



UNIVERSITY OF  
**LEICESTER**

# Эволюция пыли в гравитовязких протопланетных дисках

---

ВАРДАН ЭЛБАКЯН

ANDERS JOHANSEN

MICHIEL LAMBRECHTS

ЭДУАРД ВОРОБЬЁВ

АЛЕКСАНДР СКЛЯРЕВСКИЙ

ВИТАЛИЙ АКИМКИН

# Введение

Наблюдаемый чрезвычайно низкий показатель излучения пыли может указывать на наличие крупных (миллиметровых) пылинок в оболочках объектов Класса 0 (200-2000 а.е.).

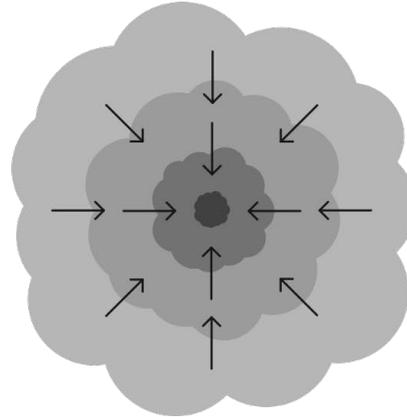
*Galametz et al. 2019*

...очевидно, что процесс формирования планет начинается в начальных протозвездных фазах, раньше, чем предсказывают современные теории формирования планет.

*Segura-Cox et al. 2020*

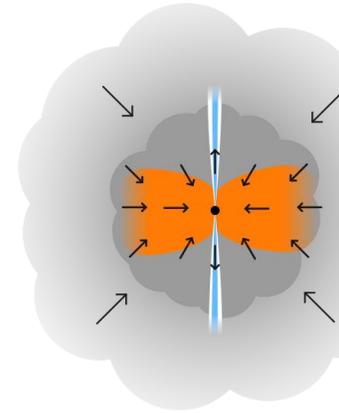
- Какой максимальный размер пыли в диске?
- Как пыль распределена?
- Как пыль движется?
- Как удержать пыль в диске?

## Prestellar Core

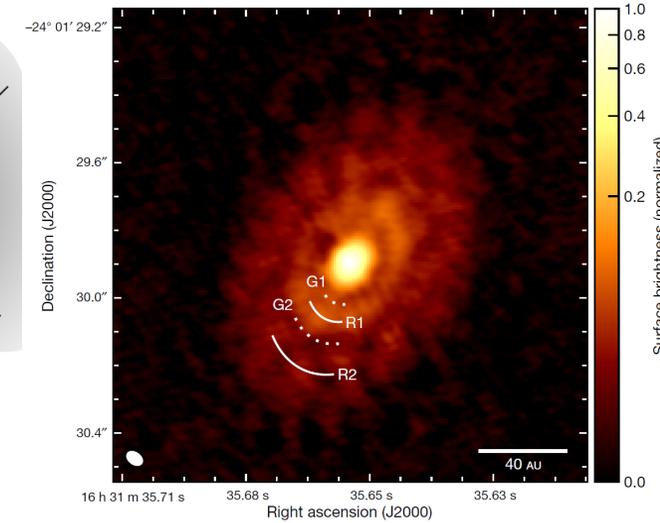


30 000 AU

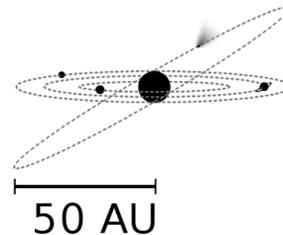
## Class 0



10 000 AU

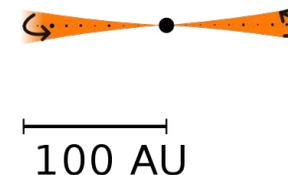


## Planetary System



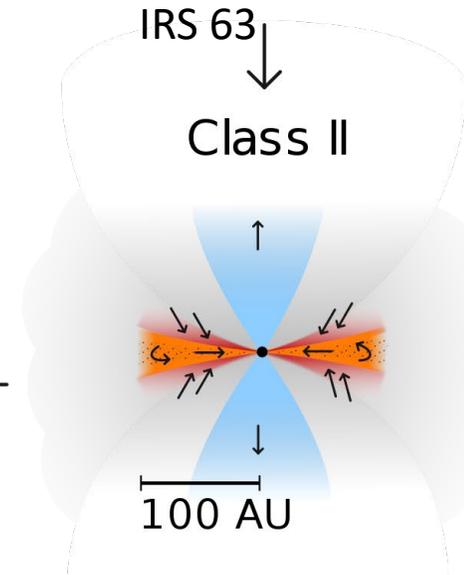
50 AU

## Class III



100 AU

## Class I



100 AU

# Численная модель

Приближение тонкого диска

(с реконструкцией вертикальной структуры диска на лету)

## Газовая компонента

Самогравитация,  
Трение,  
Фотоиспарение,  
Турбулентная вязкость,  
Химия

## Пылевая компонента

Самогравитация,  
Трение,  
Фотоиспарение,  
Рост,  
Радиационное охлаждение и  
нагрев,  
Турбулентная диффузия,  
Оседание

## Центральная звезда

Излучение диска звездой,  
Радиус и фотосферная светимость звезды.

Моделируется с помощью кода STELLAR  
(*Yorke & Bodenheimer 2008*)

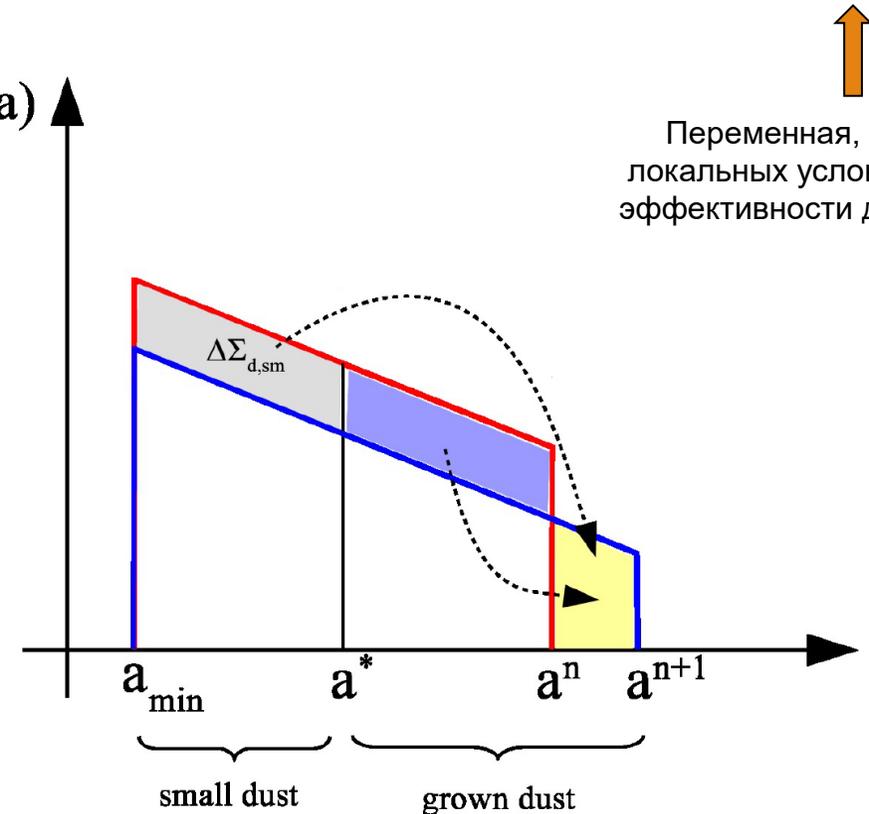
# FEOSAD – Formation and Evolution of Stars and Disks

