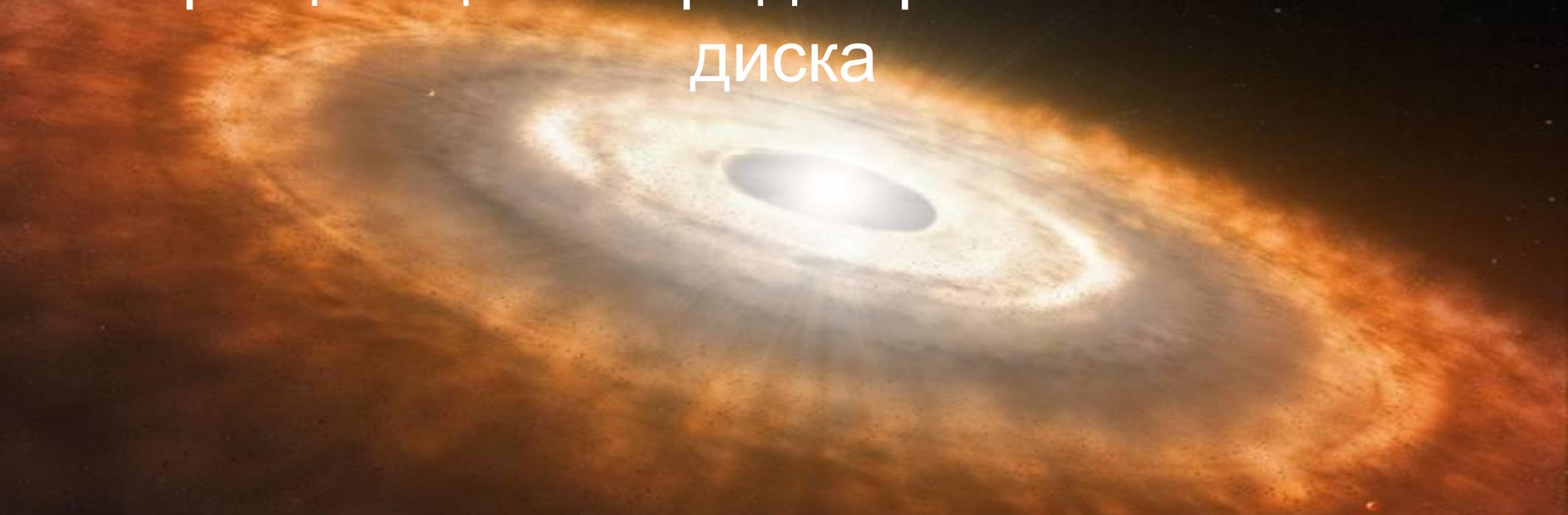


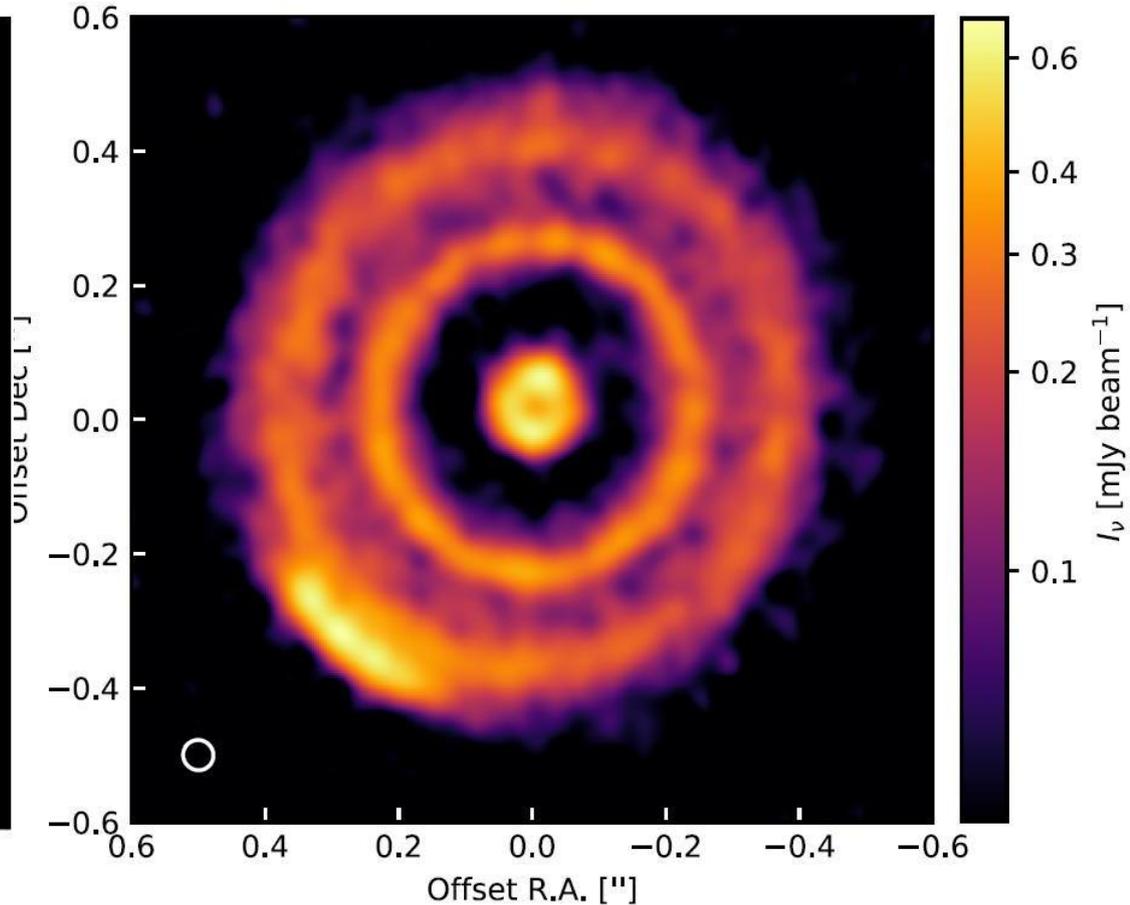
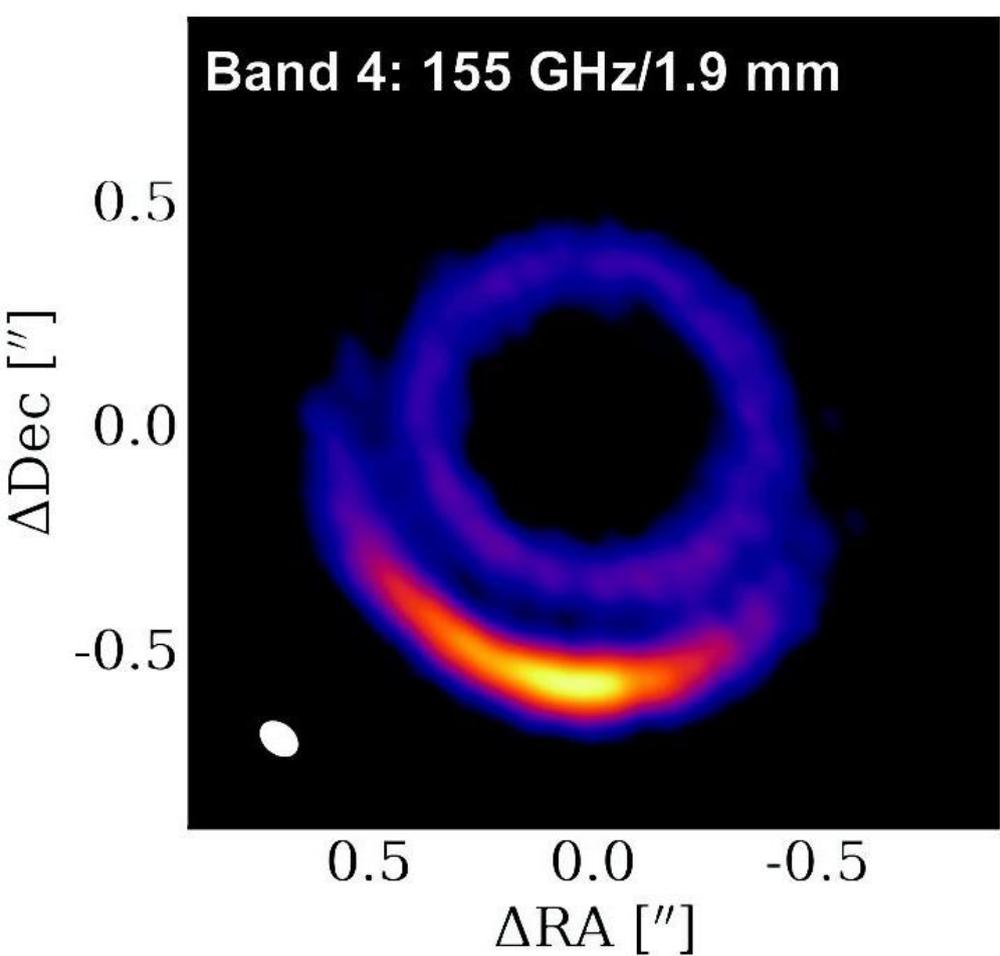
Моделирование распада облака во вращающейся среде протопланетного диска



Т.В. Демидова
Крымская астрофизическая обсерватория РАН

HD 135344B, Cazzoletti et al. (2018)

HD 143006, Perez et al. (2018)



RXJ 1615, Avenhaus et al. (2018)

HD 163296, Huang et al. (2018)



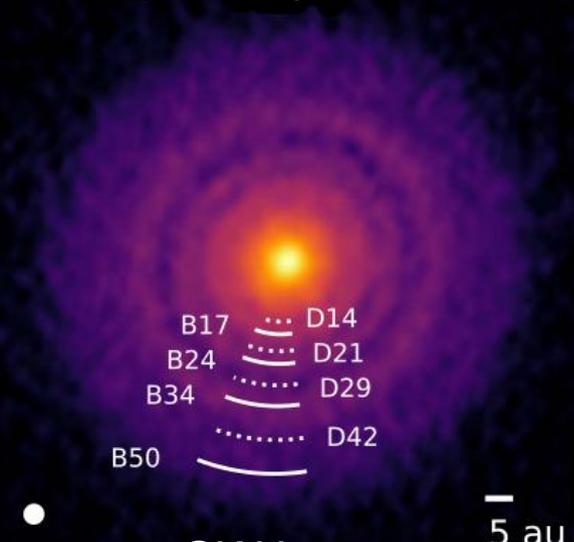
HD 169142, Fedele et al. (2017)



HD 97048, van der Plas et al. (2017)

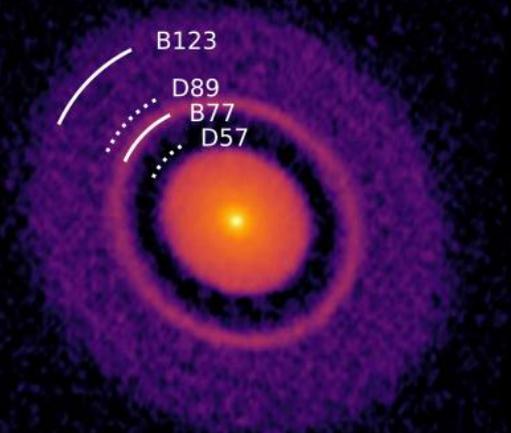


RU Lup, Huang et al. (2018)



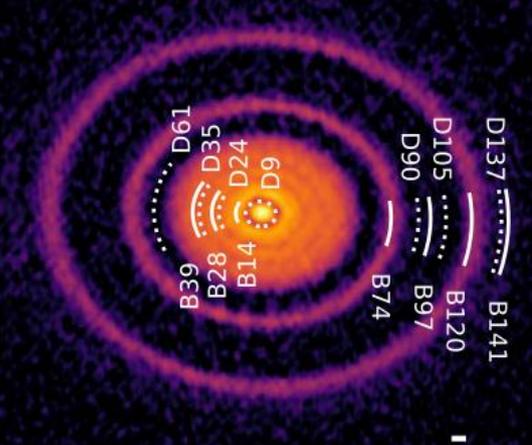
5 au

Elias 24



5 au

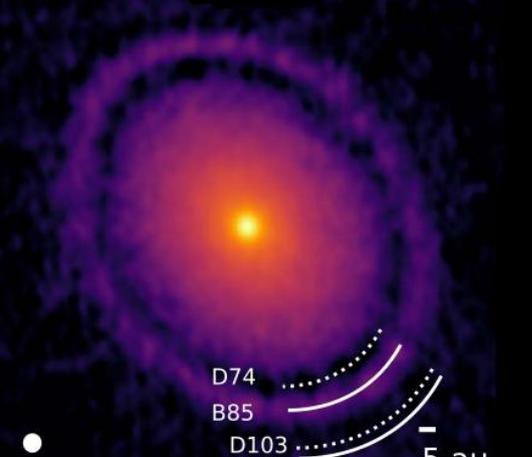
AS 209



5 au

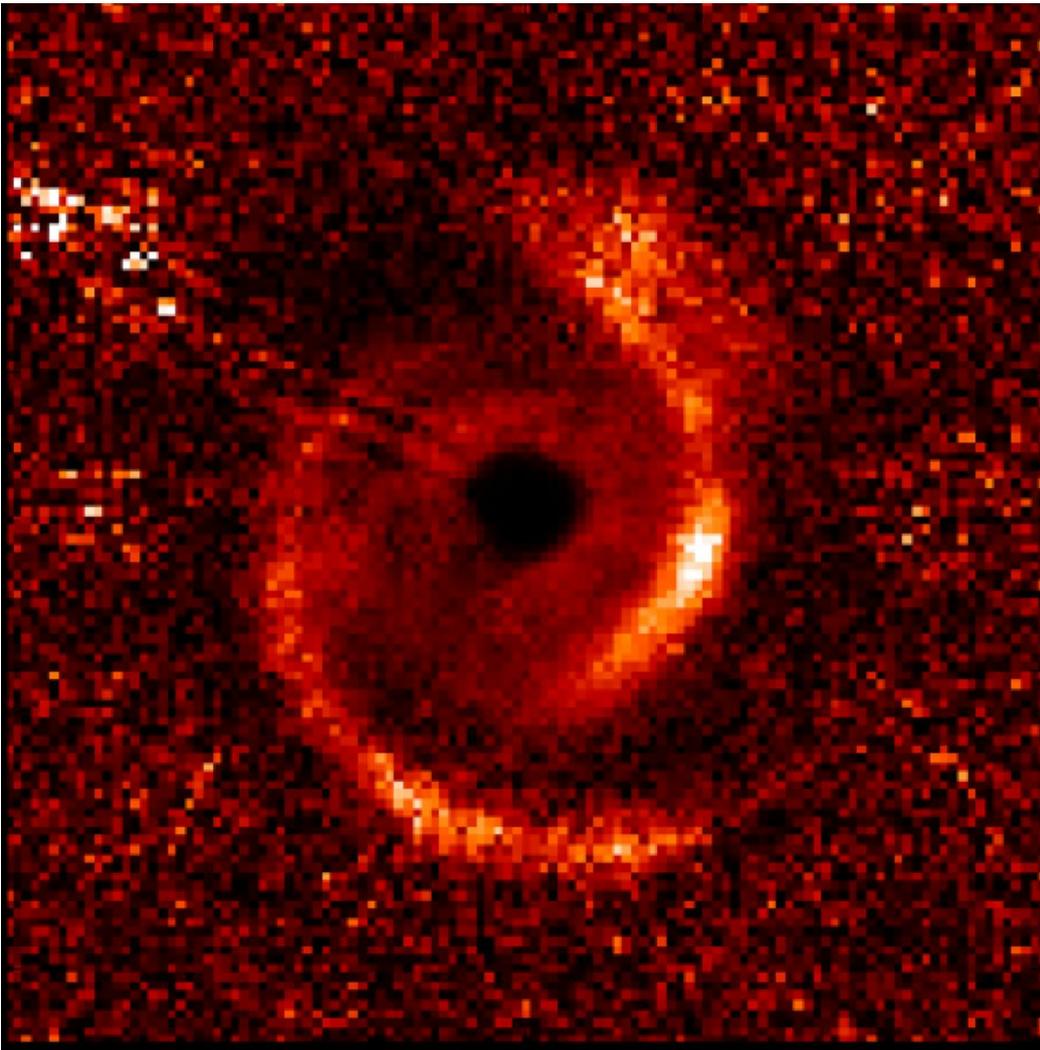
Huang et al. (2018)

