Фракционирование дейтерия как маркер происхождения молекул воды от ядер галактик до околосолнечной окрестности

М. С. Кирсанова
ИНАСАН

Физика и астрофизика — от фундаментальных констант до гамма-всплесков и космологии, 19/11/2024

работа поддержана грантом РНФ 24-22-00097

PHYSICAL PROCESSES
IN THE INTERSTELLAR
MEDIUM

Lyman SPITZER, Jr.
Princeton University Observatory

A Wiley-Interscience Publication
John Wiley & Sons, New York
Chichester • Brisbane • Toronto

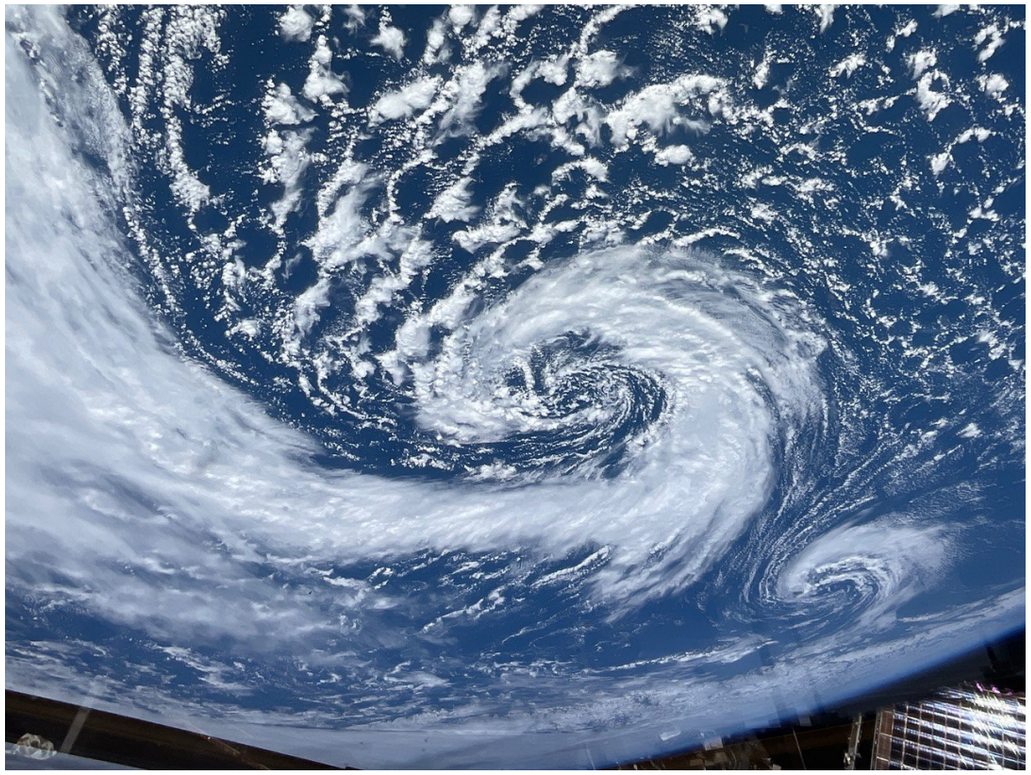
Л. СПИТЦЕР мл.

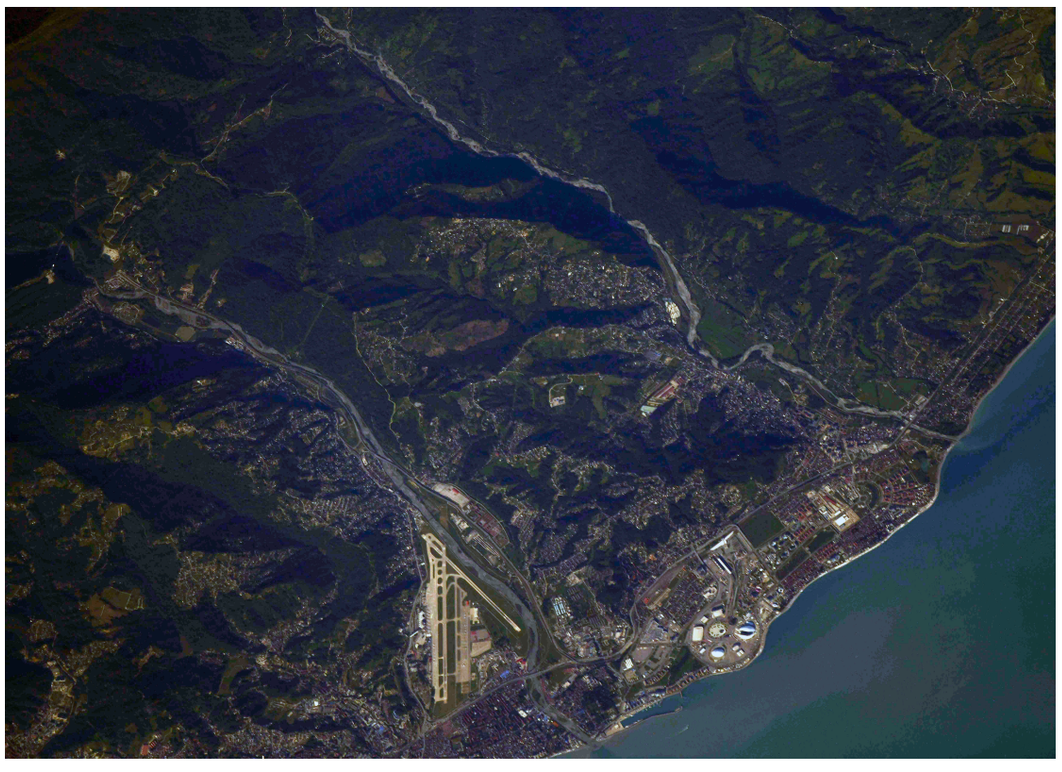
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

Перевод с английского
под редакцией
д-ра физ.-мат. наук Д. А. ВАРШАЛОВИЧА

МОСКВА
МИР
1981

Вода и жизнь на Земле





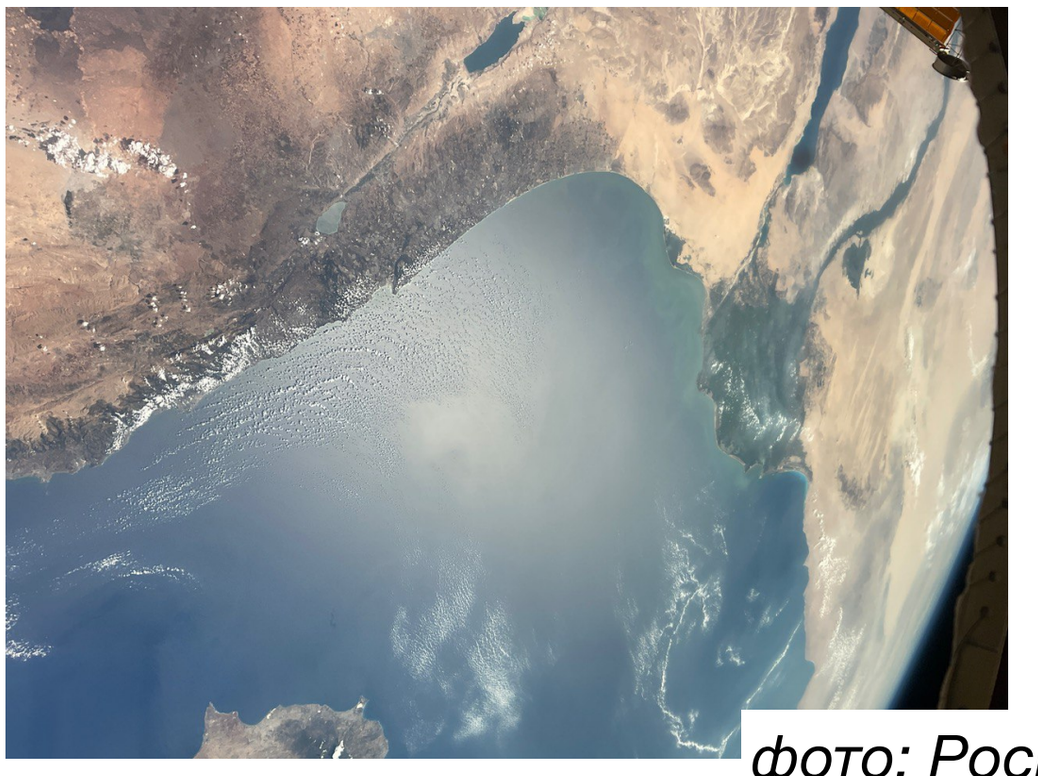


фото: Роскосмос

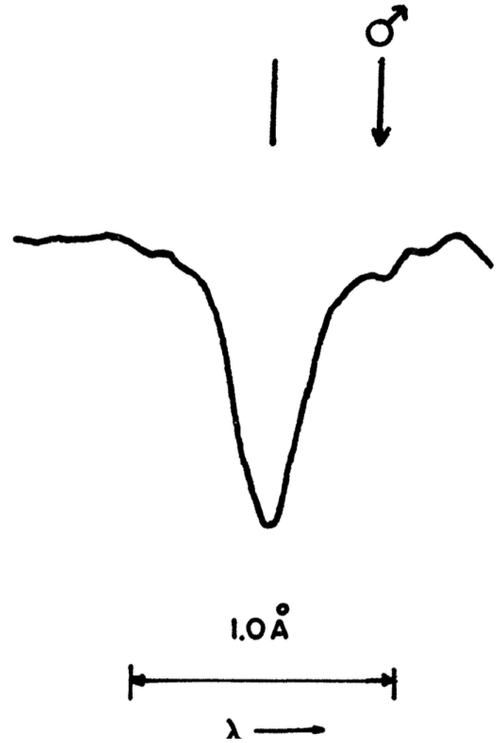
Вода обнаружена не только на Земле

PHILOSOPHICAL

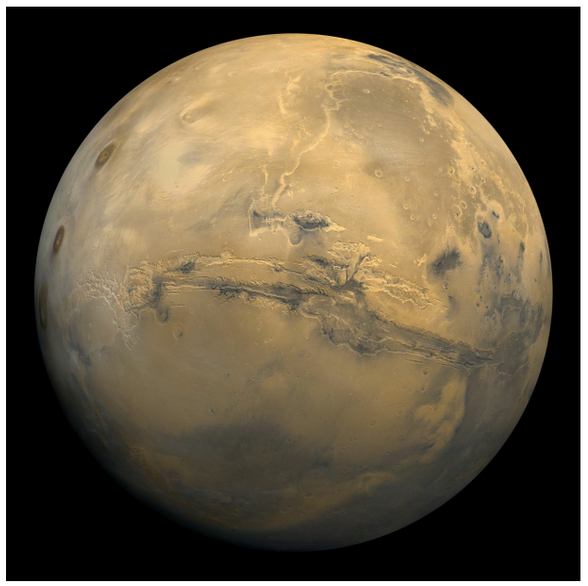
TRANSACTIONS.

