

Март 2025 г.

Том 195, № 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Происхождение и перенос воды во Вселенной

М.С. Кирсанова, П.В. Бакланов, Е.О. Васильев, А.И. Васюнин, Д.З. Вибе, С.А. Дроздов, Т.И. Ларченкова, С.Ф. Лихачёв, А.В. Моисеев, Я.Н. Павлюченков, П.С. Созинова, А.П. Топчиева, И.В. Третьяков, Г.С. Федосеев, А.В. Худченко, Н.Н. Шахворостова

Решение проблемы происхождения и переноса воды во Вселенной является одним из ключевых направлений научной программы космической обсерватории "Миллиметрон". В работе рассматривается широкий круг задач, связанных с этой проблематикой: от образования воды в ультраярких галактиках и местной Вселенной до протопланетных дисков и комет. Предлагаются методы и подходы для их решения.

Вода обнаружена не только на Земле



P H I L O S O P H I C A L

T R A N S A C T I O N S.

XIX. *On the remarkable Appearances at the Polar Regions of the Planet Mars, the Inclination of its Axis, the Position of its Poles, and its spheroidical Figure; with a few Hints relating to its real Diameter and Atmosphere.* By William Herschel, Esq. F. R. S.

Herschel, 1784

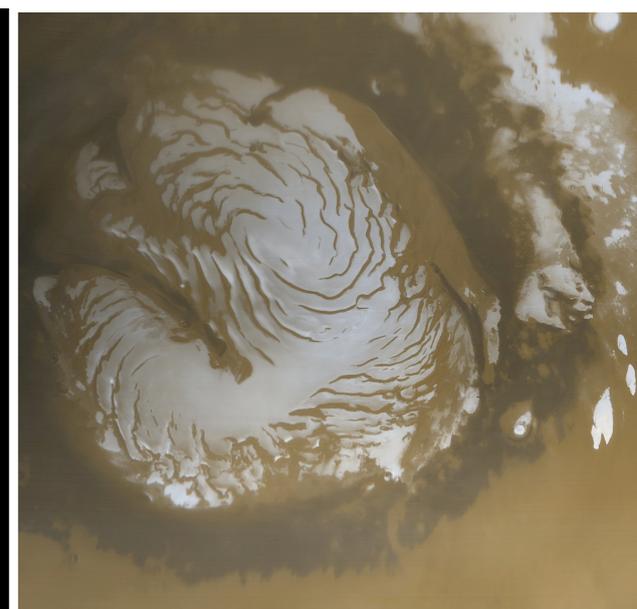
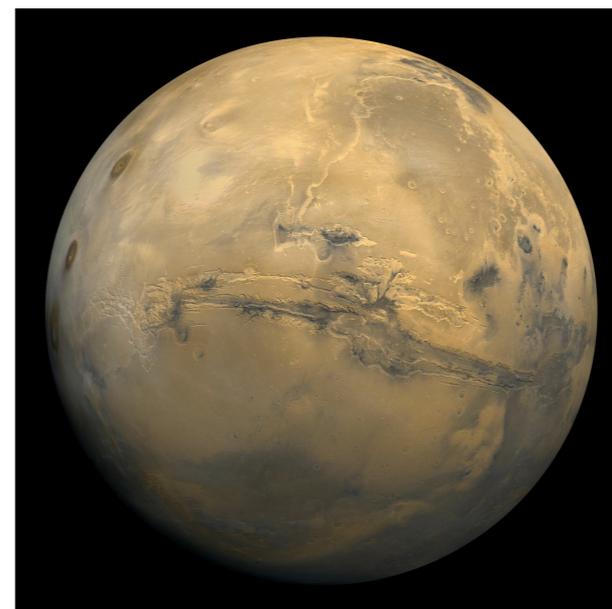
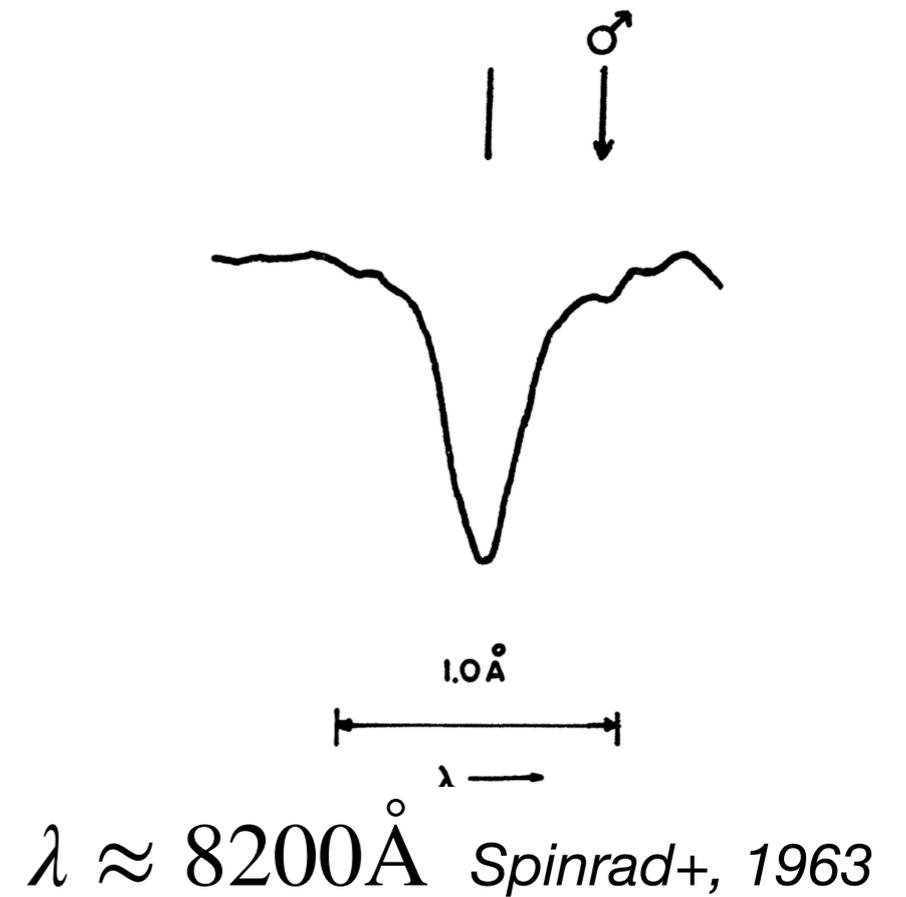
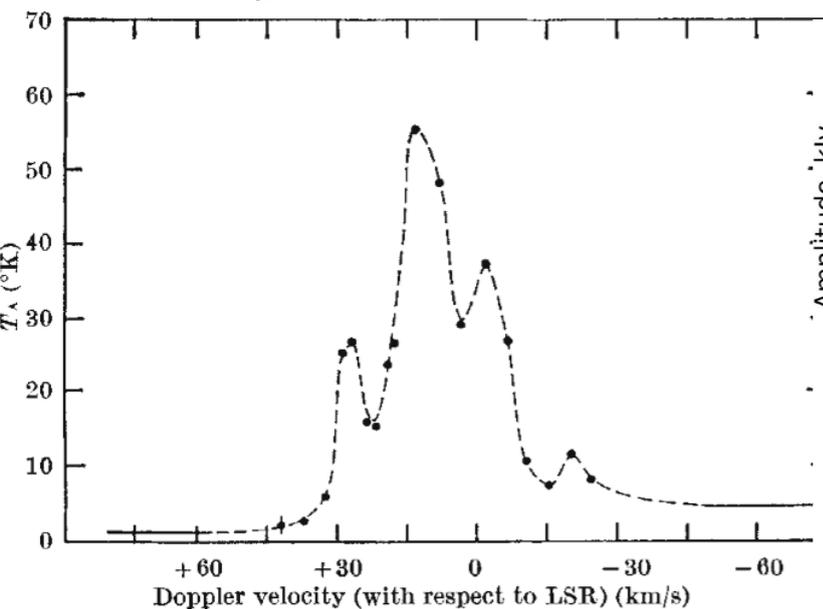
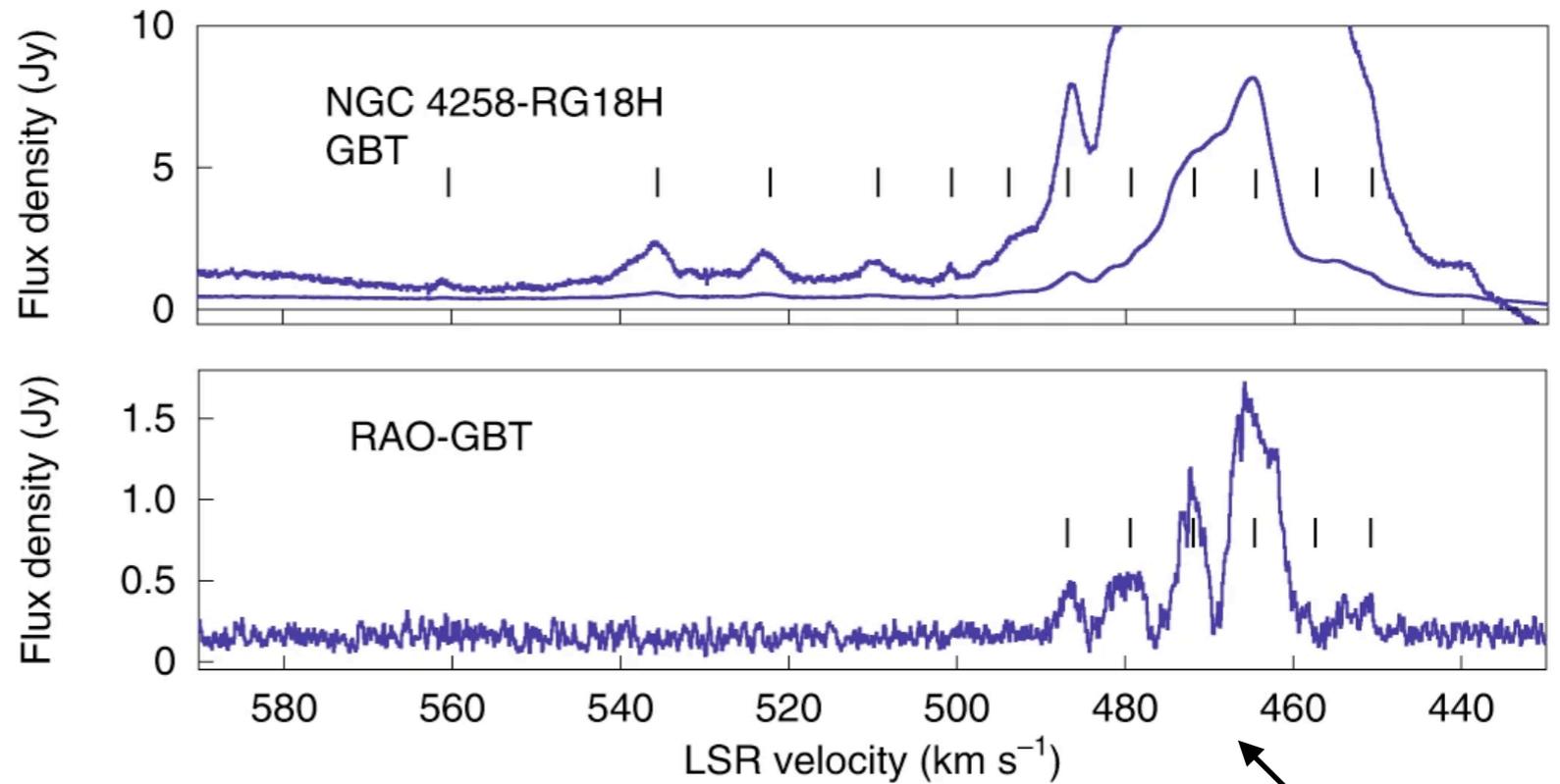
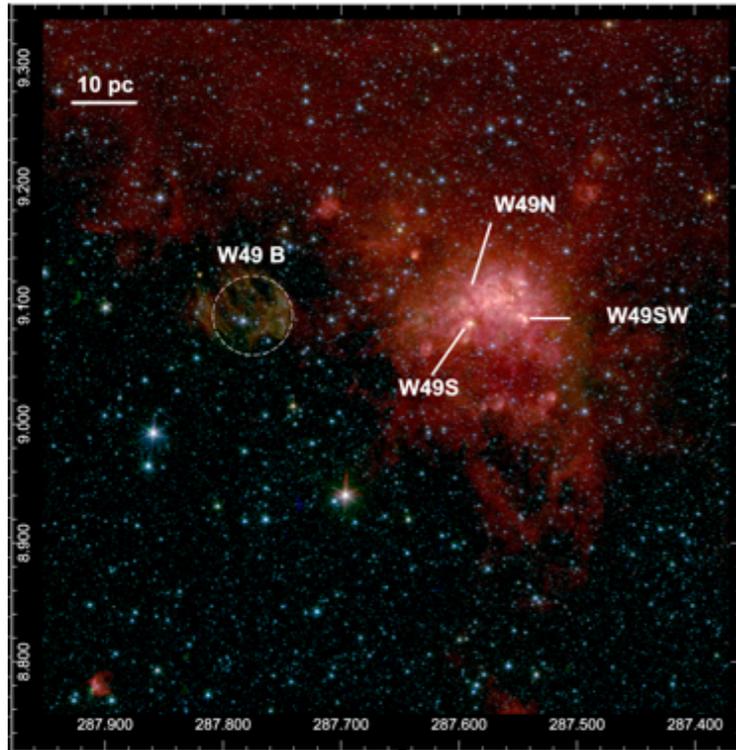