GW Lup

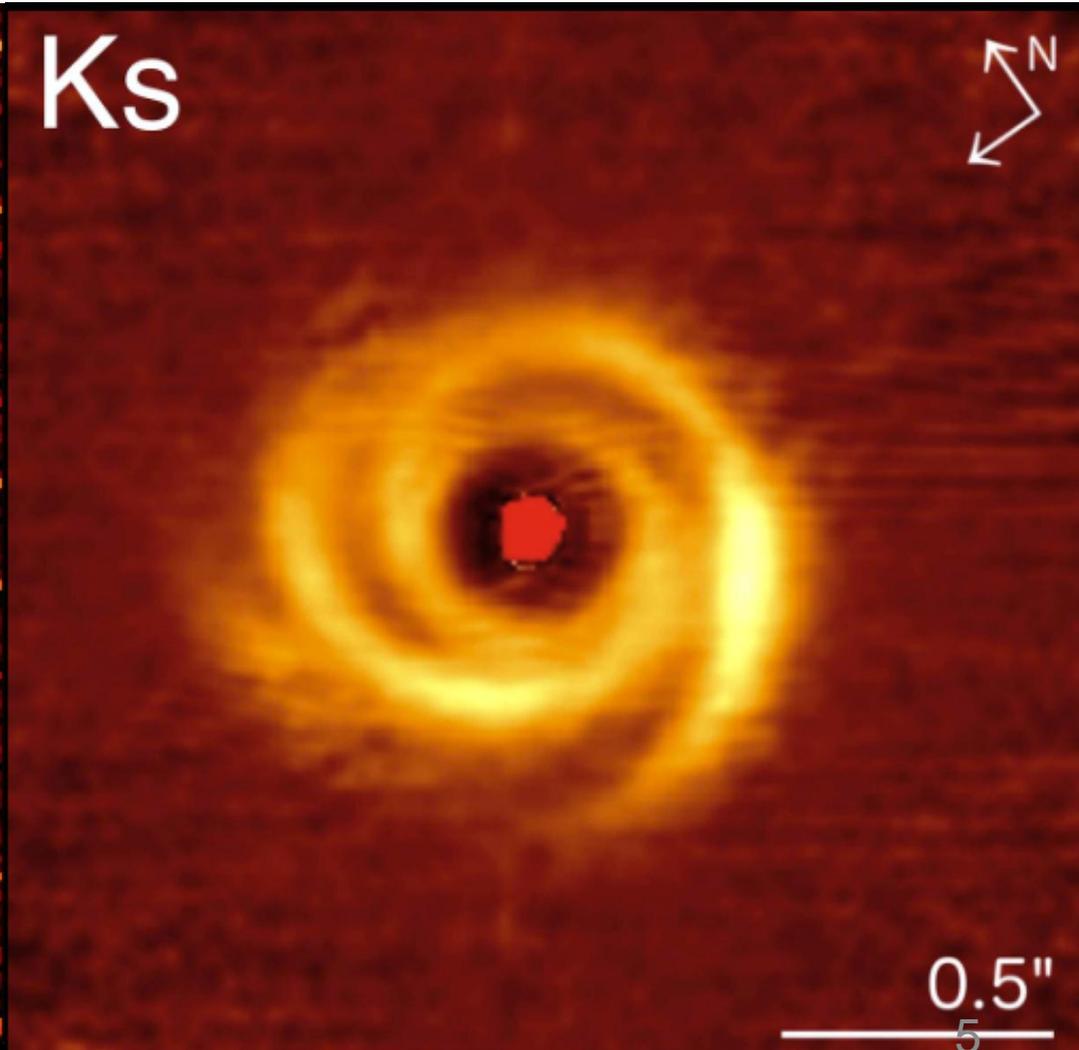


5 au

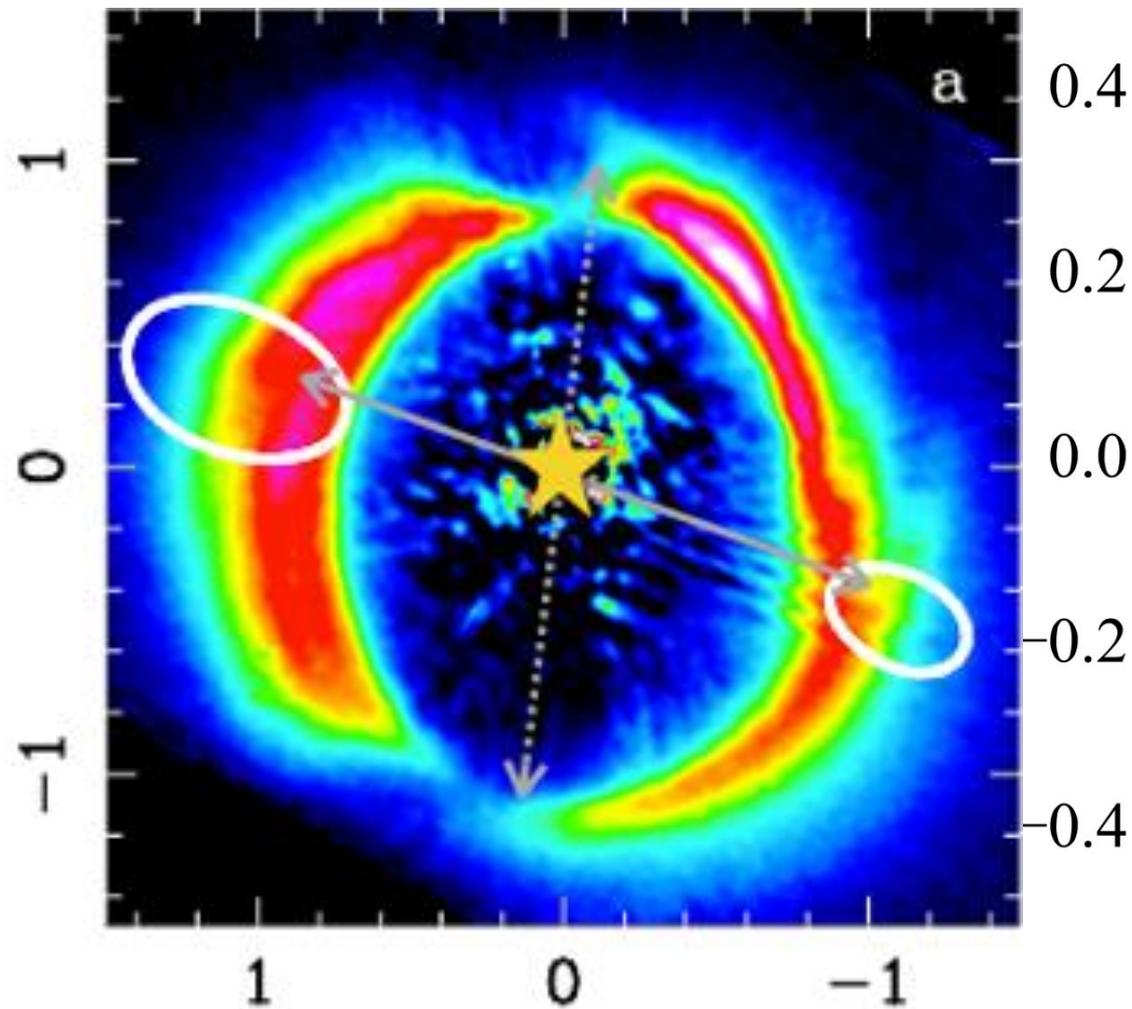
MWC 758, Benisty et al. (2015)



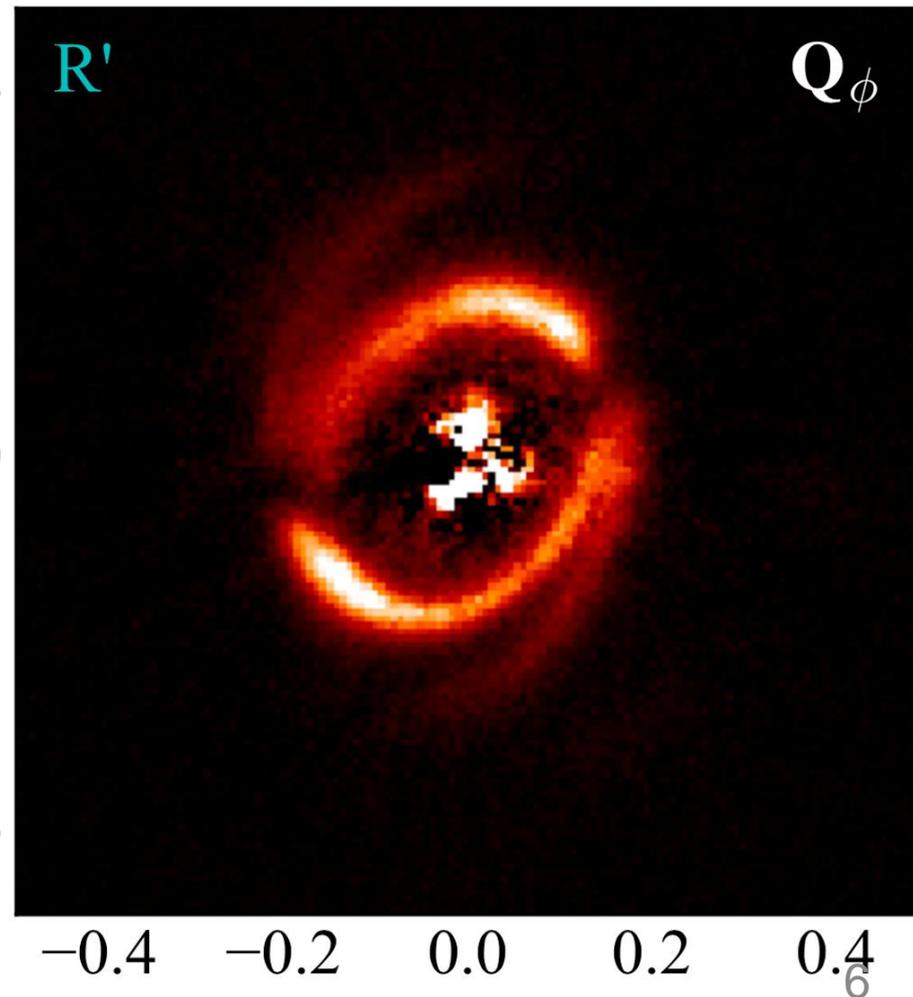
HD 135344b, Garufi et al. (2013)



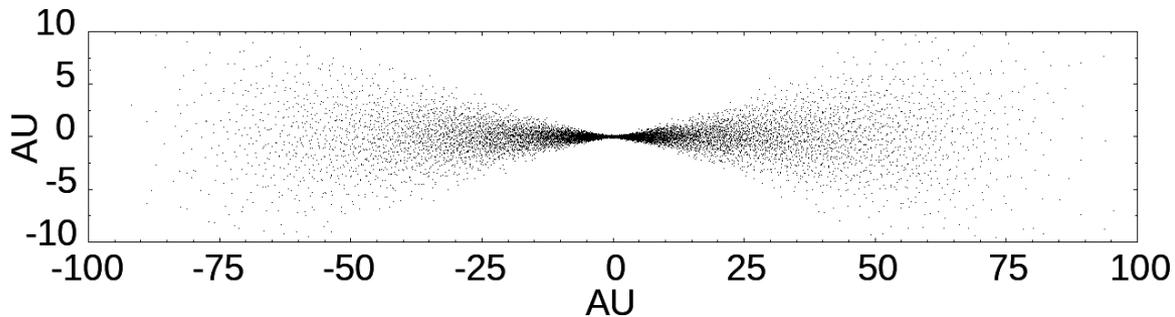
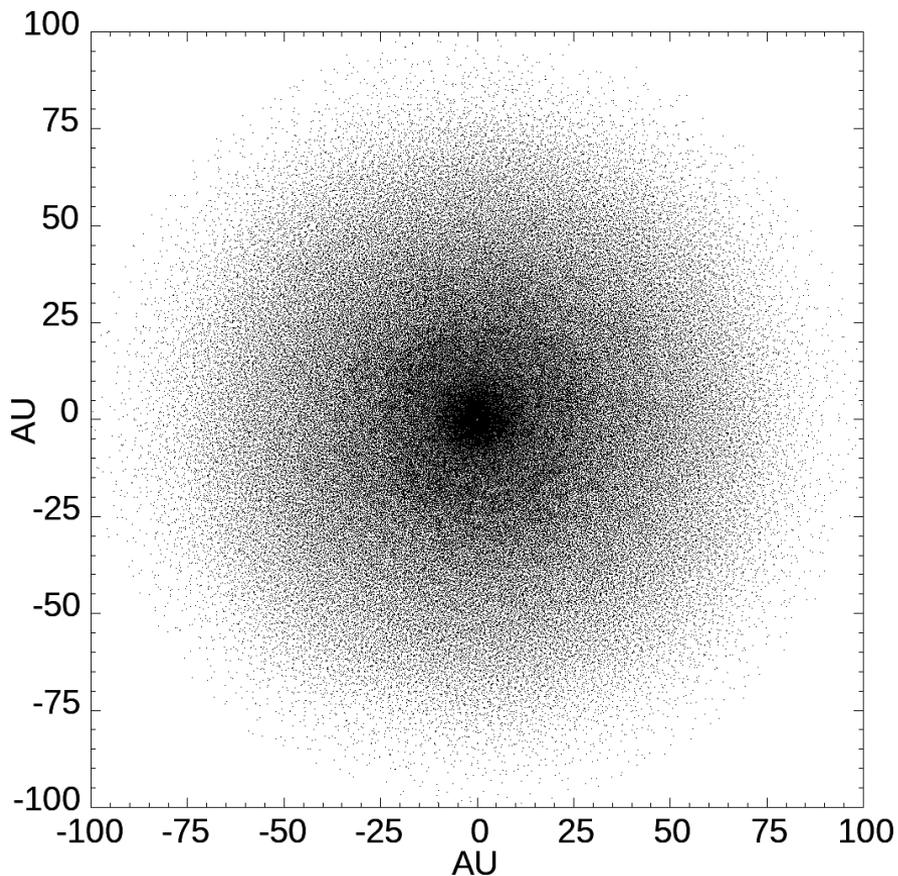
HD 142527, Marino et al. (2014)



HD 100453, Benisty et al. (2017)



Параметры диска



$$M_{\text{disk}} = 0.01 M_{\odot} \quad r_{\text{in}} = 0.5 \text{ a.e.} \quad r_{\text{out}} = 50 \text{ a.e.}$$

$$\rho(r, z, 0) = \frac{\Sigma_0}{\sqrt{2\pi} H(r)} \frac{r_{\text{in}}}{r} e^{-\frac{z^2}{2H^2(r)}}$$

$$H(r) = \sqrt{\frac{\kappa T_{\text{mid}}(r) r^3}{GM_* \mu m_H}} \quad T_{\text{mid}}(r) = \sqrt[4]{\frac{\gamma}{4}} \sqrt{\frac{R_*}{r}} T_*$$

$$\mu = 2.35 \quad M_* = M_{\odot} \quad \gamma = 0.05 \quad T_* = 5780 \text{ K}$$

(Dutrey et al. 1994; Chiang & Goldreich 1997; Dullemond & Dominik 2004).

