

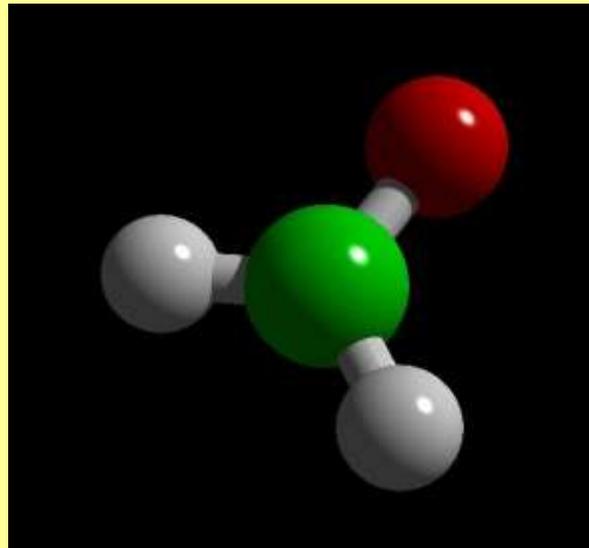
Астрохимия — молекулы во Вселенной

Дмитрий Зигфридович Вибе

Институт астрономии РАН

Андрей Владиславович Столяров

Московский государственный университет



dwiebe@inasan.ru

+7-916-6028241

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В МЗС

Фазы межзвёздной среды

<i>Компонент</i>	<i>n, см⁻³</i>	<i>T, К</i>	<i>f, %</i>	<i>M, млрд. M_⊙</i>
Горячая межоблачная среда (корона)	0.003	10 ⁶	50	—
Теплая ионизованная среда	0.1	8000	25	1.0
Теплая нейтральная среда	0.5	8000	25	2.8
Холодая нейтральная среда	50	80	1	2.2
Молекулярные облака	>200	10–50	0.05	1.3

Tielens (2005)

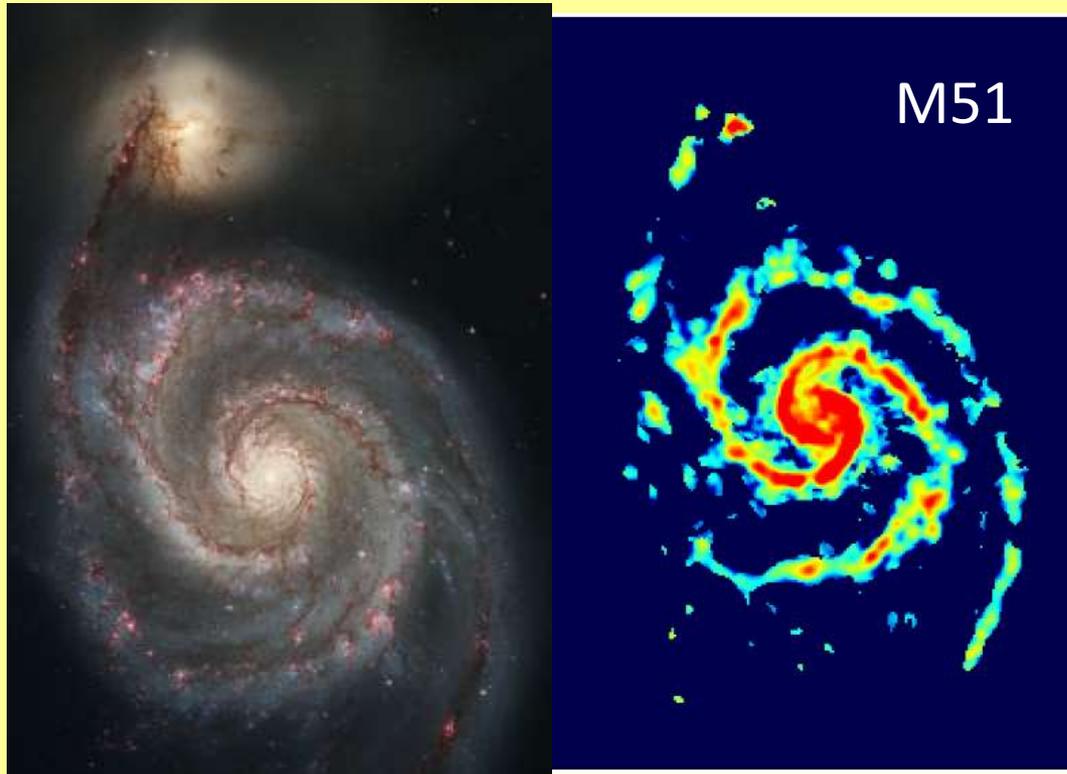
Чем плотнее, тем темнее.

Чем темнее, тем холоднее.

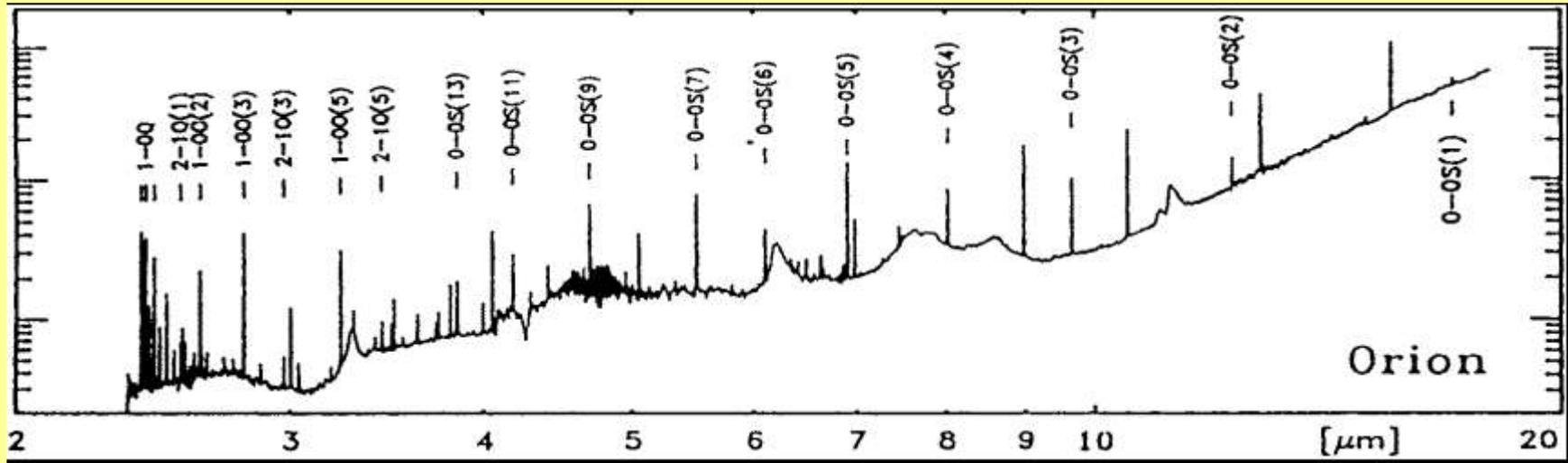
**АСТРОХИМИЯ +
РОЖДЕНИЕ ЗВЁЗД И ПЛАНЕТ**

Молекулярные облака

- Массы — до $6 \cdot 10^6 M_{\odot}$
- Размеры — десятки пк
- Температура — 10–50 К
- Плотность — более 200 см^{-3}



Молекулярный водород — самая главная молекула



Всё, что происходит в межзвёздной среде, происходит с водородом. Всё, что происходит в молекулярных облаках, происходит с молекулярным водородом.

Нет излучения от молекулярного водорода — вещество, из которого состоят молекулярные облака, практически невидимо!

Почему газофазные молекулы?

- Есть информация о скорости, плотности, температуре
- Параметры, определяемые по линиям молекул, = параметры газа в целом, но...
- ...при этом весьма сложный перенос излучения
- **Хорошо ли перемешаны с молекулярным водородом?**

Полностью разобраться в событиях, происходящих в молекулярных облаках, по наблюдениям молекул без построения химической модели невозможно!

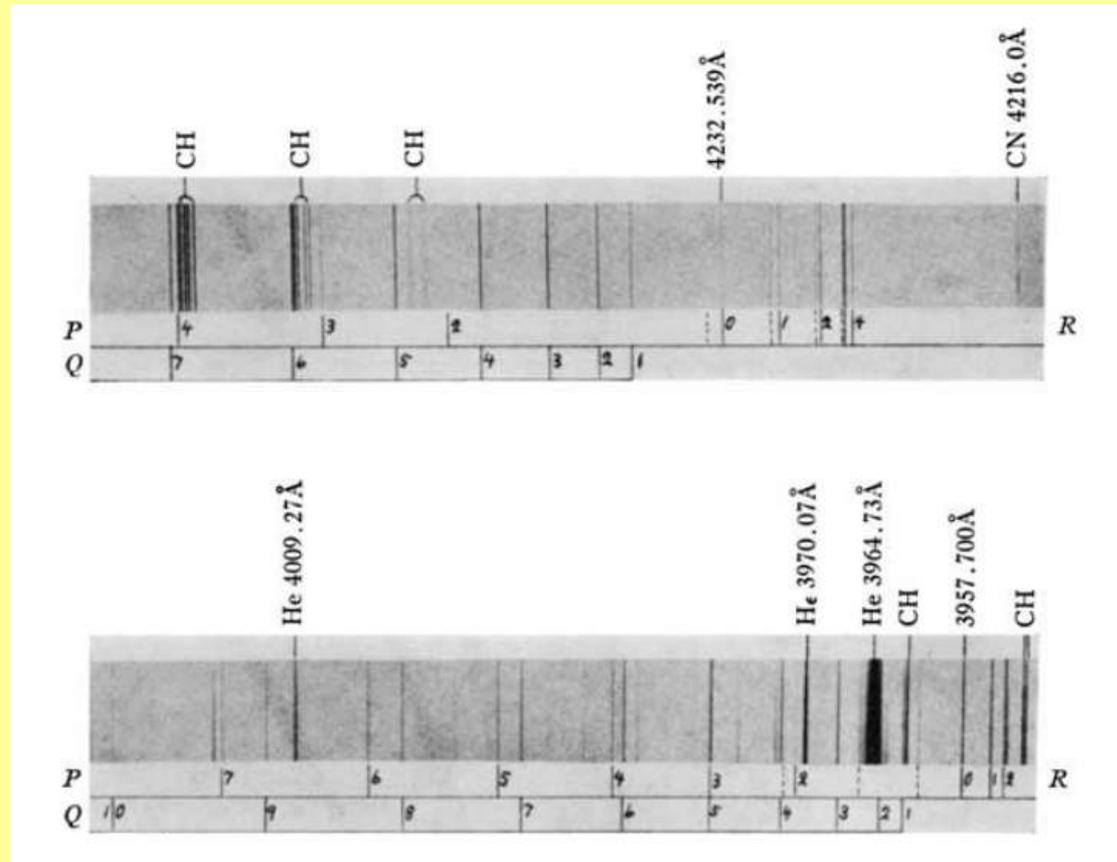
Как работает межзвёздный химический реактор?

- Низкая температура
- Низкая плотность
- Диссоциирующие излучения
- Только двухчастичные реакции



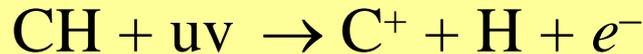
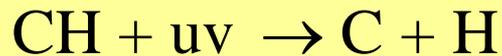
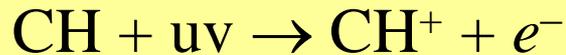
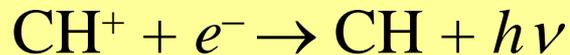
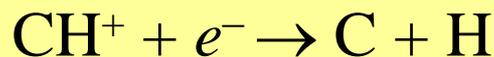
Молекулы в межзвёздном пространстве

- Dunham (1937) + Adams: λ 3934.3Å, λ 3957.7Å, λ 4232.6Å, λ 4300.3Å
 - McKellar (1940): **CH**, **CN**
 - Douglas and Herzberg (1941): **CH⁺**

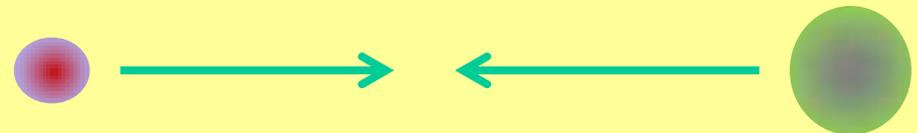


Происхождение межзвёздных молекул

- Радиативная ассоциация (радиативный захват)



Диссоциативная рекомбинация



Фотореакции

ter Haar (1943)

Kramers & ter Haar (1946)

Уравнения химической кинетики



Шесть компонентов: C, H, C⁺, CH, CH⁺, e⁻

Семь реакций:

— реакции радиативной ассоциации

— реакции диссоциативной рекомбинации

— фотореакции

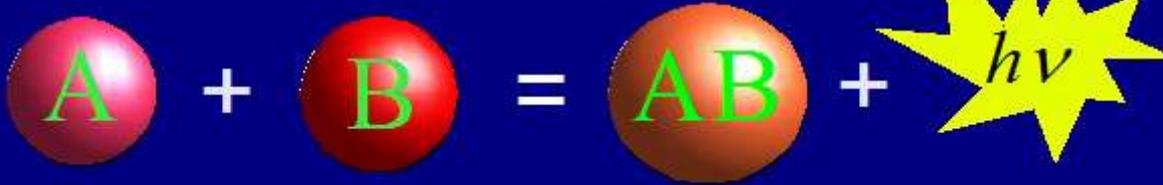
Но: Bates & Spitzer (1951)

Разрушение пылинок?