фото: NASA

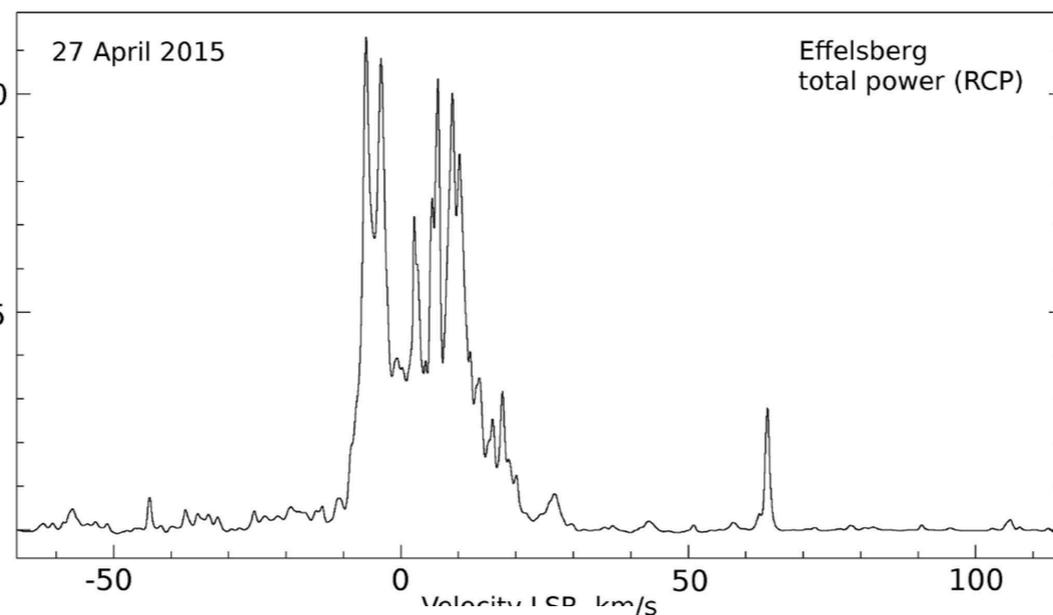
Вода обнаружена в МЗС и дальней Вселенной

Мазерное излучение воды позволяет изучать процесс звездообразования

Vaan+, 22



Cheung+, 69



Shakhvorostova+, 20



см. доклад Шахворостовой Н. Н!

Исследования воды на Herschel

Основные результаты программы WISH

“Water in star-forming regions”

- Вода — один из главных охладителей МЗС
- Яркие линии образуются в теплом и плотном газе вблизи протозвезд (100-1000 а.е.)
- Вода в основном формируется в течение холодной протозвездной стадии
- “Горячая” вода уходит в МЗС, “холодная” остается в дисках и участвует в образовании планетных систем

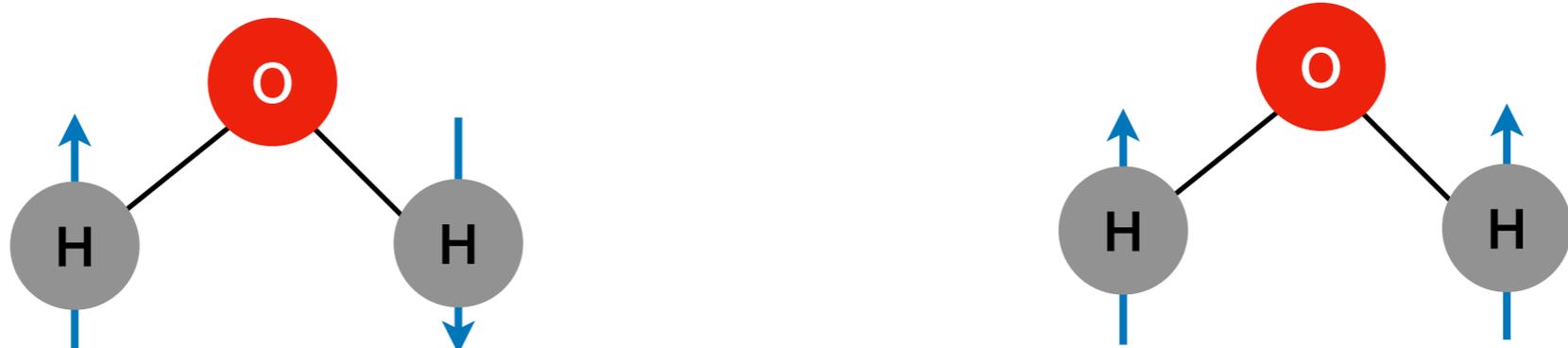
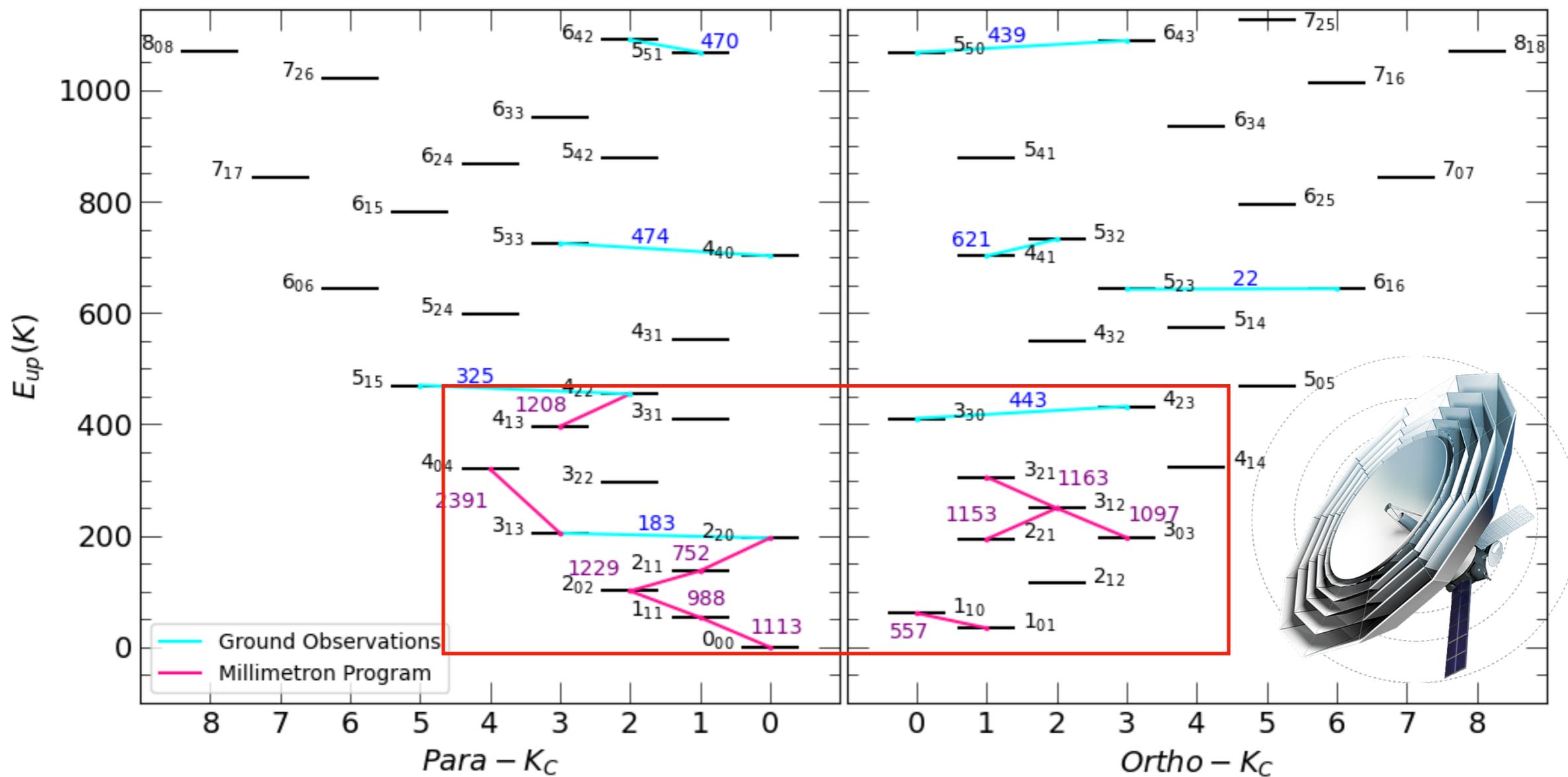


Нерешенные вопросы

- **Пути образования воды в условиях МЗС.** Вода в ледяных мантиях пылинок — основной резервуар кислорода? Каков вклад газофазных реакций синтеза?
- **Содержание воды в космических объектах.** Проблема дефицита кислорода и недостаток воды в областях звездообразования.
- **Перенос воды между космическими объектами.** Как вода попадает из мантий пылинок в газ? Особенности десорбции мантий.
- **Роль комет в происхождении воды на Земле.** Наследуют ли кометы воду с периферии протозвездных облаков/дисков?

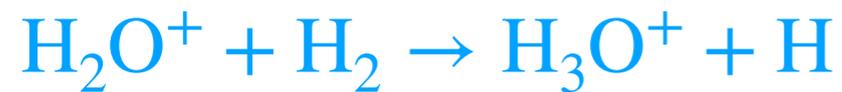
Схема энергетических уровней молекулы воды

Переходы, доступные “Миллиметру” – переходы в основном состоянии и не только



Образование воды в условиях МЗС

В газовой фазе



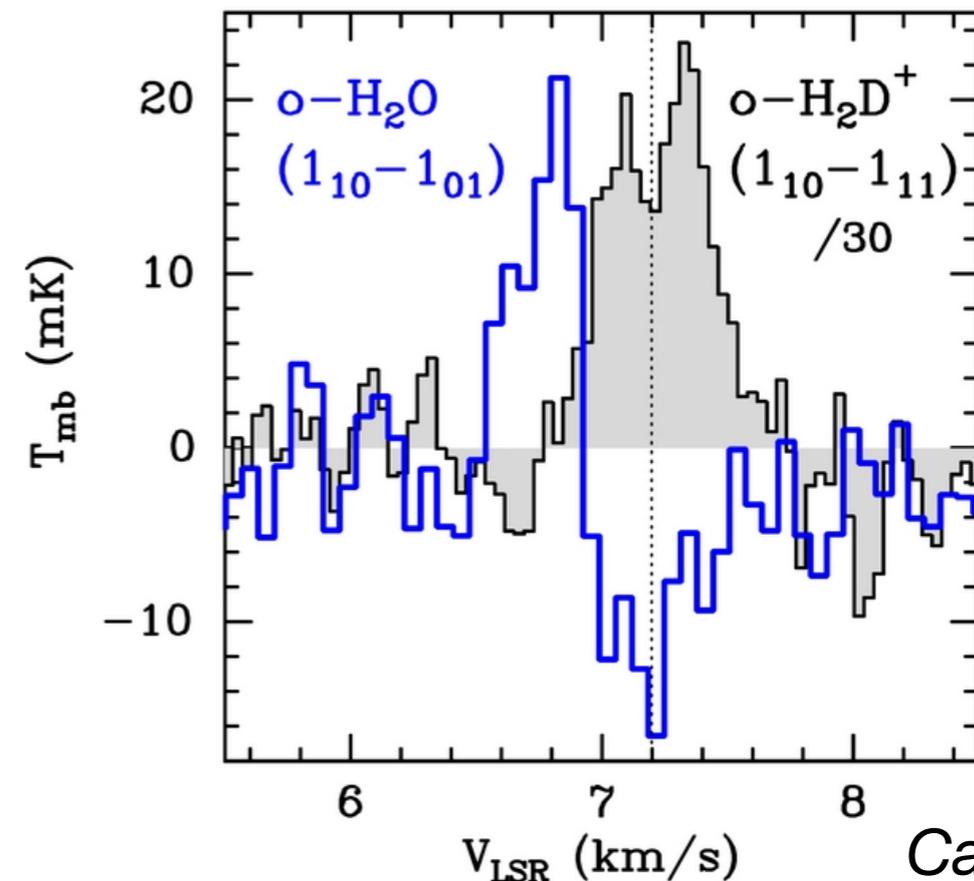
Однако, газофазные реакции не объясняют содержание воды даже в дозвездных ядрах!

