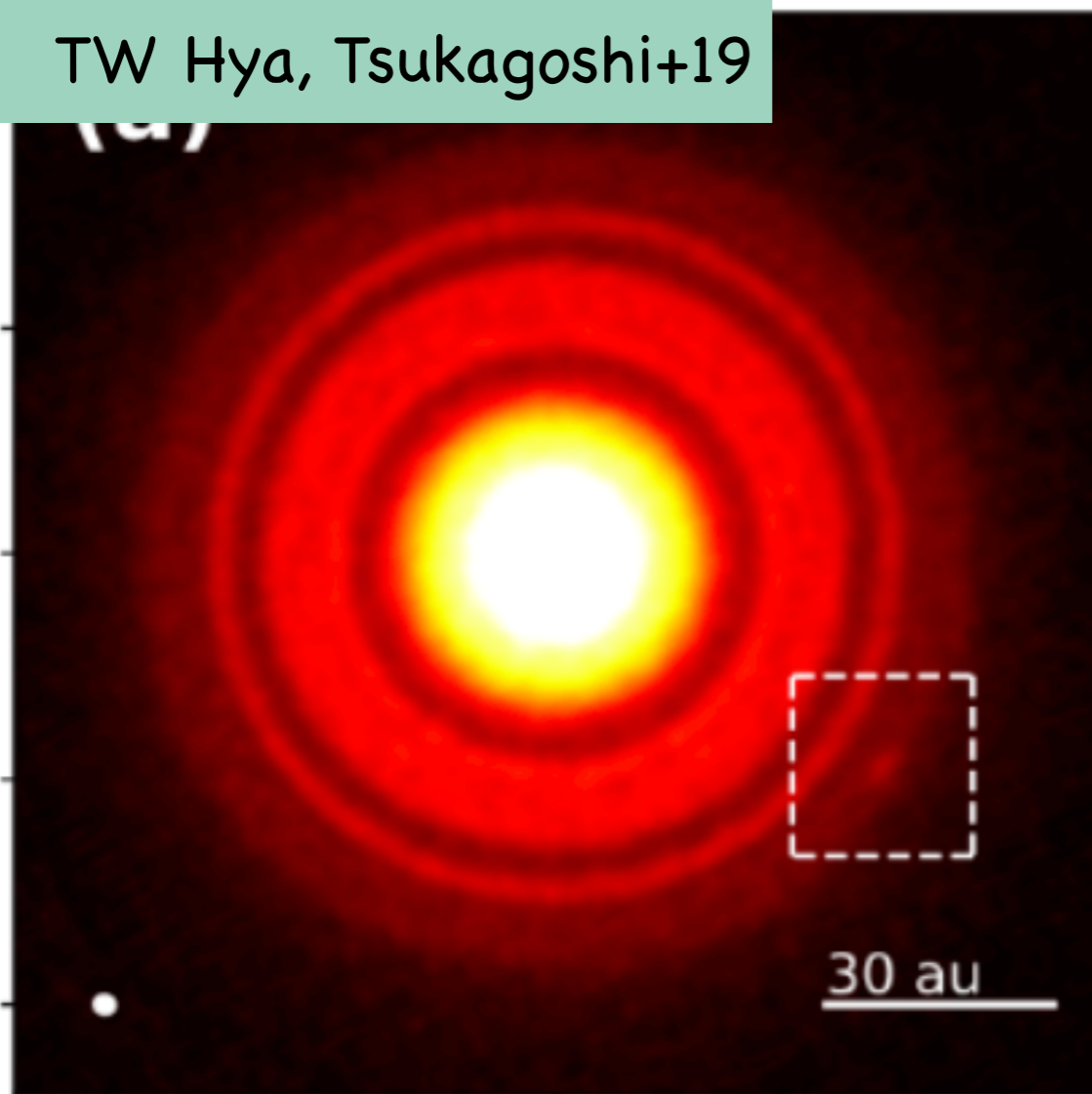


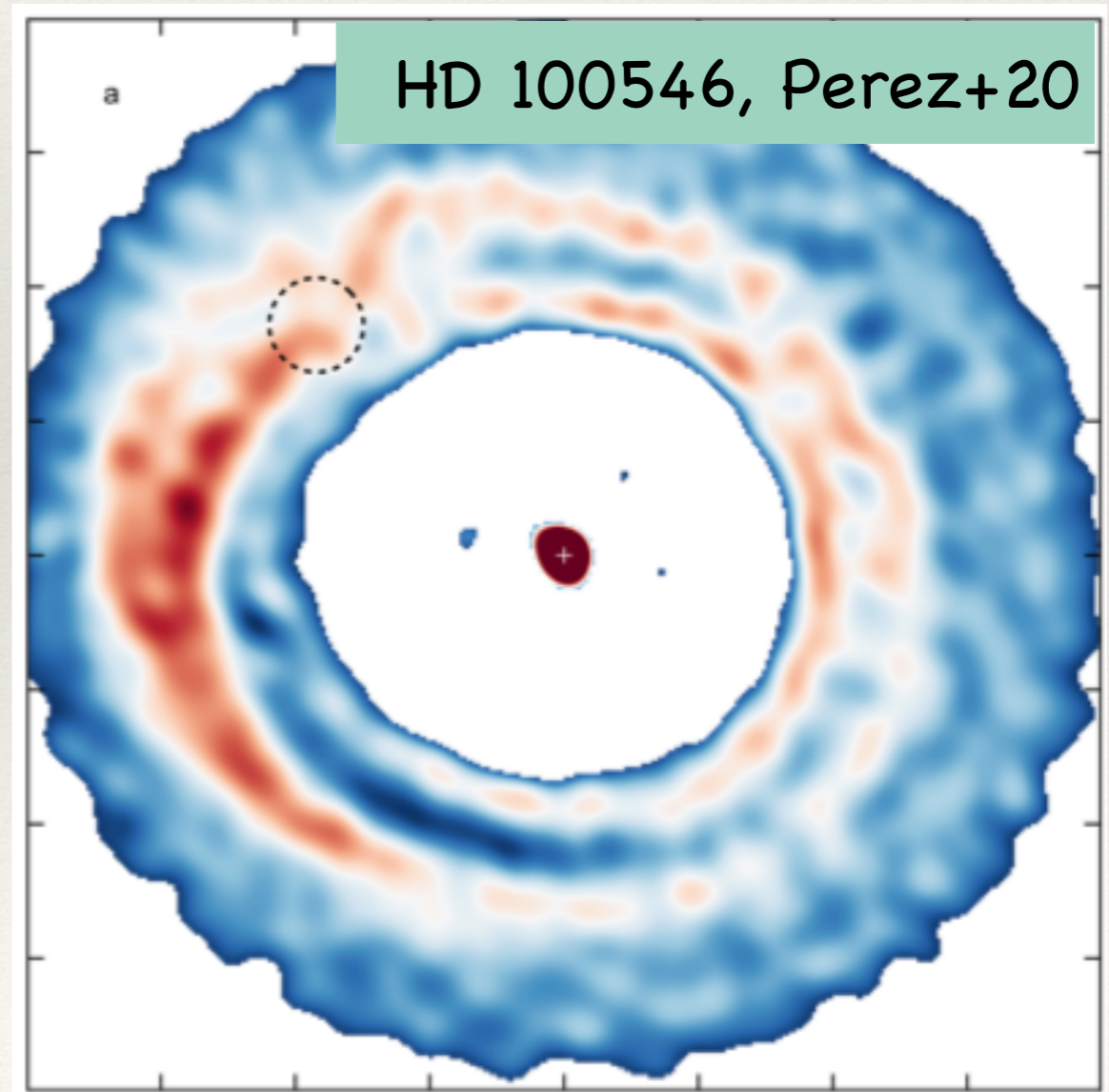
Приливное разрушение планет, физика и наблюдения

Сергей Наякшин (U of Leicester, UK)

TW Hya, Tsukagoshi+19

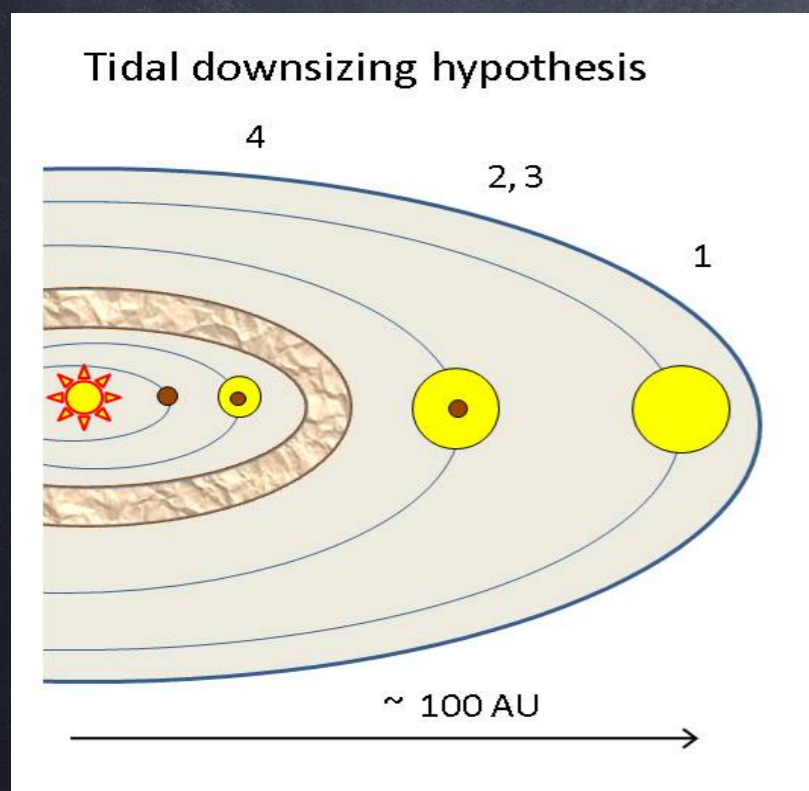
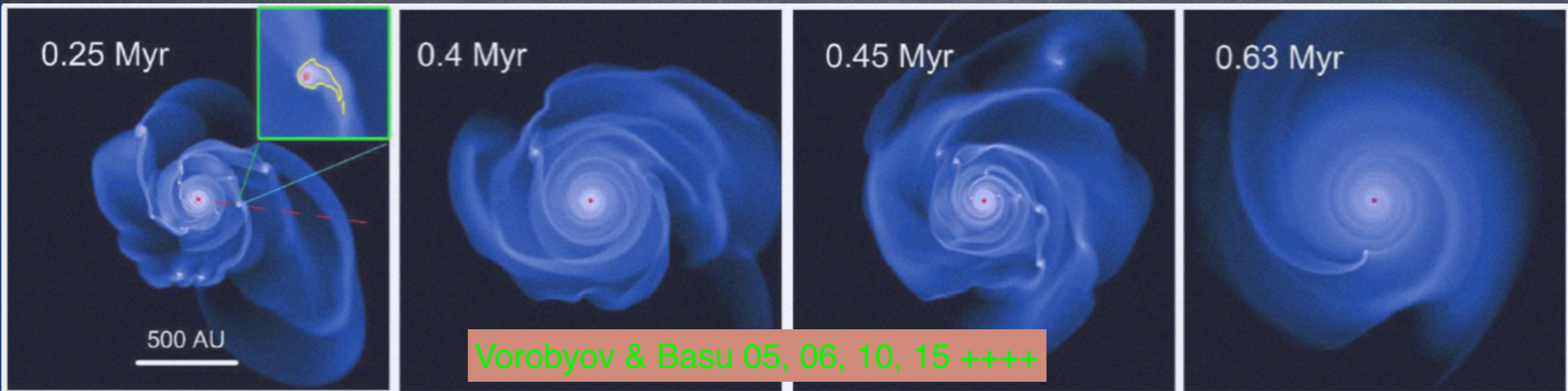


HD 100546, Perez+20



Основной тезис

Разрушение планет: наблюдаемый процесс без которого невозможно понять образование звезд и планет



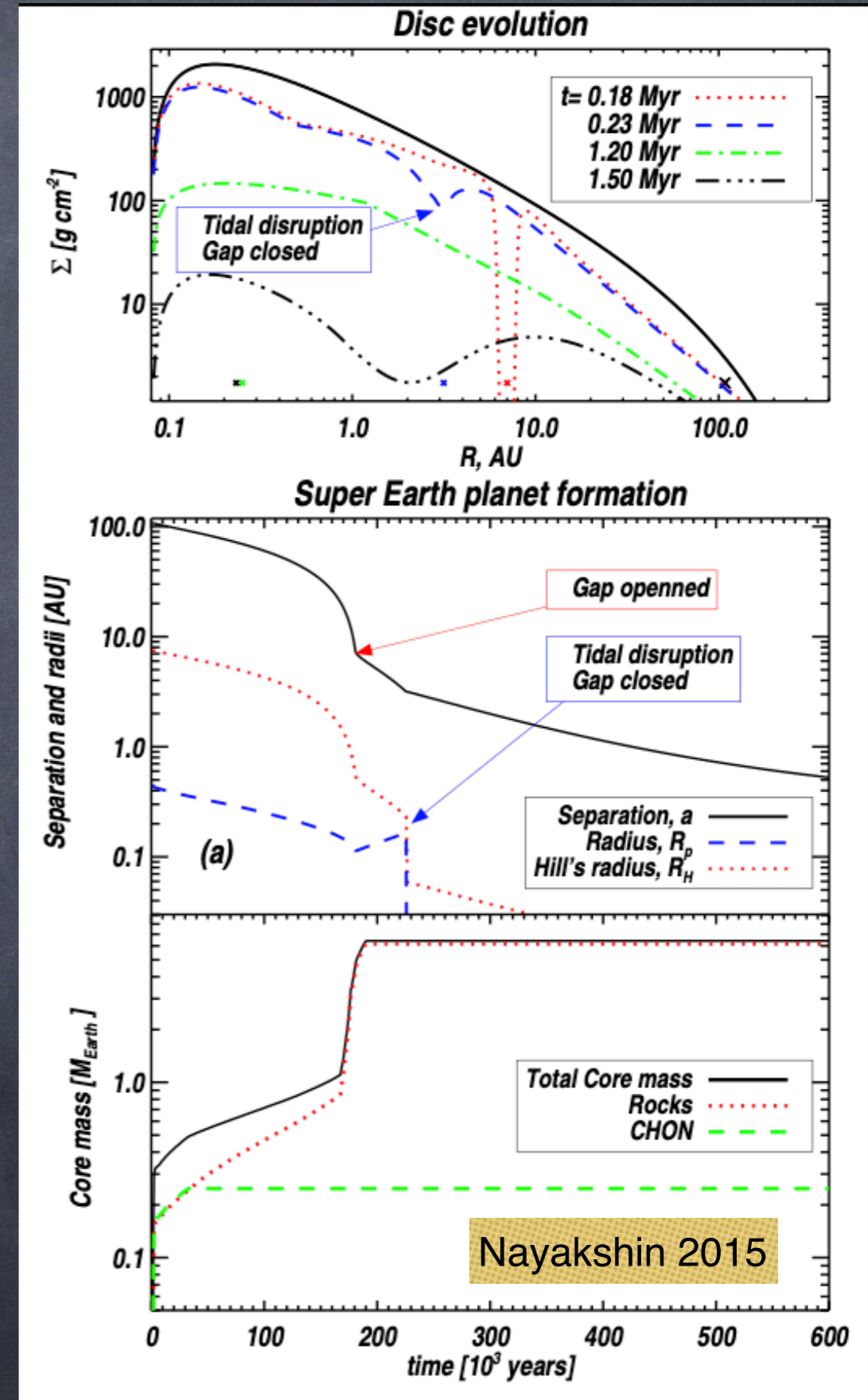
- Добавив рост и динамику пыли внутри протопланет, получаем образование планетарных ядер
- При разрушении газовой оболочки получаем планеты всех типов (Boley +10, Nayakshin 10; см также Kuiper 1951, McCrea & Williams 1965)

