

Astrofizyka Układów Planetarnych

10

POWSTAWANIE
UKŁADÓW PLANETARNYCH

The background of the slide is black, featuring a complex pattern of glowing, multi-colored lines. These lines, in shades of orange, red, and white, radiate from various points, creating a sense of dynamic energy and depth. The lines vary in thickness and brightness, some appearing as sharp, thin streaks while others are thicker and more diffuse. The overall effect is reminiscent of a starburst or a network of light trails in space.

Powstawanie układów planetarnych

Jak się tu znaleźliśmy?

Jedno z podstawowych pytań w nauce brzmi:

co i jak wydarzyło się do momentu teraźniejszego, że (wszech)świat wygląda tak, a nie inaczej?

To ogólne pytanie możemy rozbić na bardziej szczegółowe, np.:

- Jak powstał Wszechświat?
- Jak uformowały się galaktyki?
- Jak powstał Układ Słoneczny?
- Jak powstało i ewoluowało życie?

Jednym z podstawowych źródeł informacji, niezbędnych do uzyskania odpowiedzi jest Układ Słoneczny.



Powstawanie układów planetarnych

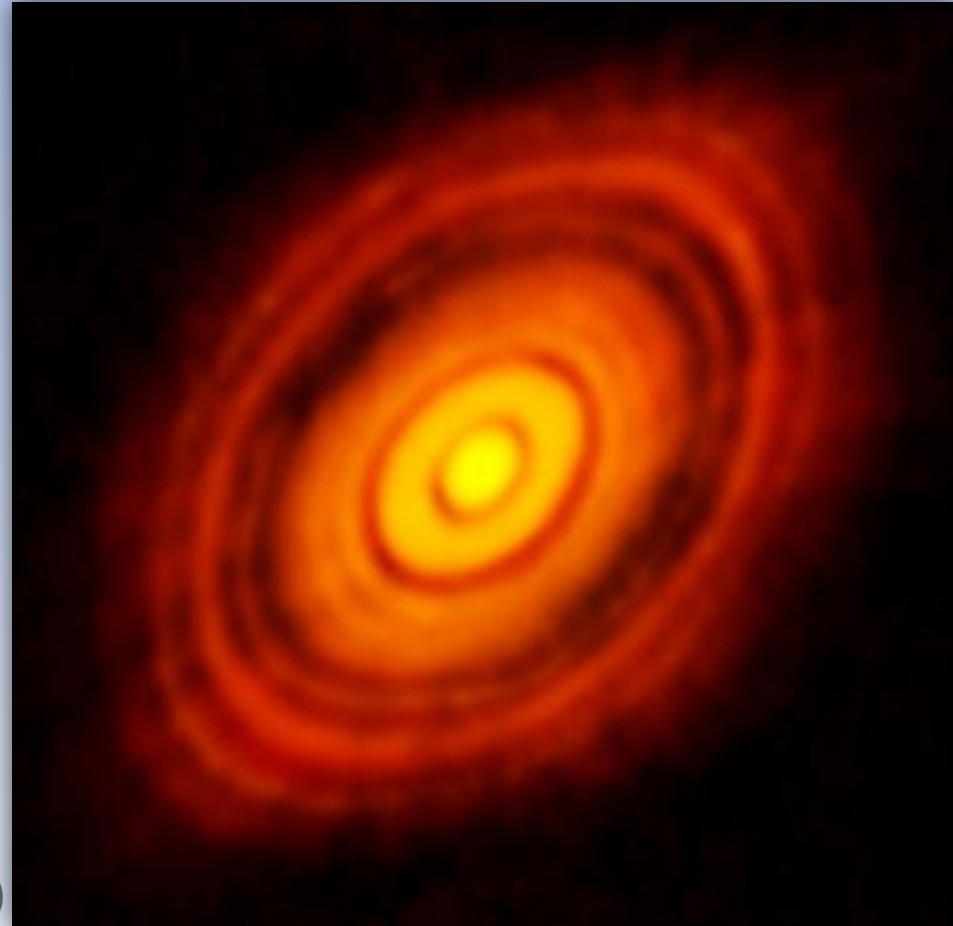
Jak zbudować model powstawania układu planetarnego?

