

Астрофизика и астрохимия формирования экзопланет - суперкомпьютерное моделирование и его проблемы

Снытников В.Н.

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН

Новосибирский

государственный университет

Научный совет по астробиологии при

Президиуме РАН

snyt@catalysis.ru

Цель выступления - кратко представить тематику, показать некоторые наши результаты исследований и поискать возможные точки взаимного интереса.

Доклад состоит из:

Введения (активность в мире и в России в этой области)

- Краткое описание объекта – околозвездных дисков
- Численное моделирование на основе уравнений гравитационной газодинамики
- Расширение модели на учет динамику «булыжников» и метровых тел
- Роль химических процессов
- Модель с переносом излучения
- МГД- модель

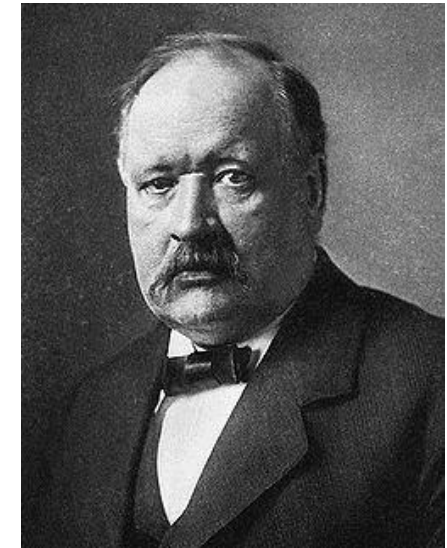
Заключение

Гипотеза «панспермии»

Г.Э. Рихтер (1865 г.) *Гипотеза панспермии* - рассеянные во Вселенной споры микроорганизмов переносятся с одной планеты на другую метеоритами или космической пылью.

С.А. Аррениус (1901 г.) Перенос бактериальных спор с планеты на планету под действием давления света.

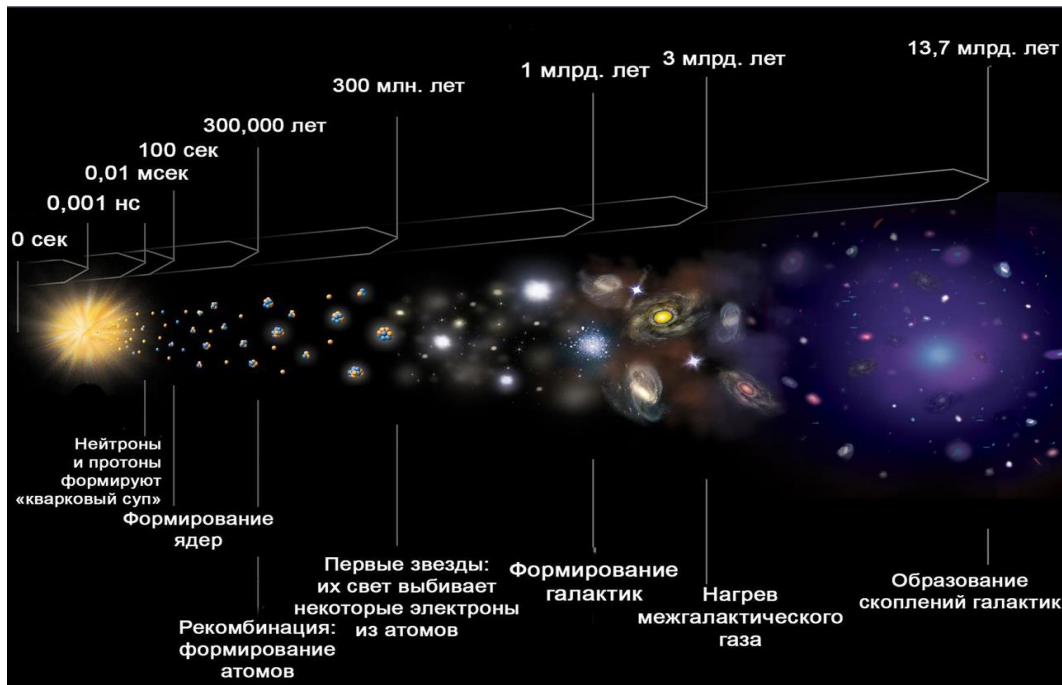
Жизнь вечна в вечной Вселенной. Жизнь проявляется как фундаментальное свойство



**Аррениус С.А.
(1859—1927)**

Возраст Вселенной – 13,6 млрд лет,
Солнечной системы – 4,56 млрд лет.

Углерод, кислород и другие
химические элементы появились во
Вселенной после взрыва первых
звезд



Гипотеза «первичного бульона» зарождения жизни на Земле



Опарин А.И.
(1894—1980)

(1922) Гипотеза возникновения жизни на Земле
с происхождением жизни из первичного "бульона"
органических веществ в океане.

- доклад «О возникновении жизни», 1924

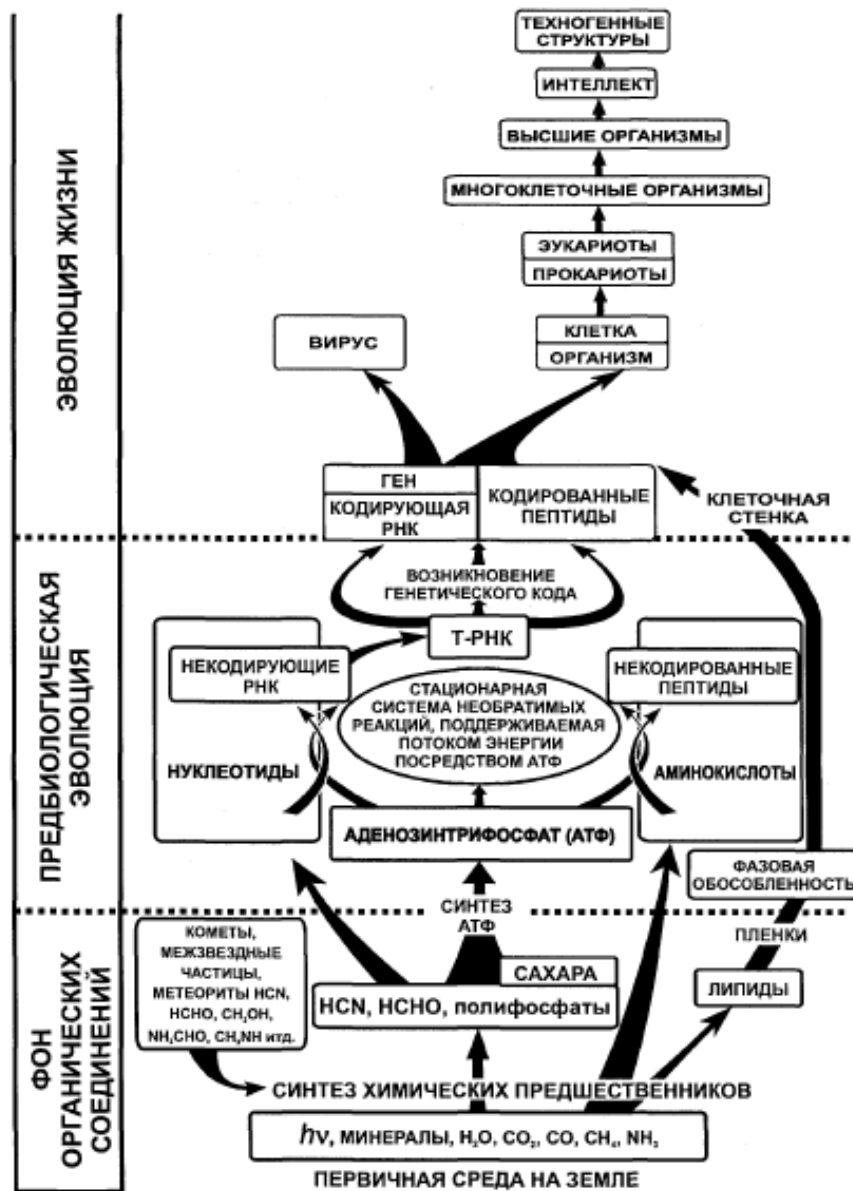
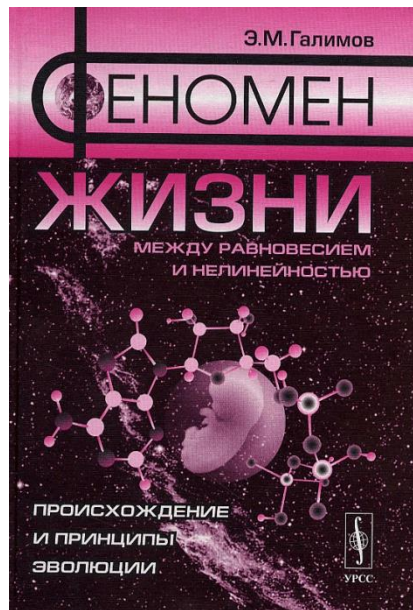
- книга «Происхождение жизни», 1924.

(1980 год) :

«...возможно первичное образование простейших
органических веществ – углеводов – на нашей
планете. Эволюция этих веществ должна приводить к
образованию белковоподобных соединений, а затем
коллоидных систем...»

Журнал Всесоюзного химического общества им.
Д.И.Менделеева» Т. XXV, в.3-4, 1980 год

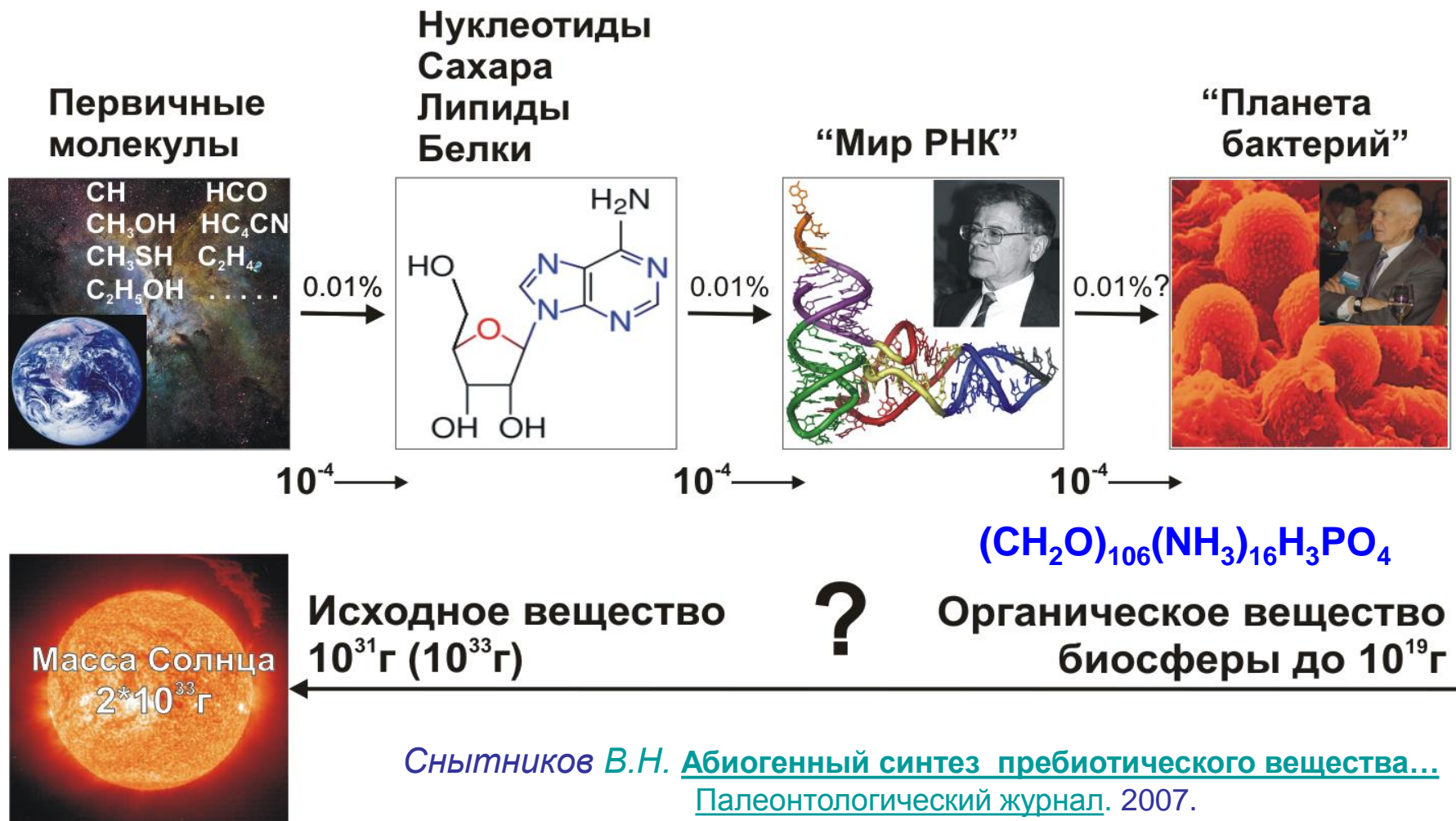
Современное изложение гипотезы Опарина



Выступление
Трифопова В.А.
Неделя Дарвина
2017

Дискуссия
Галимова Э.М. и
Варфоломеева С.И.
<https://scisne.net/a-9>

Проблема «химического завода»



Снытников В.Н. Абиогенный синтез пребиотического вещества...
Палеонтологический журнал. 2007.

Спирин А.С. Когда, где и в каких условиях мог возникнуть и эволюционировать мир рнк? Палеонтологический журнал. 2007.

Заварзин Г.А. Планета бактерий. Вестник Российской академии наук. 2008.

Программа Президиума РАН «Происхождение и эволюция биосферы» 2004 – 2014 гг.

Координаторы программы академики

Г.А. Заварзин, Н.Л. Добрецов, Э.М. Галимов, М.В. Виноградов,

Руководители отдельных направлений и участники

А.Ю. Розанов, А.И. Григорьев, А.С. Спирин, Н.П. Юшкин,
С.Г. Инге-Вечтомов, С.В. Шестаков, В.К. Шумный, Н.А. Колчанов,
В.Н. Пармон, М.Я. Маров, В.В. Власов, А.П. Деревянко, М.А. Федонкин ...

и многие другие действительные члены и член-корреспонденты РАН.

Первоочередной задачей была выработка общего языка и
терминологии,

доступного для всех участников программы.

За рубежом - **АСТРОБИОЛОГИЯ**

Развитие теорий зарождения жизни



В.И. Вернадский
(1863—1945)

(1921-1927) **Жизнь на Земле геологически вечна**

La Géochimie, 1924

Биосфера, 1926

Очерки геохимии, 1927

«Живое вещество и биосфера» – М.:Наука, 1994.

Стр. 277: Не зная научно [космического прошлого Земли], очевидно, мы не можем научно решить вопрос о генезисе в нем жизни, если он произошел в космические периоды земной истории. Другого времени для этого нет, ибо в геологических временах зарождения жизни не было.

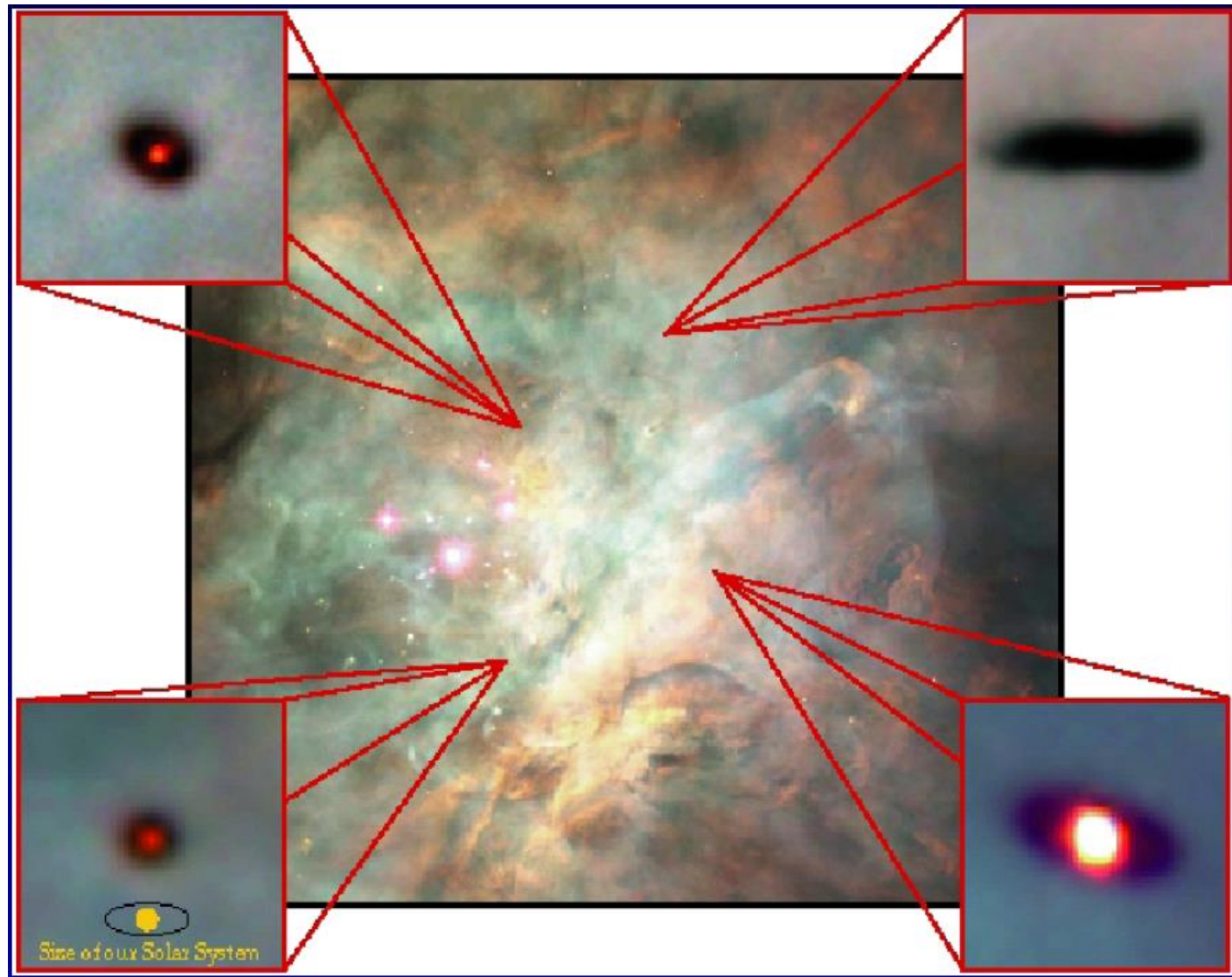
Стр. 277: ...Возможно стремиться к опытному воссозданию абиогенеза в наших лабораториях и институтах. Вполне мыслимо, что **особые условия «случая» или особой космической среды** могут быть найдены и воссозданы человеческим разумом.

