

ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ

Дудоров А.Е.¹, Хайбрахманов С.А.^{1,2*}

¹Кафедра теоретической физики, ЧелГУ, Челябинск

²Коуровская астрономическая обсерватория, УрФУ, Екатеринбург

*e-mail: khaibrakhmanov@csu.ru

План доклада

1. Современное звездообразование
2. Модель
 1. Основные уравнения
 2. Численный код Enlil
3. Результаты
 1. Образование диска
 2. Степень ионизации в диске
 3. Магнитное поле в диске
4. Заключение

Современное звездообразование

ЯДРО МОЛЕКУЛЯРНОГО ОБЛАКА
(ПРОТОЗВЕЗДНОЕ ОБЛАКО)

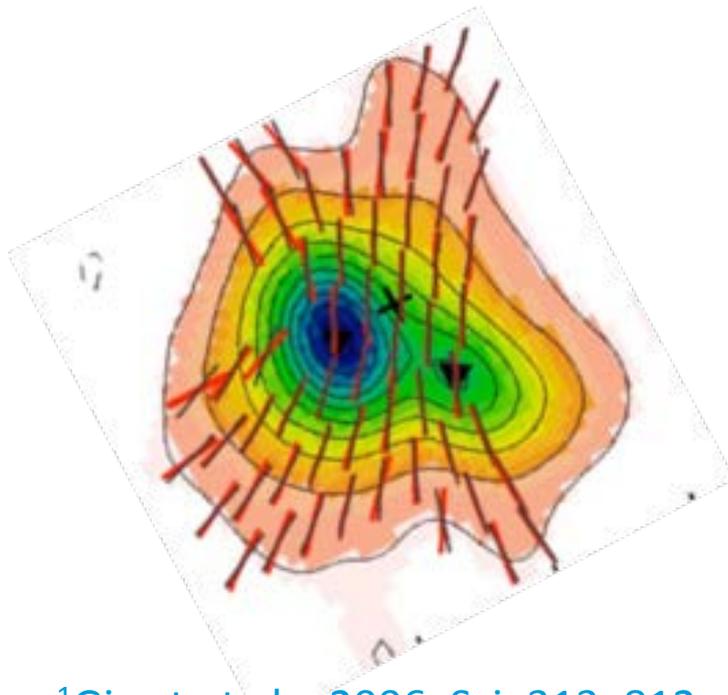
ЗВЕЗДА С ПРОТОПЛАНЕТНЫМ
ДИСКОМ



Фото: Hubble Heritage Team
(STScI/AURA), NASA

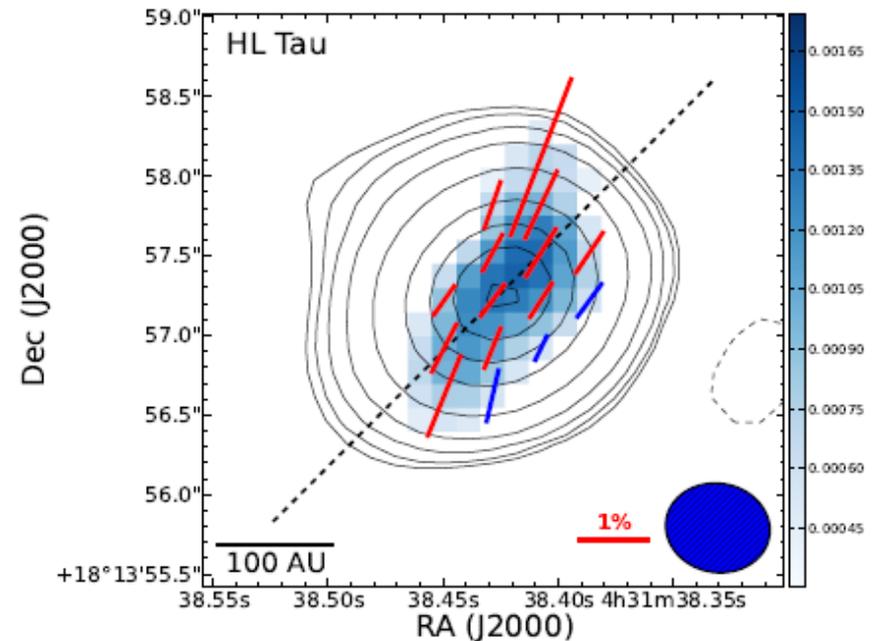
Магнитное поле молодых звездных объектов (МЗО)

