

Astrofizyka Układów Planetarnych

10

POWSTAWANIE
UKŁADÓW PLANETARNYCH



Powstawanie układów planetarnych

Jak się tu znaleźliśmy?

Jedno z podstawowych pytań w nauce brzmi:

co i jak wydarzyło się do momentu teraźniejszego, że Wszechświat 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

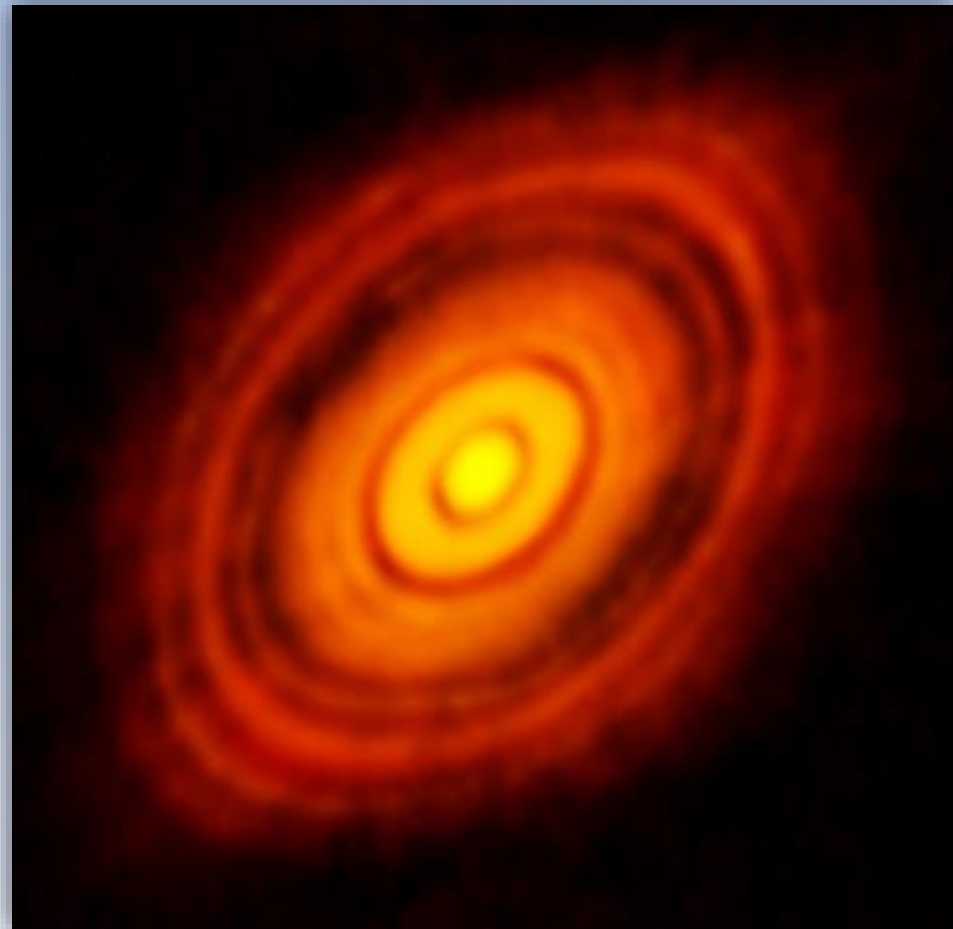
Jak zbudować model powstawania układu planetarnego?

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 przez modele i badania laboratoryjne.

Mając modele i obserwacje można próbować oszacować obfitość i różnorodność w Galaktyce układów planetarnych oraz planet nadających się do życia.