Протопланетные диски

Туманность Ориона

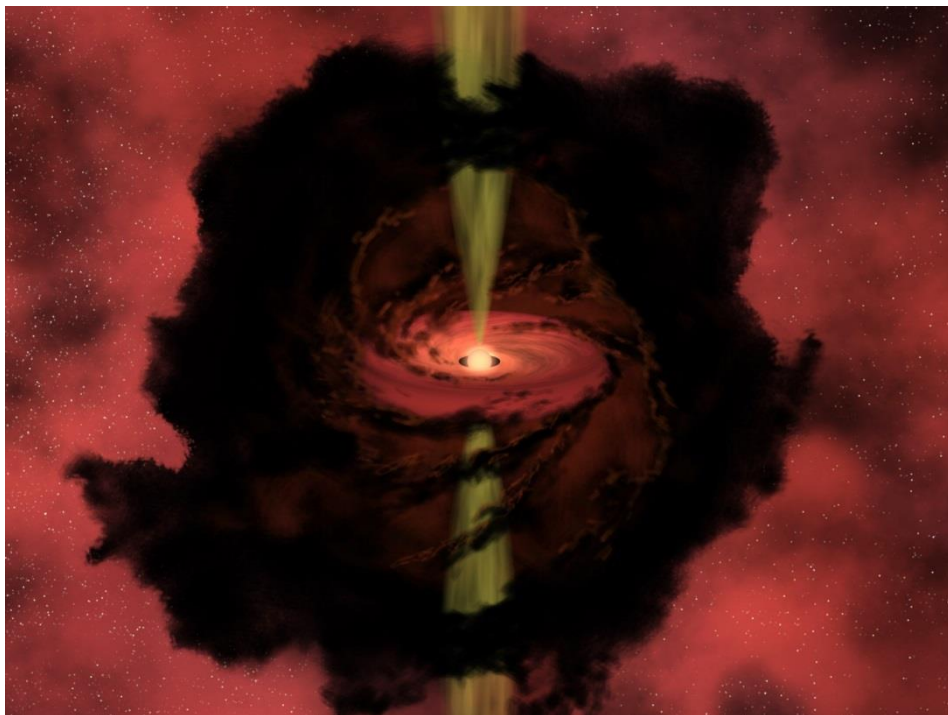
Особые
условия
«случая»
или особой
космической
среды

Снытников В.Н.,
1992; ISSOL, 1998.



Обнаружение экзопланет

Экзопланеты обнаружены более чем у 3000 звезд. Практически каждая одиночная звезда солнечного типа должна иметь планету(ы).



Место зарождения экзопланет Околозвездные диски

Начаты работы в 40-х годах XX века
(Шмидт О.Ю., Сафронов В.С,
Камерон А., Хойл Ф.)

Первое обнаружение телескопом HST
(Хаббл) в 1994 году.

Программы наблюдений на телескопах
HST, Herschel HSO, ALMA, VLT и др.

Число конференций до 20 в год (2017)

Protostars and Planets, раз в 7 лет с 1978 года.

Последняя в 2013, следующая в 2020. Число участников в 2013 – около 1000

Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2017, Ялта

Современные телескопы

HST (Hubble Space Telescope)

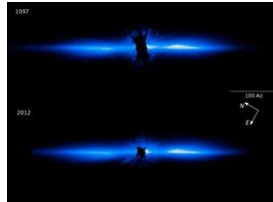


Открытие: 24 апреля 1990
общие расходы— до 7 млрд USD

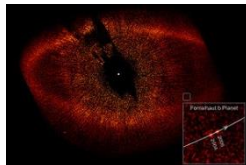
VLT (Very Large Telescope)



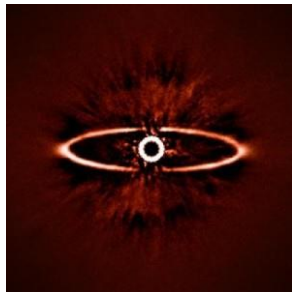
Бета Живописца



Фомальгаут



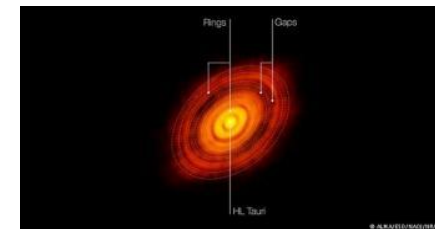
Пылевой диск
HR 4796A



ALMA (Atacama Large Millimeter Array)

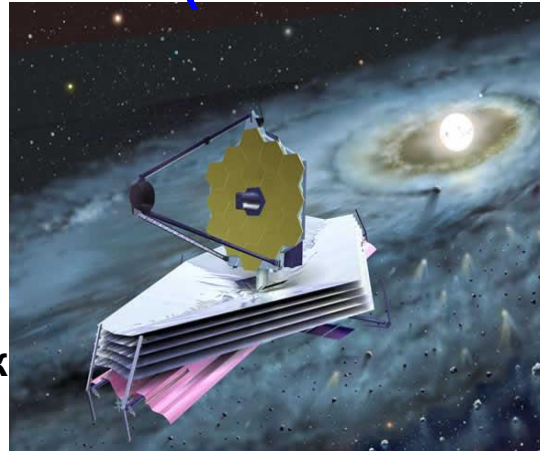


Открытие: 13 марта 2013
Атакама, Чили, 2.5 млрд Euro



Звезда HL Tauri,

JWST (James Webb Space Telescope)



Запуск в 2018 г.
Точка Лагранжа L_2
Солнце — Земля
(1,5 млн км от Земли
в противоположную
Солнцу сторону)
Стоимость
свыше 6.8 млрд
USD

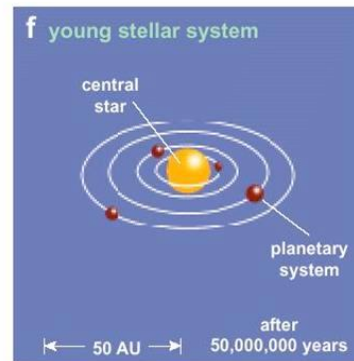
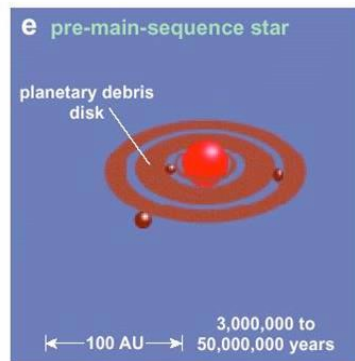
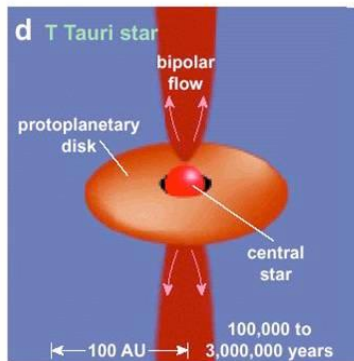
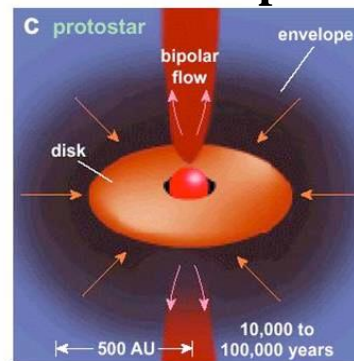
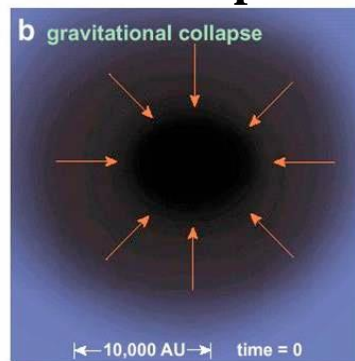
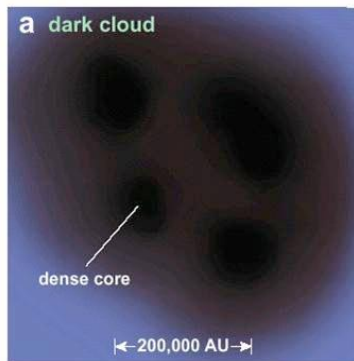
11 Открытие: май 1998 Атакама, Чили

Протопланетные диски

Этапы формирования планетных систем и аккреции газа на звезду

Водород с гелием и пыль (1-2%)

