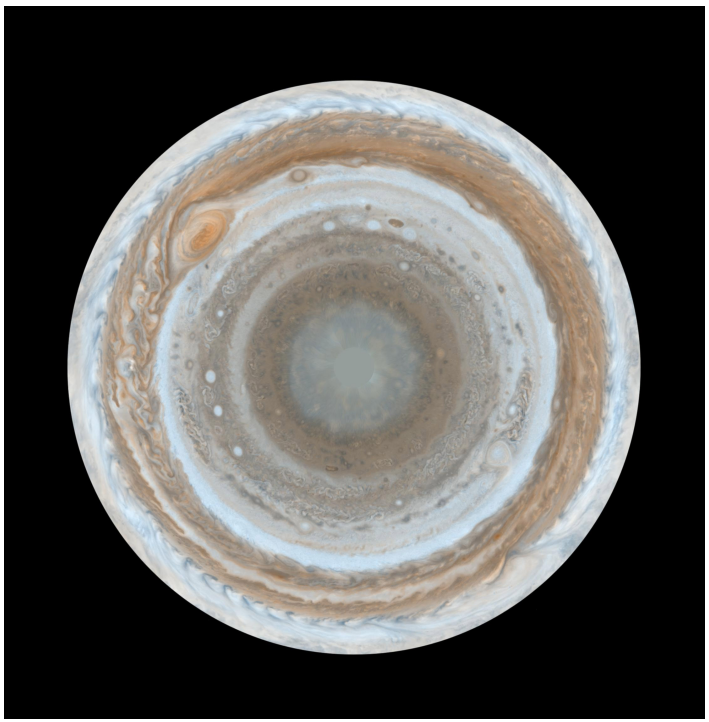
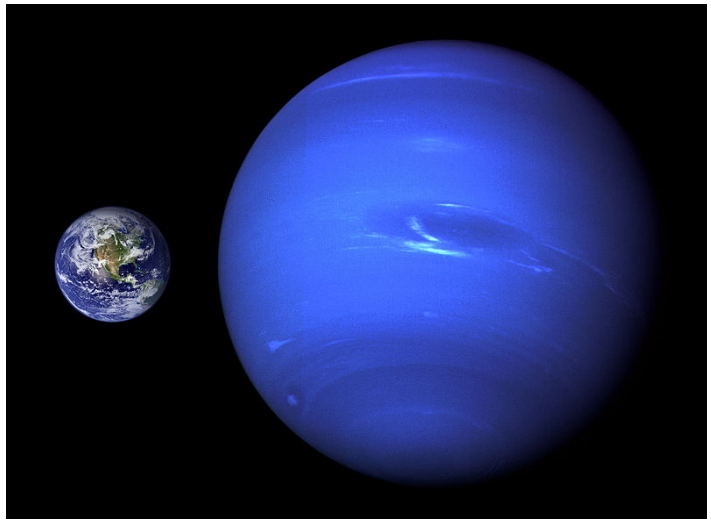
Образование планет

15 ноября 2017 г.



Cassini (NASA)



Voyager (NASA)

Газовая оболочка вокруг протопланеты

Минимальный радиус протопланеты с газовой оболочкой:

$$R_p \gtrsim \delta R_* \left(\frac{\rho_*}{\rho_m}\right)^{1/2} \left(\frac{R_*}{r}\right)^{1/2}.$$

Радиус ядра планеты, при котором размер ее статической оболочки сравнивается с полутолщиной газового диска:

$$R_p = \delta R_* \left(\frac{\rho_*}{\rho_m}\right)^{2/3}.$$

Радиус ядра планеты с массивной статической изотермической газовой оболочкой.

$$\frac{dP}{dR} = -\frac{GM_p}{R^2}\rho \quad \Rightarrow \quad h_{atm} = \frac{R_p^2}{r_g}.$$

Пусть $M_e \gtrsim \epsilon M_p$:

$$R_p \gtrsim \delta R_* \left(\frac{\rho_*}{\rho_m}\right)^{1/2} \left[\ln\left(\frac{\epsilon}{3e}\right)\right]^{1/2} \left(\frac{R_*}{r}\right)^{1/2}.$$

