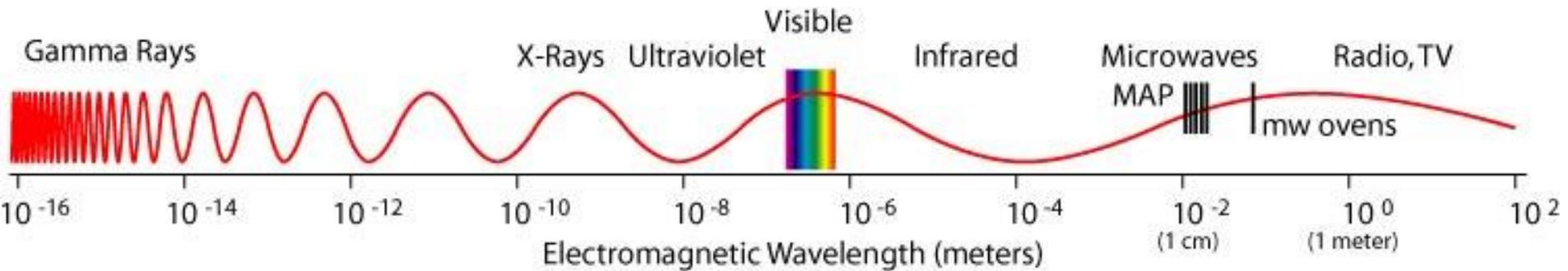




ALMA
исследует
Вселенную

В. Г. НАГНИБЕДА
СПбГУ, 2017г.

Электромагнитный спектр



Оптика → 1 октава

Радио → 15 октав

Геометрическая оптика : $D \gg \lambda$, $\theta = k \frac{\lambda}{D}$

Оптический телескоп

$$D = 0.5 \text{ м}$$

$$\lambda = 0.5 \text{ мкм}$$

$$\theta \approx 0.5 \text{ угл.сек}$$

Радиотелескоп

$$\theta = 0.5 \text{ угл.сек}$$

$$\lambda = 0.5 \text{ м}$$

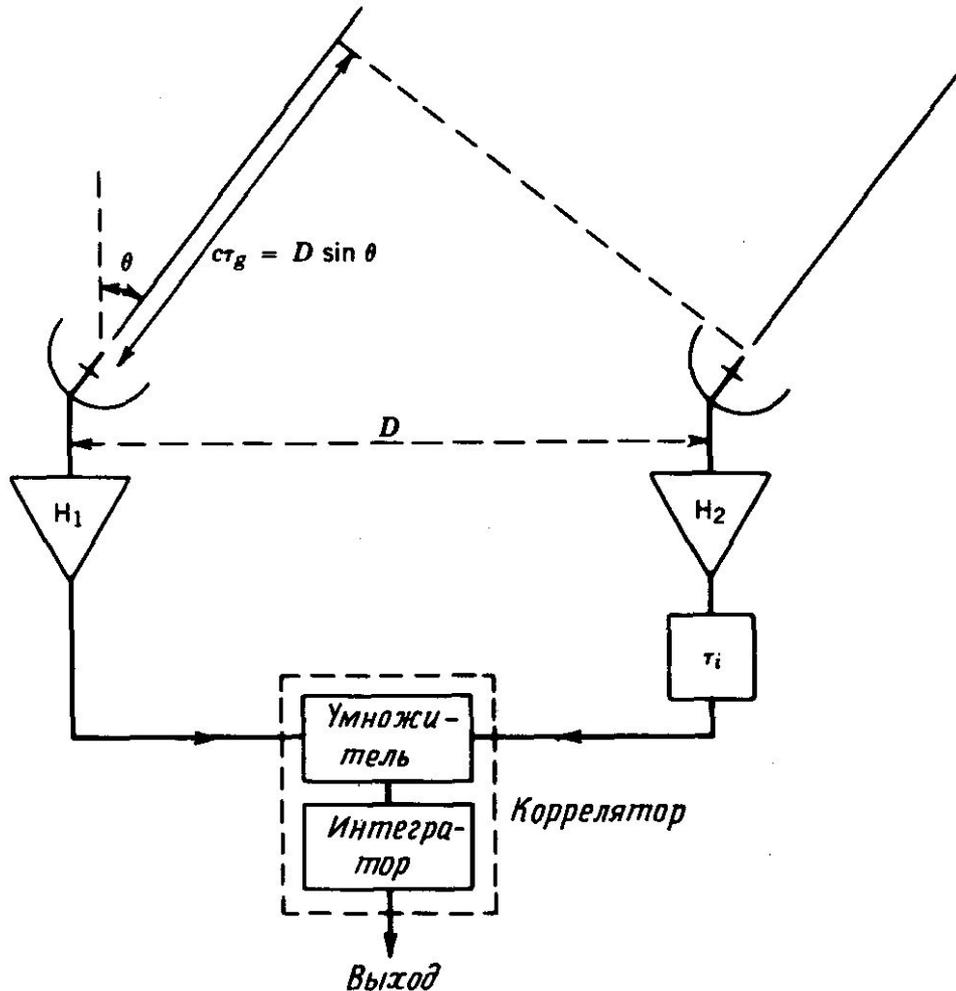
$$D \approx 500 \text{ км!}$$

$$\varepsilon = \lambda/10, \quad \varepsilon = (10^{-4} - 10^{-5})D, \quad \lambda_{\min} = (10^{-3} - 10^{-4})D$$

$$\theta_{\min} = (10^{-3} - 10^{-4}) \text{ рад} \approx 1 \text{ угл.мин.}$$



Двухэлементный интерферометр Майкельсона



- интерферометр аддитивный и мультипликативный
- разность пути двух сигналов – разность фаз

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \varphi$$

- примем для простоты, что антенны одинаковы:

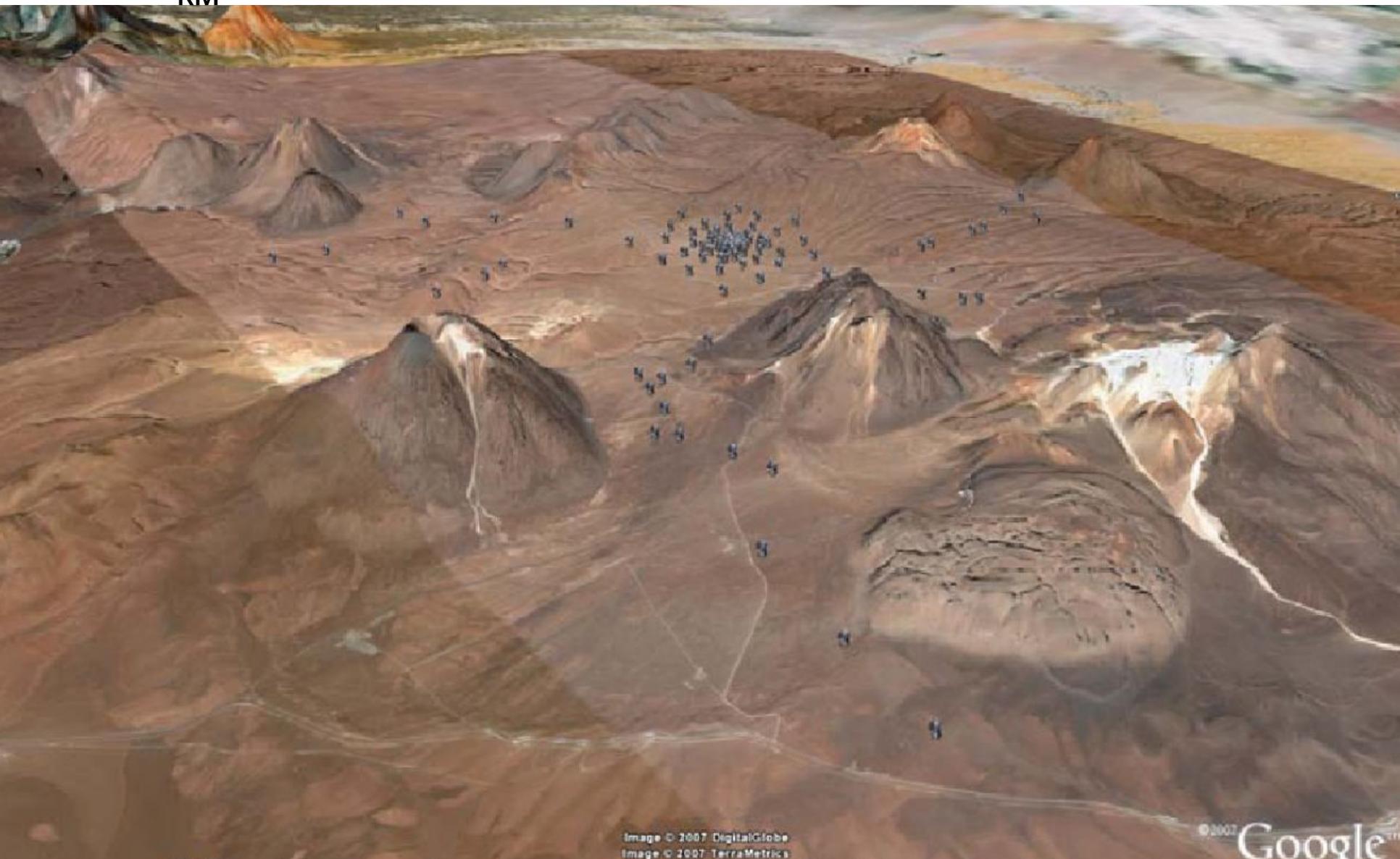
$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2 = \mathcal{F}_0$$



Вид на плато Чайнантор (Chajnantor, Atacama, Chile)

ALMA в наиболее растянутой конфигурации до 16

км





ALMA – это гигантская решетка из 66-ти 12-ти метровых антенн с базами до 16 км, расположенная на плато Чайнантор на высоте 5000 м в Андах (Chajnantor, Atacama, Chile).