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



$\lambda \approx 8200$Å *Spinrad+, 1963*



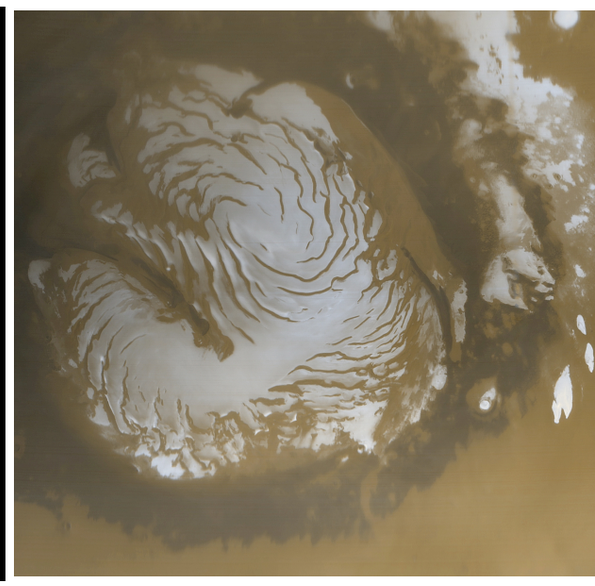
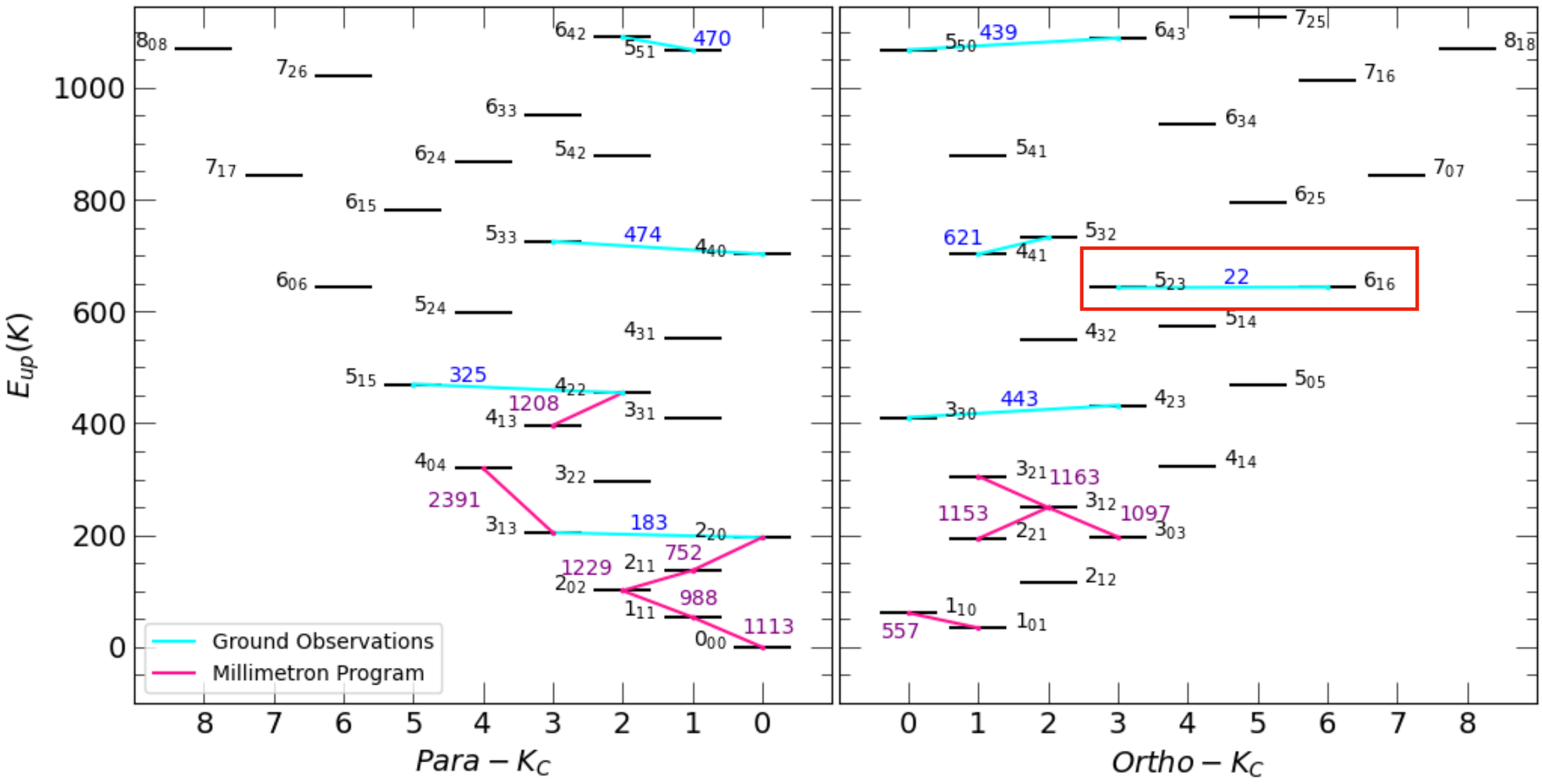
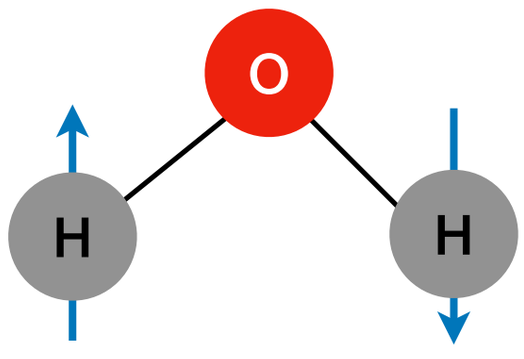
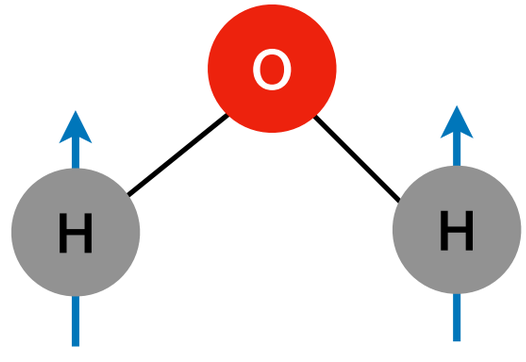


фото: NASA

Схема энергетических уровней молекулы воды

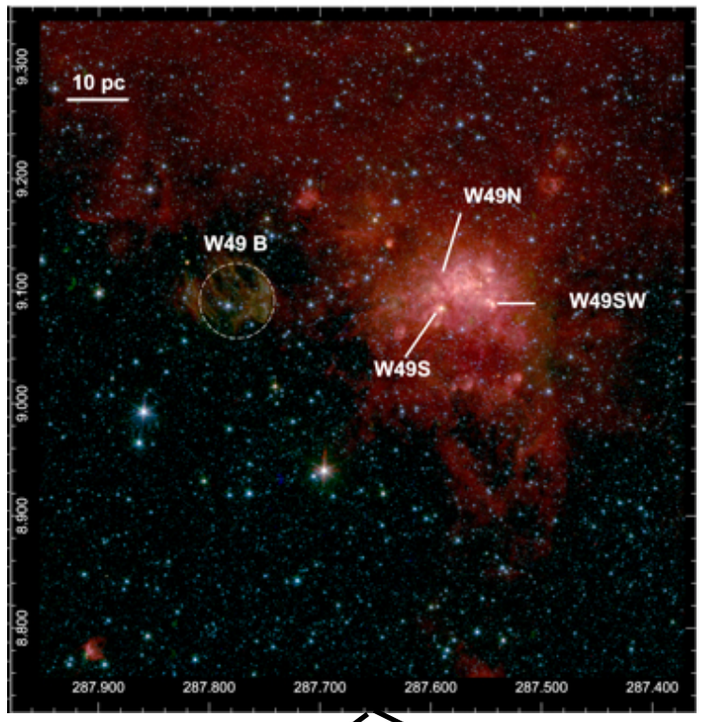




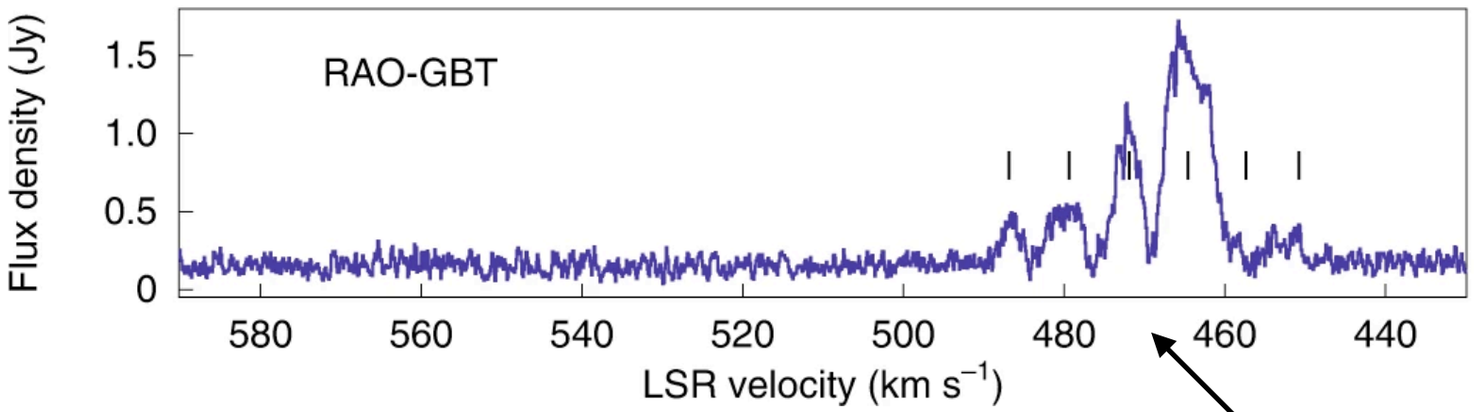


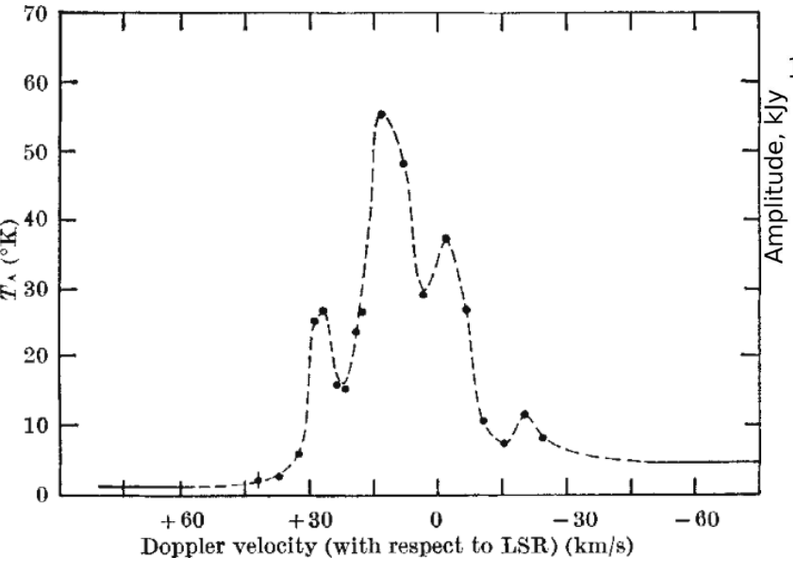
Вода обнаружена в МЗС и дальней Вселенной