См обзор Nayakshin 2017, PASA

Популяционный синтез TD

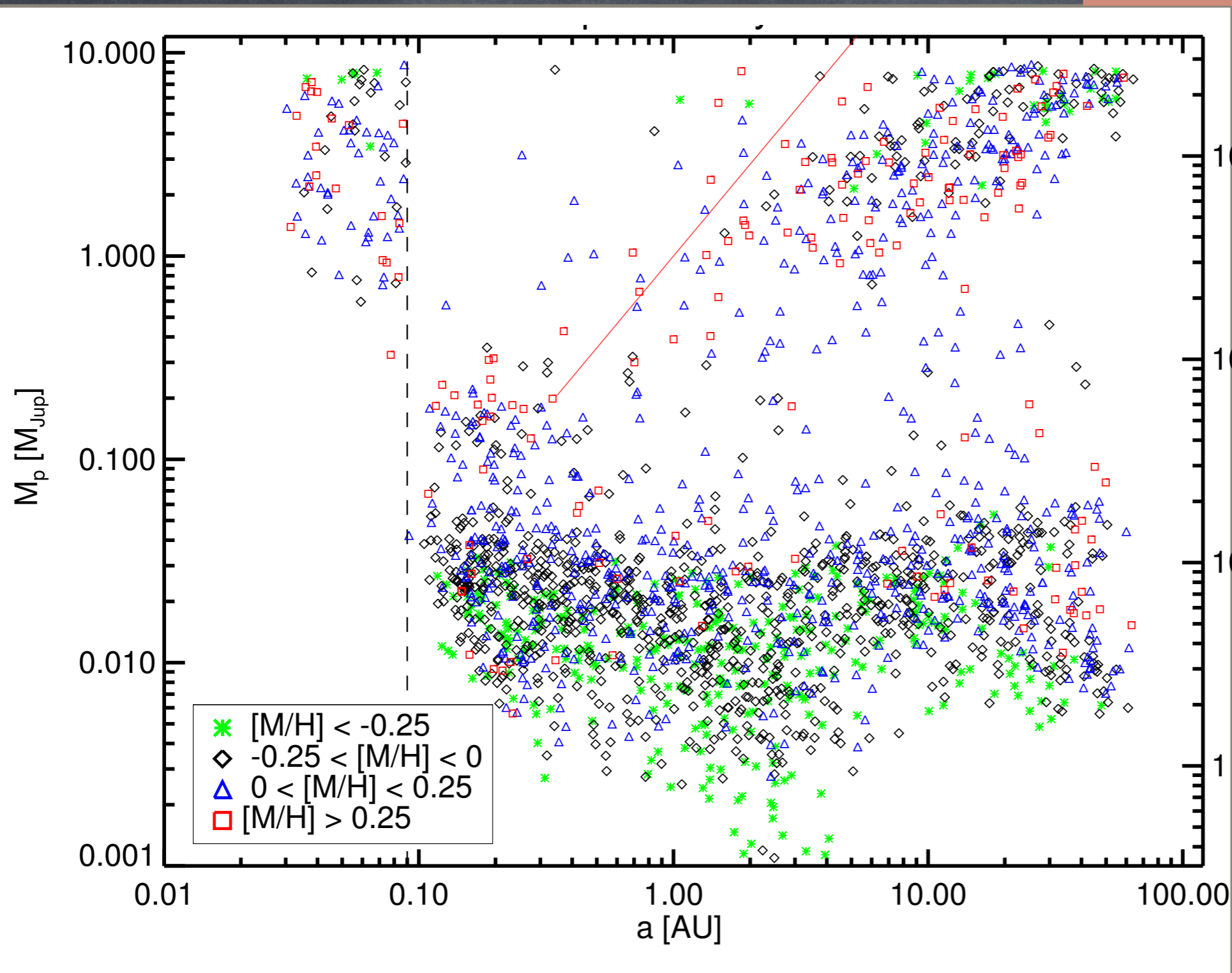
Одномерное моделирование планеты,
диска, и их взаимодействий

(Nayakshin & Lodato 2012, Nayakshin
2015a,b, 2016, Nayakshin +2020)



TD объясняет многие наблюдения лучше чем СА

См обзор Nayakshin 2017, PASA



Nayakshin
& Fletcher
2015

Однако, Forgan & Rice 2013, 2018 пришли к
прямо противоположным заключениям

При каких условиях процесс разрушения планет
наблюдаем?

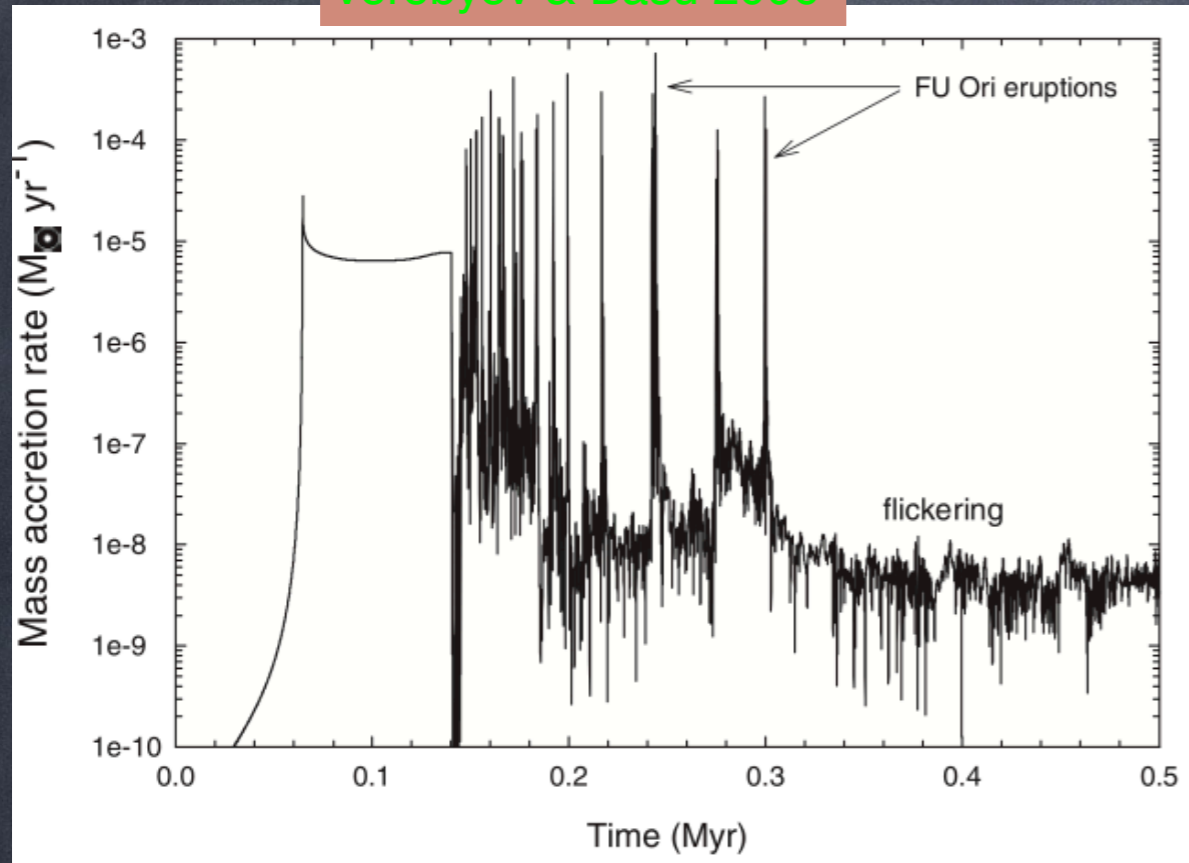
Когда сбрасываемая масса оболочки превосходит
локальную массу диска

Планетарный бюджет:

- Газ: 1–5 масс Юпитера
- Пыль: 20–100 масс Земли
- Тугоплавкие материалы типа кристаллических силикатов

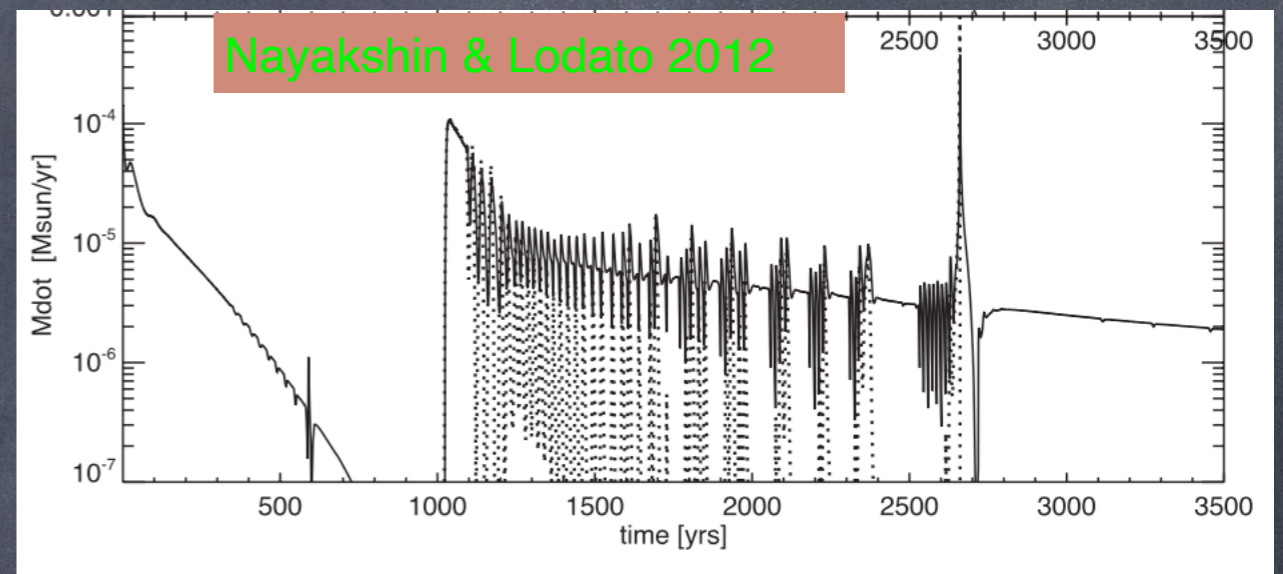
Разрушение планеты около звезды

Vorobyov & Basu 2006



$$M_{\text{disc}} \sim 0.1 M_{\text{J}} \left(\frac{R}{0.1 \text{ AU}} \right)$$

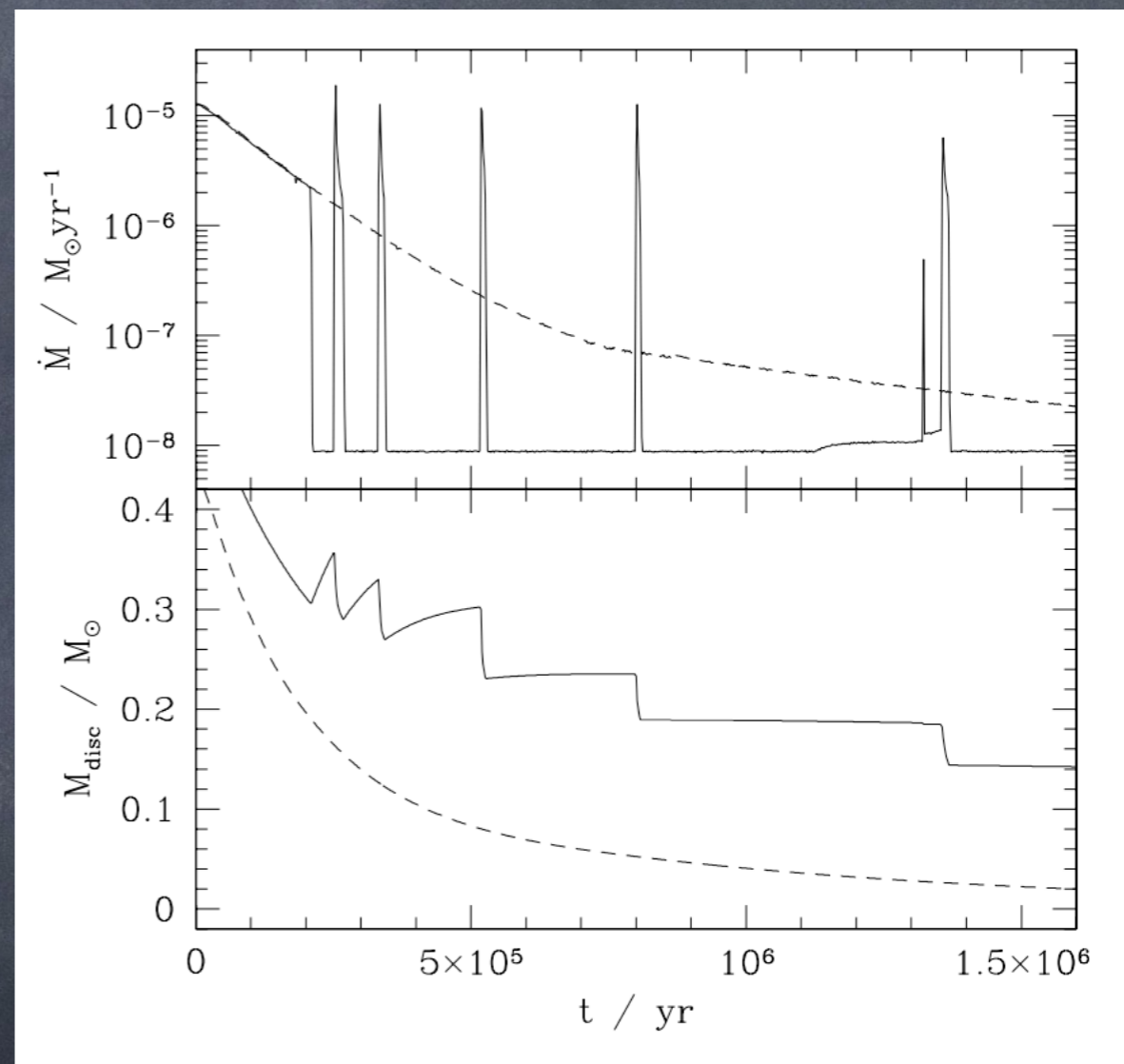
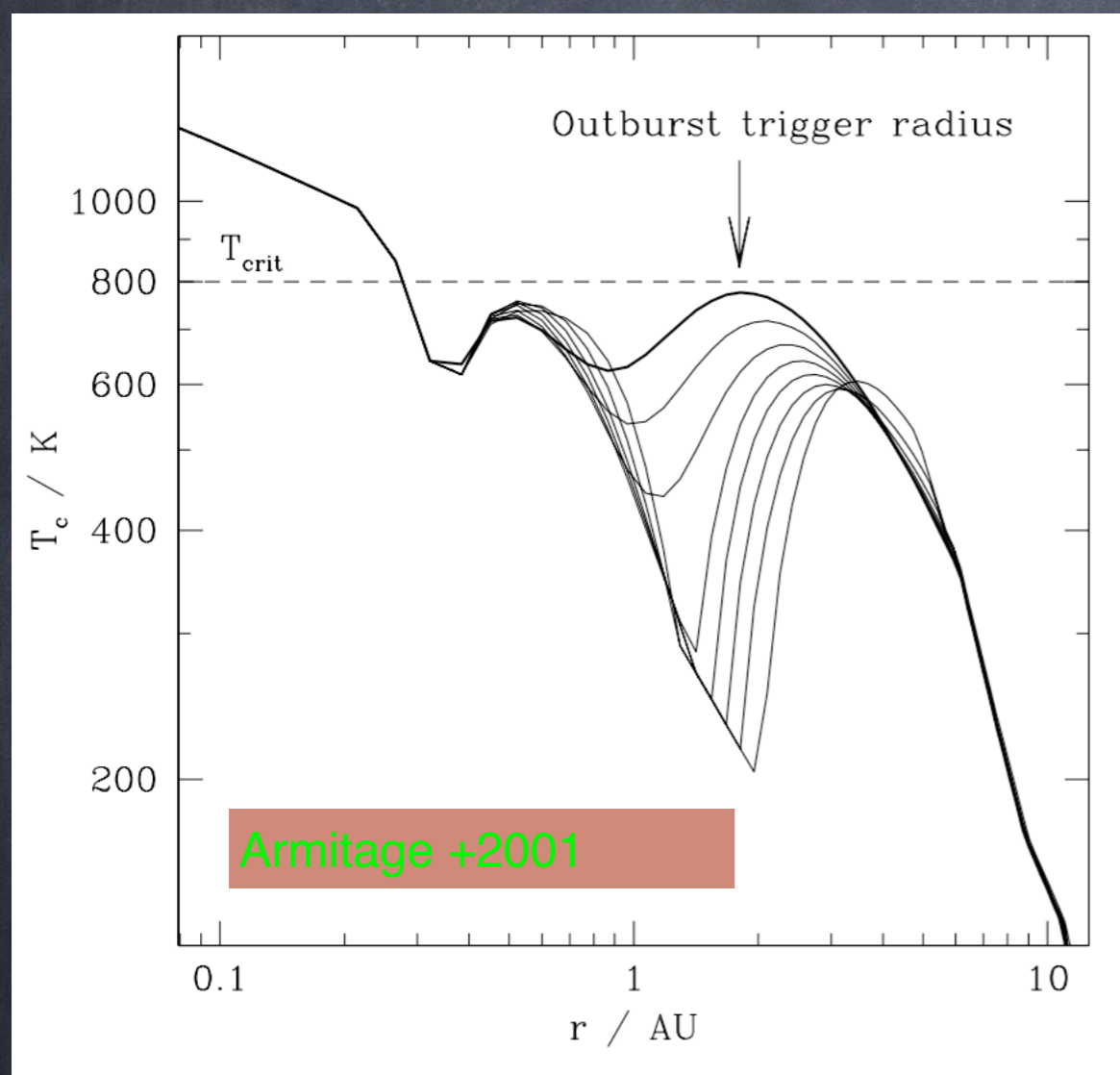
Nayakshin & Lodato 2012



Разрушение планеты на расстоянии 0.1 AU от звезды производит желаемые параметры вспышек.

