



Всероссийская конференция с международным участием

Физика звёзд: теория и наблюдения

26-30 июня 2023 года

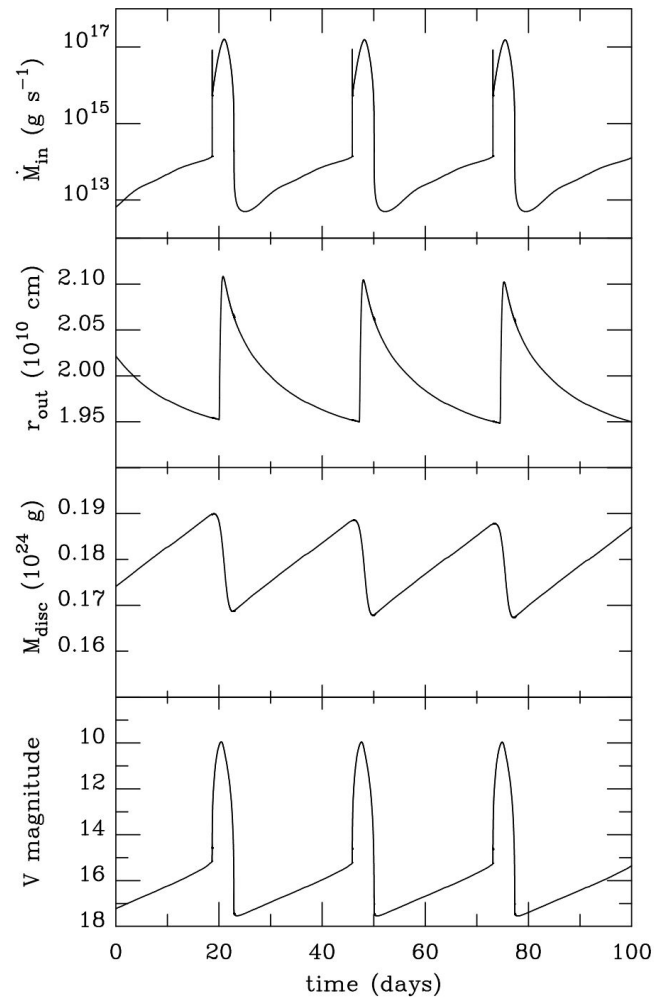
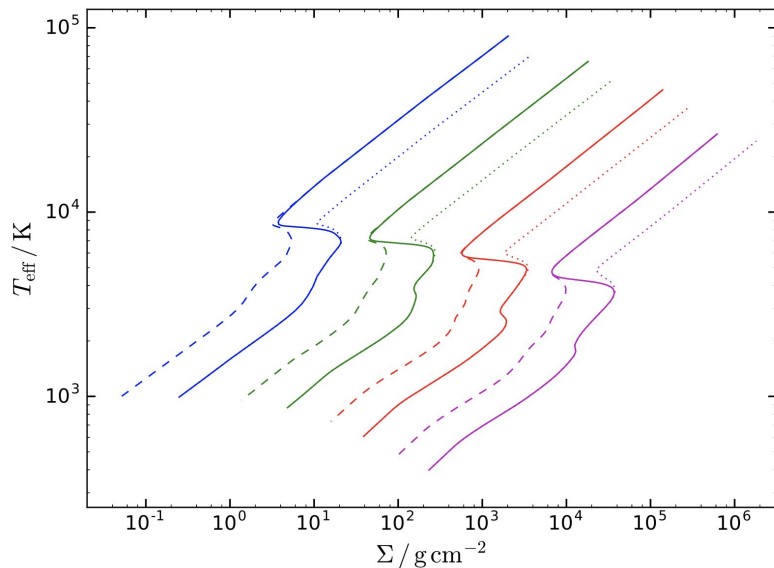
Влияние испарения пыли и тепловой неустойчивости на распределение температуры в протопланетном диске

