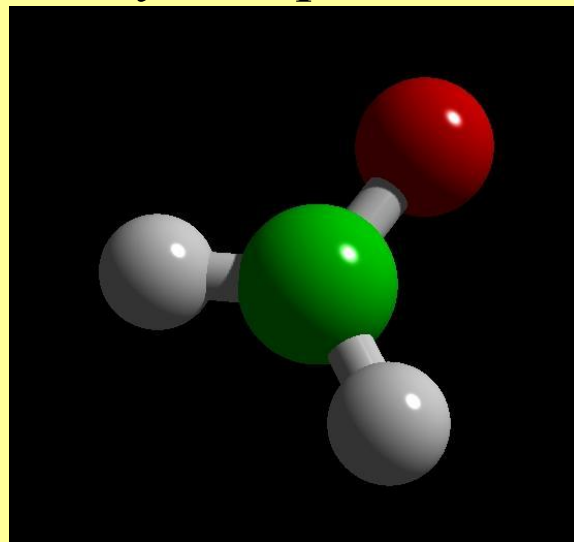


# Молекулы в Космосе

## АСТРОХИМИЯ

*Д. З. Вибе*

Институт астрономии РАН



**“Stars are among the most fundamental building blocks of the universe, and yet the processes by which they are formed are not understood.”**

Derek Ward-Thompson  
*Science*, January 4, 2002

**«Звезды представляют собой один из самых фундаментальных элементов Вселенной, и тем не менее процессы, в результате которых они образуются, нам непонятны».**

Дерек Вард-Томпсон  
*Science*, 4 января 2002 г.

- **Почему звезды образуются так медленно?**

Сопоставление динамического времени и массы гигантских молекулярных облаков дает оценку скорости звездообразования в Галактике — 500 масс Солнца в год. Реальное значение не превышает 15 масс Солнца в год.

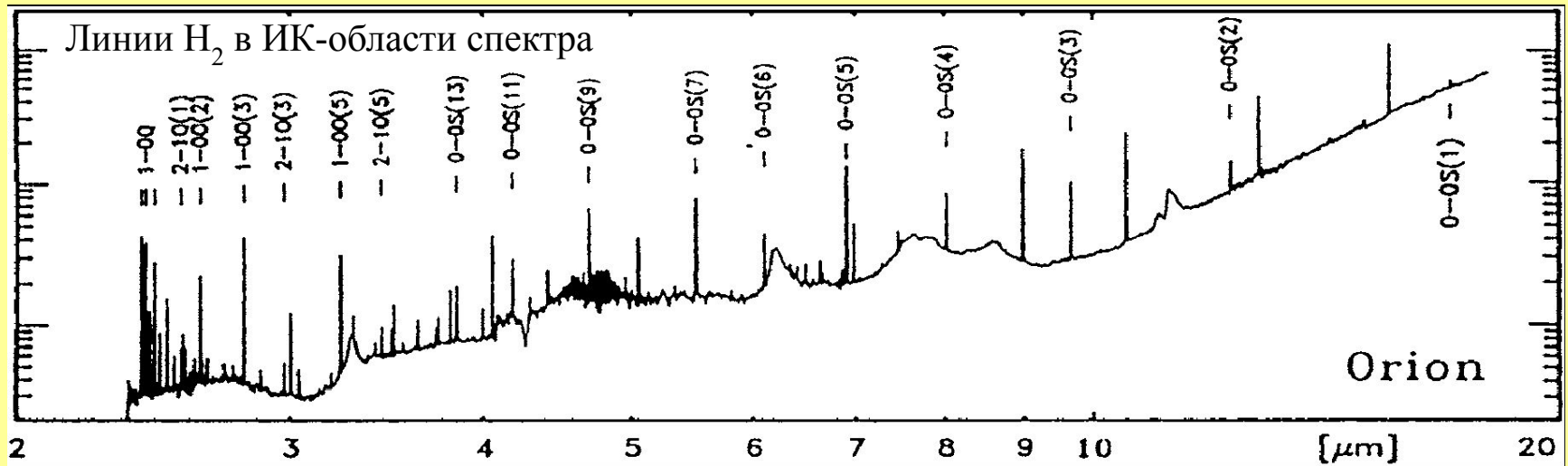
- **Почему звезды образуются так быстро?**

Приблизительно половина плотных ядер содержит точечные инфракрасные источники (протозвезды). Практически нет молекулярных облаков, в которых звездообразование еще не началось. Практически нет молекулярных облаков, в которых звездообразование уже закончилось.

# В чем проблема?

**Вещество, из которого образуются звезды,  
практически невидимо!**

Все, что происходит в молекулярных облаках, в частности, в протозвездных объектах, — происходит с молекулярным водородом.



**Но его линии в областях звездообразования слишком слабы.**

**Молекулярный водород —  
основная, но не единственная  
молекула**

До сороковых годов XX века

# Межзвездное пространство не пусто...

Гершель (светлые туманности состоят из светящейся жидкости)

Струве (Каптейн, Барнард — неравномерность поглощения)

Трюмплер (пыль)

Хартманн (1904, межзвездное поглощение  $\text{Ca}^+$ )

Юэн, Парселл (1951, HI 21 см)

## ...но молекул в Космосе нет!

- Низкая температура
- Низкая плотность
- Диссоциирующие излучения

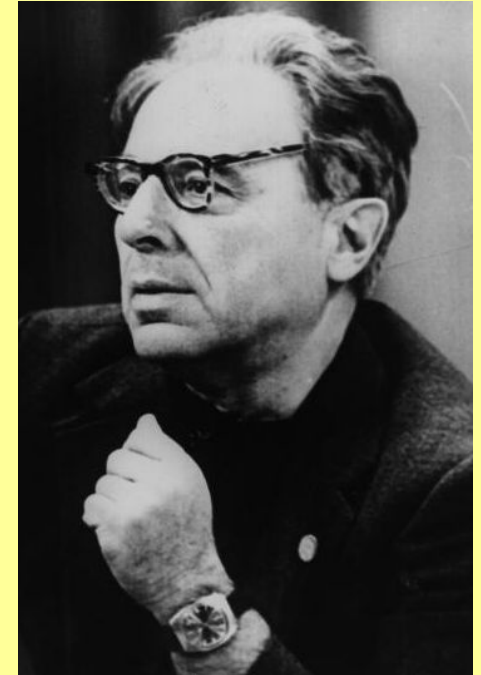
...ХОТЯ ОНИ ЕСТЬ В КОМЕТАХ.

# Молекулы в Космосе есть!

- 1930-е гг. —  $\text{CH}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{CH}^+$  (линии поглощения)
- 1960-е гг. —  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  (радиолинии)
- Наше время — 137 молекул, не считая изотопомеров (с изотопомерами 205)

Электронные переходы (видимый свет)  
Колебательные переходы (ИК)  
Вращательные переходы (радио, субмм)

Первым на возможность наблюдения молекул в радиодиапазоне указал И.С. Шкловский





Список известных межзвездных и околозвездных молекул.

<http://www.cv.nrao.edu/~awootten/allmols.html>

Молекулы из двух атомов

AlF AlCl C<sub>2</sub> CH CH<sup>+</sup> CN **CO** CO<sup>+</sup> CP CS CSi HCl **H<sub>2</sub>** KCl NH NO NS NaCl OH PN SO SO<sup>+</sup> SiN SiO SiS HF SH

Молекулы из трех атомов

C<sub>3</sub> C<sub>2</sub>H C<sub>2</sub>O C<sub>2</sub>S CH<sub>2</sub> HCN HCO HCO<sup>+</sup> HCS<sup>+</sup> HOC<sup>+</sup> **H<sub>2</sub>O** H<sub>2</sub>S HNC HNO MgCN MgNC N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> N<sub>2</sub>O NaCN OCS SO<sub>2</sub> c-SiC<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> NH<sub>2</sub> **H<sub>3</sub><sup>+</sup>** SiCN

Молекулы из четырех атомов

c-C<sub>3</sub>H l-C<sub>3</sub>H C<sub>3</sub>N C<sub>3</sub>O C<sub>3</sub>S C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> CH<sub>2</sub>D<sup>+</sup>? HCCN HCNH<sup>+</sup> HNCO HNCs HOCO<sup>+</sup> H<sub>2</sub>CO H<sub>2</sub>CN H<sub>2</sub>CS H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> **NH<sub>3</sub>** SiC<sub>3</sub>

Молекулы из пяти атомов

C<sub>5</sub> C<sub>4</sub>H C<sub>4</sub>Si l-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> CH<sub>2</sub>CN **CH<sub>4</sub>** HC<sub>3</sub>N HC<sub>2</sub>NC HCOOH H<sub>2</sub>CHN H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O H<sub>2</sub>NCN HNC<sub>3</sub> SiH<sub>4</sub> H<sub>2</sub>COH<sup>+</sup>

Молекулы из шести атомов

C<sub>5</sub>H C<sub>5</sub>O C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> CH<sub>3</sub>CN CH<sub>3</sub>NC **CH<sub>3</sub>OH** CH<sub>3</sub>SH HC<sub>3</sub>NH<sup>+</sup> HC<sub>2</sub>CHO HCONH<sub>2</sub> l-H<sub>2</sub>C<sub>4</sub> C<sub>5</sub>N

Молекулы из семи атомов

C<sub>6</sub>H CH<sub>2</sub>CHCN CH<sub>3</sub>C<sub>2</sub>H HC<sub>5</sub>N HCOCH<sub>3</sub> NH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub> c-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O CH<sub>2</sub>CHOH C<sub>7</sub><sup>-</sup>(?)