L1544 $1.5 \cdot 10^{-6} M_{\odot}$

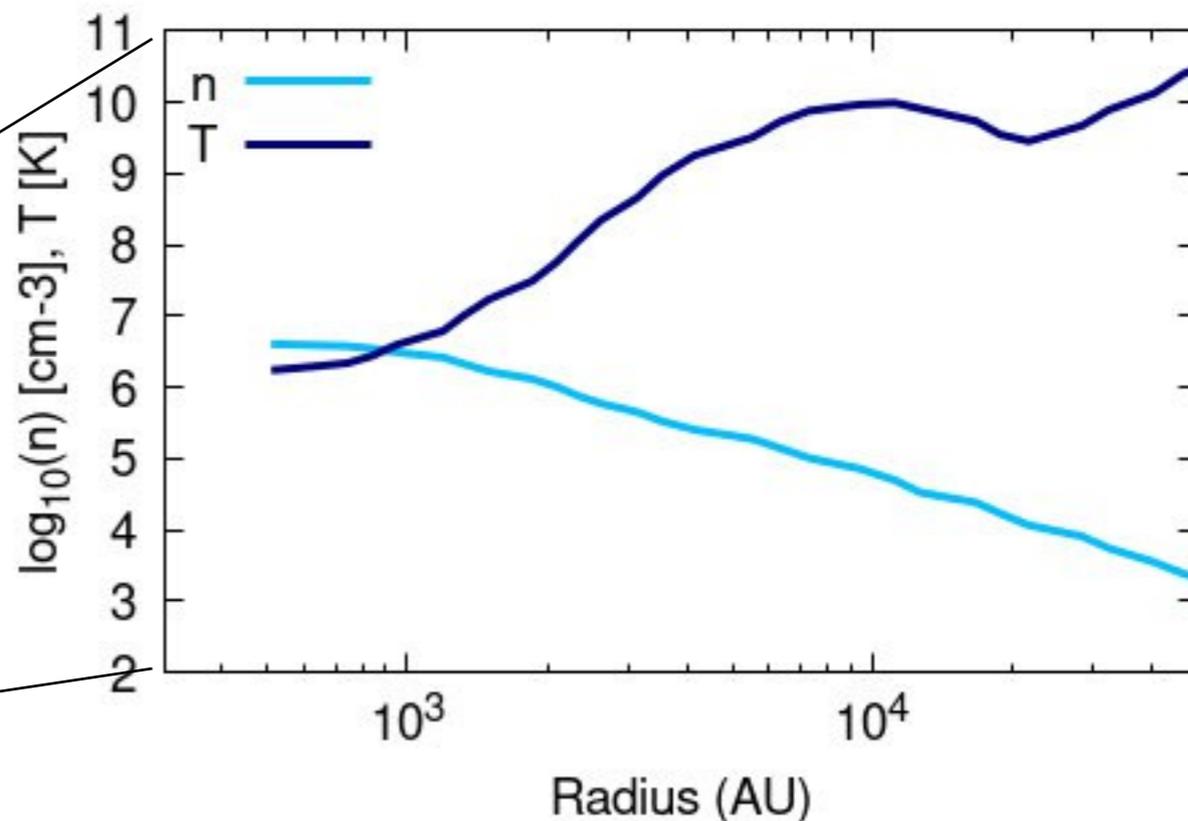
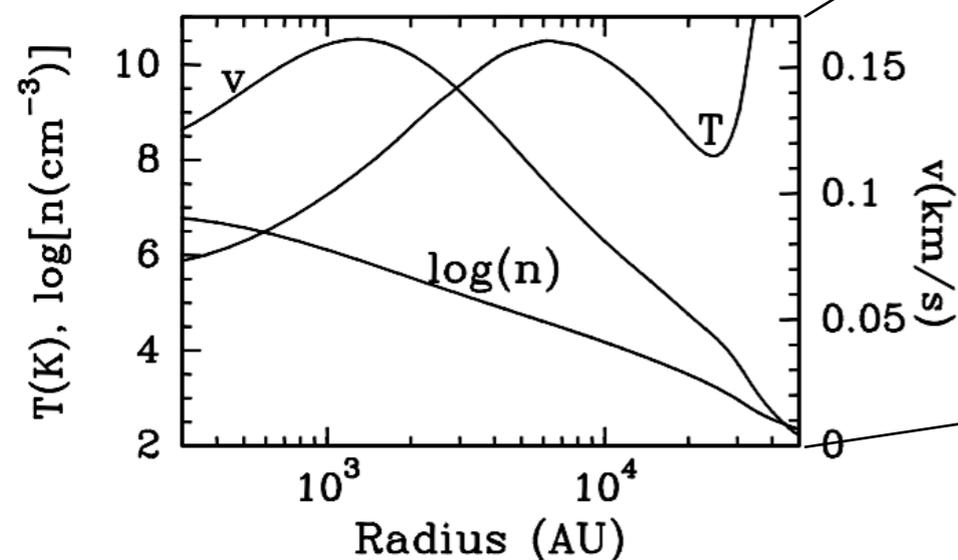
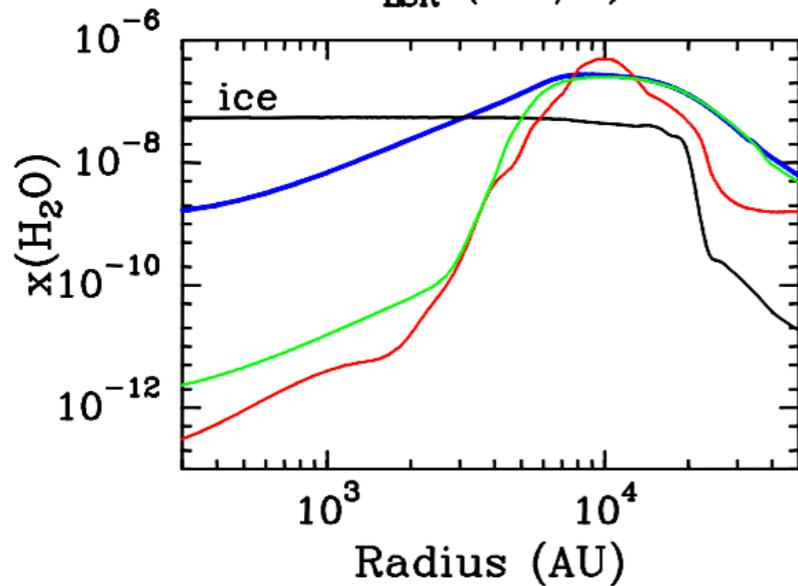
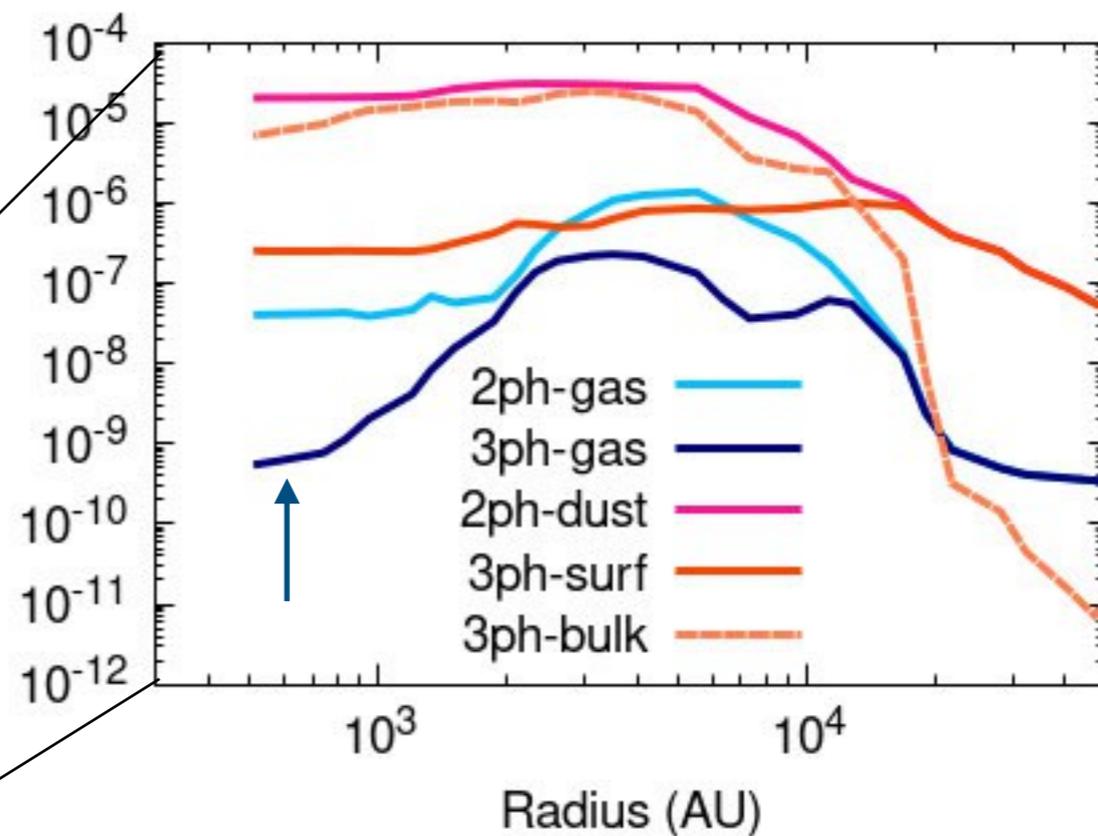
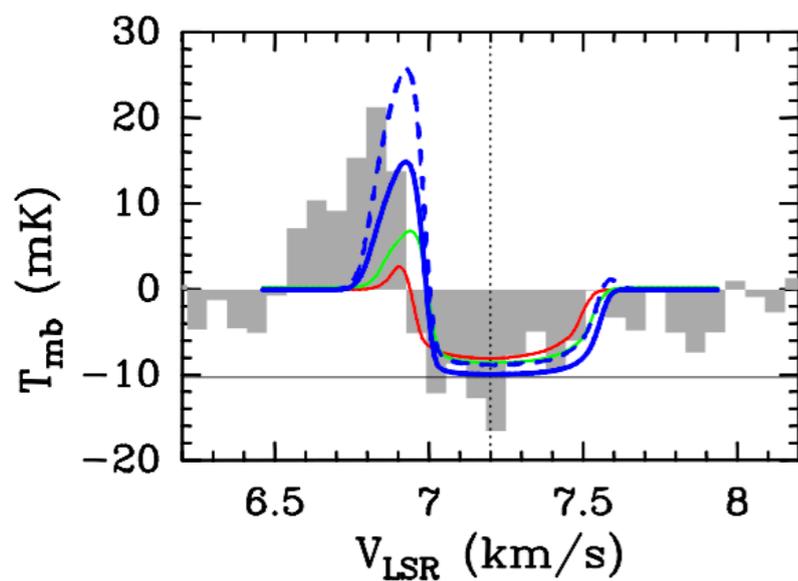
На поверхности пыли