Она принимает космическое излучение в диапазоне от 3 мм до 400 мкм (84 – 720 ГГц). Антенны решетки могут передвигаться, чтобы образовывать различные конфигурации с разными длинами баз и их ориентаций. Наиболее протяженная решетка обеспечивает наилучшее угловое разрешение (0.02 угл.сек. x длина волны в мм), более компактная конфигурация дает лучшую чувствительность к протяженным источникам.

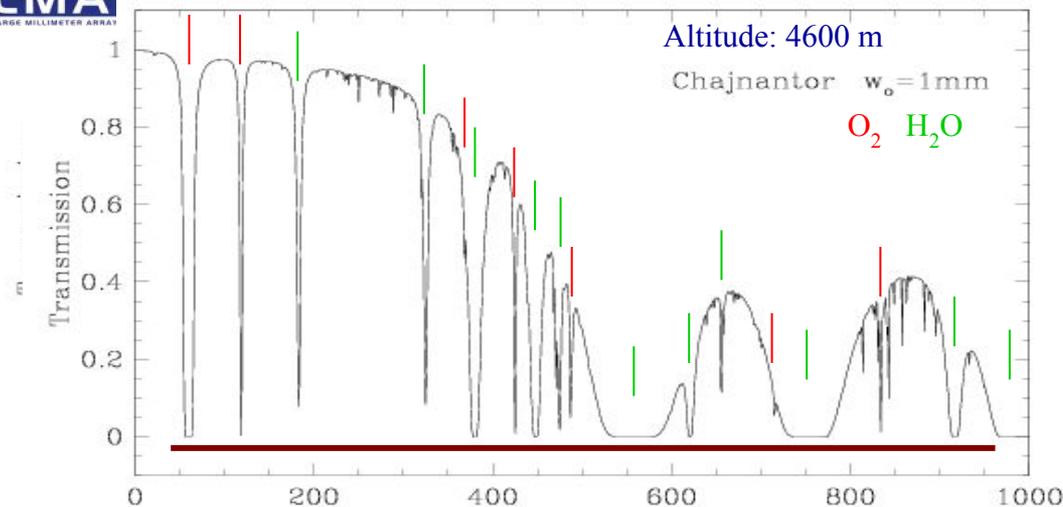
В дополнение к основной решетке создана компактная решетка ***Atacama Compact Array (ACA)***, состоящая из двенадцати 7-ми метровых и четырех 12-ти метровых зеркал. Эти антенны расположены тесно и используются для получения крупномасштабной структуры источников.

Compact Array

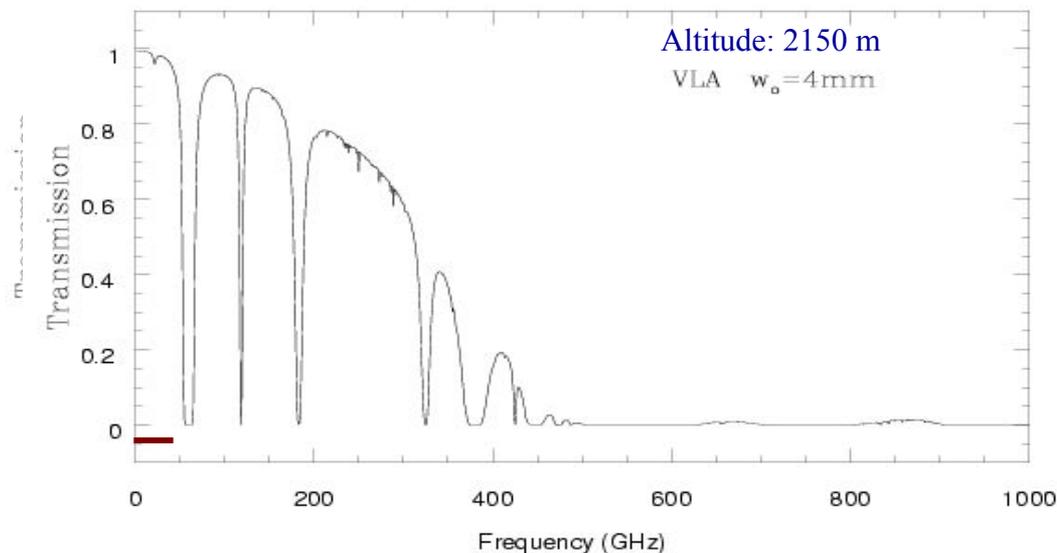




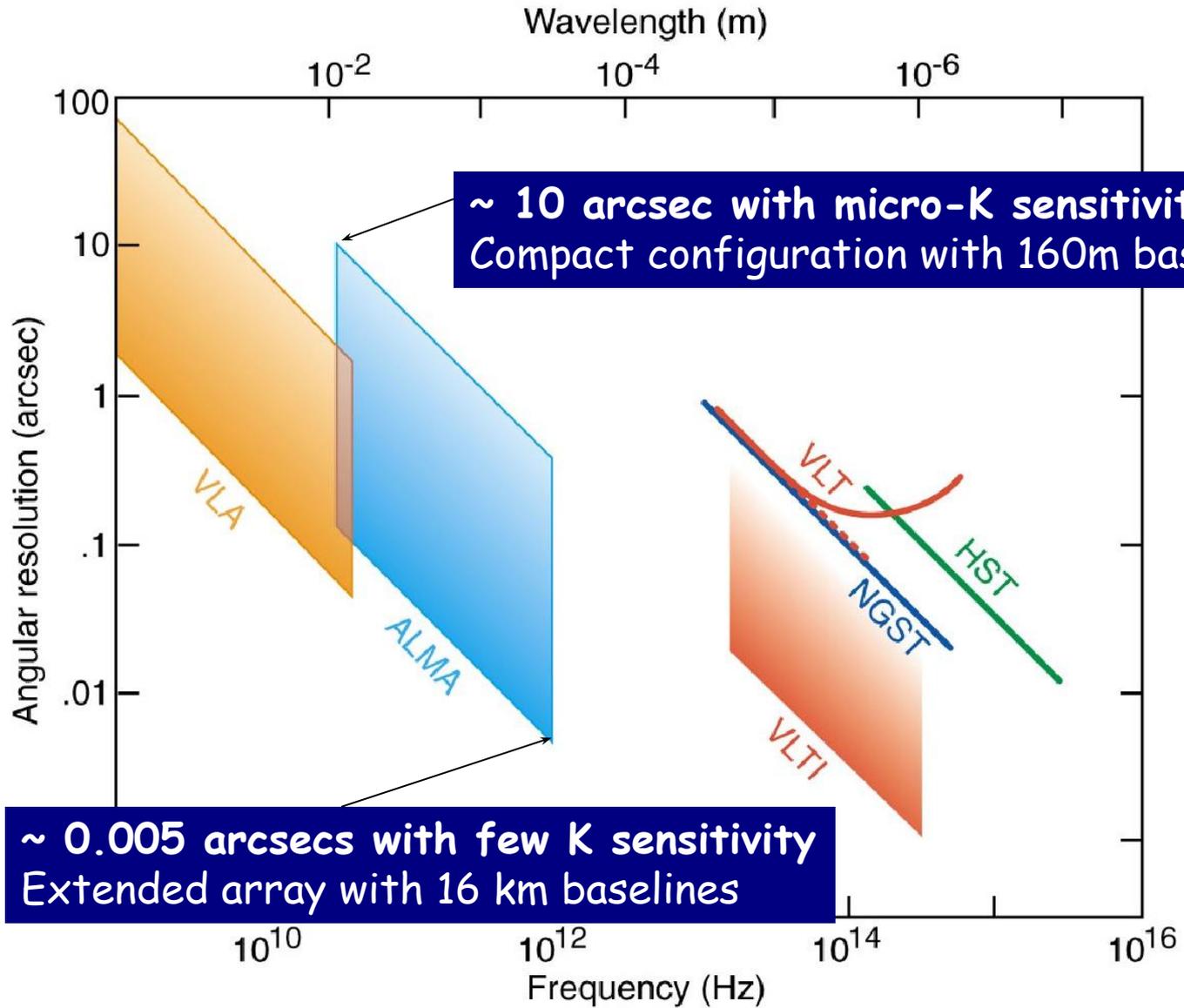
Наблюдения в этих диапазонах предпочтительней проводить **в ясную погоду**, а радиотелескопы располагать **ВЫСОКО В**



Прозрачность атмосферы для радиоволн мм- и субмм-диапазонов на разных высотах над уровнем моря



⇒ Атмосфера становится практически полностью прозрачной для сантиметровых и далее волн
⇒ $\lambda > \text{cm}$



