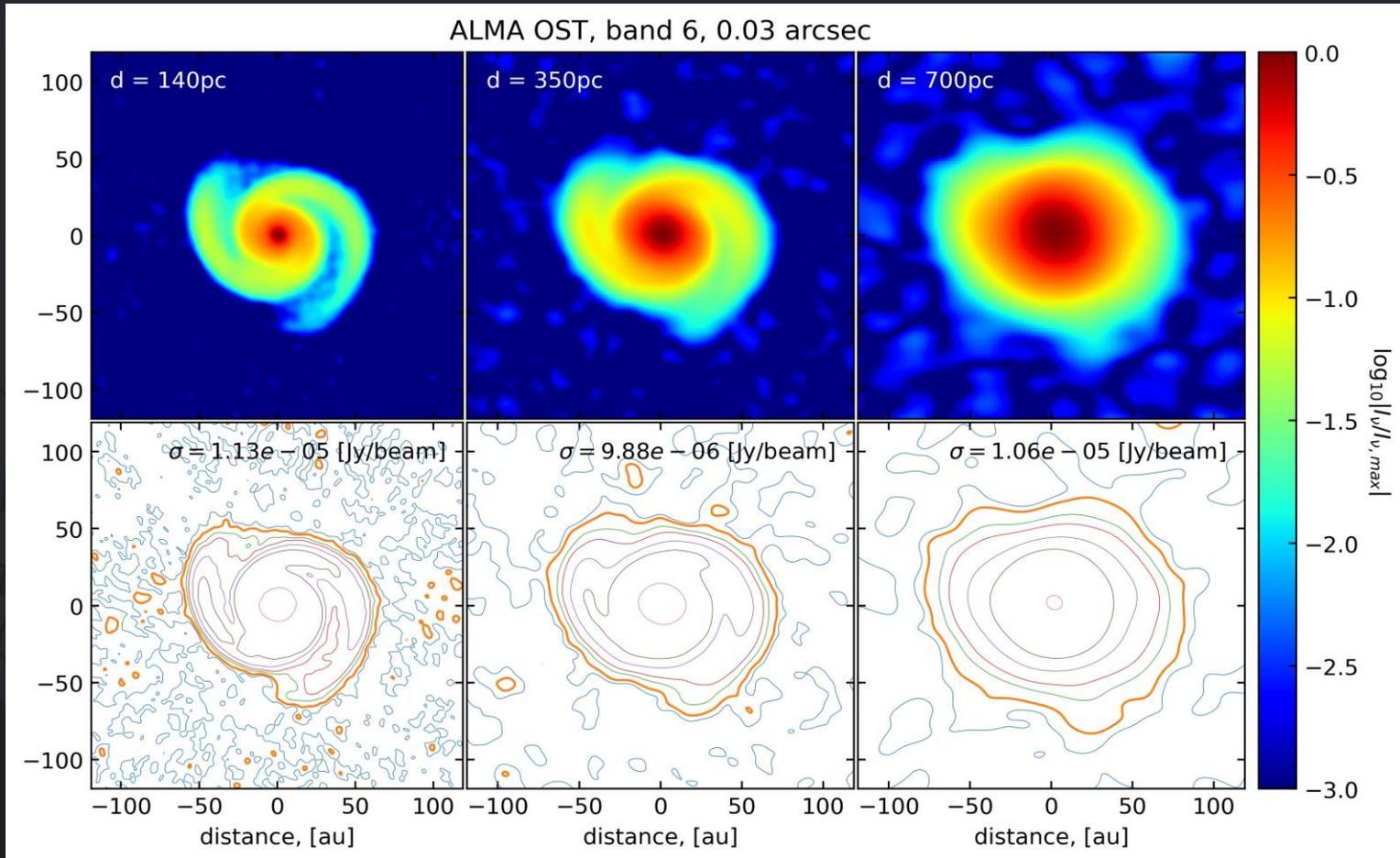


Расчетные массы и размеры молодых протопланетных дисков с учетом роста пыли



Eduard Vorobyov (University of Vienna, Austria; Southern Federal University, Russia)

In cooperation with: Alexandr Skliarevskii (ЮФУ) and Vardan Elbakyan (Univ. Duisburg-Essen)

Основные стадии формирования и эволюции протопланетного диска

Дозвездная стадия ($\sim 10^4$ лет)

Cloud

20000 au

Outflow

Forming disk

Protostellar Envelope

500 au

Диски класса 0 / I ($\sim 10^5$ лет)

ДИСКИ
Т Тельца
($\sim 10^6$ лет)

50 au

Осколочный диск ($\sim 10^{7-8}$ лет)

Credit: Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF

Начальная масса твердого вещества (пылинок) в молодых дисках класса 0?

Минимальная масса пыли, необходимая для формирования:

- ❖ планет-гигантов – 10 масс Земли, Солнечной системы – 40 масс Земли

Масса пыли в протопланетном диске оценивается по ее тепловому излучению

$$I_\nu = B_\nu(1 - e^{-\tau_\nu})$$

Интенсивность излучения плоскопараллельного диска

$$I_\nu = B_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}) \approx B_\nu \tau_\nu$$

Оптически тонкий случай $\tau \ll 1$ (мм длины волн)

$$F_\nu = I_\nu \Omega \approx B_\nu \tau_\nu \Omega = \frac{B_\nu \kappa_\nu \Sigma S}{d^2} = \frac{B_\nu \kappa_\nu M}{d^2}$$

Поток теплового излучения пыли
(например, ALMA или SMA)

$$M_{dust} = \frac{d^2 F_\nu}{B_\nu(T_{dust}) \kappa_\nu}$$

Формула для оценки массы пыли в протопланетном диске
(например, Tobin+2020; Kospal+2021)

Ключевые неопределенности:

- оптическая толщина? Весь ли диск оптически тонкий? Зависит от размера пылинок
- непрозрачность пыли κ_ν ? Зависит от размера пылинок
- температура пыли T_{dust} ?

Основная идея работы – оценка массы и размера модельного диска с использованием инструментария наблюдательной астрономии и сравнение с исходными модельными значениями

Задействовано:

- ❖ 3D численное моделирование протопланетных дисков с учетом динамики и роста пылевых частиц в диске
- ❖ Построение синтетических изображений диска на мм длинах волн
- ❖ Расчет массы пыли в диске из полученных синтетических изображений и сравнение с исходными массами пыли в численной модели

Результаты предварительные и ограничены самыми ранними стадиями формирования диска

ngFEOSAD – three-dimensional gravito-hydrodynamics on nested meshes with dust dynamics and growth (Vorobyov+2024, A&A)