Система уравнений, описывающая строение квази-статической газовой оболочки в предположении:

- Нагрева планетезимальной аккрецией с выделением всего тепла на поверхности протопланеты.
- Радиативного охлаждения.
- Идеального газа.

$$\frac{dM}{dR} = 4\pi R^2 \rho,$$
$$\frac{dp}{dR} = -\frac{GM}{R^2}\rho,$$
$$\frac{dT}{dR} = -\frac{3\kappa_R \rho}{16\sigma T^3}\frac{L}{4\pi R^2},$$
$$p = \frac{k}{\mu m_H}\rho T,$$
$$L = \frac{GM_p}{R_p}\dot{M}_{pl}.$$

p, ρ, T - давление, плотность и температура вещества в оболочке.
$M(R), M_p$ - лагранжева масса в оболочке и масса протопланеты (будущего ядра планеты).
$\dot{M}_{pl}$ - заданный темп аккреции планетезималей.
κ_R, L - росселандова непрозрачность и светимость.

Аналитическая оценка максимально возможной массы оболочки
Stevenson (1982).

Полная масса планеты:

$$M_t = M_e + M_p.$$

$$M_e = \frac{256\pi^2\sigma}{3\kappa_R L}\left(\frac{\mu m_H G M_t}{4k}\right)^4 \ln\left(\frac{r_g}{R_p}\right).$$

$$\Rightarrow \quad M_t = M_p + \left(\frac{C}{\kappa_R \dot{M}_{pl}}\right)\frac{M_t^4}{M_p^{2/3}}.$$

Условие $dM_p/dM_t = 0$ дает критическую массу:

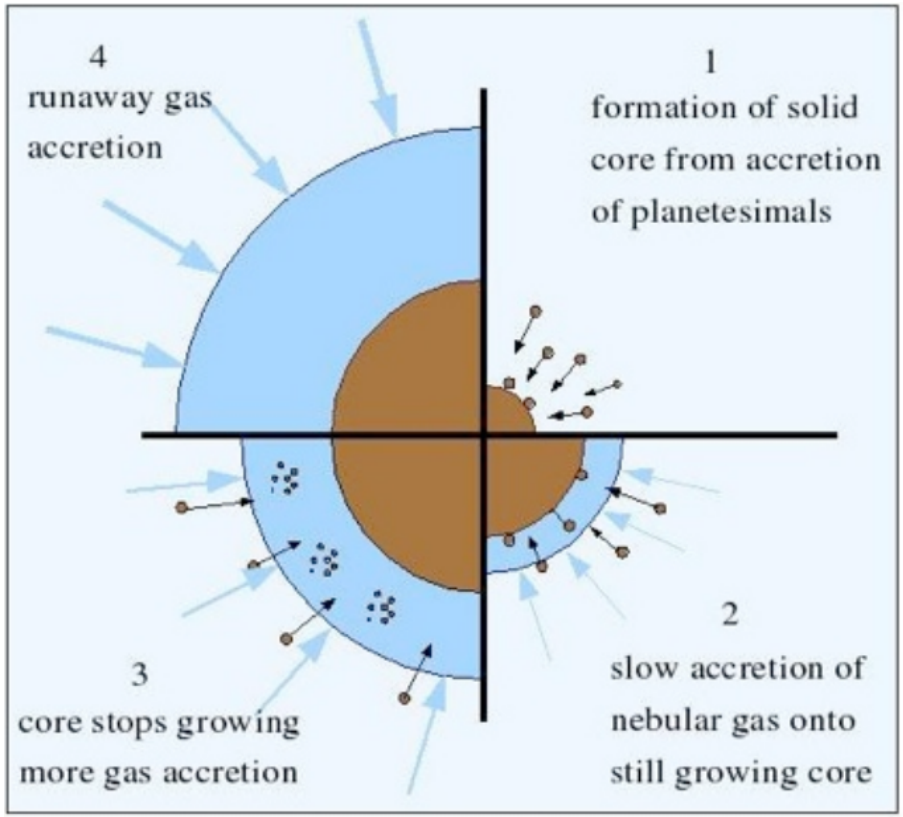
$$M_p^{crit} \simeq 0.4\left(\frac{\kappa_R \dot{M}_{pl}}{C}\right)^{3/4}.$$

