

Szymon Detlaf
Tomasz "Scypion" Nowak
Mateusz Jackiewicz
Kamil Bela

NIEPODZIELNE POWSTANIE PIERWIASTKA CHEMICZNEGO I CZŁOWIECZEGO

Streszczenie: Pierwiastki chemiczne to temat bliższy, niż może nam się wydawać. Wszystko w naszym otoczeniu złożone jest właśnie z nich. Jak wszyscy wiemy musiały też one jakoś powstać, gdyż nic nie powstaje bez przyczyny. Zagadnienie te będzie celem tego artykułu. Przedstawiona zostanie historia pierwiastków od pierwszych chwil wszechświata do późniejszych etapów ewolucji gwiazd. Do tego poruszony zostanie wątek początków ludzkich rozważań nad tym tematem.

Słowa kluczowe: nukleosynteza kosmiczna, pierwiastki, gwiazdy, wszechświat

1. Początek historii – Atomos

Od zawsze ludzkość chciała nazywać wszystko co nas otacza. Wiele cywilizacji, kultur tworzyło wiele znaczeń i określeń, które używamy po dziś dzień. Przykładem takiego słowa jest greckie „atomos” – po polsku osoba lub atom. Słowo te składa się z dwóch innych wyrazów; „a” i „temno”. Pierwszy element oznacza przeciwność lub zaprzeczenie. Drugi natomiast oznacza dzielenie. Przykład ten pokazuje jak ważne dla Greków było nazwanie człowieka i jego składu. Jak widać już od dawna wiedzieli, że człowiek jest nierozzerwalny, zbudowany z czegoś. Przykładem ich zainteresowania może być ich literatura. Chociaż niewiele tekstów przeżyło do obecnych czasów to nadal mamy możliwość poznania ich rozpatrzeń wobec koneksji człowieka z światem. Wybitny filozof Platon pisał wielokrotnie o szacunku jakim trzeba darzyć matkę naturę, od której nasze bytowanie się poczęło. Również w ich mitologii jeden z tytanów – Prometeusz - ulepił ludzi z gliny oraz wody, a następnie podarował ogień.

Na myśl o tym wszystkim powstaje pewno pytanie. Jak te pierwiastki wewnątrz i wokoło nas powstały? Obecna wiedza naukowa pozwala odpowiedzieć na tą zagadkę, która nurtowała wielkich myślicieli ludzkości.

2. Jak „odkryto” pierwiastki? – Filozofia przyrodnicza

Tutaj znowu wracamy do słowa „atomos” i filozofów greckich. W tzw. okresie przedsokratejskim temat składników życia znajdował się w kategorii filozofii przyrody, rozwijającej idee podstawowych zasad, elementów czy żywiołów. Filozofowie szukali podstawowej zasady (Arché [1]) leżącej u podstaw całej rzeczywistości. Oczywiście wśród myślicieli nie było podanej jednolitej reguły. Tales z Miletu doszukiwał się jej w wodzie, Anaksymander w bezkresie (apeiron), Anaksymenes w powietrzu, a Heraklit w ogniu. Później wyłoniła się grupa tzw. pluralistów, którzy postanowili połączyć tamtejsze koncepcje, albowiem uważali, że wszystkie zjawiska mogą być istotne. Najbardziej wpływowa była koncepcja Empedoklesa, twórcy koncepcji czterech żywiołów: wody, ognia, powietrza i ziemi, łącząca myśli wcześniej wymienionych filozofów. Elementy podane przez Empedoklesa były dla niego "pierwotne i jakościowo niezmiennie" i łączyły się ze sobą w sposób mechaniczny, tworząc różnorodność rzeczy we Wszechświecie. Odmienną koncepcję wysunęli atomiści: Leucyp i Demokryt, którzy wskazywali, że wszystkie rzeczy materialne stworzone są z małych, niepodzielnych cząstek (atomów).

Jak widać myśli było wiele, lecz do czasów nowożytnych, czyli okresu prawdziwych badań nad pierwiastkami, dotarły jeszcze inne koncepcje łączące Empedoklesa z różnymi nurtami. Autorami najpopularniejszych hipotez okazali się Arystoteles i Platon, którzy po kolei połączyli myśli swojego poprzednika z koncepcjami Anaksymandera oraz atomistów.

Na finalny kształt tej filozofii wraz z rozwojem alchemii mieli wpływ myśliciele arabscy. W poszukiwaniu substancji, z których mogliby wytworzyć złoto lub kamień filozoficzny, postanowili dodać do koncepcji Arystotelesa inne elementy. Szczególnym punktem zainteresowania okazała się siarka i rtęć. Podane pierwiastki postanowili określić jako "zasady bezpośrednie", należące spójnie do idei żywiołów greckiego myśliciela. Również uznali iż właśnie z nich są złożone wszystkie metale. Po oparciu tej teorii zaczęto próbować wytwarzać złoto na przykład za pomocą ołowiu. Znanymi alchemikami próbującymi dopiąć w praktyce swą teorię są Al-Razi (znany w Europie jako Rhazes), oraz Awicenna. W XVI wieku Paracelsus dodał do zasad alchemików inny pierwiastek - sól. Sformułował tak wpływową koncepcję trójzasadową, która rozpoczęła prawdziwe prace nad tym zagadnieniem. W finalnej transformacji okazała się bardzo ważna XVII wieczna filozofia empiryzmu i raczkujących badań z nią związanych. Dopiero to pozwoliło na odejście od alchemii i powiązanych żywiołów i zaczęto proces tworzenia pierwszych, współczesnych idei pierwiastka chemicznego.

Ten cały proces burzliwych myśli i koncepcji pozwolił na dotarcie do współczesnej wiedzy chemicznej, która pozwala nam na odkrycie i badanie nowych informacji dotyczących powstania Wszechświata. Chociaż obserwacje naszych przodków nie były tak dokładne jak obecne, to pewne podstawy i reguły przez nich wymyślane niewiele się różnią od ówczesnych założeń. [2]

3. Co jajko i ludzie mają wspólnego? - Krótko o białkach

Niektóre wyrazy mają inne znaczenie w języku potocznym niż w języku naukowym.

Takim przykładem jest białko, w mowie potocznej, oznacza ono część białka. W języku naukowym, białka to drugi po wodzie, najważniejszy budulec organizmu człowieka. Stanowi on około 20% ludzkiego organizmu. Są one zbudowane z węgla (C), tlenu (O), wodoru (H), azotu (N), siarki (S), fosforu (P) oraz niekiedy z miedzi (Cu), żelaza (Fe), cynku (Zn), magnezu (Mg) oraz Jodu (I). Dla białek nie liczy się tylko z czego są zbudowane, ale przede wszystkim w jaki sposób.

