



# О роли поля излучения в формировании начальной функции масс

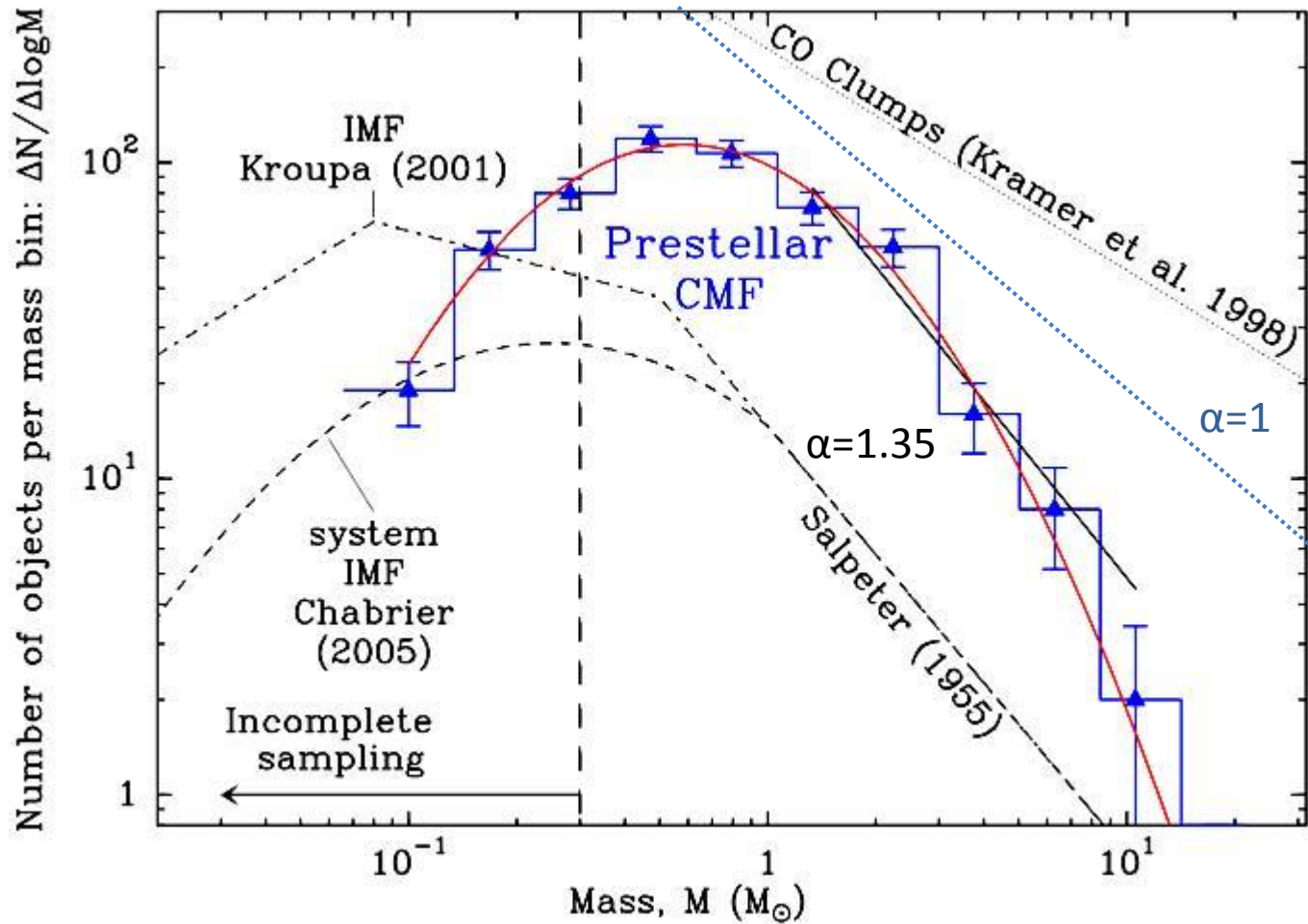
***Б.М.Шустов, Д.З.Вибе***  
Институт астрономии РАН



# О чём речь

1. НФМ (IMF) forever
2. Философские замечания о математике и физике формирования IMF
3. Поле излучения звёзд как один из механизмов, ответственных за форму IMF
4. Постановка задачи об эволюции ядер (протозвезд) и облаков (протоскоплений) в поле излучения в 1D
5. Результаты (начало)
6. Выводы

