



# Остаточное магнитное поле аккреционных дисков молодых звезд

---

Сергей Хайбрахманов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Коуровская астрономическая обсерватория, УрФУ, Екатеринбург

<sup>2</sup>Кафедра общей и теоретической физики, ЧелГУ, Челябинск

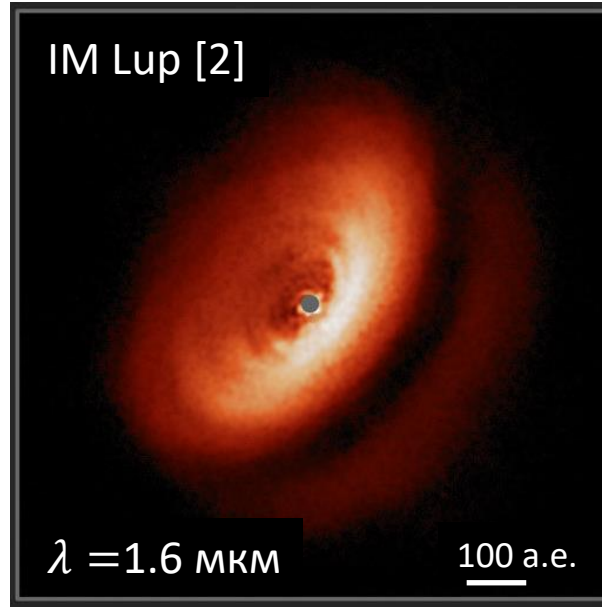
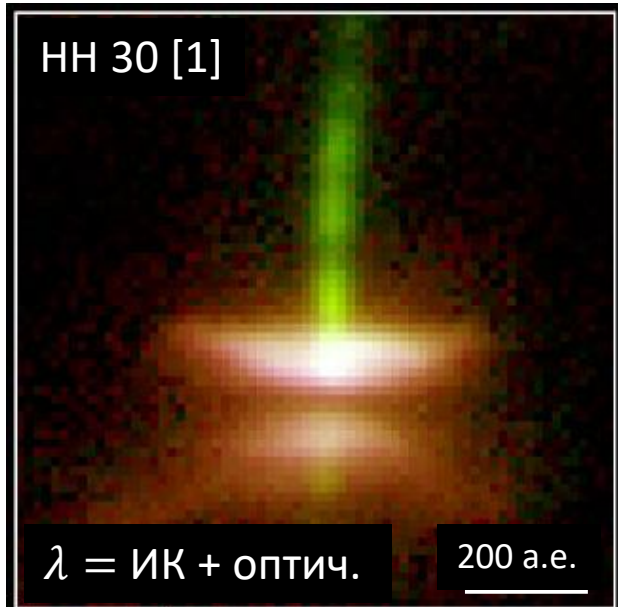
\* e-mail: [khaibrakhmanov@csu.ru](mailto:khaibrakhmanov@csu.ru)

# План доклада

---

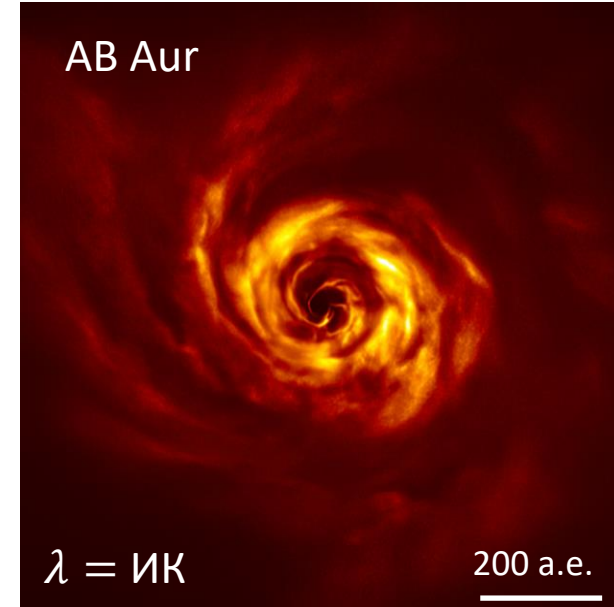
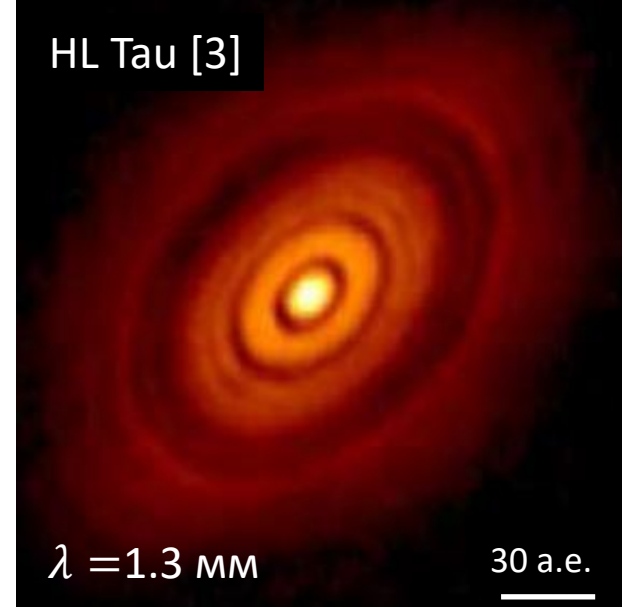
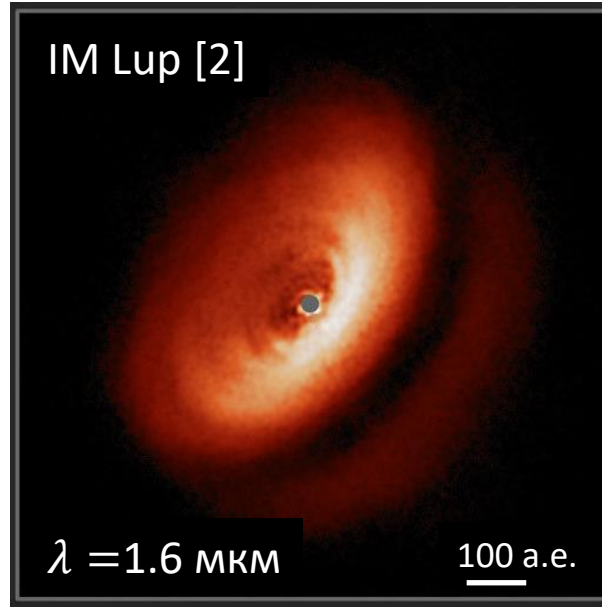
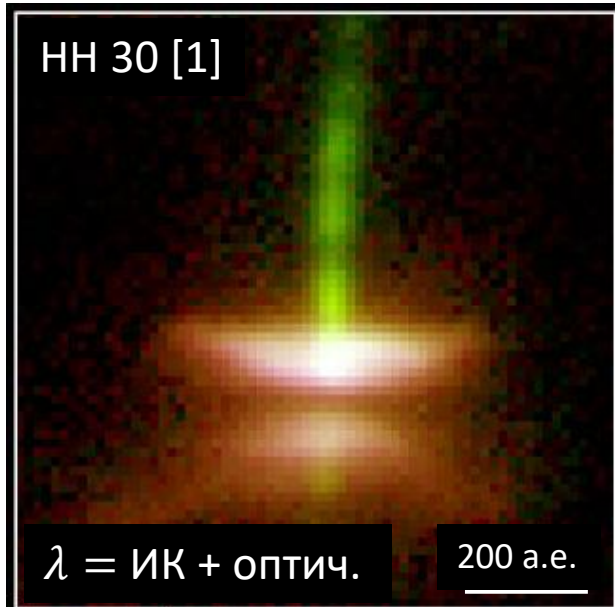
- 1) Аккреционные диски молодых звезд (АД МЗ)
- 2) МГД-модель АД МЗ
  - a. Основные приближения и уравнения
  - b. Радиальная структура диска
  - c. Вертикальная структура диска
  - d. Отклонение от кеплеровского вращения
- 3) Динамика магнитных силовых трубок в АД МЗ
- 4) Заключение

# Аккреционные диски молодых звезд



- Геометрически тонкие,  $H \ll R$ , оптически толстые
- Массы:  $0.001-0.1 M_{\odot}$
- Температуры: 10-1000 К

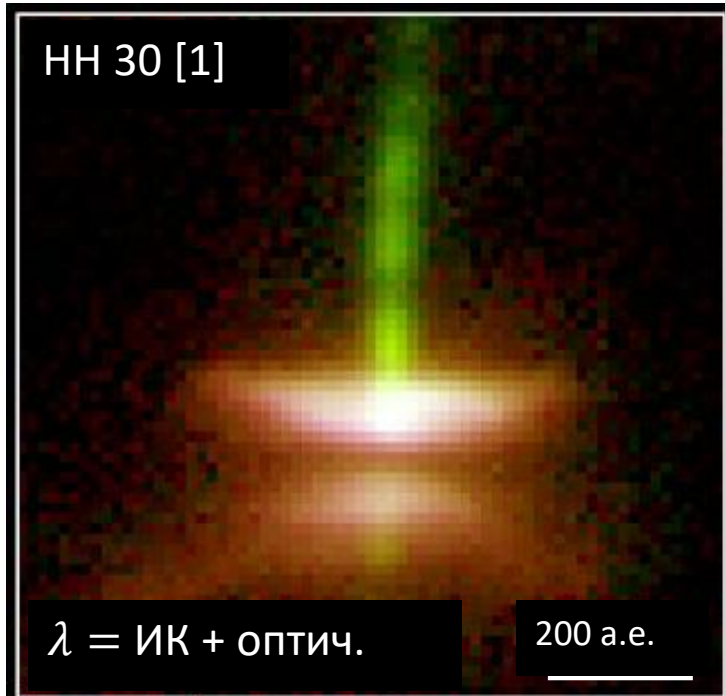
# Аккреционные диски молодых звезд



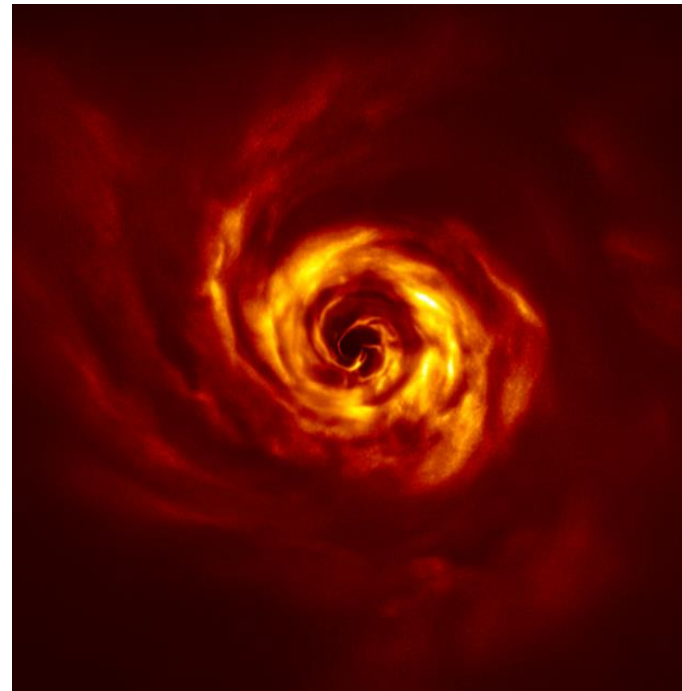
→ протопланетные диски

- Геометрически тонкие,  $H \ll R$ , оптически толстые
- Массы:  $0.001-0.1 M_{\odot}$
- Температуры: 10-1000 К

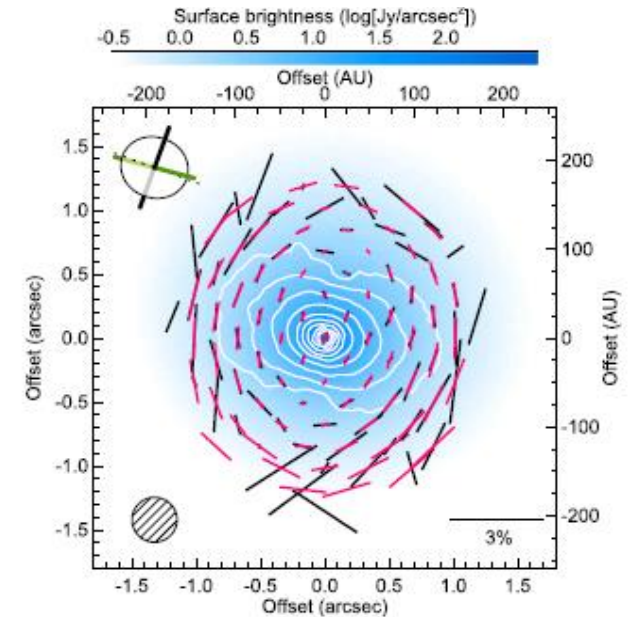
# Магнитное поле АД МЗ



**Истечения и джеты**  
→ косвенное указание



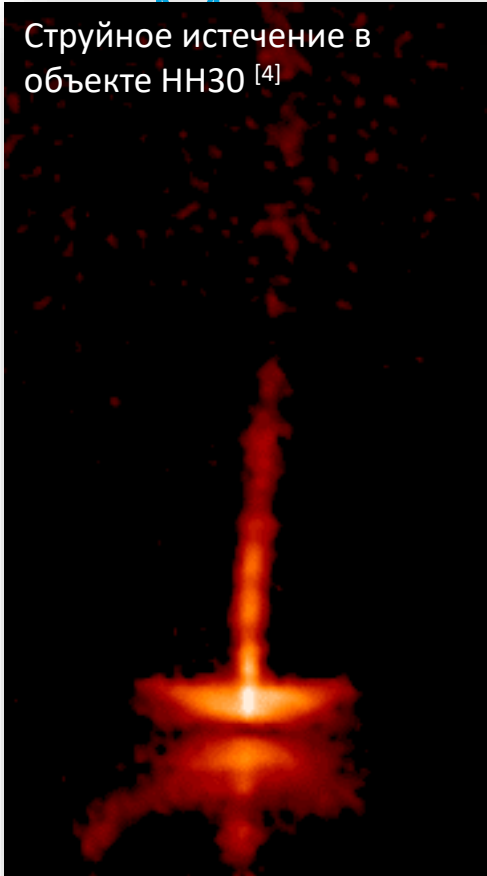
**Поляризационное картирование** → геометрия магнитного поля в АД МЗ



Li, et al, 2016, ApJ, 832, 18



Струйное истечение в объекте HH30 [4]



Отражательная туманность Бумеранг [5]