Białka są związkami wielkocząsteczkowymi zbudowanymi z reszt aminokwasowych. Połączone one są wiązaniami peptydowymi. Mimo, że kwasów aminokwasowych jest około 20, to ich różnorodność jest ogromna. Białkami umownie nazywamy związki, których łańcuch zawiera więcej niż 100 reszt aminokwasowych, a związki o krótszych łańcuchach są zaliczane do polipeptydów.

Białka pełnią nie tylko rolę budulca naszego organizmu, są również odpowiedzialne za: przenoszenie tlenu, regulację stężenia glukozy we krwi oraz obronę organizmu przed zagrożeniami zewnętrznymi i wewnętrznymi. Białka również pełnią rolę katalizatora reakcji chemicznych potrzebnych do życia oraz za regulację procesów fizjologii. Dzięki białkom możemy istnieć, ale również prawidłowo funkcjonować. [3-4]

4. To jak to było? - Czym jest nukleosynteza i dlaczego jest pierwotna?

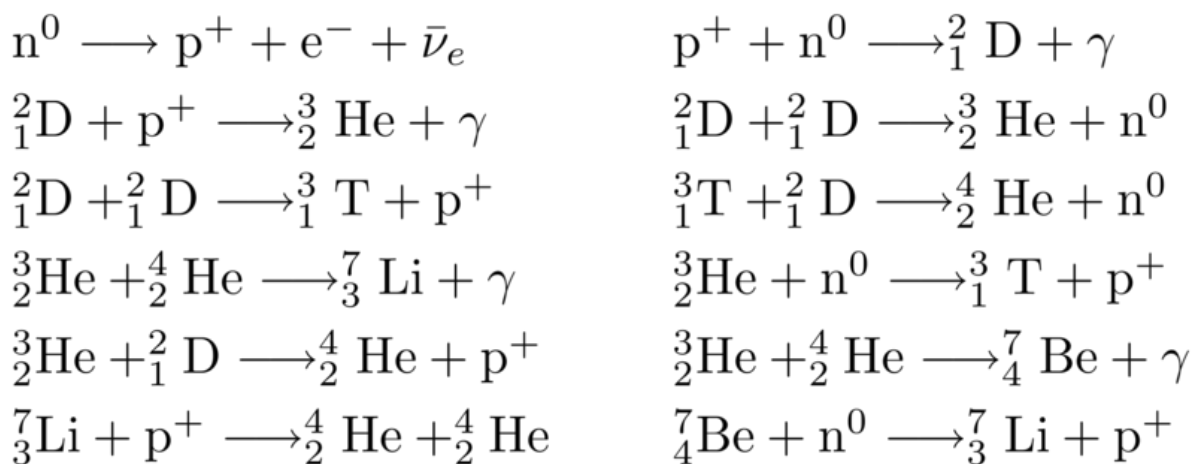
Nukleosynteza z ang. Nucleosynthesis - słowo to zostało użyte po raz pierwszy w 1957 r.. Powstało z połączenia przedrostka nucleo – oznaczającego jądro/jądrowy i synthesis – synteza. [5]

Jest to proces, w którym powstają nowe jądra atomowe w wyniku łączenia się nukleonów (protonów i neutronów) lub istniejących jąder atomowych i nukleonów. [6-7]

Pierwotna Nukleosynteza¹ to pierwsza w historii Wszechświata nukleosynteza, która miała miejsce 1 s p.W.W.² i trwała, aż do 20 min p.W.W.. Podczas niej powstały wodór (¹H), deuter (²D) hel-3 (³He), hel-4 (⁴He) oraz małe ilości berylu (⁷Be) i litu (⁷Li). [8-9]

1 z ang. Primordial Nucleosynthesis lub Big Bang Nucleosynthesis w skrócie BBN

2 p.W.W. - po Wielkim Wybuchu



Rys. 1. Równania reakcji przedstawiające przebieg pierwotnej nukleosyntezy

Źródło: <https://scholar.harvard.edu/michaelfoley/primordial-nucleosynthesis> (dostęp: 10.12.2023r.)

Wszystko zaczyna się od neutronu. Rozkłada się on, na proton i elektron. Te cząstki, które nazywamy elementarnymi, budują wszystkie atomy. Podczas pierwotnej nukleosyntezy powstały pierwiastki o niskiej liczbie masowej i atomowej.

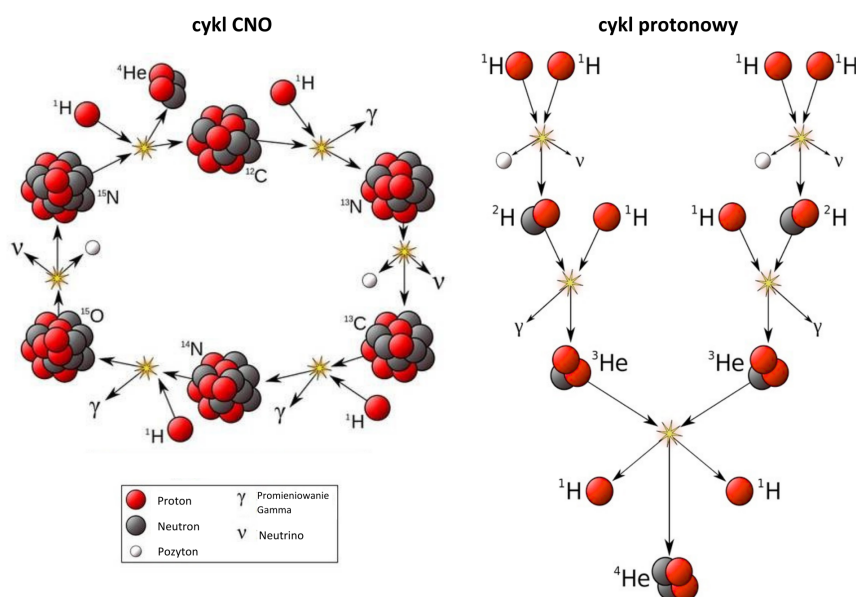
5. Same wśród „niczego” - Pierwsze gwiazdy^s

Pierwsze gwiazdy powstały ok. 100 milionów lat p.W.W.. Wcześniej ten proces nie mógł zajść, ponieważ gaz złożony z wodoru i helu nie był wystarczająco zimny, aby siły grawitacji mogły przewyciężyć siły ciśnienia termicznego i utworzyć gwiazdy. Gwiazdy powstałe z wodoru i helu, różniły się od gwiazd, które znamy teraz. Spowodowane to było wyższym ciśnieniem termicznym, przez co cząstki gazu miały wyższą masę zanim zapadły się w gwiazdę. Był to jedyny okres w historii Wszechświata, który w przeważającej mierze sprzyjał on powstawaniu gwiazd masywniejszych niż Słońce. [11-13]

