

Kocoń, Józef

Sprawozdanie z działalności Towarzystwa w 2000 r. : Sprawozdanie z działalności Wydziałów Towarzystwa : Wydział VI Nauk Technicznych : Referaty i streszczenia : Reakcje syntezy jądrowej jako najważniejsze zjawisko w przyrodzie

Rocznik Towarzystwa Naukowego Warszawskiego 62 - 63, 129-136

2000

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych oraz w kolekcji mazowieckich czasopism regionalnych mazowsze.hist.pl.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

- flawonoidy o szkielecie węglowym $C_6C_3C_6$ składające się z dwu pierścieni aromatycznych połączonych trójwęglowym łańcuchem alifatycznym (antocyjanidyny, flawony, flawonole, flawany);
 - garbniki, taniny – polimery zbudowany z monomerów polifenoli.
- Polifenole w żywności są naturalnymi barwnikami, prekursorami nieenzymatycznego i enzymatycznego brunatnienia, wywołują cierpkość, tworzą barwę z metalami, są przeciwutleniaczami oraz pełnią różnorodne funkcje fizjologiczne w organizmie człowieka. Ta ostatnia funkcja bywa określana jako witamina P, bioflawonoidy. Badania ostatnich lat wykazały, że pełnią one istotną rolę w zapobieganiu chorobom sercowo-naczyniowych oraz niektórych form raka. Ich aktywność fizjologiczna związana jest z zapobieganiem reakcjom utleniania głównie w fazie wodnej. Chronią błony komórkowe, hamując aktywność 15-lipooksygenazy oraz chronią powierzchnię komórek nabłonkowych przewodu pokarmowego. Podlegają różnorodnym przemianom w organizmie człowieka. Dotychczas scharakteryzowano około 4000 polifenoli oraz wiele reakcji, w których biorą udział. Aktywność polifenoli w żywności wyrażana jest m.in. jako ogólna pojemność przeciwutleniająca w porównaniu do syntetycznego tokoferolu. Najbogatszym źródłem polifenoli w żywności są owoce kolorowe, wina czerwone i niektóre warzywa. Propagowanie spożywania owoców i warzyw związane jest z potrzebą utrzymywania potencjału oksydo-redukcyjnego na odpowiednim poziomie, zarówno na poziomie komórkowym jak i w przewodzie pokarmowym.

Józef Kocoń

REAKCJE SYNTEZY JĄDROWEJ JAKO NAJWAŻNIEJSZE ZJAWISKO W PRZYRODZIE

Synteza jądrowa dostarcza nie tylko energii dla wszystkich naturalnych zjawisk, ale również dostarcza pierwiastków chemicznych. Materia we Wszechświecie rodziła się przed 15–20 miliardów lat temu, z ogromnego żaru Wielkiego Wybuchu – najpierw powstał wodór i hel. Bardziej złożone atomy węgla, azotu, tlenu, wapnia i żelaza, z których jesteśmy zbudowani, powstały w rozżarzonych głębiach gwiazd, a pierwiastki ciężkie takie jak uran były syntetyzowane w falach uderzeniowych wybuchów supernowych.

W reakcjach syntezy jądrowej składniki życia powstawały w środowiskach wyjątkowo wrogim życiu. Gdy pierwiastki już powstały, gwałtowne

wybuchy kierowały je w przestrzeń między gwiazdami. Tam grawitacja formowała z nich nowe gwiazdy i planety, a siły elektromagnetyczne substancje chemiczne potrzebne do życia.