Метод SPH

Smoothed Particle Hydrodynamics
(Lucy, 1977; Gingold & Monaghan, 1977)

Сглаженное значение

$$A_I(\vec{r}) = \int A(\vec{x})W(\vec{r} - \vec{x}; h)d\vec{x}$$

Ядро интерполяции

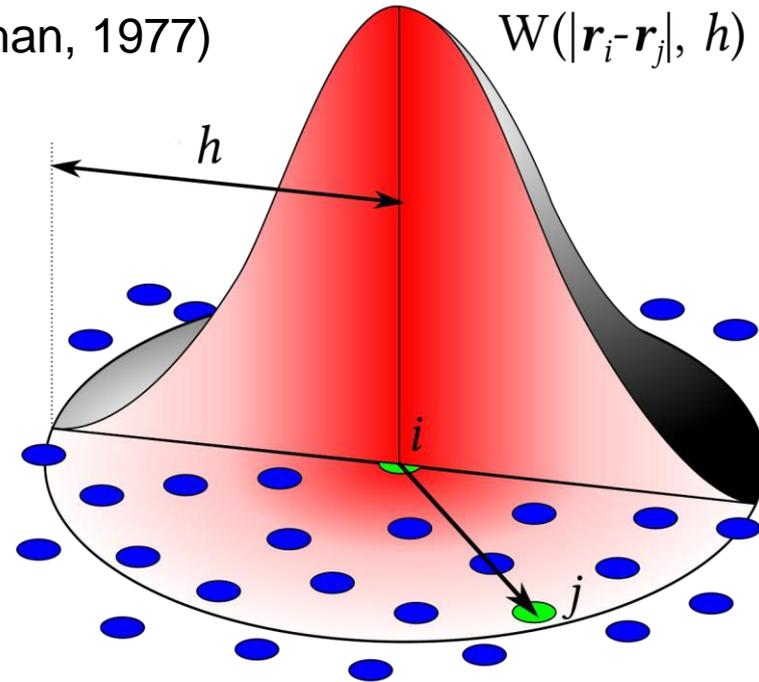
$$W(\vec{r} - \vec{x}, h) = \frac{8}{\pi h^3} \begin{cases} 1 - 6\left(\frac{\vec{r}-\vec{x}}{h}\right)^2 + 6\left(\frac{\vec{r}-\vec{x}}{h}\right)^3 & 0 \leq \frac{\vec{r}-\vec{x}}{h} < \frac{1}{2} \\ 2\left(1 - \frac{\vec{r}-\vec{x}}{h}\right)^3 & \frac{1}{2} \leq \frac{\vec{r}-\vec{x}}{h} < 1 \\ 0 & \frac{\vec{r}-\vec{x}}{h} > 1 \end{cases}$$

Интерполяционная сумма

$$A_S(\vec{r}_i) = \sum_j m_j \frac{A(\vec{r}_j)}{\rho_j} W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h)$$

Производная

$$\nabla A_S(\vec{r}_i) = \sum_j m_j \frac{A(\vec{r}_j)}{\rho_j} \nabla W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h)$$

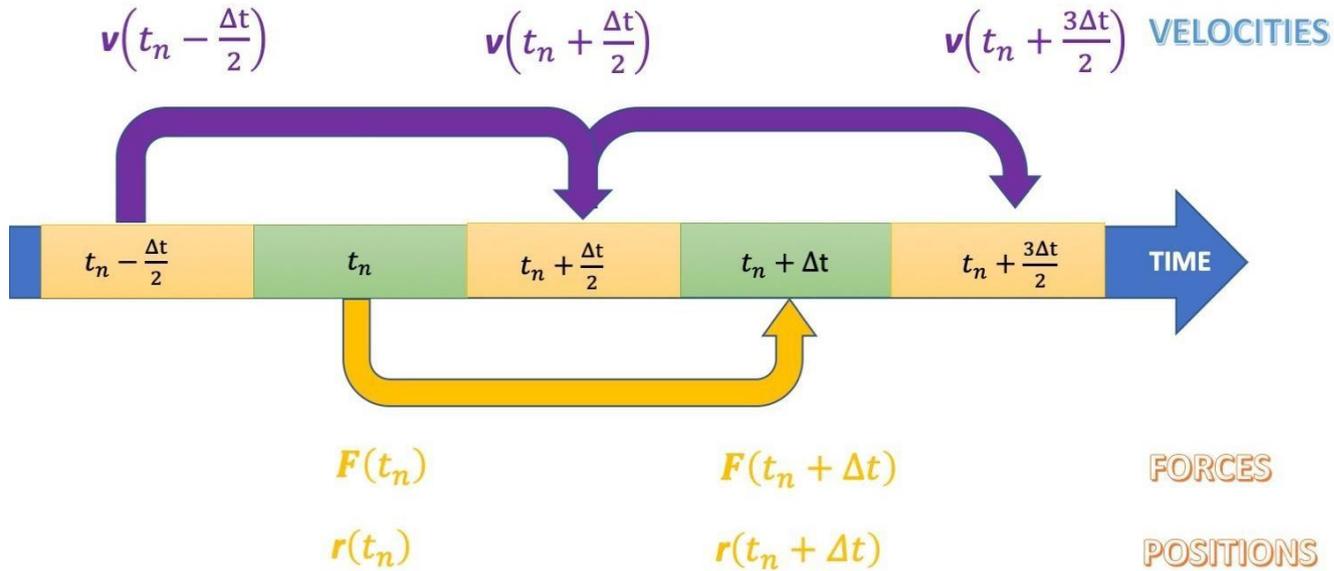


Свойства ядра

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{r} - \vec{x}; h) = \delta(\vec{r} - \vec{x})$$

$$\int W(\vec{r} - \vec{x}; h)d\vec{x} = 1 \quad 8$$

Метод Leapfrog



$$v_{i+1/2} = v_i + a_i \frac{\Delta t_i}{2}$$

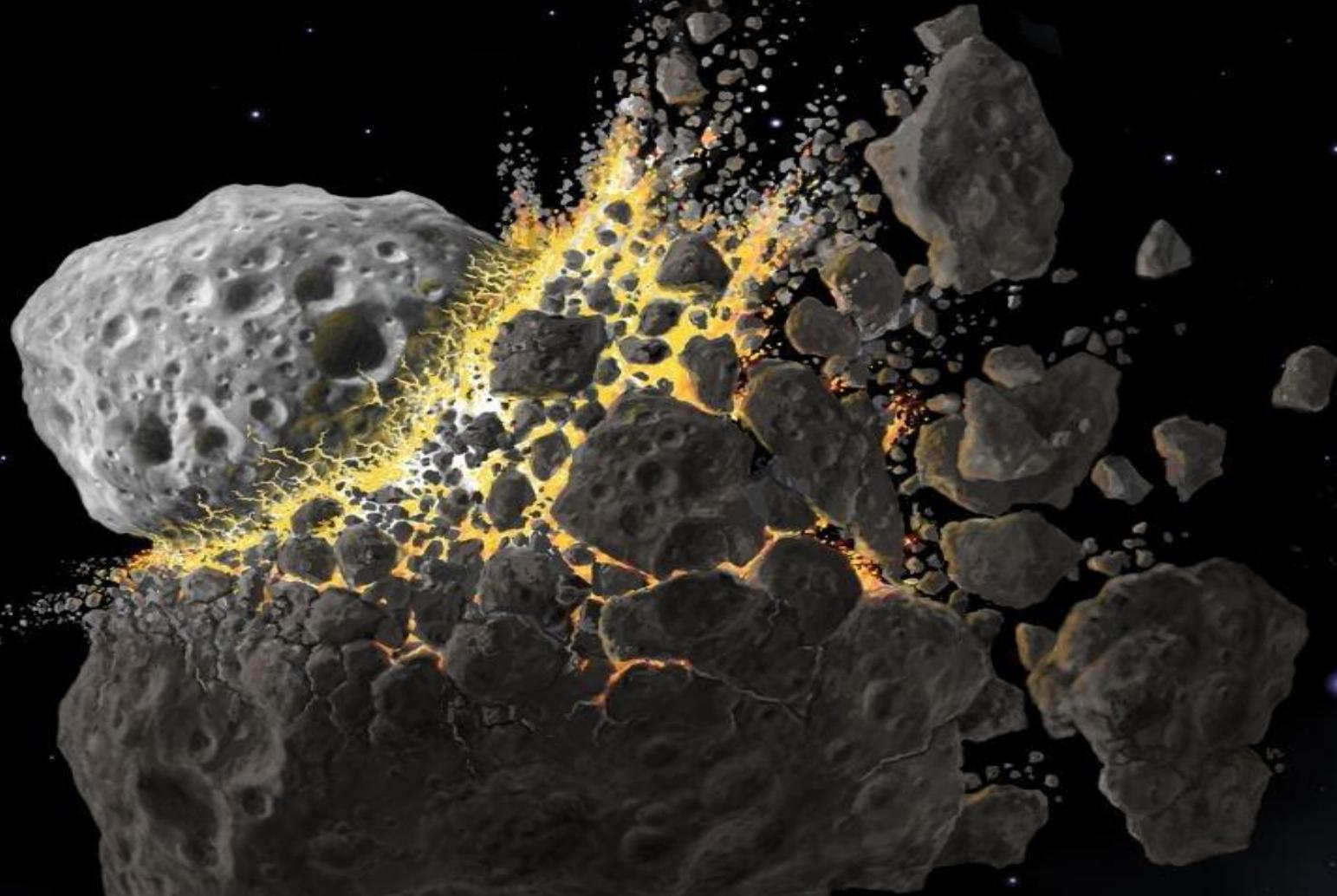
$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1/2} \Delta t_i$$

$$v_{i+1} = v_{i+1/2} + a_{i+1} \frac{\Delta t_i}{2}$$

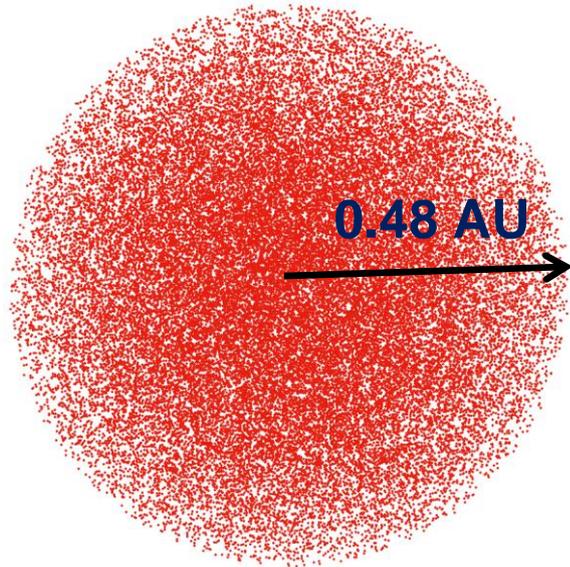
Переменный временной шаг $\Delta t_i = \sqrt{\frac{2\epsilon h_i}{|\vec{a}_i|}}$

код [GADGET-2](http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/) (Springel, 2005) <http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/>,
модифицированный в работе Demidova (2016) для протопланетных дисков
<https://github.com/Proxima84/DUSTGADGET>

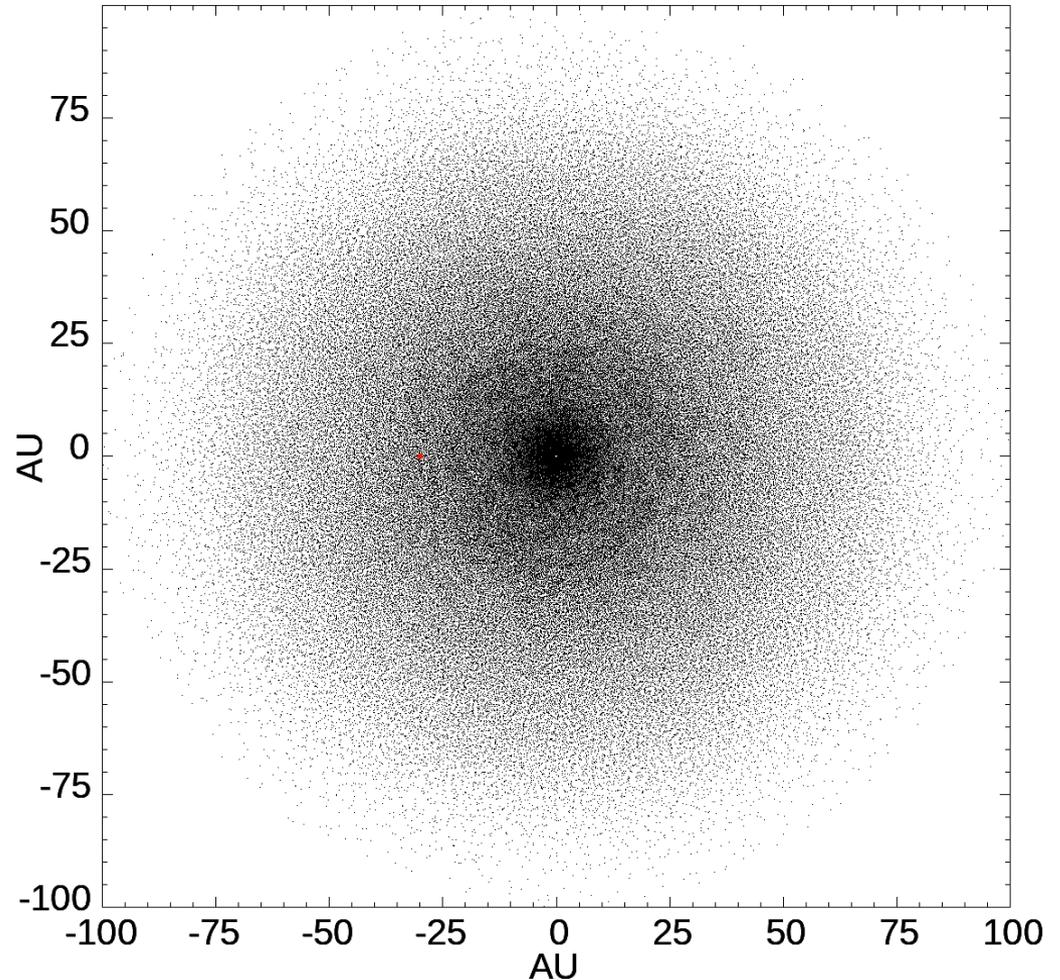
Jackson & Wyatt 2012; Genda et al. 2015b



Моделирование столкновения планетезималей



$\rho_w(x) \propto e^{-x}$
 $\rho_d = 1 \text{ g cm}^{-3}$
10 мкм, 100 мкм и 1 мм
 $M_w = 4 \cdot 10^{25} \text{ г}$,
 $V_e = 50 \pm 50 \text{ м/с}$