Grawitacyjne zapadanie się gazu w gwiazdę uwalnia ogromną ilość energii. Następnie podgrzewa ona gaz do momentu, w którym jest wystarczająco gorący, aby ciśnienie gazu mogło przeciwdziałać grawitacji, a gwiazda mogła osiągnąć równowagę w temperaturach osiąganych w rdzeniach gwiazd (miliony kelwinów). Kiedy powstawały pierwsze gwiazdy, jedynie wodór i hel były dostępnymi paliwem, zatem gwiazda kurczyła się i nagrzewała do wystarczająco wysokiej temperatury, aby hel mógł zostać szybko przekształcony w węgiel. W momencie kiedy dostępny jest węgiel, działa on jako katalizator fuzji wodoru do helu w serii reakcji znanych jako cykl CNO (cykl węglowo-azotowo-tlenowy). Ten cykl zapewnia wystarczającą ilość energii, aby utrzymać proces, do tego azot i tlen są wytwarzane jako produkty pośrednie.

Przemiana czterech protonów (cztery jądra wodoru) w dwa protony i dwa neutrony w jądrze helu (cykl protonowy) zwiększa stosunek neutronów do protonów bardziej niż jakikolwiek inny proces w nukleosyntezie gwiazdnej. Jest to niezbędny krok przed wytworzeniem cięższych jąder, ponieważ mają one stosunek neutronów do protonów ≥ 1 . Odpychanie elektromagnetyczne między protonami powoduje, że fuzja wodoru (nieformalnie nazywana spalaniem wodoru) przebiega powoli, co prowadzi do długiego czasu życia gwiazd. [14]

^s Niektóre rozdziały zostały opracowane na podstawie artykułu „Populating the periodic table: Nucleosynthesis of the elements” z czasopisma naukowego Science [10], zostały one oznaczone literą s.



Rys. 2. Graficzne przedstawienie cyklu CNO i cyklu protonowego.

Źródło: cykl CNO (<https://physicsfeed.com/post/cno-cycle/>), cykl protonowy

(<https://www.sciencelearn.org.nz/images/244-proton-proton-chain-reaction>), dostęp 03.01.2023r.,

oprac. i tłum. Szymon Detlaf

Fuzja wodoru w hel w jądrze gwiazdy trwa aż do wyczerpania wodoru w jądrze. Gwiazdy o większej masie wypalają wodór w swoich rdzeniach szybciej niż gwiazdy o mniejszej masie, które mają większe rezerwy paliwa. Natomiast są one niewystarczające, aby zrekompensować wyższe tempo reakcji. Sprawia to, że gwiazdy o dużej masie świecą jaśniej i żyją krócej niż gwiazdy o małej masie.

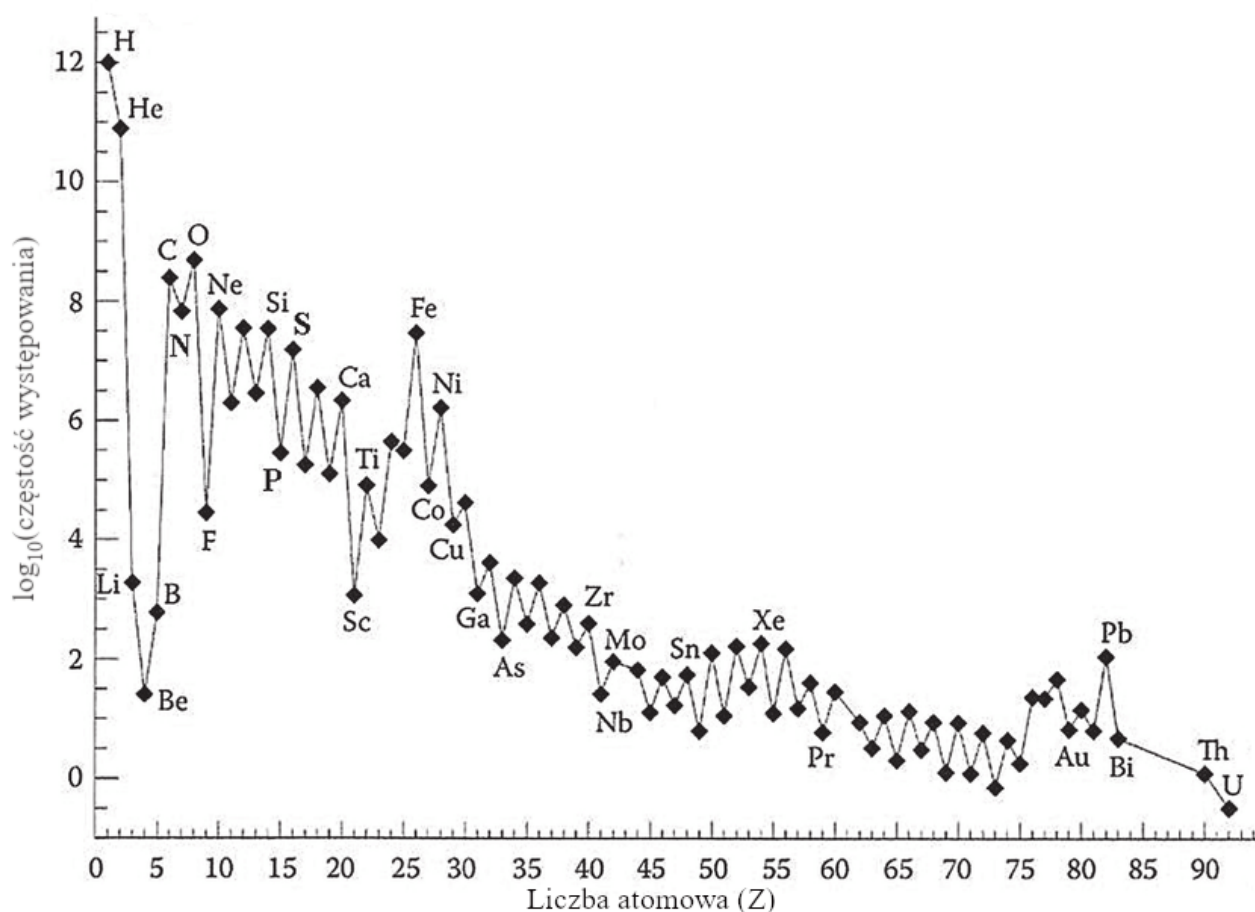
Pierwsze gwiazdy o największej masie wyczerpują się zatem jako pierwsze. Wyczerpanie paliwa oznacza, że jądro nie jest już w stanie utrzymać własnego ciężaru. Kurczy się i nagrzewa, aż do momentu, gdy spalanie helu zapewnia wystarczającą moc, aby ponownie utrzymać rdzeń. Proces ten powtarza się wielokrotnie, przy czym każdy skurcz zatrzymuje się, gdy produkty poprzedniego cyklu zaczynają spalać się w jądrze. Po spalaniu wodoru fuzja przebiega w wielu warstwach, a różne pierwiastki spalają się w szeregu powłok wokół rdzenia.

