

Szymon KOZŁOWSKI¹

Pochodzenie materii meteorytowej

The origin of meteorite constituents

Abstract: In this article, I briefly review the history of the elements in the Universe, starting from cosmic inflation and ending at the creation of elements and minerals that we find in meteorites.

Keywords: elements, minerals, dust, meteorites, cosmology

Jednym z największych przełomów w dziejach ludzkości jest odkrycie rozszerzania się Wszechświata. W 1929 roku Edwin Hubble wykazał, że obserwowane przez niego „mgławice pozagalaktyczne”² (tj. galaktyki) oddalają się od siebie. A oddalają się one tym szybciej, im większa odległość pomiędzy nimi – są unoszone przez powiększającą się przestrzeń (Hubble 1929). Skoro galaktyki oddalają się od siebie, to oznacza, że w przeszłości musiały być bliżej siebie, a w bardzo odległej przeszłości mogły one wszystkie znaleźć się w jednym bardzo małym i bardzo gorącym punkcie. Logiczną konsekwencją rozszerzania się Wszechświata jest zatem pytanie czy Wszechświat miał początek i jeśli tak, to kiedy. Naukowcy tak naprawdę nie wiedzą czy Wszechświat miał początek, natomiast dość dokładnie wiedzą kiedy narodziły się znane nam siły w przyrodzie, czas i przestrzeń jakie znamy, a także materia, z której się składamy. Nasza historia zaczyna się 13,8 miliarda lat temu.

Ekstrapolacja ekspansji Wszechświata wstecz w czasie za pomocą ogólnej teorii względności (lub fizyki newtonowskiej) daje nieskończoną gęstość i temperaturę (osobliwość) w skończonym czasie w przeszłości. To właśnie 13,8 miliarda lat temu cały nasz Wszechświat, wszystko co widzimy na niebie, te szacunkowe 100 miliardów galaktyk, zawierające średnio 100 miliardów gwiazd każda, wszystkie planety, cała przestrzeń były ściśnięte w jednym mikroskopowym punkcie

¹ Uniwersytet Warszawski, Obserwatorium Astronomiczne, al. Ujazdowskie 4, 00-478 Warszawa; e-mail: simkoz@astrouw.edu.pl

² Początkowo sądzono, że faktycznie obserwowane przez astronomów galaktyki to obiekty mgławicowe, bliskie i należące do Drogi Mlecznej. Edwin Hubble jako pierwszy „rozdzielił” na zdjęciu gwiazdy w Mgławicy Andromedy i wykazał, że „mgławice” są w istocie tworamii podobnymi do Drogi Mlecznej, czyli galaktykami.

(wiek Wszechświata wyliczany jest z mierzonych parametrów kosmologicznych; Planck Collaboration i in. 2020). Niewyobrażalne jest to, jakie wysokie gęstości i temperatura musiały tam panować. A były tak wysokie, że znane nam prawa fizyki mogły nie obowiązywać.

Według współczesnych hipotez, gdy materia zostanie ściśnięta do gigantycznych ciśnień i podgrzana do gigantycznych temperatur zmienia swoje właściwości na antygravitacyjne – tak naprawdę mamy do czynienia nie z materią jaką znamy (tj. cząstkami), a z tworem pod postacią pola skalarne o ujemnym ciśnieniu (Guth 1981; Narlikar i in. 1991). Fizycy uważają, że takie właśnie warunki panowały w początkowym punkcie 13,8 miliarda lat temu. Antygravitacyjne właściwości takiego pola powodują wykładnicze (coraz to szybsze) rozszerzanie się małego punktu początkowego. W ułamku sekundy mały punkt (tj. cały Wszechświat) rośnie 10^{26} razy (100 kwadrylionów razy), a temperatura spada 100 tysięcy razy. Ten etap nazywamy kosmiczną inflacją i to ona jest silnikiem Wielkiego Wybuchu (np. Guth 1981). Przyspieszająca ekspansja przestrzeni rozciąga wszelkie początkowe zaburzenia gęstości lub temperatury na bardzo duże skale długości. Fluktuacje kwantowe w mikroskopijnym obszarze inflacyjnym, powiększone do kosmicznych rozmiarów, stają się zalążkiem wzrostu struktur we Wszechświecie. Co było przed punktem początkowym i czy w ogóle można pytać o to, czy coś wtedy było? Jest wiele hipotez na ten temat, natomiast znana nam materia powstała na późniejszym etapie ewolucji Wszechświata, po etapie kosmicznej inflacji.

Gdy kończy się faza kosmicznej inflacji, pole skalarne (przyszła materia) wypełniająca całą przestrzeń zaczyna drgać. A szybko oscylujące pole klasyczne traci swoją energię tworząc pary znanych nam cząstek elementarnych. Rozpada się ono na pierwsze cząstki elementarne takie jak kwarki i antykwarki, elektrony i pozytony, czyli na materię i antymaterię oraz na cząstki przenoszące oddziaływania: fotony i gluony. Cały Wszechświat jest gorącą gęstą zupą, gorętszą o biliard razy niż wewnątrz naszego Słońca. Gęstość i temperatura są tak duże, że cząstki nie mogą połączyć się ze sobą, aby uformować atomy. Ba! Nie mogą nawet uformować protonów czy neutronów.

W około jedną milionową część sekundy po Wielkim Wybuchu temperatura spada na tyle, że kwarki i antykwarki mogą połączyć się w protony i neutrony oraz antyprotony i antyneutrony.