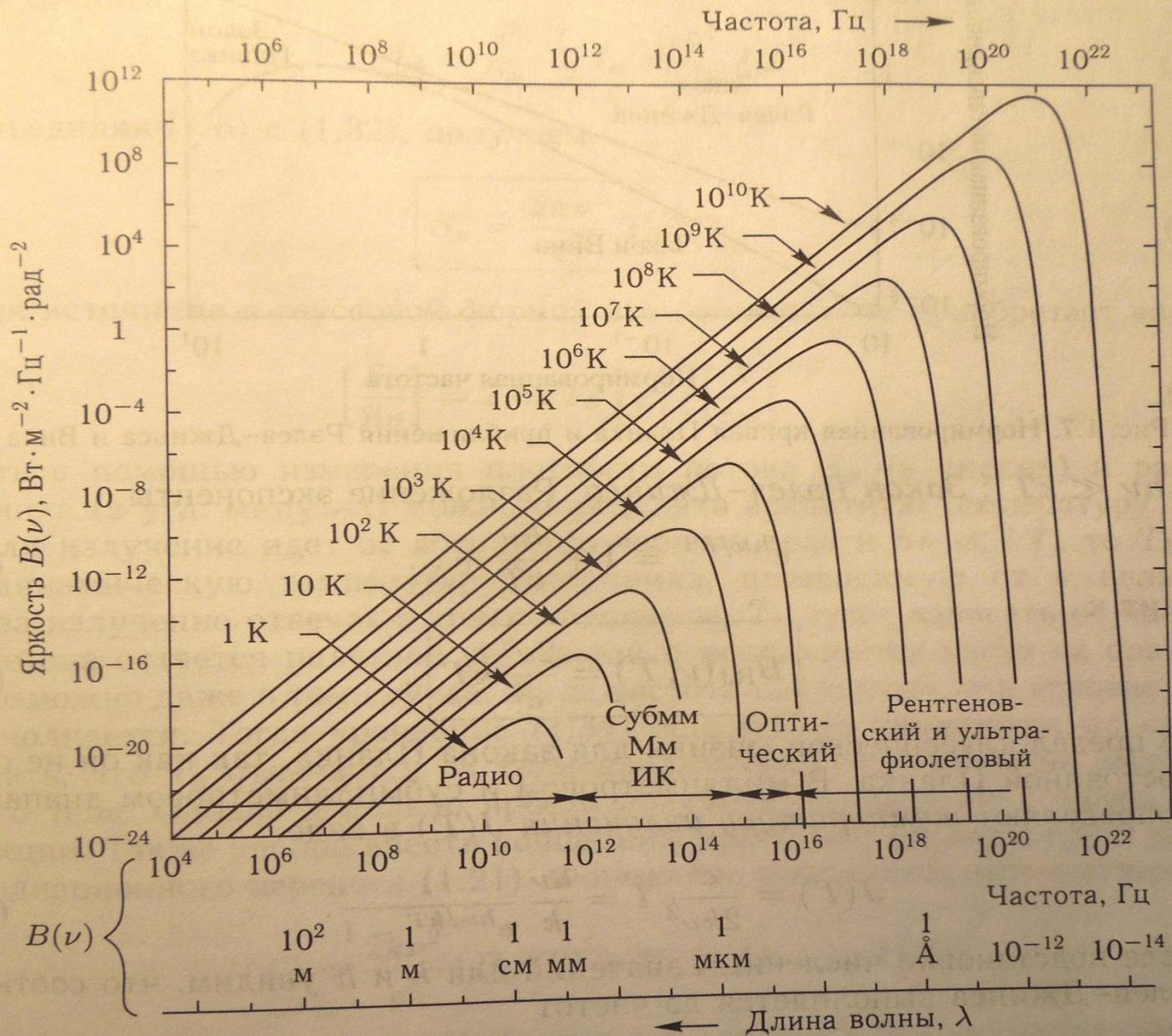


Рис. 1.6. Планковский спектр абсолютно черных тел с различной температурой

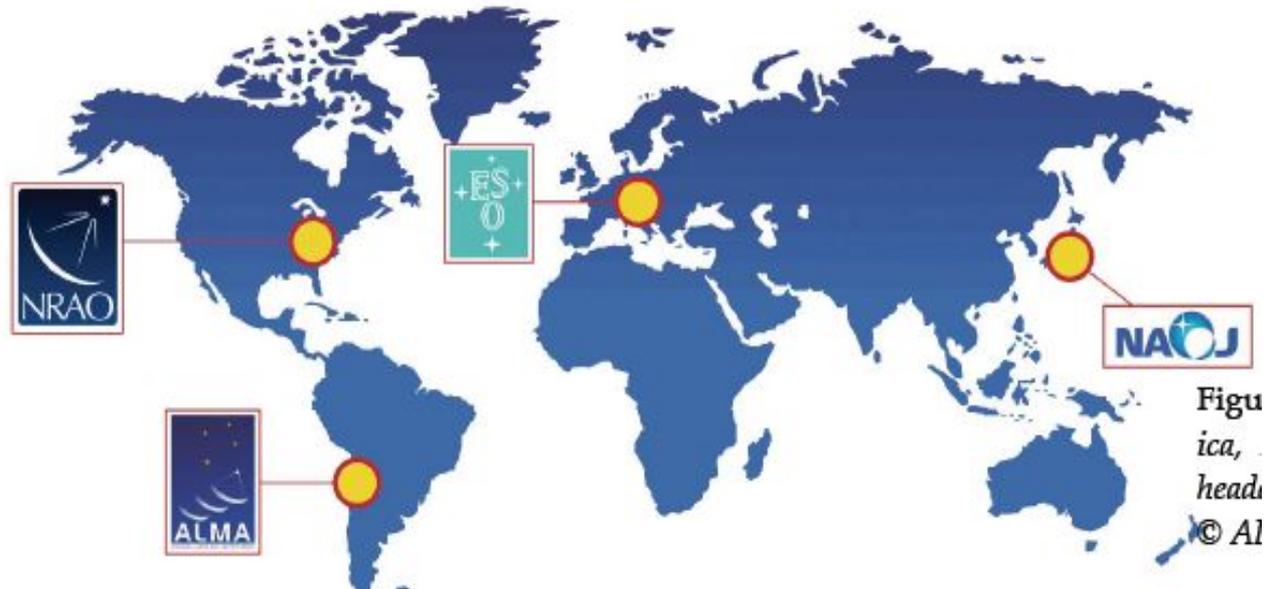






Организационная структура **ALMA**

ALMA создавалась совместно Европейской южной обсерваторией (**ESO**), Национальной радиоастрономической обсерваторией (**NRAO**, **США**) и Национальной астрономической обсерваторией Японии (**NAOJ**) в сотрудничестве с Объединенной **ALMA** обсерваторией (**JAO**, **Chile**), которая обеспечивает техническое и организационное обслуживание всей работы **ALMA**. Связь между **ALMA** и потенциальными пользователями обеспечивают Региональные **ALMA** центры (ARC).





ALMA обеспечивает беспрецедентную комбинацию чувствительности, углового разрешения, спектрального разрешения и точной воспроизводимости изображения на самых коротких радиоволнах, для которых еще прозрачна земная атмосфера.

Астрономы ожидают, что **ALMA** внесет исключительно важный вклад во все области астрономических исследований.



ALMA: научные цели

ALMA не специализированный инструмент и очень удобен для многих исследований:

- Дальняя Вселенная (при больших z)
- Структура и эволюция галактик
- Рождение и эволюция звезд
- Формирование планетных систем
- Химия межзвездной среды (от галактик до протопланетных дисков)
- Солнечная система и Солнце



ALMA станет первым инструментом, изучающим первые звезды и галактики, появившиеся из «темной эры» (“dark ages”) миллиарды лет назад. Эти объекты видны теперь на огромных расстояниях, и большая часть их излучения попадает в миллиметровый и субмиллиметровый диапазон из-за расширения Вселенной.

В близких областях Вселенной **ALMA** откроет беспрецедентную возможность исследовать процессы рождения звезд и планет в облаках межзвездного газа и пыли. Пыль прозрачна для миллиметровых волн, поэтому **ALMA** откроет детали процесса формирования молодых звезд и планет.