Najbardziej masywne gwiazdy osiągają najwyższe temperatury jądra, ponieważ mogą uwolnić najwięcej energii potencjalnej grawitacji. Gwiazdy o masie większej niż $\sim 8 M_{\odot}$ rozgrzewają się na tyle, by wytworzyć pierwiastki piku żelaza⁴ takie jak żelazo i nikiel.

Wszystkie jądra pierwiastków cięższych od berylu (Be), aż do żelaza (Fe) powstały głównie w wyniku reakcji jądrowych w gwiazdach, czemu towarzyszyło wydzielanie dużej ilości energii. Produktem końcowym tych przemian było żelazo, którego jądro ma największą energię wiązania przypadającą na jeden nukleon. Dlatego jąder żelaza jest stosunkowo dużo w porównaniu z jądrami pierwiastków o większych liczbach atomowych i w porównaniu z jądrami pierwiastków o trochę mniejszych liczbach atomowych. [15]

3 M_{\odot} - masa słońca

4 z ang. iron peak

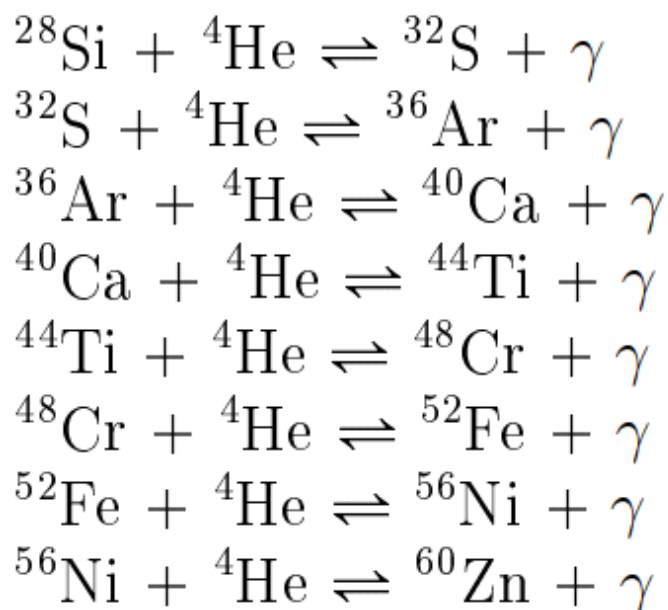


Rys. 3. Wykres częstości występowania pierwiastków, wyraźnie jest widoczny **pik żelaza**.

Źródło: https://www.researchgate.net/figure/Plot-showing-the-average-cosmic-abundance-of-elements-as-a-function-of-their-atomic_fig2_338197362 (dostęp 03.01.2023r.)

Spalania przebiegają w następującej kolejności: Wodór przemienia się w hel, który w temperaturze $\sim 10^8$ K przemienia się w węgiel i tlen. Kiedy zapala się węgiel, reakcje jądrowe stają się bardziej zróżnicowane, ponieważ $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ nie łączy się tylko dając ^{23}Mg , ale również $^{23}\text{Na} + ^1\text{H}$, $^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}$ i inne powiązane jądra. Podczas kolejnego etapu niektóre jądra neonu są rozrywane przez energetyczne fotony i reagują z innymi jądrami ^{20}Ne , tworząc ^{24}Mg . Tlen pozostały po spalaniu helu jest obojętny w temperaturach spalania węgla i neonu, ale w temperaturze 10^9 K również się zapala. Podobnie jak w przypadku spalania węgla, fuzja dwóch jąder tlenu może prowadzić do powstania kilku różnych produktów pochodnych, a w wyniku reakcji ubocznych powstaje jeszcze więcej pierwiastków. Po wyczerpaniu tlenu, jądro kurczy się i rozgrzewa do temperatury $3 \cdot 10^9$ K, w którym to momencie rozpoczyna się ostatni zestaw reakcji jądrowych podczas życia gwiazdy. Odpychanie elektromagnetyczne między dwoma jądrami krzemu jest tak duże, że nawet w temperaturze $3 \cdot 10^9$ K nie mogą one zbliżyć się do siebie na tyle, by się połączyć. Zamiast tego wysokoenergetyczne fotony odrywają cząstki od istniejących jąder, a następnie te lżejsze cząstki łączą się z krzemem, siarką i innymi jądrami, aby doprowadzić do pików żelaza. Częstość występowania jąder powstających podczas spalania krzemu zależy od ich energii wiązania i stosunku neutronów do protonów. ^{56}Fe jest najściślej związanym z jądrem produkowanym w tym procesie, więc jego produkcja jest preferowana, ale nie tylko. Każdy etap tego spalania trwa krócej niż poprzedni, ponieważ mniej energii jest uwalniane na reakcję, a więcej energii jest przenoszona z jądra przez neutrino. Szybkość reakcji musi być wyższa, aby utrzymać gwiazdę, szybciej zużywając dostępne paliwo. W przypadku gwiazdy o masie $15M_{\odot}$, spalanie wodoru w jądrze trwa miliony lat, spalanie węgla trwa kilka tysięcy lat, spalanie tlenu trwa kilka tygodni, a spalanie krzemu trwa kilka dni. Pod koniec swojego życia gwiazda ma rdzeń o masie $1,4M_{\odot}$ który spala krzem, otoczony serią

powłok, w których spalanie wodoru, helu, węgla, neonu i tlenu migocze i gaśnie. Każda powłoka (z wyjątkiem neonu) zawiera $\geq 0,5M_{\odot}$ materiału, który mógłby przyczynić się do wzbogacenia Wszechświata, gdyby został wyrzucony z gwiazdy. To, czy tak się stanie, zależy od sposobu, w jaki gwiazda umiera



