

Jakub Ptak

Badanie i analiza izotopowego składu meteorytów Układu Słonecznego wraz z jej implikacją

08.06.2022

Spis treści

1. Wprowadzenie	2
2. Początki Układu Słonecznego	2
3. Anomalie Izotopowe	2
4. Wielka Dychotomia Izotopowa	3
4.1. Aplikacja	3
5. Wpływ Jowisza na formowanie się Układu Słonecznego	4
6. Datowanie izotopowe	5
7. Akrecja	6
8. Podsumowanie	6
Bibliografia	7

1. Wprowadzenie

Odkrycia ostatnich dekad rzucają nowe światło na dotychczasowe teorie kształtowania się Układu Słonecznego. Nowe spojrzenie na formowanie się planet oraz ich podział: na skaliste i gazowe wynika z badań przeprowadzonych w ciągu ostatnich 30 lat. Dotychczas uważano, że za obecny podział odpowiedzialna jest bezpośrednio ich lokalizacja, jednakże po analizie innych środowisk wokół-gwiazdnych astrofizycy doszli do wniosku, że podobnych układów planetarnych jest bardzo mało. Poszerzając zakresy badań o analizę składu chemicznego meteorytów, naukowcy natknęli się na interesujące anomalie występowania izotopów pewnych pierwiastków, dokładne pomiary wykazały bowiem, że w Układzie Słonecznym istnieją dwie różne grupy ciał o znacznie zróżnicowanej zawartości węgla. Dane zjawisko nazwano *Wielką Dychotomią Izotopową*, która implikuje nowe teorie i umożliwia wytłumaczenie zaistniałych obserwacji.

2. Początki Układu Słonecznego

Układ słoneczny został stworzony poprzez grawitacyjne załamanie się chmury molekularnej, co poskutkowało w utworzeniu się wokółsłonecznego dysku gazu i pyłu. Centralna gwiazda układu (Słońce), wraz z upływem czasu została otoczona planetami, dzielimy je na dwie grupy: Skaliste i Gazowe. Każda z nich składa się z czterech planet. Dodatkowo w skład Układu Słonecznego wchodzi mniejsze obiekty: asteroidy, księżyce, planety karłowate, komety i pył kosmiczny.

3. Anomalie Izotopowe

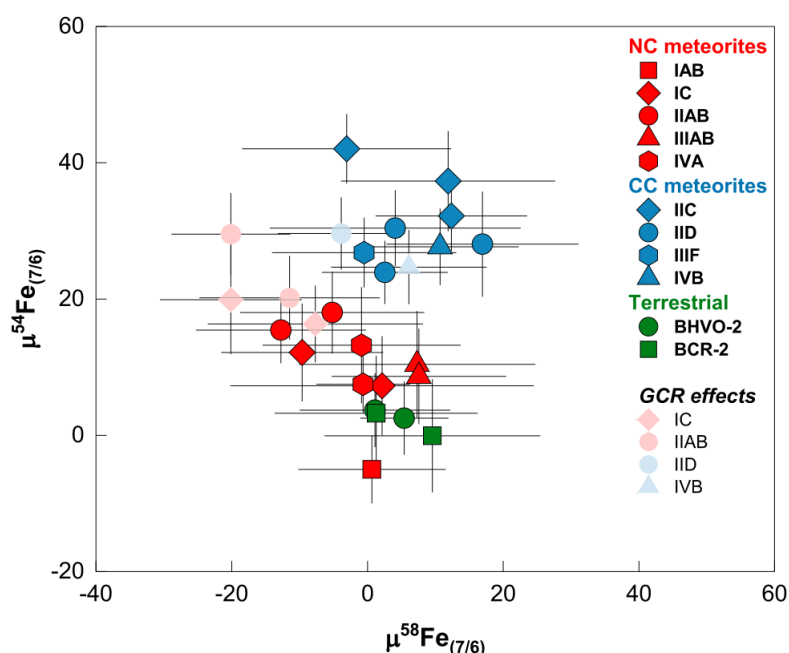
Meteority i planety zawierają anomalie izotopowe pochodzenia nukleosyntetycznego, które powstały w gwiazdach żyjących przed stworzeniem się Słońca i uniknęły homogenizacji w ośrodku międzygwiazdowym i dysku protoplanetarnym. Analiza tych anomalii jest kluczowa dla rekonstrukcji ścieżki ewolucyjnej dysku protoplanetarnego i ustanowienia powiązań pomiędzy planetami skalistymi i gazowymi.