Dysk protoplanetrany HL Tauri

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:

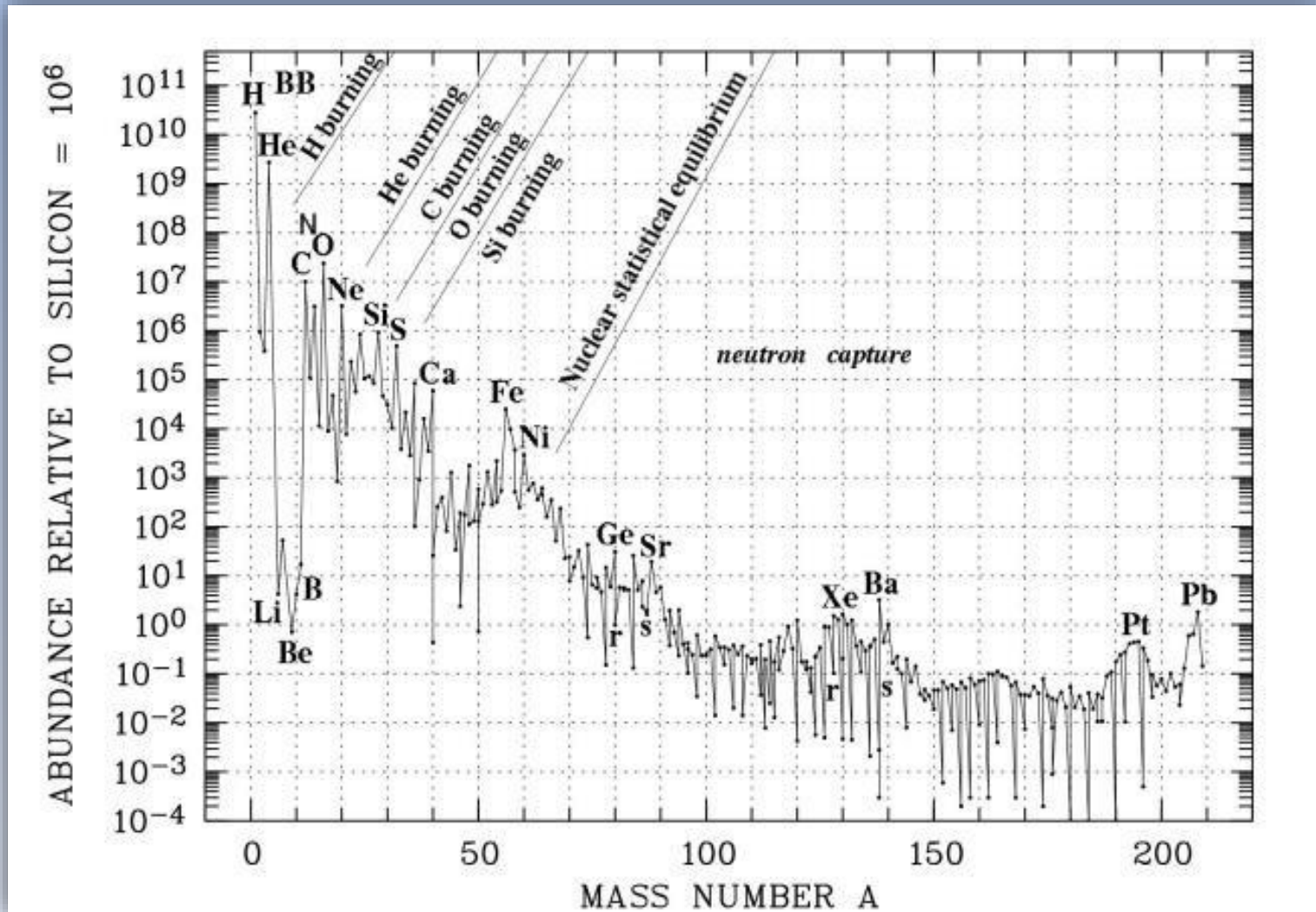
- **księżyce** – większość planet i niektóre mniejsze obiekty posiadają księżyce, z których część ma orbity o obiegu prostym w prawie płaszczyźnie planet
- **pierścienie** – planety-olbrzymy posiadają pierścienie, ich orbity są równikowe, obieg prosty i znajdują się w strefie Roche'a
- **meteoryty** – 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