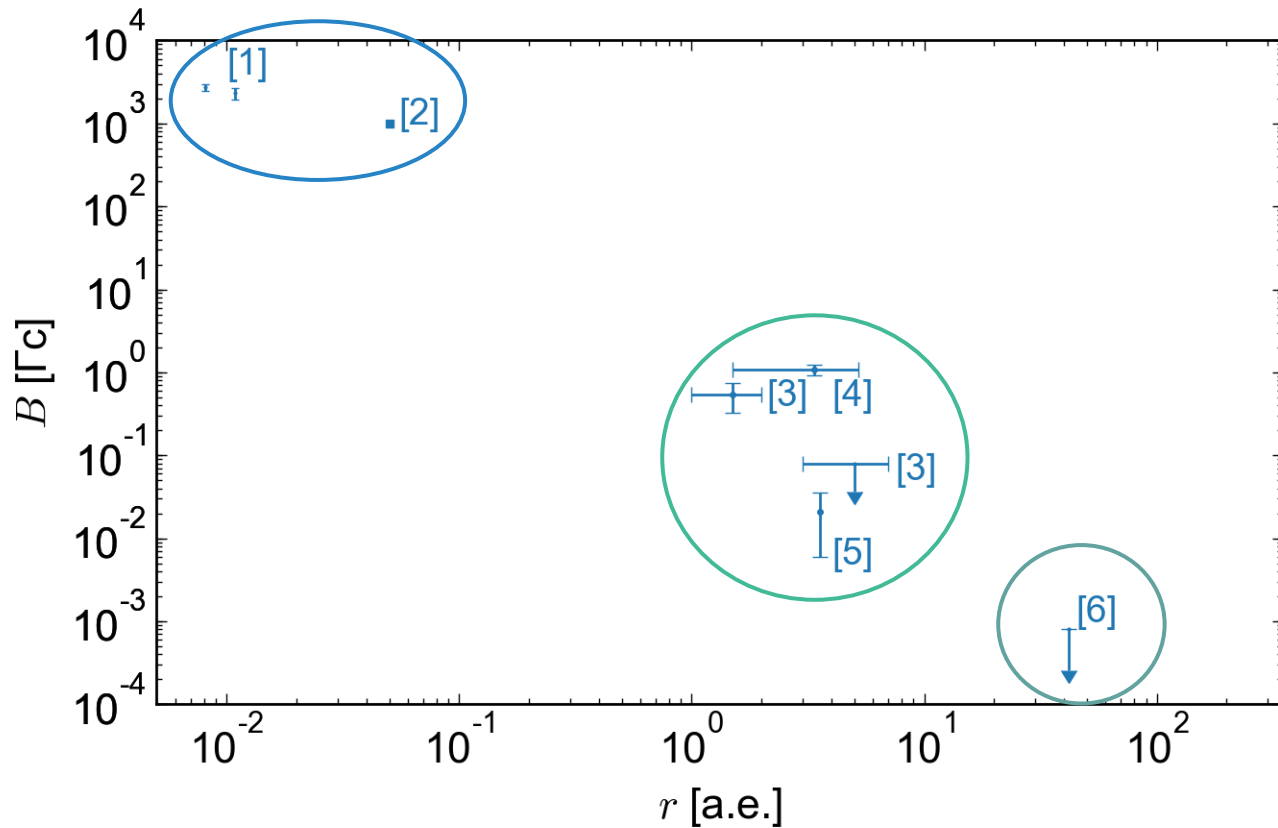
Область звездообразования NGC 1333 в Персее [6]



## Истечения и джеты

→ косвенное указание

# Магнитное поле АД МЗ



Зеемановское уширение (оптич. диап.)

[1] [Yang & Johns-Krull, 2011, ApJ, 729, 83](#)

[2] [Donati, et al., 2005, Nature, 438, 466](#)

Остаточная намагниченность метеоритов

[3] [Fu et al., 2020, JGRE, 125, e06260](#)

[4] [Butler, 1972, E&PSL, 17, 120](#)

[5] [Cournede et al., 2015, E&PSL, 410, 62](#)

Зеемановское расщепление линий  
CN (субмм)

[6] [Vlemmings et al., 2019, A&A, 24, L7](#)

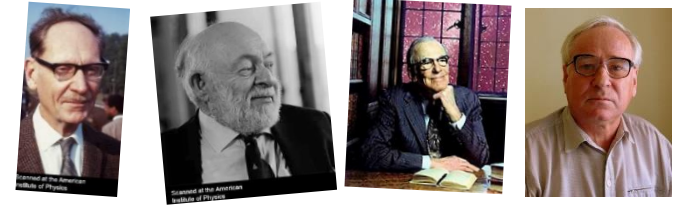
# Анализ наблюдательных данных

---

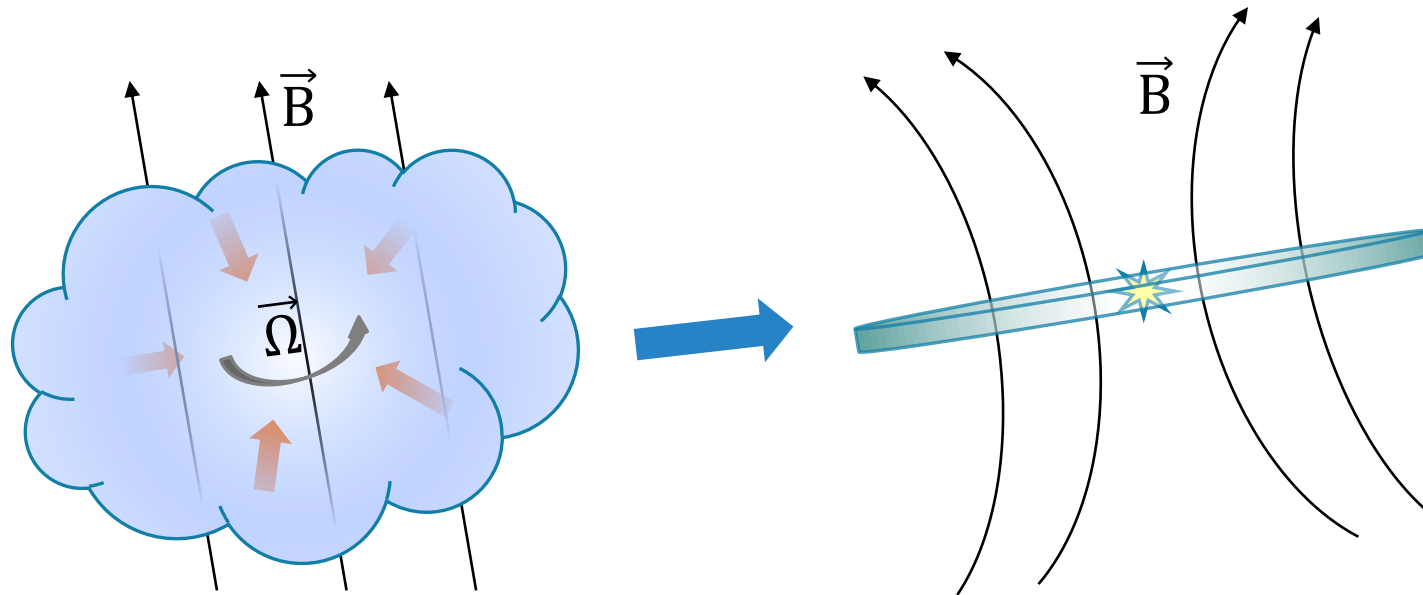
- АД МЗ в процессе своей эволюции становятся протопланетными дисками
- В АД МЗ присутствует крупномасштабное магнитное поле, интенсивность и геометрия которого до сих пор мало изучены



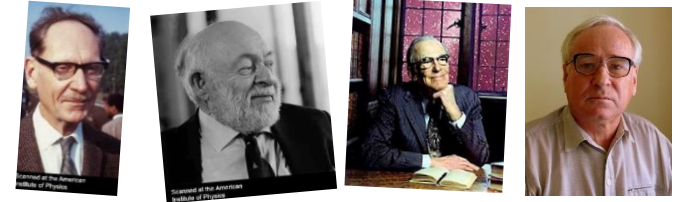
# Теория остаточного магнитного поля



Анализ наблюдений областей звездообразования и численные расчеты коллапса протозвездных облаков (ПЗО) показывают, что магнитный поток ПЗО частично сохраняется в процессе образования звезд (см. Дудоров, 1995, АЖ, 72, 884; [Dudorov & Khaibrakhmanov, 2015, AdSpRes, 55, 843](#))

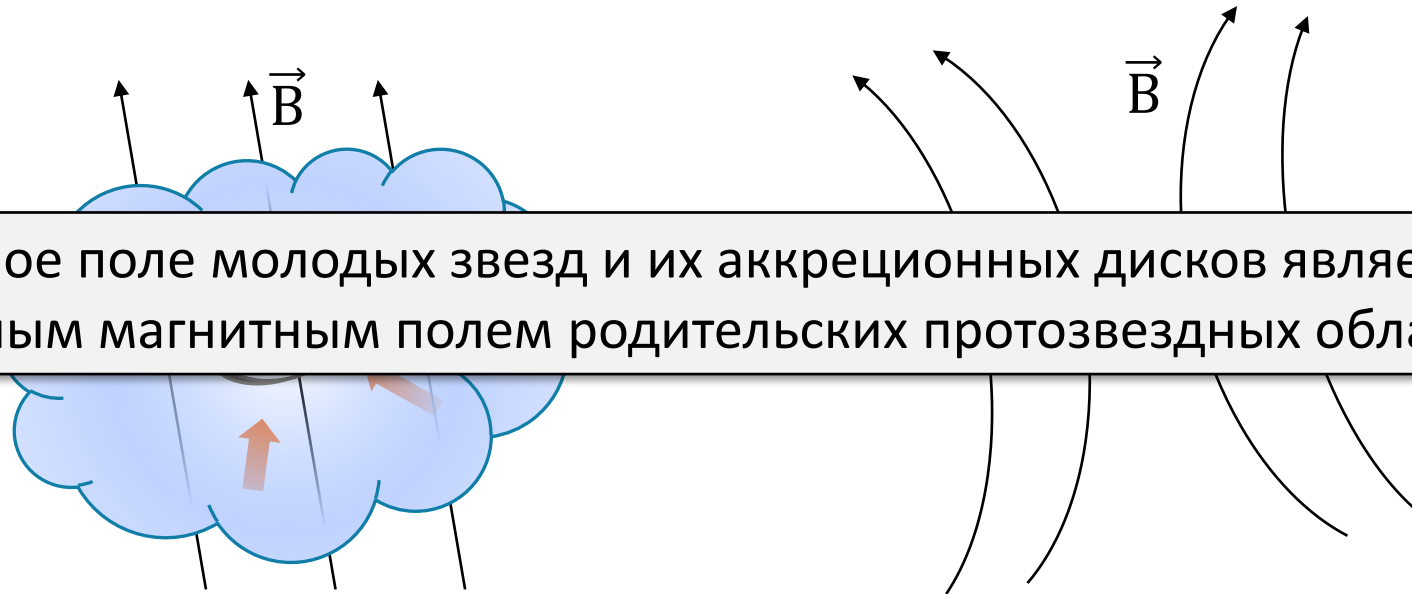


# Теория остаточного магнитного поля



Анализ наблюдений областей звездообразования и численные расчеты коллапса протозвездных облаков (ПЗО) показывают, что магнитный поток ПЗО частично сохраняется в процессе образования звезд (см. Дудоров, 1995, АЖ, 72, 884; Dudorov & Khaibrakhmanov, 2015, AdSpRes, 55, 843)

Магнитное поле молодых звезд и их аккреционных дисков является остаточным магнитным полем родительских протозвездных облаков



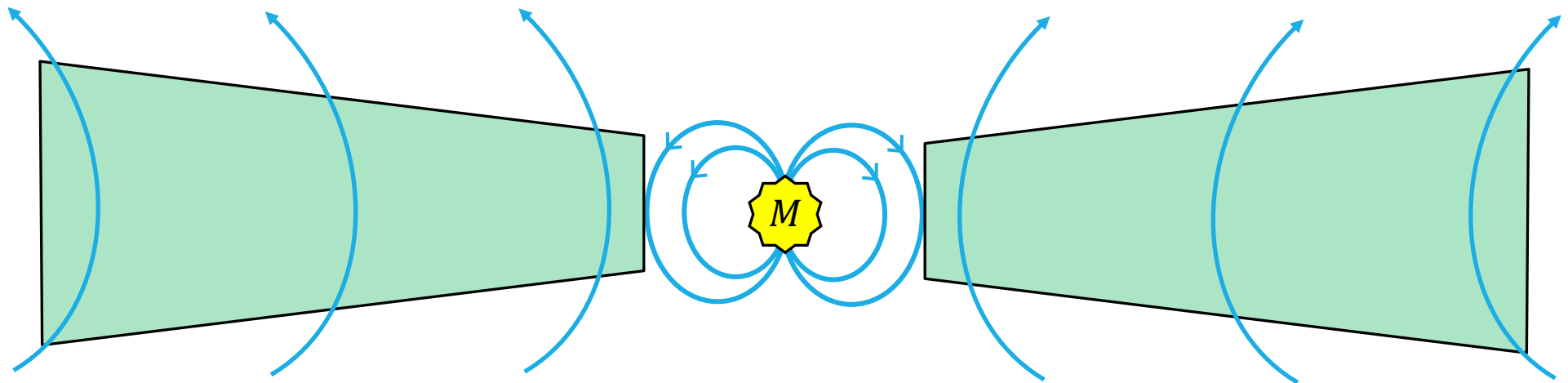
# МГД-модель аккреционных дисков

---

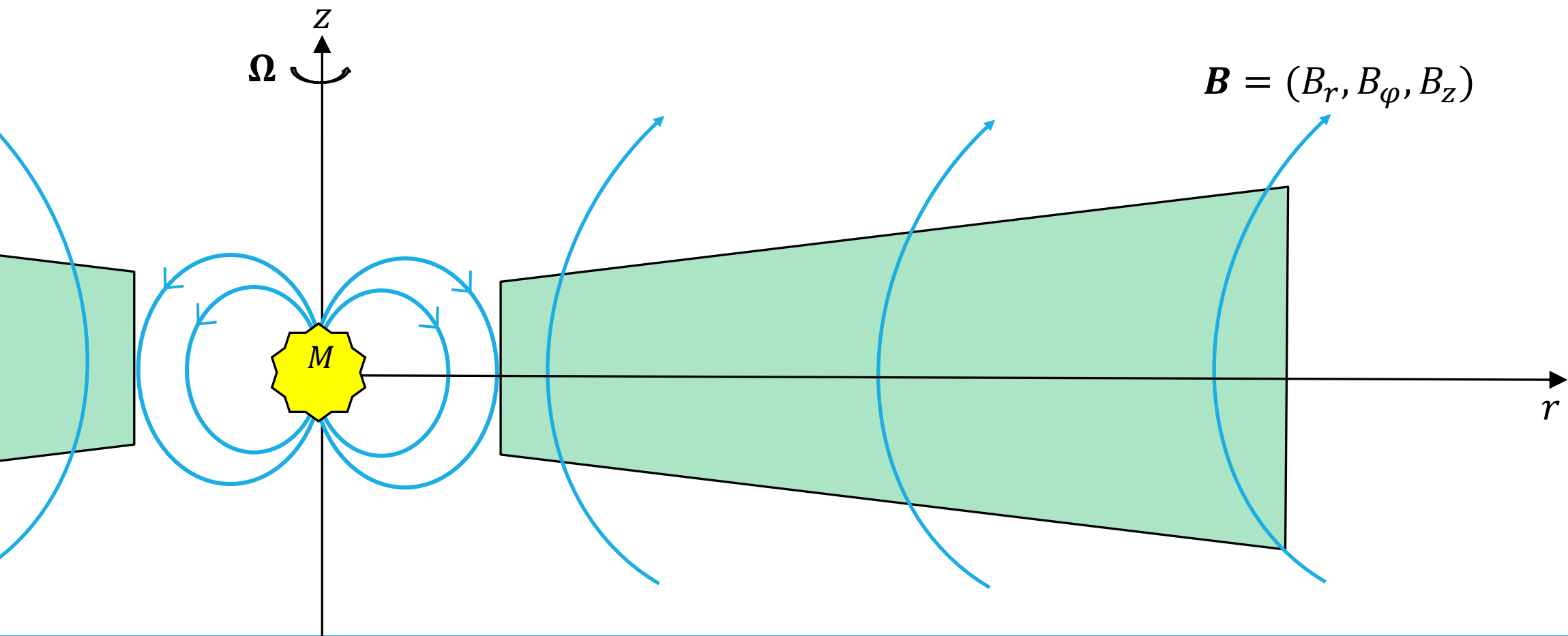
**Цель:** Исследование динамики АД МЗ с остаточным крупномасштабным магнитным полем.