Нейтраль-нейтральные реакции

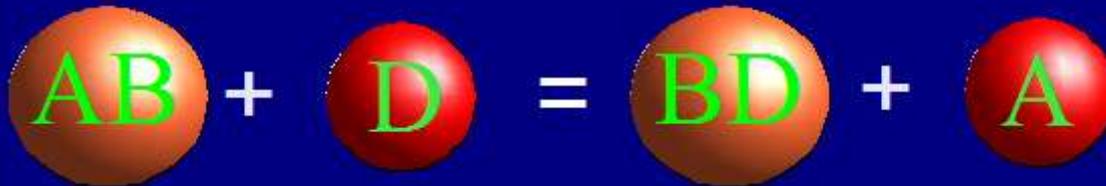
Радиативная ассоциация

Создание химических связей



Барьеры
Эндотермические
Низкие скорости

Перераспределение химических связей

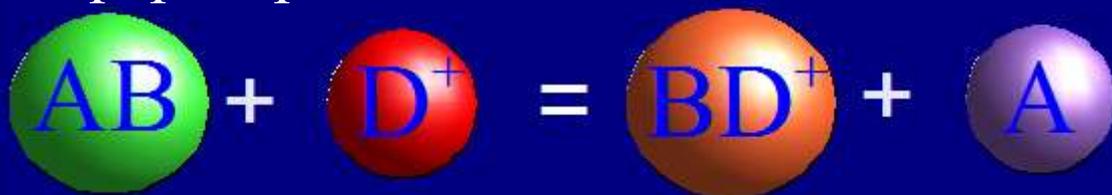


Относительно
высокие скорости

$$k_{ij} = \alpha_{ij} (T/300 \text{ K})^{\beta_{ij}} \exp(-\gamma_{ij} / T)$$

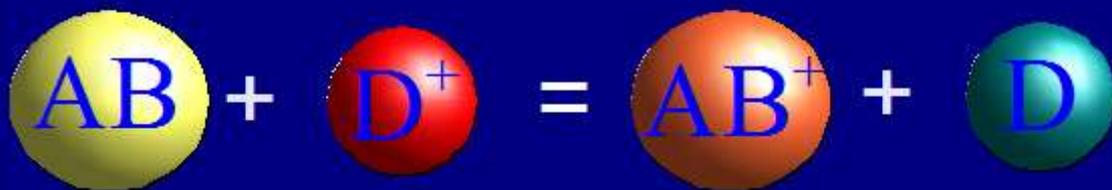
Ион-молекулярные реакции

Перераспределение химических связей



Высокие скорости
при низких
температурах

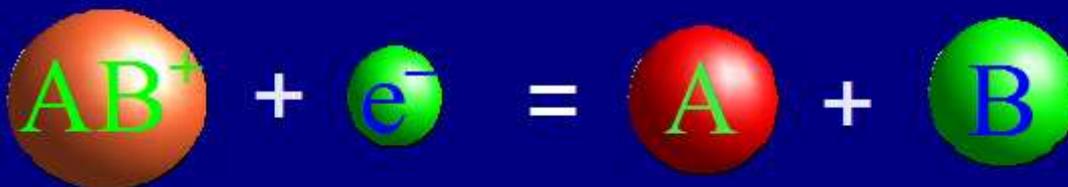
Перезарядка



$$k_{ij} = \alpha_{ij} (T/300 \text{ K})^{\beta_{ij}} \exp(-\gamma_{ij} / T)$$

Реакции диссоциативной рекомбинации

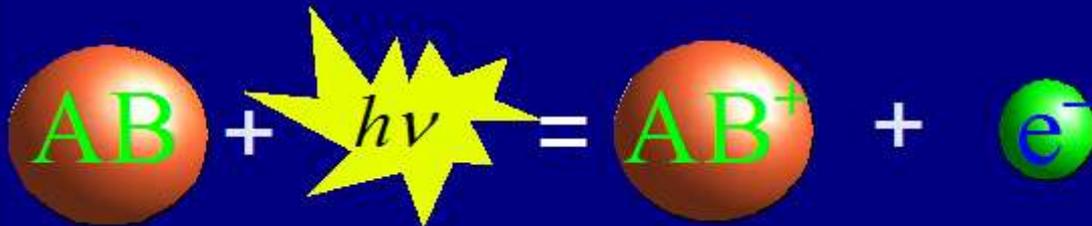
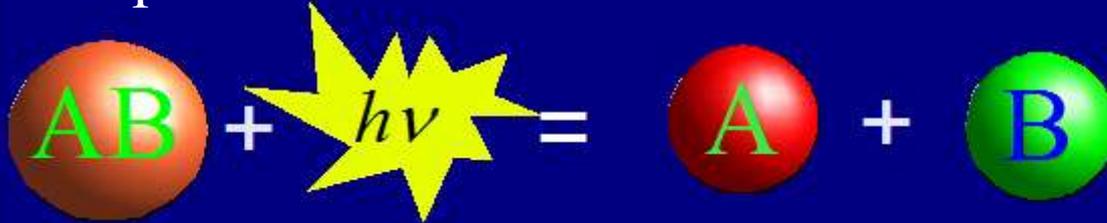
Разрыв химических связей



$$k_i = \alpha_i (T/300 \text{ K})^{\beta_i}$$

Фотореакции

Разрыв химических связей

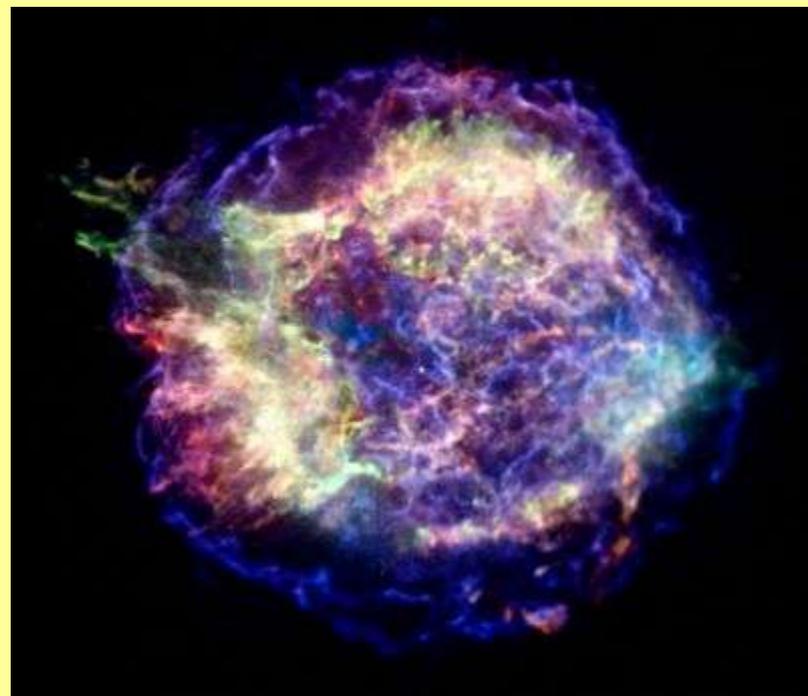
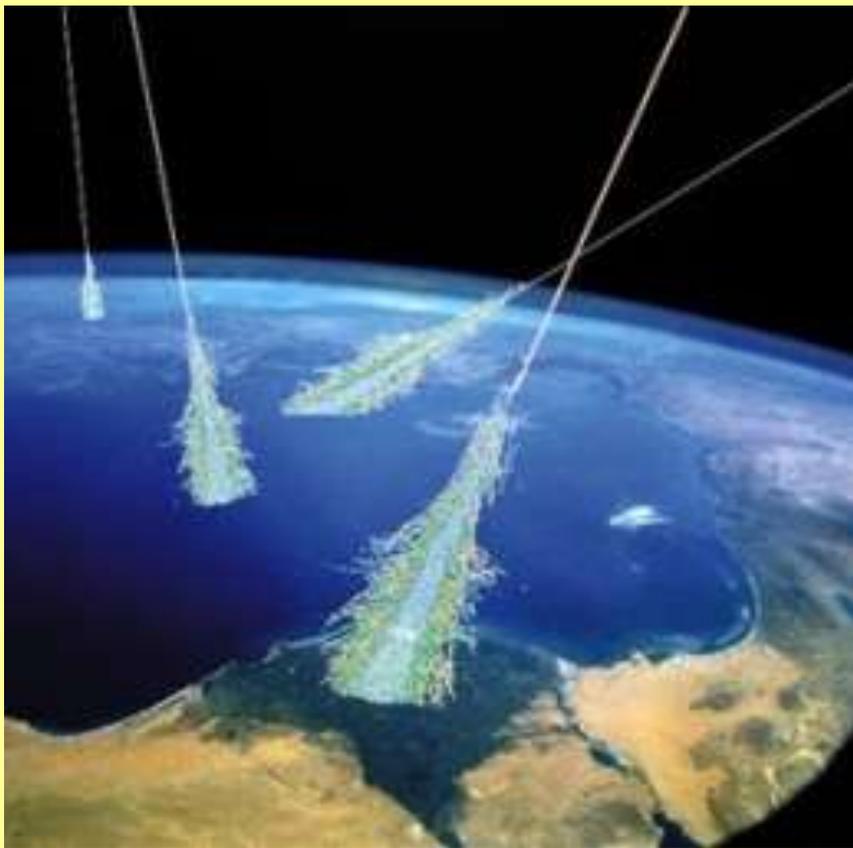


$$k_i = \alpha_i G_0 \exp(-\gamma_i A_V)$$

G_0 — поле излучения, A_V —
ослабление поля излучения

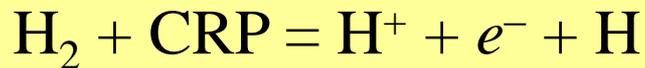
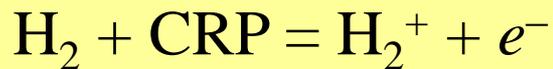
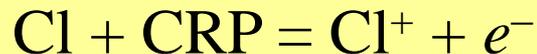
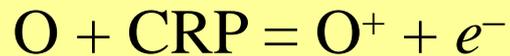
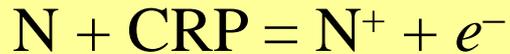
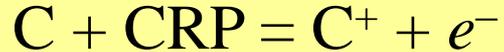
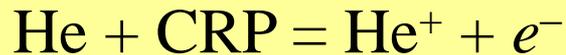
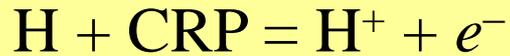


Космические лучи (CR)



Реакции с космическими лучами

Реакции ионизации



$$k_i = \alpha_i \zeta$$

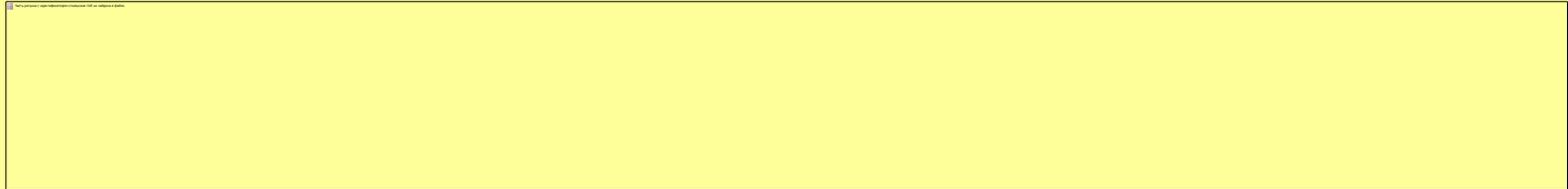
$$\zeta_{\text{CR}} = 1.3 \cdot 10^{-17} \text{ c}^{-1}$$

$$\zeta_{\text{RN}} = 6.0 \cdot 10^{-19} \text{ c}^{-1}$$

$$\zeta_{\text{X}} = \sim 10^{-12} \text{ c}^{-1}$$

Инициирование химии и нагрев среды в тёмных облаках

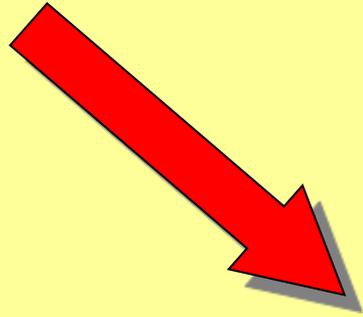
Уравнения химической кинетики



k^g — коэффициент скорости
двухчастичной реакции

k^e — коэффициент скорости реакции,
вызванной внешним фактором

С чего начинается химия?