Z przewidywań teoretycznych i potwierdzających je eksperymentów, wiemy jednak, że materia i antymateria nie zawsze mają identyczne właściwości (Cronin i Fitch otrzymali Nagrodę Nobla w 1980 roku). Na każdy miliard cząstek antymaterii we Wszechświecie przypadał miliard i jedna cząstka materii (Liddle 2015). Niby drobna asymetria, ale istotna w późniejszych etapach rozwoju Wszechświata, gdyż przy niższej gęstości i temperaturze cząstki i antycząstki anihilują (znikają) zamieniając się w fotony o energiach anihilowanych cząstek. Przy odpowiednio niskiej temperaturze, ale nadal bardzo wysokiej w naszym rozumieniu, nowe cząstki i antycząstki nie są już tworzone (w zderzeniach fotonów i cząstek). Antymateria anihiluje z materią – zostaje tylko jedna cząstka materii na miliard par

cząstka-antycząstka oraz miliard powstałych z anihilacji fotonów (1 sekunda po Wielkim Wybuchu). Czyli na każdą cząstkę materii we Wszechświecie przypada miliard fotonów (Canetti i in. 2012). W międzyczasie Wszechświat nadal rozszerza się, a jego temperatura i gęstość maleje. Następnie anihilują ze sobą elektrony i pozytony, pozostawiając po sobie fotony i śladową ilość elektronów (10 sekund po Wielkim Wybuchu).

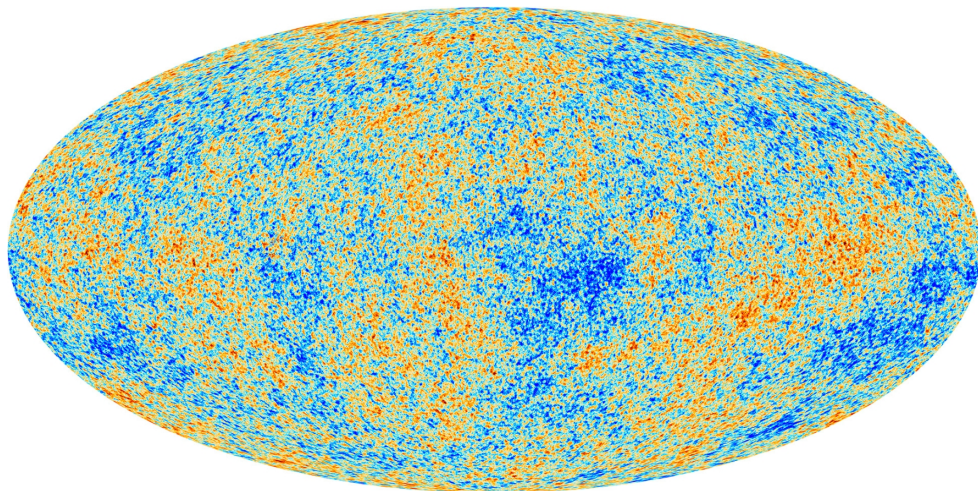
Wszechświat nadal wypełniony jest gorącą plazmą i tak naprawdę przypomina jedno wielkie wnętrze gwiazdy. Protony, neutrony, elektrony, fotony, wszystkie cząstki zderzają się ze sobą. Dla neutronów w momencie ich powstania zaczyna biec czas, gdyż czas połowicznego rozpadu swobodnego neutronu wynosi niecałe 15 minut. Albo neutrony znajdują sobie pary, albo za piętnaście minut połowa wszystkich neutronów we Wszechświecie rozpadnie się na inne cząstki: na protony, elektrony i antyneutrino elektronowe. Po następnych piętnastu minutach rozpadnie się połowa neutronów z pozostałej pierwszej połowy. Po godzinie zostanie tylko 6% neutronów, po dwóch 0,4%. Dlatego w pierwszych pięciu minutach życia Wszechświata wydarzy się magia. A magia ta zaczyna się około 20 sekund po Wielkim Wybuchu w procesie pierwotnej nukleosyntezy (Cyburt i in. 2016). Neutrony łączą się z protonami tworząc pierwsze jądra helu, które stanowią 25% materii nukleonowej (pozostałe 75% to protony – jądra wodoru) oraz śladowe ilości deuteru, litu i berylu (Burles i in. 2001). Po pierwszych pięciu minutach ustala się pierwotny skład chemiczny Wszechświata, wszystkie cięższe pierwiastki powstaną później w gwiazdach – astronomowie nazywają je metalami. Tak, wg astronomów pierwiastki takie jak np. tlen, azot, czy siarka to metale, a stosunki tych pierwiastków do pierwiastków pierwotnej nukleosyntezy (głównie do wodoru) nazywane są metalicznością.

Skład materii po pierwotnej nukleosyntezie zależał od liczby fotonów przypadających na nukleon. Gdyby była ona dużo wyższa, proces powstawania pierwszych jąder atomowych opóźniłby się, gdyż do dyspozycji byłaby mniejsza liczba neutronów i powstałoby mniej jąder helu. Również względne zawartości deuteru, helu-3 i litu byłyby inne (i na odwrót przy mniejszej liczbie fotonów). Porównanie obserwowanego składu chemicznego materii w obiektach o niskiej metaliczności z przewidywaniami pierwotnej nukleosyntezy pozwala na dość dokładne określenie stosunku liczby fotonów do nukleonów. To, z kolei, umożliwia oszacowanie średniej gęstości zwykłej materii w przestrzeni, bezpośrednio bardzo trudnej do zmierzenia.