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

continuity equation for gas

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

small dust < 1 μm (strictly linked to gas)

$$\frac{\partial \rho_{g.d.}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{g.d.} \mathbf{v}) = S$$

grown dust $\geq 1 \mu\text{m}$ (can decouple from gas)

$$\frac{\partial (\rho_g \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} + \mathbf{I}P) = -\rho_g \nabla \Phi - \rho_{g.d.} \mathbf{F}_{drag}$$

momentum equations for gas

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

momentum equations for grown dust

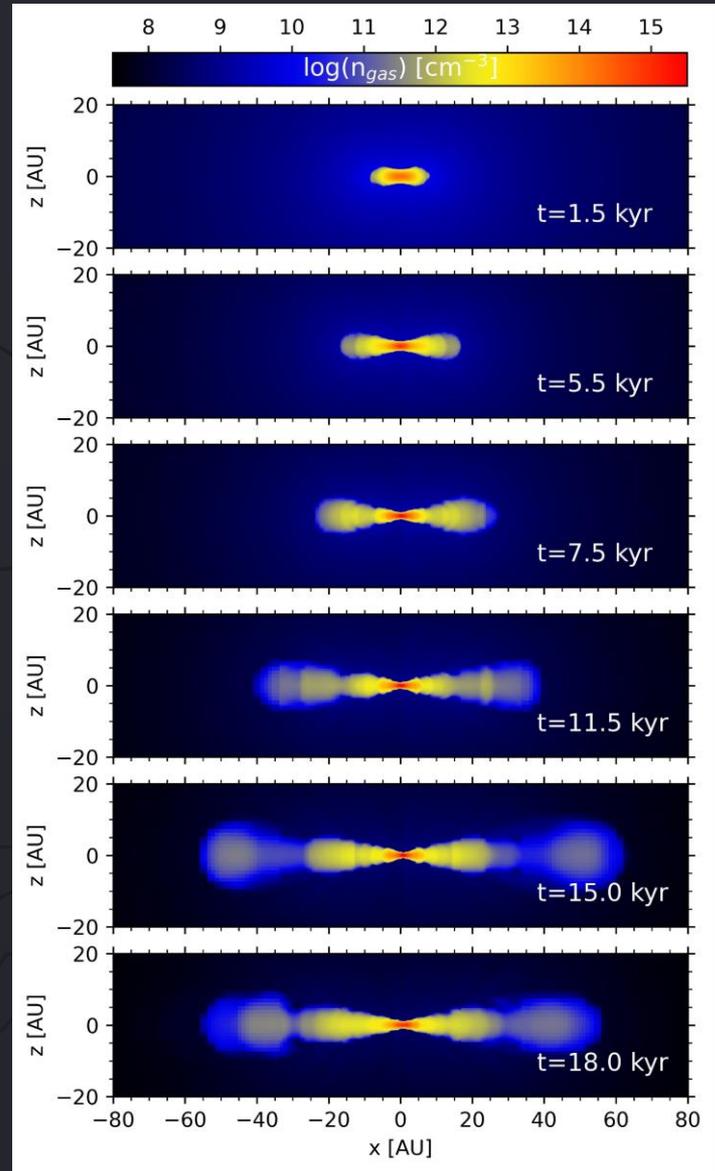
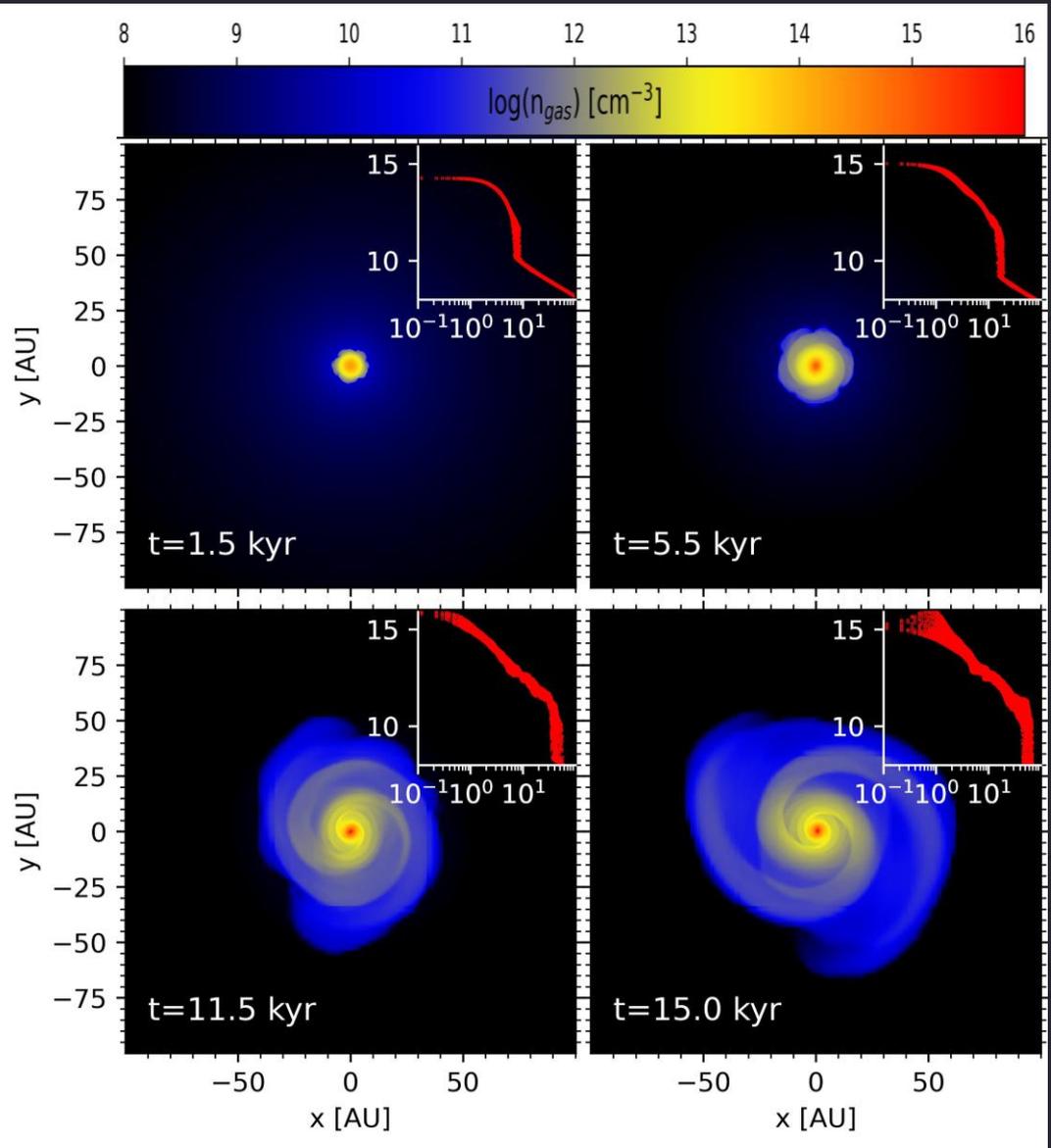
GAS : Godunov method of conservative finite volumes + **HLLC** Riemann solver