Движущая сила межзвёздной химии — молекулярные ионы, порождённые космическими лучами

Ватсон, Хербст, Клемперер (1973)

Основные химические реакции Кислород



Основные химические реакции

Углерод

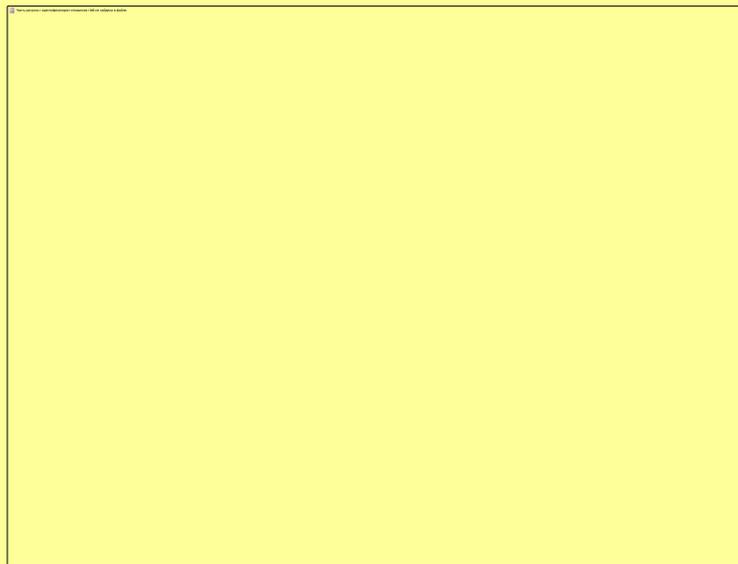


Основные химические реакции

Азот

Медленная

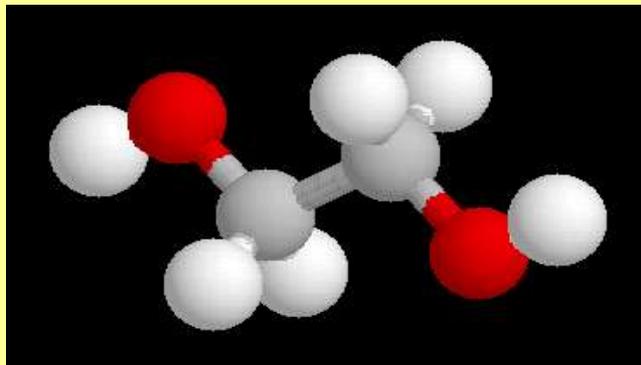
Барьер 85 К



Химия усложняется

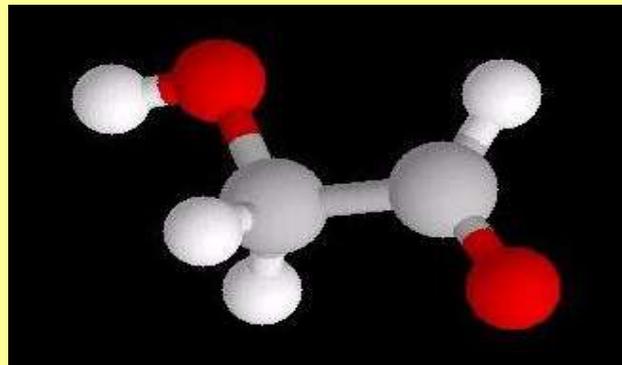


Этиленгликоль



**Открыт в МЗС в 2002 году
и в комете Хейла-Боппа в
2004 году!**

Гликольальдегид



**Открыт в МЗС в 2002
году**

Список известных межзвёздных и околозвёздных молекул

Молекулы из двух атомов

AlF AlCl C₂ CH CH⁺ CN CO CO⁺ CP CS SiC HCl H₂ KCl NH NO NS NaCl OH PN SO SO⁺ SiN SiO SiS HF SH SH⁺ O₂
HCl⁺ OH⁺ CN⁻ AlO HCl⁺ ArH⁺ NO⁺ CrO TiO NS⁺

Молекулы из трех атомов

C₃ C₂H C₂O C₂S CH₂ HCN HCO HCO⁺ HCS⁺ HOC⁺ H₂O H₂S HNC HNO MgCN MgNC N₂H⁺ N₂O NaCN OCS SO₂
c-SiC₂ CO₂ NH₂ H₃⁺ SiCN FeCN KCN H₂Cl⁺ H₂O⁺ AlOH HO₂ CCN SiCSi TiO₂ S₂H HCS HSC NCO

Молекулы из четырех атомов

c-C₃H I-C₃H C₃N C₃O C₃S C₂H₂ HCCN HCNH⁺ HNCO HNCS HOCO⁺ H₂CO H₂CN H₂CS H₃O⁺ NH₃ SiC₃ H₂O₂ HSCN
PH₃ I-C₃H⁺ HMgNC MgCCH NCCP HCCO CNCN

Молекулы из пяти атомов

C₅ C₄H C₄Si I-C₃H₂ c-C₃H₂ CH₂CN CH₄ HC₃N HC₂NC HCOOH H₂CHN H₂C₂O H₂NCN HNC₃ SiH₄ H₂COH⁺ CH₃O
HNCNH H₂NCO⁺ NCCNH⁺

Молекулы из шести атомов

C₅H C₅O C₂H₄ CH₃CN CH₃NC CH₃OH CH₃SH HC₃NH⁺ HC₂CHO HCONH₂ I-H₂C₄ C₅N C₅N⁻ e-HNCHCN C₅S SiH₃CN
CH₃NCO

Молекулы из семи атомов

C₆H CH₂CHCN CH₃C₂H HC₅N HCOCH₃ NH₂CH₃ c-C₂H₄O CH₂CHOH C₇⁻(?) HC₅O

Молекулы из восьми атомов

CH₃C₃N HCOOCH₃ CH₃COOH C₇H H₂C₆ CH₂OHCHO NH₂CH₂CN CH₃CHNH (NH₂)₂CO

Молекулы из девяти атомов

CH₃C₄H CH₃CH₂CN (CH₃)₂O CH₃CH₂OH HC₇N C₈H CH₃CH₂SH CH₃NHCHO HC₇O

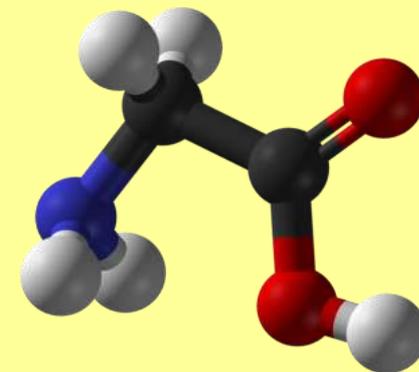
Молекулы из десяти атомов

CH₃C₅N? (CH₃)₂CO NH₂CH₂COOH? HOCH₂CH₂OH CH₃CHCH₂O CH₃OCH₂OH

Молекулы из одиннадцати атомов HC₉N C₂H₅OCHO CH₃COOCH₃

Молекулы из двенадцати атомов CH₃OC₂H₅ C₃H₇CN

Молекулы из тринадцати атомов HC₁₁N?, c-C₆H₅CN



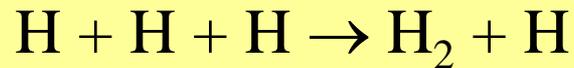
Метанол практически не образуется в газовой фазе

Медленная и лишь в 3% случаев ведёт к образованию метанола

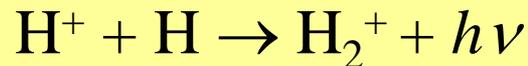
Geppert et al. (2006)

Молекулярный водород почти не образуется в газовой фазе!

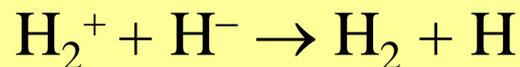
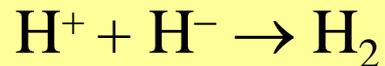
Трехчастичные столкновения:



Очень-очень медленная пара реакций:

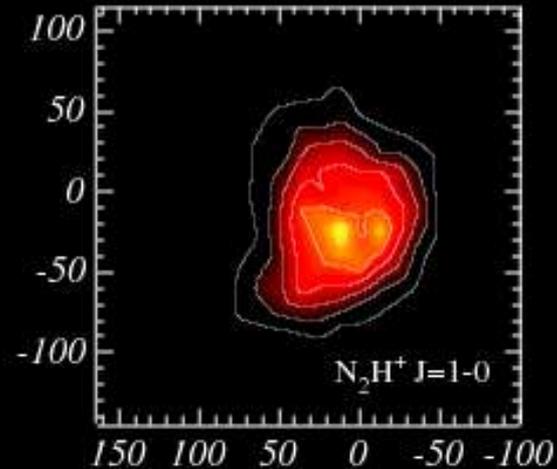
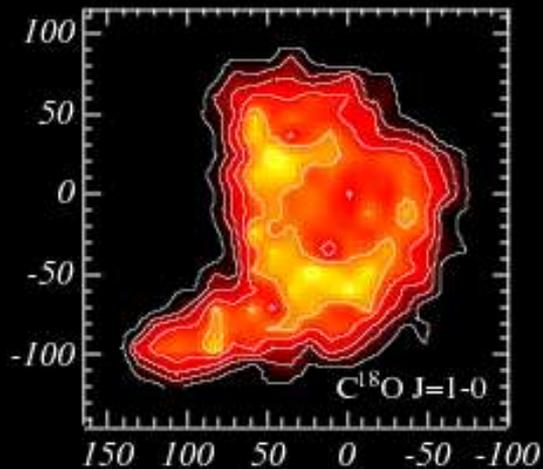
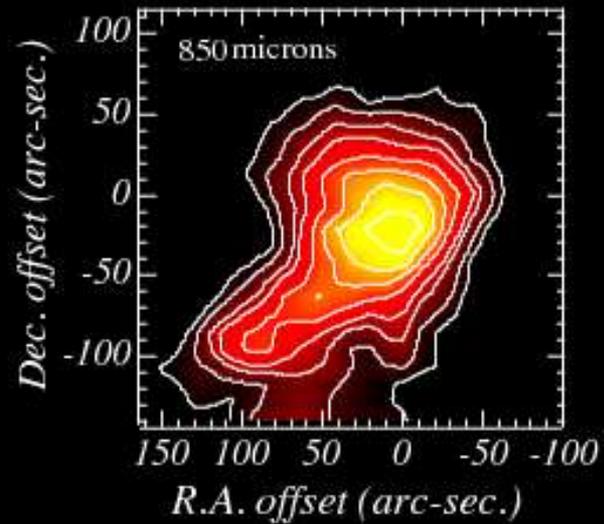


Очень медленная пара реакций:



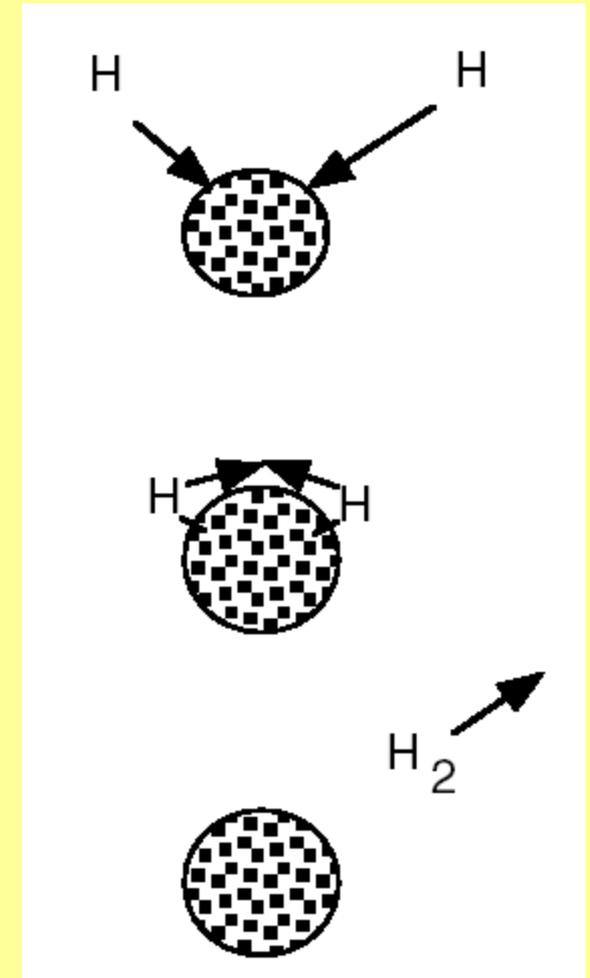
Единственный способ образовать H_2 в ранней Вселенной

Вымораживание молекул



Образование молекулярного водорода на пыли

1. Атомы водорода прилипают к пылинке.
2. Перемещаясь по поверхности пылинки, атомы сталкиваются друг с другом и образуют молекулу H_2 .
3. Энергия, выделившаяся при образовании молекулы H_2 , отрывает ее от пылинки.



Поверхностные реакции

Конечные продукты:

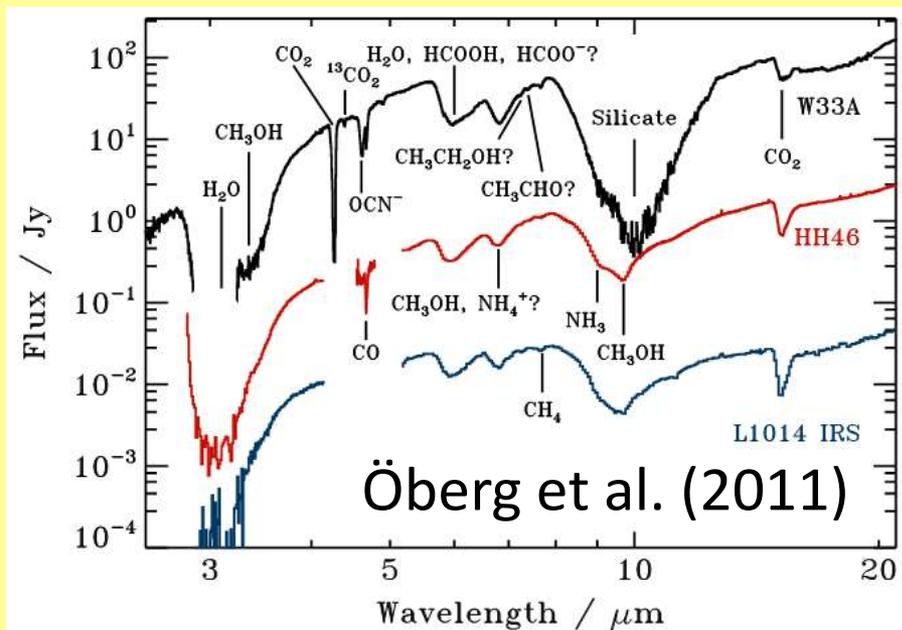
Формальдегид

Метанол

Этанол

Диметиловый эфир

Муравьиная кислота



Уравнения химической кинетики

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

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

$$k^e = \alpha \zeta$$

Что нужно для расчёта

- Элементный (и начальный) химический состав
- Физические параметры среды
- Набор молекул и реакций между ними (база данных)
- Уравнения

Параметры астрохимической модели

- $n, T_{\text{gas}}, T_{\text{dust}}, \zeta, G_0, A_V$ — внешние параметры
- Набор компонентов
- α, β, γ — параметры реакций

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 должно быть больше, чем наблюдается

Udfa.net

The UMIST Database for Astrochemistry 2012 / astrochemistry.net - Internet Explorer

http://udfa.ajmarkwick.net/

Файл Правка Вид Избранное Сервис Справка

UMIST RATE12
astrochemistry.net

Home Downloads Species Search... Follow @UM

UMIST RATE2012 / astrochemistry.net

Welcome to the 2012 edition of **The UMIST Database for Astrochemistry**.

This is the 5th public release of the database.

The database download files and the paper are available from the [download](#) section.

Recent updates

31/07/14: The dark cloud and circumstellar envelope model source code, an introduction to astrocher modelling and an introduction to UNIX are now available to [download](#).