Przez kolejne 372 tysiące lat ewolucji Wszechświata gęstość i temperatura są za wysokie, aby stworzyć atomy. Elektrony nie są w stanie utrzymać się w atomach, gdyż nieustannie bombardowane są fotonami o wysokiej energii. Wszechświat wypełniony jest prawie jednorodną plazmą – „termiczną zupą” fotonów, protonów, jąder helu, śladowych ilości innych lekkich pierwiastków, a także elektronów, neutrin i prawdopodobnie nieznanymi cząstek ciemnej materii. Z wyjątkiem neutrin i hipotetycznych cząstek ciemnej materii, które nie oddziałują z plazmą, wszystkie rodzaje cząstek mają tę samą temperaturę – wynika ona z interakcji naładowanych cząstek z fotonami (tj. termalizacji).

Po 372 tysiącach lat, gdy temperatura spadła na tyle nisko ($T \approx 3000\text{K}$), że nie ma już wystarczającej liczby fotonów o wystarczająco wysokiej energii, aby utrzymać jonizację wodoru, zachodzi proces rekombinacji. Elektrony łączą się z protonami tworząc pierwsze atomy wodoru (a także helu). Po ostatnim rozproszeniu na elektronach, fotony mogą już bez przeszkód podróżować po Wszechświecie (mówi się, że Wszechświat stał się nagle przezroczysty!). Są to fotony obecnego kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła (*cosmic microwave background radiation*, CMB; Planck Collaboration i in. 2020). Fotony kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła rozpoczęły swoją podróż po Wszechświecie, gdy był on 1090 razy mniejszy niż obecnie. W trakcie ich podróży powiększał się on, jednocześnie zwiększała się długość fali fotonów, co obniżało ich energię i temperaturę (o 1090 razy) do obecnych $T = 2,725\text{K}$ (stąd promieniowanie mikrofalowe; rys. 1).

Po etapie rekombinacji Wszechświat staje się „ciemny”, następuje era ciemności. Nie ma jeszcze gwiazd ani galaktyk, nic w nim „nie świeci”. Materia jest w miarę jednorodnie rozłożona, a pierwotne fluktuacje gęstości rozciągnięte w trakcie kosmicznej inflacji, z racji swojej nieco większej masy, zaczynają przyciągać coraz to większą ilość materii. Po milionach lat z tych początkowych fluktuacji grawitacja stworzy pierwsze struktury we Wszechświecie – galaktyki i gromady galaktyk.

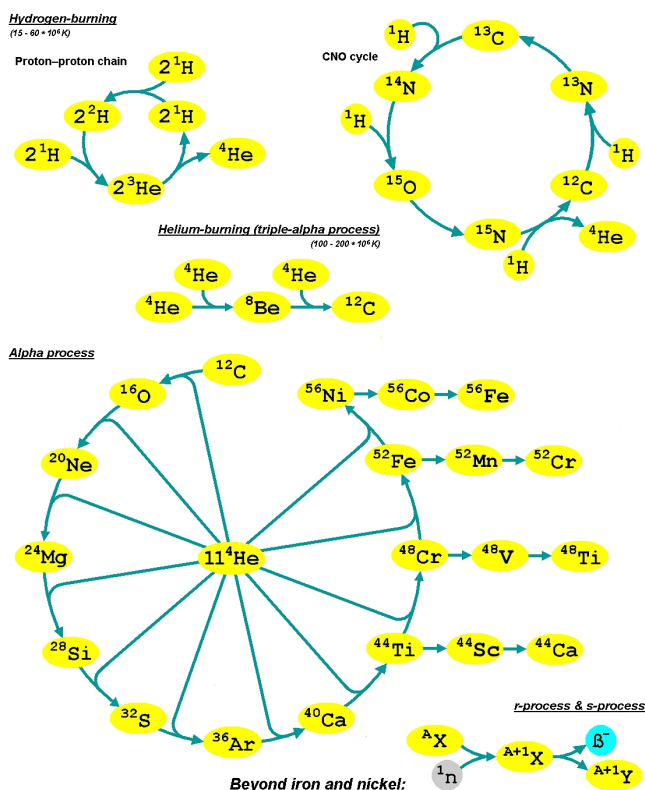


Rys. 1. Obraz Wszechświata w wieku 372 tysięcy lat – mikrofalowe promieniowanie tła (CMB; Planck Collaboration i in. 2020). Fluktuacje (plamki) mają amplitudę 10 ppm (10^{-5}) i typowy rozmiar jednego stopnia na niebie. Niebieskie plamki to obszary o mniejszej gęstości materii, natomiast czerwone plamki wskazują na większą gęstość. To z nich po milionach lat utworzą się struktury we Wszechświecie – galaktyki i gromady galaktyk (źródło: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB).

Fig. 1. Image of the Universe at age of 372,000 years – cosmic microwave background radiation (CMB; Planck Collaboration et al., 2020). The fluctuations (spots) have an amplitude of 10 ppm and a typical size of one degree on the sky. Blue spots represent areas of lower matter density, while red spots indicate higher density. The latter ones will become structures in the Universe that will form over millions of years – galaxies and galaxy clusters.

Choć to nadal dociekania teoretyczne (nie ma dowodów obserwacyjnych), około sto milionów lat po Wielkim Wybuchu, z zagęszczeń materii powstały pierwsze bardzo masywne gwiazdy – tak zwane gwiazdy populacji III (astronomowie dzielą gwiazdy na trzy populacje, numerując je w przeciwnej kolejności do biegu czasu). Były to mało metaliczne, bardzo masywne, a co za tym idzie krótko żyjące gwiazdy (Heger i in. 2002). Składały się, oczywiście, z pierwotnej materii czyli wodoru, helu i śladowych ilości litu i berylu.

