



Челябинский
государственный
университет



Primum mobile in saecula saeculorum



Уральский
федеральный
университет
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Моделирование изотермического коллапса замагниченных вращающихся протозвездных облаков

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

¹ЧелГУ, Челябинск

²УрФУ, Екатеринбург

План доклада

- Стадии звездообразования
- Первичный протозвездный диск
- Модель протозвездного облака и его характеристики
- Определение границ первичного диска
- Выводы

Этапы звездообразования

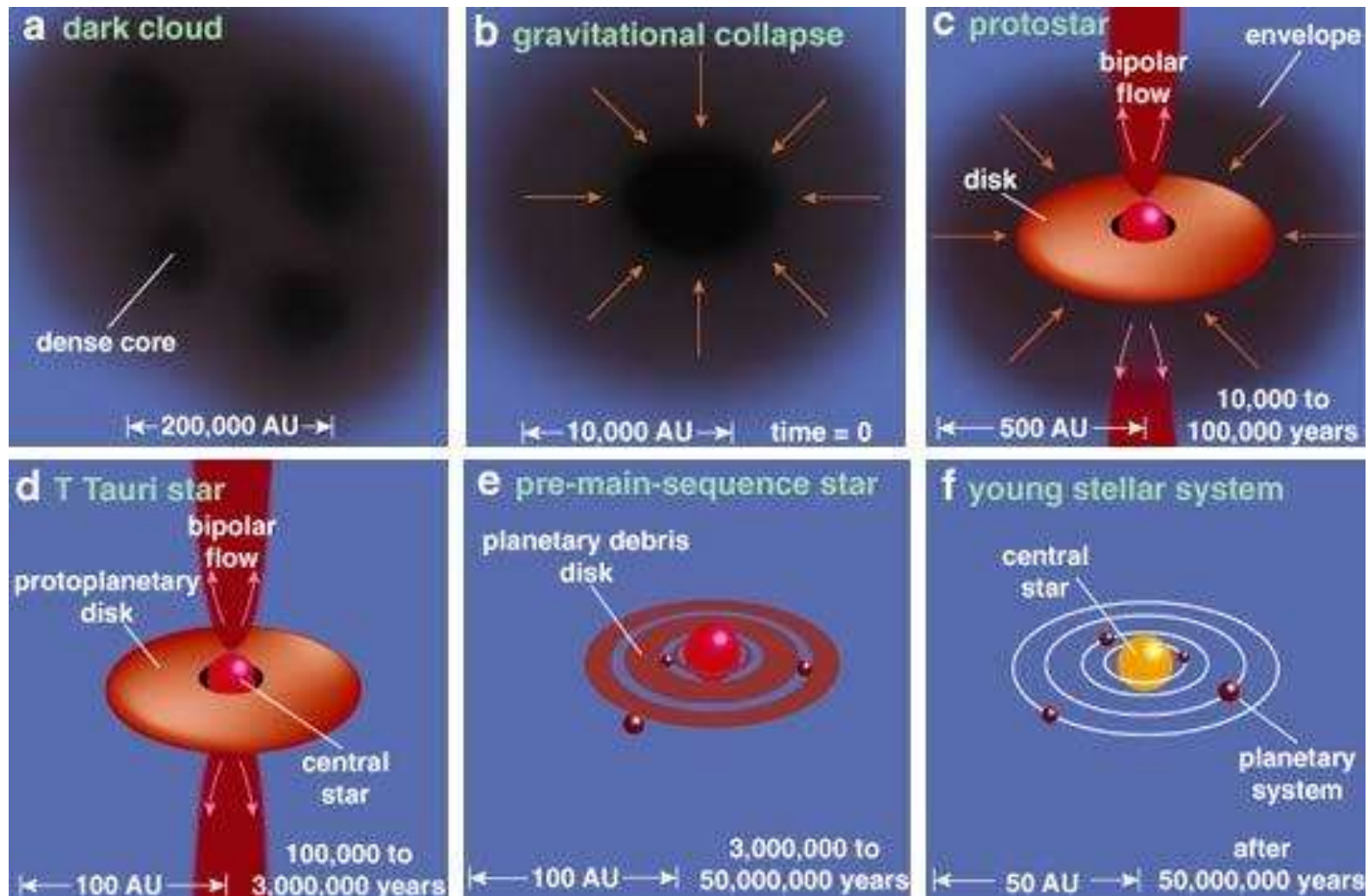


Рис.1. Стадии звездообразования.
credit: Green, 2001

Этапы звездообразования

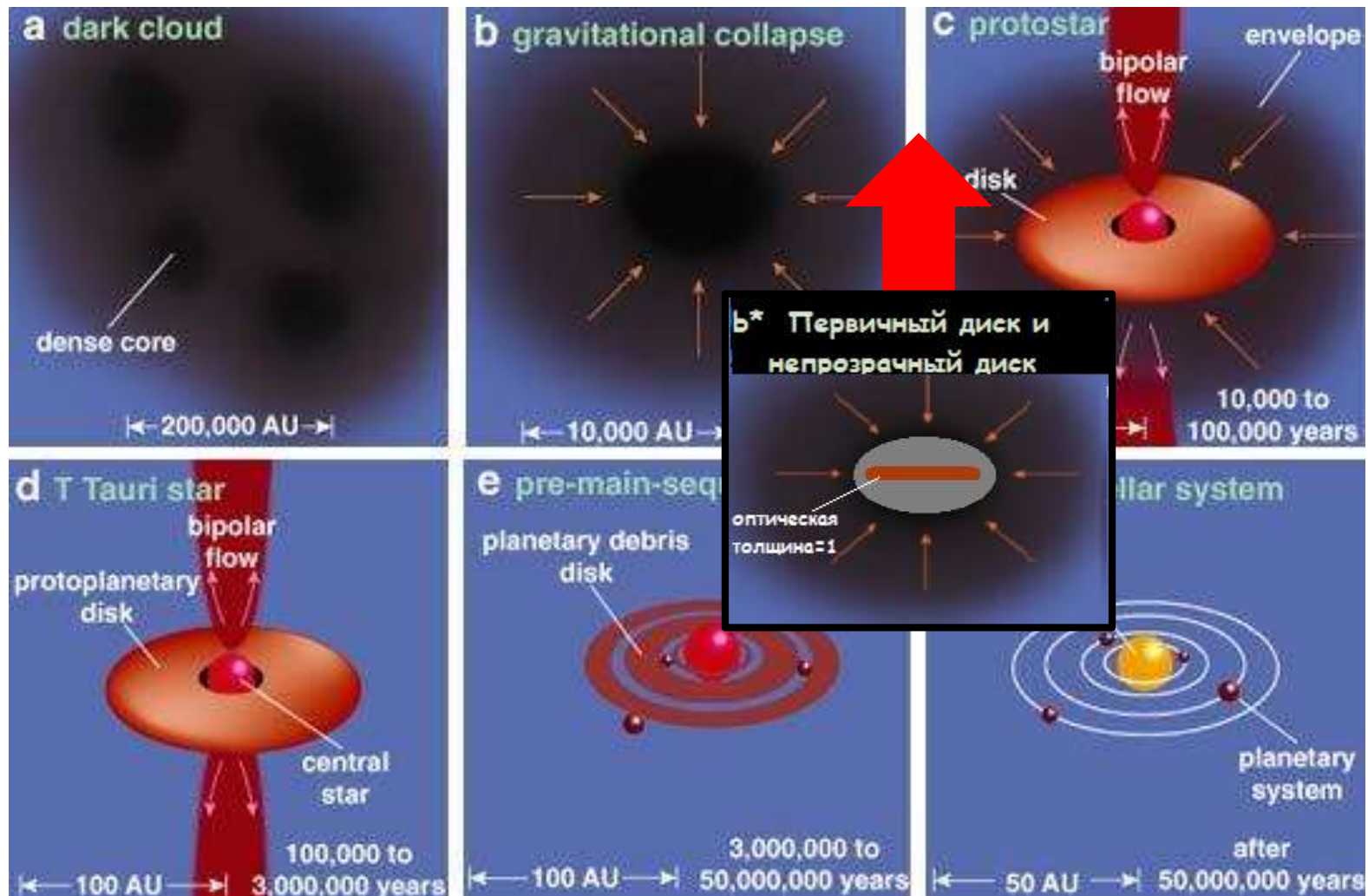
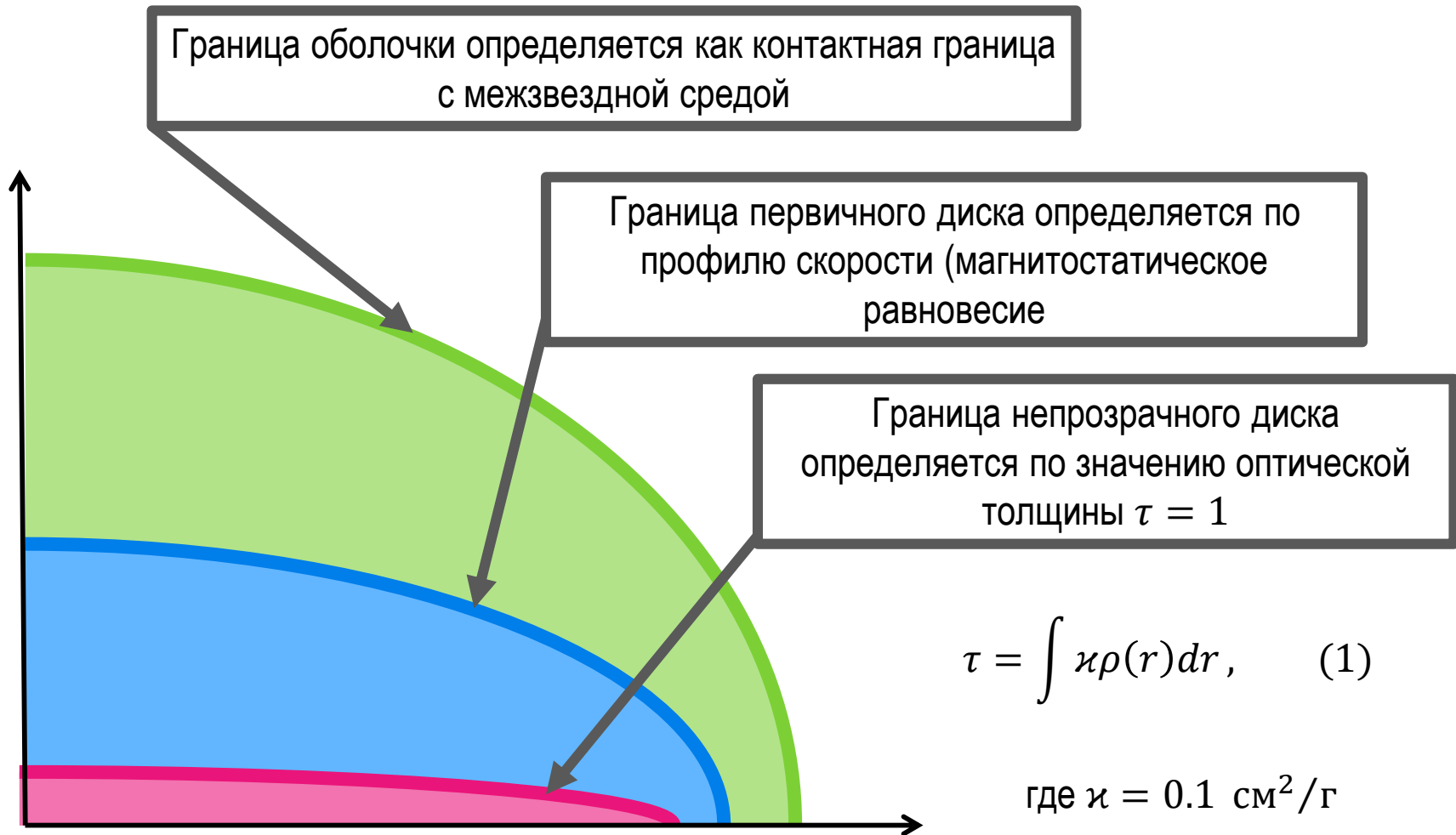