к.ф.-м.н. **Топчиева А. П.**
Я. Н. Павлюченков, В. В. Акимкин, Э. И. Воробьев

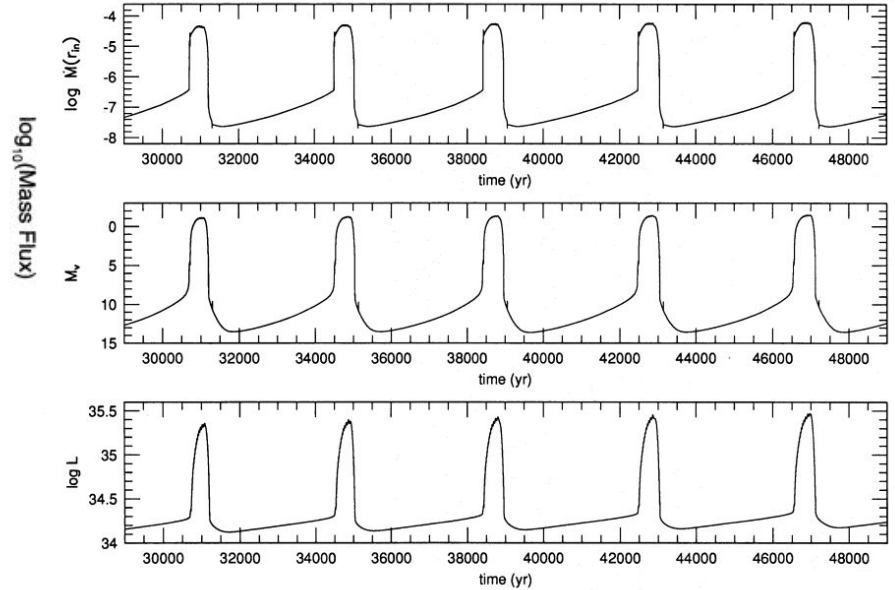
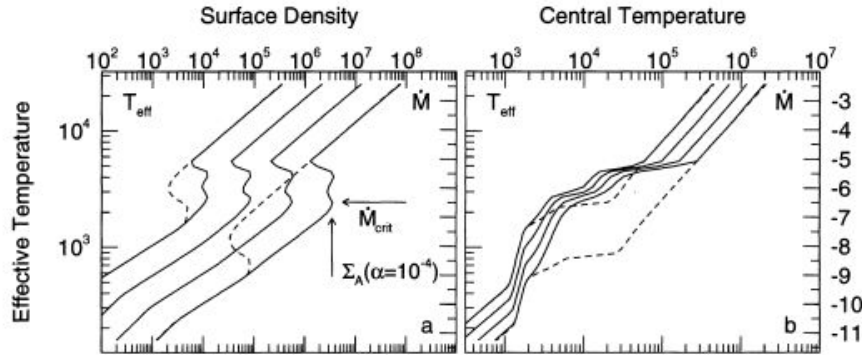
Тепловая неустойчивость в катаклизмических переменных



Hameury, 2020



Тепловая неустойчивость в протопланетных дисках



Kawazoe & Mineshige, 1993.

Bell & Lin, 1994

Kley & Lin, 1999

ЦЕЛЬ:

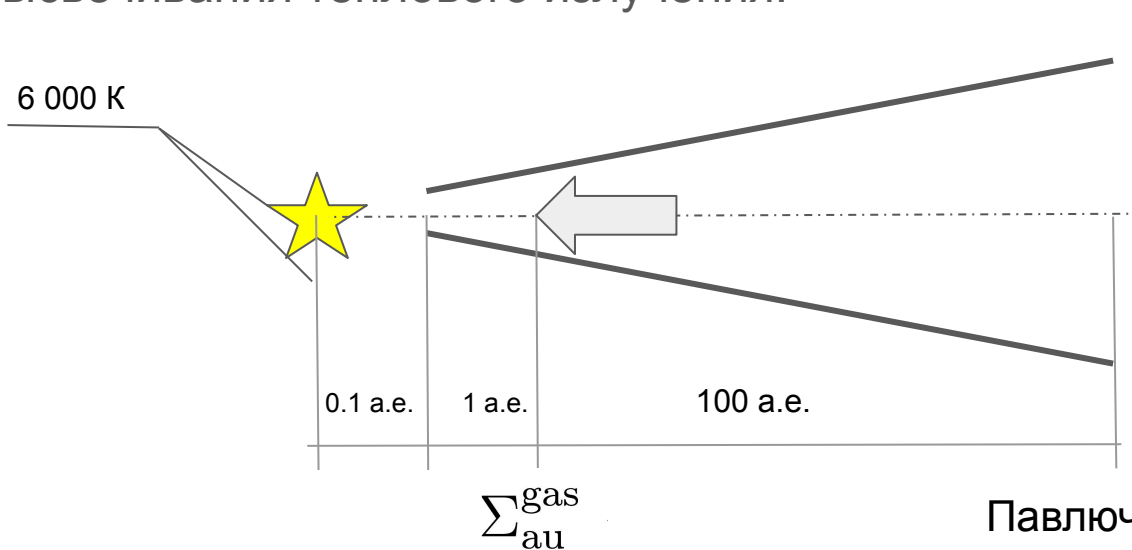
- Расчет и анализ распределения экваториальной температуры протопланетного диска на основе модели с более детальным описанием ряда физических процессов.