Уравнения для пыли и для газа

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

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \mathbf{v}_d) = 0,$$

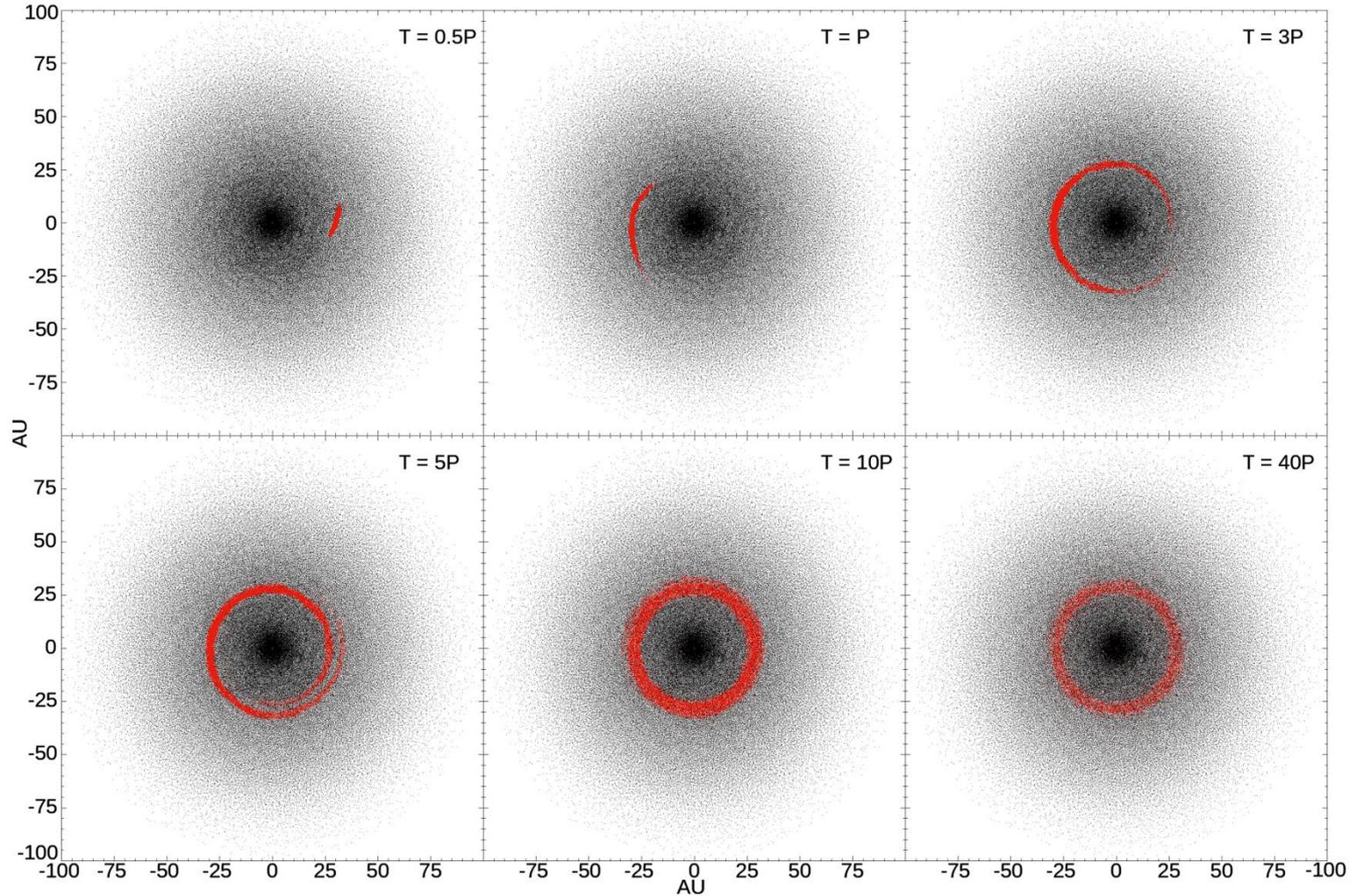
$$\rho_g \left(\frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial t} + \mathbf{v}_g \cdot \nabla \mathbf{v}_g \right) = \rho_g \nabla \phi + K(\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_g) - \nabla P_g + \mathbf{F}_v,$$

$$\rho_d \left(\frac{\partial \mathbf{v}_d}{\partial t} + \mathbf{v}_d \cdot \nabla \mathbf{v}_d \right) = \rho_d \nabla \phi - K(\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_g),$$

$$P = c^2(R)\rho_g \quad K \equiv \frac{\rho_d}{t_{\text{stop}}} \quad t_{\text{stop}} = \frac{s\rho_s}{c_s\rho_g}$$

(Monaghan & Kocharyan, 1995)

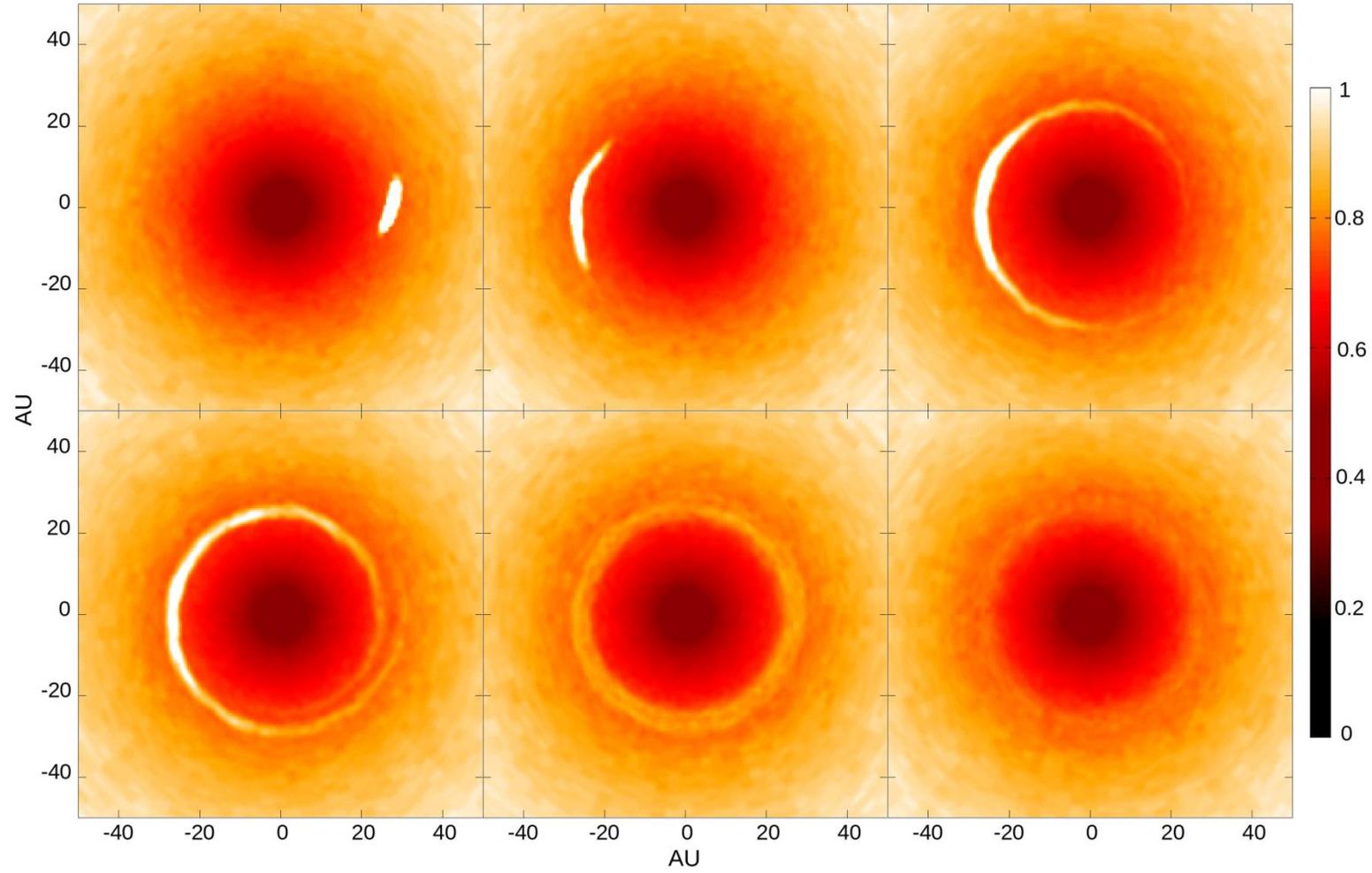
Результаты расчетов



$R = 30$ а.е.
 $P \approx 164$ г

Изображения на 1 мм

(RADMC-3D <http://www.ita.uni-heidelberg.de/~dullemond/software/radmc-3d/>)





CrossMark

Catastrophic Events in Protoplanetary Disks and Their Observational Manifestations

Tatiana V. Demidova¹  and Vladimir P. Grinin^{2,3}

¹ Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia; proximal@list.ru

² Pulkovo Observatory of the Russian Academy of Sciences, Pulkovskoje Avenue 65, St. Petersburg, Russia

³ V.V. Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg University, Petrodvorets, St. Petersburg, Russia

Received 2019 August 26; revised 2019 November 18; accepted 2019 November 21; published 2019 December 10

Abstract

Observations of protoplanetary disks with high angular resolution using an ALMA interferometer showed that ring-shaped structures are often visible in their images, indicating strong disturbances in the disks. The mechanisms of their formation are vividly discussed in the literature. This article shows that the formation of such structures can be the result of destructive collisions of large bodies (planetesimals and planetary embryos) accompanied by the formation of a large number of dust particles, and the subsequent evolution of a cloud of dust formed in this way.

Unified Astronomy Thesaurus concepts: Protoplanetary disks (1300); Planetary system formation (1257); Hydrodynamical simulations (767)

1. Introduction

One of the most interesting results obtained using ALMA and VLT is the detection of substructures on images of protoplanetary disks observed with high angular resolution (see, e.g., van Boekel et al. 2017; Avenhaus et al. 2018; Benisty et al.

obliquity of Uranus is also connected with the giant impact (e.g., Slattery et al. 1992).

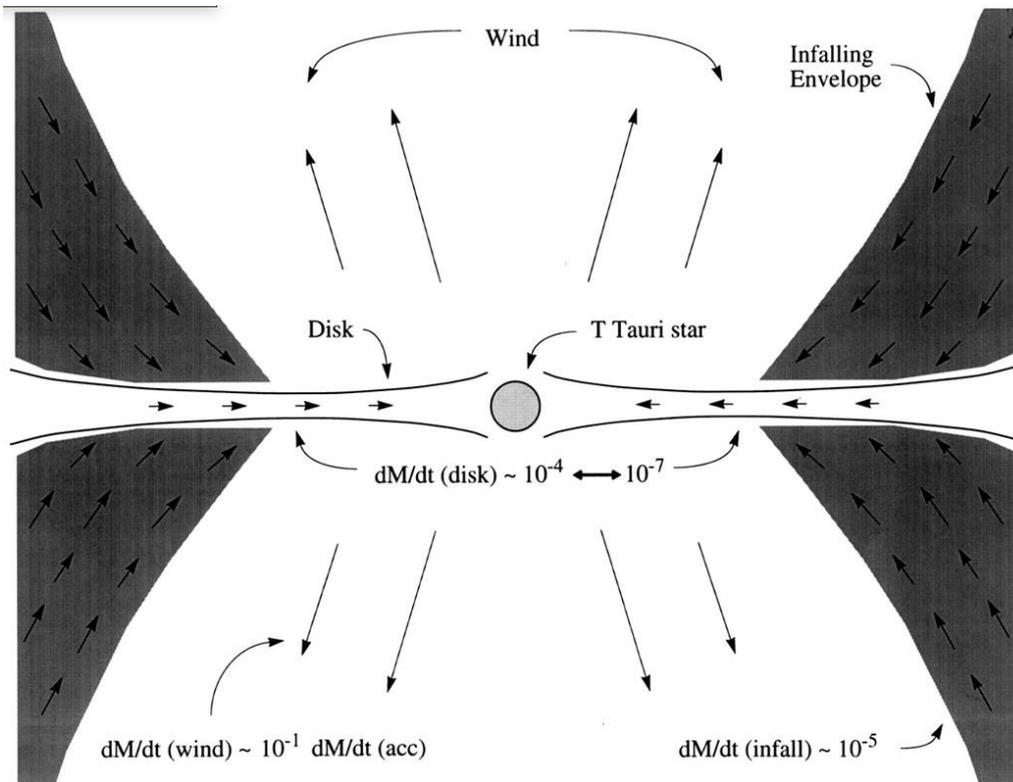
It is obvious that the collisions of such large bodies, which result in the formation of a dust cloud, should be accompanied by flashes in the infrared region of the spectrum. In this

Обоснование модели

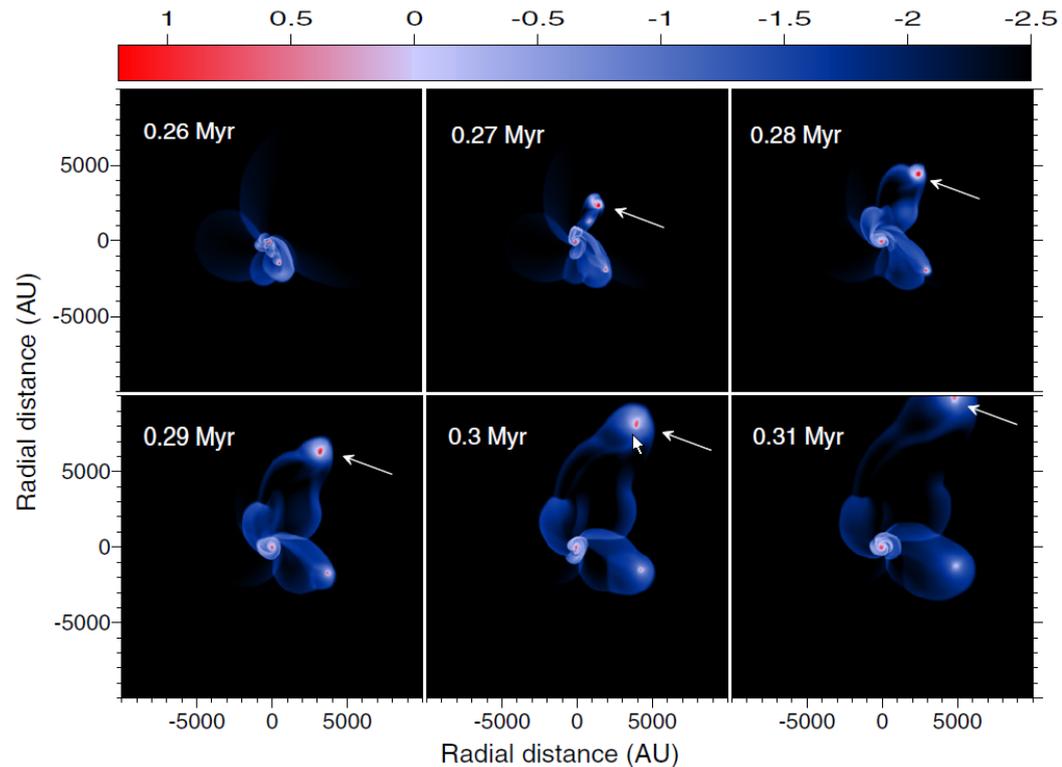
- Планета может способствовать выбросу планетезималей на периферию (Batygin & Morbidelli, 2013; Morrison & Malhotra, 2015).
- Столкновение планетезималей естественный процесс для протопланетных дисков (Meng et al., 2014; Genda et al., 2015);
- Начальная масса столкнувшихся тел может быть в 10 раз меньше массы сгустка;
- События в Солнечной системе: образование Луны (Cameron & Ward, 1976), образование системы Плутон-Харон (Canup 2005, Stern et al., 2006), наклонение оси Урана (Slattery et al. 1992);
- Разрушение планеты может способствовать выбросу большого количества мелкой пыли в протопланетный диск (Nayakshin et al., 2020)