*Vorobyov et al. 2018, A&A, 614, 98*

Мелкая пыль – радиус пылинки =  $(5 \times 10^{-3} - 1.0) \mu\text{m}$

Крупная пыль – радиус пылинки =  $(1.0 - a_{\text{max}}) \mu\text{m}$

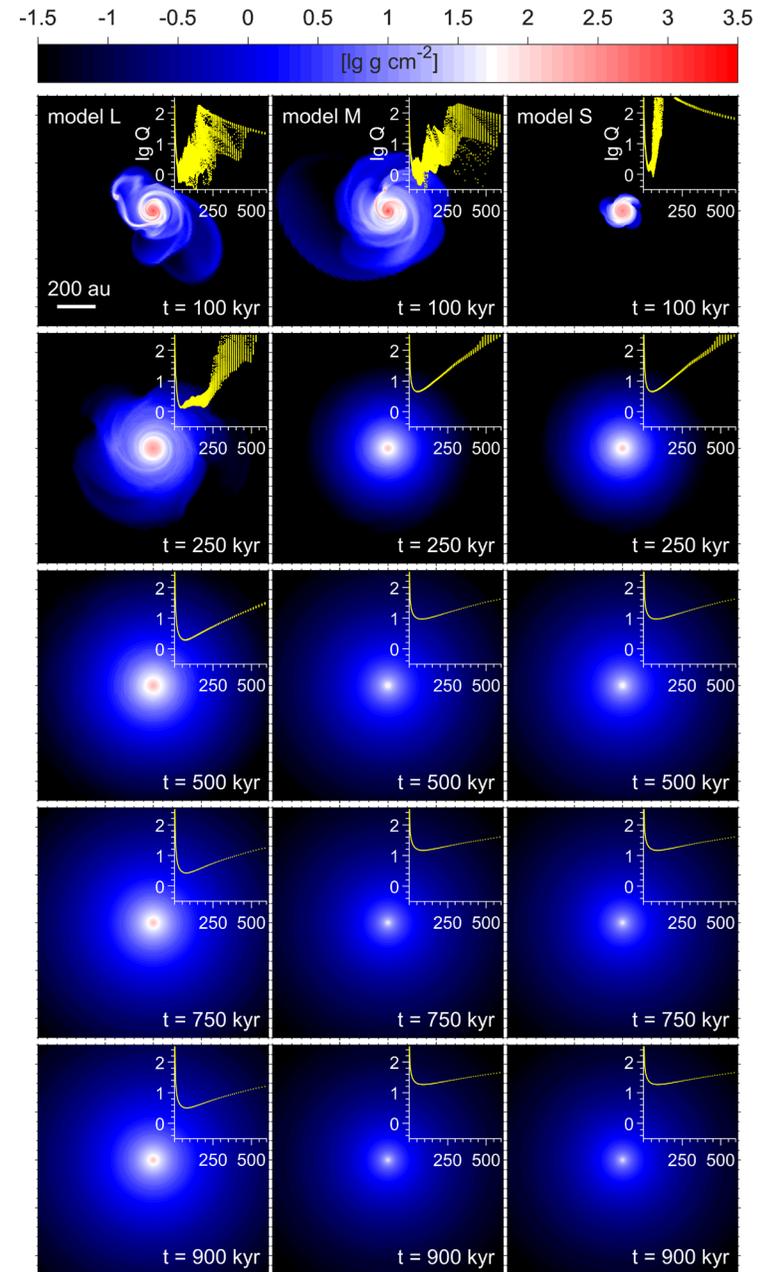
$N(a)$



# Численная модель

$\alpha$  параметризация (*Shakura & Sunyaev 1973*)  
 $\alpha = 10^{-2}$

Model	$M_{\text{core}}$ [ $M_{\odot}$ ]	$\Omega_0$ [ $\text{km s}^{-1} \text{pc}^{-1}$ ]	$r_0$ [au]	$\Sigma_{\text{g},0}$ [ $\text{g cm}^{-2}$ ]	$r_{\text{out}}$ [au]	$\beta$ [%]
L	1.03	2.1	1200	0.20	7000	0.24
M	0.53	4.0	617	0.38	3700	0.24
S	0.53	2.2	617	0.38	3700 <td 0.07	



# Радиальное распределение максимального размера пыли

$$St = \frac{\Omega_K \rho_s a_r}{\rho_g c_s}$$

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

$$u_{frag} = 30 \text{ m s}^{-1}$$

## The first ALMA survey of protoplanetary discs at 3 mm: demographics of grain growth in the Lupus region

M. Tazzari<sup>1\*</sup>, L. Testi<sup>2,3</sup>, A. Natta<sup>3,4</sup>, J. P. Williams<sup>5</sup>, M. Ansdell<sup>6,7</sup>, J. M. Carpenter<sup>8</sup>, S. Facchini<sup>2</sup>, G. Guidi<sup>9</sup>, M. Hogherheijde<sup>10</sup>, C. F. Manara<sup>2</sup>, A. Miotello<sup>2</sup>, N. van der Marel<sup>11</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, CB3 0HA, Cambridge, UK

<sup>2</sup>European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Str. 2, D-85748 Garching, Germany

<sup>3</sup>INAF/Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, I-50125 Firenze, Italy

<sup>4</sup>School of Cosmic Physics, Dublin Institute for Advanced Studies, 31 Fitzwilliams Place, Dublin 2, Ireland

<sup>5</sup>Institute for Astronomy, University of Hawai'i at Manoa, 2680 Woodlawn Dr., Honolulu, HI, USA

<sup>6</sup>Flatiron Institute, Simons Foundation, 162 Fifth Ave, New York, NY 10010, USA

<sup>7</sup>NASA Headquarters, 300 E Street SW, Washington, DC 20546, USA

<sup>8</sup>Joint ALMA Observatory, Avenida Alonso de Córdova 3107, Vitacura, Santiago, Chile

<sup>9</sup>ETH Zurich, Institute for Particle Physics and Astrophysics, Wolfgang-Pauli-Str. 27, 8093 Zurich, Switzerland

<sup>10</sup>Leiden Observatory, Leiden University, P.O. Box 9531, NL-2300 RA Leiden, the Netherlands

<sup>11</sup>Physics & Astronomy Department, University of Victoria, 3800 Finnerty Road, Victoria, BC, V8P 5C2, Canada

## Multi-wavelength continuum sizes of protoplanetary discs: scaling relations and implications for grain growth and radial drift

M. Tazzari<sup>1\*</sup>, C. J. Clarke<sup>1</sup>, L. Testi<sup>2,3</sup>, J. P. Williams<sup>4</sup>, S. Facchini<sup>2</sup>, C. F. Manara<sup>2</sup>, A. Natta<sup>3,5</sup> and G. Rosotti<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, CB3 0HA, Cambridge, UK