16/05/14: Added a [table of three body reactions](#) previously released in RATE99 and RATE06.

.. common
H₂
CO
OH
HCO⁺
H₃⁺
C⁺
H₂O
C
H
CH⁺

.. in RATE12
C
C⁺
C⁻
C₁₀
C₁₀⁺
C₁₀⁻
C₁₀H
C₁₀H⁺
C₁₀H⁻
C₁₀H₂
C₁₀H₂⁺
C₁₀H₃⁺
C₁₁
C₁₁⁺
C₂
C₂⁺
C₂⁻
C₂H

kida.obs.u-bordeaux1.fr



KINETIC DATABASE
FOR ASTROCHEMISTRY

Home

Species

Download ▾

References ▾

Help ▾

KIDA is a database of kinetic data of interest for astrochemical (interstellar medium and planetary atmospheres) studies.

SEARCH

*Indicate a species (ex: H3O+) or a couple of species (ex: C + H2)
Warning : Second letter of 2-letters elements have to be lowercase, eg Si*



@kida_database

16:55, Nov 30

RT @NatGeo : 62 years ago, the only confirmed person in history was struck by a meteorite in her home <https://t.co/pMorONVjah>



Астрохимические базы данных

Lister - [c:\projects\chemdyn\kida\kida.rec]

Файл Правка Вид Кодировка Справка 15 %

SiCH2	He+	H	He	CHSi+	1.52E-09	-0.50	0.0
SiH3	He+	He	H2	SiH+	1.00E-09	0.00	0.0
SiH3	He+	H	He	SiH2+	1.00E-09	0.00	0.0
H2CCN	He+	He	CN	CH2+	3.25E-09	-0.50	0.0
H2CCO	He+	He	CH2	CO+	1.40E-09	-0.50	0.0
H2CCO	He+	He	CO	CH2+	1.40E-09	-0.50	0.0

Lister - [c:\projects\chemdyn\udfa\udfa.rec]

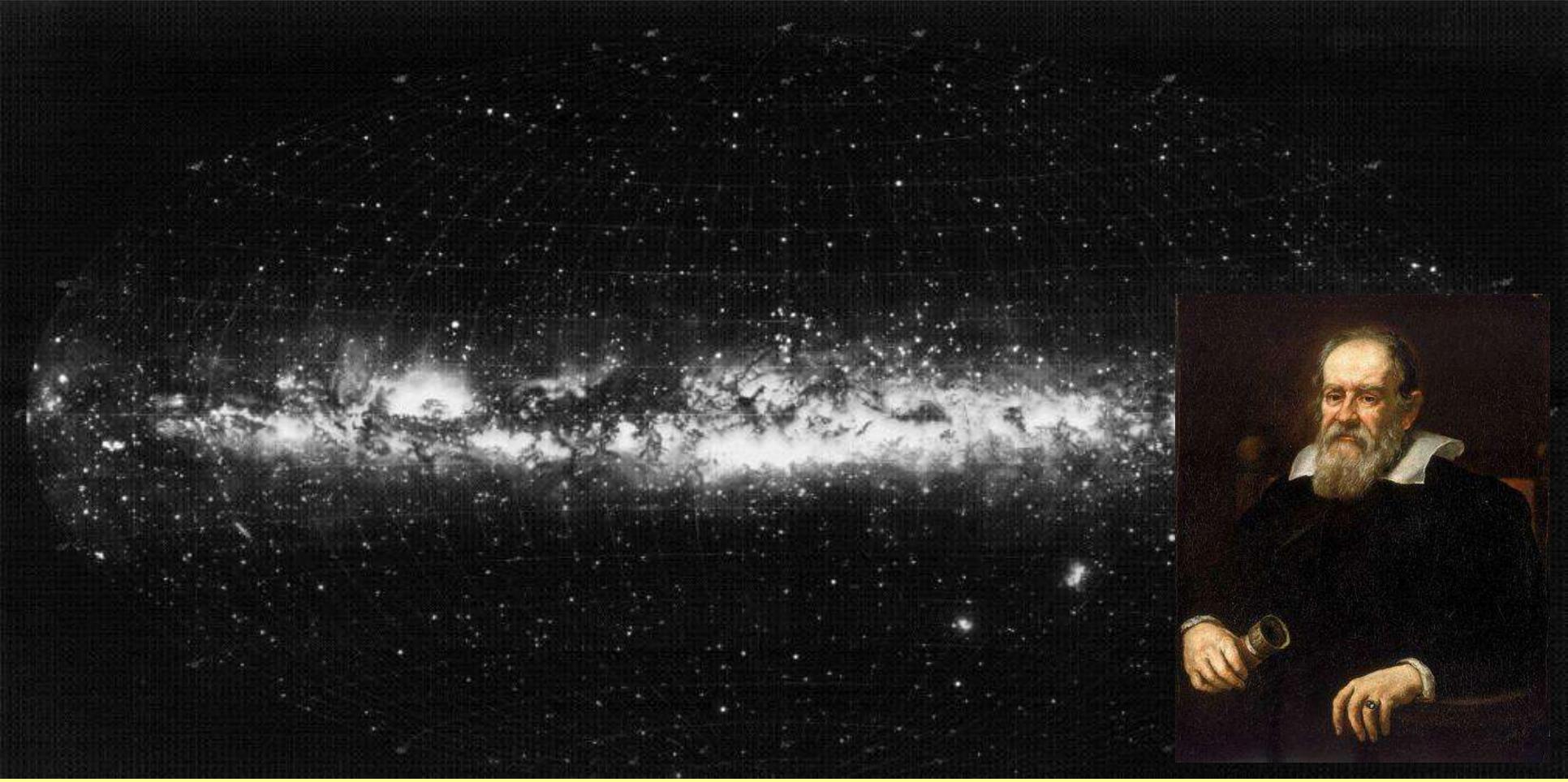
Файл Правка Вид Кодировка Справка 47 %

c-C3H2							
c-C3H2	H3+	CH2	CH3+	H2	1.70E-09	0.00	0.0
1-C3H2	H3+	CH2CCH2	C3H3+	H2	2.90E-09	0.00	0.0
1-C3H2	H3+	CH2CCN	C3H4+	H2	2.00E-09	-0.50	0.0
C4H	H3+	CH2CHCN	CH2CHCNH+	H2	9.90E-09	-0.50	0.0
C4H	H3+	CH2CN	CH3CN+	H2	3.70E-09	-0.50	0.0
C4P	H3+	CH2CO	CH3CO+	H2	2.00E-09	-0.50	0.0
C4P	H3+	CH2PH	PH4+	H2	1.00E-09	0.00	0.0
C4S	H3+	CH3	CH4+	H2	2.10E-09	0.00	0.0
C4S	H3+	CH3C3N	CH3C3NH+	H2	9.00E-09	0.00	0.0
C5	H3+	CH3C4H	C5H5+	H2	2.50E-09	0.00	0.0
C5	H3+	CH3C5N	CH3C5NH+	H2	9.00E-09	-0.50	0.0
HC00H	H3+	CH3C6H	C7H5+	H2	2.50E-09	0.00	0.0
HC00H	H3+	CH3C7N	CH3C7NH+	H2	1.00E-08	-0.50	0.0
CH2PH	H3+	CH3CCN	CH2CCN+	H2	2.25E-09	0.00	0.0
	H3+	CH3CH3	C2H5+	H2	2.40E-09	0.00	0.0
	H3+	CH3CHCH2	C2H3+	CH4	9.00E-10	0.00	0.0
	H3+	CH3CHCH2	C3H5+	H2	2.10E-09	0.00	0.0
	H3+	CH3CNO	C2H3+	H2	8.97E-10	-0.50	0.0
	H3+	CH3CNO	C2H5+	H2O	7.59E-10	-0.50	0.0
	H3+	CH3CNO	CH3+	CH3OH	1.45E-09	-0.50	0.0
	H3+	CH3CNO	CH3CNOH+	H2	1.52E-09	-0.50	0.0
	H3+	CH3CNO	CH3CO+	H2	4.14E-10	-0.50	0.0
	H3+	CH3CNO	CH5+	H2CO	8.28E-10	-0.50	0.0
	H3+	CH3CNO	H3O+	C2H4	1.04E-09	-0.50	0.0
	H3+	CH3CN	CH3CNH+	H2	1.05E-08	-0.50	0.0
	H3+	CH3COCH3	C2H3+	CH4	1.16E-09	-0.50	0.0

РОЖДЕНИЕ ЗВЁЗД

Ключевой аспект

Чтобы образование звёзд могло происходить «сейчас», необходимо наличие исходного сырья, то есть, вещества, которое могло бы превращаться в звёзды, — закон сохранения массы!



Из письма Исаака Ньютона Ричарду Бентли

10 декабря 1692 года:

Если бы вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно не скучилось бы в одну массу, но часть его скучилась бы в одну массу, часть — в другую, с тем чтобы образовать бесконечное количество больших масс, разбросанных на большие расстояния друг от друга во всём этом бесконечном пространстве. Так могли образоваться Солнце и неподвижные звёзды, в предположении, что вещество было светящимся. Но как вещество могло разделиться на две разновидности, так что одна из разновидностей больше подошла для создания светящегося тела, скучиться в одну массу и образовать Солнце, а остальное вещество, подходящее для формирования тёмного тела, скучилось не в одно тело, как светящаяся материя, но во много маленьких? Или же Солнце изначально было тёмным, как планеты, или же планеты изначально были светящимися, как Солнце? Как могло одно Солнце превратиться в светящееся тело, тогда как остальные остались тёмными, или как могли остальные тела стать тёмными, тогда как Солнце не изменилось? Я не думаю, что это объяснимо исключительно естественными причинами, и *вынужден приписать это мысли и побуждению намеренной воли.*

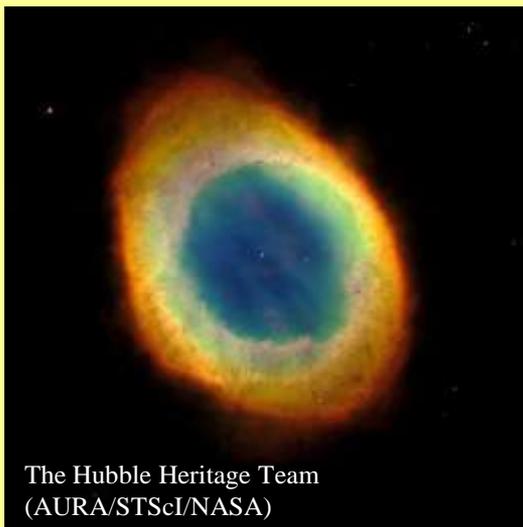
Вильям Гершель

- Галилей — все туманности разрешаются на звёзды.
- Гершель — некоторые туманности отличны от звёзд (Полярные сияния? Зодиакальный свет?)

И тем не менее мы наблюдаем, что внешние части шевелюры почти столь же яркие, как и те, что расположены ближе к звезде, так что предполагаемая атмосфера не должна препятствовать распространению центральных лучей. Следовательно, если эта материя является самосветящейся, кажется более уместным считать, что звезда возникла в результате ее конденсации, нежели полагать, что она обязана звезде своим существованием.

В. Гершель. О туманных звёздах, по праву так называемых. 1791

Первый научный сценарий звездообразования



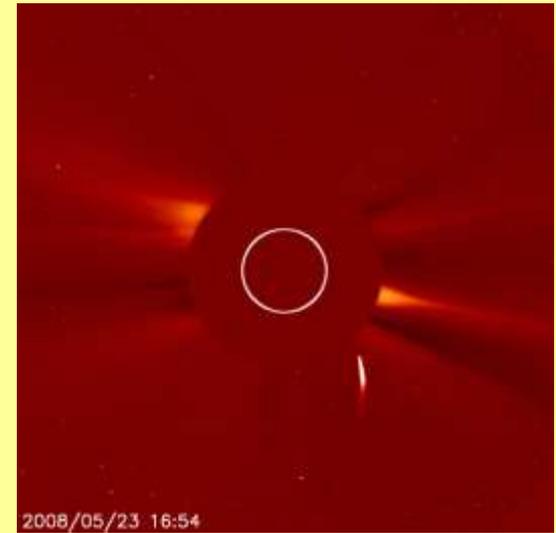
Ещё один ключевой аспект

Звёзды не могут светить вечно. В них должен быть источник энергии, который однажды начал работать и однажды иссякнет — закон сохранения энергии!



