



Хайбрахманов Сергей

Дудоров А.Е.

(ЧелГУ)

План доклада

1. Введение

- Магнитные поля аккреционных дисков
- Основные диссипативные МГД эффекты

2. Модель аккреционного диска

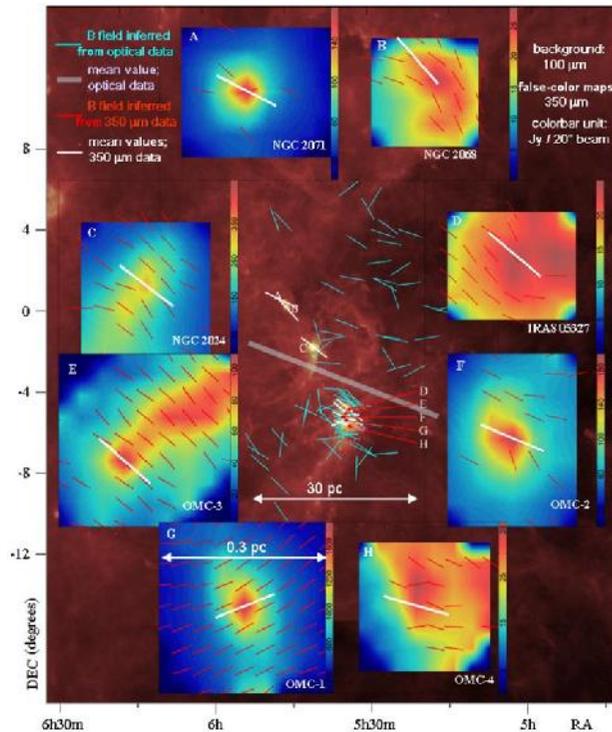
3. Результаты

- Диссипация остаточного магнитного поля
- Величина и геометрия магнитного поля

4. Заключение

Звезды-диски-планеты. Наблюдения.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



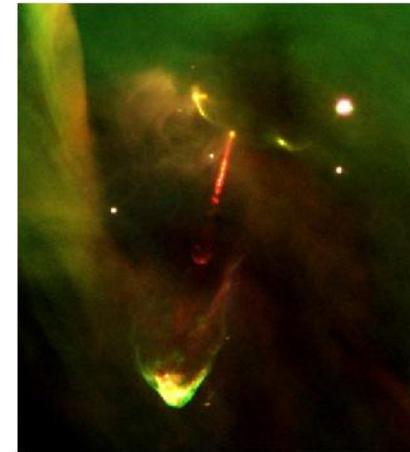
Credit: Hua-bai Li
(CfA/MPIA)

ДИСКИ



Credit: Mark
McCaughrean (Max-
Planck-Institute for
Astronomy), C.
Robert O'Dell (Rice
University)

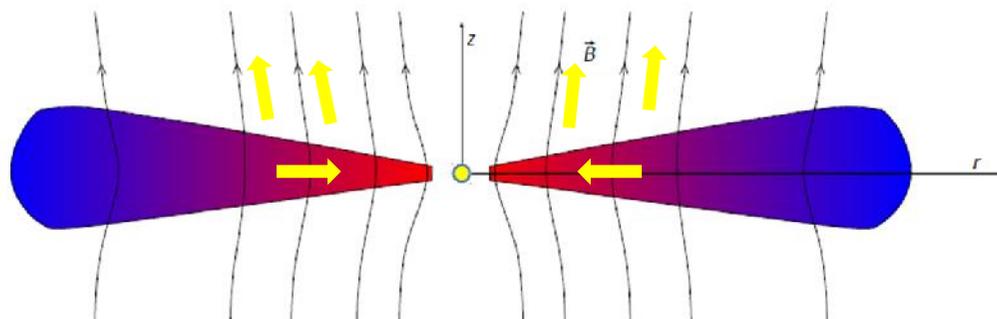
ИСТЕЧЕНИЯ



Credit: ESO

Звезды-диски-планеты. Теория.

- Проблема переноса углового момента
 - Турбулентность (Shakura, Sunyaev, 1973)
 - Истечения/джеты
 - Магнитное торможение



- Теория остаточного магнитного поля
 - Магнитное поле звезд и дисков – реликт магнитного поля молекулярных облаков (Дудоров, 1993, 1994)

Итак:

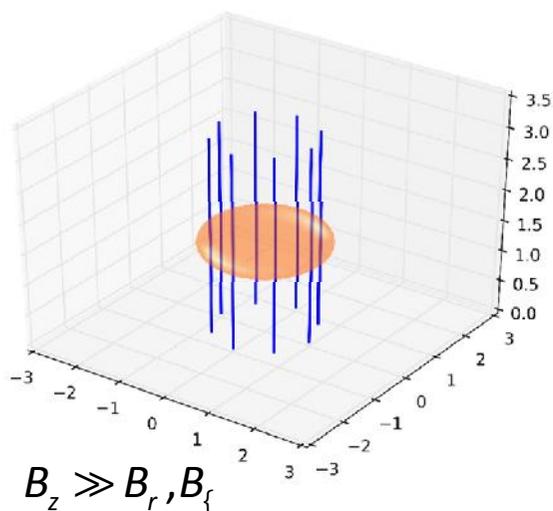
- Магнитные поля повсеместны в областях звездообразования
- Магнитное поле определяет эволюцию аккреционных дисков

Но:

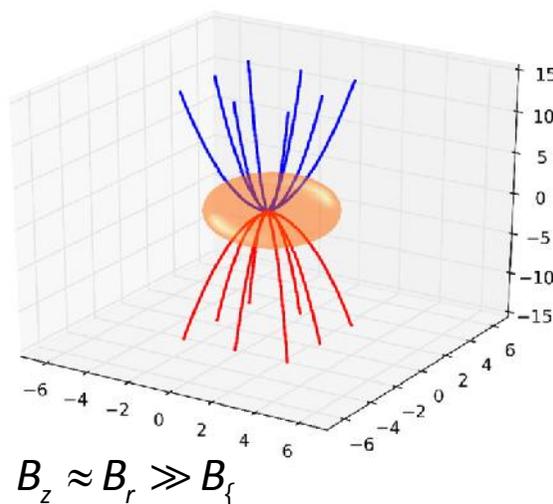
- Величина и геометрия магнитного поля в аккреционных дисках плохо изучены