ЯДРО МОЛЕКУЛЯРНОГО
ОБЛАКА NGC 1333 IRAS 4A¹



¹Girart et al., 2006, Sci, 313, 812

ПРОТОПЛАНЕТНЫЙ ДИСК HL TAU²



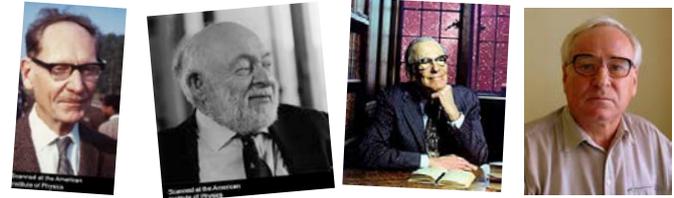
²Stephens et al., 2014, Nat, 514, 597

Магнитное поле МЗО

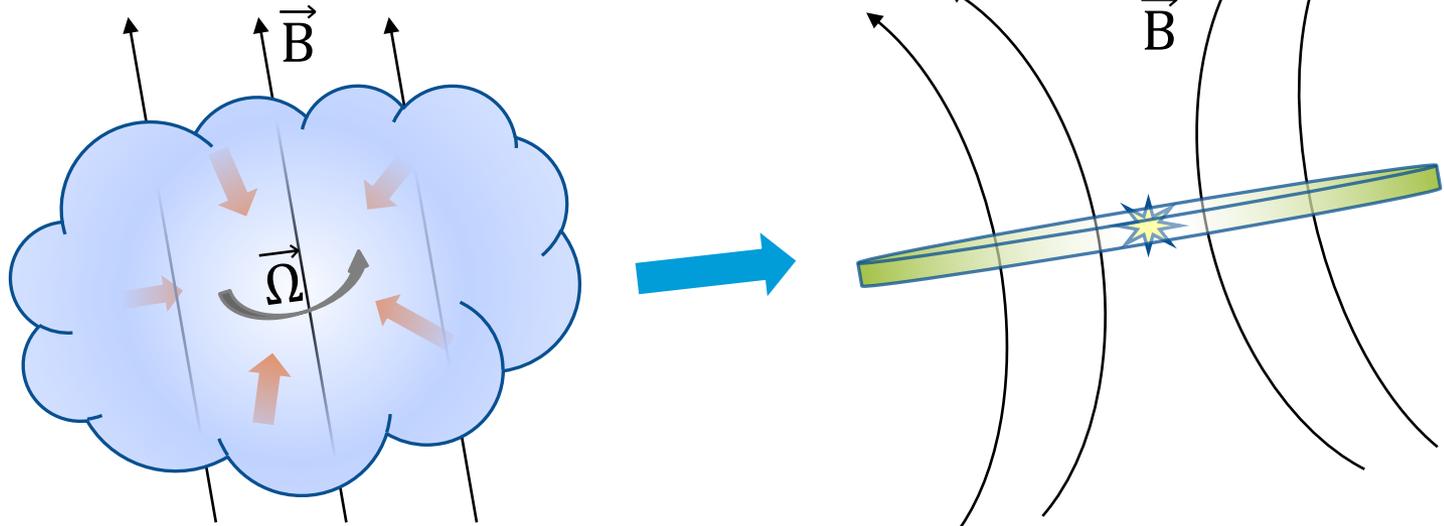
Э!

