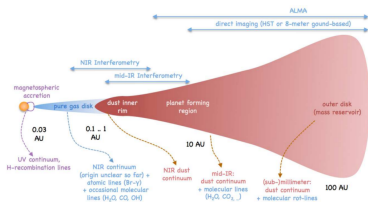


Структура и эволюция протопланетных дисков

4 октября 2017 г.



Dullemond & Monnier (2010).

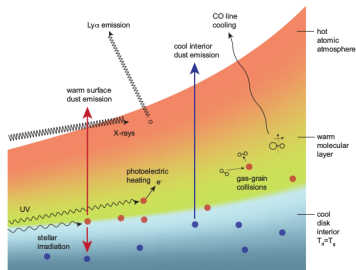
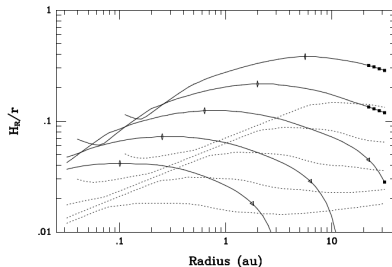
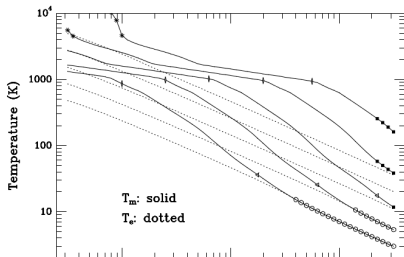


Fig. 5 Illustration of some of the physical processes determining the temperature and emission properties of irradiated protoplanetary disks.

Armitage (2015).

Стандартная модель стационарного диска.

Bell et. al (1997)

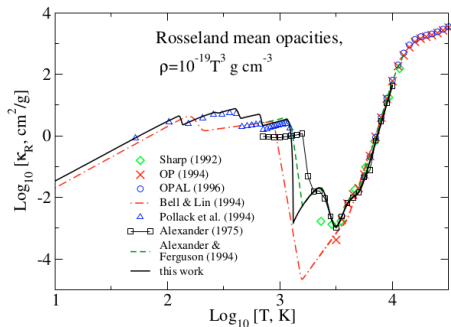


$$\alpha = 0.01, \quad \dot{M} = 10^{-9}, -8, -7, -6, -5.$$

- 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). $T \propto r^{-q}$.

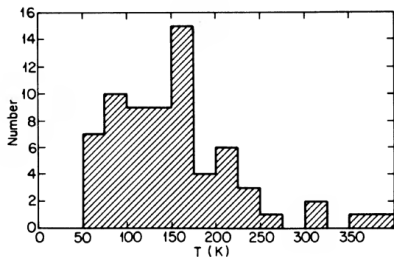


FIG. 7. Distribution of disk temperatures at 1 AU for the stars with known infrared flux densities.

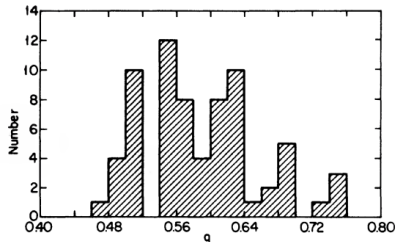


FIG. 8. Distribution of temperature power law indices q . It is noteworthy that none of the stars has q significantly less than 0.5, and only three stars have an index $q \approx 0.75$ expected for a pure accretion or reprocessing disk.

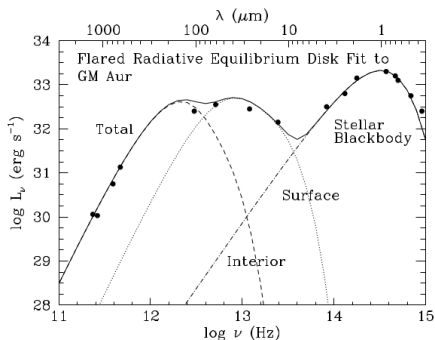
Самосогласованная двухтемпературная модель пассивного диска:

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).