Молекулы из восьми атомов

CH<sub>3</sub>C<sub>3</sub>N HCOOCH<sub>3</sub> CH<sub>3</sub>COOH C<sub>7</sub>H H<sub>2</sub>C<sub>6</sub> CH<sub>2</sub>OHCHO

Молекулы из девяти атомов

CH<sub>3</sub>C<sub>4</sub>H CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CN (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>O **CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH** HC<sub>7</sub>N C<sub>8</sub>H

Молекулы из десяти атомов

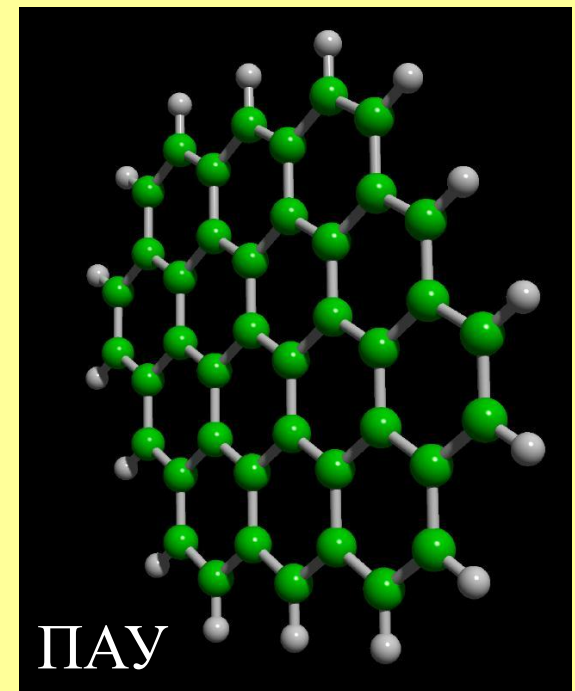
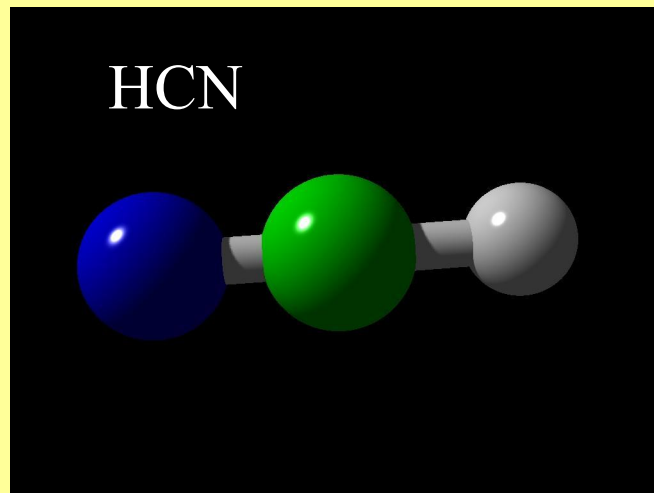
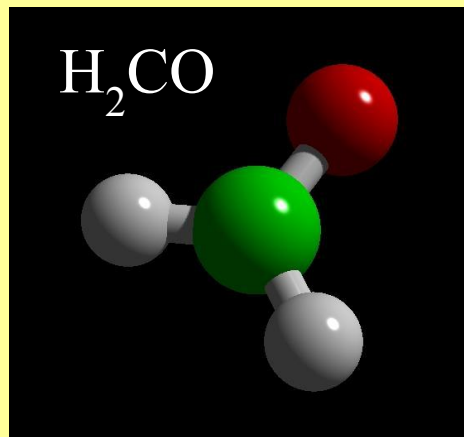
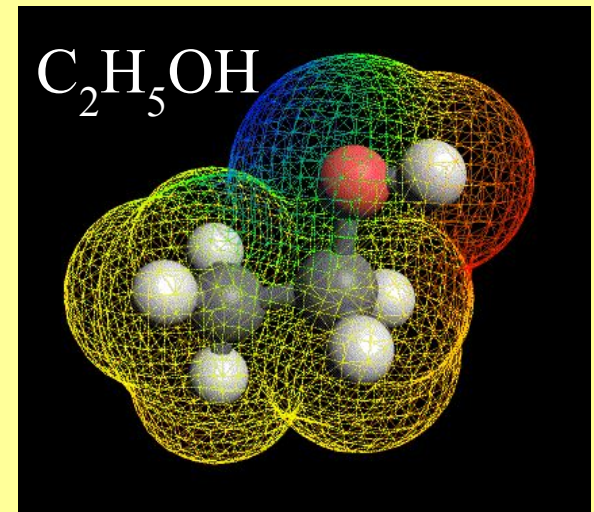
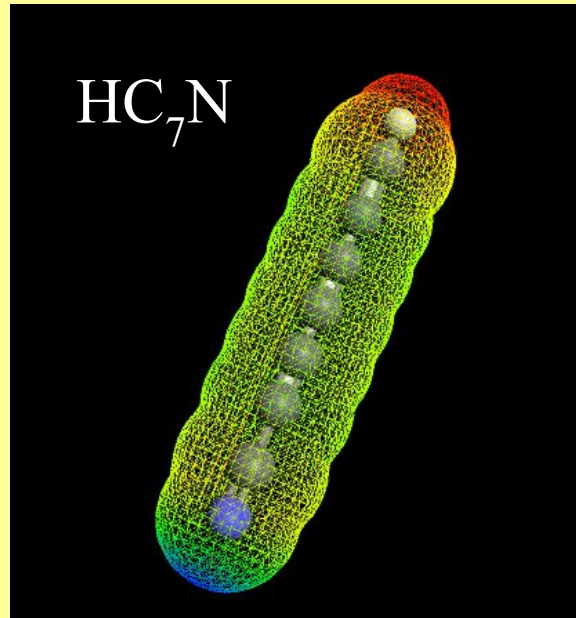
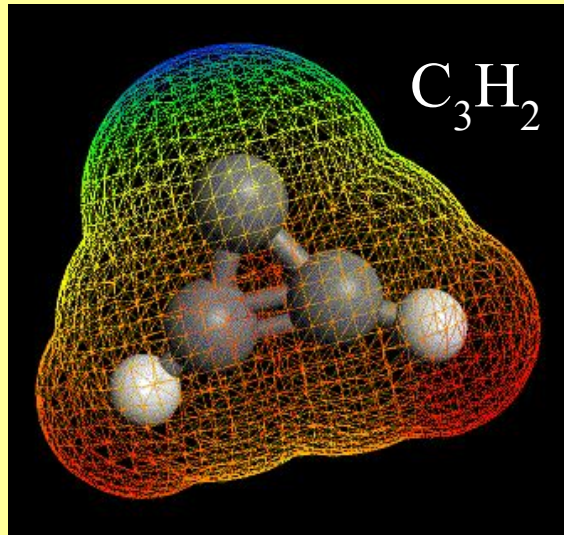
CH<sub>3</sub>C<sub>5</sub>N? (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO **NH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>COOH?**

Молекулы из одиннадцати атомов HC<sub>9</sub>N

Молекулы из тринадцати атомов **HC<sub>11</sub>N**

Изобилие радикалов и ненасыщенных водородом молекул

# Структура молекул



# ROWN ALL

## Boffins find huge cloud of alcohol in space



*ET foam home... how movie favourite would look enjoying a pint of outer-space ale*

By DAVID WOODING, Spaced-Out Correspondent

**STARGAZERS** have found a boozers' paradise in outer space — a gigantic mass of pure alcohol.

They stumbled across a mystery cloud while peering through their telescopes at a distant constellation.

Now after months of research they have learned the mystery object is the final front-beer... enough alcohol to make **400 TRILLION, TRILLION** pints of beer.