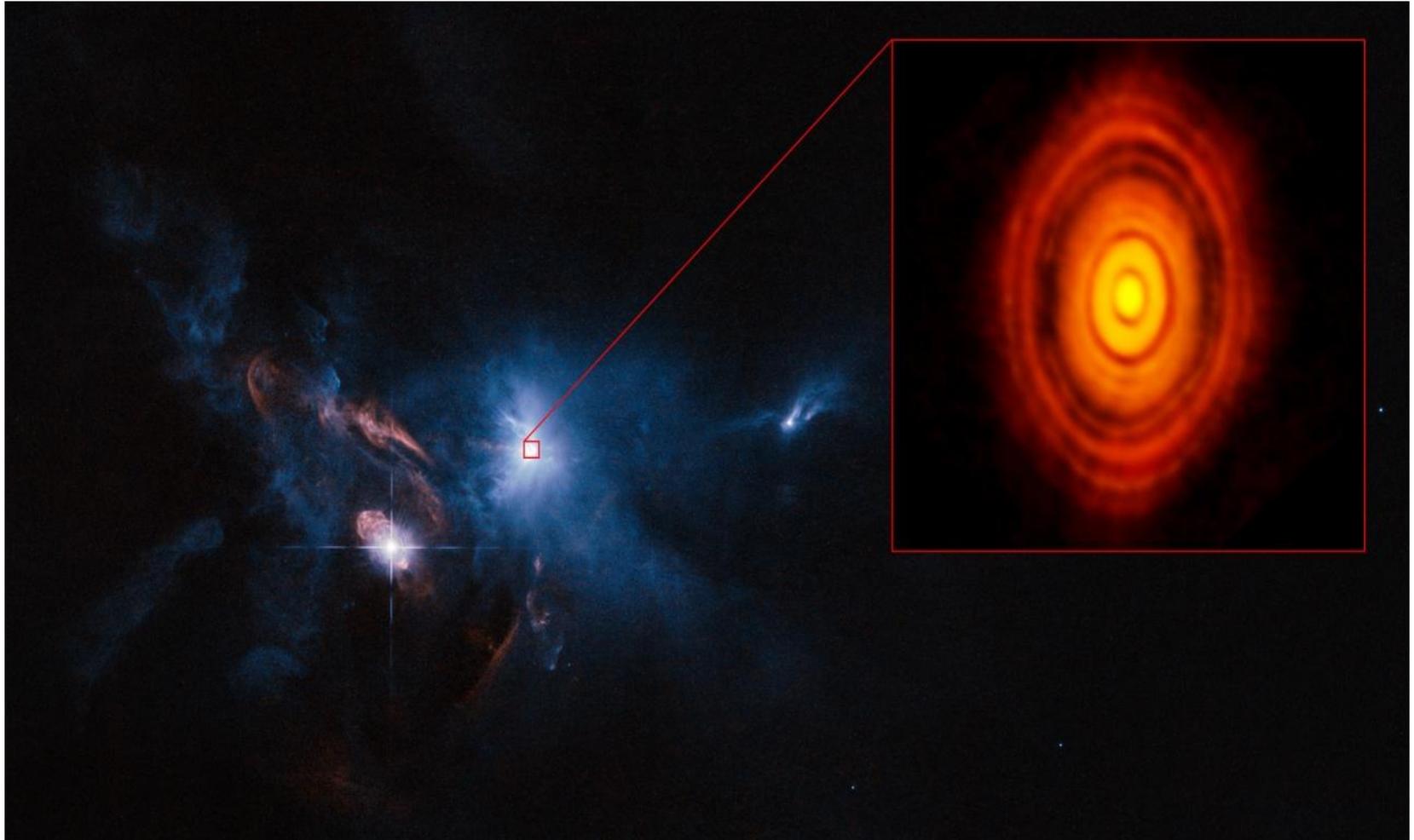
ALMA позволит ученым изучать сложные химические процессы в этих гигантских облаках газа и пыли.



Исследования областей формирования планет в эру **ALMA**

Уже полученные на **ALMA** результаты дают основание ожидать в ближайшие годы замечательные открытия в изучении природы протопланетных и дебрис дисков. С достигнутым уже разрешением в несколько *a.e.*, мы обнаруживаем щели, дыры, волновые структуры в дисках, их сильную асимметрию, излучение различных молекул и пылинок разных масштабов, первые свидетельства существования молодых планет.

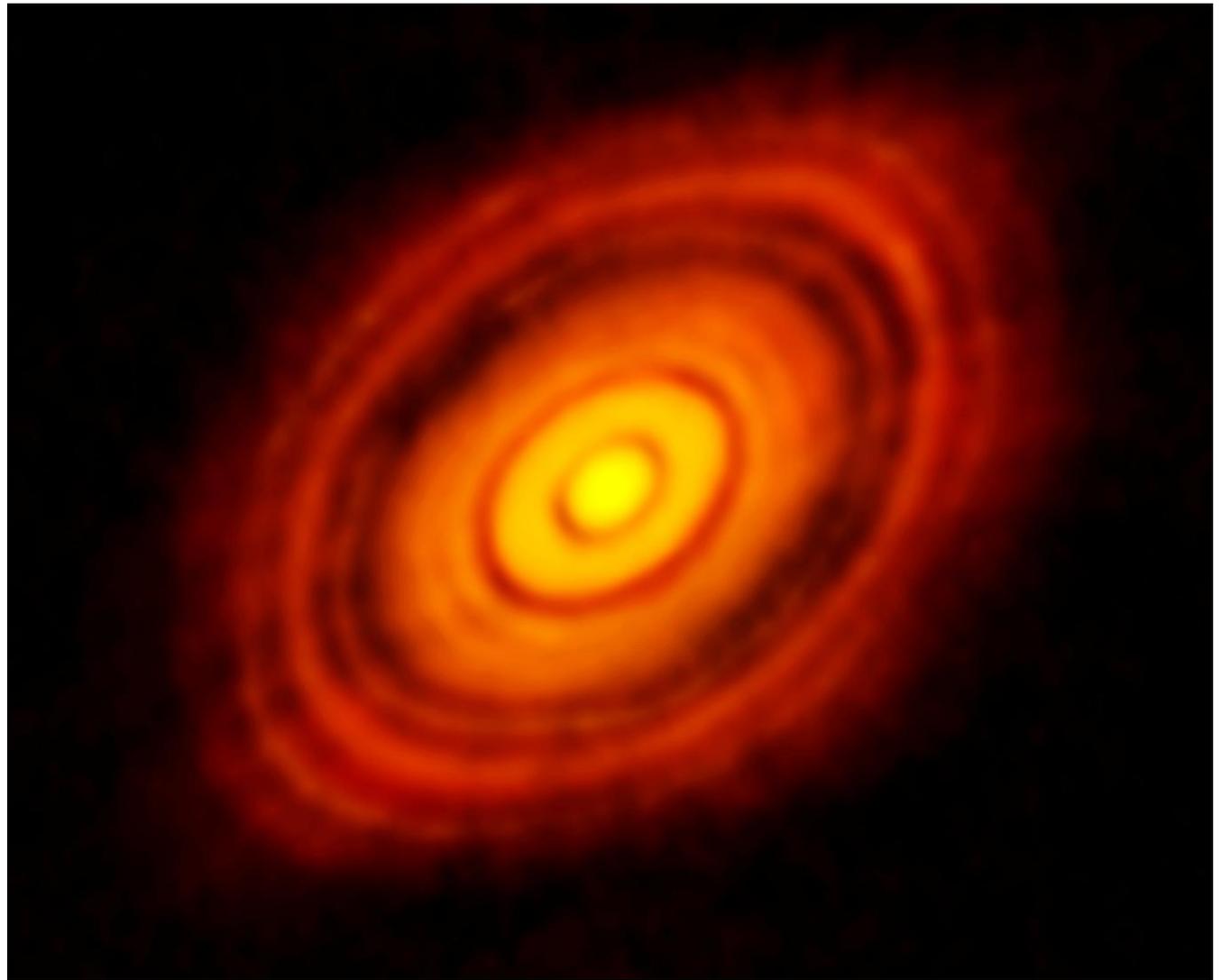
HL Tauri - протопланетный диск



HL Tau и окружающая ее область (снимок HST) и *ALMA* изображение в выделенном квадрате справа



HL Tauri



"When we first saw this image we were astounded at the spectacular level of detail. *HL Tauri* is no more than a million years old, yet already its disk appears to be full of forming planets. This one image alone will revolutionize theories of planet formation."



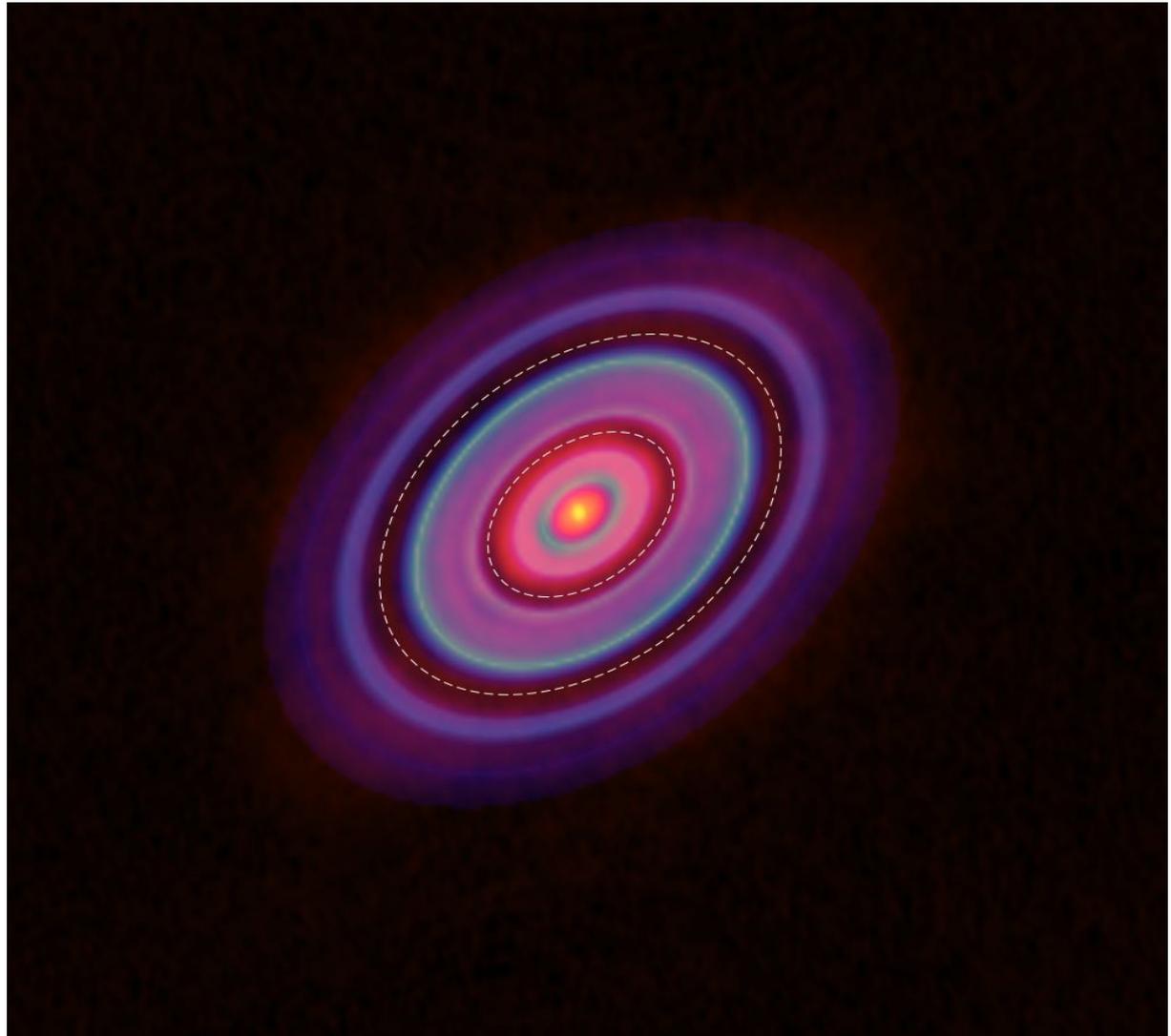
Новый анализ данных ALMA для *HL Tauri* дает большую уверенность в существовании baby planets вокруг звезды.