В зависимости от модели непрозрачности точные расчеты дают для $r \sim 5$ а.е.

$$M_p^{crit} = 5 \div 15 M_\oplus.$$

Стадии роста планеты-гиганта

- Рост эмбриона.
- Совместный рост ядра и встроенной оболочки (охлаждение полностью компенсируется планетезимальной аккрецией).
- Рост встроенной оболочки за пределами M_p^{crit} (охлаждение компенсируется уплотнением оболочки).
- Взрывной рост обособленной оболочки (охлаждение компенсируется сжатием оболочки).
- Эволюция изолированной оболочки планеты-гиганта.



Из курса Mordasini.

Обобщение модели:

- Баланс энергии в общем виде

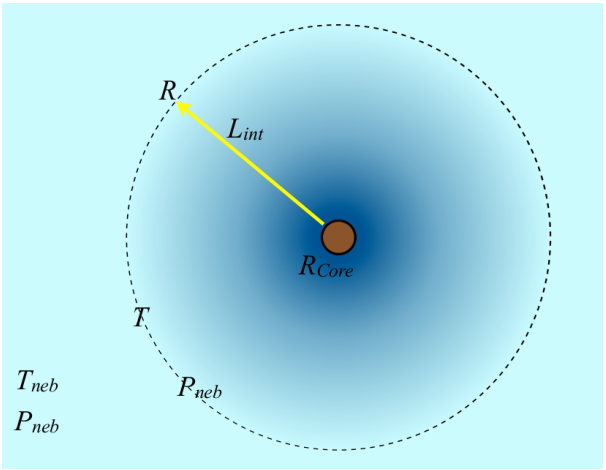
$$\frac{dL}{dR} = 4\pi R^2 \rho \left(\epsilon - T \frac{\partial S}{\partial t} \right)$$

- Учет возможной конвекции в теплопереносе

$$\nabla_{rad} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_{rad} = \frac{3\kappa_R p}{64\pi\sigma GMT^4}, \quad \nabla_{ad} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_S .$$

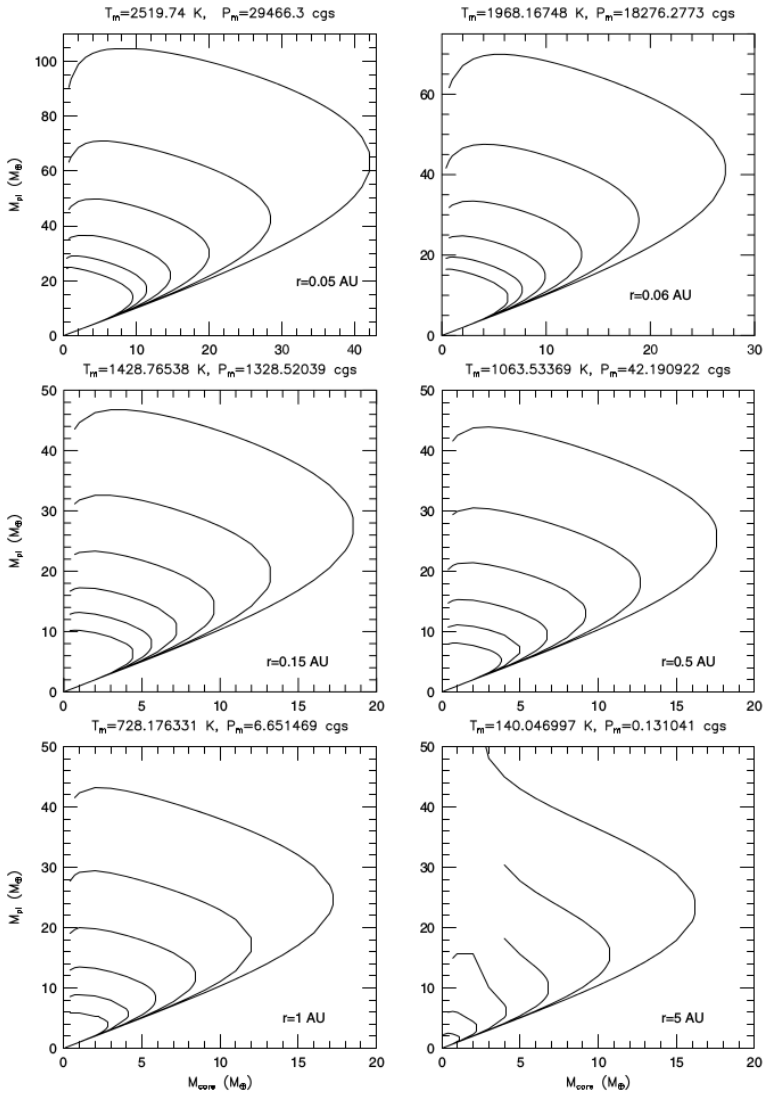
При $\nabla_{rad} > \nabla_{ad} \Rightarrow L = L_{rad} + L_{conv}$.

