

**Лекция 3**  
**Всеволновая**  
**астрономия**  
**ФФ НГУ, 2024**



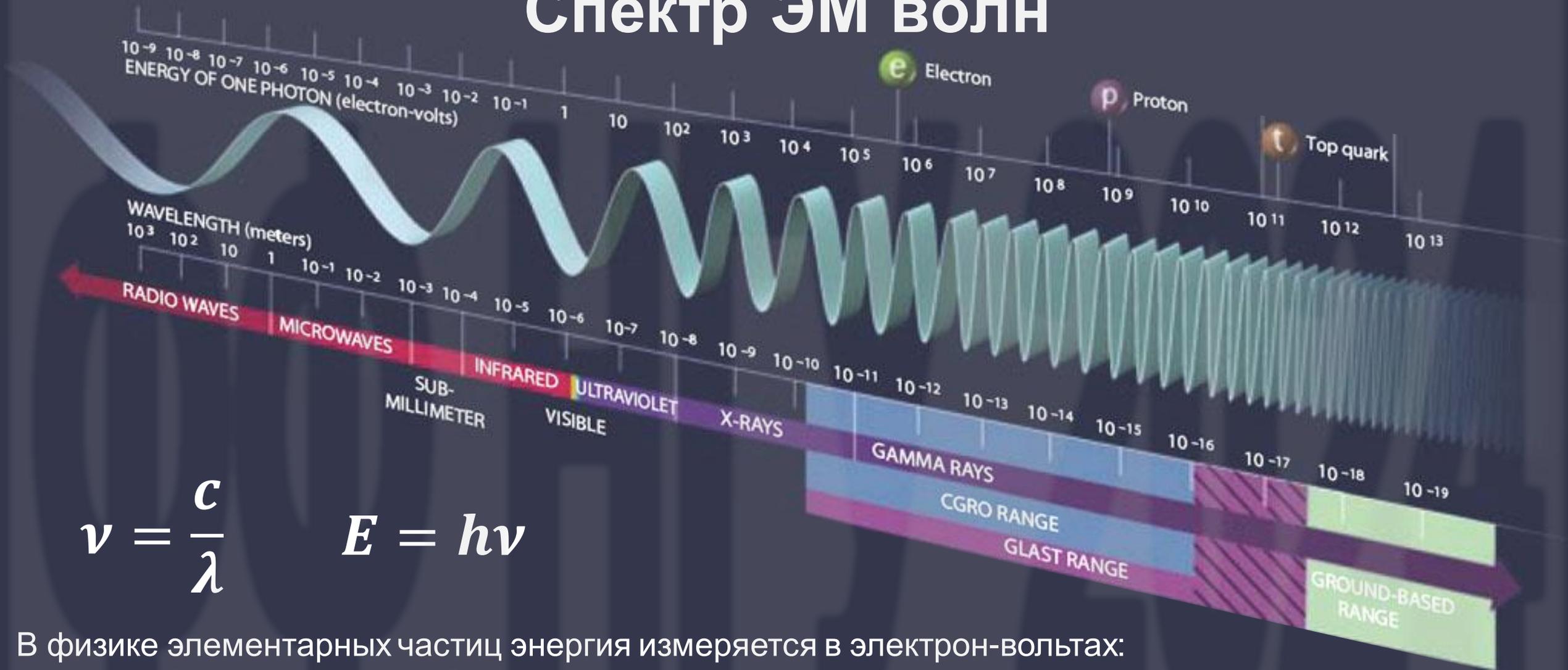
# Зачем?

Различные физические процессы проявляют себя в разных диапазонах спектра.

Межзвездное пространство, несмотря на свою разреженность, не пусто, и тоже поглощает ЭМ излучение. Интенсивность поглощения зависит от длины волны – среда, непрозрачная в одной области спектра может быть практически прозрачной в другой. Это дает возможность получать информацию о происходящих там скрытых процессах.

Мы не можем влиять на эксперимент, только наблюдать результат. Чтобы получить максимально полное и правильное представление об объекте и протекающих там процессах, необходим максимум возможной информации.

# Спектр ЭМ волн



$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad E = h\nu$$

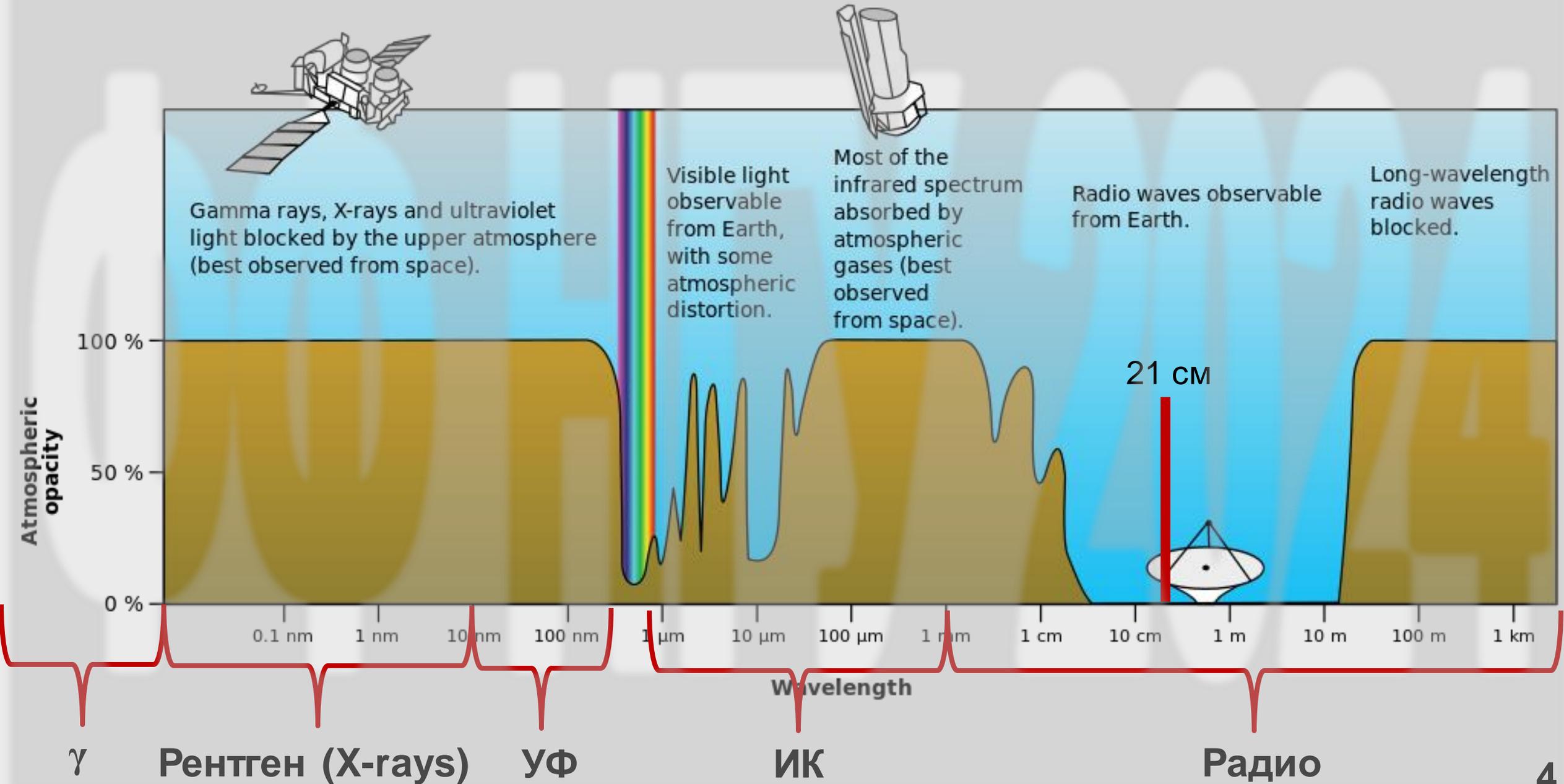
В физике элементарных частиц энергия измеряется в электрон-вольтах:

1эВ = энергия, приобретаемая электроном, при прохождении разности потенциалов 1 В, т.е.  $1 \text{ эВ} = qU = 1.602 \times 10^{-19}$  Дж.

Тогда из соотношения  $E = kT$  получаем,  $1 \text{ эВ} \approx 11600$  °К.

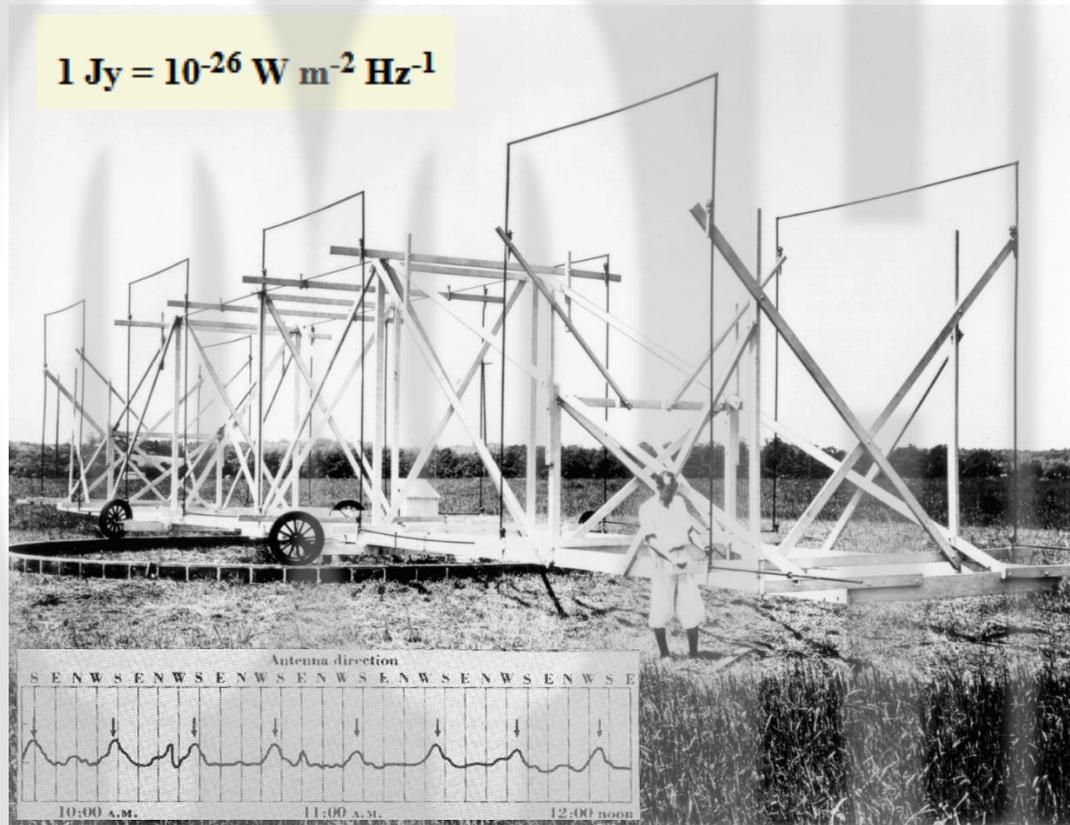
$\lambda = 500 \text{ нм} \sim E = 2.5 \text{ эВ}$ .

# Поглощение ЭМ волн в атмосфере Земли



# Рождение радиоастрономии

В начале 1930-х годов Карлу Янски (Karl Jansky), молодому инженеру компании Bell Laboratories, было поручено выяснить происхождение шумов в транс-атлантической линии радиопередач на длине волны 14 м.



## NEW RADIO WAVES TRACED TO CENTRE OF THE MILKY WAY

Mysterious Static, Reported  
by K. G. Jansky, Held to  
Differ From Cosmic Ray.

DIRECTION IS UNCHANGING

Recorded and Tested for More  
Than Year to Identify It as  
From Earth's Galaxy.

ITS INTENSITY IS LOW

Only Delicate Receiver is Able to  
Register—No Evidence of  
Interstellar Signaling.

Discovery of mysterious radio  
waves which appear to come from  
the centre of the Milky Way galaxy  
was announced yesterday by the  
Bell Telephone Laboratories. The  
discovery was made during re-  
search studies on static by Karl G.  
Jansky of the radio research de-  
partment at Holmdel, N. J., and  
was described by him in a paper

В результате своих исследований он выяснил, что источник помех имеет внеземное происхождение, а именно – центр нашей галактики Млечный Путь.

# Рождение радиоастрономии

Грот Рёбер (Grote Reber) – инженер радиолюбитель построил в 1937 году первый радиотелескоп (9.5 м) во дворе своего дома.

В 1941-1943 годах провел первый радиообзор неба и открыл несколько ярких радиоисточников (Cas A, Cyg A)

Профессиональной радиоастрономия стала только после Второй мировой войны.

Два типа радиотелескопов –  
«тарелки» и «рогульки».  
(С. Попов)



# Радиотелескоп

Угловое разрешение радиотелескопа определяется тем же соотношением, что и в оптике.

$$\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

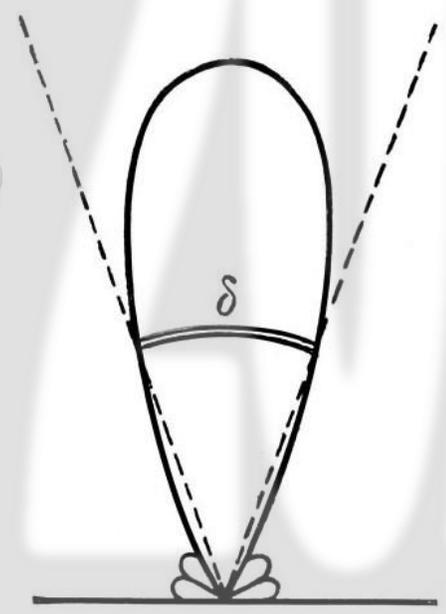
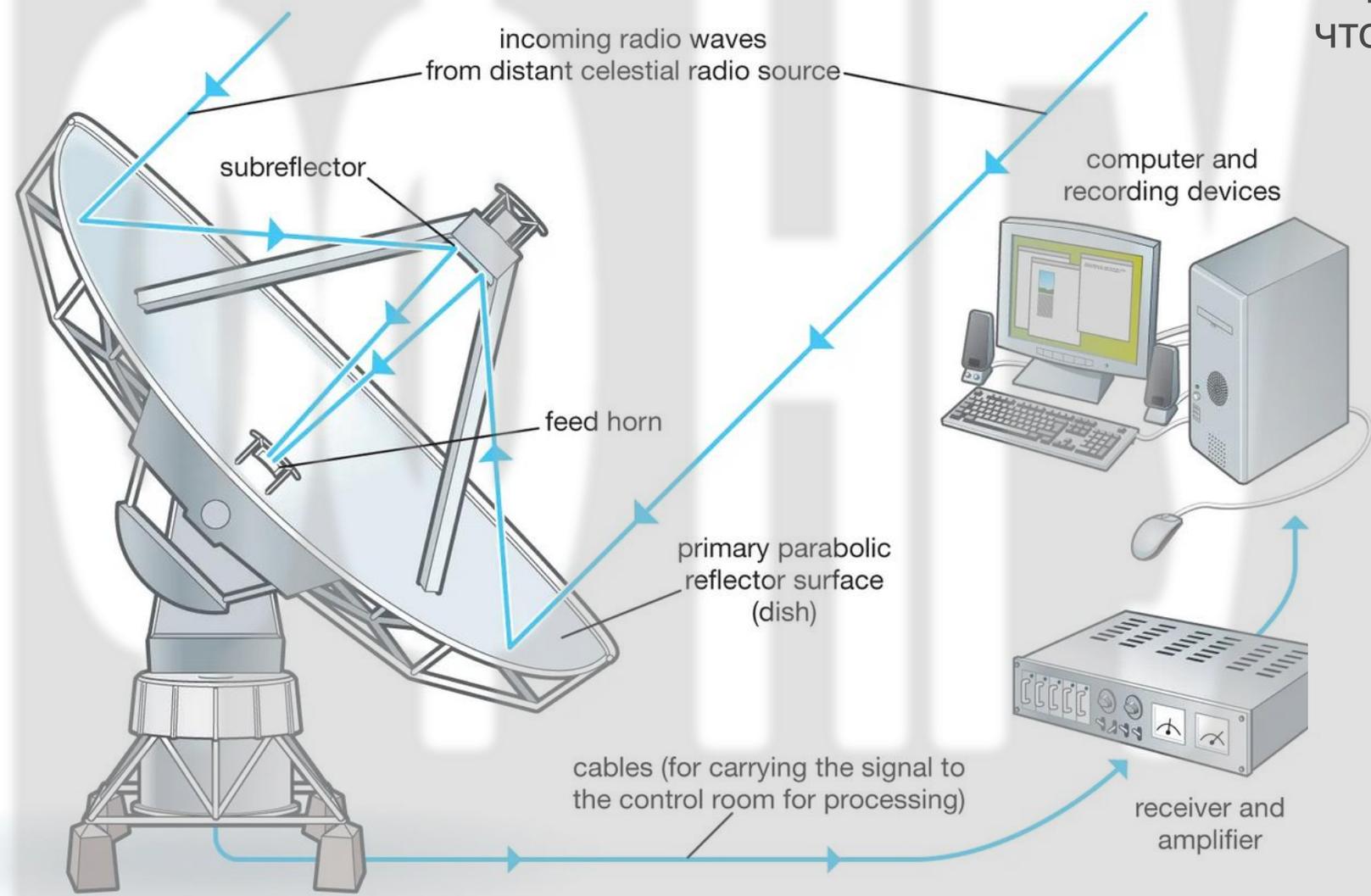
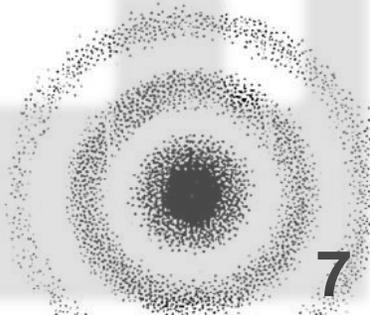
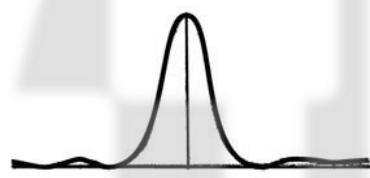


Диаграмма направленности параболической антенны

Функция рассеяния точки (ФРТ, PSF) круглой апертуры

диск Эри  
кольца Эри



# Радиотелескопы

Размеры радиотелескопов тарелочного типа очень быстро росли и достигли своего предела ( $D \sim 100$  м).

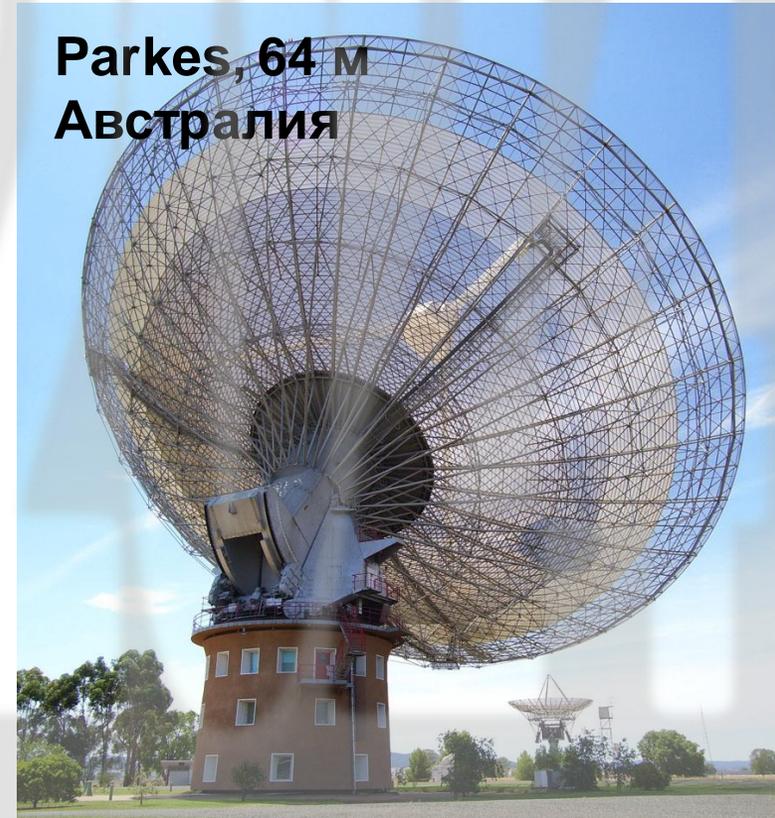
**Приморье, 70 м  
СССР (3 штуки)**



**Green Bank, 100 м  
США**



**Parkes, 64 м  
Австралия**



# Радиотелескопы

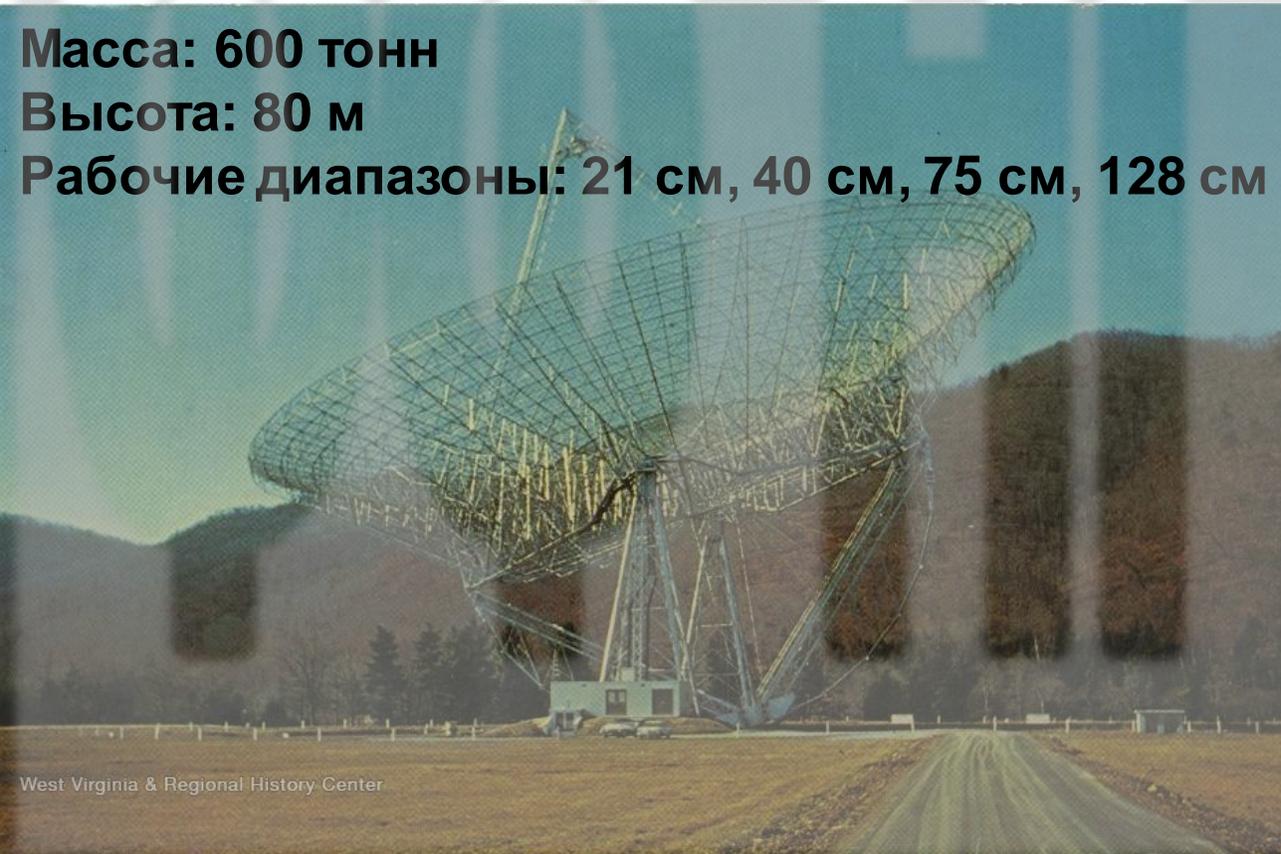
При увеличении размеров быстро возрастала сложность конструкции и системы управления из-за роста массы и потери устойчивости.

**Green Bank, 100 м (300 feet), США. Крупнейший телескоп своего времени на экваториальной монтировке. 1962 – 1988.**

**Масса: 600 тонн**

**Высота: 80 м**

**Рабочие диапазоны: 21 см, 40 см, 75 см, 128 см**



# Радиотелескоп ARESIBO

Введен в строй в 1963 году  
Место: Пуэрто Рико  
Диаметр: 305 м  
До 2016 года – крупнейший радиотелескоп

# Радиотелескоп ARESIVO: RIP

An aerial photograph of the Arecibo radio telescope dish, showing significant damage to the central suspension system and the surrounding structure. The dish is surrounded by dense green forest. In the background, there are some buildings and a tall tower.

В 2020 году произошло разрушение подвесной системы и ее падение в чашу телескопа.