Rys. 3. Graficzne przedstawienie reakcji spalania krzemu.
Oprac. Szymon Detlaf

6. Duże wybuchy – Wybuchy masywnych gwiazd^s

Wraz z końcem spalania krzemu w jądrze, gwiazda zbliża się do żelaznej katastrofy⁵. Rdzeń, który nie jest już w stanie wytworzyć wystarczającej ilości energii termojądrowej, aby się utrzymać, początkowo kurczy się powoli, ale dwa procesy szybko usuwają z niego energię. Po pierwsze, niektóre jądra żelaza absorbują wysokoenergetyczne fotony i rozpadają się. Po drugie, gdy temperatura osiągnie 10^9 K, protony i elektrony mają wystarczająco dużo energii, aby wytworzyć neutrony. To, co zaczyna się jako powolne kurczenie się, staje się swobodnym spadkiem, gdy ciśnienie gazu spada znacznie poniżej wartości potrzebnej do podtrzymania rdzenia. Gdy gęstość zapadającego materiału wzrasta, silna siła jądrowa odpycha ten materiał i uruchamia rozszerzającą się falę uderzeniową. W przypadku co najmniej kilku masywnych gwiazd, fala uderzeniowa, w połączeniu z dodatkowymi efektami fizycznymi, które są obecnie przedmiotem dyskusji, powoduje, że znaczna część materiału poza pierwotnym żelaznym rdzeniem zostaje wyrzucona w eksplozji neutronów, fotonów i energii, którą obserwujemy jako supernową typu II.[16-18]

T supernowe wzbogacają Wszechświat na trzy sposoby. Po pierwsze, wyrzucają produkty nukleosyntezy nagromadzone przez cały okres życia gwiazdy. Na przykład większość węgla, tlenu i magnezu powstała przed zapadnięciem się rdzenia, a eksplozja po prostu rozproszcza te pierwiastki w przestrzeni kosmicznej. Po drugie, ekstremalne temperatury i gęstości spowodowane przez falę uderzeniową napędzają dodatkową nukleosyntezę. W szczególności, żelazo wyrzucane przez supernowe typu II nie pochodzi z jądra, ale z wybuchowego spalania materiału w krzemowej powłoce supernowej. Wreszcie, dodatkowe wstrząsy, które powstają, gdy wyrzucony materiał wbija

się w otaczający gaz, przyspieszają niektóre cząstki do prędkości bliskiej prędkości światła, tworząc promienie kosmiczne. [19]

7. Kosmiczna spalacja – kruche jądro atomowe

Spalacja⁶ – kruszenia jądra atomowego, reakcja jądrowa, w wyniku której z jądra atomowego zostaje wyrzuconych wiele nukleonów lub lekkich jąder; zachodzi w rezultacie bombardowania jądra cząstkami (np. neutronami) lub innymi jądrami o dużej energii. [20]

Beryl (Be), bor (B) i trochę litu (Li) powstały w wyniku spalacji wywołanej promieniowaniem kosmicznym⁷. Jest ono wystarczająco energetyczne, aby rozbić cięższe jądra, wytwarzając nowe pierwiastki poprzez rozszczepienie. Przez co jest ono odpowiedzialne za dużą część litu, berylu i boru występujących we wszechświecie. Rozszczepienie promieni kosmicznych wytwarza również pierwiastki takie jak węgiel i tlen, ale obfitość tych pierwiastków jest zdominowana przez inne sposoby produkcji.

8. Razem raźniej – łączenie gwiazd neutronowych*

Supernowe typu II są spektakularnymi źródłami metali, ale prawdopodobnie nie wytwarzają wszystkich pierwiastków. Zdecydowana większość pierwiastków cięższych od niklu powstaje w wyniku różnych form wychwyty neutronów. Ponieważ neutrony nie mają ładunku elektrycznego, nie są odpychane przez jądra, a zatem cięższe pierwiastki mogą być wytwarzane w znacznie niższych temperaturach niż podczas spalania krzemu. Po pierwotnej nukleosyntezie wychwyt neutronów nie jest dominującym procesem, ponieważ wystarczający strumień wolnych neutronów występuje tylko w określonych sytuacjach. Co najmniej 100 wychwytów neutronów jest wymaganych do przejścia przez układ okresowy od piku żelaza do pierwiastków ziem rzadkich. Produkcja neutronów w materiale wyrzuconym przez supernową może prowadzić do procesu wychwyty neutronów. Jednak większość neutronów jest uwięziona w zapadającym się jądrze i nie bierze udziału w nukleosyntezie w supernowej. Nie jest więc jasne, czy supernowe przyczyniają się do powstania mierzalnych ilości pierwiastków poza szczytem żelaza.

Neutrony w gwieździe neutronowej mogą ostatecznie uczestniczyć w nukleosyntezie. Siły podczas łączenia się gwiazd neutronowych w układ podwójny lub podczas łączenia gwiazd neutronowych z czarnymi dziurami mogą rozerwać gwiazdę neutronową, prowadząc do wielu wychwytów neutronów w ciągu kilku sekund i wyrzucenia przetworzonego materiału. [21-22] Ta seria szybkich wychwytów neutronów, zwana *procesem r* (rapid neutron captures process), wytwarza jądra o masach atomowych powyżej 250, ale pierwiastki poza plutonem mają tak krótkie okresy półtrwania, że żaden z nich nie jest obecnie obecny w Układzie Słonecznym. [23]

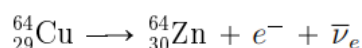
6 z ang. Spallation

7 z ang. Cosmic Ray fission (spallation) / x-process

Przykładowy ciąg reakcji *procesu – r*



czyli



Rys. 5. Graficzne przedstawienie przykładowego ciągu reakcji *procesu-r*.
Oprac. Szymon Detlaf

Fuzje gwiazd neutronowych są rzadkimi wydarzeniami. W rezultacie częstość występowania pierwiastków powstałych w *procesie r* w Układzie Słonecznym wynosi jedną milionową tego co węgla i tlenu.

9. Czas powiedzieć do widzenia – umieranie gwiazd o niskiej masie⁸

Gwiazdy mniej masywne niż $\sim 8M_{\odot}$ nie doświadczają żelaznej katastrofy. Zanim rdzenie gwiazd o niskiej masie rozgrzeją się na tyle, aby wytworzyć piku żelaza, ich kurczenie się jest zatrzymywane przez ciśnienie zdegenerowanych elektronów⁸. W takich gwiazdach nukleosynteza ustaje po wyprodukowaniu węgla i tlenu, a czasem magnezu i neonu. Pierwiastki te są ściśle związane grawitacyjnie w białego karła. Gwiazdy o niskiej masie wyrzucają duże ilości helu, węgla i azotu powstałych w wyniku spalania powłok.

Gwiazdy o niskiej masie nie mogą spalać tlenu ani krzemu, a zatem nie przyczyniają się do powstawania pierwiastków z piku żelaza. Wytwarzają one jednak znaczną część cięższych pierwiastków we Wszechświecie. Jest to możliwe, ponieważ temperatury muszą być wystarczająco wysokie tylko dla reakcji jądrowych, które uwalniają neutrony, a nie dla jąder z dużą liczbą naładowanych cząstek. Uwolnione neutrony łatwo łączą się z żelazem i innymi jądrami powstałymi w poprzednich generacjach gwiazd. Reakcje te nie dostarczają wystarczającej ilości energii do podtrzymania gwiazdy; przebiegają powoli jako produkt uboczny ewolucji gwiazd.