**Задачи:**

- Разработка двумерной МГД-модели АД МЗ
- Определение интенсивности и геометрии магнитного поля АД МЗ
- Исследование условий образования планет
- Определение динамического влияния магнитного поля на структуру диска

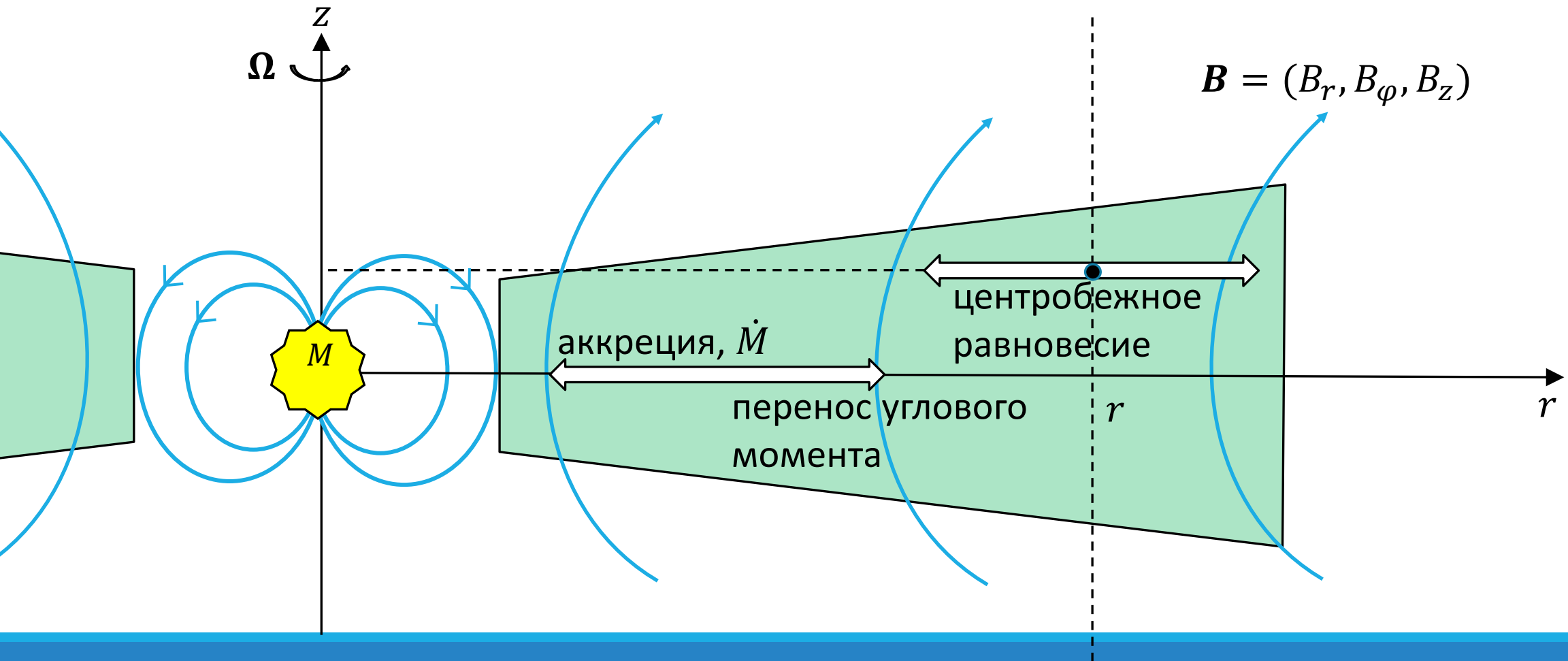


# Постановка задачи



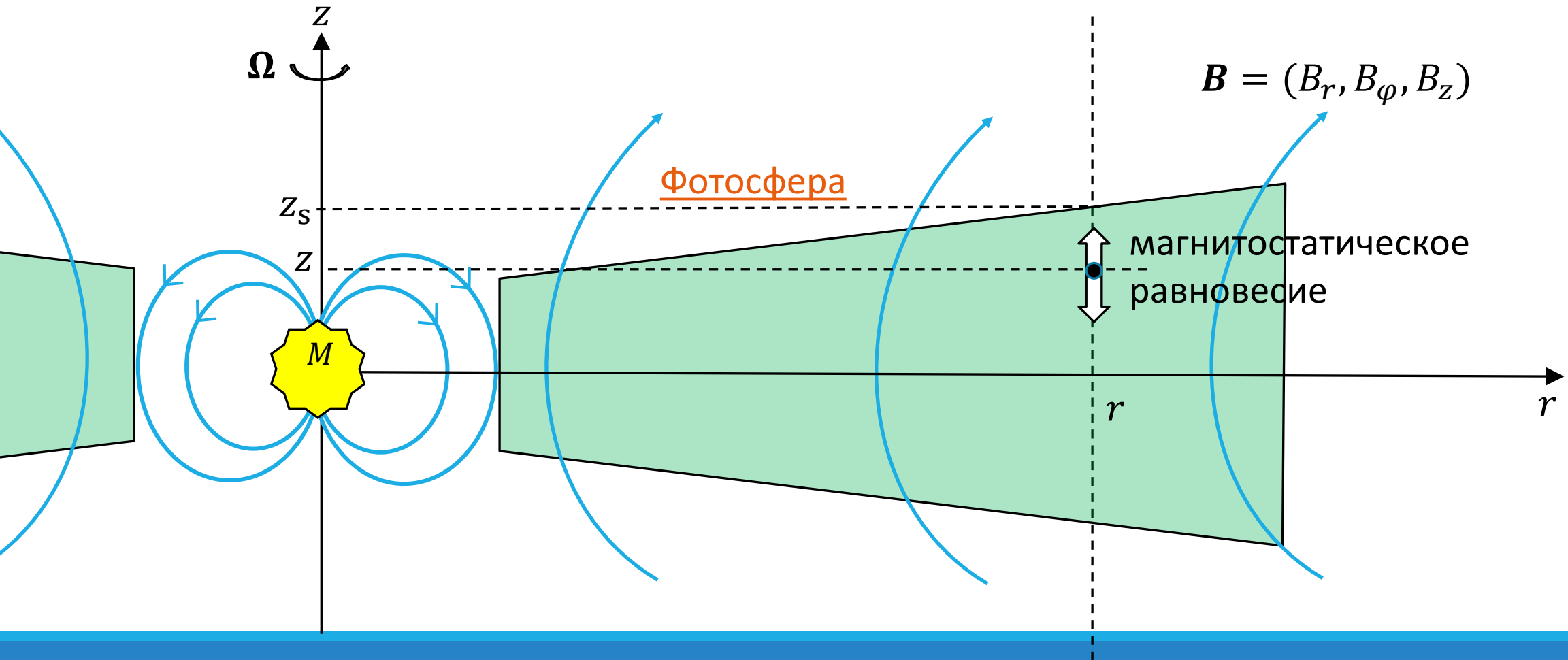
# Постановка задачи:

## а) радиальная структура диска

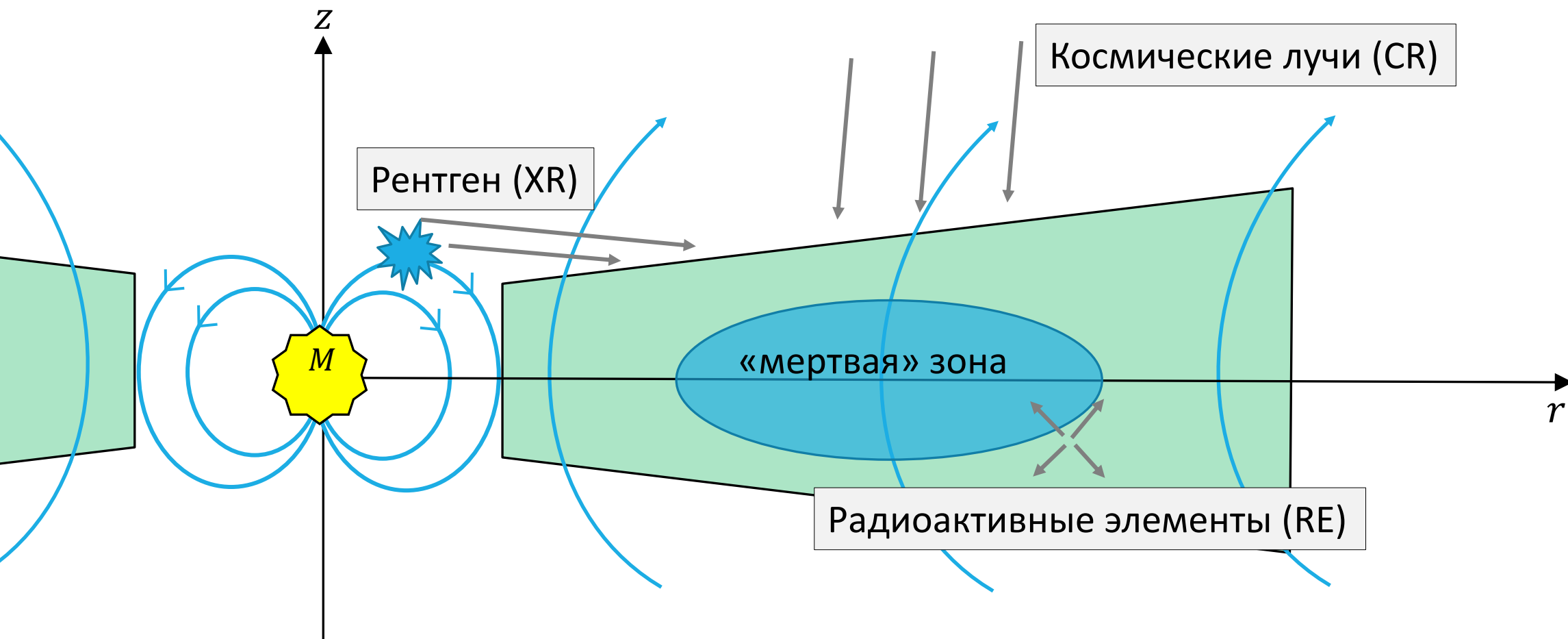




Постановка задачи:  
б) вертикальная структура диска



# Постановка задачи: в) источники ионизации



# Основные приближения и эффекты

---

- **Радиальная структура диска:** уравнения Шакуры и Сюняева (Шакура, 1972, АЖ, 49, 921; Shakura, Sunyaev, 1973, A&A, 24, 337)
- **Вертикальная структура:** магнитостатическое равновесие
- **Степень ионизации:** e-, m+, g, CR, XR, RE, тепловая ионизация
- **Магнитное поле:** уравнение индукции с учетом омической диффузии, магнитной амбиполярной диффузии, плавучести и эффекта Холла
- **Динамика:** нагрев диссипативными МГД-эффектами, изменение толщины диска, отклонение от кеплеровского вращения, ...

# Основные уравнения

Уравнения МГД с учетом гравитации, вязкости ( $\rightarrow$  турбулентности), магнитного поля, лучистой теплопроводности, диффузии магнитного поля

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1) \\ \rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla \left( p + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \rho \vec{g} + \operatorname{div} \sigma' + \frac{1}{4\pi} (\vec{B} \nabla) \vec{B} \quad (2) \\ \rho T \left( \frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) s \right) = \sigma_{ik}' \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \operatorname{div} \vec{F} \quad (3) \\ \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \operatorname{rot}[\vec{v}, \vec{B}] + \eta \nabla^2 \vec{B} \quad (4) \end{array} \right.$$

где  $\sigma_{ik}$  - тензор вязких напряжений,  $\vec{F}$  - поток лучистой энергии,  $\eta$  - коэффициент диффузии магнитного поля. Будем использовать уравнение состояния идеального газа.

# Уравнения радиальной структуры

$$\begin{array}{l}
 (1) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{M} = -2\pi r v_r \Sigma \\ \dot{M} \Omega_k f = 2\pi \alpha c_T^2 \Sigma \end{array} \right. \\
 (2) \left\{ \begin{array}{l} v_\phi = \sqrt{\frac{GM}{r} \left(1 + \frac{z^2}{r^2}\right)^{-3/2} - \frac{r B_z B_r}{4\pi \rho H}} \\ H = \frac{c_T}{\Omega_k} \end{array} \right. \\
 (3) \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{sb} T_{eff}^4 = \frac{3}{8\pi} \dot{M} \Omega_k^2 f + \Gamma_{MGD} \\ T^4 = \frac{3}{8} \kappa_R \Sigma T_{eff}^4 \end{array} \right.
 \end{array}
 \quad (4) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} B_r = -\frac{v_r H}{\eta} B_z \\ B_\phi = -\frac{3}{2} \left(\frac{H}{r}\right)^2 \frac{v_\phi H}{\eta} B_z - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{r}\right) \frac{v_\phi H}{\eta} B_r \\ B_r = \begin{cases} B_{z0} \frac{\Sigma}{\Sigma_0}, & R_m \gg 1 \\ \sqrt{4\pi \chi \rho^2 r |v_r|}, & R_m < 1 \end{cases} \end{array} \right.$$

1. [Дудоров, Хайбрахманов, 2013, Вестник ЧелГУ, 9\(300\), 27](#)
2. [Dudorov, Khaibrakhmanov, 2014, Ap&SS, 352, 103](#)
3. [Khaibrakhmanov et al., 2017, MNRAS, 464, 586](#)
4. [Khaibrakhmanov, Dudorov, 2019, MGD, 55, 65](#)

## Уравнения вертикальной структуры

$$\begin{array}{l}
 (2) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dz} = -\rho \frac{GM}{r^3} z - \frac{d}{dz} \left( \frac{B_\varphi^2}{8\pi} \right) \\ \frac{16\sigma T^3}{3\kappa_R \rho} \frac{dT}{dz} = -F_z \\ \frac{dF_z}{dz} = \frac{3}{2} \alpha p \Omega_k \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{уравнение магнитостатического равновесия} \\ \text{поток лучистой энергии} \\ \text{уравнение теплового баланса} \end{array} \\
 (3) \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right. \\
 (4) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 B_\varphi}{dz^2} = -\frac{3 B_z}{2 \eta} v_k \frac{z}{r^2} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{уравнение баланса диффузии и адвекции} \\ \text{магнитного поля} \end{array}
 \end{array}$$

Неизвестные:

$p, T, F_z, B_\varphi$

Коэффициенты уравнений:

$\kappa_R(\rho, T), v_k = r\Omega_k, B_z, T_{eff}$

Хайбрахманов, Дудоров, ЧФМЖ, 2021, 6, 52



# Метод решения уравнений модели

---

## РАДИАЛЬНАЯ СТРУКТУРА

- В частном случае  $x \propto n^{-q}$ : аналитическое решение
- В общем случае: система нелинейных алгебраических уравнений
- Метод простых итераций совместно с методом бисекции. Начальное приближение – кинематическая модель

## ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА

- Система ОДУ первого порядка
- Метод Рунге-Кутты 4-го порядка точности с автоматическим выбором шага
- Координата фотосферы  $z_s$  находится методом стрельбы.