Kompozycja izotopowa obrazuje dychotomie pomiędzy dwoma rodzajami ciał: **NC** i **CC** (skrótów pochodzą z literatury anglosaskiej oznaczają odpowiednio: non-carbonaceous, carbonaceous), czyli ciał niewęglowych i węglowych.

4. Wielka Dychotomia Izotopowa

Pojęcie Dychotomii Izotopowej po raz pierwszy zostało wprowadzone w 2007 roku przez doktor Anne Trinquier, która pokazała że meteoryty węglowe (**CC**) widocznie różnią się kompozycją izotopową chromu i tlenu, porównawszy z innymi próbkami meteorytów i chondrytów pochodzących z Układu Słonecznego. Już 4 lata później pokazano również, że meteoryty niewęglowe (**NC**) i chondryty enstatytowe również dla pierwiastków: Tlen, Tytan, Chrom i nikiel, zawsze wyróżniają dwa odrębne izotopowo skupiska, czego następstwem jest wprowadzenie podziału na meteoryty węglowe i niewęglowe, aby odróżnić te grupy.

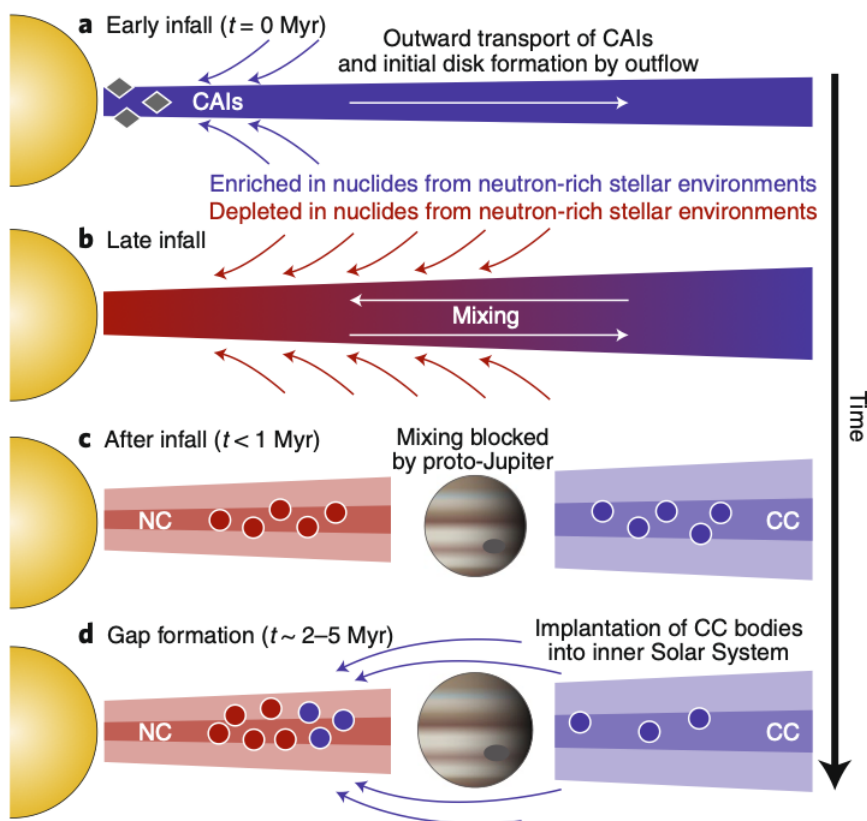
4.1. Aplikacja



Rysunek 1: Skład izotopowy Fe w meteorytach żelaznych (czerwony, niebieski) wraz z standardami ziemskimi (zielony). Opracowany na podstawie badań "Earth's accretion inferred from iron isotopic anomalies of supernova nuclear statistical equilibrium origin"