нет определенного ответа на вопрос о возникновении *gaps* в пылевом диске.

Одни считают, что формирующиеся в этом диске планеты либо стягивают на себя пыль, либо выметают ее вдоль орбиты. Другие сомневаются в этом, указывая, что звезда *HL Tauri* очень молода, всего около миллиона лет, а классическая теория образования планет из диска мелкой пыли требует десятки миллионов лет. Так что механизм образования *gaps* другой, и связан с процессом изменения размеров пылинок из-за слипания или разрушения; либо формирование пыли связано с замерзанием молекулярного газа. Известно, что в дисках вокруг молодых звезд газа примерно в сто раз больше, чем пыли. Так что, ответ на эти вопросы можно искать, наблюдая молекулярные линии в спектре околзвездных дисков.

Такие наблюдения были выполнены в линии NCO^+ . Благодаря высокой чувствительности ALMA и специальной методике были получены уникальные изображения газового диска.

*HL
Tauri*



Распределение HCO^+ газа (голубой) и пыли (красный) в диске. Пунктиром показано положение *gaps*.



HL Tauri

В распределении NCO^+ в диске можно выделить, по крайней мере, два *gaps* в диске на расстоянии 28 и 69 а.у.,

и они совпадают с пылевыми *gaps* ! Это подтверждает идею о том, что

gaps являются следами *baby planets*. Это также свидетельствует, что

В

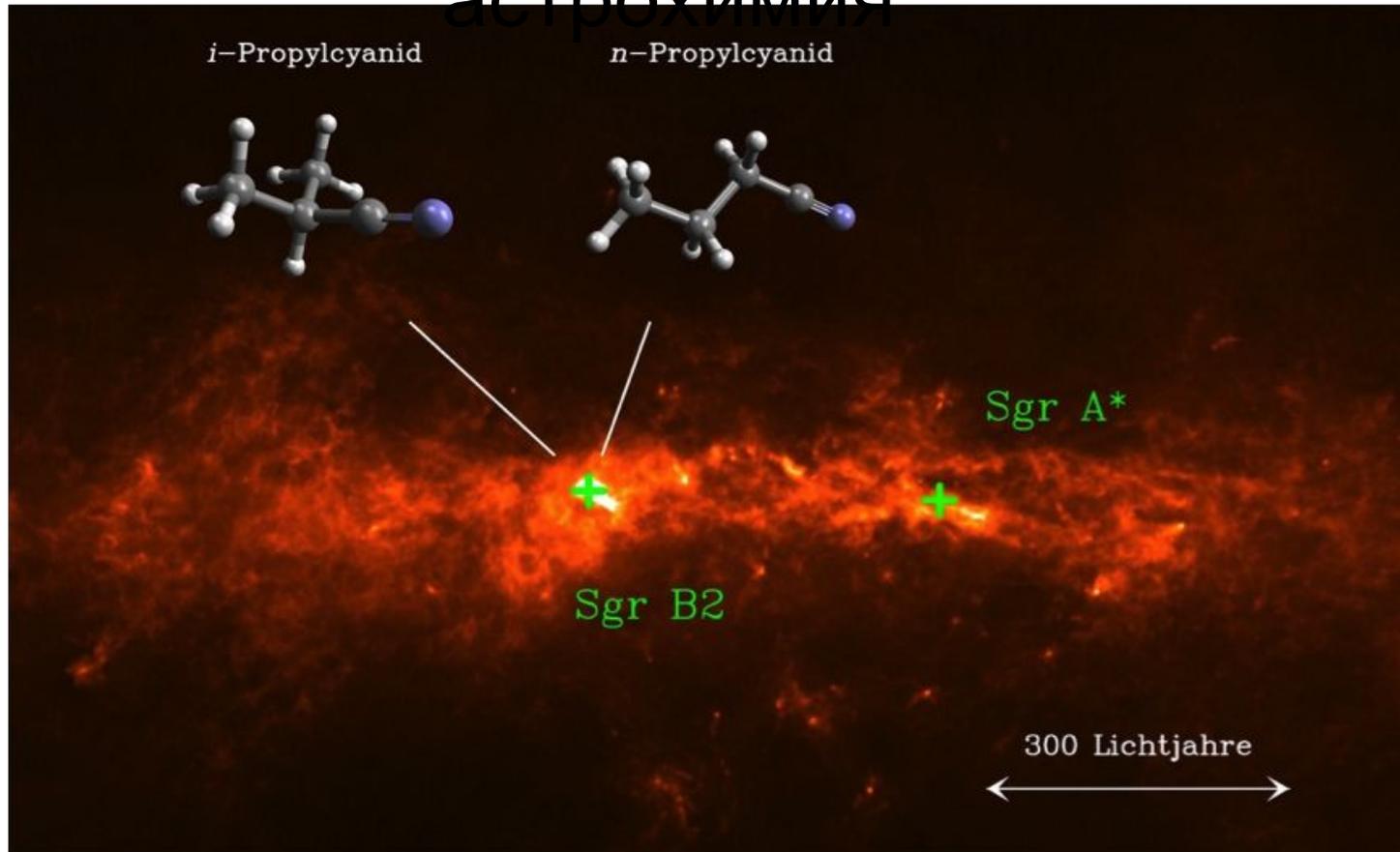
областях *gaps* мало вещества и также поддерживает теорию формирования планет в этом диске, несмотря на очень малый возраст

HL Tauri.

“Our results indicate that planets start to form much earlier than what we expected.” - пишет Hsi-Wei Yen, руководитель команды исследователей.

Оценки массы планеты во внутренней части диска дают значение 0.8 массы Юпитера. Для внешней части, аналогичная оценка дает