Численная модель реализована в программном комплексе Бельмондо на языке программирования C++



# Параметры модели

параметр (1)	диапазон значений (2)	принятые значения (3)	стандартное значение (4)
$\dot{M}$	$(0.1 - 10) \times 10^{-8} \frac{M_{\odot}}{\text{год}}$	$\propto M^2$	$10^{-8} \frac{M_{\odot}}{\text{год}}$
$\alpha$	0.001-0.1	0.01	0.01
$M$	$(0.5 - 4) M_{\odot}$	$(0.5 - 2) M_{\odot}$	$1 M_{\odot}$
$R_S$	$(1.5 - 4) R_{\odot}$	$2 R_{\odot}$	$2 R_{\odot}$
$B_S$	$(1 - 3.5) \text{ кГц}$	$2 \text{ кГц}$	$2 \text{ кГц}$
$L_{\star}$	$(0.1 - 100) L_{\odot}$	$(0.5 - 10) L_{\odot}$	$1 L_{\odot}$
$Y_d$	0.01	0.01	0.01
$a_d$	$\leq 1 \text{ мм}$	$0.01 \text{ мкм} - 1 \text{ мм}$	$0.1 \text{ мкм}$
$\xi_0$	$(10^{-17} - 10^{-16}) \text{ с}^{-1}$	$0, (10^{-17} - 10^{-16}) \text{ с}^{-1}$	$10^{-17} \text{ с}^{-1}$
$L_{\text{XR}}$	$(10^{29} - 10^{32}) \text{ эрг с}^{-1}$	$(10^{29} - 10^{32}) \text{ эрг с}^{-1}$	$10^{30} \text{ эрг с}^{-1}$

**Коэффициент поглощения  $\kappa_R(\rho, T)$**  – интерполяция таблиц Семенова и др. (2003, A&A, 410, 611) и OPAL (Iglesias, Rogers, 1996, ApJ, 464, 943)

# Аналитическое решение

---

# Аналитическое решение

---

- В случае степенной зависимости  $x \propto n^{-q}$  уравнения модели имеют аналитическое решение  $\rightarrow$  степенные решения для радиальных профилей  $\Sigma, T, v_r, v_\varphi, H, n, B, \dots$

- В частности, в области замороженного магнитного поля (для  $\kappa_R = 3 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{Г}$ )

$$B_z = 0.29 \left( \frac{\alpha}{0.01} \right)^{-3/4} \left( \frac{\dot{M}}{10^{-8} M_\odot/\text{год}} \right)^{1/2} \left( \frac{M}{1M_\odot} \right)^{1/8} \left( \frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-3/8} \text{ Гс}$$

- В области эффективной магнитной амбиполярной диффузии

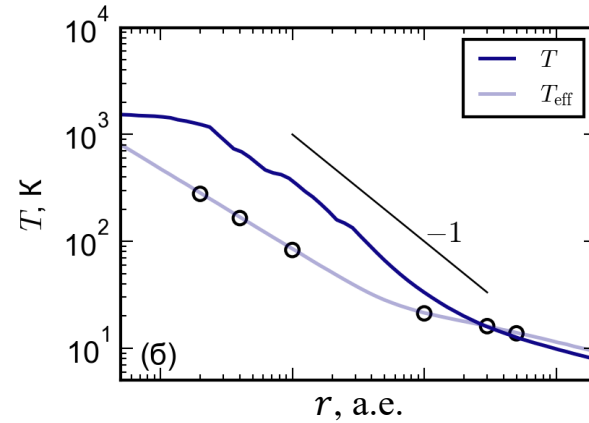
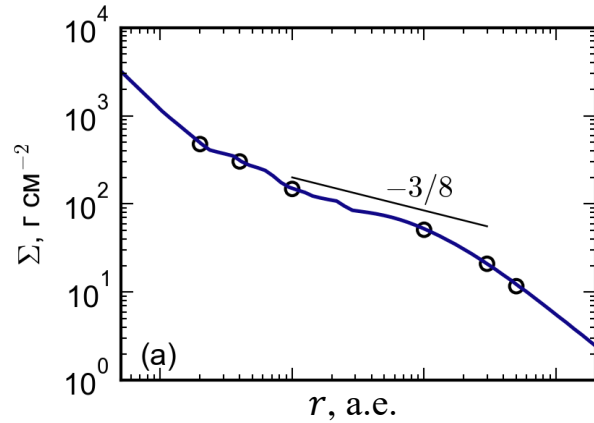
$$B_z = 0.11 \left( \frac{\xi}{10^{-17} \text{ с}^{-1}} \cdot \frac{a_d}{0.1 \text{ мкм}} \right)^{1/2} \left( \frac{\alpha}{0.01} \right)^{1/16} \left( \frac{\dot{M}}{10^{-8} M_\odot/\text{год}} \right)^{3/8} \left( \frac{M}{1M_\odot} \right)^{5/32} \left( \frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-15/32} \text{ Гс}$$

# Радиальная структура диска

---

# Радиальная структура диска

## Стандартные параметры

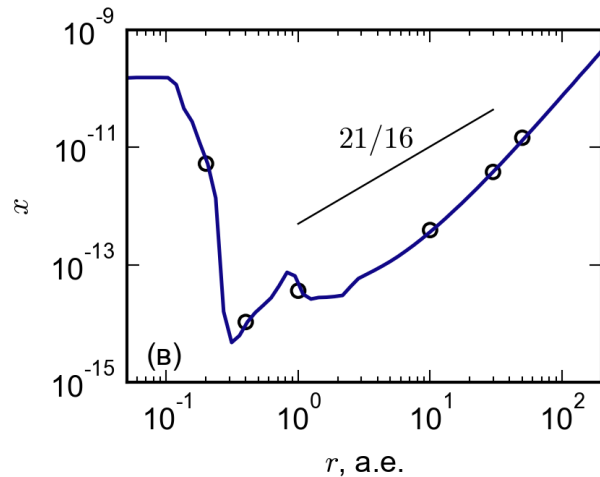
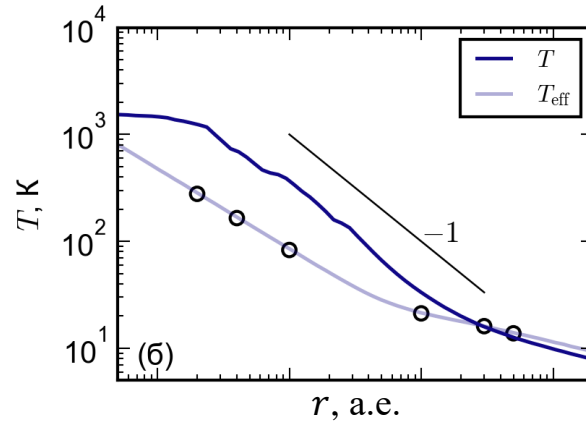
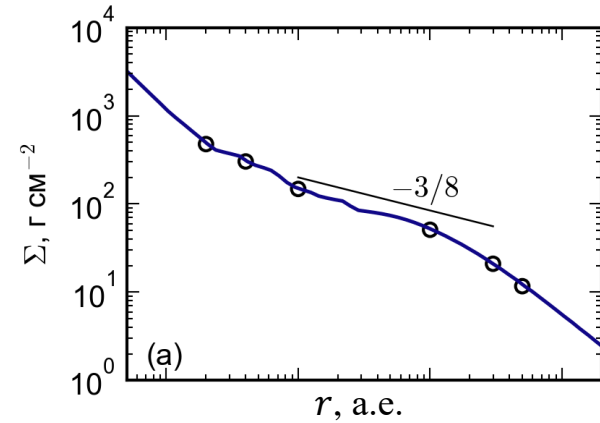


- Радиальные профили поверхностной плотности и температуры согласуются с наблюдаемыми



# Радиальная структура диска

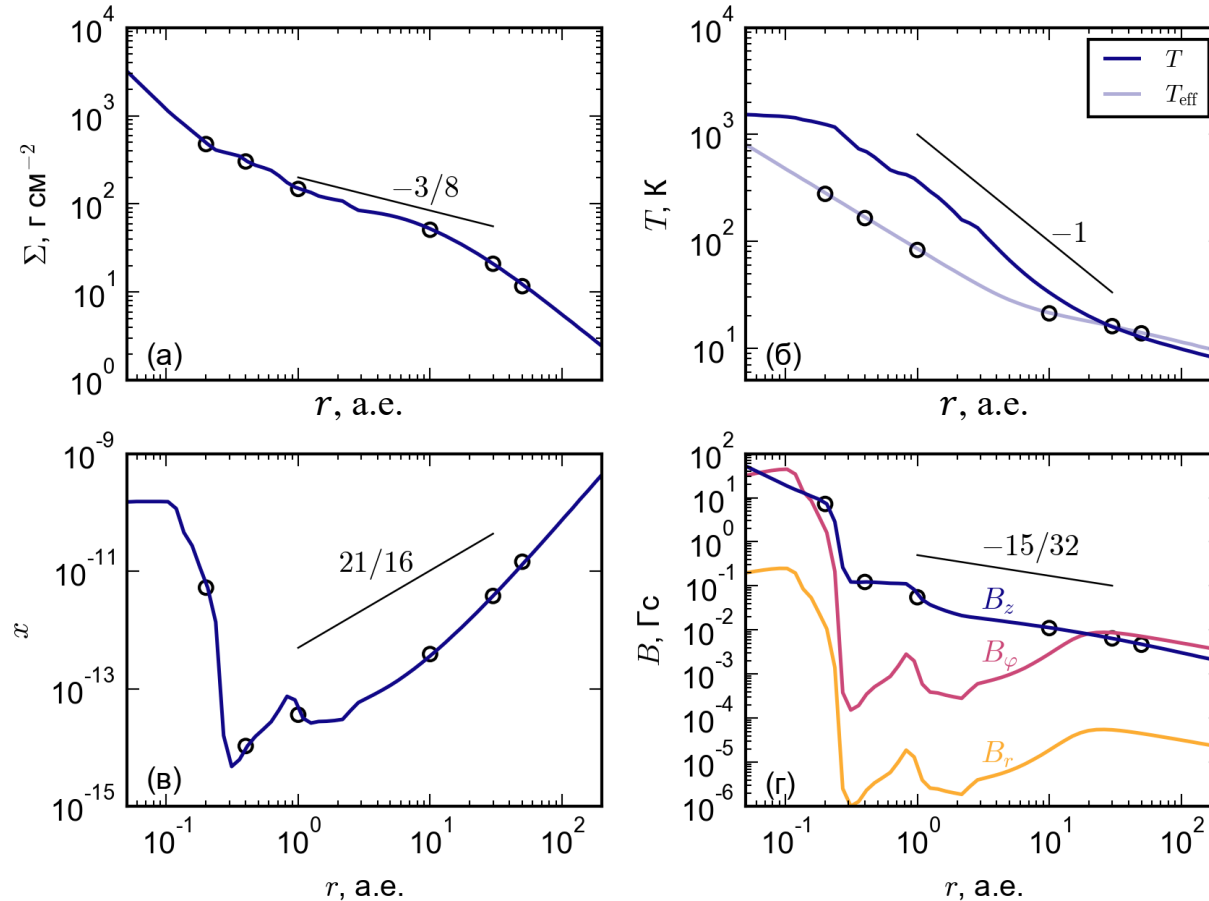
## Стандартные параметры



- Радиальные профили поверхностной плотности и температуры согласуются с наблюдаемыми
- В области  $r \in [0.3, 20]$  а.е. расположена «мертвая» зона

# Радиальная структура диска

## Стандартные параметры

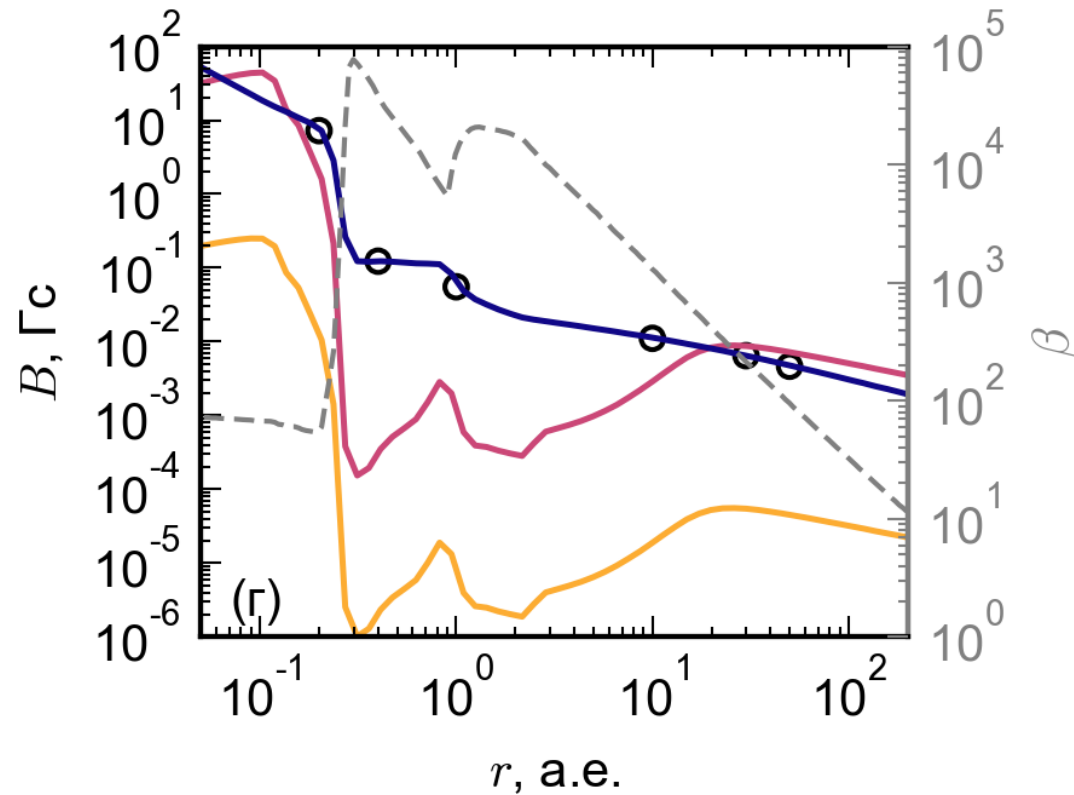


- Радиальные профили поверхностной плотности и температуры согласуются с наблюдаемыми