объект	В, Гс	метод	ссылка
Протозвездные облака	$10^{-4} - 10^{-5}$	Зееман	Crutcher et al., 2004, ApJ, 600, 279
Аккреционный диск FU Ori	10^3	Зееман	Donati et al., 2005, Nat, 438, 466
Звезды типа Т Тельца	1000 – 3000	Зееман	Yang & Johns-Krull, 2011, ApJ, 729, 83
Протосолнечная туманность	0.1 – 1	Остаточная намагниченность	Levy, 1978, Nat, 26, 481

Теория остаточного магнитного поля



- Магнитный поток, $\int \vec{B} d\vec{s}$, протозвездных облаков частично сохраняется в процессе звездообразования
- Магнитное поле молодых звезд с аккреционными дисками является *остаточным*^{1,2}



¹Dudorov, 1995, ARep, 39, 790

²Dudorov, Khaibrakhmanov, 2015, AdSpRes, 55, 843

Основные уравнения

МГД с учетом омической диффузии и магнитной амбиполярной диффузии

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{4\pi\rho} [\text{rot } \vec{B} \times \vec{B}] - \nabla \Phi, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{rot}[(\vec{v} + \vec{v}_{ad}) \times \vec{B}] - \text{rot}(v_m \text{rot } \vec{B}), \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \varepsilon \right] + P \nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (4)$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho, \quad (5)$$

Уравнение состояния: $P = (\gamma - 1)\varepsilon\rho$

Диффузия магнитного поля

- Омическая диффузия – затухание токов проводимости

$$\nu_m = \frac{c^2}{4\pi\sigma_e}, \quad (8)$$

$$\sigma_e = \frac{e^2 n_e}{m_e \nu_{en}}, \quad (9)$$

где e и m_e это заряд и масса электрона, n_e – концентрация электронов, $\nu_{en} = \langle \sigma v \rangle_{en} n_n$ – частота столкновений электронов с нейтральными частицами, $\langle \sigma v \rangle_{en} = 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$.

- Магнитная амбиполярная диффузия – дрейф плазмы сквозь нейтральный газ под действием э.м. силы

$$\vec{v}_{ad} = \frac{\text{rot } \vec{B} \times \vec{B}}{4\pi R_{in}} \quad (7)$$

Степень ионизации

Уравнение ионизации¹

$$(1 - x_s)\xi = \alpha_r x_s^2 n + \alpha_g x_s n, \quad (6)$$

- $x_s = n_e / (n_e + n_i + n_n)$ – степень ионизации
- ξ – скорость ионизации
- α_r – скорость лучистых рекомбинаций
- α_g – скорость рекомбинаций на пылинках

Учитывается ионизация космическими лучами, радиоактивными элементами, испарение пылинок.

¹Дудоров, Сазонов, 1987, Науч.инф., 63, 68

Численный код

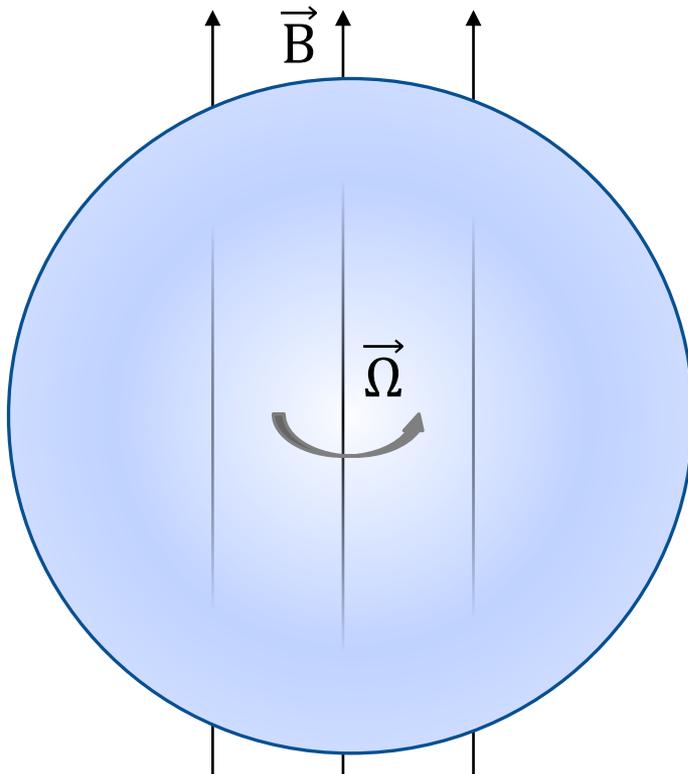
- *Enlil* – двумерный код для моделирования осесимметричных МГД-течений¹
- Основан на квази-монотонной TVD-схеме повышенного порядка точности. Используется HLLD-решатель
- Очистка дивергенции магнитного поля – метод обобщенных множителей Лагранжа
- Уравнение Пуассона – метод переменных направлений
- Диффузионная часть уравнения индукции – полностью неявная абсолютно устойчивая схема²