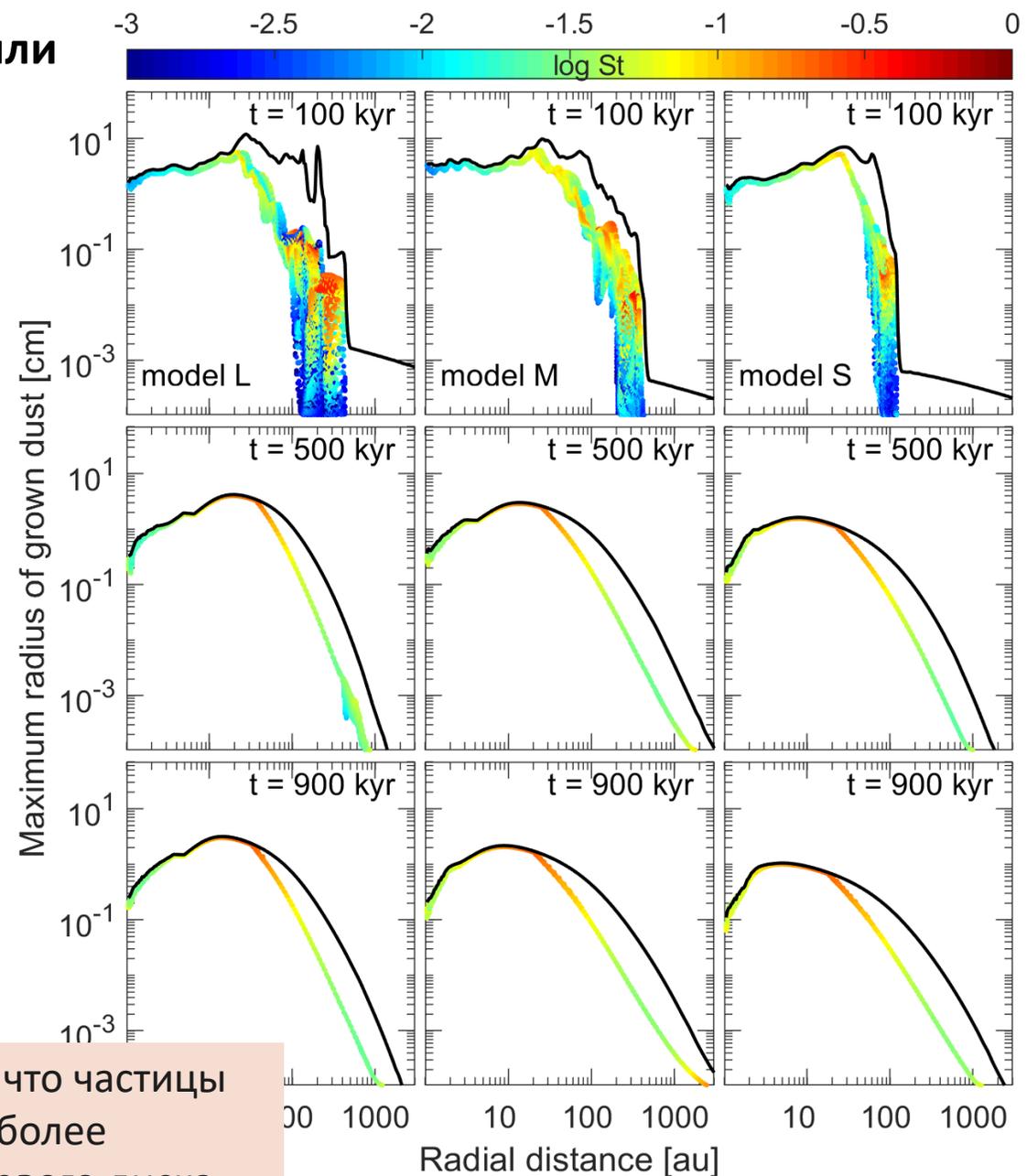
<sup>2</sup>European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Str. 2, D-85748 Garching, Germany

<sup>3</sup>INAF/Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, I-50125 Firenze, Italy

<sup>4</sup>Institute for Astronomy, University of Hawai'i at Manoa, 2680 Woodlawn Dr., Honolulu, HI, USA

<sup>5</sup>School of Cosmic Physics, Dublin Institute for Advanced Studies, 31 Fitzwilliams Place, Dublin 2, Ireland

<sup>6</sup>Leiden Observatory, Leiden University, P.O. Box 9531, NL-2300 RA Leiden, the Netherlands

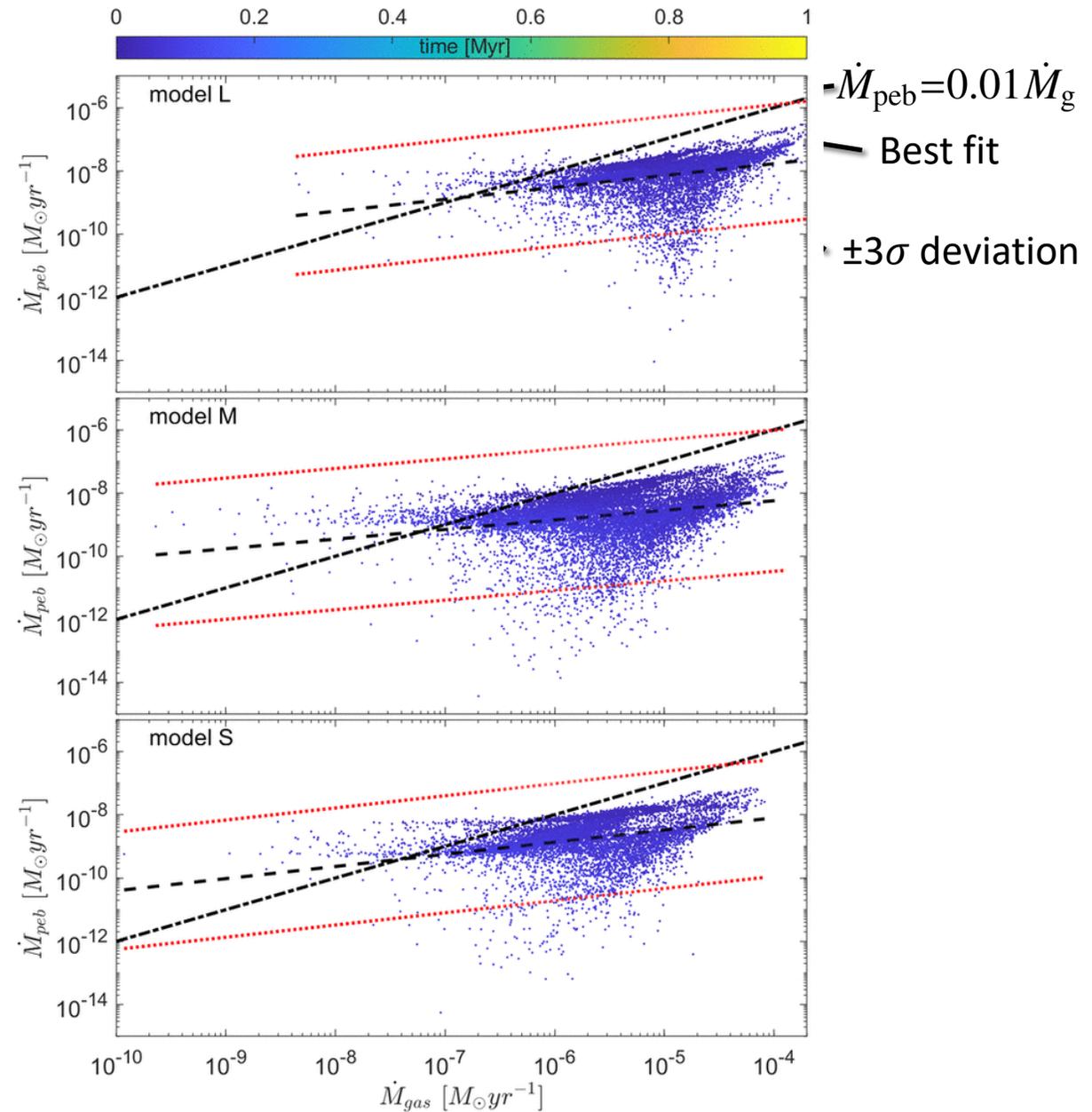
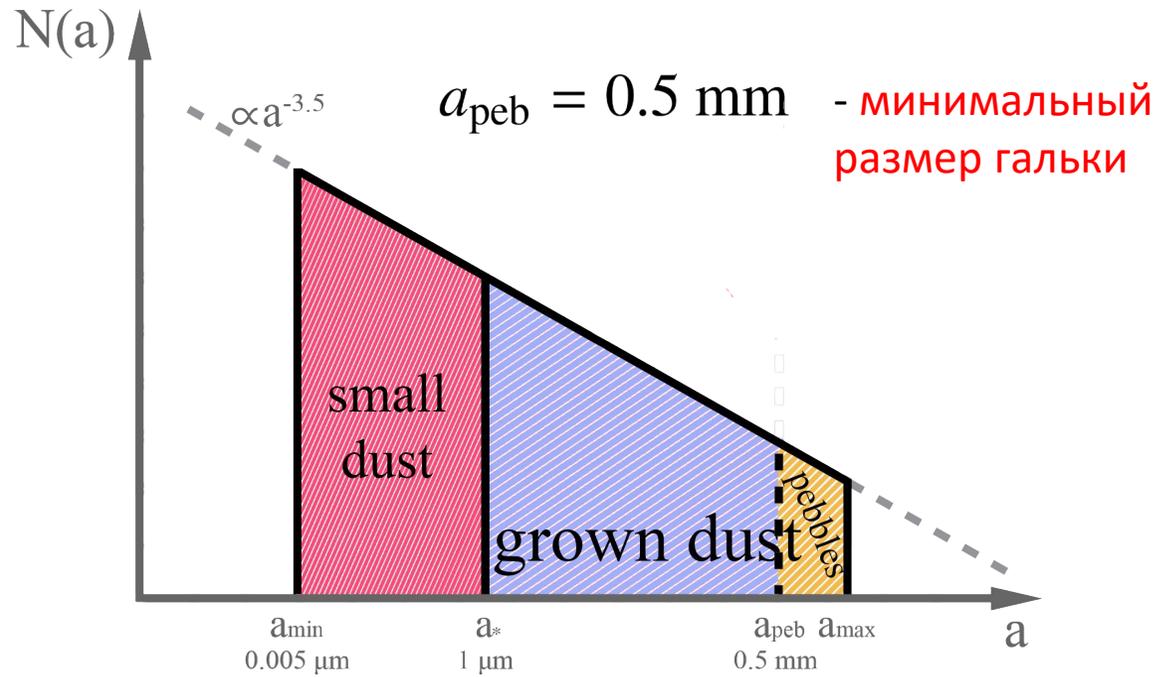