That's 300,000 pints a day for every person on Earth for the next **BILLION** years. It would fill the world's oceans tens of thousands of times over.

### Frozen

But star-trekkers who want to beam up for a quick one had better think again — the bar at the end of the Universe is 10,000 light years away — or 58,858,980,000,000,000 miles.

Last night, the three British astronomers who made the discovery were raising their glasses in a more down-to-Earth toast.

Geoff Macdonald and Rolf Habing, of the University of Kent and Tom Miller, of the University of Manchester Institute of Science and Technology, were the boffins who spotted the cloud.

They were looking through the powerful James Clerk Maxwell Telescope on Hawaii at a newly-formed star called G34.3 in the

## 10 STOUT OF THIS WORLD DRINKS

1. Interstellar Airtels
2. Carling Black Hole Label
3. Tennants Extra Terrestrial
4. Adnams Alien
5. Mars-tons Pedigree
6. Wainmays Red Planet
7. Miller Lite Years
8. Rolling Rocket
9. Castlemoon XXXX
10. Red Spock Cider

constellation of Aquila. Further studies revealed that heat from the new star is producing alcohol faster than all the world's breweries and distilleries put together.

At minus 148°C the cloud is warm by space standards — but the brew could be comfortably drunk without ice.

As Captain Kirk might say if he stumbled across the alcoholic haze: "Booze me up, Scotty."

Only one problem in outer space, though... the pubs have no atmosphere.

## Ученые нашли в космосе огромное облако спирта

Звездочеты нашли в космосе рай для пьяниц — гигантскую массу чистого спирта.

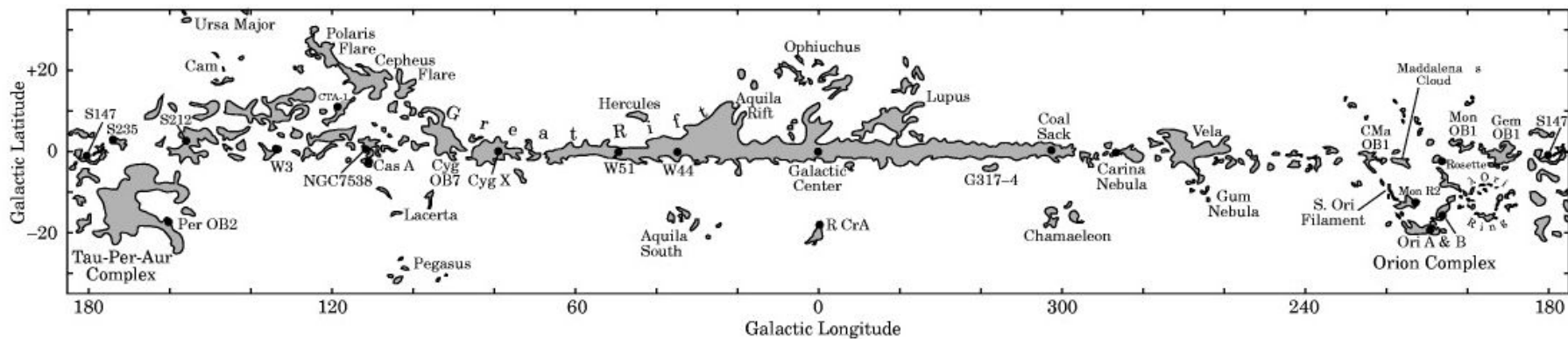
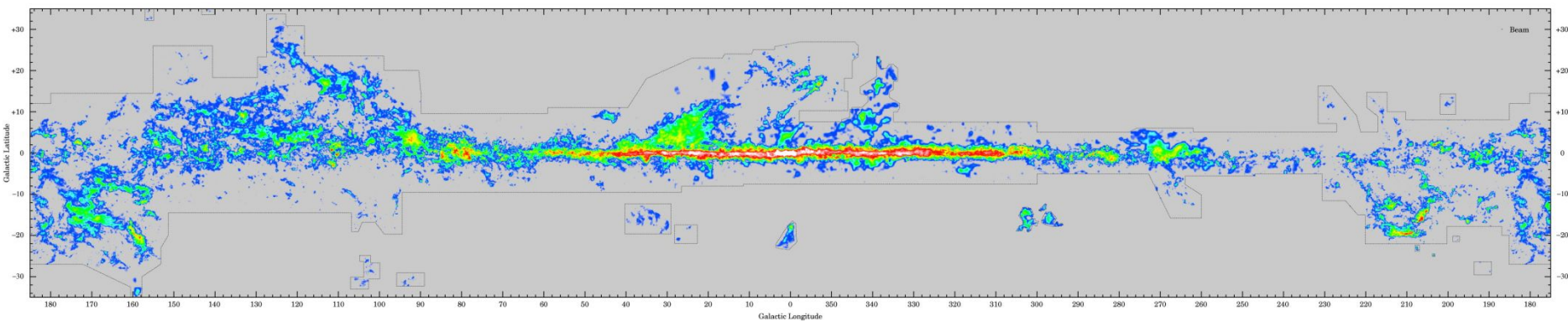
«Они наткнулись на таинственное облако, глаза в свои телескопы на далекое созвездие.

Через несколько месяцев исследований они поняли, что таинственный объект содержит достаточно спирта, чтобы изготовить **400 триллионов триллионов** пинт пива. Это составляет 300000 пинт ежедневно для каждого жителя Земли на следующий миллиард лет... Облако находится близ молодой звезды G34.3 в созвездии Орла... Тепло этой звезды производит больше спирта, чем все пивные и ликеро-водочные заводы Земли, вместе взятые.»

# Хранить в прохладном, защищенном от света месте

- Кометы
- Околосветные оболочки
- Молекулярные облака

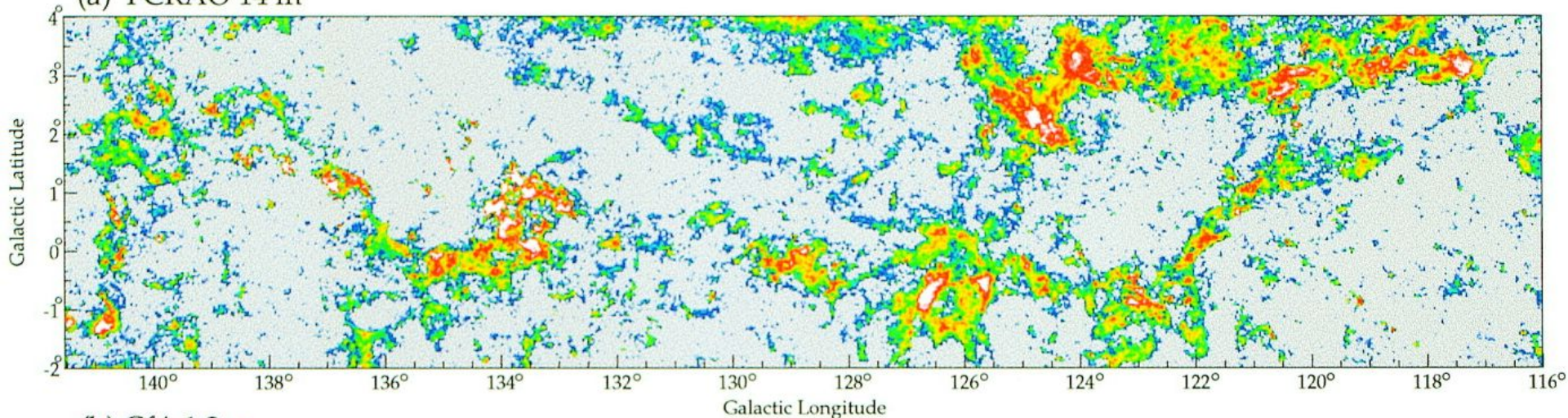
# Карта Млечного Пути в линии молекулы CO



# Области звездообразования

- **Гигантские молекулярные облака** (плотность  $\sim 10^2 \text{ см}^{-3}$ , размер  $\sim 100 \text{ пс}$ )
- **Молекулярные облака** (плотность  $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ , размер  $\sim 1 \text{ пс}$ )
- **Плотные ядра** (плотность  $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ , размер  $\sim 0.1 \text{ пс}$ )