- Граничные условия
  а) На R_p: $M(R_p) = M_p$.
  б) На $\min\{r_g, r_H\}$: $M_t = M_p + M_e$, p, ρ, T равны значениям в диске.
  в) Свободная внешняя граница для модели обособленной оболочки.



Из курса Mordasini.

Papaloizou & Terquem (1999).

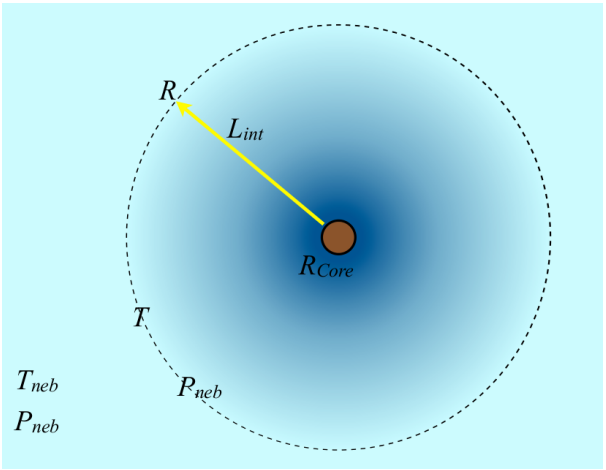


1) Модель стандартного стационарного диска
$\alpha = 10^{-2}$ и $\dot{M} = 10^{-7} M_\odot$/год.

2) Внешняя граница оболочки на r_H.

3) Слева направо:
$\dot{M}_{pl} = 10^{-11, -10, -9, -8, -7, -6} M_\oplus$/год.

4) $M_t = f(M_p(t))$.



Из курса Mordasini.

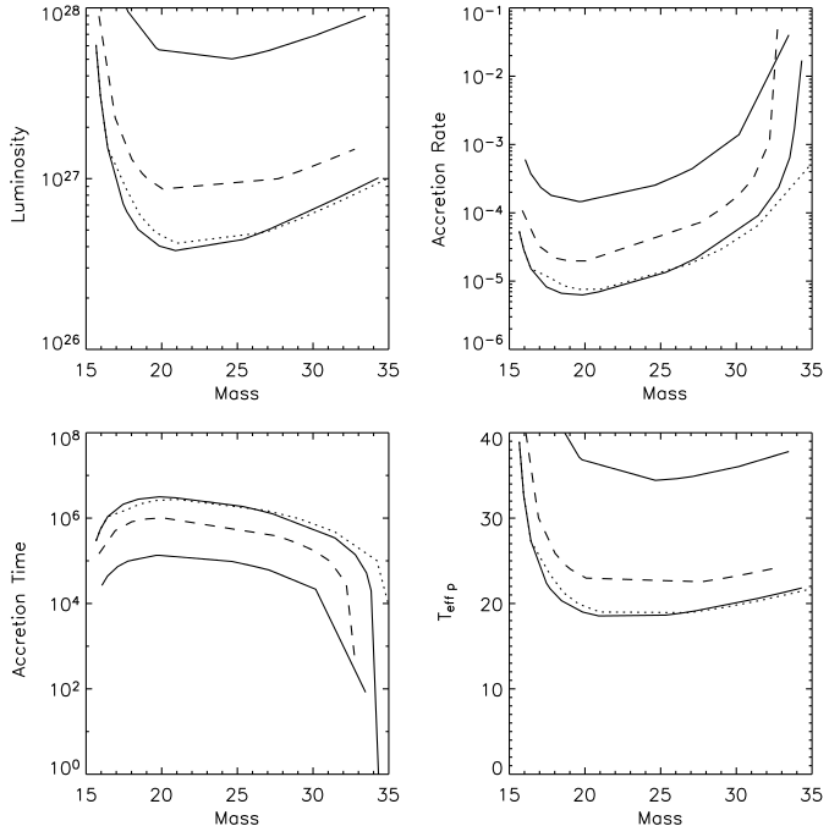
1) Модель стандартного стационарного диска
$\alpha = 10^{-3}$ и $\dot{M} = 10^{-7} M_\odot$/год.
vspace0.2cm
2) Внешняя граница оболочки на r_H.