Источник солнечной и звёздной энергии

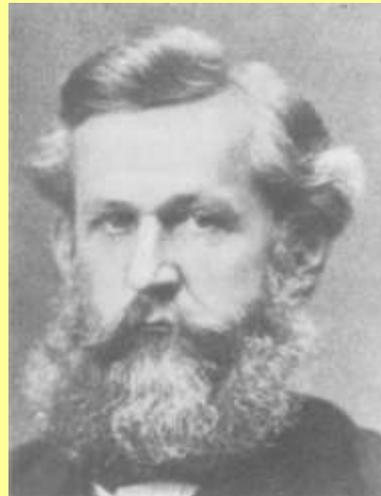
- Юлиус Майер, Джеймс Уотерстон — 1840-е
- Кельвин, Гельмгольц
- Август Риттер
- Джеймс Джинс



Юлиус Майер



Август Риттер



Германн Гельмгольц

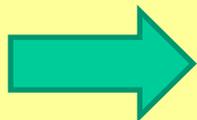


Джеймс Джинс



Гравитационная неустойчивость (Джинса)

Однородная статичная среда:



Длина Джинса

Масса Джинса

Гравитационная неустойчивость

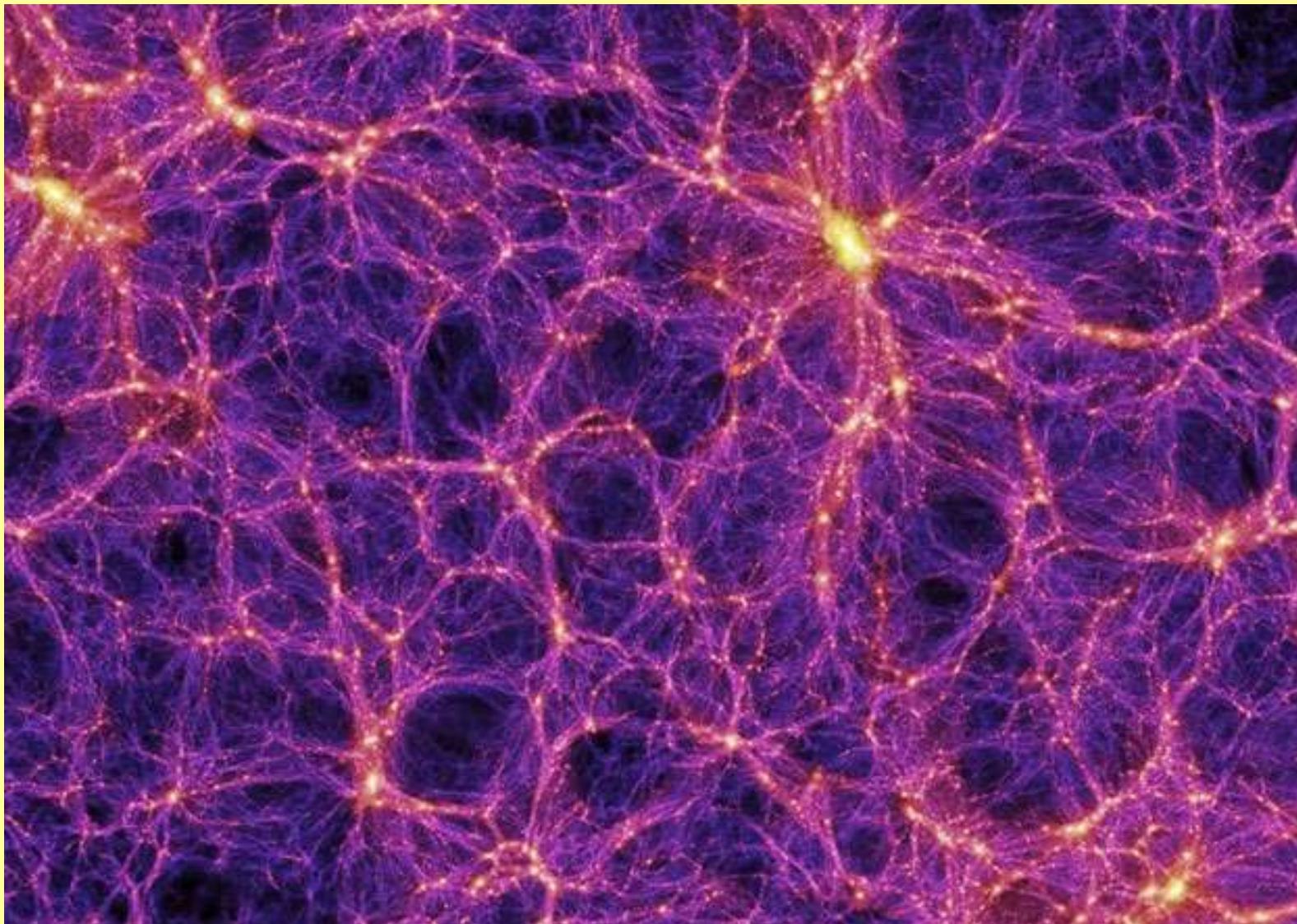
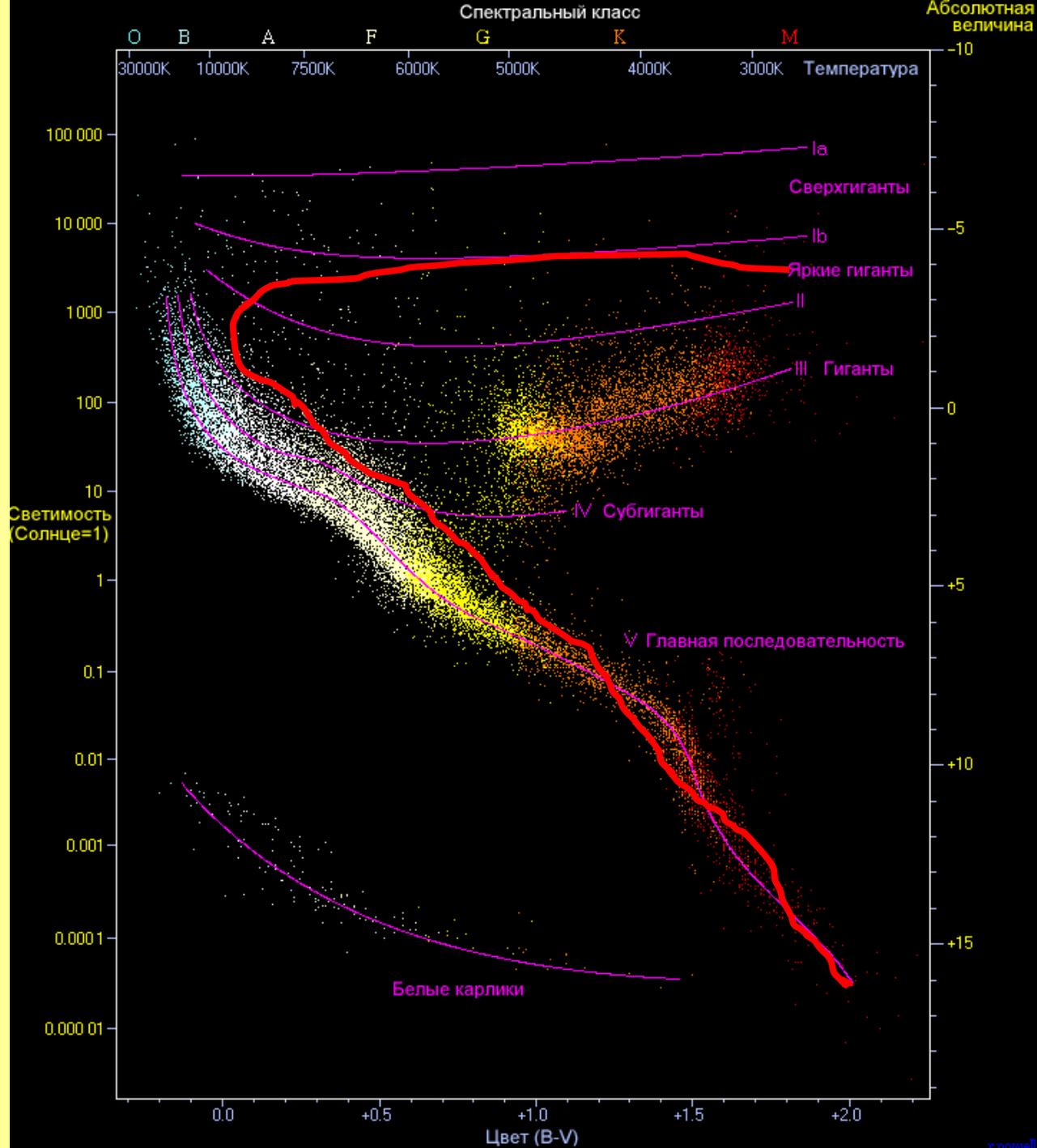


Диаграмма Герцшпрунга-Рессела

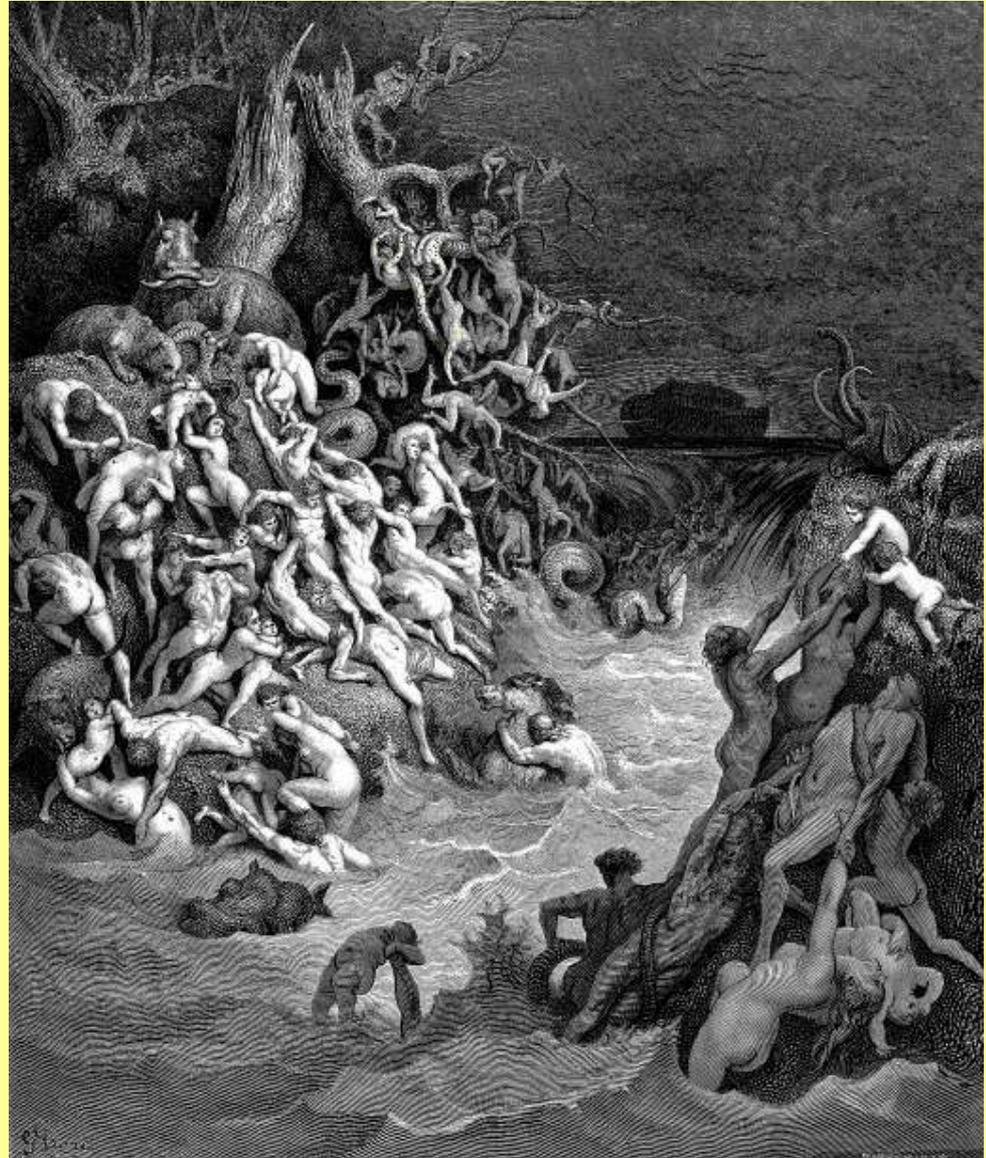


Начало XX века

- Звёзды образуются непрерывно
- Источник энергии — гравитационное сжатие
- Механизм образования — гравитационная неустойчивость
- Исходный материал неясен, но, возможно, есть связь с туманностями, в частности, спиральными

Первая половина XX века

- Возраст Земли больше 4 млрд. лет
- Источник звёздной энергии — термоядерные реакции превращения водорода в гелий
- Где водород?
- Возвращение к гипотезе «катастрофизма»



Середина XX века

- Открытие ионизованного и атомарного водорода в МЗС
- Распад звёздных ассоциаций (Амбарцумян)
- Конечность времени жизни массивных звёзд

Два слагаемых звездообразования

- Звёзды должны образовываться сейчас
- Звёздам есть из чего образовываться сейчас
- Как это происходит и как проявляется?



Молекулярные облака

Rank et al. (1971) — есть два вида газовых облаков: в одних доминирует линия водорода на длине волны 21 см, в других доминируют молекулярные линии, тогда как водород почти не виден.

Другие трейсеры — NH_3 , N_2H^+ , CS

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 161:L43-L44, July 1970

© 1970. The University of Chicago. All rights reserved. Printed in U.S.A



Монооксид углерода — изобилие и стабильность!

CARBON MONOXIDE IN THE ORION NEBULA

R. W. WILSON, K. B. JEFFERTS, AND A. A. PENZIAS

Bell Telephone Laboratories, Inc., Holmdel, New Jersey, and
Crawford Hill Laboratory, Murray Hill, New Jersey

Received 1970 June 5

Структура молекулярных облаков

Параметр	Облако (cloud)	Сгусток (clump)	Ядро (core)
Масса (M_{\odot})	10^3 – 10^4	50–500	0.5–5
Размер (пк)	2–15	0.3–3	0.03–0.2
Плотность (см^{-3})	50–500	10^3 – 10^4	10^4 – 10^5
Дисперсия скоростей (км с^{-1})	2–5	0.3–3	0.1–0.3
Динамическое время (млн. лет)	2–4	≈ 1	0.5–1
Температура газа (К)	≈ 50	10–20	8–12
Магнитное поле (мкГс)	1–10	3–30	10–50
Примеры	Телец, Змееносец	B213, L1709	L1544, L1498, B68

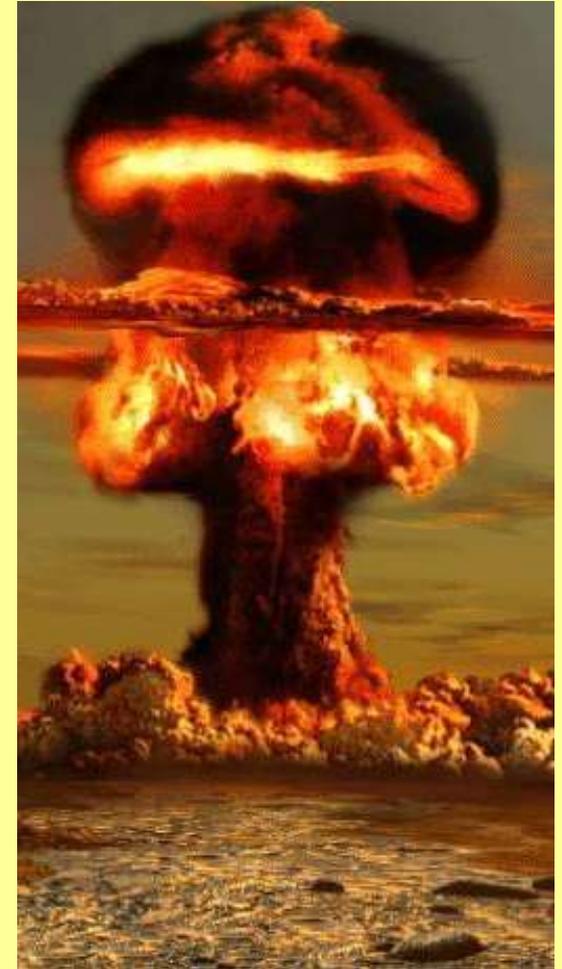


Первые численные модели — одиночные протозвёзды

Mon. Not. R. astr. Soc. (1969) **145**, 271–295.