- В области  $r \in [0.3, 20]$  а.е. расположена «мертвая» зона
- В диске выделяется три области с различной геометрией магнитного поля

# Радиальная структура диска

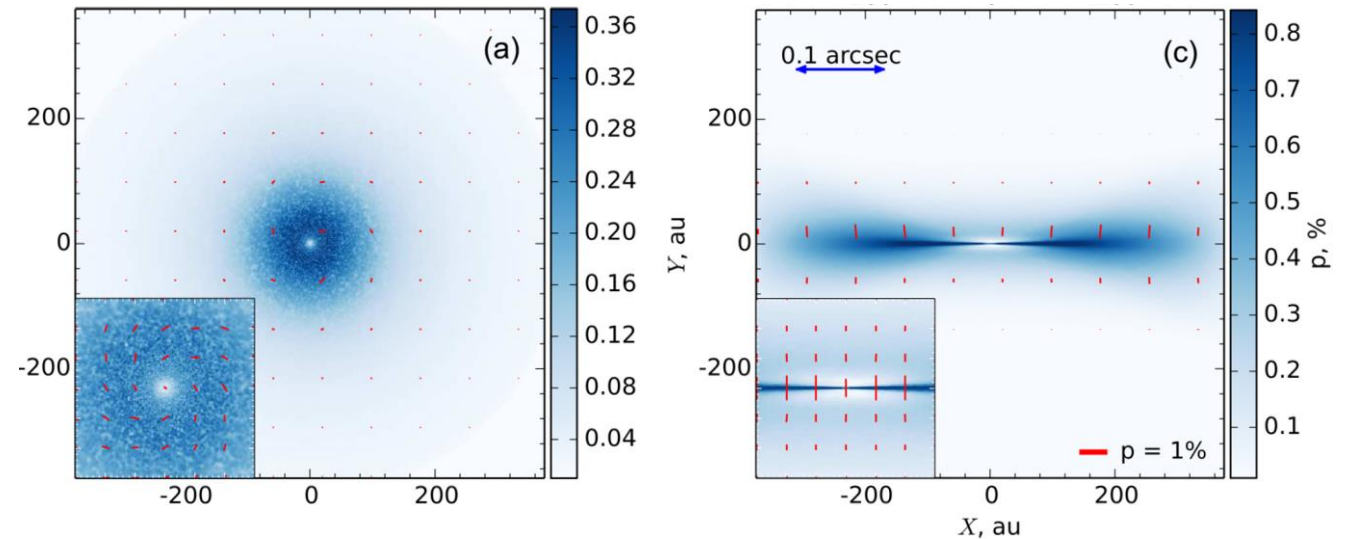
## Стандартные параметры



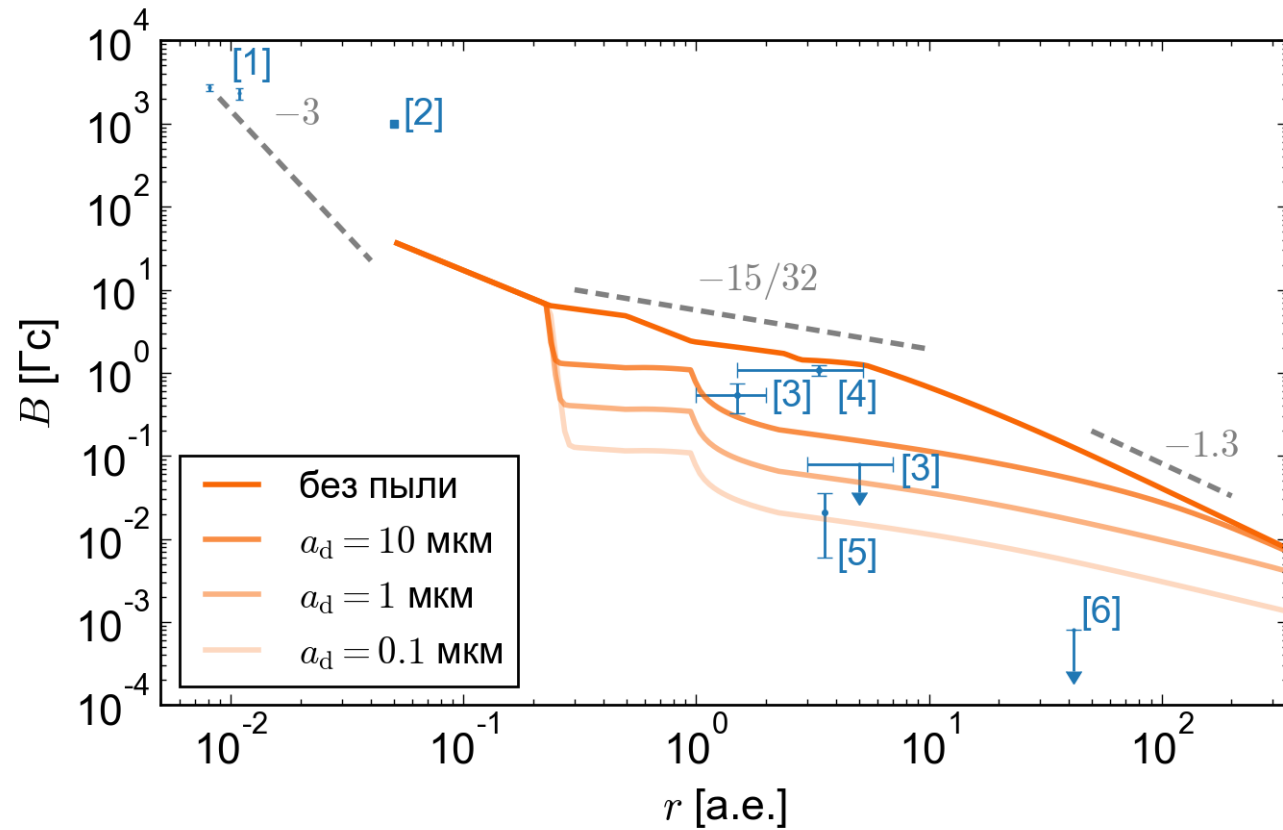
- Плазменный параметр  $\beta > 1$  не постоянен в диске

# Синтетические карты поляризованного излучения 1.3 мм

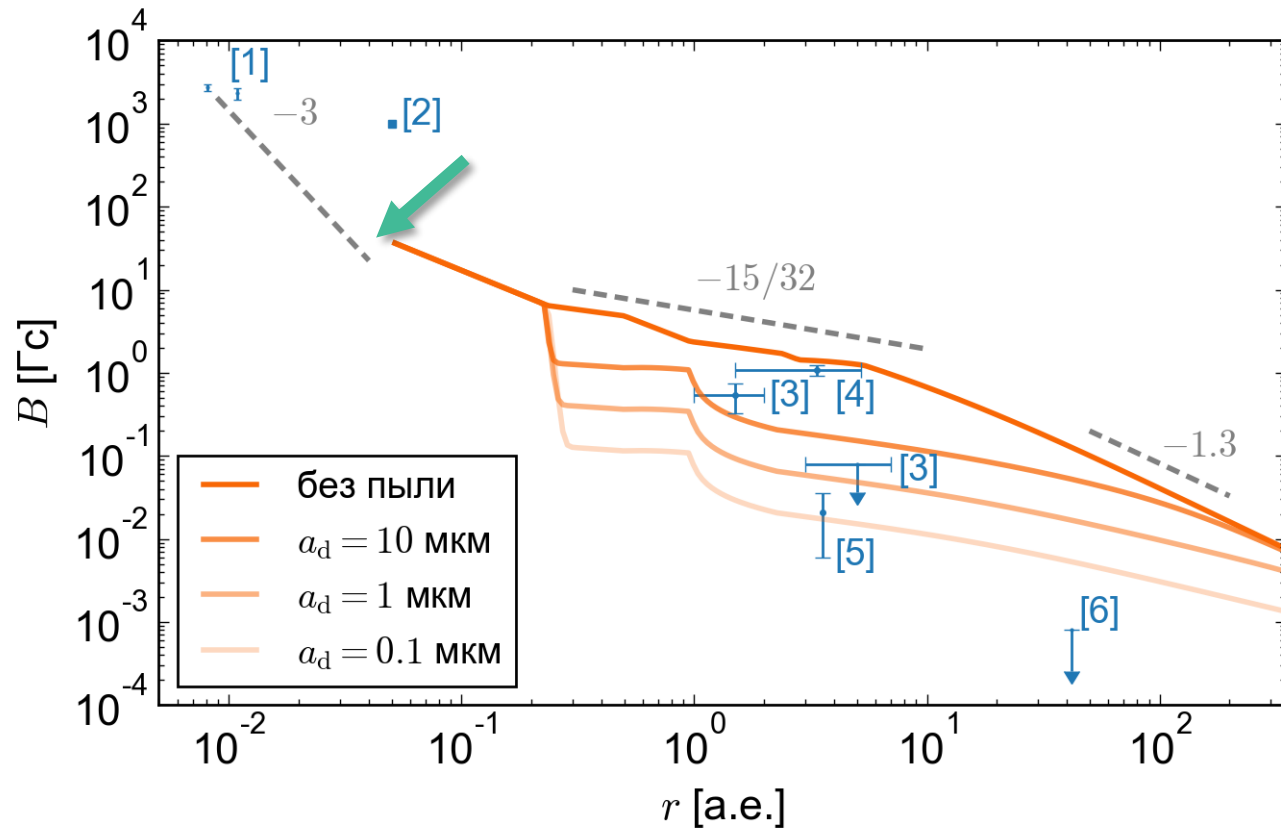
- «Мертвая» зона может наблюдаться как область наиболее низкой степени поляризации
- Совокупность квазирадиального и квазиазимутального магнитного поля проявляется как спиральная структура



# Интенсивность магнитного поля АД МЗ

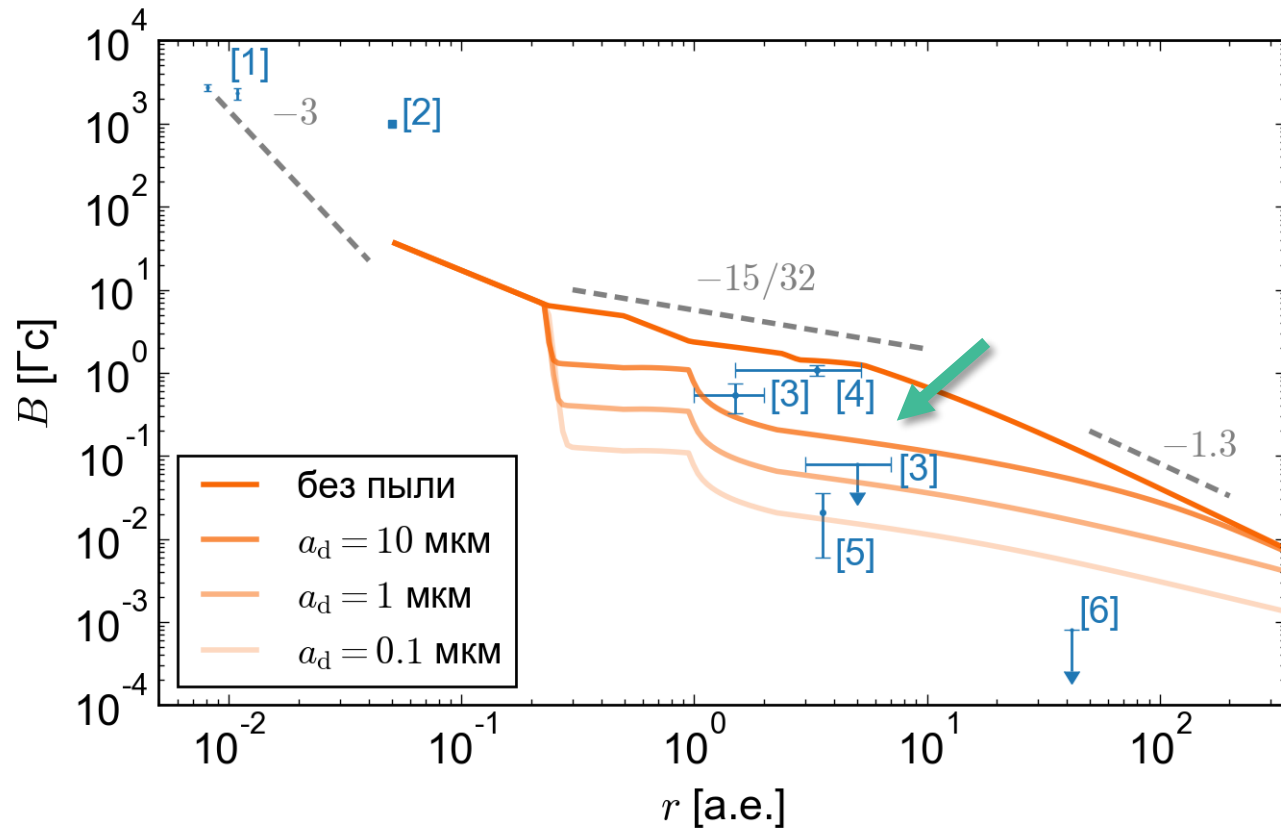


# Интенсивность магнитного поля АД МЗ



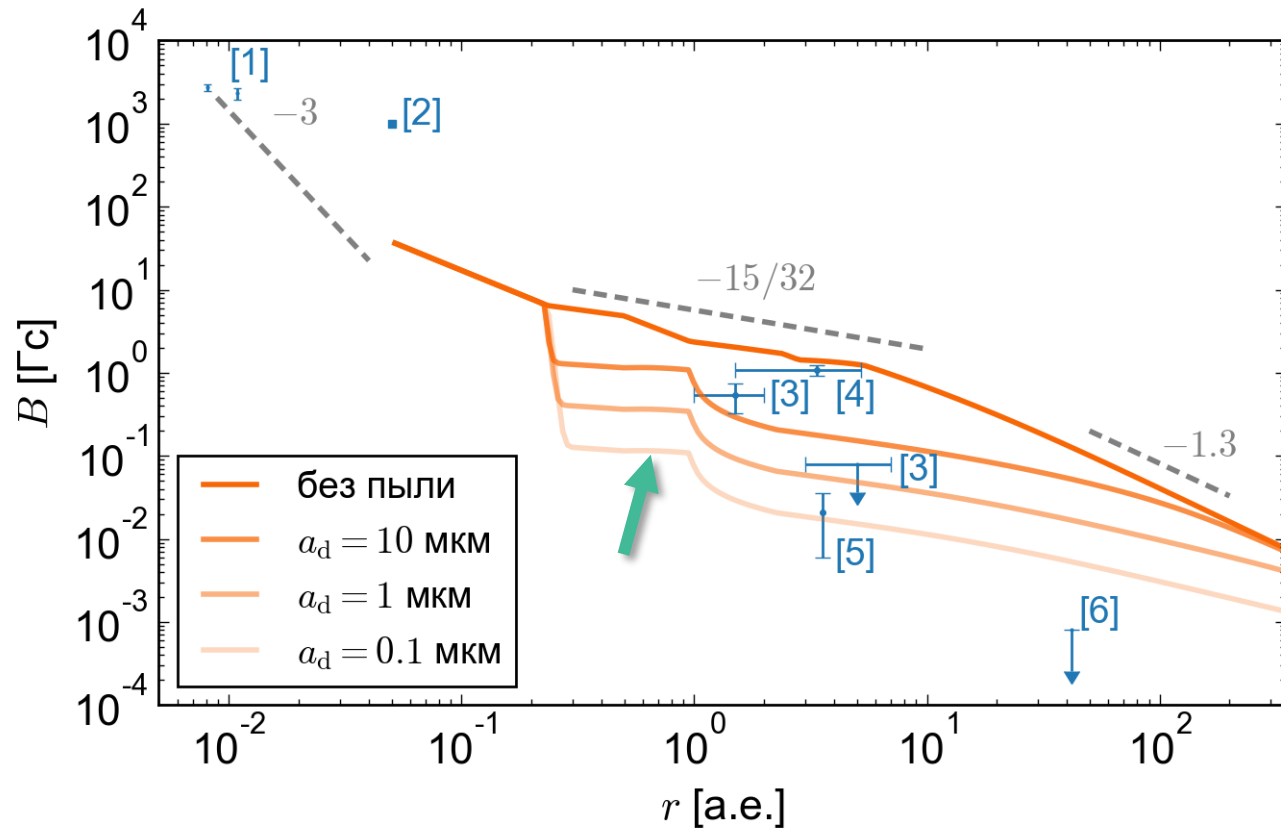
- На внутренней границе диска  $B$  сравнимо с дипольным магнитным полем звезды