Planety Układu Słonecznego to mniej niż 1% wszystkich znanych planet. Jednak **modele powstawania układów planetarnych** bazują w dużej części na szczegółowej wiedzy o US. Dodatkowe ograniczenia nakładane są przez obserwacje

- egzoplanet,
- dysków okołogwiazdowych,
- obszarów powstawania gwiazd.

oraz modele i badania laboratoryjne.

Mając modele i obserwacje można próbować oszacować obfitość i różnorodność układów planetarnych oraz planet habitacyjnych w Galaktyce.



dysk protoplanetarny HL Tau (ALMA)

Powstawanie układów planetarnych

Obserwacyjne ograniczenia teorii

Każda dobra teoria powinna poprawnie wyjaśniać obserwacje. W przypadku Układu Słonecznego (planetarnego) są to:

- **ruchy orbitalne, wzajemne odległości, rotacja** – przeważają ruchy proste w prawie jednej płaszczyźnie zgodne z rotacją Słońca, małe mimośrodowość, rotacja w kierunku zgodnym z obiegiem. Odstępstwa od tego – głównie małe ciała.
- **moment pędu układu** – w większości znajduje się w planetach (olbrzymach). Odwrotnie jest w układach planeta – księżycy.
- **wiek** – datowanie radiometryczne wskazuje, że najstarsze materiały liczą 4.568 mld lat i pochodzą z obiektów niezdyferencjonowanych.
- **rozmiary i gęstości obiektów** – średnie gęstości obiektów maleją z odległością heliocentryczną, co wiąże się z temperaturą kondensacji różnych składników.
- **kształt obiektów** – małe obiekty są nieregularne, duże przyjmują kształt zbliżony do kulistego
- **pas planetoid, Kuipera i innych TNO** – obecność dużej liczby małych ciał o stabilnych orbitach poza orbitami planet