Gwiazdy są gigantycznymi kulami materii, na tyle masywnymi i gęstymi, że w ich wnętrzach panują warunki umożliwiające zajście procesu fuzji jądrowej, czyli zamiany lżejszych pierwiastków na cięższe. W reakcjach termojądrowych lżejsze jądra atomowe łączą się z nukleonami (protony i neutrony) lub cząstkami alfa, tworząc coraz to cięższe jądra atomowe, czyli nowe pierwiastki. Większość helu w gwiazdach powstaje w wyniku dwóch typów reakcji (rys. 2): proton-proton (cykl protonowy) przebiegającej w mało masywnych gwiazdach takich jak Słońce i reakcji CNO (cykl węglowo-azotowo-tlenowy) przebiegającej najczęściej w gwiazdach masywnych.



Rys. 2. Schematy procesów powstawania nowych pierwiastków w gwiazdach: proton-proton, cykl CNO, 3- α , α -proces (źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_process#/media/File:Kernfusionen1_en.png (CC BY-SA 4.0)).

Fig. 2. Processes of the formation of new elements in stars: proton-proton, CNO cycle, 3- α , α -process, r -process and s -process.

Mocno upraszczając ewolucję mało i średnio masywnych gwiazd, jądro gwiazdy typu Słońca po wyczerpaniu zapasu wodoru (co nastąpi dla Słońca za około pięć miliardów lat), zamienionego w cyklu protonowym na hel, zapadnie się tworząc w procesie 3- (rys. 2) kulę tlenowo-węglową otoczoną wodorowo-helową warstwą. Słońce odrzuci zewnętrzne warstwy, które utworzą mgławicę planetarną, na końcu zostając obdartą tlenowo-węglową gwiazdą – czyli białym karłem. Kontrybucja ciężkich pierwiastków (metali) do materii międzygwiazdowej z mało masywnych gwiazd jest stosunkowo mała (rzędu 10% masy gwiazdy). Skład chemiczny odrzuconych warstw z gwiazd powyżej jednej masy Słońca, czyli mgławic planetarnych, astronomowie otrzymują z widm tych obiektów – a obserwowane najczęściej są linie emisyjne wodoru i helu oraz silnie zjonizowane linie emisyjne tlenu, azotu, siarki, neonu, czy argonu.

Masywne gwiazdy z kolei mają wystarczającą masę, aby wytworzyć większe ciśnienie, a tym samym wyższą temperaturę w jądrze gwiazdy. W gwiazdach masywnych po wyczerpaniu wodoru spokojnie palony jest hel, który w procesie 3- zamienia się na węgiel. Następnie w kombinacji kilku reakcji (np. cykl CNO, proces – rys. 2) węgiel i hel zamieniany jest w tlen, a dwa atomy węgla w magnez. Poprzez połączenie tego typu procesów (proces palenia: węgla, tlenu, neonu, krzemu, itd. – rys. 2), kolejno tworzone są cięższe pierwiastki, aż po żelazo.

Opisane reakcje termojądrowe we wnętrzach masywnych gwiazd w efekcie końcowym prowadzą do produkcji coraz to cięższych pierwiastków z jednoczesną emisją energii, która przeciwdziała zapadaniu się gwiazdy. Jej emisja trwa aż do syntezy żelaza. Aby ten proces mógł być kontynuowany do etapu produkcji jeszcze cięższych pierwiastków, potrzebne są coraz to większe ciśnienie, temperatura i energia. Ponieważ jądro żelaza jest najbardziej stabilnym jądrem w naturze (fuzja żelaza nie generuje już wolnej energii), to nawet gdybyśmy nadal zwiększali ciśnienie i temperaturę, nie powstaną pierwiastki cięższe od żelaza. Zachodzi proces odwrotny, w tych warunkach jądra żelaza są rozbijane na lżejsze pierwiastki. Dlatego powstanie żelaza jest ostatnim etapem w opisanym procesie ewolucji masywnych gwiazd.

Masywne gwiazdy kończą swój żywot albo zapadając się i tworząc czarne dziury (tzw. nieudana supernowa) albo wybuchając jako gwiazdy supernowe – typu I (gwiazda zostaje zniszczona) lub typu II (tworzy się czarna dziura lub gwiazda neutronowa). W trakcie wybuchu supernowej warunki umożliwiają zajście kolejnego procesu – procesu wyłapywania szybkich neutronów (tzw. proces r; rys. 2). W wyniku tego procesu powstają jądra atomowe cięższych pierwiastków niż żelazo. Żelazo wychwytyując neutrony może zamienić się w kobalt, kobalt w nikiel, nikiel w miedź, miedź w cynk, itd. Wybuchy gwiazd supernowych mogą zapewnić skuteczny mechanizm wzbogacania w metale otaczającej materii międzygwiazdowej, która to posłuży jako budulec do tworzenia nowych gwiazd (Yoshida i in. 2004).

Wracając do pierwszych bardzo masywnych gwiazd populacji III, Heger i Woosley (2002) pokazali, że w jądrach masywnych gwiazd o zerowej metaliczności przetwarzane jest do 40–50% całkowitej masy gwiazd na ciężkie pierwiastki,

po czym materia ta zostaje rozrzucona w wybuchu gwiazd supernowych. Z tej bogatszej w metale materii musiały w następnej kolejności powstawać gwiazdy populacji II, tzw. gwiazdy mało metaliczne ($-0,01\%$ metali w gwieździe). Te z kolei po przetworzeniu lekkich pierwiastków na cięższe ponownie zanieczyściły przestrzeń międzygwiazdową wyrzucając dodatkowe ilości ciężkich pierwiastków. Jak łatwo się domyślić, gwiazdy populacji I (najnowsze) są kolejną generacją gwiazd o największej metaliczności. Należy do nich nasze Słońce, mające metaliczność na poziomie $1,22\%$ składu gwiazdy (Asplund i in. 2006).