ALMA И АСТРОХИМИЯ

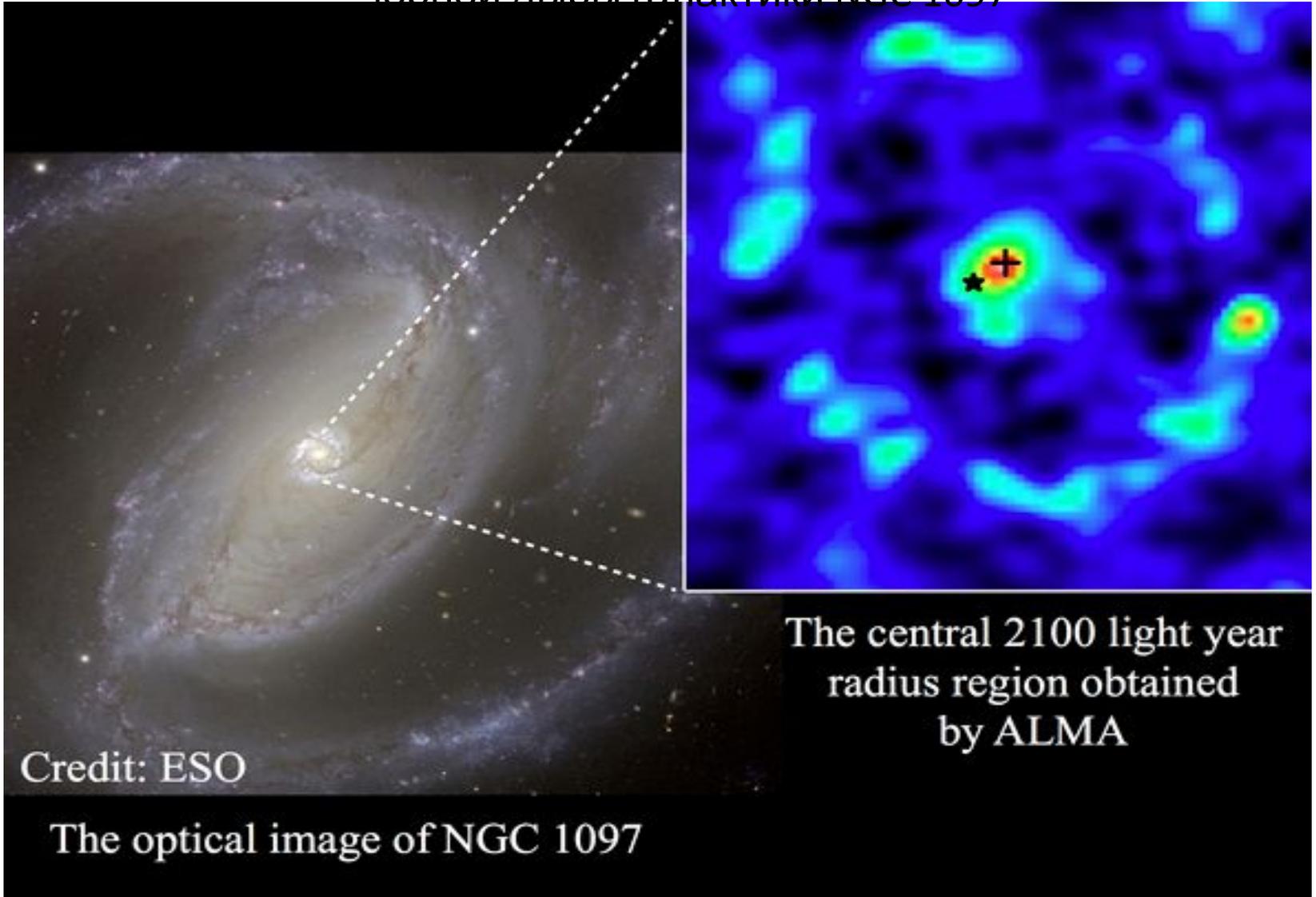


Изображение скомбинировано из наблюдений АРЕХ-телескопа и космической обсерватории Планк на волне 860 мкм. В области звездообразования Sgr B2

ALMA зарегистрировала два изомера органической молекулы



Молекулярные облака **HCN** вокруг центральной
сверхмассивной
черной дыры галактики NGC 1097



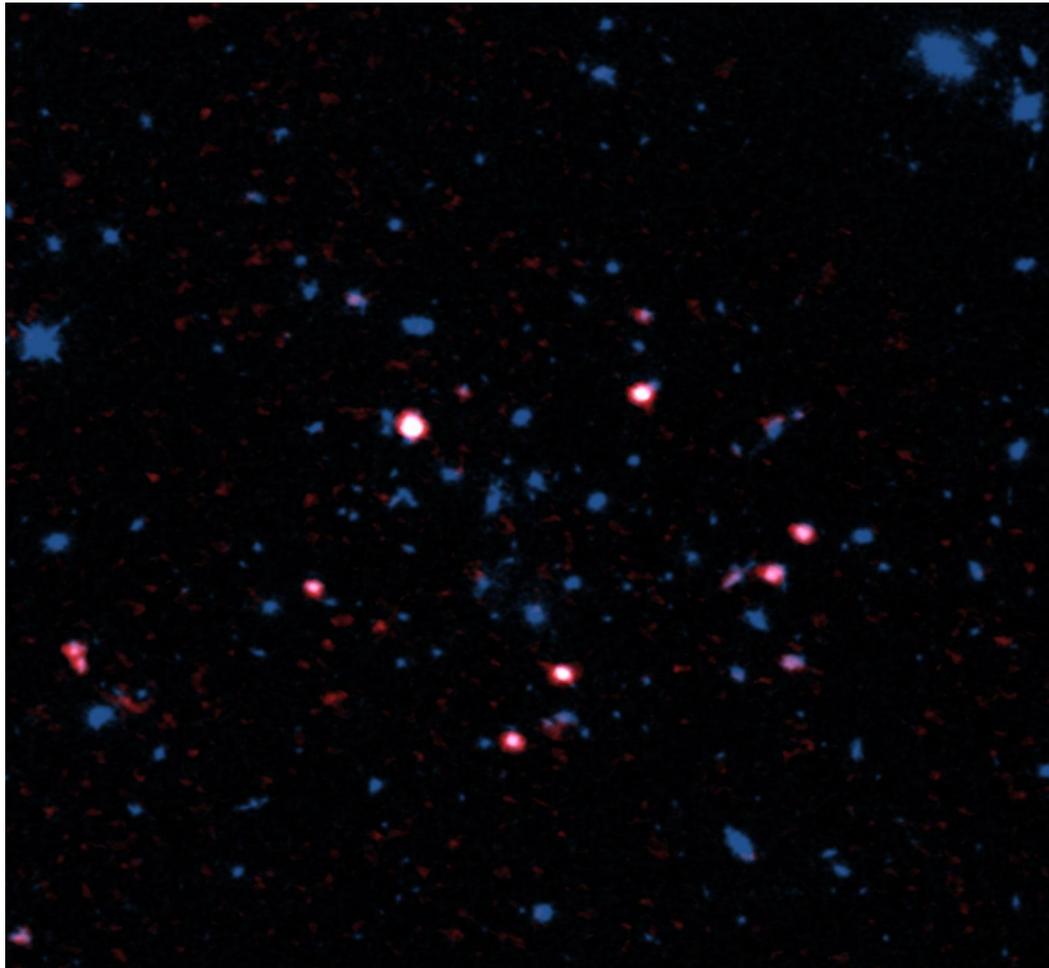
Credit: ESO

The central 2100 light year
radius region obtained
by ALMA

The optical image of NGC 1097



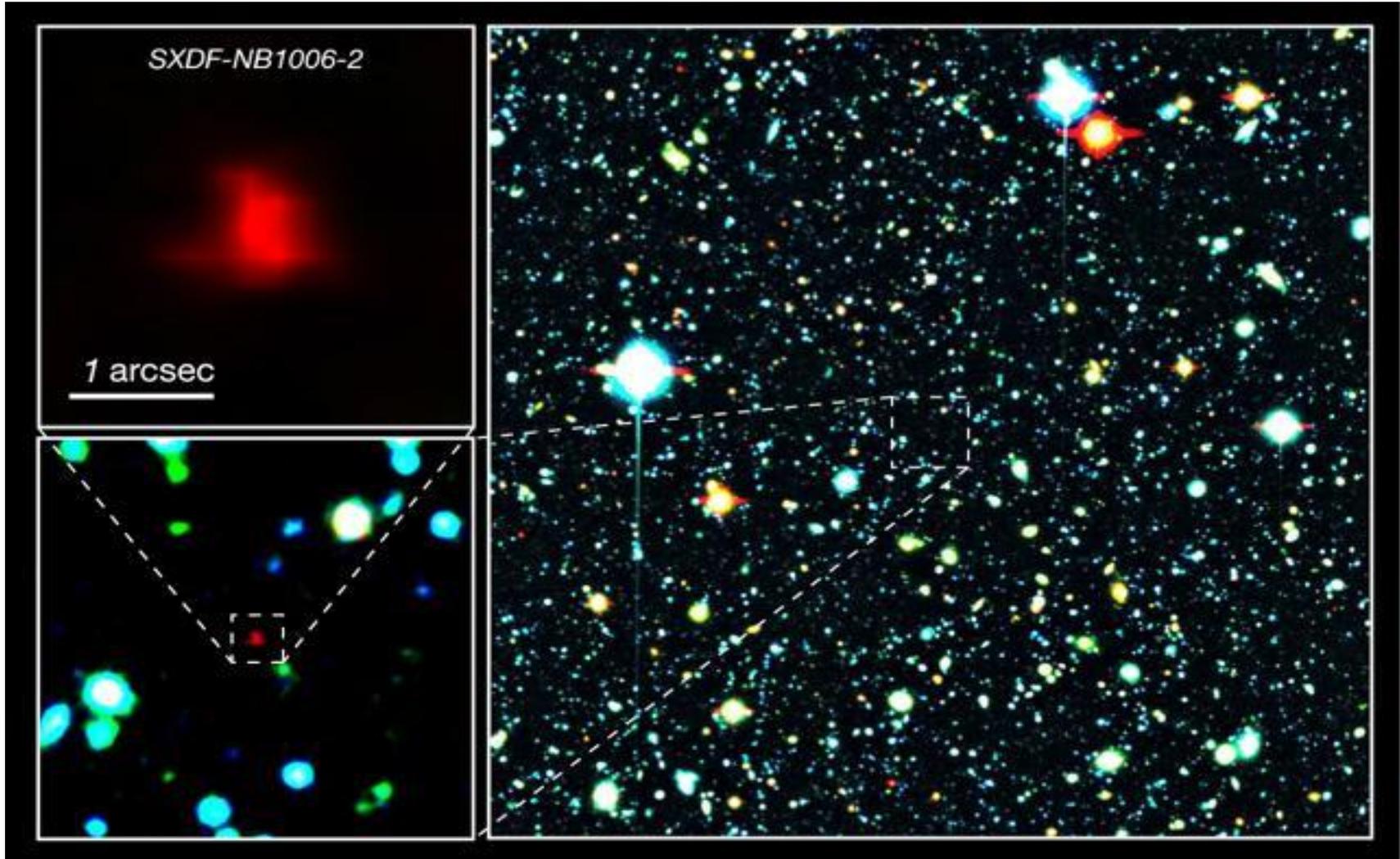
Скопление галактик из хаббловского ультраглубокого поля, которое образовалось 10 млрд лет назад (голубой цвет), и наблюдения на ALMA в линии молекулы **CO** (красный цвет). 17 галактик содержат большое количество холодного газа.