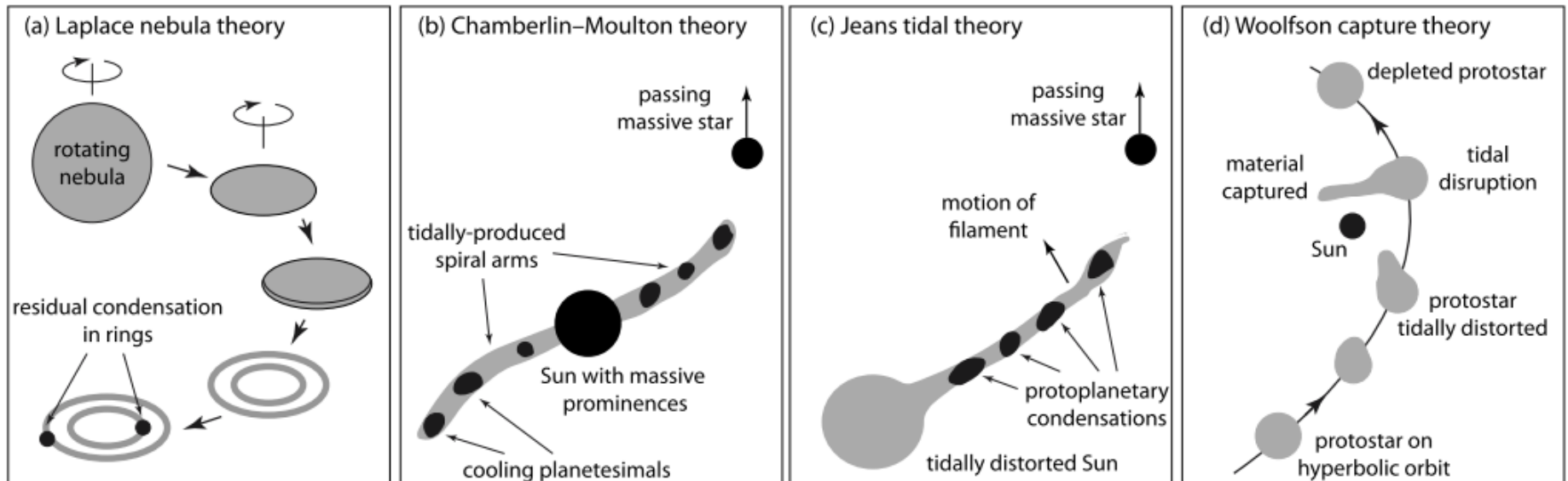
Do powstania układu planetarnego potrzebne są pierwiastki i to głównie cięższe niż H i He, których dostarcza ewolucja gwiazd.



Powstawanie układów planetarnych

Powstanie Układu Słonecznego, teorie historyczne

- Pierwsze naukowe teorie powstanie Układu Słonecznego pojawiają się na początku XVIII w.
- Model Laplace'a dominował w XIX w., zarzucony na początku XX w.
- W XX w. pojawia się szereg innych teorii (wybrane poniżej).
- Pod koniec lat `70 XX w. wraca model Laplace'a w nowej formie – planety powstają w dysku otaczającym nowopowstającą gwiazdę.