DUST : Godunov method + one-wave HLL Riemann solver for pressureless fluid

GAS+DUST : **3rd order** in space (piecewise parabolic) and 1st order in time

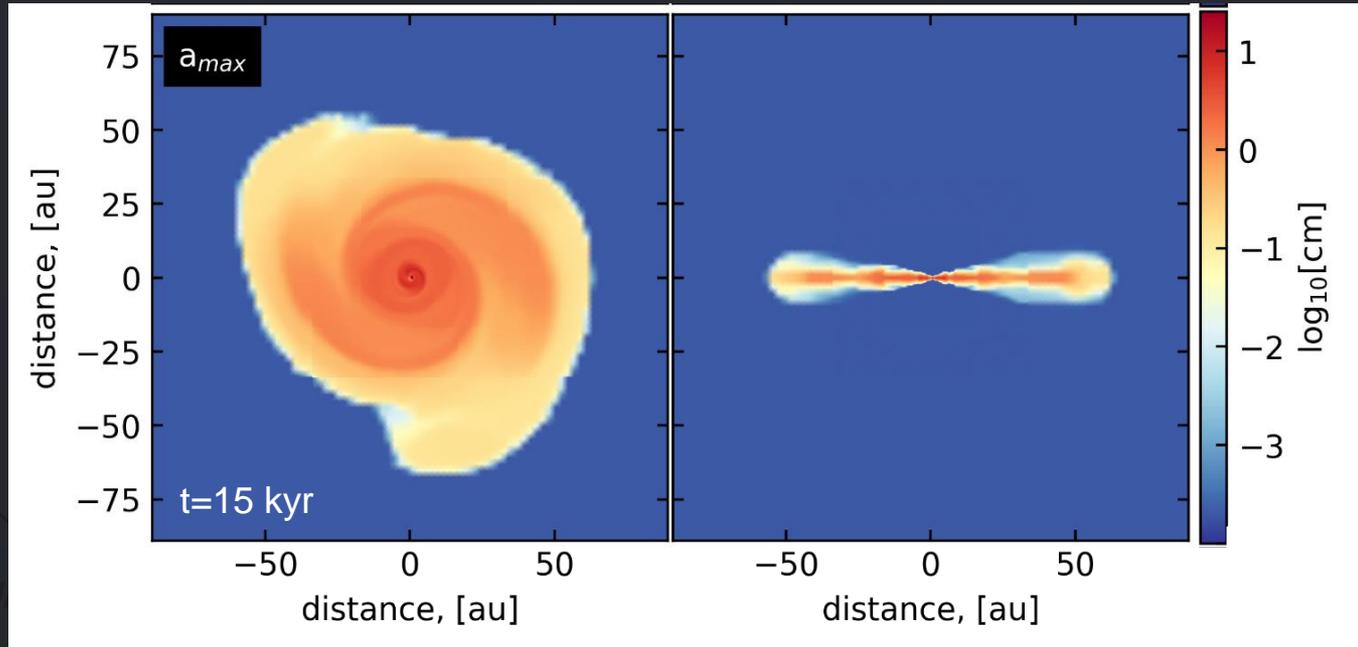
DUST-to-GAS FRICTION : Fully implicit scheme

GAS+DUST SELF-GRAVITY : Nested grid decomposition + FFT



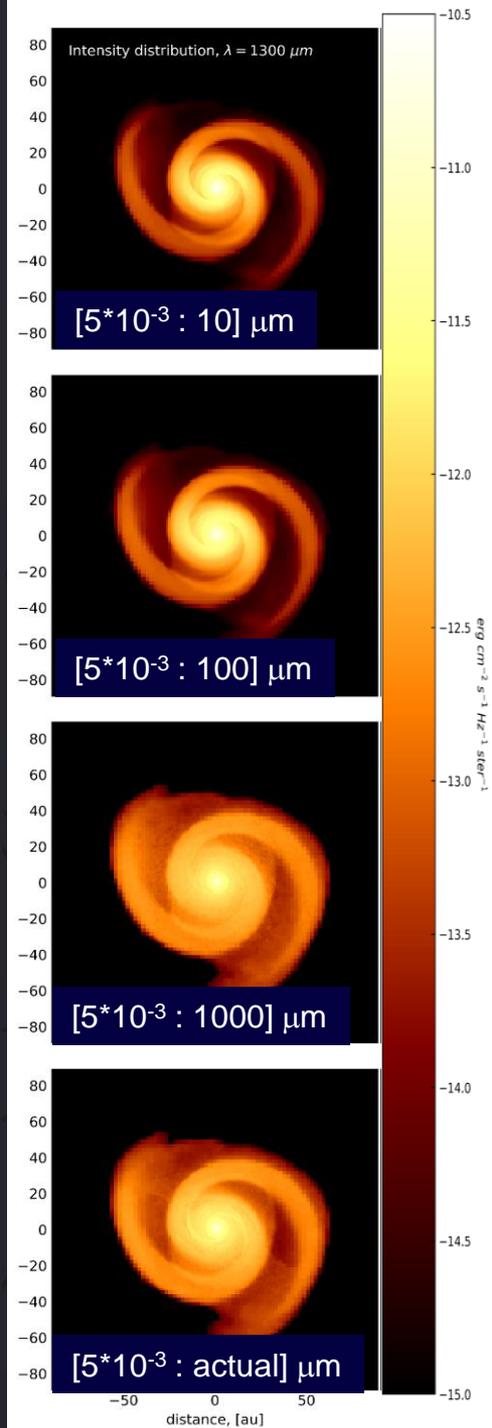
Центральное уплотнение – протозвезда на стадии формирования
 $T \sim 1500$ K, $n \sim 10^{16}$ cm $^{-3}$

Пространственное распределение максимального размера пылинок в диске



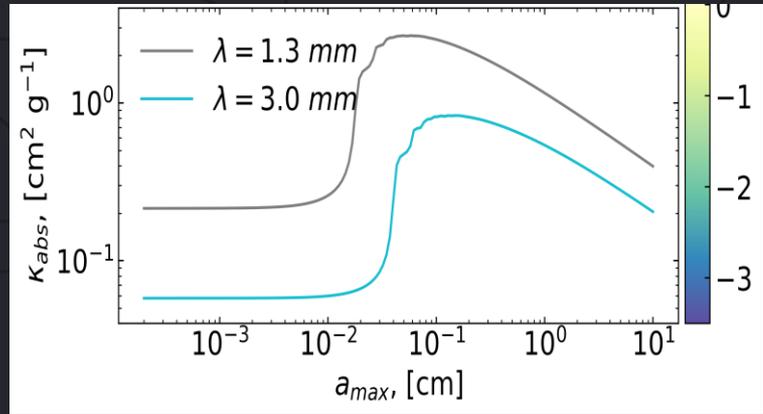
- ❖ Максимальный размер пылинок варьируется от ~ 1 мм до нескольких см.
- ❖ Пылинки максимального размера находятся в срединной плоскости диска.

Заметим, что на рисунке показан только максимальный размер пылинок. Весь спектр размеров пылинок в каждой ячейке диска простирается от субмикронного до показанного максимального размера, с функцией распределения $N(a) \sim a^{-3.5}$