(a) FCRAO 14 m

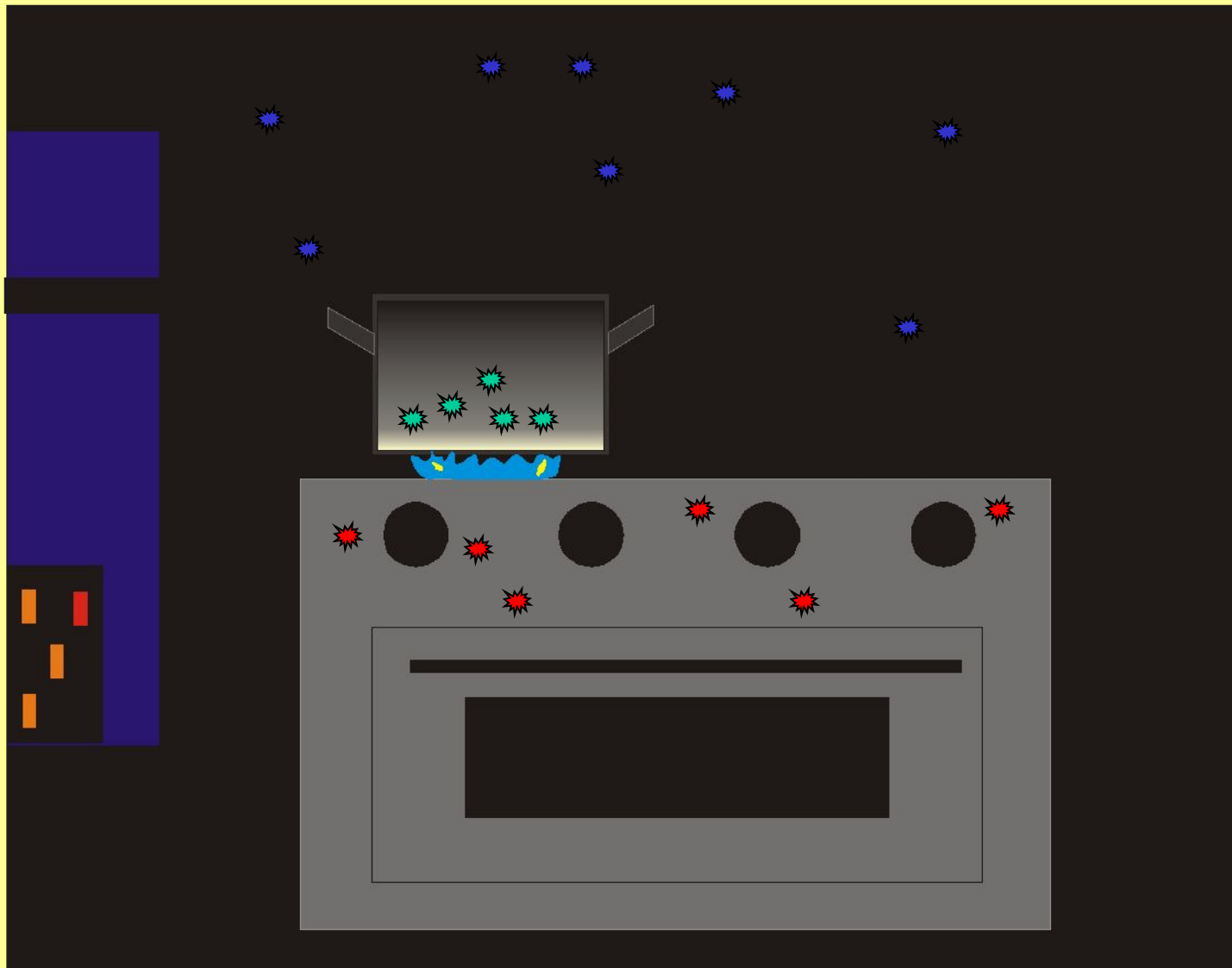


# Содержание некоторых молекул в ТМС-1 (по отношению к $\text{H}_2$ )

<b>C</b>	$1-10 \cdot 10^{-5}$	<b>HCN</b>	$2 \cdot 10^{-8}$
<b>CO</b>	$8-12 \cdot 10^{-5}$	<b>HC<sub>3</sub>N</b>	$6-17 \cdot 10^{-9}$
<b>H<sub>2</sub>CO</b>	$5 \cdot 10^{-8}$	<b>CH<sub>3</sub>CN</b>	$5 \cdot 10^{-10}$
<b>HCO<sup>+</sup></b>	$2-4 \cdot 10^{-9}$	<b>NH<sub>3</sub></b>	$2 \cdot 10^{-8}$
<b>CH</b>	$2 \cdot 10^{-8}$	<b>N<sub>2</sub>H<sup>+</sup></b>	$5-10 \cdot 10^{-10}$
<b>C<sub>2</sub>H</b>	$3-10 \cdot 10^{-9}$	<b>CS</b>	$1 \cdot 10^{-8}$
<b>C<sub>3</sub>H</b>	$2 \cdot 10^{-8}$	<b>C<sub>2</sub>S</b>	$1 \cdot 10^{-8}$
<b>C<sub>4</sub>H</b>	$1-4 \cdot 10^{-8}$	<b>C<sub>3</sub>S</b>	$2 \cdot 10^{-9}$
<b>C<sub>3</sub>H<sub>2</sub></b>	$1 \cdot 10^{-8}$	<b>HCS<sup>+</sup></b>	$2 \cdot 10^{-9}$
<b>CH<sub>3</sub>OH</b>	$2-4 \cdot 10^{-9}$	<b>SO</b>	$5 \cdot 10^{-9}$
<b>CN</b>	$3 \cdot 10^{-8}$	<b>H<sub>2</sub>O</b>	$< 7 \cdot 10^{-8}$

Молекул очень мало!

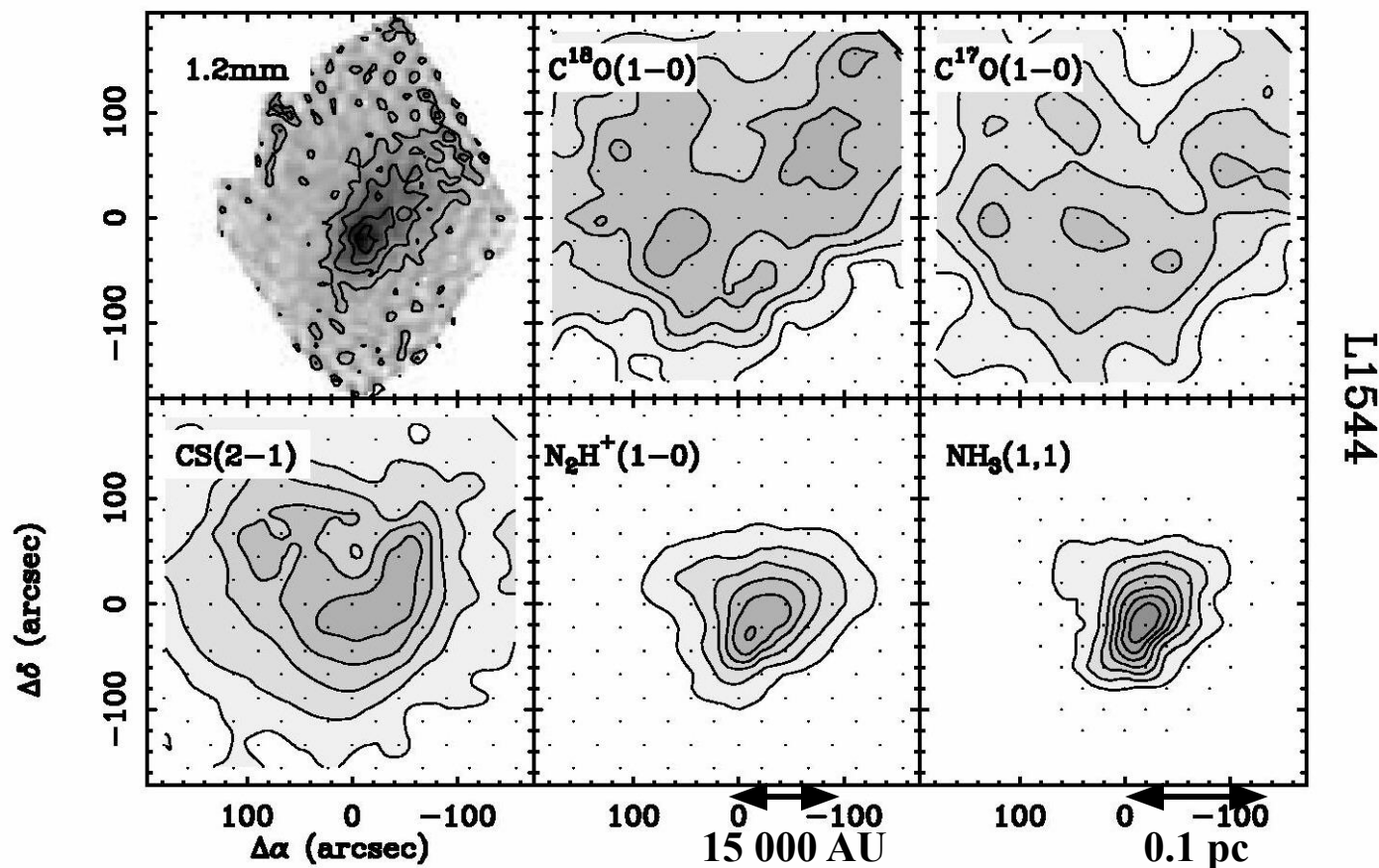
# Что творится на кухне?