Восстановлению не подлежит.

# Радиотелескоп FAST

Введен в строй в 2016 году  
Место: Китай  
Диаметр: 500 м

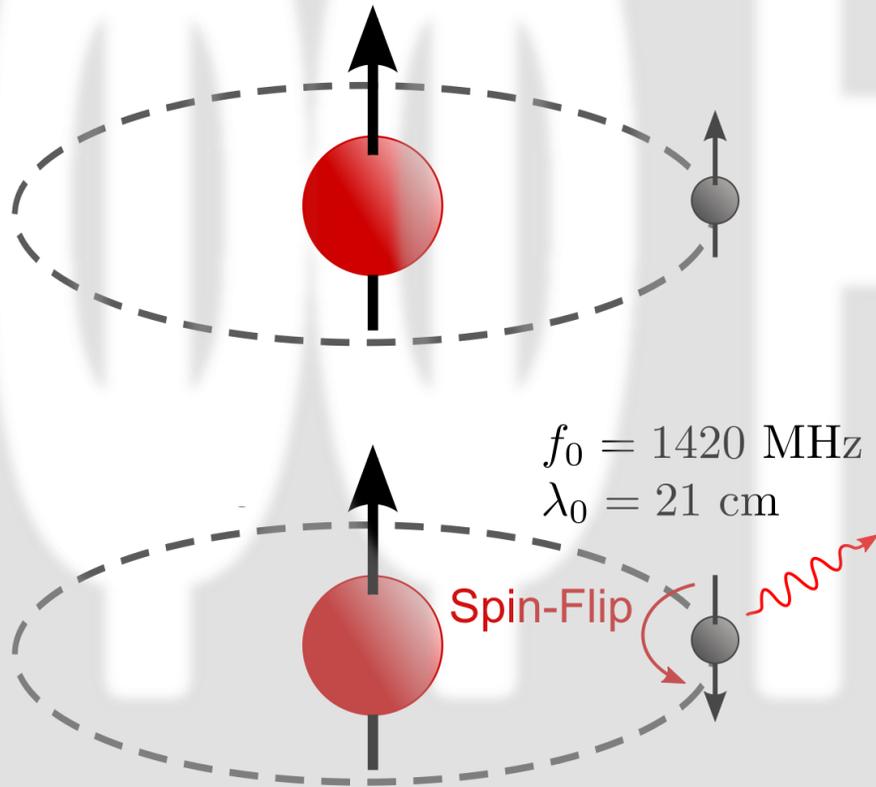
# Радиотелескоп РАТАН-600

*Обсерватория «Зеленчукская», Северный Кавказ,  
Карачаево-Черкесия, Россия.*

**Диаметр: 576 м**  
**Диапазон волн: 0.8 – 50 см**  
**Разрешение: ~5''**  
**Введен в строй в 1974 году**

# Радиодиапазон 1420 МГц (21.1 см)

Особенно важной частотой в радиоастрономии является 1420 МГц – частота излучения атомарного водорода.

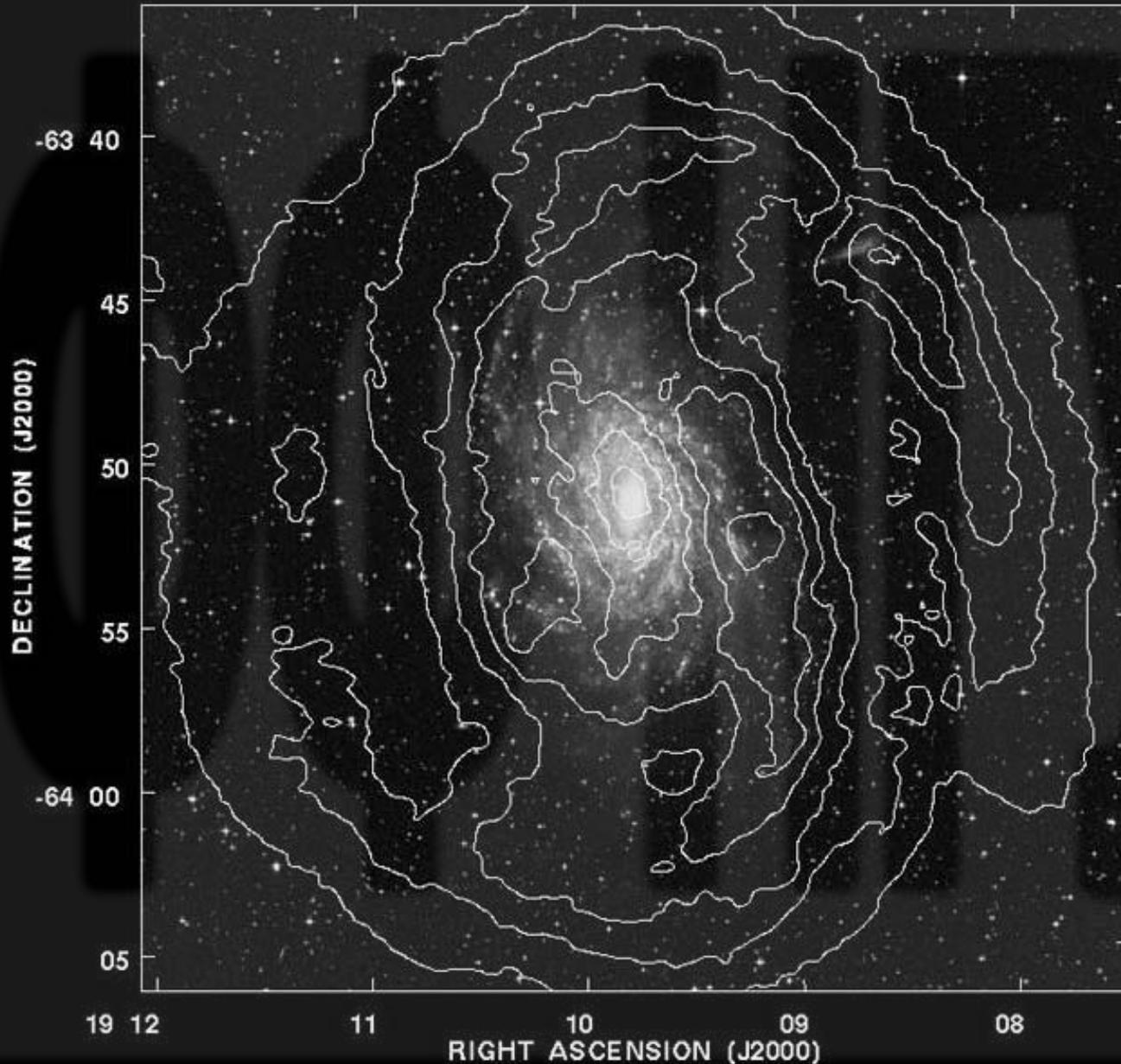


Переход идет за счет магнито-дипольного излучения и в лаборатории в нормальных условиях не наблюдается – возбуждение снимается за счет соударения молекул. Время жизни  $\sim 3 \times 10^{14}$  с (метастабильный уровень).

В межзвездном пространстве водород находится преимущественно в атомарном состоянии и при низкой температуре ( $\sim 10 - 50$  К) и очень малой концентрацией.

Эта частота попадает в радио окно прозрачности атмосферы Земли.

# Радио + оптика



$$\delta\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

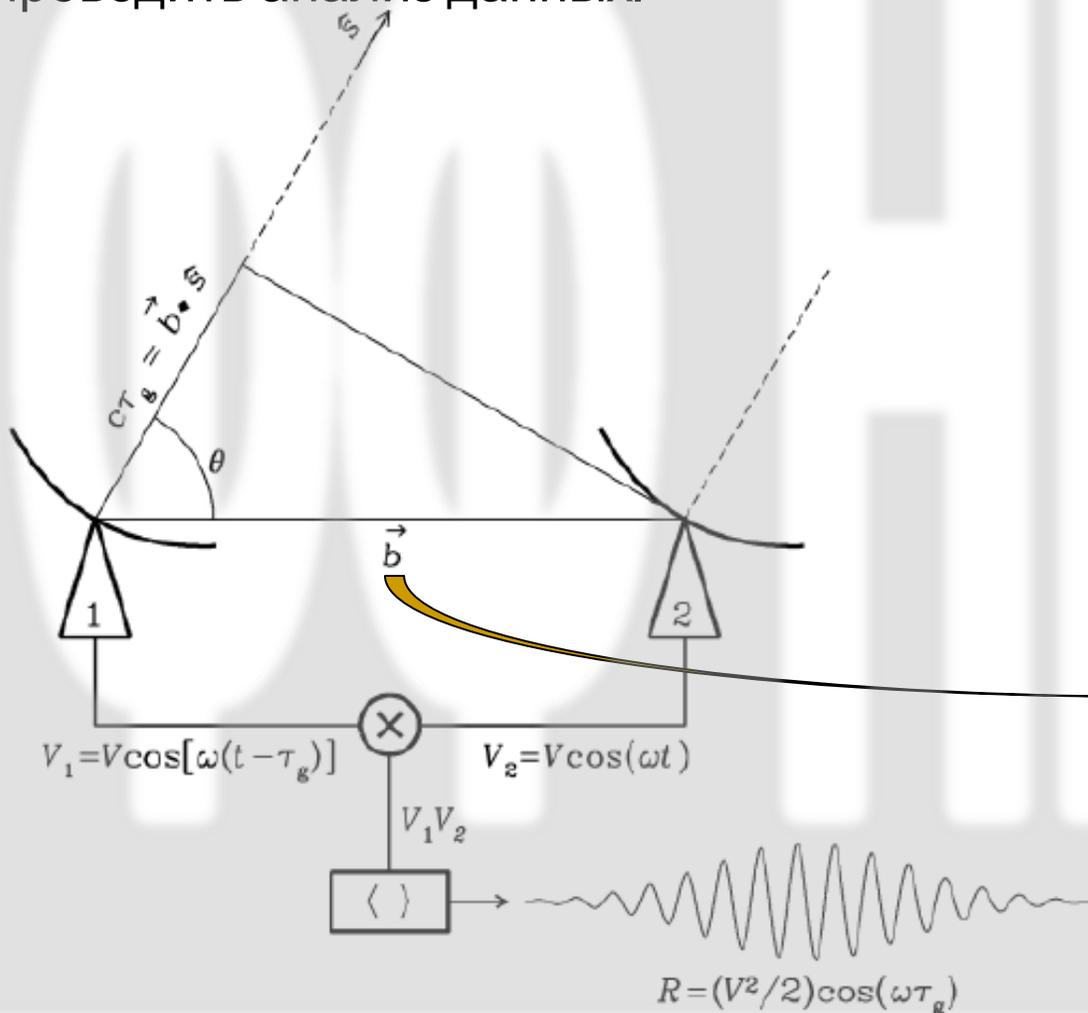
При наблюдениях на длине волны 21 см даже с крупнейшим радио-телескопом разрешение всего

$$\delta\theta = 1.22 \frac{0.21}{500} \approx 1.8'$$

то есть хуже, чем у глаза человека в оптическом диапазоне! При таком низком разрешении сложно проводить надежную идентификацию точечных объектов с их оптическим изображением.

# Радио-интерферометры

Принципиальным отличием от оптики, однако, является то, что мы можем записывать (измерять) не только амплитуду, но и фазу радио волны! Нет необходимости непосредственно объединять радио-телескопы, запись информации можно производить отдельно для каждого и потом проводить анализ данных.



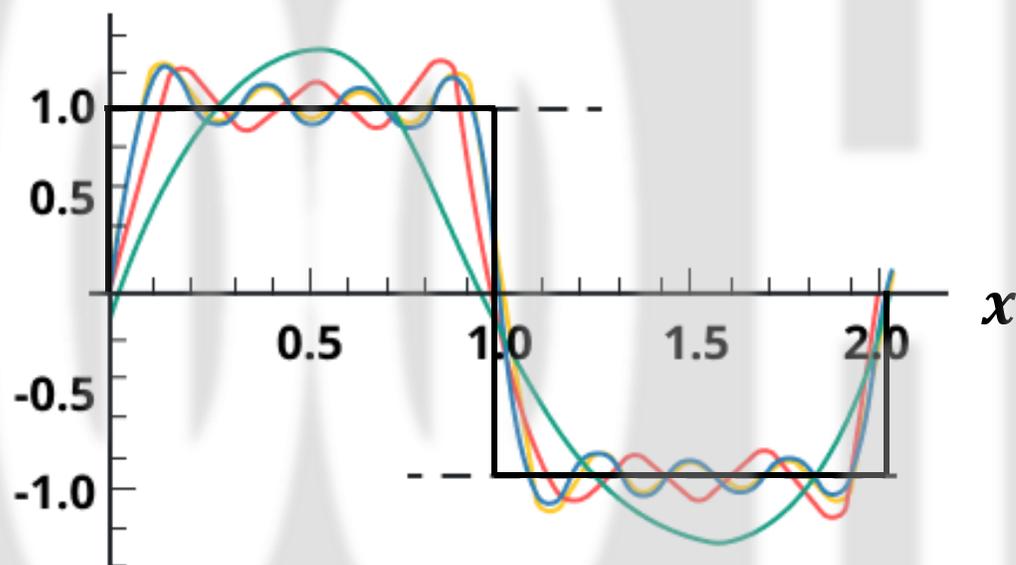
При интерферометрии разрешение системы резко повышается в направлении, соединяющем два телескопа (вектор  $b$  на рисунке).

$$\delta\theta = 1.22 \frac{\lambda}{b}$$

В зависимости от направления на источник меняется эффективная база интерферометра, а значит меняется его разрешение.

# Ряды Фурье

Любую (почти) периодическую, с периодом  $L$ , функцию можно представить в виде ряда по гармоническим функциям.



$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \right]$$

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) dx$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx$$

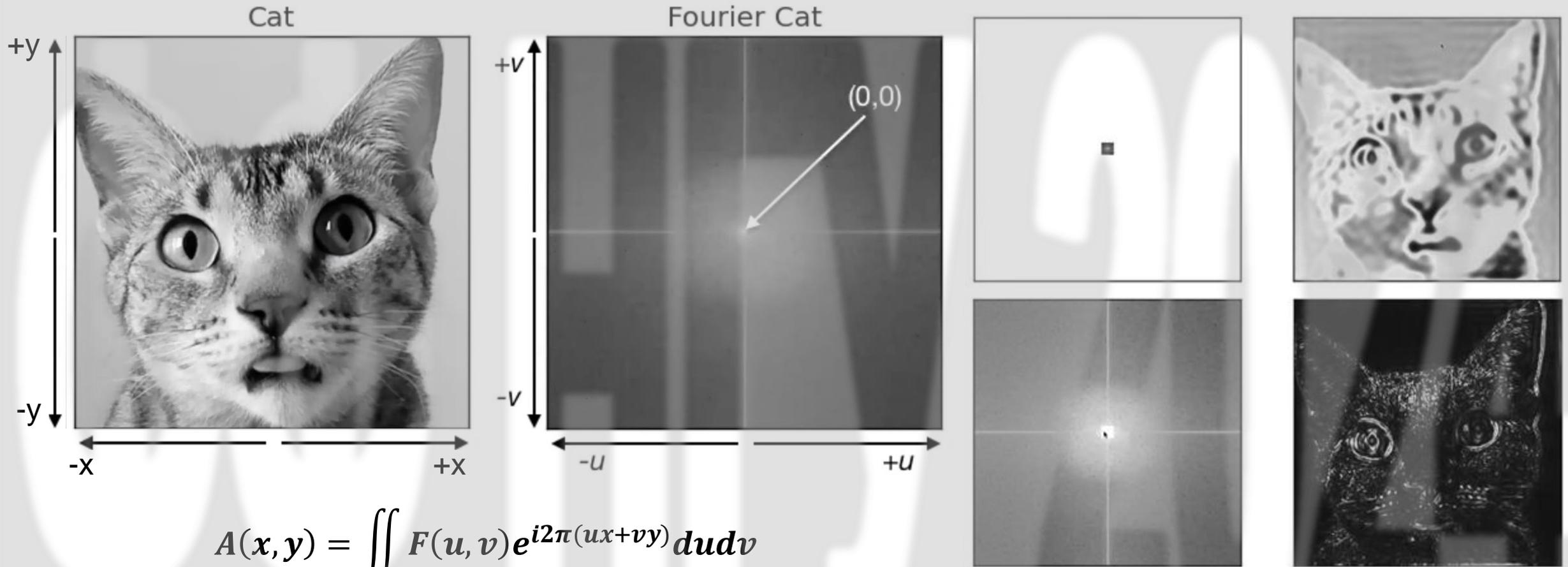
$$b_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx$$

Непрерывное преобразование Фурье является обобщением на случай  $L \rightarrow \infty$ :

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(k) e^{i2\pi kx} dk$$

$$F(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i2\pi kx} dx$$

# 2D Фурье преобразование



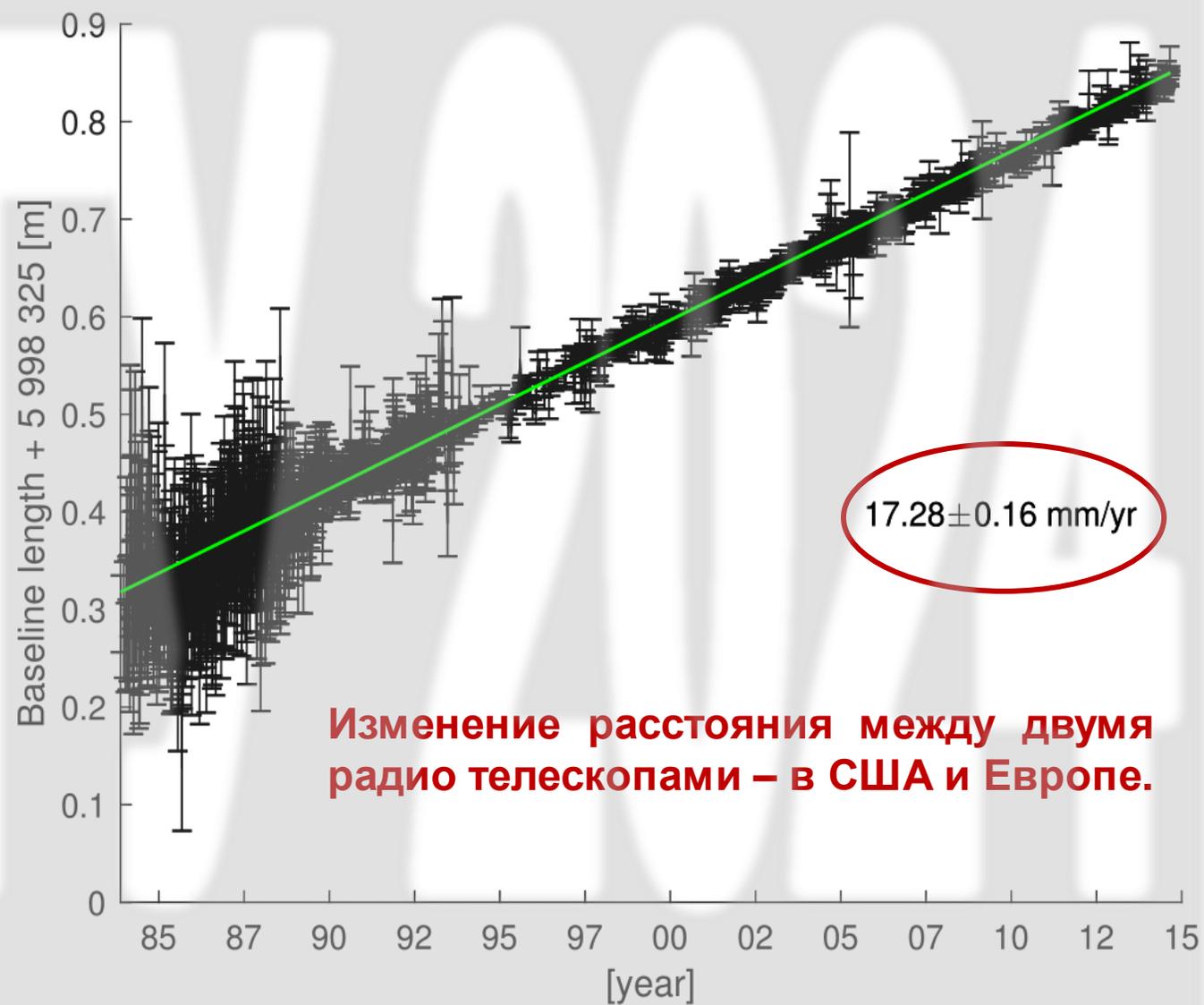
В интерферометрических измерениях непосредственно измеряется (**неполный**) 2D Фурье образ  $F(u, v)$  исходного изображения в  $u$ - $v$  плоскости. Само изображение  $A(x, y)$  восстанавливается обратным Фурье преобразованием. Полнота Фурье образа определяется степенью покрытия – множеством всех доступных для интерферометра баз.

# Апертурный синтез

Для реализации радиоинтерферометра на (сверх)длинных базах, необходимо знать и контролировать взаимное положение и синхронизацию часов телескопов, находящихся на разных континентах, с точностью лучше доли длины волны ( $10^{-12}$  с)!

При такой точности измерений, необходимо учитывать множество факторов, включая относительное движение материков!

Апертурный синтез — очень сложная техническая и математическая задача...