Powstawanie układów planetarnych

Obserwacyjne ograniczenia teorii

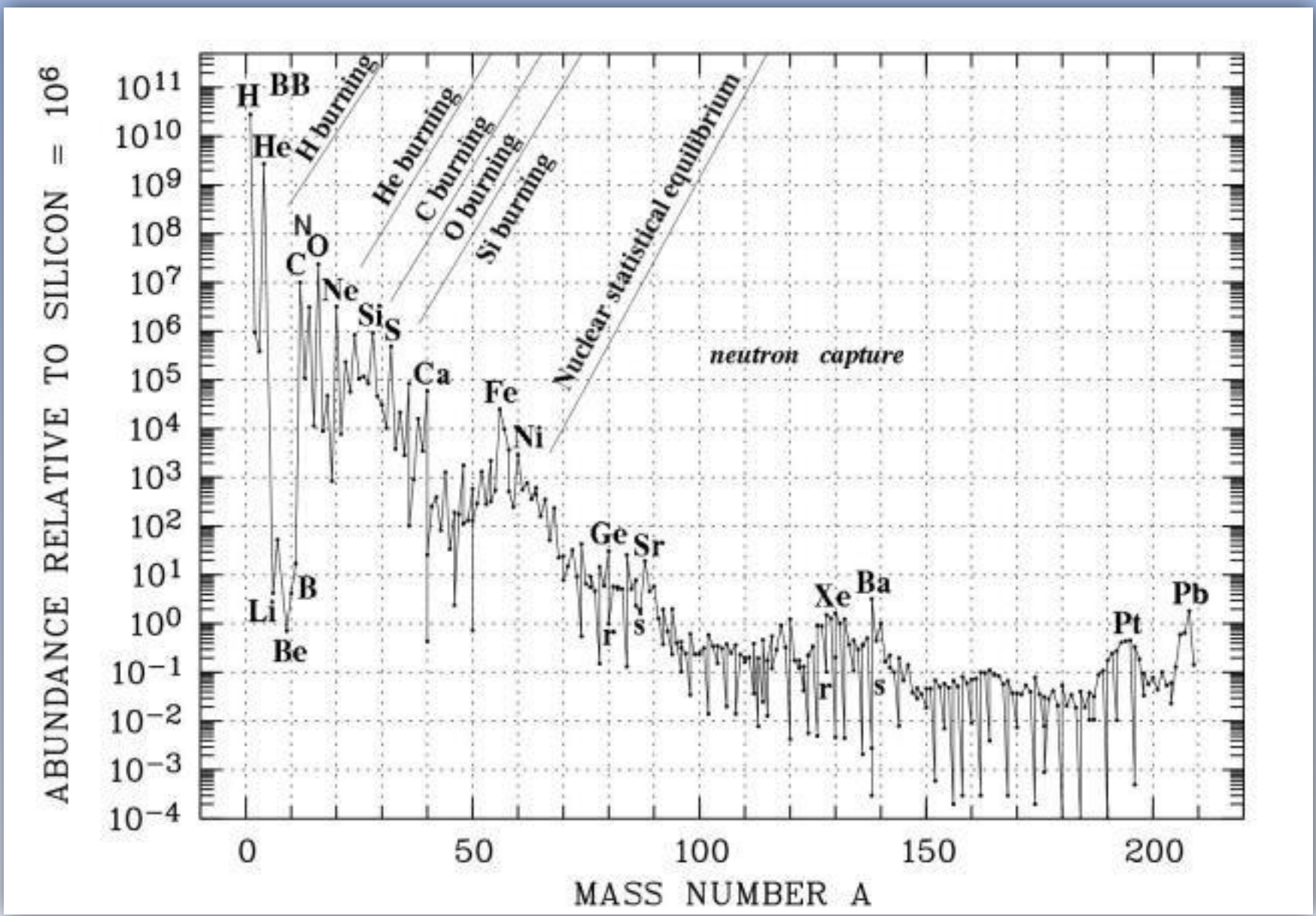
Każda dobra teoria powinna poprawnie wyjaśniać obserwacje. W przypadku Układu Słonecznego (planetarnego) są to:

- **księżyce** – większość planet i niektóre mniejsze obiekty posiadają księżyce, z których część ma orbity o obiegu prostym w prawie płaszczyźnie planet
- **pierścienie** – planety-olbrzymy posiadają pierścienie, ich orbity są równikowe, obieg prosty i znajdują się w strefie Roche'a
- **meteoryty** – wiek małych ciał wskazuje, że faza akrecji trwała krótko a materia w dysku protoplanetarnym był dobrze wymieszana.
- **dyferencjacja i topienie** – duże obiekty (planety (karłowate), większe księżyce i planetoidy) są zdyferencjonowane, co oznacza, że ich wnętrza były (są) gorące („stopione”).
- **skład chemiczny atmosfer** – planety olbrzymy mają atmosfery pierwotne z przewagą H i He, mniejsze obiekty mają atmosfery wtórne z cięższych pierwiastków
- **struktura powierzchni** – większość obiektów wykazuje obecność kraterów uderzeniowych oraz ślady dawnej aktywności tektonicznej i wulkanicznej. Na nielicznych ta aktywność trwa obecnie.