# Интенсивность магнитного поля АД МЗ



- На внутренней границе диска  $B$  сравнимо с дипольным магнитным полем звезды
- Амбиполярная диффузия в «мертвой» зоне понижает  $B$  на порядок

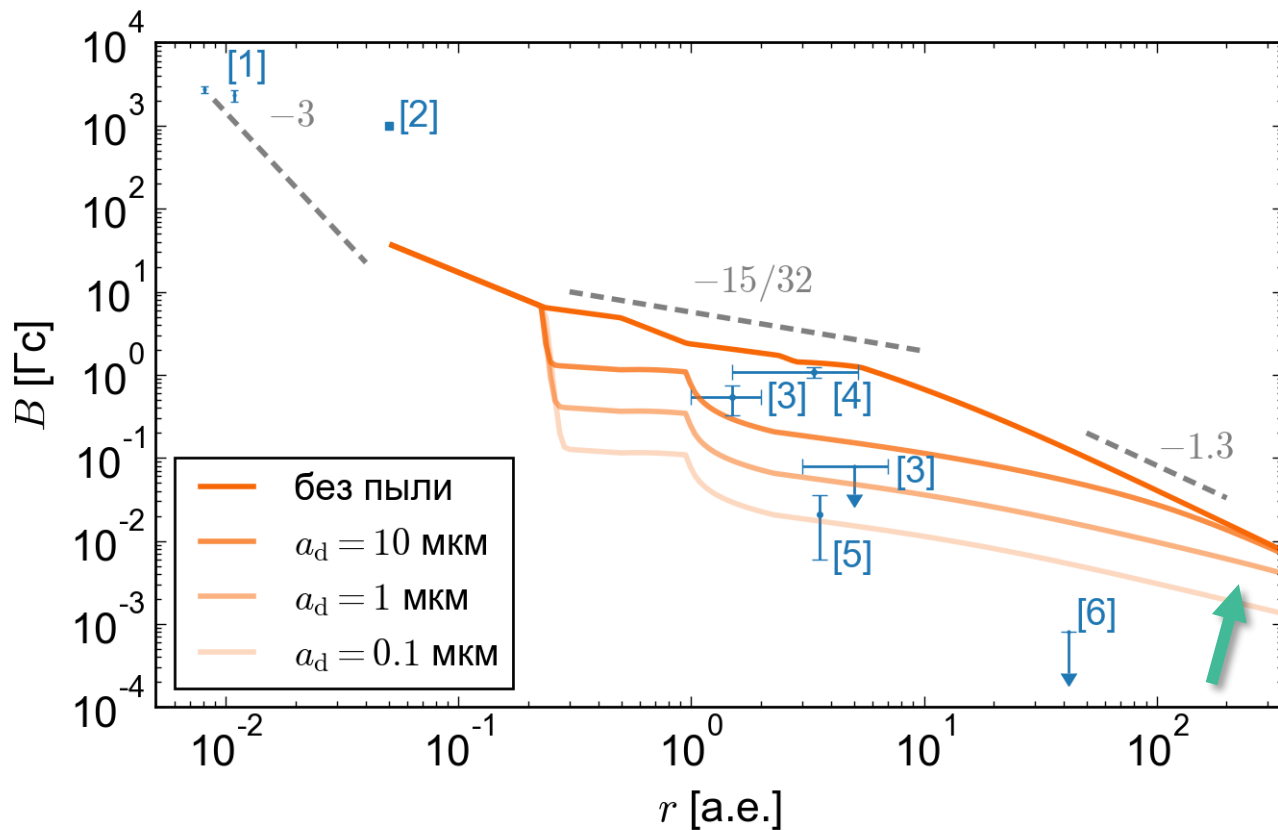
# Интенсивность магнитного поля АД МЗ



- На внутренней границе диска  $B$  сравнимо с дипольным магнитным полем звезды
- Амбиполярная диффузия в «мертвой» зоне понижает  $B$  на порядок
- Вне области тепловой ионизации,  $r > 0.2$  а.е.,  $B \propto a_d^{1/2}$ , т.е. укрупнение пылинок ведет к увеличению интенсивности магнитного поля



# Интенсивность магнитного поля АД МЗ



- На внутренней границе диска  $B$  сравнимо с дипольным магнитным полем звезды
- Амбиполярная диффузия в «мертвой» зоне понижает  $B$  на порядок
- Вне области тепловой ионизации,  $r > 0.2$  а.е.,  $B \propto a_d^{1/2}$ , т.е. укрупнение пылинок ведет к увеличению интенсивности магнитного поля
- На внешней границе диска  $B$  стремится к магнитному полю межзвездной среды с учетом зависимости  $B_c \propto \rho_c^{1/2}$

Вертикальная структура.

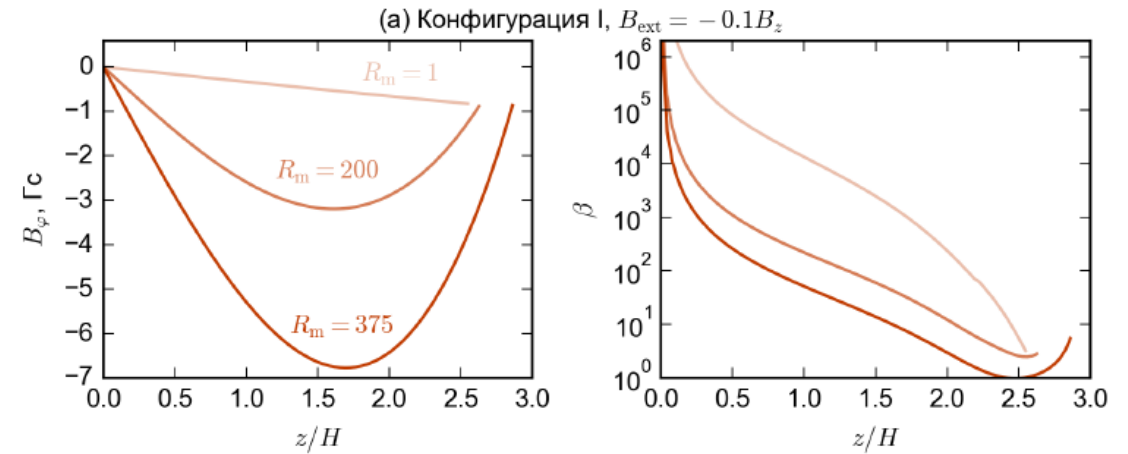
---

# Вертикальная структура.

## Конфигурации магнитного поля, $r = 0.2$ а.е.

Конфигурация I:  $B_\varphi(0) = 0$ ,  $B_\varphi(z_s) = B_{ext}$

При  $R_m > 1$  профиль  $B_\varphi(z)$  является немонотонным. При  $R_m = 375$  вблизи поверхности генерируется динамически сильное магнитное поле,  $\beta \sim 1$ .



# Вертикальная структура.

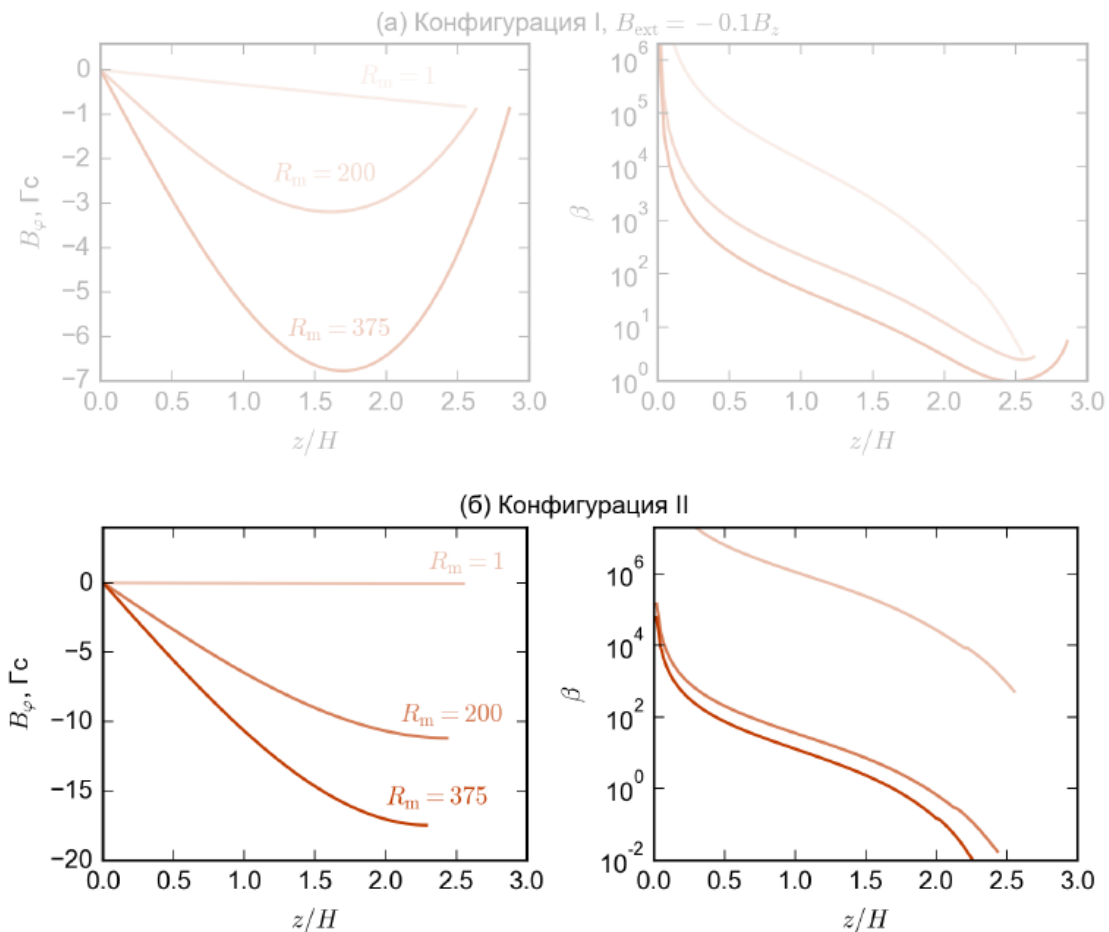
## Конфигурации магнитного поля, $r = 0.2$ а.е.

Конфигурация I:  $B_\varphi(0) = 0$ ,  $B_\varphi(z_s) = B_{ext}$

При  $R_m > 1$  профиль  $B_\varphi(z)$  является немонотонным. При  $R_m = 375$  вблизи поверхности генерируется динамически сильное магнитное поле,  $\beta \sim 1$ .

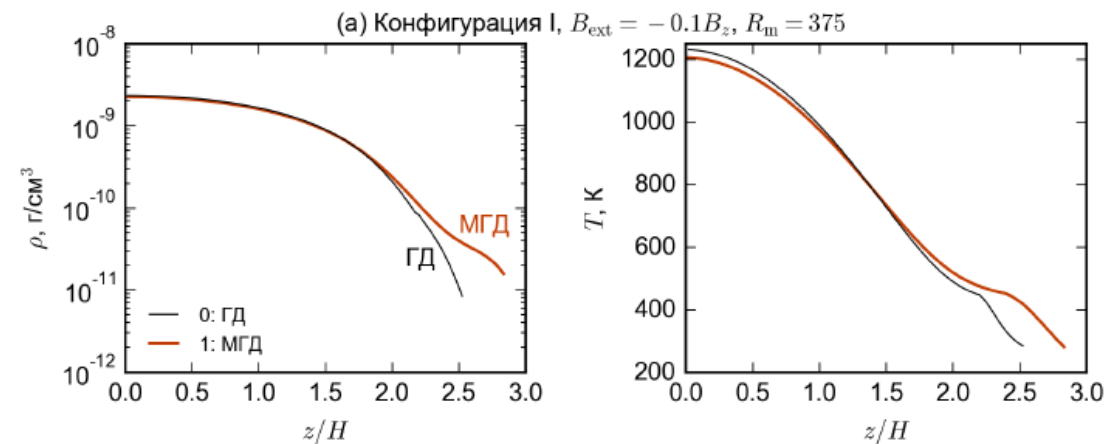
Конфигурация II:  $B_\varphi(0) = 0$ ,  $\frac{\partial B_\varphi}{\partial z}(z_s) = 0$

$B_\varphi(z)$  монотонно растет к поверхности.