Materiał wywiewany z gwiazd w postaci wiatru gwiazdowego, a także wybuchy gwiazd supernowych zasilają ośrodek międzygwiazdowy (obłoki gazu i pyłu) w nową, bogatą w metale materię, czyli w pierwiastki cięższe od helu. To z takich obłoków tworzyć się będą nowe gwiazdy i nowe planety. Materia ta ma duży wpływ na wygląd galaktyk, gdyż pochłania około 30% światła gwiazd i reemituje je w podczerwieni (rys. 3; Bernstein i in. 2002). Na długości fali $9,7$ mikrona obserwuje się silną emisję pyłu – kondensatu krzemianowego – wywiewanego z masywnych gwiazd tlenowych będącego materiałem amorficznym ($<5\%$ krystalicznym) o składzie oliwinów (Li i in. 2002; Draine 2003). Innymi drobkami wywiewanymi przez gwiazdy mogą być ziarna na bazie węgla. To właśnie takie „presłoneczne” drobinki zawiera znana nam materia meteorytowa. Ilość ziaren starszych niż Układ Słoneczny, czyli drobinek materii międzygwiazdowej



Rys. 3. Galaktyka spiralna M83 w świetle widzialnym (z lewej strony) i w podczerwieni (z prawej strony). Światło widzialne gwiazd pochłaniane jest przez pył, co obserwujemy jako ciemne (brązowe) absorpcyjne pasma widoczne na zdjęciu optycznym. Pył reprocessuje te światło (podgrzewa się) i emituje je w podczerwieni – kolor czerwony na zdjęciu w podczerwieni. Kolorystyka na zdjęciu w podczerwieni: turkus $3-5$ mikronów, czerwień $6,5-9,5$ mikrona (Teleskop Kosmiczny Spitzera, detektor IRAC) (źródło: ESO i NASA/JPL).

Fig. 3. Spiral galaxy M83 in visible light (left) and infrared light (right). Starlight is absorbed by dust, which is visible as dark (brown) absorption bands in the optical image. The dust reprocesses this light (heats up) and emits it in the infrared – shown in red in the infrared image. Color coding in the infrared image: turquoise represents $3-5$ microns, red represents $6.5-9.5$ microns (taken with the Spitzer Space Telescope, IRAC detector).

znajdowanych w meteorytach wynosi 0,05% (500 ppm, części na milion) nano-diaamentów, 6 ppm węgla krzemu (SiC), 1 ppm grafitu (Hoppe i in. 2000). Badania 40 drobinek węgla krzemu z chondrytu węglatego Murchison określiły wiek drobinek na powyżej 4,6 miliarda lat, wskazując na wzmożoną aktywność gwiazdotwórczą w naszej części Galaktyki 7 miliardów lat temu (Heck i in. 2020). Interpretacja tego wyniku jest następująca: gwiazdy o masach 1,6 do 1,9 masy Słońca powstałe 7 miliardów lat temu wyewoluowały do stadium, w którym 4,9–4,6 miliarda lat temu wywiewane były z nich drobinki diamentowe, węgla krzemu i grafitu, a następnie zostały one uwięzione w znanych nam meteorytach (i całej materii Układu Słonecznego).

Nowe gwiazdy, a tym samym nowe układy planetarne powstają, gdy obłok molekularny (lub jego część) zapada się pod wpływem grawitacji. Chmury gazu i pyłu, aby zapaść się i utworzyć gwiazdę oraz planety, musiały osiągnąć przynajmniej krytyczną masę Jeansa³, w przeciwnym razie chmura taka nie mogłaby się zapaść. Powolny ruch obłoku międzygwiazdowego podlegając zasadzie zachowania momentu pędu wymusza na materii ukształtowanie prawie płaskiego wirującego dysku. Znaczna część pyłu i gazu w dysku przemieszcza się do centrum mgławicy, gdzie zasila rosnącą protogwiazdę, a ta ostatecznie staje się gwiazdą, taką jak np. nasze Słońce. Analizując stosunki izotopów w inkluzjach wapniowo-glinowych (CAIs) w chondrytach węglistych – czyli w pierwszych kondensatach gazu wokół tworzącej się gwiazdy – to wydarzenie, czyli początek naszego Układu Słonecznego, datuje się na 4,567 miliarda lat temu (Amelin i in. 2002; Connelly i in. 2012).

Pozostały po formowaniu się Słońca pył i gaz był zaczątkiem pierwotnej materii planetarnej. Nie licząc wodoru i helu, mgławica protoplanetarna zawierała spore ilości cięższych pierwiastków, przypuszczalnie wystarczające na utworzenie nawet 30–40 planet o masie Ziemi. Spekuluje się, że większość tej materii znajduje się we wnętrzach dużych planet: Jowisza i Saturna (Militzer i in. 2008; Mankovich i in. 2021).

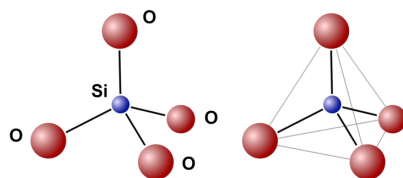
Duże ilości krzemu i tlenu szybko doprowadziły do powstania fundamentu większości minerałów obserwowanych zarówno na Ziemi, jak i w meteorytach – krzemianów. Ich fundamentem jest czworościan zbudowany z jonu krzemu Si^{4+} znajdującego się w jego środku i otoczonego czterema silnie związanymi jonami tlenu O^{2-} w wierzchołkach (piramida SiO_4 ; rys. 4). Wypadkowy ładunek takiego tetraedru jest ujemny (-4), dlatego chętnie łączy się on z innymi jonami dodatnimi. Ze względu na dostępność pierwiastków najczęściej są to żelazo (Fe), magnez (Mg) i wapń (Ca).