Геометрия магнитного поля

-полоидальное

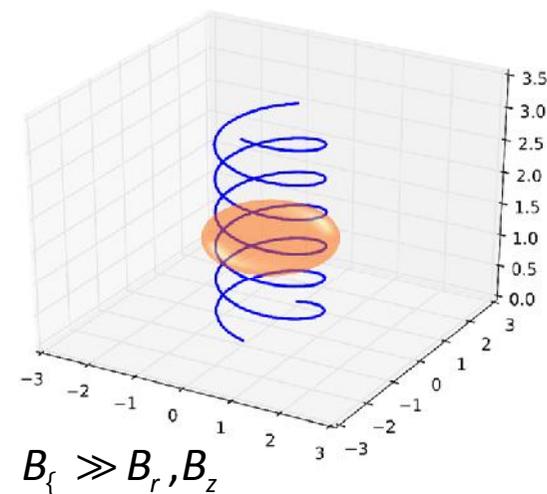


-квазирадиальное



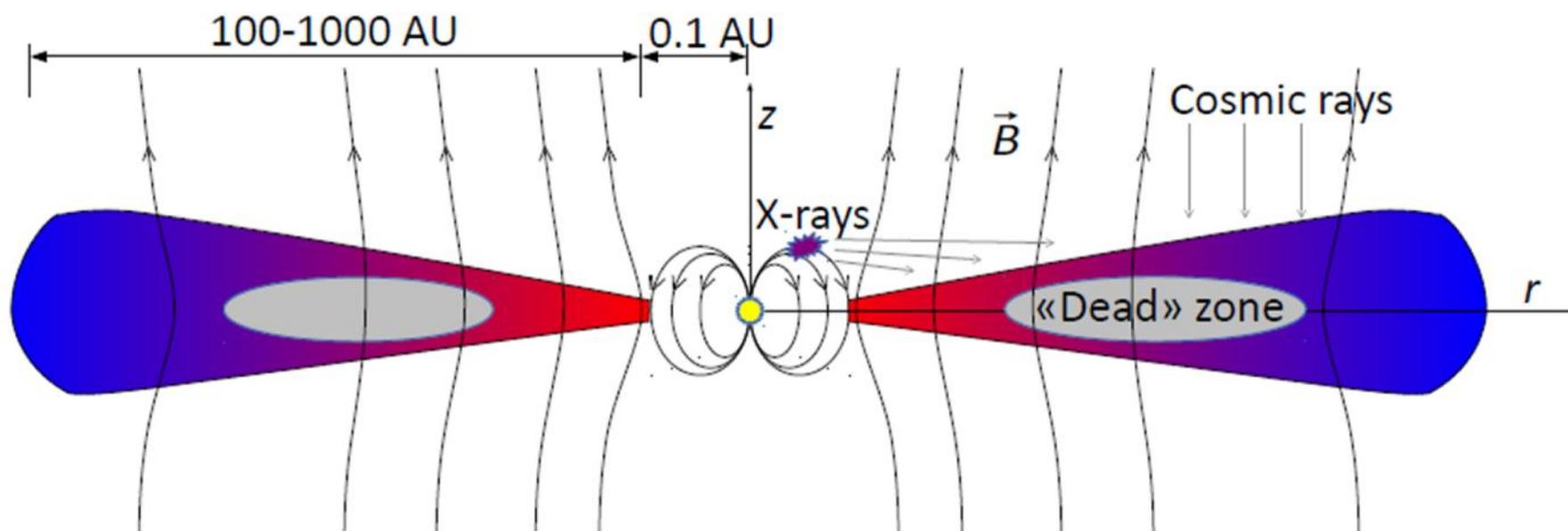
Магнито-
центробежный
ветер
(Blandford, 1982)

-азимутальное



- Плавучесть (Draine, 1983)
- Механизм Шибаты-Учиды (1985)

Аккреционные диски молодых звезд



Дополнительный фактор:

- диссипативные эффекты

Основные диссипативные эффекты

В аккреционных дисках молодых звезд важны 3 эффекта (пр., Wardle, 2012)