Мазерное излучение воды позволяет изучать процесс звездообразования

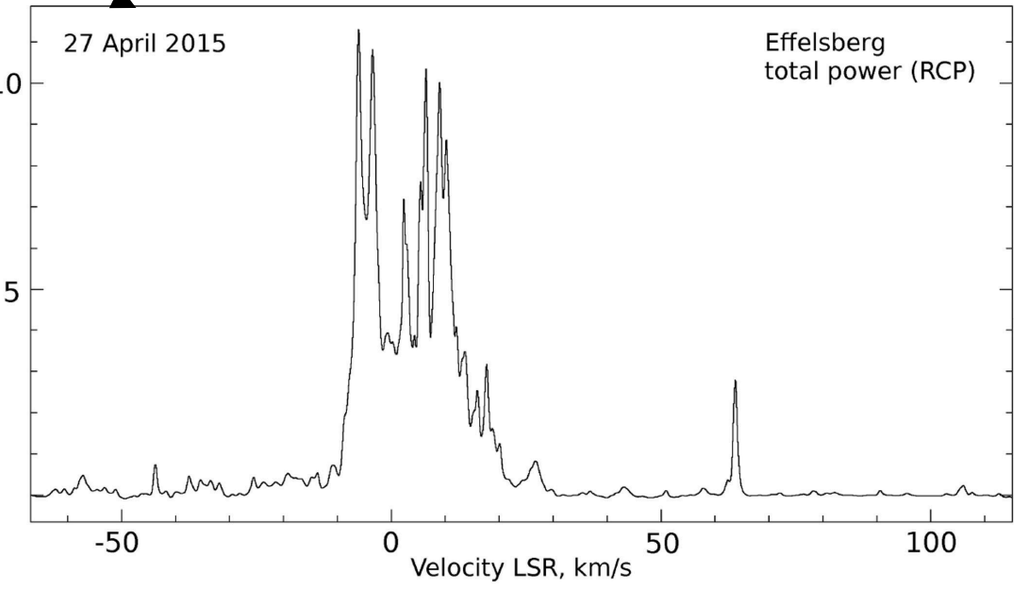


Baan+, 22





Cheung+, 69



Shakhvorostova+, 20

$$V_{\mathrm{LSR}} = -\,c\frac{\nu-\nu_0}{\nu_0}$$

Вода в галактиках

Линии воды — надежный индикатор темпа звездообразования

- Индикаторы звездообразования в УФ, оптике, ИК: Hα, CII и др. — ненадежны

- поглощение пылью

- L_{IR} (8-1000 мкм) — наилучший вариант, т.к. все УФ и оптическое излучение переизлучается пылью

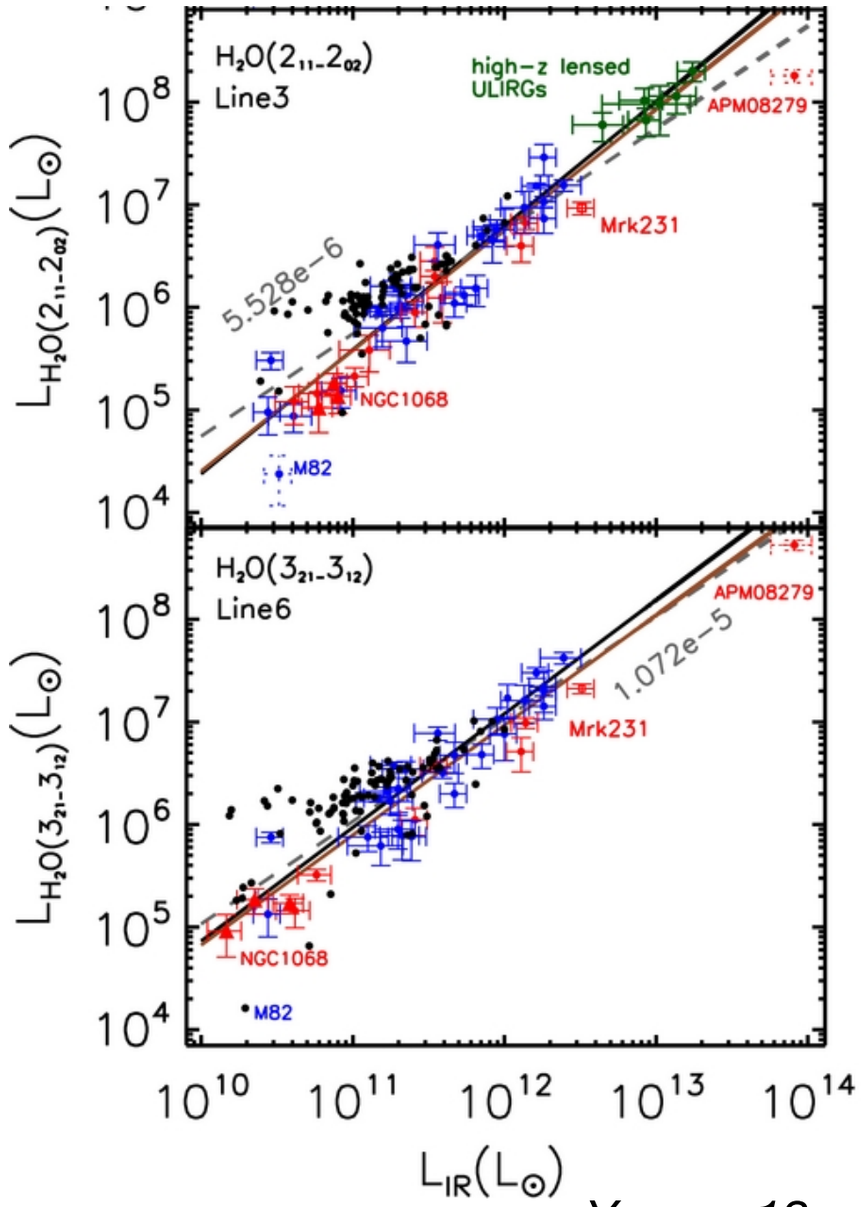
- $\mathrm{SFR}[\mathrm{M}_\odot \mathrm{yr}^{-1}] \approx 1.47 \times 10^{-10} L_{\mathrm{IR}}[L_\odot]$

  Kennicutt+,12

- получить распределение энергии в спектре трудно

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

Не зависит от активного ядра



Yang+, 13

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?

Образование воды в условиях МЗС

В газовой фазе

В газовой фазе при низкой температуре

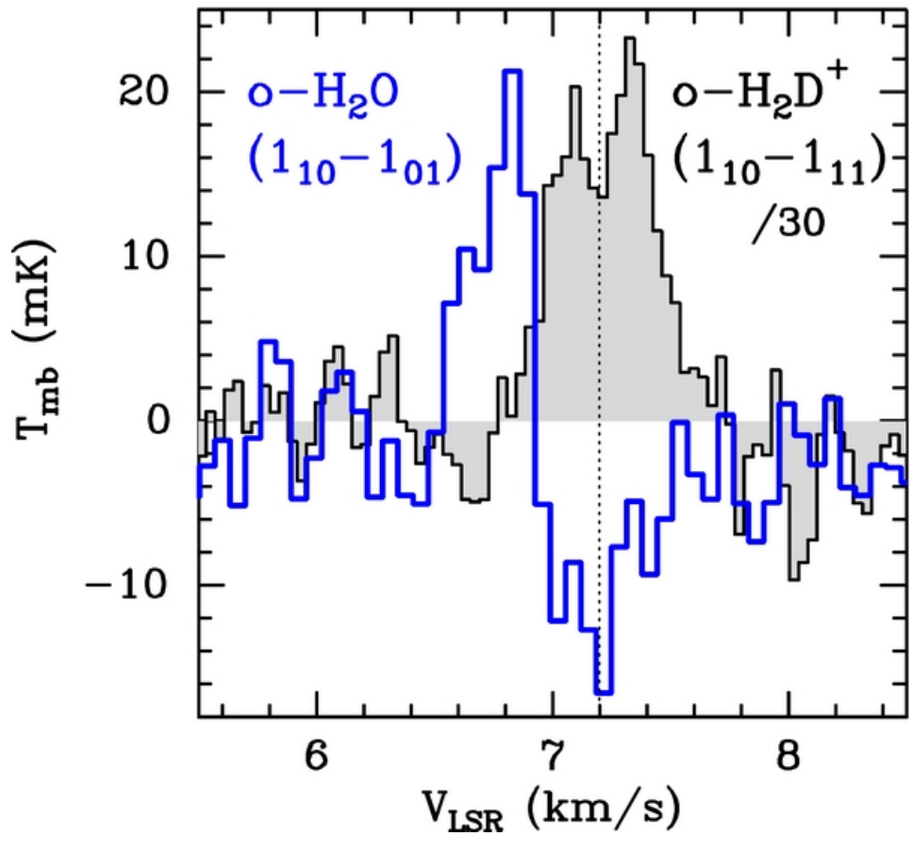
$$O + H_3^+ \rightarrow OH^+ + H_2$$
$$OH^+ + H_2 \rightarrow H_2O^+ + H$$
$$H_2O^+ + H_2 \rightarrow H_3O^+ + H$$
$$H_3O^+ + e^- \rightarrow H_2O + H$$

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

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

В газовой фазе при $T > 250\,K$

$$O + H_2 \rightarrow OH + H$$
$$OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$$