**Изменение расстояния между двумя радио телескопами – в США и Европе.**

# Апертурный синтез

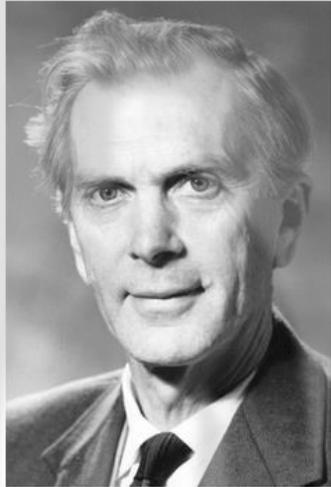


Photo from the Nobel Foundation archive.  
Sir Martin Ryle  
Prize share: 1/2

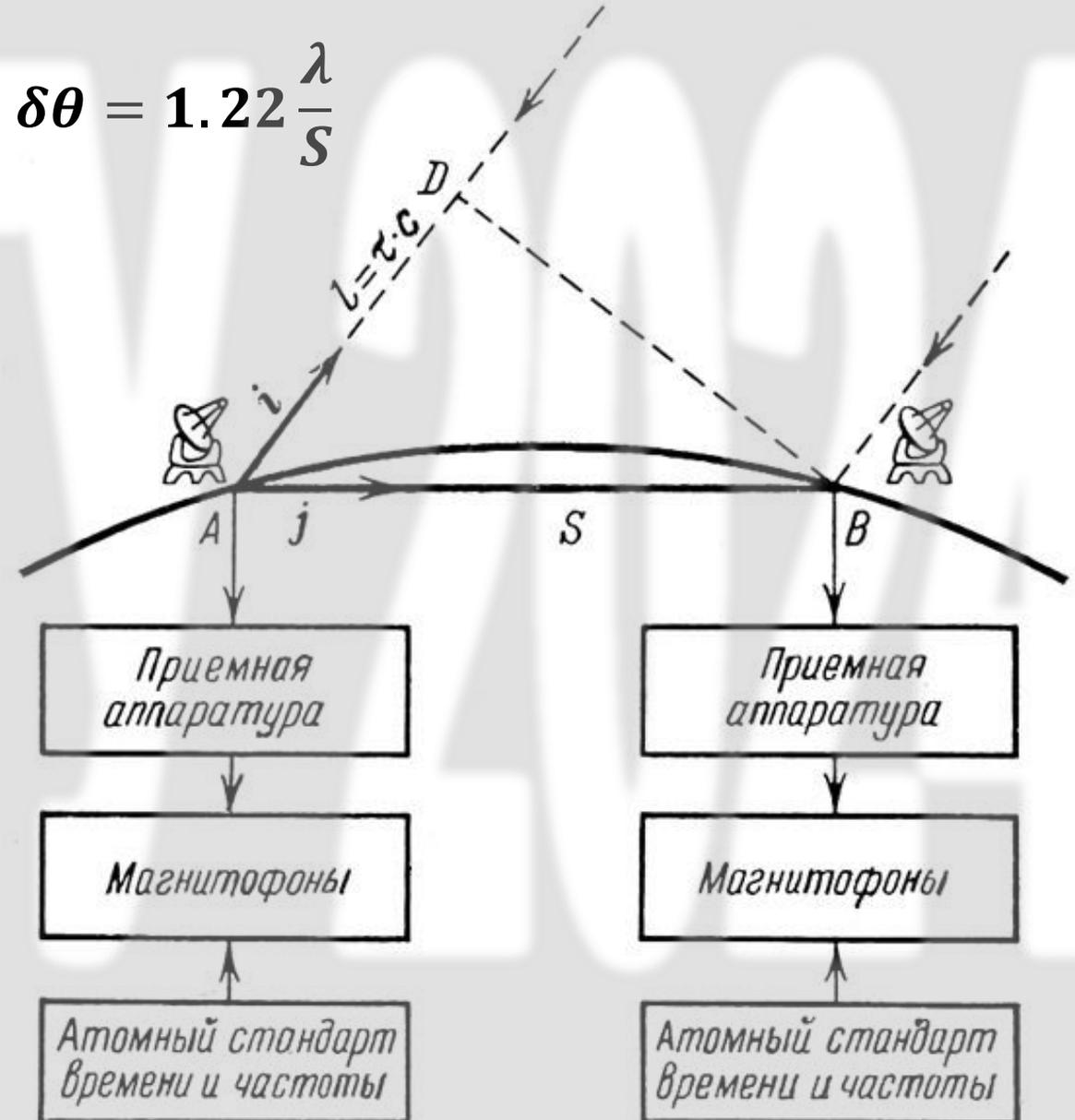


"for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique"

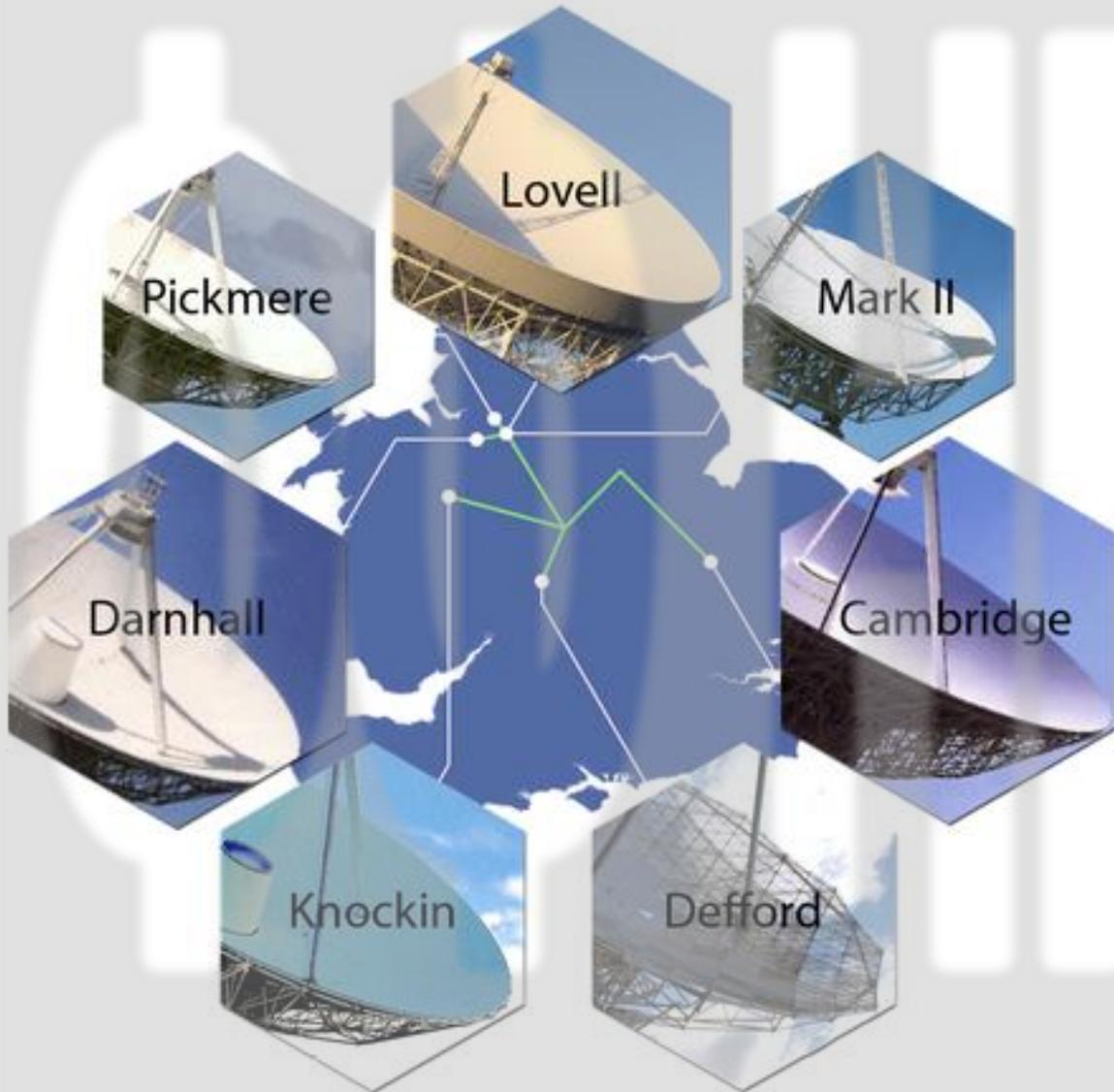
При радио интерферометрических измерениях производится множество измерений с различной базой ( $S$ ) и с разными фазовыми сдвигами ( $l$ ), чтобы максимально покрыть эквивалентную апертуру.

Для повышения эффективности используется сразу множество телескопов, распределенных по площади.

$$\delta\theta = 1.22 \frac{\lambda}{S}$$



# Крупнейшие радио-интерферометры



Одна из первых крупных интерферометрических систем e-MERLIN (Multi-Element Radio Linked Interferometer Network) введен в строй в 1980 году.

Максимальная база 217 км.

Предельное угловое разрешение от 10 до 150  $\mu\text{as}$

В отличие от большинства современных интерферометров все телескопы физически объединены в одну систему выделенной линией связи с центром Jodell Bank Observatory.

# Крупнейшие радио-интерферометры: ALMA

## Atacama Large Millimeter Array

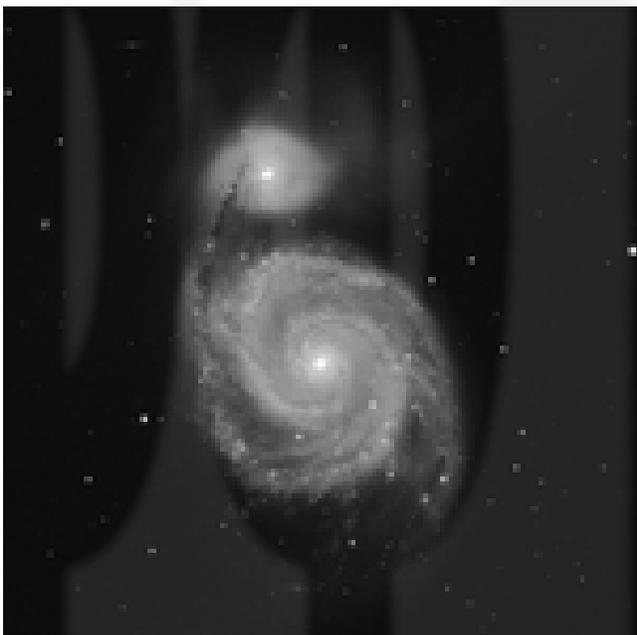
- ❖ Начало работы: 2013 год
- ❖ Расположена в Чили, пустыня Атакама, 5060 м над у.м.
- ❖ 66 антенн диаметром 12 м (54) и 7 м (12), база до 16 км
- ❖ Рабочий диапазон частот от 31 до 1000 ГГц ( $\lambda = 0.32 - 3.6$  мм)  
(благодаря большой высоте, поглощение парами воды существенно меньше, чем на у.м.)
- ❖ Угловое разрешение  $\sim 10$  mas



# Апертурный синтез

В зависимости от направления на источник меняется эффективная база интерферометра. При суточном вращении Земли каждая пара антенн интерферометра «замечает» траекторию на  $u$ - $v$  плоскости. Плотность покрытия  $u$ - $v$  плоскости зависит от количества возможных комбинаций пар антенн.

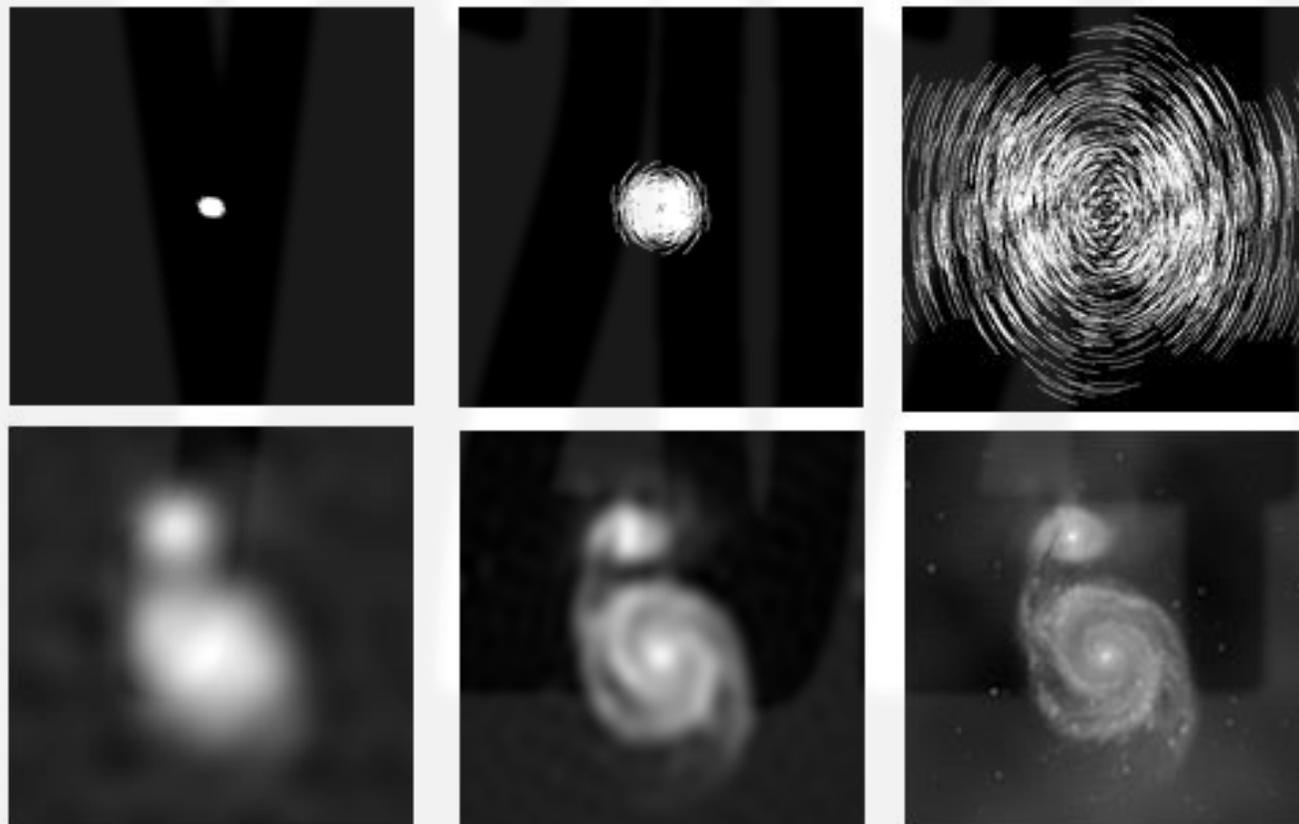
Объект



Радиоинтерферометр ALMA (моделирование):

Покрытие на  $u$ - $v$  плоскости

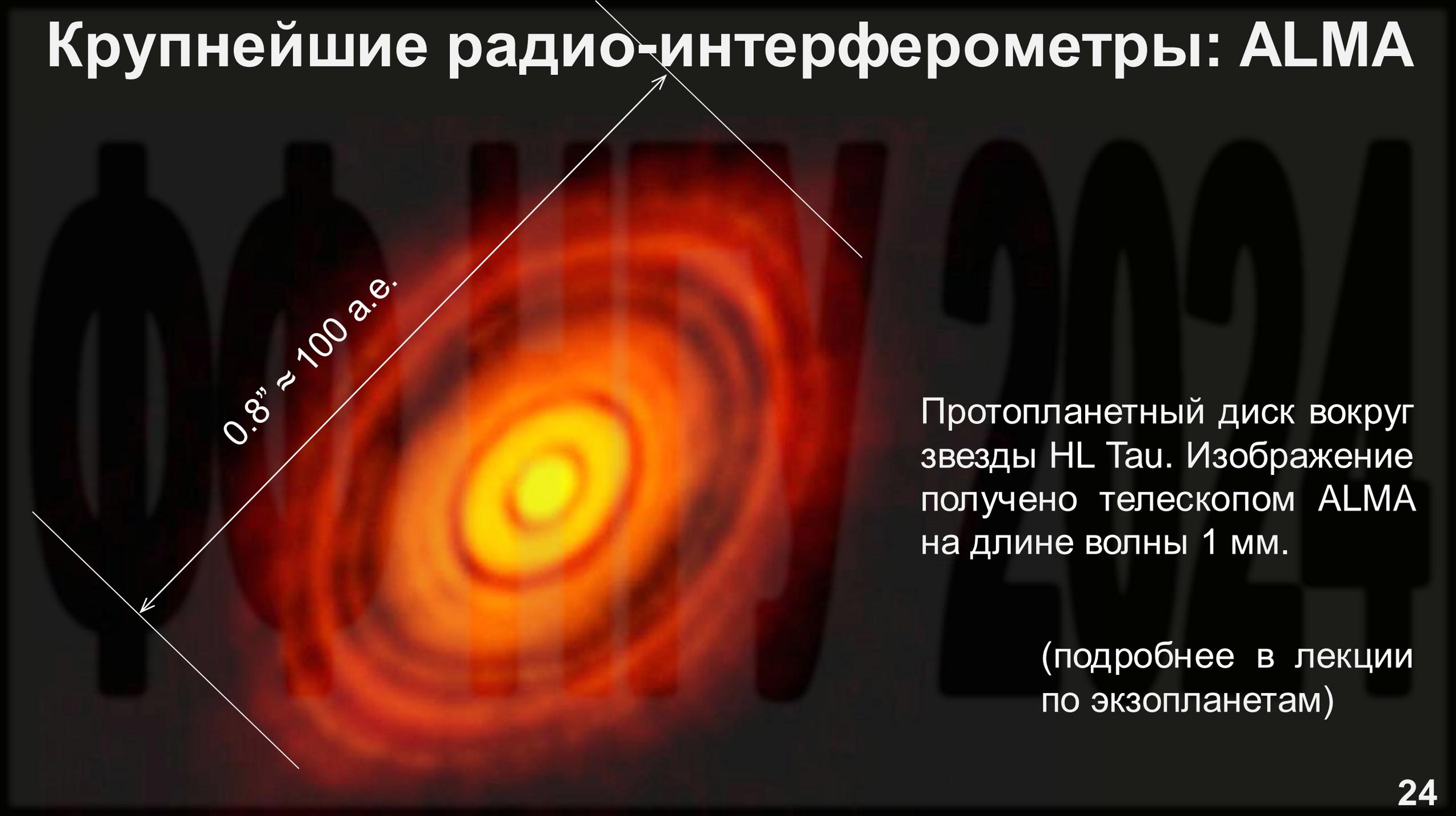
Восстановленное изображение



Апертурный синтез — очень сложная техническая и математическая задача...

# Крупнейшие радио-интерферометры: ALMA

0.8"  $\approx$  100 а.е.



Протопланетный диск вокруг звезды HL Tau. Изображение получено телескопом ALMA на длине волны 1 мм.

(подробнее в лекции по экзопланетам)

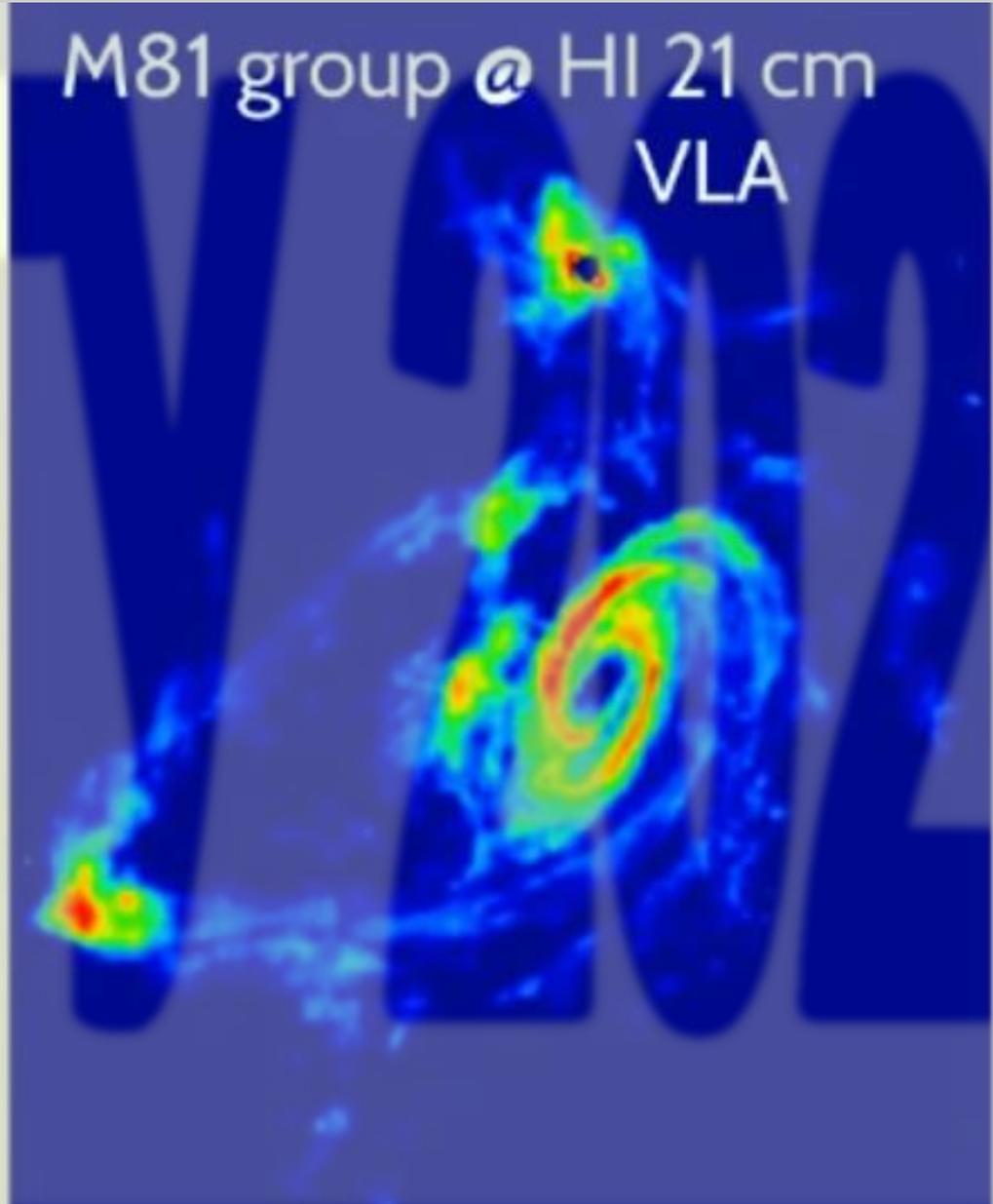
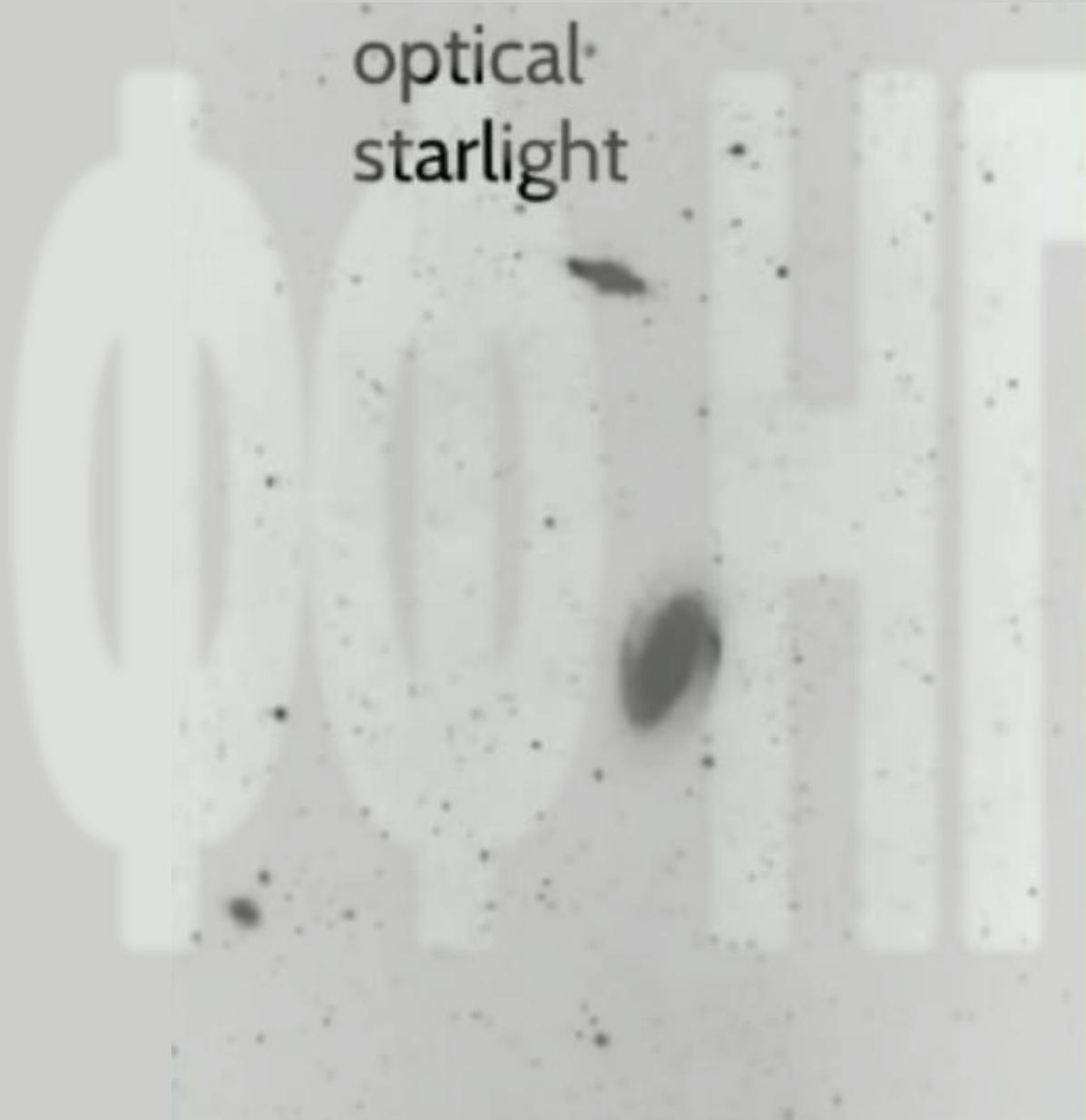
# Крупнейшие радио-интерферометры: VLA

- ❖ Начало работы: 2011 год
- ❖ Расположена в США (New Mexico), 2120 м над у.м.
- ❖ 27 антенн диаметром 25 м
- ❖ Y-конфигурация с длиной каждого рукава до 21 км
- ❖ Рабочий диапазон частот от 74 МГц до 70 ГГц ( $\lambda = 0.7 - 400$  см)
- ❖ Угловое разрешение 20 – 40 mas

# Радиодиапазон 1420 МГц (21.1 см)

optical  
starlight

M81 group @ HI 21 cm  
VLA



# Крупнейшие радио-интерферометры: VLBI



# Телескоп горизонта событий

2017

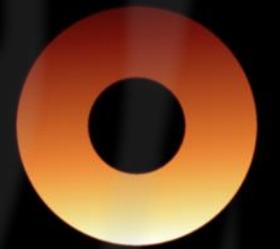
## M87\* black hole appearance in 2009-2017

По мере расширения сети и увеличения базы, разрешение интерферометра росло...