# H $\Phi$ M (IMF) forever



Andre2013

$$\phi(M) \propto M^{-(1+\alpha)}.$$

# IMF коричневых карликов

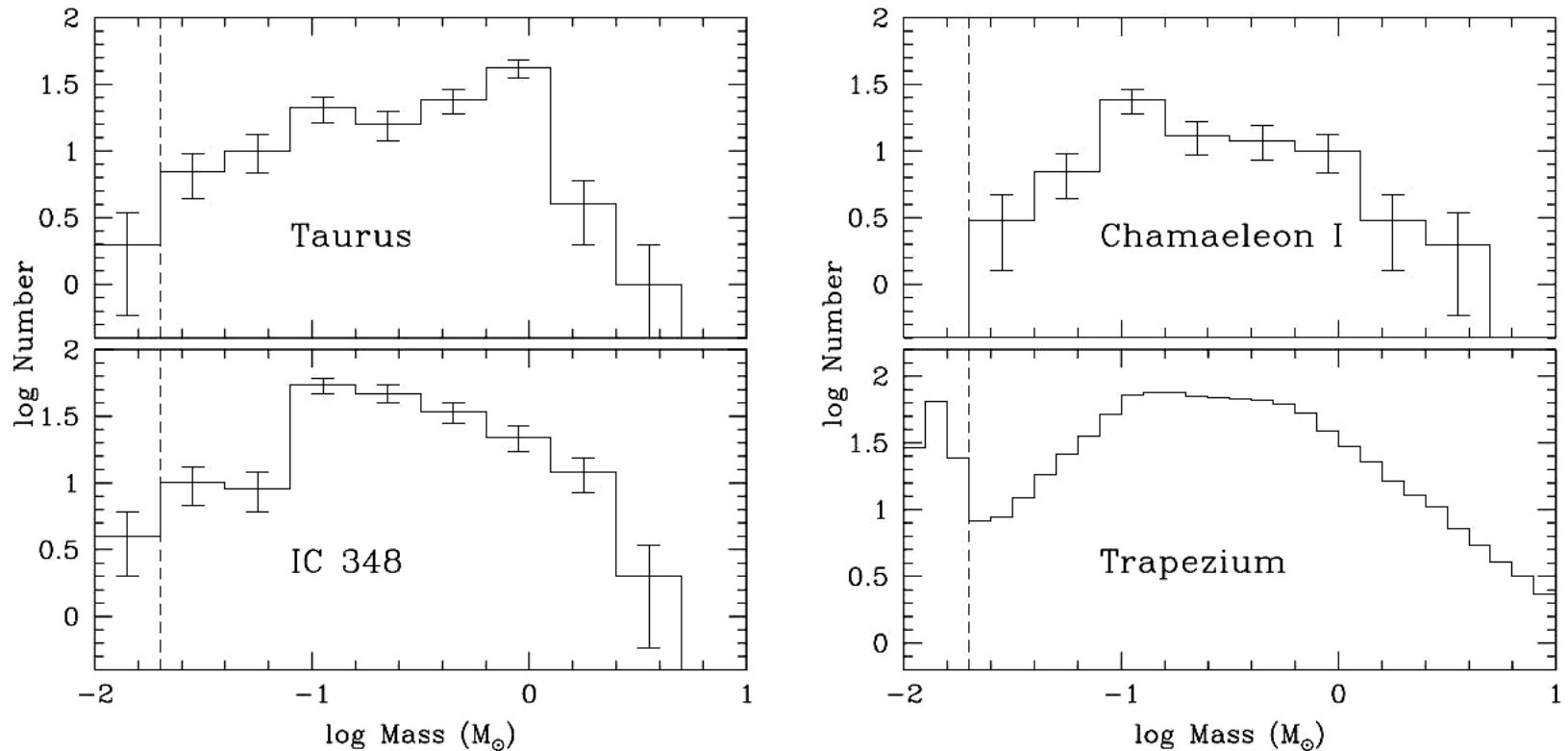


Fig. 1.— IMFs for Taurus (Luhman, 2004c), IC 348 (Luhman et al., 2003b), Chamaeleon I (Luhman, in preparation), and the Trapezium Cluster (Muench et al., 2002). The completeness limits for these measurements are near  $0.02 M_{\odot}$  (dashed lines). In the units of this diagram, the Salpeter slope is 1.35.

Luhman+2006

# Факторы и процессы, влияющие на переходы облако → ядра и ядра → звезды

## облако → ядра

турбулентная фрагментация; тепловые, ГД (МГД) неустойчивости, химические процессы,...

## ядра → звезды

конкурентная аккреция, динамическая фрагментация, аккреционные потоки и фрагментация в филаментах, образование и фрагментация дисков, химические процессы, магнитное торможение, feedback (испарение, выбросы и т.д.)...

# Теоретические подходы к объяснению CMF и IMF примеры

## Molecular cloud clump → CMF

*Padoan+1997, 2002* Турбулентность → предположение о логнормальном распределении PDF (probability density function). В изотермическом газе получается CMF логнормального вида со степенным распределением для массивной области.

*Inusuka 2001, Hennebelle&Chabrier2008* формализм Press-Schechter → солпитеровского вида CMF с крутым завалом на малых массах

*Hopkins2012, Goodman+2009, Beaumont2013*: статистические методы (e.g. метод случайных блужданий, ..). GMC MF. → CMF  
Много численных проектов.

## CMF → IMF

см., например, обзор *Offner+2014*

# Философские замечания о математике и физике формирования IFM

$$\lambda_o = \frac{V_s}{\sqrt{4\pi G \varrho}}$$

Плотность вероятности (возмущений масштаба  $\lambda$ ) в предположении белого шума

$$\varphi(\lambda) d\lambda = 2 \lambda_o^{-2} \lambda^{-3} d\lambda \quad \lambda_o \leq \lambda \leq \infty$$

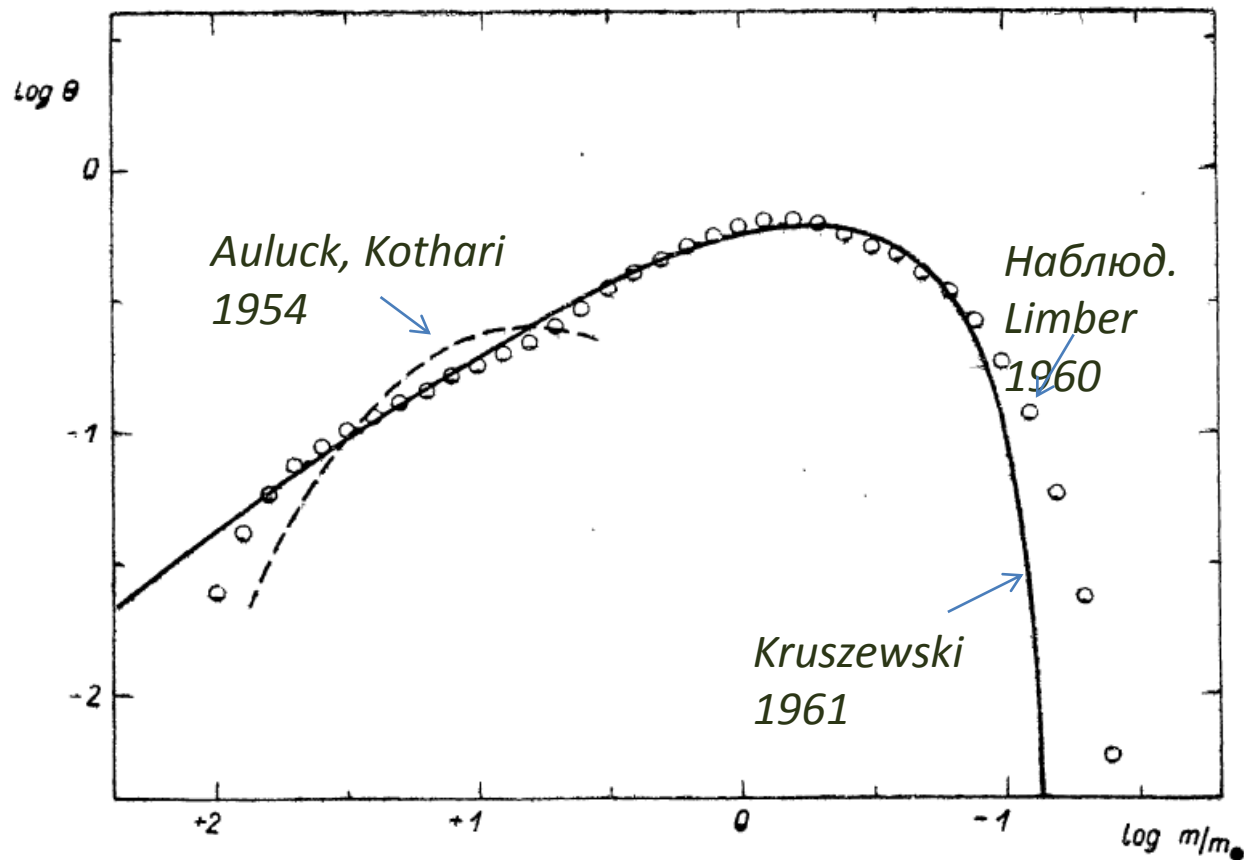
$$m = \varrho \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad m_o = \varrho \lambda_o^3$$