Caselli+, 12

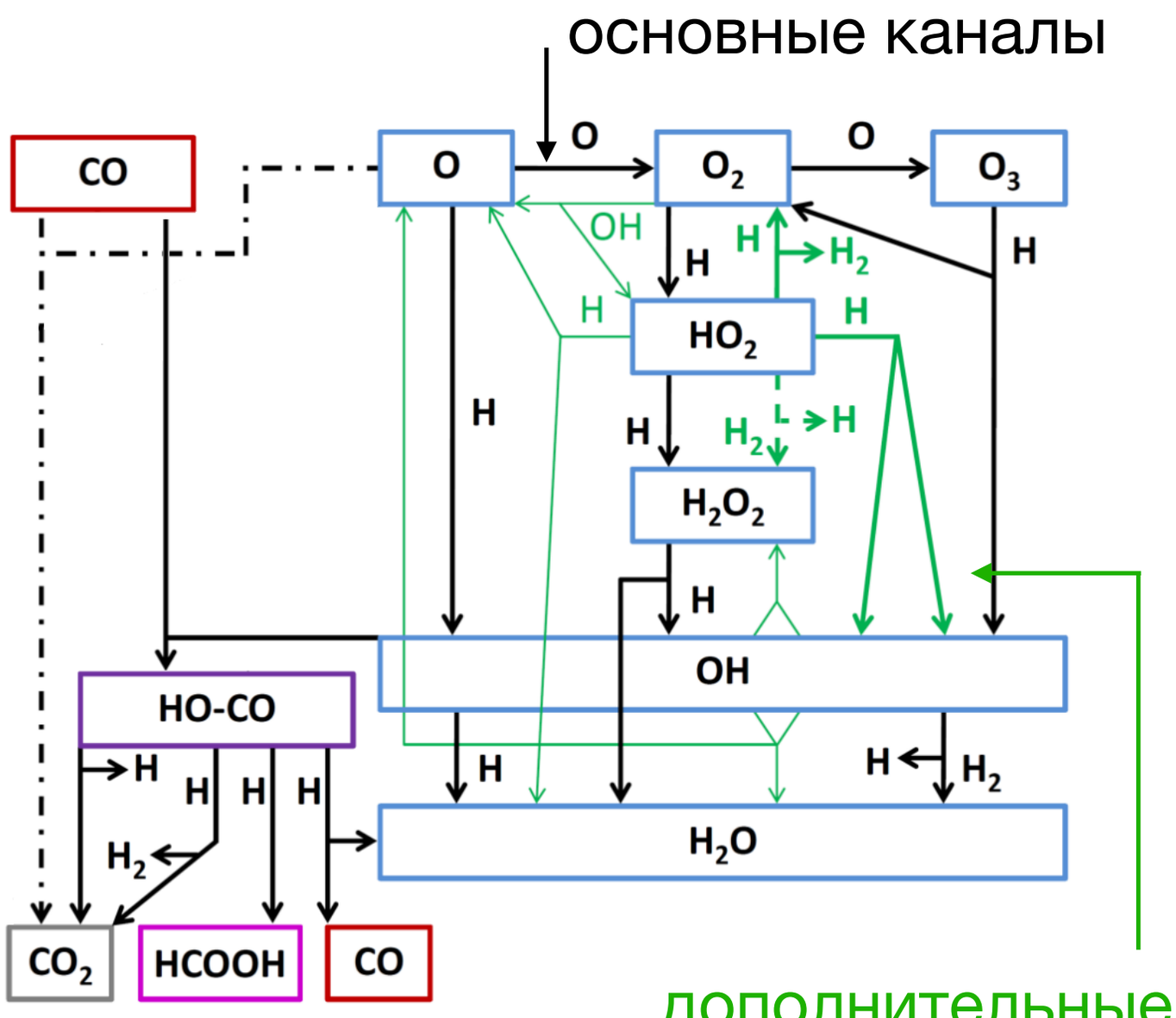
Образование воды в условиях МЗС

На поверхности пыли

$$O + H \rightarrow OH$$

$$OH + H \rightarrow H_2O$$

- Нет барьера активации
- Избыточная энергия реакции поглощается пылинкой



дополнительные каналы расходования кислорода на пылинках

Соотношения изотопологов $H_2O/HDO/D_2O$

Фракционирование дейтерия — возможность исследовать пути образования воды

газ

$$H_3^+ + HD \rightleftarrows H_2D^+ + H_2 + \Delta E$$

$$\Delta E/k = 230\,\mathrm{K}$$

$$O + H_2D^+ \rightarrow OD^+ + H_2$$

и так далее…

пыль

$$O + D \rightarrow OD$$

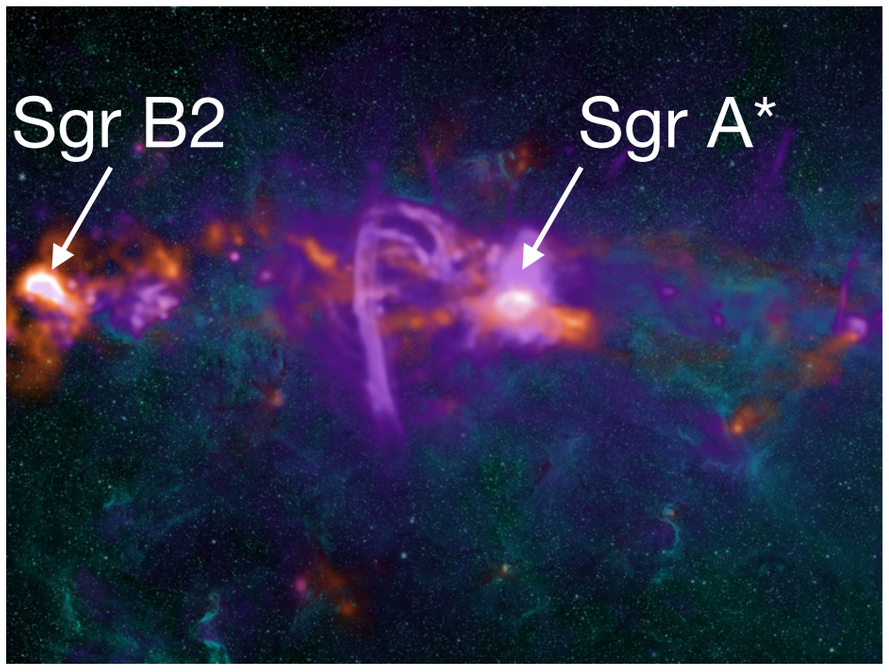
$$OD + H \rightarrow HDO$$

$$OD + D \rightarrow D_2O$$

$$\frac{HDO}{H_2O} > \frac{D}{H}\mathrm{ISM} \qquad \frac{D}{H}\mathrm{ISM} = 2 \times 10^{-5}$$

HDO в центральной молекулярной зоне

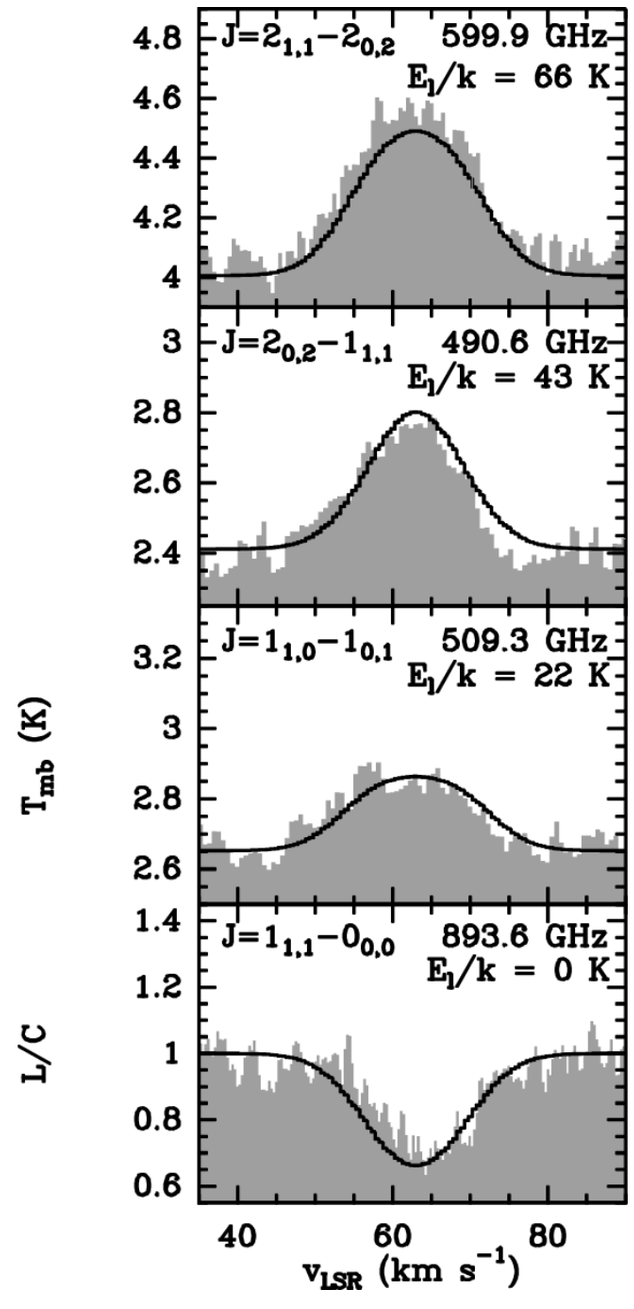
500 пк вокруг центра Галактики
10% массы молекулярного газа — в ЦМЗ



$$x_{\mathrm{HDO}} \approx 10^{-11},\ T_{\mathrm{gas}} < 100\ \mathrm{K}$$

$$x_{\mathrm{HDO}} \approx (1-4)\times 10^{-9},\ T_{\mathrm{gas}} \geq 100\ \mathrm{K}$$

При $\mathrm{H/D} = 1.7 \times 10^{-6}$
газофазные реакции
дадут только $x_{\mathrm{HDO}} \approx 10^{-10}$



Вода образовалась на пылинках и затем испарилась

Comito+, 10

HDO/H_2O в областях звездообразования

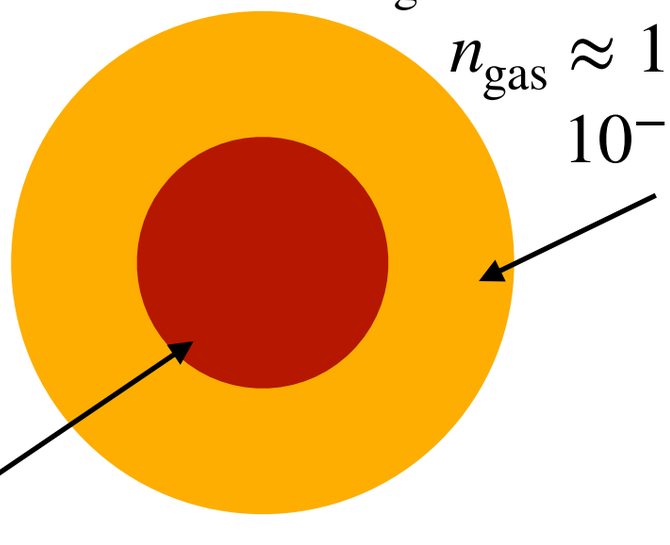
Горячее ядро и оболочка

$$\frac{D}{H}ISM = 2 \times 10^{-5}$$

$T_{gas} \leq 100$ K

$n_{gas} \approx 10^4 - 10^5$ cm^{-3}

$10^{-11} \leq x_{H_2O} \leq 10^{-8}$



$100 \leq T_{gas} \leq 10^4$ K

$n_{gas} \geq 10^6$ cm^{-3}

$10^{-6} \leq x_{H_2O} \leq 10^{-4}$

солнечные

	NGC1333	IRAS 16293
HDO/ H_2O	**10^{-2}/$7*10^{-2}$**	**$3*10^{-2}$/$5*10^{-3}$**

Прогрев облака протозвездой и испарение мантий пылинок происходит быстрее в массивных областях, чем в областях солнечных масс