IMAGE



40  $\mu$ as

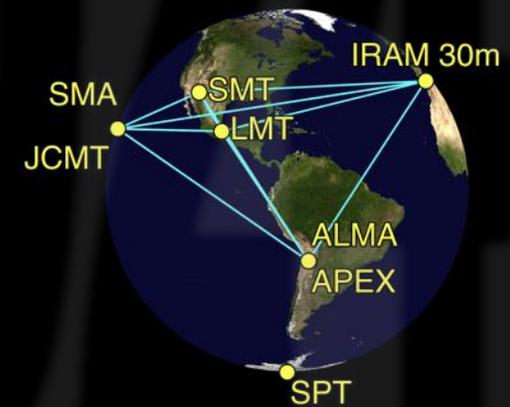


2009

2011

2012

2013



Event Horizon Telescope

Credit: M. Wielgus, D. Pesce

Наблюдения проводились на длине волны 1.3 мм

# Российская космическая обсерватория «Радиоастрон»



РОСКОСМОС

Проект «Радиоастрон» позволит увидеть далекие объекты космоса в небывалом разрешении

Параболическая антенна

- Диаметр – 10 м
- Состоит из 27 твердых лепестков из углепластика

Малонаправленные антенны

Фокальный модуль

«Радиоастрон» – первый в истории российский радиотелескоп на орбите

Он будет изучать:

- ядра галактик
- черные дыры
- нейтронные звезды
- облака межзвездной плазмы
- гравитационное поле Земли
- и многие другие объекты и явления Вселенной

Заказчик: Роскосмос

Головной исполнитель проекта: НПО имени Лавочкина

Разработчик научной аппаратуры: Астрокосмический центр ФИАН

Запуск: 18 июля 2011

Срок активного существования: не менее 5 лет

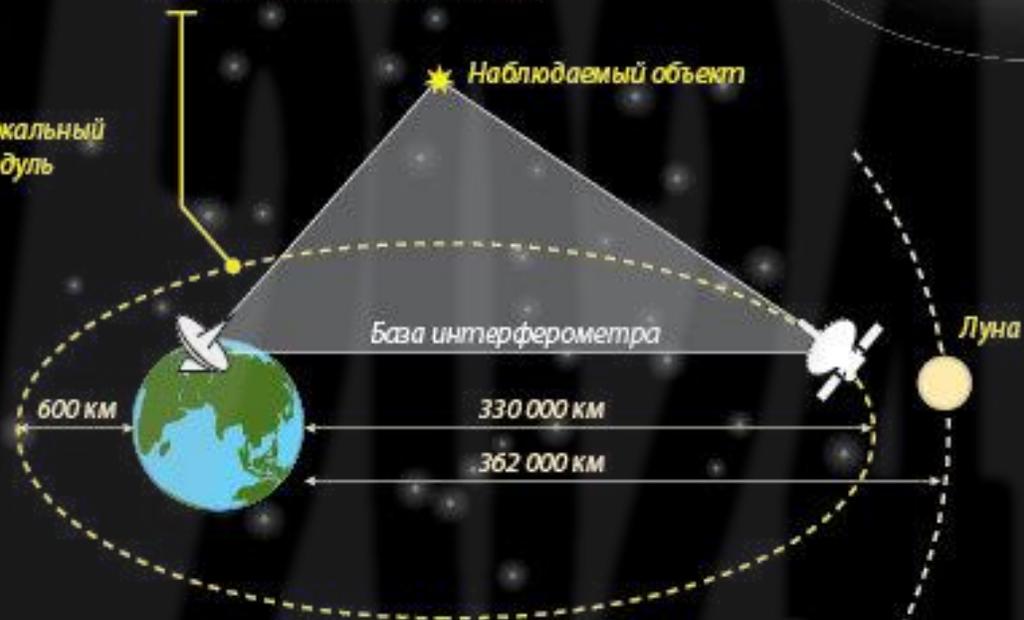
Служебный модуль «Навигатор»

Высокоинформативный радиокомплекс

Солнечные батареи

Орбита: высокоэллиптическая

- апогей: 330 000 км
- перигей: 600 км
- период обращения: 8,2 суток



«Радиоастрон» будет работать совместно с международной сетью наземных радиотелескопов, образуя **гигантский наземно-космический телескоп (т.н. интерферометр)** высочайшего углового разрешения.

Это позволит получить изображения далеких объектов **в тысячу раз более детальные**, чем у орбитального телескопа «Хаббл»

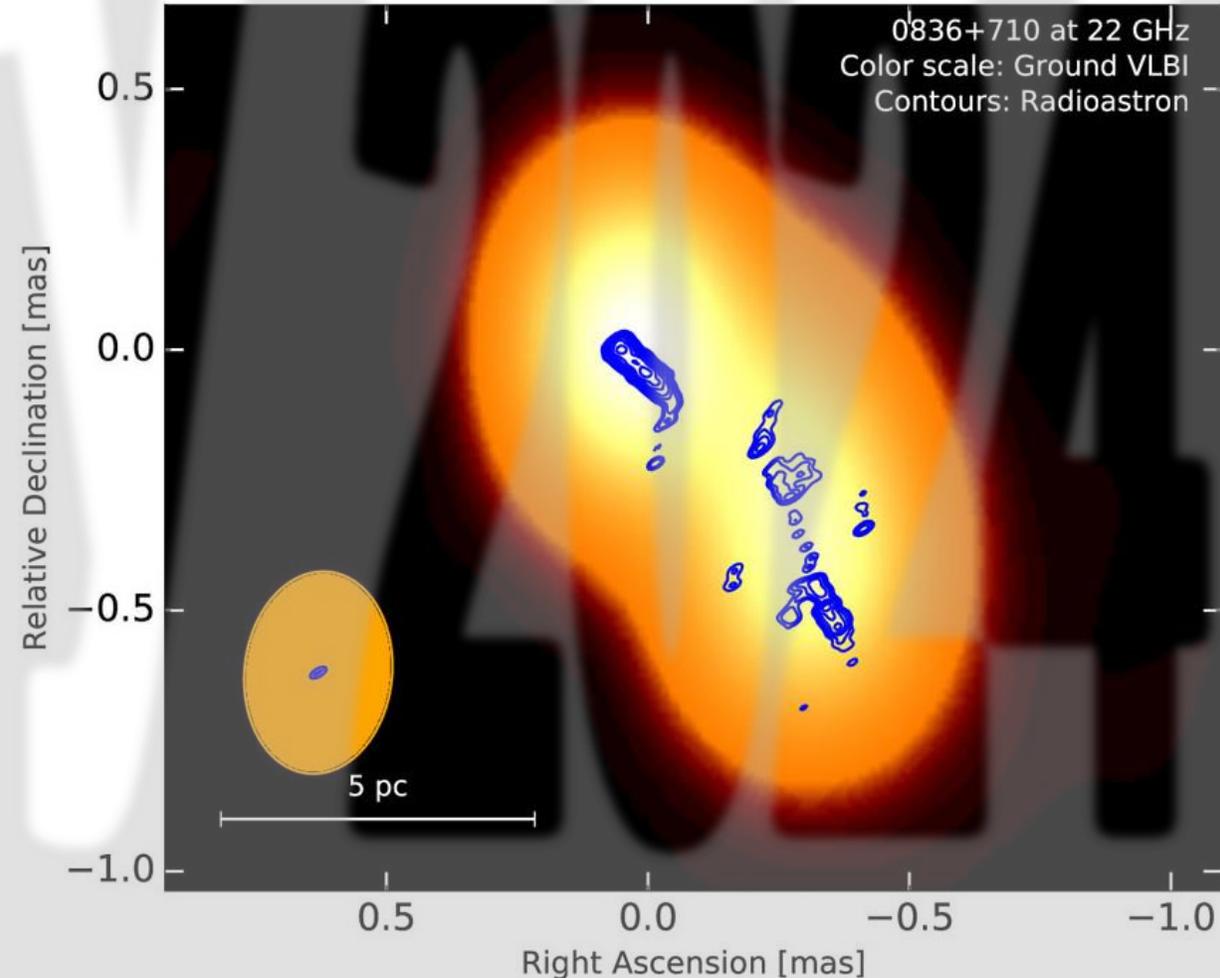
# Крупнейший радио-интерферометр

В комбинации с сетью из 15 наземных телескопов в России, Европе и США, предельное угловое разрешение составляет  $\sim 30 \mu\text{as}$ , в отдельных случаях до  $8 \mu\text{as}$ !

Джет блазара 0836+71, движущийся на нас с отклонением  $3^\circ$ . Цветом показана карта, снятая наземным радиоинтерферометром, синими контурами — карта «Радиоастрона».

(Vega-Garcia et al., 2019, A&A)

Телескоп успешно проработал на орбите с 2011 по 2019 годы при гарантийном сроке до 2014 года.

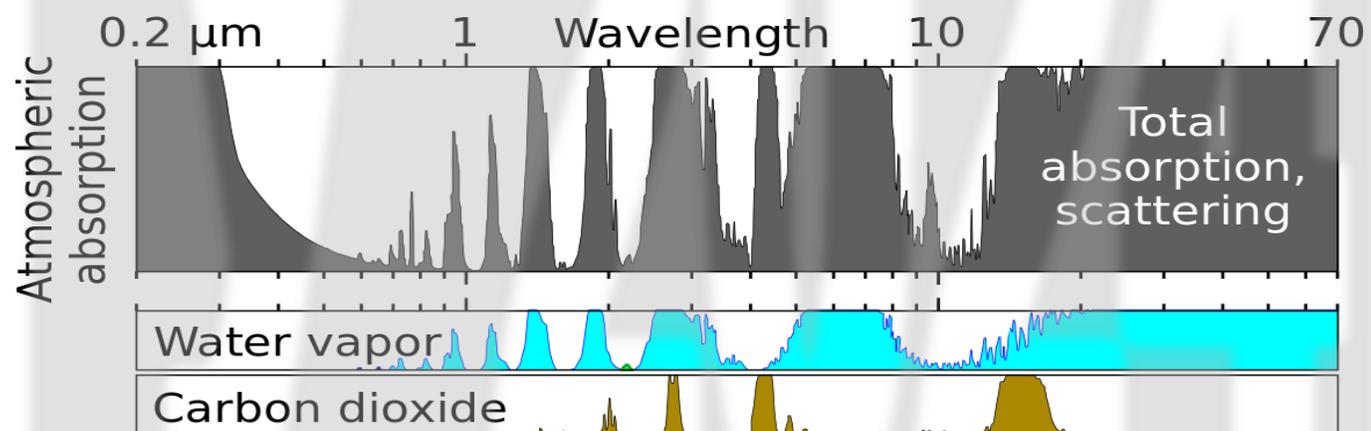


# ИК астрономия

Многие важные астрофизические процессы (рождение звезд и планетных систем, самые далекие галактики...) лучше всего наблюдать в ИК диапазоне.

В ИК диапазоне есть окна прозрачности земной атмосферы. Дополнительно, влияние атмосферы (в основном паров воды) можно снизить, размещая телескоп на большой высоте и в сухих местах.

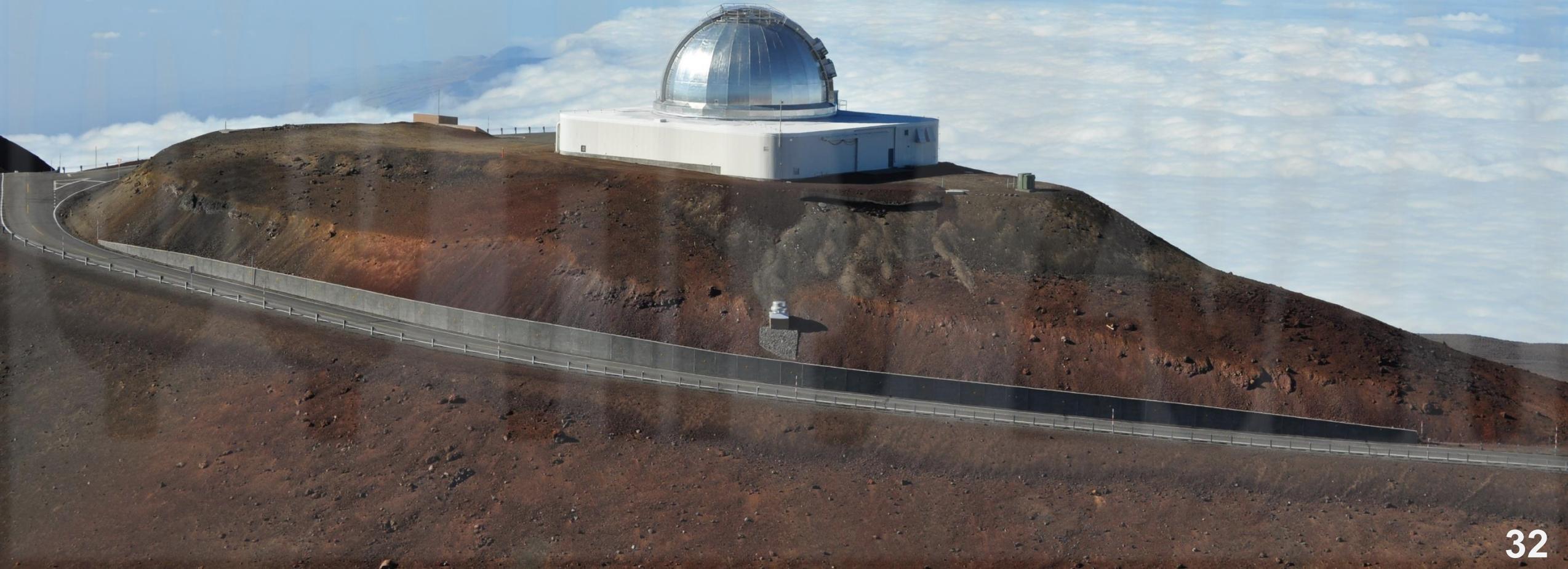
ИК диапазон – область комнатных температур. Основной фон при измерениях идет от нагретых объектов вокруг нас и самой CCD матрицы.



Для достижения максимальной чувствительности необходимы орбитальные телескопы (желательно на удаленной от Земли орбите) с криогенным охлаждением (жидкий гелий).

# ИК астрономия на земле: IRTF

- ❖ Начало работы: 1979 год (построен для миссии Voyager)
- ❖ Расположен в США (Гавайи), 4140 м над у.м.
- ❖ Диаметр зеркала 3.2 м
- ❖ Рабочий диапазон длин волн  $\lambda = 0.5 - 25$  мкм

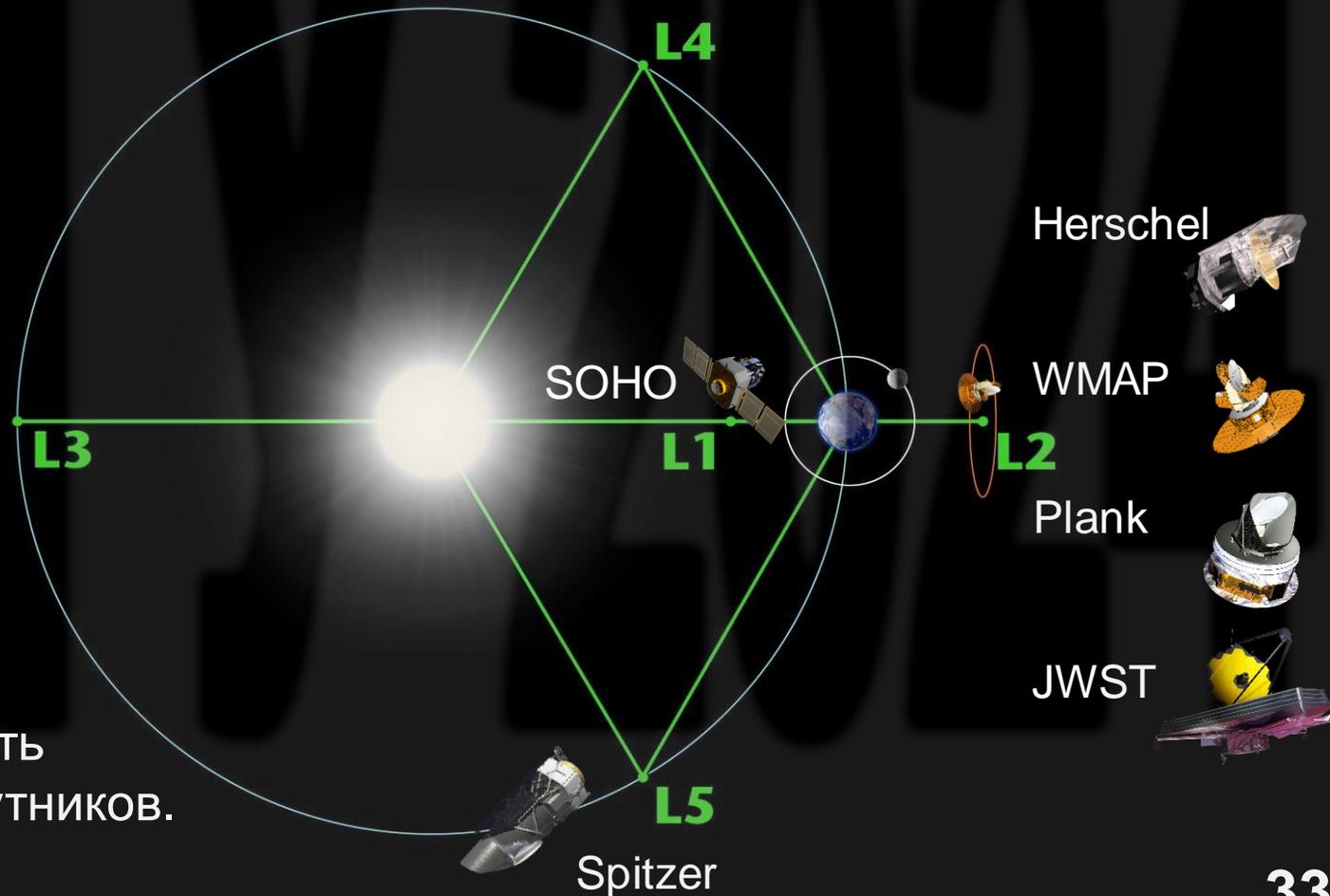


# ИК астрономия на орбите

ИК диапазон – область комнатных температур. Основной фон при измерениях идет от нагретых объектов вокруг нас и самой CCD матрицы. Для достижения максимальной чувствительности необходимы орбитальные телескопы (желательно на удаленной от Земли орбите) с криогенным охлаждением (жидкий гелий).

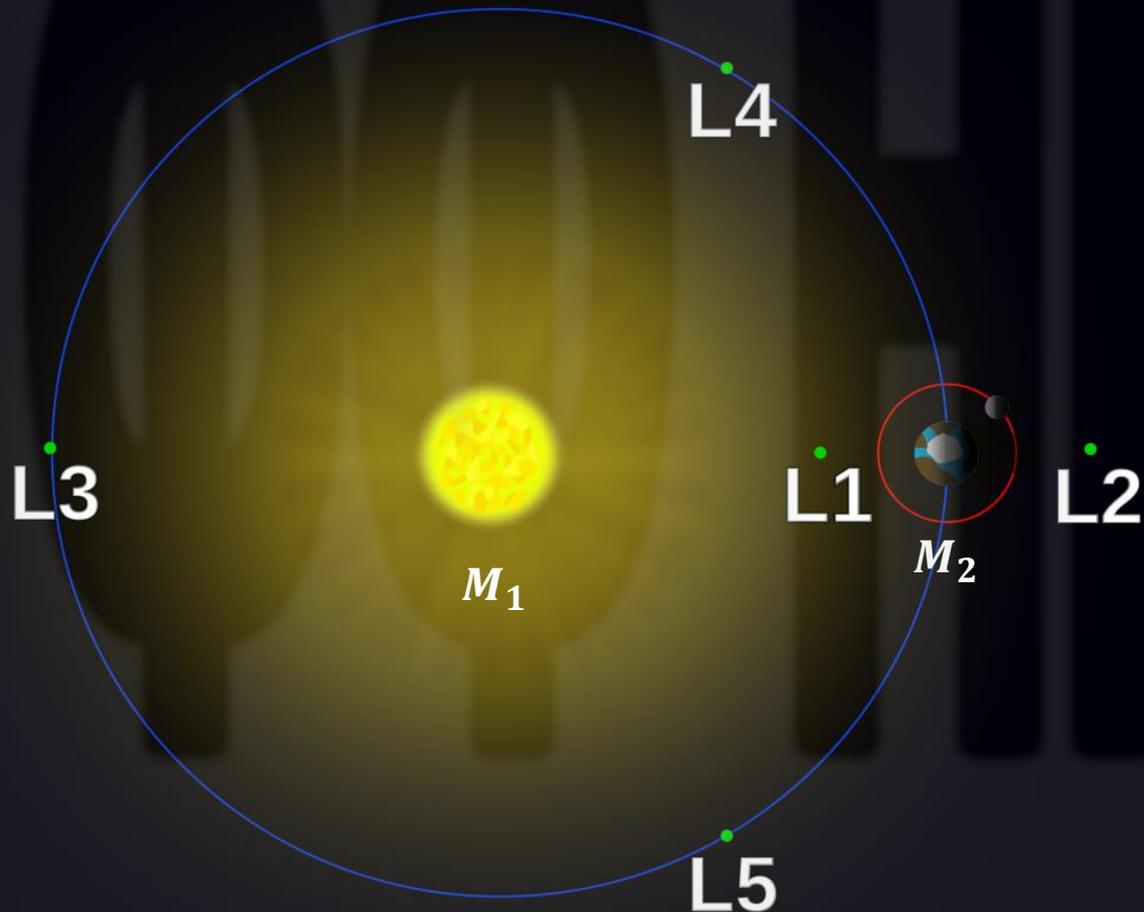
Точка Лагранжа L2 (1.2 Мкм от Земли) – наиболее популярное место расположения астрономических инструментов высокой чувствительности, работающих в ИК диапазоне.

Однако L2 – точка неустойчивого равновесия, требуется постоянная корректировка орбиты. Это (и необходимость охлаждения) ограничивает срок службы спутников.



# Точки Лагранжа

В системе двух гравитационно связанных тел существует 5 точек, где комбинация сил тяготения и центробежной «силы» (задачу удобно решать во вращающейся системе, где два массивных тела покоятся, предполагая круговую орбиту) равна нулю.



Точки L1, L2 и L3 всегда точки неустойчивого равновесия.

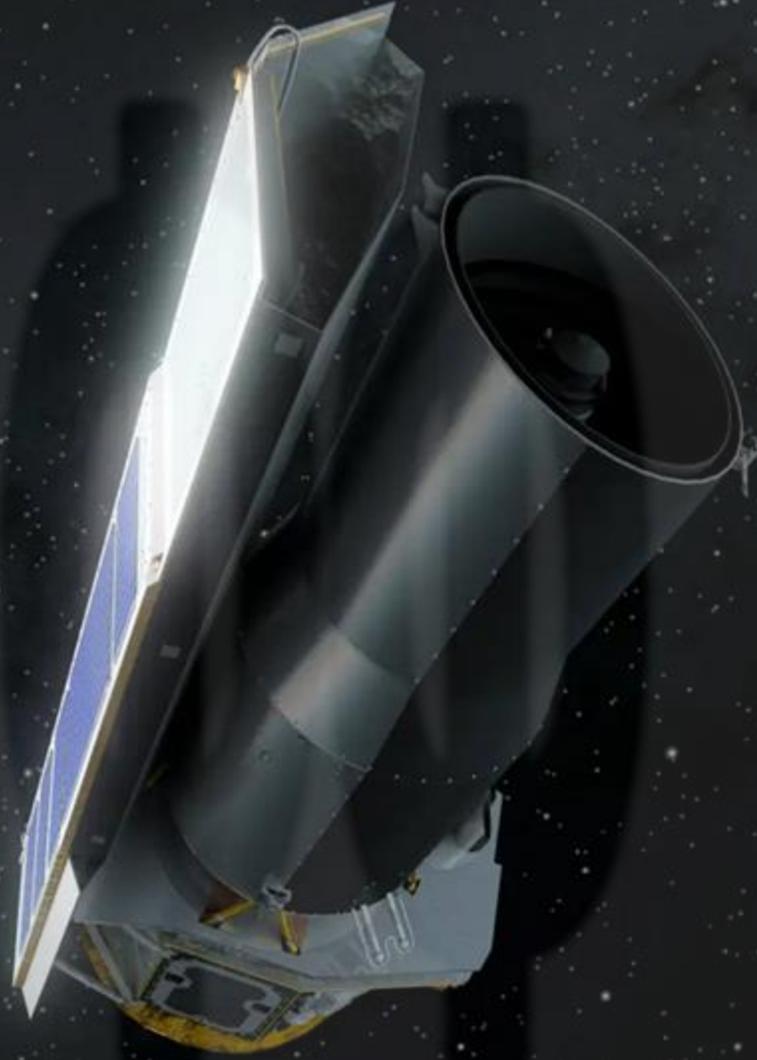
Точки L4 и L5 будут точками устойчивого равновесия, если выполняется условие:

$$\frac{M_1}{M_2} > \frac{25}{2} \left( 1 + \frac{\sqrt{23 \cdot 27}}{25} \right) \approx 24.96$$

<https://farside.ph.utexas.edu/teaching/336k/Newton/node126.html>

Несмотря на неустойчивость, точки L1 и L2 часто используются для размещения орбитальных обсерваторий.

