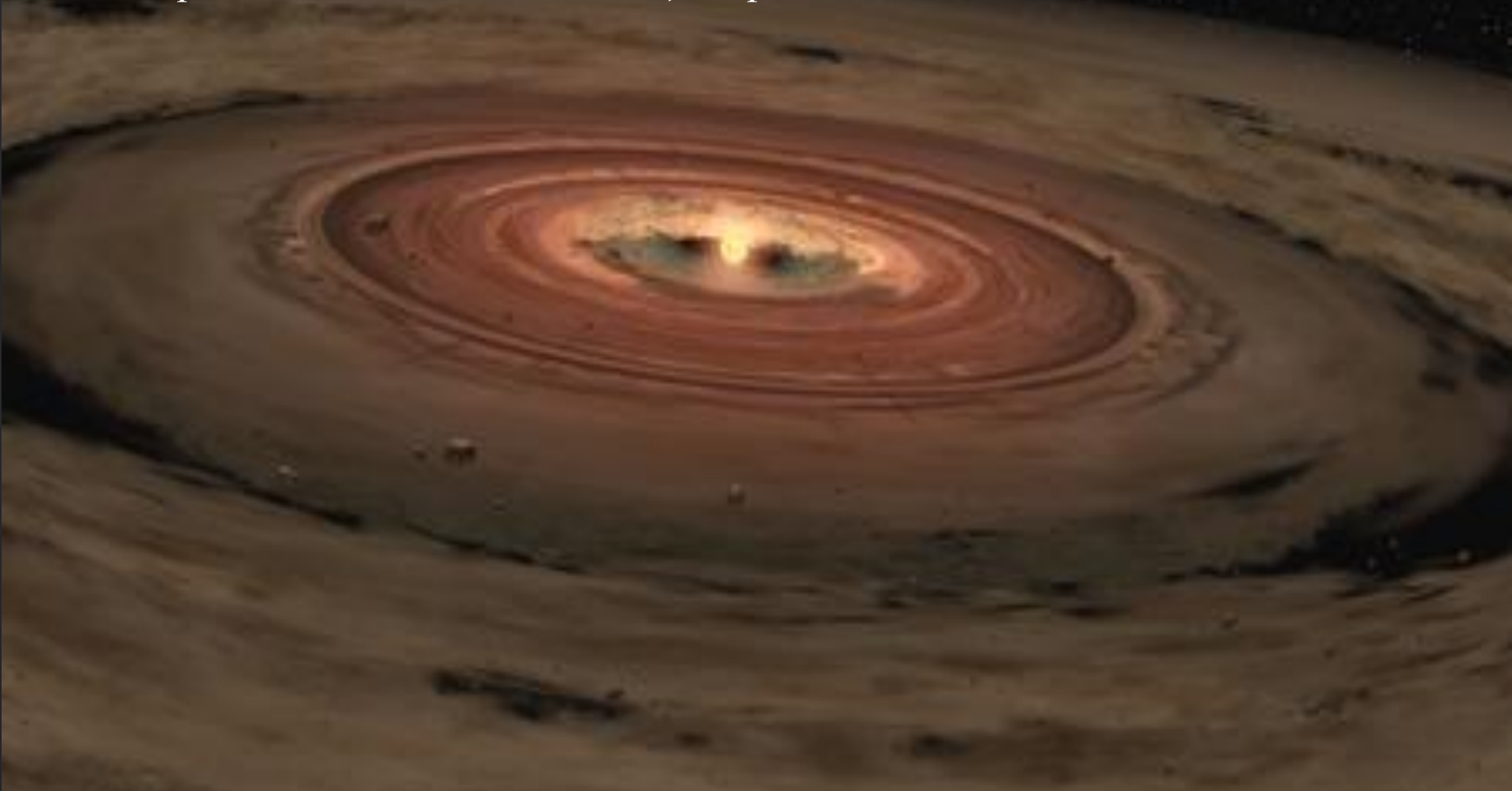


*FEOSAD – двухмерный численный магнито-гемодинамический код для моделирования длительной эволюции протопланетных газопылевых дисков*



► **Воробьев Э. И. (ЮФУ),** Акимкин В. В. (ИНАСАН), Молярова Т. (ИНАСАН),  
Стойновская О. П. (НГУ), Хайбрахманов С. (УрФУ, ЧелГУ), Павлюченков Я. Н.  
(ИНАСАН), Складьевский А. М. (ЮФУ), Элбакян В. Г. (ЮФУ)

## Научный коллектив

Эдуард Воробьев (ЮФУ) – численная гидродинамика, общая координация

Виталий Акимкин (ИНАСАН) – модели роста пыли

Ярослав Павлюченков, Вардан Элбакян (ИНАСАН) – перенос излучения

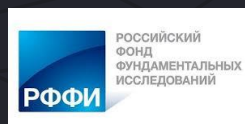
Тамара Молярова, Дмитрий Вибе (ИНАСАН) – химическая эволюция