# Неравномерное содержание молекул

## Беззвездное ядро L1544



Tafalla et al. (2002)

Разобраться в событиях,  
происходящих в  
молекулярных облаках, по  
наблюдениям молекул  
невозможно без  
моделирования химических  
процессов!

**«Широко простирает химия руки свои в дела человеческие. Куда ни посмотрим, куда ни оглянемся, везде обращаются перед очами нашими успехи ее прилежания.»**

М. В. Ломоносов

# Как работает межзвездный химический реактор?

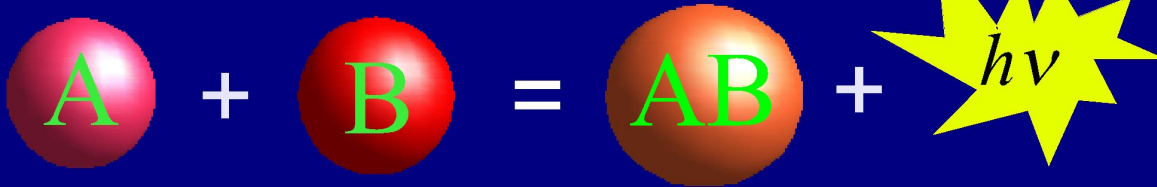
***Межзвездная химия сильно отличается от земной!***

# Виды газофазных химических реакций

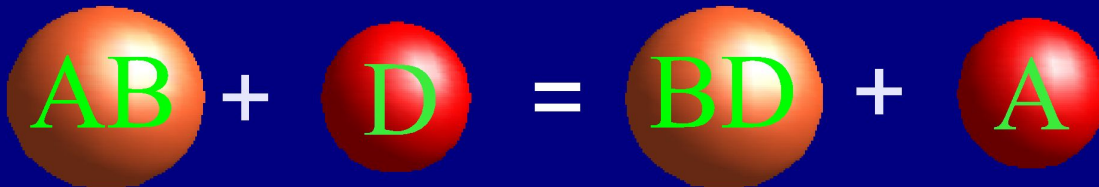
- **Нейтраль-нейтральные реакции**
- **Реакции с космическими лучами**
- **Ион-молекулярные реакции**
- **Реакции диссоциативной рекомбинации**
- **Фотореакции**

# Нейтраль-нейтральные реакции

Создание химических связей

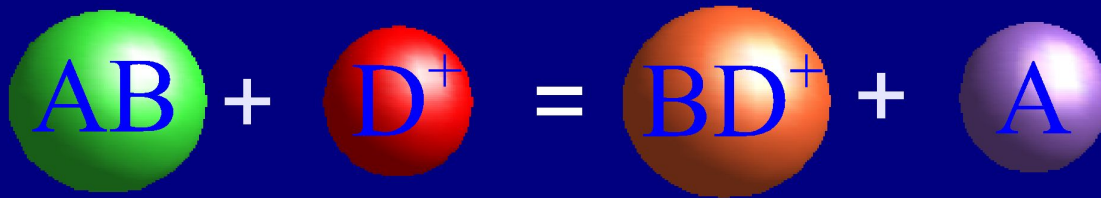


Перераспределение химических связей



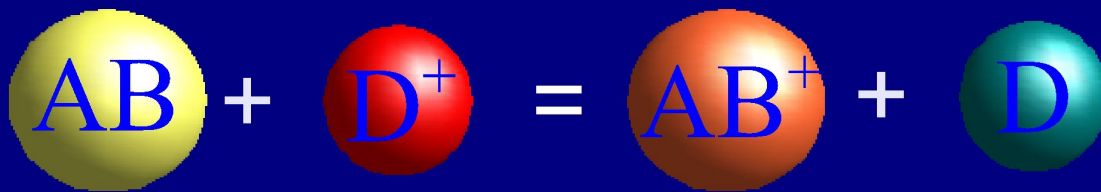
# Ион-молекулярные реакции

Перераспределение химических связей



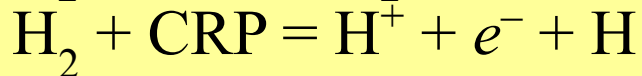
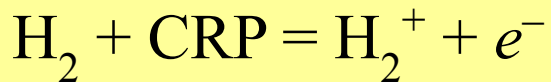
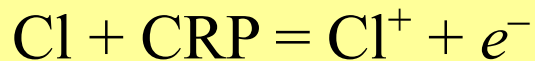
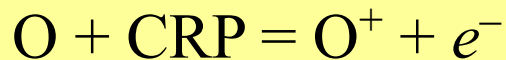
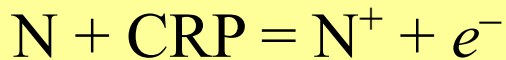
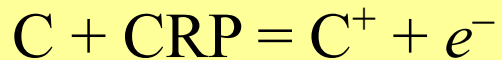
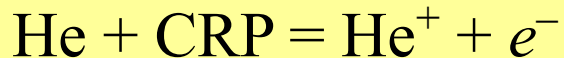
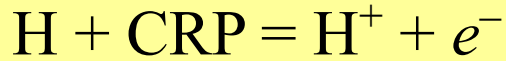
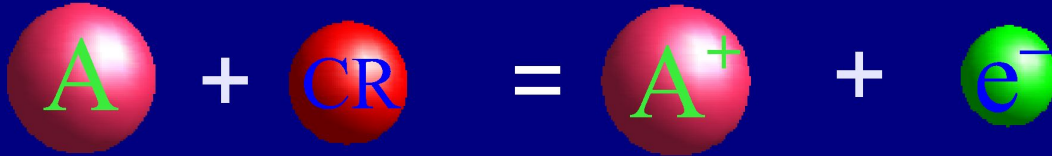
Высокие скорости  
при низких  
температурах

Обмен зарядом



# Реакции с космическими лучами

## Реакции ионизации



$$r = \alpha \zeta n_i$$

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

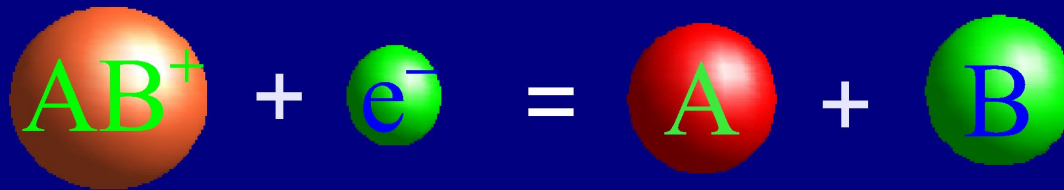
$$\zeta_{RN} = 6.0 \cdot 10^{-19} \text{ s}^{-1}$$

$$\zeta_X = \sim 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$



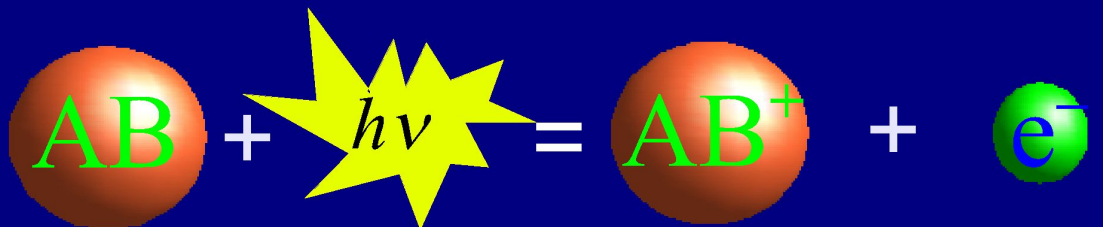
# Реакции диссоциативной рекомбинации

Разрыв химических связей



# Фотореакции

Разрыв химических связей



# Химические базы данных

## **UMIST95 (University of Manchester)**

Около 400 компонентов и 3864 реакции, в том числе

10 реакций с космическими лучами

2803 ион-молекулярных реакции

69 фотореакций, индуцированных космическими лучами

394 нейтраль-нейтральных реакции

433 реакции диссоциативной рекомбинации

150 фотореакций

## **New Standard Model (Ohio State University)**

Около 400 компонентов и 4203 реакции, в том числе

9 реакций с космическими лучами

2935 ион-молекулярных реакций

235 фотореакций, индуцированных космическими лучами

209 нейтраль-нейтральных реакций

504 реакции диссоциативной рекомбинации

272 фотореакции

## **Herbst & Clemperer (1973)**

37 компонентов и 100 реакций (5 наблюдаемых молекул)