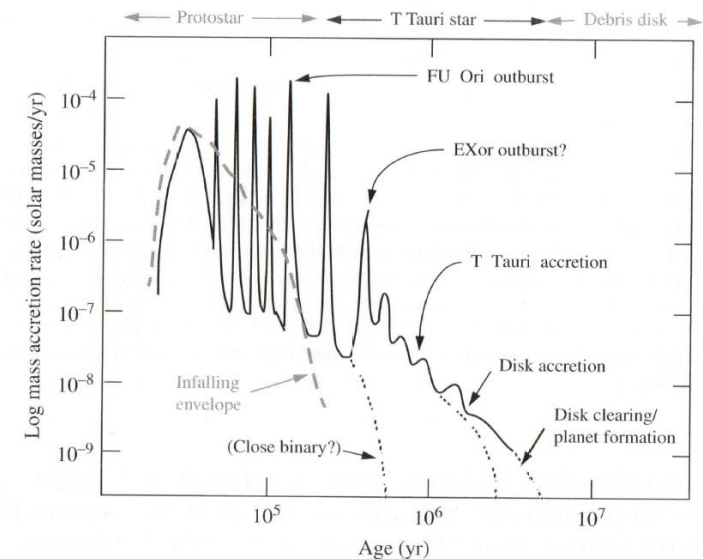
Pre-stellar phase Class 0 and I phases



FU Ori (фуоры)
T Tauri phase

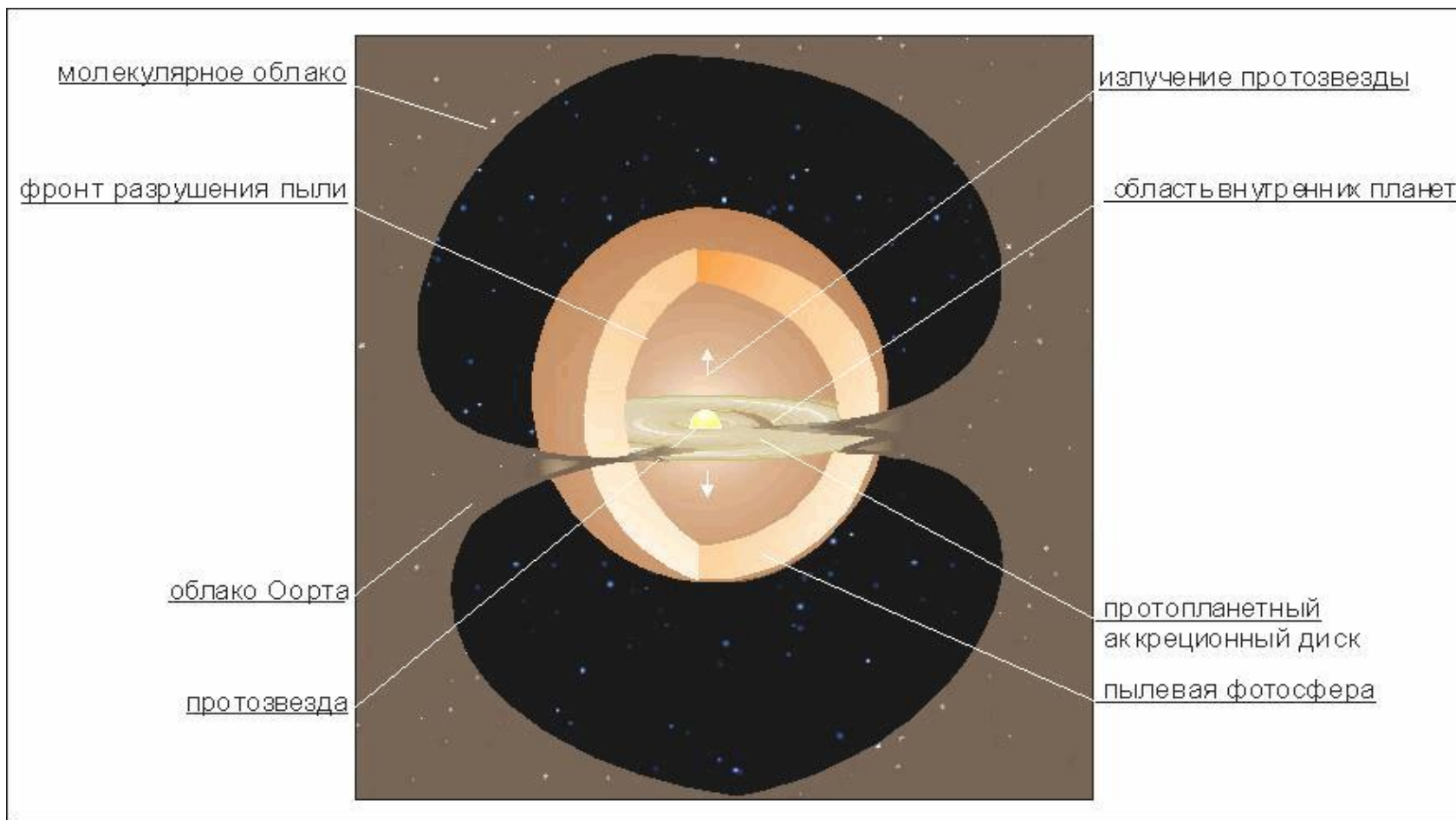
Debris disc
Диск камней

$$L = \left(\frac{M_s}{M_0}\right)^3 L_0 + f_{acc} \frac{GM_s \dot{M}_s}{R_s}$$

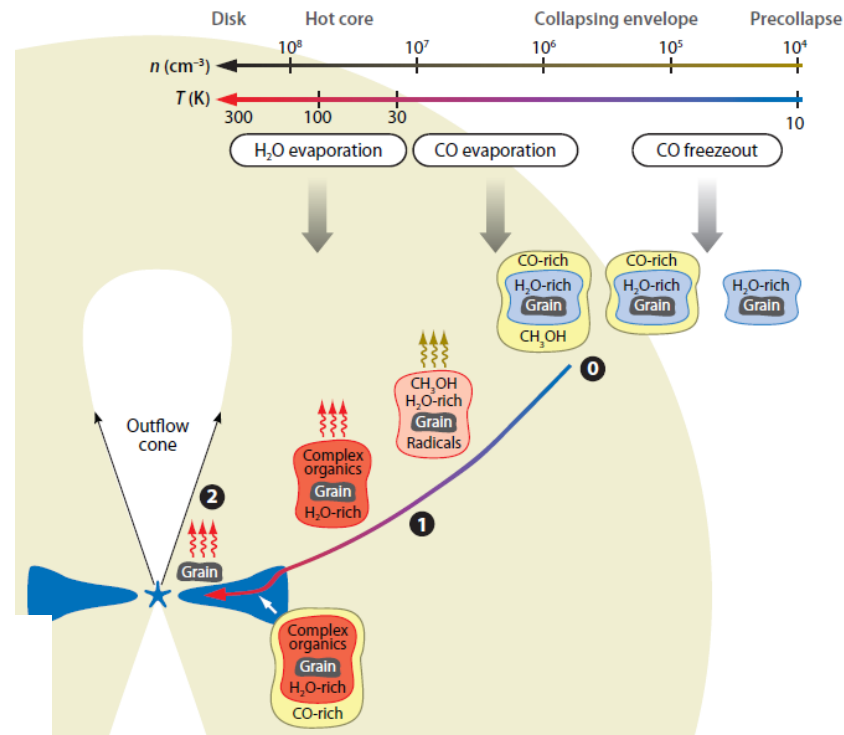
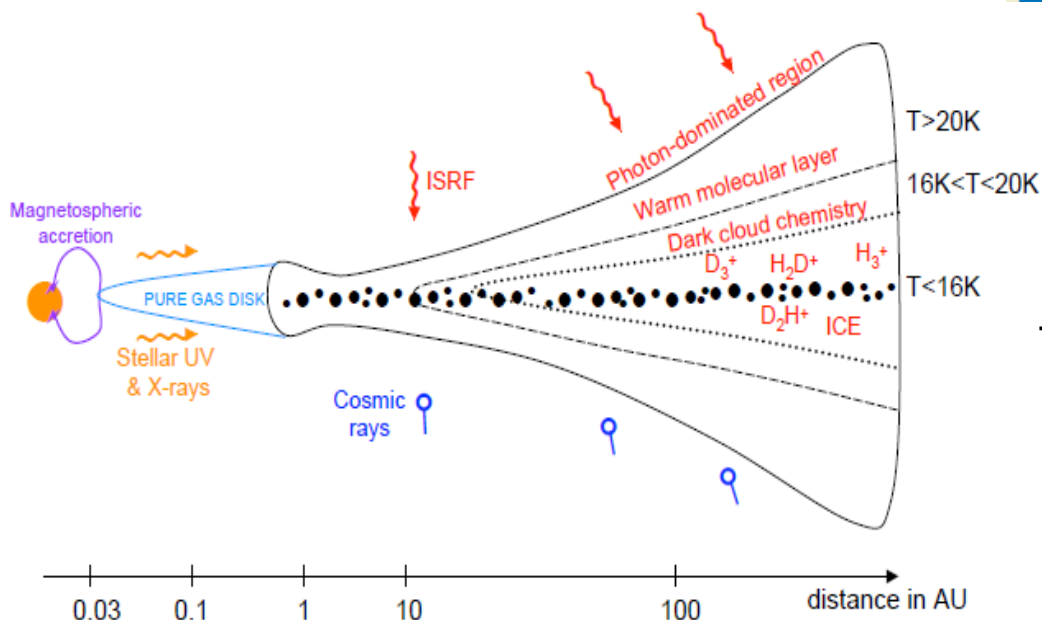
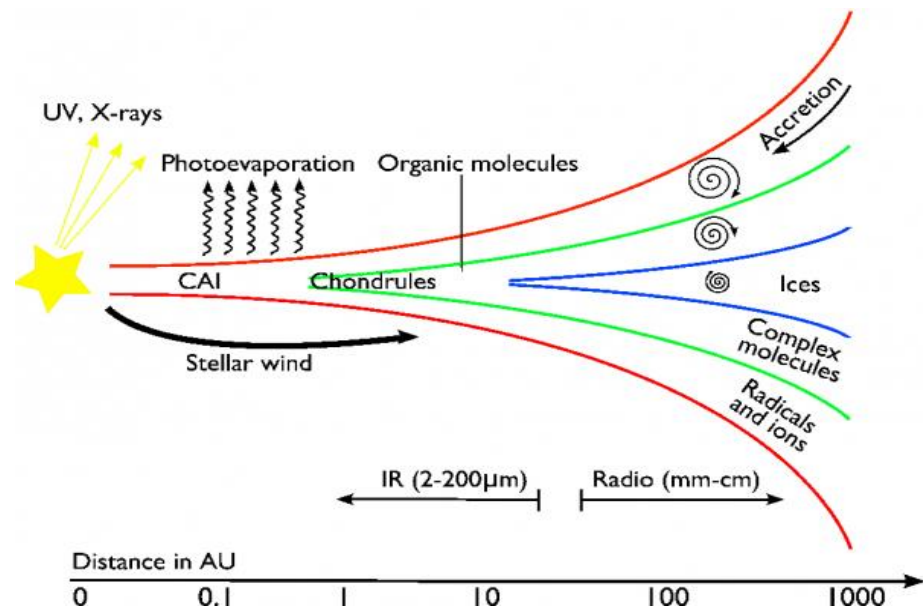


L. Hartmann, *Accretion Processes in Star Formation*, 2008

Протозвезда с околозвездным ДИСКОМ



Структура диска



Трехфазная среда

плазма – газ – твердая фаза

Газ - от 10^3 cm^{-3} до 10^{21} cm^{-3}

Температура от 20 K до 100 000 K

Давление до 10^{-3} атм и выше

Газ : твердая фаза - 100:1

Herbst E., van Dishoeck E., 2009

Моделирование формирования звезд с околозвездными дисками

Изменения по шкале длины - 7 порядков

от 10^{12} км (100 пс) молекулярное облако и до радиуса Солнца 10^5 км

Шкала времени - 11 порядков

от миллиона лет до 10 минут

Изменение плотности – 16 - 18 порядков

от плотности в молекулярном облаке с массой в 10^4 масс Солнца до плотности Солнца (или плотности твердого тела, жидкой воды)

Физические процессы

Самогравитация, (турбулентная) многофазная газодинамика, динамика твердой фазы, неидеальная магнитогазодинамика, перенос излучения, плазмохимические реакции, газофазные химические реакции, химические реакции на поверхности пыли, коагуляция ...

Гравитационная газовая динамика

Богоявленский О.И (ИТФ им. Ландау)

Лидов М.Л. (ИПМ им Келдыша)....

Фридман А.М. (ИНАСАН)

Armitage P., Bonnell I. Lodato G., Rice W.,

Pringle J., Price D. et al, ...

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \vec{\nabla}) \vec{v} = -\operatorname{grad}(p) - \rho \operatorname{grad} \Phi$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \vec{v}) = -\operatorname{div}(p \vec{v}) - (\rho \operatorname{grad} \Phi, \vec{v})$$

$$p = (\gamma - 1) \rho \varepsilon \quad \Delta \Phi = 4\pi \rho \quad G = 1$$

$$M = v/c_s \quad \frac{c_s}{L\sqrt{4\pi\rho G}} = \frac{\lambda_J}{L}, \quad \lambda_J - \text{Jeans length}$$

Коды

GADGET, FANTOM, ZEOS,....

$M < 1; > 1; >> 1$ $\operatorname{Re} = 10^{10} - 10^{14}$

$\gamma > 4/3$ - нет коллапса

$\gamma < 4/3$ - коллапс возможен

Проблемы

численного решения задач гравитационной газовой динамики
для протопланетных дисков

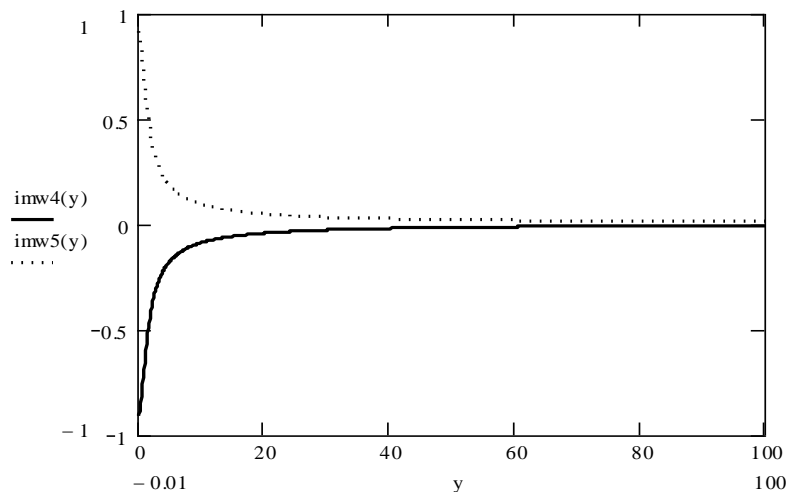
1. Неустойчивость
2. Ударные волны
3. Вязкость, в том числе вторая
4. Коллапсы
5. Турбулентность течения газа в диске

Zhu Z., Hartmann L., Nelson R.P., Gammie C.F. Challenges in forming planets by gravitational instability: disk irradiation and clump migration, accretion, and tidal destruction // The ApJ. 2012.

Линейный дисперсионный анализ

Дисперсионное соотношение для 1D

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 - 4\pi\rho_0 - \frac{\varphi_0' \rho_0'}{\rho_0} - i4\pi \frac{\rho_0'}{k}$$



Зависимость $Im(\omega)$ от волнового числа k

Снытников В., Стадниченко О. АЖ 2011

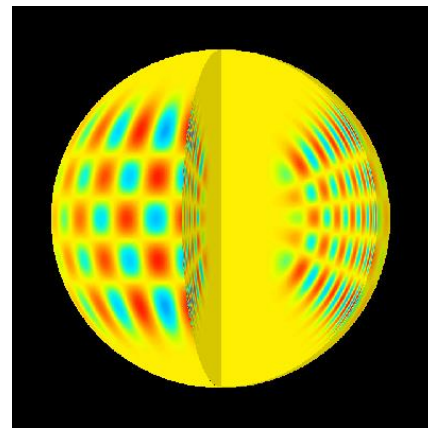
Дисперсионное соотношение для 2D

$$(\omega - m\Omega)^2 = c_s^2 k^2 + \kappa^2 - 2\pi G \Sigma |k|, \quad \kappa^2 = 4\Omega^2 + r \, d\Omega^2/dr$$

$$k_J = 2\pi/\lambda_J = 2\pi G \Sigma / c_s^2, \quad \lambda_J = c_s^2 / G \Sigma$$

Рольфс К., 1980

Дисперсионное соотношение для 3D

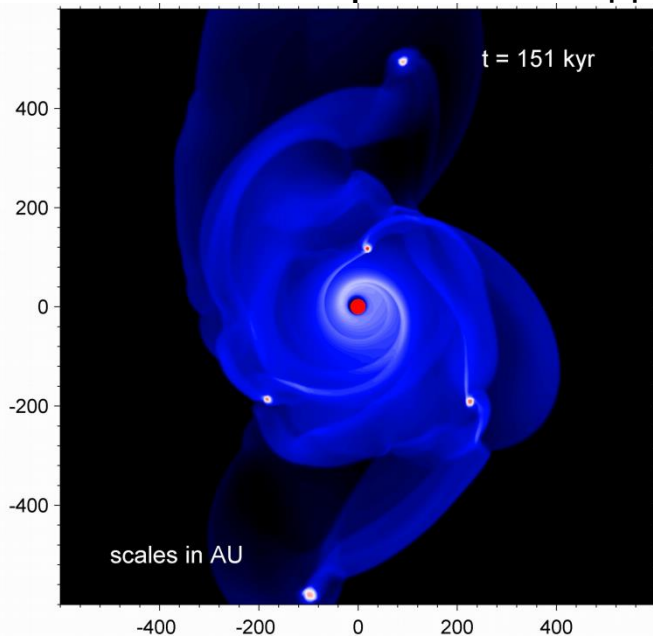


Рабинович М., Трубецков Д., 1992

Физическая, а значит и численная модель неустойчива в линейном приближении. **Корректность задачи ???** Однако для нестационарных решений интегрально выполняются законы сохранения (закон сохранения энергии и др.).

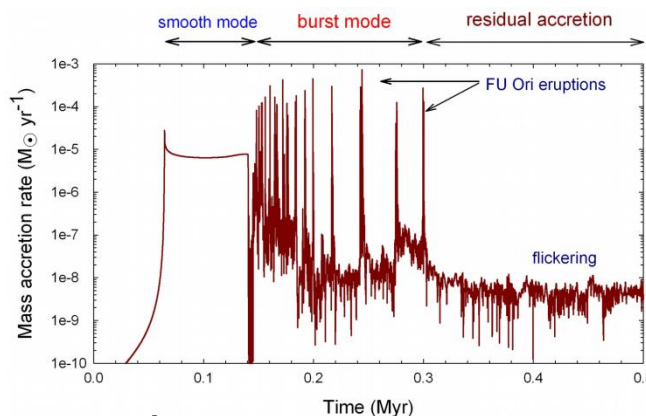
Примеры

численного решения задач гравитационной газовой динамики

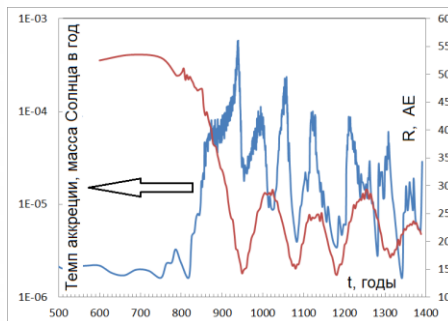


Масса диска
 M_d

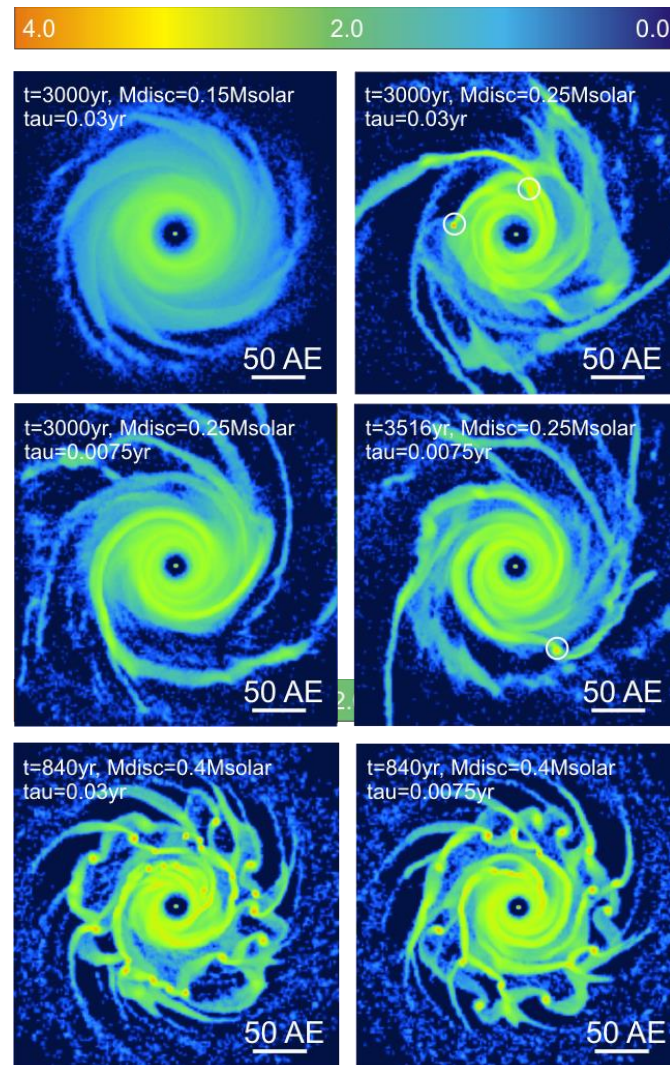
Расчет кодом FEOSAD, метод КЭ, Воробьев и др. 2017



Аккреция на звезду
(Vorobyov & Basu 2005)