Рис.1. Стадии звездообразования.
credit: Green, 2001

Структура протозвездного облака в конце стадии изотермического коллапса



Дудоров А.Е., Сазонов Ю.В, Гидродинамика коллапса межзвездных облаков.
2. Роль магнитного поля., 1982

Характеристики протозвездных облаков



Рис.2. Звездообразование в туманности
Тарантул.

Авторы и редакторы: Robert
Nemiroff (MTU) & Jerry
Bonnell (USRA). NASA Web Site .

$$M = 0.3 \div 10^4 M_{\odot}$$

$$T = 10 \div 100 K$$

$$R = 0.03 \div 15 \text{ пк}$$

$$B = 10^{-4} \div 10^{-5} \text{ Гс}$$

$$n = 10^3 \div 10^6 \text{ см}^{-3}$$

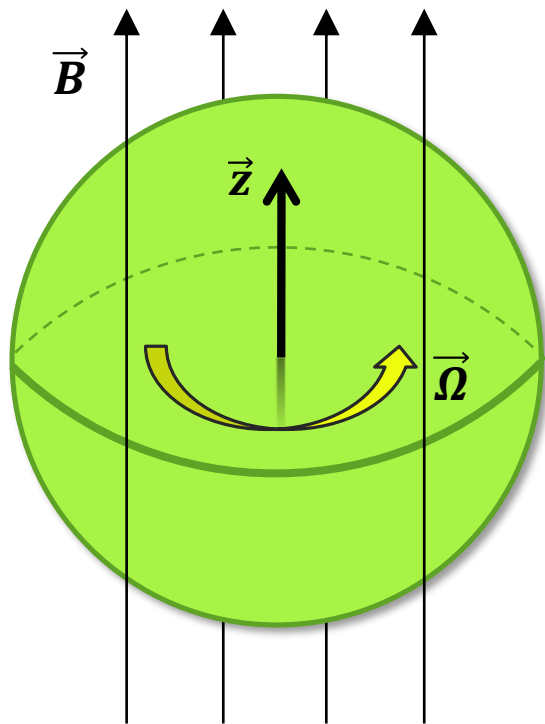
Литература:

- 1) Дудоров А.Е., Свойства иерархии межзвездных магнитных облаков // *Астрономический журнал*, 1991, Т. 68, 4, 695-708с.
- 2) Bergin E.A., Tafalla M., Cold dark clouds: The Initial Conditions for Star Formation, 2007, arXiv:0705.3765v1 [astro-ph]
- 3) Crutcher R., Observations of Magnetic Fields in Molecular Clouds // *ApJ*, 2004, V. 600, P. 279
- 4) Andre P. et al, Submillimeter continuum observations of ρ ophiuchi A: The candidate protostar VLA 1623 and prestellar clumps // *ApJ*, 406:1993, P.122-141

Модель протозвездного облака

Рассматривается однородное сферически-симметричное вращающееся протозвездное облако в однородном магнитном поле.

Начальные характеристики:



$$M_0 = 10 M_{\odot}$$

$$0.1 \leq \varepsilon_t \leq 0.9$$

$$n = (10^3 \div 10^5 \text{ см}^{-3})$$

$$0 \leq \varepsilon_m \leq 0.6$$

$$T = 20 \text{ K}$$

$$0 \leq \varepsilon_{\Omega} \leq 0.04$$

$$\varepsilon_t = \frac{E_t}{|E_g|} \quad (2) \text{ Тепловой параметр}$$

$$\varepsilon_m = \frac{E_m}{|E_g|} \quad (3) \text{ Магнитный параметр}$$

$$\varepsilon_{\Omega} = \frac{E_{\Omega}}{|E_g|} \quad (4) \text{ Вращательный параметр}$$

Рис.3. Схематическое представление модели протозвездного облака

Основные уравнения

Уравнения МГД с учетом омической и амбиполярной диффузии¹:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{1}{4\pi\rho} (\text{rot} \vec{B} \times \vec{B}) - \nabla \Phi \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{rot}[(\vec{v} + \vec{v}_{ad}) \times \vec{B}] - \text{rot}(v_m \text{rot} \vec{B}) \quad (7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \varepsilon \right) + P \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \quad (9)$$

Уравнение состояния: $P = (\gamma - 1)\rho\varepsilon \quad (10)$

Расчет выполняется численно двумерным МГД-кодом Enlil²

1) Жилкин А.Г., Павлюченков Я.Н., Замоздра С.Н., Моделирование протозвездных облаков и их наблюдательных проявлений. // *Астрономический журнал*, 2009, Т.86, №7.

2) Дудоров А.Е., Жилкин А.Г., Кузнецов О.А., Двумерный численный код для осесимметричных самогравитирующих МГД-течений // *Матем. Моделирование*, 1999, 109–127с.