Materia powstała około 15–20 miliardów lat temu w gwałtownej eksplozji zwanej Wielkim Wybuchem. W ciągu małego ułamka sekundy utworzyły się nukleony (protony i neutrony), a te z kolei utworzyły jądra atomowe wodoru i helu. Rozszerzaniu się wszechświata towarzyszyły zmiany struktury materii. Węgiel, azot, tlen i inne niezbędne do życia pierwiastki były syntetyzowane we wnętrzach gwiazd, po których dzisiaj nie pozostał nawet ślad. Badanie promieniotwórczości (rozpad izotopów uranu ^{235}U i ^{238}U) pozwoliło ustalić wiek pierwiastków i na tej podstawie obliczono, że wiek naszej planety wynosi około 5×10^9 lat. Wiek naszej planety pozwolił ustalić kalendarz ewolucji geologicznej i biologicznej, w czasie której zmiany zachodzą niezauważalnie powoli. Wiek słońca, naszej gwiazdy dziennej, też jest oszacowany na około 5×10^9 lat. Jeżeli gwiazdy żyją miliardy lat to muszą mieć źródło energii tysiące, a nawet milion razy większej niż energia chemiczna. Przemiany chemiczne związane są z siłami elektrycznymi, a przemiany jądrowe z oddziaływaniami silnymi. Produkty syntezy jądrowej mają niekiedy mniejszą masę niż jej składniki. Nadmiar masy zamieniałby się w energię zgodnie ze znanym wzorem Einsteina $E = mc^2$. Energia wyzwolona podczas reakcji jądrowych jest około milion razy większa niż w reakcjach chemicznych. Gwiazda spalająca wodór, jak nasze Słońce, ma taką ilość energii, że „pracując” z taką jak dotąd mocą $4 \times 10^{26}\text{W}$ może żyć jeszcze ok. 100 miliardów lat, a więc 20 razy dłużej niż żyje dotąd, co ilustruje następujący przykład.

Energia wytworzona przy przemianie wodoru w hel stanowi 0,7 masy spoczynkowej paliwa, czyli

$$E = (7 \times 10^{-3}) Mc^2,$$

gdzie:

M – masa Słońca = $2 \times 10^{30}\text{kg}$,

$C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,

a więc

$$E = 1,3 \times 10^{45}\text{J};$$

stąd

$$t = E/N,$$

gdzie $N = 4 \times 10^{26}\text{W}$,

$t = 10^{11}$ lat (sto miliardów lat).

Gdyby Słońce wysyłało energię z taką samą mocą, ale uzyskaną ze spalania węgla to „żyłoby”

$$t = E/N = \frac{1,6 \times 10^{37} \text{ J}}{4 \times 10^{26} \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 4 \times 10^{10} \text{ s} = 1250 \text{ lat,}$$

ponieważ typowe ilości energii wytwarzanych w reakcjach chemicznych to $7,9 \times 10^{16} \text{ J}$ na kg CO_2 przy spalaniu węgla.

W Słońcu zachodzą następujące reakcje termojądrowe:



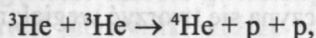
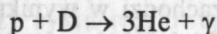
gdzie

D = deuter (${}^2\text{H}$),

p – proton,

e^+ – pozyton,

ν – neutrino.



gdzie

${}^3\text{He}$ – izotop helu,

γ – kwant promieniowania jądrowego,

${}^4\text{He}$ – jądro helu.

Ten ciąg reakcji termojądrowych jest znany jako ciąg protonowy.

Jest to główny mechanizm produkcji energii przez Słońce i inne gwiazdy bogate w wodór. W wyniku cyklu protonowego 4 protony są zużywane do utworzenia cząstki α (${}^4\text{He}$), dwóch pozytonów, dwóch neutronów, dwa fotonów γ o całkowitej energii kinetycznej około 26 MeV. Pierwsza reakcja, w której powstaje para pozyton – neutrino, jest przykładem oddziaływania słabego. Jest to oddziaływanie tego samego typu jak przemiana protonu w jądrze promieniotwórczym w neutron i parę pozyton – neutrino (rozpad β).

Aby mogła nastąpić pierwsza reakcja – dwa protony muszą się zbliżyć się do siebie na odległość ok. $5 \times 10^{-15} \text{ m}$. Zachodzi to w temperaturze

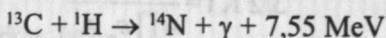
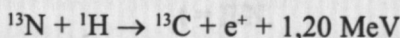
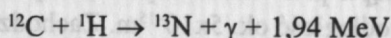
$$\frac{3}{2} KT = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

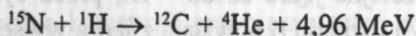
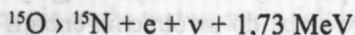
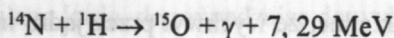
Każdy proton ma energię $3/2 KT$, więc oba mają energię $3KT$, stąd

$$T = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{3K}$$

$$T = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{C^2 (1,6 \cdot 10^{-19} C)^2}{Nm^2 (5 \cdot 10^{-15} m)^2}}{3 \cdot 1,3810^{-23} \frac{J}{K}} \approx 1,1 \cdot 10^9 K$$