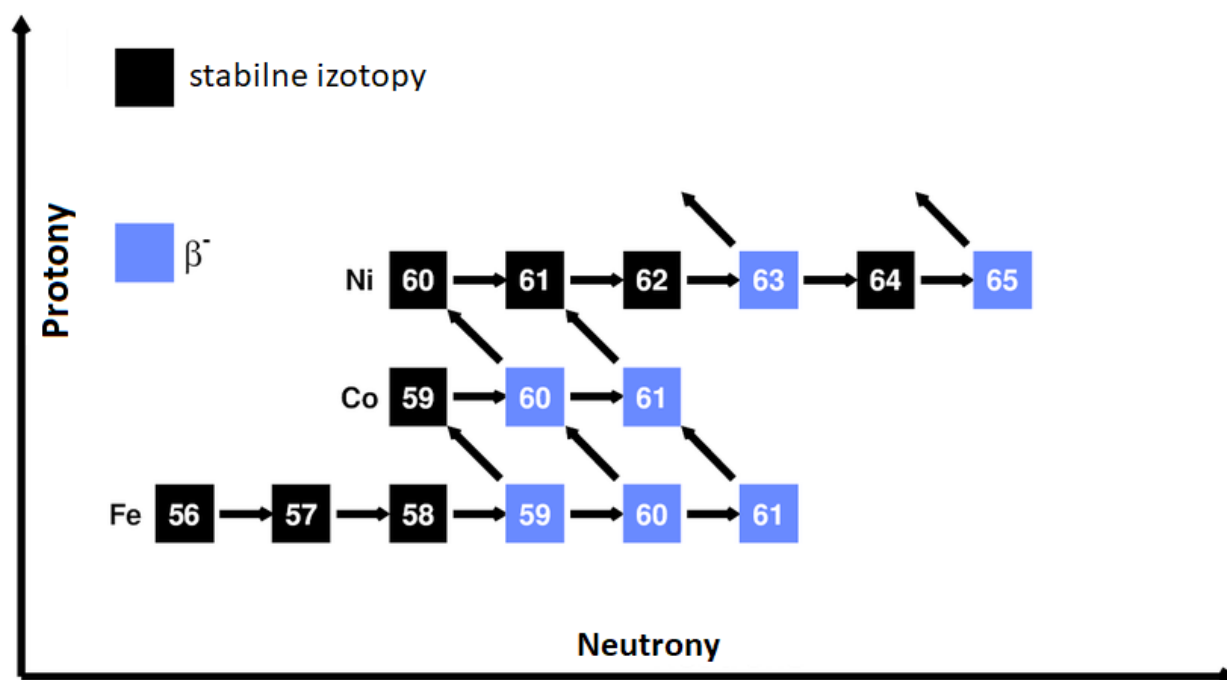
Źródłem neutronów w umierających gwiazdach o niskiej masie są jądra atomowe, a nie zderzenia proton-elektron. Aby powstał nadmiar neutronów, a następnie wolny neutron, musi zajść określona seria reakcji jądrowych. Umierające gwiazdy o niskiej masie wytwarzają wolne neutrony w swoich spalających hel powłokach z powodu specyficznych okoliczności. Zewnętrzne części gwiazdy doświadczają konwekcji, przenosząc świeżą materię z niespalonej, bogatej w wodór otoczki do spalającej hel powłoki. Obecność ${}^4\text{He}$, protonów i nowo wyprodukowanego ${}^{12}\text{C}$ w temperaturach spalania helu prowadzi do reakcji, które przekształcają ${}^{12}\text{C}$ w ${}^{16}\text{O}$, jednocześnie uwalniając neutron. Reakcje uwalniania neutronów mogą zachodzić również w gwiazdach o większej masie, ale wolniejsza ewolucja gwiazd o małej masie oznacza, że dostępnych jest znacznie więcej neutronów

⁸ z ang. electron degeneracy pressure

na jedno jądro. Konwekcja powoduje również, że gwiazdy o niskiej masie uwalniają pewną ilość azotu i litu, ponieważ konwekcja przenosi te jądra na chłodniejszą powierzchnię, zapobiegając spalaniu tych pierwiastków w inne jądra.

Fuzje gwiazd neutronowych i umierające gwiazdy o niskiej masie nie wytwarzają ciężkich pierwiastków w równych proporcjach. Większość ksenonu powstaje w wyniku fuzji gwiazd neutronowych, podczas gdy ołów pochodzi głównie z gwiazd o niskiej masie.

W *procesie r* wychwyt neutronów przebiega szybciej niż rozpad promieniotwórczy. Jądra przestają wychwytywać dodatkowe neutrony dopiero wtedy, gdy ich stosunek protonów do neutronów jest tak duży, że jądro nie byłoby w stanie się utrzymać i wyemitowałoby proton lub neutron. [24] Najliczniejszymi jądrami wytwarzanymi w *procesie r* są zatem te z niewielkimi prędkościami reakcji wychwytu neutronów, które są blisko maksymalnego stosunku protonów do neutronów, przez co rozpadu. W umierającej gwiazdzie o małej masie, jądro początkowe [25] (od niego zaczynają się reakcje jądrowe) zazwyczaj wychwytyuje neutron co kilka tygodni lub miesięcy. Jeśli wychwyt neutronu spowoduje powstanie niestabilnego jądra, radioaktywny rozpad β^- neutronu na proton następuje zwykle przed kolejnym wychwytem neutronu. Ten proces powolnego wychwytu neutronów (*proces s*, slow neutron captures process) wytwarza zatem jądra dążące do rozpadu β^- , preferując prawie stabilne jądra o małej szybkości reakcji wychwytu neutronów. Proces *r* i proces *s* faworyzują zatem jądra o bardzo różnych stosunkach protonów do neutronów. [26-28]



Rys. 6. Graficzne przedstawienie przykładowego ciągu reakcji *procesu-s*.

Źródło: https://www.researchgate.net/figure/The-s-process-path-between-Fe-and-Co-The-neutron-densities-during-the-s-process-have-to_fig1_257409985 (dostęp 04.01.2024r.)