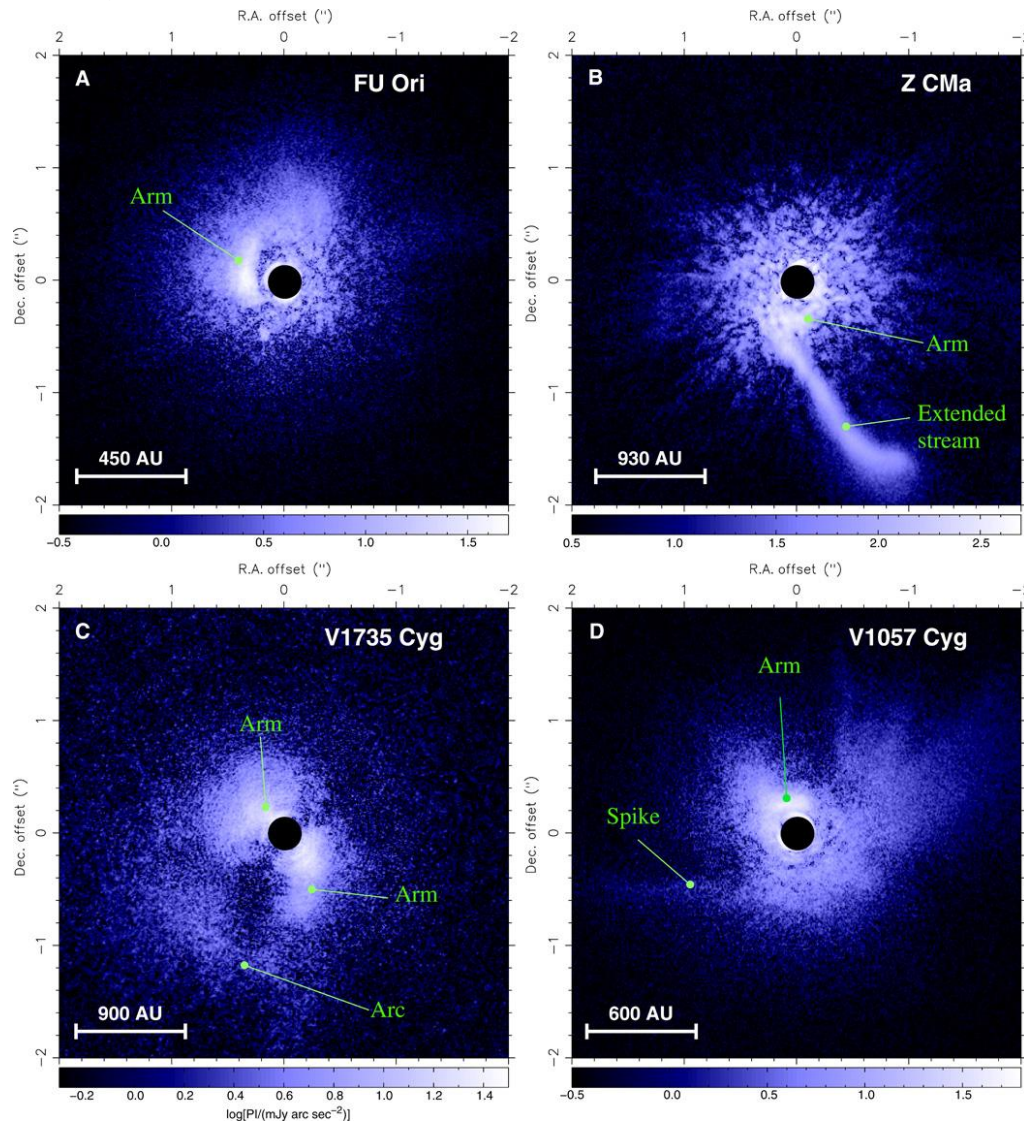


Аккреция на звезду
(Стояновская О.,
Снытников В. 2016)



Расчет кодом SOMBRERO, метод SPH
Стояновская О., Снытников В. 2016

Диски вокруг фуоров, VIS-NIR телескоп Субару



Hauyu Baobab Liu et al., Sci. Adv., 2016 **ScienceAdvances**



Корректность. Задача о коллапсе

Модельное уравнение

$$\frac{d}{dx}y(x) - 2 \cdot y(x)^2 - y(x) = 0$$

$$y(0) = 0.000050 \text{ Red} \\ = 0.0005 \text{ Blue}$$

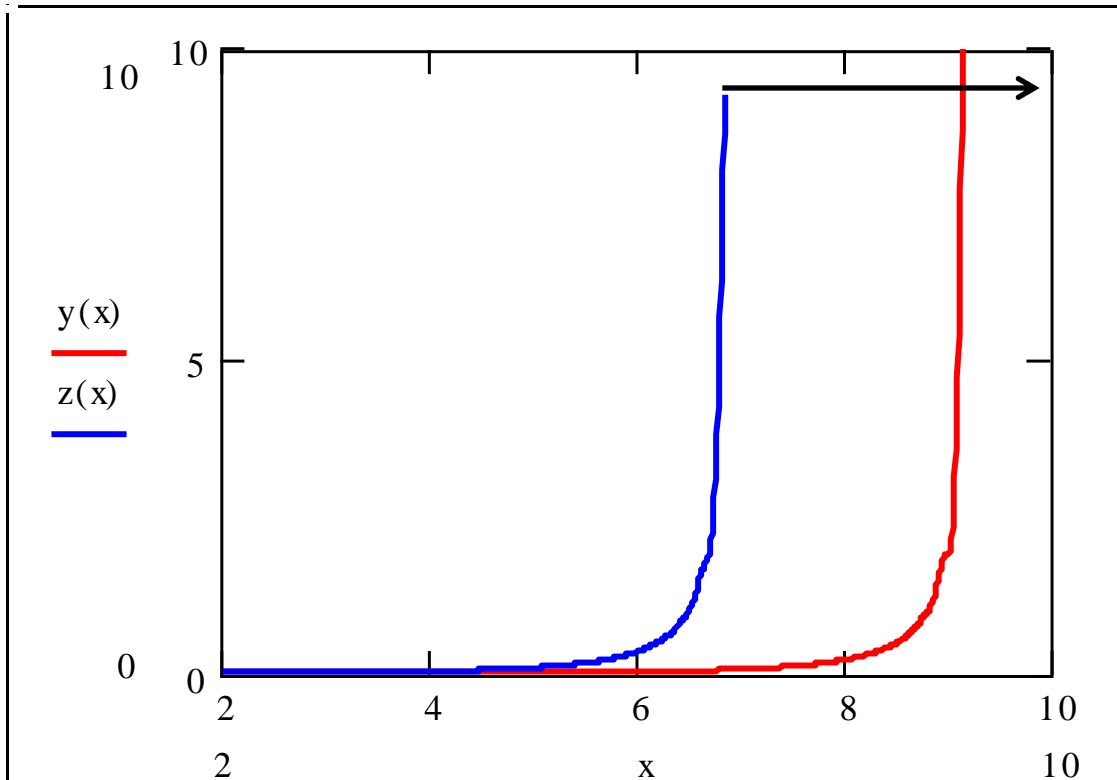
$$X_0 = A^{-1} \ln(1 + A/y(0))$$

Решение неустойчиво в
линейном и нелинейном
приближении

Задача становится
корректной на классе
ограниченных функций
 $y(x) < C = \text{const}$

$\gamma > 4/3$ - нет коллапса

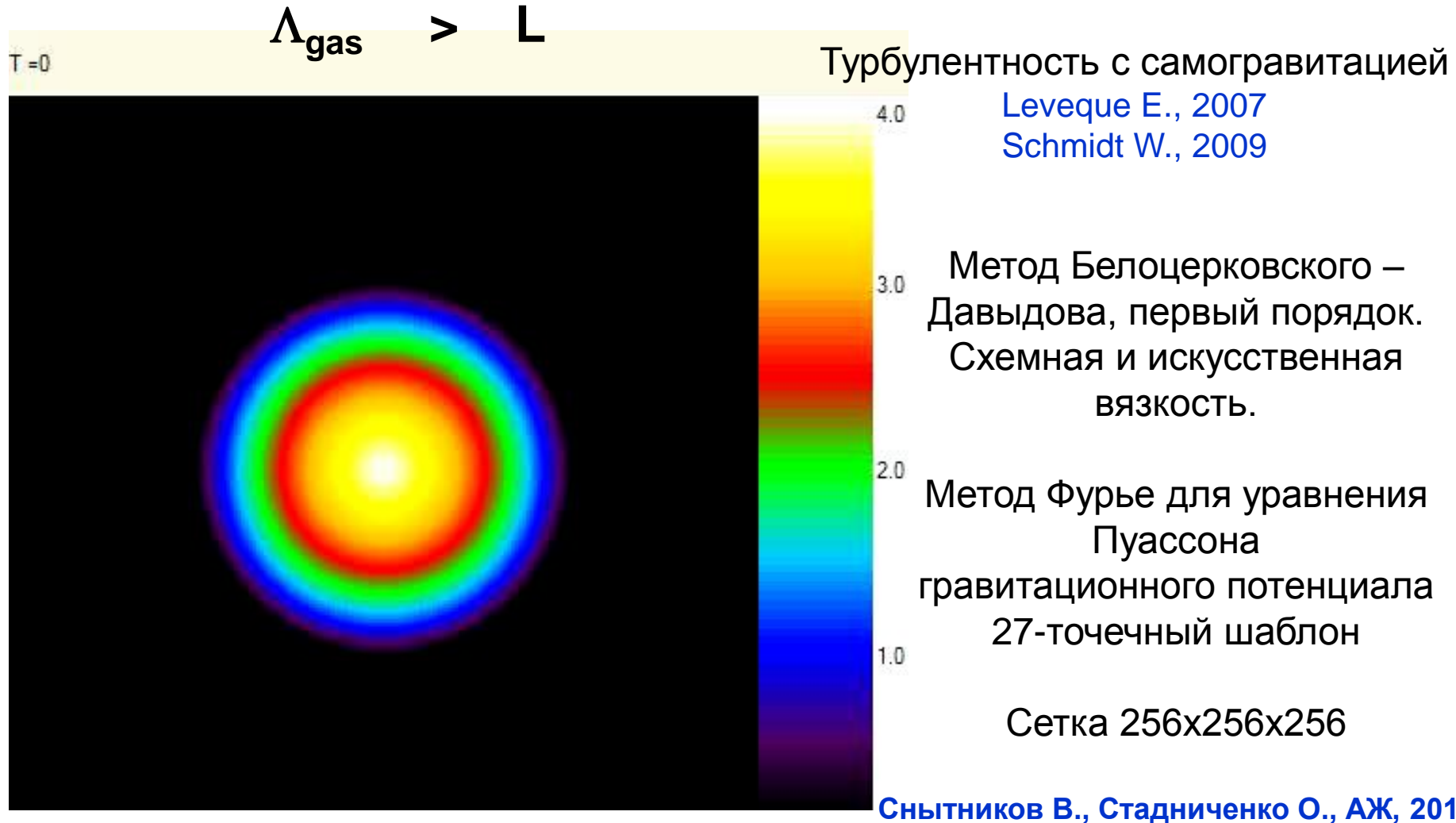
$\gamma < 4/3$ - коллапс возможен



Снытников В., Стояновская О., К вопросу о корректности...
// Выч. методы и програм. 2016

Турбулентность.

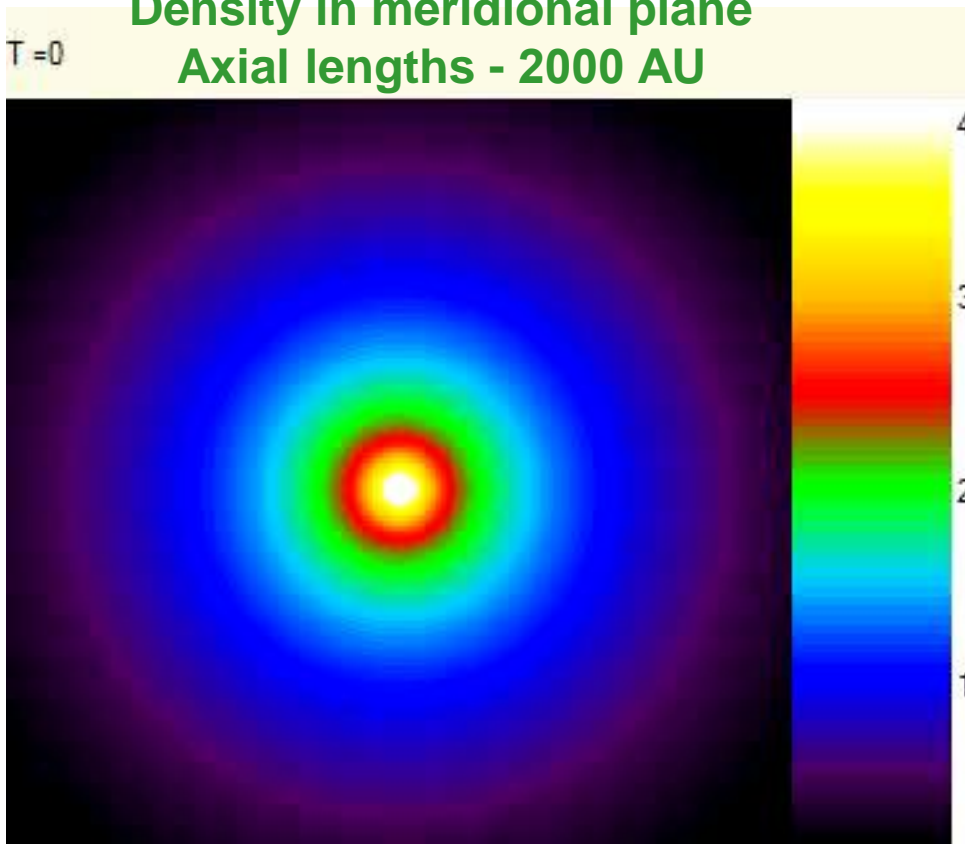
Облако «горячего» самогравитирующего вещества



Околозвездный диск Формирование

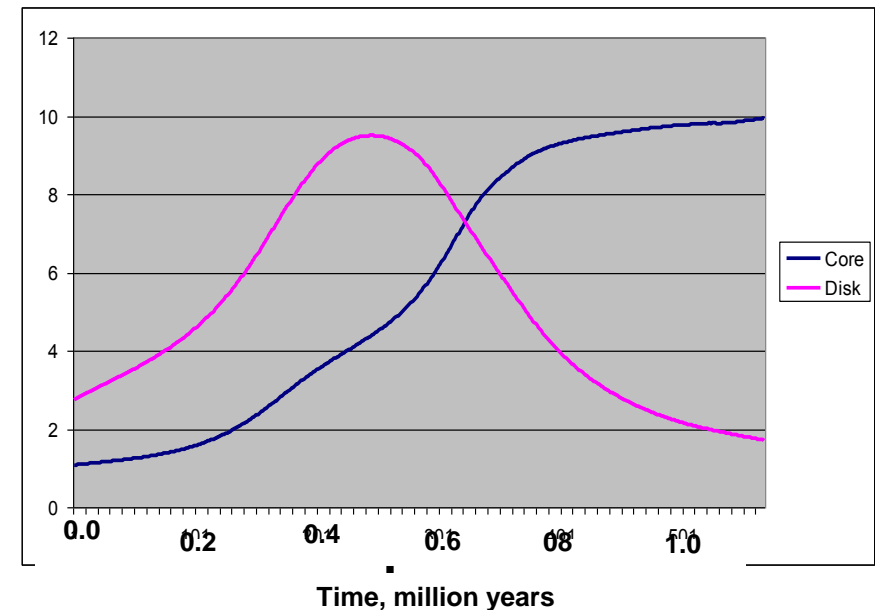
Density in meridional plane
Axial lengths - 2000 AU

Machida M. et al. 2006-2012



Gas/condense phase density >0.1
Temperature in massive disk – firstly
increases from 10K up to over 300K, then falls

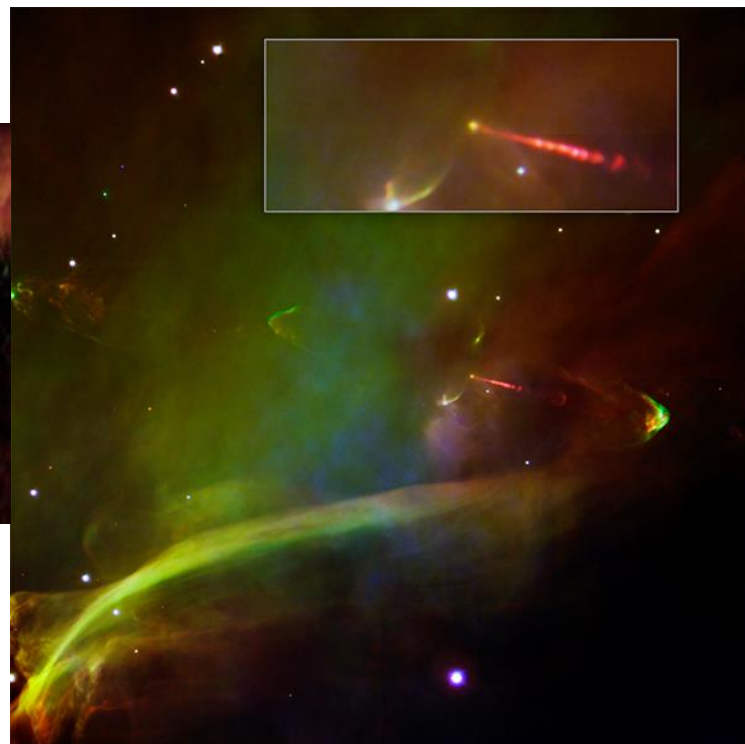
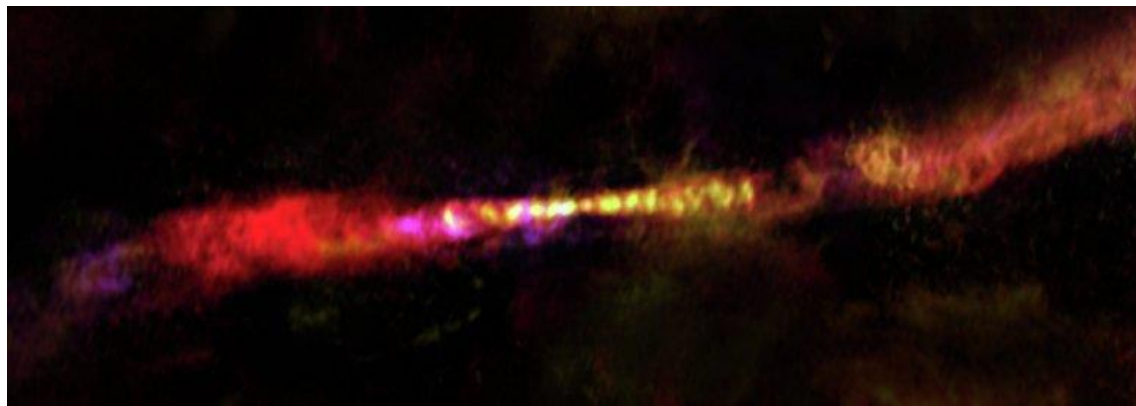
Protostar's and its disk mass change
Times about 1 Million Years



Snytnikov V., Stadnichenko O., Stoynovskaya O., 2014

Джеты (струи) от протозвезд. ALMA

Звезда-младенец CARMA-7 расположена примерно в 1400 световых лет от Земли в звездном скоплении Serpens South. Это плотное скопление в созвездии Змеи (Serpens).