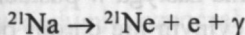
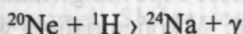
We wnętrzu gwiazdy, nawet przy temperaturze o jeden lub dwa rzędy wielkości niższej, znajdzie się wystarczająca liczba protonów o energii powyżej średniej, aby podtrzymać reakcję. We wnętrzu Słońca temperatura wynosi ok. $1,5 \times 10^7 K$ a reakcja zachodzi w wyniku tunelowania. Z chwilą, gdy gęstość helu w rdzeniu obłoku, który przerodził się w gwiazdę, staje się dostatecznie duża, zaczyna się tworzyć węgiel; mianowicie dwa jądra ${}^4\text{He}$ tworzą ${}^8\text{Be}$. Jeśli jądro to wejdzie prawie natychmiast w reakcje z kolejnym jądrem helu ${}^4\text{He}$ powstaje ${}^{12}\text{C}$. Jeśli jądro berylu ${}^8\text{Be}$ nie zdąży przyłączyć ${}^4\text{He}$ to rozpada się w czasie około $10^{-15} s$ z powrotem na dwa jądra ${}^4\text{He}$. Częstość takich pozornie nieprawdopodobnych reakcji byłaby praktycznie równa zero, gdyby nie istnienie stanu wzbudzonego jądra ${}^{12}\text{C}$ o energii około $7,65 \text{ MeV}$. Przy temperaturze $\sim 10^8 K$ istotną rolę odgrywa rezonans, przy którym przekrój czynny staje się stosunkowo duży. Przy takiej temperaturze suma energii kinetycznych trzech jąder ${}^4\text{He}$ nie może doprowadzić do powstania jąder o A większych od 4, ponieważ wszystkie jądra o $A = 5$ są zupełnie niestabilne ilości węgla w rdzeniu gwiazdy, głównym mechanizmem wytwarzania energii staje się cykl węglowy, w którym węgiel spełnia rolę katalizatora (tzn. pojawia się w pierwotnej postaci po zakończeniu cyklu) pośredniczącego syntezie jądra 4He z czterech protonów ${}^1\text{H}$; przy okazji powstaje odpowiednia ilość pozytonów, neutrin i kwantów γ . Na cykl węglowy składają się reakcje:



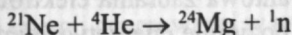


Uwzględniając energię wyzwoloną przy anihilacji obu pozytonów, całkowita energia wyzwoloną w jednym cyklu wynosi 26,72 MeV, a więc prawie tyle samo co w cyklu protonowym. W cyklu węglowym rozpady β są wyżej energetyczne, toteż neutrino opuszczające gwiazdę unoszą ze sobą ponad 5% energii wyzwolonej w całym cyklu, a w cyklu protonowym unoszą tylko 1% energii. Częstość zachodzenia cykli węglowych jest znacznie większa od częstości cykli protonowych, ponieważ żaden z etapów cyklu węglowego nie jest tak powolny, jak pierwszy etap cyklu protonowego. Słońce nie osiągnęło jeszcze cyklu węglowego. W gwiazdzie o masie dwukrotnie większej od masy Słońca, kurczenie grawitacyjne jest bardzo gwałtowne i rdzeń bardzo szybko uzyskuje temperaturę $\sim 10^8\text{K}$ potrzebną do wydajnej syntezy cyklu węglowego – gwiazda się szybko spala. W miarę wzrostu gęstości rdzenia gwiazdnego, temperatura jego rośnie i zaczynają powstawać pierwiastki cięższe od węgla. Początkowo zachodzi to przez przyłączanie kolejnych jąder ${}^4\text{He}$, tak więc z ${}^{12}\text{C}$ powstają kolejno ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$ i ${}^{24}\text{Mg}$. Przy wzroście temperatury powyżej 10^9K energia ruchu cieplnego tych jąder jest na tyle duża, by mogły przenikać przez bariery kulombowskie między nimi i tworzyć bezpośrednio rozmaite jądra o parzystych A aż do ${}^{56}\text{Fe}$. Jądra o porównywalnych, ale nieparzystych wartościach A powstają z jąder o parzystych A przenoszonych wskutek turbulencji do chłodniejszego otoczenia, w którym w dalszym ciągu zachodzi cykl protonowy.