В частности, в представленной модели используются реалистичные коэффициенты поглощения газа и пыли, а процесс испарения пыли трактуется явным образом. Кроме того, наряду с вязким нагревом диска мы учитываем нагрев звездным излучением, а сами функции нагрева и охлаждения корректны для произвольных оптических толщин.

- На основе представленной полуаналитической модели провести исследования возможности развития тепловой неустойчивости в протопланетных дисках.

Модель расчета равновесной экваториальной температуры в протопланетном диске

Два источника нагрева диска — звездное излучение и вязкий нагрев. Вязкий нагрев диска вычисляется в приближении стационарной аккреции с заданным темпом аккреции. Охлаждение диска происходит за счет высвечивания теплового излучения.



$$\Sigma^{\text{gas}} = \Sigma_{\text{au}}^{\text{gas}} \left(\frac{R}{R_{\text{au}}} \right)^{-1}$$

Постулируемое распределение поверхностной плотности

$$\Lambda_{\text{IR}} = \Gamma_{\text{star}} + \Gamma_{\text{vis}}$$

Условие теплового равновесия

Охлаждение и нагрев в диске

$$\Lambda_{\text{IR}} = \frac{4\tau_{\text{P}}\sigma T_{\text{mid}}^4}{1 + 2\tau_{\text{P}}\left(1 + \frac{3}{4}\tau_{\text{R}}\right)}$$

$$\Gamma_{\text{star}} = \frac{\mu F_0 \tau_{\text{P}} \left[2(1 - e^{-\tau_{\text{uv}}}) + 3\mu \frac{\tau_{\text{R}}}{\tau_{\text{uv}}} (1 - e^{-\tau_{\text{uv}}} - \tau_{\text{uv}} e^{-\tau_{\text{uv}}}) + \frac{\tau_{\text{uv}}}{\tau_{\text{P}}} e^{-\tau_{\text{uv}}} \right]}{1 + 2\tau_{\text{P}}\left(1 + \frac{3}{4}\tau_{\text{R}}\right)}$$

$$\Gamma_{\text{vis}} = \frac{3}{4\pi} \frac{GM\dot{M}}{R^3}.$$

Усредненные по спектру непрозрачности

Используются усредненные по частоте непрозрачности, причем для κ_F используется так называемая двухтемпературная непрозрачность, учитывающая отличие кинетической температуры от температуры поля излучения.

$$\tau_{uv} = \frac{1}{\mu} (\kappa_F^{gas} \Sigma^{gas} + \kappa_F^{dust} \Sigma^{dust})$$