Ольга Стояновская (НГУ) – трение газа и пыли

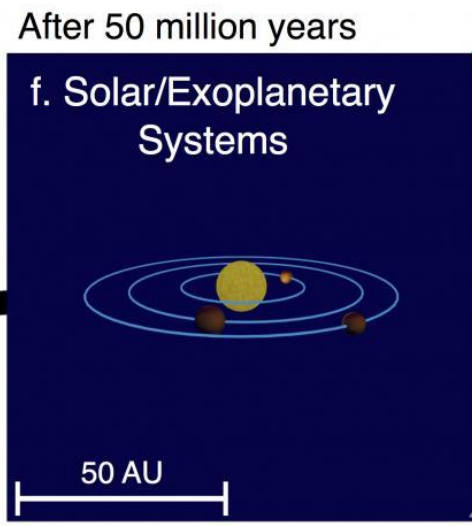
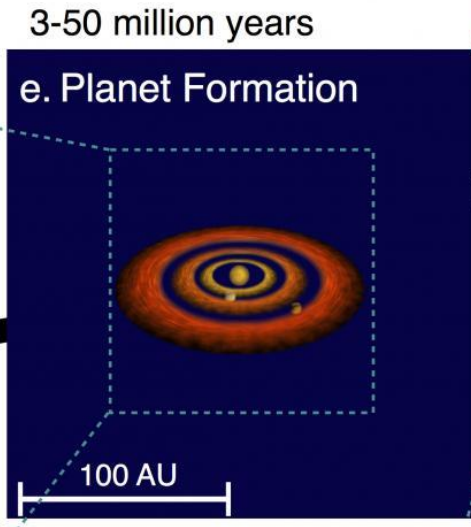
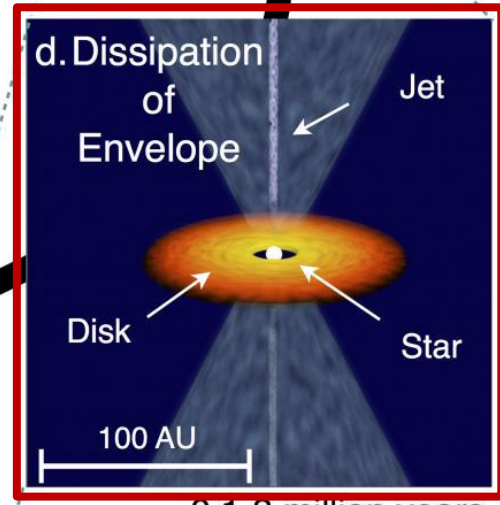
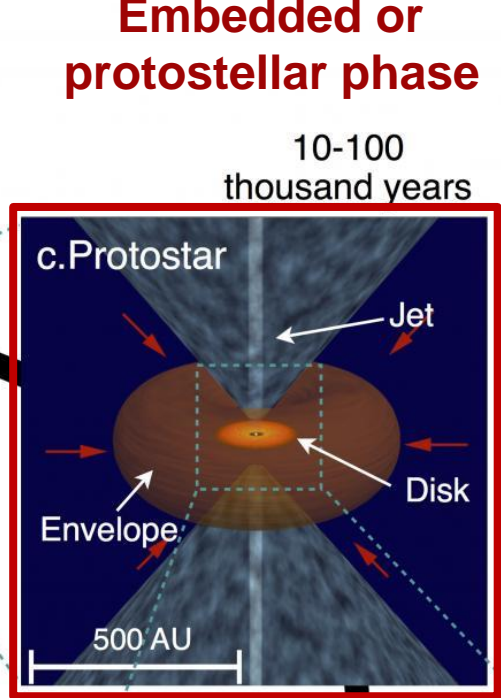
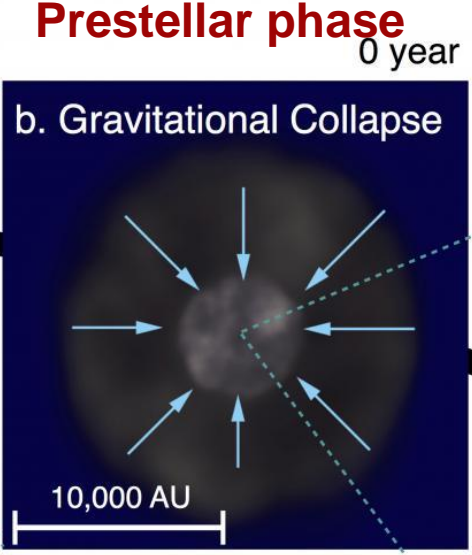
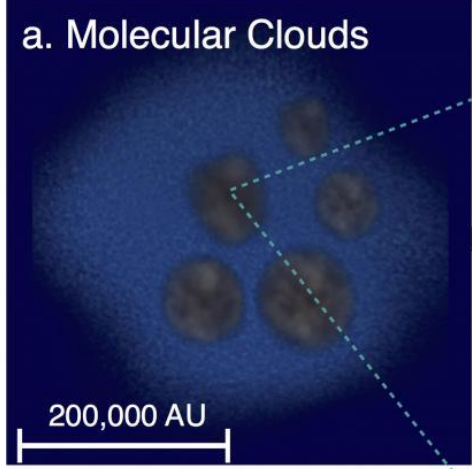
Сергей Хайбрахманов (ЧелГУ/УрФУ) – магнитная гидродинамика

Александр Склярский (ЮФУ) – фотоиспарение, интерфейс с RADMC-3D

15 лет непрерывной разработки. Первая статья - 2005 (Vorobyov & Basu, ApJL)



Десятки миллионов лет



**Prestellar phase**

**Embedded or protostellar phase**

**Submicron grains**

**1000-km-sized bodies**

**Debris disk**

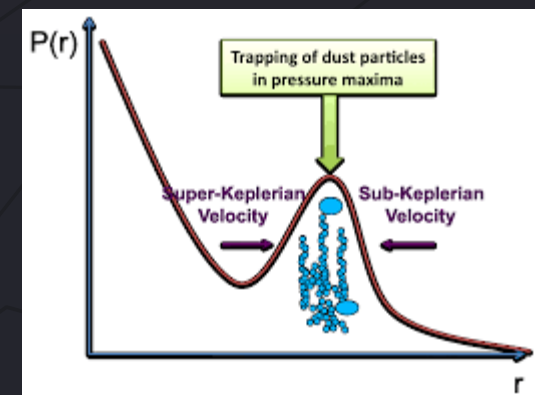
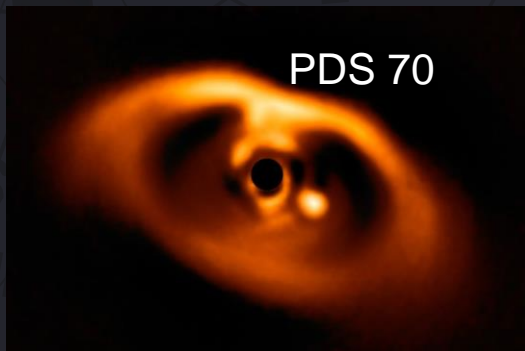
**T Tauri or protoplanetary phase**

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

Уравнение вязкой эволюции диска  
(Pringle 1981)

### Упрощающие предположения при выводе уравнения Прингла

- 1) Тонкий диск (вертикально интегрированные плотности, отсутствие вертикальных движений, локальное вертикальное гидродинамическое равновесие)
- 2) Градиент давления несущественен по сравнению с вязкими моментами сил
- 3) Одномерный осесимметричный диск (отсутствие азимутальной структуры)