массивные

	G34.26	AFGL 2591
HDO/ H_2O	**$6*10^{-4}$/$1.6*10^{-3}$**	**$5*10^{-4}$/$(0.4-4)*10^{-3}$**

Liu+, 13

van Dishoeck+, 21

Проблема появления воды на Земле

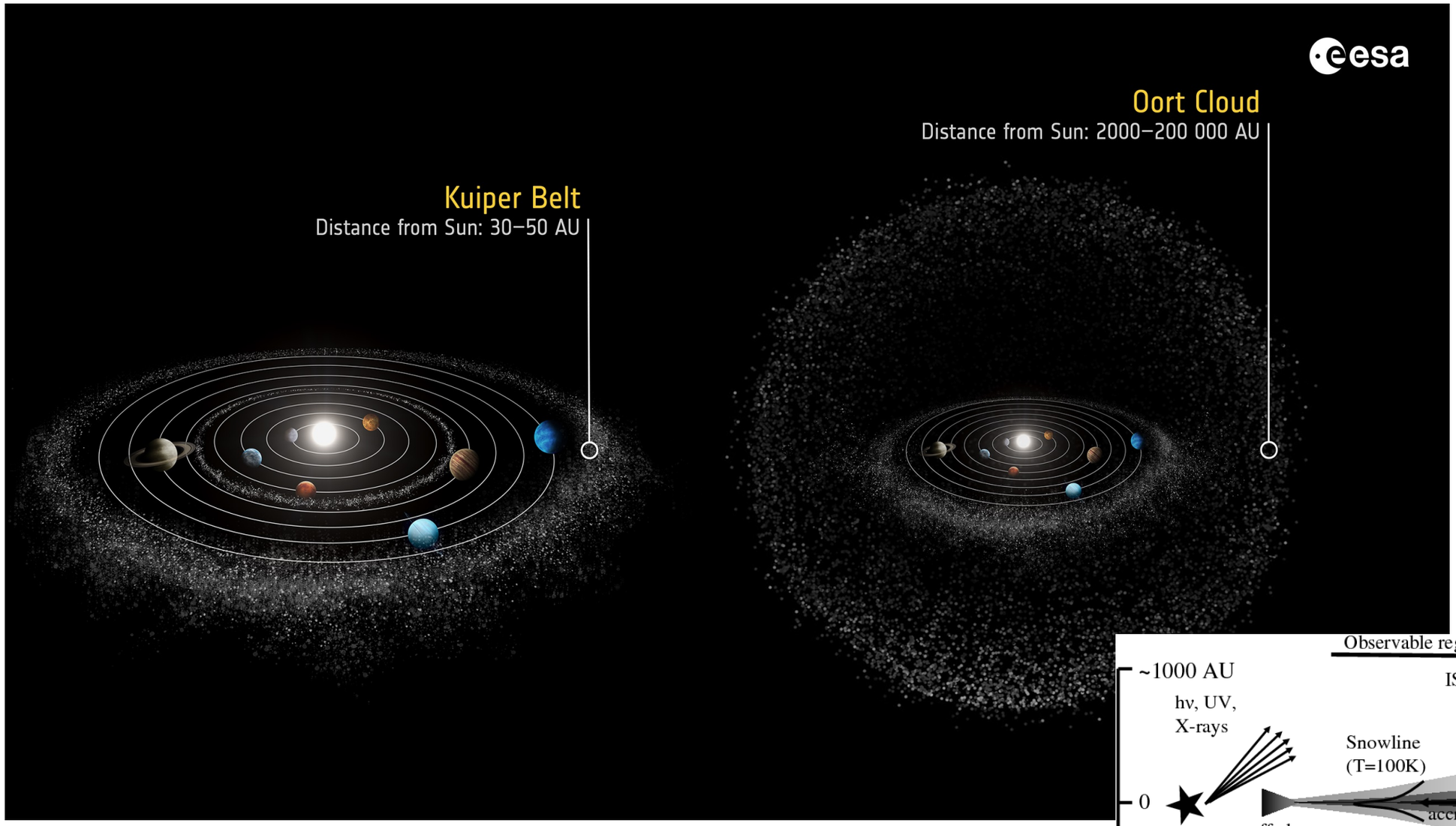
Снеговая линия воды в Солнечной Системе находится между орбитами Марса и Юпитера

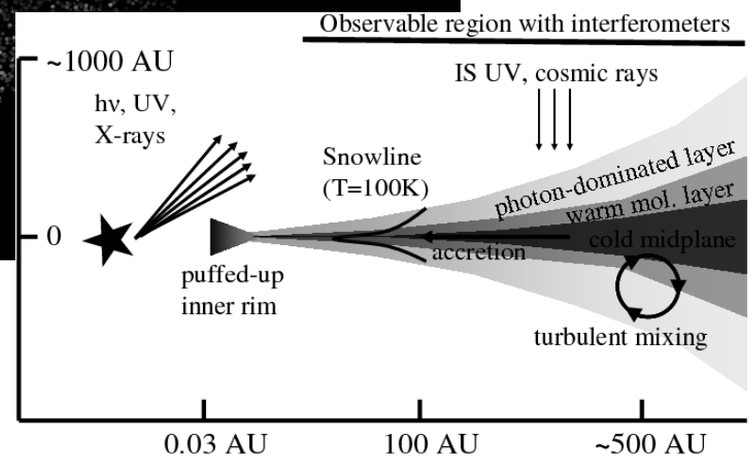
- Снеговая линия — граница области протосолнечного диска, в которой вода могла конденсироваться в твердое вещество.
- Возможный источник воды на Земле — кометное-метеоритное вещество, привнесенное в эпоху метеоритной бомбардировки молодой Земли. Предполагается, что из этого вещества могли сформироваться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

Бадюков, meteorites.ru

Вода в отдаленных частях протопланетных дисков

Область, где выживают молекулы из первичного вещества планетной системы



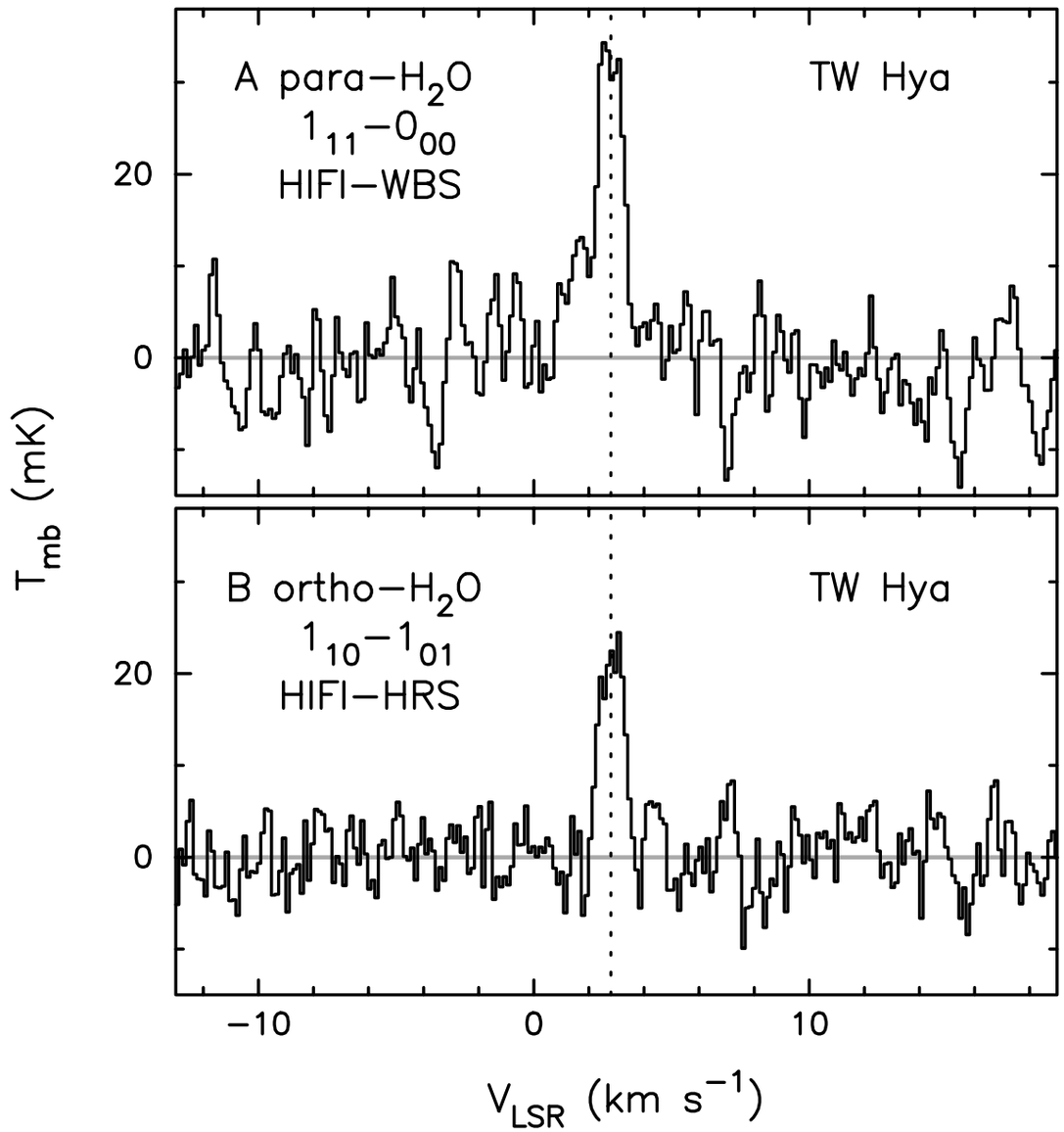


Наблюдений линий воды в дисках мало, так как линии слабые!