- Нет барьера активации
- Избыточная энергия реакции поглощается пылинкой



Развитие моделей образования воды

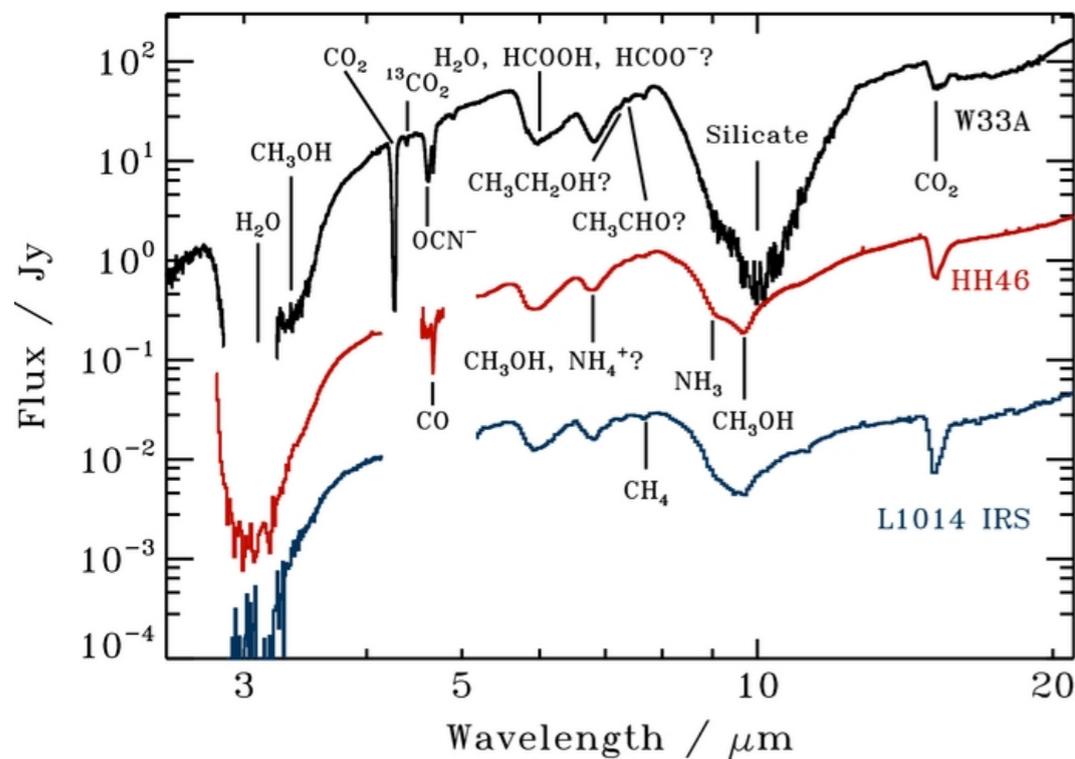


Проблема дефицита кислорода

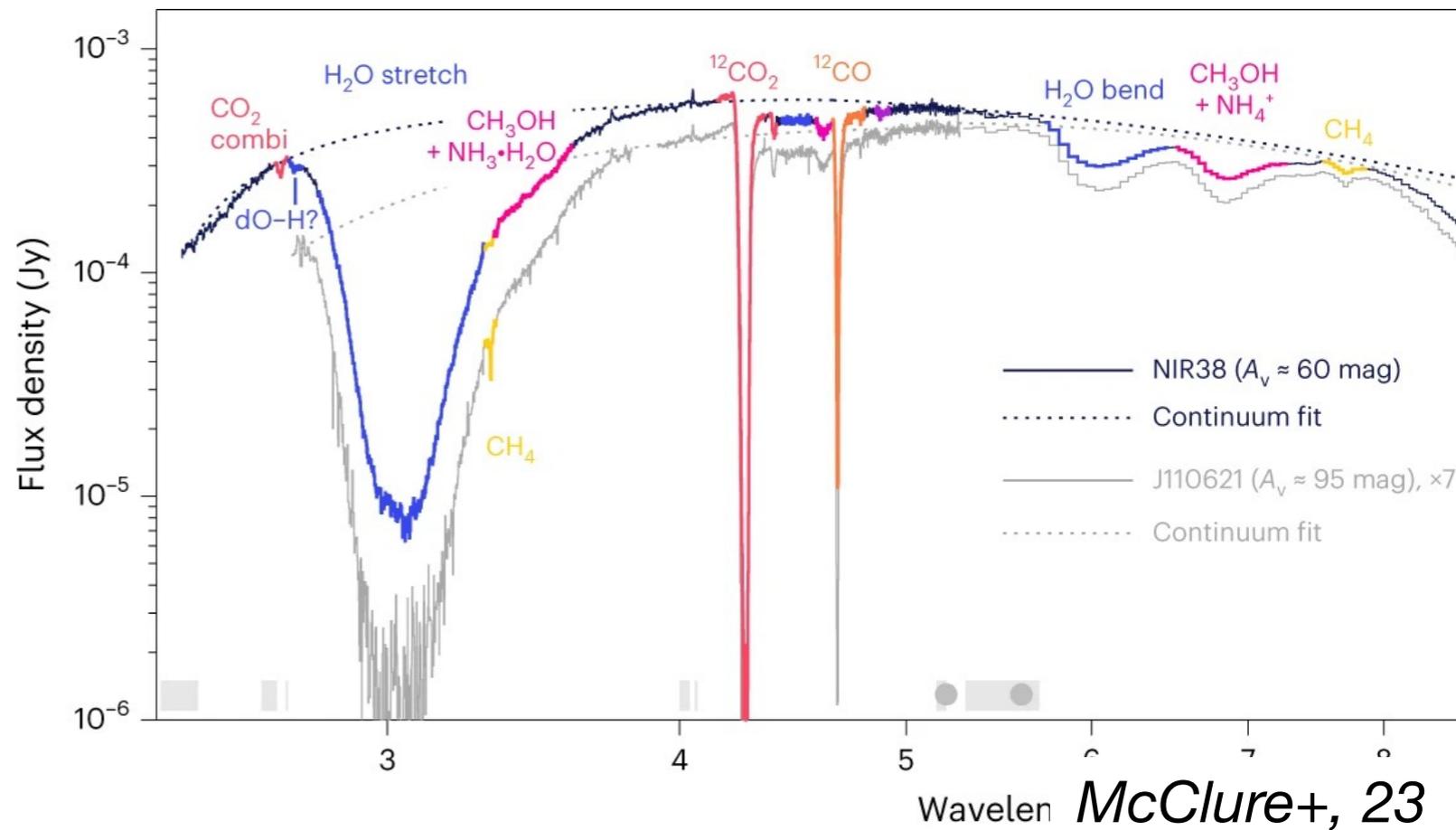
Возможно, кислород находится в ледяных мантиях пылинок?

- $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{H}) \approx 2 \cdot 10^{-4}$ — если вода в мантиях — это основной резервуар кислорода
- $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{H}) \approx 5 \cdot 10^{-5}$ — в мантиях в направлении на области звездообразования

Oberg+, 11



Oberg+, 11



McClure+, 23

Недостаток воды в космических объектах

| | | |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------|
| $10^{-7} - 10^{-6}$ | ОКОЛО ОСТАТКОВ СВЕРХНОВЫХ | <i>Rho+, 16</i> |
| $5 \cdot 10^{-8}$ | диффузные облака | <i>Flagey+, 13</i> |
| $\geq 1.4 \cdot 10^{-10}$ | ДОВЗВЕЗДНЫЕ ЯДРА | <i>Caselli+, 12</i> |
| $10^{-7} - 10^{-5}$ | ВОКРУГ ПРОТОЗВЕЗД | <i>van Dishoeck+, 21</i> |
| $1.4 \cdot 10^{-4}$ | W43-MM1 | <i>Herpin+, 16</i> |
| 10^{-4} | W3 IRS5 | Chavarria+, 10 |

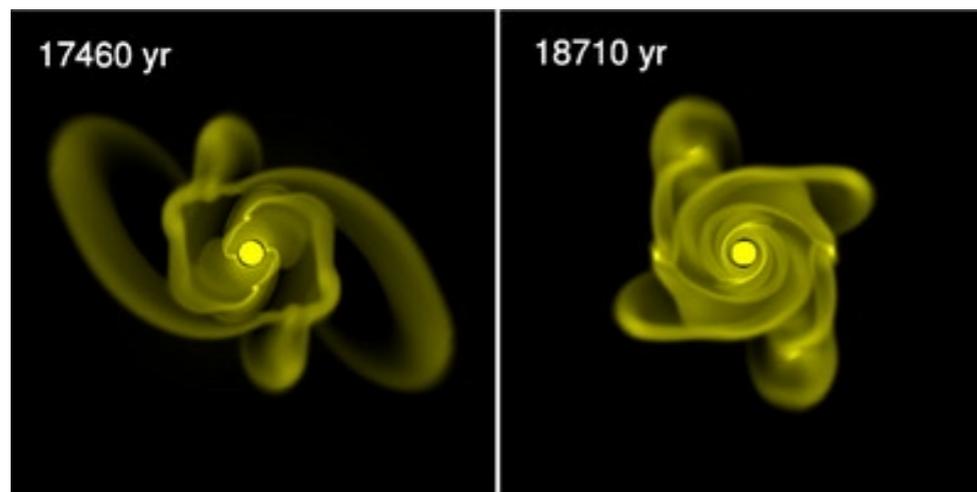
Недостаток воды в протозвездных оболочках

Эпизодический характер аккреции на протозвезду

- Рост T — испарение части мантии — вода переходит в газовую фазу
- Уменьшение T — синтез воды на пыли возобновляется только через некоторое время

Короткая протозвездная стадия

- За 10^6 лет вода успеет образоваться в мантиях в кол-ве $\sim 10^{-4}$
- за 10^5 лет — не успеет и кислород остается в газовой фазе в виде CO, H₂CO, CO₂, CH₃OH



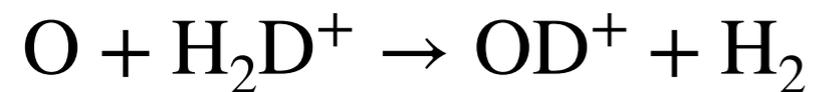
Соотношения изотопологов H₂O/HDO/D₂O

Фракционирование дейтерия — возможность исследовать пути образования воды

газ



$$\Delta E/k = 230 \text{ K}$$



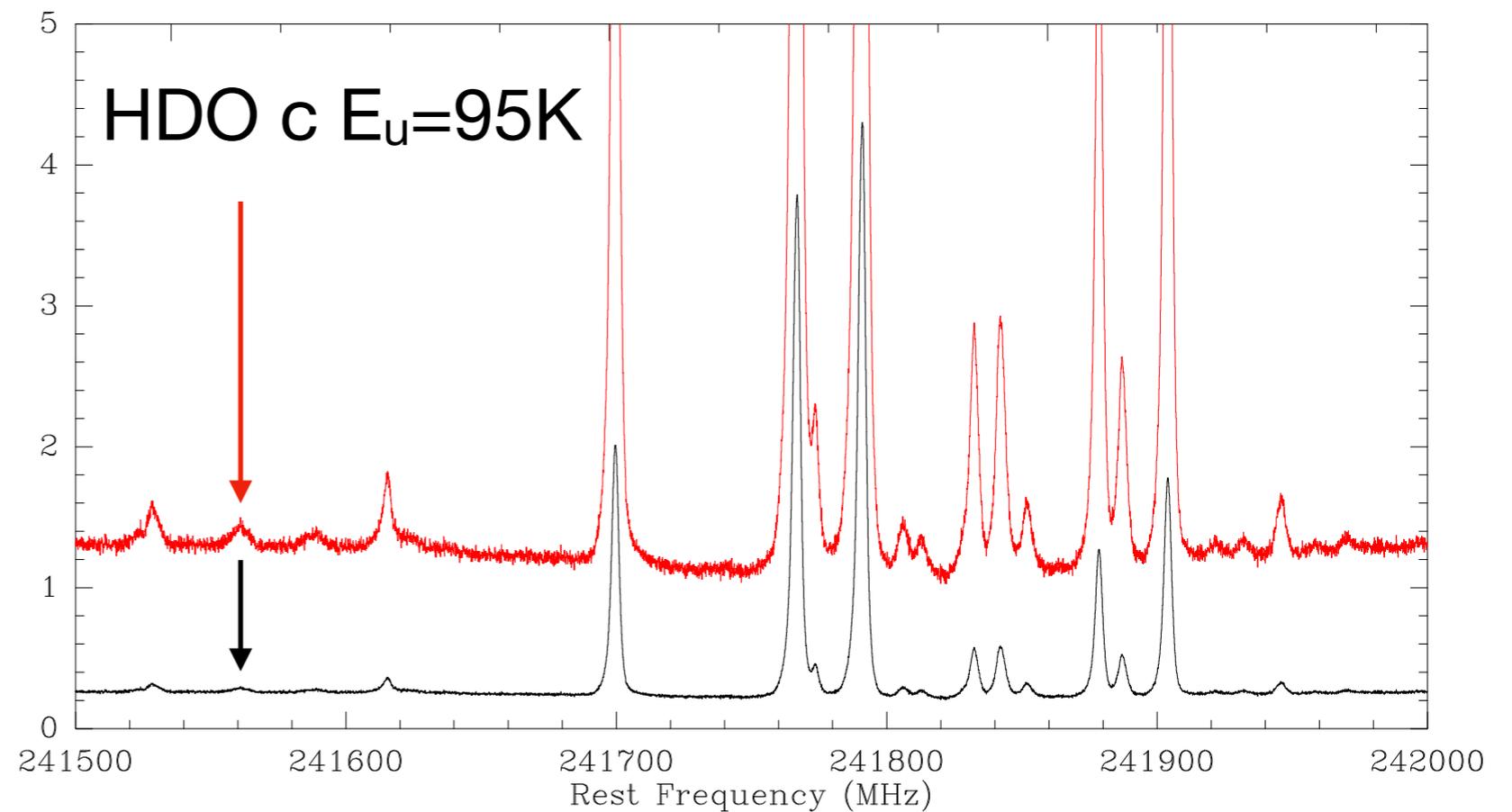
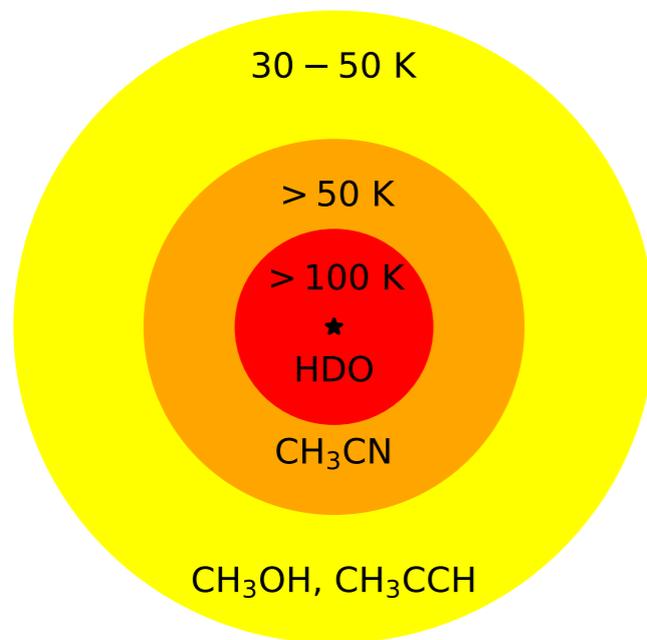
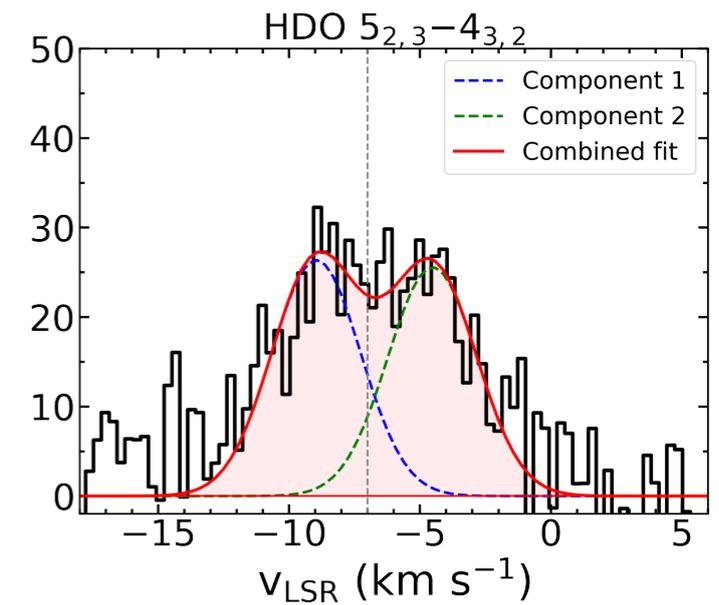
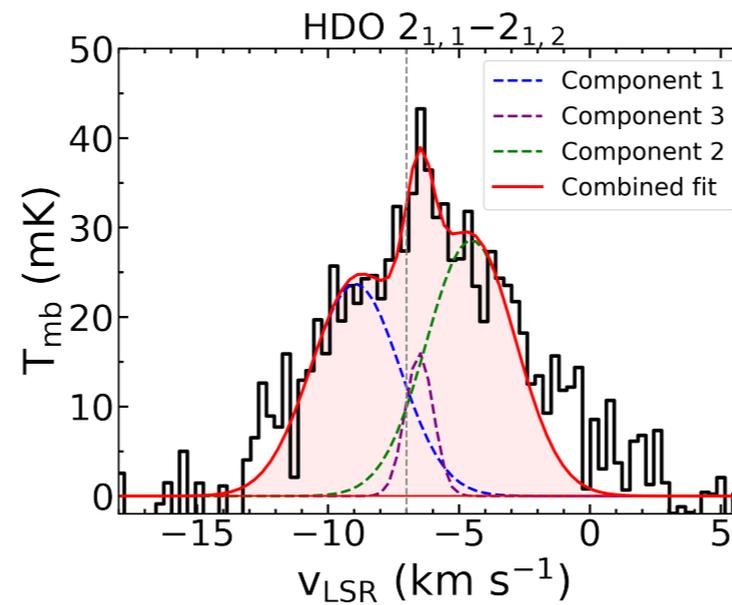
и так далее...