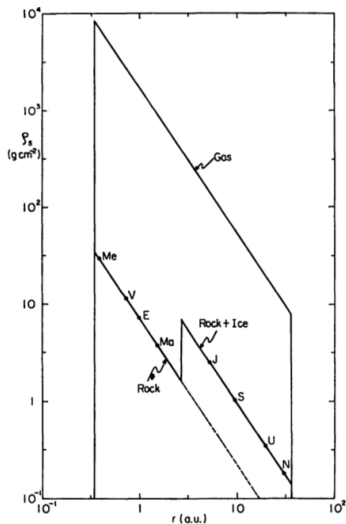
Солнечный диск минимальной массы:

Hayashi (1981).

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

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

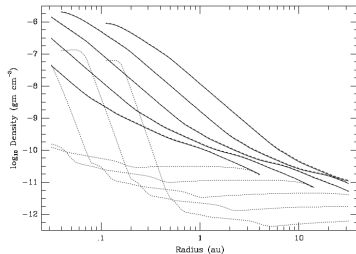
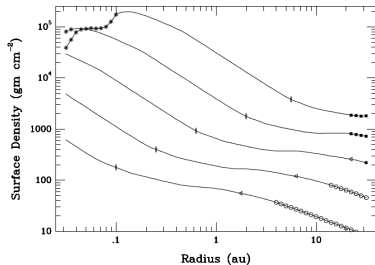
$$\Sigma_d = 30 \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \right)^{-3/2} \text{ г/см}^2 \text{ при } r > 2.7 \text{ a.e.}$$



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:

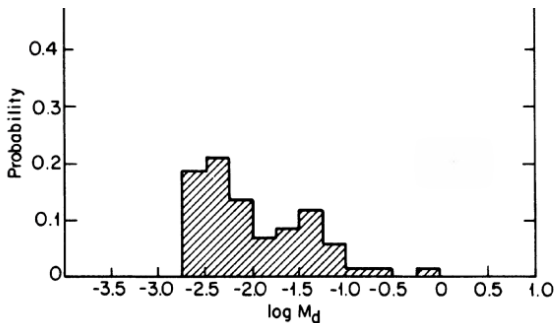
$$\Sigma \nu = \frac{\dot{M}}{3\pi}.$$

-

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

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.

Lodders et. al (2003)

TABLE 7
MAJOR ELEMENT CONDENSATION TEMPERATURES

Ideal Formula	Mineral Name	Solar System Composition (K)	Photospheric Composition (K)
Al ₂ O ₃	Corundum	1677	1665
CaAl ₁₂ O ₁₉	Hibonite	1659	1647
CaAl ₄ O ₇	Grossite	1542	1531
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Gehlenite	1529	1519
CaTiO ₃	Perovskite	1593	1584
Ca ₄ Ti ₃ O ₁₀	Ca titanate	1578	1567
Ca ₃ Ti ₂ O ₇	Ca titanate	1539	1529
Ca ₄ Ti ₃ O ₁₀	Ca titanate	1512	1502
CaTiO ₃	Perovskite	1441	1429
MgAl ₂ O ₄	Spinel	1397	1387
CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Anorthite	1387	1378
Mg ₂ SiO ₄	Forsterite	1354	1346
MgSiO ₃	Enstatite	1316	1308
CaMgSi ₂ O ₆	Diopside	1347	1339
Fe	Fe alloy	1357	1351
Fe ₃ P	Schreibersite	1248	1245
FeS	Troilite	704	693
Fe ₃ O ₄	Magnetite	371	365
H ₂ O	Water ice	182	181

NOTE.—At 10⁻⁴ bar total pressure.

TABLE 10
CONDENSATION TEMPERATURES (K) OF ICES

Compound	Complete Equilibrium	Kinetic Model A ^a	Kinetic Model B ^b
H ₂ O	182	182	182–121
CH ₄ ·7H ₂ O	78	...	...
CH ₄	41	...	...
Graphite	...	626	<626
NH ₃ ·H ₂ O	131	...	...
N ₂ ·7H ₂ O	...	58	58

NOTE.—At 10⁻⁴ bar total pressure. Solar system composition gas. Ellipses indicates that a compound does not form.

^a Model A: Hydrocarbon and H-N gas formation kinetically inhibited.

^b Model B: Hydrocarbon and H-N gas formation kinetically inhibited and graphite precipitation suppressed.