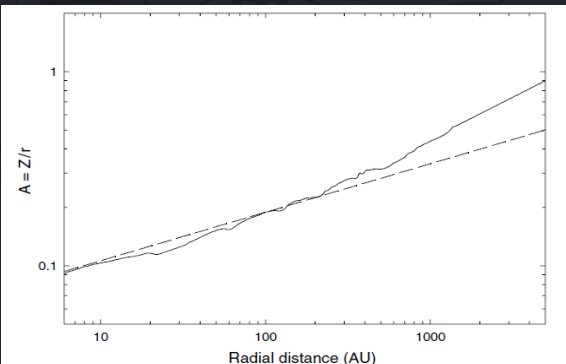
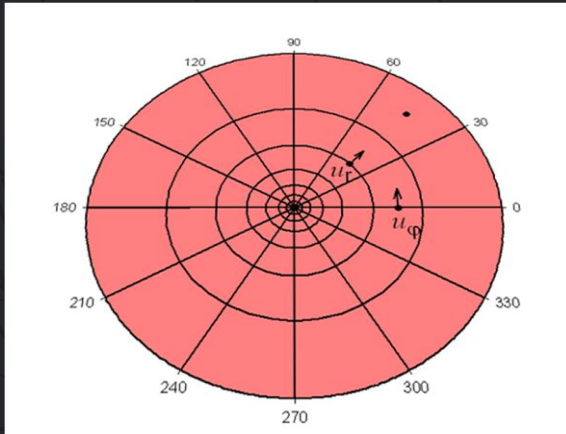


# FEOSAD (Formation and Evolution of Stars and Disks)

(Vorobyov et al. 2018, 2019, 2020, Akimkin et al. 2020, Molyarova et al. 2021)

- Двухмерное приближение тонкого диска,
- Численный метод, схожий с кодом ZEUS (Stone & Norman 1992),
- Расчет адвекции на основе кусочных парабол (Colella & Woodward 1984),
- Алгоритм FARGO для ускорения расчета адвекции (Masset 2000),
- Полярная система координат, логарифмическая сетка в радиальном направлении,
- Распараллелен с помощью технологии OpenMP.

## Интегрированная динамика газа и пыли



$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u}) = 0$$

gas

$$\frac{\partial \Sigma_{s.d.}}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_{s.d.} \mathbf{u}) = -S(a_{\max})$$

small dust (strictly linked to gas)

$$\frac{\partial \Sigma_{g.d.}}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma \mathbf{v}) = S(a_{\max})$$

grown dust (pressureless fluid)

$$\frac{\partial (\Sigma_g \mathbf{u})}{\partial t} + [\nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u} \otimes \mathbf{u})] = -\nabla P - \Sigma_g \nabla \Phi + (\nabla \cdot \mathbf{\Pi}) - \Sigma_{g.d.} \mathbf{F}_{drag}$$

gas

$$\frac{\partial (\Sigma_{g.d.} \mathbf{v})}{\partial t} + [\nabla \cdot (\Sigma_{g.d.} \mathbf{v} \otimes \mathbf{v})] = -\Sigma_{g.d.} \nabla \Phi + \Sigma_{g.d.} \mathbf{F}_{drag} + S(a_r) \mathbf{u}$$

grown dust

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u}) = -P(\nabla \cdot \mathbf{u}) - (T_{mp}^4 - T_{irr}^4) \left( \frac{8\sigma\tau_p}{1 + 2\tau_p + 1.5\tau_p\tau_R} \right) + (\nabla \mathbf{u})_{pp'} : \mathbf{\Pi}_{pp'}$$

$$\frac{\partial a_{\max}}{\partial t} + (\mathbf{v}_{dust} \cdot \nabla) a_{\max} = \mathfrak{R}$$

maximum dust radius changes due to growth and advection

$\mathbf{\Pi}$  – viscous stress tensor;  $\nu = \alpha c_s h_g$  – kinematic viscosity

# Восстановление вертикальной структуры диска

$$\rho c_V \frac{\partial T}{\partial t} = \rho \kappa_P c (E - aT^4) + \rho S,$$

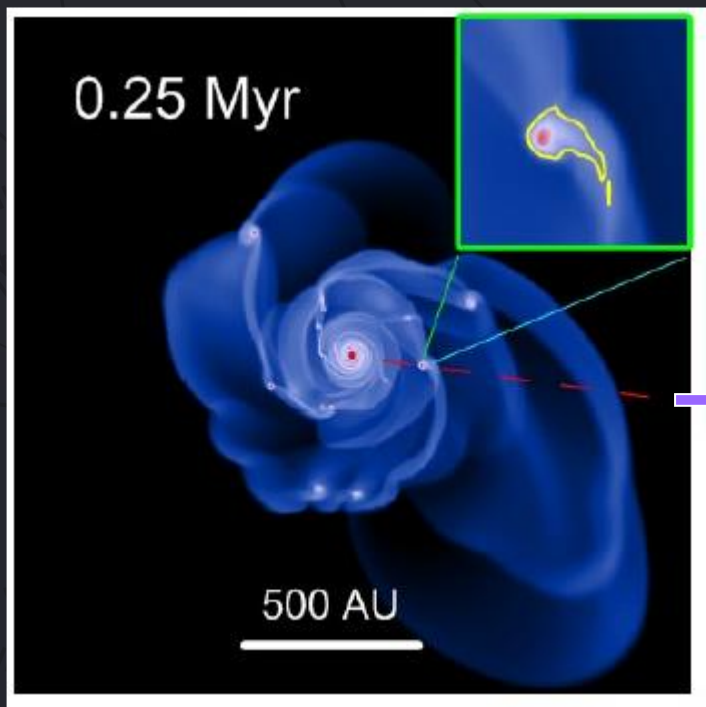
$$\frac{\partial E}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{c}{3\rho\kappa_R} \frac{\partial E}{\partial z} \right) = -\rho \kappa_P c (E - aT^4)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz} = -\frac{GM_*}{r^3} z - 2\pi G \Sigma$$

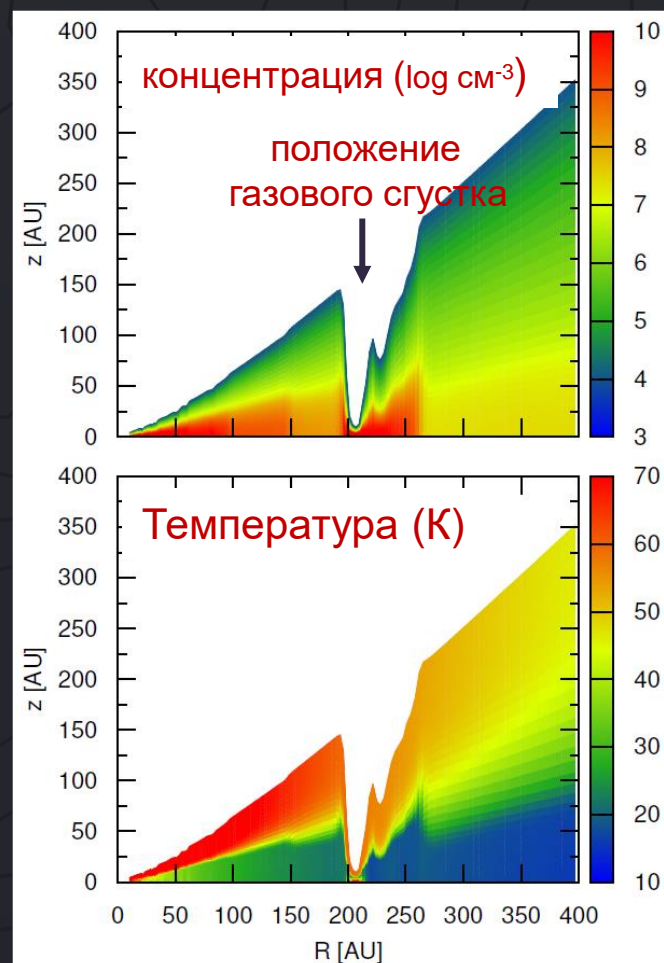
Перенос излучения в вертикальном направлении. Описывают нагрев диска излучением звезды и внешним излучением (S-term) и охлаждение диска в инфракрасном излучении пыли