пыль

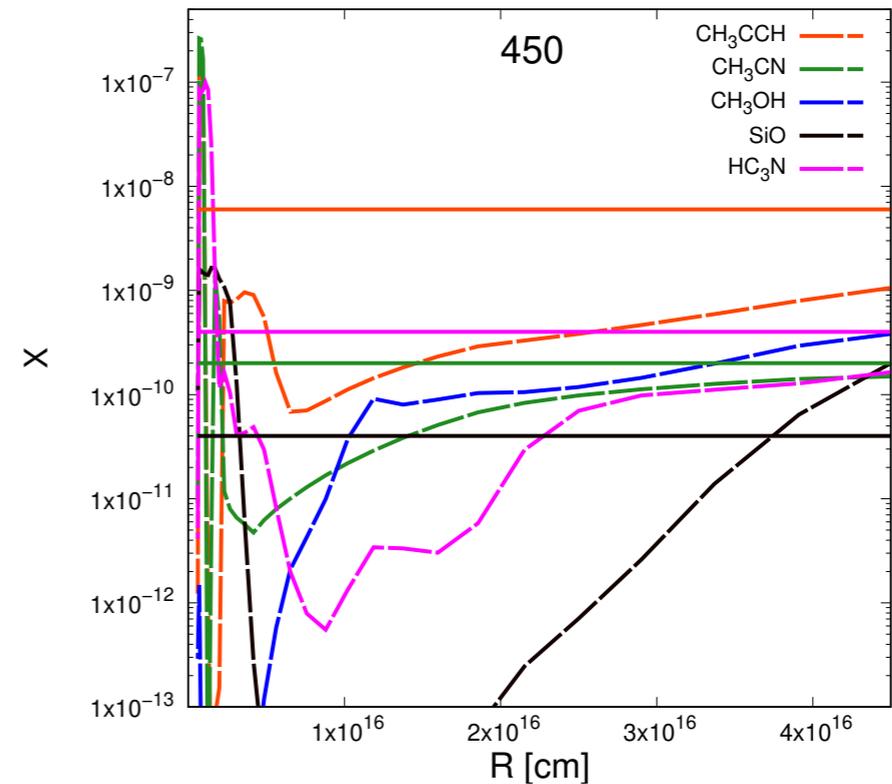
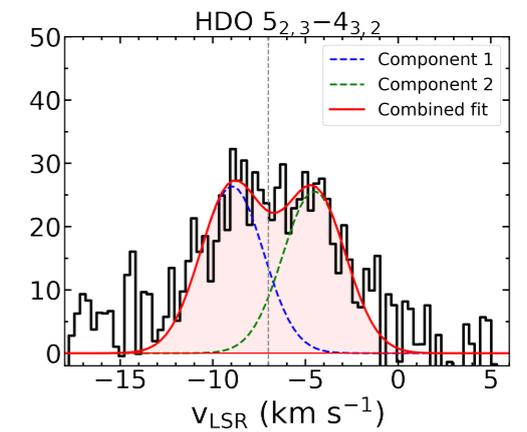
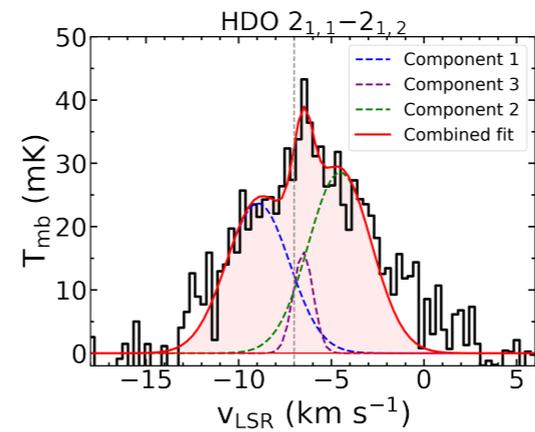
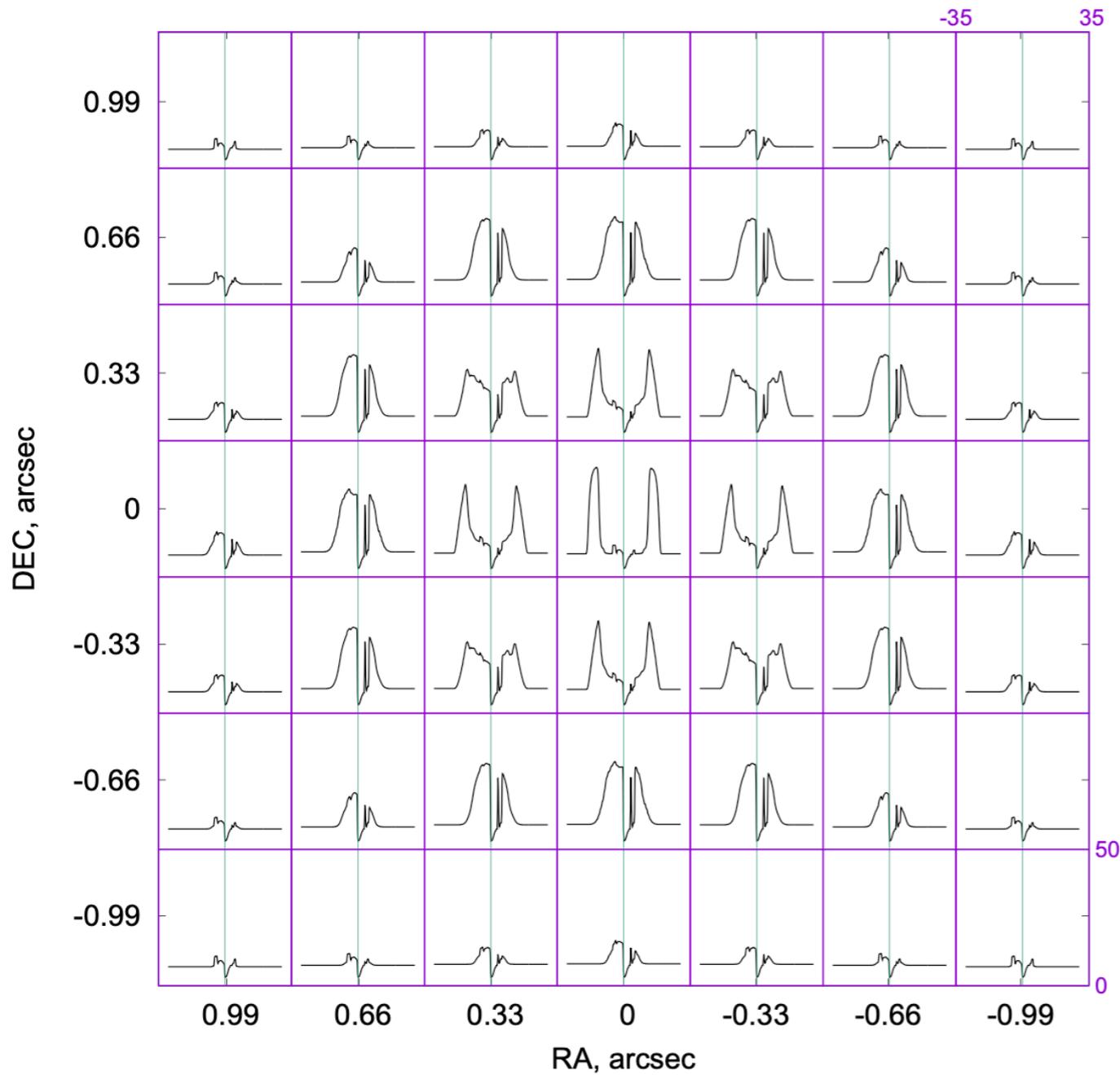


$$\frac{\text{HDO}}{\text{H}_2\text{O}} > \frac{\text{D}}{\text{H}}_{\text{ISM}} \quad \frac{\text{D}}{\text{H}}_{\text{ISM}} = 2 \cdot 10^{-5}$$

Исследование содержания HDO



Химико-динамические модели протозвезд

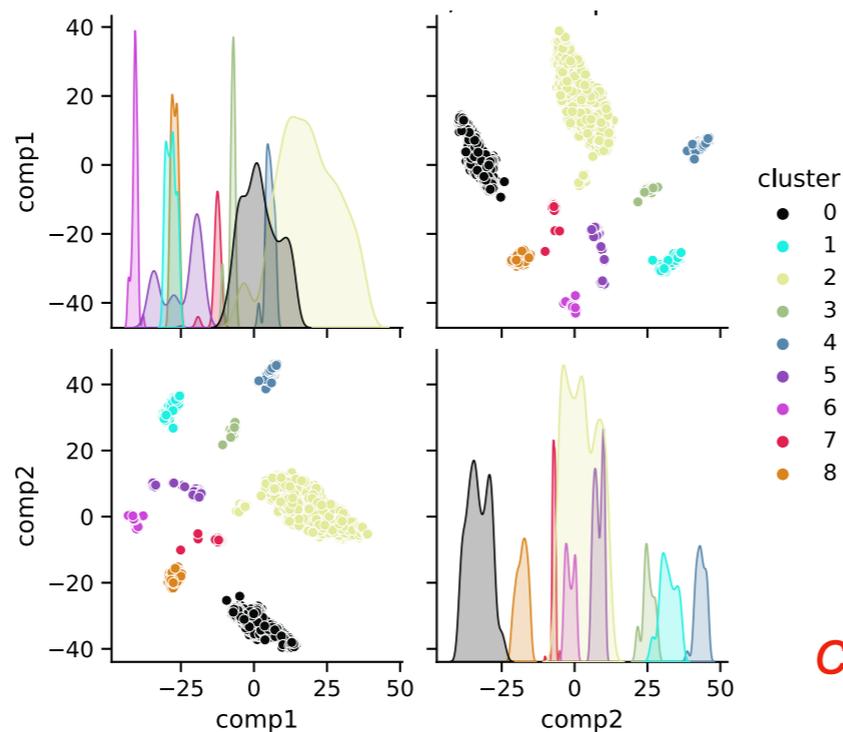
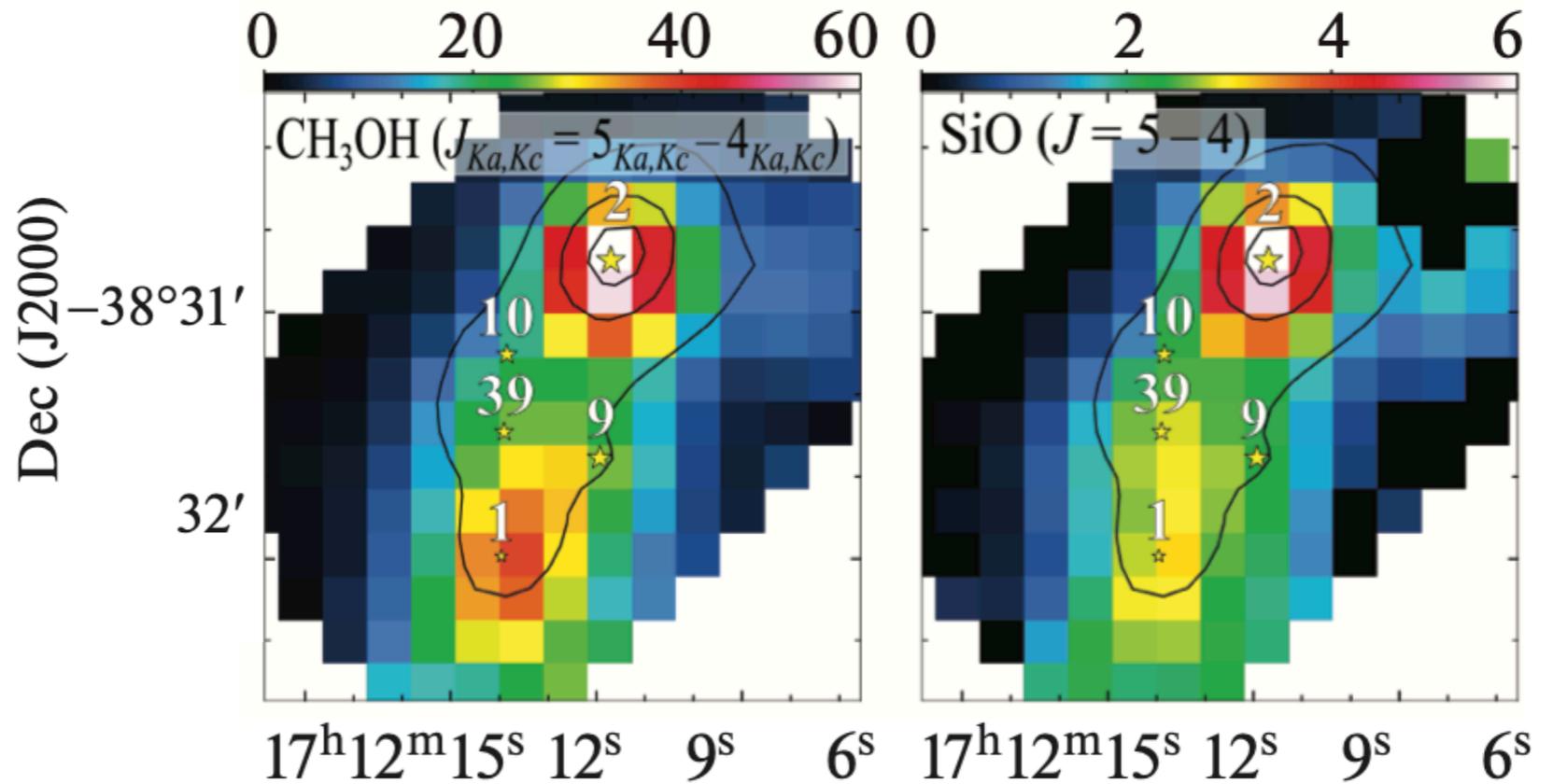
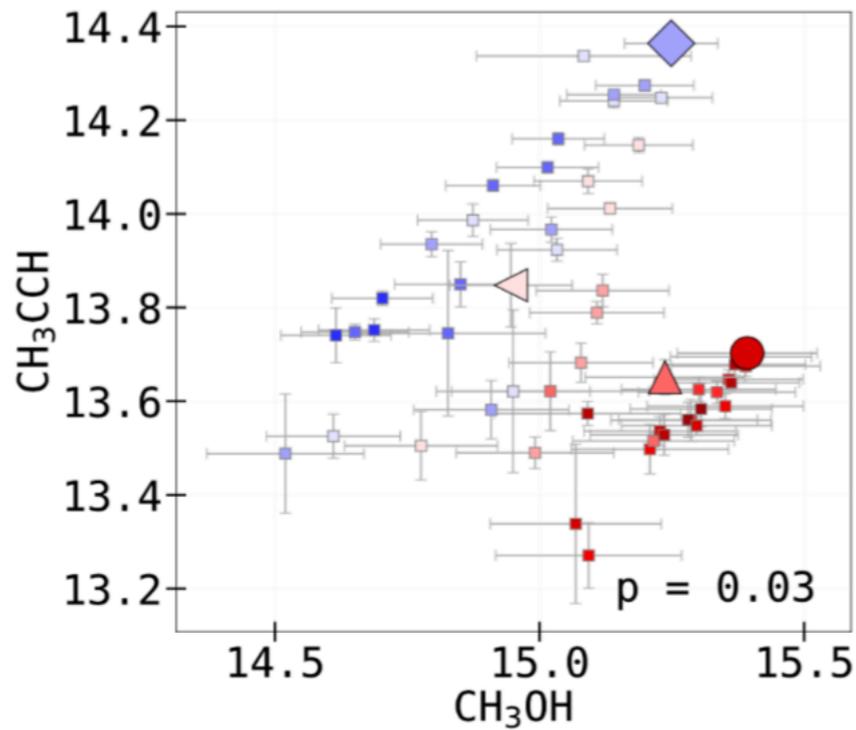