Формирование сгустка

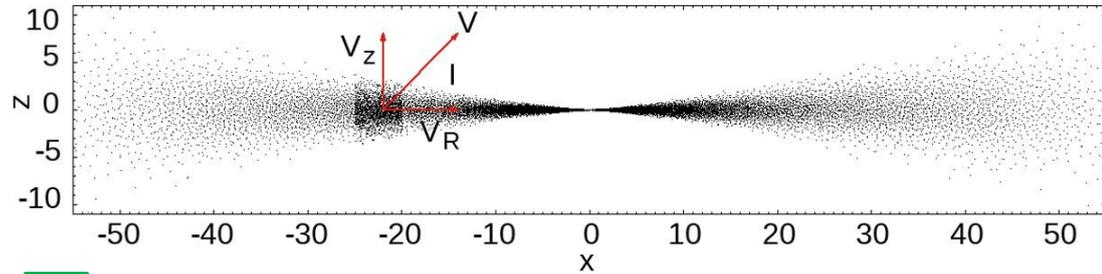
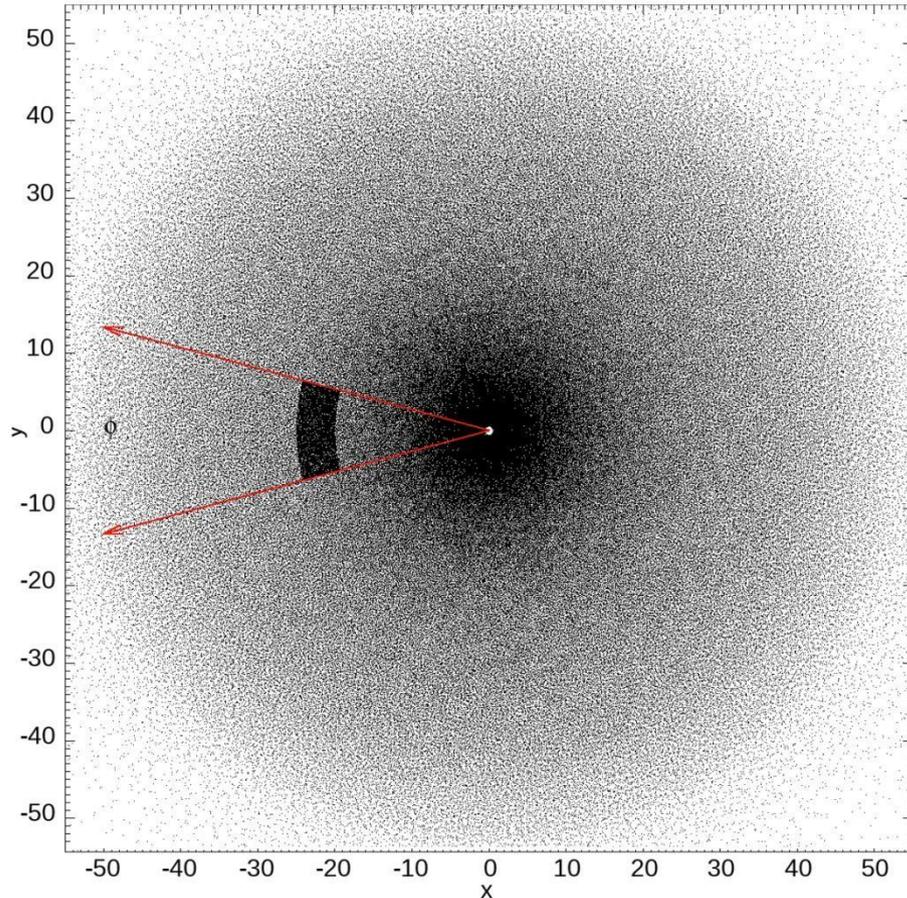
Облачная аккреция из остатков протозвездного облака Hartmann & Kenyon (1996)



Выброс сгустка из массивного аккреционного диска Basu & Vorobyov (2012)



Параметры возмущения



$$K = \frac{\Sigma_{cl}}{\Sigma_d}$$

Определяет массу возмущения

$$V(R) = L \cdot V_k(R)$$

Скоростной режим

$$\sin(I) = \frac{V_z(R)}{V(R)}$$

Наклон вектора скорости

$$\phi = 30^\circ$$

Азимутальный угол

$$R_0 \quad dR$$

Радиальные размеры

Основные уравнения

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla \vec{v} \right) = \rho \nabla \phi - \nabla P + \vec{F}_\nu \\ P = c^2(R) \rho \end{cases}$$

↓ SPH

$$\begin{cases} \rho_i = \sum_j m_j W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h) \\ \frac{\Delta \vec{r}_i}{\Delta t_i} = \vec{v}_i \\ \vec{a}_i = \frac{\Delta \vec{v}_i}{\Delta t_i} = \vec{\Psi}_i + \vec{v}_i + \vec{G}_i \\ P_i = c_i^2 \rho_i \end{cases}$$

Основные уравнения

Гидродинамическое ускорение

$$\vec{\Psi}_i = -m_i \frac{\vec{r}_i}{|r_i|} \sum_j \left(\frac{P_i}{\Omega_i \rho_i^2} \nabla_i W(r_{ij}, h_i) + \frac{P_j}{\Omega_j \rho_j^2} \nabla_i W(r_{ij}, h_j) \right)$$

$$\Omega_i = \left[1 - m_i \frac{\partial h_i}{\partial \rho_i} \sum_j \frac{\partial W(r_{ij}, h_i)}{\partial h_i} \right]$$

h_i определяется с помощью итераций по заданному количеству соседей N_i

Искусственная вязкость

$$\vec{v}_i = -m_i \frac{\vec{r}_i}{|r_i|} \sum_j \Pi_{ij} [\nabla_i W(r_{ij}, h_i) + \nabla_i W(r_{ij}, h_j)]$$

$$\alpha = 1, \beta = 0$$

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} [-\alpha c_i \mu_{ij} + \beta (\mu_{ij})^2] / \bar{\rho}_{ij}, & (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \cdot (\vec{r}_i - \vec{r}_j) < 0 \\ 0, & (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \cdot (\vec{r}_i - \vec{r}_j) \geq 0 \end{cases}$$

$$\mu_{ij} = \frac{\bar{h}_{ij} (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \cdot (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^2 + \eta \bar{h}_{ij}^2}$$

Гравитационное ускорение

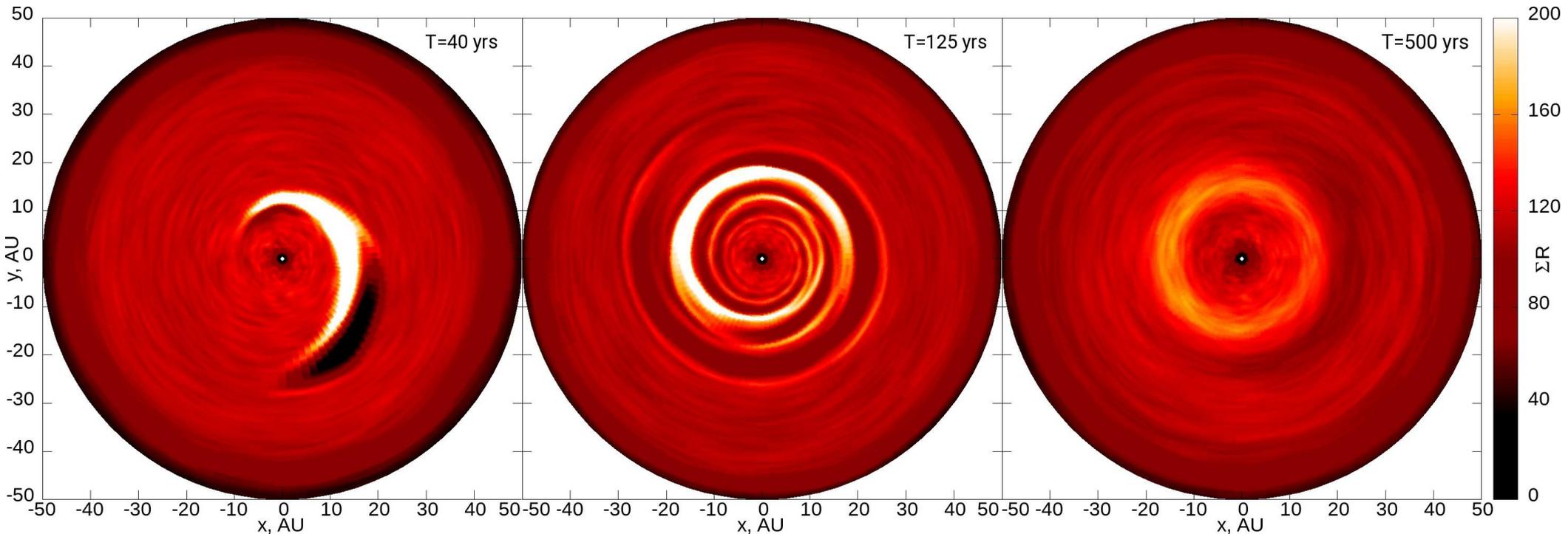
$$\vec{G}_i = \frac{M_* \vec{R}_s}{|R_s|^3} + \text{Самогравитация (tree code)}$$

Маломассивное возмущение

| L (float) (1) | I (deg) (2) | K (number) (3) | R (au) (4) | dR (au) (5) | ϕ (deg) (6) | Remnant Mass (Jupiter mass) (7) | Structures (8) | Lifetime (yr) (9) |
|---------------------|-------------------|----------------------|------------------|-------------------|------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------|
| 0.8 | 5 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, One-hand spiral, Horseshoe | >600 |
| 0.8 | 10 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, One-hand spiral, Horseshoe | >600 |
| 0.8 | 20 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, Faint two-arm spiral, Horseshoe | >600 |
| 0.8 | 30 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, Faint two-arm spiral, Horseshoe | >600 |
| 0.8 | 10 | 5 | 20 | 5 | 30 | 0.19 | Arc, One-hand spiral, Horseshoe | >600 |
| 1 | 5 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, One-arm spiral, Multirings, Ring | ~1000 |
| 1 | 10 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, One-arm spiral, Ring | >600 |
| 1 | 20 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, One-arm spiral, Faint two-arm spiral | >600 |
| 1 | 30 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, One-arm spiral, Faint two-arm spiral | >600 |
| 1 | 5 | 5 | 20 | 5 | 30 | 0.19 | Arc, One-arm spiral, Multirings, Ring | >600 |
| 1 | 5 | 10 | 20 | 5 | 30 | 0.38 | Arc, One-arm spiral, Multirings, Ring | >600 |
| 1.2 | 5 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, One-arm spiral, Multirings, Ring | >600 |
| 1.2 | 10 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, Bright two-arm spiral | >600 |
| 1.2 | 20 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, Bright two-arm spiral | >600 |
| 1.2 | 30 | 3 | 20 | 5 | 30 | 0.11 | Arc, Bright two-arm spiral, Asymmetric ring | ~2000 |
| 1.2 | 30 | 1 | 20 | 5 | 30 | 0.04 | Arc, Bright two-arm spiral | >600 |
| 0.8 | 30 | 3 | 10 | 2 | 30 | 0.04 | Arc | ~100 |
| 1 | 30 | 3 | 10 | 2 | 30 | 0.04 | Arc | ~100 |
| 1.2 | 30 | 3 | 10 | 2 | 30 | 0.04 | Arc, Faint two-arm spiral, Multirings | ~450 |

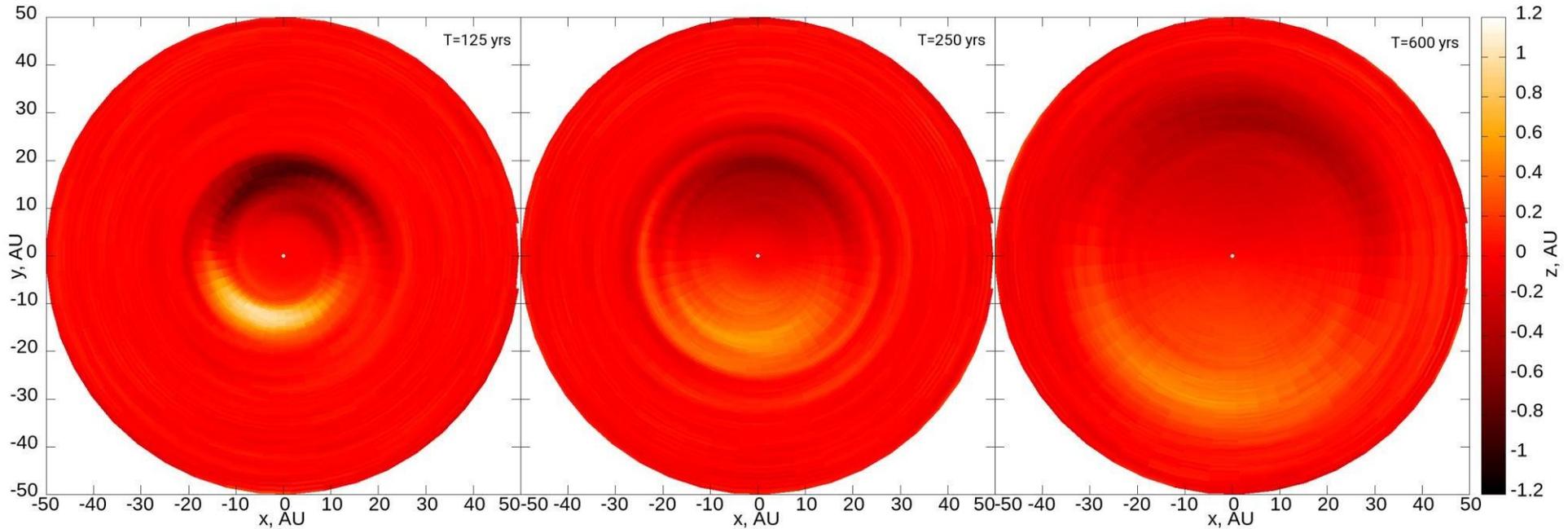
Note. The column of “Structures” lists the types of observed asymmetries in order of their appearance in the disk images. The column of “Lifetime” is a long-lived structures lifetime.

Субкеплерово возмущение на периферии диска Поверхностная плотность



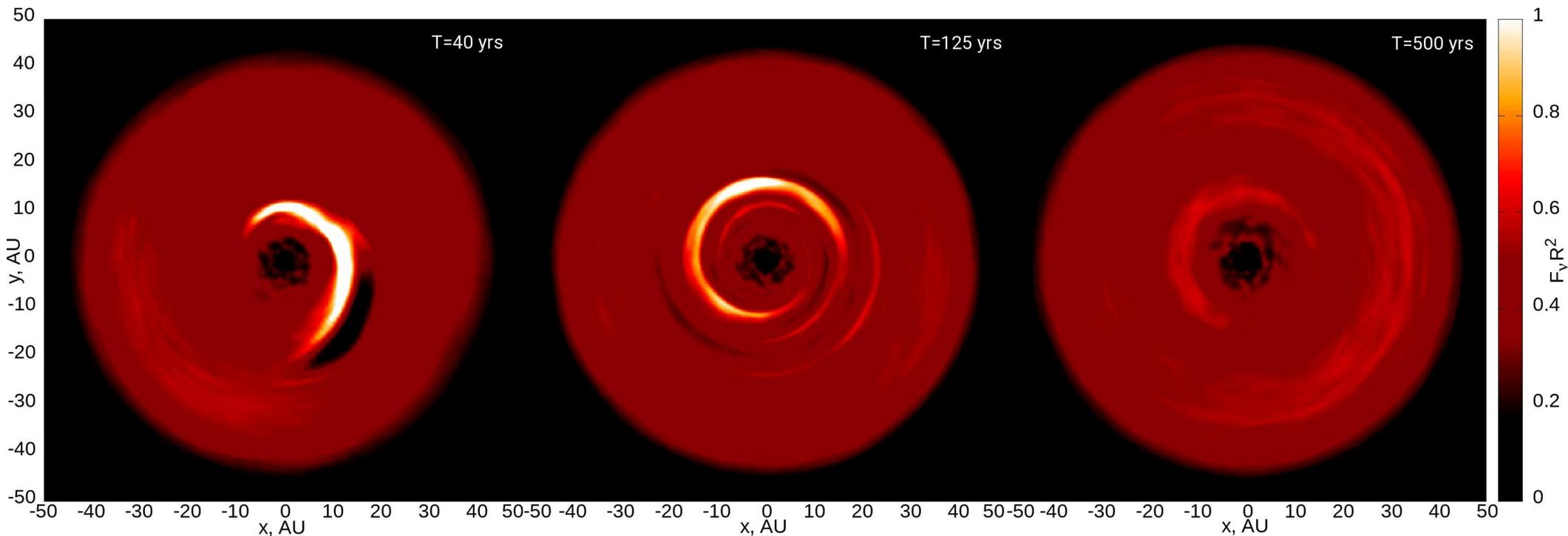
$L = 0.8$; $K = 3$; $I = 10^\circ$; $R_0 = 20$ a.e.; $dR = 5$ a.e.; $\varphi = 30^\circ$; $\longrightarrow M_c \approx 0.11 M_J$ 22