Frank A., Ray T. et al. Jets and Outflows.../
Protostars & Planets, 2013

Расширения модели

Пыль (нанодисперсная, микронная и миллиметровая) и ее коагуляция – полидисперсная двухфазная среда
(Стояновская О.П.)

Булыжники и тела метрового размера

Астрохимия и астрокатализ. Химические процессы:

газофазные

гетерогенные каталитические

ион-молекулярные

плазма-химические

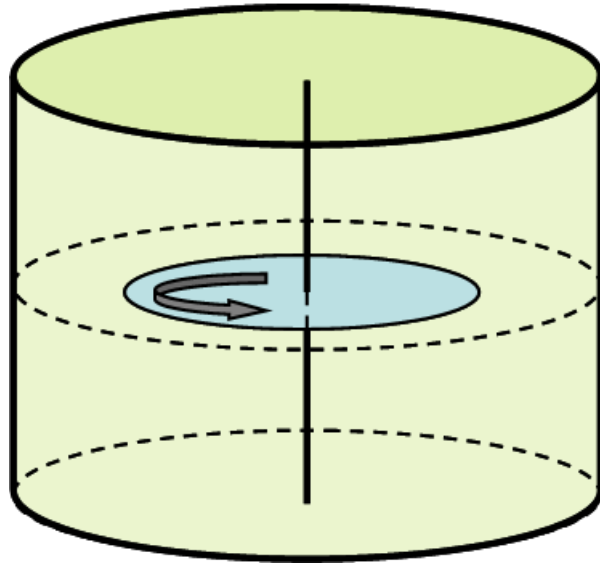
радиационные

Перенос и поглощение излучения

МГД процессы:

- ☐ в слабоионизованной среде
- ☐ в магнито – плазмо – ионосфере
- ☐ в среде газ – пыль – плазма

Квази 3D-модель тонкого диска на стадии формирования клампов из газа и метровых тел



Gas dynamics

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \text{div}(\sigma \vec{v}) = 0,$$

$$\sigma \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \sigma(\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\nabla p^* - \sigma \nabla \Phi,$$

$$\frac{\partial S^*}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla) S^* = 0, \quad p^* = T^* \sigma.$$

$$\sigma_{par, gas} = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{par, gas} dz;$$

Gravitational field

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \quad \Phi_1 = -\frac{M_c}{r},$$

$$\Delta \Phi_2 = 0, \quad \Phi_2 \xrightarrow{r \rightarrow \infty} 0,$$

$$\left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} \right|_{z=0} = 2\pi(\sigma_{par} + \sigma_{gas}).$$

Solid dynamics

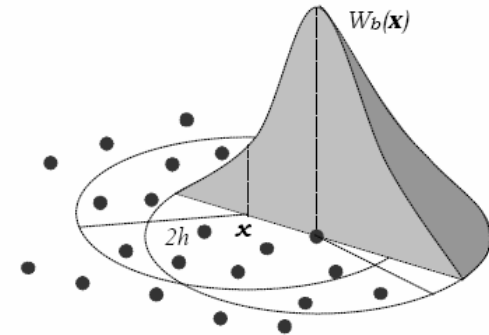
$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{u} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + \vec{a} \frac{\partial f}{\partial \vec{u}} = 0,$$

$$\vec{a} = -\nabla \Phi, \quad \sigma_{par} = \int f d\vec{u} dz.$$

Snytnikov V., Stoynovskaya O., MNRAS, 2013

Parallel code Sombbrero

- Particle-in-Cell method for **Vlasov-Luiville equation**
- Iterative combined method which includes Fourier transformation and sweep to solve **Poisson equation**
- SPH to treat **gas dynamics**



Nonlinear unstable dynamics - numerical results verification

Varying numerical resolution
Results of different codes comparation

Характерное время счета задачи

. $1.6 \cdot 10^5$ SPH частиц, сетка $1024 \cdot 1024$ узлов
 10^5 временных шагов, 8 процессоров

20 часов для диска без появления клампов

85 часов для диска с клампов

.Если количество модельных частиц

Уменьшить в 4 раза

$0.4 \cdot 10^5$ – 10 часов для диска без клампов

Увеличить в 4 раза

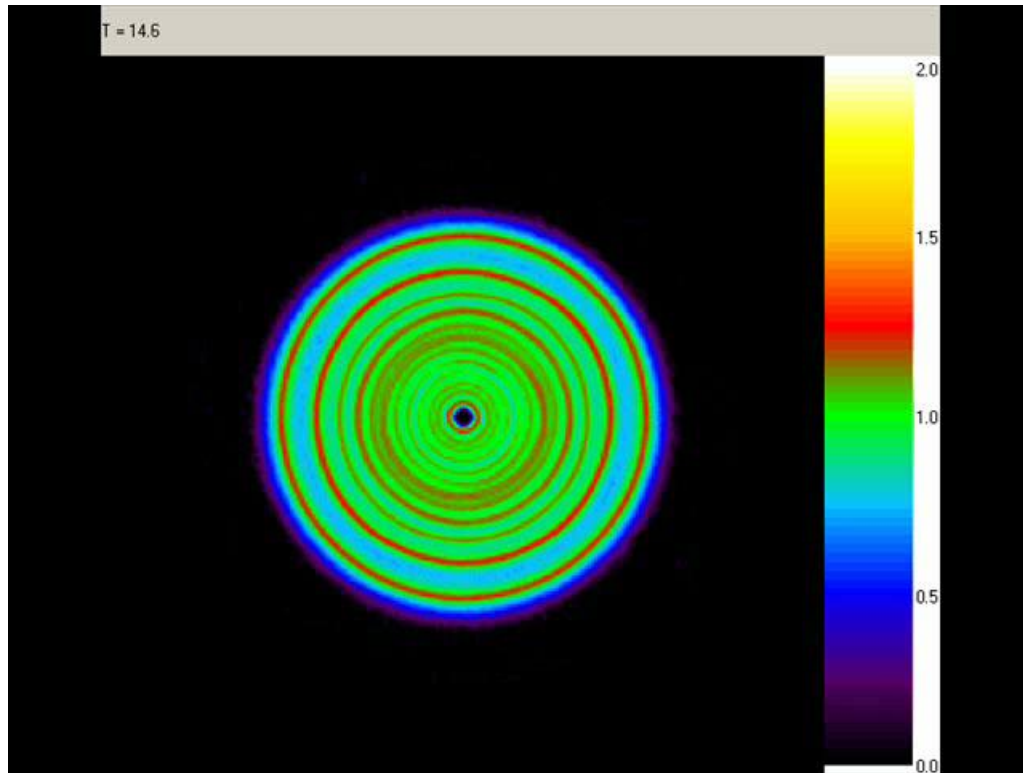
$6.4 \cdot 10^5$ – 80 часов для диска без клампов

Особые условия в околозвездном диске

Rice W., Lodato G., Pringle J., Armitage P., Bonnell I. et al, MNRAS, 2006

Creation of primary bodies with size about 1 and more kilometers

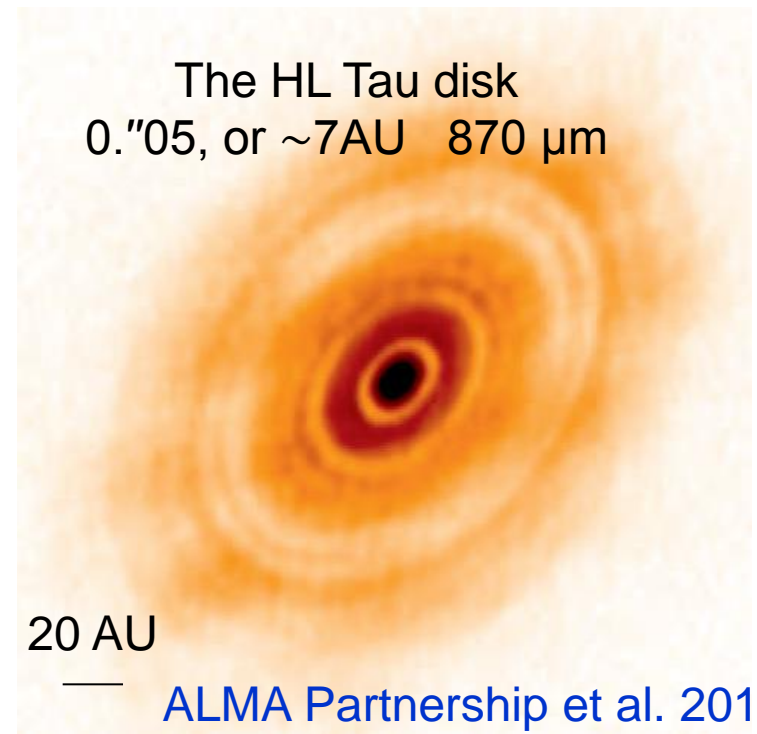
Drastic change of physical and chemical conditions



Gravitational instability

Time of the Clump was 1-10 years

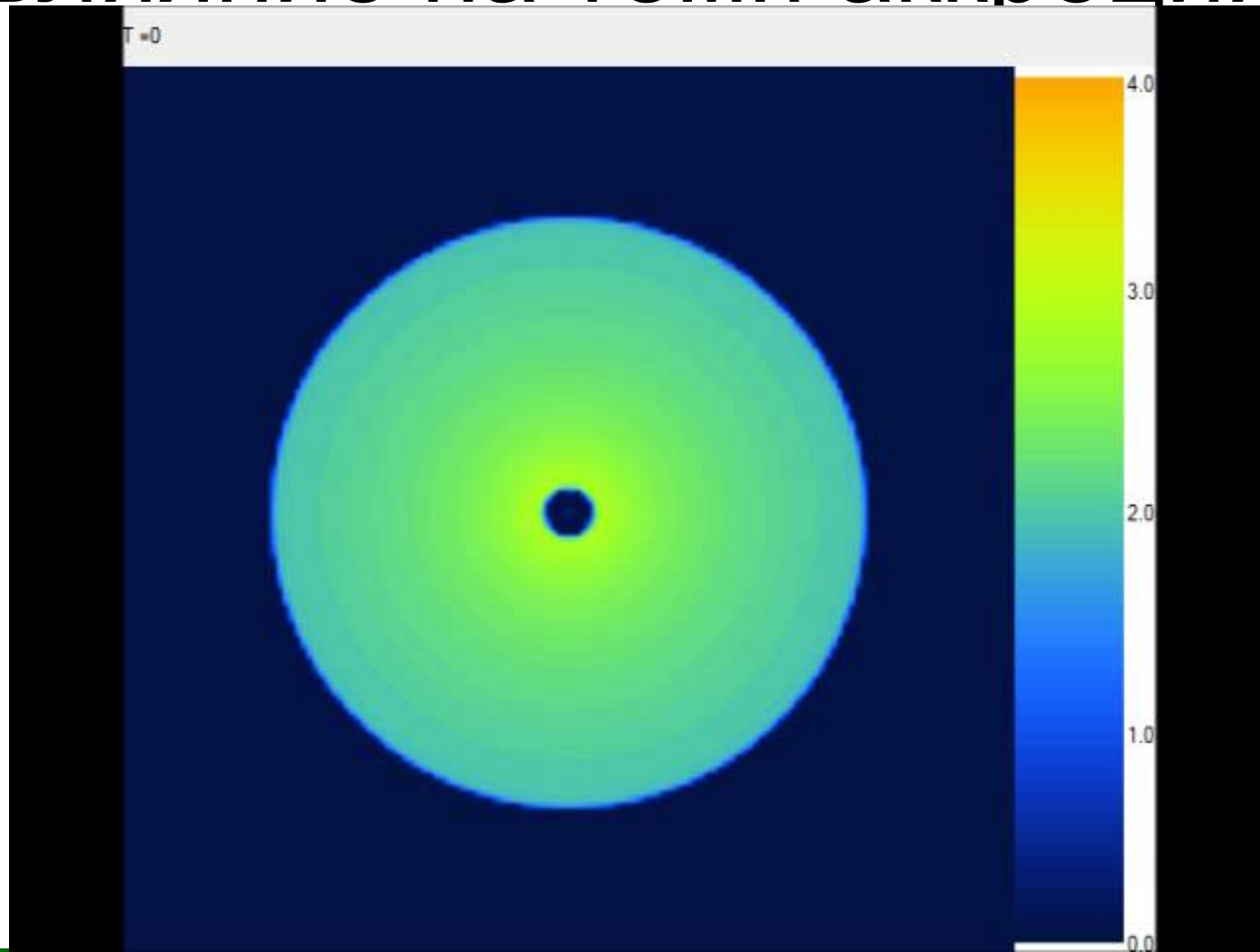
Стояновская О., Снытников В., 2013, 2016



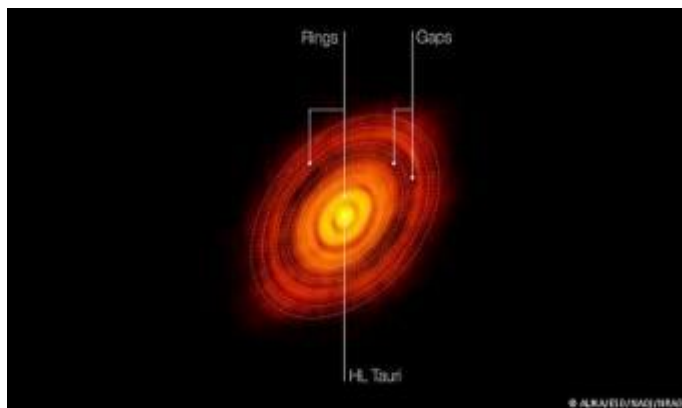
20 AU

ALMA Partnership et al. 2015

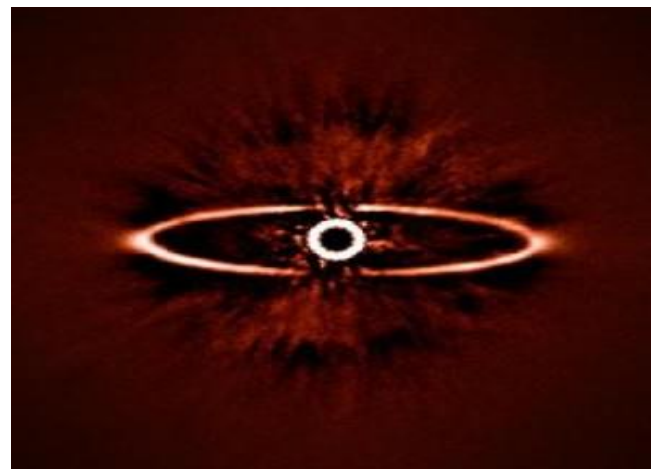
Фрагментация диска и ее влияние на темп аккреции



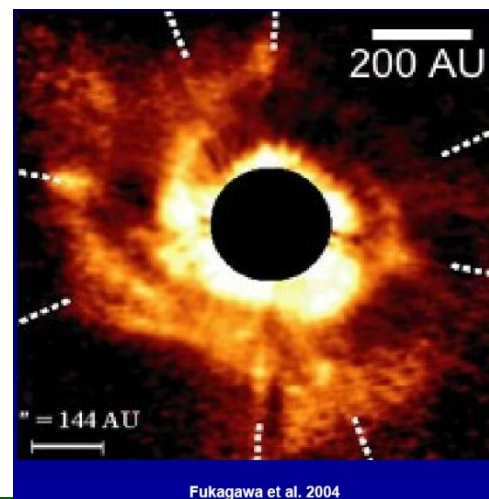
Околозвездные диски



Околозвездный диск (протопланетный газопылевой диск вокруг звезды HL Tauri, наблюдение с ALMA)