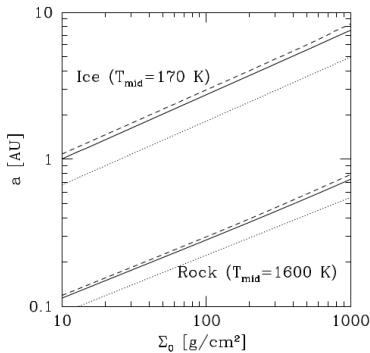


Fig. 1. Position of the iceline a_{ice} as a function of the initial gas surface density Σ_0 at 5.2 AU (upper three lines). It corresponds to an initial T_{mid} of 170 K. The iceline is plotted for three values of α : 0.01 (dashed line), 0.007 (solid line) and 0.001 (dotted line). The lower three lines 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).

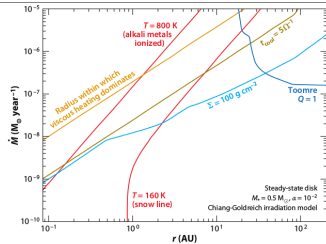


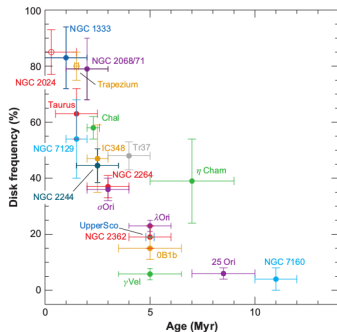
Figure 2

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).

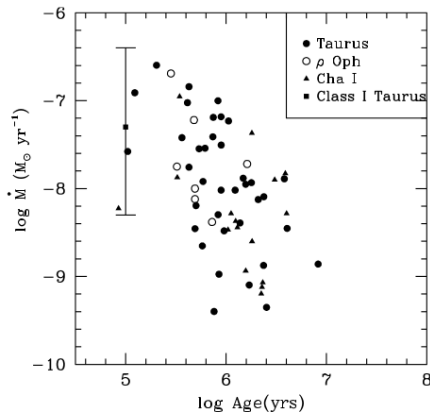
Эволюция диска: аккреция на звезду

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).

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

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

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

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

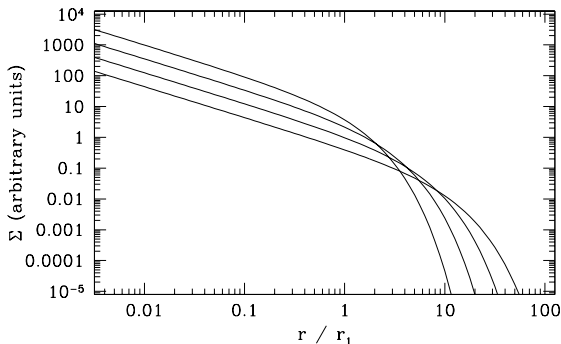
Эволюция диска: аккреция на звезду

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.

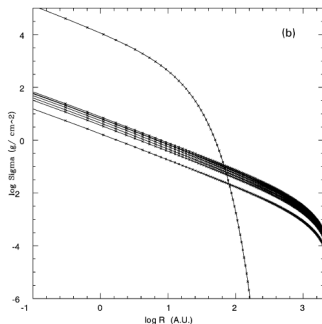
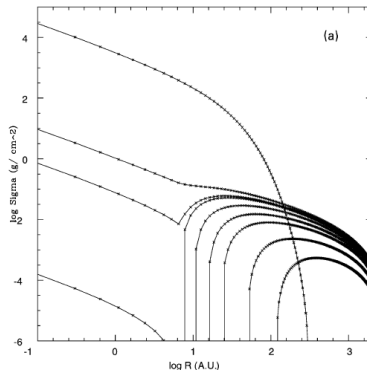


Figure 1. Snapshots of the surface density distribution in the disc (a) for the standard model (see Section 3.1) and (b) for the corresponding model with no photoevaporative mass loss. The curves represent (from the top down), $t = 0, 1.3 \times 10^7, 1.41 \times 10^7, 1.43 \times 10^7, 1.6 \times 10^7, 1.8 \times 10^7, 2.0 \times 10^7, 2.4 \times 10^7, 2.8 \times 10^7$ 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. $c_s \sim 10 \text{ км/с}$, и $r_g \sim 9 \text{ а.е.}$