Najprostszymi krzemianami w naturze są oliwiny, w których tetraedry nie łączą się bezpośrednio ze sobą (tj. krzemiany wyspowe), a z pomocą kationów żelaza, magnezu lub wapnia, gdzie ładunek -4 każdego tetraedru SiO_4 jest równoważony przez dwa kationy Fe, Mg, lub Ca, każdy o ładunku $+2$. Stąd też bardzo powszechne w meteorytach forsteryt (Mg_2SiO_4), fajalit (Fe_2SiO_4) lub ich kombinacja (roztwór stały – ciągły szereg izomorficzny) zapisana w postaci $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$.

³ Aby doszło do zapadnięcia się obłoku, masa chmury musi być większa od masy Jeansa (zależnej od temperatury, gęstości i ciśnienia obłoku), w przeciwnym razie ciśnienie powstrzyma zapadanie.

Rys. 4. Tetraedr krzemianowy SiO_4 – podstawa ogromnej liczby powszechnych minerałów.

Fig. 4. *Silicate tetrahedron SiO_4 – the basis of a vast number of common minerals.*



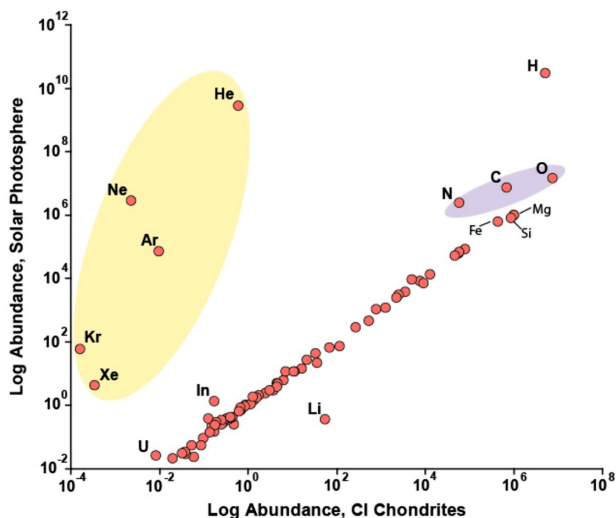
Tetraedry mogą łączyć się wierzchołkami (anionami tlenu) w długie pojedyncze ciągi – łańcuchy, stąd zapis SiO_3 (efektywnie tetraedr ma jeden kation krzemu i trzy aniony tlenu). Krzemiany łańcuchowe to pirokseny, także bardzo popularne minerały w meteorytach i w płaszczu Ziemi. Pojedynczy tetraedr w łańcuchu ma niezrównoważony ładunek +2, dlatego na każdy tetraedr przypada jeden jon żelaza, magnezu lub wapnia, tworząc odpowiednio ferrosilit (FeSiO_3), enstatyt (MgSiO_3), lub wollastonit (CaSiO_3). Kombinacja (roztwór stały – ciągły szereg izomorficzny) ferrosilitu (Fs) i enstatytu (En) tworzy minerały dobrze znane w świecie meteorytowym: bronzyt (85%mol. En i 15%mol. Fs) i hipersten (75%mol. En i 25%mol. Fs). Tetraedry krzemianowe mogą łączyć się na wiele innych sposobów – we wstęgi (np. amfibole) albo struktury przestrzenne (np. plagioklasy), ale minerały te stanowią dużo mniejszy wkład do wagi meteorytów, niż wymienione oliwiny i pirokseny.

Osobne zagadnienie stanowią kombinacje pierwiastków takich jak żelazo, nikiel, czy siarka. Żelazo łącząc się z niklem tworzy głównie dwa minerały: kamacyt ($\text{Fe} > 85\%$ i $\text{Ni} < 15\%$) i taenit (o zawartości niklu większej niż 15%). Żelazo łącząc się z siarką tworzy siarczek żelaza (FeS), czyli troilit. Najbardziej rozpowszechniona materia chondrytowa składa się w około 70% z oliwinów i piroksenów i zawiera wagowo do 20% ze stopu żelazo-niklowego i do 10% troilitu.

Początkowo krzemianowy pył w mgławicy protoplanetarnej gromadził się tworząc małe, luźno związane amorficzne (bezipostaciowe) grudki, zlepki materii. W niektórych regionach mgławicy słonecznej grudki pyłu brały udział w gwałtownych zdarzeniach o wysokiej temperaturze ($T > 1200\text{K}$), gdzie topiły się tworząc zastygłe kulki krzemianowe⁴. Ponieważ takie zdarzenia wysokotemperaturowe były krótkie, stopione kropelki szybko ostygły w mgławicy i utworzyły obiekty dzisiaj zwane chondrami (Shu i in. 2001; Connelly i in. 2012). Połączenie chondr, drobinek pyłu i drobinek metalu (kamacyt/taenit i troilit) to przepis na najczęściej spadający na Ziemię typ meteorytów – chondryty. Chondryty węgliste tworzyły się w obszarach o niskich temperaturach, dlatego są najmniej przetworzone i mają niemal identyczny skład jak Słońce (rys. 5).