$$\ln \frac{m}{m_o} = \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_o} + \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_o} + \ln \frac{\lambda_3}{\lambda_o}$$

Спектр масс

$$\Theta \left( \ln \frac{m}{m_o} \right) d \left( \ln \frac{m}{m_o} \right) = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{m}{m_o} \right)^2 e^{- \left( \ln \frac{m}{m_o} \right)} d \left( \ln \frac{m}{m_o} \right)$$

# Философские замечания о математике и физике формирования IFM (прод.)



Физика процесса выражается в отклонении от распределения, полученного в приближении «белого шума»?



## О роли поля излучения

*Stutzki+1988, Draine +Bertoldi 1996* Наблюдения областей звездообразования в линиях  $C^+$  показывают, что диффузное УФ-излучение способно проникать довольно глубоко в плотные молекулярные облака (благодаря клочковатой структуре) и освещать их плотные ядра.

Изучения коллапса, индуцированного ионизирующим или диссоциирующим излучением (напр. *LaRosa1983, Ho+1986*). Подтверждением возможности этого процесса служат наблюдения точечных источников ИК-излучения в глобулах с яркими краями (*Sugitani+1995, Patel+1993*)

*Klein+1983, Bertoldi+McKee1990, Kovalenko+Shchekinov1992, Lefloch +Lazareff1994* - в сгустке, освещенном ионизирующим излучением, конкурируют два процесса: сжатие внутренних и разлет внешних областей облака.

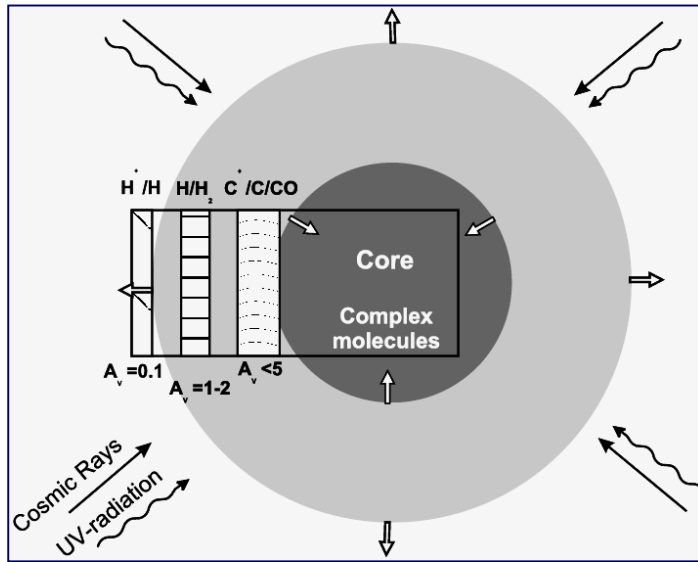
## О роли поля излучения (прод.)

*Bate2009* – observed IMF appears to be universal in the local Universe is due to self-regulation of the star formation process by radiative feedback.

*Guzseinov+2017* found that a model with the protostellar heating reproduces the observed multiplicity fractions and mass ratio distributions for both. Solar and sub-Solar mass stars while a model without feedback fails to do so.

*Palmeirim et al. (2017)*. провели статистическое исследование населения молодых звёздных объектов внутри инфракрасных пузырей и в их окрестности. Процесс перехода от дозвёздной к протозвёздной стадии занимает меньше времени на ранней стадии эволюции пузыря, то есть, когда процесс звездообразования происходит в сгустках, расположенных ближе к ионизирующей звезде (звёздам). Авторы предположили, что это связано с эффектами обратной связи.