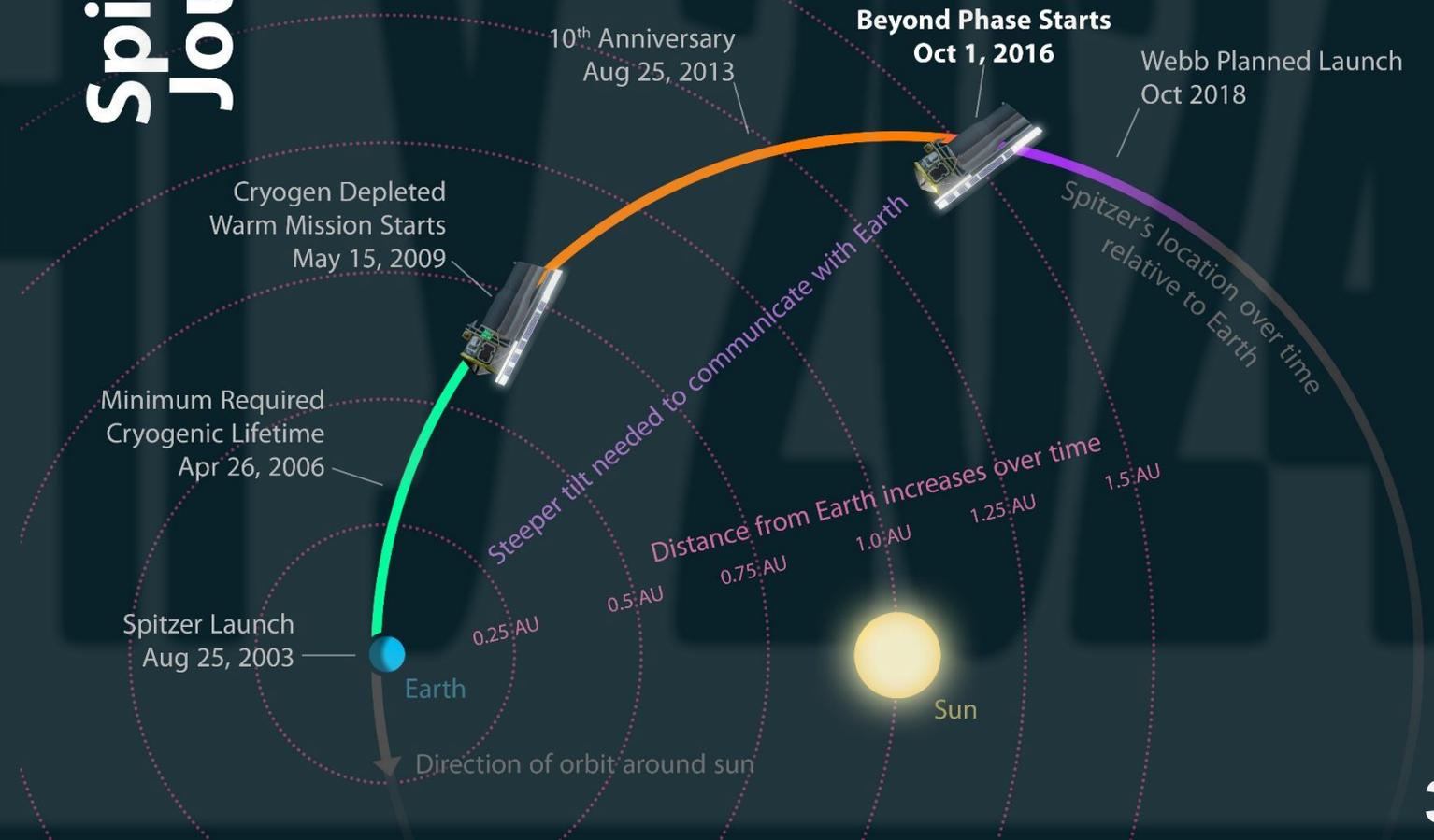
# ИК астрономия на орбите: Spitzer



**Зеркало:  $D=0.85$  м,  $F=10.2$  м**  
**ИК диапазон: 4 – 160 мкм**  
**Температура: 5.5 К**

## Spitzer's Journey

**Cryogenic Mission** - Three operating instruments, telescope actively cooled to 5.5 K  
**Warm Mission** - One operating instrument, telescope passively cooled to 27 K  
**Beyond Phase** - Warm Mission continues with increased risks, power management & communication challenges

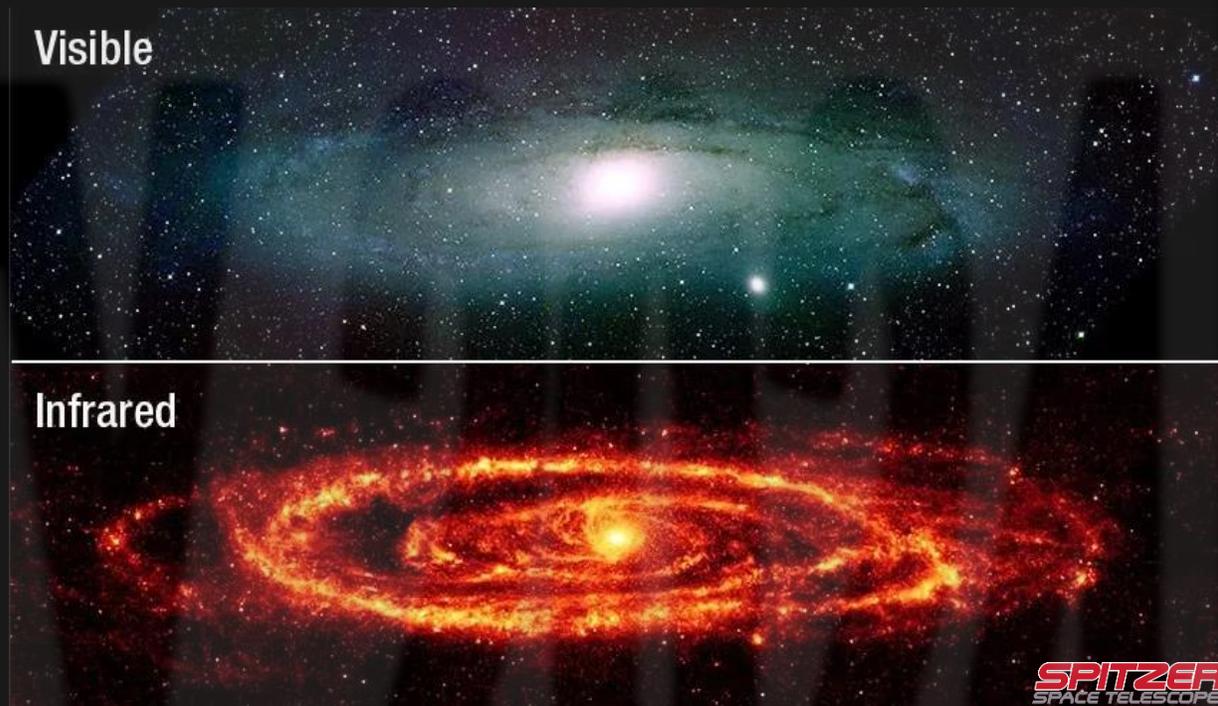


# ИК vs ВИДИМЫЙ диапазоны

Области пространства, непрозрачные для видимого света, могут быть прозрачны в ИК диапазоне.



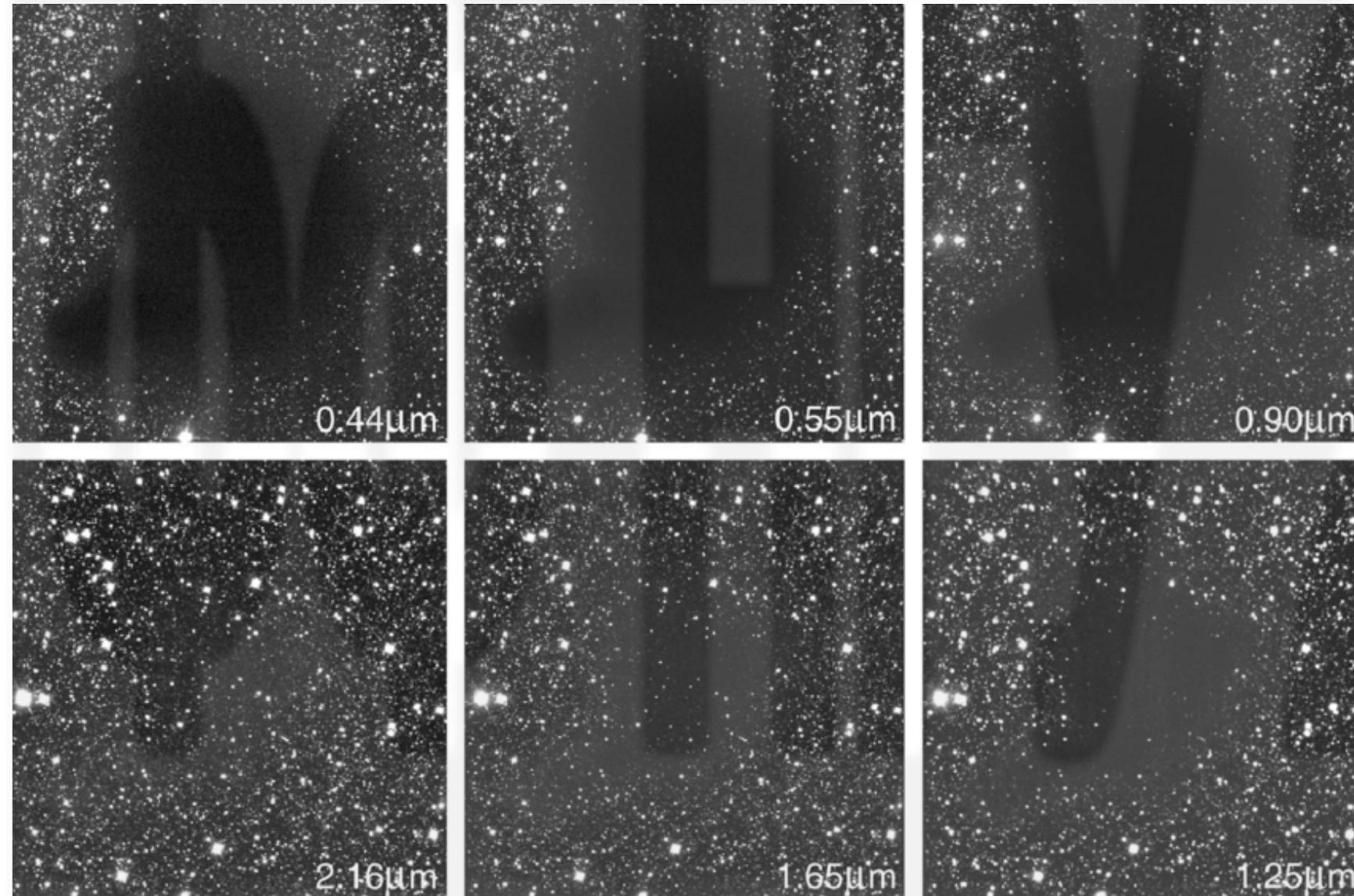
M16 ■ Eagle Nebula  
Hubble Space Telescope ■ WFC3/UVIS/IR



Изображение галактики M31 (Туманность Андромеды) на длине волны 160 мкм, полученная телескопом Spitzer. Хорошо видна спиральная структура, образованная «ХОЛОДНОЙ» ПЫЛЬЮ.

# ИК vs видимый диапазоны

Молекулярно-пылевое облако Барнард 68 («Угольный мешок»)

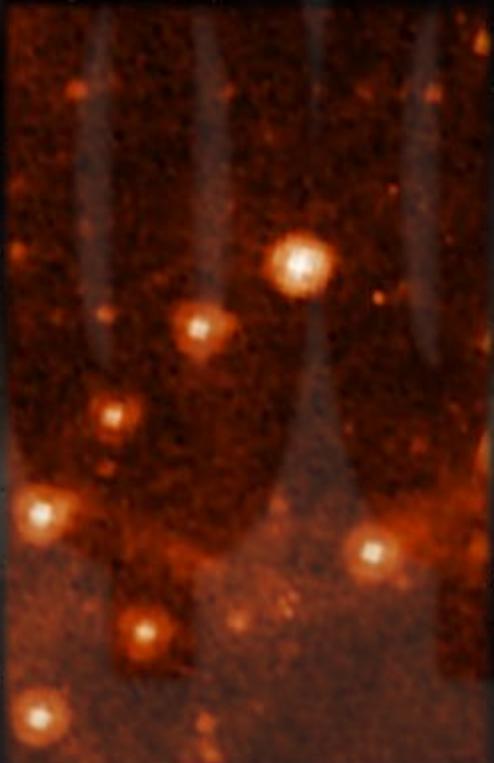


Типичный размер «пылинок» 0.01 – 1 мкм, что приводит к сильному поглощению и рассеиванию света в видимом диапазоне.

Зависимость сечения рассеяния света на молекулах газа обратно пропорционально длине волны в четвертой степени!

# ИК астрономия

- ❖ Начало работы: 2022 год
- ❖ Расположен в L2
- ❖ Диаметр 6.5 м
- ❖ Рабочая температура 6 – 50К



SPITZER IRAC 8.0 $\mu$



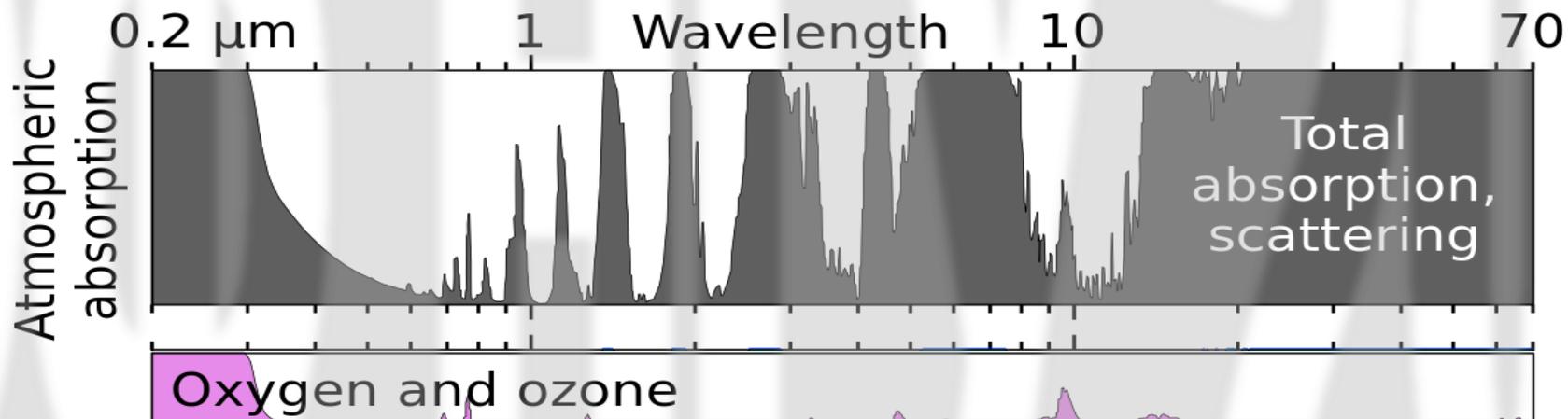
WEBB MIRI 7.7 $\mu$

## Оборудование:

- ❖ NIRISS: 0.8 – 5 мкм
- ❖ MIRI: 5 – 28 мкм
- ❖ NIRCam: 0.6 – 5 мкм
- ❖ NIRSpec: 0.6 – 5 мкм

# УФ + Рентгеновская астрономия

Рентгеновский и ультра-фиолетовый диапазоны спектра позволяют получать информацию о нетепловых явлениях и процессах, протекающих с огромным энерговыделением (взрывы сверхновых, слияние нейтронных звезд, аккреция вещества на компактные объекты и т.д.).



В этих диапазонах спектра атмосфера Земли полностью непрозрачна и единственная возможность – орбитальные телескопы.

Первые телескопы на орбите в 60-х 70-х работали в рентгеновском диапазоне.

# УФ астрономия

International Ultraviolet Explorer (IUE) – первый специализированный спутник для спектроскопии в ближнем УФ диапазоне от 119 до 325 нм. Период работы 1978 – 1996 годы.

Extreme UltraViolet Explorer (EUVE) – специализированный спутник для наблюдений в дальнем УФ диапазоне от 7 до 76 нм. Период работы 1992 – 2001 годы. Провел обзор всего неба и составил каталог из 801 объекта.

Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE) – специализированный спутник для спектроскопии в дальнем УФ диапазоне от 90 до 120 нм. Период работы 1999 – 2007 годы.

Cosmic Hot Interstellar Plasma Spectrometer (CHIPS) – небольшой спутник для спектроскопии в дальнем УФ диапазоне от 9 до 26 нм. Период работы 2003 – 2005 годы. До 2008 года работал как солнечная обсерватория.

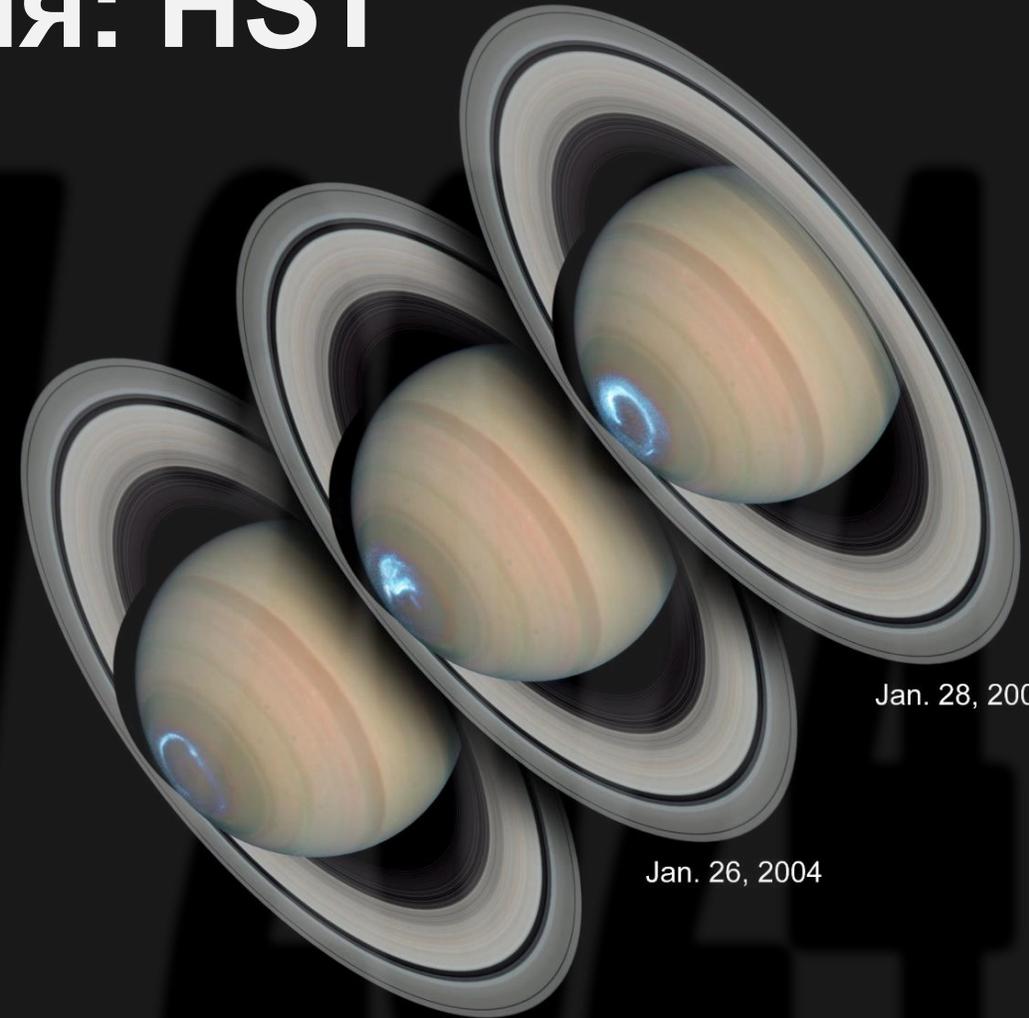
GALEX Evolution Explorer (GALEX) – специализированный спутник для спектроскопии в ближнем УФ диапазоне от 135 до 280 нм. Период работы 2003 – 2013 годы.

# УФ астрономия: HST

Телескоп Hubble может проводить наблюдения в диапазоне от 200 до 1700 нм.



На орбите с 1990 года



Jan. 28, 2004

Jan. 26, 2004

Jan. 24, 2004

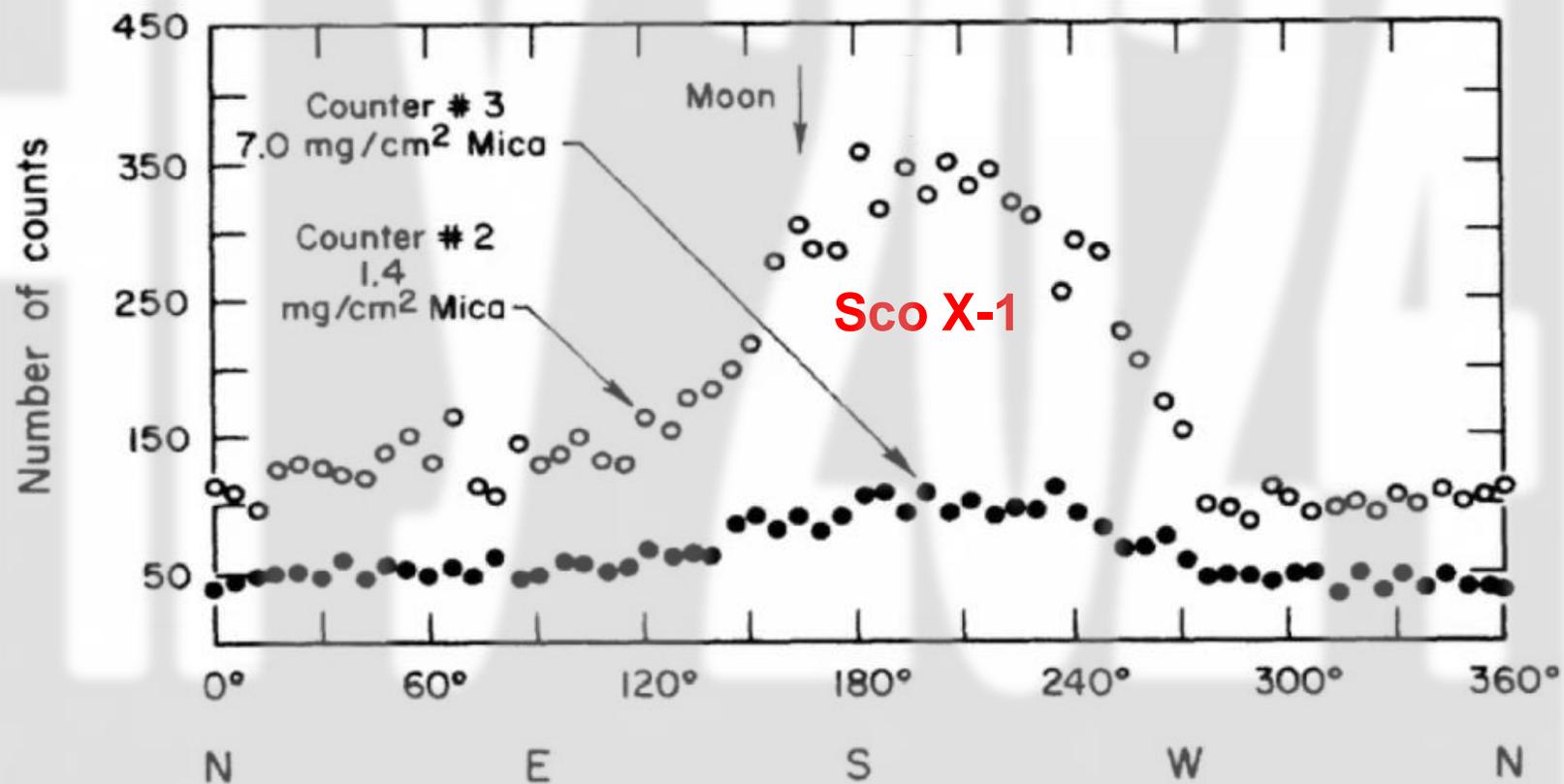
Полярное сияние на Сатурне.  
Комбинация снимков в УФ и  
видимом диапазонах.

# Рентгеновская астрономия

В начале 60-х Риккардо Джаккони исследовал возможность зарегистрировать солнечные рентгеновские лучи, отраженные от поверхности Луны. Для этого детектор был установлен на суборбитальной ракете Aerobee. В полете ракета вращается и детектор (счетчики Гейгера) производит обзор большой площади неба.

В 1962 году Джаккони и др. (с третьей попытки) запустили и действительно «увидели» мощный источник X-лучей, но не от Луны, а в созвездии Скорпиона (Sco X-1).

Sco X-1 – самый мощный рентгеновский источник на небе.