$$\tau_P = \kappa_P^{gas} \Sigma^{gas} + \kappa_P^{dust} \Sigma^{dust}$$

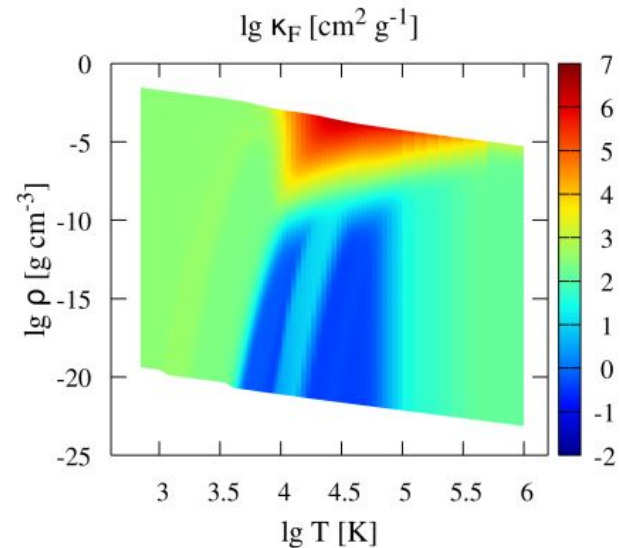
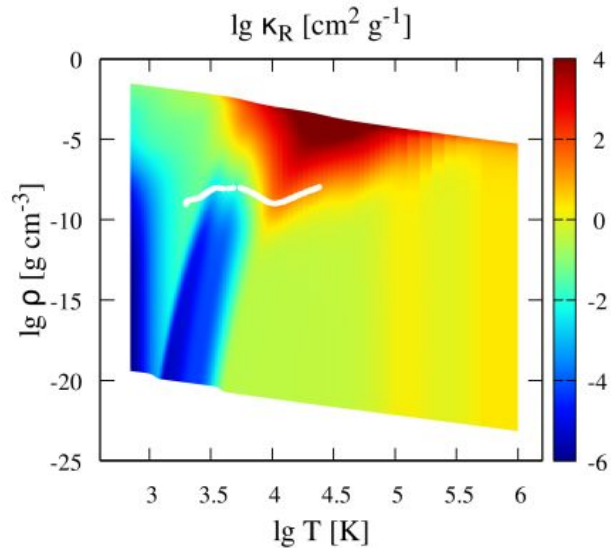
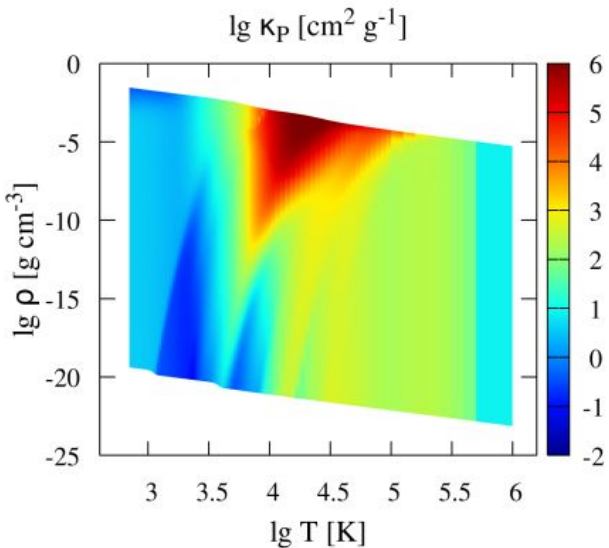
$$\tau_R = \kappa_R^{gas} \Sigma^{gas} + \kappa_R^{dust} \Sigma^{dust},$$

$$\kappa_F^{gas} (T_{gas}, T_{rad}) = \frac{\int \kappa_\nu (T_{gas}) \times B_\nu (T_{rad}) d\nu}{\int B_\nu (T_{rad}) d\nu}$$

$$\kappa_P^{gas} (T_{gas}) = \frac{\int \kappa_\nu B_\nu (T_{gas}) d\nu}{\int B_\nu (T_{gas}) d\nu}$$

$$\kappa_R^{-1} (T_{gas}) = \frac{\int \kappa_\nu^{-1} (T_{gas}) \times \partial_T B_\nu (T_{gas}) d\nu}{\int \partial_T B_\nu (T_{gas}) d\nu}$$

Коэффициенты непрозрачности газа



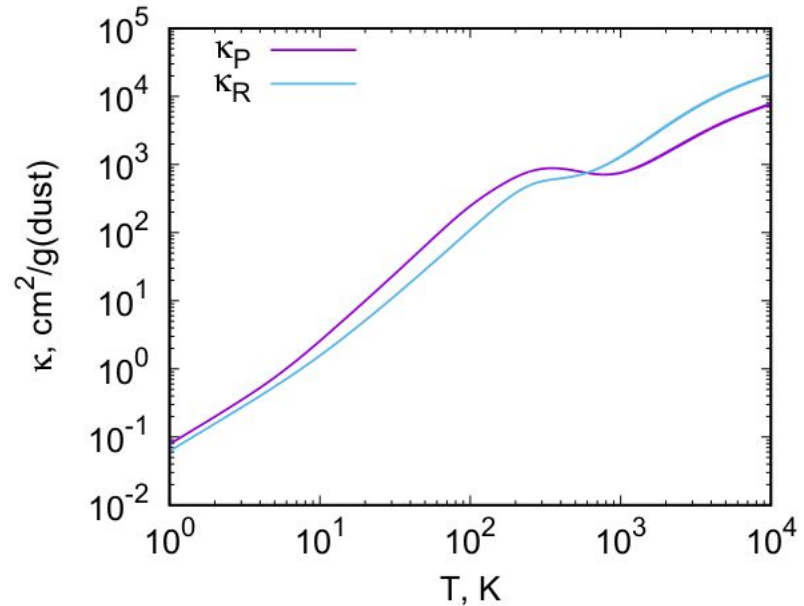
Malygin et al. 2014

Коэффициенты непрозрачности пыли

Усредненные по частоте непрозрачности
рассчитаны для распределения силикатных
пылинок (форстерит Mg_2SiO_4).