Обе статьи предполагают, что частицы размером в миллиметр и более преобладают в массе пылевого диска.

## Соотношение темпа переноса газа и гальки

$$\dot{M}_{\text{peb}} [M_{\odot} \text{yr}^{-1}] = b \dot{M}_{\text{gas}}^a [M_{\odot} \text{yr}^{-1}]$$

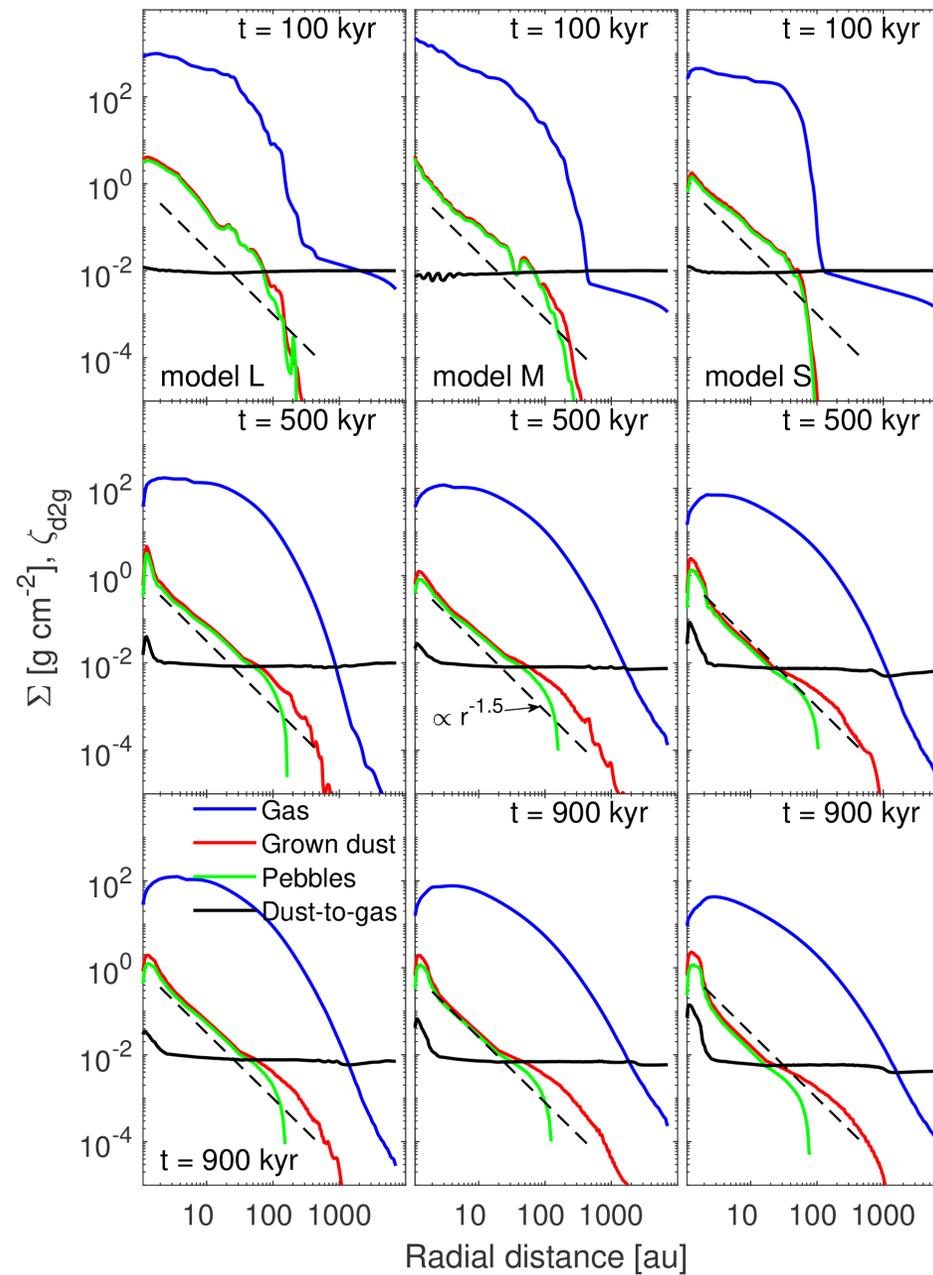
	0.5 mm		1 mm		2 mm	
	$a$	$\lg(b)$	$a$	$\lg(b)$	$a$	$\lg(b)$
model L	0.49	-5.97	0.50	-5.92	0.53	-5.81
model M	0.49	-6.09	0.51	-5.99	0.53	-5.96
model S	0.59	-5.47	0.61	-5.35	0.64	-5.24
All models	0.52	-5.84	0.54	-5.76	0.56	-5.67



# Распределение поверхностной плотности

$\Sigma_{\text{peb}} \propto r^{-1.2}$  в модели **L** and **M**,

$\Sigma_{\text{peb}} \propto r^{-1.5}$  в модели **S** (MMSN зависимость)