Активация MRI в мертвой зоне

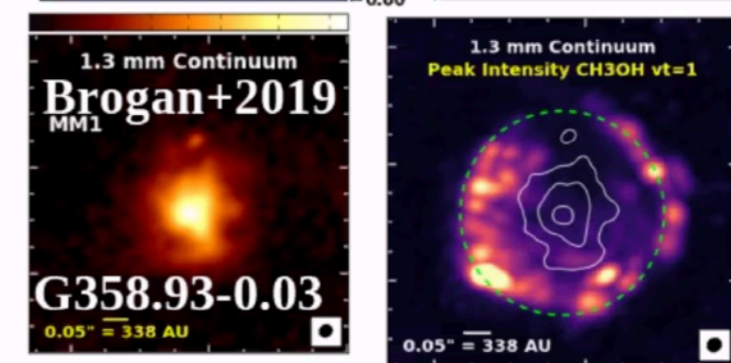
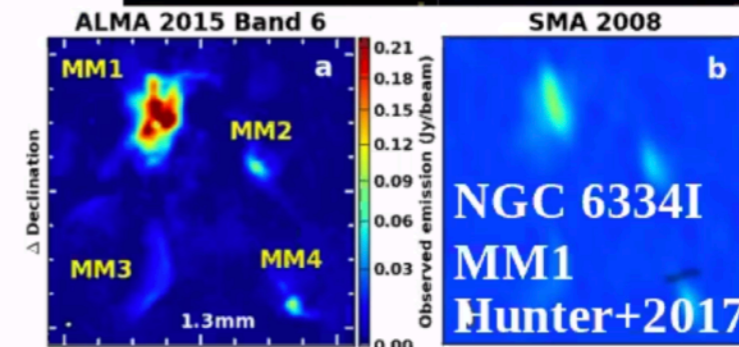
Этот механизм тоже производит вспышки как в ФУорах



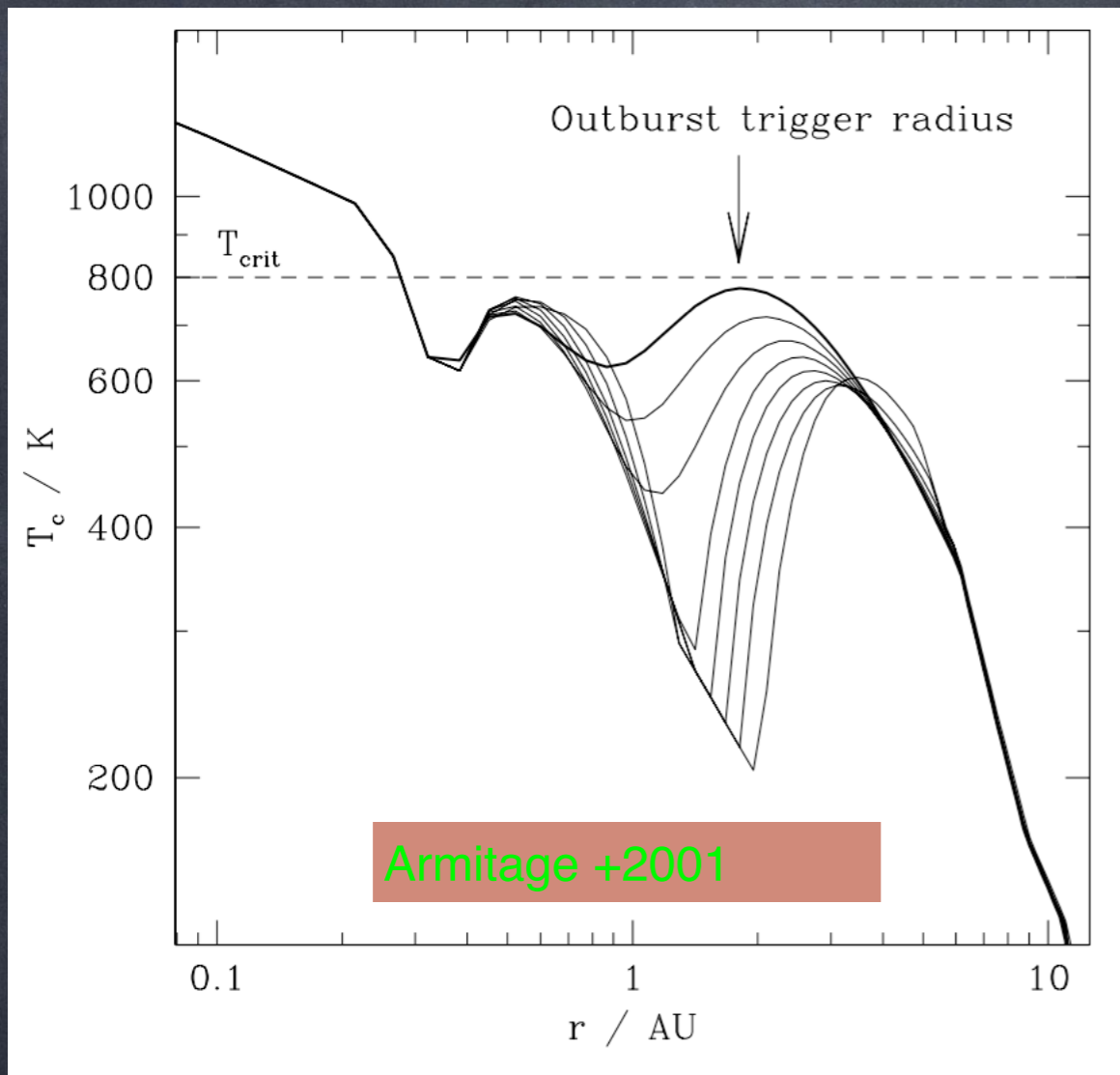
Accretion bursts in HMYSOs

The discovery of episodic accretion in HMYSOs has opened a new research field in star formation.

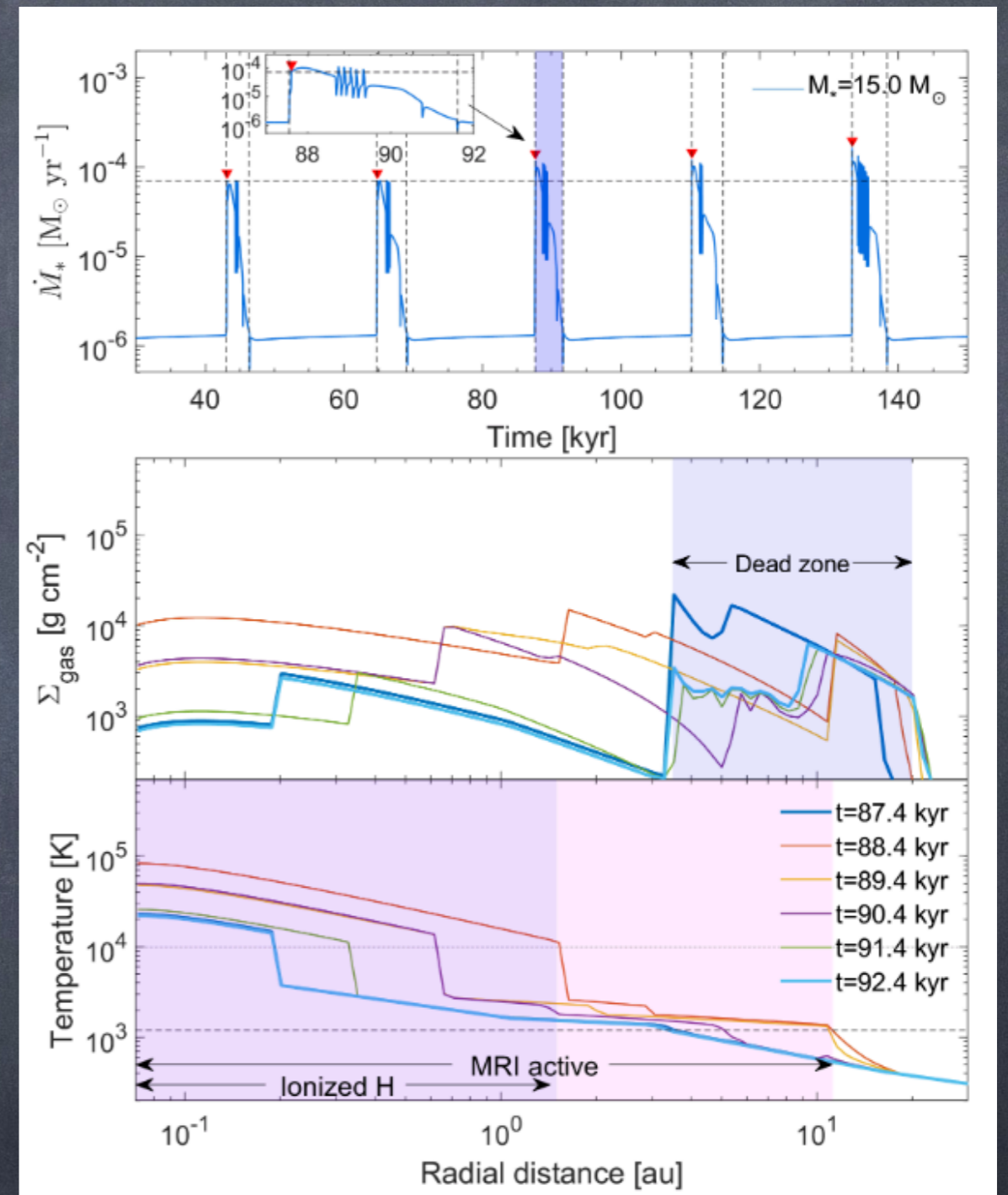
- 4 accretion bursts detected and studied so far:
- S255IR NIRS 3: $\sim 20 M_{\odot}$ (Caratti o Garatti+2017; Moscadelli +2017; Szymczak+2017; Liu+2018; Cesaroni+2018; Uchiama+2019)
- NGC 6334I MM1: $\sim 20 M_{\odot}$ (Hunter+2017,2018; Brogan+2018; McLeod+2018)
- G358.93-0.03 MM1: $\sim 10 M_{\odot}$ (Brogan+2019; MacLeod+2019; Breen+2019; Burns+2020; Stecklum+submitted)
- G323.46-0.08: $\sim 8 M_{\odot}$ (Proven-Adzri+2019; Wolf+ in prep)



Активация MRI в дисках с $M_* = 20 M_\odot$



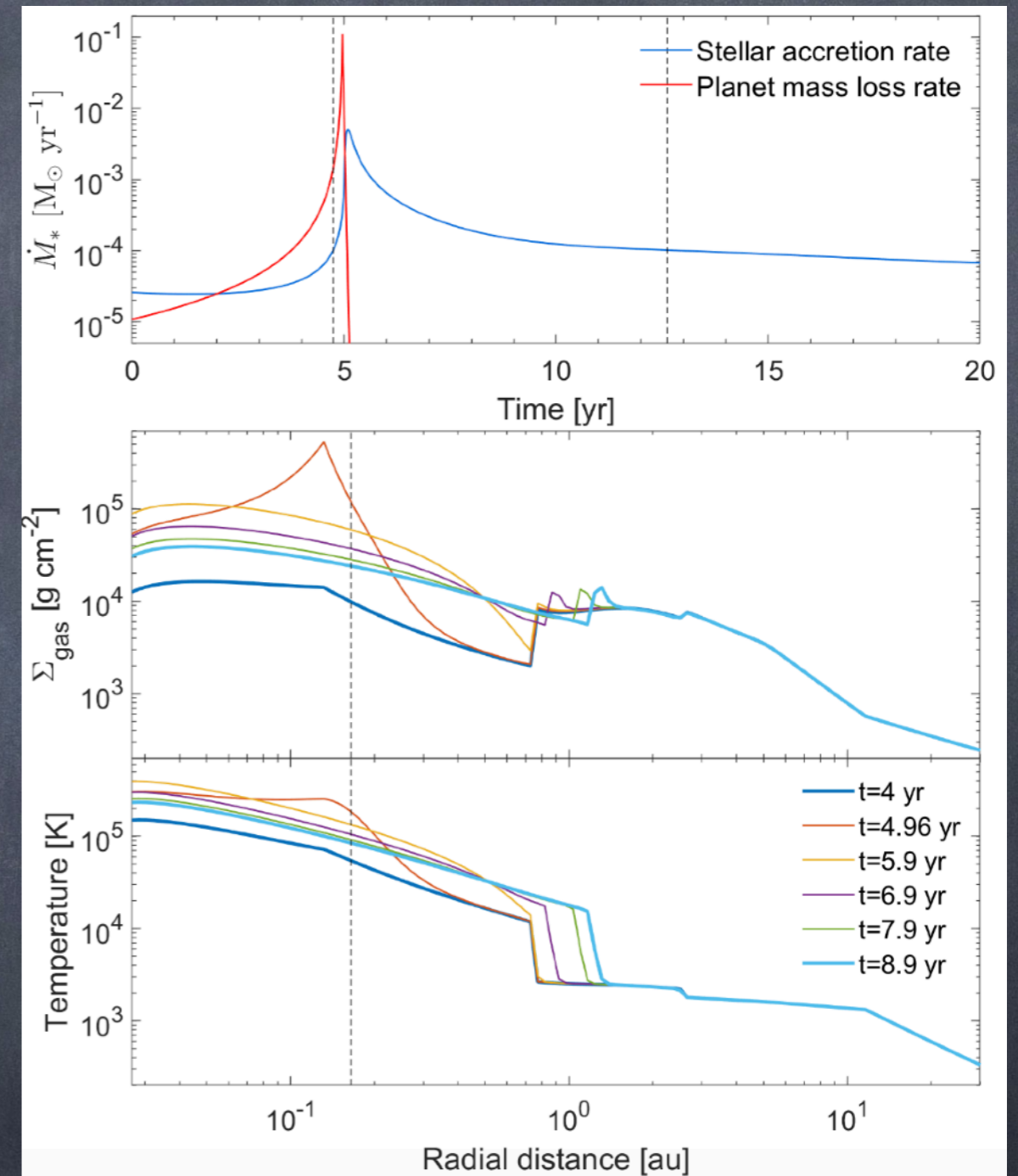
Диски около массивных звезд на порядок горячее. Вспышки этой модели не могут быть короче сотен лет, тогда как продолжительность наблюдаемых вспышек $\sim 1-3$ года



Elbakyan, N, Vorobyov, Caratti o Garatti +, in prep.