W obszarze tym zachodzą reakcje:



Niektóre z jąder nieparzystych A wchodzą w reakcje, w których powstają neutrony, np.



Pierwiastki cięższe od żelaza nie powstają w reakcji syntezy, gdyż ich liczby A mają wartość większą od 60, przy której to wartości energia wiązania na nukleon jest największa. Po wyżej $A \sim 60$ odpychanie kulombowskie

protonów staje się tak silne, że wychwyty przez jądro innego jądra zaczyna być energetycznie nieopłacalny. W dalszym ciągu jest korzystny wychwyty neutronu, ponieważ prowadzi do uwolnienia energii wiązania neutronu w równej ~ 6 MeV. Kolejne jądra aż do ^{209}Bi , przez cykle kolejnych wychwyty neutronów i rozpadu β powstają z jądra wyjściowego ^{56}Fe .

Miejsca najistotniejsze z punktu widzenia naturalnej fuzji jądrowej znajdują się w gwiazdach mających masę większą niż Słońce. Masywne gwiazdy chociaż występują rzadziej, zmierzają ku samozagładzie znacznie krótszą drogą. Aby podtrzymać ciężar warstw zewnętrznych, temperatura i ciśnienie w rdzeniu (w jądrze) takiej gwiazdy musi być wysokie. Gwiazda o masie dwukrotnie większej od masy Słońca jest od niego 20000 razy jaśniejsza. Przechodzi przez fuzję wodoru 1000 szybciej niż Słońce, puchnie i staje się czerwonym olbrzymem już po 10 milionach lat, a nie po 100 miliardach lat jak to będzie w przypadku Słońca. Po okresie długotrwałej i jednostajnej fuzji wodoru prowadzącej do gromadzenia się helu w rdzeniu – gwiazda zmienia się radykalnie; jej jądro kurczy się i rozgrzewa, ponieważ w każdym jądrze helu uwięzione zostały cztery nukleony. Temperatura i gęstość rdzenia rosną, by utrzymać równowagę ciśnień. Gwiazda jako całość przestaje być jednorodna. Gdy rdzeń (jądro) maleje warstwy zewnętrzne puchną, zwiększając swoje rozmiary nawet 50-krotnie. Gwiazda o rozmiarach Słońca przekształca się szybko w chłodnego czerwonego olbrzyma, wtedy nastąpi kres ziemskiej cywilizacji, Ziemia wraz z tym, co na niej jest wyparuje. Lecz wewnątrz czerwonych olbrzymów zachodzą interesujące zjawiska – powstają reakcje wyżej opisane. Gwiazda o masie Słońca jest czerwonym olbrzymem tylko przez kilka milionów lat. Ostatnie stadia jej życia są niestabilne: odrzuca ona zewnętrzne warstwy, które tworzą otoczkę gazową zwaną mgławicą planetarną. W niektórych gwiazdach materia bogata w węgiel jest przez konwekcję wynoszona ku powierzchni, by następnie uciec i spowić gwiazdę smolistym kokonem utworzonym z ziarenek grafitu. W końcu paliwo wyczerpuje się i wewnętrzne jądro czerwonego olbrzyma zastyga w postaci białego karła. Przed całkowitym kolapsem grawitacyjnym nie chroni białego karła kinetyczne ciśnienie gazu, w jego wnętrzu węgiel i tlen są prawie krystaliczne. Gwiazda podtrzymywana jest dzięki odpychaniu kwantowemu swobodnych elektronów. Mechanika kwantowa zabrania elektronom znajdować się jednocześnie na najniższym poziomie energetycznym. Ograniczenie to zmusza większość tych cząstek do zajmowania wyższych stanów energetycznych. Elektrony te są źródłem ciśnienia podtrzymującego białego karła, w którym nie jest już generowana energia jądrowa, ani nie powstają żadne nowe pierwiastki. Czasami zbyt rozrzutna jakaś gwiazda dostarcza gazu,

