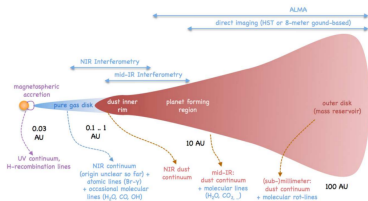


Структура и эволюция протопланетных дисков

27 сентября 2018 г.



Dullemond & Monnier (2010).

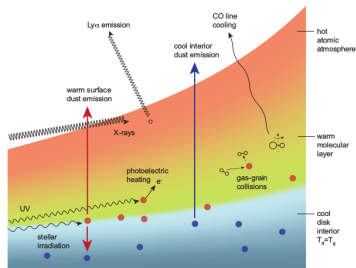
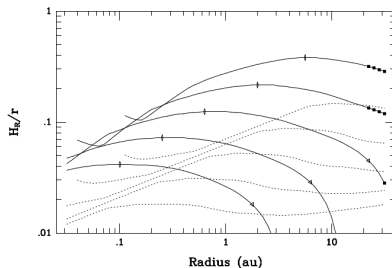
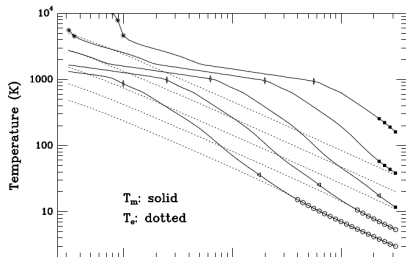


Fig. 5 Illustration of some of the physical processes determining the temperature and emission properties of irradiated protoplanetary disks.

Armitage (2015).

Стандартная модель стационарного диска.

Bell et. al (1997)

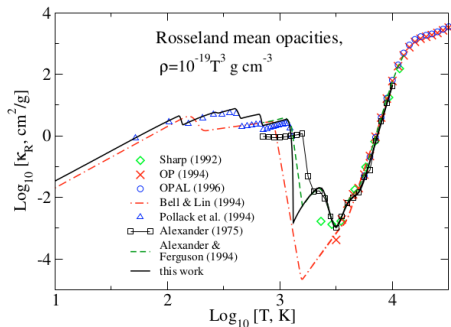


$$\alpha = 0.01, \quad \dot{M} = 10^{-9}, -8, -7, -6, -5.$$

- Аналитическая аппроксимация непрозрачности: $\kappa_R = \kappa_0 n \rho^{\alpha n} T^{\beta n}$ (Henning & Stognienko, 1996).
- Диск не раздувается за снеговой линией: $\delta = h/r$ падает, т.к. $\kappa \propto T^2$.
- При большом $\dot{M}$ внешние части диска гравитационно-неустойчивы по критерию Тоомре: $Q < 1$.

Точный профиль росселандовой непрозрачности.

Semenov et. al (2003).



Распределение пылинок по размерам
Pollack et. al (1985):

$$n(s) = 1, s < 0.005 \mu m$$

$$n(s) = \left(\frac{s}{0.005 \mu m} \right)^{-3.5}, 0.005 \leq s < 1 \mu m$$

$$n(s) = 4 \times 10^4 \left(\frac{s}{0.005 \mu m} \right)^{-5.5}, 1 \mu m \leq s < 5 \mu m$$

$$n(s) = 0, s \geq 5 \mu m.$$

Необходимо учитывать:

- Эволюцию $\Sigma(r, t)$.
- Эволюцию пыли (изменение непрозрачности).
- А кроме этого...

Прогрев диска звездой.