3) Аккреции планетезималей нет.

4) Интегральный баланс энергии:

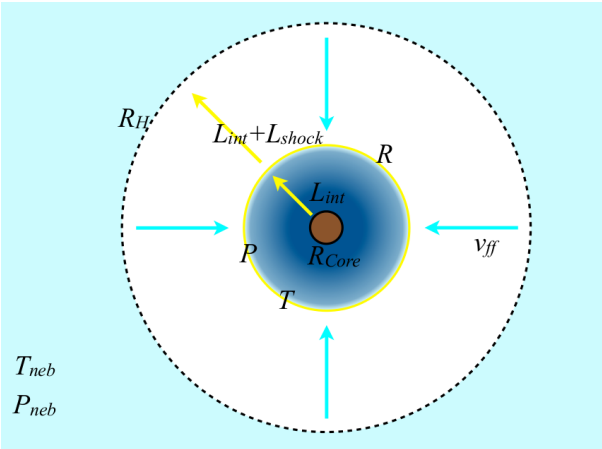
$$\frac{dE}{dM_t}\frac{dM_t}{dt} = -L, \quad \dot{M}_t \text{ - считается.}$$

Papaloizou & Nelson (2005).



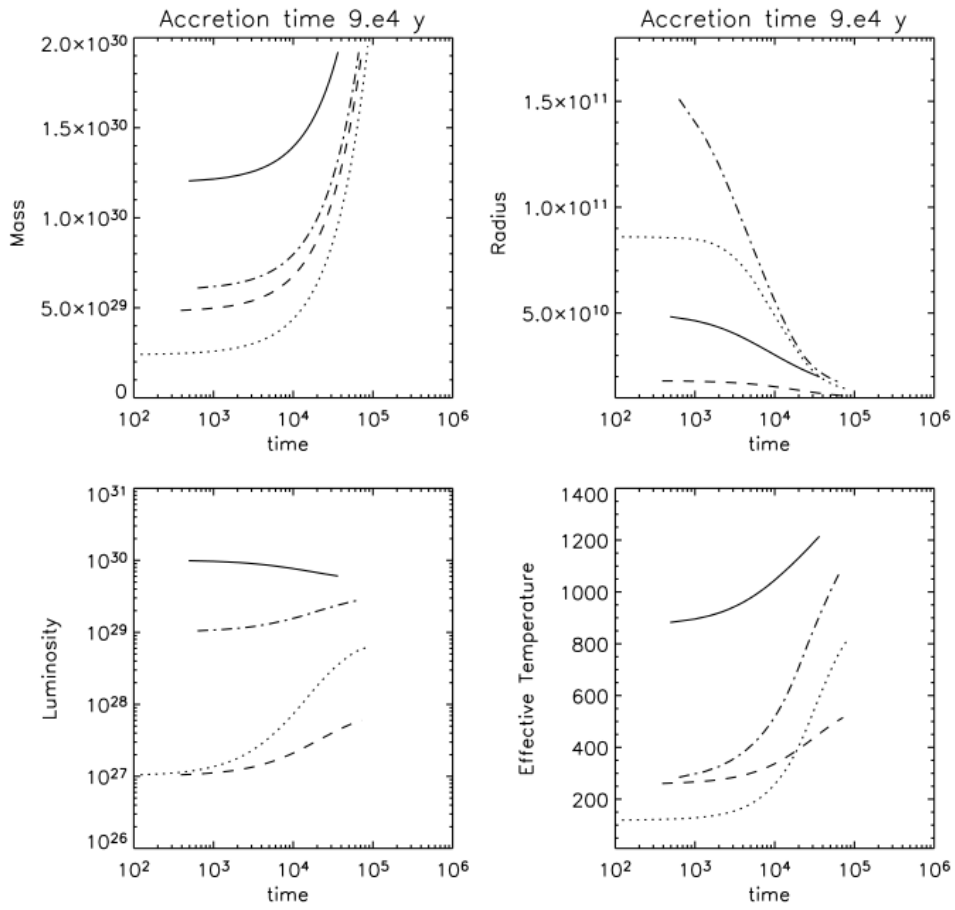
5) $r = 5$ а.е., $M_p = 15 M_\oplus$,
Темп аккреции дан в $M_\oplus$/год,
характерное время аккреции - в годах.