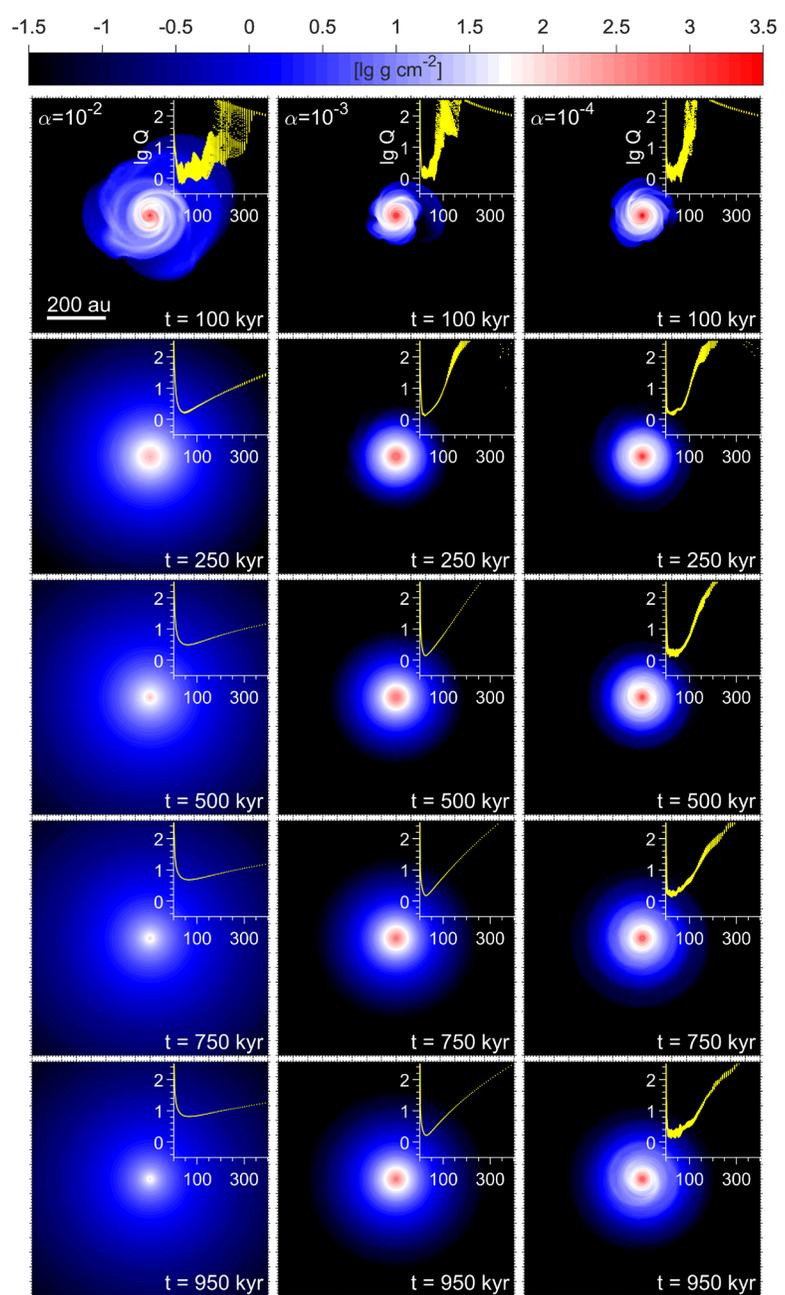


Gas  
Dust-to-gas ratio  
Grown dust  
Pebbles

# Модели с переменным $\alpha$ параметром

Широкий диапазон значений  $\alpha$  был обнаружен различными исследованиями - от  $10^{-4}$  до 0.1.

- Mulders & Dominik 2012;*
- Teague et al. 2016;*
- Lodato et al. 2017;*
- Rafikov 2017;*
- Ansdell et al. 2018;*
- Najita & Bergin 2018;*
- Dullemond et al. 2018;*
- Flaherty et al. 2017, 2020;*
- Rosotti et al. 2020.*