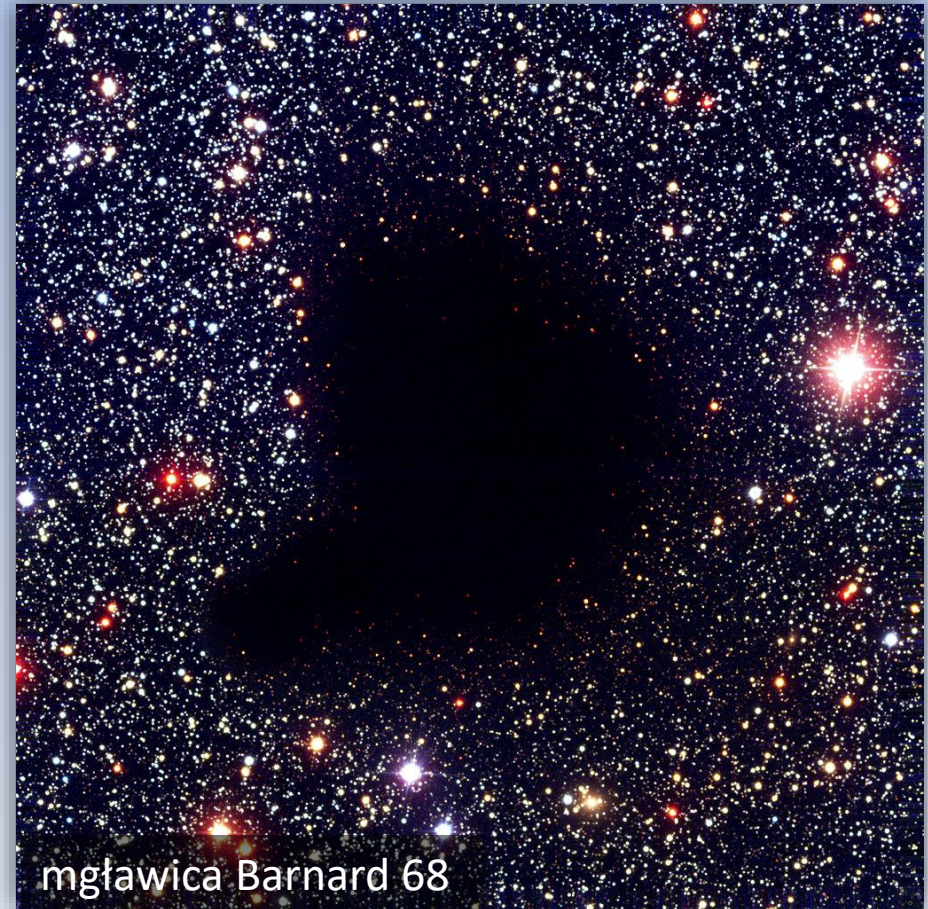
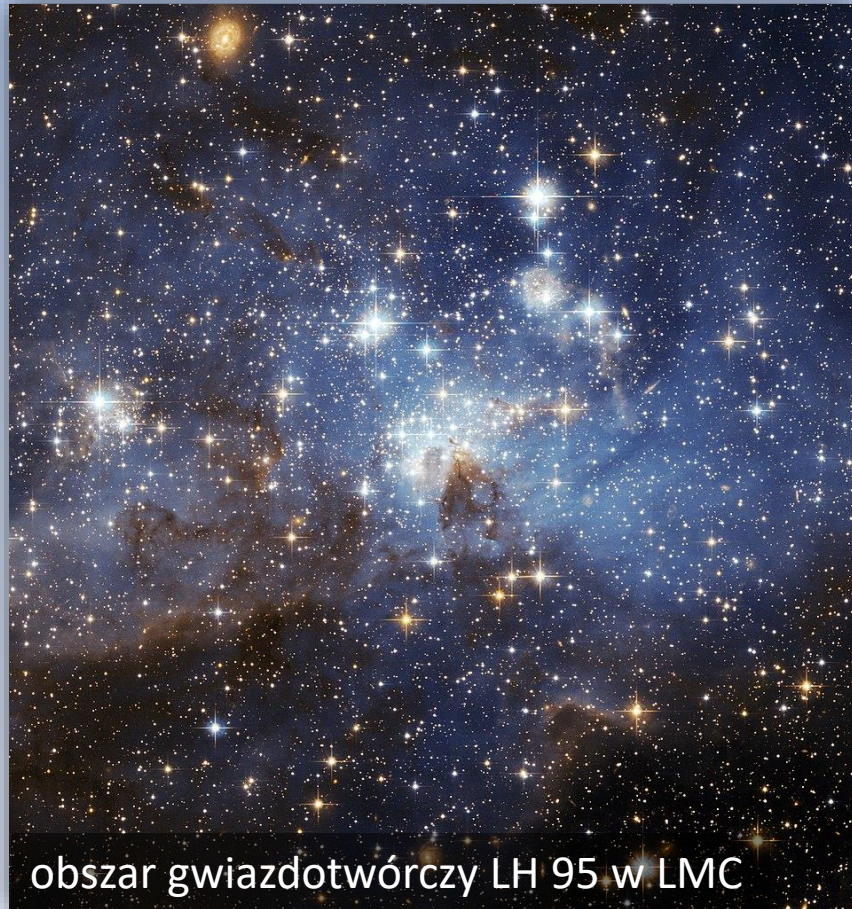
Powstawanie układów planetarnych