Омическая диффузия

- Столкновения заряженных частиц приводят к затуханию токов проводимости

Магнитная амбиполярная диффузия

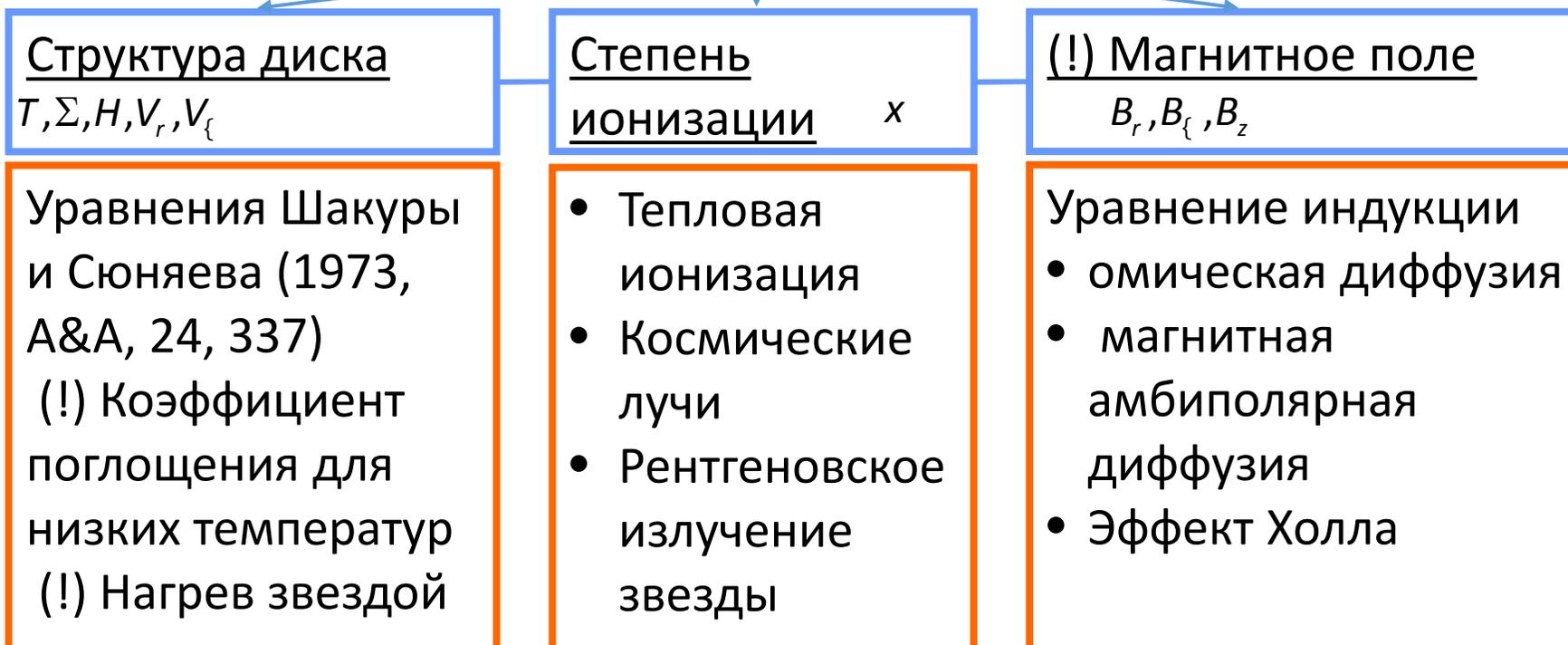
- Совместные дрейф заряженных частиц сквозь газ

Эффект Холла

- Поперечный дрейф заряженных частиц приводит к появлению дополнительного (Холловского) тока
- Не диссипативный

Модель аккреционного диска

- Геометрически тонкий стационарный диск в гидростатическом равновесии
- Кинематическое приближение



1. Дудоров, +, Вестн. ЧелГУ, 2013. №9, Вып. 16., С. 27., С. 40
2. Dudorov, +, ApSS, 2013, in preparation

Модель аккреционного диска

Структура диска

$$\dot{M} \Omega f = 2f r \Sigma V_s^2,$$

$$\dot{M} = -2f r V_r \Sigma,$$

$$\frac{\dagger_{sb} T^4}{3|\Sigma} = \frac{3}{8f} \dot{M} \Omega^2 f,$$

$$H = V_s / \Omega,$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \left(1 + \frac{z^2}{r^2}\right)^{-3/4}$$

$$\Sigma = 2 \dots H,$$

$$V_s = \sqrt{R_g T / \sim},$$

$$| = |_{0 \dots} a T^b$$

$$T_{irr} = 280K \left(L / L_{\odot}\right)^{1/4} r_{AU}^{1/2}$$

Степень ионизации

$$(1 - x_s) \ll \dots = \Gamma_r x_s^2 n + \Gamma_g x_s n$$

$$x \frac{x_j^T}{1 - x_j^T} = \frac{1}{n} \frac{g_j^+}{g_j^0} \frac{2(2f m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{t_j}{kT}\right)$$

$$x = x_s + \sum_j \epsilon_j x_j^T \quad j = \text{H, He, Me}$$

(!) Магнитное поле

-Вмороженное: $B_z = B_{z0} \Sigma / \Sigma_0$

-МАД: $B_z = \left(4f x \dots^2 \chi_{in} r V_r\right)^{1/2}$

$$B_r = \frac{V_r z}{y} B_z \quad B_{\zeta} = \frac{3}{2} \left(\frac{H}{r}\right)^2 \frac{V_{\zeta} z}{y} B_z$$

Результаты.

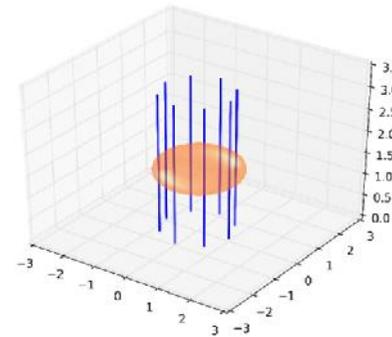
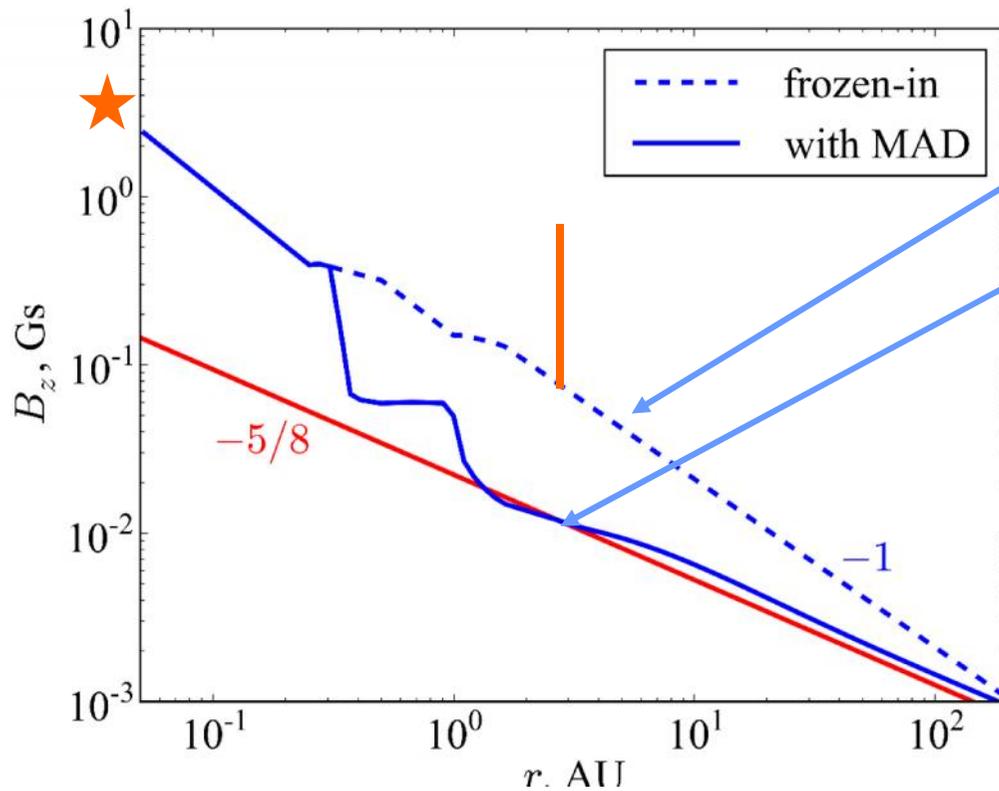
Диссипация остаточного магнитного поля