# Постановка задачи об эволюции ядер молекулярных облаков в поле излучения в 1D



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \vec{v} = 0$$

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

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -p \nabla \vec{v} - \Lambda + \Gamma.$$

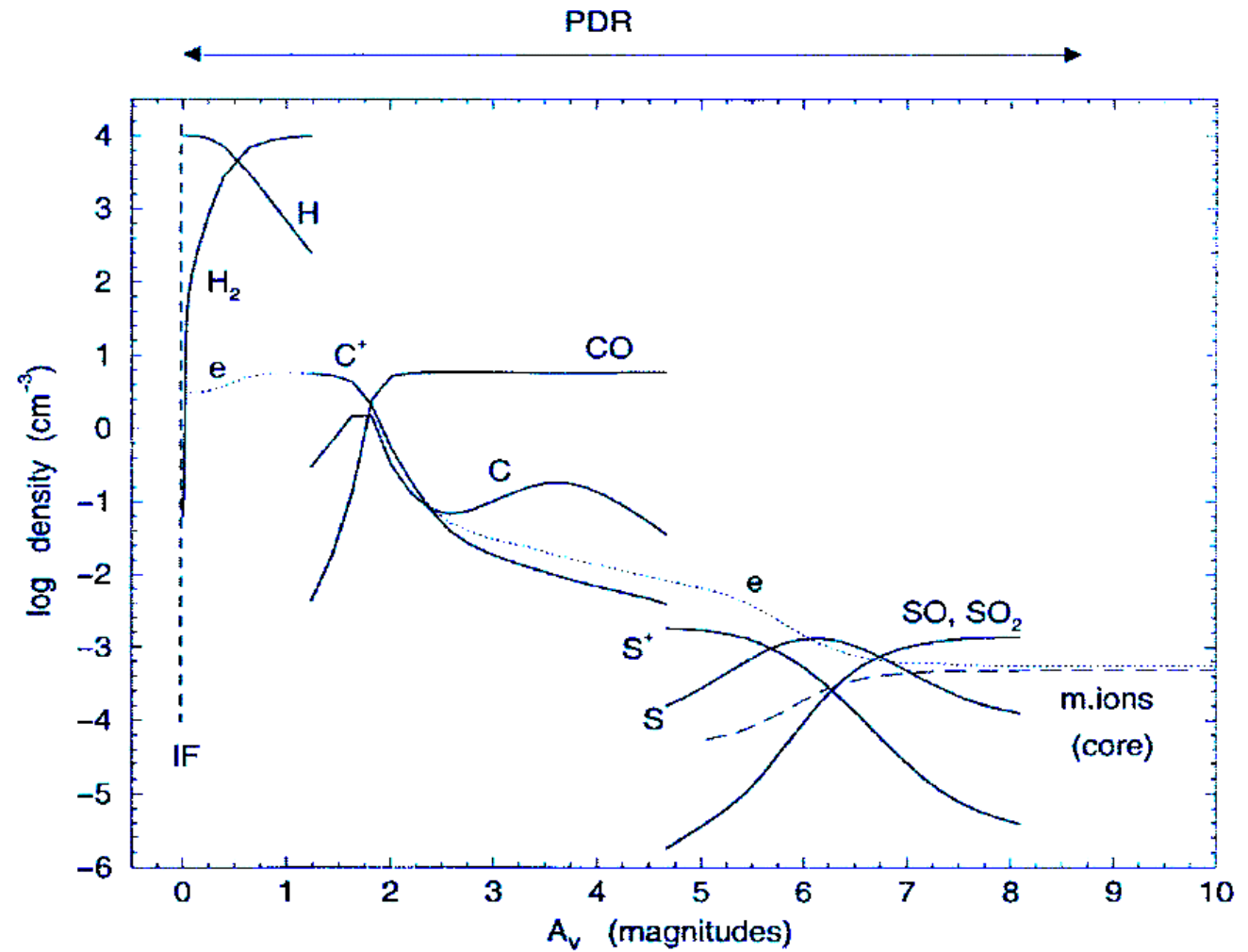
$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \text{div } n_i \vec{v} = P_i - L_i, \quad i = 1, \dots, M,$$

**Вибе2004** – первая самосогласованная модель: химия+ динамика+ G (неопубл.)

**Нагрев:** фотоионизация нейтрального углерода, фотоэлектрическая эмиссия с поверхности пылинок, образование H<sub>2</sub> на поверхности пылинок, нагрев/охлаждение в столкновениях газ—пыль, нагрев космическими лучами

**Охлаждение:** излучение атомов и молекул: вращательные уровни основного электронного состояния молекул CO, CH, OH и H<sub>2</sub>O, а также уровни тонкого расщепления основных электронных состояний C<sup>+</sup>, C и O.<sup>11</sup>

# Схема химической структуры зоны PDR



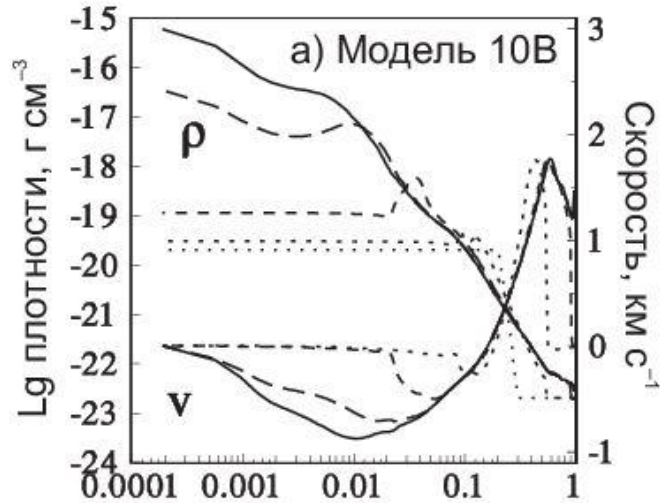
# Начальные значения (одиночные ядра-протозвёзды)

| Модель | Масса<br>облака, $M_{\odot}$ | $G_0$ | $M_J$<br>$M_{\odot}$ | Поверхностные<br>реакции | $Y$        | Примечание                                                                                  |
|--------|------------------------------|-------|----------------------|--------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3A     | 3                            | 0     | 2.8                  | +                        | $10^{-4}$  | Стандартная модель<br>Только газofазные реакции<br>Стационарное облако<br>Свободное падение |
| 3B     | 3                            | 1     | 2.8                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 3C     | 3                            | 1000  | 2.8                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10A    | 10                           | 0     | 1.5                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10B    | 10                           | 1     | 1.5                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10B-G  | 10                           | 1     | 1.5                  | —                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10B-ND | 10                           | 1     | 1.5                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10B-PF | 10                           | 1     | 1.5                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10C    | 10                           | 1000  | 1.5                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 3A     | 3                            | 0     | 2.8                  | +                        | $10^{-4}$  | Стандартная модель                                                                          |
| 3B     | 3                            | 1     | 2.8                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 3C     | 3                            | 1000  | 2.8                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10A    | 10                           | 0     | 1.5                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10B    | 10                           | 1     | 1.5                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |
| 10B-Y  | 10                           | 1     | 1.5                  | +                        | $10^{-10}$ |                                                                                             |
| 10C    | 10                           | 1000  | 1.5                  | +                        | $10^{-4}$  |                                                                                             |