Рождение газовых гигантов: стадия обособленной оболочки



Из курса Mordasini.

Papaloizou & Nelson (2005).



1) Модель стандартного стационарного диска $\alpha = 10^{-3}$ и $\dot{M} = 10^{-7} M_\odot$/год.

2) Внешняя граница оболочки, r_s - свободная, $M_p = 15 M_\oplus$.

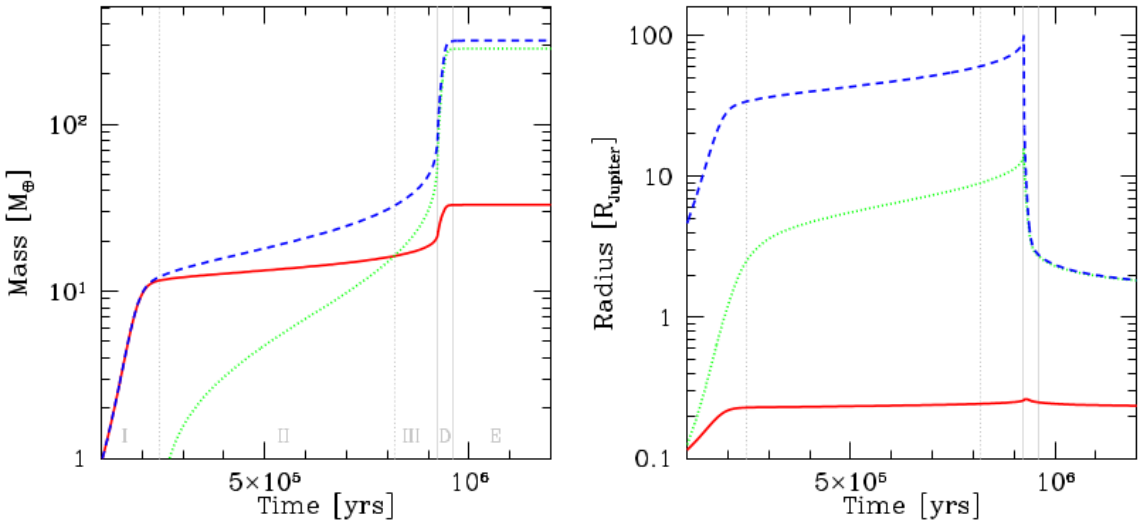
3) Аккреции планетезималей нет.

4) Интегральный баланс энергии:

$$\left[\frac{\partial E}{\partial M_t} + \frac{G M_t}{r_s}\right] \frac{dM_t}{dt} + \frac{\partial E}{\partial L}\frac{dL}{dt} = -L.$$

5) $r = 5$ а.е., $\dot{M}_t = 1 M_J / 9 \times 10^4$ лет.