¹Дудоров, Жилкин, Кузнецов, 1999, Матем.Мод, 11(11), 109

²Жилкин, Павлюченков, Замоздра, 2009, Астрон. Ж., 86(7), 638

Постановка задачи и параметры

Рассматривается однородное вращающееся сферическое облако с однородным магнитным полем



$$n_0 = 4.1 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$$

$$M = 1 M_{\odot}$$

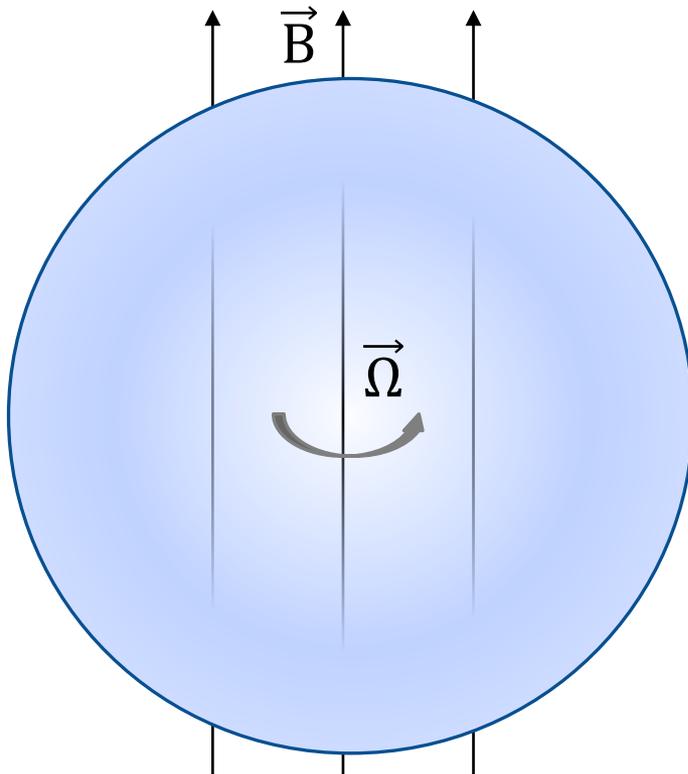
$$R = 0.022 \text{ пк}$$

$$B_0 = 1.4 \times 10^{-4} \text{ Гс}$$

$$T = 10 \text{ К}$$

Постановка задачи и параметры

Рассматривается однородное вращающееся сферическое облако с однородным магнитным полем