Początek: obłok molekularny

Miejsce 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

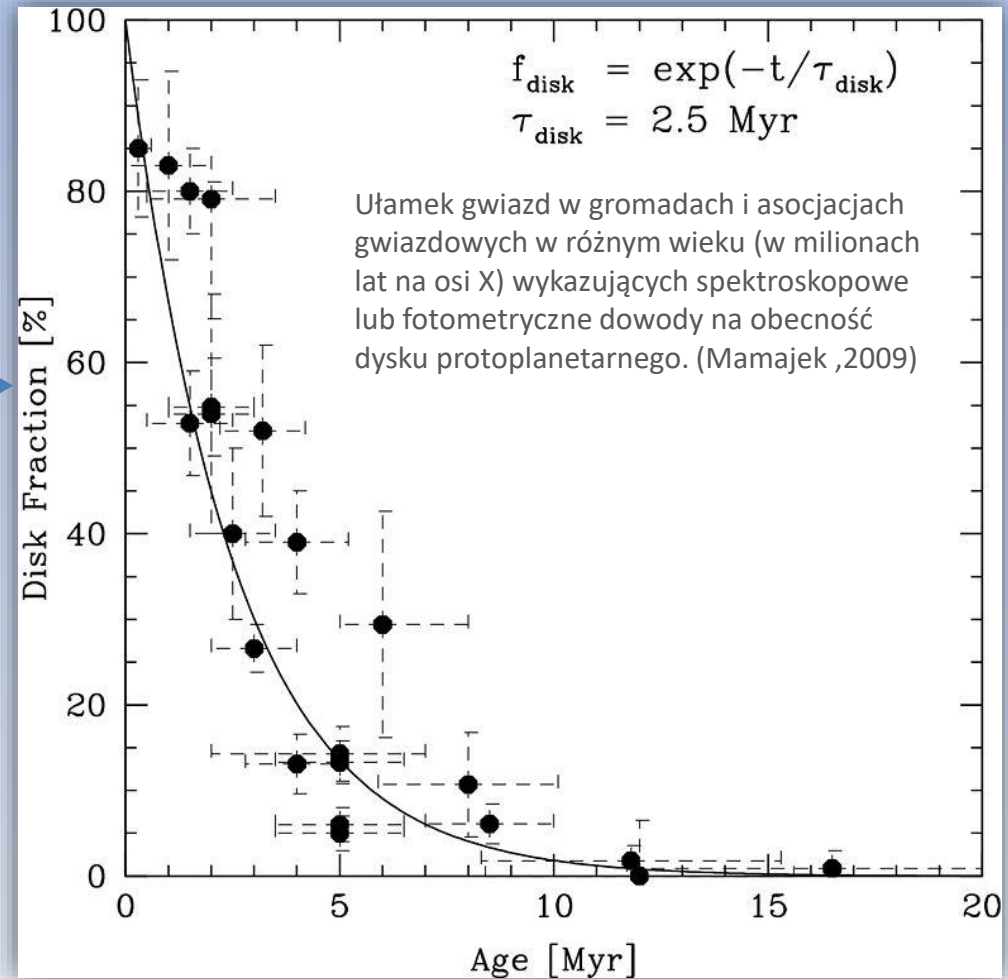


Powstawanie układów planetarnych

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 lub mniej. To czas dostępny do formowania się planet.