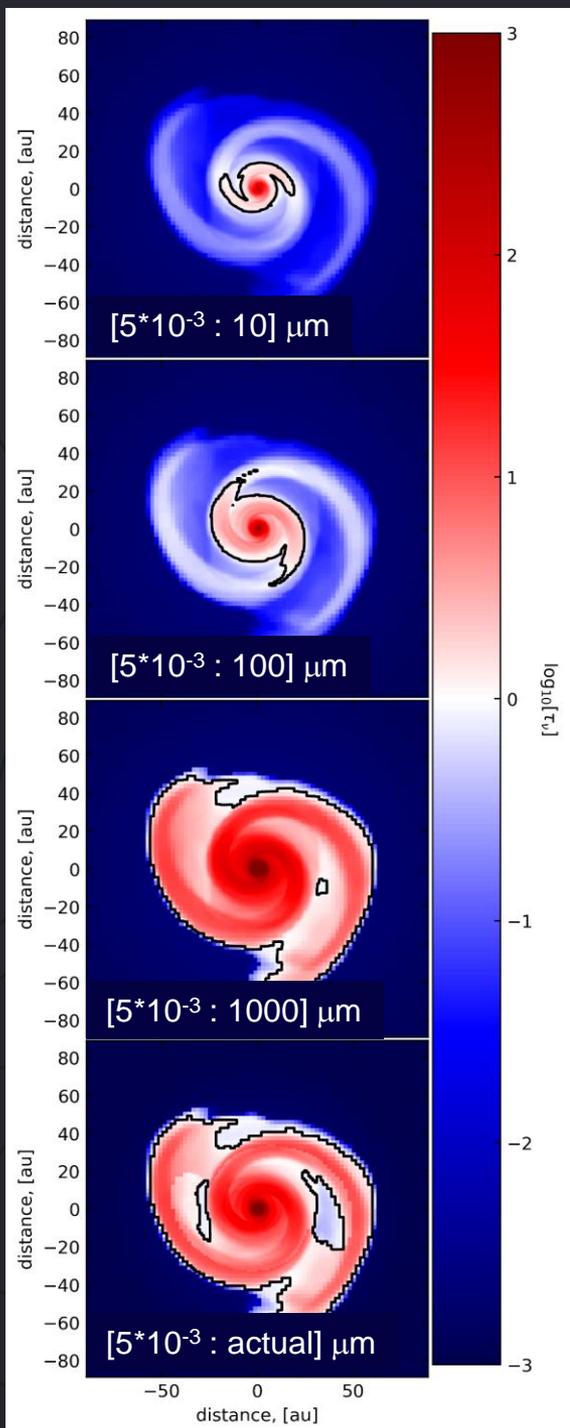


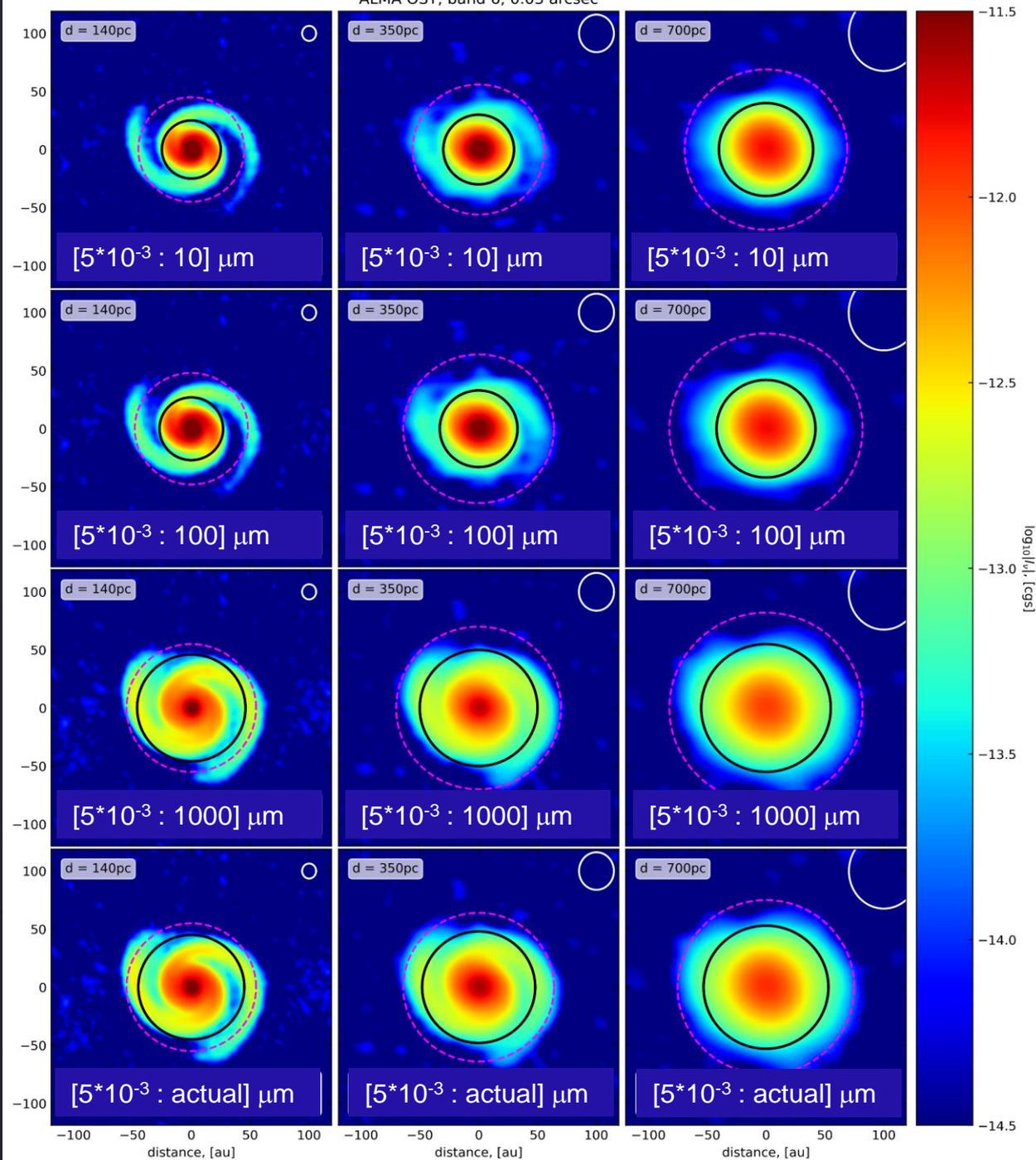
Radiation intensity I (at $\lambda=1.3 \text{ mm}$)
(RADMC 3D, Dullemond+2012)

Optical depth τ (at $\lambda=1.3 \text{ mm}$)
черный контур – $\tau = 1.0$



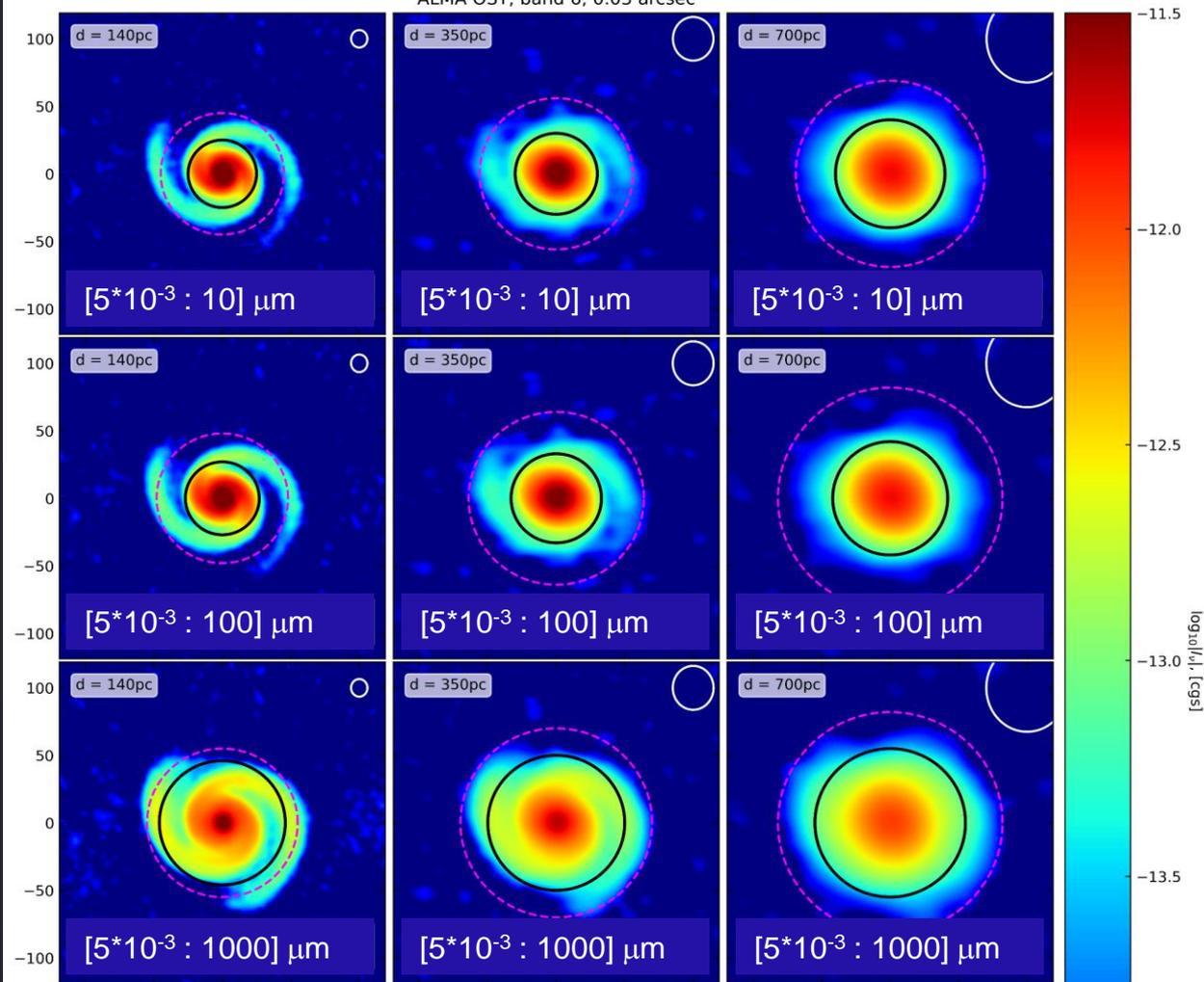
Резкий рост непрозрачности пыли
приходится на $\lambda = 2 \pi * a_{max}$