Powstawanie układów planetarnych

Pierwiastki – podstawowe cegiełki do budowy układów planetarnych



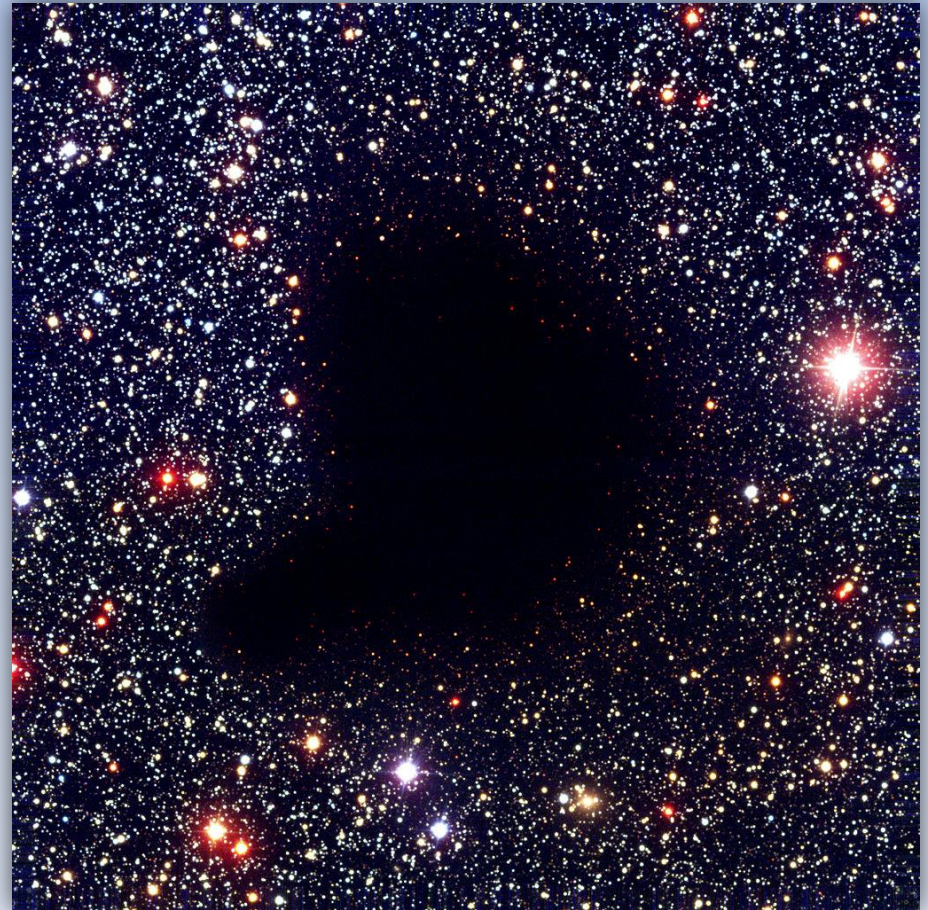
Powstawanie układów planetarnych

Początek: obłok molekularny

Miejscem powstawania gwiazd wraz z układami planetarnymi są obłoki molekularne. Proces formowania zaczyna się od zapadania obłoku, co wymaga jakiegoś zaburzenia zewnętrznego.

Typowe cechy obłoków:

temperatura: 10-30 K, gęstość: $10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$, masa: $<1 M_{\odot} - 10^7 M_{\odot}$, rozmiary: do kilkuset lś