Małe bryłki materii z czasem łączyły się w większe obiekty – planetozymale, a te z kolei w jeszcze większe ciała – planety. Planetoidy o rozmiarze rzędu dziesiątek kilometrów były wystarczająco duże, aby energia pochodząca z rozpadu pierwiastków promieniotwórczych (niestabilnych izotopów) podgrzała obiekt od

⁴ Istnieją alternatywne teorie powstawania chondr. Np. Johnson i in. (2005) proponują jako źródło chondr wyrzuty roztopionej materii (kropielek) w trakcie zderzeń z już wcześniej uformowanych planetozymali. To sugeruje, że meteoryty są produktem ubocznym formowania się planet, a nie pozostałościami materiału budulcowego.



Rys. 5. Wykres przedstawia obfitości pierwiastków na powierzchni Słońca (fotosfera) w porównaniu do obfitości pierwiastków w chondrytach węglistych CI. Obfitości pierwiastków lotnych, takich jak wodór, węgiel, azot, tlen i gazy szlachetne, są wyraźnie wyższe w Słońcu niż w chondrytach, co jest zgodne z obserwacjami dla innych skał w Układzie Słonecznym. Pozostałe pierwiastki zachowują stosunek jeden do jednego, w tym żelazo, magnez i krzem, czyli główne pierwiastki tworzące skały (zaadoptowane z pracy Dye i in. 2015).

Fig. 5. The plot shows the abundances of elements of the Sun's photosphere compared to the abundances of elements in carbonate chondrites of the CI type. The abundances of highly volatile elements, such as hydrogen, carbon, nitrogen, oxygen, and noble gases, are significantly higher in the Sun than in the chondrite, which is consistent with observations for other rocks in the Solar System. The remaining elements follow a one-to-one ratio, including iron, magnesium, and silicon, which are the main rock-forming elements (adopted from Dye et al. 2015).

środką powodując dyferencjację materiału (McCoy i in. 2006). Najgęstszy stop żelazo-niklowy opadał do środka, najlżejsze stopy krzemianowe (po zastygnięciu tworzące skały achondrytowe płaszcza i skorupy) znajdowały się bliżej powierzchni, a pomiędzy nimi utworzyła się warstwa żelazno-kamienna (źródło pallasytów). Za małe na dyferencjację planetoidy oraz powierzchnia dużych planetoid także ulegały metamorfizmowi termicznemu (a czasami i wodnemu – chondryty węgliste), dlatego obserwujemy zakres typów petrologicznych chondrytów: od 3 – chondryty niezmienione, z doskonale zachowanymi chondrami, do 6/7 – chondry niewidoczne tzw. achondryty pierwotne (Weisberg i in. 2006; VanSchmus i in. 1967; Piłski i in. 2011). Zderzenia meteoroidów i planetoid powodują tworzenie się warstwy regolitu na ich powierzchni (warstwa skał o różnym pochodzeniu i składzie), a co za tym idzie część meteoroidów (brekcje) spadających na Ziemię składa się z dwóch lub więcej różnych typów materii meteoroidowej.

Ze względu na swój rozmiar nasza planeta w przeszłości także uległa procesowi dyferencjacji, co widać dobrze w proporcjach pierwiastków tworzących skorupę (rys. 6 i 7). Jednak jej całkowity skład w przybliżeniu musi oddawać skład chemiczny wczesnego Układu Słonecznego, w tym chondrytów. Wągowo płaszcz ziemski stanowi 2/3, a jądro 1/3 naszej planety (Morgan i in. 1980). Płaszcz ziemski to w 45% pirokseny i 38% oliwiny, natomiast jądro Ziemi to w 75% stop

W powyższym artykule pokrótce prześledziłem drogę znanej nam materii od początku jej powstania 13,8 mld lat temu aż do dzisiaj. Składamy się z niej i my. Najstarsze elementy budujące nasze ciała – kwarki mają 13,8 mld lat, niewiele młodsze są protony i jądra atomów helu. Wszystkie cięższe pierwiastki z których się składamy powstały miliardy lat temu we wnętrzu kilku populacji (pokoleń) gwiazd. Część tej materii była wywiana z ich powierzchni, inna część została rozrzucona w gigantycznych wybuchach gwiazd supernowych. Materia ta skondensowała tworząc nowe pokolenia gwiazd, planet i nas ludzi.

Najstarszymi skałami na Ziemi jakie możemy wziąć do ręki są meteoryty kamienne, chondryty – pozostałości pierwotnej materii z początku formowania się Układu Słonecznego (rys. 5). Na szczególną uwagę zasługują tutaj dwa chondryty węgliste – Allende i Murchison. Ten pierwszy jest bardzo popularnym i łatwo dostępnym meteorytem, który powinien znaleźć się w kolekcji każdego miłośnika meteorytów. Wiek inkluzji wapniowo-glinowych (CAI) w meteorycie Allende zmierzono na 4,567 miliarda lat (Connelly i in. 2012) i jest on (exequo z kilkoma innymi meteorytami) najstarszą materią jaką możemy wziąć do ręki. Meteoryt Murchison, z kolei, zawiera śladowe ilości jeszcze starszej materii, unoszonej z wiatrami gwiazd powstałych siedem miliardów lat temu (ziarna nanodiamentów, węglików krzemu, czy grafitu).

Podziękowania

Dziękuję Andrzejowi S. Pilskiemu za jego artykuły w czasopismach Wiedza i Życie oraz Urania/Postępy Astronomii we wczesnych latach 90. XX wieku. To one stały się podstawą mojej fascynacji kamieniami z kosmosu i zainteresowania meteorytyką. Dziękuję Mu także za całą Jego pracę i energię włożoną w redagowanie i wydawanie przez trzy dekady czasopisma Meteoryt oraz za przedsięwzięcia takie jak „Wakacje w Planetarium”, podczas których jako nastolatek mogłem zapoznać nie tylko z meteorytami, ale także z astronomią. I choć Andrzej był twarzą (i piórem) tych aktywności meteorytowych Jego praca zasadniczo zależała od (i tu podziękowania): dr Jadwiga Biała i Jacek Drażkowski. Pierwsze meteoryty do mojej kolekcji meteorytów nabyłem od Andrzeja S. Pilskiego w połowie sierpnia 2000 roku we Fromborku.