Powyższy wykres pokazuje zróżnicowanie składów izotopowych pierwiastków pośród meteorytów żelaznych. Kolor niebieski reprezentuje obiekty z grupy węglowej (**CC**), natomiast czerwony z grupy niewęglowej (**NC**), dodatkowo kolor zielony oznacza obiekty skaliste (Ziemia, Mars, księżyc). Widoczne porównanie składu izotopowego pierwiastków występujących w ciałach obrazuje widoczny podział na dwie grupy. Korelacja odpowiednich stosunków pierwiastków chemicznych ilustruje dychotomię, czyli podział na dwa odrębne zbiory. Na podstawie czego powstała nowa teoria formowania się planet w układzie słonecznym.

5. Wpływ Jowisza na formowanie się Układu Słonecznego



Rysunek 2: Skład izotopowy Fe w meteorytach żelaznych (czerwony, niebieski) wraz z standardami ziemskimi (zielony). Opracowany na podstawie badań "Earth's accretion inferred from iron isotopic anomalies of supernova nuclear statistical equilibrium origin"

Zaczynając chronologicznie od około 4.5 miliona lat po powstaniu słońca, co przyjmuje się za czas zerowy, bo wtedy właśnie zaczęły się formować pierwsze ciała w Układzie Słonecznym warto przeanalizować zaistniałe cykle. Szybka ekspansja wcześniej przyciągniętych grawitacyjnie obiektów poprzez rozprzestrzenianie się wiskotyczne tworzy początkowy dysk, którego kompozycja izotopowa może być zapisana w CAI

Późniejszy napływ był prawdopodobnie zubożały w izotopy wysokoneutronowe. Wymieszanie redukowało różnicowanie pomiędzy ciałami stałymi z dysku zewnętrznego i wewnętrznego.

Następnie szybkie formowanie się jądra Jowisza prawdopodobnie zapobiegało wymianie i mieszanii się materiałów dysku, utrzymując w ten sposób różnicę izotopową między zbiornikami CC i NC

Wreszcie dalszy wzrost Jowisza doprowadził do powstania luki w dysku. Zbiegało się to z rozproszaniem ciał CC z dysku zewnętrznego do głównego pasa planetoid, sytuacja ta zaistniała albo przez intensywny wzrost Jowisza, albo przez jego migrację do wewnątrz.

Następstwem powyższych procesów jest widoczny dzisiaj podział Układu Słonecznego

na dwie grupy planet: skaliste i gazowe. Zróznicowanie materii, z której zbudowane są planet było najprawdopodobniej spowodowane wytworzeniem się proto-Jowisza.

6. Datowanie izotopowe

Znajomość czasu połowicznego rozpadu danego pierwiastka promieniotwórczego umożliwia określenie wieku różnych obiektów. Metoda datowania izotopowego opiera się na prawie rozpadu promieniotwórczego i polega na określeniu liczby jąder w danej próbce, które uległy rozpadowi, co z kolei umożliwia oszacowanie czasu powstania tej próbki. W równaniu 1 widnieje zapis prawa rozkładu. co po odpowiednich przekształceniach można zapisać jako 4. Ponieważ stała rozkładu jest równa $\lambda = \frac{0,693}{T}$ możliwe jest wyznaczenie czasu z 4.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