Расчеты

№	Расчет	R_0 пк	n_0 1/см ³	ε_t	ε_m	ε_ω	Σ	t, t_{ff}	$t,$ млн лет	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	t1m0w0	0.04	$7.00 \cdot 10^5$	0.10	0	0	0.10	0.965	0.039	
2	t3m0w0	0.1	$4.00 \cdot 10^4$	0.28	0	0	0.28	0.993	0.167	
3	t3m0w01					0.01	0.30	1.011	0.170	
4	t3m0w04					0.04	0.36	1.055	0.178	
5	t3m01w0				0.01	0	0.30	0.993	0.167	
6	t3m01w01					0.01	0.32	1.012	0.170	
7	t3m01w04					0.04	0.37	1.055	0.178	
8	t3m2w0					0.23	0	0.51	1.082	0.182
9	t3m2w01						0.01	0.53	1.095	0.184
10	t3m2w04						0.04	0.59	1.126	0.190
11	t3m6w0				0.6	0	0.88	1.305	0.220	
12	t3m6w01					0.01	0.90	1.317	0.222	
13	t3m6w04					0.04	0.96	1.348	0.227	
14	t6m0w0				0.22	$4.00 \cdot 10^3$	0.59	0	0	0.59
15	t9m0w0	0.33	$1.15 \cdot 10^3$	0.91	0	0	0.91	1.234	1.226	
16	t9m0w01					0.01	0.93	1.303	1.294	
17	t9m0w04					0.04	0.99	1.515	1.505	
18	t9m01w0				0.01	0	0.92	1.264	1.256	
19	t9m01w01					0.01	0.94	1.335	1.326	
20	t9m01w04					0.04	0.94	1.391	1.252	
21	t7m2w0	0.26	$2.4 \cdot 10^3$	0.70	0.23	0	0.93	1.359	0.935	
22	t7m2w01					0.01	0.95	1.394	0.959	
23	t7m2w04					0.04	0.98	1.431	0.984	

В 13 расчетах из 23
в результате коллапса
образовался
первичный диск

1. Коллапс невращающегося облака со слабым магнитным полем

$$\varepsilon_t = 0.28 \quad \varepsilon_m = 0.01 \quad \varepsilon_\Omega = 0 \quad \xi = \frac{\Delta r - \Delta x}{\Delta r} \quad (11)$$

Степень сплюснутости оболочки:
 $\xi_{cloud} = 0.017$

Степень сплюснутости центральной области:
 ≈ 0.25

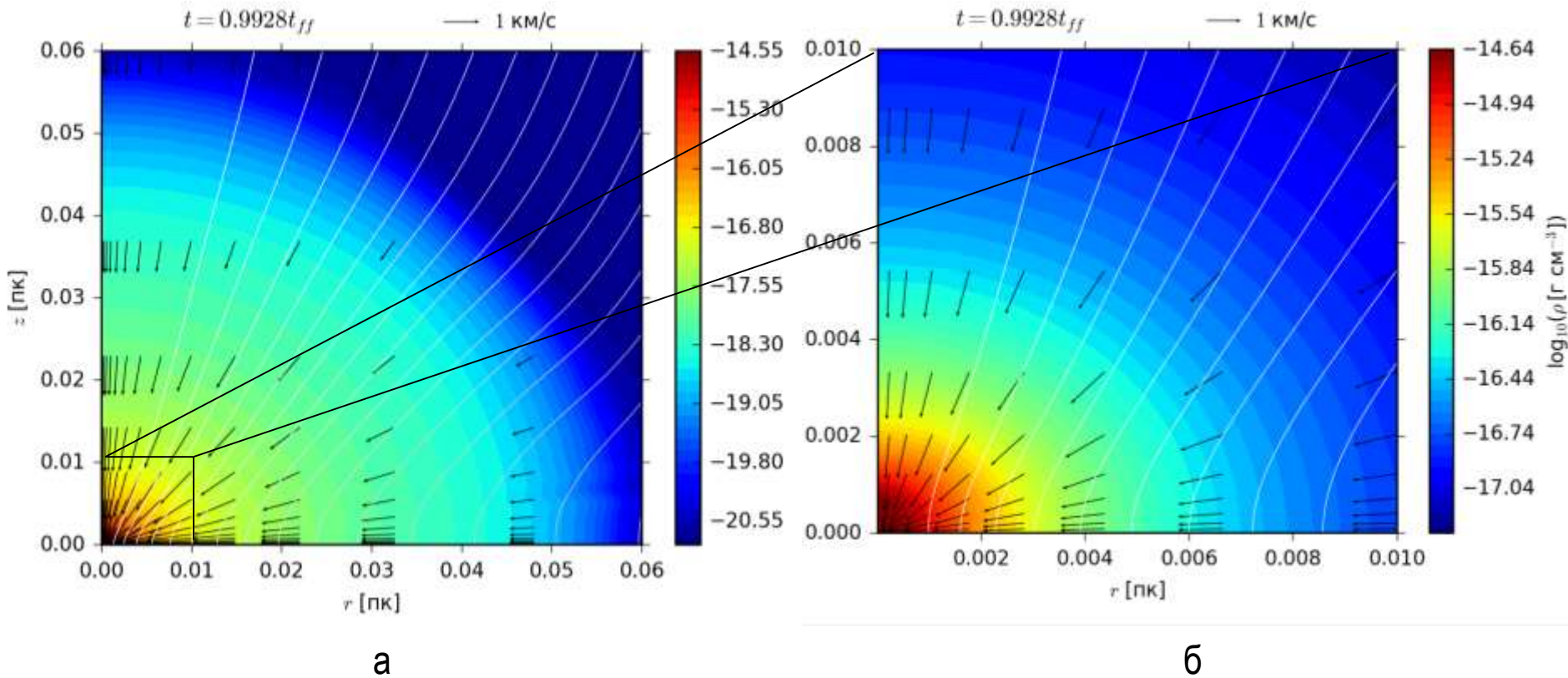


Рис.4. Распределение плотности (заливка цветом), магнитного поля (белые линии) и скорости (стрелки) в протозвездном облаке для расчета t3m01w0.
а) В масштабе всего облака. б) Центральная область облака.