Observational support tool (OST ALMA)

- Черная окружность – 90% полного потока излучения
Принята наблюдателями для оценки размера диска.
- Красная окружность – 98% полного потока
- ❖ Спиральная структура размывается с увеличением расстояния до объекта
- ❖ критерий 90% потока охватывает только часть диска



- ❖ Размер диска увеличивается с ростом максимального размера пылинок. Эффект увеличения оптической толщины?

$$I_{\nu} = B_{\nu} (1 - e^{-\tau_{\nu}}) \neq B_{\nu} \tau_{\nu}$$

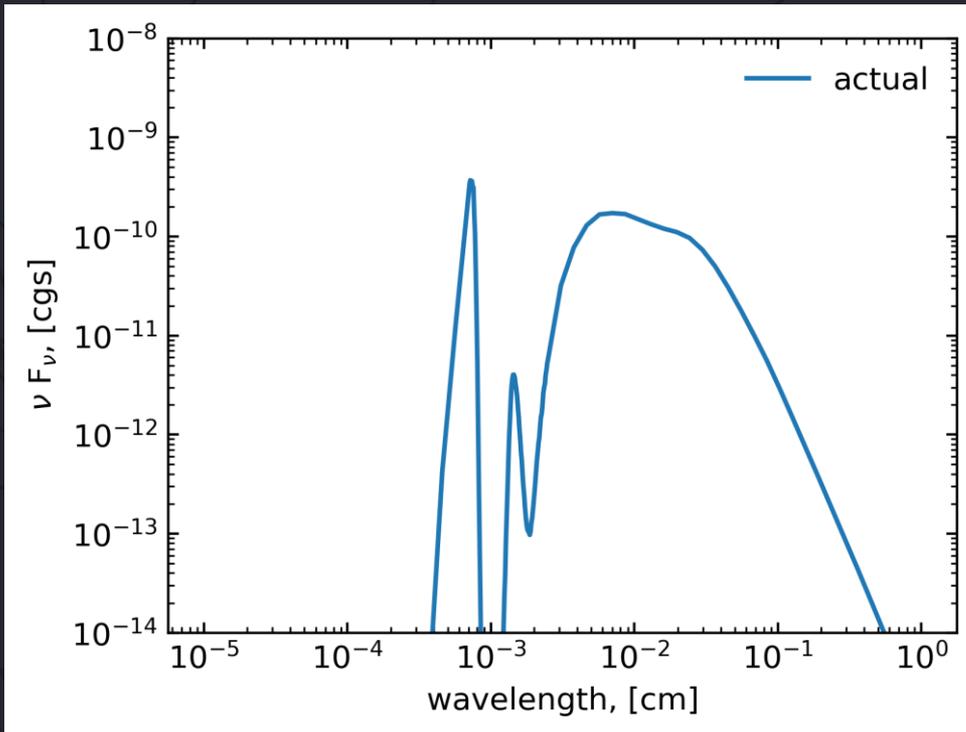
- ❖ Размер диска увеличивается при увеличении расстояния до объекта. Эффект размытия картинки за счет увеличения луча (beam smearing)?

Model [a_{\max}]	$R_{90\%}^{\text{obs}}(d=140 \text{ pc})$ [AU]	$R_{98\%}^{\text{obs}}(d=140 \text{ pc})$ [AU]	$R_{90\%}^{\text{obs}}(d=350 \text{ pc})$ [AU]	$R_{98\%}^{\text{obs}}(d=350 \text{ pc})$ [AU]	$R_{90\%}^{\text{obs}}(d=700 \text{ pc})$ [AU]	$R_{98\%}^{\text{obs}}(d=700 \text{ pc})$ [AU]
10 μm	25	45	30	56	40	69
100 μm	27	48	33	64	42	82
1.0 mm	46	55	50	70	55	82
actual	45	55	48	64	53	75

Определение массы пыли в диске

$$M_{dust} = \frac{d^2 F_\nu}{B_\nu(T_{dust}) \kappa_\nu}$$

Спектральное распределение энергии
модельного диска



$$\kappa_\nu (\lambda=1.3 \text{ mm}) = 0.899 \text{ cm}^2/\text{g}$$

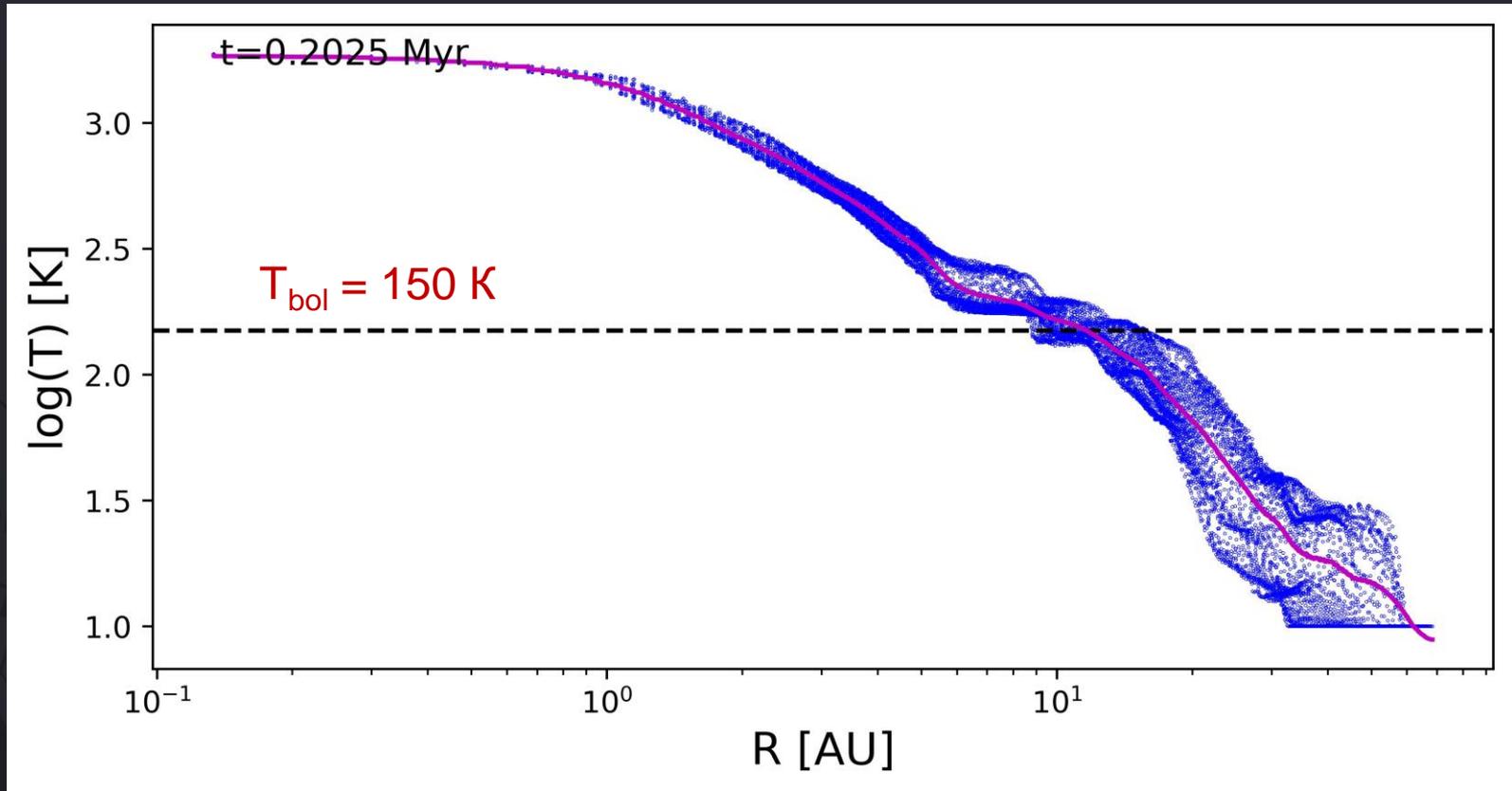
(Ossenkopf & Henning 1994)