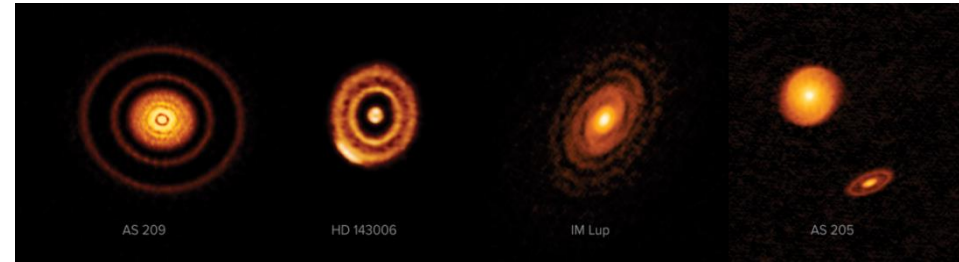
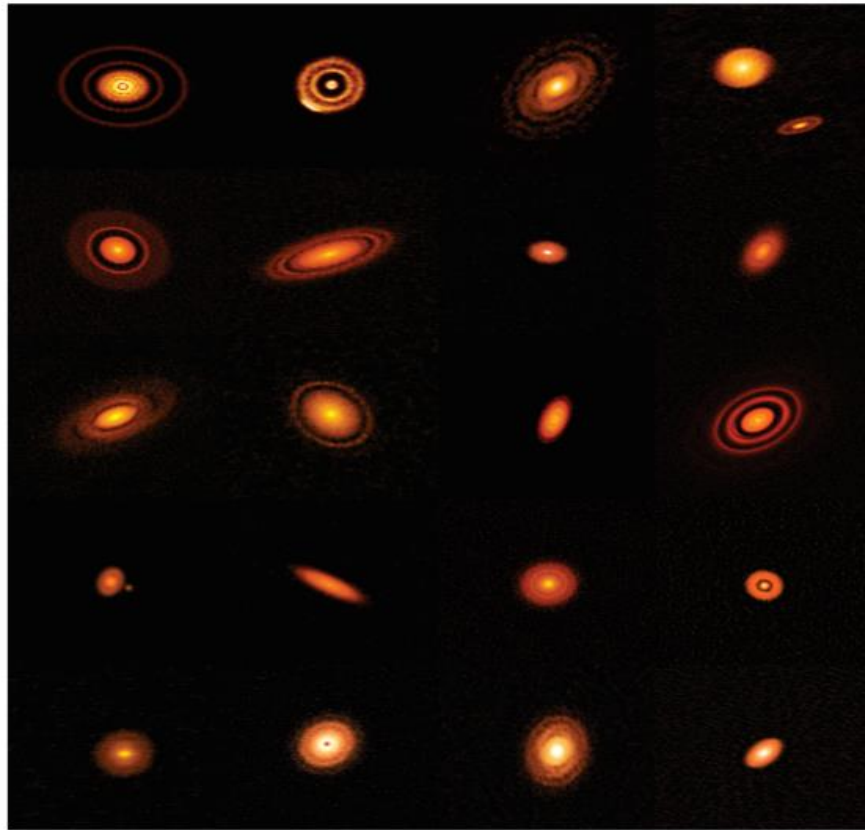
Околозвездный диск (пылевой диск вокруг звезды HR 4796A, наблюдение с VLT)



Наблюдения околозвездных дисков ALMA

The Epoch of Planet Formation, Times Twenty.

ALMA Campaign Provides Unprecedented Views of the Birth of Planets.

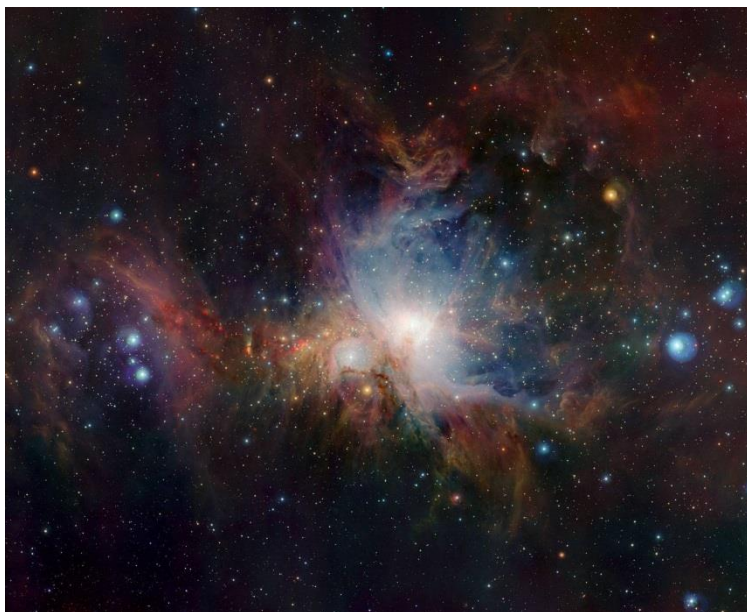


AS209 (возраст звезды — 1 млн лет). Интерпретации тонких внешних колец пока нет. HD143006 — 5 млн лет. Природа сгустка слева снизу неизвестна, но он реален. M Lup — пример спиральных рукавов. Возраст звезды — 0,5–1 млн лет, расстояние — около 500 световых лет. AS205 — двойная система. Диски ориентированы по-разному и с виду не деформированы тяготением соседней звезды

Круговые щели в дисках. Диски со спиральными рукавами: третий в верхнем ряду и первый во втором. Это результат гравитационной неустойчивости. Такие рукава воспроизводятся численным моделированием.

Штерн Б. Троицкий вариант, 2018

Астрохимия



Распространенность элементов в космосе

H, He, O, C, Ne, N, Mg, Si, Fe, S, Ar,...

- I. **H + He** – 98%,
Another elements – 1-2%, *among them*
- II. **Organics** (H, O, C, N,...) > 90%
- III. **Inorganics** (Mg, Si, Fe, O, ...) < 10%

H₂, He, H₂O, CH₄, Ne, NH₃, MgH₂, SiH₄, FeH, H₂S, Ar,...

H₂, He, H₂O, CH₄, Ne, Ar - **пробники гравитации, температуры, давления**

H, O, C, N, S, ... - **элементы для синтеза органики**

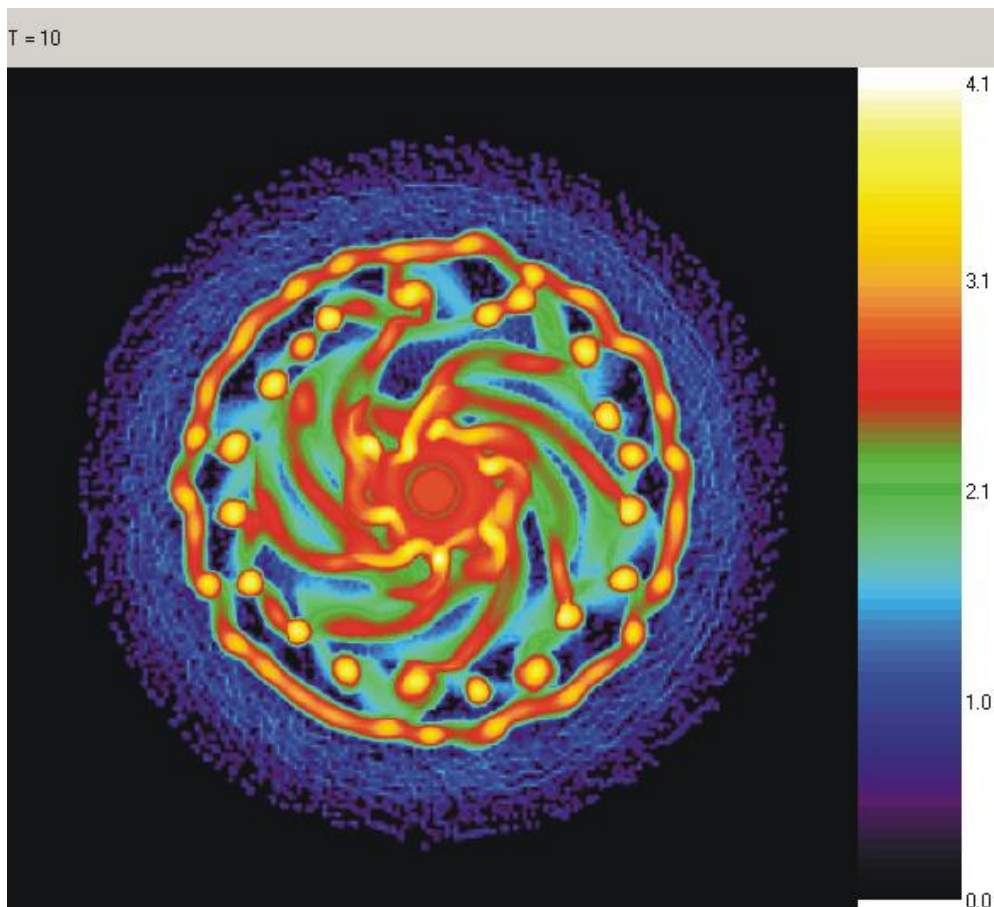
O, MgH₂, SiH₄, FeH, ... – **соединения для синтезов неорганики**

MgH₂ + SiH₄ + FeH + H₂O --> (Mg,Fe)₂SiO₄ and (Mg,Fe)₆Si₄O₁₀(OH)₈

(CH₂O)₁₀₆(NH₃)₁₆H₃PO₄ and Organics —> CO₂ + H₂O + N₂ + CH₄ + [PO₃]³⁻

Астрокатализ. Воссоздание физических условий химической эволюции в допланетных околозвездных дисках

Логарифм плотности газа в диске. Сгустки.

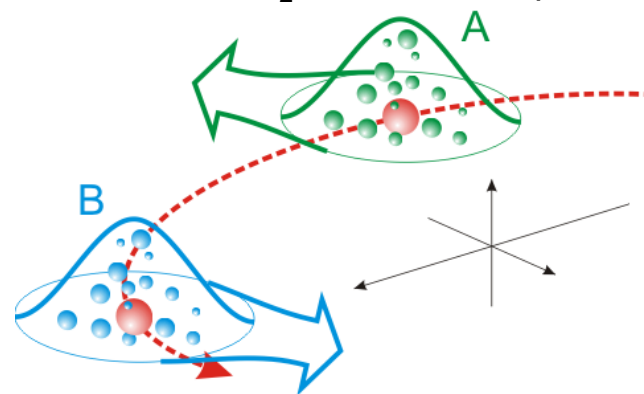


Двухфазная модель диска из газа и твердых тел.

Расчеты на ССКЦ и кластере ИК СО РАН. Сетка 80 000 000 ячеек.

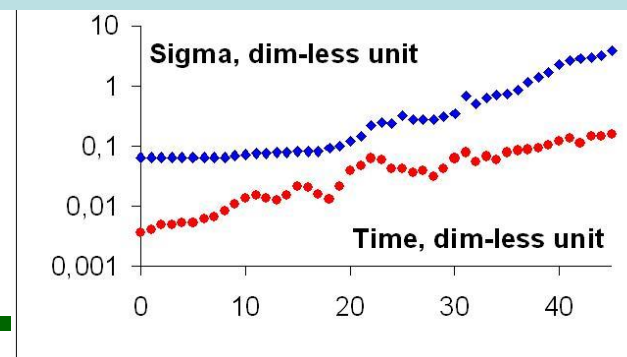
Снытников В.Н. Палеонтологический журнал, 2010, и др.

Периодическое повышение давления над поверхностью тела из $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ и $(\text{Mg,Fe})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ при его движении из одного сгустка к другому в первый миллион лет. Волновые реактора высокого давления $P > 1$ атм по H_2 и He для «мира РНК».



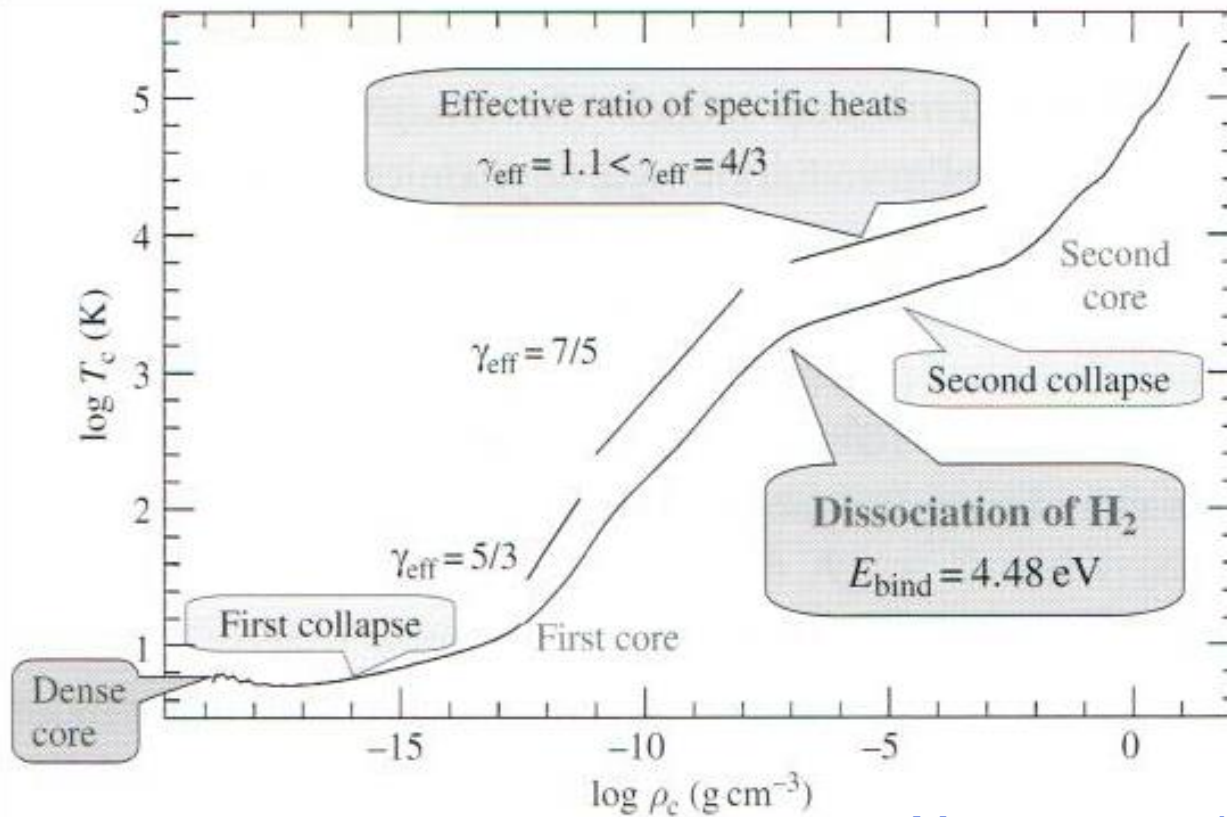
Коллапс газа и сборка тел в одном сгустке

Поверхностная плотность газа (синий) и плотность твердой фазы (красный)



Водород и гелий

Расчет коллапса газа в модели радиационной газодинамики
Изменение показателя адиабаты среды



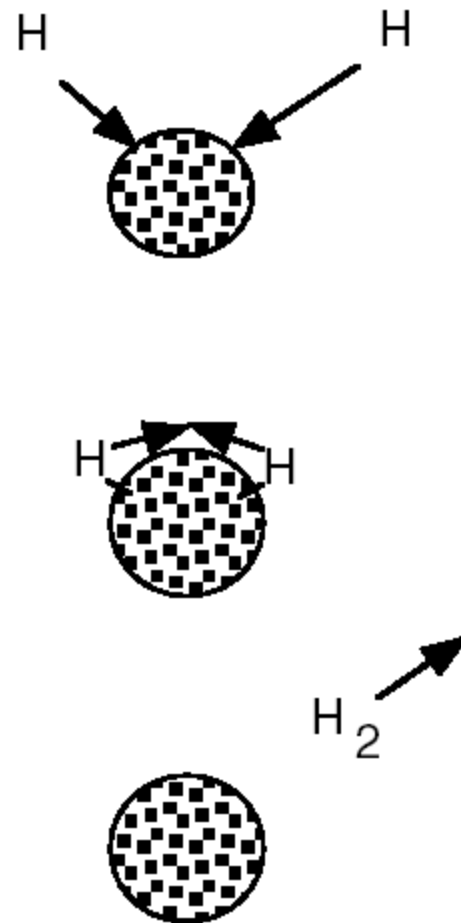
Masunaga and Inutsuka 2000

Пара- орто- водород при 20 – 100 K на катализаторах Fe, Ni
теплота перехода 1,3 кДж/моль.