Literatura

- Amelin Y., Krot A.M., Hutcheon I.D., Ulyanov A.A., 2002, *Lead Isotopic Ages of Chondrules and Calcium-Aluminum-Rich Inclusions*, Science, 297(5587), s. 1678–1683.
- Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., 2006, *The new solar abundances – Part I: the observations*, Communications in Asteroseismology, 147, s. 76–79.
- Bernstein R.A., Freedman W.L., Madore B.F., 2002, *The First Detections of the Extragalactic Background Light at 3000, 5500, and 8000 Å. III. Cosmological Implications*, The Astrophysical Journal, 571(1), s. 107–128.
- Burles S., Nollett K.M., Turner M.S., 2001, *Big Bang Nucleosynthesis Predictions for Precision Cosmology*, The Astrophysical Journal, 552(1), s. L1–L5.

- Canetti L., Drewes M., Shaposhnikov M., 2012, „*Matter and Antimatter in the Universe*”, New J. Phys., 14(9):095012.
- Connelly J.N., Bizzarro M., Krot A.N., Nordlund Å., Wielandt D., Ivanova M.A., 2012, *The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk*, Science, 338(6107), s. 651.
- Cyburnt R.H., Fields B.D., Olive K.A., Yeh Tsung-Han, 2016, *Big bang nucleosynthesis: Present status*, Reviews of Modern Physics, 88(1), id.015004
- Draine, B.T., 2003, *Interstellar Dust Grains*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 41, s. 241–289.
- Dye S.T., Huang V., Lekic Y., McDonough W.F., Sramek O., 2015, *Geo-neutrinos and Earth Model*, Physics Procedia, 61, s. 310–318.
- Guth A.H., 1981, *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*, Physical Review D (Particles and Fields), 23(2), 15 January 1981, s. 347–356.
- Heck P.R., Greer J., Kööp L., Trappitsch R., Gyngard F., Busemann H., Maden C., Ávila J.N., Davis A.M., Wieler R., 2020, *Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(4), s. 1884–1889.
- Heger A., Woosley S.E., 2002, *The Nucleosynthetic Signature of Population III*, The Astrophysical Journal, 567, s. 532.
- Hoppe P., Zinner E., 2000, *Presolar dust grains from meteorites and their stellar sources*, Journal of Geophysical Research, 105(A5), s. 10371–10386.
- Hubble E., 1929, *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 15(3), s. 168–173.
- Johnson B., Minton D., Melosh H. et al., 2015, *Impact jetting as the origin of chondrules*. Nature 517, s. 339–341.
- Li A., Draine B.T., 2002, *Are Silicon Nanoparticles an Interstellar Dust Component?*, The Astrophysical Journal, 564(2), s. 803–812.
- Liddle A., 2015, *An Introduction to Modern Cosmology (3rd ed.)*. Hoboken: Wiley. ISBN 978-1-118-69027-7.
- Lodders K., 2010, *Solar System Abundances of the Elements*, Astrophysics and Space Science Proceedings, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 379–417.
- Mankovich C.R., Fuller J., 2021, *A diffuse core in Saturn revealed by ring seismology*, Nat. Astron., 5, s. 1103–1109, doi:10.1038/s41550-021-01448-3
- McCoy T.J., Mittlefehldt D.W., Wilson L., 2006, *Asteroid Differentiation*, Meteorites and the Early Solar System II, D.S. Lauretta and H.Y. McSween Jr. (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 943, s. 733–746.
- Militzer B., Hubbard W.B., Vorberger J., Tamblyn I., Bonev S.A., 2008, *A Massive Core in Jupiter Predicted from First-Principles Simulations*, The Astrophysical Journal Letters, 688(1), s. L45.
- Morgan J.W., Anders E., 1980, *Chemical composition of Earth, Venus, and Mercury*, Proceedings of National Academy of Sciences, 77(12), s. 6973–6977.
- Narlikar J.V., Padmanabhan T. 1991, *Inflation for astronomers*, Annual Rev. Astron. Astrophys., 29, s. 325–362.
- Planck Collaboration I in., 2016, *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, Astronomy & Astrophysics, 641, id.A6, 67 pp.
- Pilski A., Przylibski T.A., Łuszczek K., 2011, *Primitive enstatite achondrites*, Meteorites, vol. 0, no. 0, s. 9–21.

- Shu F.H., Shang H., Gounelle M., Glassgold A.E., Lee T., 2001, *The Origin of Chondrules and Refractory Inclusions in Chondritic Meteorites*, *Astrophysical Journal*, 548, s. 1029.
- VanSchmus W.R., Wood J.A., 1967, A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), s. 747–754.
- Weisberg M.K., McCoy T.J., Krot A.N., 2006, Systematics and Evaluation of Meteorite Classification, *Meteorites and the Early Solar System II*, D. S. Lauretta and H. Y. McSween Jr. (eds.), University of Arizona Press, Tucson, 943 pp., s. 19–52.
- Yoshida N., Bromm V., Hernquist L., 2004, *The Era of Massive Population III Stars: Cosmological Implications and Self-Termination*, *The Astrophysical Journal*, 605(2), s. 579–590.