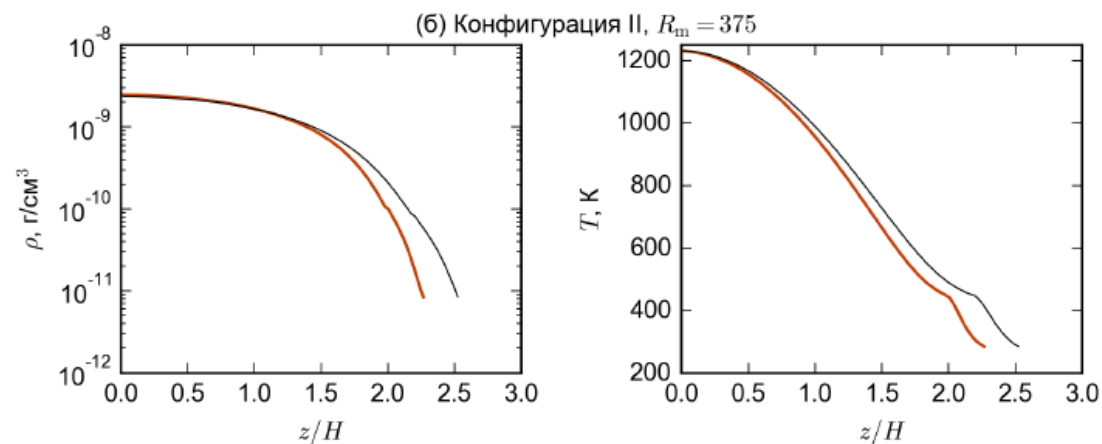


# Вертикальная структура

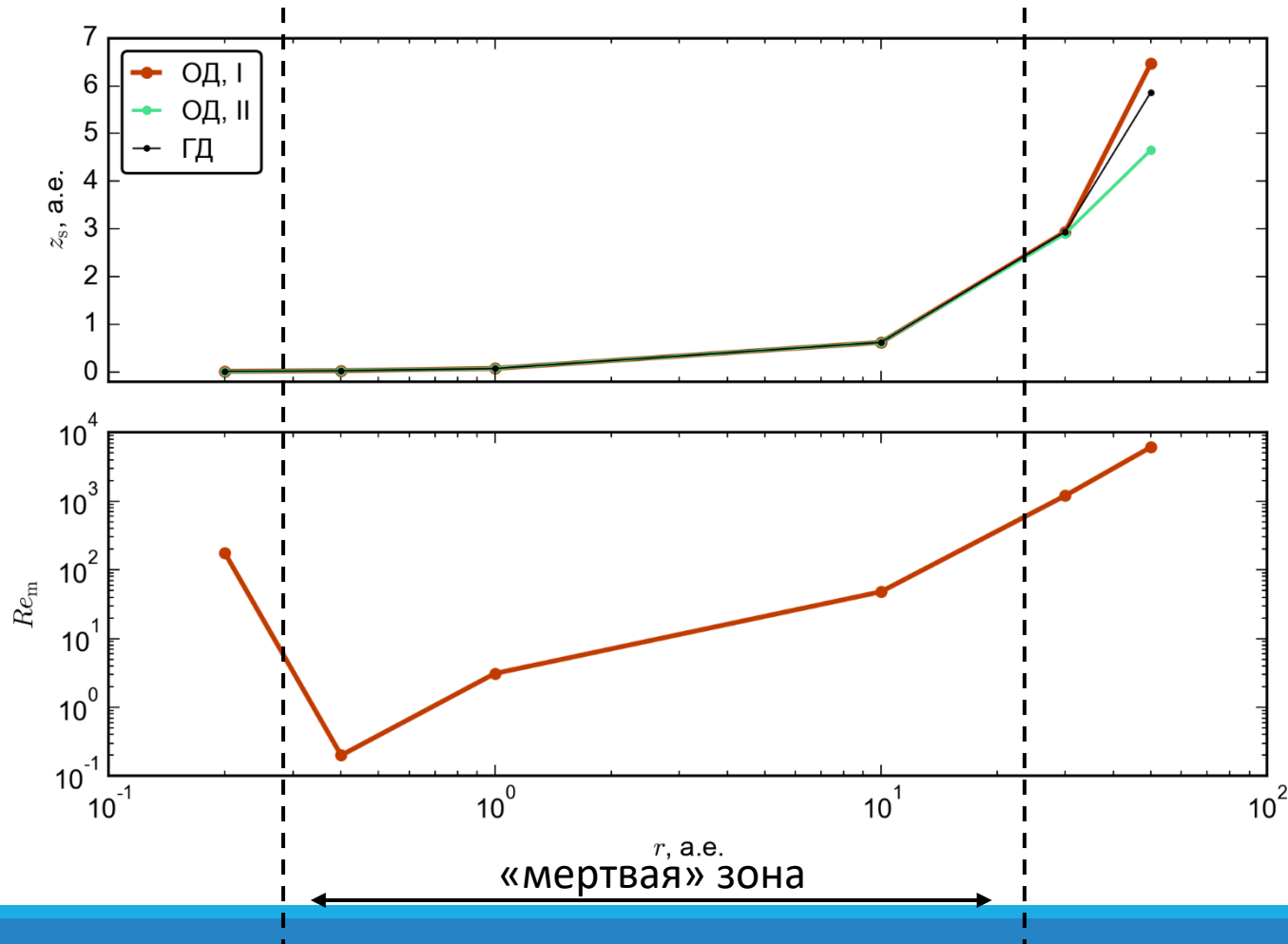
Конфигурация I: расширение диска  
вблизи поверхности



Конфигурация II: поджатие диска



# Влияние магнитного поля на толщину диска



Конфигурация I: утолщение диска на 10% вне «мертвой» зоны

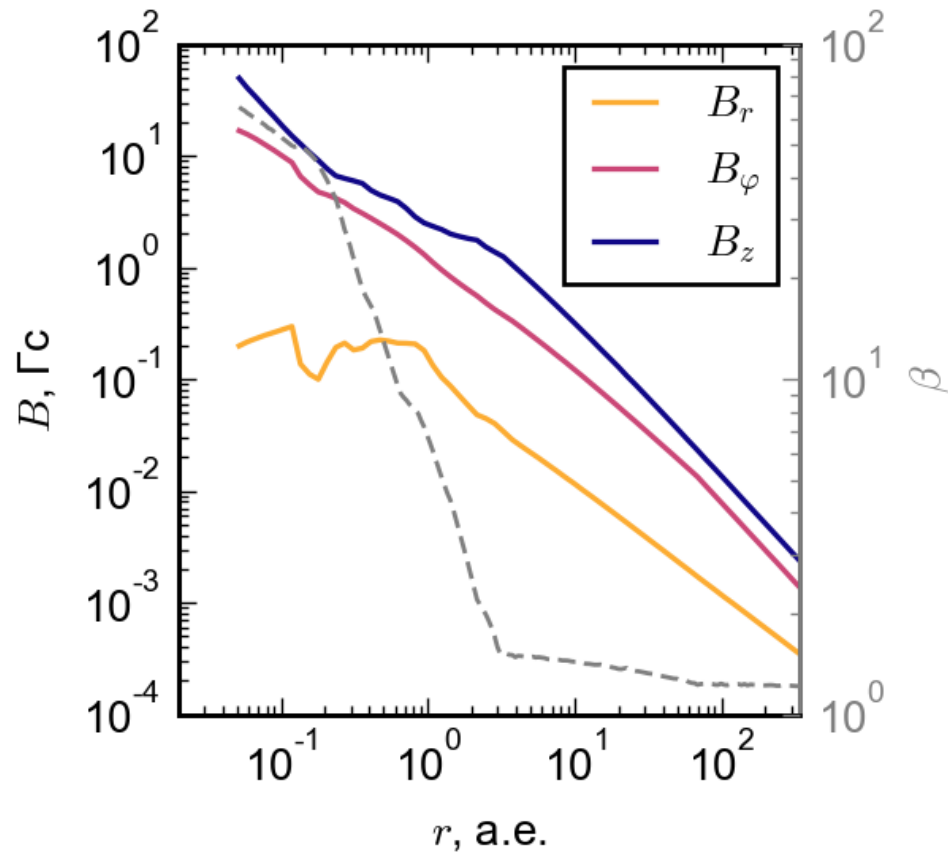
Конфигурация II: поджатие на 15%

Хайбрахманов, Дудоров, ЧФМЖ, 2021, 6, 52

# Отклонение от кеплеровского вращения

---

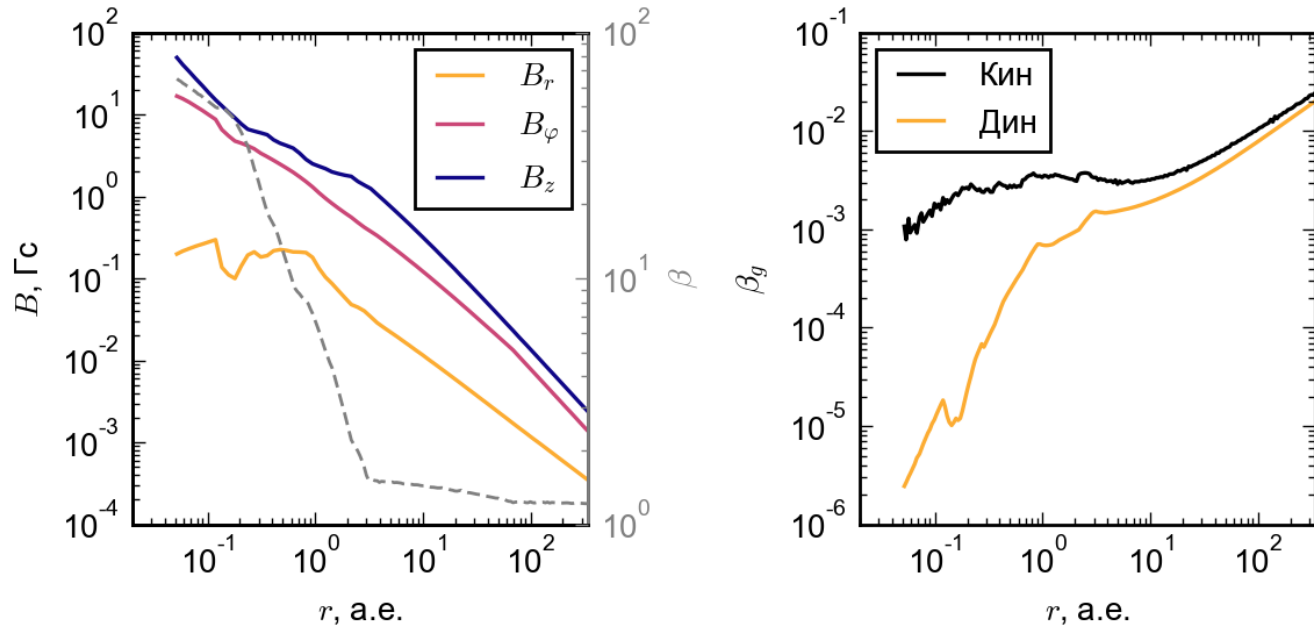
# Отклонение от кеплеровского вращения



- Случай  $\dot{M} = 10^{-8} M_\odot/\text{год}$ ,  
 $a_d = 1$  мм: динамически сильное  
магнитное поле,  $\beta \rightarrow 1$



# Отклонение от кеплеровского вращения



- Отклонение от кеплеровского вращения
  - «Газодинамическое»:  $\frac{\Delta g}{g} \sim 10^{-3} - 10^{-2}$
  - «Магнитное»: сравнимо с газодинамическом во внешней области диска

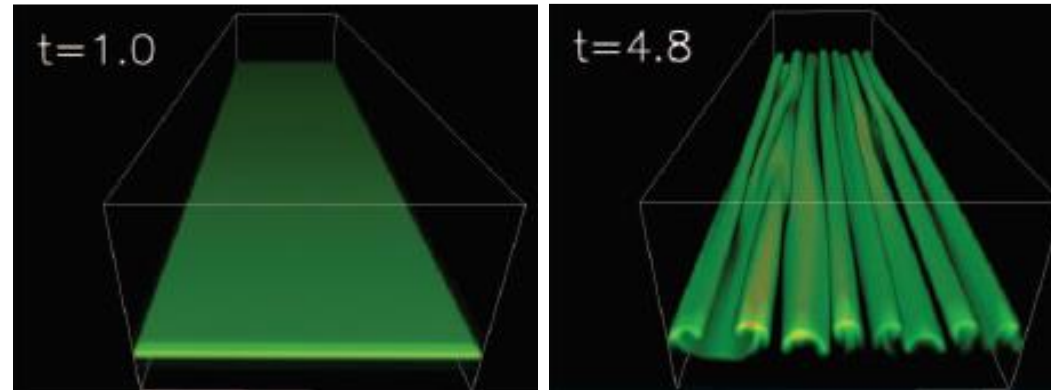
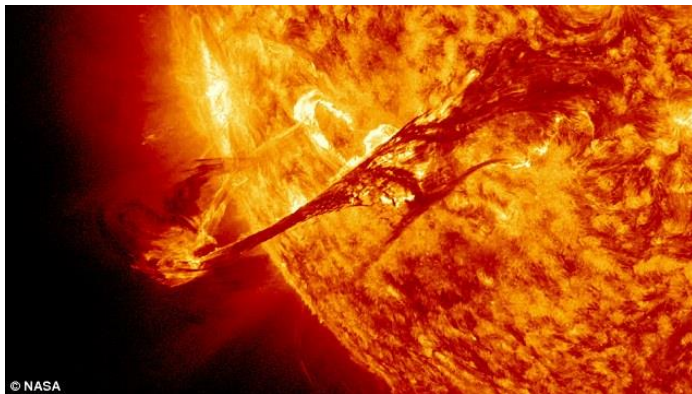
$$v_\phi = \sqrt{\frac{GM}{r} \left(1 + \frac{z^2}{r^2}\right)^{-3/2} \underbrace{- \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}}_{r(\Delta g)_{GD}} - \underbrace{\frac{r B_z B_r}{4\pi \rho H}}_{r(\Delta g)_{MGD}}}$$

# Динамика магнитных силовых трубок в АД МЗ

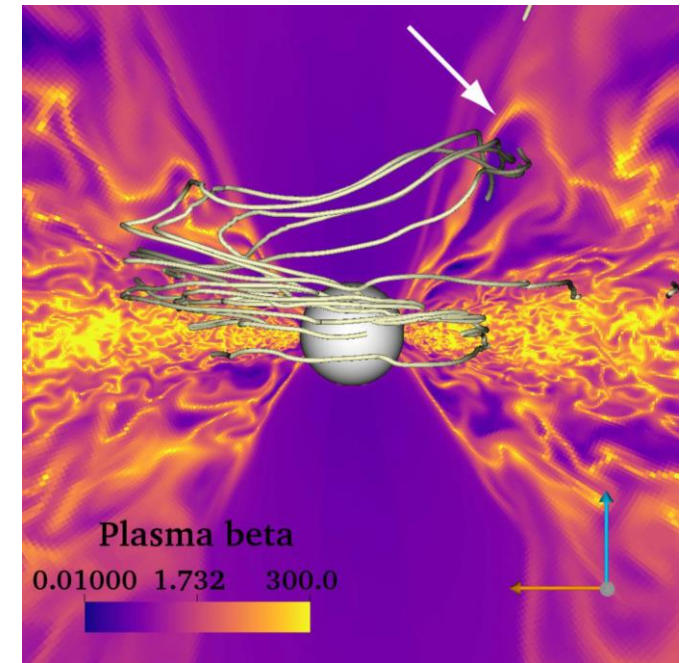
---

# Динамика магнитных силовых трубок в АД МЗ

В области вмороженности в АД МЗ происходит интенсивная генерация тороидального поля. Решение – магнитная плавучесть (образование и всплытие магнитных силовых трубок)



Vasil, Brummel, 2008, ApJ, 686, 709



Takasao et al., 2018, ApJ, 857, 4



# Основные уравнения<sup>1,4</sup>

---

$$(1) \quad \rho \frac{d\vec{v}}{dt} = (\rho - \rho_e)\vec{g} + \vec{f}_d$$

$$(2) \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$$

$$(3) \quad dQ = dU + P_e dV$$

$$(4) \quad P_g + \frac{B^2}{8\pi} = P_e + \frac{B_e^2}{8\pi}$$

$$(5) \quad \frac{dP_e}{dz} = -\rho_e g$$

$$(6) \quad M = \rho \pi a^2 2\pi r$$

$$(7) \quad \Phi_m = B \pi a^2$$

**Учитывается:**

- аэродинамическое и турбулентное трение<sup>2,3</sup>
- лучистый теплообмен с окружающим газом
- однородное магнитное поле диска<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Дудоров, Кириллов, 1985, Солн.Д., 12, 85