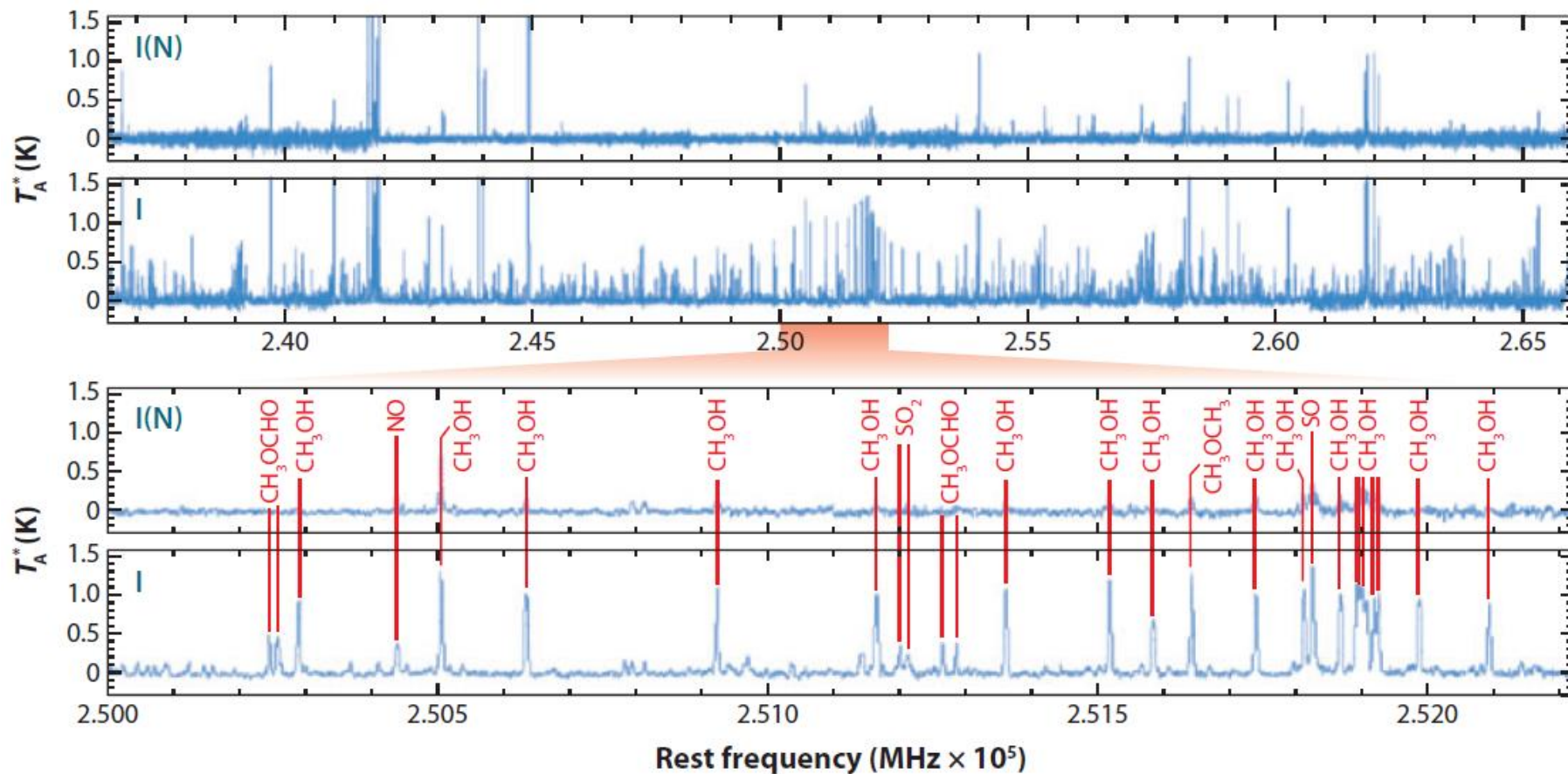
Буянов Р.А. 1960

Образование водорода и органических соединений катализом на пыли

1. Молекулы или атомы водорода адсорбируются на пылинке.
2. Разложение молекул на составляющие группы или атомы
3. Диффузия по поверхности атомов
4. Образование новой молекулы на активном центре поверхности.
Образование молекулы H_2 .
5. Десорбция молекулы H_2 с поверхности пылинки при выделении энергии.
6. Возможен обратный процесс – разложение молекулы H_2 на два атома с их десорбцией в газ



Спектральные обзоры



Herbst & van Dishoeck ,2009.

Уравнения химической КИНЕТИКИ

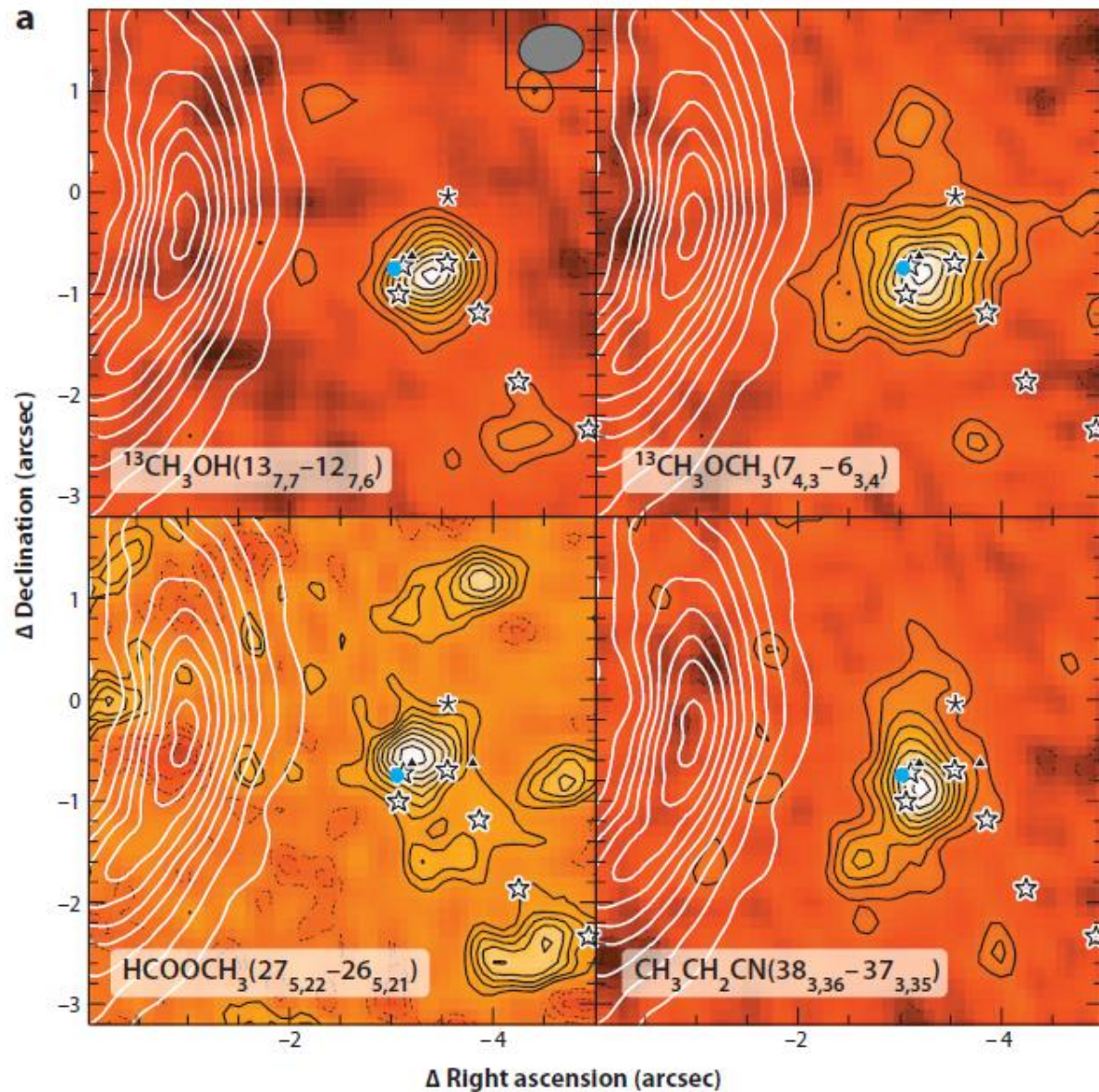
$$\frac{d}{dt}n_i^g(r,t) = \sum_j \sum_l K_{lj}^g n_l^g n_j^g - n_i^g \sum_j K_{ij}^g n_j^g + \sum_{j \neq i} K_j^e n_j^g - K_i^e n_i^g$$

$$K^g = \alpha (T/300 \text{ K})^\beta \exp(-\gamma/T)$$

$$K^e = \alpha G_0 \exp(-\gamma A_V)$$

$$K^e = \alpha \zeta$$

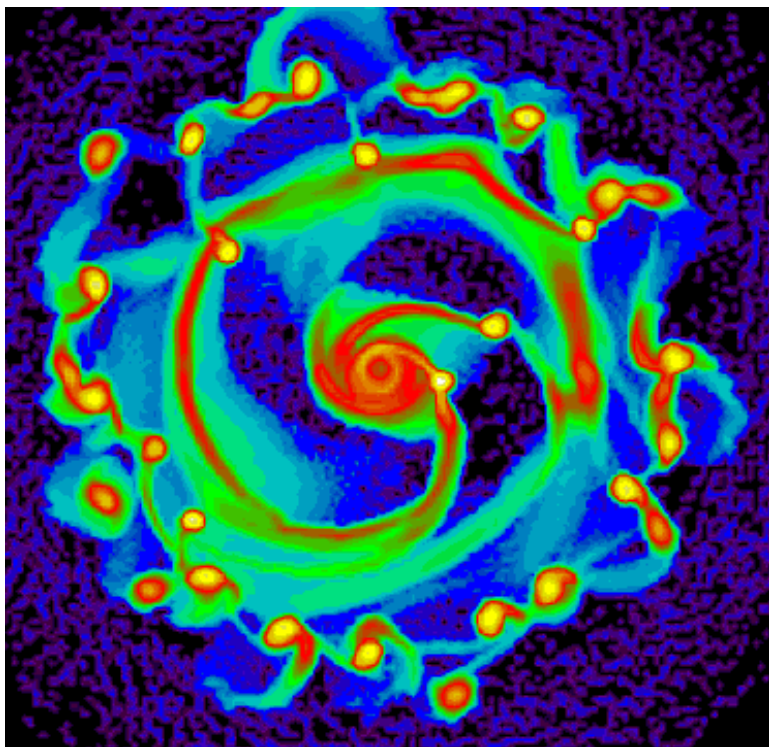
- n , T , ζ , G_0 , A_V — внешние параметры
- Набор компонентов
- α , β , γ — параметры реакций



Метанол с ^{13}C
 Диметилловый эфир с ^{13}C
 Метилформиат
 Пропаннитрил

Herbst E., van Dishoeck E., 2009

СУБДИСК ГАЗ – ПЫЛЬ И БУЛЫЖНИКИ МИР РНК



Гравитационная неустойчивость
Времена существования сгустков
от 1 до 100 лет

МИР РНК мог длиться
свыше 1 миллиона лет

Формирование километровых и
больших тел

Катализаторы и органические
соединения

Изменение физических и химических
условий в гигантских пределах

Концентрации от 10^5 до 10^{22} (см⁻³)

Давление газа до 100 атм

Температура от 50 до 5000 К

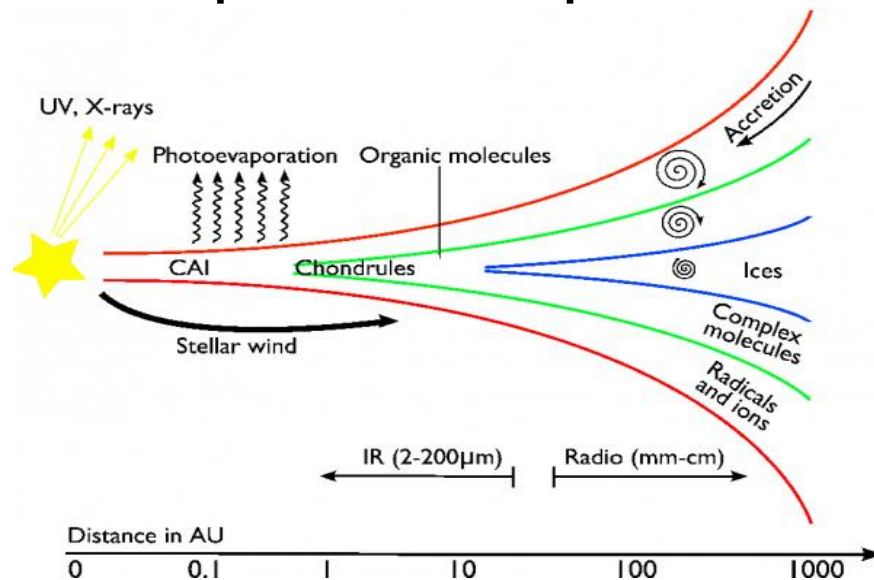
Обмен веществом между
сгустками

Размеры сгустков –
реакторов могли превышать
диаметр Солнца

МИР РНК в СС!!!

Перенос и поглощение излучения

Уравнения радиационной газодинамики



(G^0, \mathbf{G}) - 4-х вектор плотности энергии излучения,
 E - плотность энергии излучения, \mathbf{F} – поток
 излучения, P - тензор переноса энергии,
 $I(\mathbf{n}, \nu)$ - интенсивность излучения на частоте ν в
 направлении \mathbf{n}

$$cG^0 = \int_0^\infty d\nu \int d\Omega [\kappa(\mathbf{n}, \nu) I(\mathbf{n}, \nu) - \eta(\mathbf{n}, \nu)],$$

$$c\mathbf{G} = \int_0^\infty d\nu \int d\Omega [\kappa(\mathbf{n}, \nu) I(\mathbf{n}, \nu) - \eta(\mathbf{n}, \nu)] \mathbf{n},$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \mathbf{G}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \nabla \cdot [(\rho e + P) \mathbf{v}] = cG^0$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = -cG^0$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathcal{P} = -\mathbf{G},$$

$$cE = \int_0^\infty d\nu \int d\Omega I(\mathbf{n}, \nu)$$

$$\mathbf{F} = \int_0^\infty d\nu \int d\Omega \mathbf{n} I(\mathbf{n}, \nu)$$

$$c\mathcal{P} = \int_0^\infty d\nu \int d\Omega \mathbf{n} \mathbf{n} I(\mathbf{n}, \nu),$$

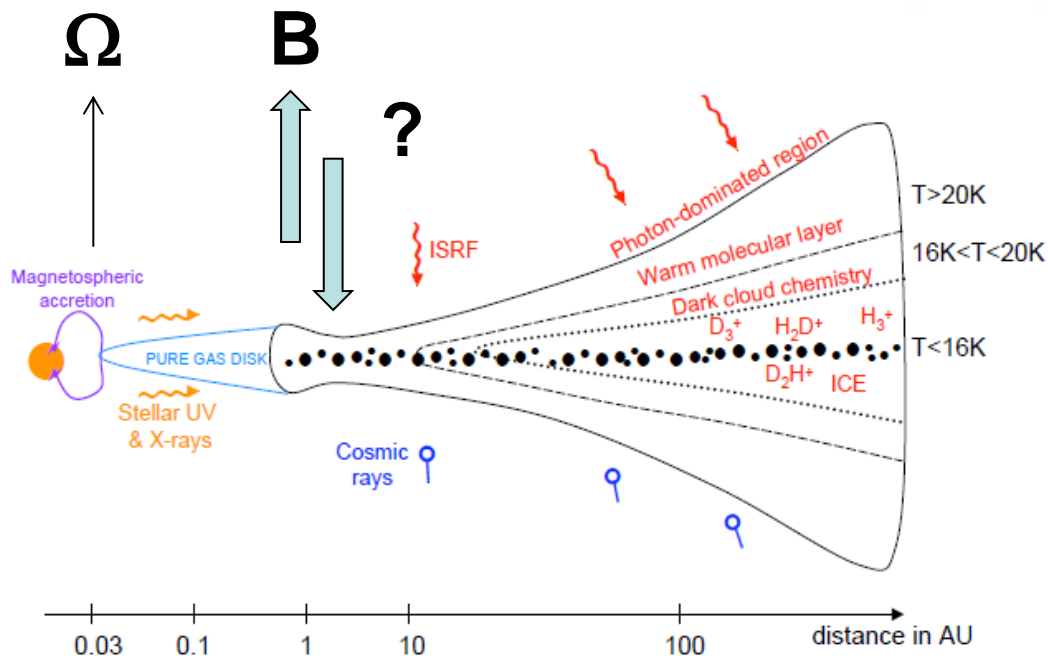
κ - поглощение η - эмиссия

Mihalas & Auer, 2001;
 Klein R. & Stone J. 2009

МГД - модели

Влияние направления магнитного поля на выходы хиральных продуктов в ион-молекулярных и радикальных реакциях

Проблема хиральности в биохимии
Гольданский В.И., Кузьмин В.В., 1989



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

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) + \nabla p + \rho \nabla \Phi - \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{c} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) e \right) + p(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

МГД процессы:

- ☐ в слабоионизованной среде
- ☐ в магнито – плазмо – ионосфере
- ☐ в среде газ – пыль – плазма

Монография
Schulz N. 2005, 2012.
Число ссылок 1344.

Заключение

Задачи численного моделирования дисков

Решение конкретных вычислительных проблем, в частности, исследование и адаптация методов при включении какого-либо физического или химического процесса в функционирующий численный код.

Создание параллельных программ на основе отработанных и реализованных последовательных алгоритмов, решающих конкретную физическую проблему.

Разработка новых программ на основе перспективных численных методов или расширенных математических моделей.

Решение ряда фундаментальных проблем вычислительной математики, направленных на создание новых численных методов и обоснование имеющихся.