$$T_{bol} = 1.25 \times 10^{-11} \frac{\int_0^\infty \nu F_\nu d\nu}{\int_0^\infty F_\nu d\nu} \text{ K.}$$

Myers & Ladd 1993

Полученная средняя температура пыли – $T_{bol} = 150 \text{ K}$

Радиальное распределение температуры пыли в диске



Model [a_{\max}]	$M_{90\%}^{\text{obs}}(d=140 \text{ pc})$ [M_{\oplus}]	$M_{98\%}^{\text{obs}}(d=140 \text{ pc})$ [M_{\oplus}]	$M_{90\%}^{\text{obs}}(d=350 \text{ pc})$ [M_{\oplus}]	$M_{98\%}^{\text{obs}}(d=350 \text{ pc})$ [M_{\oplus}]	$M_{90\%}^{\text{obs}}(d=700 \text{ pc})$ [M_{\oplus}]	$M_{98\%}^{\text{obs}}(d=700 \text{ pc})$ [M_{\oplus}]
10 μm	40.9	44.1	41.7	45.2	42.1	45.4
100 μm	43.8	47.6	45.1	48.8	45.3	49.0
1.0 mm	44.9	48.5	46.7	50.5	46.6	50.5
actual	48.0	52.1	49.4	53.7	49.6	53.8

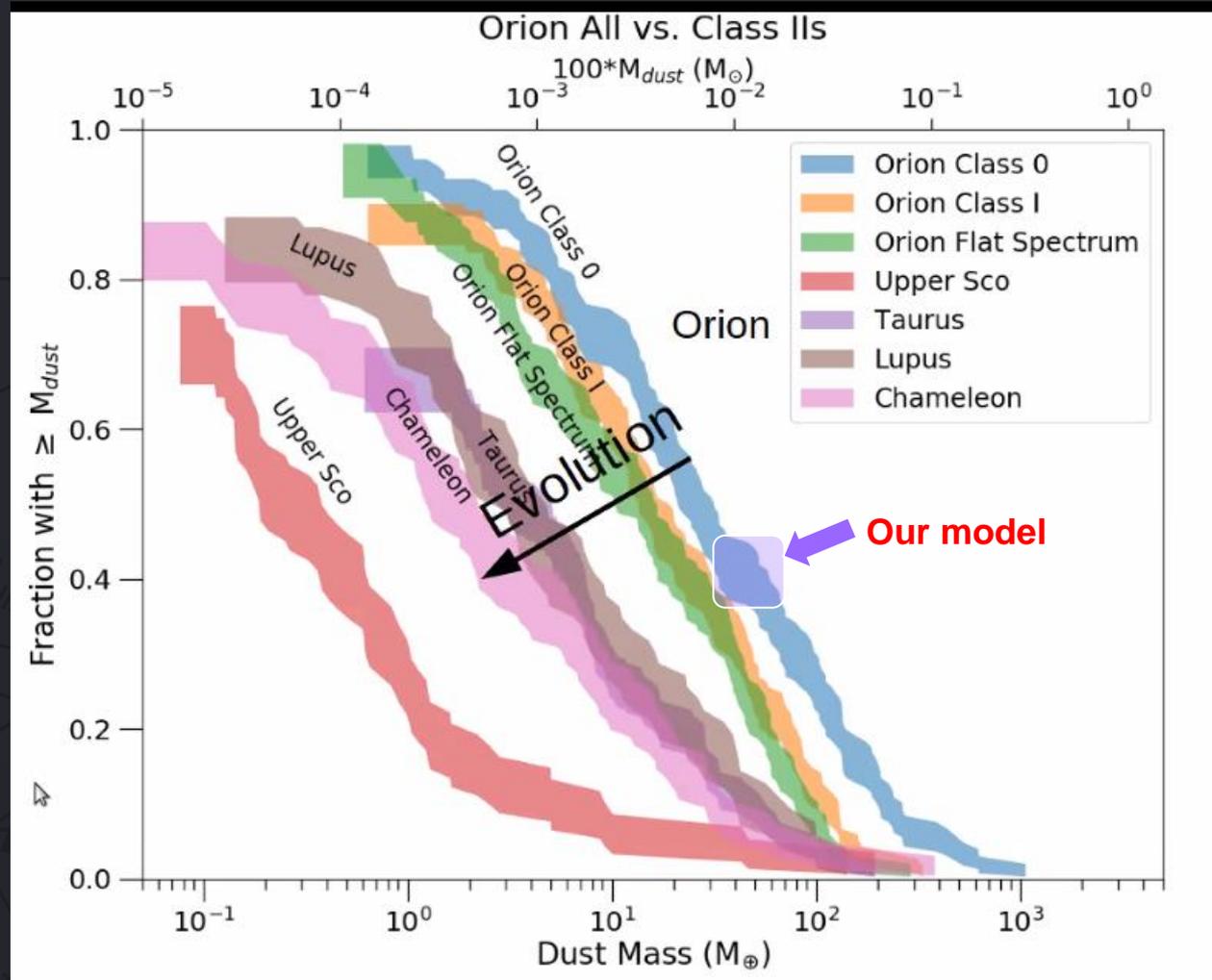
- ❖ Расстояние до объекта слабо влияет на оценку массы пыли в диске
- ❖ Рост пыли приводит к небольшому увеличению расчетной массы диска

Действительная масса пыли в модельном диске $\sim 880 M_{\text{Earth}}$

**$\sim 90\%$ массы пыли теряется при оценке,
принятой в наблюдательной астрономии!**

А как согласуются наши оценки с наблюдениями?