$$n(a) \propto a^{-3.5}$$

$$a_{\min} = 5 \times 10^{-7} \text{ см и } a_{\max} = 10^{-4} \text{ см}$$



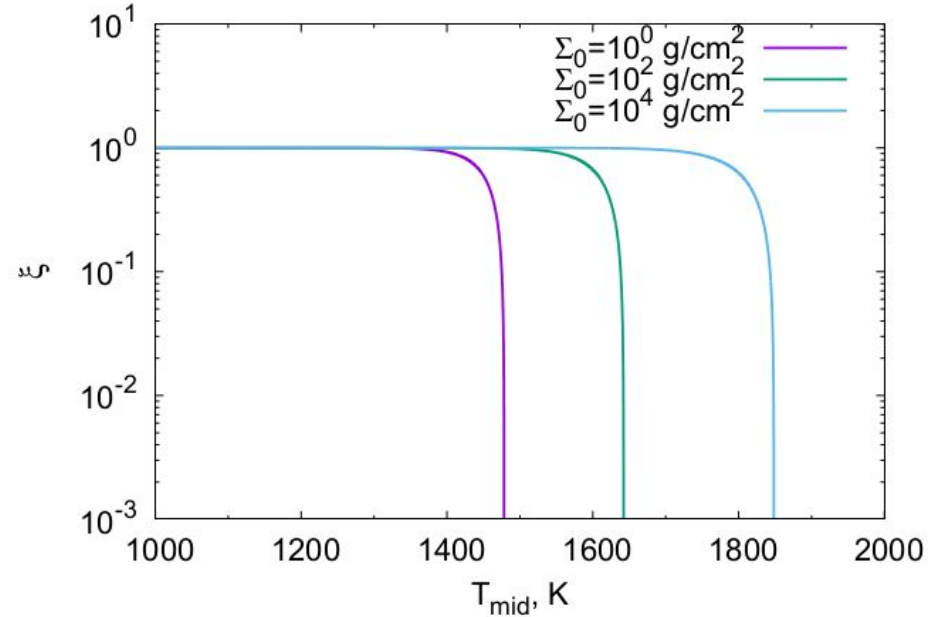
Модель испарения пыли для форстерита Mg_2SiO_4

$$\Sigma^{\text{dust}} = \xi(T_{\text{mid}}) \mu_{\text{dg}} \Sigma^{\text{gas}}$$

$$\xi(T) = 1 - \frac{n_{\text{vap}}}{n_{\text{tot}}}$$

$$n_{\text{vap}} = \frac{P_{\text{vap}}}{k_b T}$$

$$P_{\text{vap}} = f_a \exp\left(x_1/T + x_2 + x_3 T + x_4 T^2 + x_5 T^3\right)$$



Рассматриваемые модели диска и их параметры

Модель	Непрозрачность пыли	Испарение пыли	Непрозрачность газа	$\Sigma_0, \text{г/см}^2$	$\dot{M}, M_\odot/\text{год}$
M1	+	-	-	0.1	0
M2	+	-	-	1000	0
M3	+	-	-	1000	10^{-6}
M4	+	+	-	1000	10^{-6}
M5	+	+	+	1000	10^{-6}