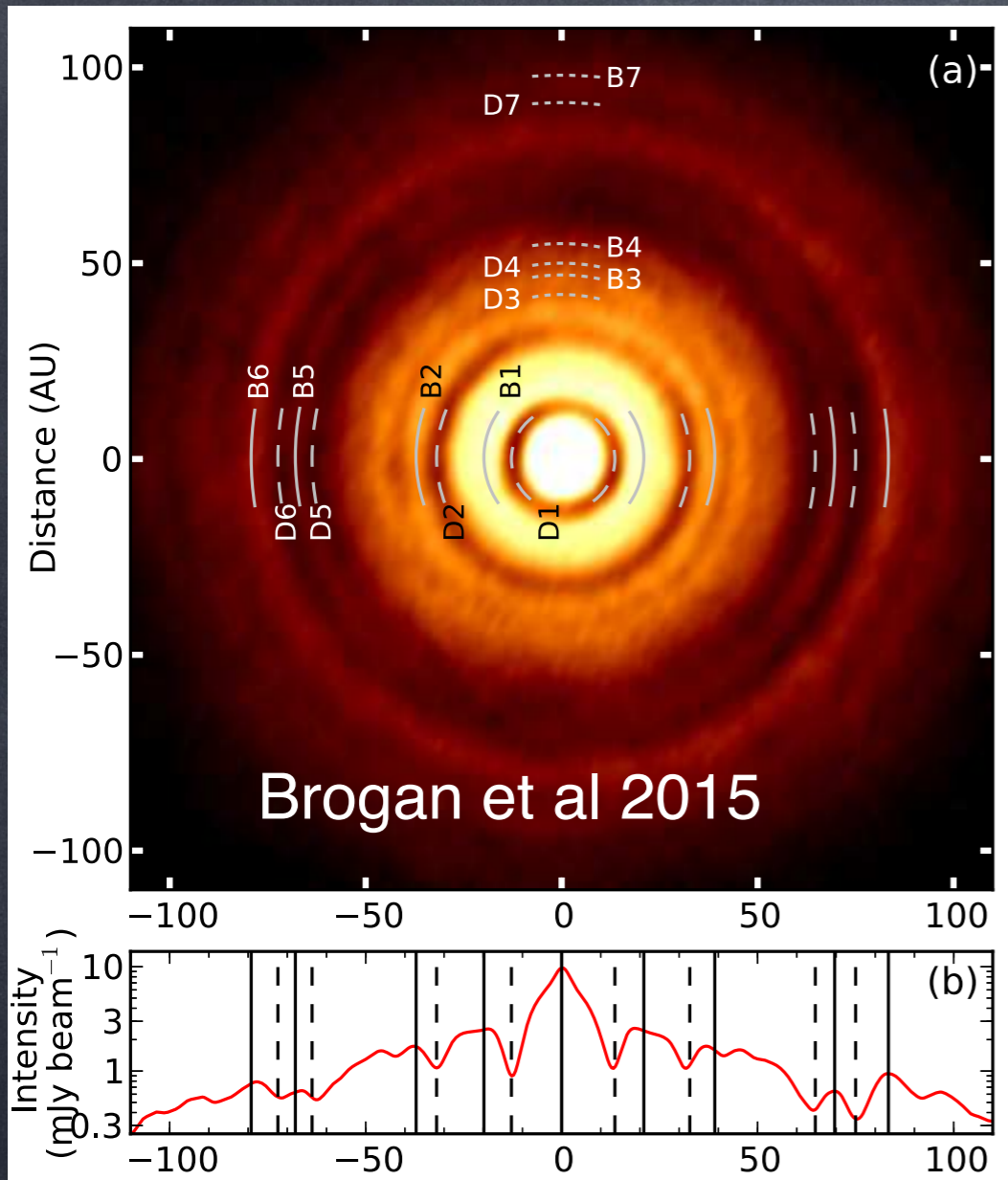
Разрушение планеты около $M_* = 20 M_\odot$

Разрушение планеты происходит чуть дальше от звезды (чем в случае маломассивных звезд), тем не менее свойства расчетных вспышек прекрасно сочетаются с наблюдаемыми

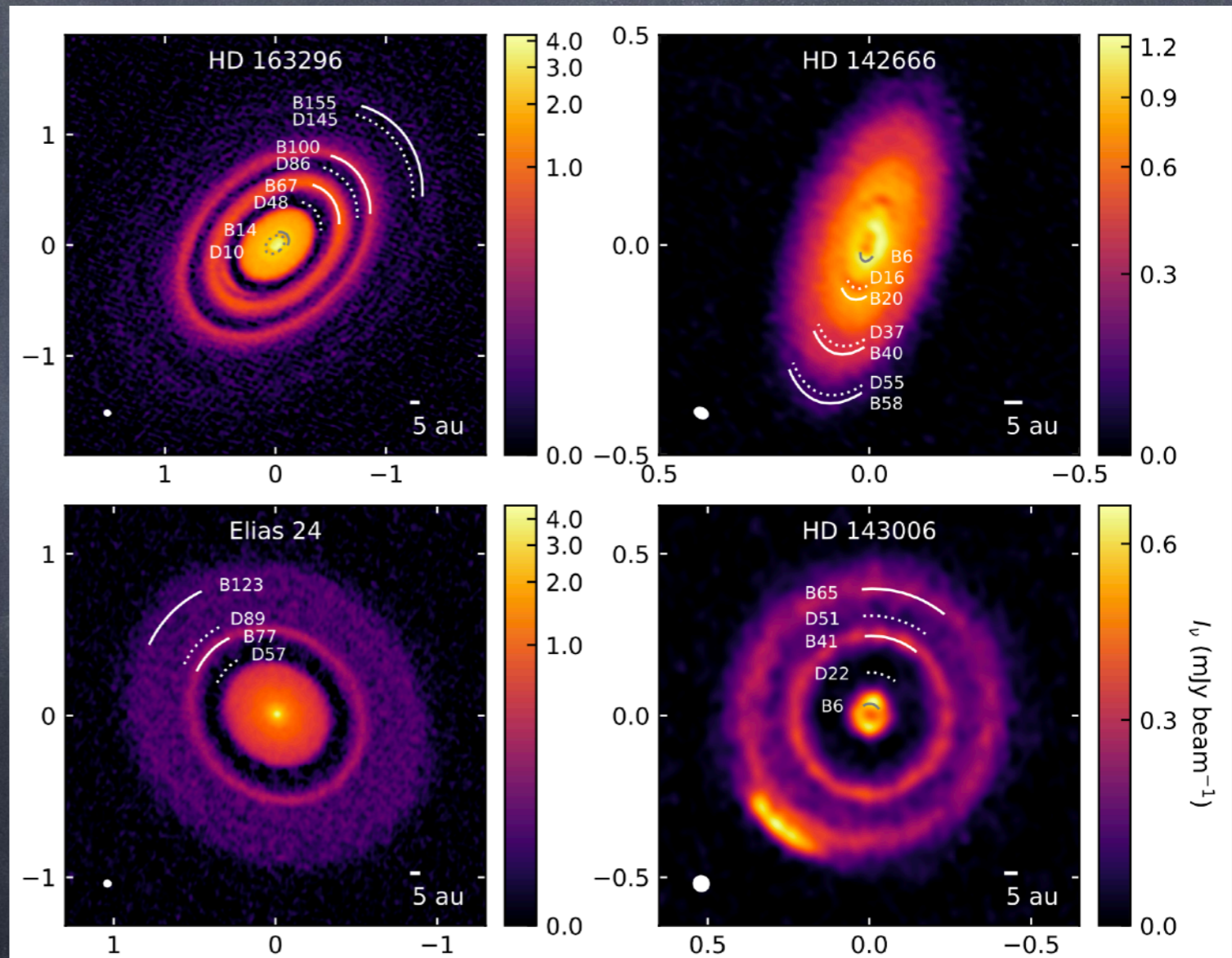


Elbakyan, N, Vorobyov, Caratti o Garatti +, in prep.

ALMA: КОНЕЦ ТЕМНОЙ ЭПОХИ

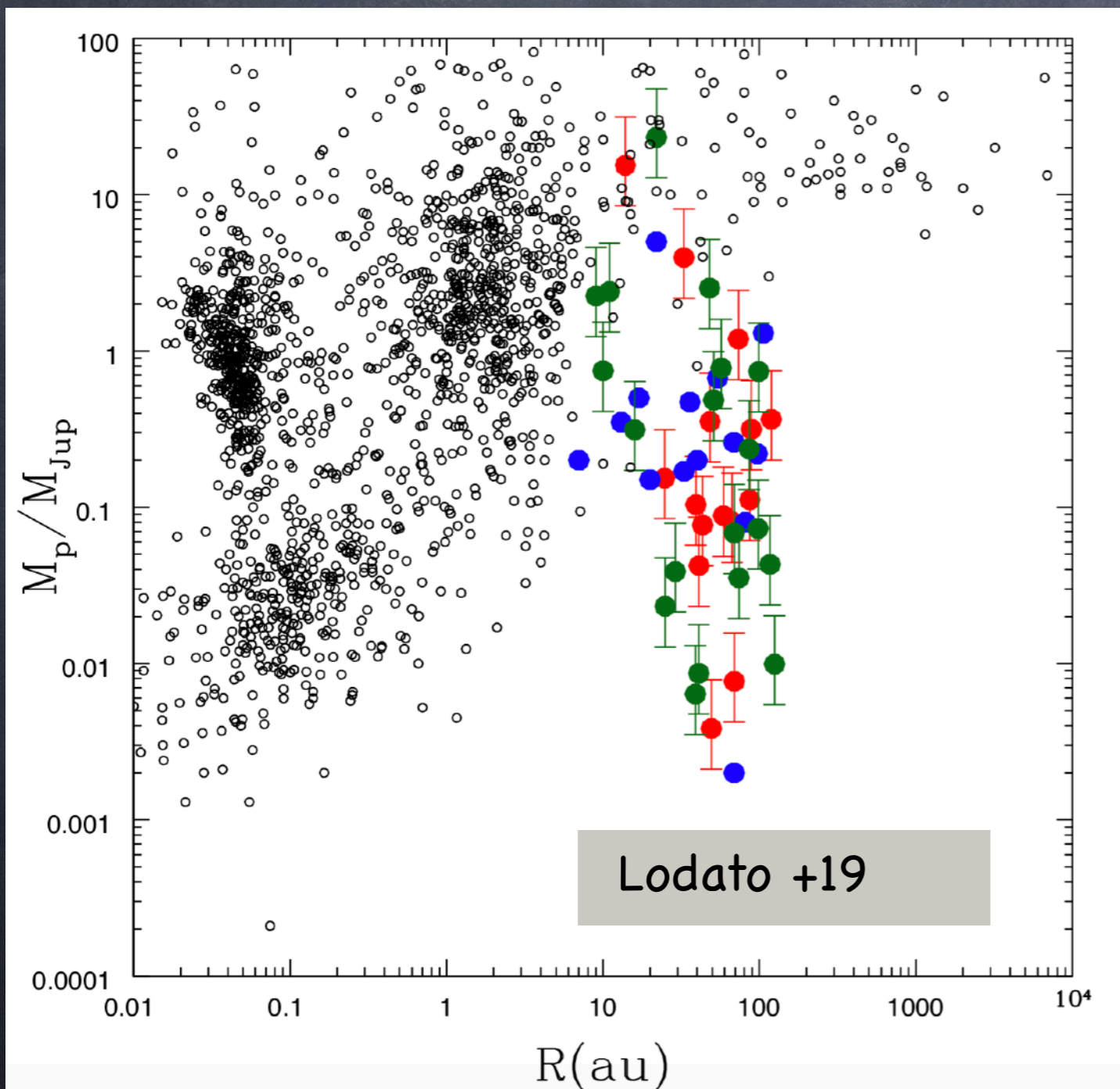


DSHARP ALMA survey, Huang +18



Перепись планет ALMA

Черные точки — Kepler, RV, etc — где уже нет дисков



- ALMA — DSHARP
- ALMA — Long+18
- Scattered light imaging

Nayakshin 2020:
давайте посмотрим
что параметры этих
систем говорят нам
про их диски

Парадоксы классической теории дисков

1. Пылинки мм-го размера требуют массивных дисков (иначе вся пыль должна уже быть в звезде).

$$t_{\text{dr}} \approx 10^6 \text{ yr} \left(\frac{M_{\text{disc}}}{0.1 M_{\odot}} \right)$$