## **Bettens & Herbst (1995)**

Около 1000 компонентов и 10000 реакций

# Химия усложняется

OH, NH, CH, OH<sup>+</sup>, NH<sup>+</sup>, CH<sup>+</sup>, □ H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, □

+

C, C<sup>+</sup>



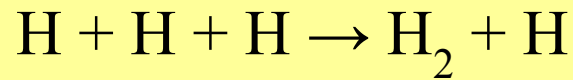
HCN, CCN, HCO<sup>+</sup>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H, HC<sub>3</sub>N, □



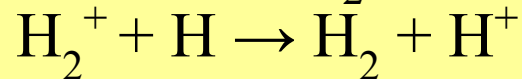
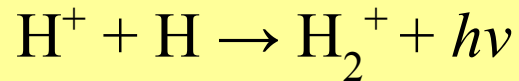
H<sub>4</sub>C<sub>8</sub>N<sup>+</sup>, C<sub>10</sub><sup>+</sup>

# Молекулярный водород в газовой фазе почти не образуется!

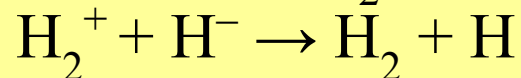
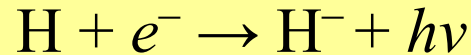
Трехчастичные столкновения:



Очень-очень медленная реакция:

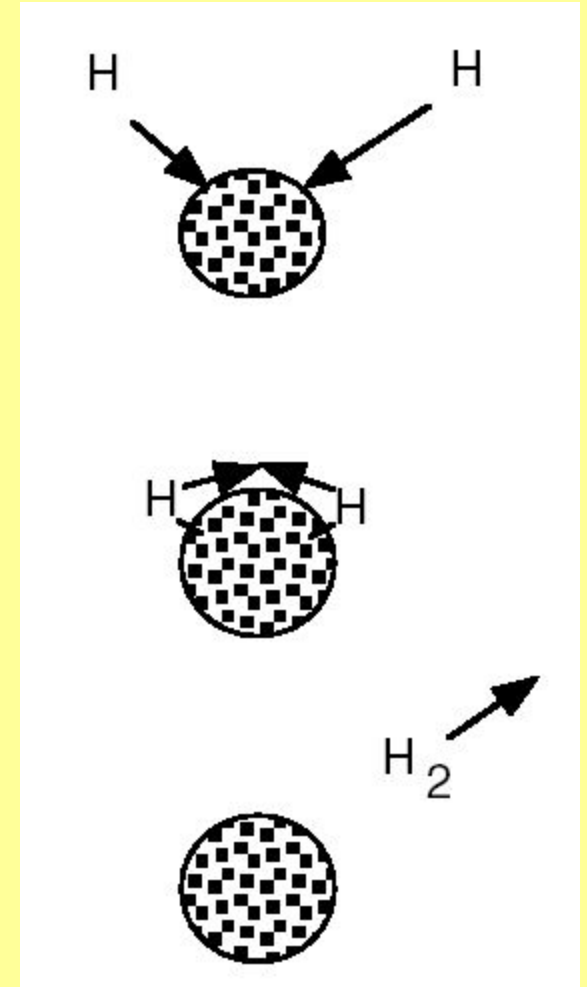


Очень медленная реакция:



# 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 химические реакции

- Образование молекулярного водорода
- Образование молекул, насыщенных водородом
- Образование гомогенных молекул ( $C_2$ ,  $O_2$ )
- Образование простейших органических молекул





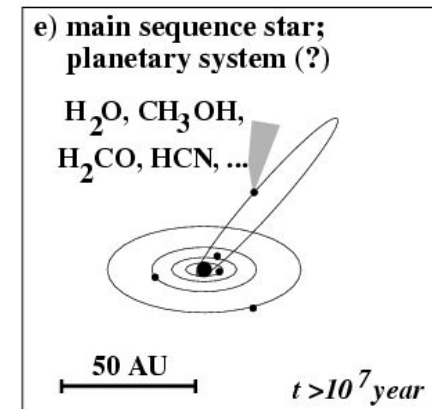
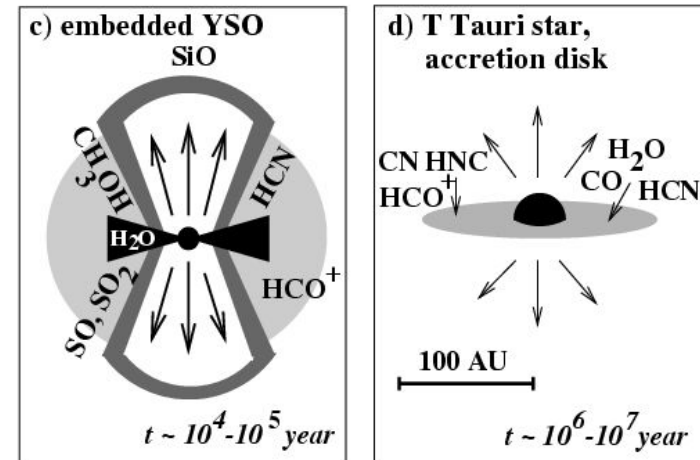
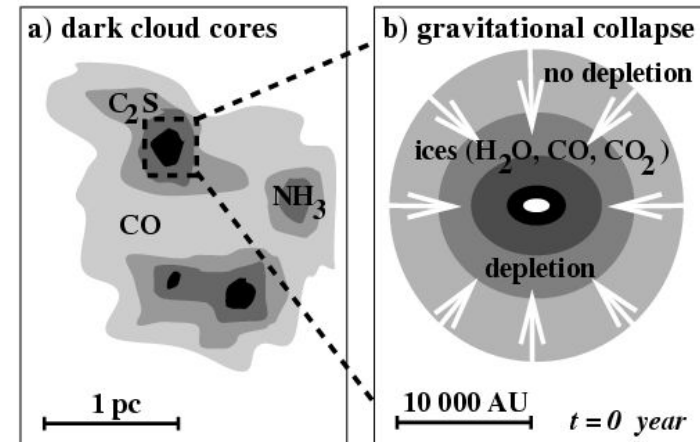
# Десорбция

- Тепловая десорбция (энергия связи)
- Десорбция космическими лучами (температура нагрева)
- Фотодесорбция (вероятность отрыва)
- Химическая десорбция

# Общая картина звездообразования

Молекулярное облако распадается на несколько гравитационно связанных ядер, в которых изначально силам притяжения противодействуют тепловое, магнитное и турбулентное давление.

Эти ядра в течение некоторого времени пребывают в стационарном состоянии, а затем в результате амбиполярной диффузии, диссипации турбулентности или под воздействием внешнего импульса становятся гравитационно неустойчивыми и коллапсируют.



# Что и зачем моделировать?

- Определение плотности, температуры, магнитного поля
- Исследование поля скоростей
- Определение возраста («химические часы»)
- Обратная связь с динамикой
- Происхождение жизни