Субкеплерово возмущение на периферии диска Вертикальный изгиб



$L = 0.8; K = 3; I = 10^\circ; R_0 = 20 \text{ a.e.}; dR = 5 \text{ a.e.}; \varphi = 30^\circ;$ \longrightarrow $M_c \approx 0.11 M_J$ 23

Изображение на 1 мм

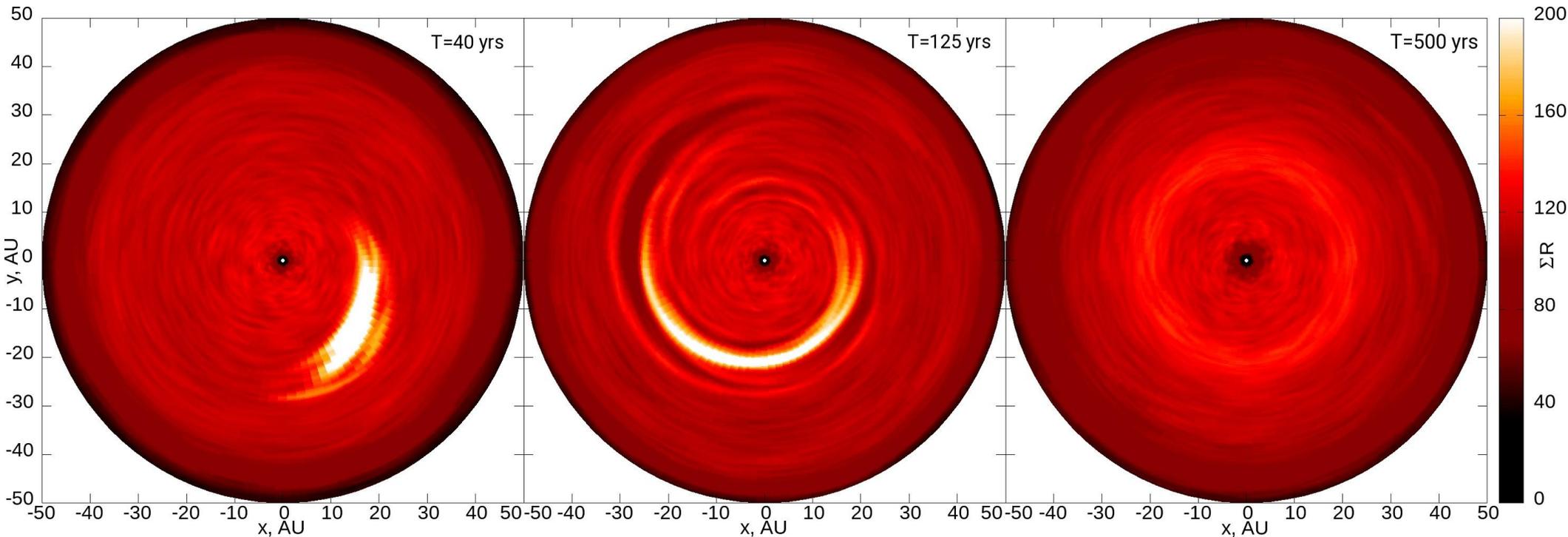


$L = 0.8$; $K = 3$; $I = 10^\circ$; $R_0 = 20$ a.e.; $dR = 5$ a.e.; $\varphi = 30^\circ$; $\longrightarrow M_c \approx 0.11 M_J$

Код RADMC-3D: <http://www.ita.uni-heidelberg.de/~dullemond/software/radmc-3d/>

Кеплерово возмущение на периферии диска

Поверхностная плотность

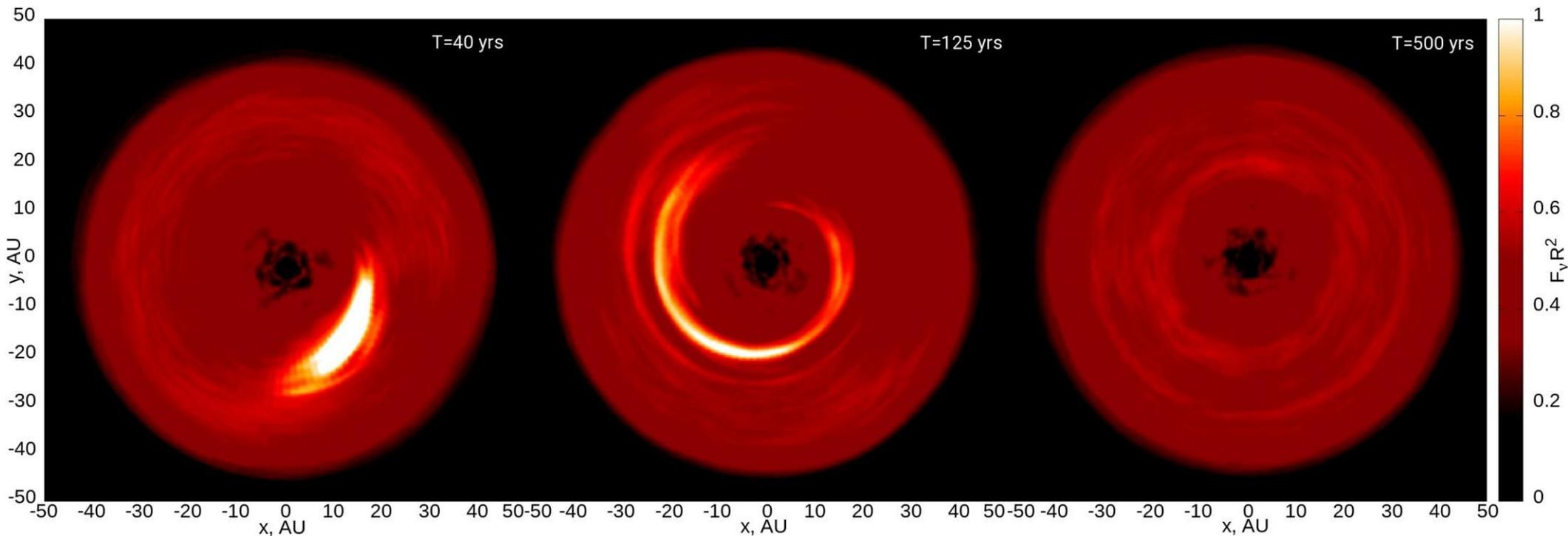


$L = 1; K = 3; l = 10^\circ; R_0 = 20 \text{ a.e.}; dR = 5 \text{ a.e.}; \varphi = 30^\circ;$



$M_c \approx 0.11 M_J$ 25

Изображение на 1 мм

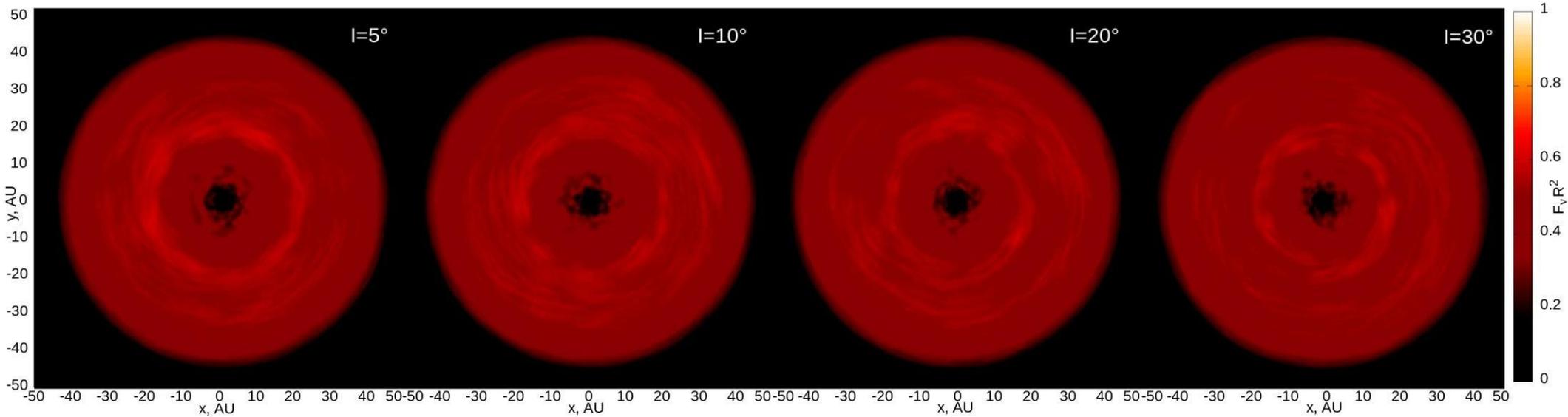


$L = 1$; $K = 3$; $l = 10^\circ$; $R_0 = 20 \text{ a.e.}$; $dR = 5 \text{ a.e.}$; $\varphi = 30^\circ$;



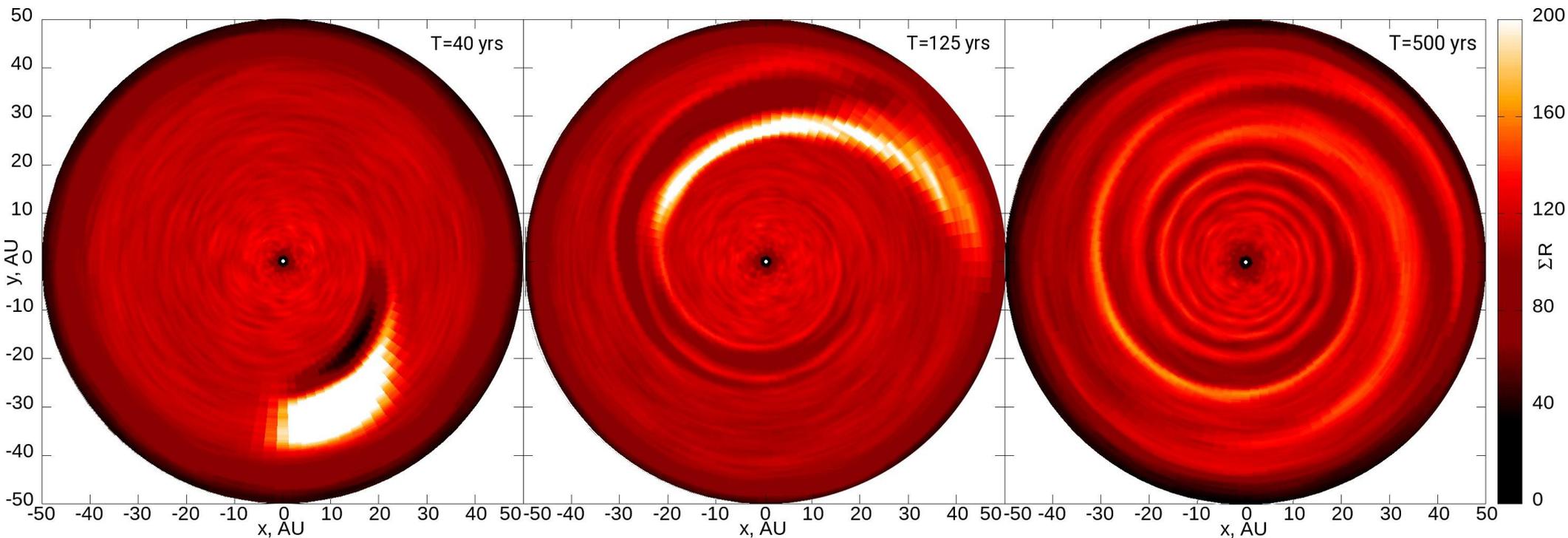
$M_c \approx 0.11 M_J$ 26

Влияние начального угла наклона вектора скорости I



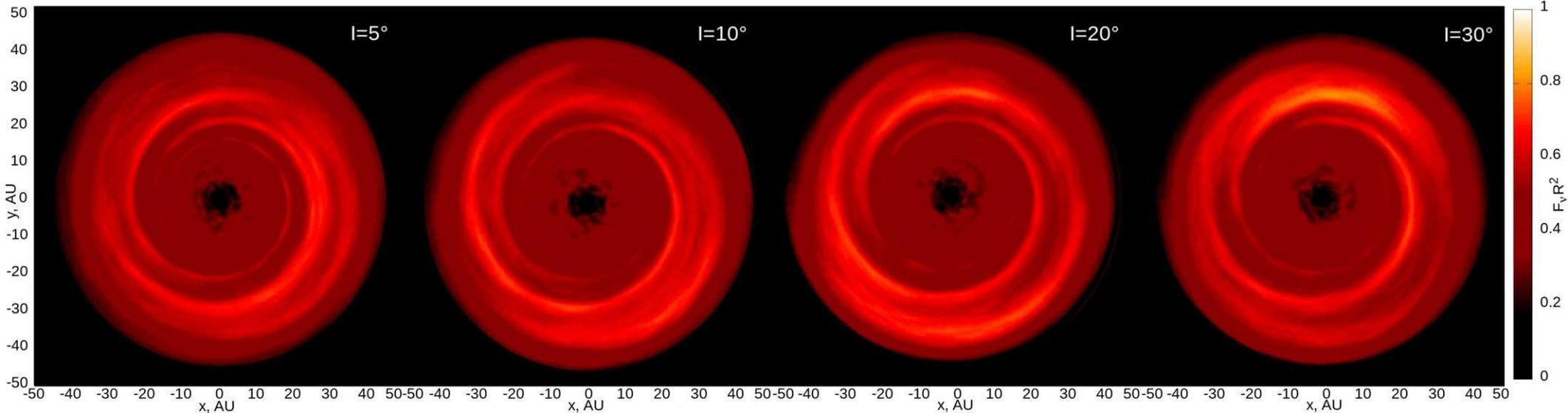
$L = 1$; $K = 3$; $R_0 = 20$ а.е.; $dR = 5$ а.е.; $\varphi = 30^\circ$; $T = 600$ лет $\longrightarrow M_c \approx 0.11 M_J$

Сверхкеплерово возмущение на периферии диска. Поверхностная плотность



$L = 1.2; K = 3; I = 10^\circ; R_0 = 20 \text{ a.e.}; dR = 5 \text{ a.e.}; \varphi = 30^\circ;$ $\longrightarrow M_c \approx 0.11 M_J$

Влияние начального угла наклона вектора скорости I

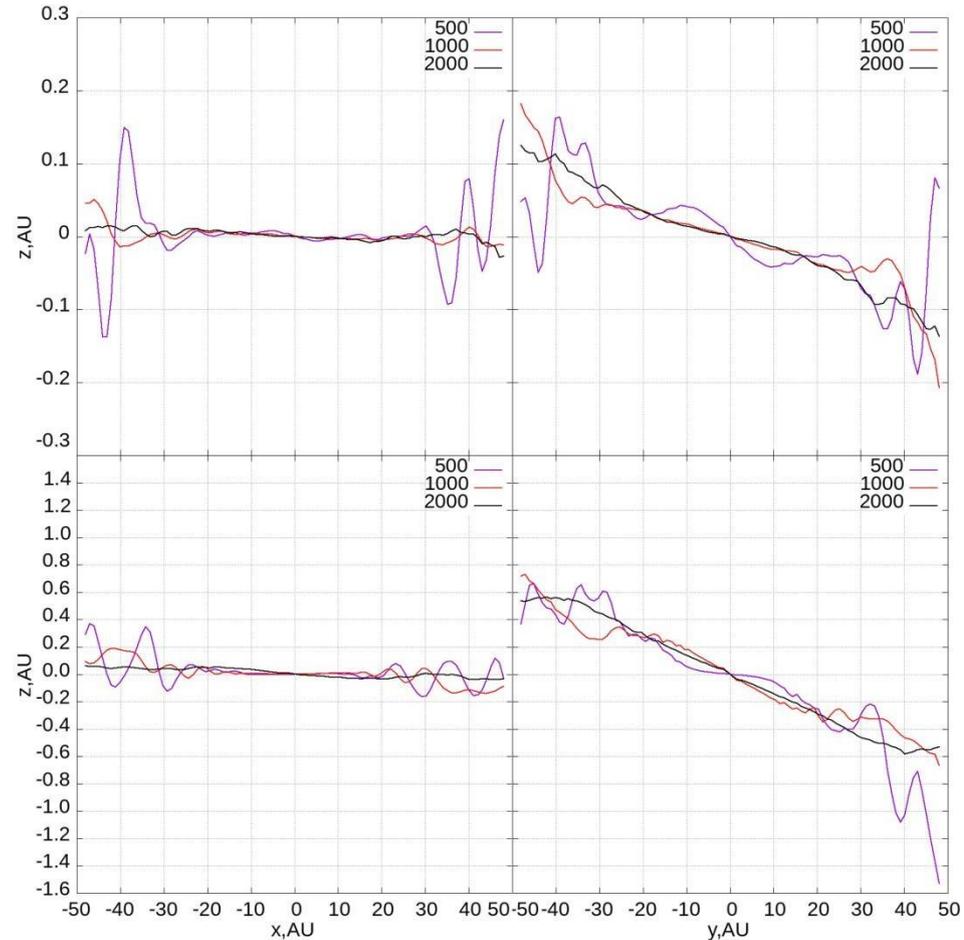


$L = 1.2$; $K = 3$; $R_0 = 20$ а.е.; $dR = 5$ а.е.; $\varphi = 30^\circ$; $T = 600$ лет $\longrightarrow M_c \approx 0.11 M_J$