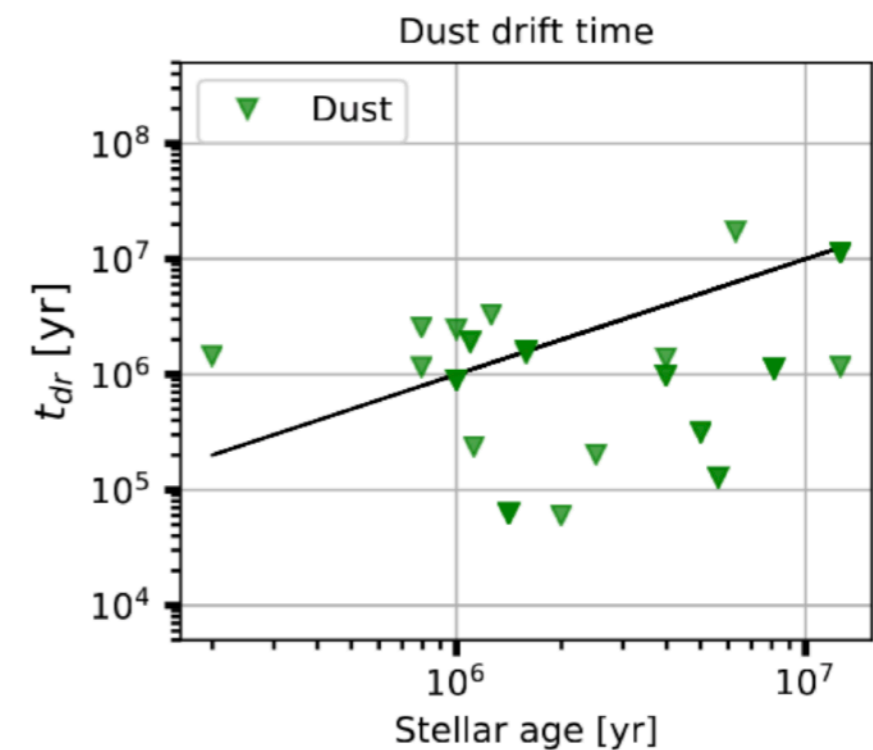
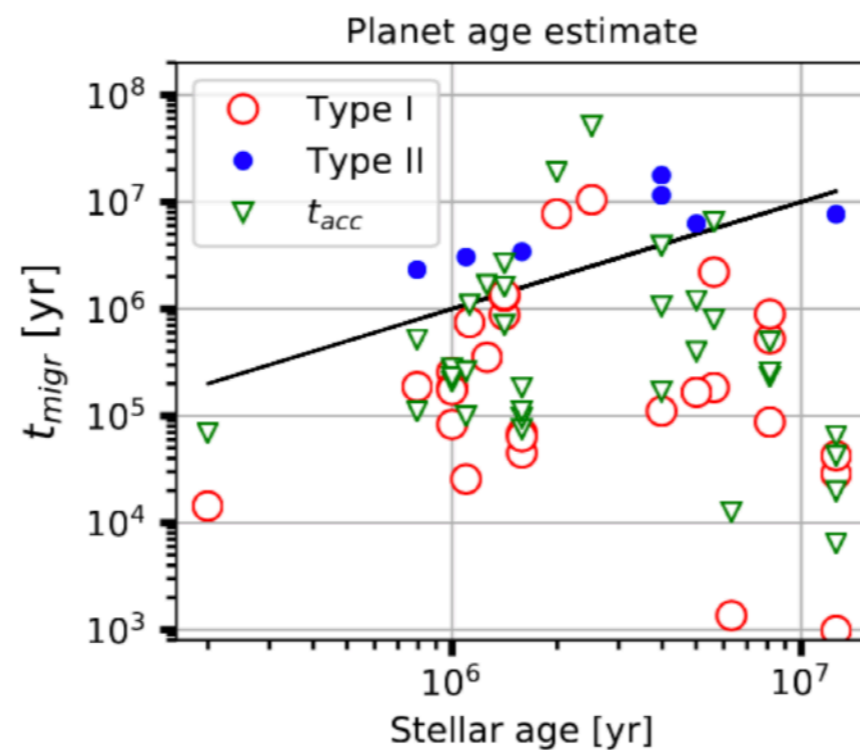
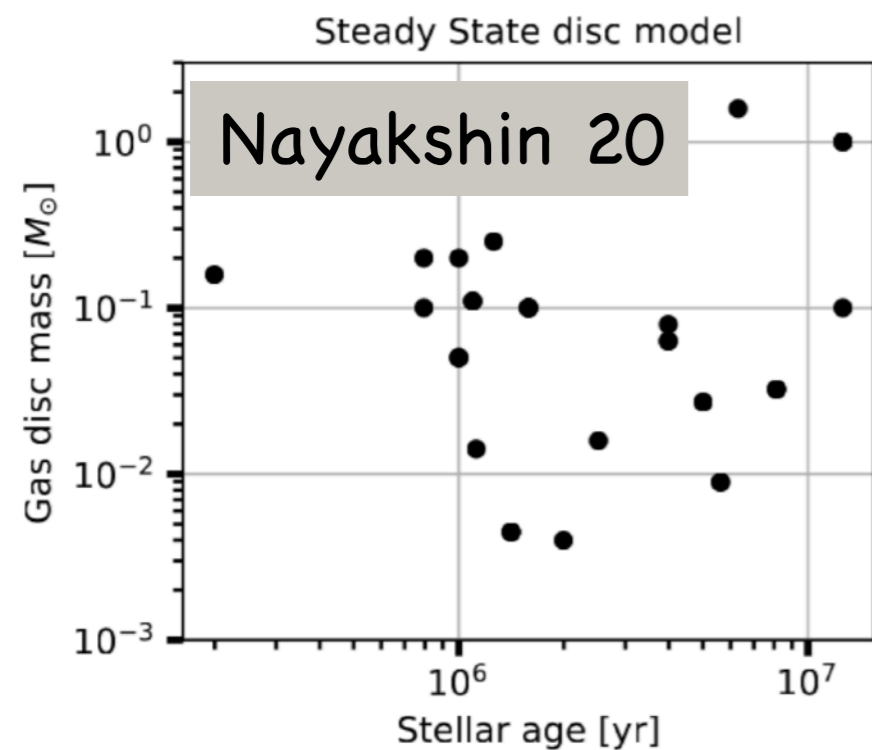
2. Темпы аккреции газа на звезду требуют того же (Jones +12)

$$M_{\text{disc}} \approx 5 \dot{M}_* t_* \sim 5 \times 10^{-8} \times 2 \times 10^6 = 0.1 M_{\odot}$$

- Диски должны быть самогравитирующими, со спиральными рукавами. Однако видим кольцевую структуру
- Если диски массивные то их планеты должны мигрировать очень быстро. Там что, конвейер с $O(100)$ планет???

Парадокс молодости планет

$$t_{\text{migI}} \approx \frac{1}{\Omega} \frac{M_*^2}{M_p M_{\text{disc}}} \left(\frac{H}{R} \right)^2$$



- Planets in the discs neither grow nor migrate... Eh???
- Were these planets just made?
 - A statistical MIRACLE? – Very unlikely.
 - Need a train of $O(100)$ gas giants in most ALMA discs. Ruled out by mass budget constrains

Разрушение планет внутренним энерговыделением

$$E_{\text{pl}} = -\frac{3}{5} \frac{GM_{\text{p}}^2}{R_{\text{p}}} \approx 10^{41} \text{ erg}$$

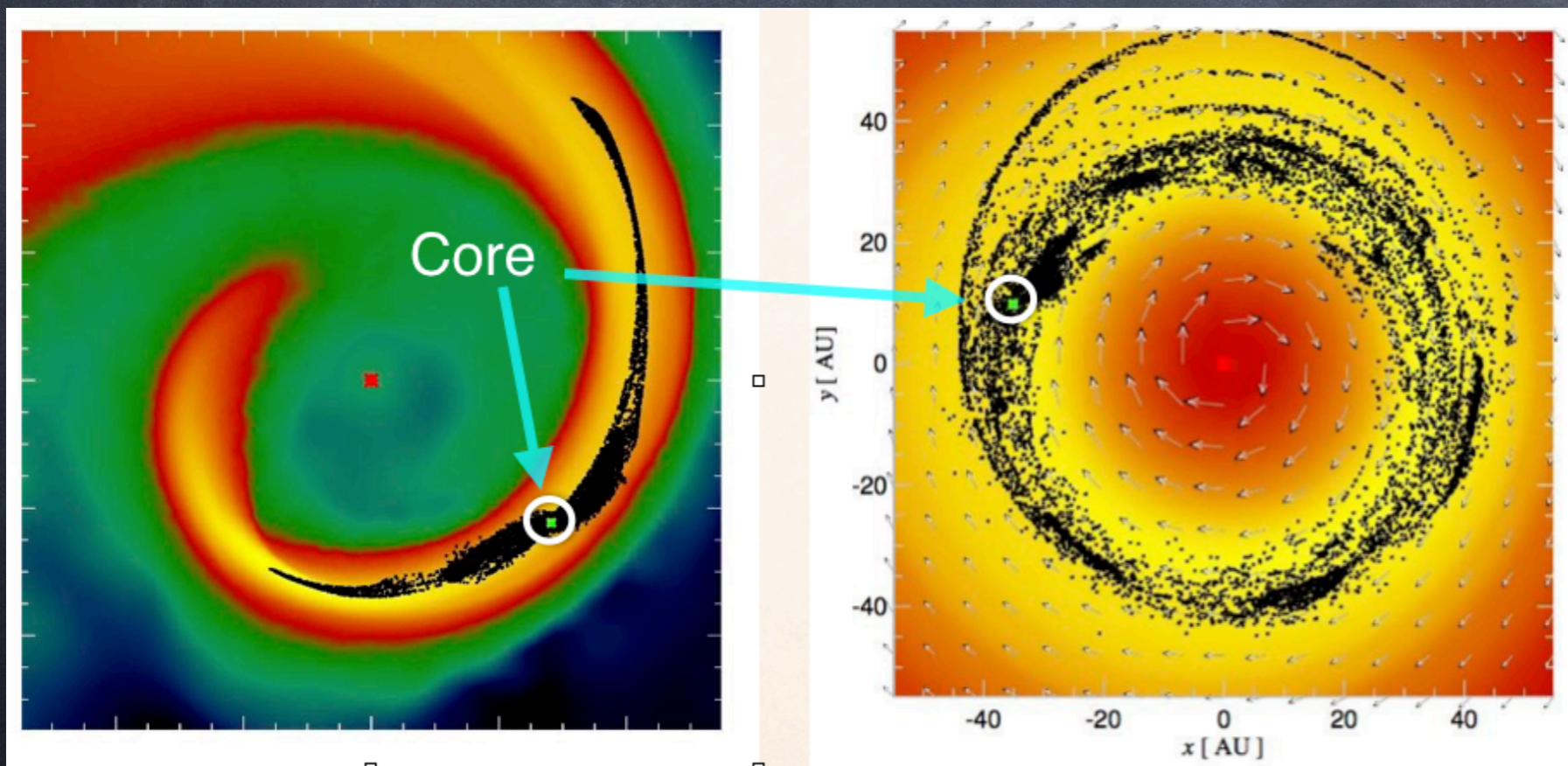
for $M_{\text{p}} = 2M_{\text{J}}, R_{\text{p}} = 0.5 \text{ AU}$

$$E_{\text{core}} \sim -\frac{GM_{\text{c}}^2}{R_{\text{core}}} \approx 10^{41} \text{ erg}$$

for $M_{\text{c}} = 10M_{\oplus}, R_{\text{core}} = 3R_{\oplus}$

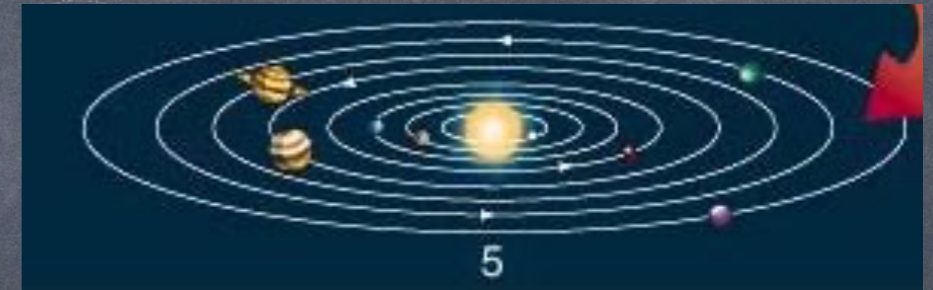
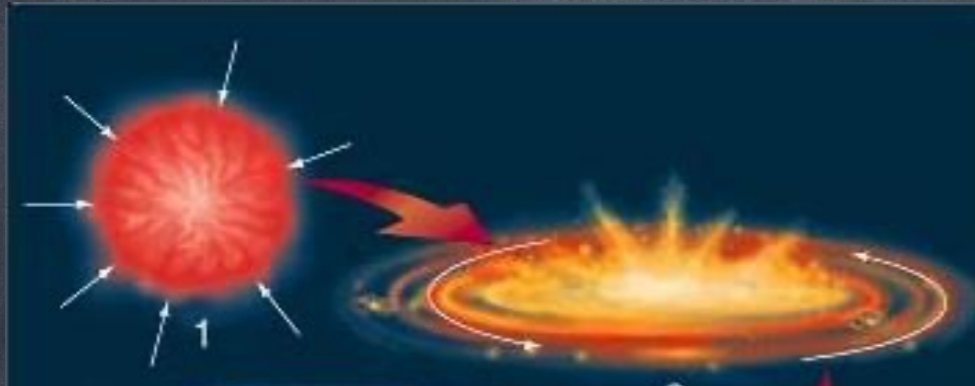
Ядро протопланеты может вздуть оболочку планеты и она ее потеряет (Примерно так как у звезд красных гигантов)

N & Cha 12 — clump disruption forms a ring of gas & solids

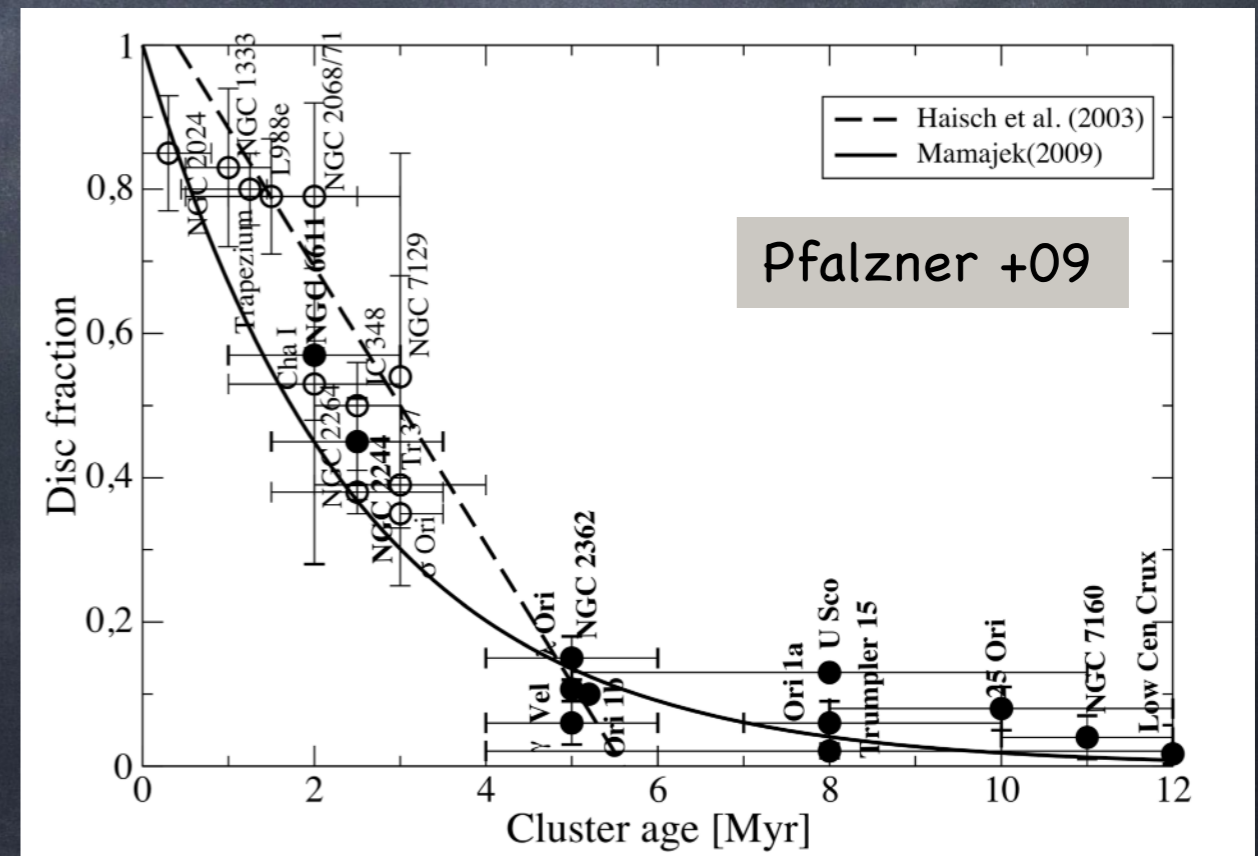


See update in Humphries & N 19 — dynamics of gas & solids inside the clump.