który spływa na białego karła, doprowadzając do wybuchu supernowej typu I i do nagłego zsyntetyzowania nowych pierwiastków. Gwiazda z rozbudowanym rdzeniem nie może wytwarzać – jak już wspomniano – energii na drodze fuzji, wyświeca niezwykle ilości energii i dąży do katastrofy. Tak więc gwiazdna katastrofa przybiera postać wybuchu supernowej. W ciągu sekundy jądro zapada się tworząc gwiazdę neutronową lub czarną dziurę. Materia w jądrze gwiazdy osiąga maksymalnie dopuszczalną gęstość – jądra atomowego, Przez wnętrze gwiazdy przechodzi z prędkością większą niż prędkość dźwięku fala ogromnego ciśnienia – dźwiękowy grzmot. Gdy ta fala osiągnie powierzchnię gwiazda nagle jaśnieje i eksploduje. Przez kilka tygodni powierzchnia jej świeci jak miliardy Słońce i rozszerza się z prędkością wielu tysięcy km na sekundę. Ilość uwalnianej energii jest porównywalna z energią wysyłąną przez Słońce w czasie całego „życia”. Takie eksplozje supernowych typu II odgrywają szczególną rolę w tworzeniu pierwiastków chemicznych; za oddalającą się falą uderzeniową syntetyzowane są nowe pierwiastki. Bardzo wysoka temperatura sprzyja reakcjom jądrowym, które nie mogą zachodzić w gwiazdach palących się spokojnie, Niektóre z produktów jądrowych są radioaktywne, lecz mogą też powstawać stabilne pierwiastki cięższe od żelaza. Neutrony bombardując jądra żelaza przekuwając je w złoto, które przemienia się w ołów, a z bombardowanego ołowiu powstają wszystkie pierwiastki, włącznie z uranem. Pierwiastki znajdujące się w tablicy Mendelejewa za żelazem występują w kosmosie rzadko – jeden atom uranu przypada na 100 miliardów atomów wodoru.

W przedstawionym omówieniu zarysu ewolucji gwiazdy założono, że jej początkowy skład był identyczny ze składem pierwotnej materii powstałej po Wielkim Wybuchu, a więc że składa się z 90% wodoru, 10% helu. Znamy wiele przykładów takich gwiazd pierwszej generacji. Znamy także wiele przykładów gwiazd drugiej czy trzeciej generacji, które powstały z pozostałości po wybuchu supernowej, Słońce jest właśnie jedną z takich gwiazd. W gwiazdach drugiej czy trzeciej generacji mogą występować pierwiastki ciężkie, nawet wtedy kiedy nie rozpoczął się cykl węglowy.

Skład chemiczny Ziemi jest naturalnym produktem ubocznym procesu generacji energii w gwiazdach i następujących po sobie aktach urodzin i śmierci gwiazd w Galaktyce. Jesteśmy zbudowani z tego, co powstało w gwiazdach i żyjemy dzięki energii generowanej w naszej gwiazdzie dziennej – znaczy Słońcu. Masa Słońca zapewnia mu długowieczny żywot, pali się już prawie 5 miliardów lat, jest to czas wystarczający aby na tle ewolucji geologicznej, powstała ewolucja biologiczna i wyłoniła najbardziej złożone zjawisko w przyrodzie – życie, w tym intelektualne. Życie intelektualne

(Homo sapiens sapiens) powstało dopiero po 15 miliardach lat, licząc od początku Wielkiego Wybuchu.

Rys historyczny Wszechświata przedstawia jego ewolucję od Wielkiego Wybuchu do chwili obecnej. W czasie 10^{-43} s była epoka kwantowej grawitacji, 10^{-36} s prawdopodobnie epoka inflacji, w czasie 10^{-5} s powstawały nukleony: protony i neutrony z kwarków, synteza jądrowa powstawała trzy minuty, a po upływie 300 lat tworzyły się pierwsze atomy. Po upływie jednego miliarda lat pojawiły się pierwsze gwiazdy, galaktyki i kwazary; 10–15 miliardów lat pojawiły się obecnie obserwowane galaktyki. Wszechświat w dalszym ciągu się rozszerza i nie wiemy jaki będzie w przyszłości jego los, wszystko zależy od jego rzeczywistej gęstości. Jeśli jego gęstość jest większa od pewnej gęstości umownej, to grawitacja powstrzyma ekspansję i Wszechświat zacznie się kurczyć doprowadzając do nowego Wielkiego Wybuchu, jeśli jego gęstość jest mniejsza będzie się stale rozszerzać, a jeśli gęstości równe – będzie Wszechświatem stacjonarnym. Być może, że istnieje multiwszechświat, w którym ciągle rodzą się nowe wszechświaty, o innych niż w naszym fundamentalnych prawach przyrody. Na te pytania być może odpowiedzią fizycy w XXI wieku.