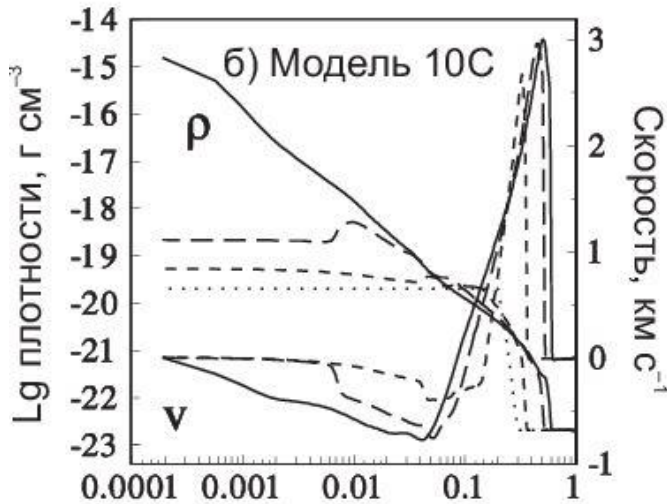
# Результаты (одиночные ядра - протозвёзды)

## Динамическая эволюция

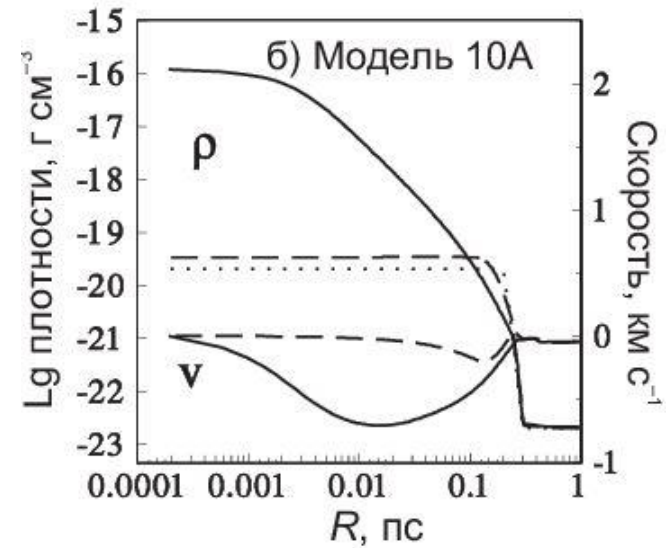
$G_0=1$



$G_0=1000$



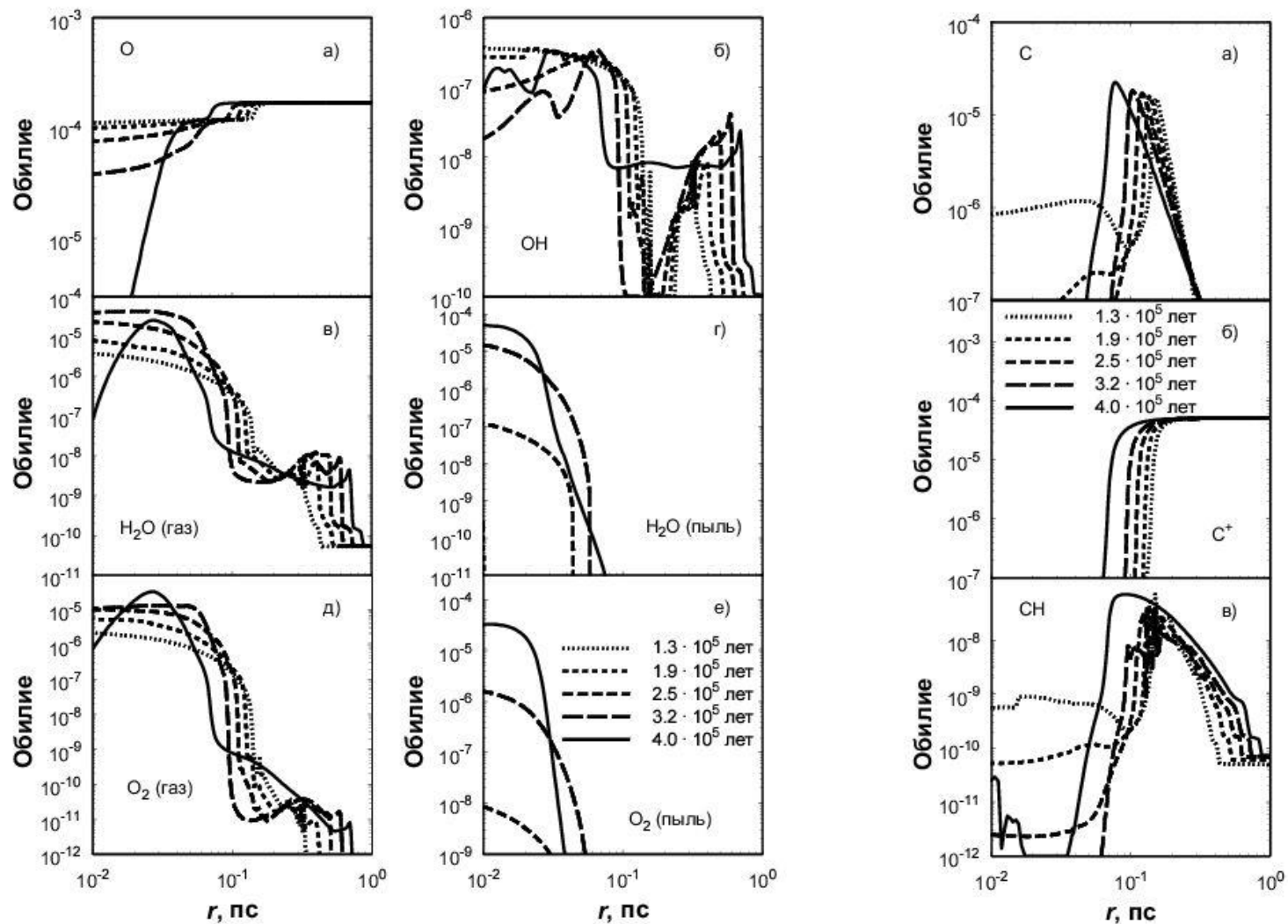
$G_0=0$



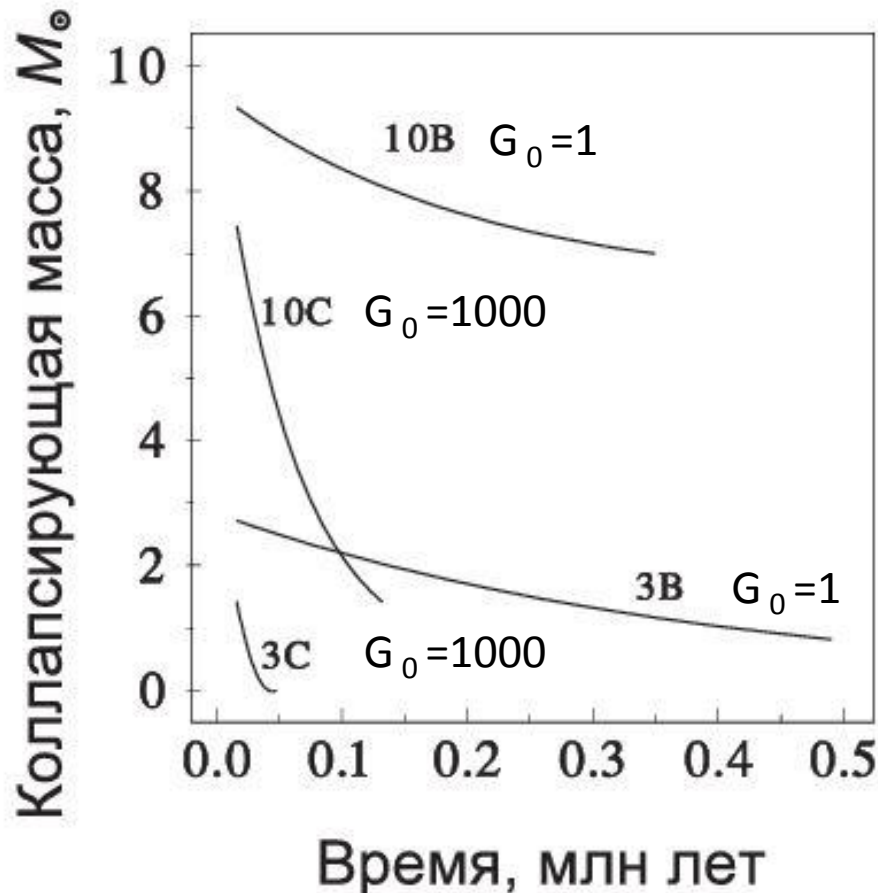


# Результаты (одиночные ядра - протозвёзды)

## Химическая эволюция



# Результаты (одиночные ядра - протозвезды) Выживание ядер



Параметры потери  