Все расчеты сделаны при типичных для звезд Т Тельца параметрах

$$M = 1M_{\odot}, \dot{M} = 10^{-8} M_{\odot} / \text{год}, r = 0.01$$

$$a_d = 0.1 \sim M, \langle \kappa_{CR0} \rangle = 10^{-17} \text{ с}^{-1}, L_{XR} = 10^{30} \text{ эрг/с}$$

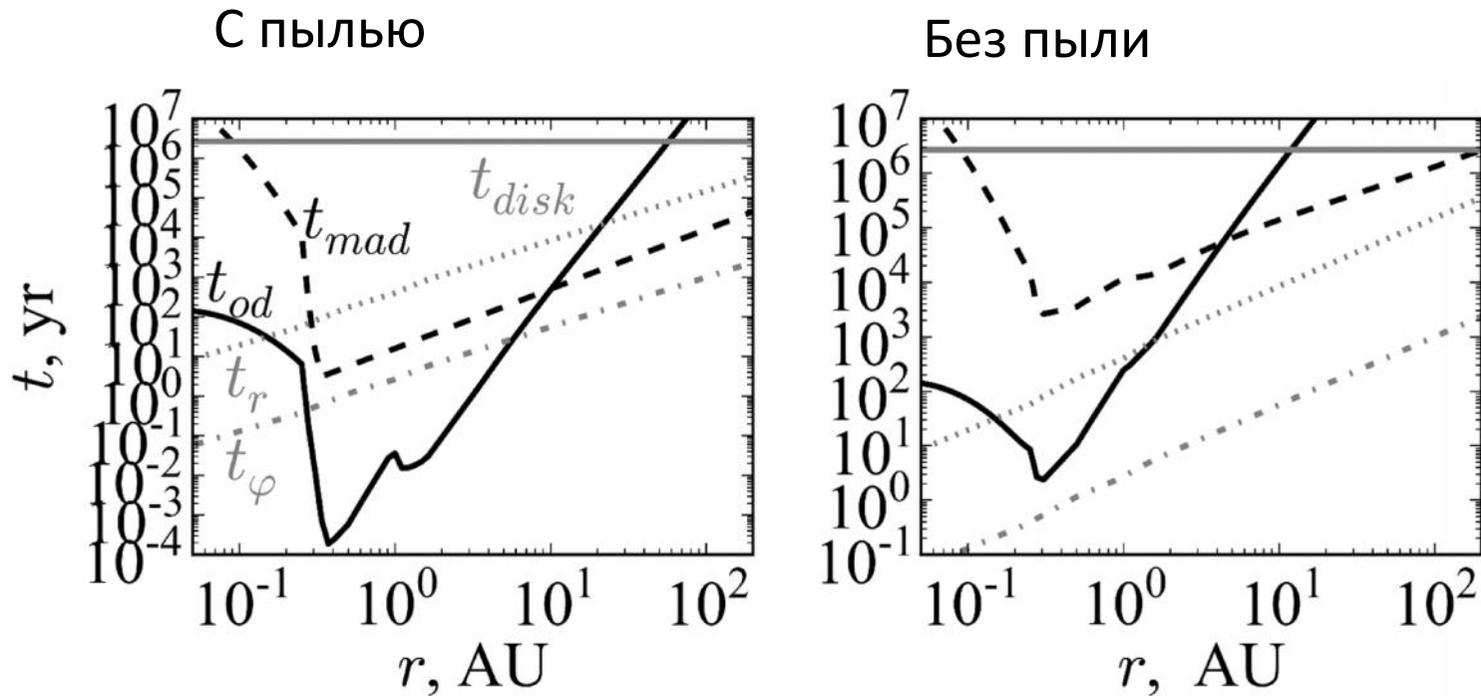
Вертикальное магнитное поле, магнитная амбиполярная диффузия



- *Вмороженное* магнитное поле
- *Магнитная амбиполярная диффузия* уменьшает поле на 1 порядок