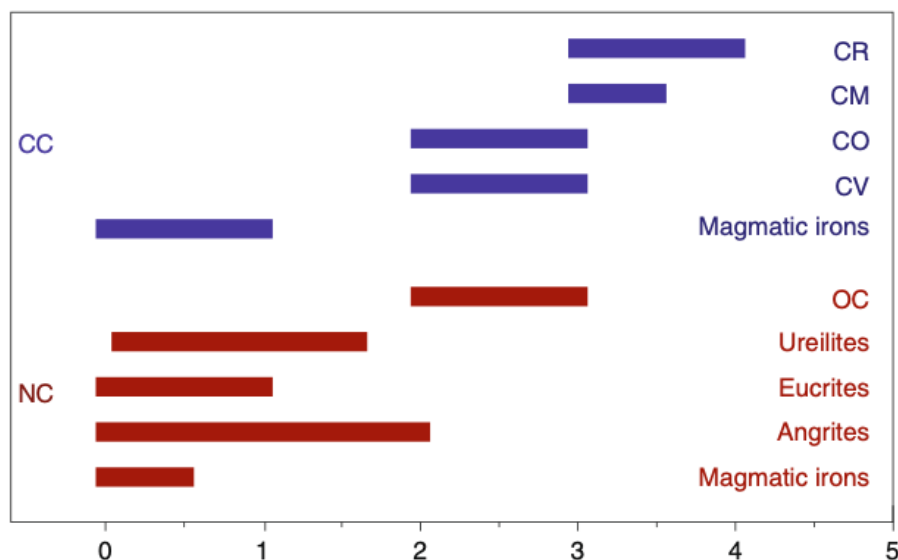
$$D(t) = N_0 - N(t) = N(t)(e^{\lambda t} - 1) \quad (2)$$

$$\frac{D(t)}{N(t)} = e^{\lambda t} - 1 \quad (3)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{D}{N} + 1\right) \quad (4)$$

T Czas połowicznego rozkładu; N_0 początkowa liczba jąder; N liczba jąder, które nie uległy rozpadowi; Stała rozkładu $\lambda = \frac{0,693}{T}$

7. Akrecja



Rysunek 3: Skale czasowe akrecji ciał macierzystych meteorytów wnioskowane na podstawie wieku izotopowego meteorytów, poziome kreski oznaczają rozstęp szacowanych wartości. Opracowany na podstawie badań "Earth's accretion inferred from iron isotopic anomalies of supernova nuclear statistical equilibrium origin"

Akrecja to opadanie rozproszonej materii na powierzchnię ciała niebieskiego w wyniku działania grawitacji. Powiązanie chronologii akrecji meteorytowego ciała macierzystego z dychotomią NC-CC dostarcza fundamentalnie nowego wglądu w dynamikę i wielkoskalową strukturę protoplanetarnego dysku słonecznego, historię formowania się i wzrostu Jowisza oraz dynamikę akrecji planet naziemnych, w tym dostarczanie wody i wysoko lotnych gatunków na Ziemię. Jednakże akrecja nie może być datowana bezpośrednio. Należy odnieść się albo do daty powstawania określonego składnika (na przykład chondrytów), która jest ściśle powiązana w czasie z akrecją ich ciała macierzystego, albo alternatywnie przez datę określonego procesu różnicowania chemicznego (na przykład powstawania jądra), które może być powiązane z czasem akrecji ciała macierzystego przez modelowanie termiczne.

8. Podsumowanie

Poprzednia teoria wiążąca kształtowanie się planet, bezpośrednio z ich lokalizacją znalazła swojego następnika w postaci teorii powiązanej z dychotomią izotopową. Jest to ogromny krok rozpoczynający nową erę kosmologii i kosmochemii. Rewolucyjne odkrycia poczynione w ostatnich dekadach zmieniają wizję postrzegania naszego układu planetarnego. Dodatkowo bardzo ciekawą implikacją powyższych odkryć jest to, że inne układy planetarne mogą wyglądać kompletnie inaczej, niż Układ Słoneczny.

Bibliografia

- [1] The great isotopic dichotomy of the early Solar System, December 16 2019, Thomas S. Kruijer, Thorsten Kleine and Lars E. Borg
- [2] Earth's accretion inferred from iron isotopic anomalies of supernova nuclear statistical equilibrium origin, November 11 2021, Timo Hopp, Nicolas Dauphas, Fridolin Spitzer, Christoph Burkhardt, Thorsten Kleine.
- [3] Wikipedia, Akrecja(geologia). 05.06.2022
- [4] . Bifurcation of planetary building blocks during Solar System formation, 22 Jan 2021. Tim Lichtenberg, Joanna Drażkowska, Maria Schonbachler, Gregor J. Golabek, Thomas O. Hands