$$M_{\text{core}} = 0.59 M_{\odot}$$

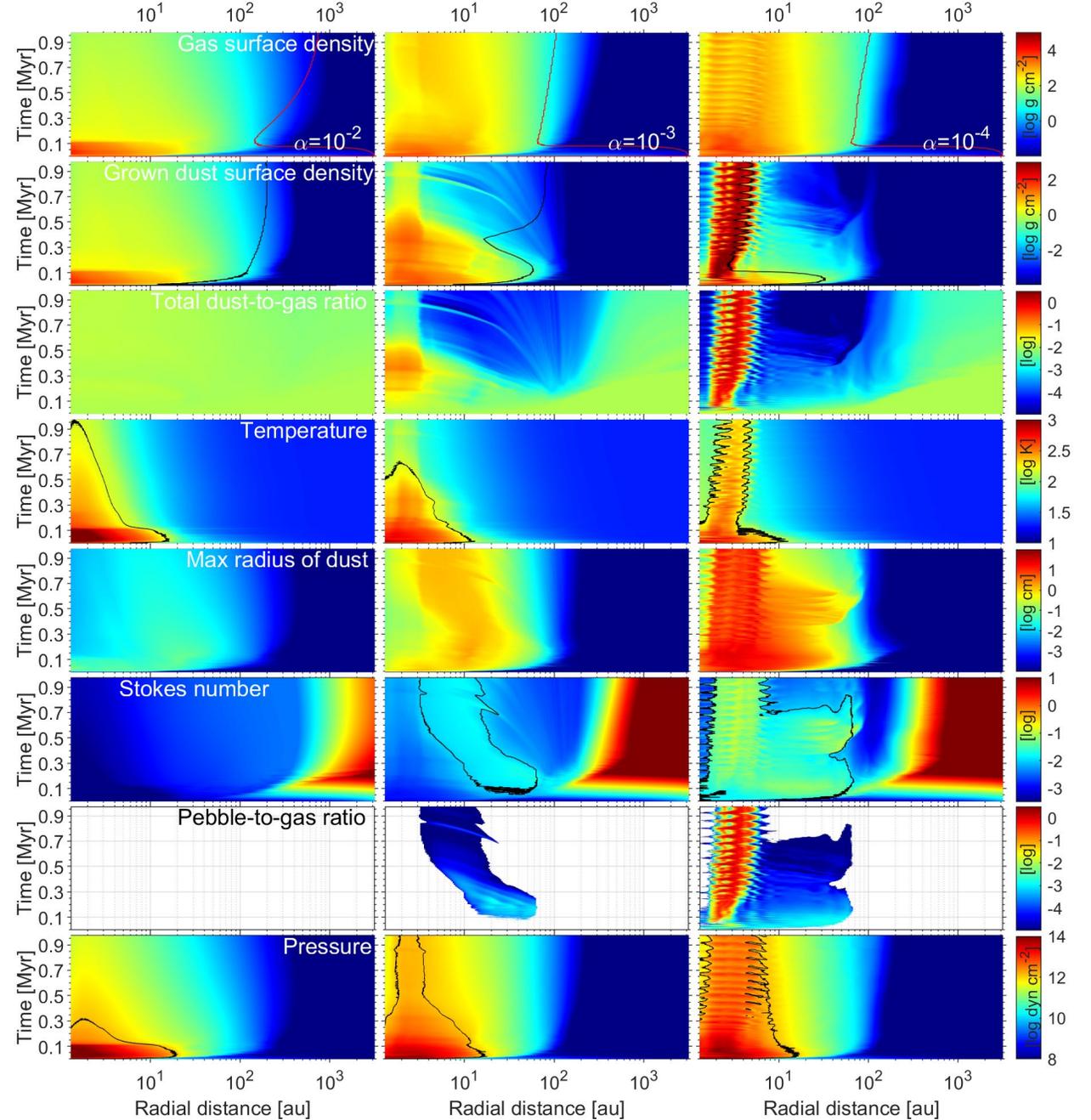
$$\beta = 0.24\%$$

$$u_{\text{frag}} = 3 \text{ m s}^{-1}$$

# Пространственно-временные диаграммы

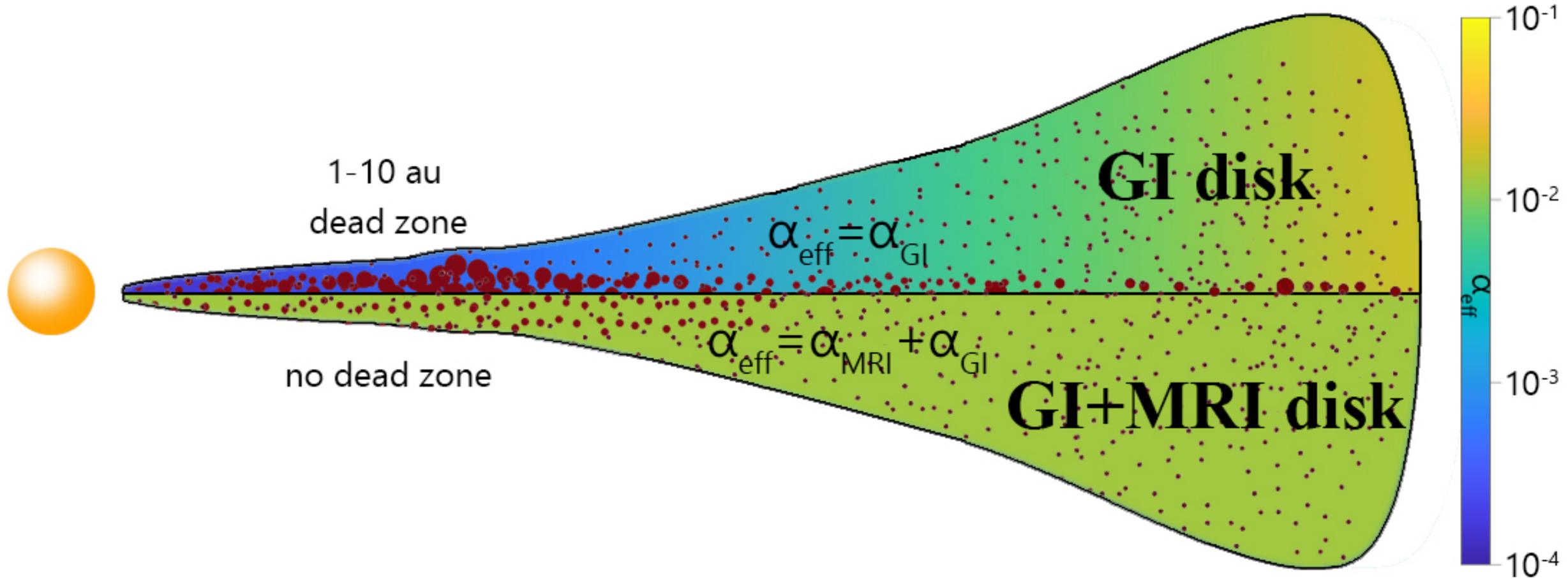
$$a_{\text{peb}} = \begin{cases} a_d, & \text{if } St \geq 0.01 \text{ AND } a_d \geq 0.5 \text{ mm,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$St = \frac{\Omega_K \rho_s a_r}{\rho_g c_s}$$