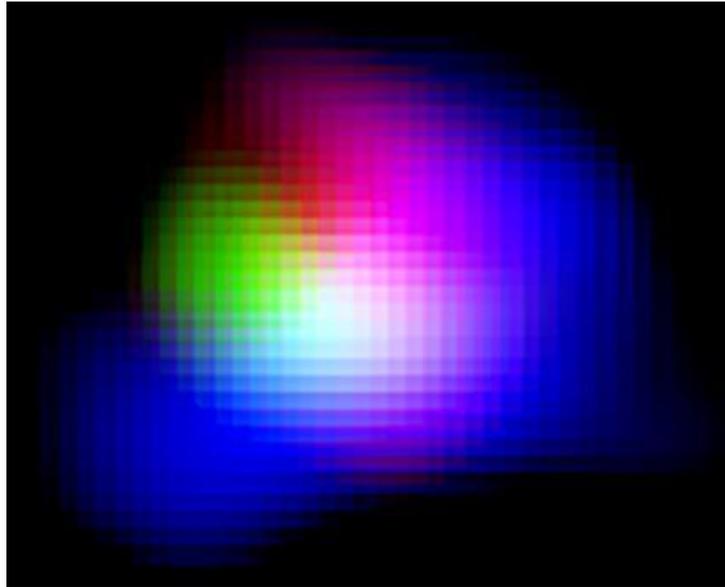


Оказалось, что такие галактики, где идет активный процесс звездообразования, располагаются на периферии скопления. Этот факт отражает характер эволюции скопления.

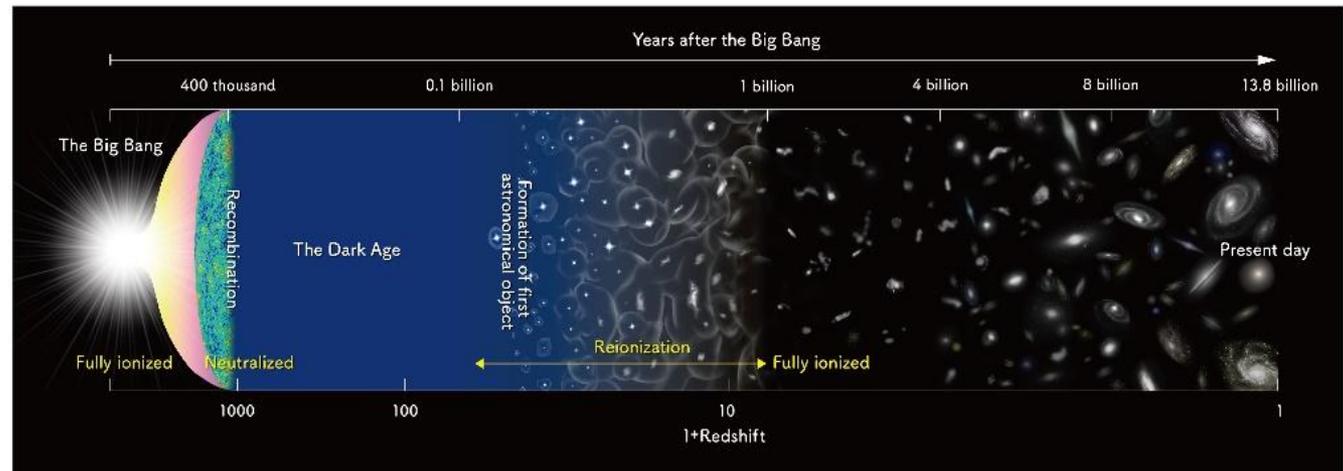


Далекая галактика SXDF-NB1006-2, находящаяся на расстоянии всего 700 млн лет после Большого Взрыва, интересна сильным УФ излучением, которое связывают с наличием значительного числа массивных звезд





Композитное изображение галактики SXDF-NB1006-2, составленное по наблюдениям на **ALMA** и телескопах Subaru и UKIRT: синий цвет – область излучения ионизованного водорода, красный – УФ, зеленый – **ИОНИЗОВАННЫЙ кислород**. Наблюдения ALMA – самое далекое свидетельство существования тяжелых элементов в эпоху реионизации.



Область протозвезды: красный контур в центре – methyl formate
(HCOOCH₃), цветное изображение – carbon sulfide (CS)

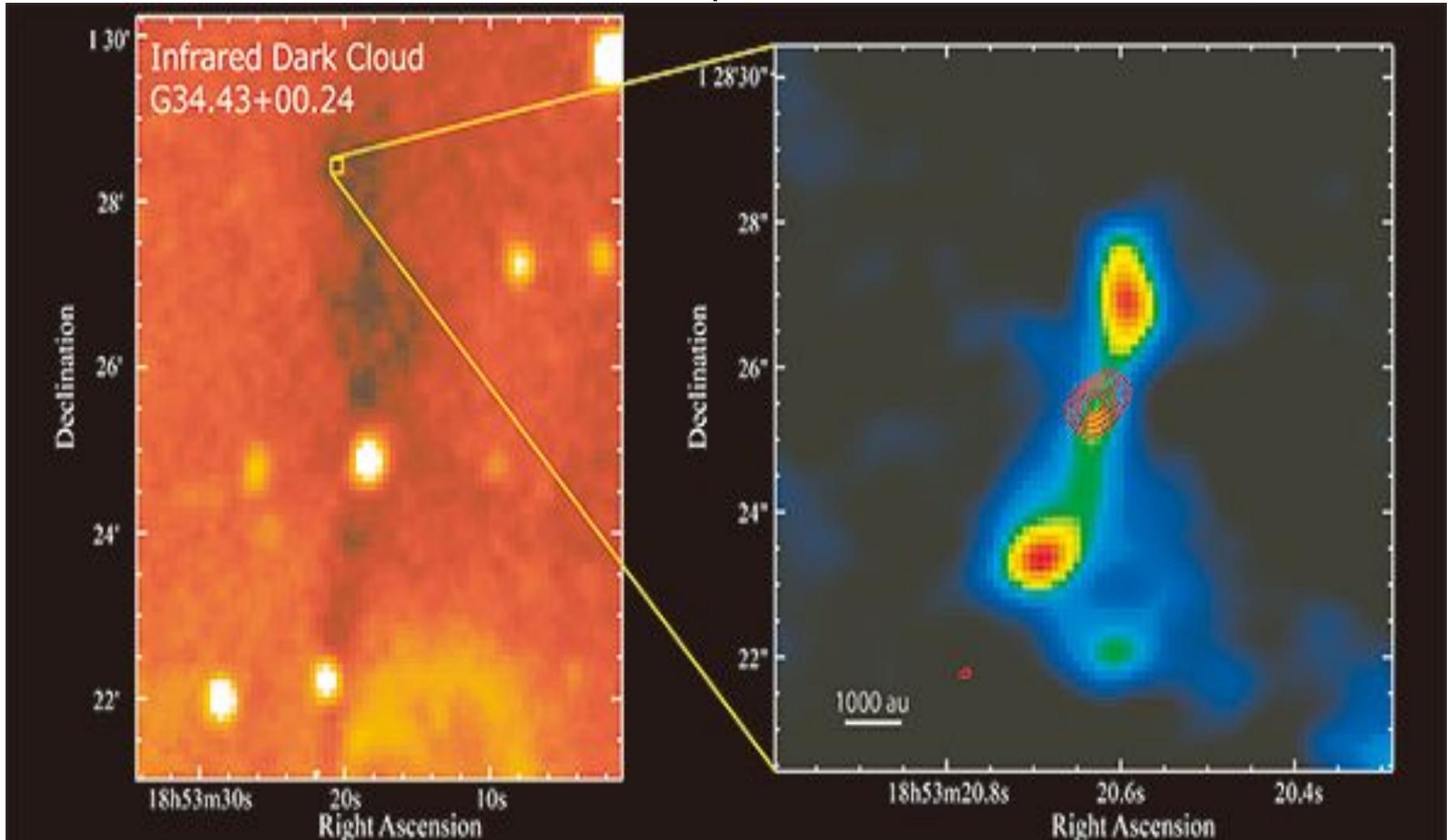
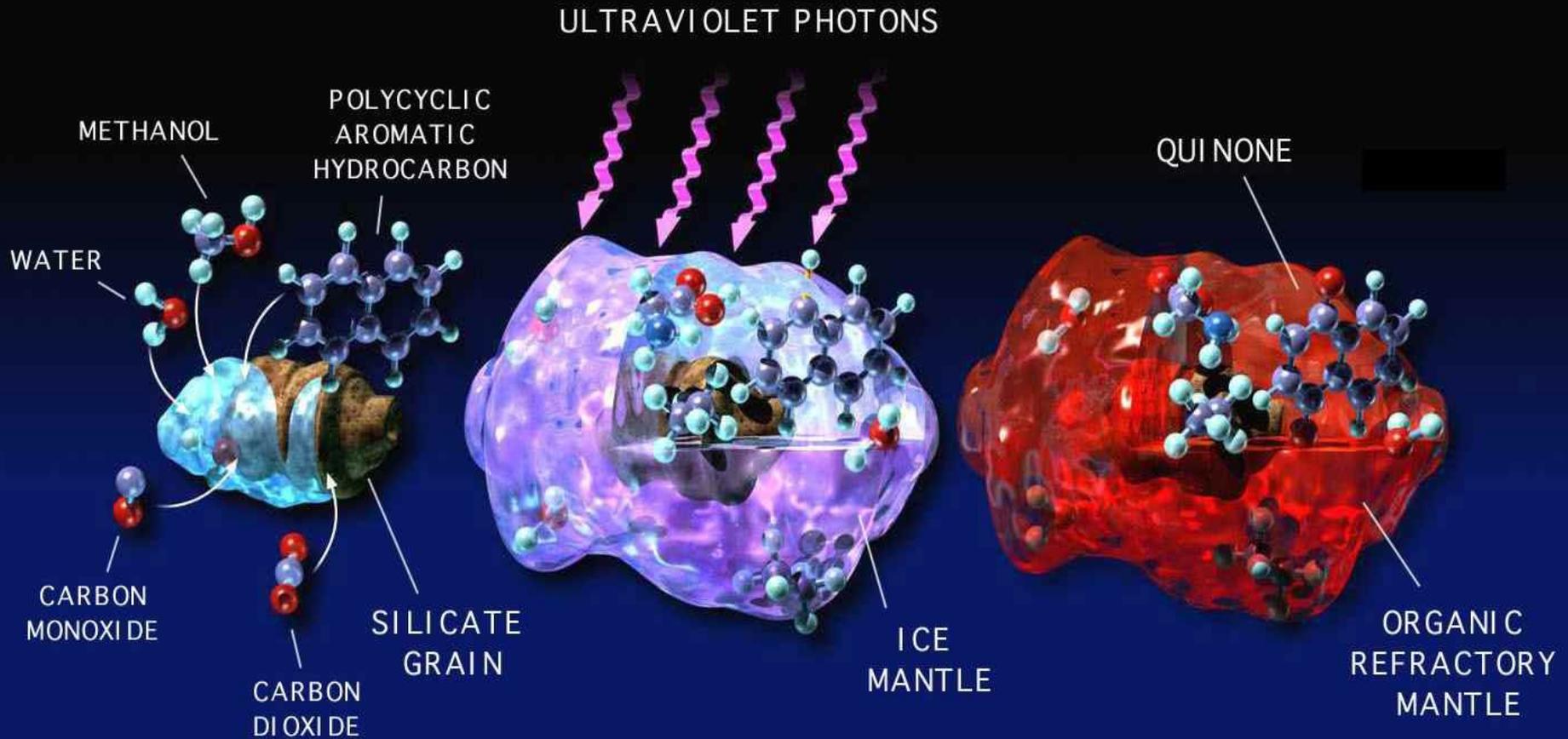