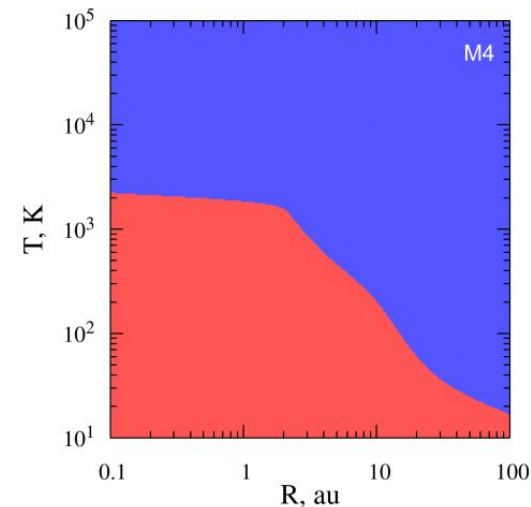
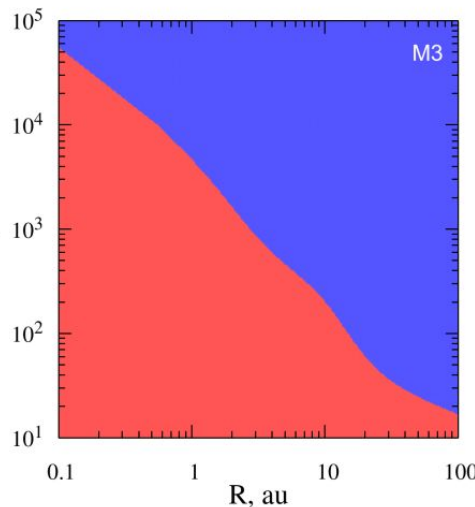
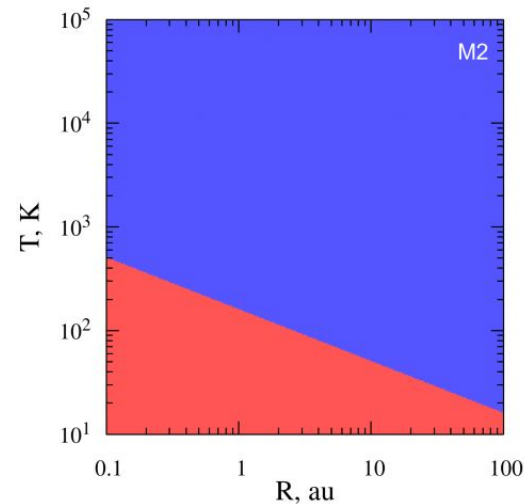
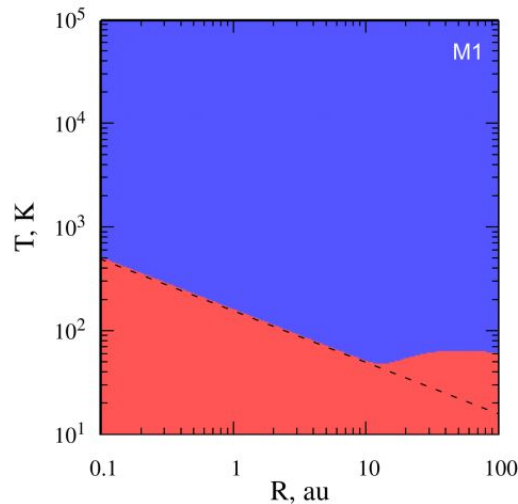
Результаты моделирования: отсутствие неустойчивости

$$\text{M1, 2: } aT_{\text{mid}}^4 = \frac{2\mu F_0}{c}$$

$$\text{M1: } aT_{\text{mid}}^4 = \frac{\kappa_F F_0}{\kappa_P c}, R > 7 \text{ a.e.}$$

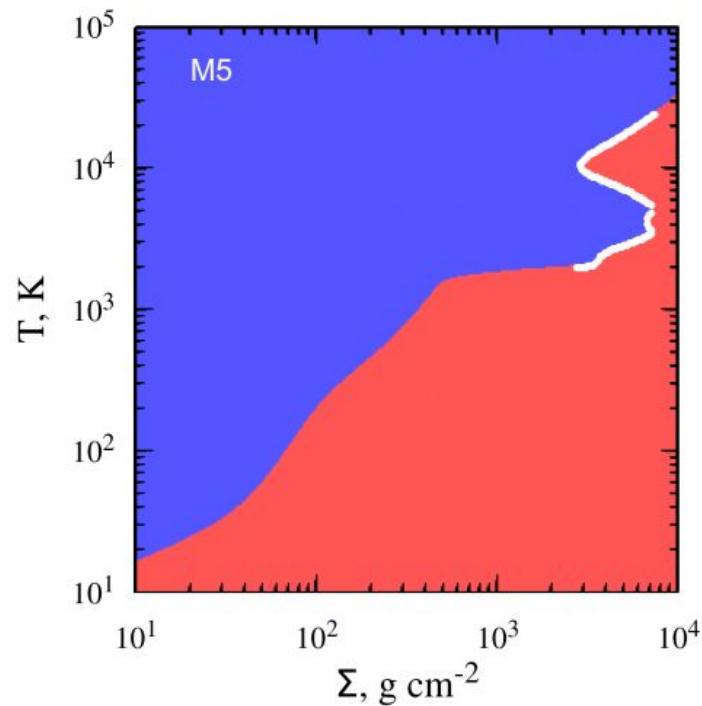
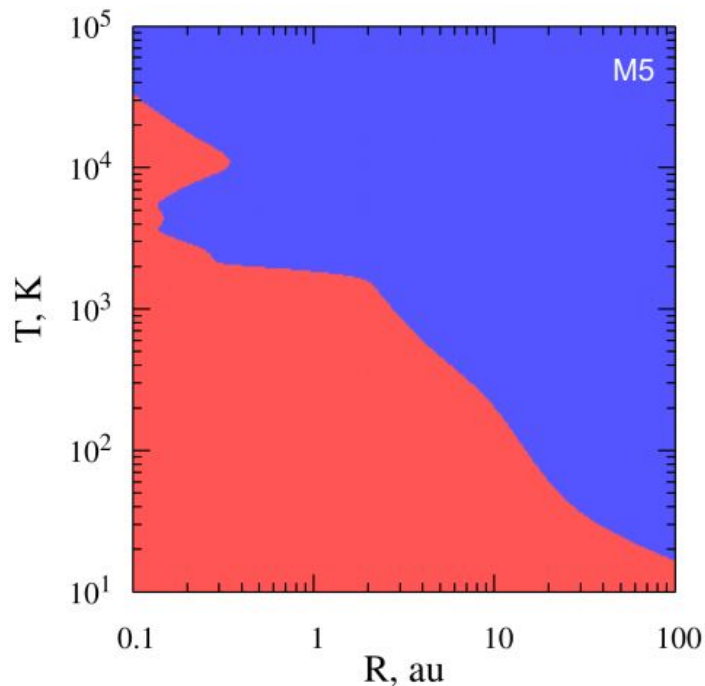
M3:

$$aT_{\text{mid}}^4 = \frac{2\mu F_0}{c} + \frac{\Gamma_{\text{vis}}}{c} \left[\frac{1 + 2\tau_P(1 + \frac{3}{4}\tau_R)}{\tau_P} \right] \Gamma, \text{ K}$$

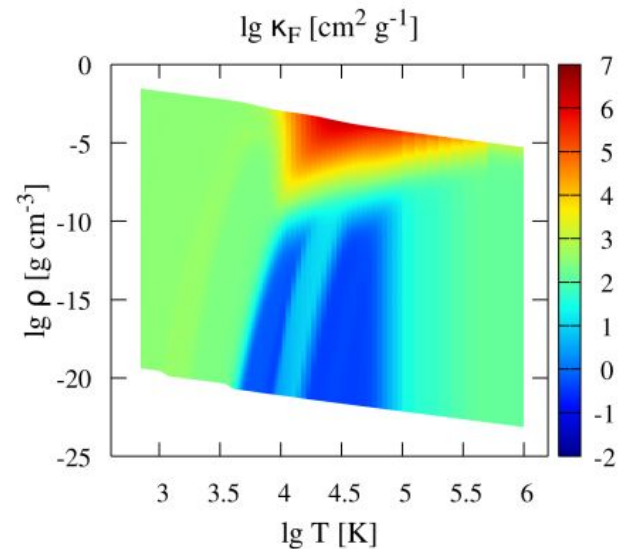
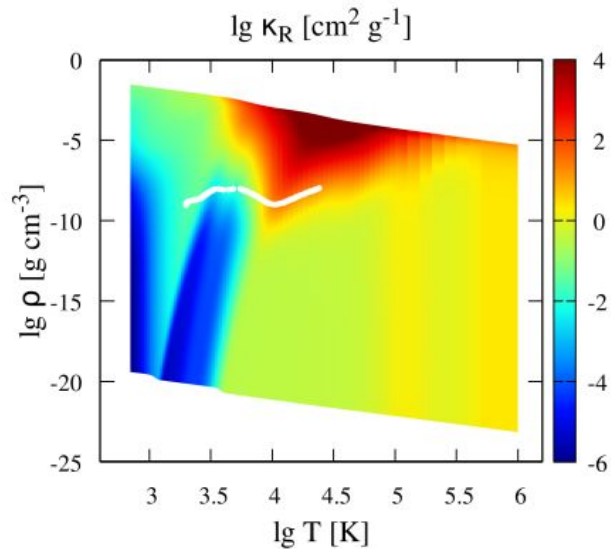
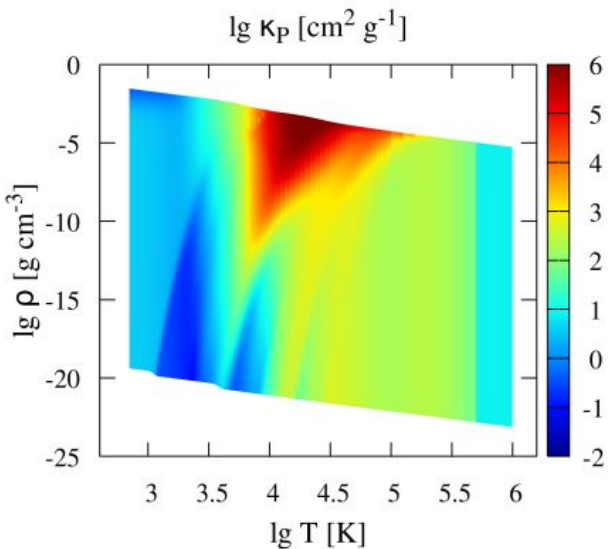