Кумулятивное распределение массы пыли в протопланетных дисках на разных стадиях эволюции (ALMA / VLA, Tobin+2020)

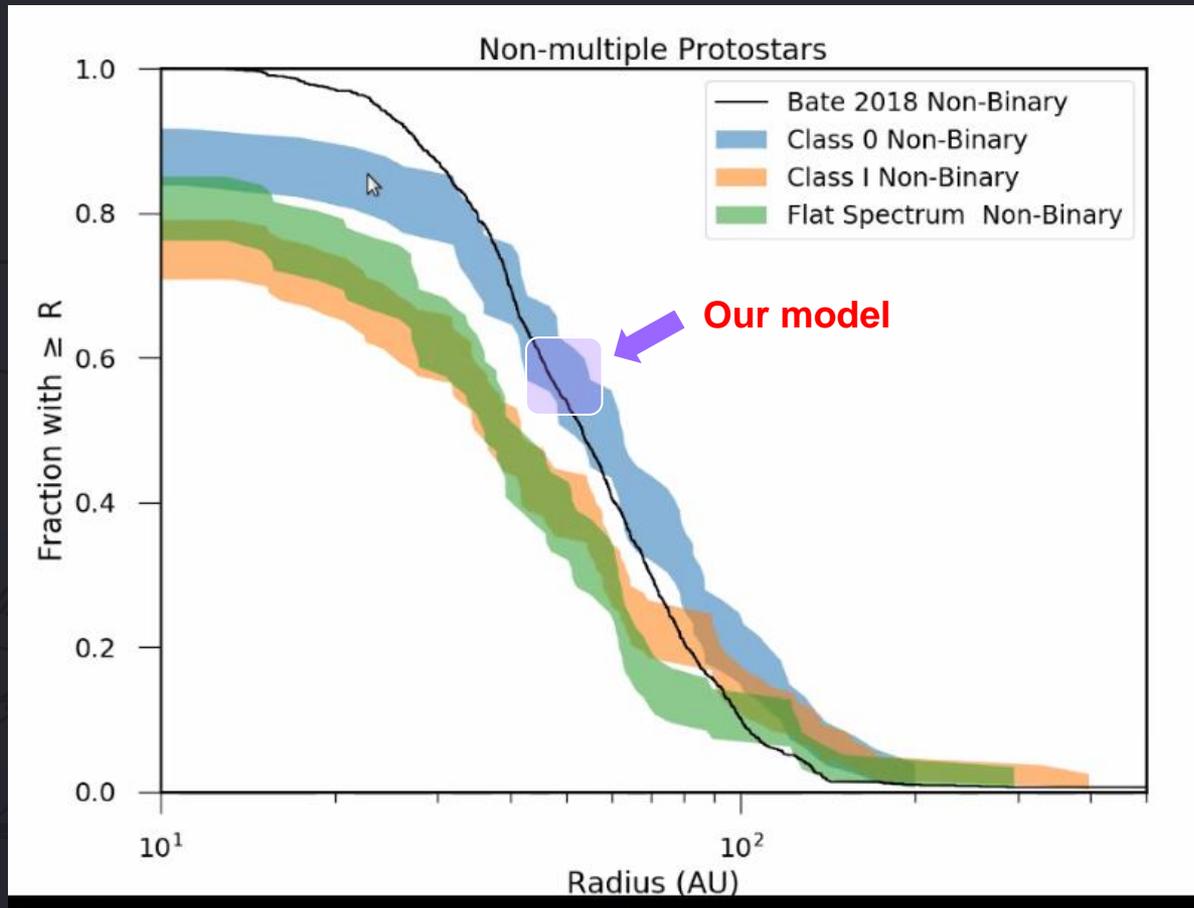


Около 40% наблюдаемых дисков характеризуются массами, схожими с или больше чем наши оценки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

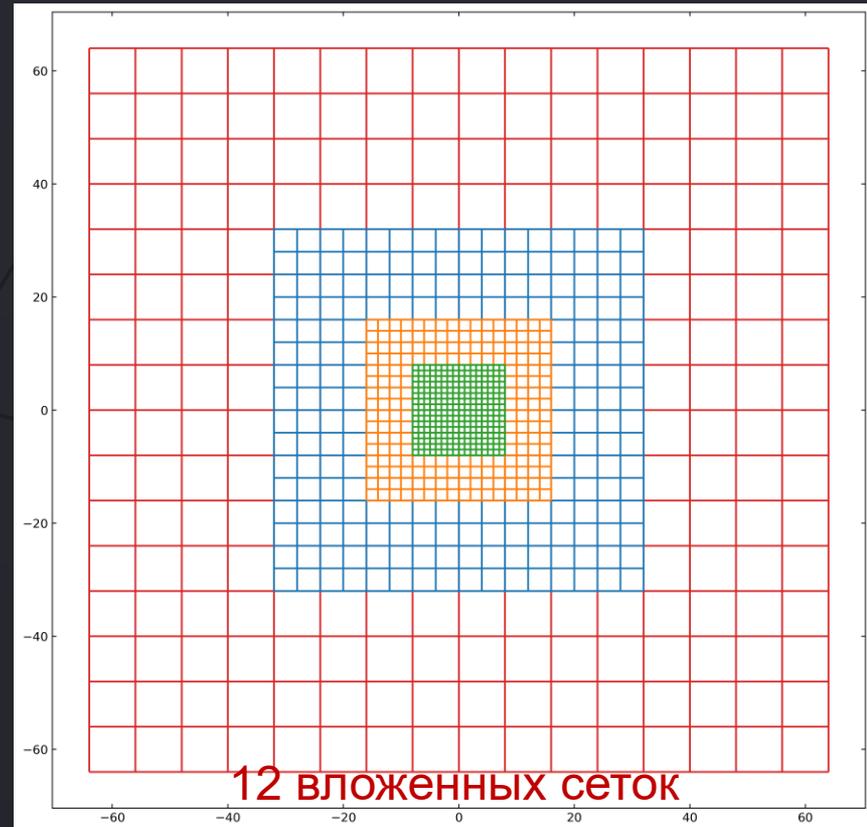
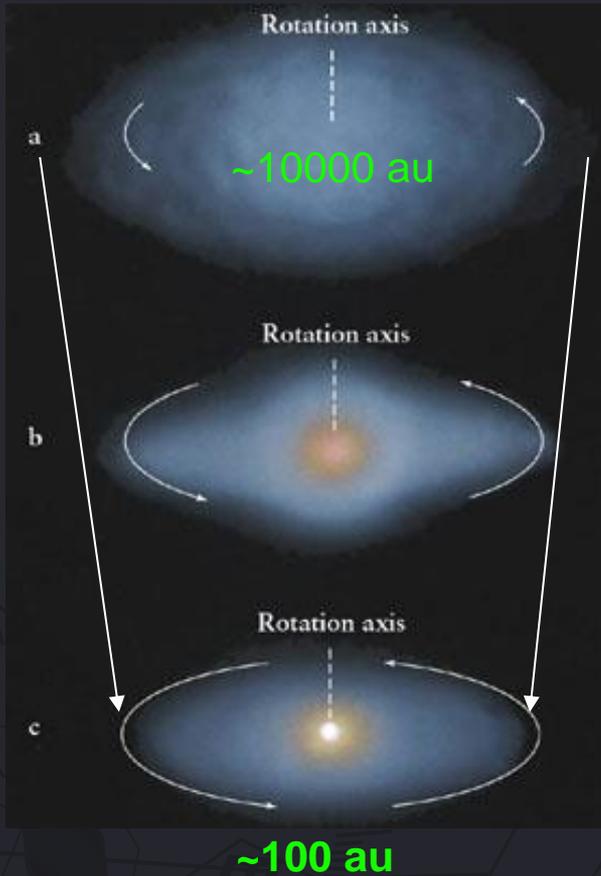
- ❖ Оценки массы и размеров протопланетных дисков зависят от максимального размера пылевых частиц, в основном за счет изменения непрозрачностей пыли по мере увеличения их размера.
- ❖ Основная масса пыли может теряться при расчете через потоки теплового излучения пыли согласно процедуре, принятой в наблюдательной астрономии. Причину предстоит установить.
- ❖ Резервуар пыли в протопланетных дисках может быть значительно выше, чем следует из наблюдений, что облегчает процесс планетообразования.