Оценка массы воды в протопланетных дисках

Отдельные сведения, нет систематических исследований

Herschel, одиночное зеркало



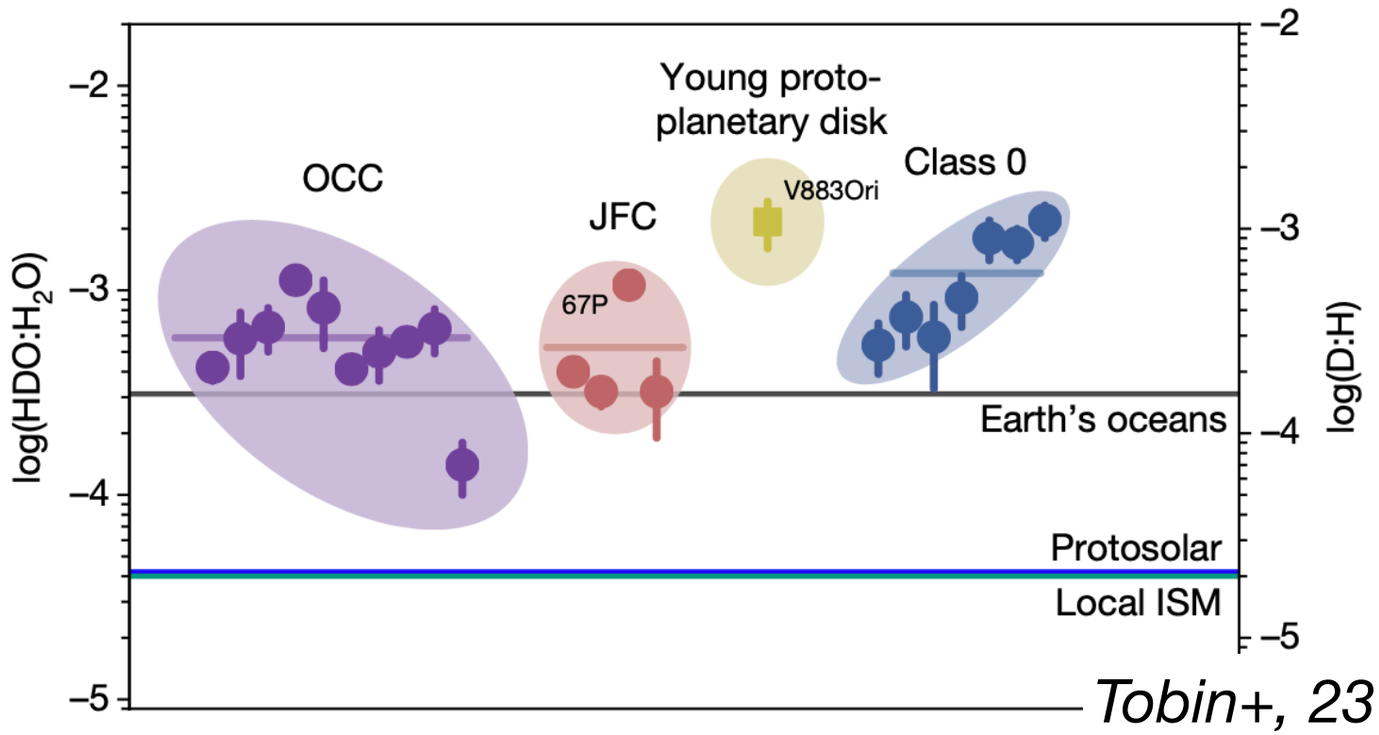
Hogerheijde+, 11

- Масса воды в диске $\sim 10^5$ масс Земного океана
- *N*(o-H_2O)/*N*(p-H_2O)=*0.8*
- T_{spin} = *14* K
- Вода в TW Hya образовалась на холодной пыли

Связь с происхождением воды на Земле

- HDO/H_2O — маркер местоположения в Солнечной Системе, где образовались те или иные кометы

- HDO/H_2O в углистых хондритах близко к значению в Земном океане

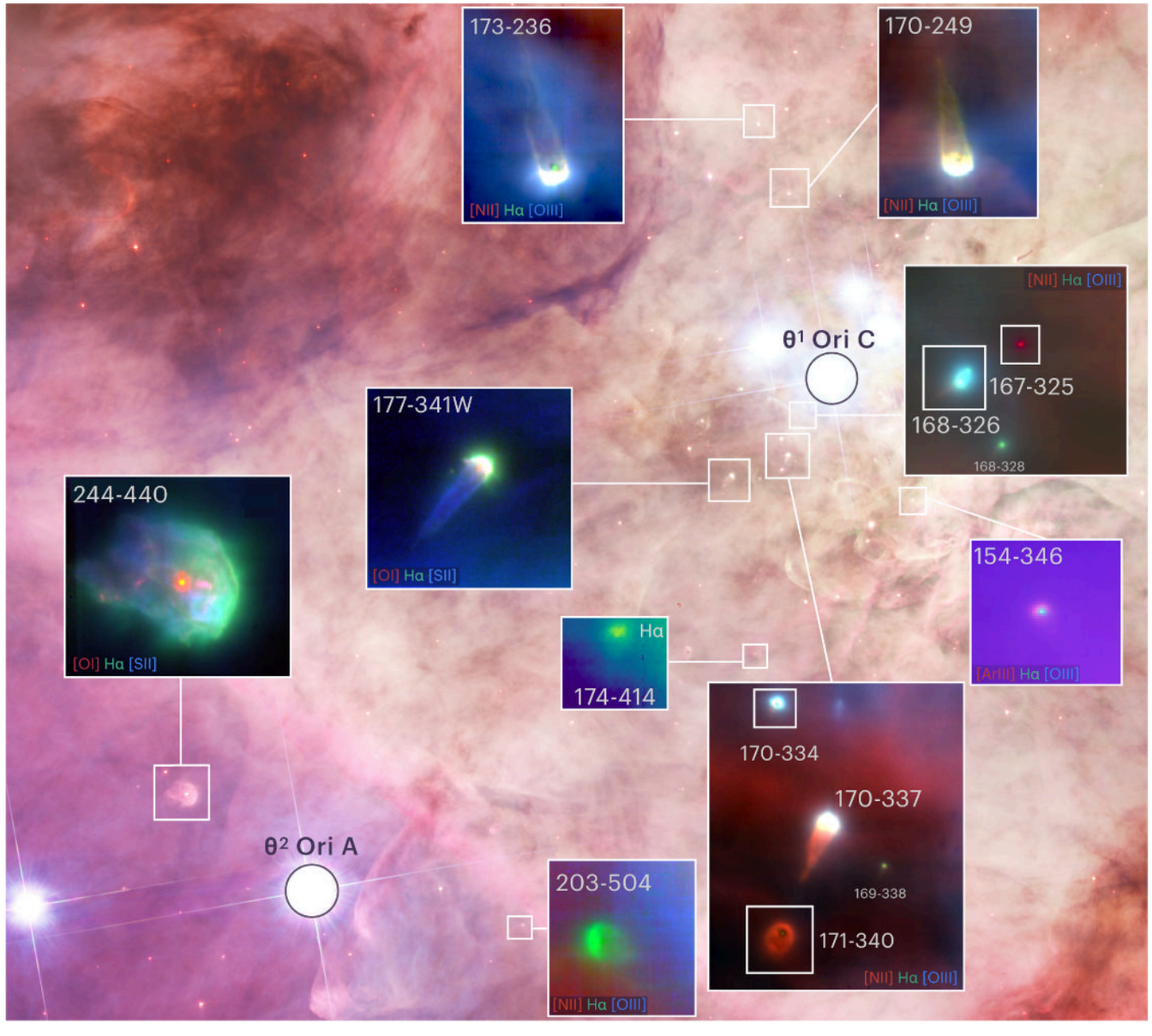


- Отношение HDO/H_2O у тел, привнесших воду на Землю по своей природе меньше?

- Высокотемпературная химия привела к уменьшению HDO/H_2O?

Необходимость перехода от отдельных измерений содержания воды к статистически-значимым выборкам

- Необходимо увеличить число комет и протопланетных дисков с измеренным HDO/H_2O
- Полезно исследовать диски вблизи звезд разных типов, в разных физических условиях и понять от чего зависит масса воды в них

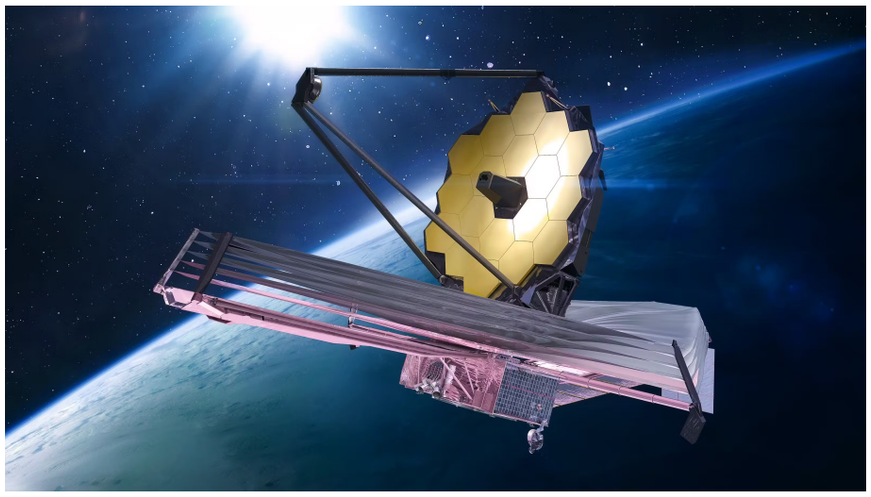


Aru+, 24

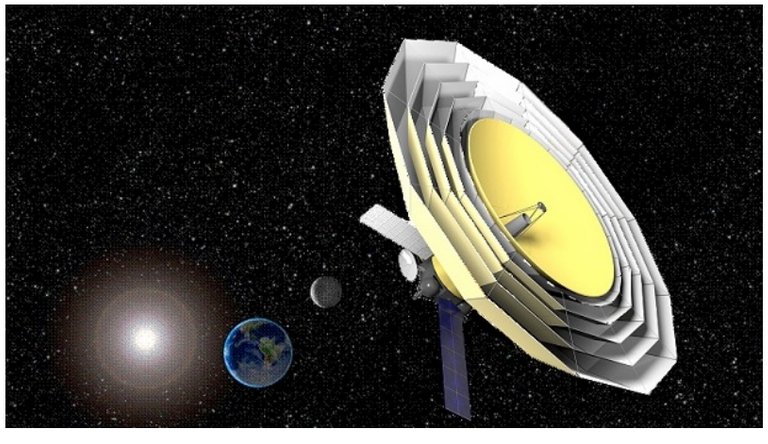
Спасибо за внимание!