массы из-за испарения

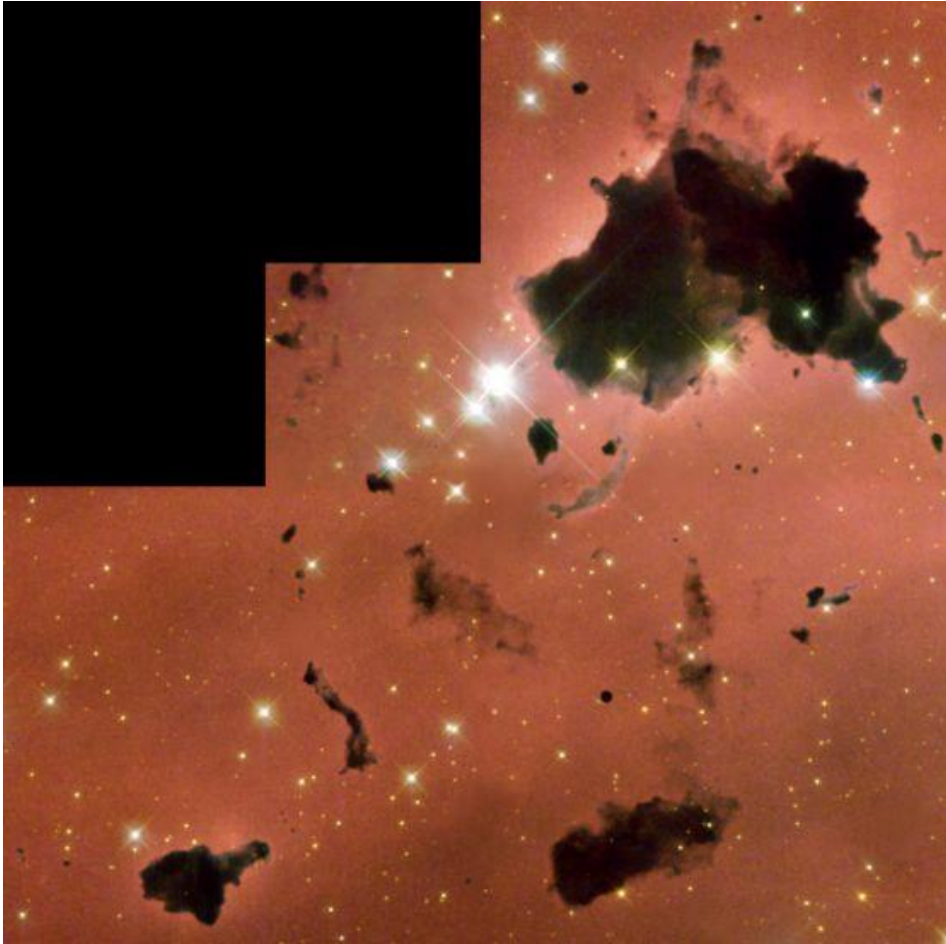
$$a + b \exp(-t/c)$$

| Модель | $a, M_{\odot}$ | $c, \text{млн лет}$ |
|--------|----------------|---------------------|
| 3B     | 0              | 0.4                 |
| 3C     | 0              | 0.009               |
| 10B    | 6.3            | 0.2                 |
| 10C    | 0.4            | 0.06                |