1. Коллапс невращающегося облака со слабым магнитным полем

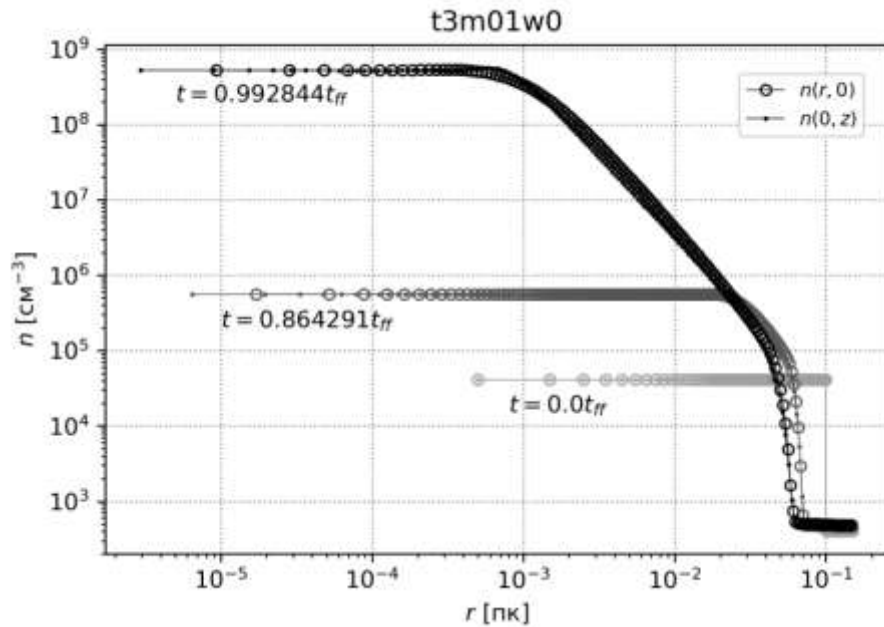


Рис.5. Профили плотности вдоль оси r (сплошные линии с маркерами-кружками) и оси z (сплошными линиями с маркерами-точками) для расчета t9m08w01 в моменты времени: $0.0 t_{ff}$ (линии светло серого цвета); $0.86 t_{ff}$ (линии серого цвета); $0.99 t_{ff}$ (линии черного цвета).

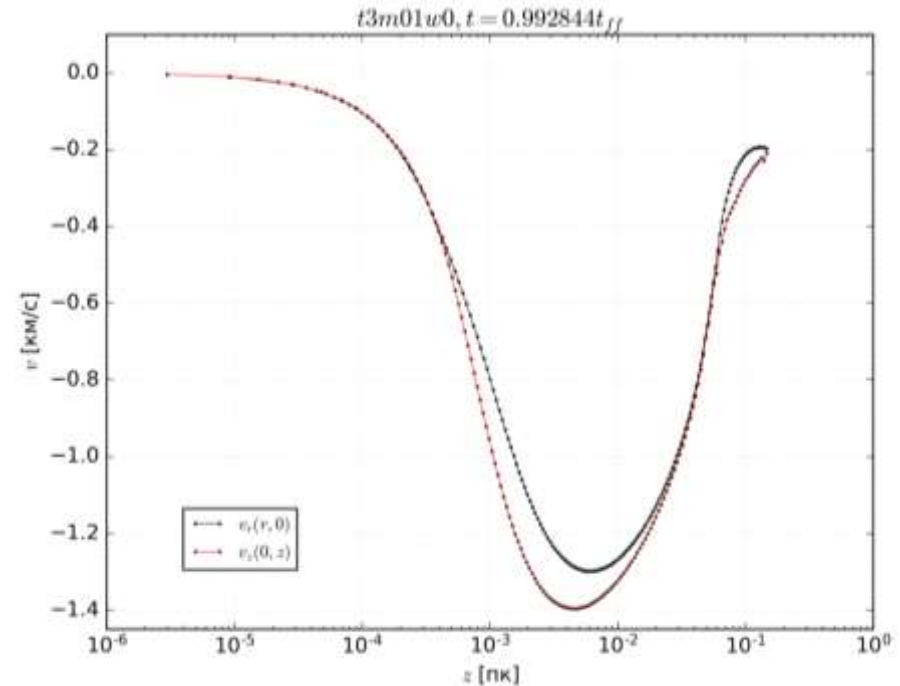


Рис.6. Профили скорости вдоль экваториальной плоскости (черная линия), вдоль оси вращения (красная линия) в момент времени $0.99 t_{ff}$