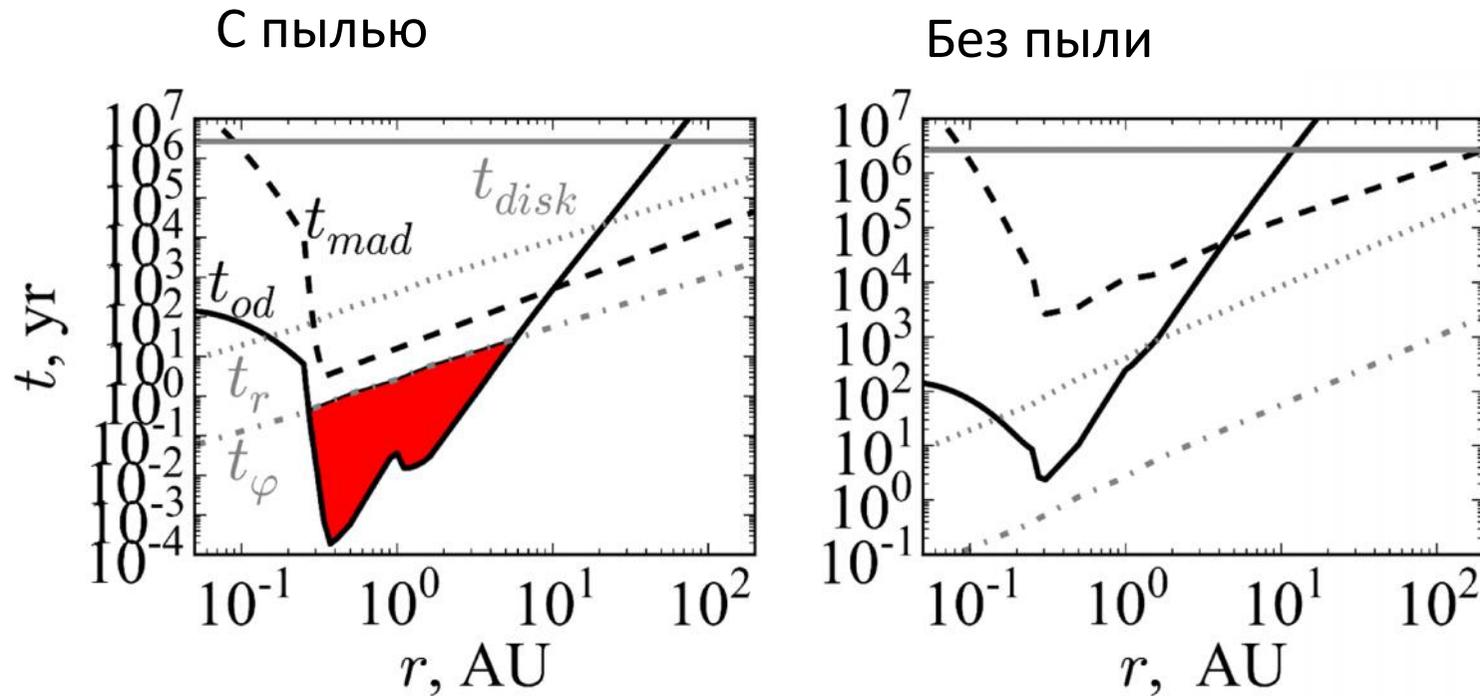
Области эффективной диффузии магнитного поля