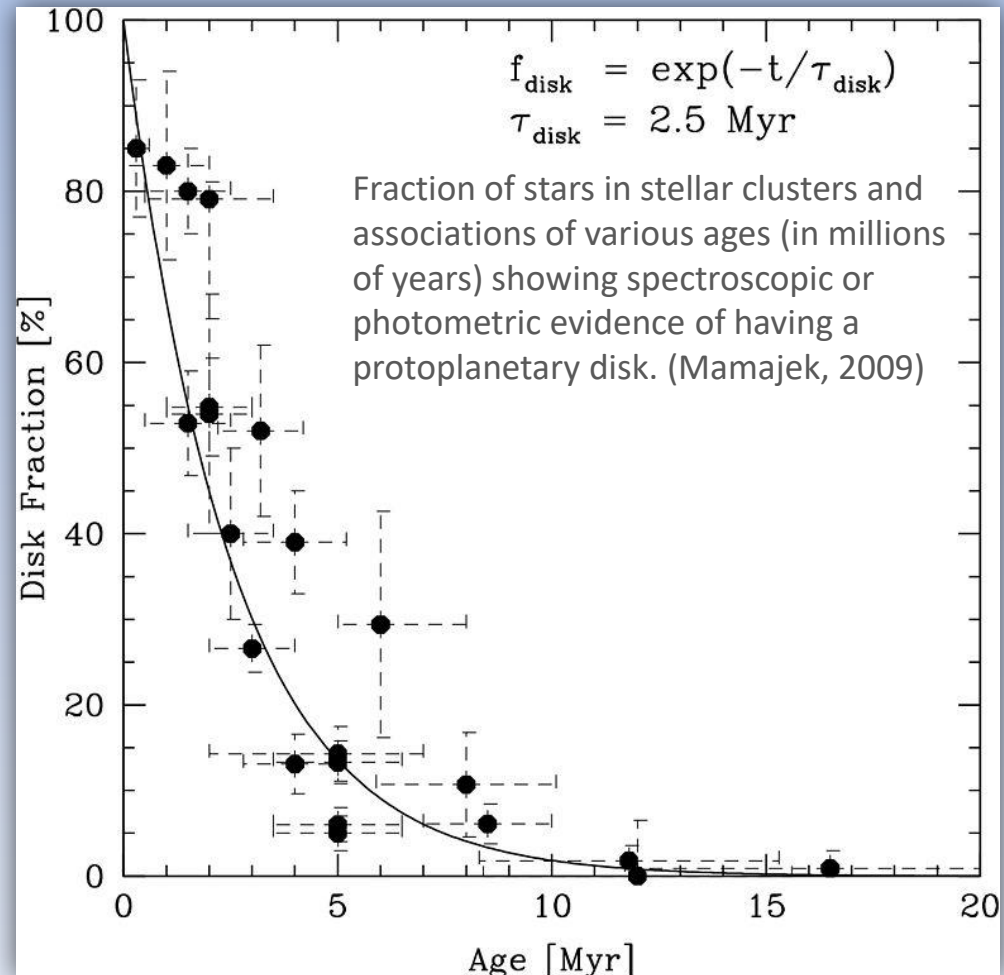


Powstawanie układów planetarnych

dysk protoplanetarny

Kolaps powstającej gwiazdy powoduje powstanie wokół niej dysku (nadmiar momentu pędu).
Dysk zawiera gaz i pył (przy odpowiednio niskiej temperaturze).

- Rozmiar: do kilkuset AU.
- Masa: ułamek masy samej gwiazdy (<0.1 M_{\odot}).
- Temperatura: przekracza 1000 K tylko w części najbliższej gwiazdzie.
- Czas istnienia: nie więcej niż ok. 20 mln lat. To czas dostępny do formowania się planet



Powstawanie układów planetarnych

od dysku do planet

Ewolucja dysku przebiega w trzech fazach:

- zapadania
- wewnętrznej ewolucji
- oczyszczenia

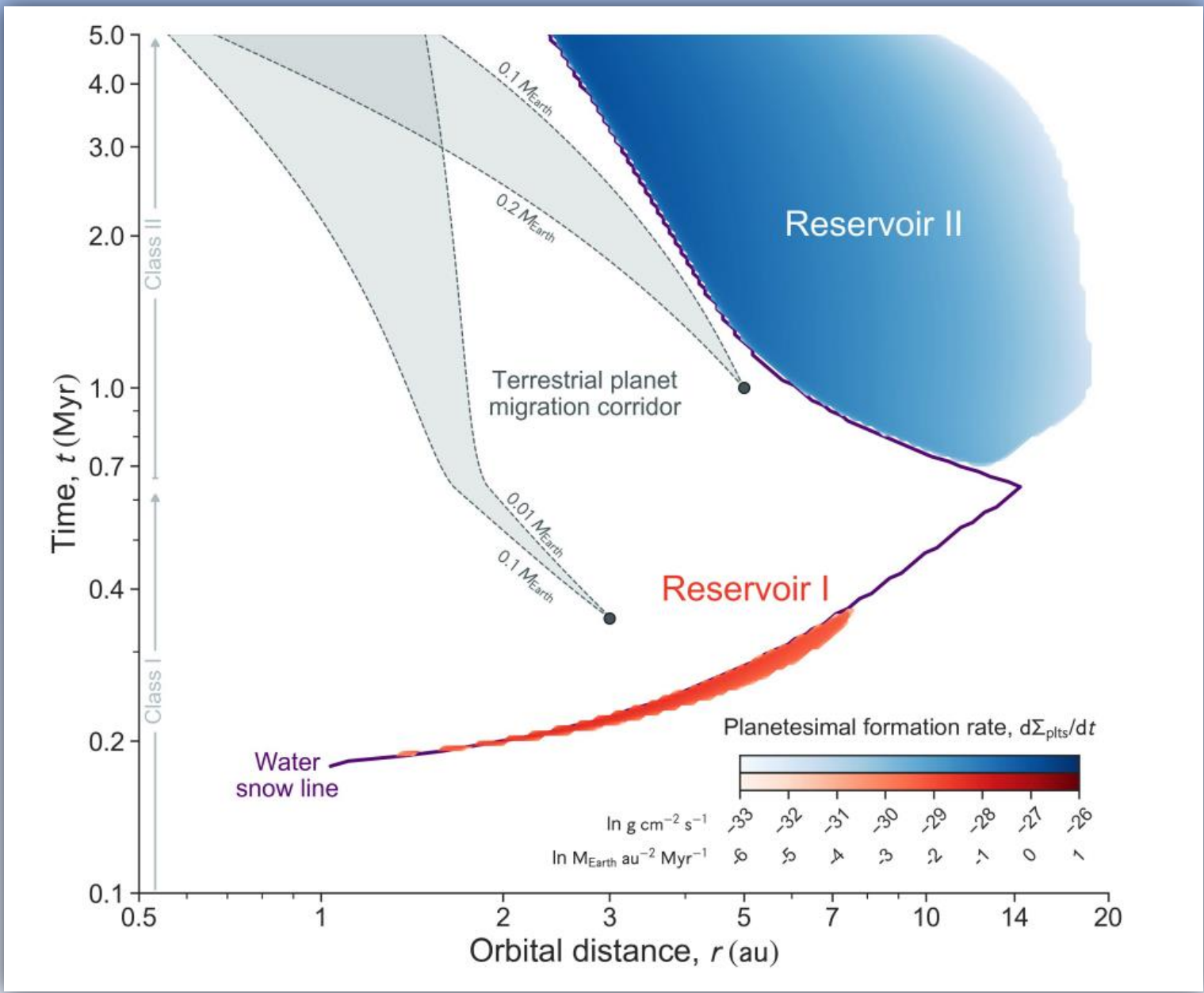
Powstawanie obiektów planetarnych zaczyna się jeszcze w fazie zapadania i musi zakończyć się w fazie oczyszczenia.

- łączenie się ziaren pyłu ($\sim\mu\text{m}$) do agregatów ($\sim\text{mm}$, cm), szczególnie za linią śniegu
- migracja i koncentracja około linii śniegu
- bariera fragmentacji
- niestabilność strumieniowa i linia śniegu pozwala na dalszy wzrost agregatów do planetozymali ($>100\text{ m}$ – kilkaset km)
- wzrost planetozymali do rozmiarów protoplanet (pebble accretion)
- przemieszczanie się linii śniegu przesuwają proces akrecji radialnie po dysku
- planetozymale formują się w dwóch generacjach: I – uboga w wodę powstaje jeszcze na etapie formowania się dysku, II – zawiera stosunkowo dużo wody i powstaje później.