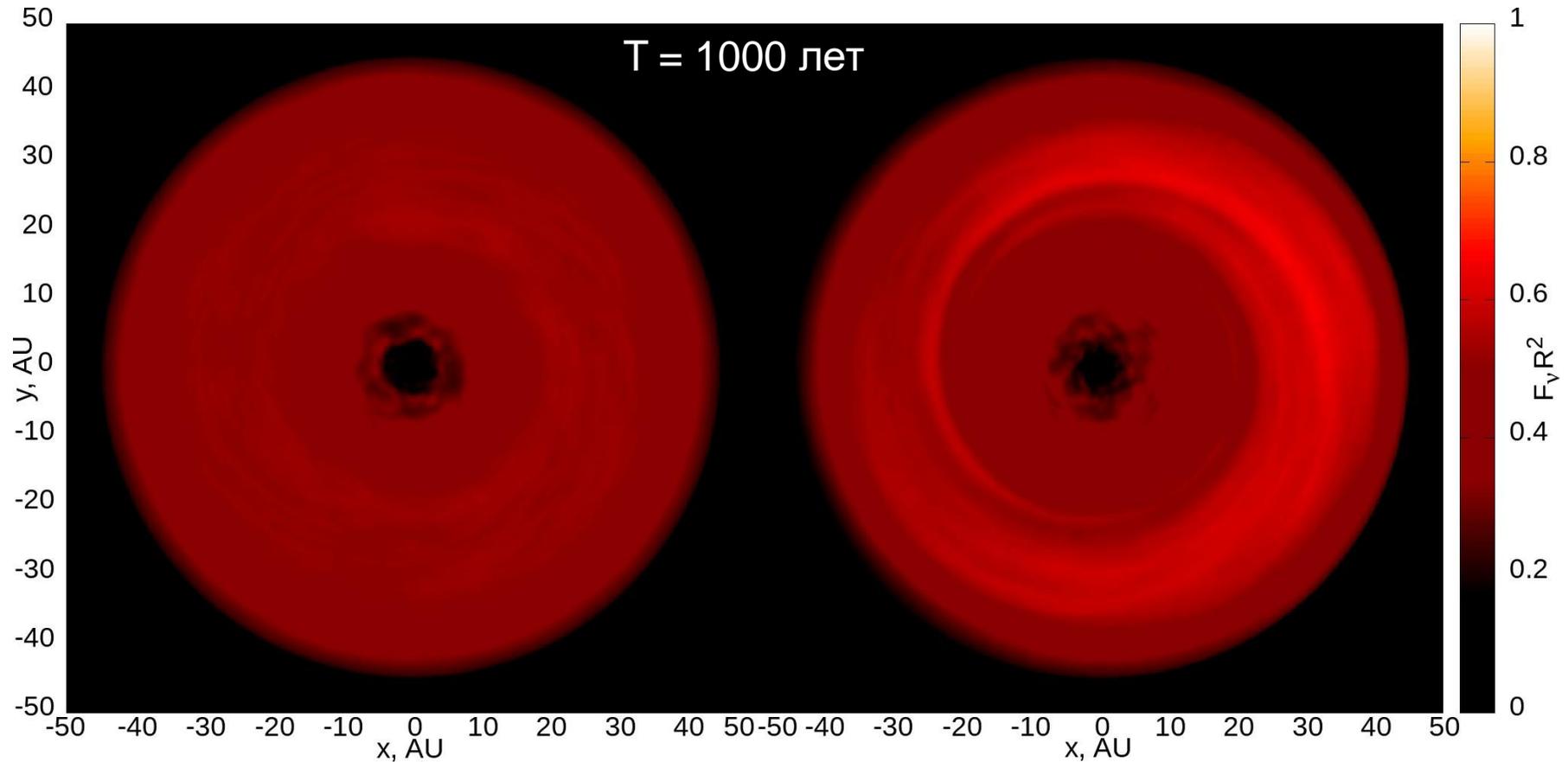
Долговременная эволюция

$L = 1; K = 3;$
 $I = 5^\circ; \varphi = 30^\circ$
 $R_0 = 20 \text{ a.e.};$
 $dR = 5 \text{ a.e.};$
 $I_e = 0^\circ.14;$

$L = 1.2; K = 3;$
 $I = 30^\circ; \varphi = 30^\circ$
 $R_0 = 20 \text{ a.e.};$
 $dR = 5 \text{ a.e.};$
 $I_e = 0^\circ.72;$



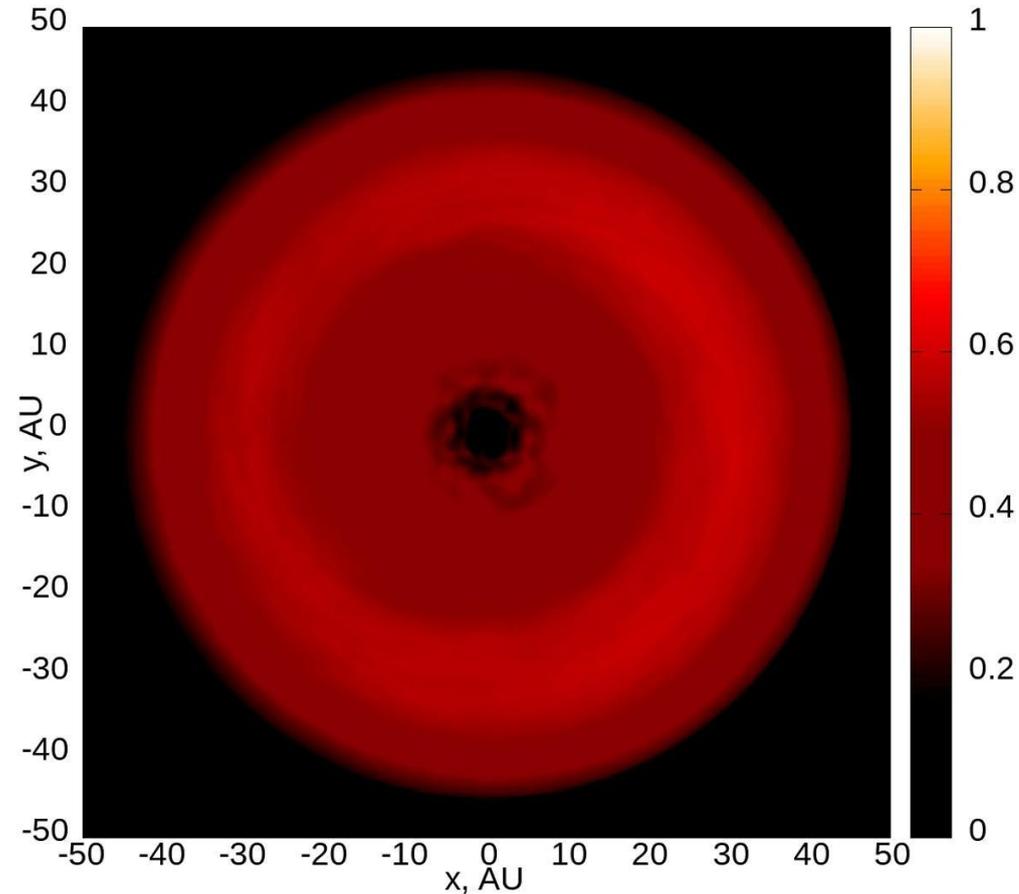
Долговременная эволюция



$L = 1; l = 5^\circ;$

$L = 1.2; l = 30^\circ;$

Долговременная эволюция



$L = 1.2$; $K = 3$; $l = 30^\circ$; $R_0 = 20$ а.е.; $dR = 5$ а.е.; $\varphi = 30^\circ$; $T = 2000$ лет



Clumpy Accretion in Pre-main-sequence Stars as a Source of Perturbations in Circumstellar Disks

Tatiana V. Demidova¹  and Vladimir P. Grinin^{2,3} 

¹ Crimean Astrophysical Observatory, p. Nauchny, Bakhchisaray, 298409, Crimea[†]; proximal@list.ru

² Pulkovo Observatory of the Russian Academy of Sciences, Pulkovskoje Avenue 65, St. Petersburg 196140, Russia

³ V.V. Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg University, Petrodvorets, St. Petersburg, Russia

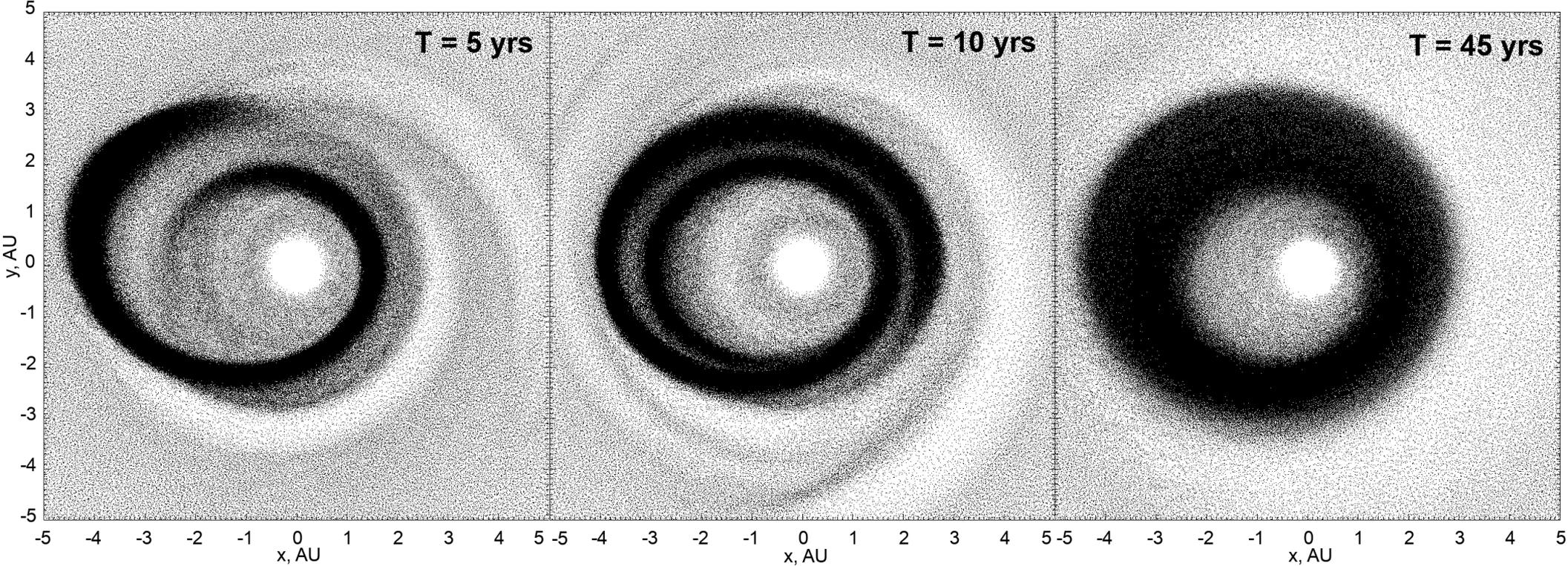
Received 2021 October 20; revised 2021 December 30; accepted 2022 February 8; published 2022 May 10

Abstract

The development of perturbations in the circumstellar disks of pre-main-sequence stars caused by clumpy accretion was investigated. Here we perform 3D smoothed particle hydrodynamics simulations of disks perturbed by a recent clump accretion event. These simulations are further explored by radiative transfer calculations to quantify the observational appearance of such disks. It was shown that the density waves in the disks were formed at the fall of the clump. After several revolutions they can transform into spirals and ring structures. Their images in millimeter wavelengths are very similar to those observed with Atacama Large Millimeter/submillimeter Array in some protoplanetary disks. We assume that clumpy accretion may be the source of such structures.

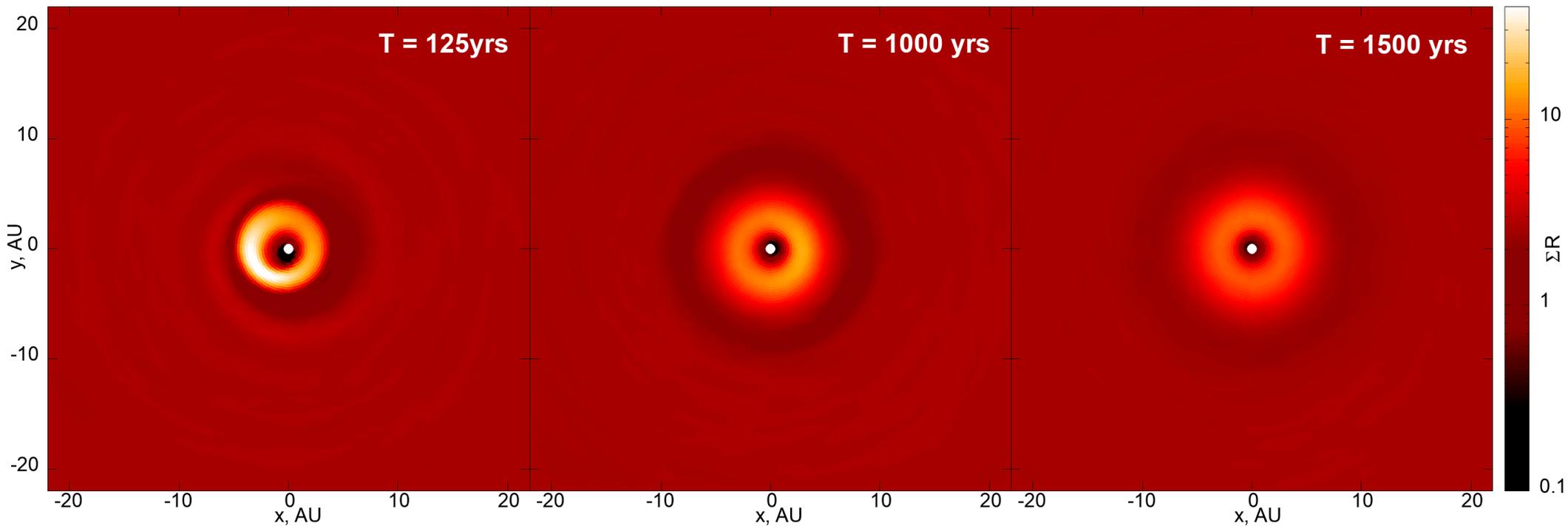
Unified Astronomy Thesaurus concepts: [Accretion \(14\)](#); [Protoplanetary disks \(1300\)](#); [Pre-main sequence stars \(1290\)](#); [Hydrodynamical simulations \(767\)](#); [Radiative transfer simulations \(1967\)](#)