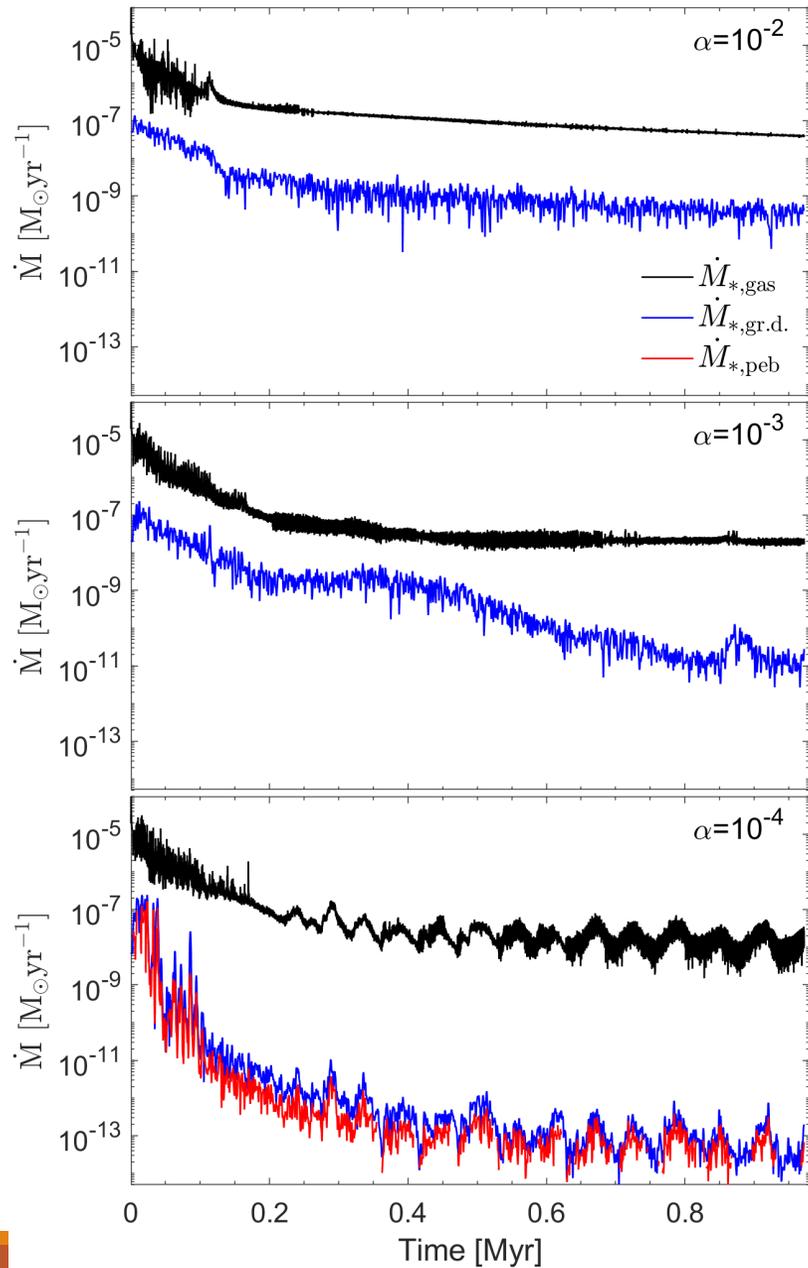


$$\alpha = 10^{-2}$$

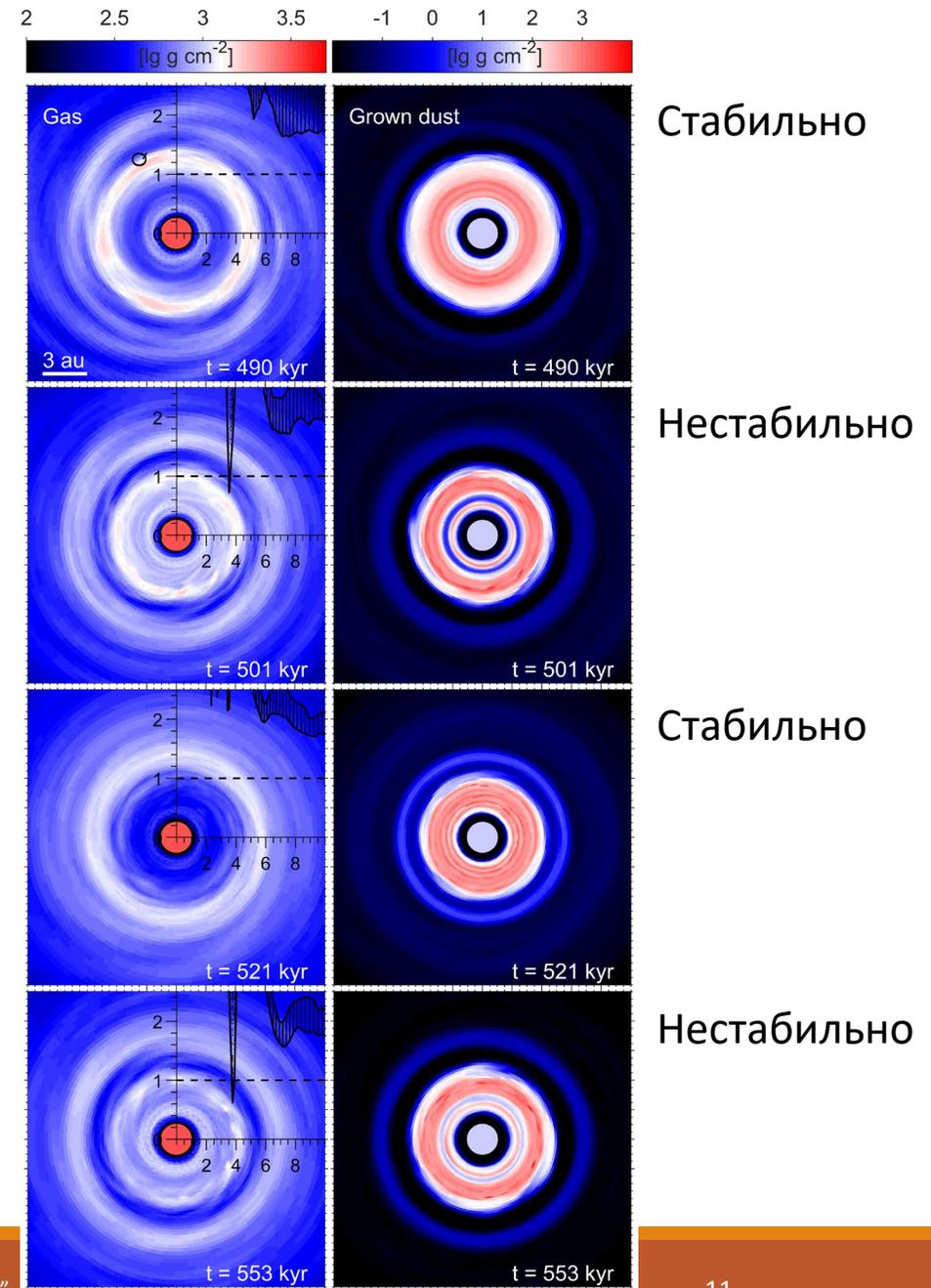
$$\alpha = 10^{-4}$$



# Темпы аккреции на звезду



# Гравитационная неустойчивость в кольце

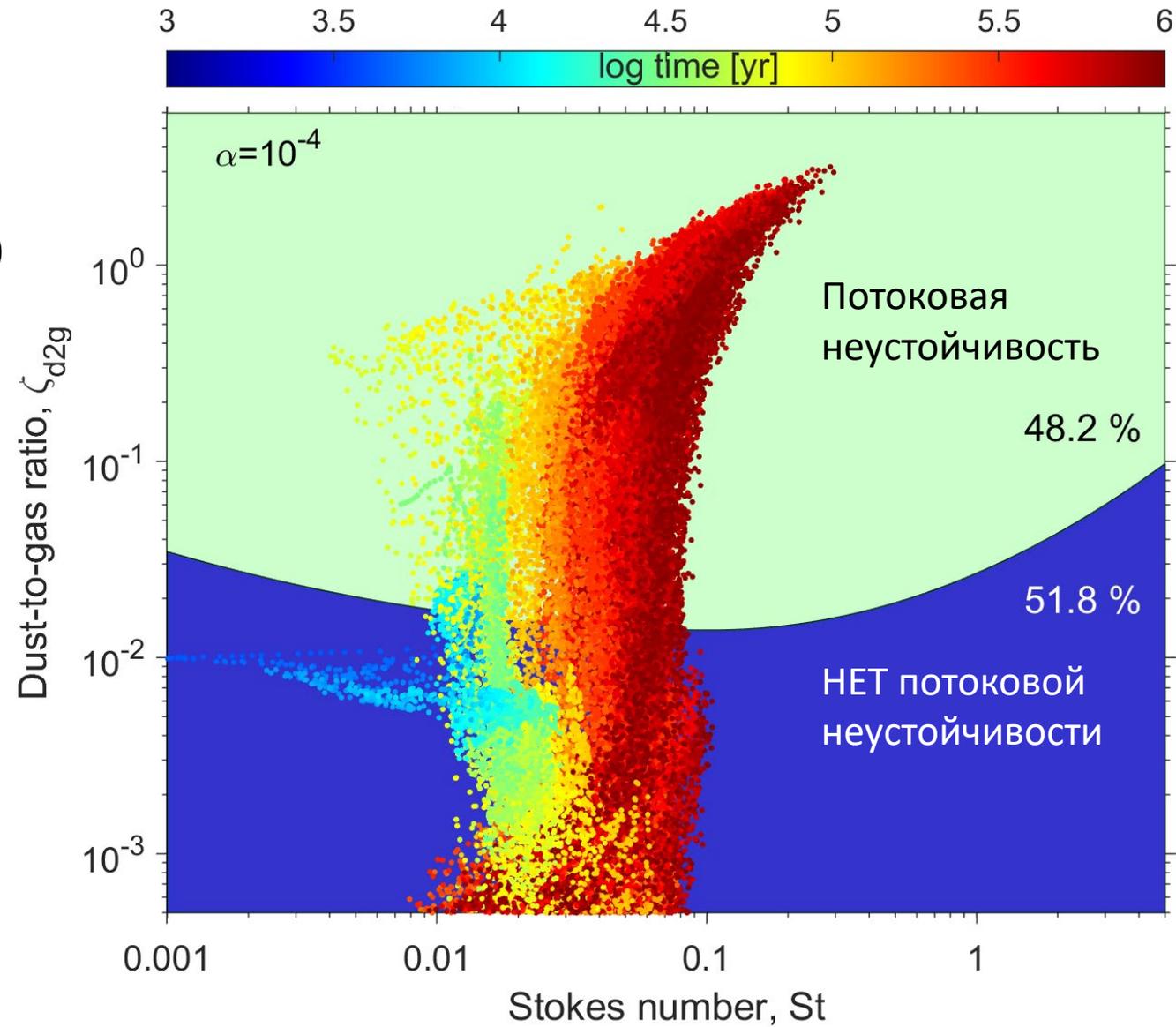


# Потоковая неустойчивость (Streaming instability) в кольце

$$\log \zeta_{d2g} = 0.3(\log St)^2 + 0.59 \log St - 1.57 \quad (St > 0.1)$$

$$\log \zeta_{d2g} = 0.1(\log St)^2 + 0.20 \log St - 1.76 \quad (St < 0.1)$$

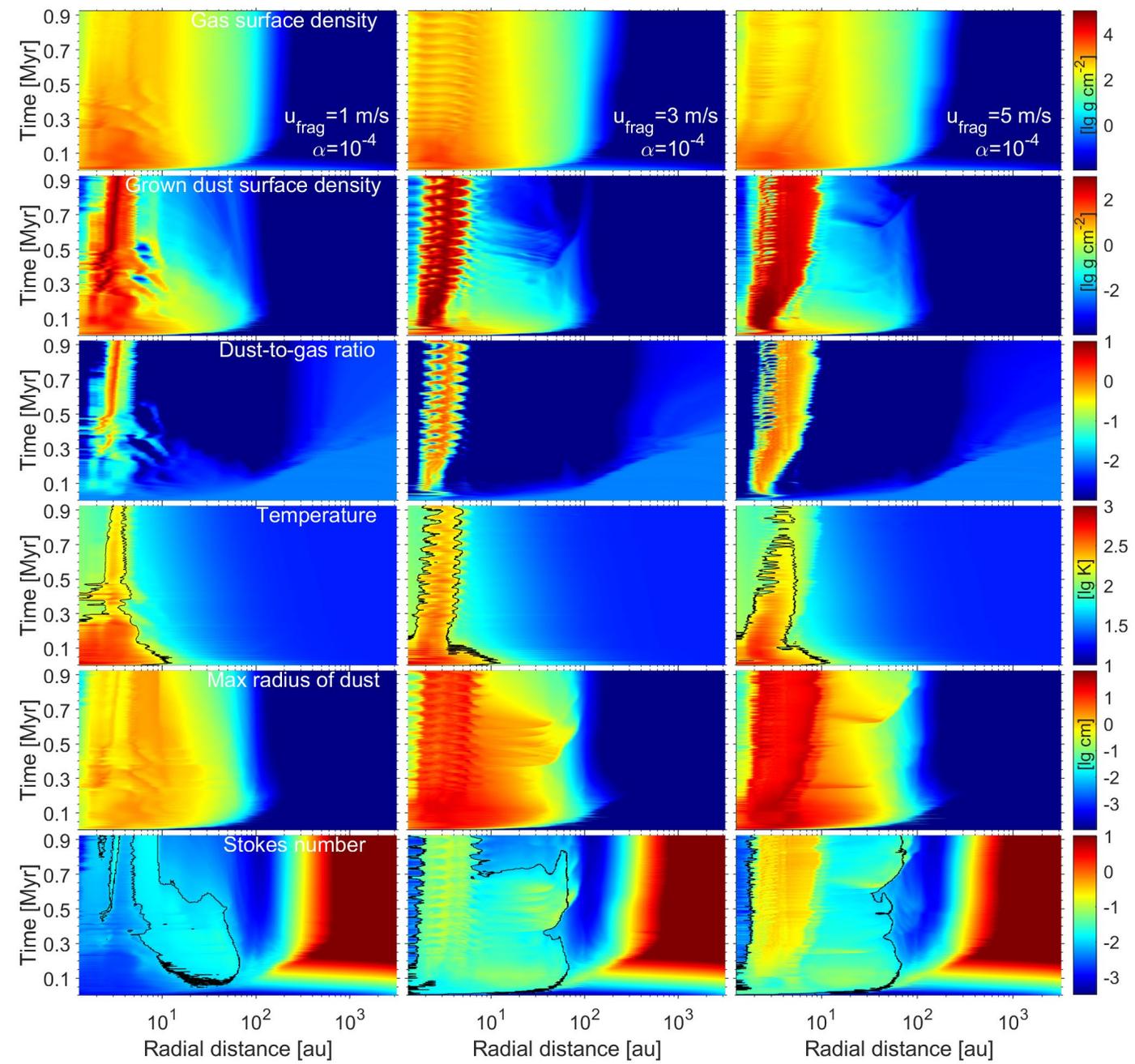
Yang et al. 2017



# Скорость фрагментации силикатных пылинок – от 1 до 30 м/с

Blum & Wurm 2008;  
 Teiser & Wurm 2009;  
 Wada et al. 2009;  
 Zsom et al. 2010;  
 Wada et al. 2013;  
 Meru et al. 2013;  
 Yamamoto et al. 2014;  
 Gundlach & Blum 2015;  
 Bukhari Syed et al. 2017

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



# Турбулентия в вертикальном направлении

Грав. неустойчивые спиральные волны рассеивают пыль в вертикальном направлении и могут критически влиять на динамику пыли.

*Riols et al. (2017) u Riols & Latter (2018b)*

Турбулентные потоки за счёт грав. неустойчивости сильно препятствуют вертикальному оседанию частиц размером от мм до дм, и шкала высот пыли сравнима с газовой.

*Riols et al. (2020)*

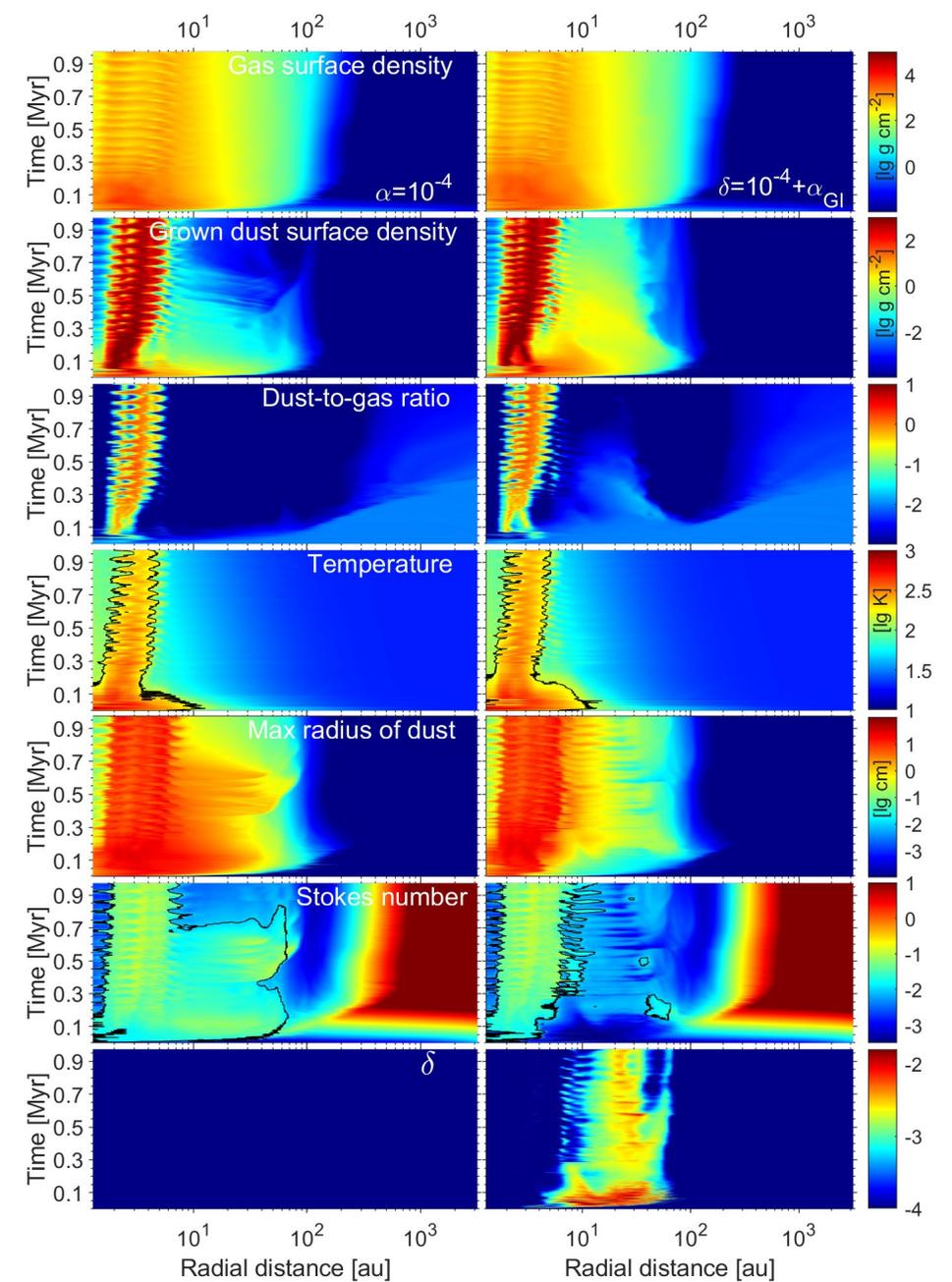
$$\alpha_{\text{GI}} = \sqrt{\alpha_{\text{short}}^2 + \alpha_{\text{long}}^2},$$