Powstawanie układów planetarnych

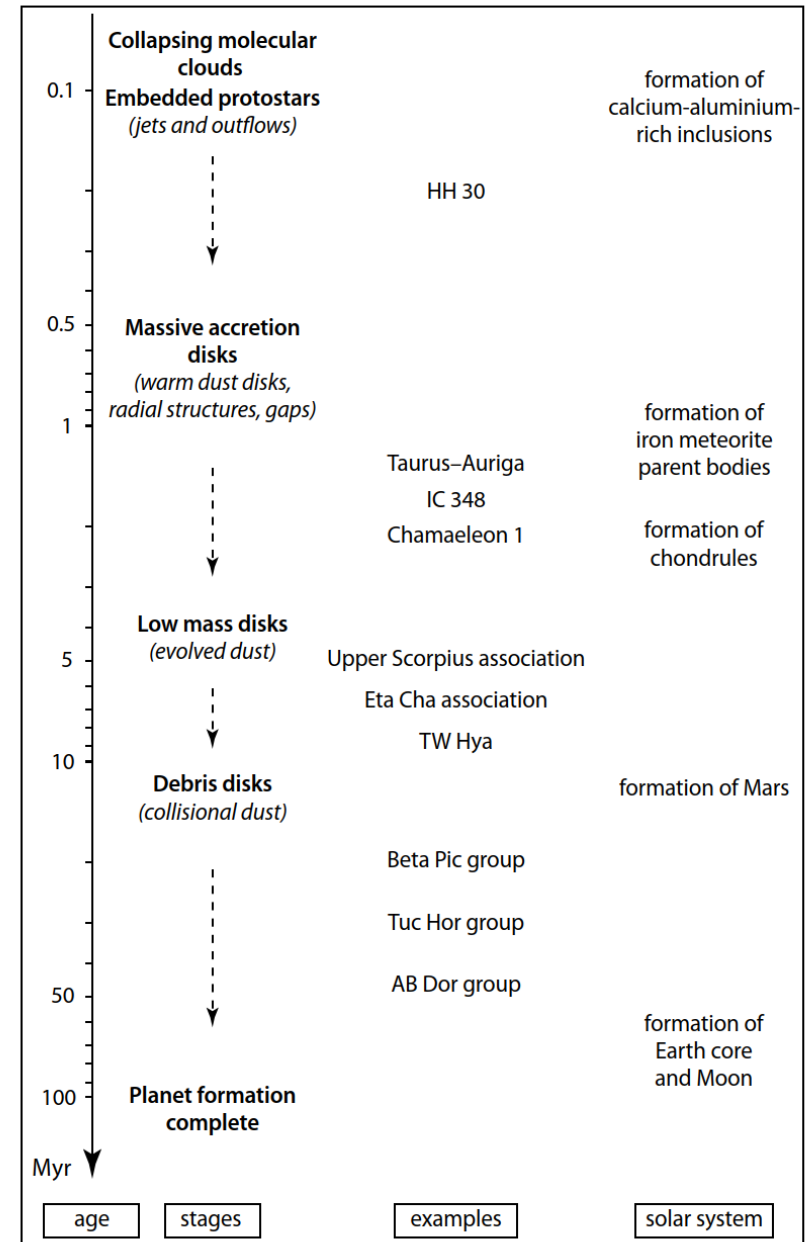
od dysku do planet

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.

Chronologia wczesnych etapów formowania planet, począwszy od arbitralnie wybranego momentu początkowego, przedstawiająca niektóre główne etapy ewolucyjne, wybrane reprezentatywne przykłady obserwacyjne oraz konkretne zdarzenia istotne dla Układu Słonecznego (Apai & Laretta, 2010).