Массивное возмущение вблизи звезды



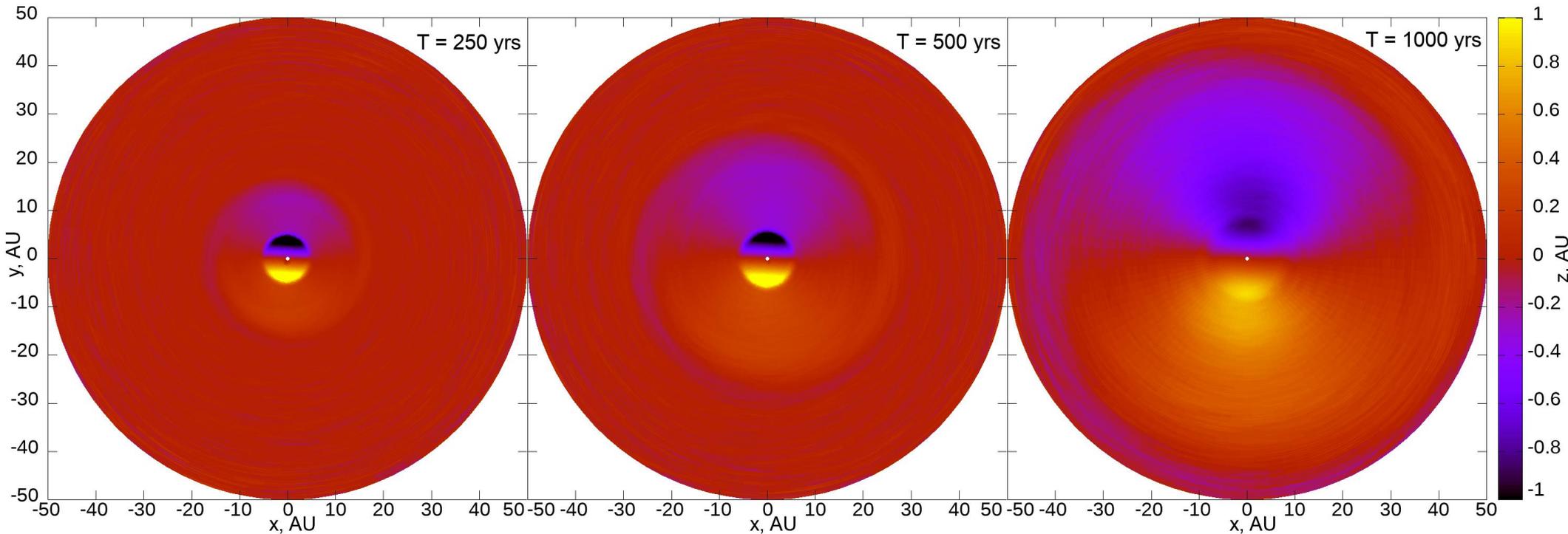
$M_c = M_J$; $I = 30^\circ$; $L=0.8$; $R_0 = 3 \text{ a.e.}$; $dR = 2 \text{ a.e.}$; $\varphi = 30^\circ$;

Поверхностная плотность



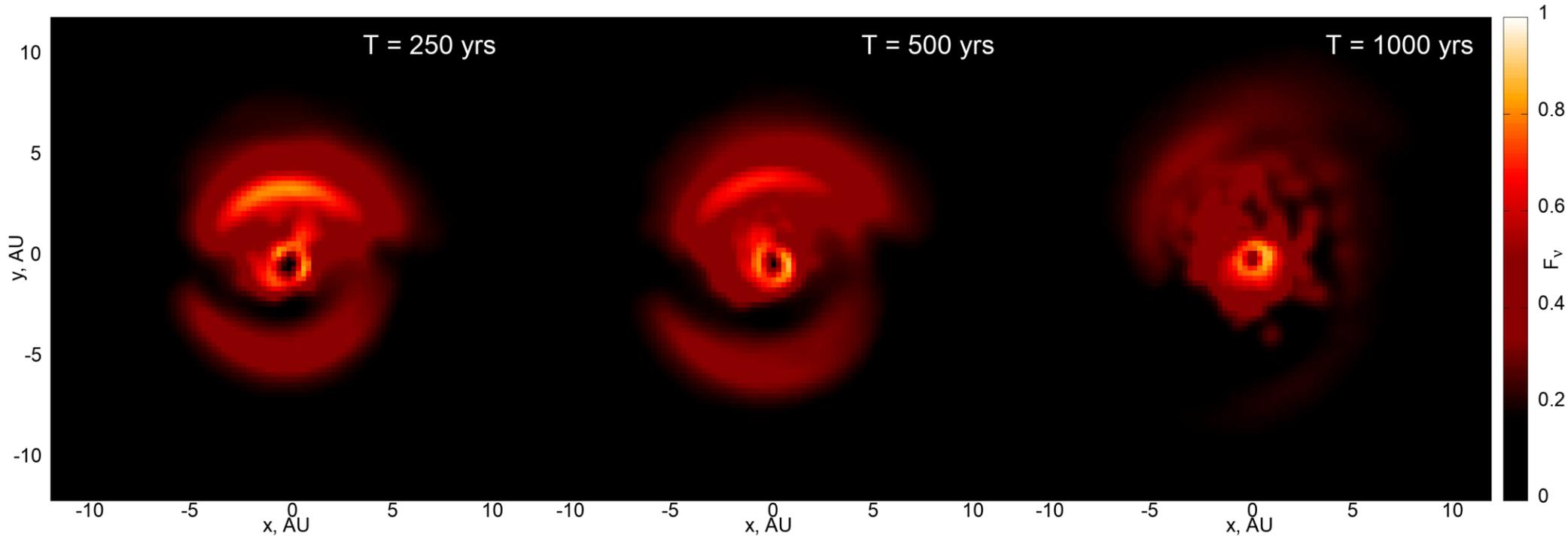
$M_c = M_J$; $I = 30^\circ$; $R_0 = 3 \text{ a.e.}$; $dR = 2 \text{ a.e.}$; $\varphi = 30^\circ$;

Вертикальный изгиб



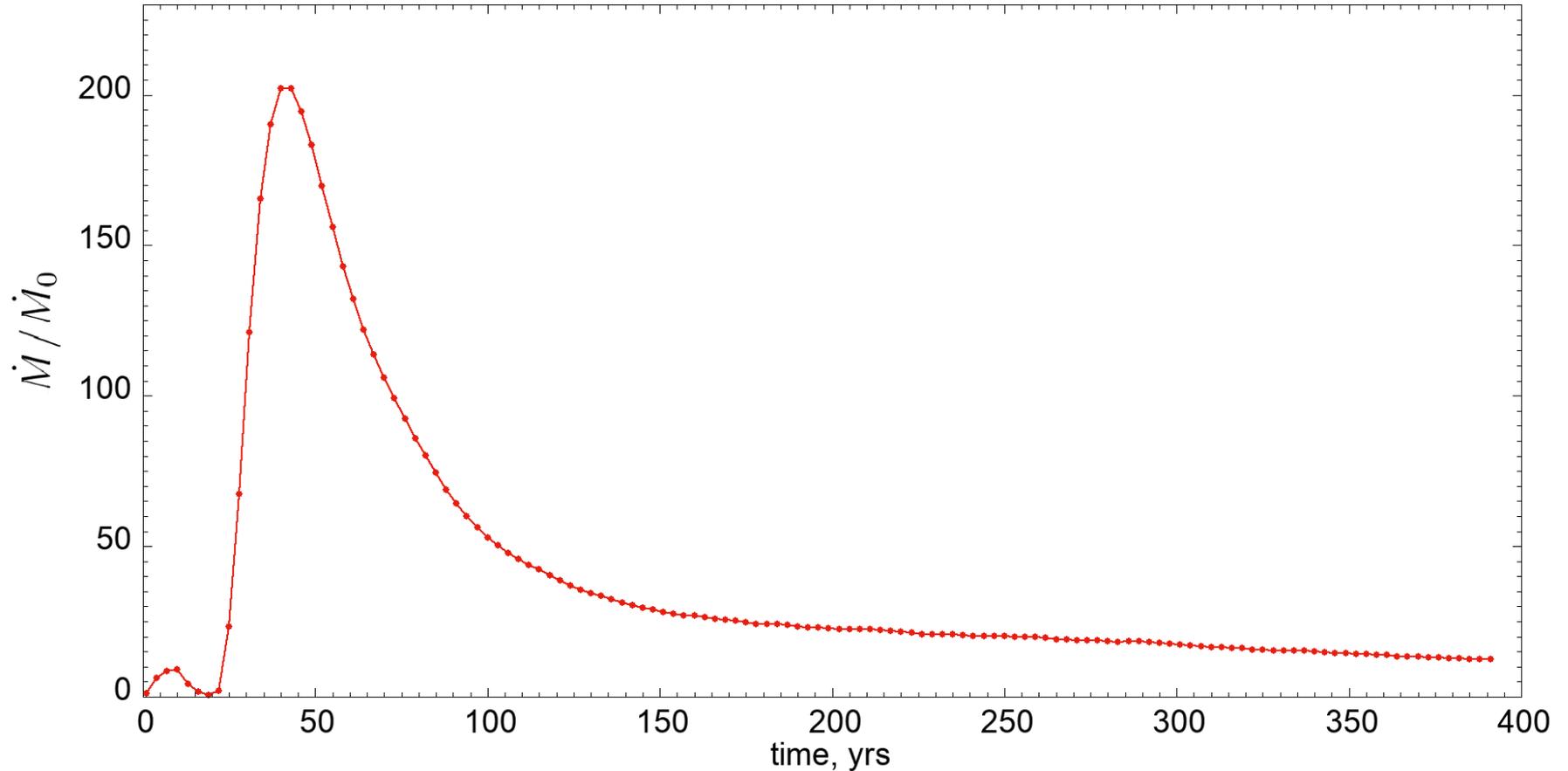
$M_c = M_J$; $I = 30^\circ$; $L = 0.8$; $R_0 = 3 \text{ a.e.}$; $dR = 2 \text{ a.e.}$; $\varphi = 30^\circ$;

Изображение на 1 мм



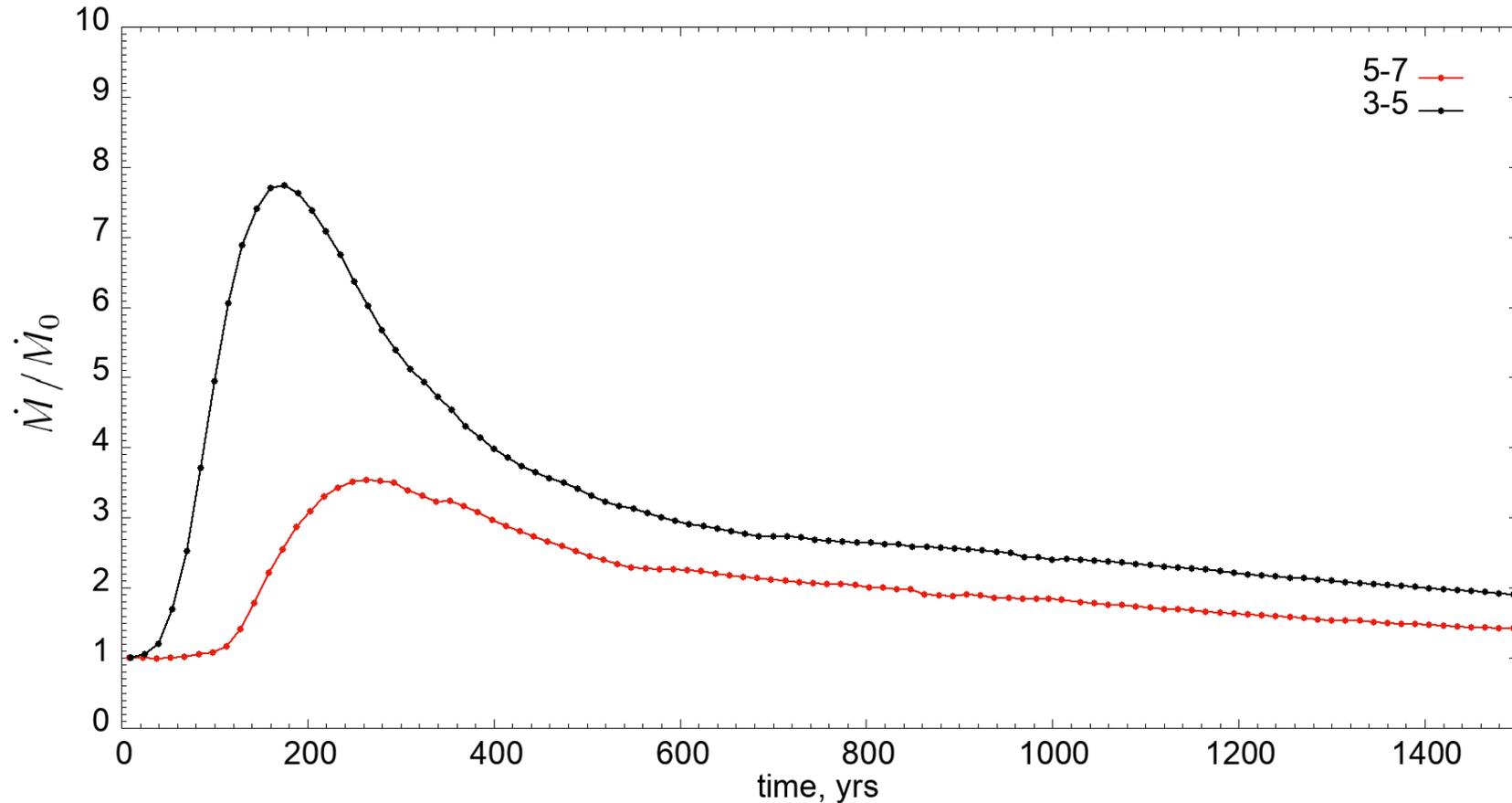
$M_c = M_J$; $i = 30^\circ$; $L=0.8$; $R_0 = 3 \text{ a.e.}$; $dR = 2 \text{ a.e.}$; $\varphi = 30^\circ$;

Темп аккреции



$M_c = 3M_J$; $L=0.66$; $I = 45^\circ$; $R_0 = 3$ a.e.; $dR = 2$ a.e.; $\varphi = 30^\circ$;

Темп аккреции



1 M_J – 7.7 раза
0.5 M_J – 3.7 раза
0.3 M_J – 2.5 раза
0.1 M_J – 1.3 раза

$M_c = M_J$; $L = 0.8$; $i = 30^\circ$; $dR = 2$ a.e.; $\varphi = 30^\circ$;

Выводы

Модель облачной аккреции позволяет объяснить следующие явления:

1. Большинство наблюдаемых типов асимметрий на изображениях протопланетных дисков;
2. Появление мощных и продолжительных вспышек аккреции на молодую звезду, которые напоминают вспышку FUORa;
3. Появление наклонного внутреннего диска, что как раз и наблюдается у некоторых молодых звезд.
4. Облачная аккреция может способствовать формированию планеты на наклонной орбите.

Заключение

1. Идея об облачной аккреции на протопланетный диск была предложена в работе Graham (1992) для объяснения событий сильного поглощения, наблюдаемых у некоторых молодых звезд;
2. Применялась для объяснение формирования хондритов (Tanaka et al., 1998);
3. Не теряет своей актуальности для объяснения явления FUORов (Hartmann & Kenyon, 1996; Zhu et al., 2010; Bae et al., 2013; Hartmann & Bae, 2018)

Однако газодинамическое моделирование распада облака в вязкой среде диска и анализ наблюдательных проявлений данного события выполнены в первые в данной работе

Была продемонстрирована принципиальная возможность возникновения целого ряда наблюдательных проявлениях механизма облачной аккреции, которые могут быть использованы для объяснения наблюдательных особенностей у молодых звезд.