$$\alpha_{\text{short}} = \max \left[ 0.14 \left( \frac{1.3^2}{Q^2} - 1 \right) (1 - \mu)^{1.15}, 0 \right]$$

$$\alpha_{\text{long}} = \max \left[ \frac{1.4 \times 10^{-3} (2 - Q)}{\mu^{1.25} Q^{0.5}}, 0 \right]$$

$$\mu = \frac{M_d}{M_d + M_*}$$

*Kratter et al. (2008)*



## Основные выводы

- Пыль в диске вырастает до сантиметровых размеров менее чем за 100 тысяч лет после образования диска.
- Дрейф мелкой пыли из оболочки и внешнего края диска делает возможным существование пылинок размером в несколько сантиметров в диске более 900 тысяч лет.
- Основная часть выросших пылевых частиц во внутренних 100 а.е. диска имеет размер гальки. Между потоками газа и гальки в дисках существует корреляция, демонстрирующая почти универсальную степенную зависимость для дисков разной массы.
- Радиальное распределение гальки в дисках показывает почти универсальное степенное распределение, близкое к наклону распределения MMSN -  $\Sigma \propto r^{-1.5}$
- Значение параметра  $\alpha$  в диске сильно влияет на эволюцию пыли в диске.
- Кольцевая структура, образовавшаяся во внутреннем диске модели  $\alpha=10^{-4}$ , в процессе эволюции, становится массивной и склонной к гравитационной неустойчивости. Из-за высокого отношения массы пыли к газу, кольцо подвержено потоковой неустойчивости, и внутри него, скорее всего, будут образовываться планетезимали размером около 100 км.