Анализ характерных времен



Области эффективной диффузии магнитного поля

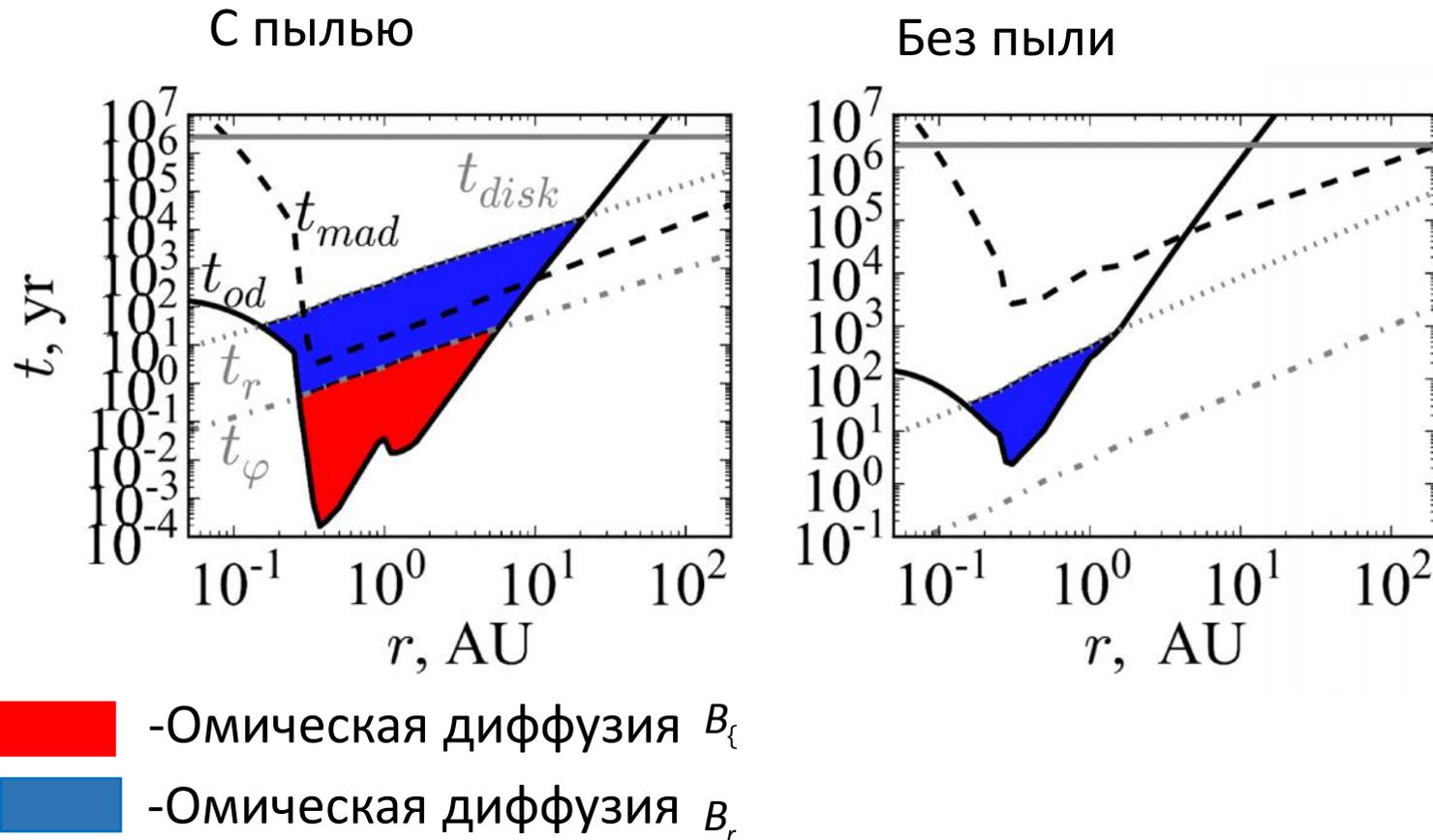
Анализ характерных времен



-Омическая диффузия B_ζ

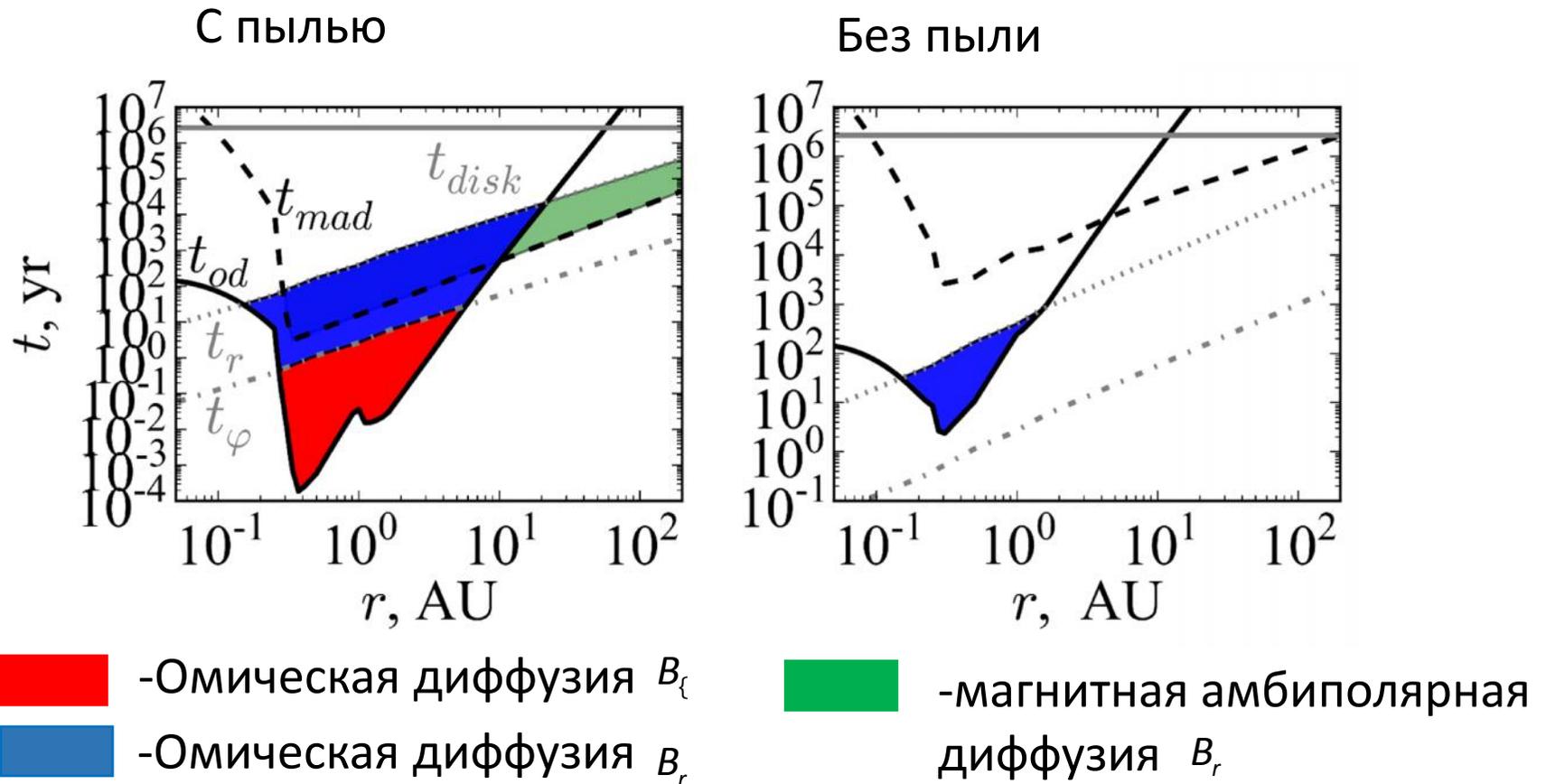
Области эффективной диффузии магнитного поля