Локальное вертикальное гидродинамическое равновесие

Газовый сгусток

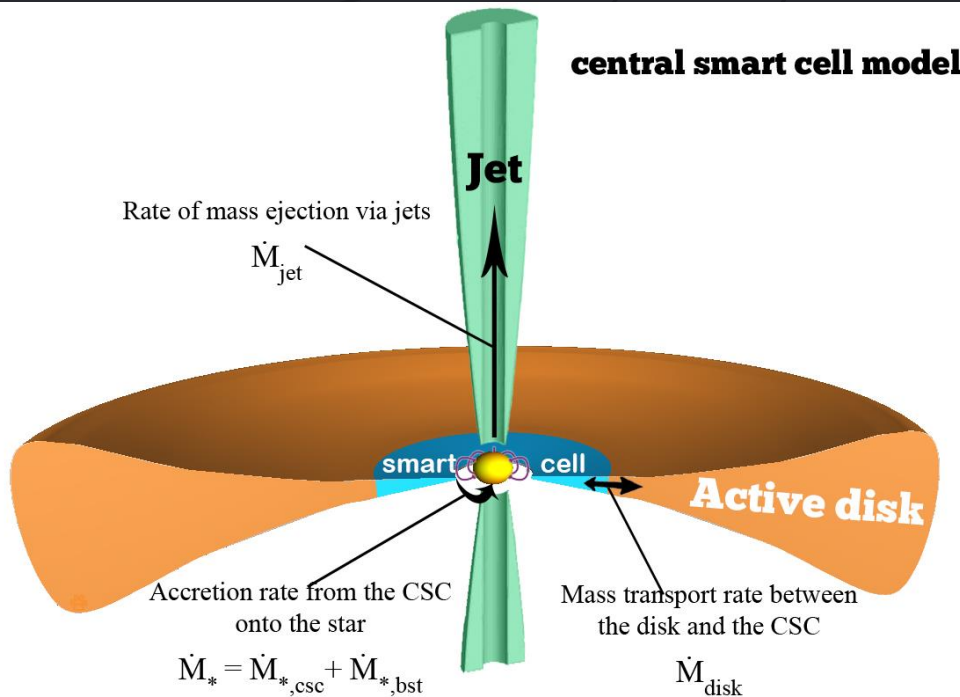
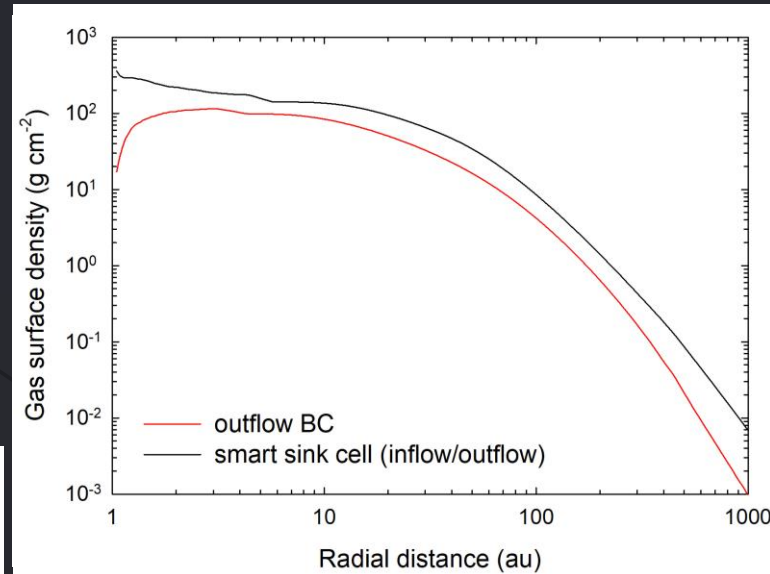


радиальный срез  
вдоль красной  
штриховой линии



# Проблема внутренних областей диска

Расчет динамики во внутренних областях диска (< 1.0 а.е.) сопряжен с численными ограничениями, налагаемыми на шаг по времени условием Куранта



В Феосаде центральная область диска (~ 1 а.е.) заменена «умной» поглощающей ячейкой, включающей звезду и однородный диск. Вещество может свободно перемещаться между границей диск – поглощающая ячейка (см Vorobyov et al. 2019).

$$\frac{dM_{csc}}{dt} = \dot{M}_{disk} - \dot{M}_{*,csc} - \dot{M}_{*,bst} - \dot{M}_{jet}.$$

$$\frac{dM_*}{dt} = \dot{M}_{*,csc} + \dot{M}_{*,bst}$$

$$\dot{M}_{*,csc} = \begin{cases} \xi \dot{M}_{disk}, & \dot{M}_{disk} > 0 \\ 0, & \dot{M}_{disk} \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