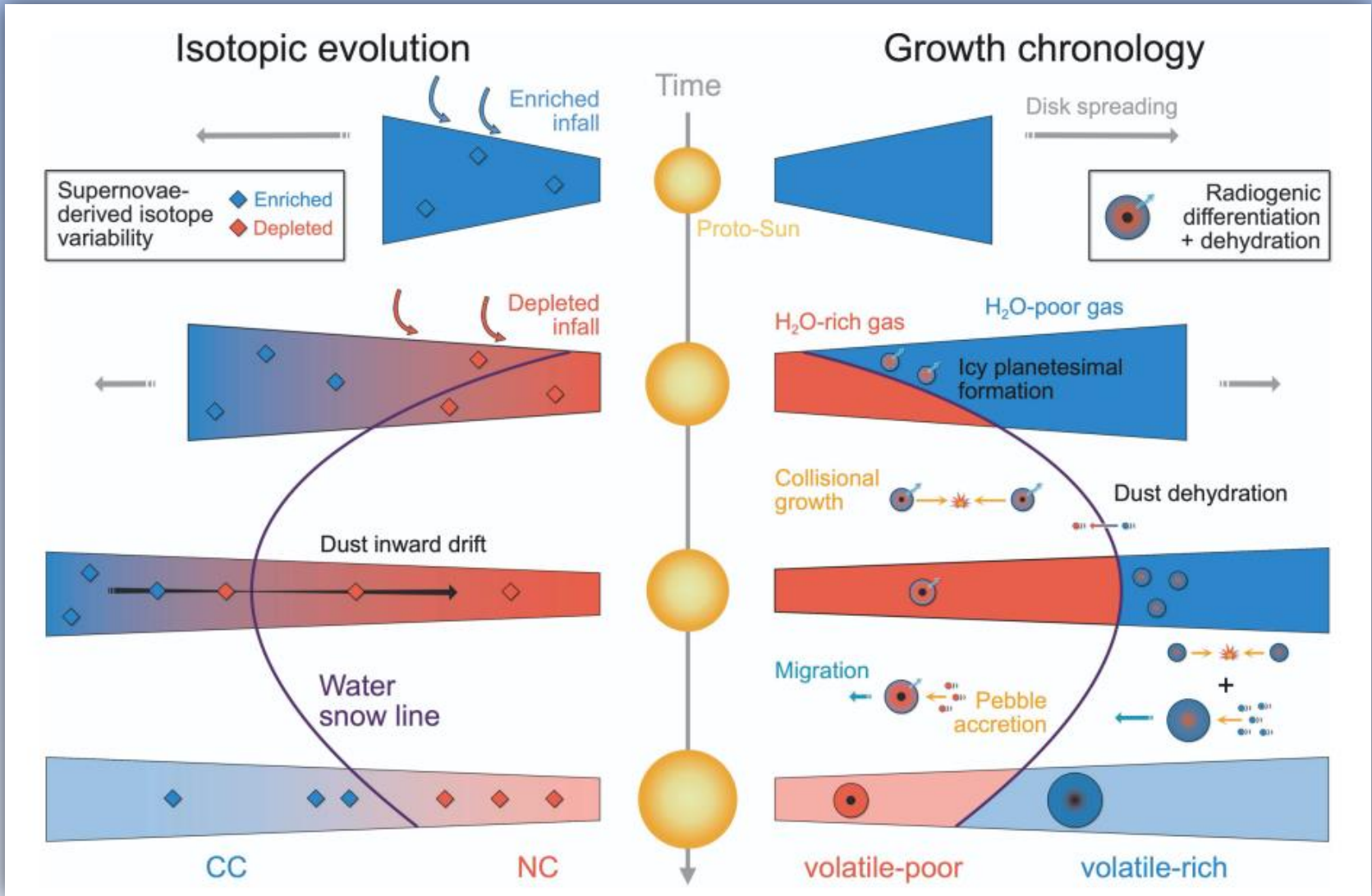
Szczegółowy opis: Jak formował się Układ Słoneczny (Urania 5/2021),