<sup>2</sup>Паркер, 1982

<sup>3</sup>Neuman, Raadu, 1972, ApJ, 172, 739

<sup>4</sup>Dudorov et al., 2019, MNRAS, 487, 5388

# Основные уравнения

(1)	$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = (\rho - \rho_e)\vec{g} + \vec{f}_d$	$\rightarrow$	$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\rho_e}{\rho} - 1\right)g + f_d$		
(2)	$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$	$\rightarrow$	$\frac{dz}{dt} = v$		
(3)	$dQ = dU + P_e dV$	}	$\frac{d\rho}{dt} = \frac{h_c P_T + U_T \rho_e g v}{P_T (U_\rho - P_e / \rho^2) - U_T (P_\rho + C_m \rho)}$		
(4)	$P_g + \frac{B^2}{8\pi} = P_e$			$\rightarrow$	$\frac{dT}{dt} = \frac{\rho_e g v (P_e / \rho^2 - U_\rho) - h_c (P_\rho + C_m \rho)}{P_T (U_\rho - P_e / \rho^2) - U_T (P_\rho + C_m \rho)}$
(5)	$\frac{dP_e}{dz} = -\rho_e g$				
(6)	$M = \rho \pi a^2 2\pi r$	$\rightarrow$	$a = a_0 (\rho / \rho_0)^{-1/2}$		
(7)	$\Phi_m = B \pi a^2$	$\rightarrow$	$B = B_0 (\rho / \rho_0)$		
			$h_c = -\frac{8}{3\chi\rho} \frac{\sigma_R T^4 - \sigma_R T_e^4}{a^2}$		

# Модель вертикальной структуры диска

---

- Политропный диск

$$\rho_e(z) = \rho_m \left[ 1 - \left( \frac{z}{H_k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{k-1}},$$

$$T_e(z) = T_m \left[ 1 - \left( \frac{z}{H_k} \right)^2 \right],$$

$$H_k = \sqrt{\frac{2k}{k-1}} H,$$

где  $H$  – изотермическая шкала высоты,  $k = 1 + 1/n$ ,  $n$  – показатель политропы

- Поверхность диска,  $z_s$ , определяется границей его фотосферы

## Модель вертикальной структуры диска

---

- Над диском находится гидростатическая корона с температурой, которая определяется нагревом излучением звезды

$$T_c = 185 \left( \frac{f}{0.05} \frac{L}{L_\odot} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-1/2} \text{ К},$$

где  $f$  – доля потока излучения звезды, перехватываемого поверхностными слоями диска. Давление короны у поверхности диска равно давлению межзвездной среды с концентрацией  $10^9 \text{ см}^{-3}$  и температурой 20 К.

- При переходе от оптически толстого диска к оптически прозрачной короне температура экспоненциально возрастает с характерным масштабом  $\Delta z_{\text{tr}} = H$



# Модель динамики МСТ

---

- Уравнения движения МСТ решаются с учетом сил плавучести и сопротивления, лучистого теплообмена с окружающим газом, магнитного поля диска
- Структура диска рассчитывается с помощью модели Дудорова и Хайбрахманова
- Обыкновенные дифференциальные уравнения динамики МСТ решаются методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности с автоматическим выбором шага для относительной погрешности  $10^{-4}$

Алгоритм решения уравнений модели реализован в численном коде Хариус на языке программирования C++



# Параметры расчетов

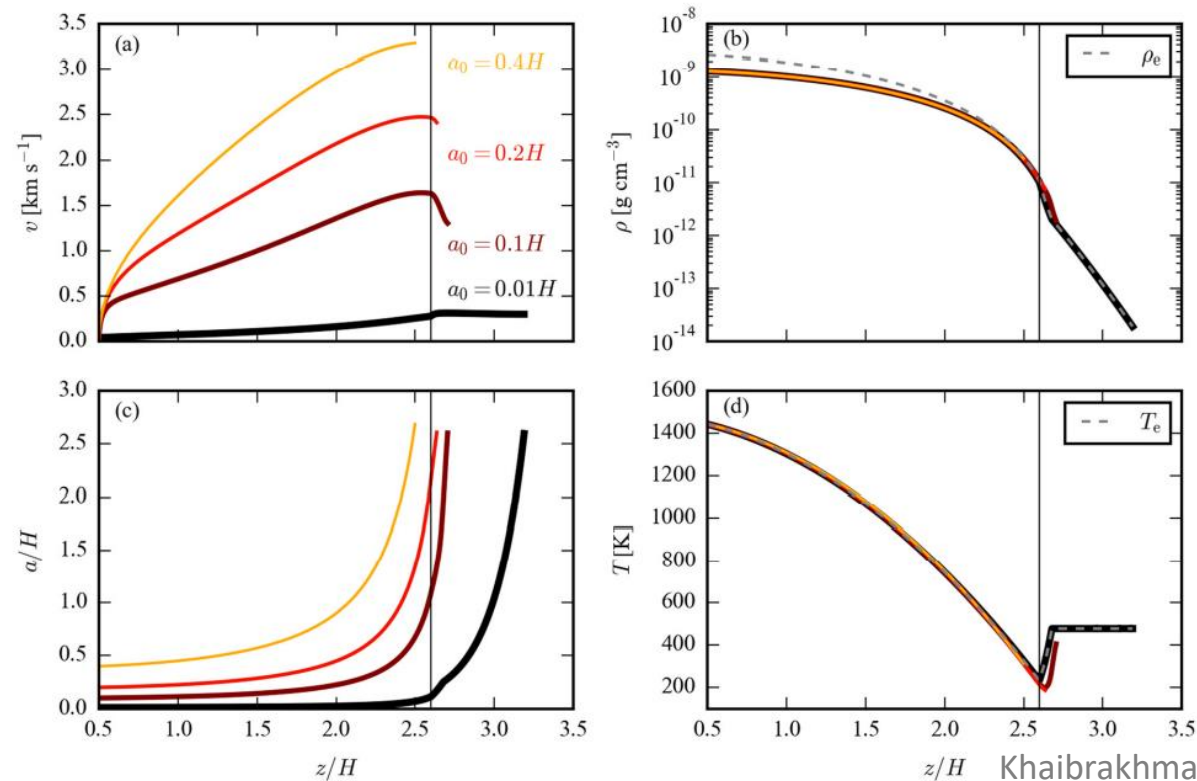
- МСТ
  - Изначально,  $z_0 = 0.5H$ , в тепловом равновесии с окружающим газом,  $T = T_e$
  - Начальная плотность определяется из равенства давлений  $P = P_e$

величина	обозначение	Диапазон	Значение по умолчанию
плазменный параметр	$\beta_0$	0.01, 0.1, 1, 10	<b>1</b>
радиус	$a_0$	$[0.01, 0.4] H$	<b>0.1H</b>
расстояние от звезды	$r$	$[0.012, 1]$ а.е.	<b>0.15 а.е.</b>

- Аккреционный диск MWC 480:  $M_\star = 2M_\odot$ ,  $R_\star = 1.67R_\odot$ ,  $\dot{M} = 10^{-7} M_\odot/\text{год}$ ,  $L_\star = 11.2L_\odot$ ,  $B_\star = 1$  кГц (Donehew, Brittain, 2011, ApJ, 141,46; Hubrig et al., 2011, A&A, 536, A45)

# Динамики МСТ без внешнего поля, $\beta_0 = 1$

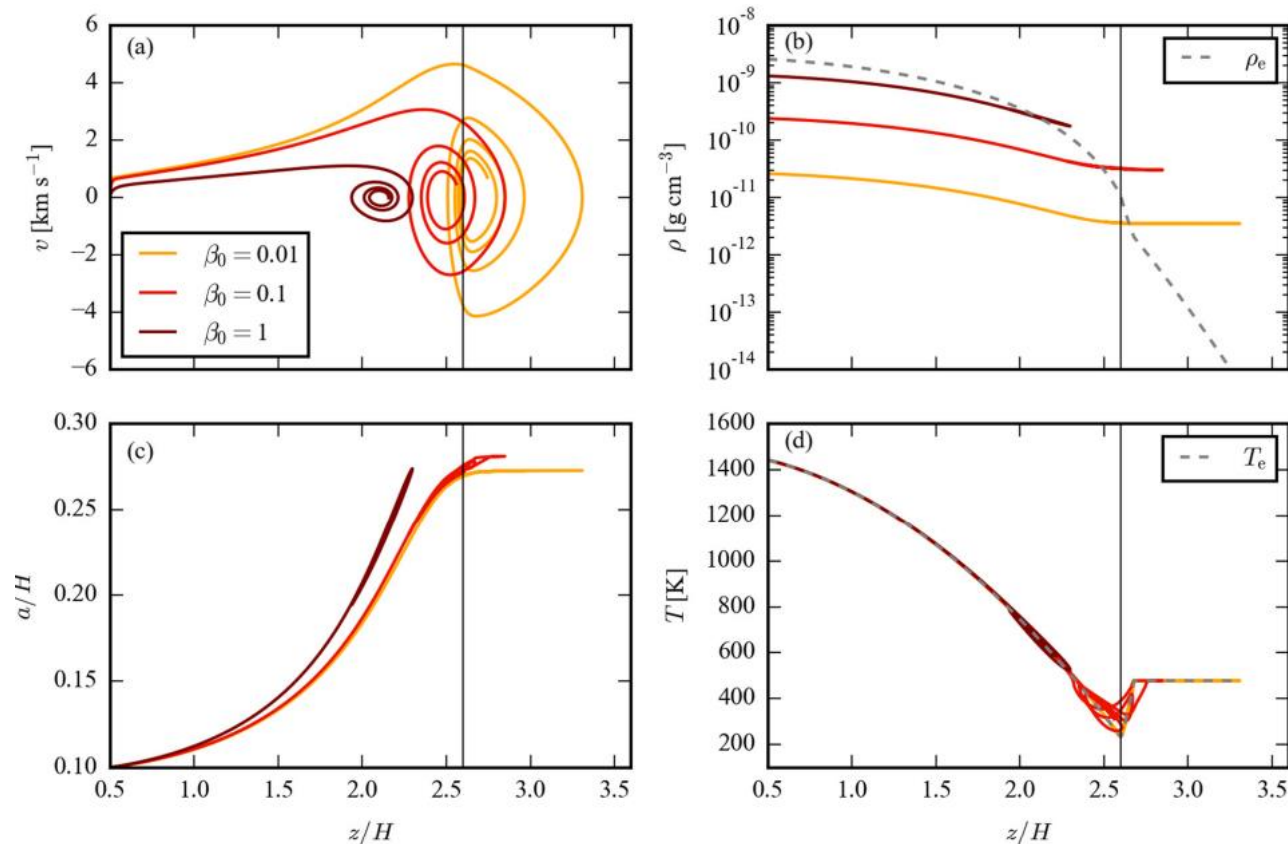
Без внешнего магнитного поля МСТ всплывают из диска со скоростями 10-15 км/с и формируют истекающую замагниченную корону



Khaibrakhmanov & Dudorov, OAst, 2022, accepted

# Динамики МСТ во внешнем поле, $r = 0.5$ а.е.

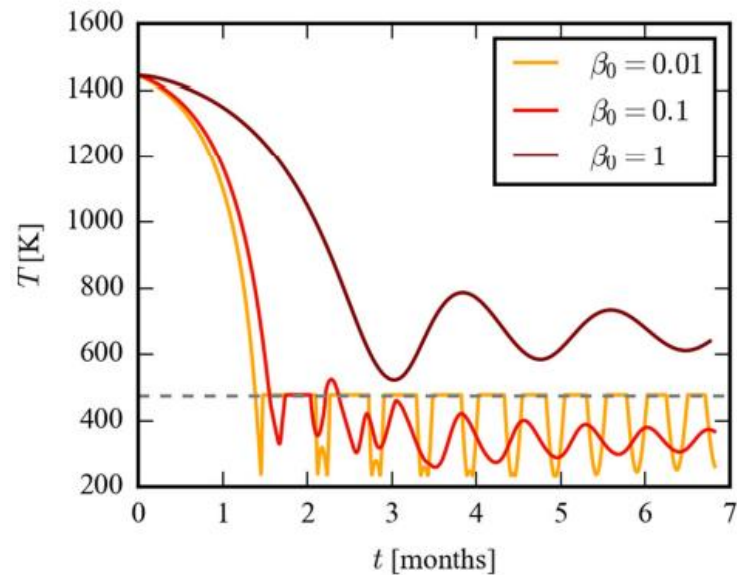
Во внешнем магнитном поле МСТ испытывают колебания вблизи поверхности диска



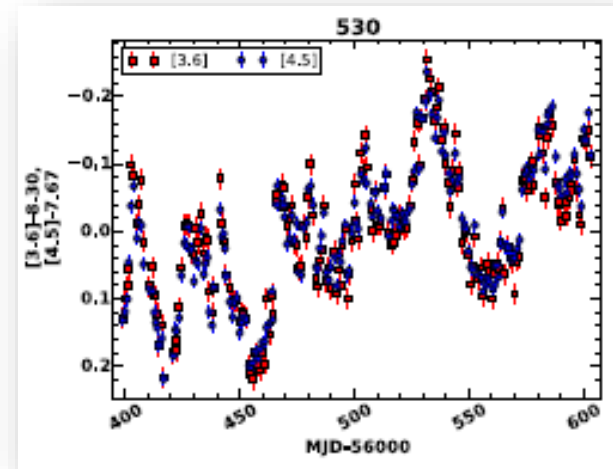
# Тепловые колебания МСТ

Колебания сопровождаются вариациями температуры МСТ

Эти вариации могут давать вклад в ИК-переменность излучения АД МЗ



Dudorov et al., 2019, MNRAS, 487, 5388



Flaherty et al., 2016, ApJ, 833, 104

## Заключение

---

1. Разработана МГД-модель аккреционных дисков молодых звезд с остаточным крупномасштабным магнитным полем. Модель хорошо описывает наблюдательные данные
2. Магнитное поле приводит к отклонению толщины диска от гидростатической
3. Отклонение от кеплеровского вращения может быть сравнимо с газодинамическим во внешней области диска. Это имеет важное значение с точки зрения радиального дрейфа пылинок
4. ИК-переменность молодых звездных объектов может быть обусловлена динамикой МСТ, всплывающих из областей интенсивной генерации магнитного поля
5. Дальнейшее развитие – полностью самосогласованная динамическая 2Д-модель

# Спасибо за внимание!

---

- Работа в разделе 2d выполнена при поддержке правительства РФ и Министерства высшего образования и науки РФ по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039, договор 780-10)
- Работа в разделе 3 выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-10012)



# Credits

---

- 1: Chris Burrows (STScI), the WFPC2 Science Team and NASA
- 2: ESO/H. Avenhaus et al./DARTT-S collaboration
- 3: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)
- 4: NASA, A. Watson (UNAM), K. Stapelfeldt (JPL), J. Krist (STScI) and C. Burrows (ESA/STScI)
- 5: NASA, ESA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
- 6: R. A. Gutermuth (Harvard-Smithsonian CfA) et al./JPL-Caltech/NASA