- Модель бесконечно тонкого диска:

$$\frac{T_d^4}{T_*^4} = \frac{1}{\pi} \left[\sin^{-1} \tilde{R}_* - \tilde{R}_* (1 - \tilde{R}_*^2)^{1/2} \right], \quad \text{где } \tilde{R}_* \equiv R_*/r.$$

При $\tilde{R}_* \ll 1 \Rightarrow T_d \propto r^{-3/4}$.

$$L_d = 2 \times \int_{R_*}^{\infty} 2\pi r \sigma T_d^4 dr = \frac{L_*}{4} \simeq \frac{GM_* \dot{M}}{2R_*} \text{ при } \dot{M} \simeq 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}.$$

- Самосогласованная модель пассивного диска конечной толщины:
При $\tilde{R}_* \ll 1 \Rightarrow T_d \rightarrow r^{-1/2}$.

Kenyon & Hartmann (1987).

Числовая оценка:

$$T_d \simeq 150 \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \right)^{-1/2} \left(\frac{R_*}{R_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_*}{T_{\odot}} \right) \text{ К.}$$

Температурный профиль из наблюдений.

Beckwith et. al (1990). $T \propto r^{-q}$.

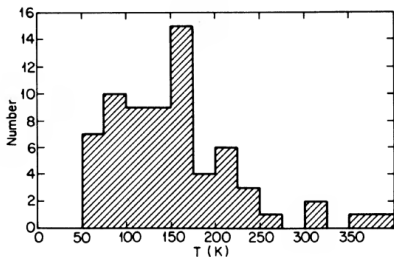


FIG. 7. Distribution of disk temperatures at 1 AU for the stars with known infrared flux densities.

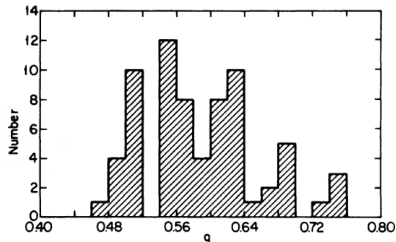


FIG. 8. Distribution of temperature power law indices q . It is noteworthy that none of the stars has q significantly less than 0.5, and only three stars have an index $q \approx 0.75$ expected for a pure accretion or reprocessing disk.

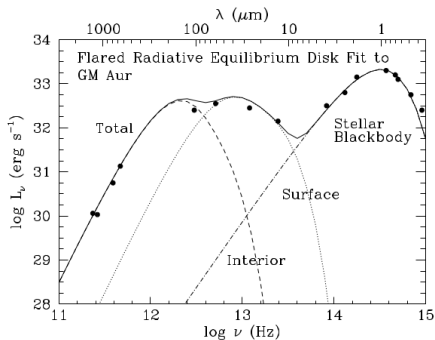
Самосогласованная двухтемпературная модель пассивного диска:

Chiang & Goldreich (1997).

- Облучаемая звездой пыль перегревается $\Rightarrow F_* < \sigma T_d^4$.
- Верхний слой пыли прозрачен для излучения с $T_i < T_d$.
- $M = 0.5M_\odot$, $R_* = 2.5R_\odot$, $T_* = 4000$.
- $\Sigma = 10^3 (r/1\text{a.e.})^{-3/2} \text{ г/см}^2$, $f_d \equiv \rho_d/\rho_g = 10^{-2}$.
- $T_d = 550 \left(\frac{r}{1\text{a.e.}}\right)^{-2/5} \text{ К}$.
- $T_i = 150 \left(\frac{r}{1\text{a.e.}}\right)^{-3/7} \text{ К}$.
- $\frac{h_p}{r} = 0.17 \left(\frac{r}{1\text{a.e.}}\right)^{2/7}$.

Самосогласованная двухтемпературная модель пассивного диска:

Chiang & Goldreich (1997).