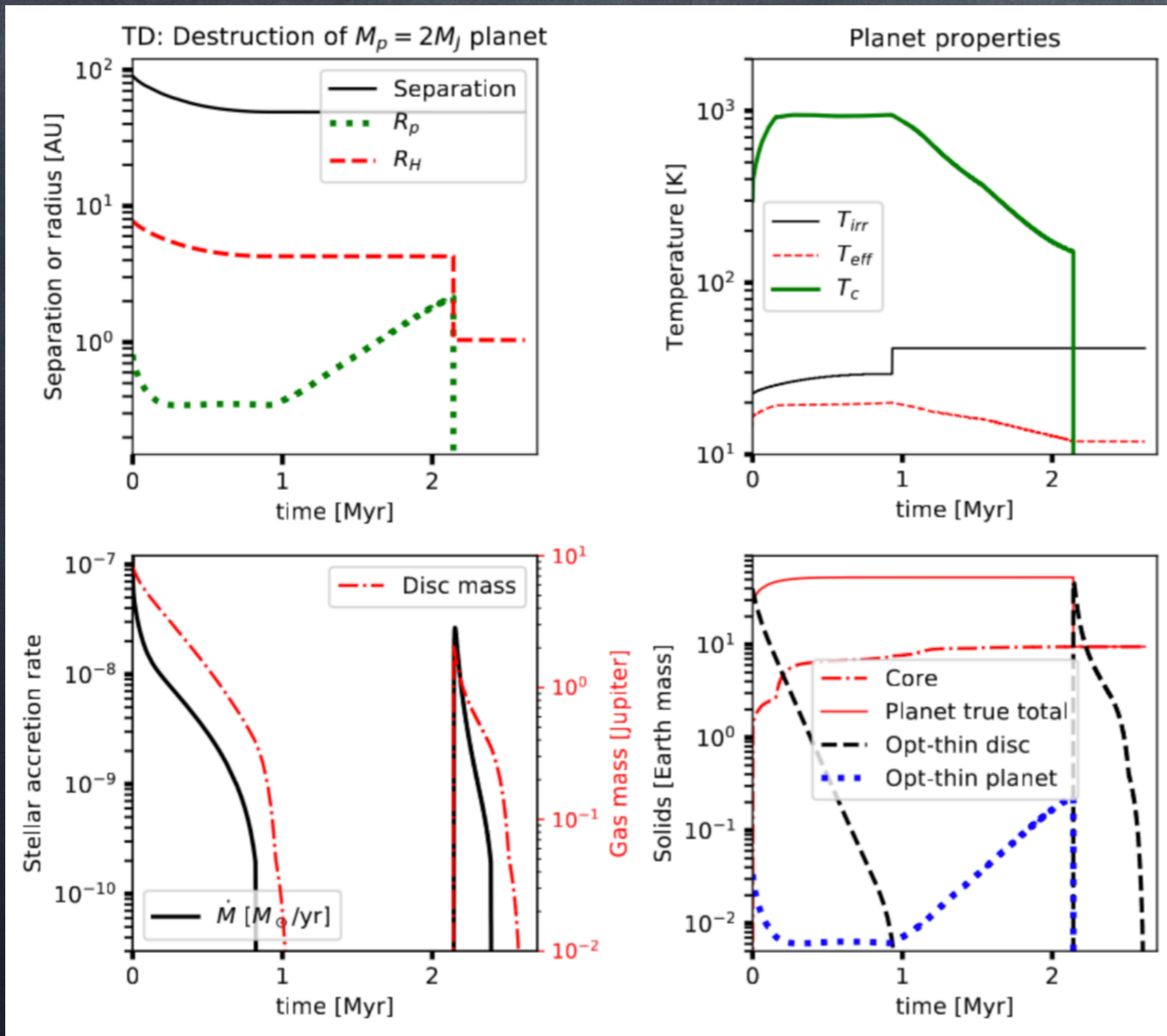
Первичные и вторичные диски



- Большинство систем старше 3М лет уже потеряли свои диски
- Разрушение протопланеты в такой системе ведет к образованию “вторичных дисков”
- Эти диски имеют совершенно более малую массу по сравнению с классическими дисками, и другую морфологию



Вторичные протопланетные диски (Nayakshin 2020)



- Первичный диск уходит к 1 М лет
- Протопланета с массой $2 M_J$ “застряла” на 80 AU
- Планета разбухает и сбрасывает газо-пылевую оболочку к 2.2 М лет
- Вторичный диск появляется и уходит за ~ 0.2 Myr

The first Directly Imaged ALMA planet ???

Tsukagoshi +19

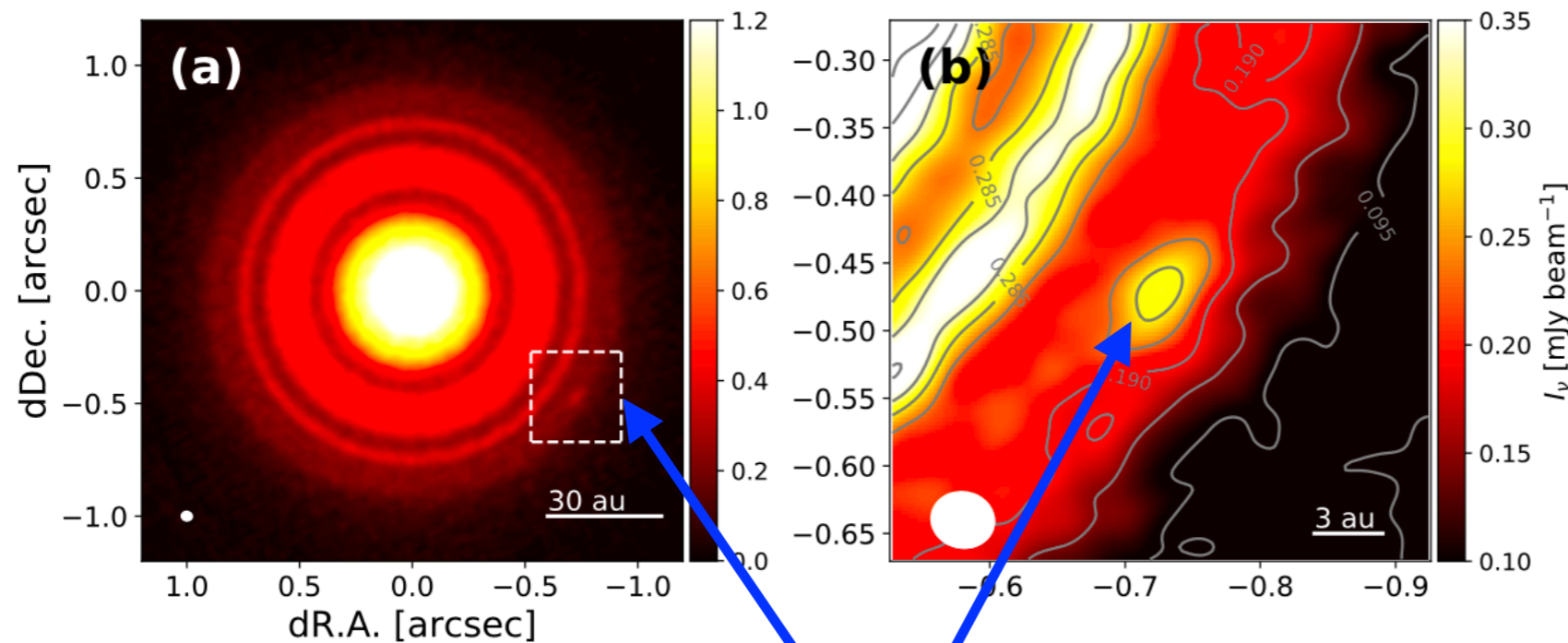
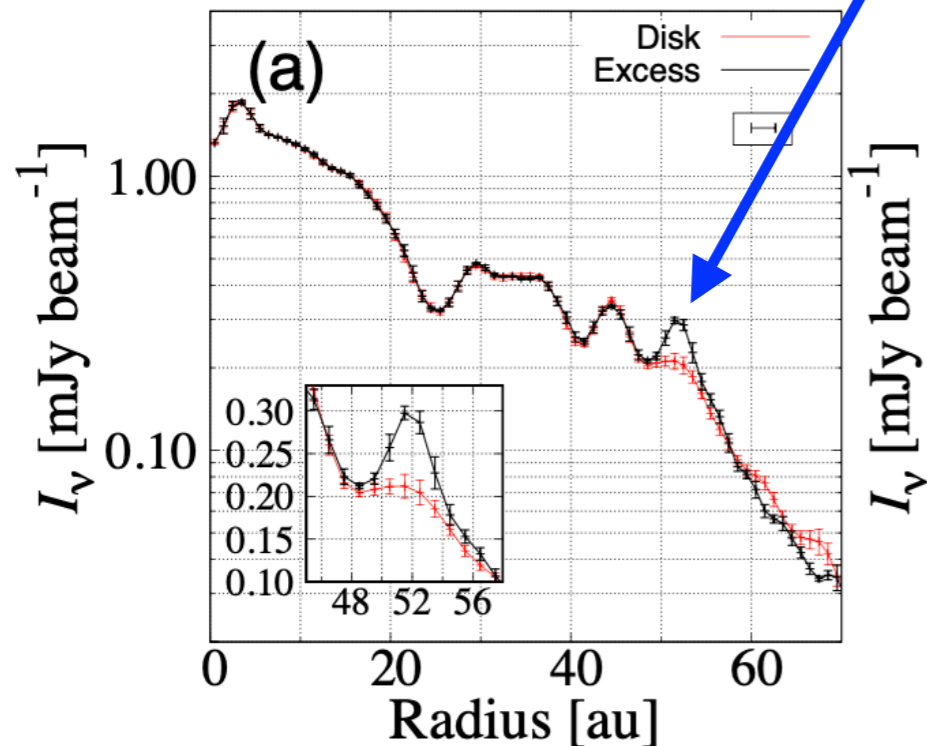


Figure 1. 233 GHz continuum maps. The white ellipse at the bottom left corner of each panel indicates the beamsize of the synthesised images. (a) Overall distribution of the 233 GHz continuum emission. (b) Close-up view of the $0''.4 \times 0''.4$ box including the emission feature (white box in the main panel). The signal-to-noise ratio is 5σ , where $1\sigma = 9.1 \mu\text{Jy beam}^{-1}$.

Planet (?)



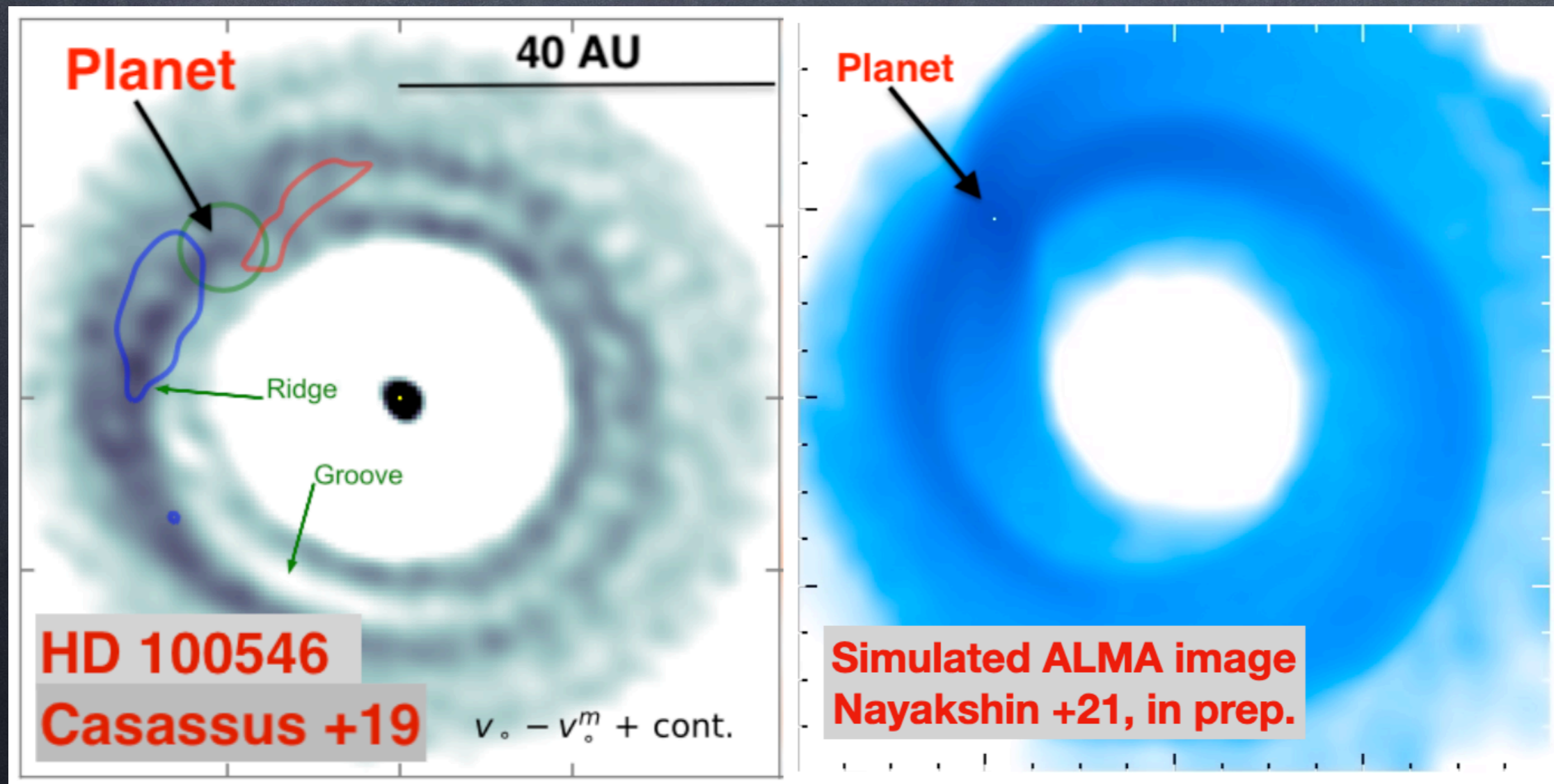
- 1.3 mm dust continuum (ALMA)
- 12 sigma excess at 51.5 AU
- Half widths of the excess ~ 0.5 AU radial, ~ 2 AU azimuthal
- Sits right on the edge of the disc, not in a gap

HD 100546, звезда типа Herbig Ae

$$t = (5 - 15) \text{ Myr}, M \approx 2M_{\odot}, L = 25L_{\odot}$$

$$\dot{M} = 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

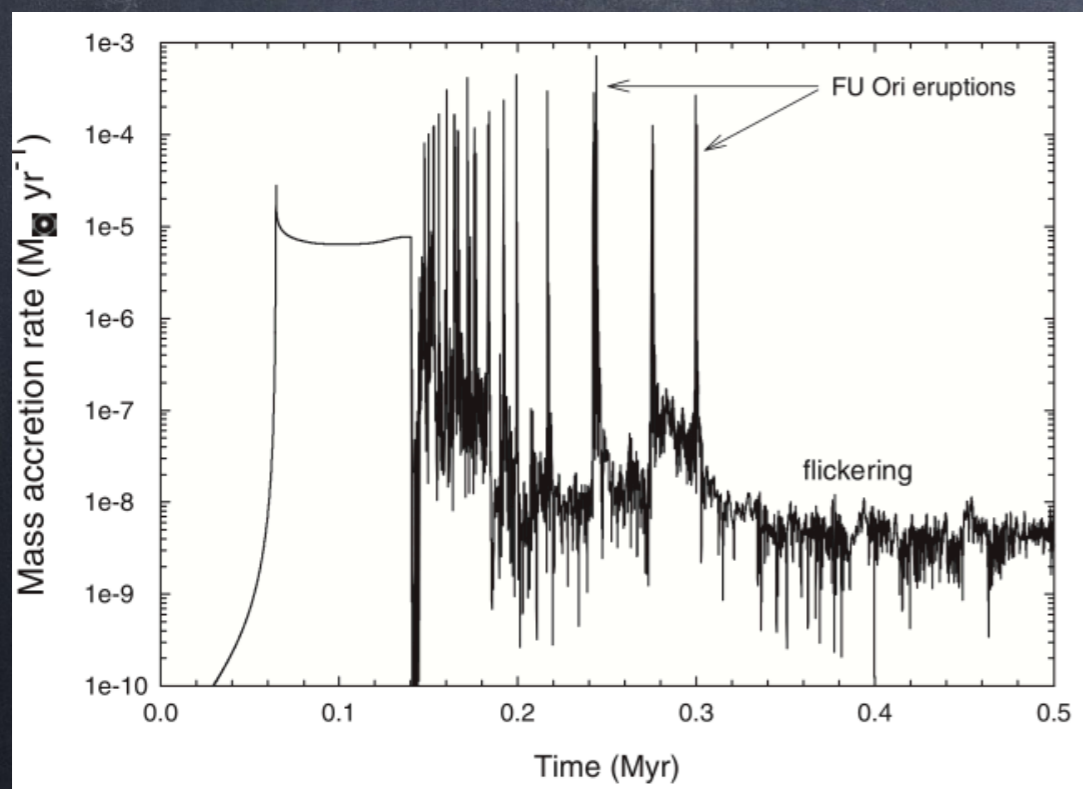
- Классическая теория: планеты открывают щели в дисках
- В этом источнике все наоборот: Планета сидит внутри кольца пыли и газа
- Разрушение планеты предсказывает именно это