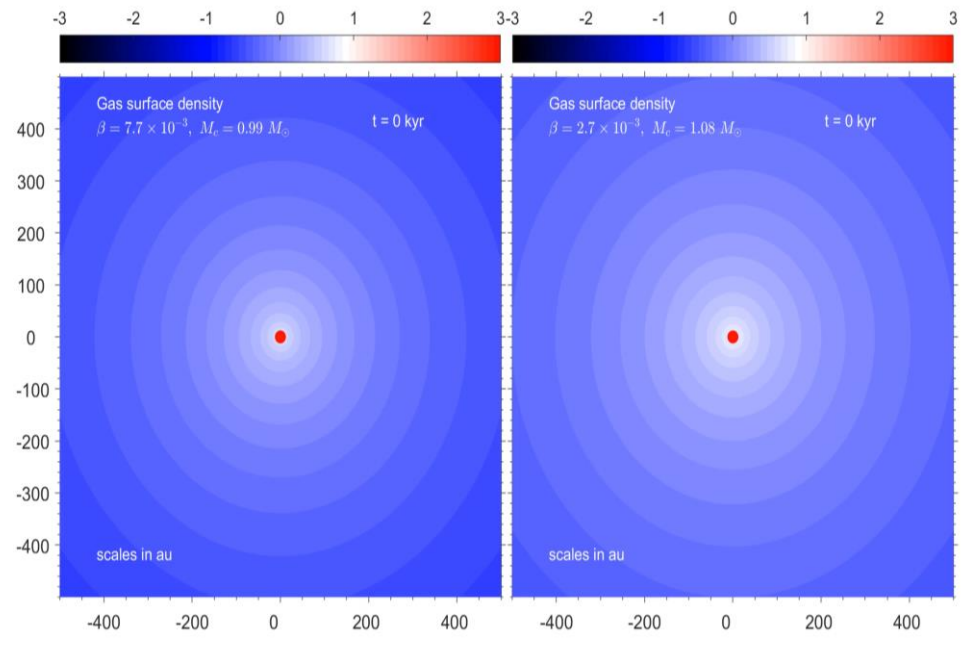
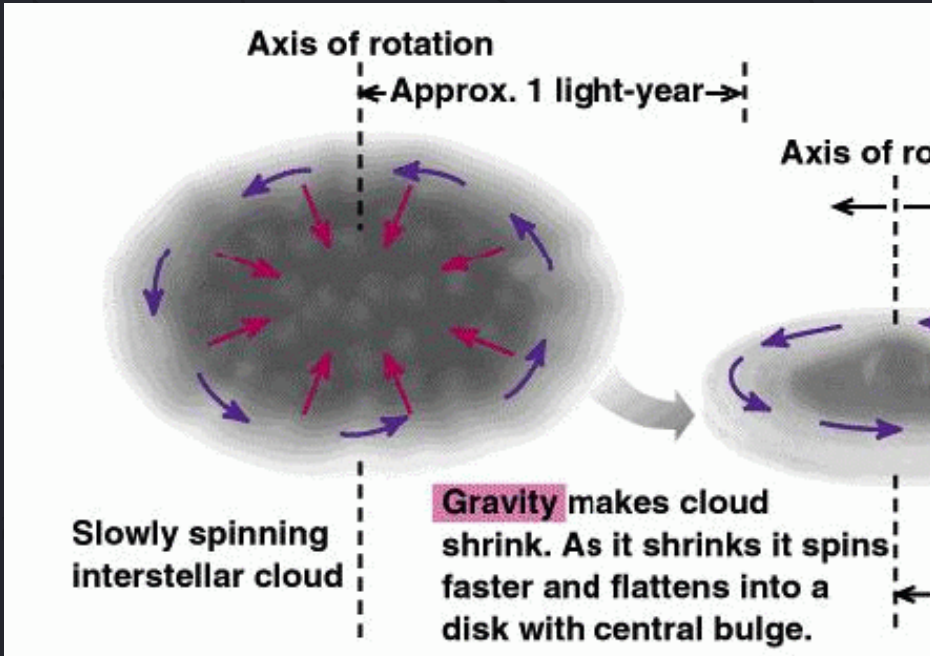
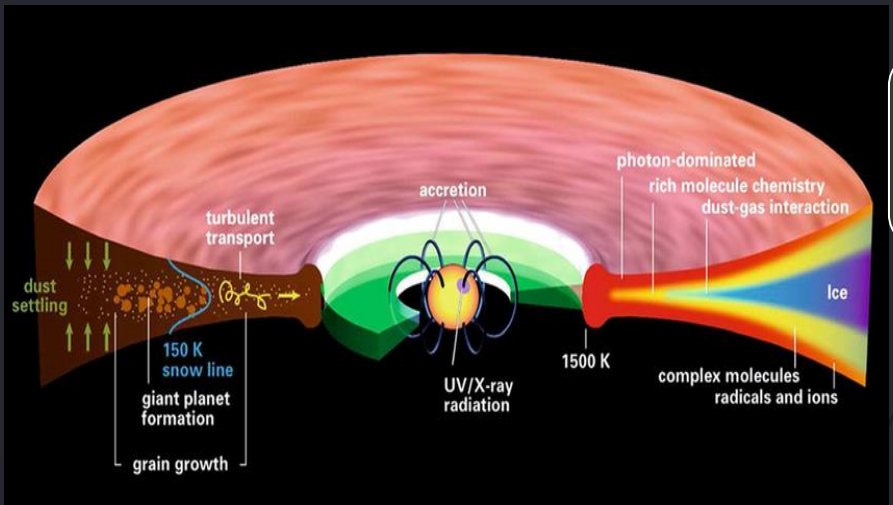
# Начальные условия

Большинство численных моделей стартуют с уже сформированной системы звезда+протопланетный диск (e.g., FARGO)

Эффект падения вещества их внешней среды учитывается введением источников в уравнения неразрывности и движения

$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u}) = \dot{\Sigma}_{\text{infall}}$$

Феосад начинает вычисления с дозвездного облака





# Интегрированная динамика газа и пыли в Феосаде

- Более аккуратный учет охлаждения диска (отношение пыли к газу более не предполагается равным 1:100 по всему диску при расчете непрозрачностей)
- Непосредственное сравнение с наблюдениями дисков в излучении пыли (ALMA)
- Исследование механизмов накопления пыли и формирования первичных блоков протопланет (планетезималей)

*Большинство численных кодов с интегрированной динамикой пыли предполагают фиксированный размер пыли по всему протяжению диска. При этом могут рассматриваться несколько фракций (bins) пыли с фиксированным размером*

Феосад использует двухкомпонентной модель распределения пыли по размерам с возможностью роста пыли и перехода пыли между двумя компонентами:

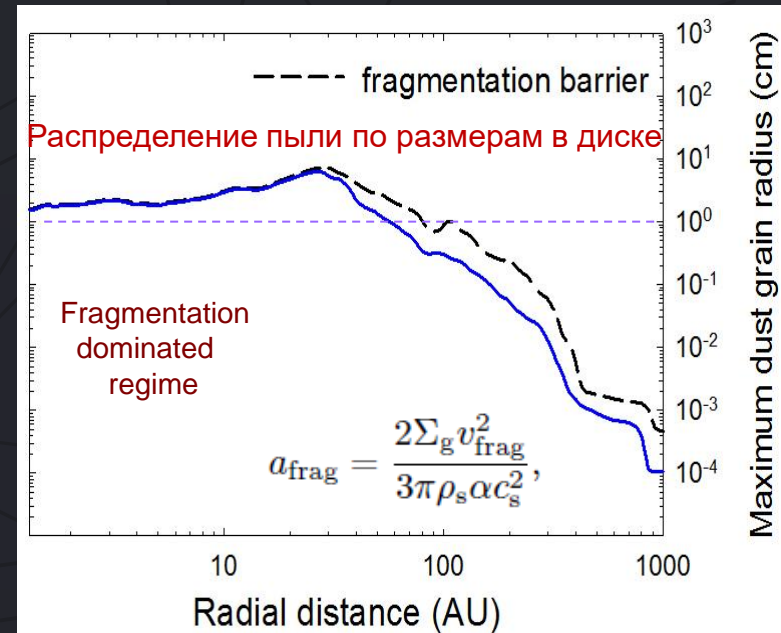
- 1) субмикронная пыль ( $5 \cdot 10^{-3} - 1$  мкм)
- 2) выросшая пыль ( $1.0 - a_{\max}$  мкм), где  $a_{\max}$  – переменный максимальный размер, определяемый дрейфом и ростом пыли

$$\frac{\partial a_{\max}}{\partial t} + (\mathbf{v}_{dust} \cdot \nabla) a_{\max} = \mathcal{R}$$

$$\mathcal{R} = \frac{\rho_d \mathbf{u}_{rel}}{\rho_{solids}}$$

Stepinsky & Valageas (1997)

(see for details Akimkin et al. 2020, Vorobyov et al. 2020)



Феосад рассчитывает динамику и фазовые переходы (сублимацию и конденсацию на пылинки) четырех летучих соединений CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и CH<sub>4</sub>

Уравнения на примере монооксида углерода

$$\frac{\partial \Sigma_{CO}^{gas}}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_{CO}^{gas} \mathbf{u}_{gas}) = -\lambda \Sigma_{CO}^{gas} + \eta_{sm} + \eta_{gr},$$

$$\frac{\partial \Sigma_{CO}^{sm}}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_{CO}^{sm} \mathbf{u}_{gas}) = \lambda_{sm} \Sigma_{CO}^{gas} - \eta_{sm},$$

$$\frac{\partial \Sigma_{CO}^{gr}}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_{CO}^{gr} \mathbf{u}_{dust}) = \lambda_{gr} \Sigma_{CO}^{gas} - \eta_{gr}.$$

$$\lambda = \lambda_{sm} + \lambda_{gr}$$

$$\eta = \eta_{sm} + \eta_{gr}$$

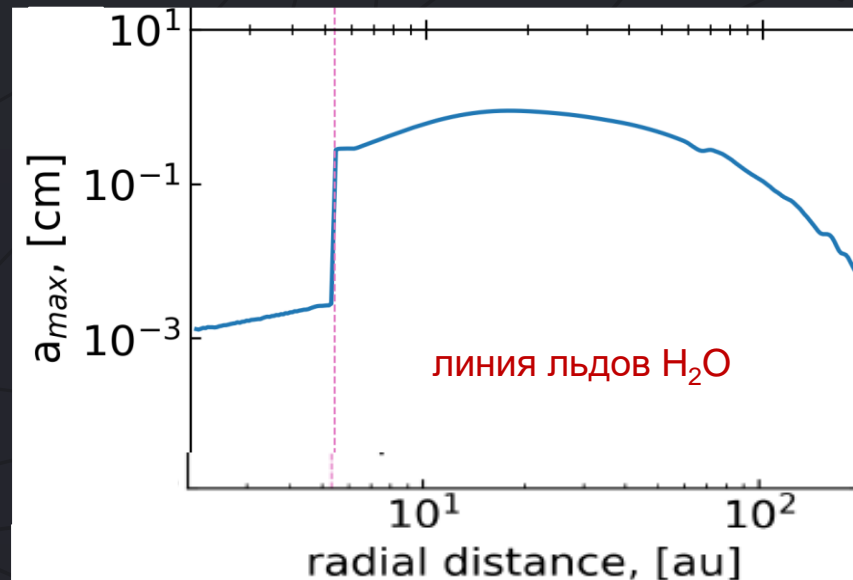
$$a_{frag} = \frac{2 \Sigma_g v_{frag}^2}{3 \pi \rho_s \alpha c_s^2},$$

Фрагментационный барьер пылинок зависит от фрагментационной скорости, которая в свою очередь может определяться химическим составом ледяных мантий пылинок

See for details Molyarova et al. 2021

## Обмен мантиями между населенными пылью

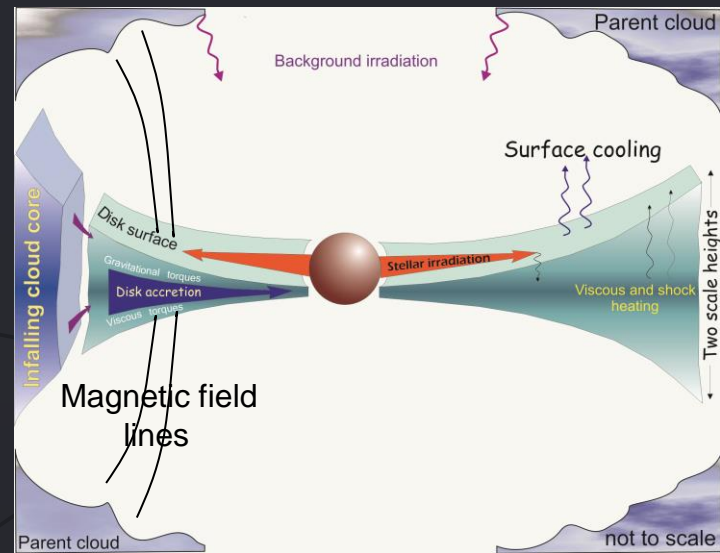
Мелкая и крупная пыль обмениваются мантиями в процессе фрагментации и коагуляции



# Магнитная гидродинамика в приближении тонкого диска (Vorobyov et al. 2021)

- Магнитное поле включает две компоненты: внешнее поле  $B_0$  и поле  $B$ , генерируемое токами внутри диска.
- Внутри диска магнитное поле имеет только вертикальную компоненту  $B_z$ .
- Токи присутствуют только внутри диска. Вне диска  $j = 0$ .

$$\frac{\partial(\Sigma_g \mathbf{u})}{\partial t} + \left[ \nabla \cdot (\Sigma_g \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) \right] = -\nabla P - \Sigma_g \nabla \Phi + (\nabla \cdot \Pi) - \Sigma_{g,d} \mathbf{F}_{drag} + \frac{B_z B_p^+}{2\pi} - H_g \nabla \left( \frac{B_z^2}{4\pi} \right).$$



$$\frac{\partial B_z}{\partial t} + \nabla \cdot (B_z \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\eta \nabla B_z)$$