Следствие для НФМ – маломассивные сгустки испаряются эффективные. Одна из причин «завала» НФМ на малломассивном конце.



# Испарение протозвезд



*(Hubble Heritage Team  
(STScI/AURA), NASA )*

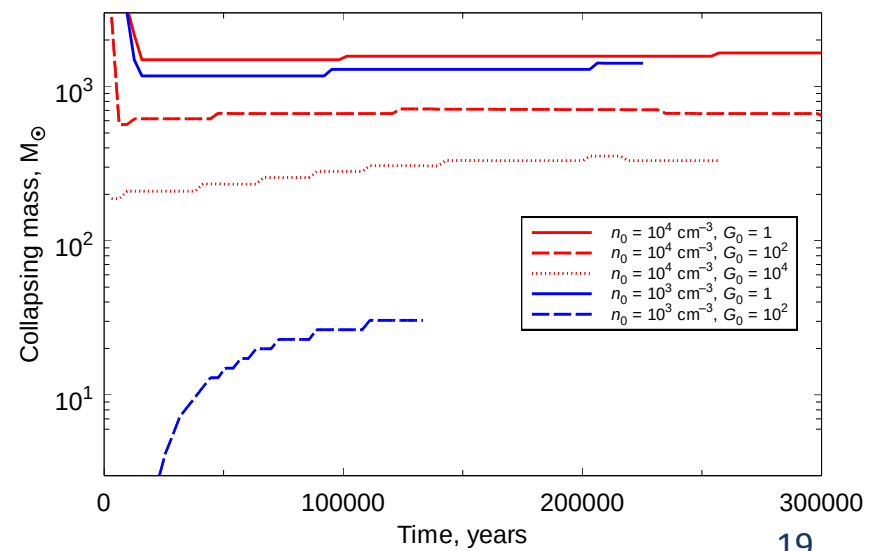
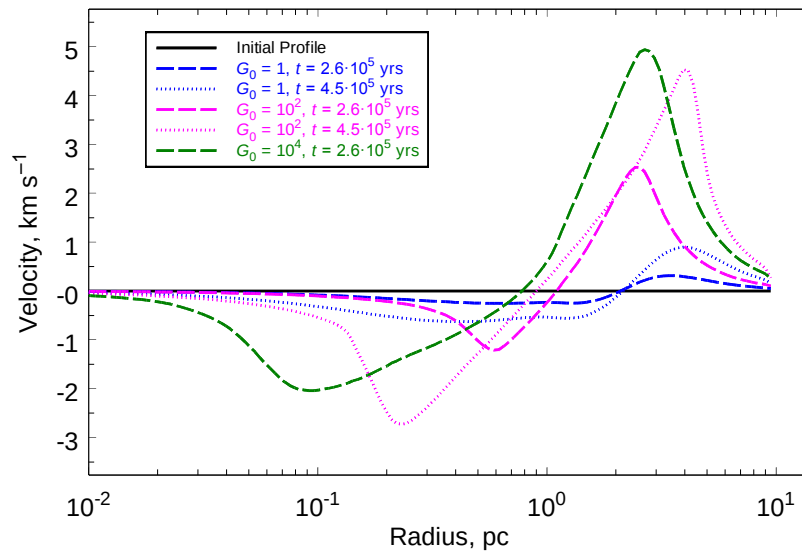
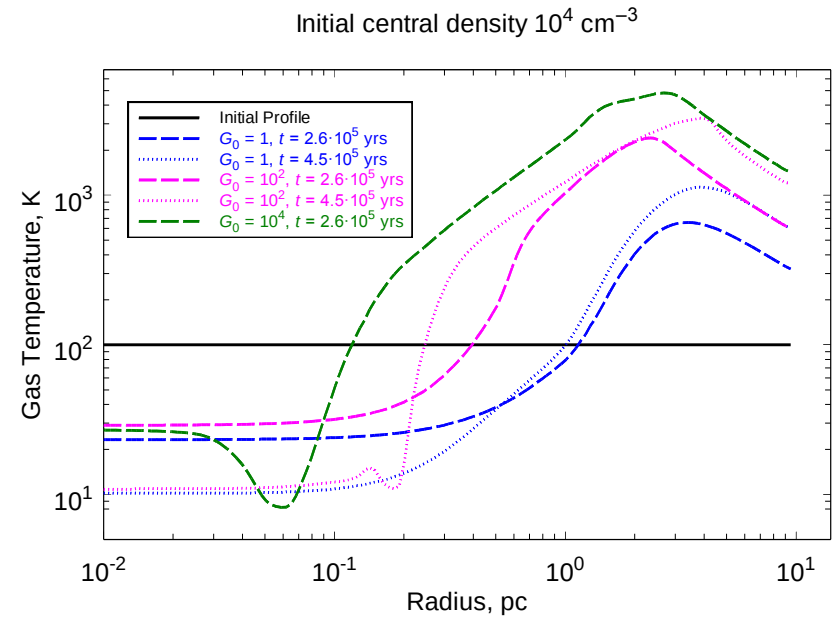
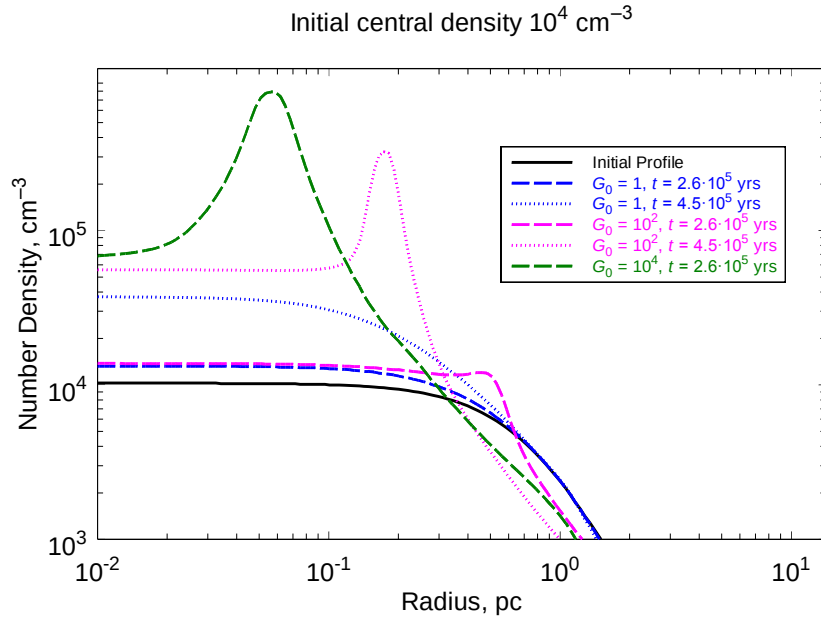
Opaque clouds of interstellar gas and dust of IC 2944, a bright star forming region in Centaurus, 5,900 light-years away (Thackeray's Globules) . The largest of these globules (first observed by Thackeray 1950) is  $\sim 0.3$  pc,  $\sim 15 M_{\odot}$ . These and similar dark globules known to be associated with other star forming regions may ultimately be dissipated by their hostile environment.