Проведение вычислительных экспериментов с использованием доступных и/или созданных кодов на имеющихся компьютерах с получением ориентированных на потребителя результатов.

В работах принимали участие:

Стояновская О.П., (ИК СО РАН)
Снытников Н.В. (ИВМиМГ СО РАН)

Ранее участвовали:

Вшивков В.А., Никитин С.А. (ИЯФ)
Неупокоев Е.А., Нурисламова Л.Ф.
Снытников А.В., Кукшева Э.А.,
Стадниченко О.А., Маркелова Т.В.
Черных И.Г., Боронина М.А.
Лазарева Г.Г., Куликов И.М.
Юрченко Е.А.

Работа была поддержана программой Президиума РАН
«Происхождение и эволюция биосферы».

Обсуждалась у Розанова А.Ю., Галимова Э.М., Спирина А.С.,
Заварзина Г.А., Марова М.А., Добрецова Н.А., Шумный В.К., Колчанова Н.А.
Особая признательность - Пармону В.Н.

Спасибо за внимание

Carbonaceous chondrites



Murchison CM



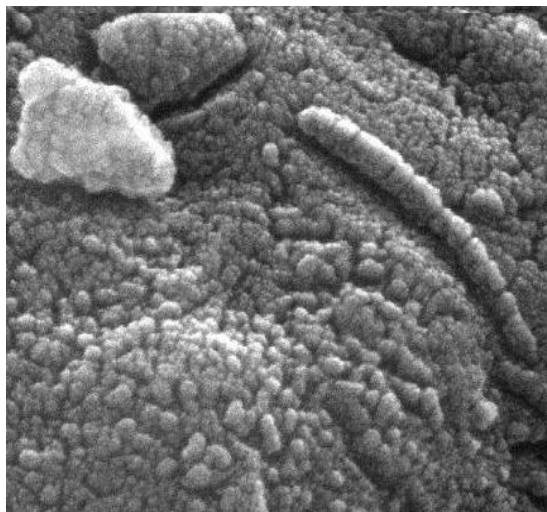
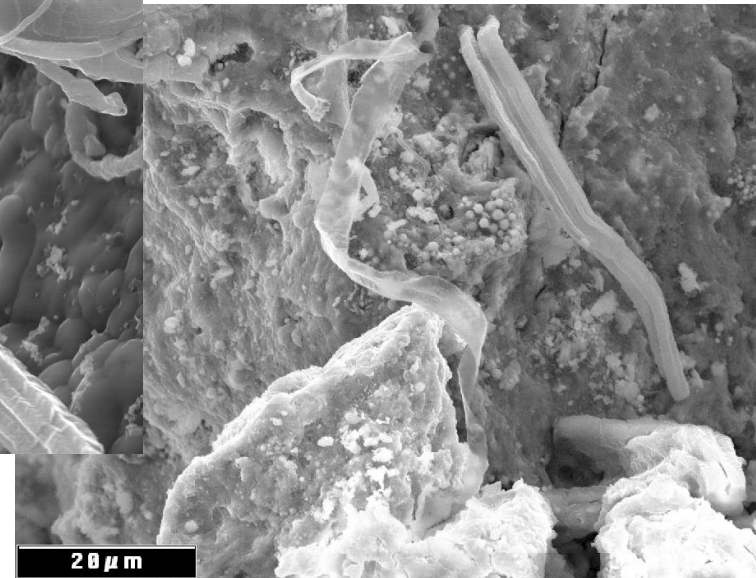
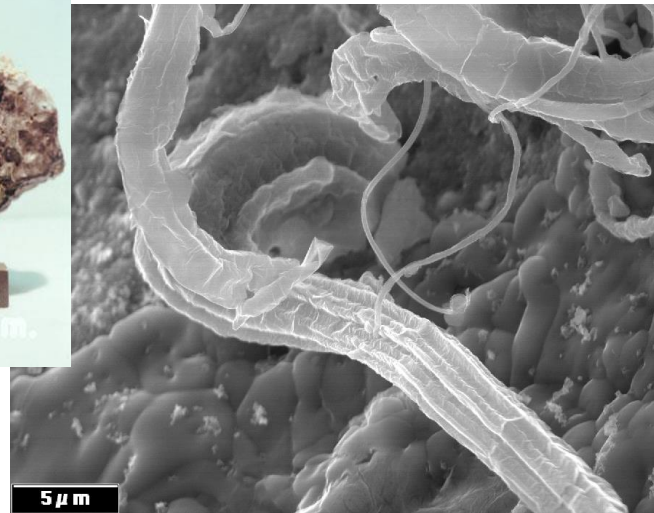
Allende CV3



Orgueil (CI)

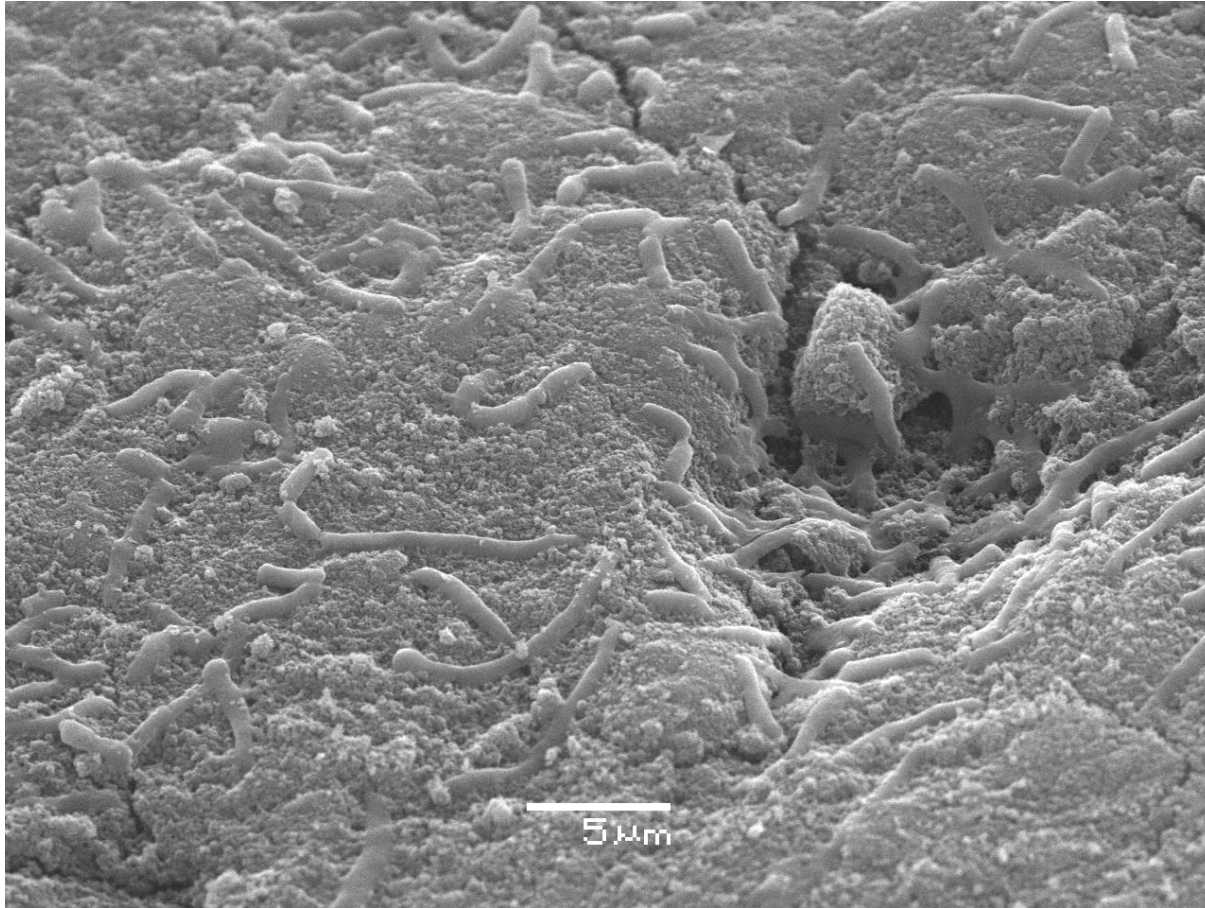
Comets, Carbonaceous Meteorites, and Origin of the Biosphere

1996: McKay et al. Report Discovery of Possible Microfossils in 3.2 Gya Mars Meteorite ALH84001. Microfossils discounted as being too small for life and too simple to be conclusively Biogenic.



2004: Hoover et al. Report Evidence for Complex Mats of Mineralized Morphotypes of Filamentous Cyanobacteria in Orgueil CI Carbonaceous Meteorite

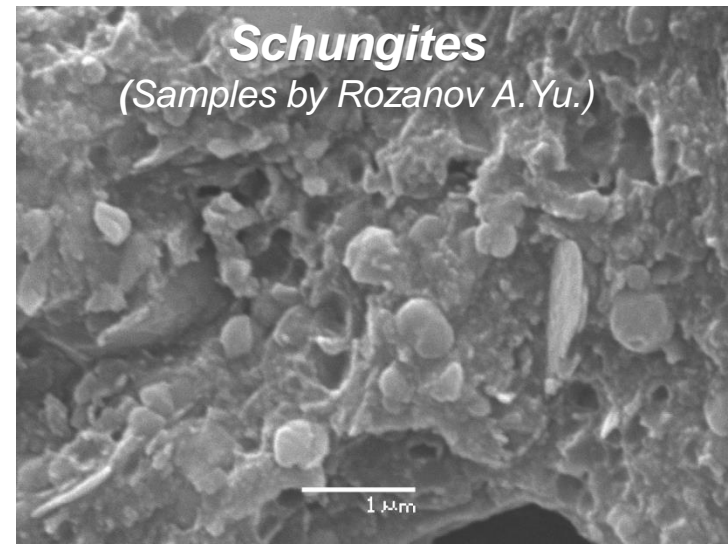
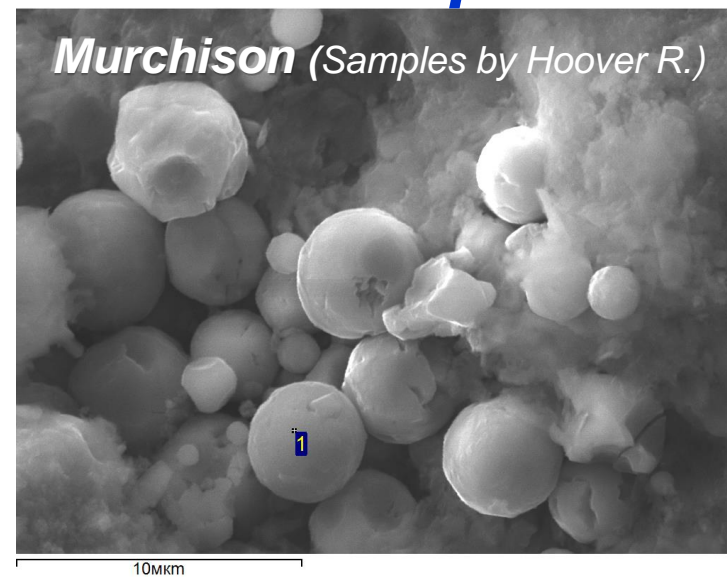
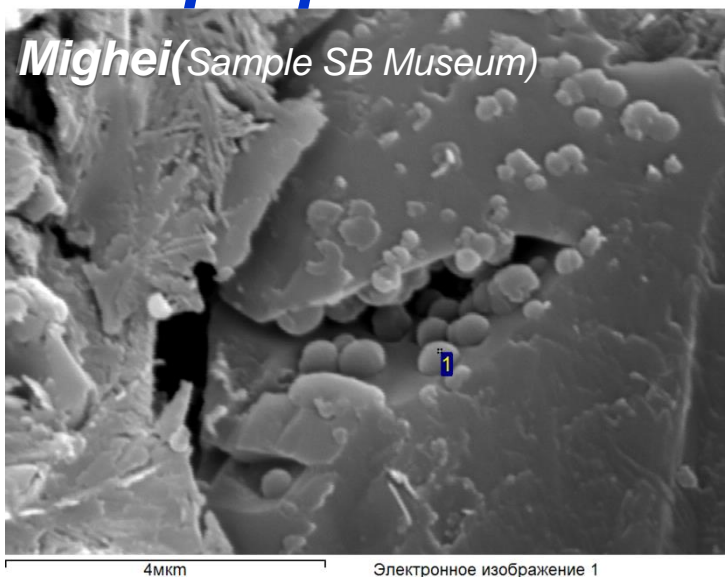
***Rhodococcus* sp.**
on Sibunite (C – material)



Kovalenko G. and Rudina N. (BIC SBRAS)

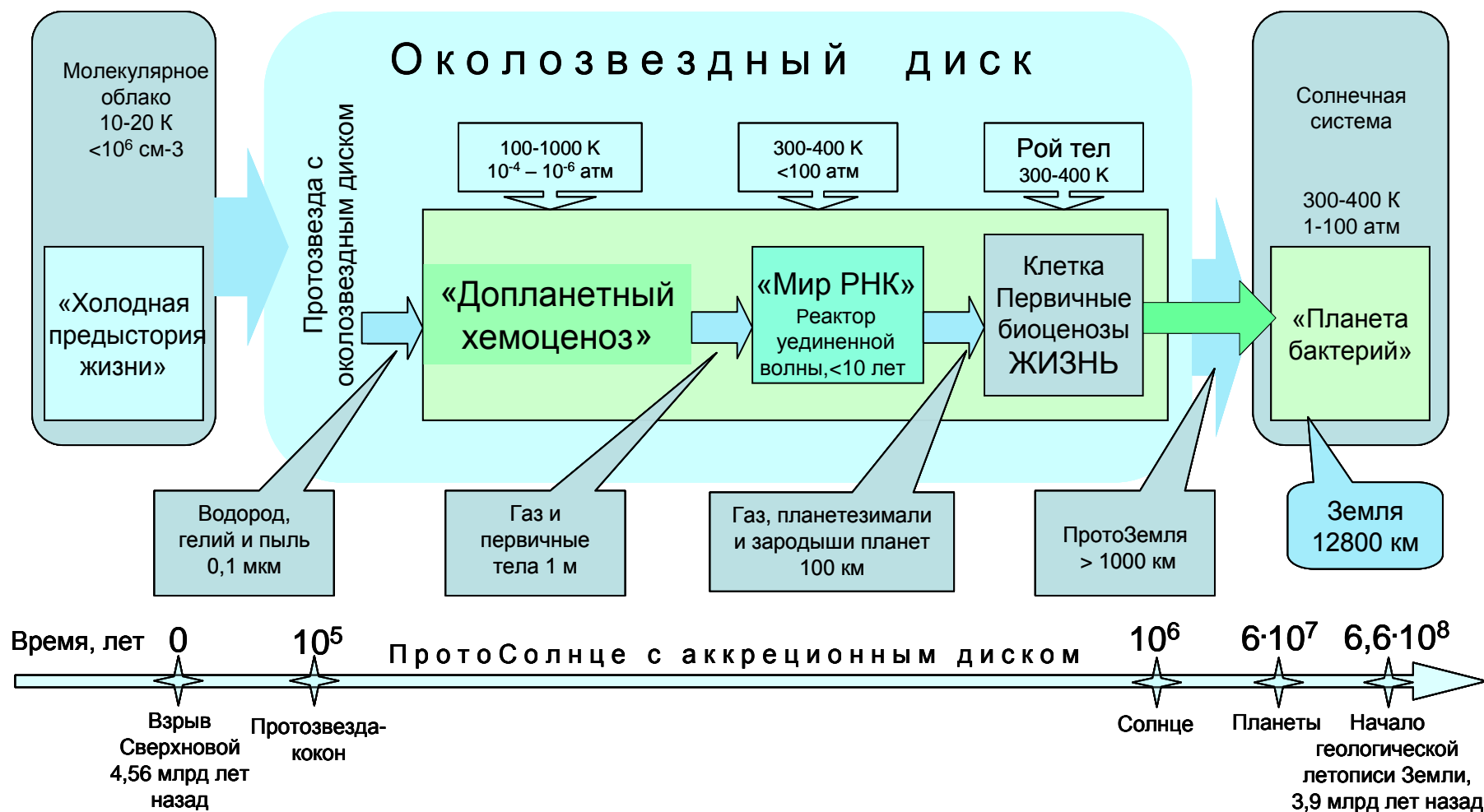
МЕТЕОРИТЫ

Микрофоссилии в углистых хондритах СМ



Scanning Electron Microscope, BIC SB RAS (Study by N.A. Rudina)

Происхождение жизни как процесс самоорганизации



Астрохимические базы данных

Herbst & Clemperer (1973)

37 компонентов и 100 реакций (5 наблюдаемых молекул)

Bettens & Herbst (1995)

Около 1000 компонентов и 10000 реакций

UMIST95, UMIST99, RATE06, UDFA (University of Manchester)

420 компонентов и более 4500 реакции

New Standard Model, OSU, KIDA (Ohio State University)

473 компонента и более 6096 реакций

Молекул больше, чем наблюдается