Pierwiastki aktywności nie mają udziału w procesie *s*. Dzieje się tak dlatego, że stopniowe tworzenie coraz cięższych jąder jest zatrzymywane przez prawie stabilne jądro ^{210}Bi (Bizmut), które rozpada się uwalniając jądro helu, a nie elektron. Chociaż kolejne wychwyty neutronów mogą doprowadzić do powstania ^{210}Bi , proces *s* nigdy nie osiąga poziomu toru i uranu.

e względu na dłuższy czas życia gwiazd o niższej masie, ich produkty nukleosyntezy są uwalniane tylko wtedy, gdy gwiazdy o masie nieco poniżej masy supernowej typu II osiągną koniec swojego

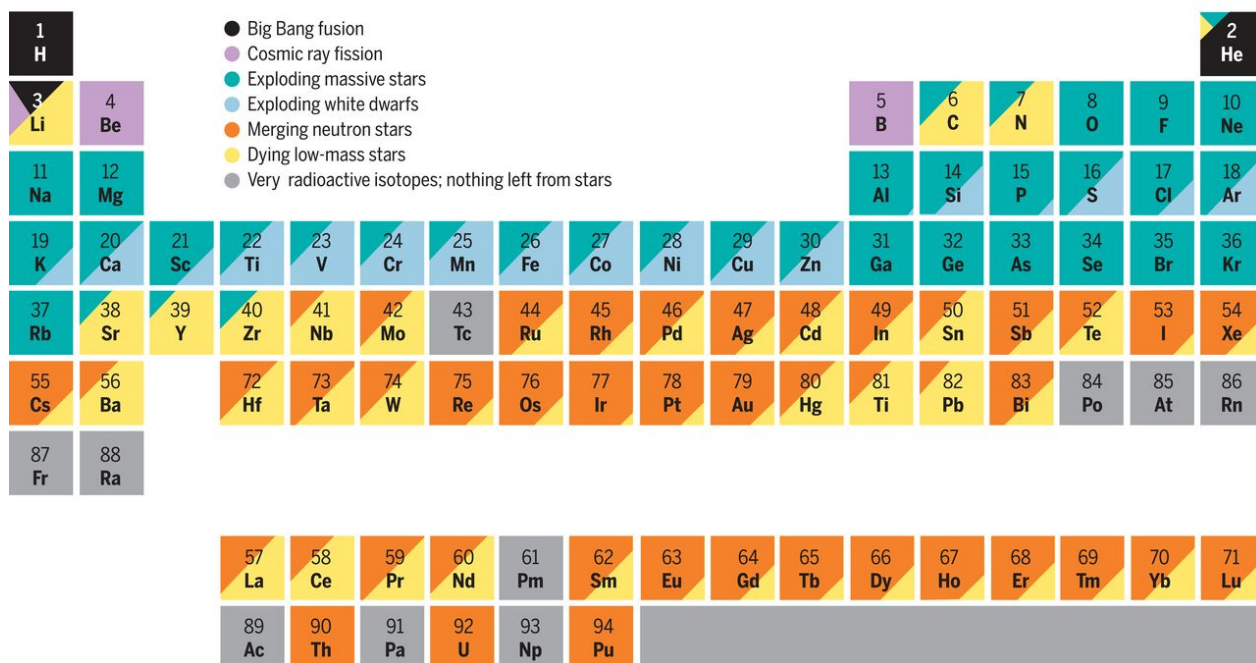
życia. Pierwszy wkład pojawia się, gdy gwiazdy o masie $8 M_{\odot}$ umierają 30 milionów lat po pierwszej supernowej typu II. Jednak całkowity wkład wszystkich gwiazd o niskiej masie jest znikomy aż do około 1 miliarda lat po rozpoczęciu formowania się gwiazd. Ich niższe masy oznaczają, że każda gwiazda wzbogaca Wszechświat w mniej metali niż gwiazdy o wysokich masach. Jednak wśród pierwszych gwiazd istnieje znacznie więcej gwiazd o niskiej masie niż gwiazd o wysokiej masie, więc ich łączny wkład znacznie wypełnia układ okresowy.

10. Wybuchające karły – nukleosynteza w białych karłach⁹

Białe karły, które tworzą się w bliskich układach podwójnych, podobnie jak podwójne gwiazdy neutronowe, mogą być miejscem dodatkowej nukleosyntezy. Ich indywidualna ewolucja została zatrzymana przez ciśnienie degeneracji elektronów, co uniemożliwiło uwolnienie dodatkowej energii potencjalnej grawitacji w celu podgrzania gazu i zapoczątkowania dodatkowego spalania. Jednakże jeśli dodatkowe źródło energii może zostać dostarczone poprzez transfer masy z drugiego białego karła z układu podwójnego, wówczas węgiel i tlen mogą wybuchowo spalać się aż do pików żelaza. [29-30] Szczegóły tego procesu są obecnie przedmiotem badań i wydaje się, że przyczynia się do niego wiele mechanizmów. Niezależnie od źródła zapłonu, węgiel i tlen spalają się, wytwarzając jądra od krzemu do pików żelaza. Proces nukleosyntezy trwa zaledwie kilka sekund, po czym biały karzeł ulega eksplozji w postaci supernowej typu Ia, a cała jego masa zostaje wyrzucona do otaczającej galaktyki. Ponieważ supernowe tego typu nie produkują wolnych neutronów, nie syntetyzują one żadnych pierwiastków znajdujących się poza pikiem żelaza. Supernowe typu Ia wymagają najpierw całkowitej ewolucji gwiazdy o niskiej masie w celu wytworzenia białego karła, a następnie transferu masy lub spiralnego łączenia się poprzez uwalnianie fal grawitacyjnych. Są to ostatnie zdarzenia nukleosyntezy, które przyczyniają się do składu Układu Słonecznego. Śmierć gwiazd o masie $8M_{\odot}$ po 30 milionach lat to pierwsza okazja do pojawienia się białych karłów. [31-32] Chociaż w niezwykle rzadkich przypadkach taki biały karzeł może szybko zgromadzić wystarczającą ilość materiału, aby przekroczyć masę M_{Ch} ⁹ [33-34], bardziej realistyczne obliczenia pokazują, że eksplodujące białe karły dostarczają znaczne ilości materiału po upływie 1 miliarda lat. Na tym etapie Wszechświat doświadczył wszystkich głównych źródeł nukleosyntezy.