# Переход к модели НФМ в протоскоплении (начало)

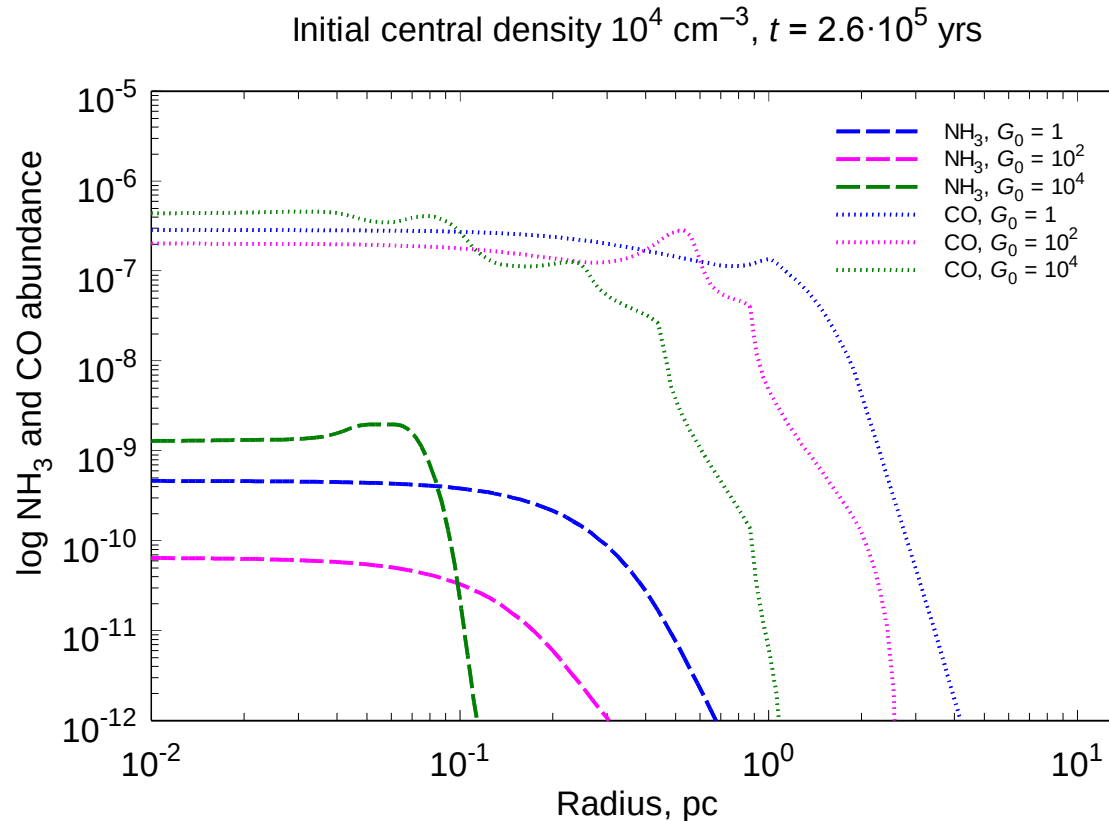
Рассматривается эволюция сгустка (облака) массой  $7000 M_{\text{sun}}$   
Варируются  $G_0$  и начальная центральная плотность.

Представлены лишь начальные (демонстрационные)  
результаты (эволюция облака как целого).

# Эволюция профилей плотности, температуры, скорости и коллапсирующей массы



# Профили содержания оксида углерода и аммиака



Молекулы  $\text{NH}_3$  сосредоточены, главным образом, в коллапсирующем веществе, тогда как содержание CO остаётся заметным в фотоиспаряемом газе. Это означает, что мы можем увидеть разницу скоростей в линиях CO и  $\text{NH}_3$  (см. напр. *Kirsanova+2014*).

## Что дальше?

1. Завершение построения численного кода с учетом эволюции структуры протоскопления. Проведение расчетов в полном объеме.
2. Переход к рассмотрению НФМ и анализ зависимостей.
3. Разработка моделей PDR с детальным переносом излучения в линиях. Продвижение к диагностике динамики и химии зон PDR.
4. Подготовка программы наблюдений в том числе в УФ диапазоне.