NUMERICAL CALCULATIONS OF THE DYNAMICS
OF A COLLAPSING PROTO-STAR*

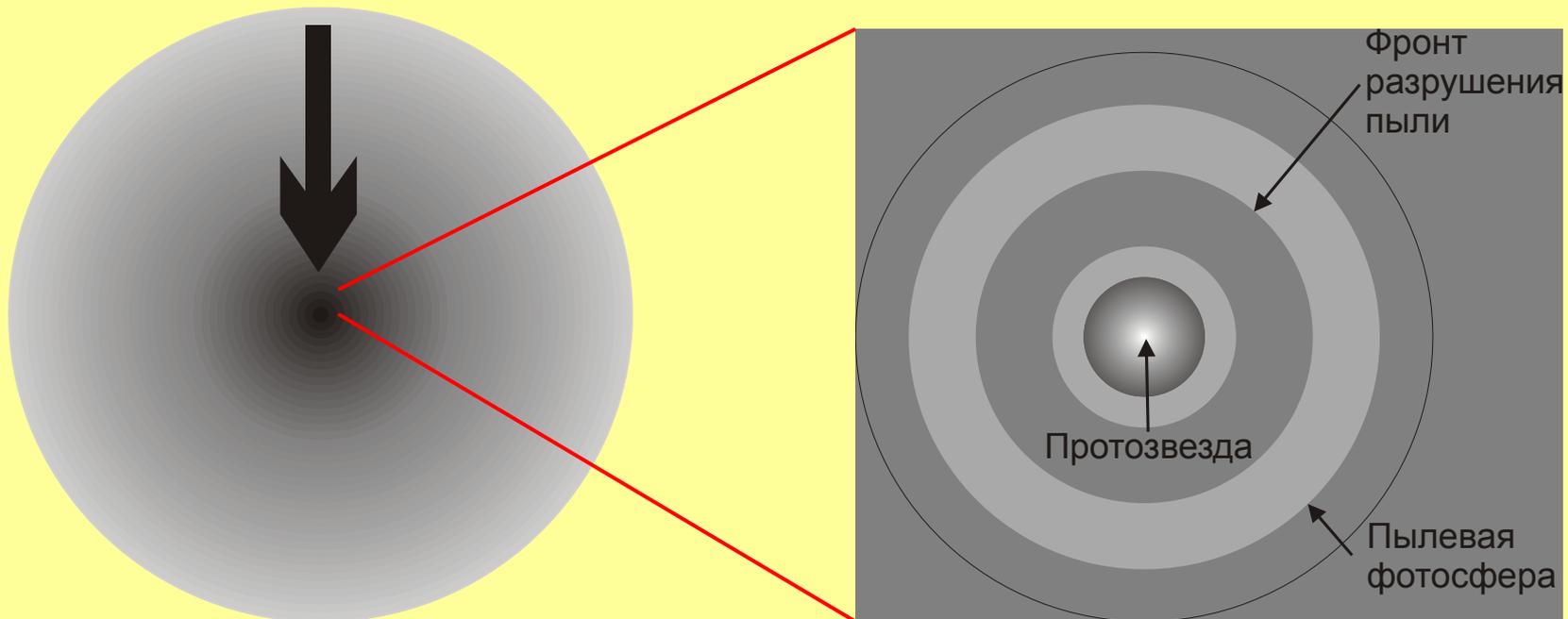
Richard B. Larson



Ричард Ларсон рассказывает про бомбокод (Барселона, 2010)

Стадии коллапса

- *Дозвёздное ядро*: почти изотермическое, **проявляется как источник субмиллиметрового излучения и молекулярных линий (CO, CS, аммиак)**
- *Первое гидростатическое ядро*: от повышения непрозрачности до испарения пыли.
- *Главная фаза аккреции*, протозвезда **проявляется как источник ИК-излучения**



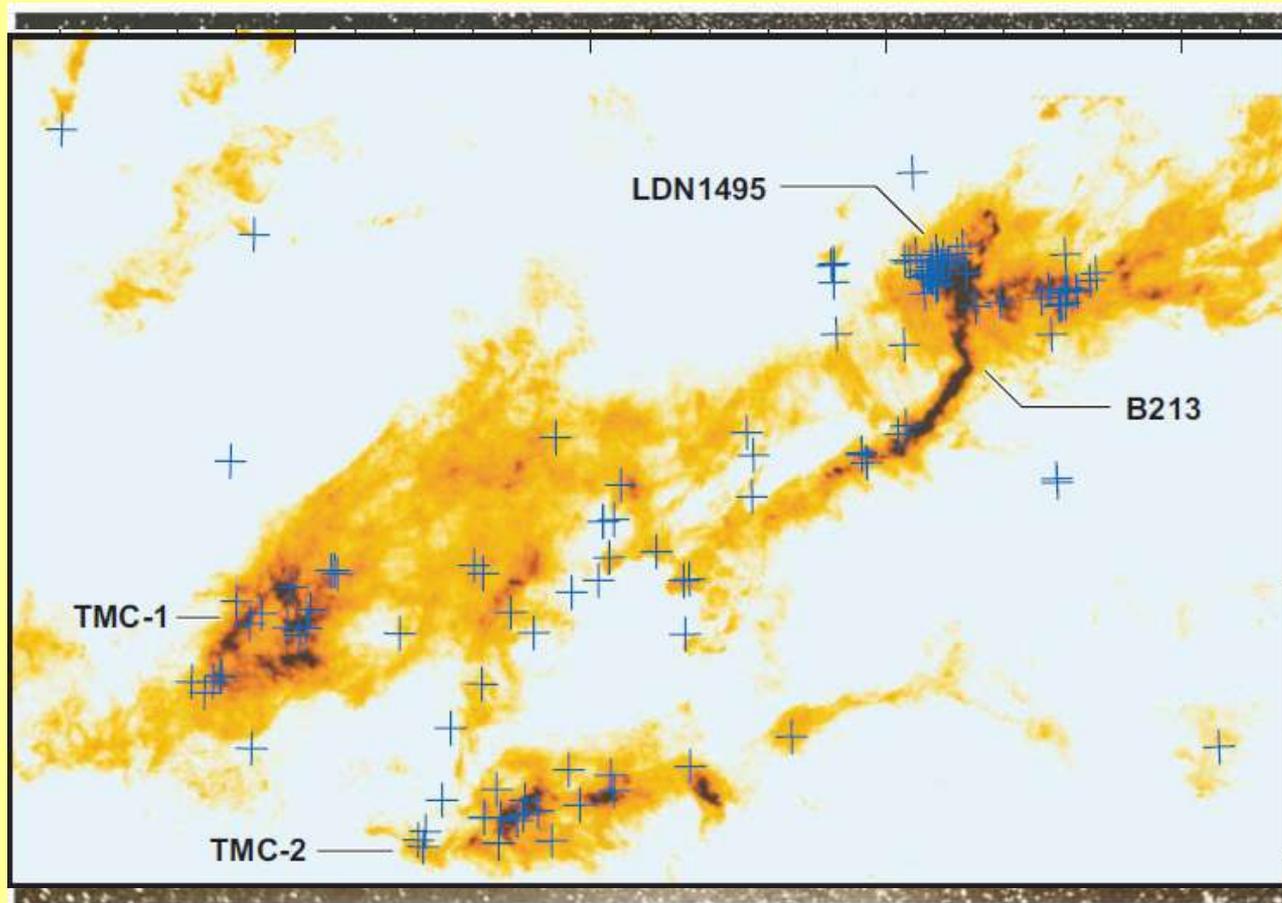
Протозвезду нужно наблюдать как инфракрасный источник

Infrared Astronomical Satellite

- Время работы: 1983
- Диапазон: 12, 25, 60 и 100 мкм
- Результаты: атлас неба и каталог точечных ИСТОЧНИКОВ



Место рождения звёзд — молекулярные (газо-пылевые) облака



Звёзды образуются слишком медленно!

Масса молекулярных облаков существенно превышает джинсовскую!

Джеймс Джинс



«Стандартная» модель звздообразования

- Молекулярные облака гравитационно неустойчивы
- Скорость звездообразования в Галактике должна быть существенно выше наблюдаемой,

НО

- Скорость звездообразования в Галактике невелика
- Молекулярные облака — долгоживущие объекты
- Эффективность звездообразования не превышает нескольких процентов

ЗНАЧИТ

- Имеется фактор, удерживающий облака от сжатия — магнитное поле
- Поддержка магнитного поля медленно теряется и приводит к медленному образованию звёзд

Статистика

- **Benson & Myers (1989)**, 41 ядро: размеры от 0.06 до 0.9 пк, массы от 0.5 до 760 масс Солнца; 68% содержат IRAS-источники.
- **Jijina et al. (1999)**, 264 ядра: размеры от 0.03 до 0.5 пк, в скоплениях ядра крупнее, линии шире; в зонах изолированного звездообразования ядра мельче, ширина линий меньше; отношение беззвёздные-протозвёздные в Тельце 8:12.
- **Onishi et al. (2002)**, 55 объектов с массами 0.4–20 масс Солнца; 80% беззвёздных.
- **Enoch et al. (2008)**, 108 беззвёздных, 92 протозвёздных объекта.

Звёзды образуются слишком быстро!

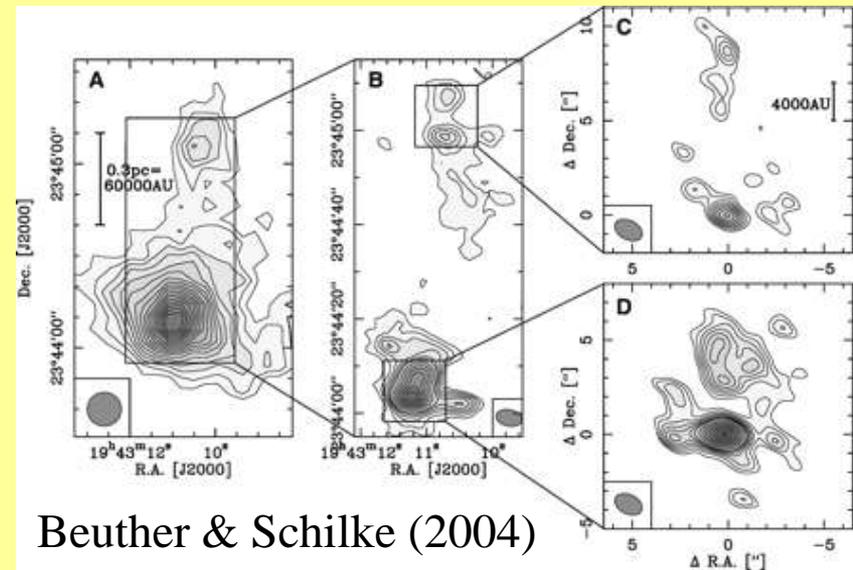
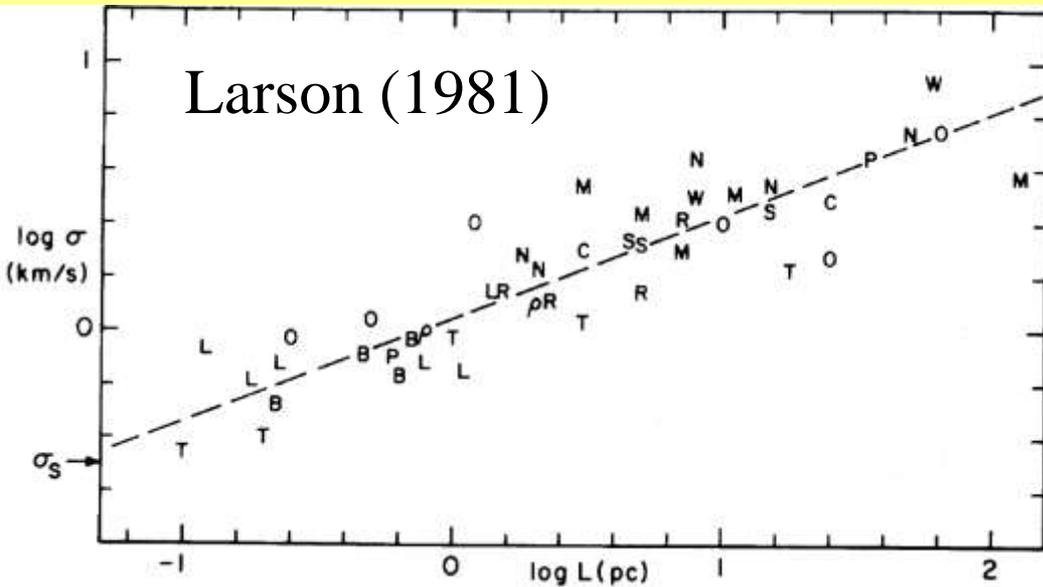
Практически во всех известных комплексах молекулярных облаков идёт звездообразование.

В большинстве областей звездообразования с молекулярным газом возраст молодых звёзд не превышает 1–3 млн. лет.