Кирсанова+, 25

Плаkitина+, 25

Kirsanova & Farafontova, submitted

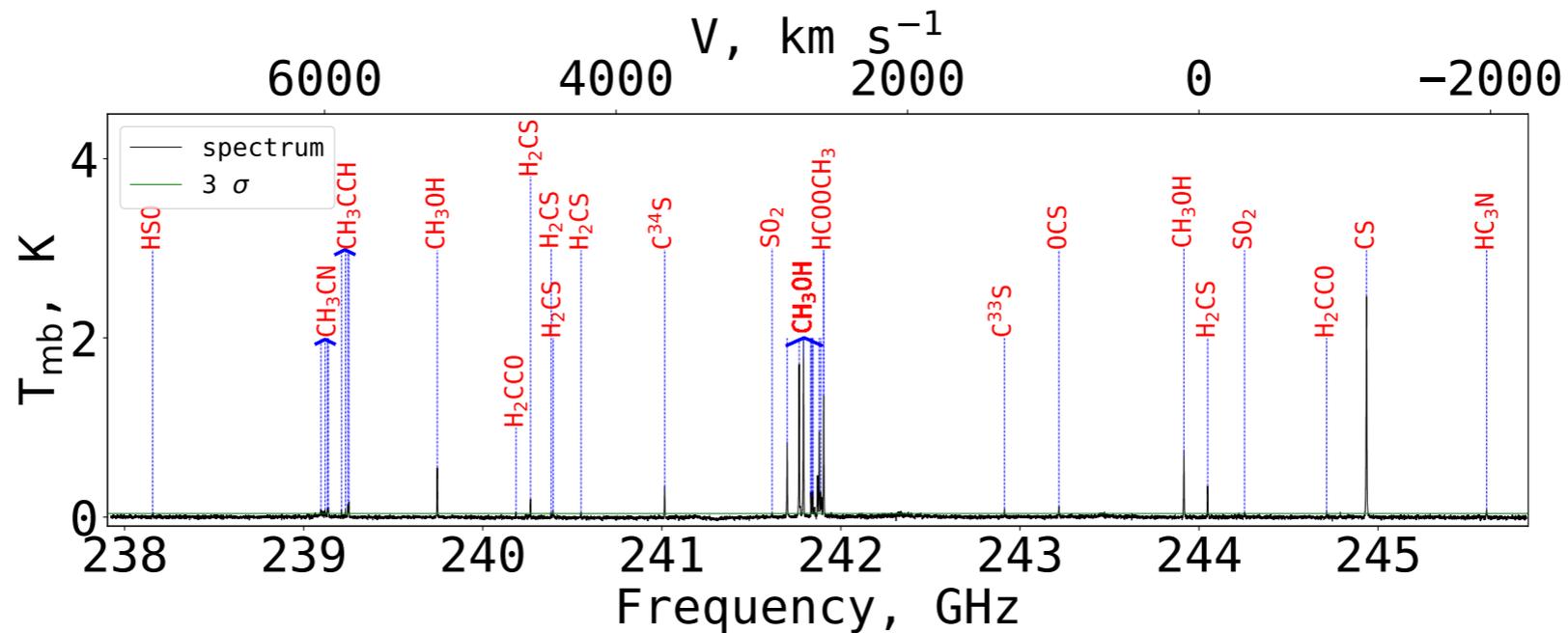
Кислородсодержащие молекулы в оболочках протозвезд



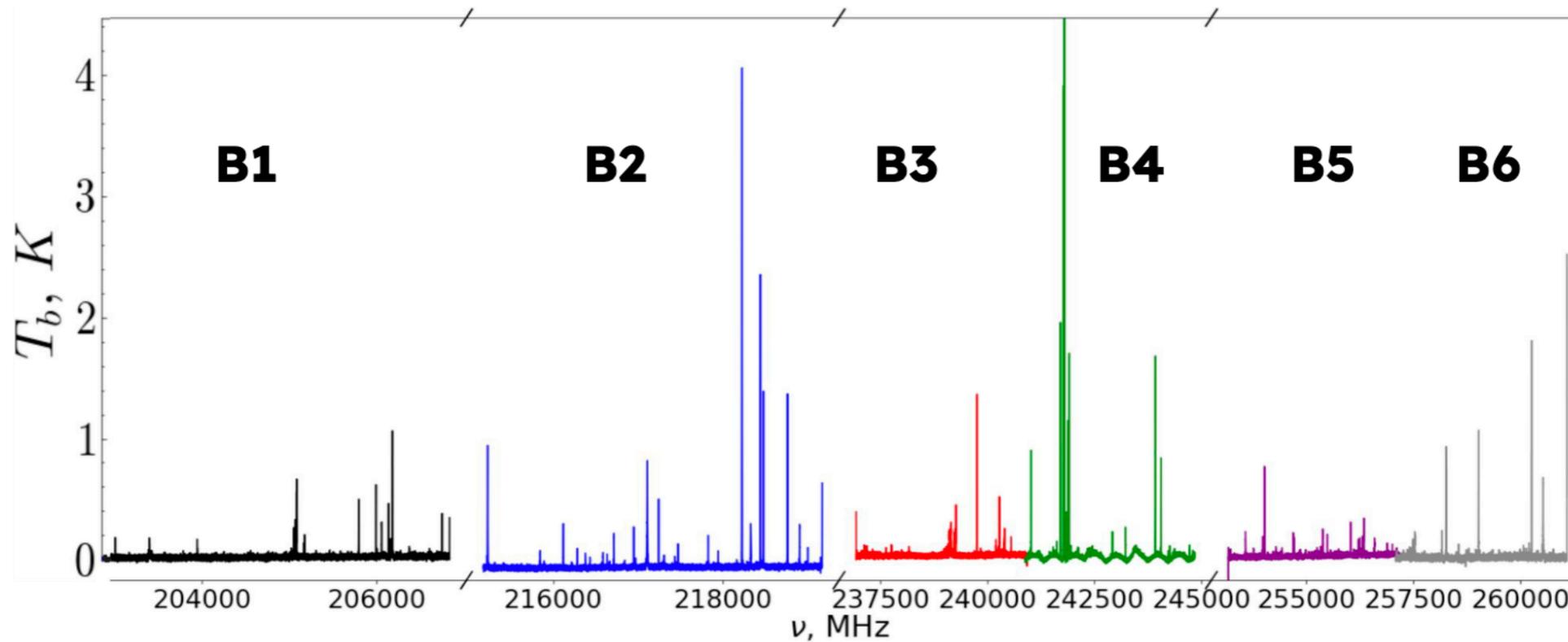
Плакитина+, 24
Плакитина+, 25

см. доклад Плакатной К. В. во вторник!

Кислородсодержащие молекулы в оболочках протозвезд



Плаkitина+, 25



см. доклад Фарафоновой А. А. во вторник!

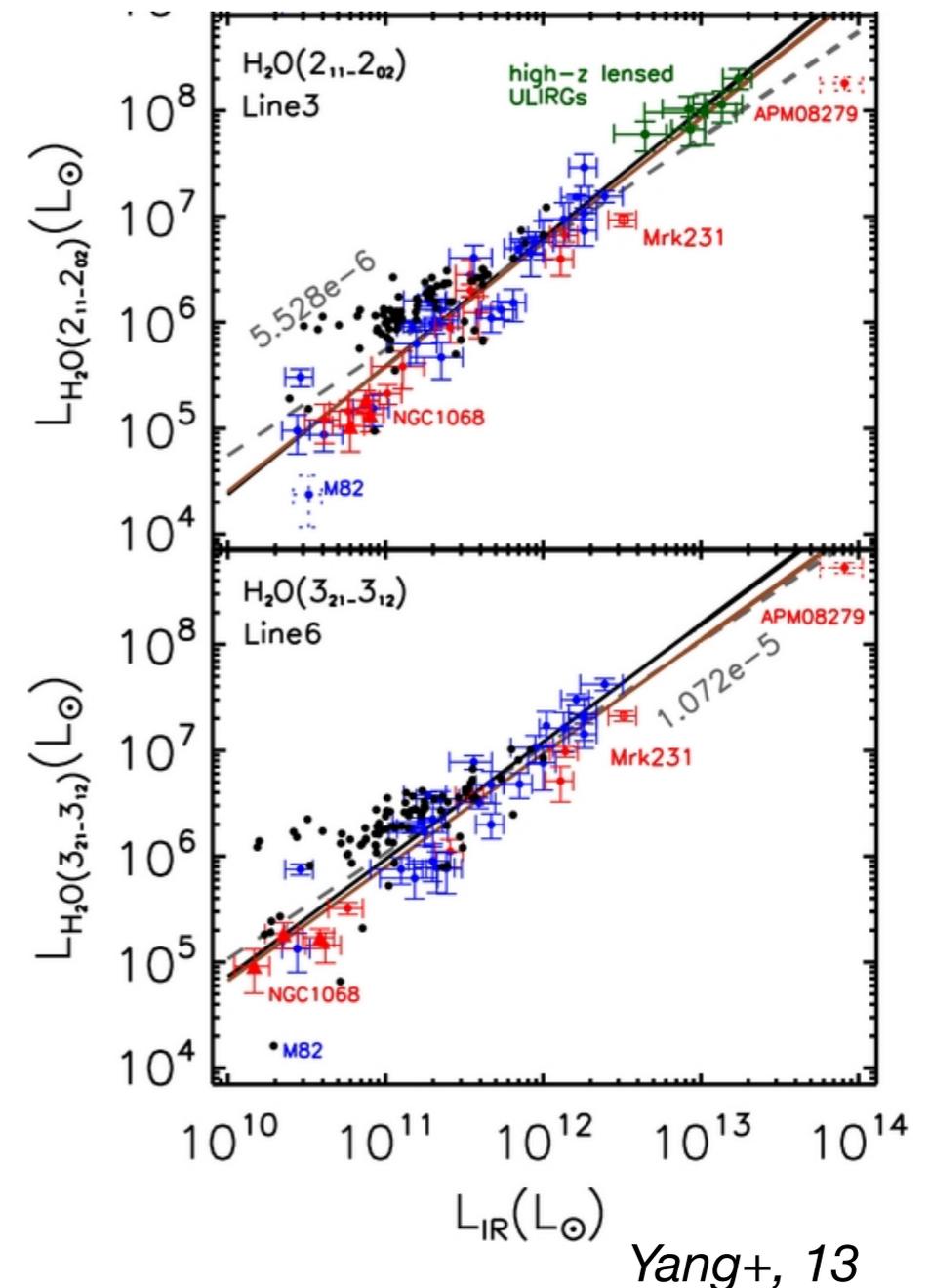
Вода в галактиках

Линии воды – надежный индикатор темпа звездообразования

- Индикаторы звездообразования в УФ, оптике, ИК: $H\alpha$, CII и др. – ненадежны
- поглощение пылью
- L_{IR} (8-1000 мкм) – наилучший вариант, т.к. все УФ и оптическое излучение переизлучается пылью
- $SFR[M_{\odot}yr^{-1}] \approx 1.47 \times 10^{-10} L_{IR}[L_{\odot}]$
Kennicutt+, 12
- получить распределение энергии в спектре трудно