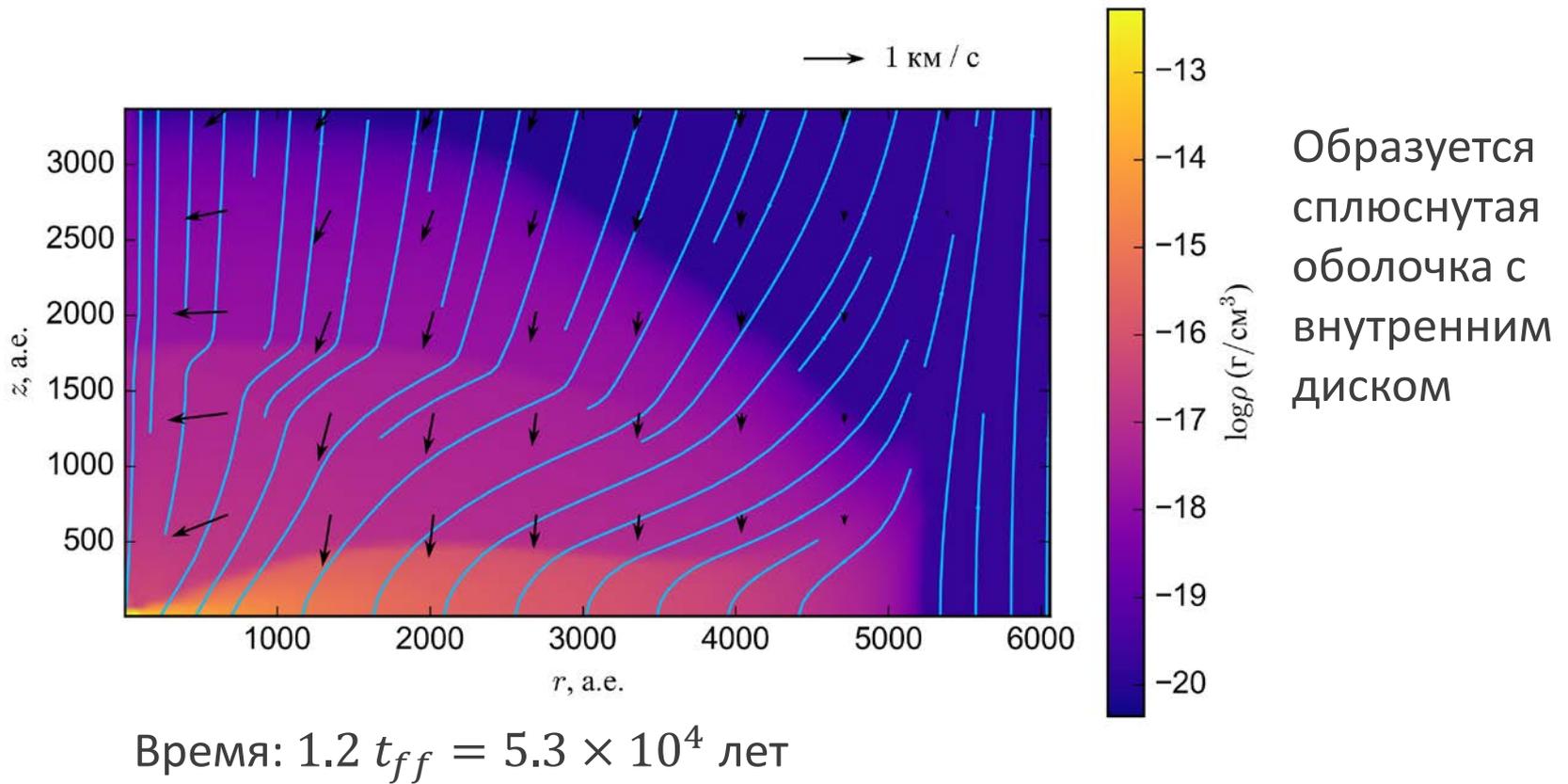


- Изотермический коллапс: $\gamma = 1.001$

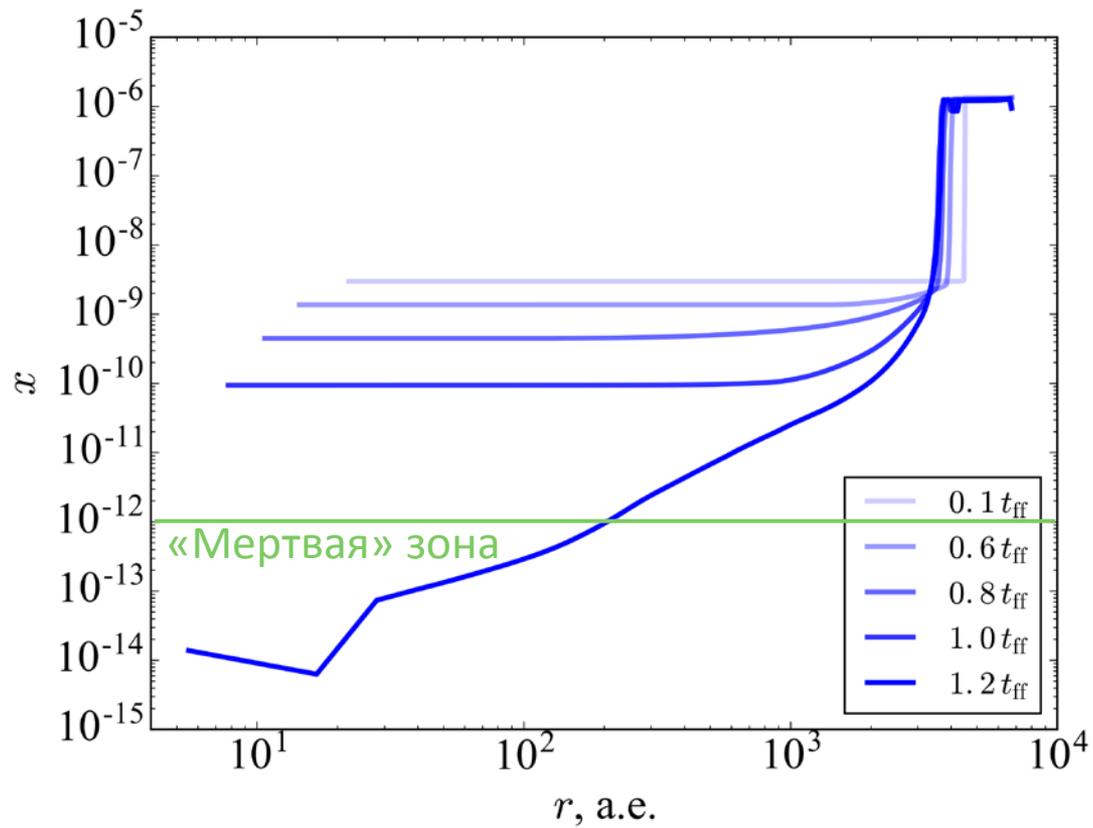
$$\frac{E_{th}}{E_G} = 0.3 \quad \frac{E_{\Omega}}{E_G} = 0.025 \quad \frac{E_B}{E_G} = 0.4$$