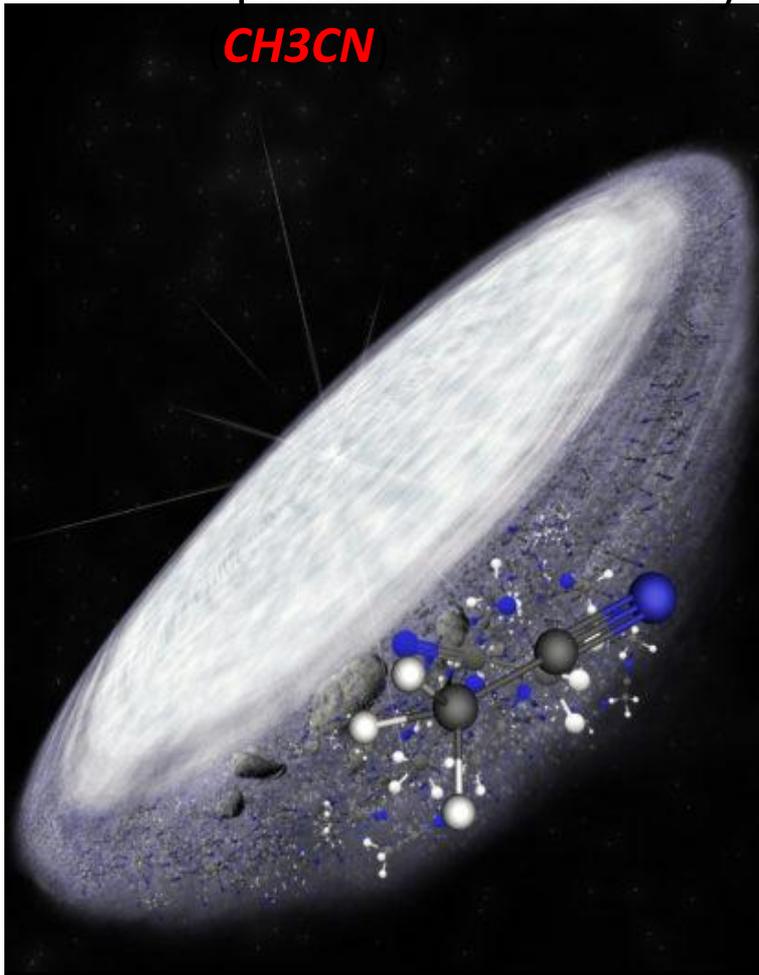
Схема образования сложных молекул в холодных газопылевых областях





Художественное изображение протопланетного диска вокруг звезды

MWC 480, во внешней части которого обнаружены сложные органические молекулы – гидроцианид (**HCN**) и метилцианид



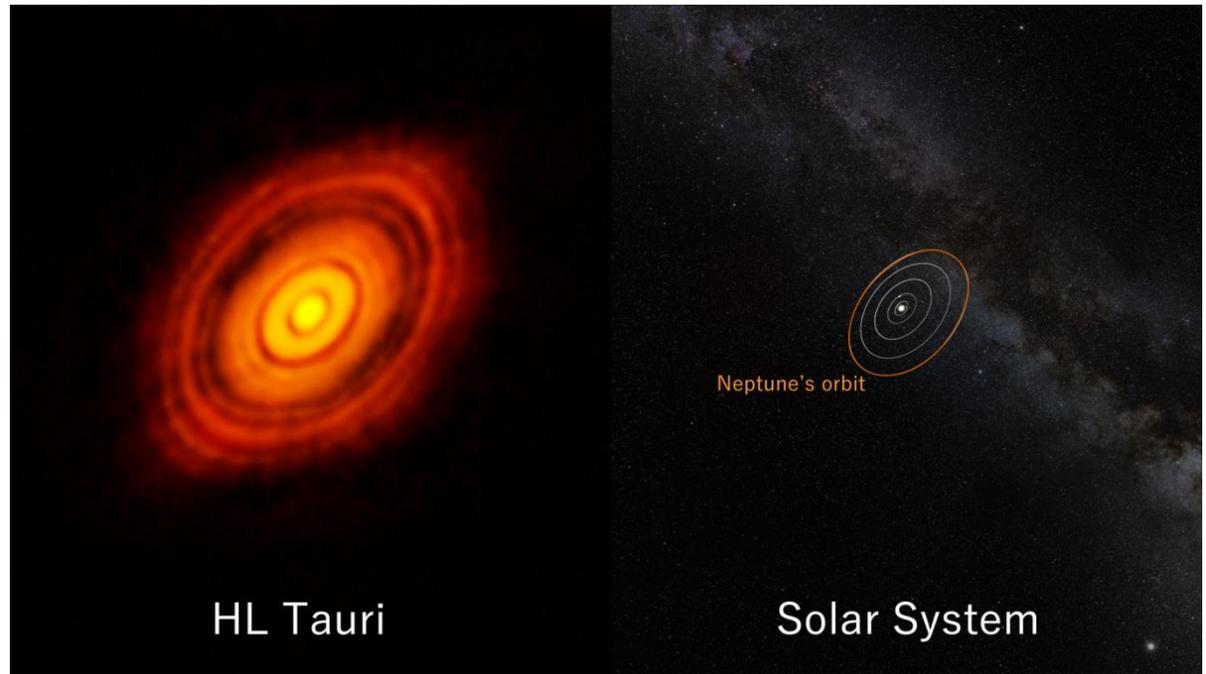
Эта холодная область околозвездного диска аналогична поясу Койпера в нашей солнечной системе, который располагается за пределами орбиты Нептуна и состоит из ледяных планетезималей и комет.

Возможно, что такая структура характерна для протопланетных дисков.

Обнаружение цианидов, и особенно метилцианида, интересно и важно, так как они содержат углерод-азотную группу, существенную для образования аминокислот – основы протеинов



HL Tauri



HL Tauri

Solar System

*"I had never dreamed that at this early phase of operations **ALMA** would image such a vivid picture showing the formation of a planetary system"* told Dr. **Masahiko Hayashi**, the Director General of the National Astronomical Observatory of Japan, who is an astronomer specializing in star and planet formation. *"I learned the Kyoto Model of solar system formation when I was an undergraduate, but never imagined that I would see in my lifetime observations actually revealing such details of the planetary system formation process. I'm now confident that we can move to the next step, the search for signs of life in the Universe. I believe we could find other life-bearing worlds while I am still in this world."*



A large bush of pink Astilbe flowers in a garden. The flowers are in full bloom, creating a dense, feathery display of light pink color. The foliage is dark green and glossy. The background is dark, suggesting a shaded garden area. The text "Спасибо за внимание" is overlaid on the lower part of the image.

Спасибо за
внимание