'In situ' formation: Mordasini et. al (2012)



Факторы, влияющие на скорость образования гиганта:

- Непрозрачность (чем ниже, тем быстрее происходит набор массы).
- Конвекция (ускоряет отвод темпа).
- Химсостав (молекулярный вес μ).
- Темп аккреции ($\dot{M}_{pl}$ & $\dot{M}_t$).
- Миграция.

*Вопросы эволюции сформировавшегося газового гиганта...

Прямое образование газовых гигантов

Гравитационная неустойчивость протопланетного диска

Работает в массивных дисках.

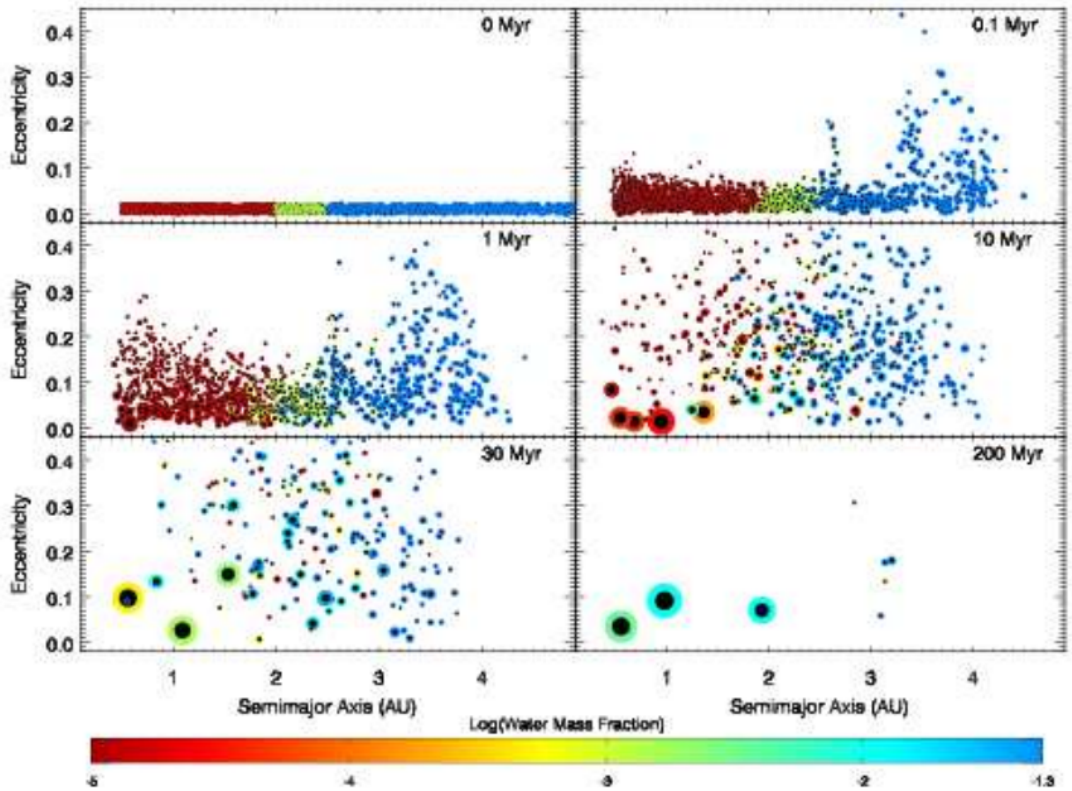
Скорее всего является причиной существования самых массивных газовых гигантов в неск. масс Юпитера на периферии планетных систем.

Образование ледяных гигантов

Ледяные гиганты - планеты, которым 'не хватило времени'.

Осыпная аккреция (peeble accretion).

Raymond et. al (2006)



1) Задача N-тел в диске из 2000 планетных эмбрионов.
2) Учет перераспределения воды.
3) $\Sigma_p \propto r^{-3/2}$, $\Sigma_p(1\,\text{а.е.}) = 10\,\text{г/см}^2$,
4) Юпитер присутствует в поздние 100 млн. лет на $r = 5.5\,\text{а.е.}$