- Число Куранта = 0.1
- Разрешение: 150×150

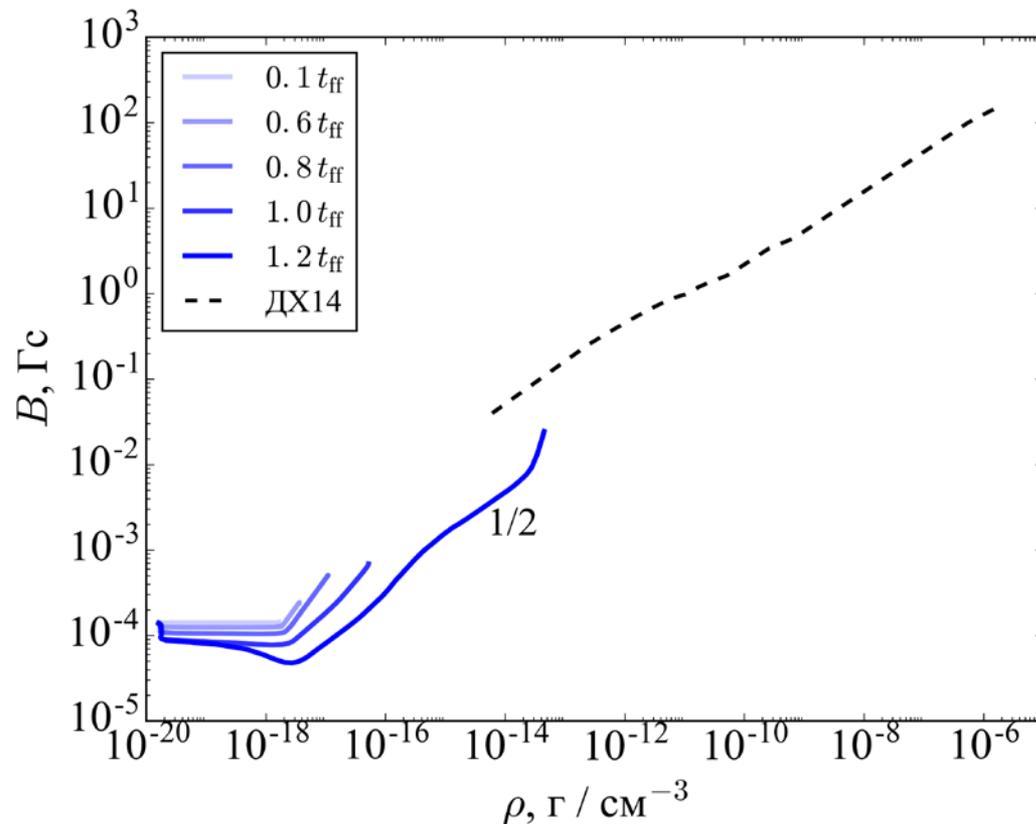
Образование протозвездного диска



Степень ионизации в диске



Магнитное поле в протозвездном диске

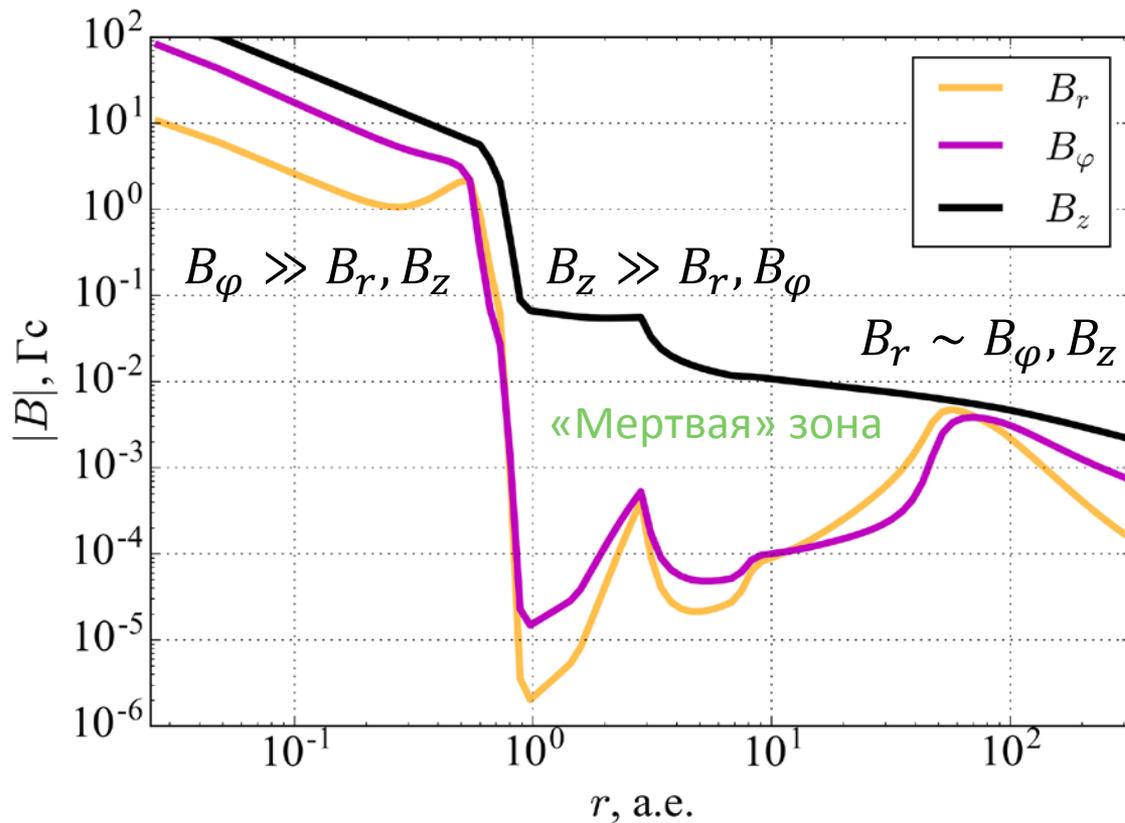


$B \propto \rho^{1/2}$ -
магнито-статическое
сжатие

Подтверждает
предположения
кинематической
МГД-модели
Дудорова и
Хайбрахманова¹

¹Dudorov, Khaibrakhmanov, 2014, ApSS, 352(1), 103

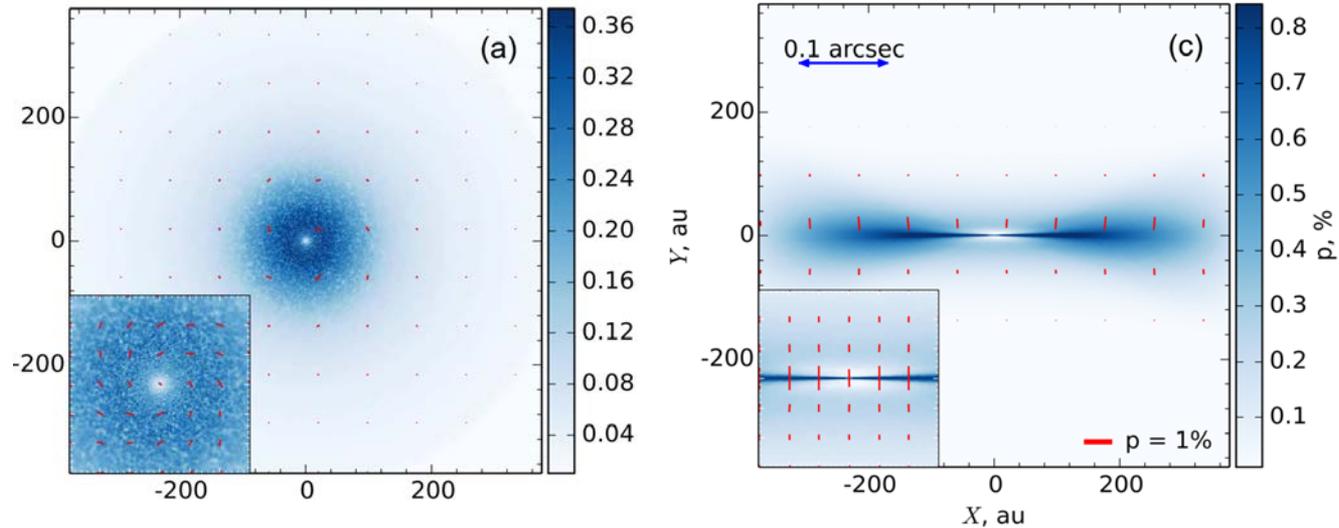
Магнитное поле в аккреционном диске



Расчет с помощью кинематической МГД-модели с учетом ОД, МАД, плавучести и эффекта Холла¹

¹Khaibrakhmanov et al, 2017, MNRAS, 454, 586

Синтетические карты поляризованного излучения 1.3 мм



- «Мертвая» зона может наблюдаться как область наиболее низкой степени поляризации

Khaibrakhmanov et al., 2017, MNRAS, 464, 586

Заключение

1. Проведены расчеты коллапса вращающегося протозвездного облака с сильным магнитным полем. В коде реализована модель расчета степени ионизации с учетом лучистых рекомбинаций и рекомбинаций на пылевых частицах.
2. Сжатие облака приводит к образованию сплюснутой оболочки с внутренним диском. Соотношение осей оболочки 1:2, радиус внутреннего протозвездного диска – 1000-3000 а.е., отношение толщины внутреннего диска к радиусу 1:10.
3. Сразу после образования внутреннего диска в нем формируется «мертвая» зона – область низкой степени ионизации и эффективной диффузии магнитного поля.
4. Зависимость интенсивности магнитного поля от плотности в диске $B \propto \rho^{1/2}$. Это подтверждает предположения кинематической МГД-модели аккреционных дисков Дудорова и Хайбрахманова.

Спасибо
за внимание!