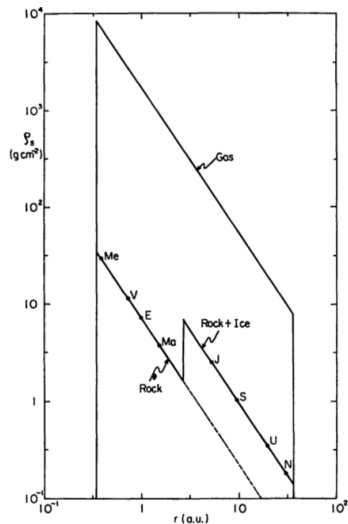
Солнечный диск минимальной массы:

Hayashi (1981).

$$\Sigma = 1.7 \times 10^3 \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \right)^{-3/2} \text{ г/см}^2.$$

$$\Sigma_d = 7.1 \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \right)^{-3/2} \text{ г/см}^2 \text{ при } r < 2.7 \text{ a.e.}$$

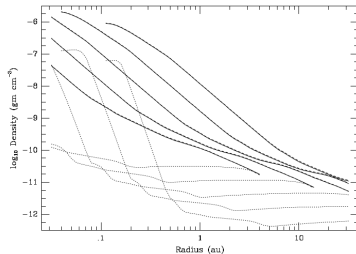
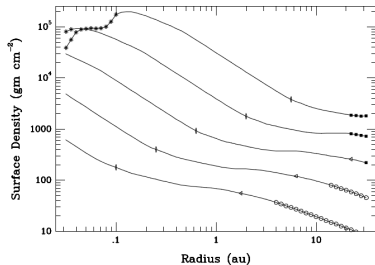
$$\Sigma_d = 30 \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \right)^{-3/2} \text{ г/см}^2 \text{ при } r > 2.7 \text{ a.e.}$$



Структура диска: профиль поверхностной плотности

Стандартная модель стационарного диска.

Bell et. al (1997)



$$\alpha = 0.01, \quad \dot{M} = 10^{-9}, -8, -7, -6, -5.$$

Аналитические профили в однозонной аппроксимации (см. прошлую лекцию):

- Для $\kappa = 2 \text{ cm}^2/\text{г}$: $\Sigma \simeq 600 \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \right)^{-3/5} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-7} M_{\odot}/\text{год}} \right)^{3/5} \left(\frac{\alpha}{0.01} \right)^{-4/5} \text{ г/см}^2$
- Для $\kappa = 2.4 \times 10^{-4} T_c^2 \text{ cm}^2/\text{г}$: $\Sigma \simeq 150 \left(\frac{\dot{M}}{10^{-7} M_{\odot}/\text{год}} \right)^{1/3} \left(\frac{\alpha}{0.01} \right)^{-2/3} \text{ г/см}^2$

Стандартная модель стационарного диска с прогревом от звезды:

- Из модели Чанга-Голдрайха:

$$T_c = 150 \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \right)^{-3/7}.$$

- α -параметризация и гидростатическое равновесие:

$$\nu = \alpha c_s^2 \Omega^{-1}.$$

- Сохранение момента импульса:

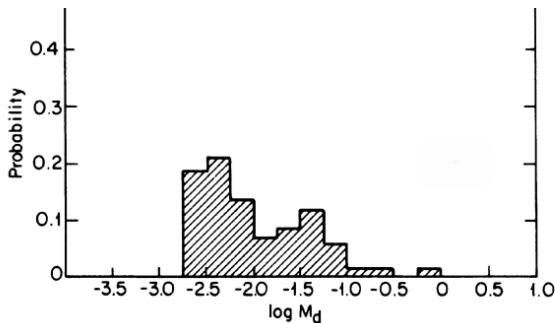
$$\Sigma \nu = \frac{\dot{M}}{3\pi}.$$

•

$$\Rightarrow \Sigma \simeq 250 \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \right)^{-15/14} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-8} M_\odot / \text{год}} \right) \left(\frac{\alpha}{0.01} \right) \text{ г/см}^2.$$

Наблюдения дают $\Sigma \propto r^{-p}$, где $p = 0.5 \div 1.5$ (Williams & Cieza 2011).

По наблюдениям в мм-диапазоне, где диск - оптически тонкий:
Beckwith et. al (1990).



$$F_\nu = \frac{A}{d^2} \kappa_0 \nu^{2+\beta} \int (2\pi r dr) T(r) \Sigma(r),$$

где $\kappa = \kappa_0(\nu/\nu_0)^\beta$. $\beta_{ISM} \simeq 2$, а $\beta_{pd} \simeq 1$: рост пылинок по крайней мере до миллиметрового размера.