Анализ характерных времен



Области эффективной диффузии магнитного поля

Анализ характерных времен



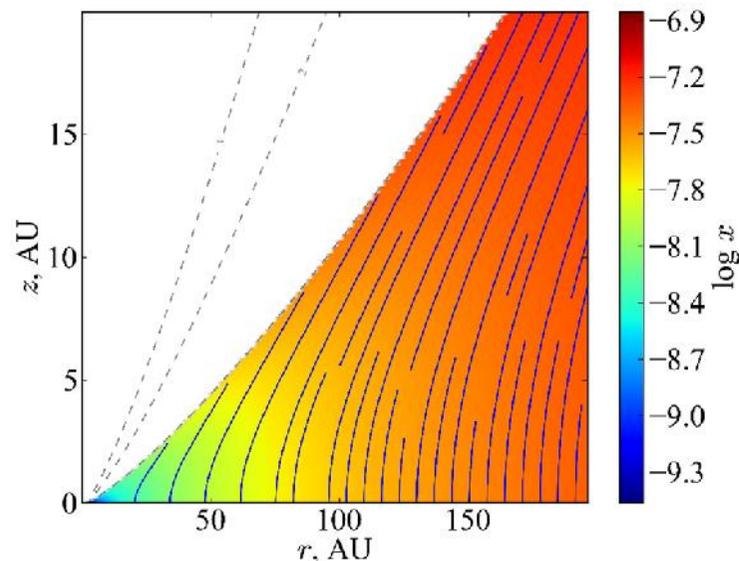
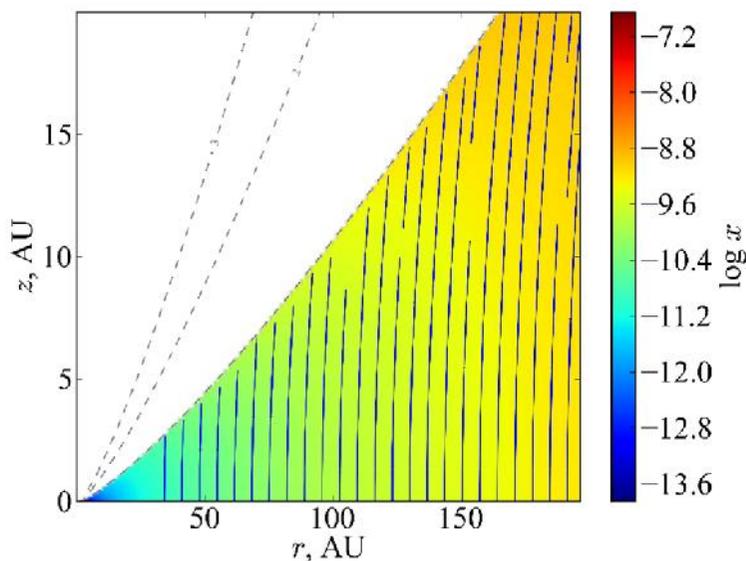
Результаты.

Величина и геометрия магнитного поля

Влияние пыли на геометрию магнитного поля

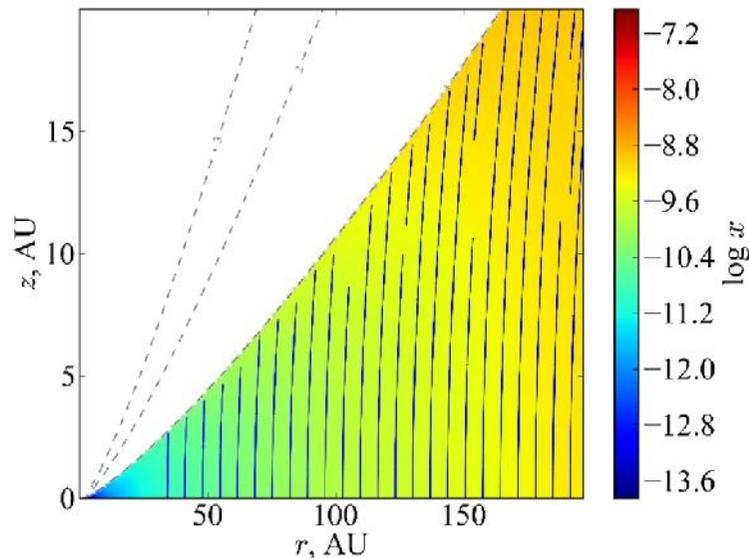
С учетом пыли, 0.1 мкм

Без учета пыли

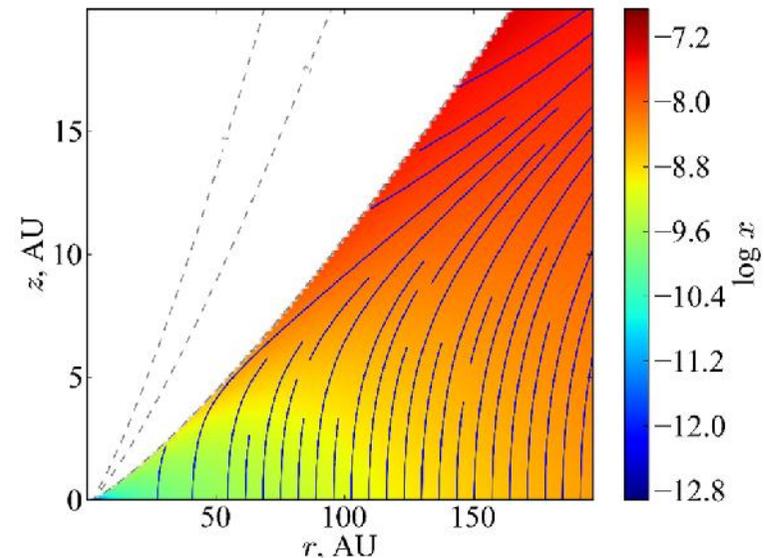


Влияние скоростей ионизации на геометрию магнитного поля

$$\langle_{CR0} = 10^{-17} \text{ с}^{-1}, L_{XR} = 10^{30} \text{ эрг/с}$$



$$\langle_{CR0} = 10^{-17} \text{ с}^{-1}, L_{XR} = 10^{32} \text{ эрг/с}$$

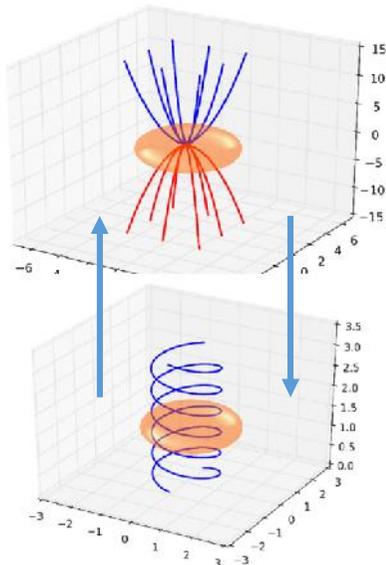


Влияние эффекта Холла на геометрию магнитного поля

- Эффект Холла

- Омическая амбиполярная диффузия

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}[\mathbf{V}, \mathbf{B}] - \text{rot} \left(\frac{c}{4\pi en_e} [\text{rot} \mathbf{B}, \mathbf{B}] + \eta \text{rot} \mathbf{B} \right)$$