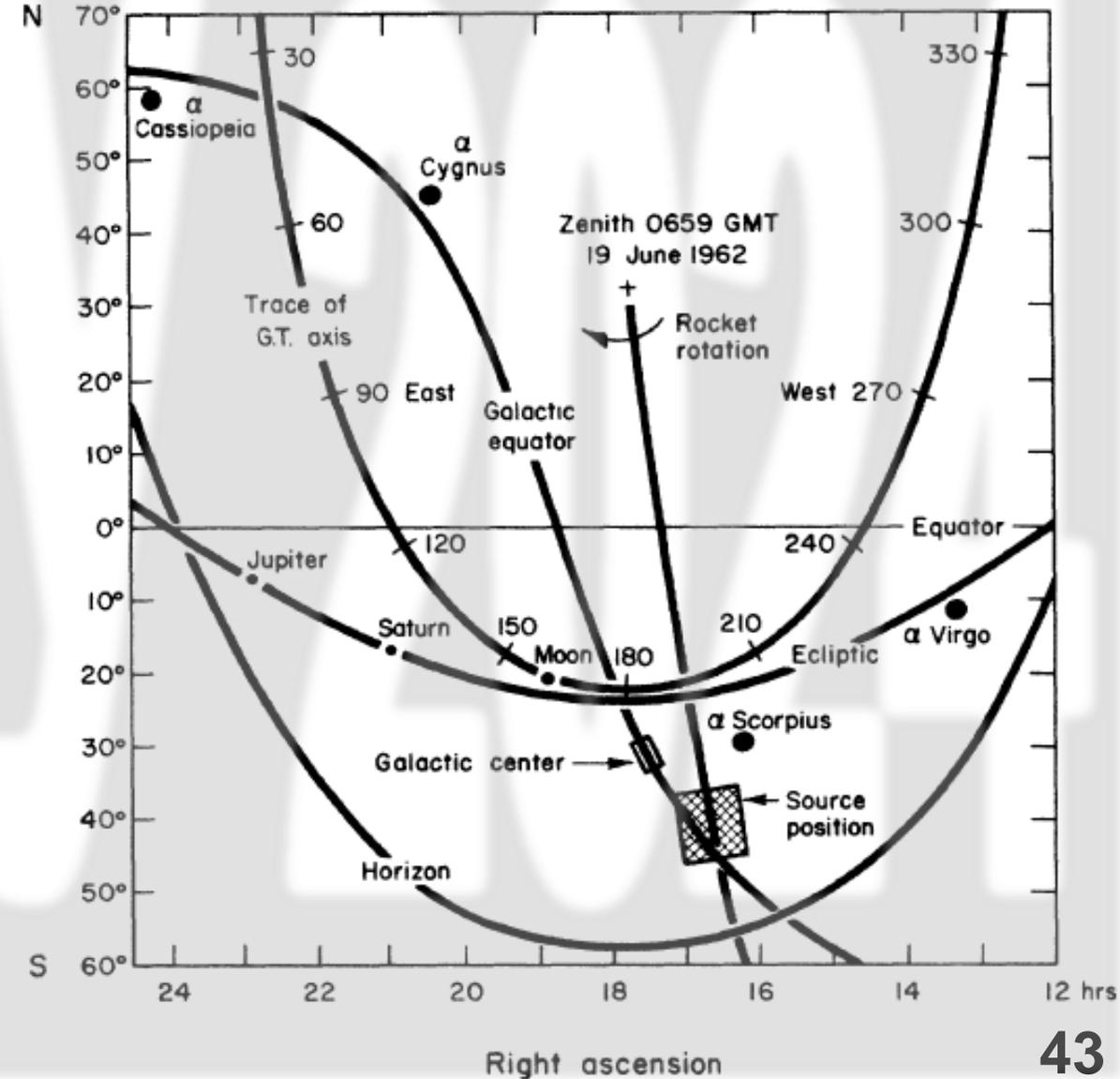
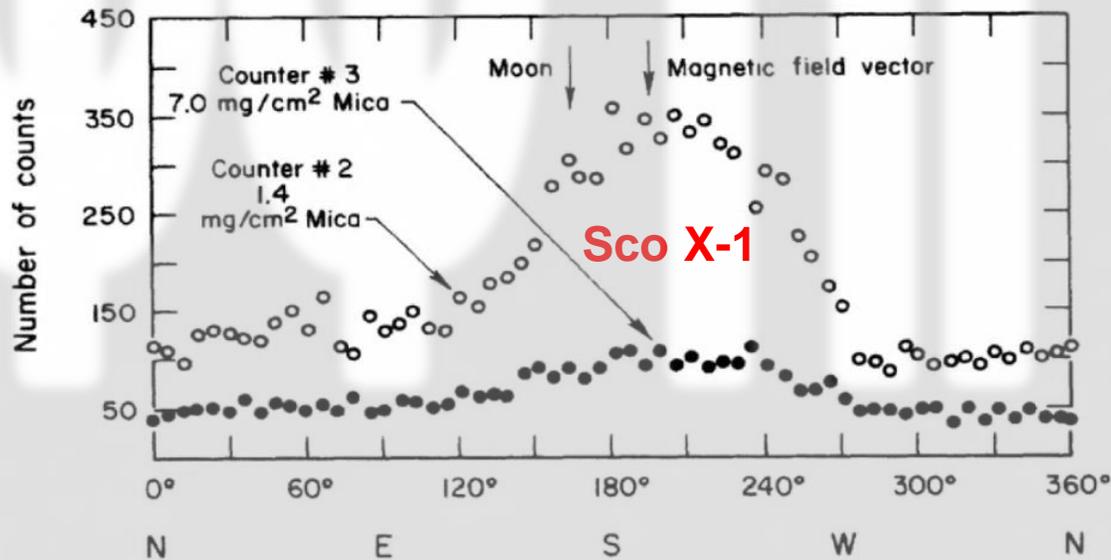
# Рентгеновская астрономия



Photo from the Nobel Foundation archive.  
Riccardo Giacconi  
Prize share: 1/2

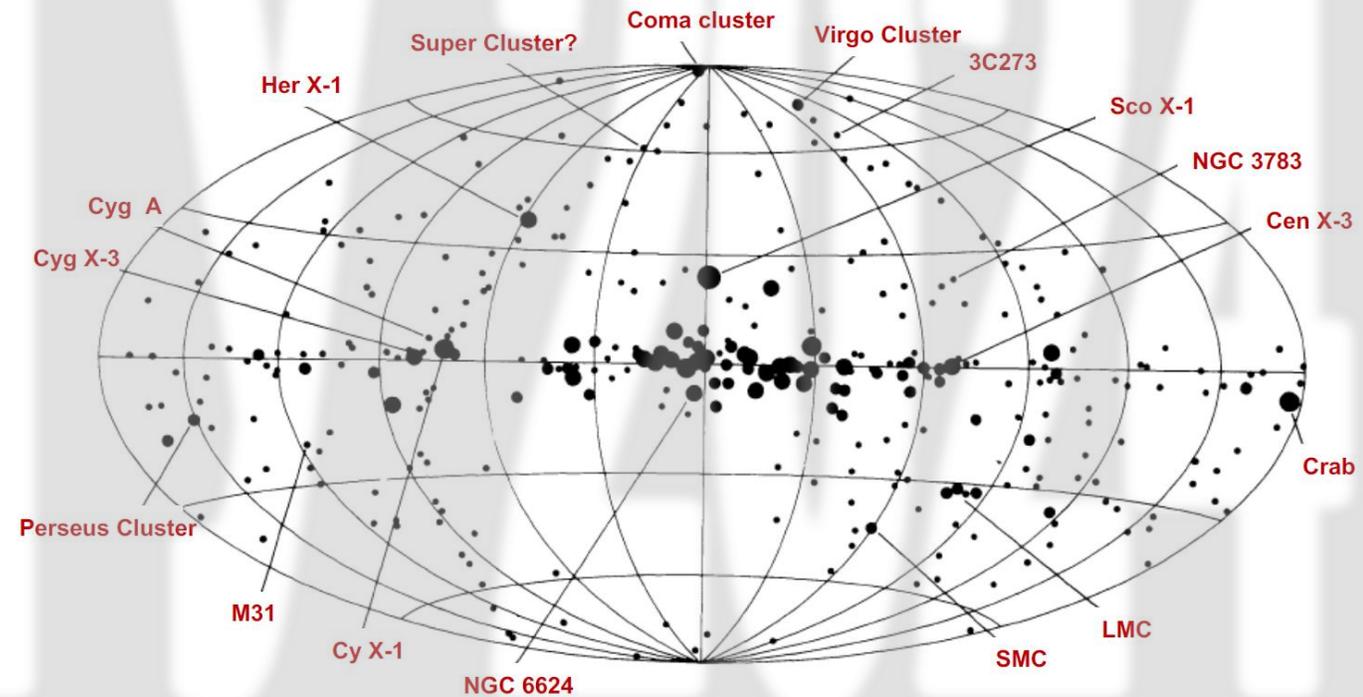
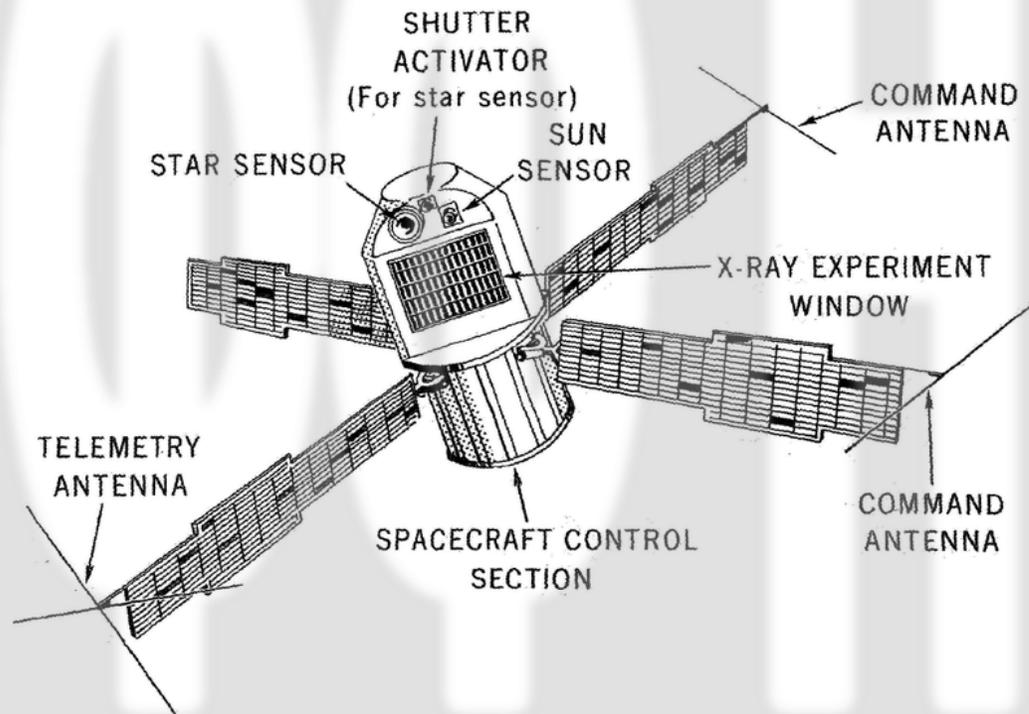


*"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"*



# Рентгеновская астрономия: UHURU

В 1970 году был запущен UHURU – уже первый «настоящий» спутник, полностью посвященный поиску и изучению рентгеновских объектов в диапазоне 2 – 18 кэВ. Пропорциональные камеры с угловым разрешением  $\sim 0.5^\circ$ . Завершение работы: 1973 год.

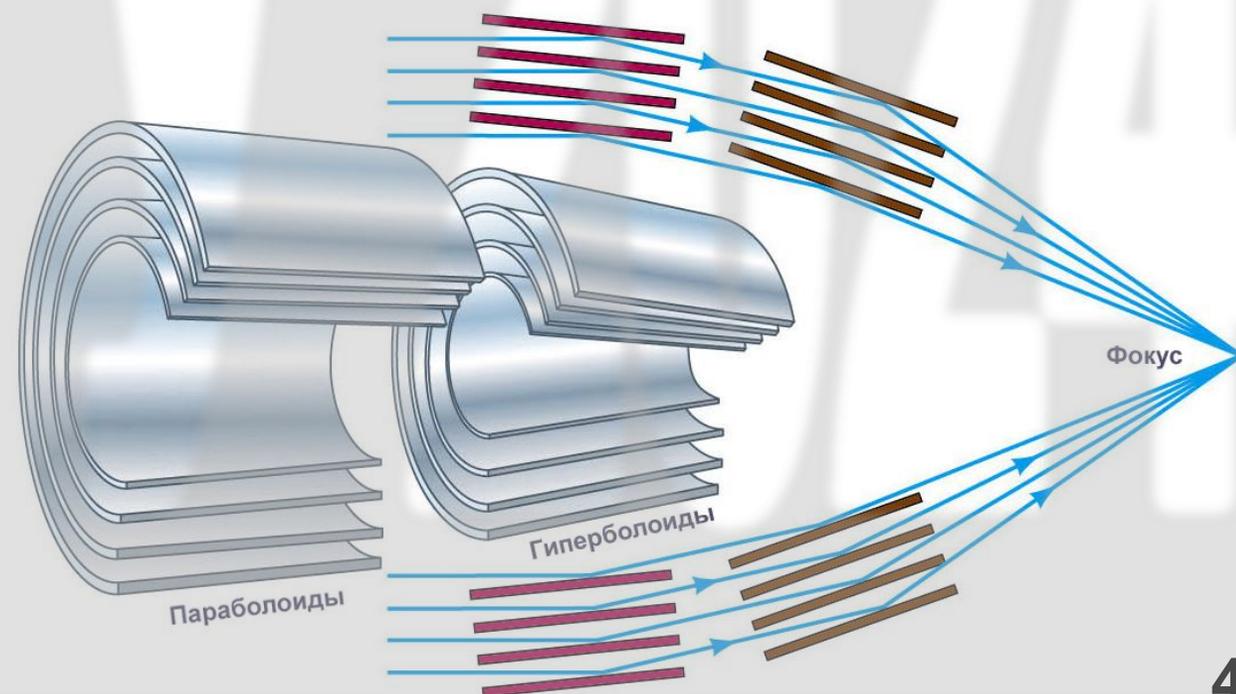


Первый каталог всего неба из 339 рентгеновских объектов.

# Рентгеновская астрономия

Для рентгеновского диапазона ЭМ волн классические законы геометрической оптики уже не работают – невозможно сфокусировать входной поток обычным зеркалом.

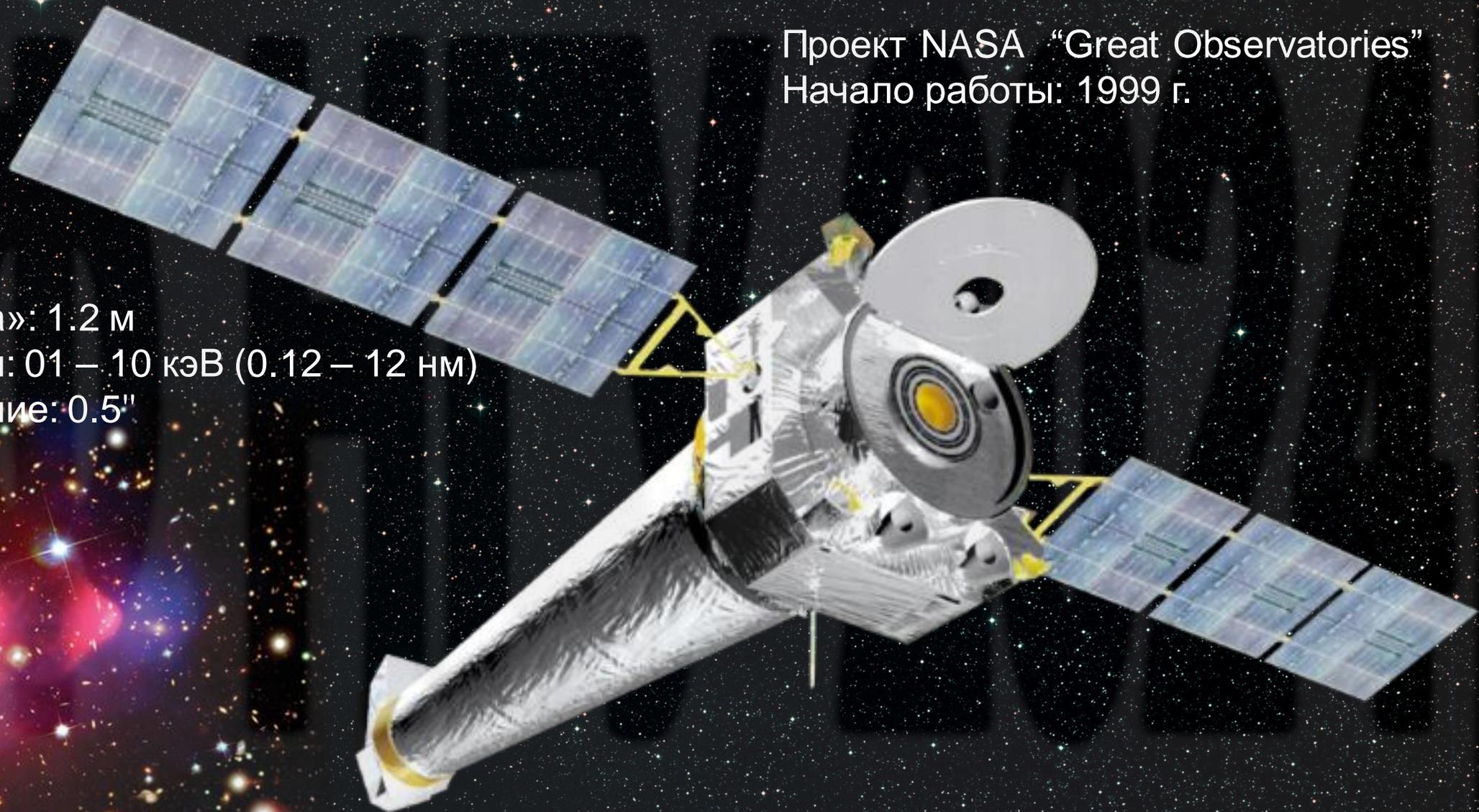
При нормальном падении происходит поглощение или рассеяние рентгеновских фотонов. Однако при малых ( $\sim 2^\circ$  и меньше) углах к поверхности, рентгеновские фотоны (энергия 0.1 – 10 кэВ) хорошо отражаются о полированную металлическую поверхность (золото, иридий).



# Рентгеновская астрономия: Chandra



Проект NASA "Great Observatories"  
Начало работы: 1999 г.



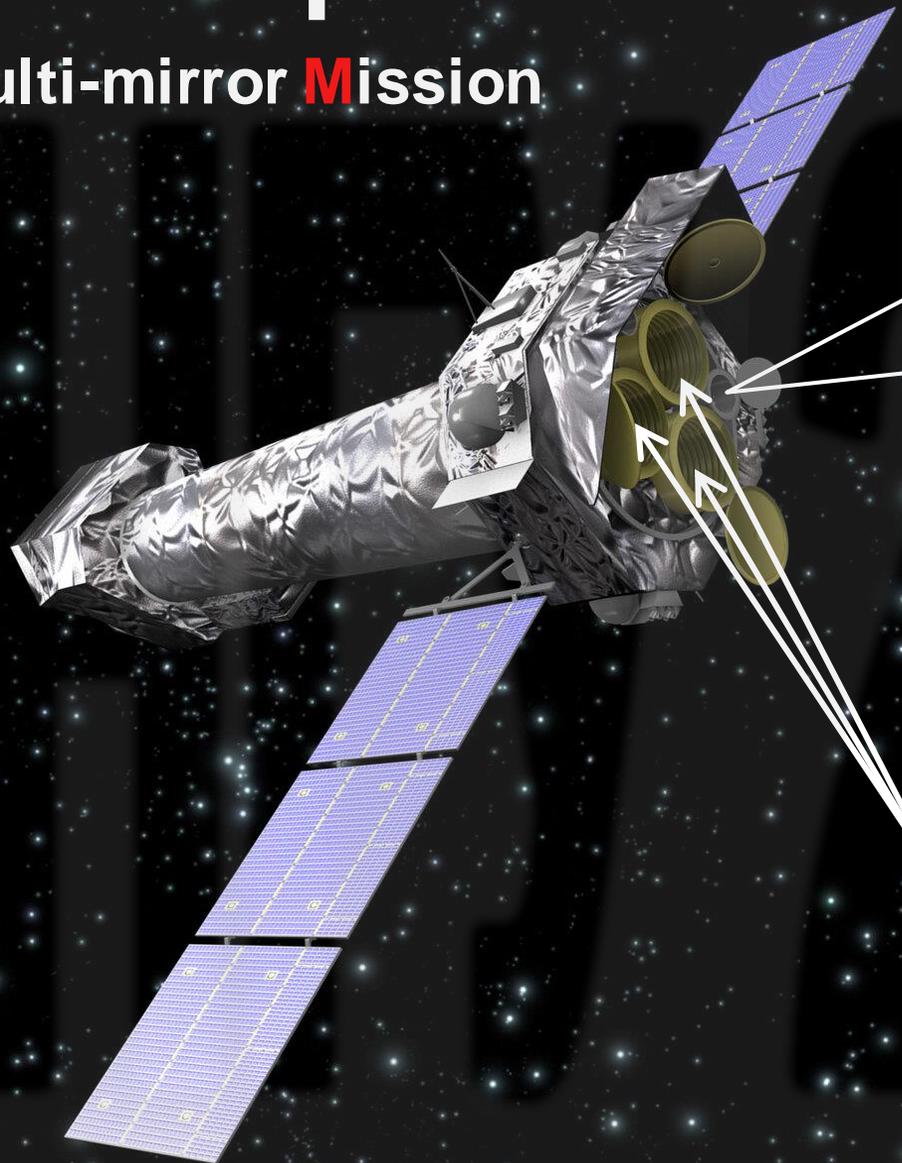
Диаметр «зеркала»: 1.2 м  
Рабочий диапазон: 0.1 – 10 кэВ (0.12 – 12 нм)  
Угловое разрешение: 0.5"  
Поле зрения: 60'

# Рентгеновская астрономия: XMM-Newton

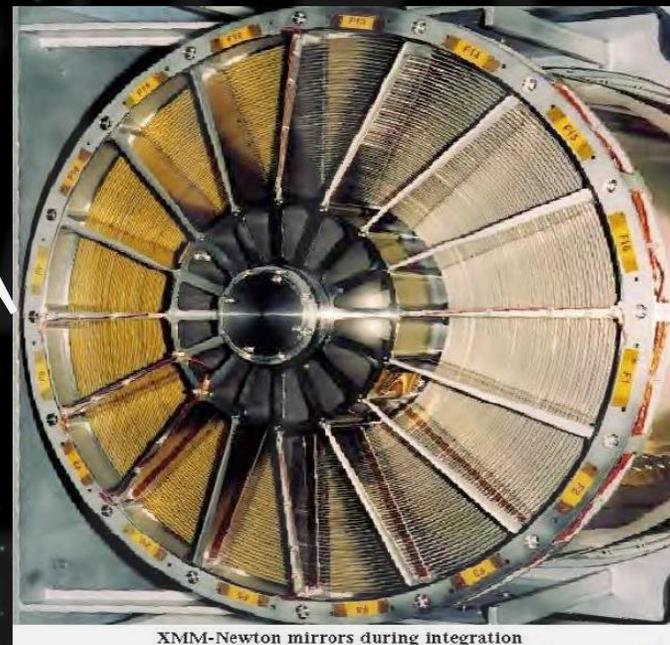
X-ray Multi-mirror Mission



Диаметр «зеркала»: 0.7 м  
Рабочий диапазон: 01 – 12 кэВ  
Угловое разрешение: 5" – 14"  
Поле зрения: 30'



+ оптический телескоп для одновременного наблюдения в видимом диапазоне для идентификации источника.

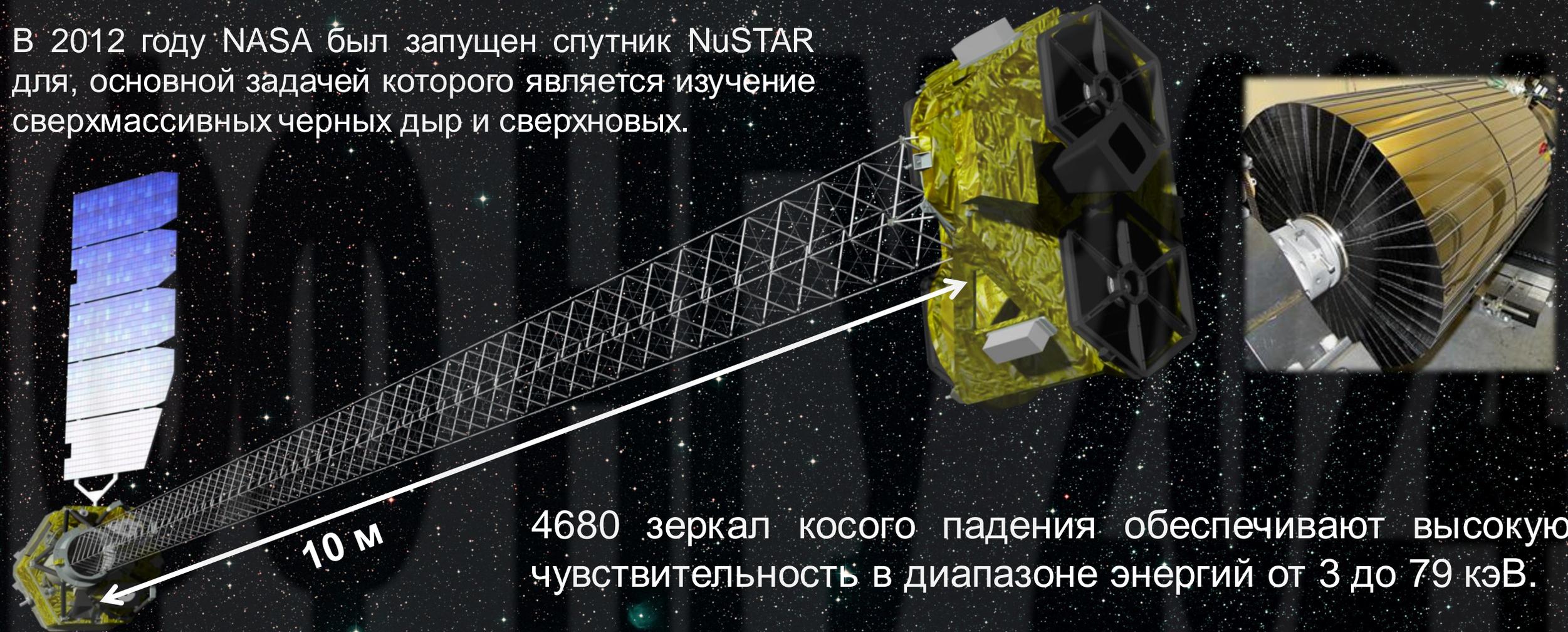


XMM-Newton mirrors during integration

Начало работы: 2000г.