HDO — линии высокого возбуждения

лед



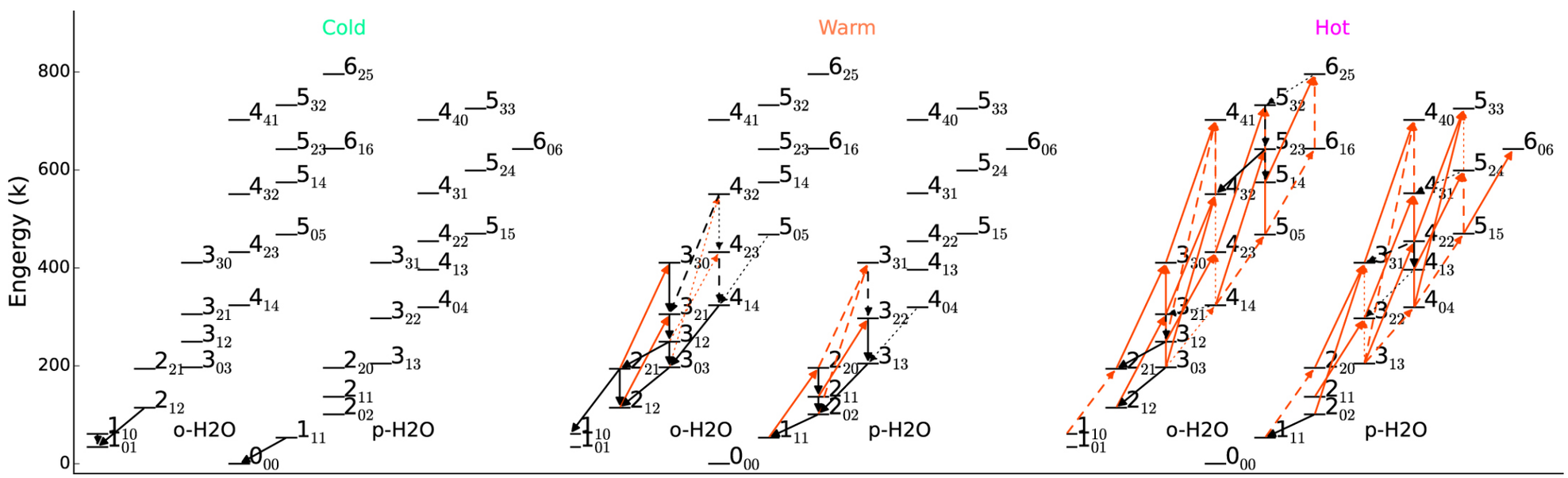
кислород

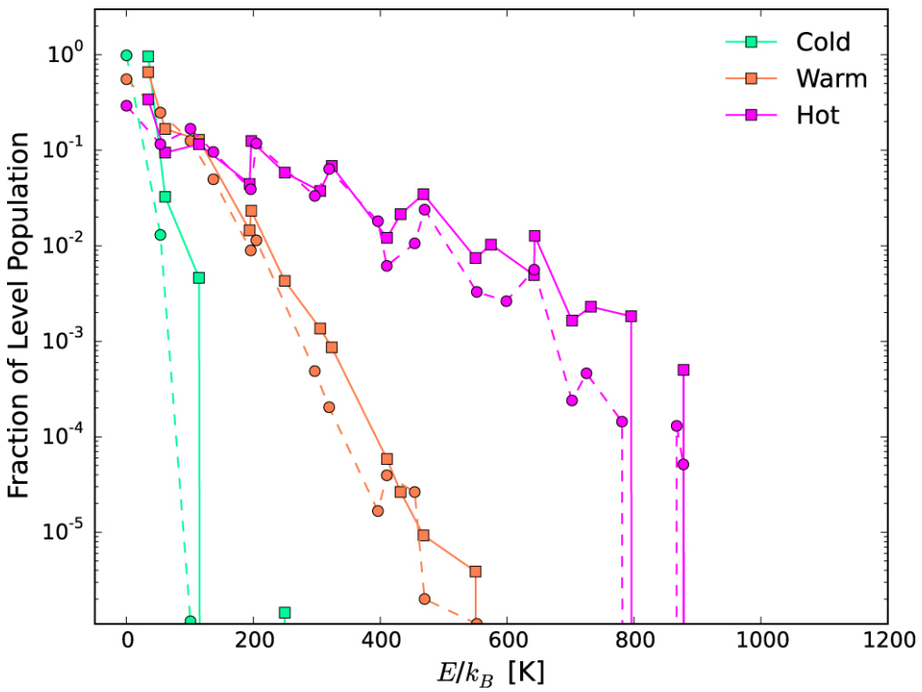


H_2O, HDO — переходы в основное состояние

Вода в галактиках

Холодная, теплая и горячая вода





- T_{dust}=40-70K, n(H)=10^5-10^6 см$^{-3}$, максимум изл-я пыли в галактиках (L_{IR}) формируется этой средой, x_{H2O}=10^{-8}-10^{-7}
- T_{dust}=20-30K, n(H)=10^4-10^5 см$^{-3}$, x_{H2O}=10^{-9}-10^{-8}
- Возникает в АЯГ (Arp220, Mrk231), x_{H2O}=10^{-6}-10^{-5}