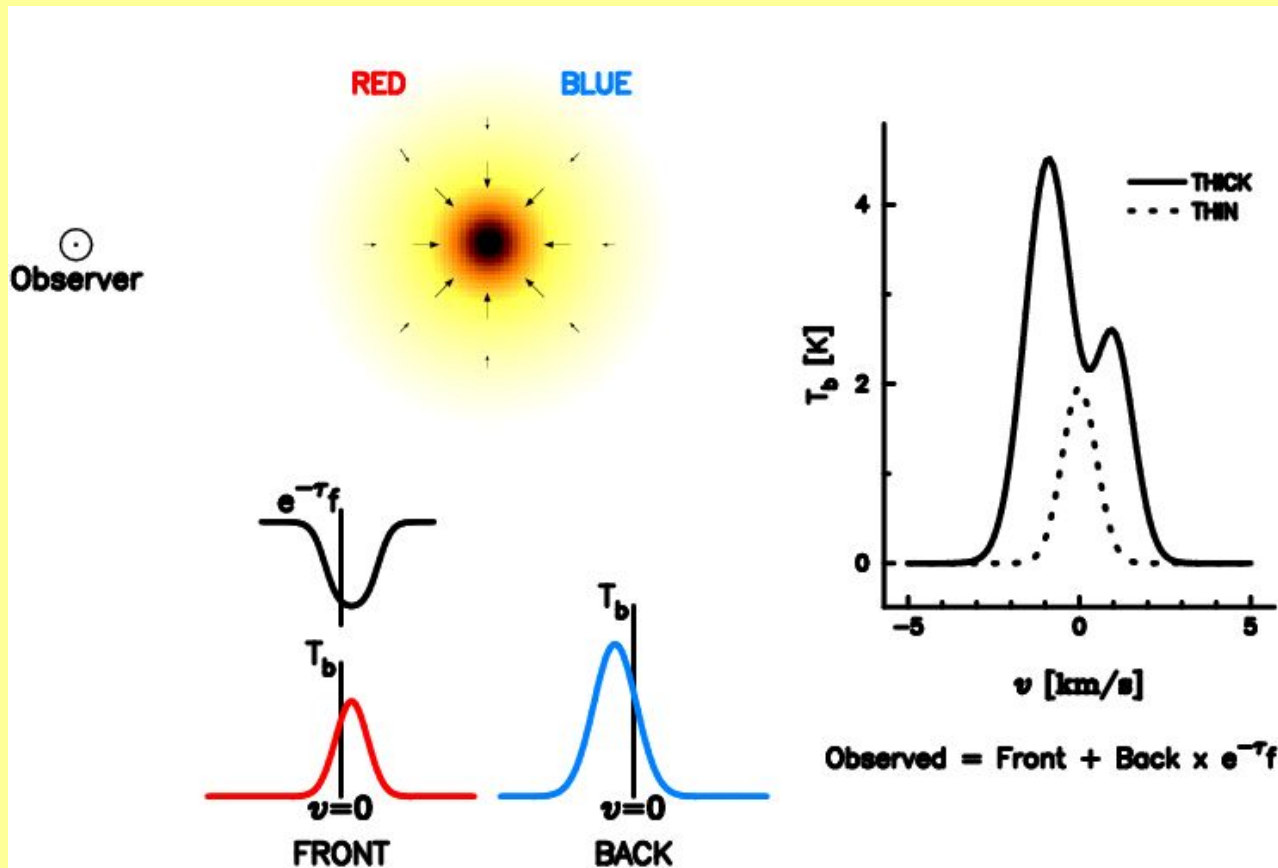
# Определение плотности и температуры

Молекула	Переход	Частота, ГГц	$n_{cr}(10\text{ K}),$ $\text{cm}^{-3}$	$n_{cr}(100\text{ K}),$ $\text{cm}^{-3}$
NH <sub>3</sub>	(1,1)	23.7	$1.8 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^3$
NH <sub>3</sub>	(2,2)	23.7	$2.1 \cdot 10^3$	$2.1 \cdot 10^3$
CS	$J = 1 \rightarrow 0$	49.0	$4.6 \cdot 10^4$	$6.2 \cdot 10^4$
CS	$J = 2 \rightarrow 1$	98.0	$3.0 \cdot 10^5$	$3.9 \cdot 10^5$
CS	$J = 3 \rightarrow 2$	147.0	$1.3 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^6$
CS	$J = 5 \rightarrow 4$	244.9	$8.8 \cdot 10^6$	$6.9 \cdot 10^6$
CS	$J = 7 \rightarrow 6$	342.9	$2.8 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^7$
CS	$J = 10 \rightarrow 9$	489.8	$1.2 \cdot 10^8$	$6.2 \cdot 10^7$
HCO <sup>+</sup>	$J = 1 \rightarrow 0$	89.2	$1.7 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^5$
HCO <sup>+</sup>	$J = 3 \rightarrow 2$	267.6	$4.2 \cdot 10^6$	$3.3 \cdot 10^6$
HCO <sup>+</sup>	$J = 4 \rightarrow 3$	356.7	$9.7 \cdot 10^6$	$7.8 \cdot 10^6$
HCN	$J = 1 \rightarrow 0$	88.6	$2.6 \cdot 10^6$	$4.5 \cdot 10^6$
HCN	$J = 3 \rightarrow 2$	265.9	$7.8 \cdot 10^7$	$6.8 \cdot 10^7$
HCN	$J = 4 \rightarrow 3$	354.5	$1.5 \cdot 10^8$	$1.6 \cdot 10^8$

# Магнитные поля

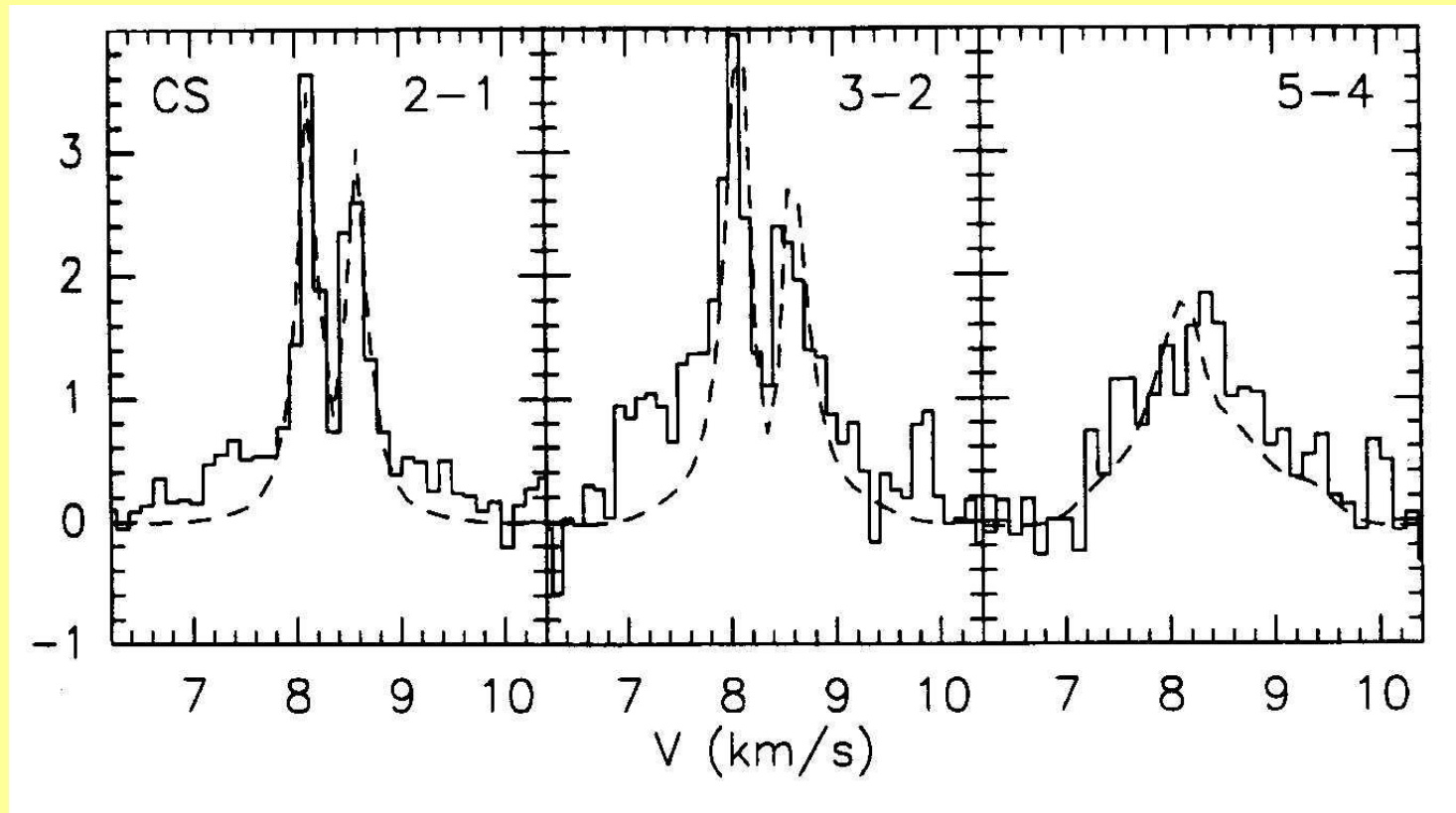
- Круговая поляризация (эффект Зеемана)
- Плоская поляризация (эффект Голдрайка-Килафиса)