Гравотурбулентная модель

- Молекулярные облака — короткоживущие объекты
- Звёзды образуются в местах схождения турбулентных течений
- Роль магнитного поля либо пренебрежимо мала, либо не является решающей.

Гравитурбулентная модель

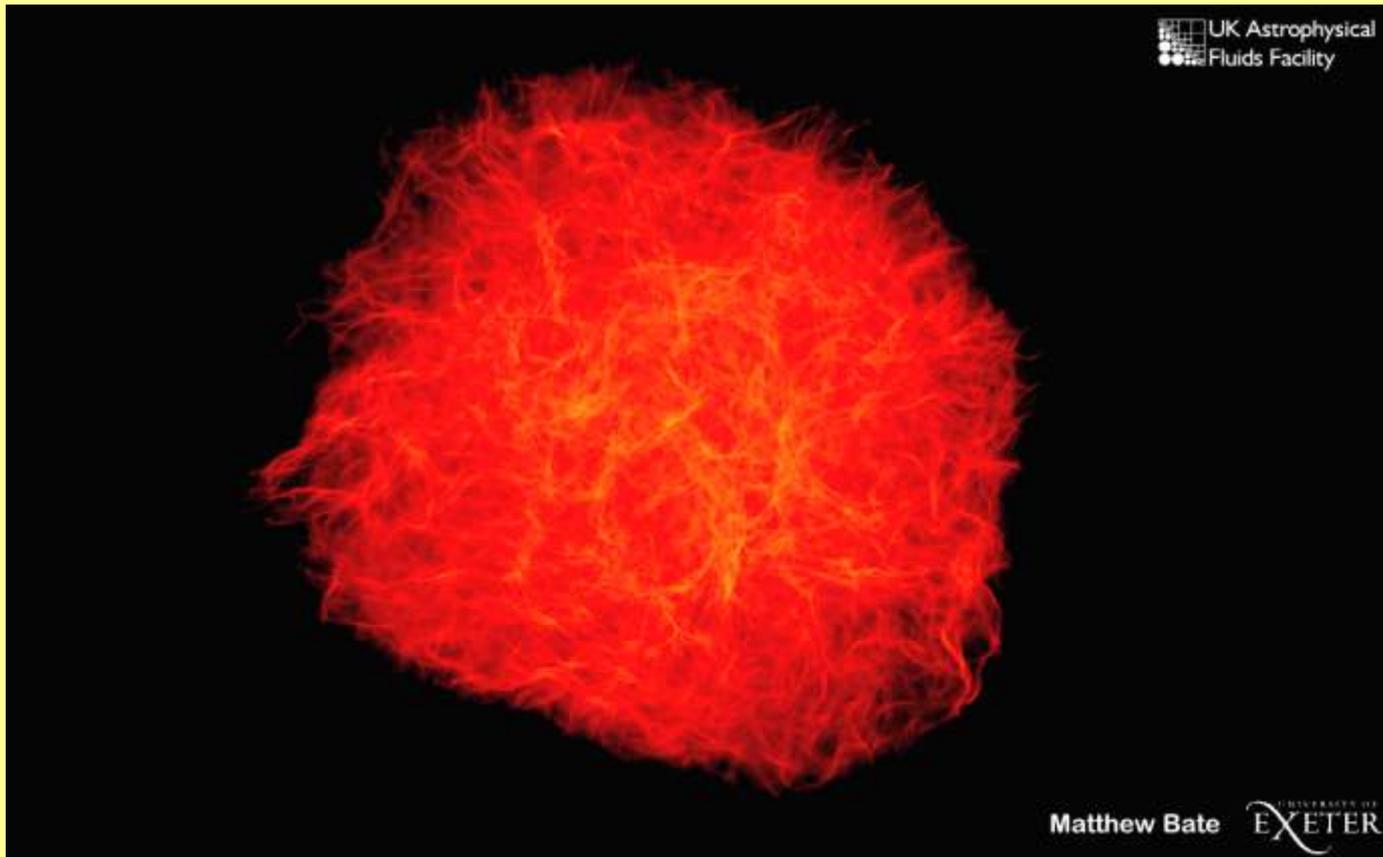


Clouds are scale-free and their structure is best described as fractal. The hierarchy of cores within clumps within clouds is simply an observational categorization of the self-similar structure.

Williams et al. (2000)

- Безмасштабная структура молекулярных облаков
- Соотношение между размером сгустков и дисперсией скоростей
- Соотношение между плотностью и напряжённостью магнитного поля

Образование звёзд в молекулярном облаке



Волокна «Гершеля»



Достоинства и недостатки моделей

Магнитная

- Низкая эффективность звездообразования
- Профили плотности и скорости
- Химические возрасты

- Статистика
- Степень ионизации

Добавить
турбулентность

Гравитационно-турбулентная

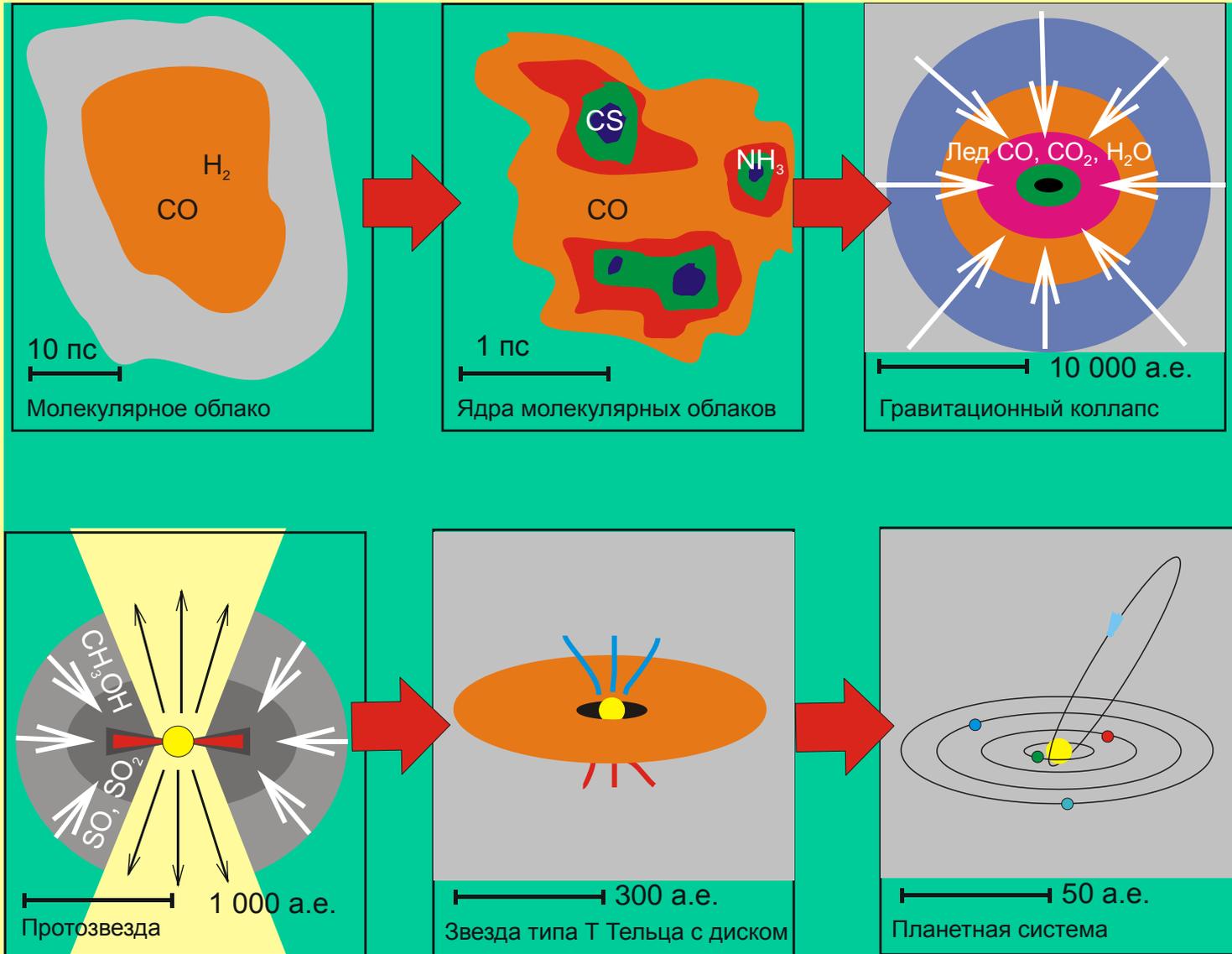
- Единство модели
- Статистика
- Профили плотности

- Высокая эффективность звездообразования
- Профили скорости
- Химические возрасты
- Диссипация турбулентности