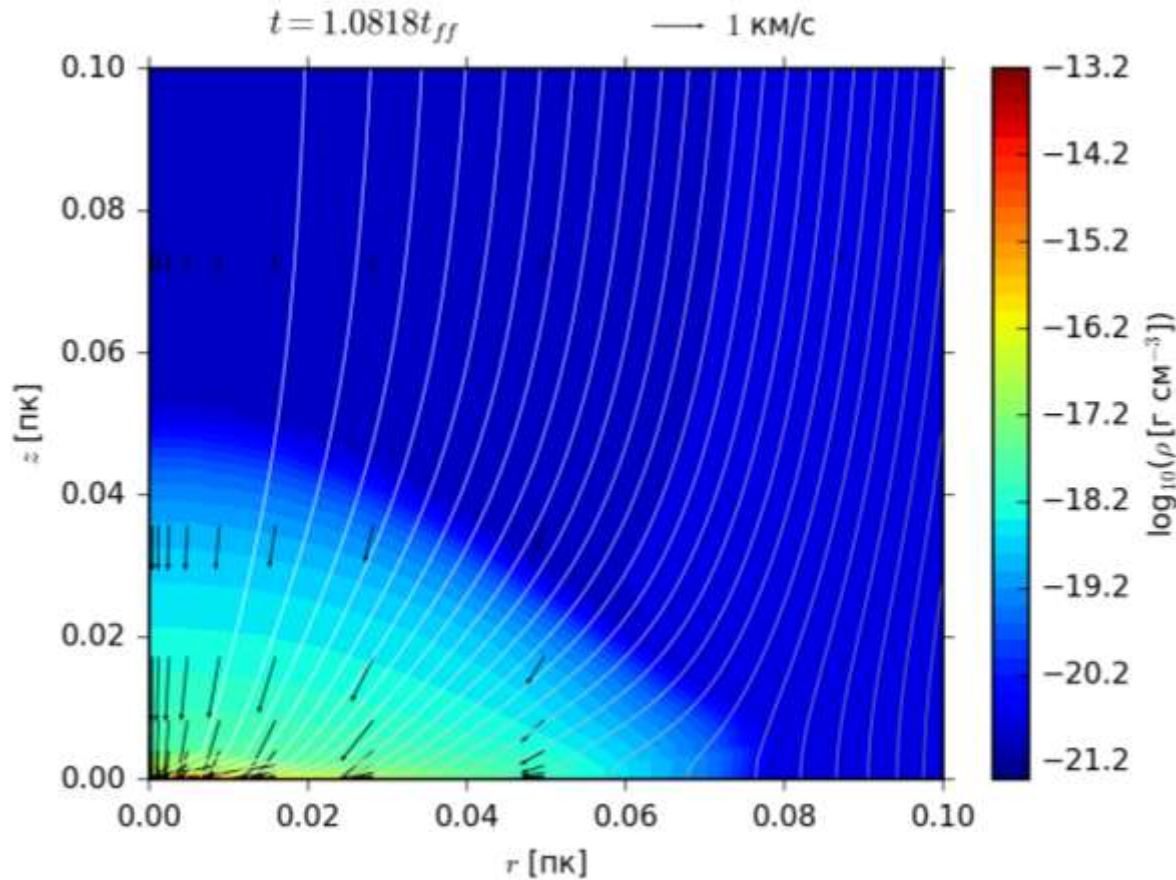
$$\varepsilon_t = 0.28$$

$$\varepsilon_m = 0.01$$

$$\varepsilon_\Omega = 0$$

Размер непрозрачного ядра: 23.12 а.е.
Максимальная плотность: 2.01×10^{-15} г/см³

2. Коллапс магнитного невращающегося облака



$$\varepsilon_t = 0.28$$

$$\varepsilon_m = 0.2$$

$$\varepsilon_\Omega = 0$$

Степень сплюснутости
оболочки:

$$\xi_{cloud} = 0.3$$

Рис.7. Распределение плотности (заливка цветом), магнитного поля (белые линии) и скорости (стрелки) в протозвездном облаке для расчета t3m2w0.

2. Коллапс магнитного невращающегося облака

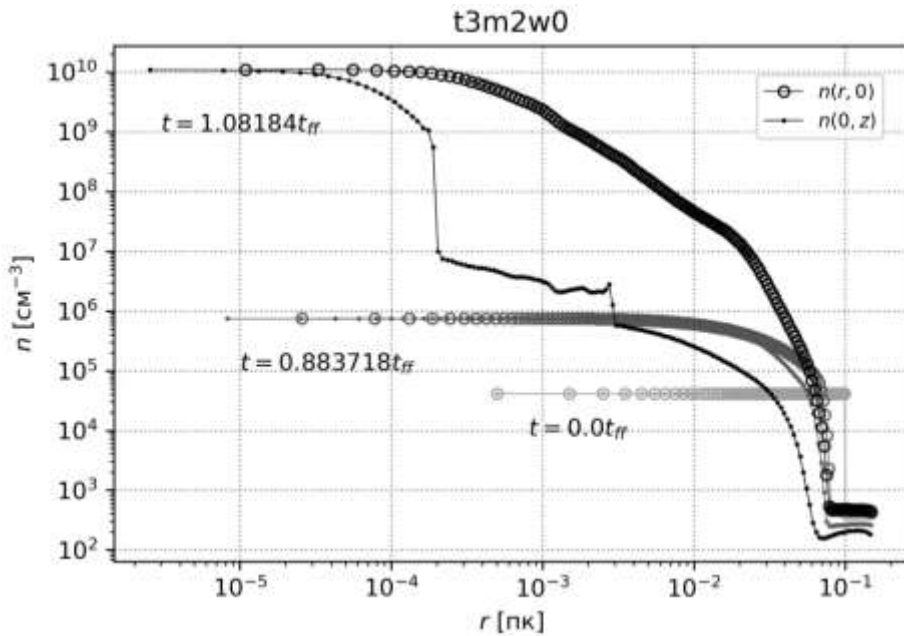


Рис.8. Профили плотности вдоль оси r (сплошные линии с маркерами-кружками) и оси z (сплошными линиями с маркерами-точками) для расчета $t_{9m08w01}$ в моменты времени: $0.0 t_{ff}$ (линии светло серого цвета); $0.88 t_{ff}$ (линии серого цвета); $1.08 t_{ff}$ (линии черного цвета).