# Формирование линий в коллапсирующем облаке



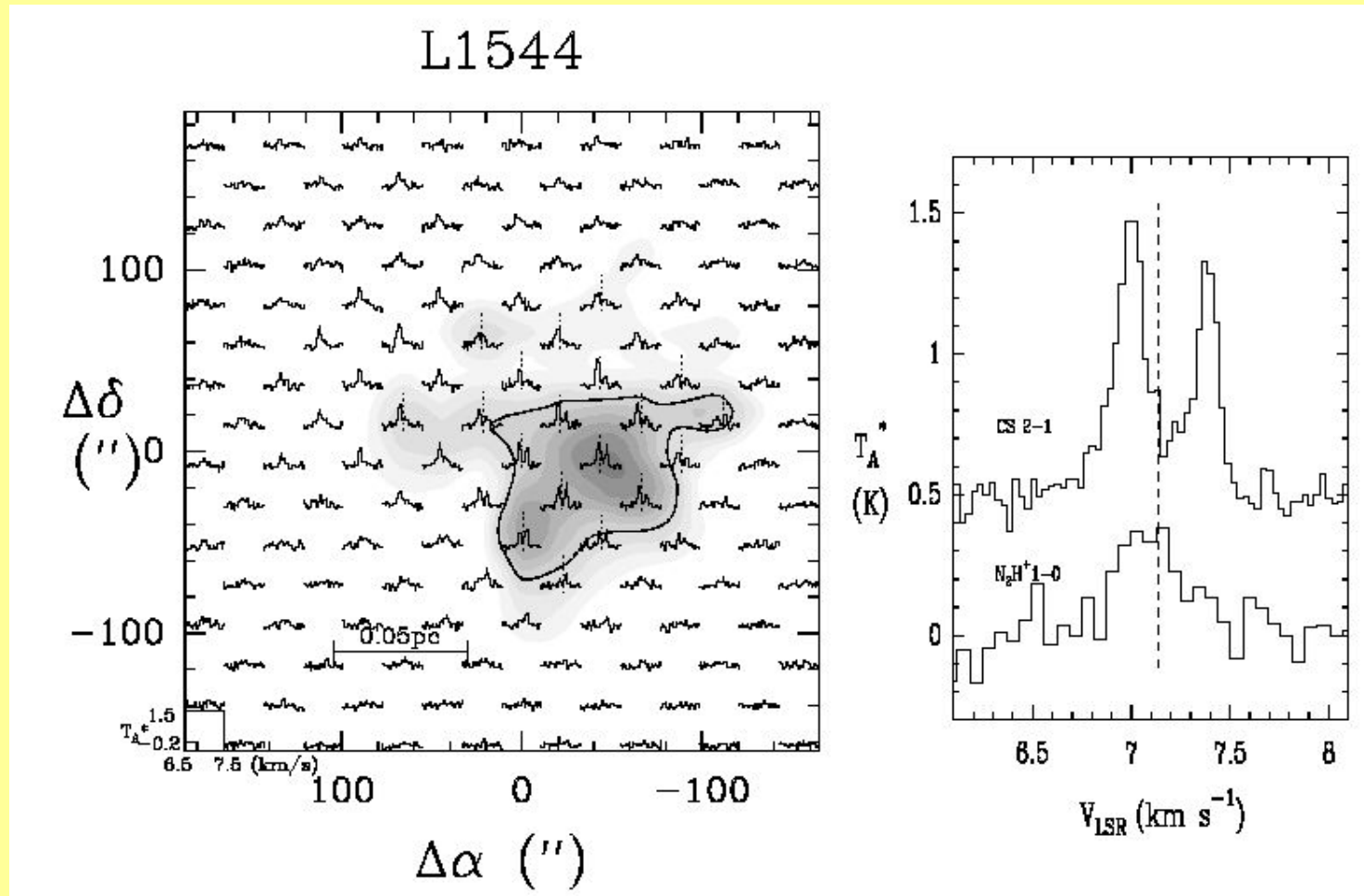
Оптически толстые линии в коллапсирующем облаке имеют характерную двугорбую форму с неравной высотой пиков

# Признаки коллапса в наблюдениях



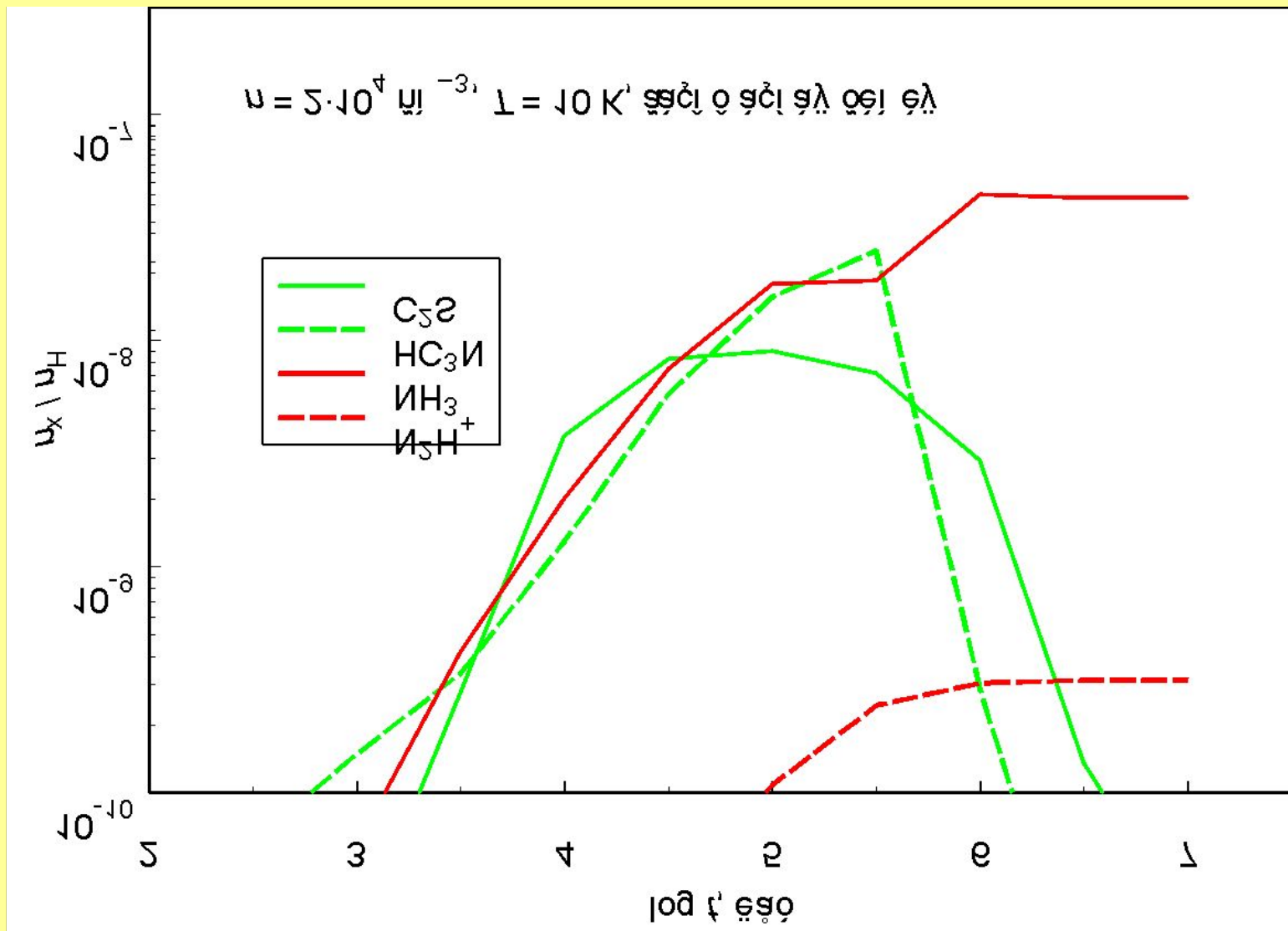
Профили линий CS в V335 (Choi et al. 1995). Сплошные линии — наблюдения (Zhou et al. 1993), штриховые линии — модель с относительным содержанием CS  $5.5 \cdot 10^{-9}$  и максимальной скоростью коллапса на расстоянии 0.03 пс от центра облака.

# Признаки коллапса в наблюдениях





# Химические часы



# Нагрев и охлаждение

## Нагрев

- Фотодиссоциация молекулярного водорода
- Фотоионизация нейтрального углерода
- Фотоэлектрическая эмиссия с поверхности пылинок
- Образование молекулярного водорода на поверхности пылинок
- Нагрев в результате ионизации космическими лучами

## Охлаждение

- Охлаждение в молекулярных линиях

# Происхождение жизни

Органические молекулы в молекулярных облаках

Органические молекулы в кометах и метеоритах

# Успехи

- Корректно воспроизведены содержания основных молекул (СО) и большинства второстепенных молекул
- Объяснено наличие в молекулярных облаках радикалов, ионов и изомеров, а также ненасыщенных органических молекул (несмотря на изобилие водорода)
- Объяснено повышенное содержание молекул, содержащих дейтерий

# Перспективы

- Детальная информация о распределении молекул в областях звездообразования
- Внегалактическая астрохимия (в частности, на больших красных смещениях)