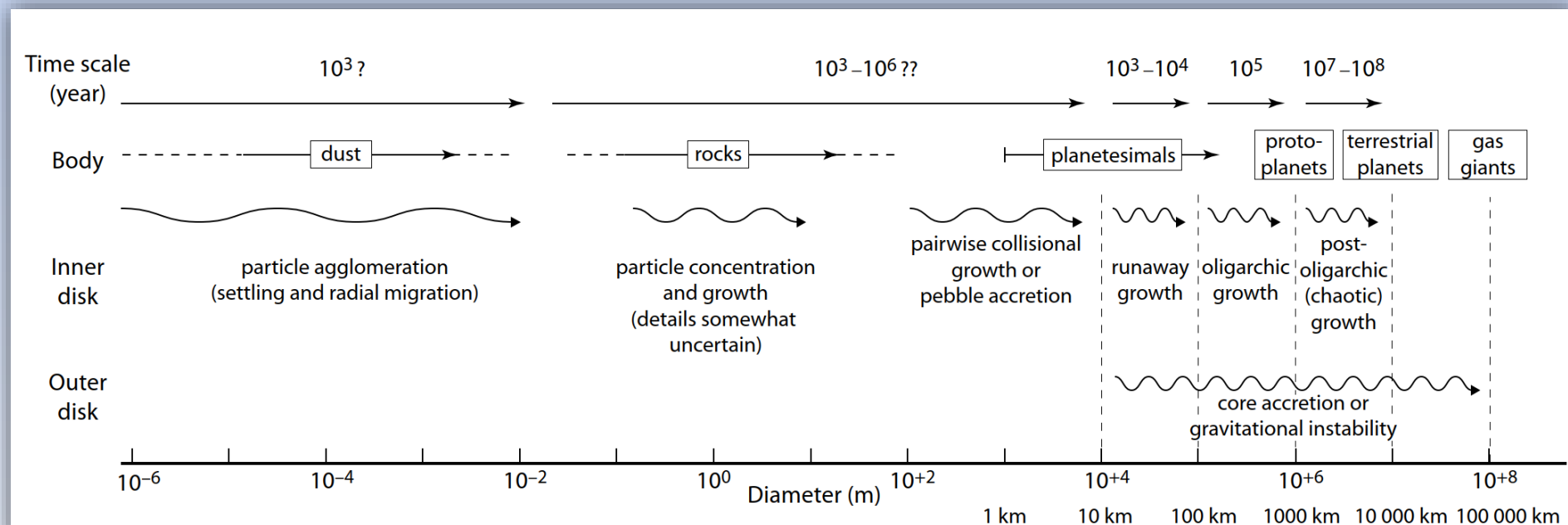


Powstawanie układów planetarnych

Etapy powstawania układu planetarnego

- etap 1: zlepienie ziaren pyłu do obiektów (agregatów) o rozmiarze ~ 1 cm (siły van der Waalsa), szczególnie za linią śniegu (migracja i koncentracja około linii śniegu)
- etap 2: wzrost od cm do km (planetozymale) – etap problematyczny do wyjaśnienia (bariera fragmentacji), możliwy proces: niestabilność strumieniowa i linia śniegu pozwala na dalszy wzrost agregatów do planetozymali (>100 m – kilkaset km)
- etap 3: łączenie planetozymali do protoplanet i planet (pebble accretion)

Schemat wzrostu planet, rozpoczynający się od submikronowego pyłu i rozciągający się aż do planet skalistych w wewnętrznym dysku oraz gazowych olbrzymów w zewnętrznym dysku. Podano przykładowe skale czasowe, choć niektóre przedziały, zwłaszcza w okolicach bariery fragmentacji (rzędu 1 m), pozostają szczególnie niepewne (Perryman, 2018).



Powstawanie układów planetarnych

Według nowych badań:

Przemieszczanie się w dysku protoplanetarnym linii śniegu przesuwa proces akrecji radialnie po dysku, zwiększając jej efektywność.

Planetozymale formują się w dwóch generacjach: I – uboga w wodę powstaje jeszcze na etapie formowania się dysku (oddalanie się linii śniegu od gwiazdy), II – zawiera stosunkowo dużo wody i powstaje później (przybliżanie się linii śniegu do gwiazdy).

więcej Lichtenberg+ 2021, www.science.org/doi/10.1126/science.abb3091

Dla zainteresowanych ciągiem dalszym:
„Jak formował się Układ Słoneczny. Nowa teoria powstawania planet”, Joanna Drążkowska
Urania PA, 5/2021