# Рентгеновская астрономия: NuSTAR

В 2012 году NASA был запущен спутник NuSTAR для, основной задачей которого является изучение сверхмассивных черных дыр и сверхновых.



4680 зеркал косо́го падения обеспечивают высокую чувствительность в диапазоне энергий от 3 до 79 кэВ.

Большое фокусное расстояние и высокая грануляция детектора позволяют получить угловое разрешение 10".

# Рентгеновская астрономия: Спектр-РГ



Российско-немецкая орбитальная астро-физическая обсерватория, для построения полной карты неба в рентгеновском диапазоне энергий.

Состоит из двух рентгеновских телескопов:

← немецкого eROSITA, (0.2 – 10 кэВ)

← российского ART-XC (4 – 30 кэВ)



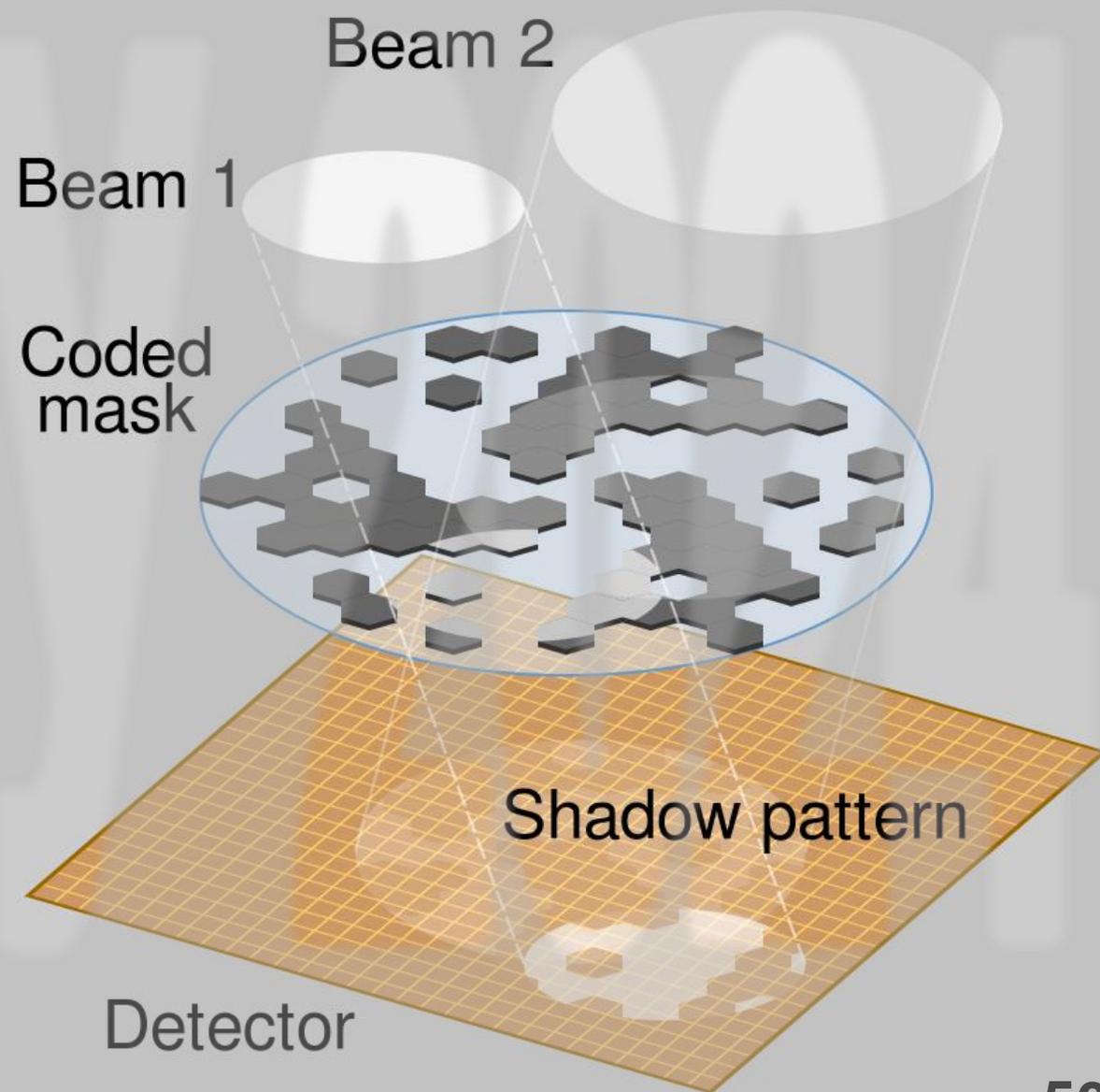
Начало работы: 2019 г.

# Кодирующая маска

Рентгеновские спутники с фокусирующей системой обладают более высокой чувствительностью и угловым разрешением, но малым полем зрения.

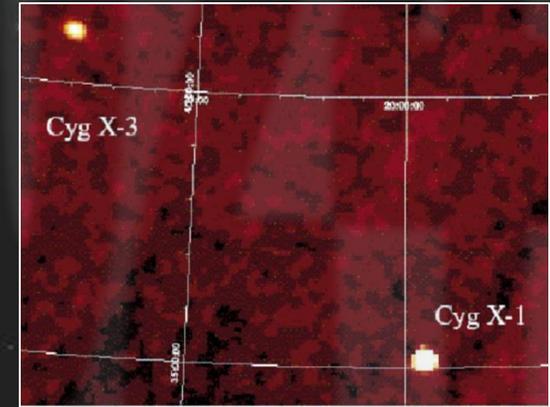
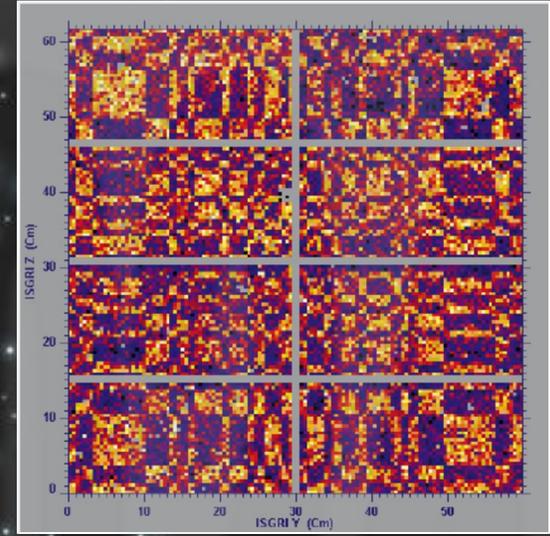
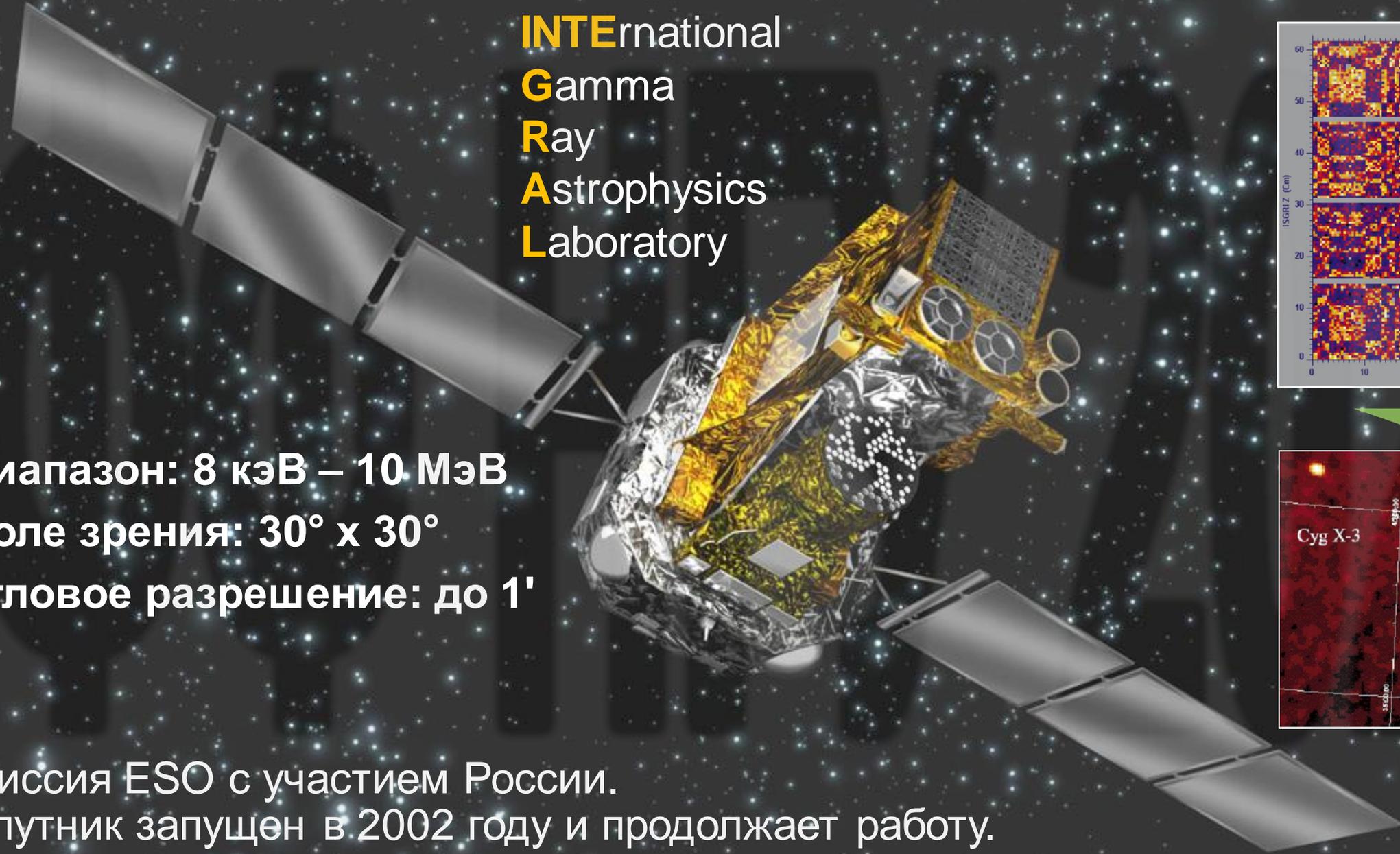
Альтернативной конструкцией является кодирующая маска, расположенная на входном отверстии телескопа.

По конфигурации тени от маски, создаваемой точечным источником, можно определить направление.



# Кодирующая маска: INTEGRAL

**I**NTErnational  
**G**amma  
**R**ay  
**A**strophysics  
**L**aboratory



Диапазон: 8 кэВ – 10 МэВ  
Поле зрения:  $30^\circ \times 30^\circ$   
Угловое разрешение: до  $1'$

Миссия ESO с участием России.  
Спутник запущен в 2002 году и продолжает работу.

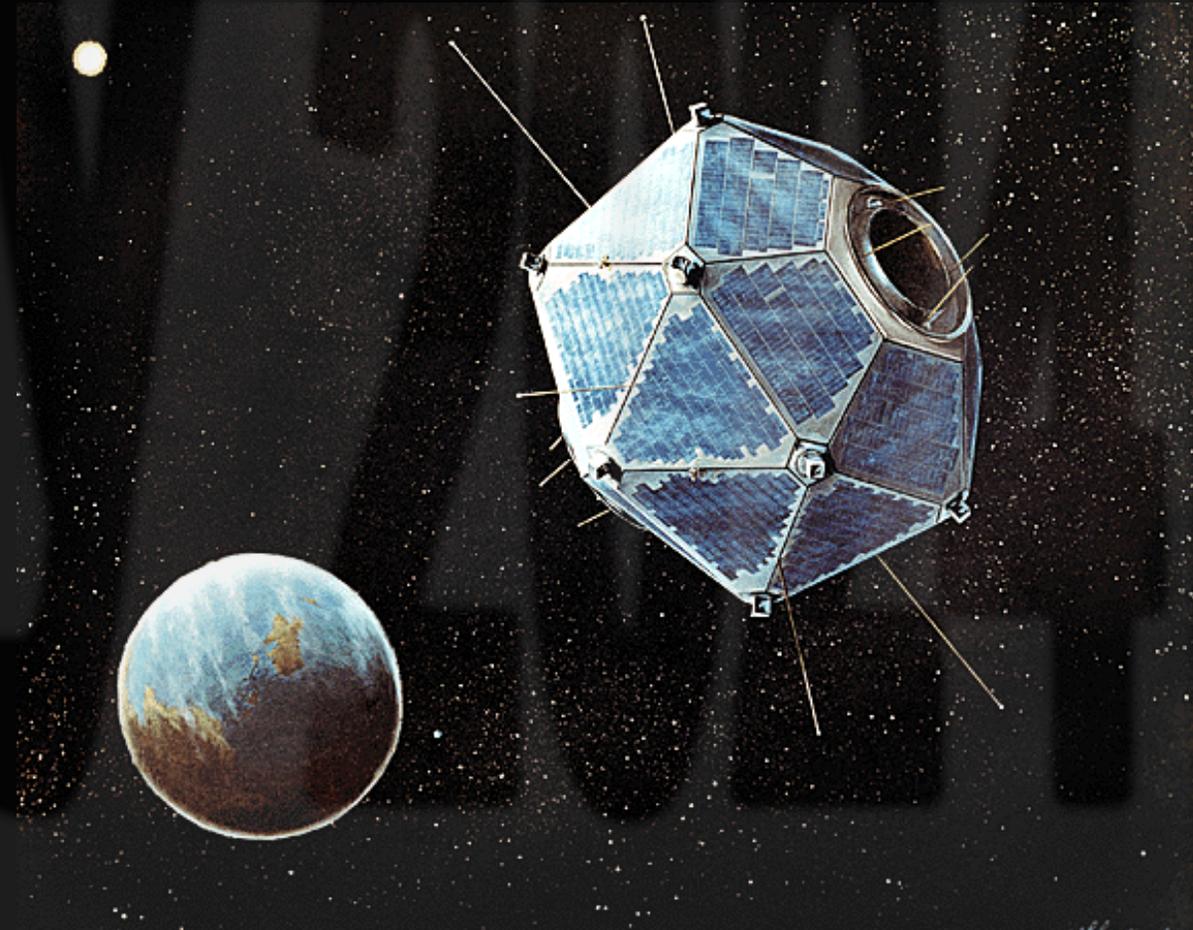
# Гамма астрономия: рождение

В 1963 году был подписан договор о частичном (в космическом пространстве, атмосфере и под водой) запрете испытаний ядерного оружия.

Для контроля за выполнением договора со стороны СССР, США создали и запустили на орбиту серию спутников VELA, которые могли зарегистрировать гамма излучение, образующееся в результате взрыва.

2 июля 1967 года сразу два спутника зарегистрировали короткие гамма всплески неизвестной природы.

Только в 1973 году, когда стало точно понятно, что источник находится не на Земле, результаты были опубликованы.

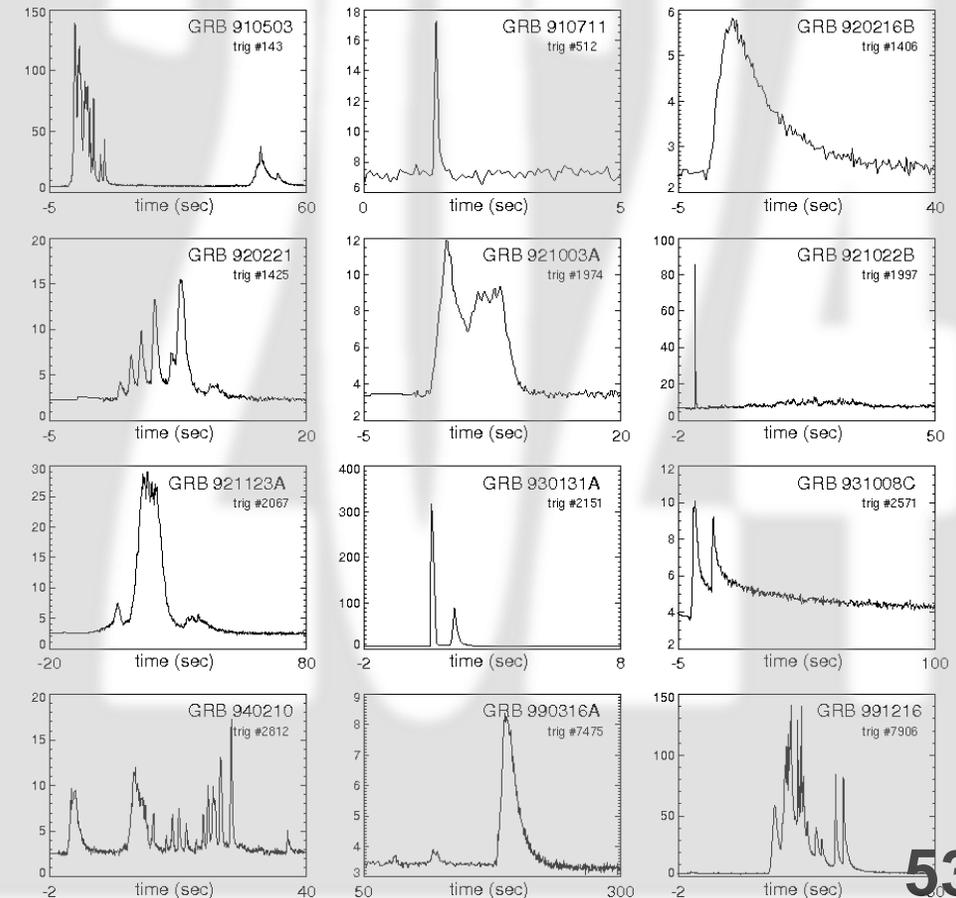


# Гамма астрономия: рождение

Многочисленные попытки определить источник гамма вспышек в других диапазонах ЭМ спектра не приводили к успеху. Это означало, что источник находится очень далеко, и, следовательно, энергии процессов, приводящих к гамма вспышкам должны быть чудовищно огромными!

Попытки классификации наблюдаемых вспышек также ни к чему не приводили – каждая вспышка выглядела особенной, без каких либо очевидных закономерностей.

В настоящее время гамма гамма-астрономия – одно из активно развивающихся направлений исследований. Достигнут большой прогресс в понимании механизмов, приводящих к гамма-всплескам.



# Гамма астрономия: CGRO

Compton Gamma Ray Observatory

Масса спутника 16.3 тонны  
Доставлен на орбиту шаттлом  
Atlantis в 1991 году.

# Гамма астрономия

**The Imaging Compton Telescope**  
Энергии 1 – 30 МэВ.

**The Energetic Gamma Ray  
Experiment Telescope**  
Энергии 20 – 30000 МэВ.



**The Oriented Scintillation  
Spectrometer Experiment**  
Энергии 50 кэВ – 10 МэВ.

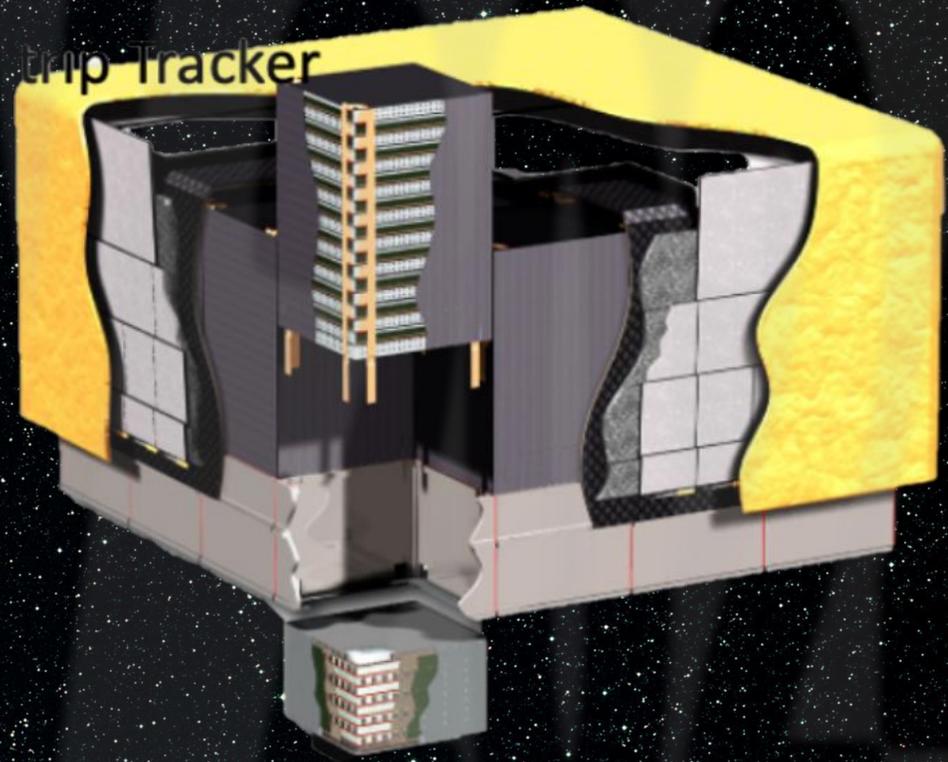
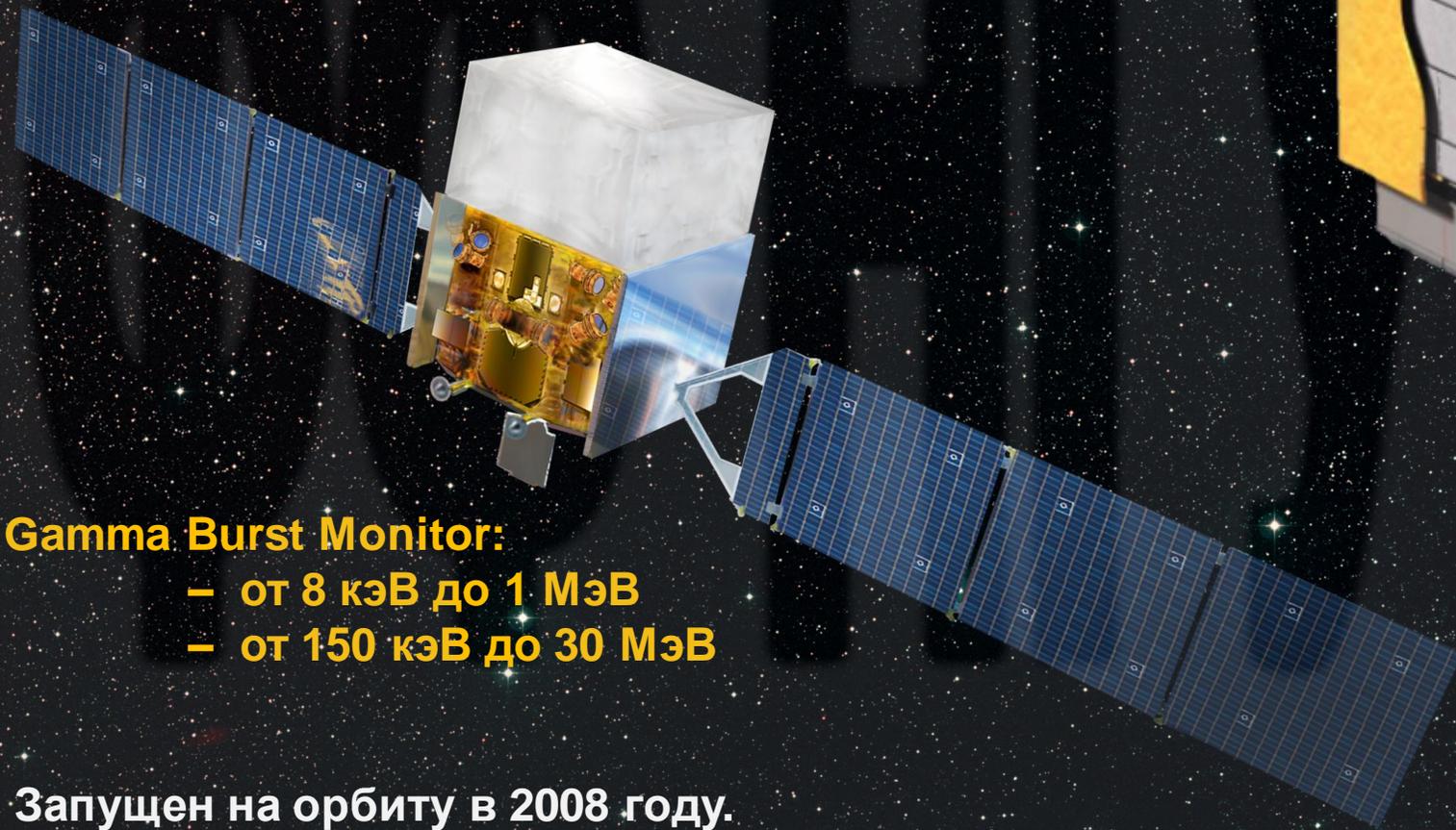
**The Burst And Transient  
Source Experiment**  
Энергия 20 – 1000 кэВ.