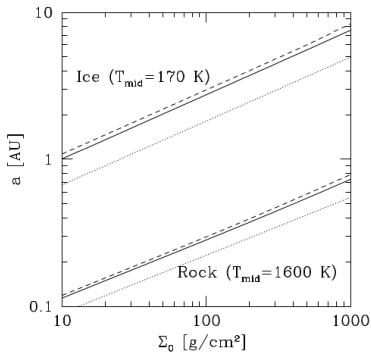


Fig. 1. Position of the iceline a_{ice} as a function of the initial gas surface density Σ_0 at 5.2 AU (upper three lines). It corresponds to an initial T_{mid} of 170 K. The iceline is plotted for three values of α : 0.01 (dashed line), 0.007 (solid line) and 0.001 (dotted line). The lower three lines correspond to an initial T_{mid} of 1600 K, roughly the evaporation temperature of rock. The rockline a_{rock} is however not taken into account in the nominal model, due to the difficulty in defining its relevant location, as disk evolution is very rapid close-in and irradiation effects might be important (cf. Paper II).

Mordasini et. al (2009).

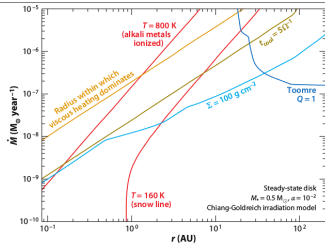


Figure 2

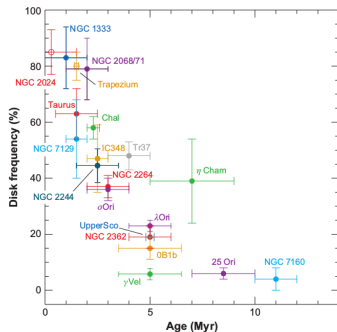
Illustration of how critical disk radii, delimiting different physical regimes relevant to angular momentum transport and planet formation, scale with accretion rate $\dot{M}$. Temperatures are midplane values, the cooling timescale is defined as $t_{cool} = \Sigma c_p^2 / 2\sigma T_{eff}^4$, and the Toomre Q parameter is $Q = c_s \Omega_K / \pi G \Sigma$. The plot is based upon a one-zone vertical model (calculated as described, e.g., by Frank, King & Raine 2002) of a steady-state α disk around a $0.5 M_\odot$ star, where $\alpha = 10^{-2}$. The opacity includes contributions from water ice, amorphous carbon, silicates, and graphite (Z. Zhu, private communication). The calculation is approximate: The radial dependence of stellar irradiation is assumed to follow the Chiang & Goldreich (1997) form, independent of both time and disk accretion rate.

Armitage (2011).

Эволюция диска: аккреция на звезду

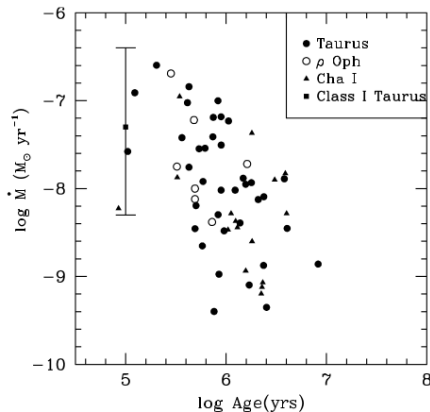
Данные по молодым звездам в скоплениях:

характерное время жизни
протопланетных дисков 3-5 млн. лет.



Wyatt (2008).

- 1) Оценка $\dot{M}$ по УФ-избытку звезд Тельца в модели колонковой аккреции.
- 2) Возраст звезд - по диаграмме Г-Р.



Calvet et. al (2000).

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \right]. \quad (*)$$

Lynden-Bell & Pringle (1974).