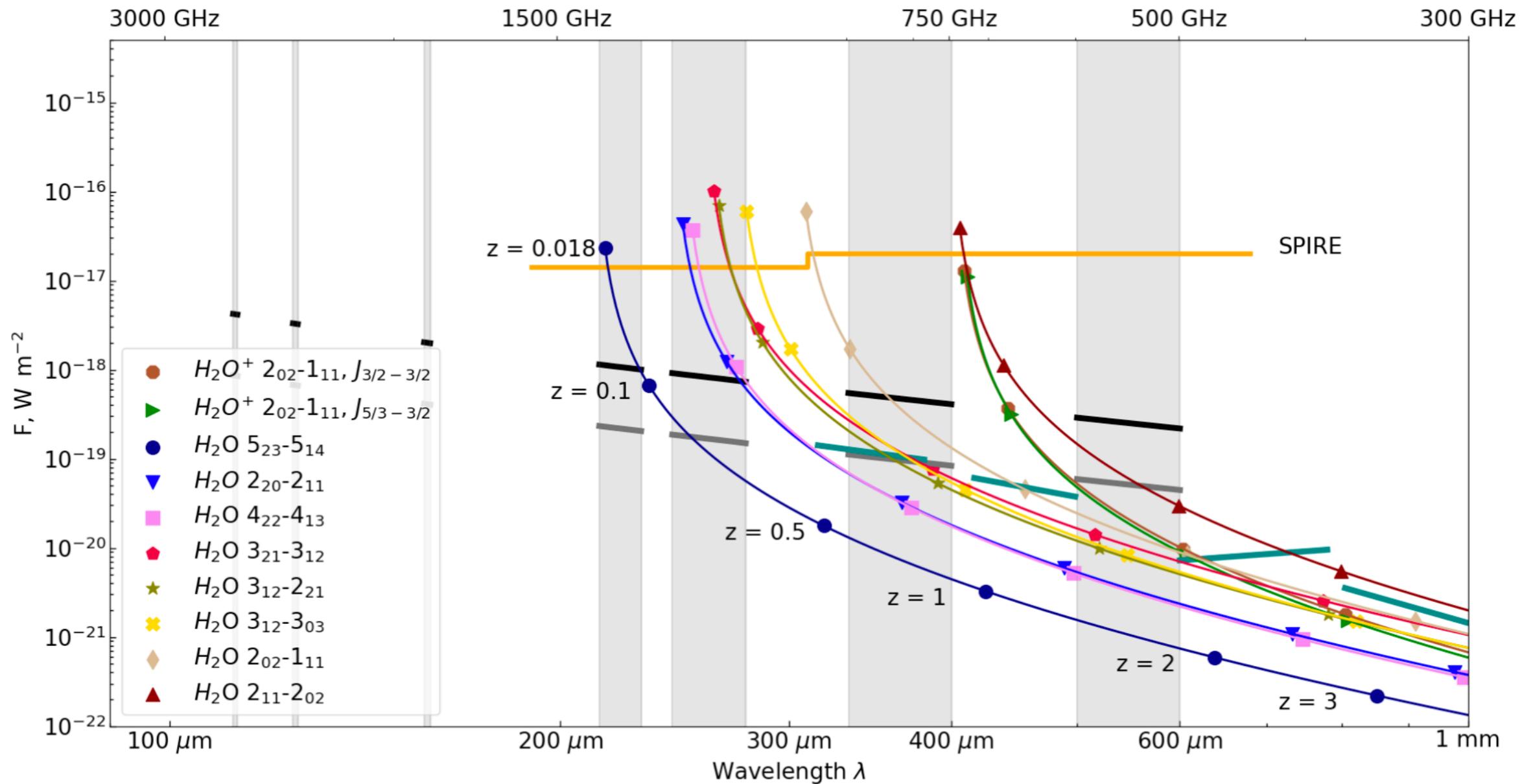
$$\log L_{H_2O} = \alpha \log L_{IR} + \beta$$

Не зависит от активного ядра



Вода в областях экстремально высокого звездообразования

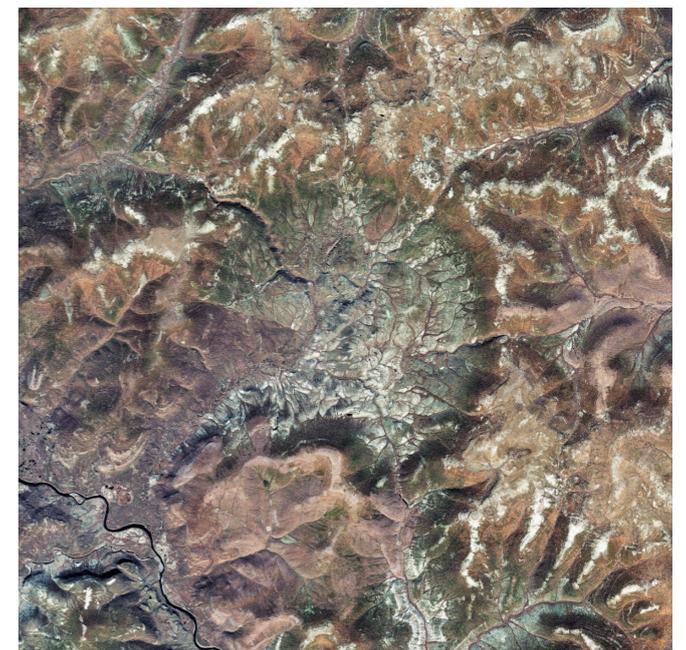
Ультраяркие ИК-галактики: звездообразование или активное ядро?



Проблема появления воды на Земле

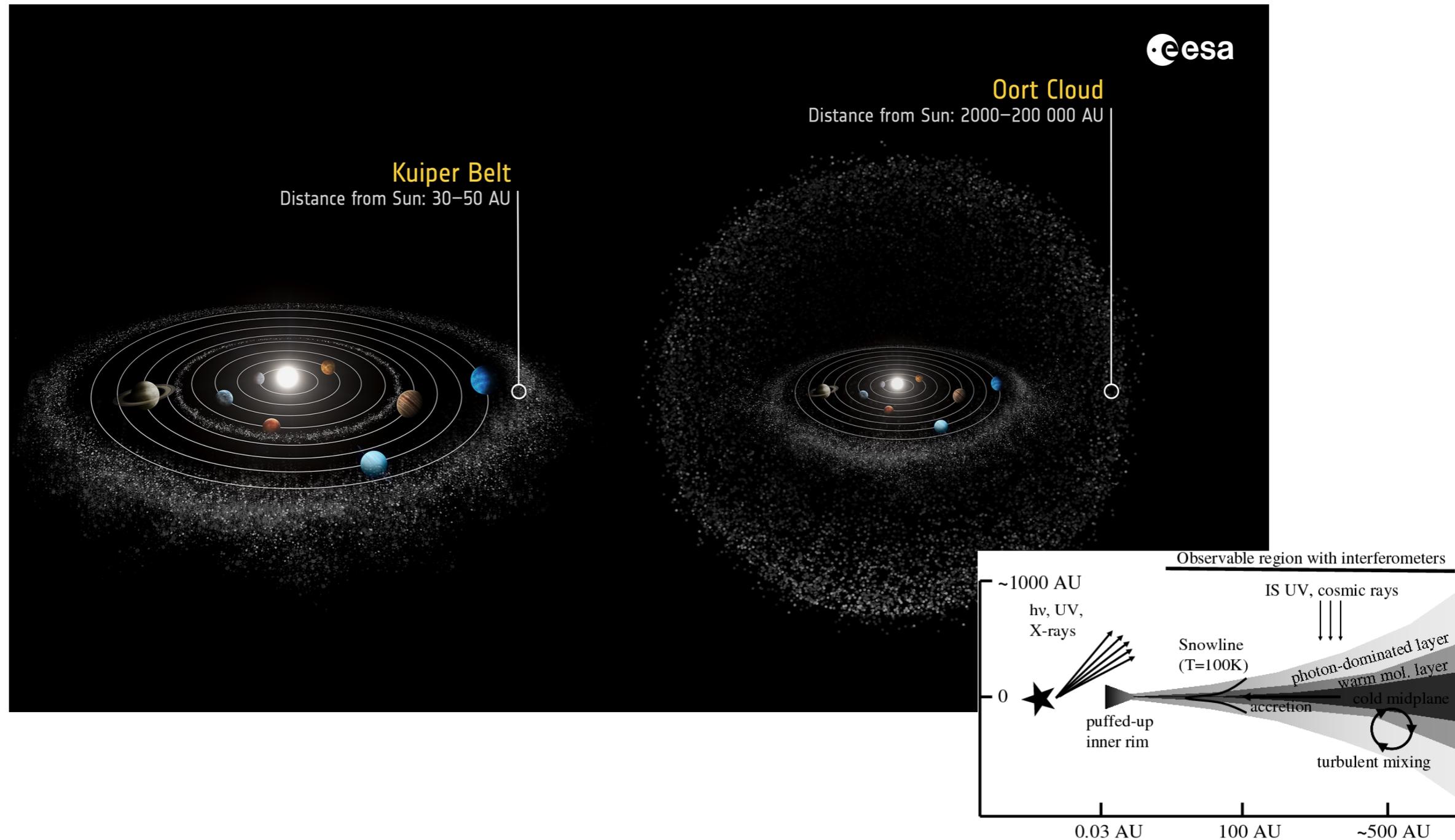
Снеговая линия воды в Солнечной Системе находится между орбитами Марса и Юпитера

- Снеговая линия — граница области протосолнечного диска, в которой вода могла конденсироваться в твердое вещество.
- Возможный источник воды на Земле — кометное-метеоритное вещество, привнесенное в эпоху метеоритной бомбардировки молодой Земли. Предполагается, что из этого вещества могли сформироваться океаны.



Вода в отдаленных частях протопланетных дисков

Область, где выживают молекулы из первичного вещества планетной системы



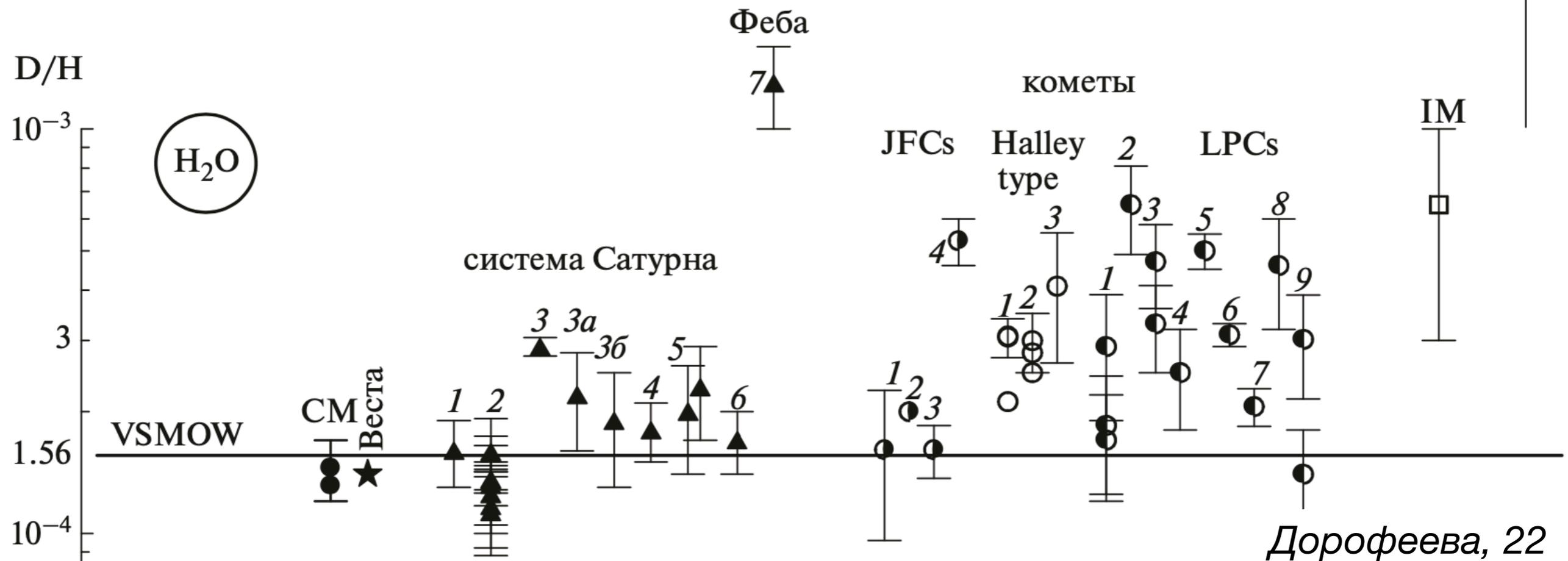
Наблюдений линий воды в дисках мало, так как линии слабые!