Кумулятивное распределение радиусов протопланетных дисков на разных стадиях эволюции (ALMA / VLA, Tobin+2020)



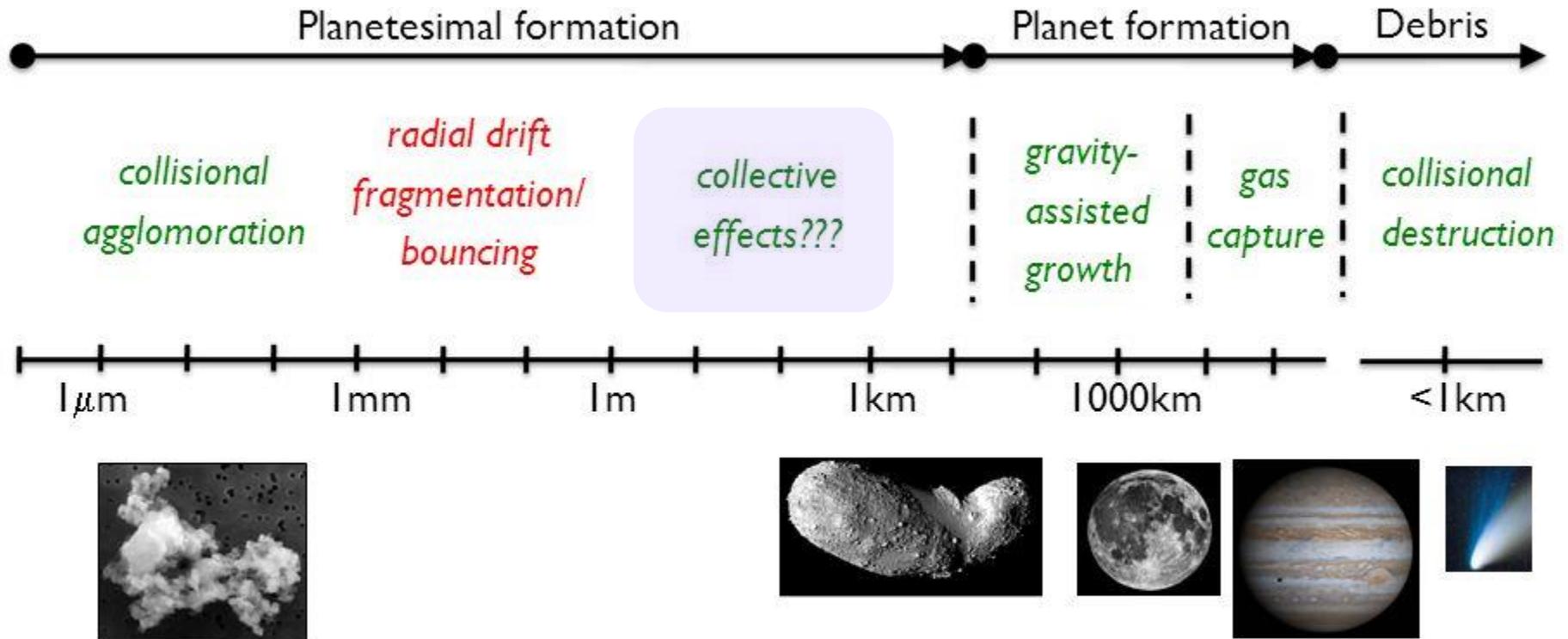
Около 55% наблюдаемых дисков характеризуются размерами, схожими с или больше чем наши оценки

Nested grids in Cartesian coordinates



- Achieving fine resolution in the protoplanetary disk
- Reducing the total number of grid cells compared to uniform grids (speedup)

From Dust to Planets -- 14 orders of magnitude

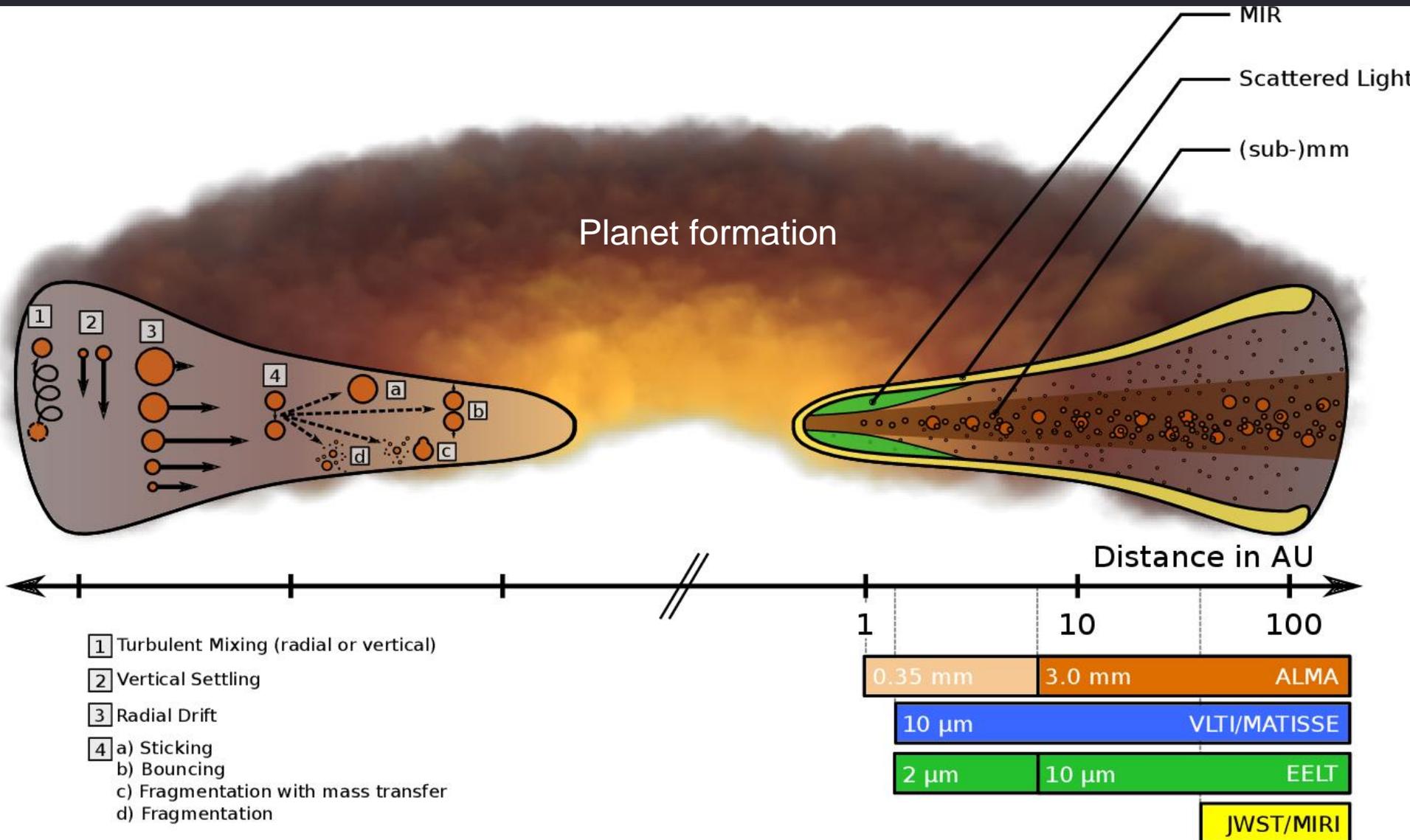


Ключевой вопрос – количество твердого вещества (масса пылинок) в дисках?

Минимальная масса пыли, необходимая для формирования:

- ❖ планет-гигантов – 10 масс Земли
- ❖ Солнечной системы – 40 масс Земли

Vertical slice through a protoplanetary disk



Наблюдения на (суб-)мм длинах волн дают информацию о росте и концентрации пыли, то есть начальных стадиях формирования планет