- Частный случай $\nu \propto r^\gamma$,
- Начальное $\Sigma(t=0, r)$ дается стационарным решением с экспоненциальным обрезанием на $r = r_1$:

$$\Sigma(t=0) = \frac{C}{3\pi\nu_1 \tilde{r}^\gamma} \exp \left[-\tilde{r}^{(2-\gamma)} \right],$$

где $\tilde{r} \equiv r/r_1$, и $\nu_1 \equiv \nu(r_1)$.

- Автомоделное решение:

$$\Sigma(\tilde{r}, T) = \frac{C}{3\pi\nu_1 \tilde{r}^\gamma} T^{-(5/2-\gamma)/(2-\gamma)} \exp \left[-\frac{\tilde{r}^{(2-\gamma)}}{T} \right], \quad (*)$$

где

$$T \equiv \frac{t}{t_s} + 1$$

$$t_s \equiv \frac{1}{3(2-\gamma)^2} \frac{r_1^2}{\nu_1}.$$

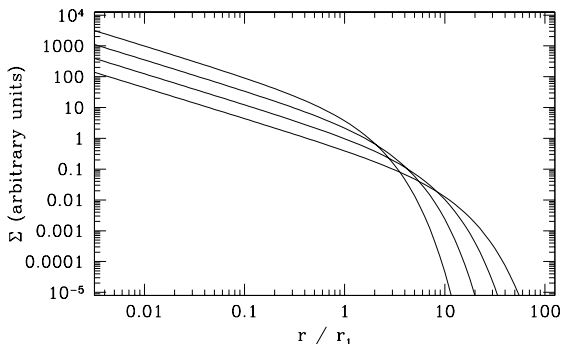
Эволюция диска: аккреция на звезду

Автомодельное решение в частном случае $\gamma = 1$ (например, случай $T_c \propto r^{-1/2}$) $\Rightarrow \dot{M} \propto t^{-3/2}$.

Показаны начальная кривая, соотв. $T = 1$, и кривые, соотв. $T = 2$, $T = 4$ и $T = 8$.

НО: на неск. млн. лет наблюдается завал $\dot{M}(t)$ (нет промежуточных объектов между CTTS & WTTS) !

Armitage (2014).



Эволюция диска: фотоиспарение

Эволюция Σ без фотоиспарения.

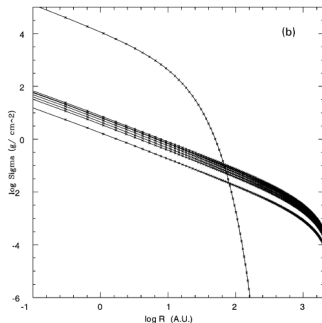
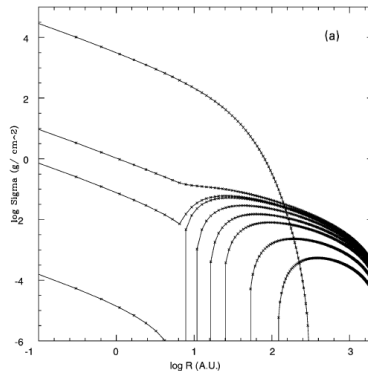


Figure 1. Snapshots of the surface density distribution in the disc (a) for the standard model (see Section 3.1) and (b) for the corresponding model with no photoevaporative mass loss. The curves represent (from the top down), $t = 0, 1.3 \times 10^7, 1.41 \times 10^7, 1.43 \times 10^7, 1.6 \times 10^7, 1.8 \times 10^7, 2.0 \times 10^7, 2.4 \times 10^7, 2.8 \times 10^7$ yr. Note the precipitous decline of the inner disc in (a) over the 2×10^5 -yr time-scale between the third and fourth snapshots.

Clarke et. al (2001).

Эволюция Σ с фотоиспарением.



Clarke et. al (2001).

$r_g = GM/c_s^2$ - граница связанной атмосферы. $c_s \sim 10$ км/с, и $r_g \sim 9$ а.е.