Павлюченков и др. 2023

Результаты моделирования: тепловая неустойчивость



Коэффициенты непрозрачности газа



Malygin et al. 2014

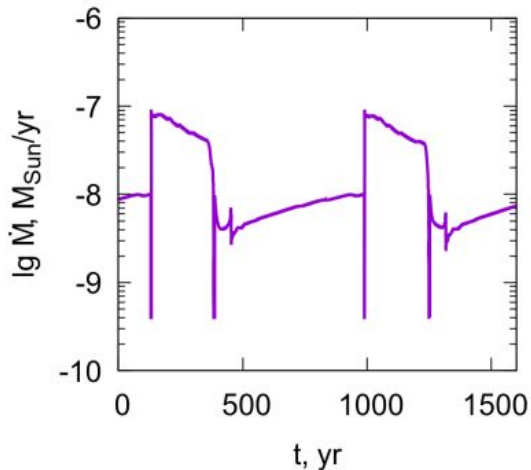
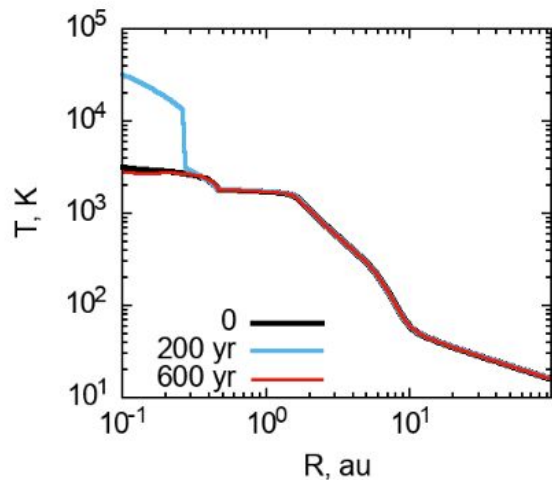
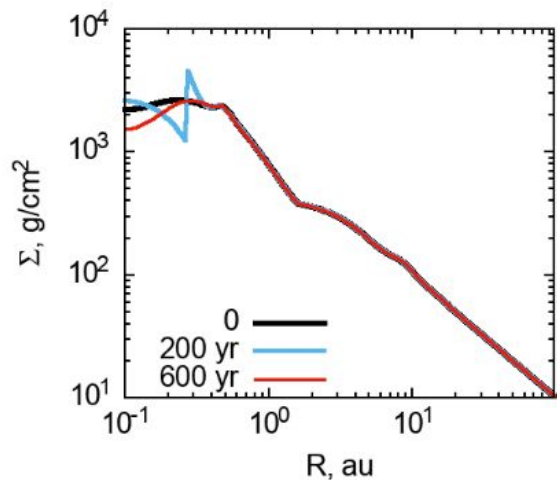
Эволюционная модель диска

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^{1/2} \nu \Sigma \right) \right) \quad \nu = \alpha c_s H,$$
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \Gamma_{\text{star}} + \Gamma_{\text{vis}} - \Lambda_{\text{IR}} + \frac{3}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^{1/2} \nu \varepsilon \right) \right)$$

Решается классическое уравнение Прингла. В уравнении для энергии включен радиальный перенос тепловой энергии в приближении диффузионного аккреционно-декреционного диска. Считается, что турбулентность приводит к эффективному перемешиванию вещества, т.е. к турбулентной диффузии — в результате динамика всех индивидуальных компонентов вещества (например, примесей), а также и тепловой энергии описывается диффузионным уравнением, аналогичным уравнению Прингла.

Эволюционная модель диска

На $R < 0.5$ а.е. происходит периодическая перестройка структуры диска. Накопление вещества приводит к “запиранию” ИК излучения и росту температуры. Высокая температура повышает вязкий нагрев, пока существенная часть вещества из внутренней области не аккрецирует на звезду. Это приводит к эпизодическому характеру аккреции с периодом около 1000 лет.



ВЫВОДЫ:

1. Во внутренних областях протопланетных дисков действительно возникают условия для развития тепловой неустойчивости, что необходимо учитывать при моделировании их структуры и эволюции.
2. Периодический характер аккреции возникает при использовании α -параметризации турбулентной вязкости, которая обеспечивает положительную обратную связь между темпом аккреции и температурой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10029, <https://rscf.ru/project/22-72-10029>.

Благодарю за внимание!