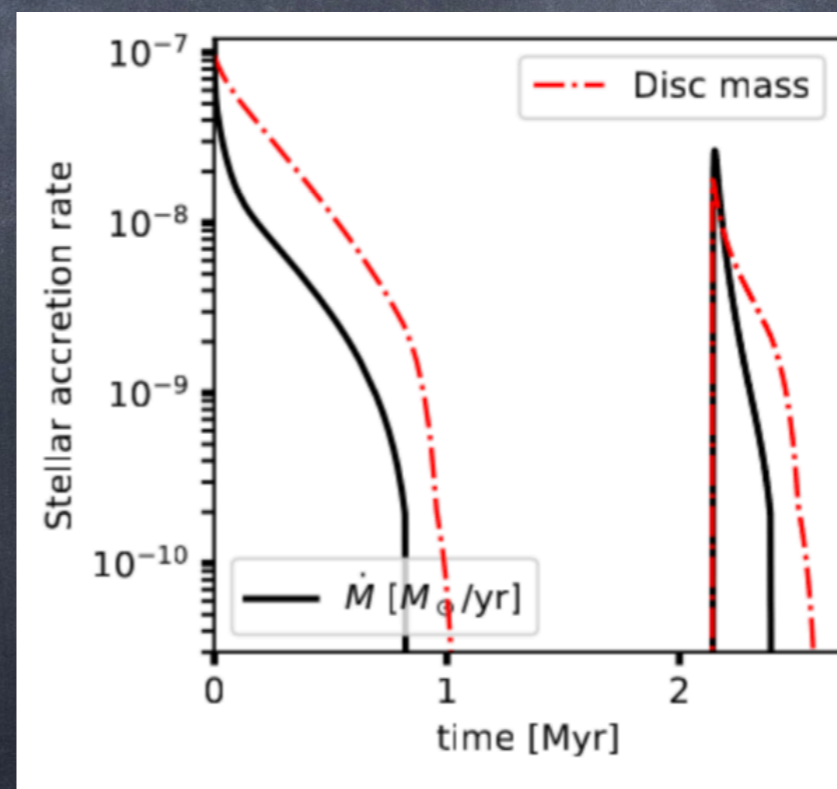
Заключения

- Разрушения планет можно наблюдать напрямую:
 - Либо очень близко к звезде (Фуоры)
 - Либо в старых системах без первичных дисков
- Наблюдения ALMA и др. требуют эпизодической аккреции, скорее всего из за разрушения планет, на всех временах и пространственных масштабах
- Можем ли мы отличить вторичные диски от первичных? (Химия/затмения...?)

Class 0/I



Class II/III



Пылевые щели в дисках: скорее всего планеты

Некоторые подтверждены в $H\alpha$ emission (e.g., in PDS 70; Keppler +19)

Perez+18

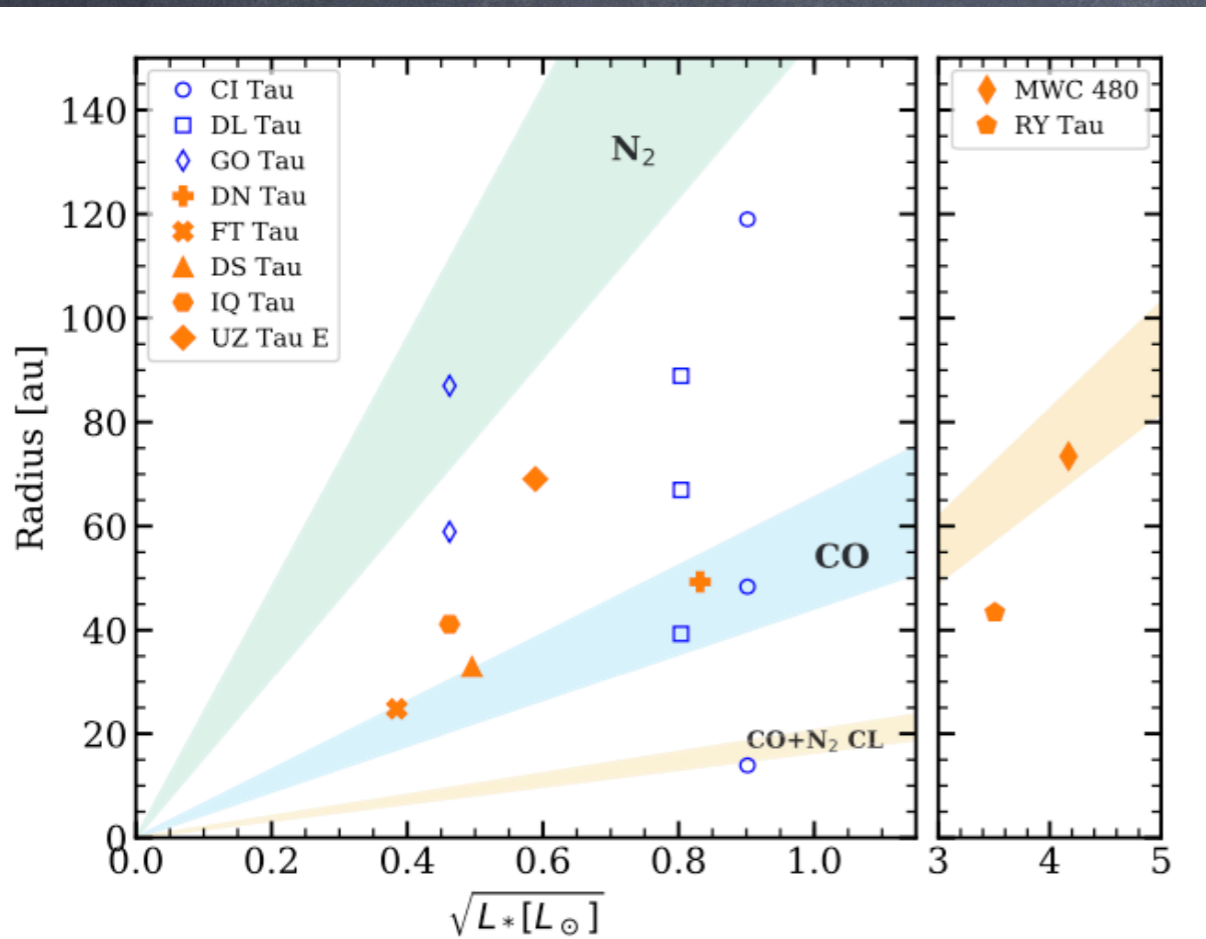
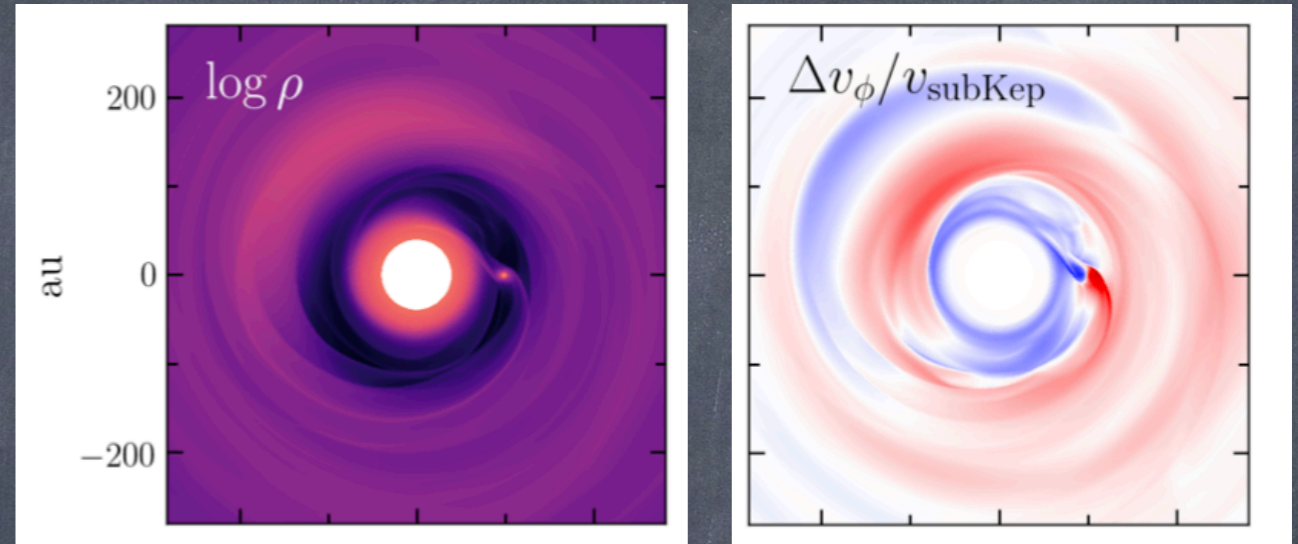


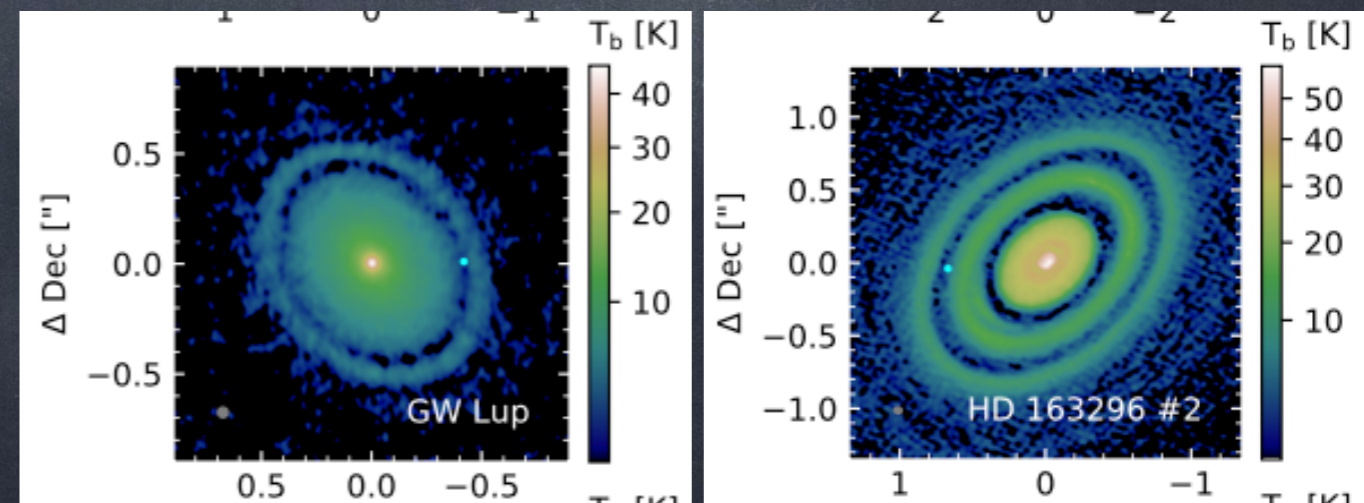
Figure 11. Disk radius vs. the square root of stellar luminosity. The color-shaded regions correspond to the range of ice line location for N_2 (cyan), CO (blue), and the clathrate-hydrated CO and N_2 (orange), with condensation temperatures described in the text and disk dust temperature approximated by Equation (6). Gap locations for each disk are plotted in different symbols, and five gaps are located near the CO ice line.

Long+18

Радиальная позиция щели не коррелирует с тем где ожидается конденсация основных молекулярных составляющих диска

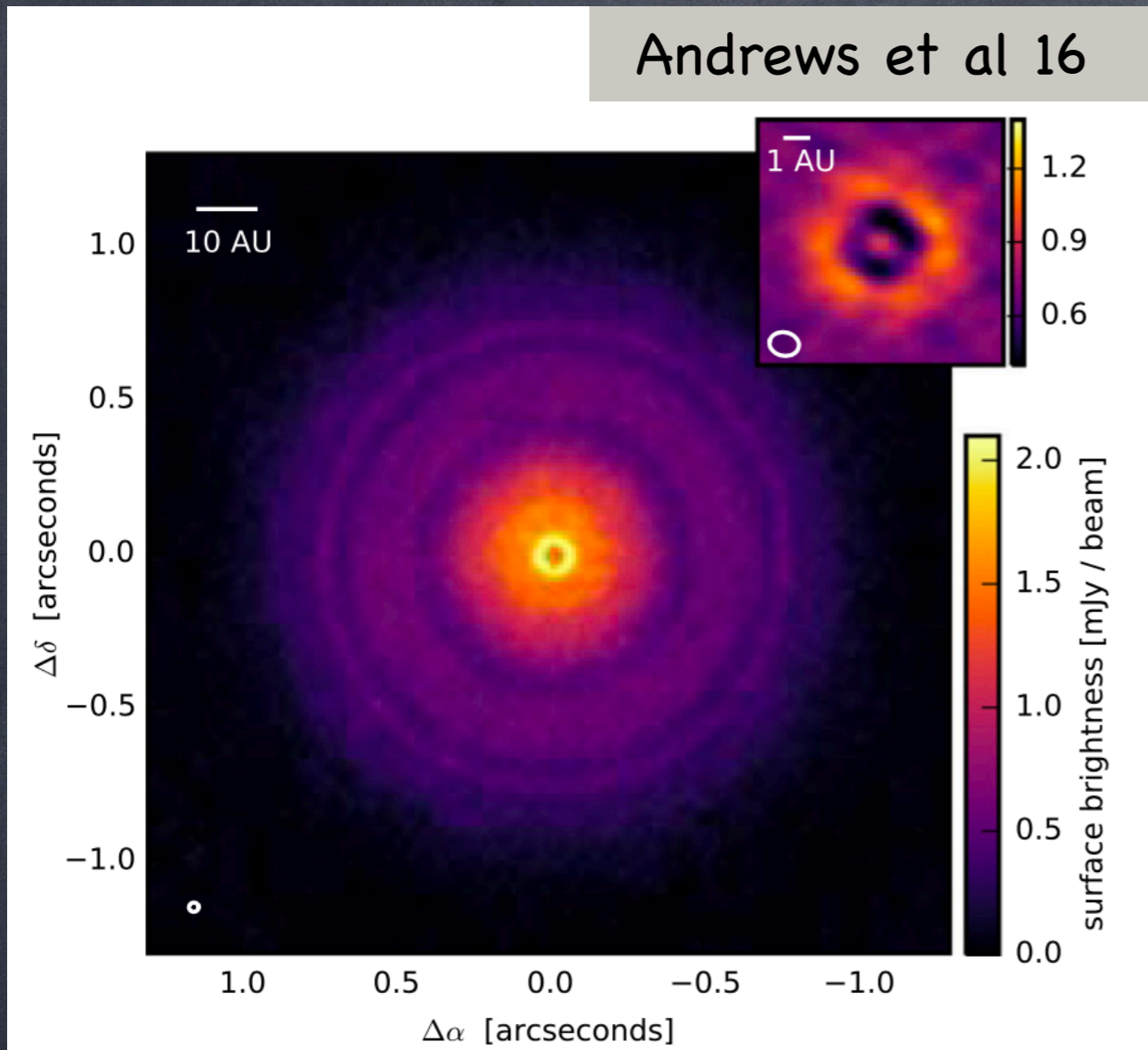


- Pinte+20. Все 8 DSHARP планет-кандидатов обнаруженных по локальным возмущениям в молекулярных линиях CO либо совпадают с щелями, или же лежат на спиралях



TW Hydra: the most well studied protoplanetary disc

Andrews et al 16



$$D \approx 60 \text{ pc}$$

Closest to Earth disc!

$$M_* \approx 0.8 M_{\odot}$$

- 3 suspected planets in gaps at 1, 24, and 41 AU
- 10 Myr old — yet accreting
- Dust disc ~ 100 times more massive than average for Class II