Период работы 1991 – 2000 годы.

# Гамма астрономия: Fermi-GRST

Предельные энергии, которые еще можно напрямую измерить.

Диапазон энергий от 20 МэВ до 300 ГэВ



**Gamma Burst Monitor:**

- от 8 кэВ до 1 МэВ
- от 150 кэВ до 30 МэВ

Фотоны (и другие космические частицы более высоких энергий регистрируются косвенными методами.  
(следующая лекция)

Запущен на орбиту в 2008 году.

# SWIFT: Три в одном UV-X-Gamma

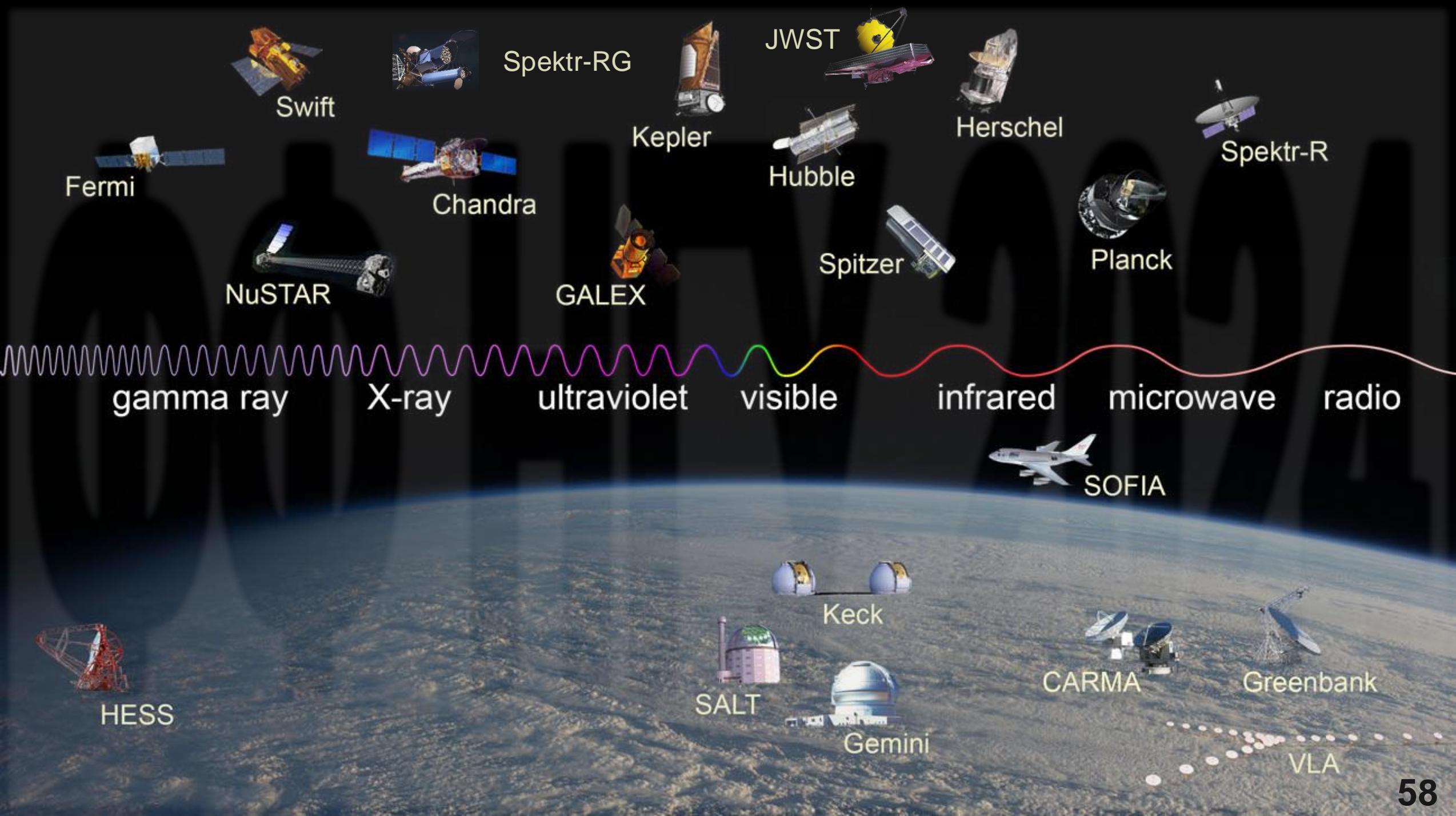
Мультиканальная обсерватория для поиска и изучения гамма всплесков и их дальнейшего изучения в гамма, рентгеновском и УФ диапазонах. Начало работы 2004 год.

УФ-Оптический  
телескоп  
(170 – 650 нм)

Рентгеновский  
телескоп  
(0.2 – 10 кэВ)

Кодирующая маска  
гамма телескопа  
(15 – 150 кэВ)







Radio

Microwave

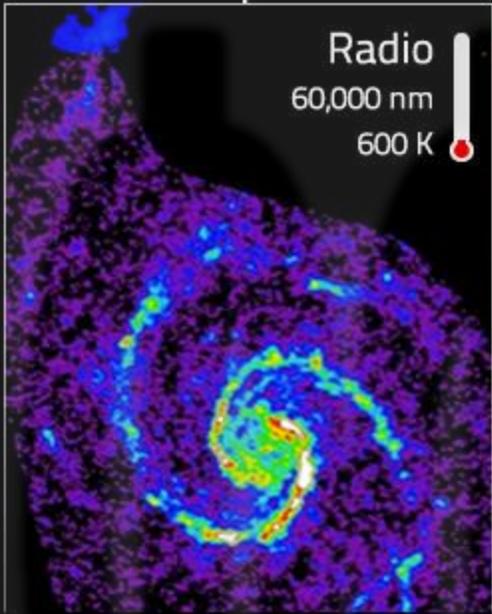
Infrared



UV

X-Ray

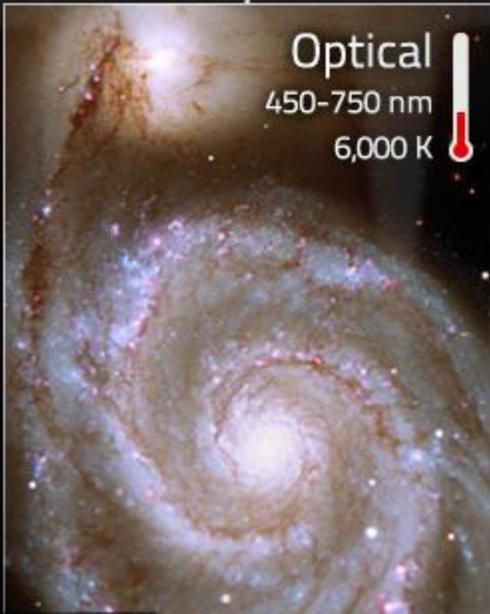
Gamma Ray



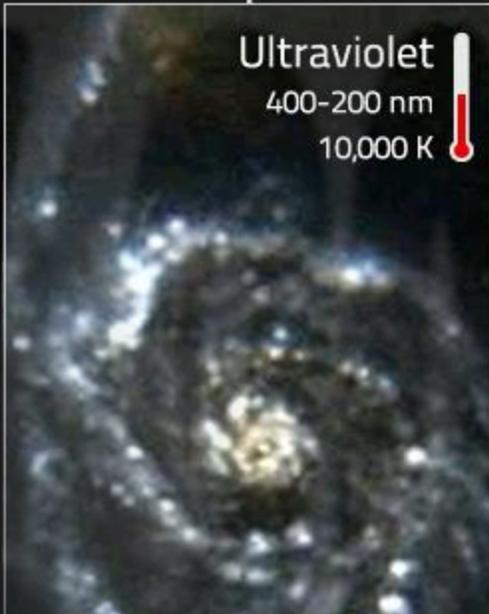
Radio  
60,000 nm  
600 K



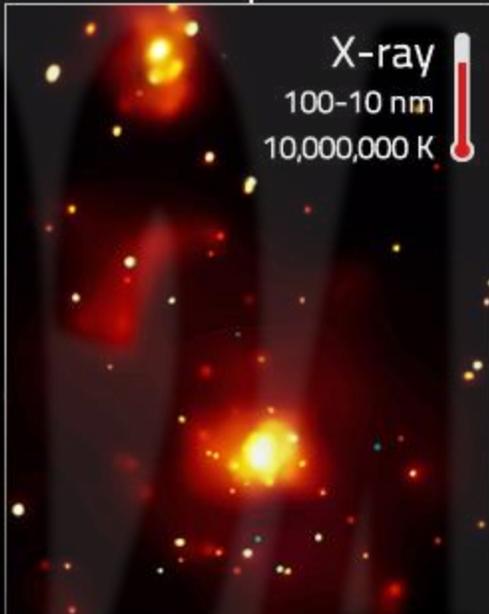
Infrared  
1200-800 nm (10-3.6 um)  
4,500 K



Optical  
450-750 nm  
6,000 K



Ultraviolet  
400-200 nm  
10,000 K



X-ray  
100-10 nm  
10,000,000 K

# Multiwavelength Whirlpool Galaxy

**COLD GAS:** Radio waves reveal regions of gas cool enough for CO<sub>2</sub> molecules to exist.

**COOL STARS:** Infrared shows smaller cool red stars that make up most of the galaxy.

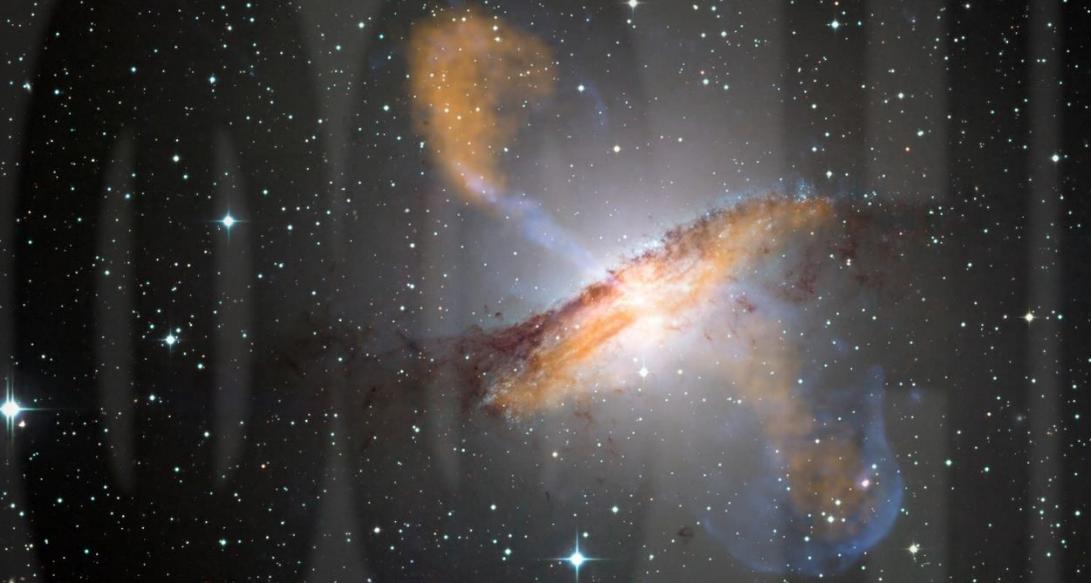
**SOLAR STARS:** Optical light comes from stars around the size of the Sun.

**HOT STARS:** Ultraviolet shows the larger hot blue stars that are less frequent in galaxies.

**HOT GAS:** X-rays are emitted from the hottest regions of gas where atoms are ionized.

# Всеволновая астрономия

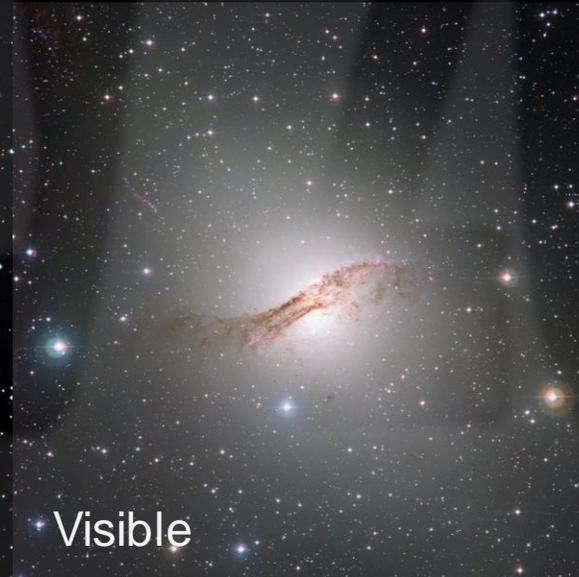
NGC 5128 (Cen A)



Галактика с активным ядром  
(сверхмассивная черная дыра в центре)

Composite image

Radio



Visible

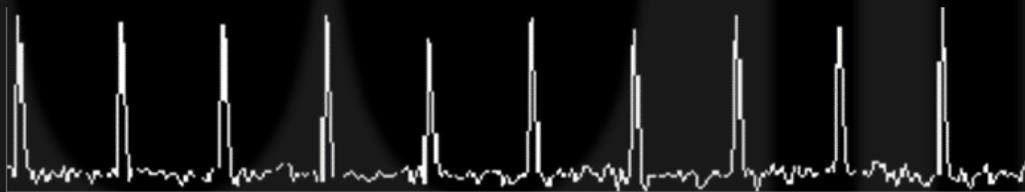
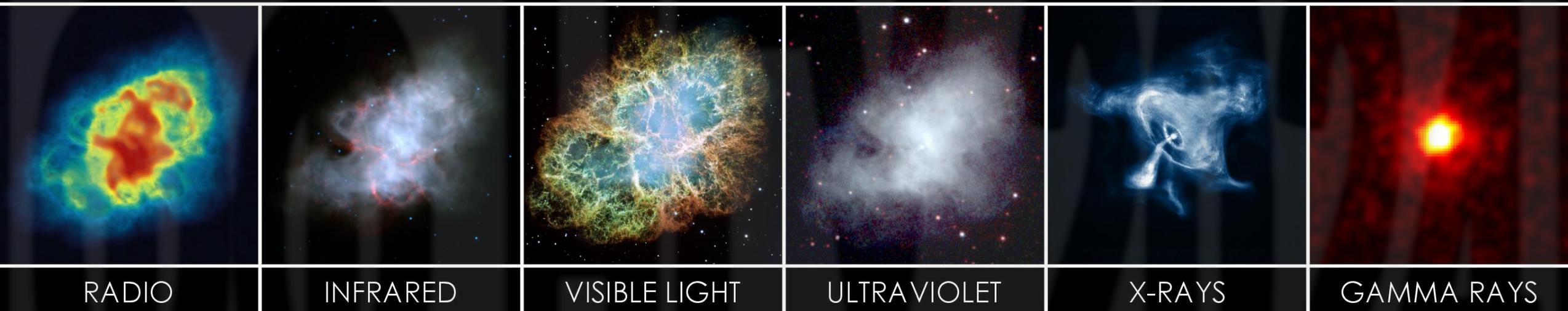
IR



X-Ray

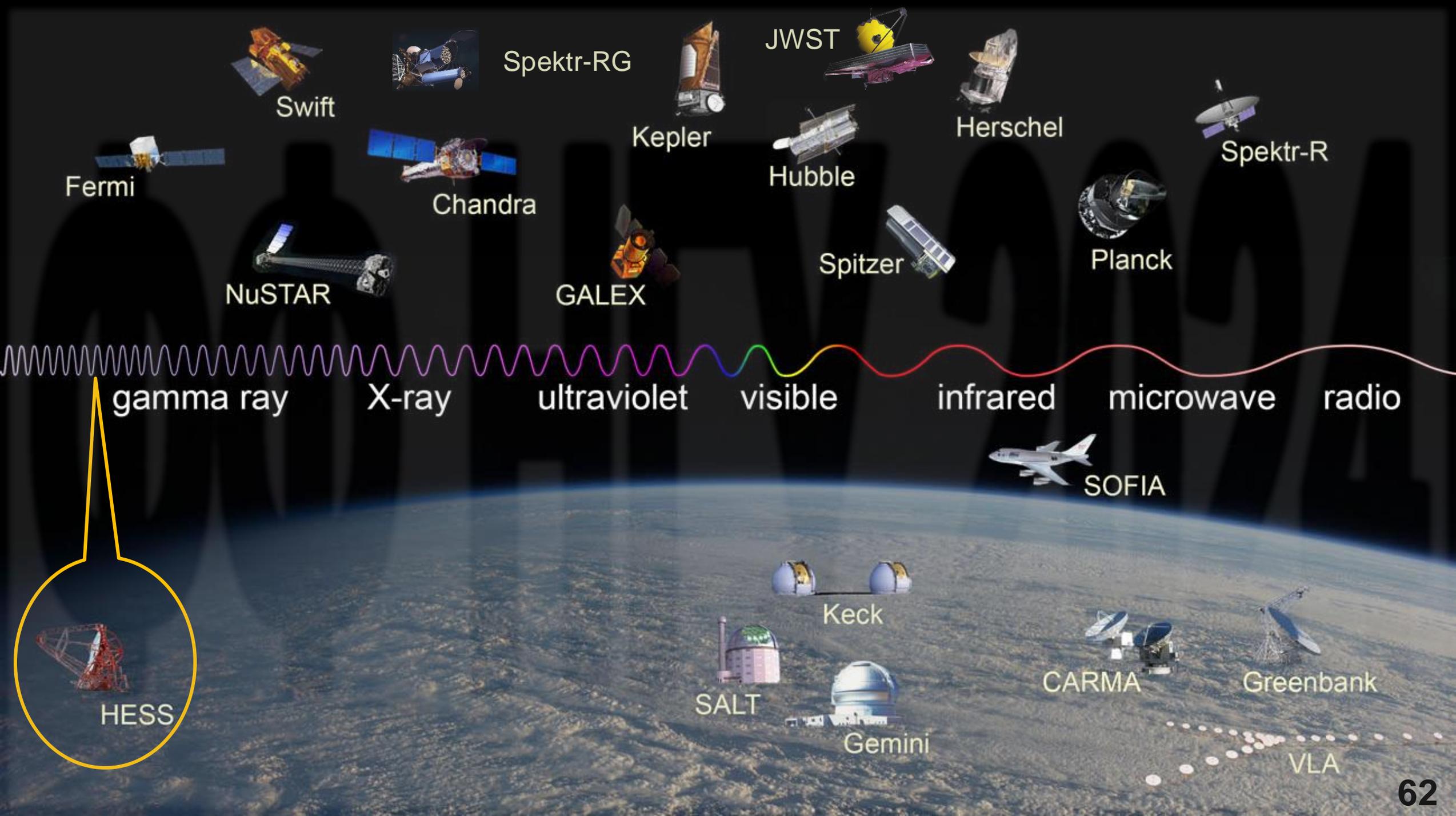
# Всеволновая астрономия

## CRAB NEBULA



Радио-пульсации нейтронной звезды

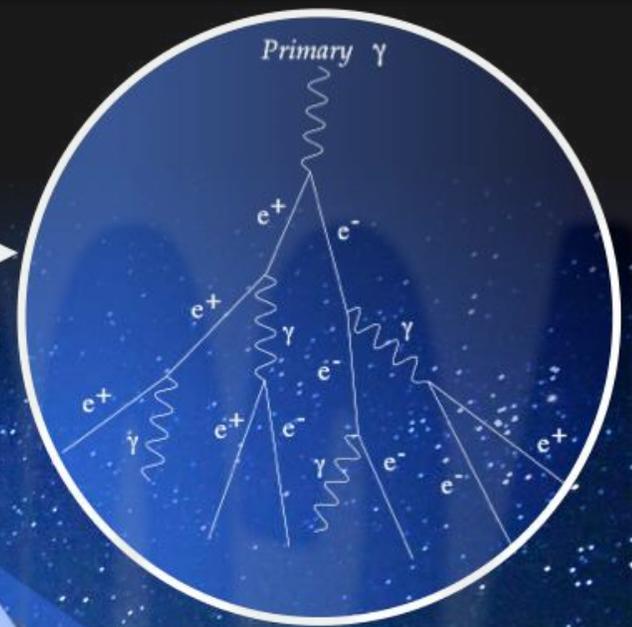
Один из ближайших к нам и лучше всего изученных пульсаров (нейтронная звезда), образовавшихся при взрыве сверхновой в 1054 году (согласно китайским хроникам).



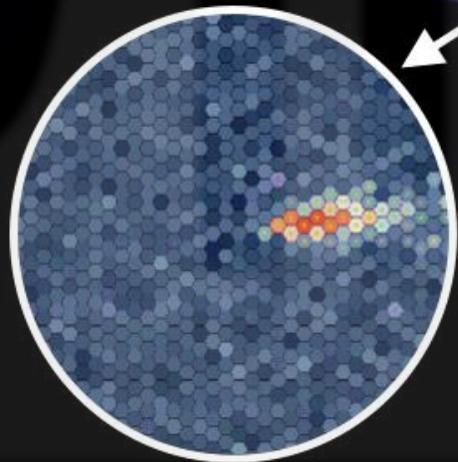
# $\gamma$ — астрономия

$\gamma$ -ray enters the atmosphere

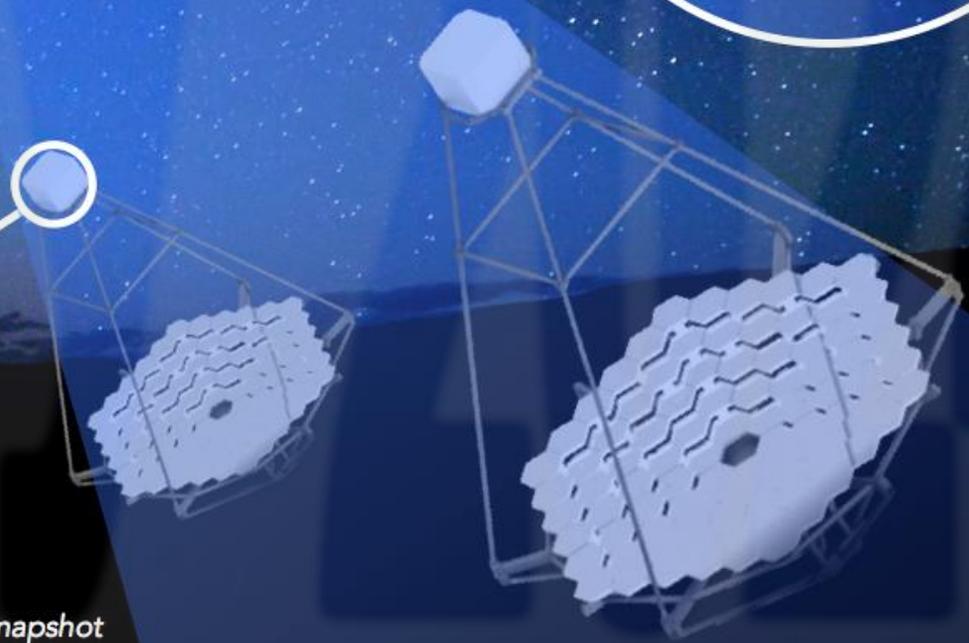
Electromagnetic cascade



Космические фотоны сверхвысоких энергий ( $>TэВ$ ) уже практически невозможно регистрировать прямыми методами. Основным методом изучения частиц ( $\gamma$ ,  $e$ ,  $p$ ) очень высоких энергий является наблюдение результата их взаимодействия в атмосфере Земли.



10 nanosecond snapshot



0.1 km<sup>2</sup> "light pool", a few photons per m<sup>2</sup>.

(следующая лекция)