Artykuł źródłowy: Lichtenberg+ 2021, arxiv.org/abs/2101.08571

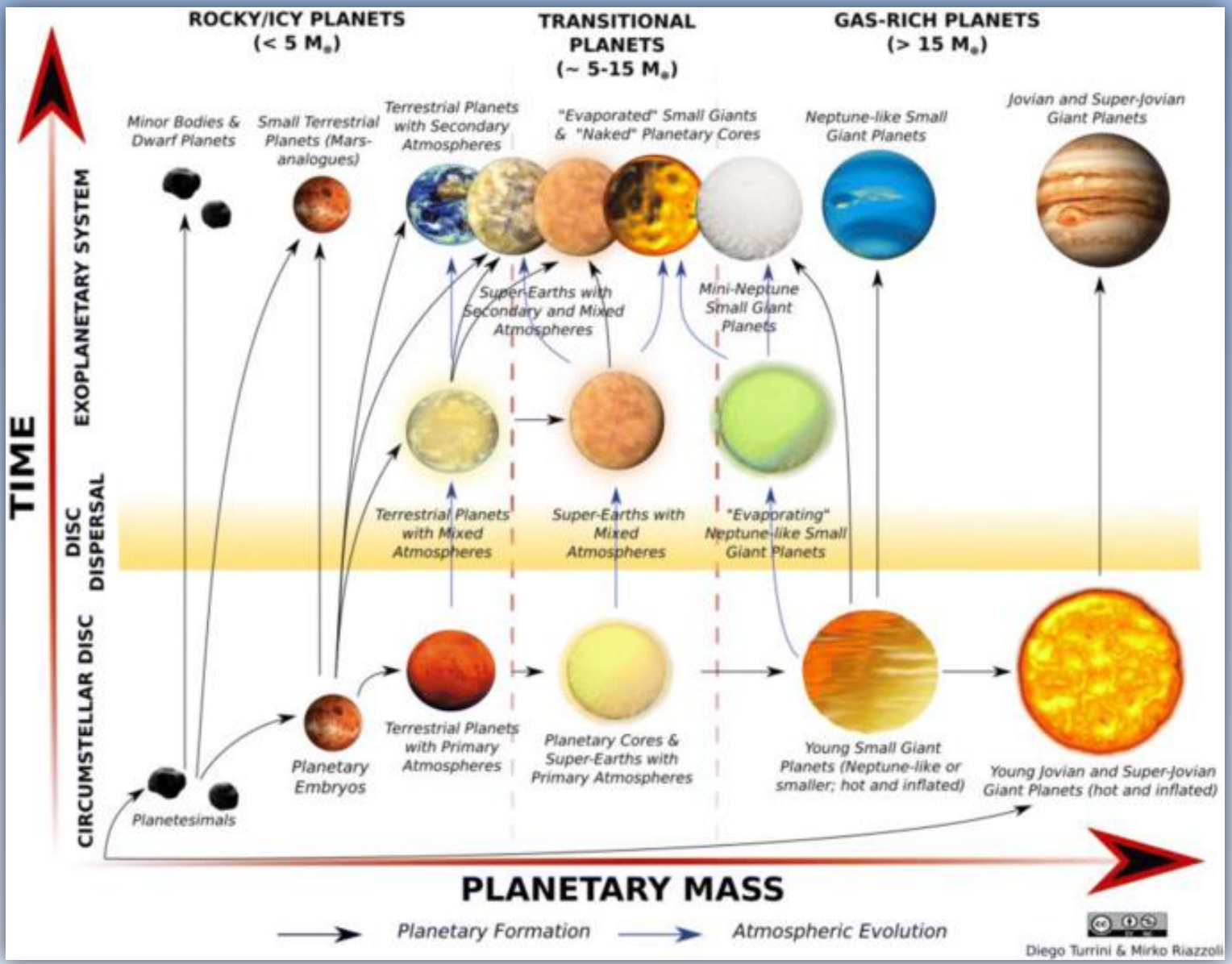
Powstawanie układów planetarnych



Powstawanie układów planetarnych



Powstawanie układów planetarnych



Zobacz opis:

astrobiology.com/2021/04/ariel-enabling-planetary-science-across-light-years.html

Turrini+ 2018