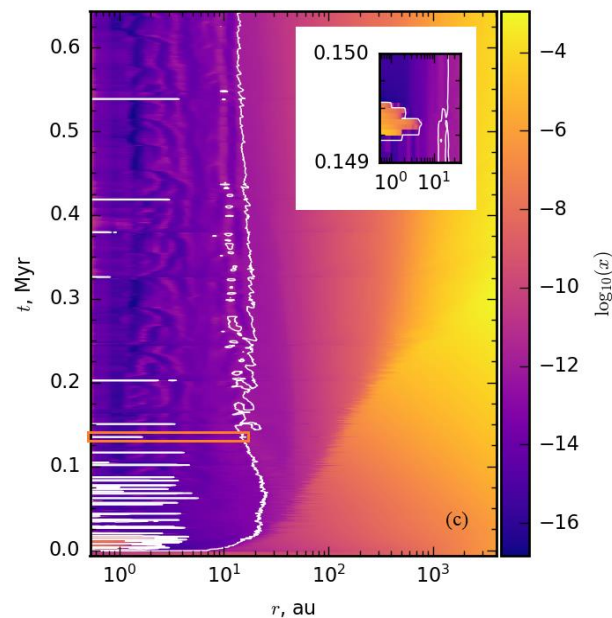
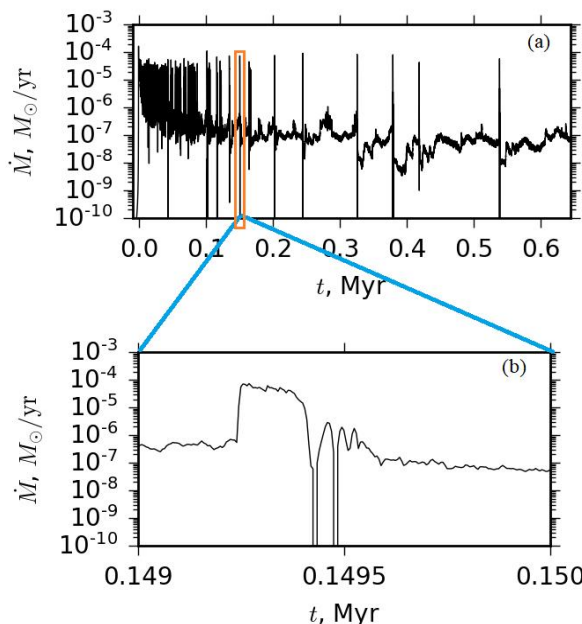
## Моделирование мертвых зон и вспышек аккреции

$\eta$  — магнитная диффузивность

Условие развития MRI  
(Sano et al. 2000)

$$\lambda_{MRI} \equiv \frac{2\pi\eta}{u_A} < H_g$$

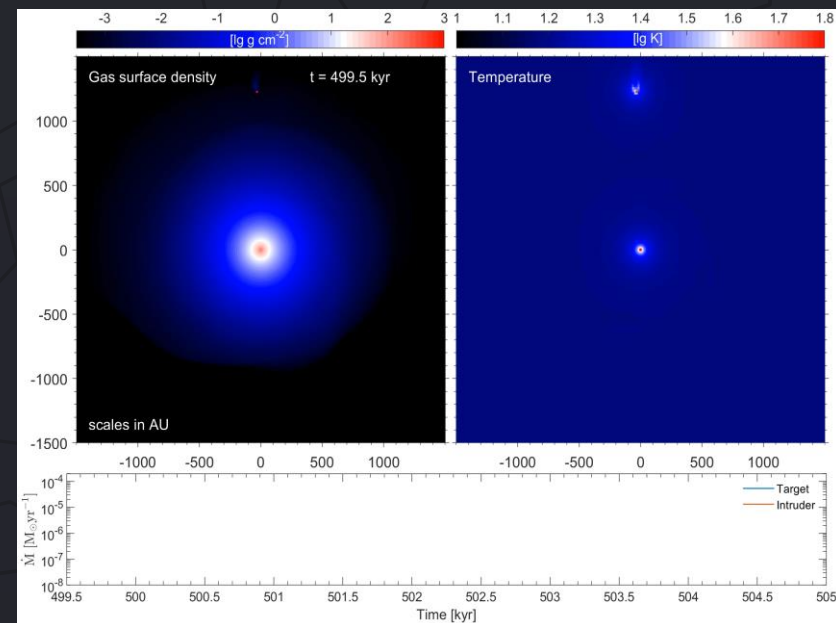
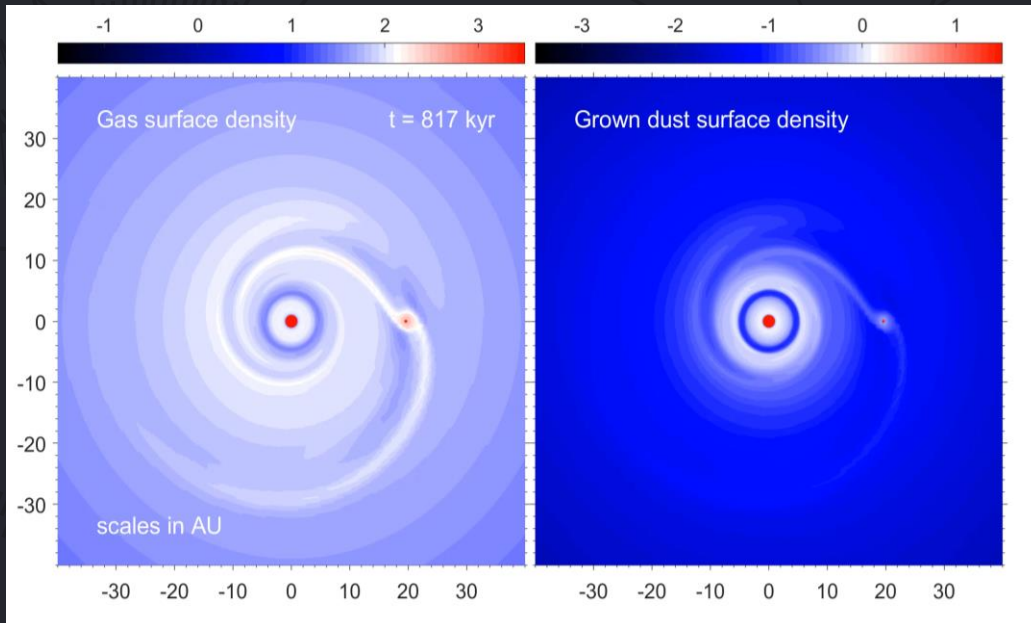
Вязкий  $\alpha$ -параметр определяется степенью развития MRI