9 M_{Ch} - granica Chandrasekhara – maksymalna masa stabilnego białego karła, wynosi ok. $1,44M_{\odot}$

The evolving composition of the Universe



Rys. 7. Tablica Mendlejewą razem z sposobem powstania pierwiastków

Źródło: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aau9540> (dostęp 03.01.2024.r)

11. Podsumowanie

Z pierwiastkami łączy nas więcej, niż może się wydawać. Tlen, Węgiel, Wodór i Azot oraz wiele innych pierwiastków które składają się na nasz chemiczny skład. To głównie te pierwiastki składają się na białka, a są one najważniejszym budulcem organizmu. Bez białek, nie moglibyśmy transportować tlenu, który jest niezbędny do życia, a bez budulca, nie mielibyśmy z czego się składać. Poza byciem budulcem białek Węgiel, Azot i Tlen możemy uznać za szczególnie poważne, bo bez powodu istnieje cykl węglowo-azotowo-tlenowy. Wodór zajmuje szczególne miejsce, bo to on tworzył pierwsze gwiazdy. Obecnie wykorzystywany w elektronice Krzem, również zajmuje specjalne miejsce, gdyż to proces ich fuzji, produkuje pierwiastki z pików żelaza. Procesy kosmicznych nukleosyntez ukształtowały kosmos, a w szczególności gwiazdy, jakie znamy dziś i chętnie badamy. Podczas procesów kosmicznych nukleosyntez powstało, aż 99 na 118 pierwiastków oraz wiele ich izotopów.

Bibliografia:

- [1] „Arché”, *Wikipedia, wolna encyklopedia*. 20 listopad 2023. Dostęp: 7 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Arch%C3%A9&oldid=71899967>
- [2] „Pierwiastek chemiczny”, *Wikipedia, wolna encyklopedia*. 22 grudzień 2023. Dostęp: 7 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: https://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Pierwiastek_chemiczny&oldid=72294854
- [3] „Białka – budowa - Zintegrowana Platforma Edukacyjna”. Dostęp: 9 kwiecień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://zpe.gov.pl/a/bialka---budowa/Di56UwmTx>

- [4] „Rola białek w organizmie. Dlaczego białka w diecie są nam potrzebne?” Dostęp: 9 kwiecień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://noyopharm.com/rola-bialek-w-organizmie-dlaczego-bialka-w-diecie-sa-nam-potrzebne>
- [5] „nucleosynthesis, n. meanings, etymology and more | Oxford English Dictionary”. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: https://www.oed.com/dictionary/nucleosynthesis_n?tl=true
- [6] „nucleosynthesis”, Britannica, The Editors of Encyclopaedia. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.britannica.com/science/nucleosynthesis>
- [7] „DOE Explains...Nucleosynthesis”, Energy.gov. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsnucleosynthesis>
- [8] H. Drozdowski, „Jak powstały pierwiastki chemiczne we Wszechświecie?”, *POSTĘPY FIZYKI*, t. 71, nr 1, s. 2–20, 2020, ISSN 2658-2422, Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: https://www.ptf.net.pl/sites/default/files/PF/PF_1_2020.pdf
- [9] A. Coc i E. Vangioni, „Primordial nucleosynthesis”, *Int. J. Mod. Phys. E*, t. 26, nr 08, s. 1741002, sie. 2017, doi: [10.1142/S0218301317410026](https://doi.org/10.1142/S0218301317410026).
- [10] J. A. Johnson, „Populating the periodic table: Nucleosynthesis of the elements”, *Science*, t. 363, nr 6426, s. 474–478, luty 2019, doi: [10.1126/science.aau9540](https://doi.org/10.1126/science.aau9540).
- [11] S. Hurley, „A Brief History of the Universe.”, Explaining Science. Dostęp: 4 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://explainingscience.org/2014/11/17/a-brief-history-of-the-universe/>
- [12] „The First Stars in the Universe”, *SCIENTIFIC AMERICAN*, 2004. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <http://www.astro.yale.edu/larson/papers/SciAm04.pdf>
- [13] „The First Stars and Galaxies - Department of Physics and Astronomy - Uppsala University, Sweden”. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.physics.uu.se/research/astronomy-and-space-physics/research/galaxies/first-stars-galaxies/>
- [14] „21.2: Patterns of Nuclear Stability”, Chemistry LibreTexts. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_Chemistry_-_The_Central_Science_\(Brown_et_al.\)/21%3A_Nuclear_Chemistry/21.02%3A_Patterns_of_Nuclear_Stability](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_Chemistry_-_The_Central_Science_(Brown_et_al.)/21%3A_Nuclear_Chemistry/21.02%3A_Patterns_of_Nuclear_Stability)
- [15] „iron peak”, Oxford Reference. Dostęp: 4 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803100011385>
- [16] „Imagine the Universe! Supernovae” Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/supernovae2.html>
- [17] „Type II supernova”, Britannica, The Editors of Encyclopaedia. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.britannica.com/science/Type-II-supernova>
- [18] „Binary Star | COSMOS”. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/B/Binary+Star>
- [19] Friedlander, Michael Wulf, „cosmic ray”, Encyclopedia Britannica. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.britannica.com/science/cosmic-ray>
- [20] „spalacja, Encyklopedia PWN: źródło wiarygodnej i rzetelnej wiedzy”. Dostęp: 4 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/spalacja;3978002.html>
- [21] R. Lea, „Neutron Stars: Definition & Facts”, Space.com. Dostęp: 4 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.space.com/22180-neutron-stars.html>
- [22] C. Buongiorno, „What are neutron stars? The cosmic gold mines, explained | Astronomy.com”, Astronomy Magazine. Dostęp: 4 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.astronomy.com/science/what-are-neutron-stars-the-cosmic-gold-mines-explained/>
- [23] „R-process”. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/R-process.html>

- [24] „Nuclear drip line”, *Wikipedia*. 27 listopad 2023. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nuclear_drip_line&oldid=1187143712
- [25] „Seed nucleus”, *Wikipedia*. 1 lipiec 2023. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Seed_nucleus&oldid=1162825926
- [26] A. I. Boothroyd, „Heavy elements in stars”, *Science*, t. 314, nr 5806, s. 1690–1691, 2006, doi: [10.1126/science.1136842](https://doi.org/10.1126/science.1136842).
- [27] „S-process”. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.chemeuropa.com/en/encyclopedia/S-process.html>
- [28] R. Reifarth, „The s-process – overview and selected developments”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, t. 202, s. 012022, sty. 2010, doi: [10.1088/1742-6596/202/1/012022](https://doi.org/10.1088/1742-6596/202/1/012022).
- [29] „white dwarf star”, Britannica, The Editors of Encyclopaedia. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.britannica.com/science/white-dwarf-star>
- [30] „Imagine the Universe! - White Dwarf Stars” Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/dwarfs2.html>
- [31] „Type Ia Supernova | COSMOS”. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/t/Type+Ia+Supernova>
- [32] Y. Cendes, „Type Ia supernovae: Inside the universe’s biggest blasts”, *Astronomy Magazine*. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.astronomy.com/science/type-ia-supernovae-inside-the-universes-biggest-blasts/>
- [33] „Chandrasekhar limit”, Britannica, The Editors of Encyclopaedia. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.britannica.com/science/white-dwarf-star>
- [34] „White Dwarf | COSMOS”. Dostęp: 3 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/W/White+Dwarf>