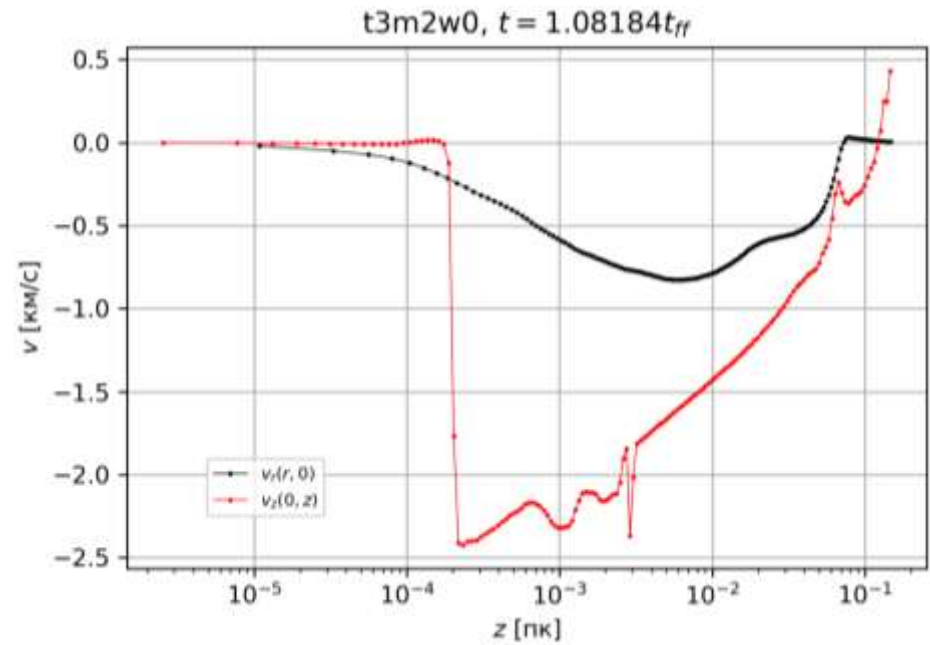
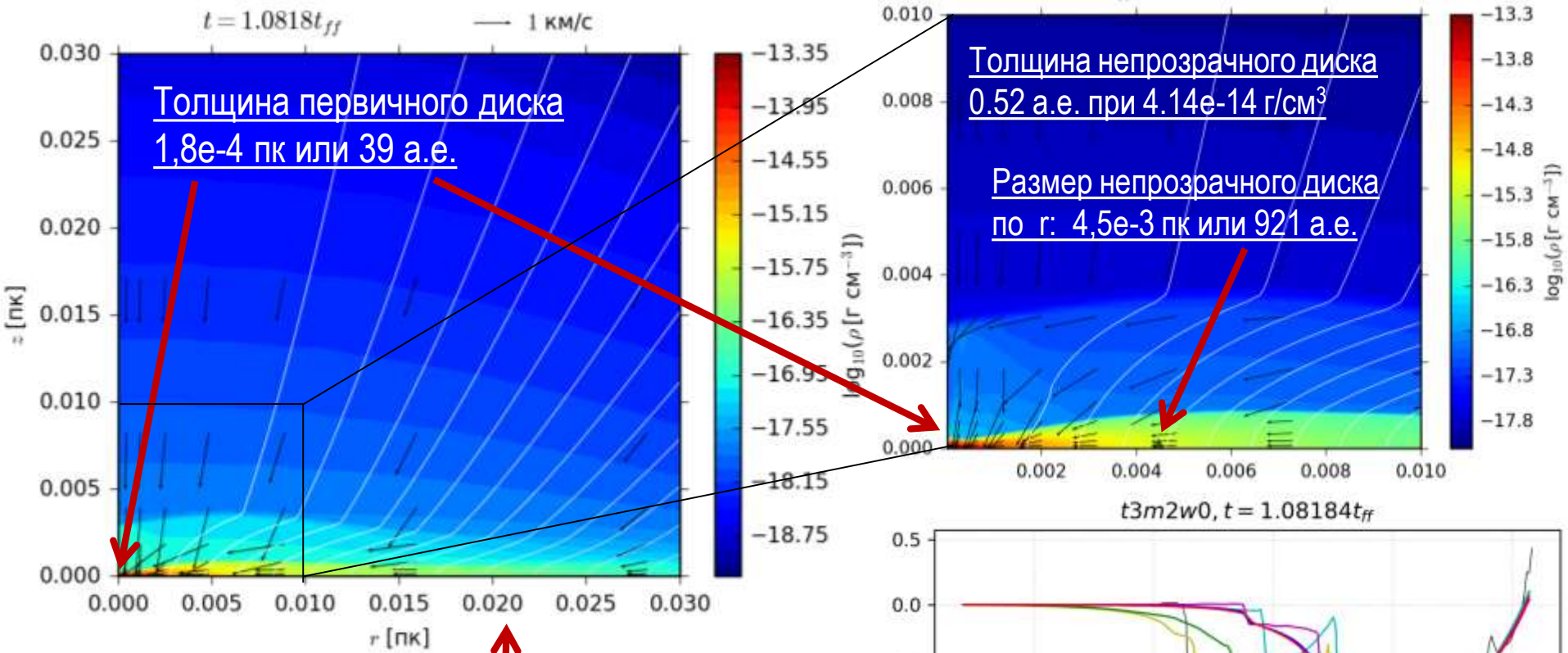


Рис.9. Профили скорости вдоль экваториальной плоскости (черная линия), вдоль оси вращения (красная линия) в момент времени $1.08 t_{ff}$

$$\varepsilon_t = 0.28 \quad \varepsilon_m = 0.2 \quad \varepsilon_\Omega = 0$$

2. Коллапс магнитного невращающегося облака



Степень сплюснутости
первичного диска:

$$\xi_{disk} = 0.9913$$

Степень сплюснутости
непрозрачного диска:

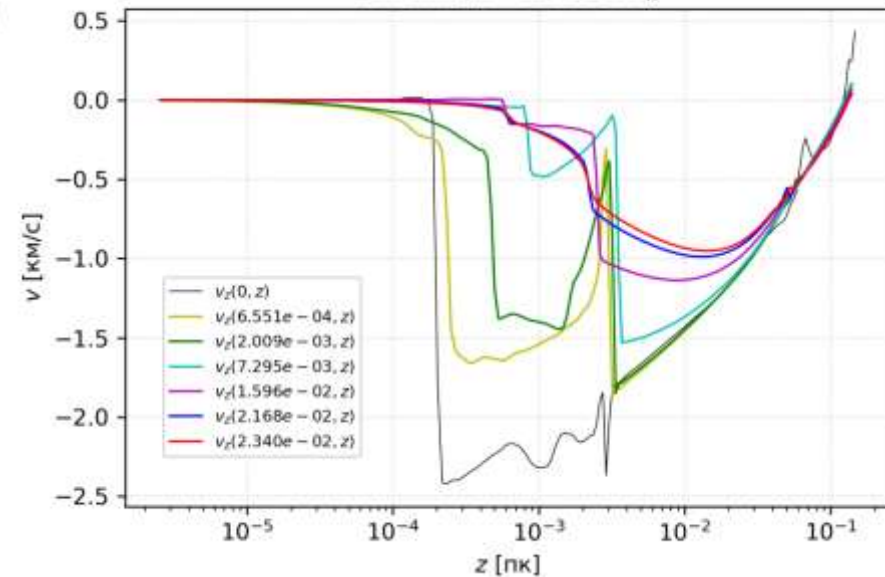
$$\xi_{core} = 0.9994$$

Размер первичного диска
в экваториальной плоскости
 $0,022$ пк или 4472 а.е.

$$\varepsilon_t = 0.28$$

$$\varepsilon_m = 0.2$$

$$\varepsilon_\Omega = 0$$



Результаты

№	Расчет	Плотность в центре, $\text{г}/\text{см}^3$	Рост плотности в центре	Радиус непрозрачного диска, а.е.	ξ_{core}	Плотность на границе первичного диска	Радиус первичного диска, а.е.	ξ_{disk}	ξ_{cloud}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	t1m0w0	5,57E-16	$2.03 \cdot 10^2$	12.08	0	нет	нет	нет	0.0000
2	t3m0w0	1,57E-15	$1.00 \cdot 10^4$	14.17	0	нет	нет	нет	0.0000
3	t3m0w01	5,94E-14	$3.80 \cdot 10^5$	457.17	0.9993	$5.21 \cdot 10^{-16}$	360,34	0,9605	0.0684
4	t3m0w04	7,74E-14	$4.94 \cdot 10^5$	1211.67	0.9997	$1.62 \cdot 10^{-16}$	405,38	0,9396	0.2676
5	t3m01w0	2,01E-15	$1.28 \cdot 10^4$	23.12	0.8630	нет	нет	нет	0.0170
6	t3m01w01	5,10E-14	$3.26 \cdot 10^5$	478.33	0.9992	$7.01 \cdot 10^{-15}$	359,89	0,9558	0.1155
7	t3m01w04	6,12E-14	$3.91 \cdot 10^5$	1212.77	0.9997	$1.65 \cdot 10^{-15}$	1487,48	0,9661	0.2676
8	t3m2w0	4,14E-14	$2.65 \cdot 10^5$	921.09	0.9994	$2.11 \cdot 10^{-15}$	4471,93	0,9913	0.3072
9	t3m2w01	4,45E-14	$2.87 \cdot 10^5$	815.22	0.9983	$5.45 \cdot 10^{-16}$	5948,85	0,9913	0.3450
10	t3m2w04	4,97E-14	$3.18 \cdot 10^5$	576.64	0.9991	$2.27 \cdot 10^{-15}$	5853,64	0,9942	0.3643
11	t3m6w0	5,62E-14	$3.59 \cdot 10^5$	496.74	0.9984	$1.13 \cdot 10^{-16}$	6347,78	0,9899	0.5395
12	t3m6w01	5,39E-14	$3.45 \cdot 10^5$	500.00	0.9992	$1.07 \cdot 10^{-17}$	8512,72	0,9925	0.5749
13	t3m6w04	5,56E-14	$3.55 \cdot 10^5$	505.16	0.9981	$1.41 \cdot 10^{-16}$	13599,59	0,9951	0.6687
14	t6m0w0	7,69E-15	$5.27 \cdot 10^5$	6.10	0	нет	нет	нет	0.0000
15	t9m0w0	1,08E-14	$2.64 \cdot 10^6$	17.84	0	нет	нет	нет	0.0000
16	t9m0w01	4,95E-14	$1.11 \cdot 10^7$	112.69	0.9914	нет	нет	нет	0.1351
17	t9m0w04	4,05E-14	$9.00 \cdot 10^6$	101.97	0.9876	нет	нет	нет	0.4221
18	t9m01w0	3,58E-14	$7.96 \cdot 10^6$	96.28	0.9821	нет	нет	нет	0.0590
19	t9m01w01	4,30E-14	$9.57 \cdot 10^6$	110.24	0.9892	нет	нет	нет	0.1481
20	t9m01w04	5,16E-14	$9.42 \cdot 10^6$	101.22	0.9800	нет	нет	нет	0.3704
21	t7m2w0	6,57E-14	$7.00 \cdot 10^6$	198.12	0.9956	$1.06 \cdot 10^{-18}$	15471,75	0,9196	0.2583
22	t7m2w01	7,77E-14	$6.91 \cdot 10^6$	201.36	0.9956	$6.05 \cdot 10^{-19}$	17634,79	0,9068	0.2952
23	t7m2w04	8,12E-14	$8.65 \cdot 10^6$	198.56	0.9946	$5.00 \cdot 10^{-19}$	18987,58	0,9006	0.4890

Выводы

Для протозвездных облаков с массой $10M_{\odot}$ и температурой 20К:

- Первичный диск образуется при $\varepsilon_m \geq 0.2$
- Размер первичного диска от 300 до 19000 а.е.
- При росте плотности на 2-3 порядка формируется первичный диск.
- В невращающихся протозвездных облаках без магнитного поля размер непрозрачного диска составляет от 6 до 20 а.е.
- При увеличении магнитного и вращательного параметра увеличивается размер непрозрачного диска от 20 до 1300 а.е.
- При росте плотности на 4-6 порядка формируется непрозрачный диск.

Спасибо за внимание!

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (проект 19-72-10012),
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект 18-02-01067) , Российского фонда
фундаментальных исследований (проект 18-52-52006)