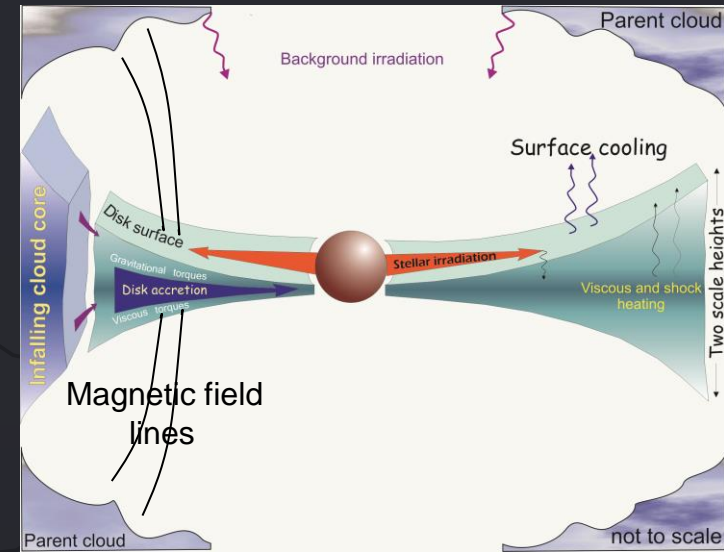
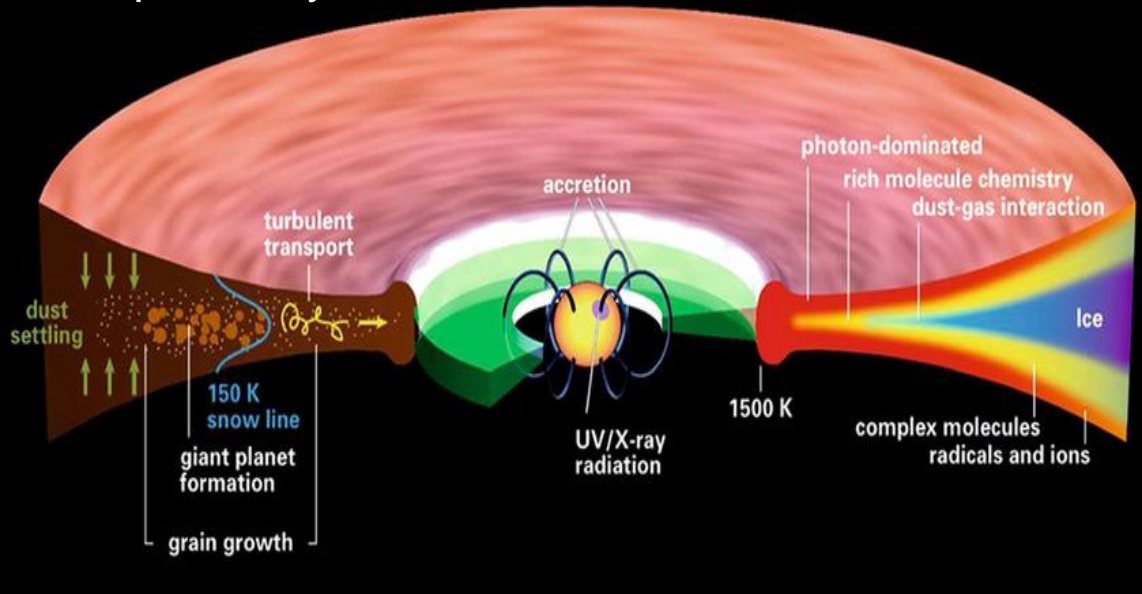
# Элементы Лагранжевой гидродинамики в Феосаде

- *Моделирование столкновения диска с внешней звездой*
- *Миграция планет в протопланетном диске*

- 1) Расчет динамики диска ведется в неинерциальной системе координат, двигающейся вместе с центральной звездой. Для этого вводится так называемый неявный потенциал (Regaly & Vorobyov 2017).
- 2) Рассчитывается самосогласованная динамика с учетом взаимного гравитационного влияния диска и лагранжевой частицы (внешняя звезда, планета) в срединной плоскости диска (Vorobyov et al. 2017).
- 3) Учитывается аккреция на лагранжеву частицу и обратное влияние на диск в виде аккреционной светимости (Vorobyov et al. 2020).



# Protoplanetary disk sketch



## Феосад учитывает следующие процессы:

- 1) Падение вещества на диск из протозвездной оболочки
- 2) Самогравитация диска
- 3) Нагрев диска звездой и фоновым межзвездным излучением
- 4) Охлаждение тепловым излучением пыли с поверхности диска
- 5) Турбулентная вязкость (альфа-параметризация)
- 6) Турбулентная диффузия пыли
- 7) Влияние магнитного поля на динамику диска
- 8) Динамика и рост пыли в срединной плоскости диска
- 9) Динамика летучих соединений в срединной плоскости диска
- 10) Формирование и разрушение ледяных мантий пылинок

## Заключение

FEOSAD – двухмерный численный магнито-гемодинамический код для моделирования длительной эволюции протопланетных газопылевых дисков – является совместной разработкой ЮФУ, ИНАСАН, ЧелГУ и НГУ (координатор – Эдуард Воробьев).

### Феосад включает следующие основные модули

- Совместная динамика газа и пыли в приближении тонкого диска,
- Восстановление вертикальной структуры диска
- Нагрев звездой и внешним излучением, охлаждение излучением пыли,
- Модуль роста пыли,
- Динамика и фазовые превращения летучих соединений,
- Магнитная гидродинамика,
- Лагранжевая гидродинамика (планеты, близкий пролет внешней звезды),
- Интерфейс с RADMC-3D для моделирования синтетических изображений диска.

**Типичное время расчета одного миллиона лет эволюции диска с разрешением 256x256 ячеек – 10-14 дней на серверах с 16-32 ядрами**

### Расширения/улучшения

- химическая эволюция в срединной плоскости диска (компактные наборы реакций для CO, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O.
- Фотоиспарение диска рентгеновским и жестким УФ излучением,
- Магнитный дисковый ветер (существуют только 1D модели, расширение на неосесимметричные 2D диски не очевидно),
- Различная температура газа и пыли.
- 2D1D – расчет динамики внутреннего диска с помощью неявного одномерного кода TAPIR (Ragossnig et al. 2020)

**Приглашаем к сотрудничеству!**