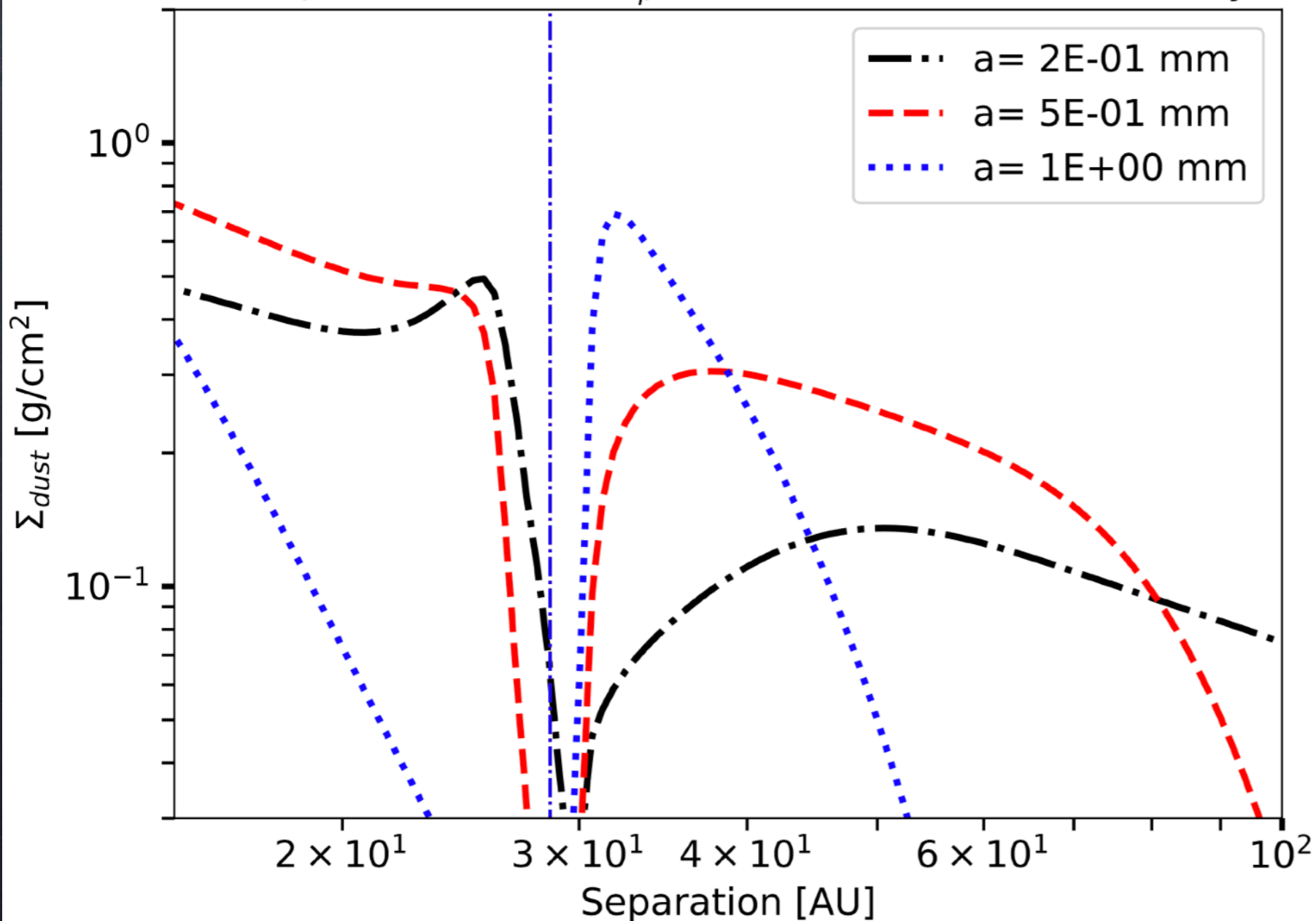
TW Hya is a contradiction to the physics of discs (?)

TW Hya: an old protoplanetary disc revived by its planet

MNRAS, 2020

Sergei Nayakshin^{1*}, Takashi Tsukagoshi², Cassandra Hall¹, Allona Vazan^{3,4}, Ravit Helled⁴, Jack Humphries¹, Farzana Meru^{5,6}, Patrick Neunteufel^{1,7} and Olja Panic⁸

SS, $M_d = 5E-02$ Sun, $M_p = 2E+01$ Earth, $t = 4.0E+05$ yr

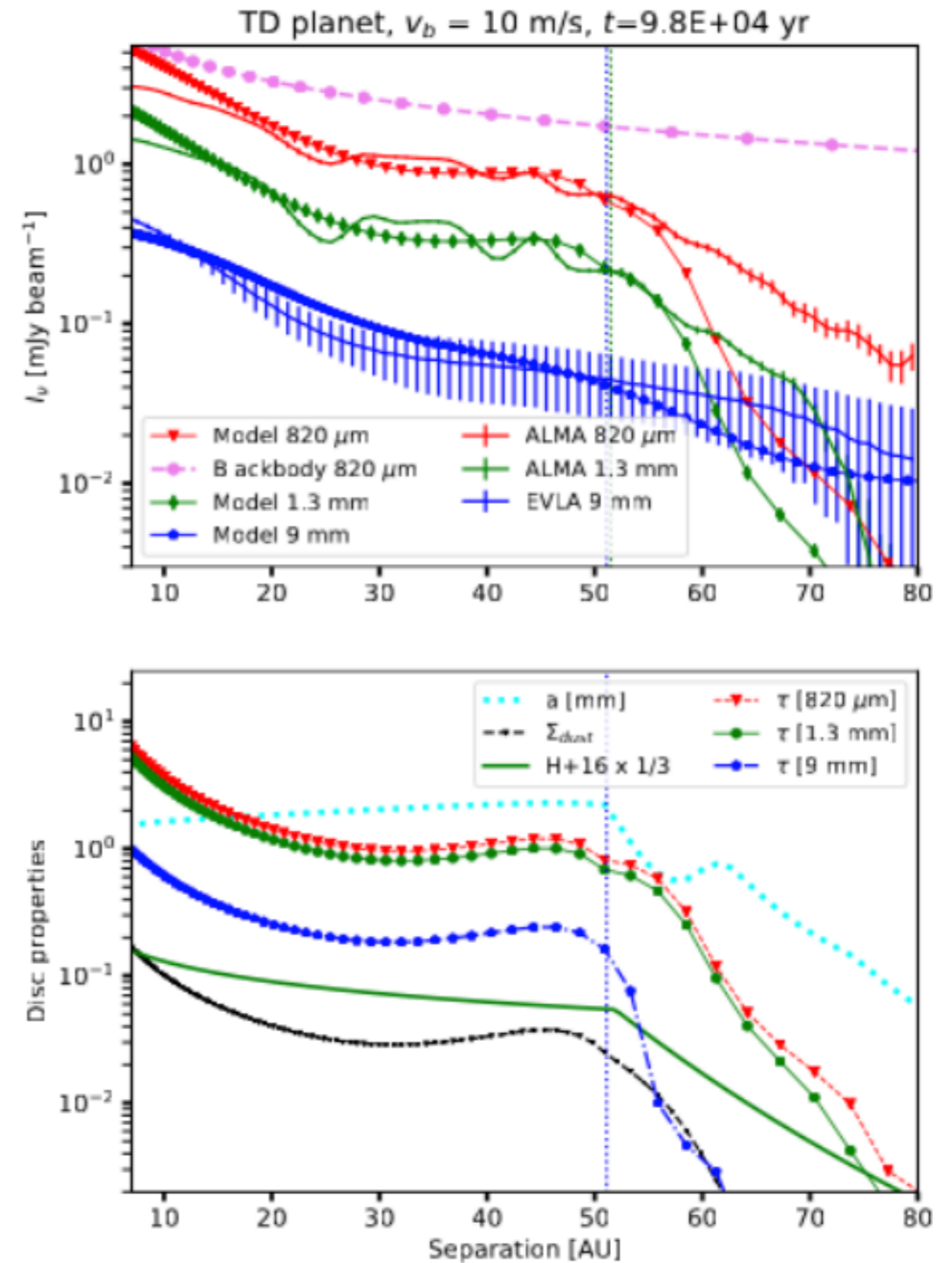
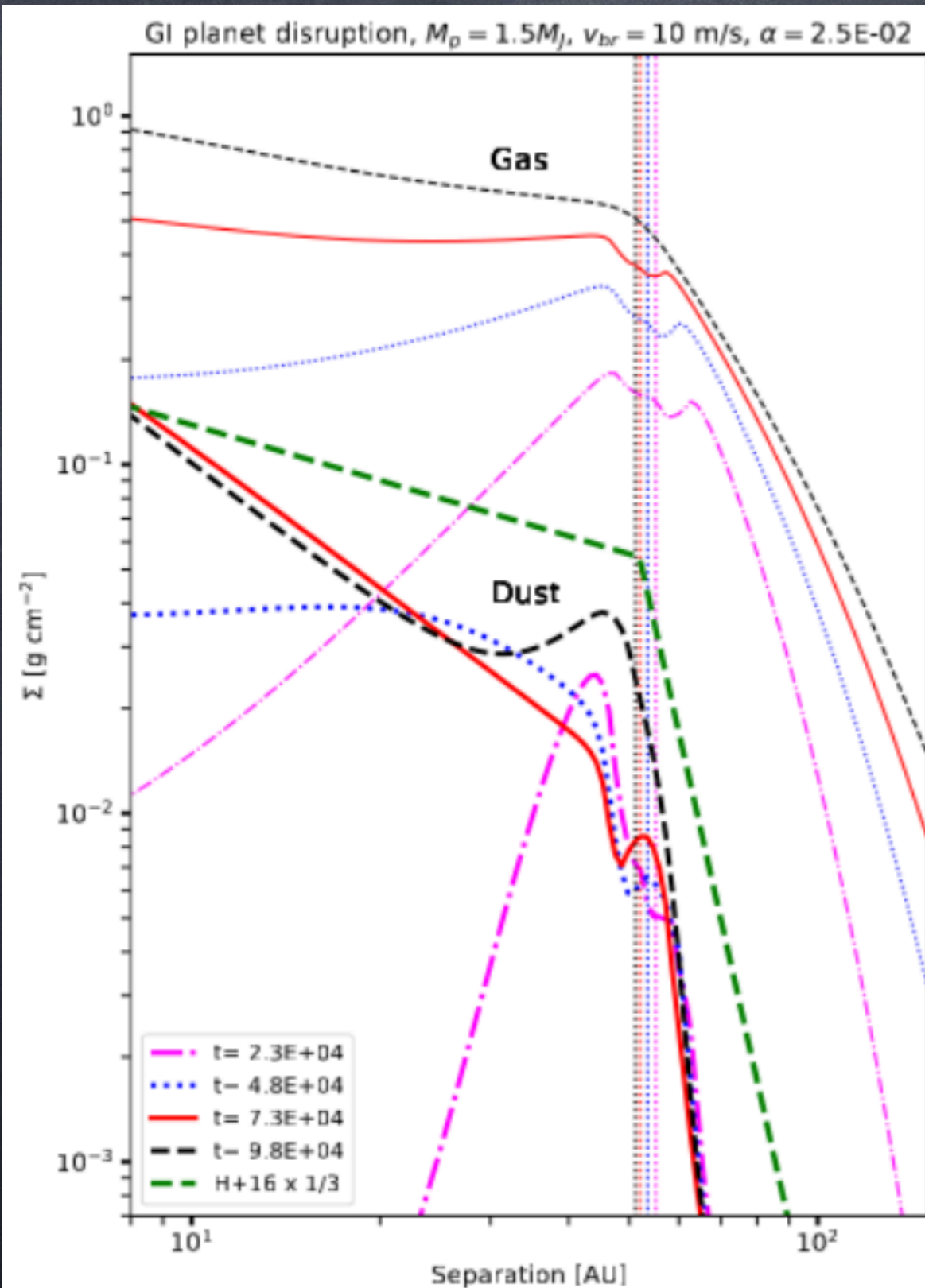


1D viscous disc
+ dust + planet

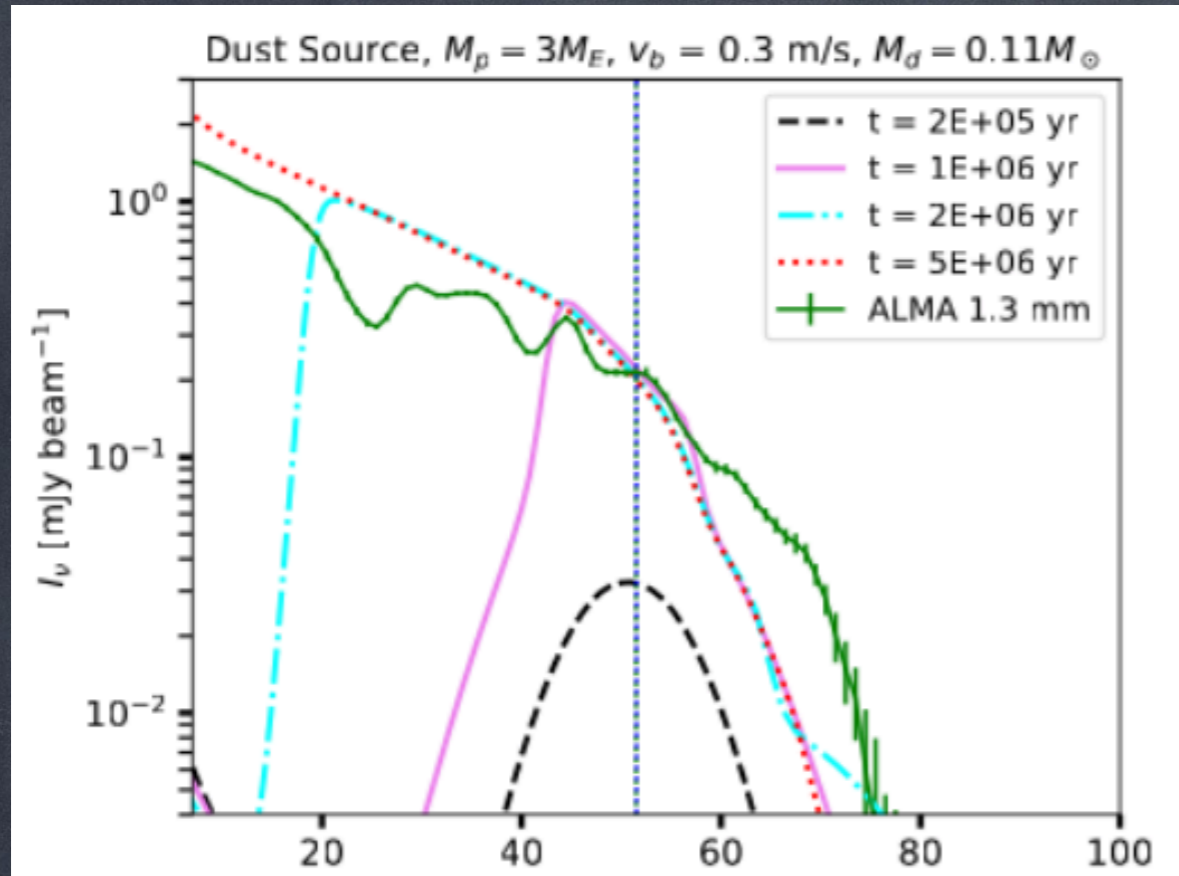
Paradoxes:

- The planet migrates too rapidly
- Opens a deep gap
- A bright rim is expected behind the planet
- Planet's image is too large for a CPD, too small for a vortex

A disrupted Gravitational Instability planet



A phenomenological Dust Source model



- Fits $\Sigma_{\text{dust}}(R)$ qualitatively
- Explains why the T+19 blob is at the edge of the disc
- Explains the size and orientation of the blob
-