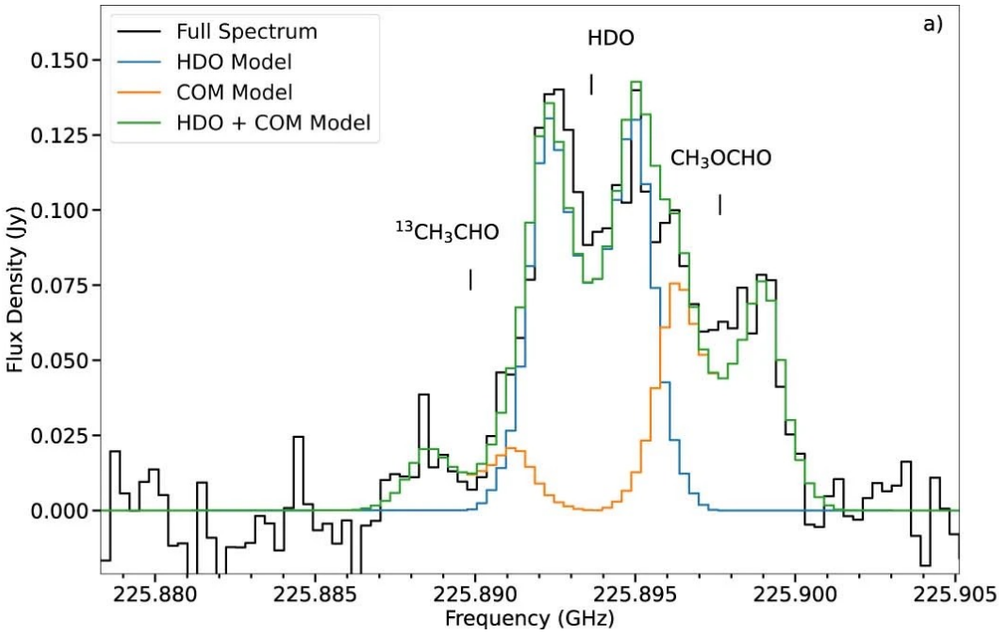
Liu+, 17

Для оценки содержаний критически важно качество спектров и количество линий

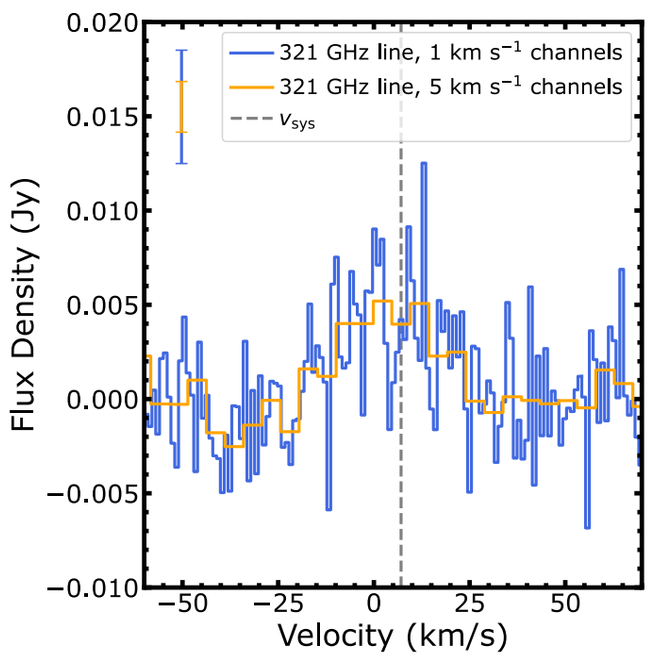
ALMA

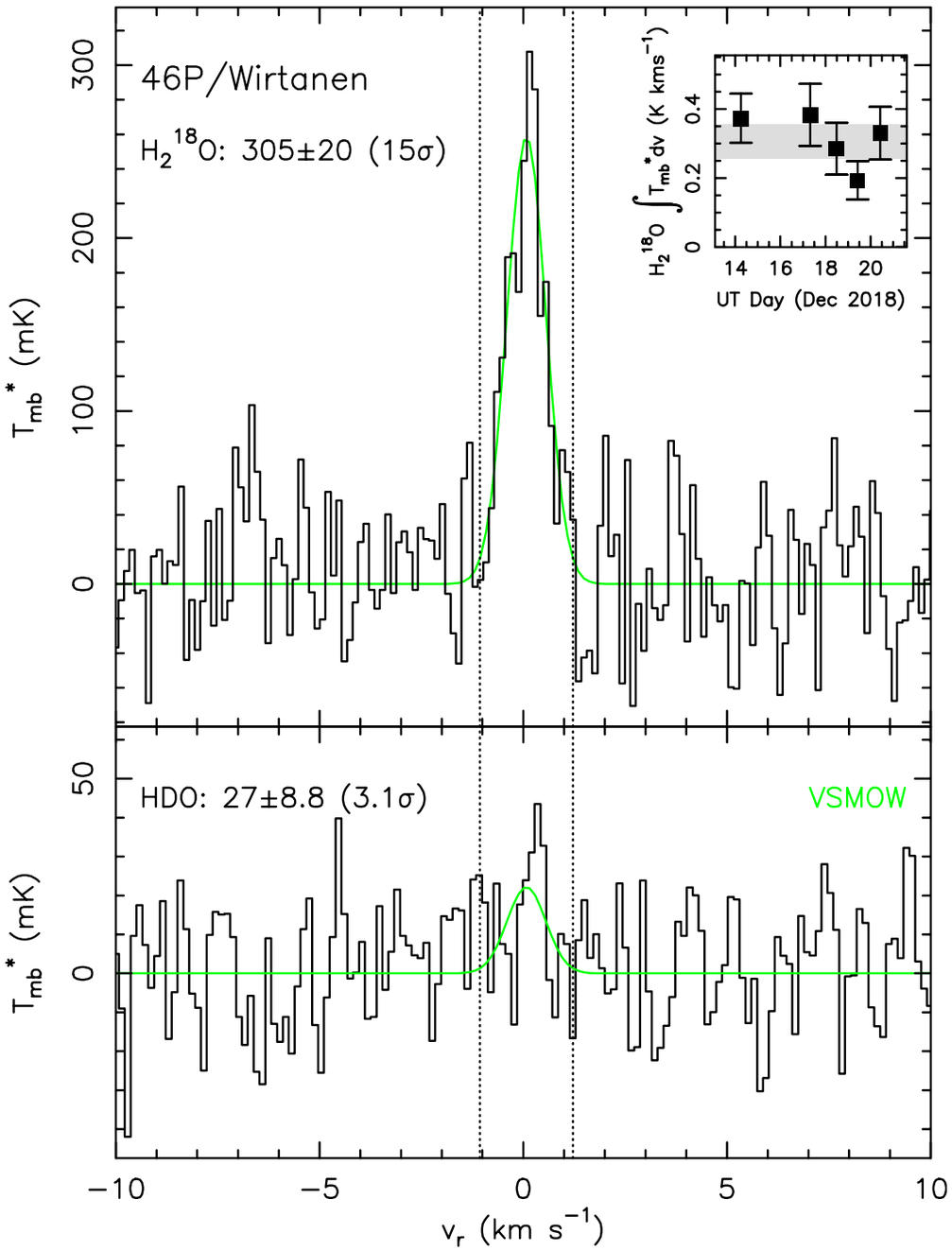
SOFIA

Tobin+, 23



Facchini+, 24



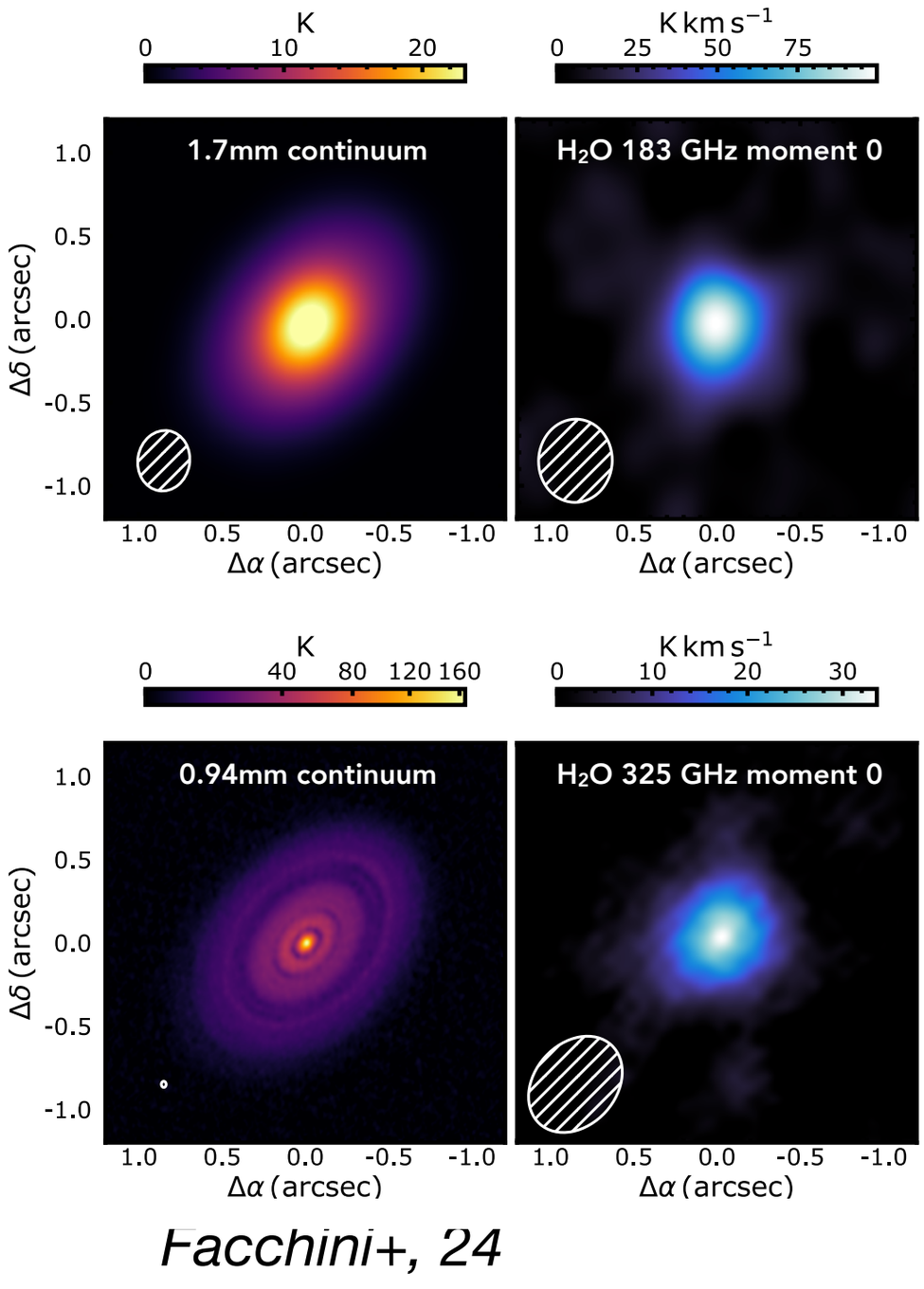


Lis+, 19

Оценка массы воды в протопланетных дисках

Отдельные сведения, нет систематических исследований

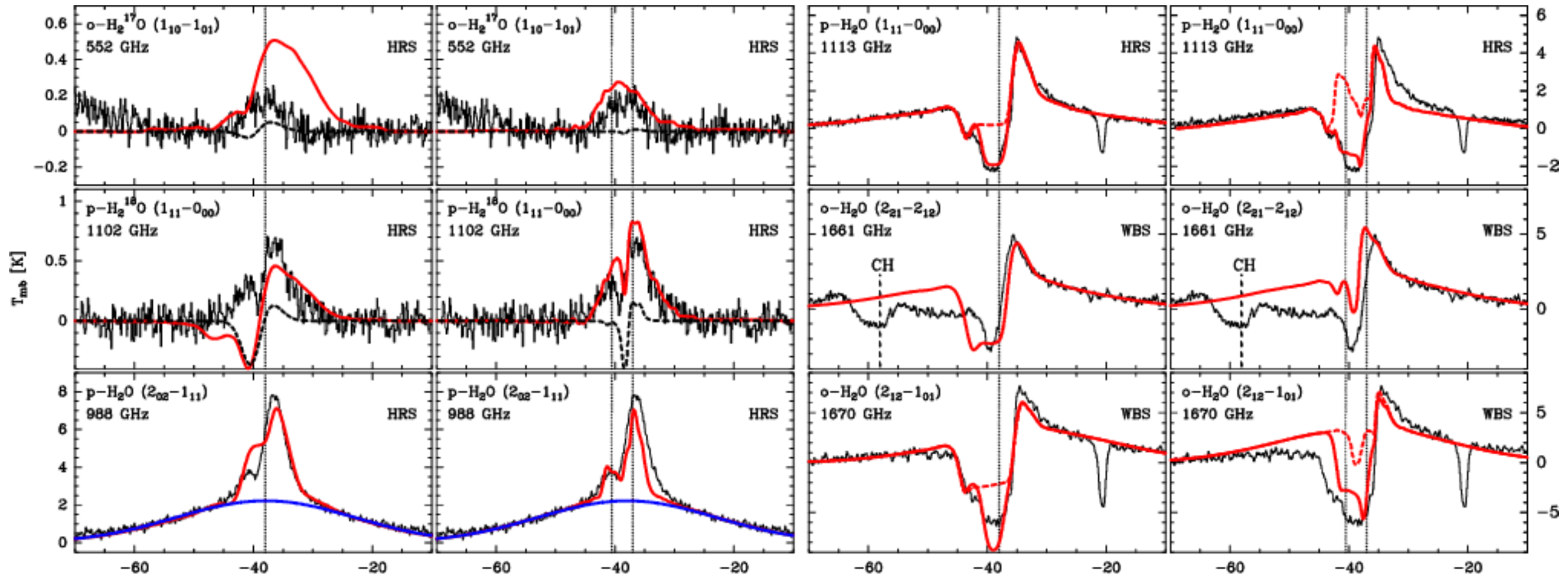
ALMA, интерферометр



Facchini+, 24

- Энергии верхних уровней ≈200, 500 и 2000K
- Излучение из теплых верхних слоев диска
- Масса воды как минимум 3.7 массы Земного океана внутри 17 а.е.

Сложные профили линий воды в протозвездах

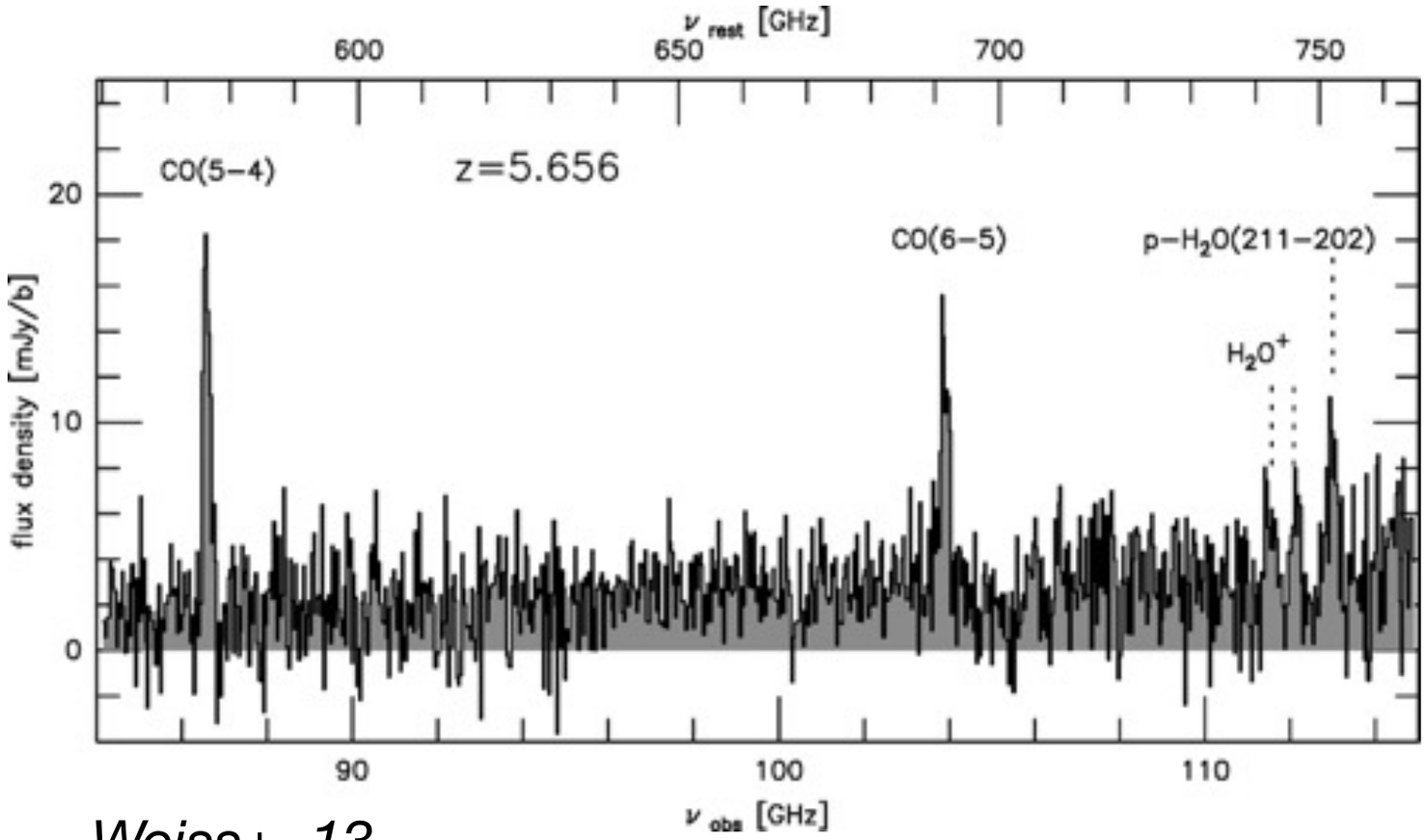


Chavarria+, 10

W3 IRS5

10^{-4}

Вода в галактике на большом красном смещении



Weiss+, 13