Оценка наблюдательного времени для протопланетного диска

| полоса | частота (ГГц) | время (мин) | примечание |
|--------|---|-------------|---------------------|
| M1 | орто-H₂O 556.9 | 36 | основное состояние |
| | орто-H₂¹⁸O 547.7 | 144 | основное состояние |
| | орто-HDO 509.3 | 144 | основное состояние |
| | CO(5-4) 576.3 | 12 | физ. условия |
| M2 | пара-HDO 893.6 | 360 | основное состояние |
| | CO(7-6) 806.7 | 33 | физ. условия |
| | CI 809.3 | 8 | содержание углерода |
| M3 | пара-H₂O 1113.3 | 8 | основное состояние |
| | CO(9-8) 1036.9 | 2 | физ. условия |
| M5 | CI 1900.5 | 16 | содержание углерода |
| M7 | HD 2674 | 100 | масса |

Связь с происхождением воды на Земле

- $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ — маркер местоположения в Солнечной Системе, где образовались те или иные кометы



- Отношение $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ у тел, привнесших воду на Землю по своей природе меньше?
- Высокотемпературная химия привела к уменьшению $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$?

Развитие моделей комет

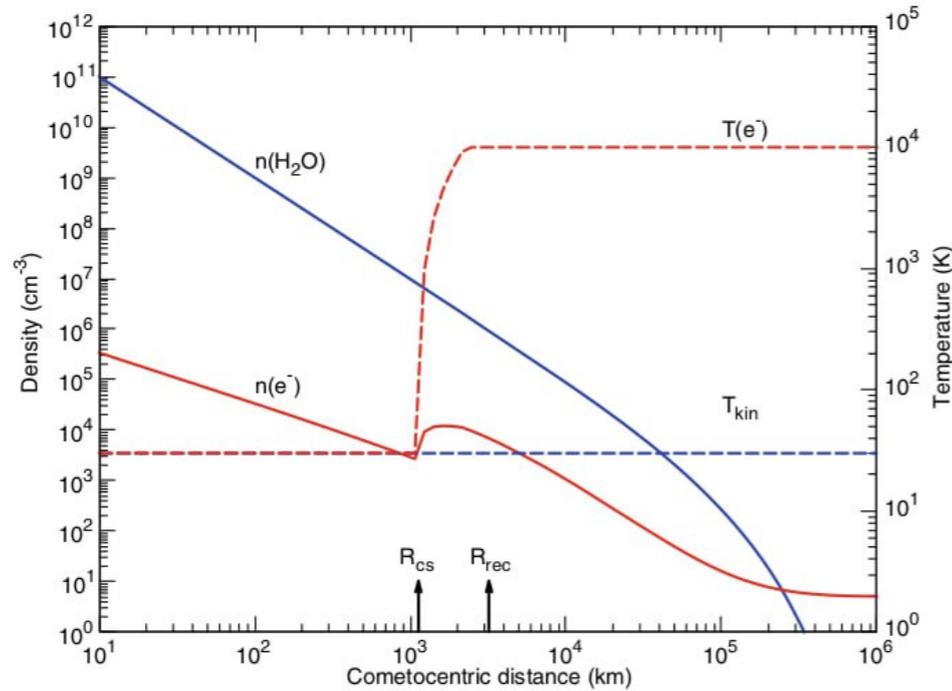
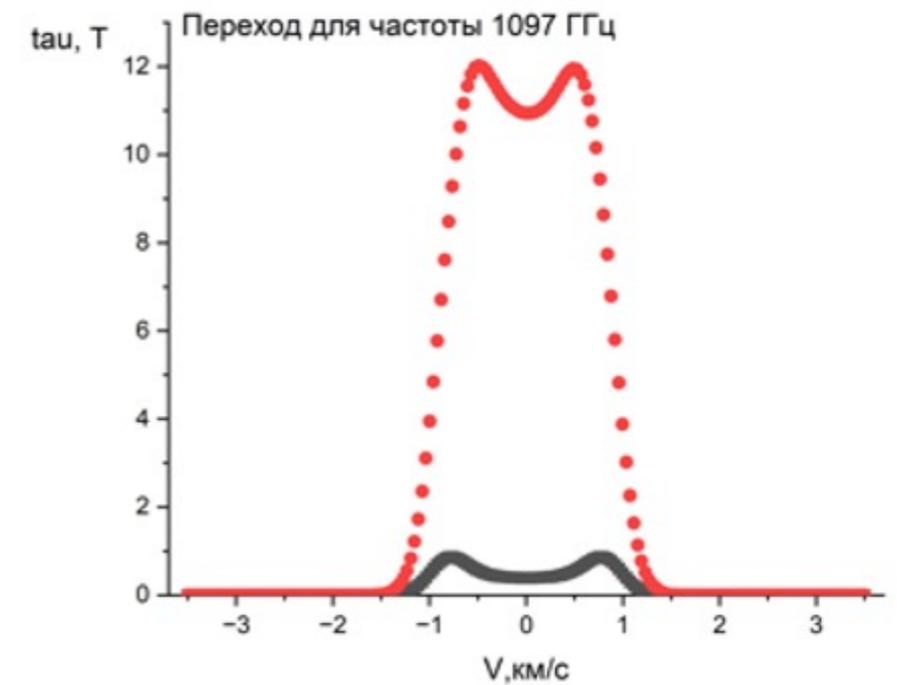
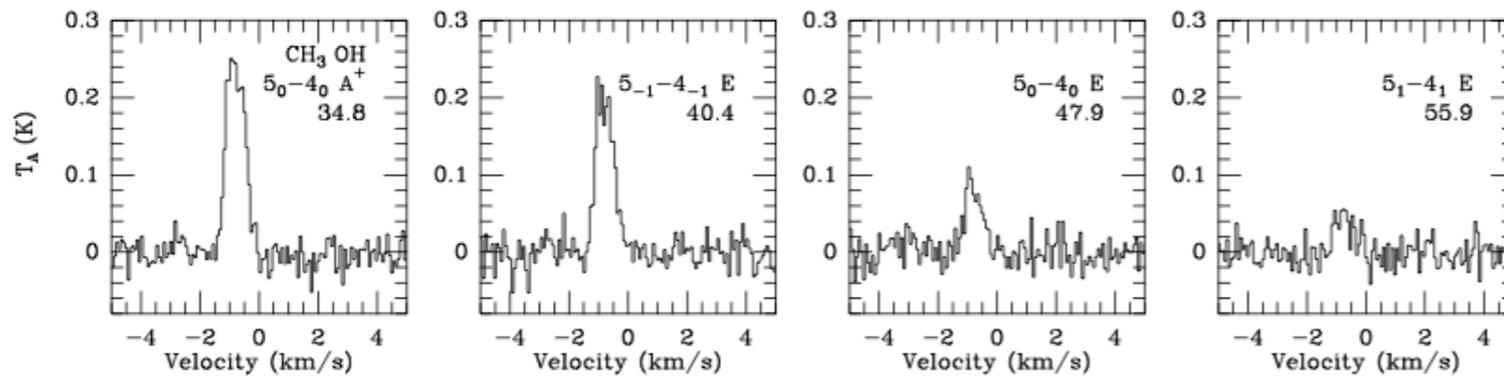
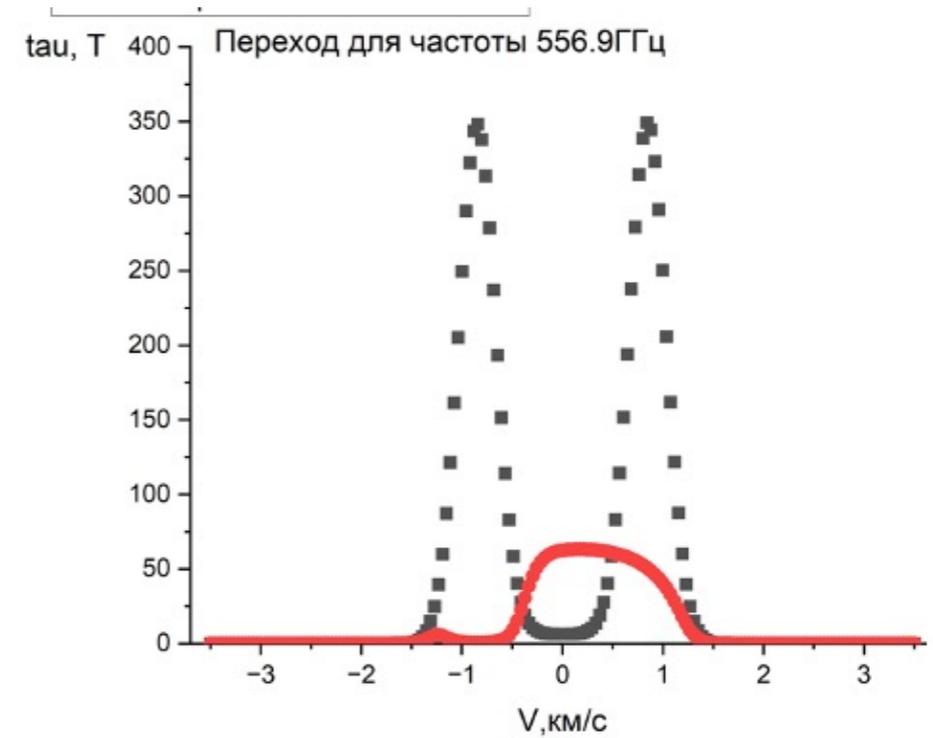


Fig. 1 Evolution of H₂O and electron density and temperature as a function of the nucleocentric distance for $Q_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{29} \text{ s}^{-1}$. The scaling factor x_{n_e} is fixed at 1. See text for details

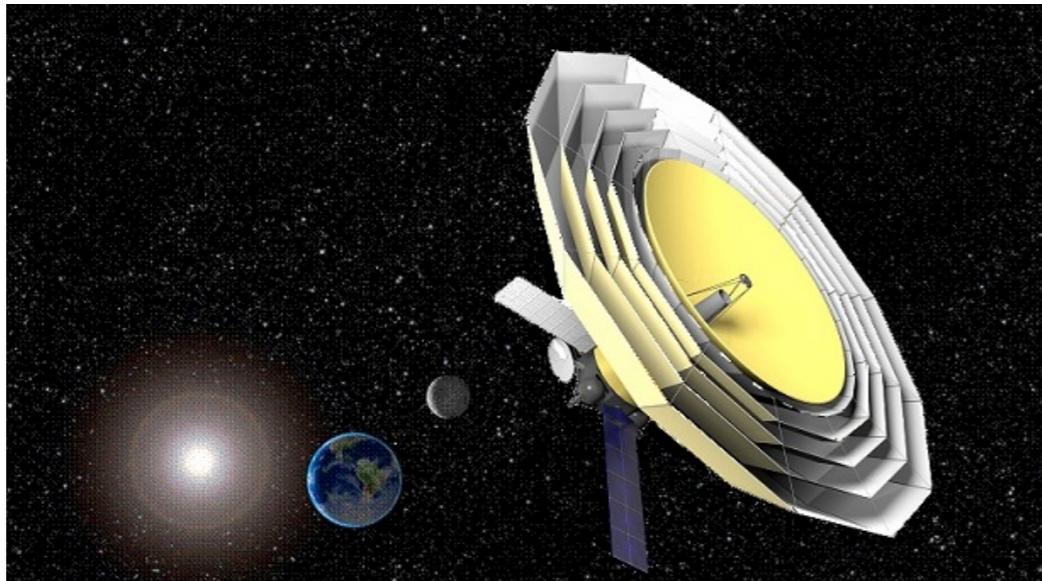
Bensch & Bergin, 04



см. доклад Барановой Е. И. во вторник!

Программа наблюдений на "Миллиметроне"

Статистически-значимые выборки объектов разных типов



Обзоры линий H_2O , HDO , D_2O и других кислородсодержащих молекул в:

- молекулярных облаках
- дисках
- кометах

TABLE I
FREQUENCY RANGES AND MAIN PARAMETERS OF HRS INSTRUMENT
RECEIVERS

| Chanal | Band (GHz) | Pixel | Technology | T_n (K) | Res. (") |
|-----------|-------------|-------|------------|-----------|----------|
| <i>M1</i> | 500–600 | 3 | SIS | 200 | 14 |
| <i>M2</i> | 740–900 | 3 | SIS | 400 | 9 |
| <i>M3</i> | 1080–1230 | 3 | SIS | 1000 | 7 |
| <i>M4</i> | 1300 – 1400 | 7 | HEB | 1000 | 6 |
| <i>M5</i> | 1890 – 1910 | 7 | HEB | 1200 | 4 |
| <i>M6</i> | 2390 – 2410 | 7 | HEB | 1400 | 3 |
| <i>M7</i> | 2660 – 2680 | 7 | HEB | 1400 | 3 |