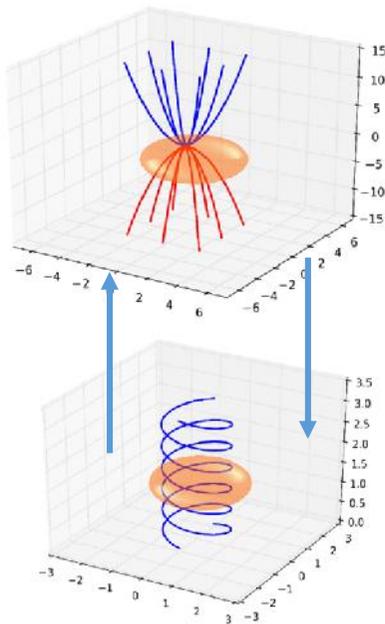


$$\frac{\partial \mathbf{B}_\rho}{\partial t} + (\mathbf{v}_\rho \nabla) \mathbf{B}_\rho = (\mathbf{B}_\rho \nabla) \left(\mathbf{v}_\rho - \frac{c}{4\pi en_e} \text{rot}(B_\varphi \mathbf{e}_\varphi) \right) - \mathbf{B}_\rho \text{div} \mathbf{v}_\rho + \eta \Delta \mathbf{B}_\rho$$

$$\frac{\partial B_\zeta}{\partial t} + (\mathbf{v}_\rho \nabla) B_\zeta = (\mathbf{B}_\rho \nabla) \left(v_\zeta - \frac{c}{4\pi en_e} \text{rot} \mathbf{B}_\rho \right) - B_\zeta \text{div} \mathbf{v}_\rho + \eta \left(\Delta B_\varphi - \frac{B_\varphi}{r^2} \right)$$

Влияние эффекта Холла на геометрию магнитного поля

Уравнения для азимутального и радиального поля с учетом эффекта Холла, в приближениях модели



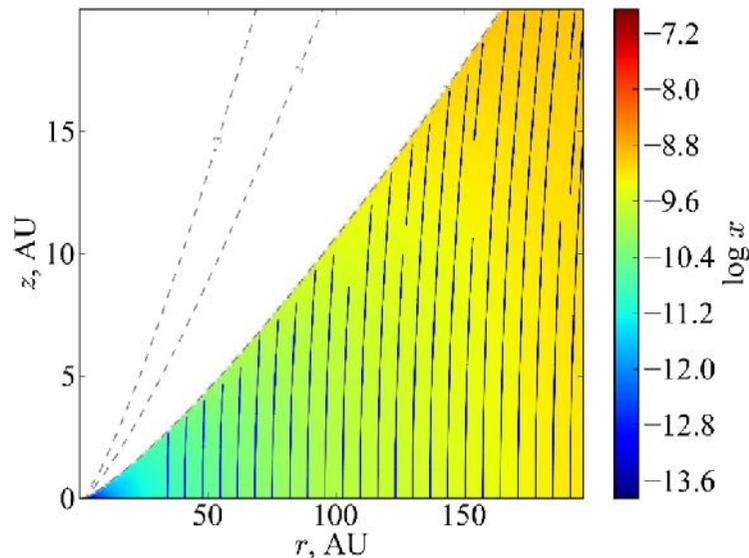
$$V_r z B_z = -y B_r + y_H B_\phi$$

$$-\frac{3}{2} \left(\frac{H}{r} \right)^2 V_k z B_z = -\eta B_\phi + \eta_H B_r$$

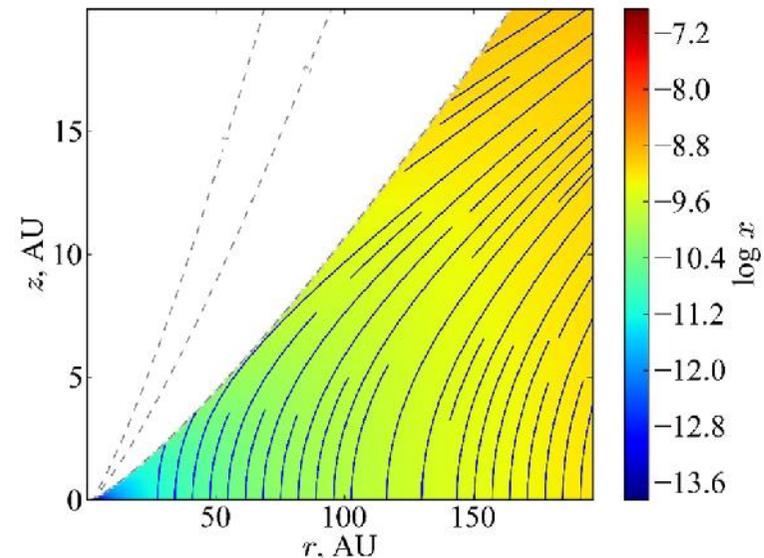
Влияние эффекта Холла на геометрию магнитного поля

Без учета эффекта Холла

С учетом эффекта Холла



магнитное поле --
квазиполоидальное



магнитное поле --
квазирадиальное

Заключение

В присутствии пыли можно выделить 3 области

- *Область тепловой ионизации*: магнитное поле заморожено, квази-азимутальное
- *«мертвые» зоны*: квази-полоидальная геометрия вследствие эффективной омической диффузии. Магнитная амбиполярная диффузия уменьшает остаточное поле на порядок по сравнению с замороженным. Ослабление поля способствует образованию планет
- *Внешние области*: квази-азимутальное. Становится квази-радиальным при повышенных скоростях ионизации, при учете эффекта Холла, что может способствовать образованию истечений

В отсутствие пыли магнитное поле заморожено, динамически сильное

Спасибо за внимание!