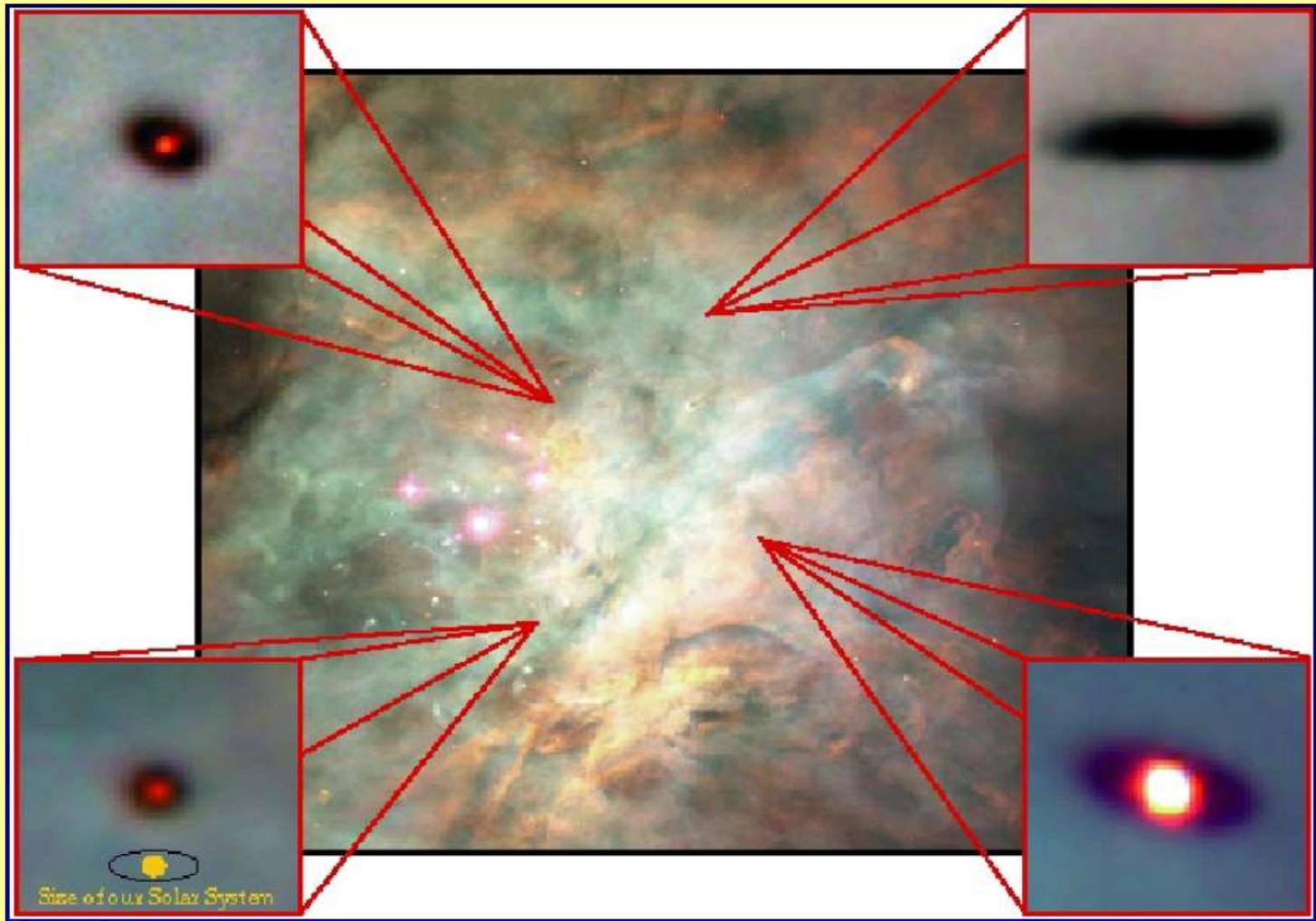
Добавить
магнитное поле

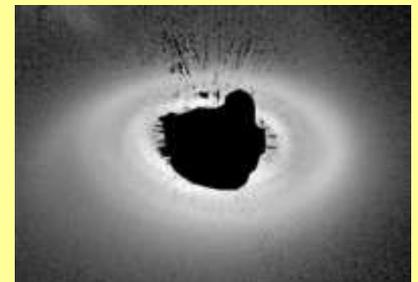
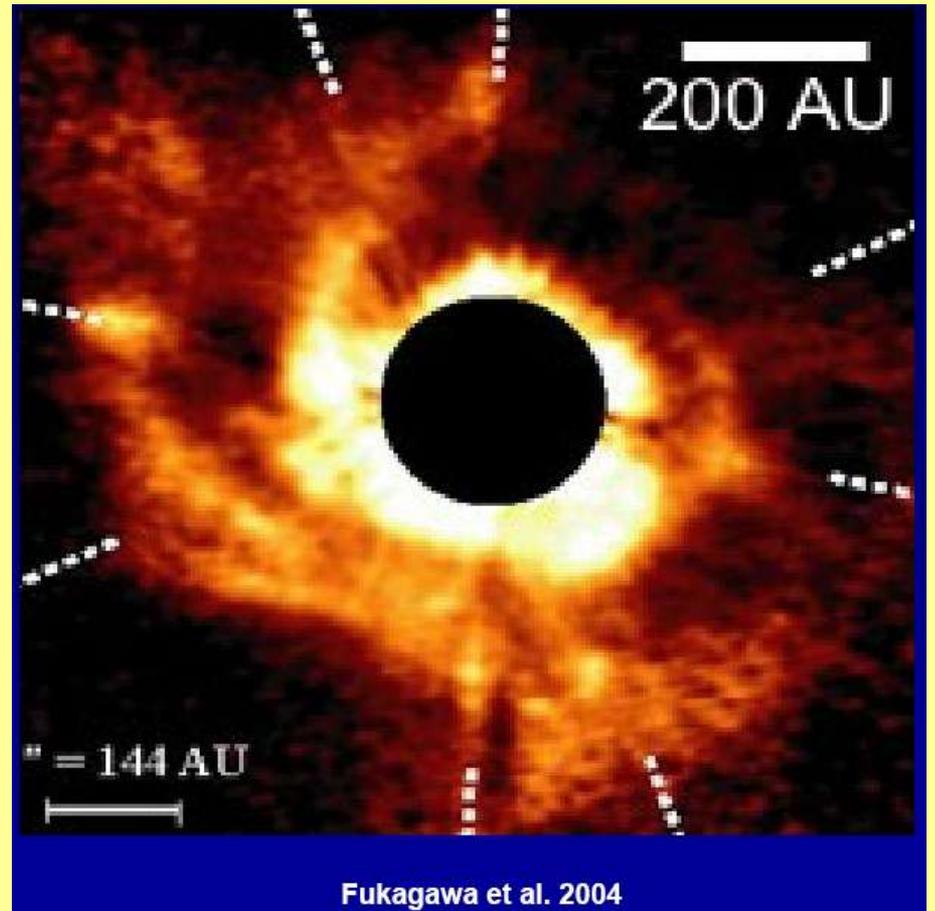
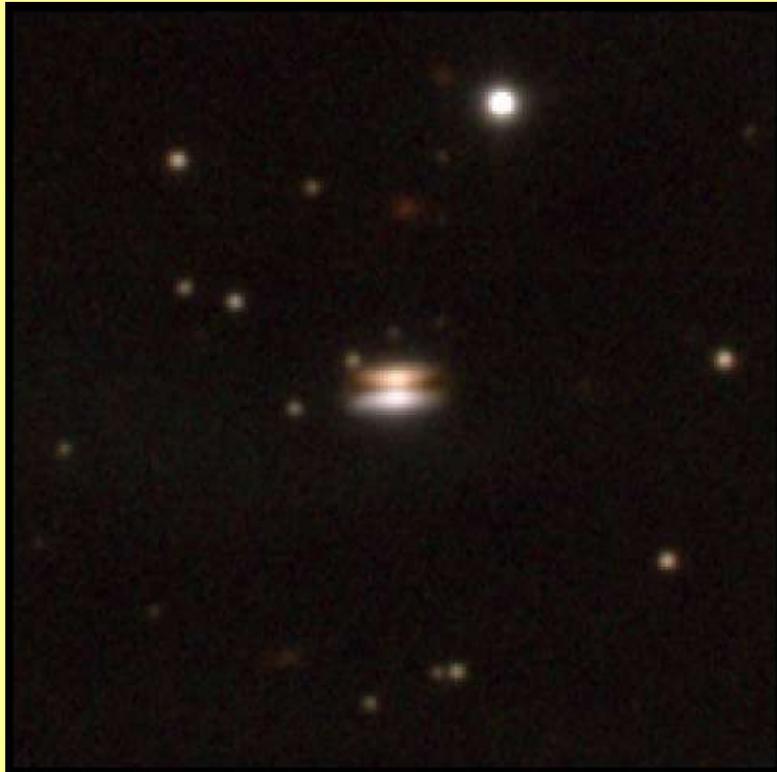
Ещё одна проблема — образование массивных звёзд

Базовый сценарий звездообразования

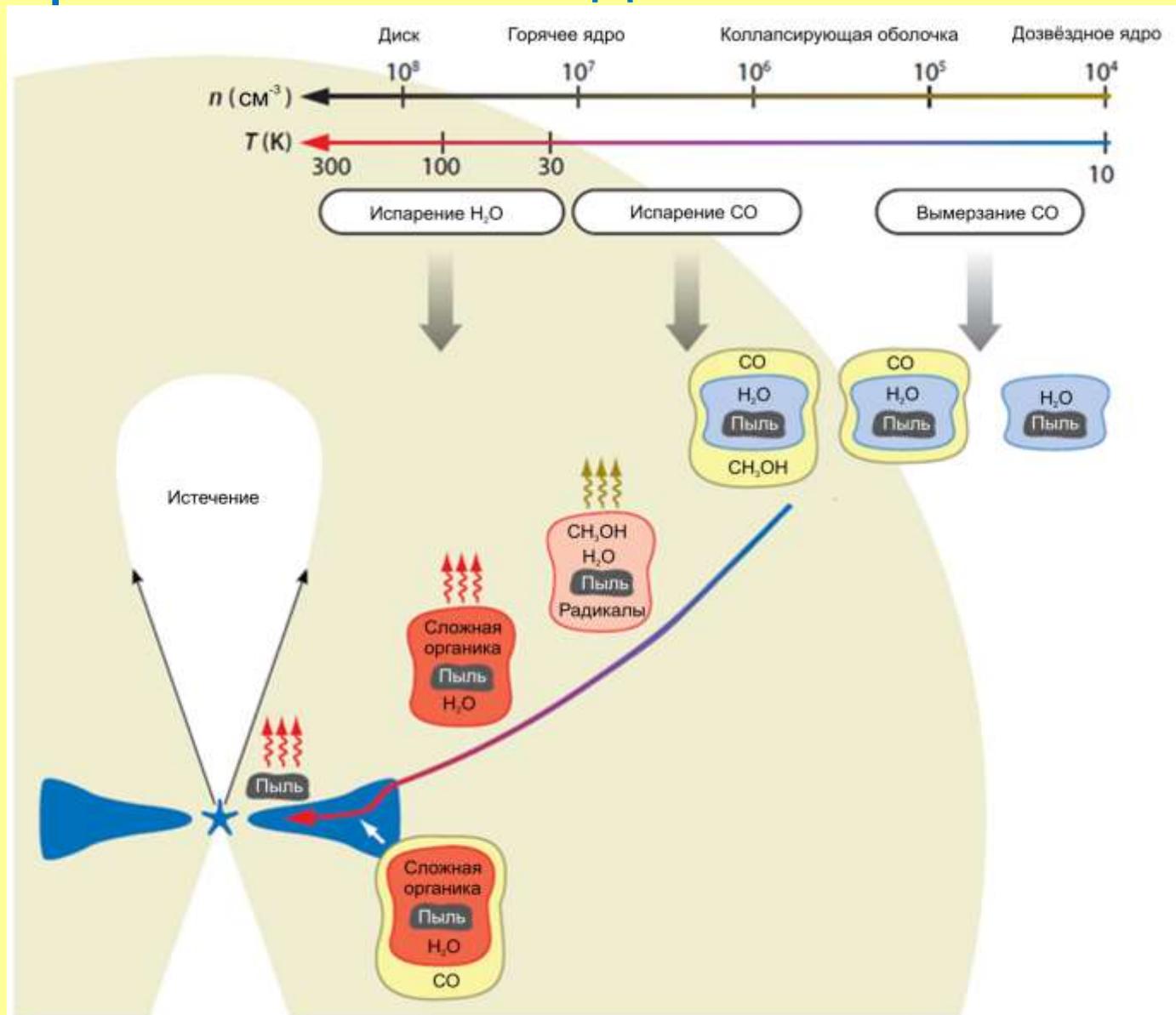


Протопланетные диски

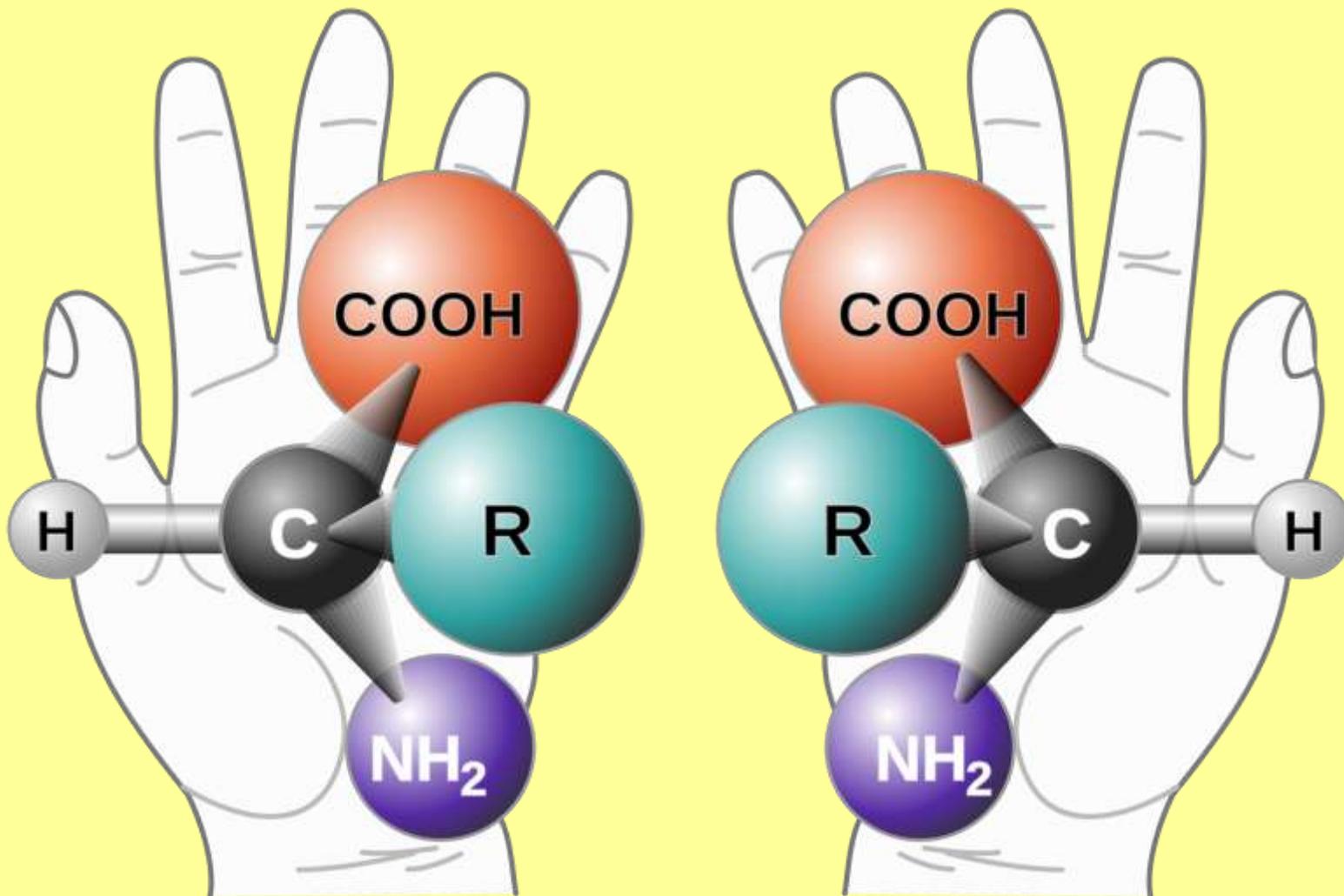




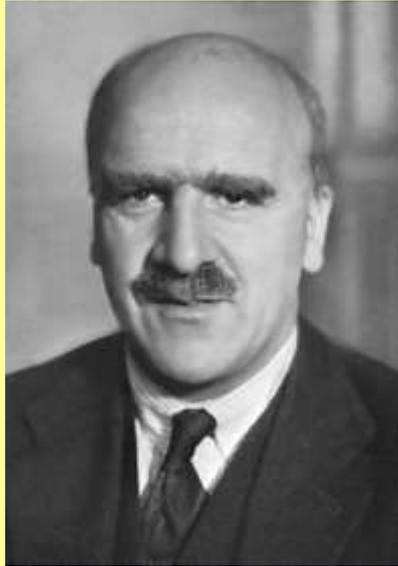
Попадают ли межзвёздные молекулы в протопланетные диски и планеты?



Хиральность



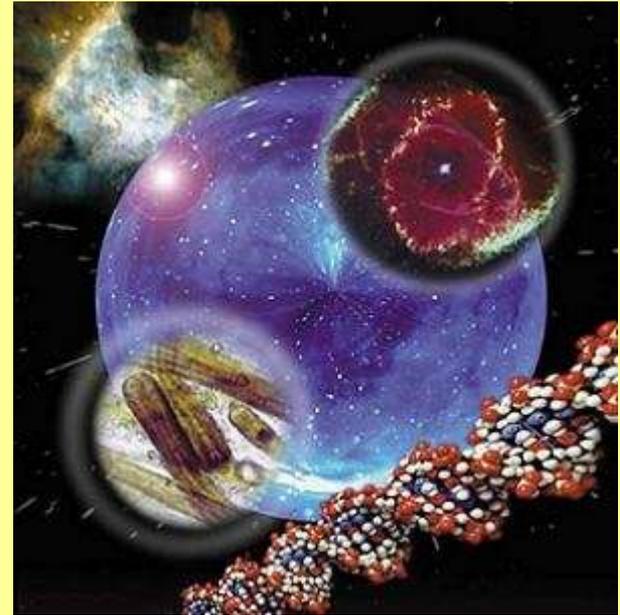
Проблема возникновения жизни



- Органические и неорганические вещества, абиогенез
- Эксперименты Миллера-Юри (1952) — вода+метан+аммиак+молекулярный водород+СО=аминокислоты, сахара и пр.

Астро+био=логия

- Астроботаника
- Экзобиология
- Ксенобиология
- Биоастрономия



**Истоки жизни — в
межзвёздной
среде?**

В поисках истоков жизни во Вселенной

- Органические соединения высокой сложности синтезируются в межзвёздной среде и даже в звёздах нашей и других галактик
- Они могут сохраняться в протопланетных дисках и входить в состав планетезималей
- Органика с метеоритами и по сей день попадает на Землю в «нетронутом» виде



Х. Аверкамп. «Зимний пейзаж»

