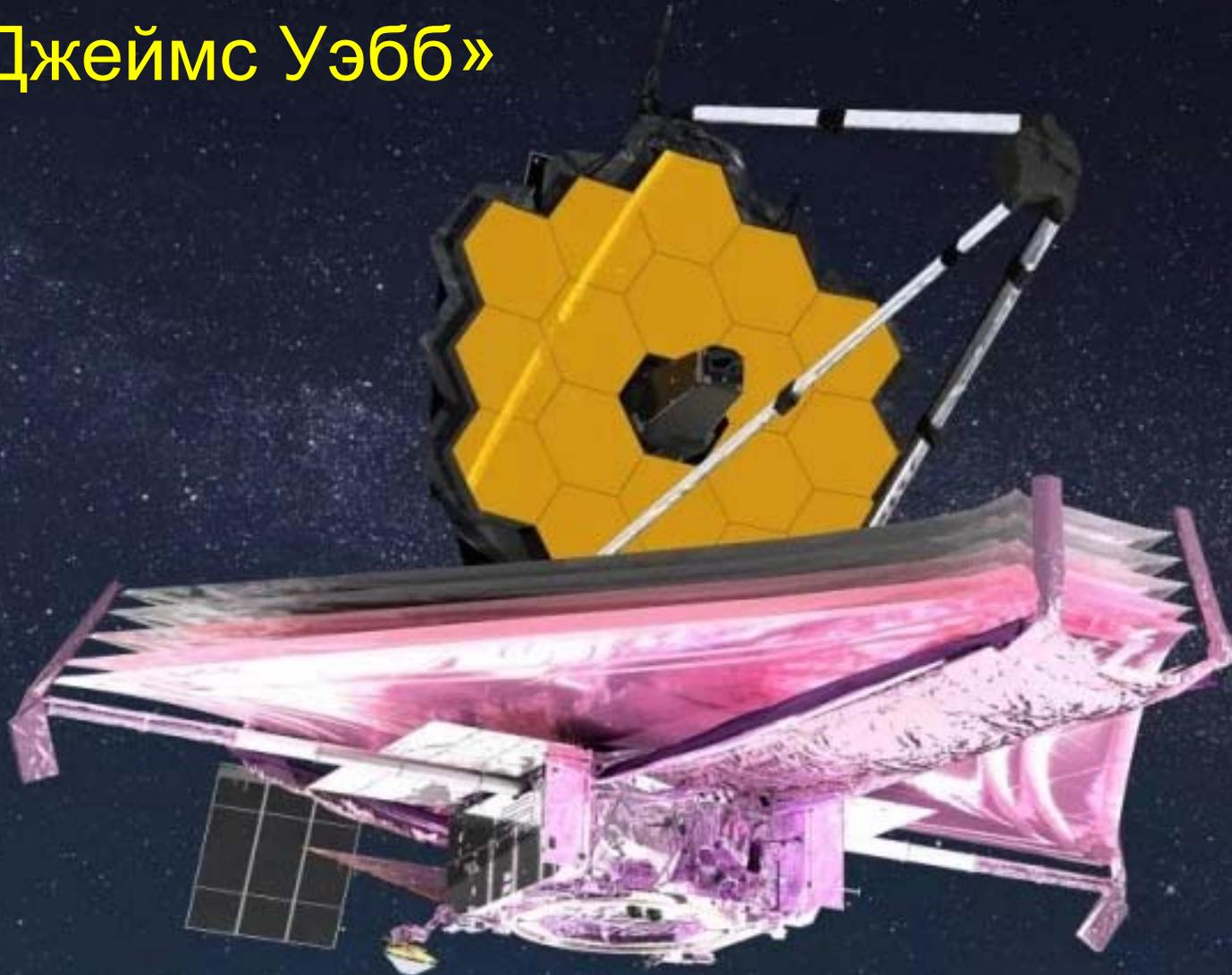


Внеатмосферная астрономия  
и новый космический телескоп  
«Джеймс Уэбб»

Сурдин В.Г.  
ГАИШ МГУ



James Webb Space Telescope



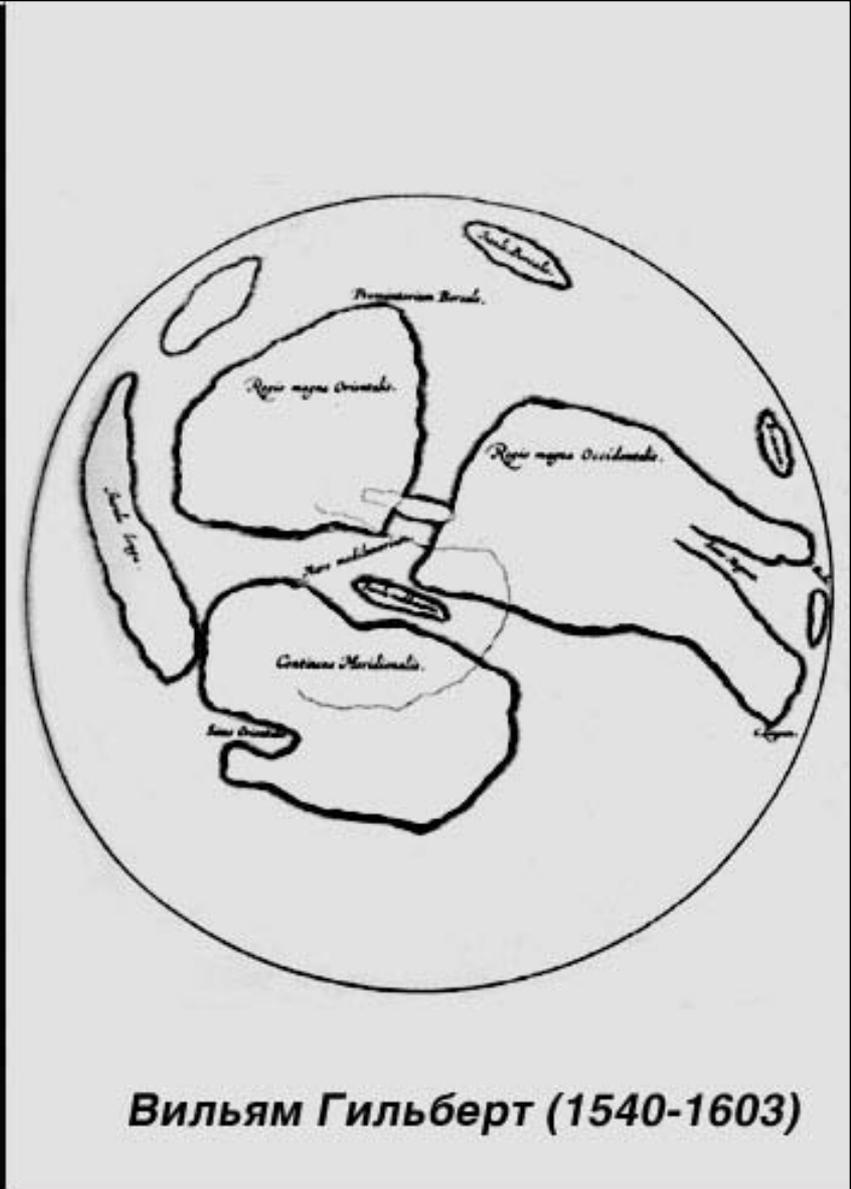


Леонардо да Винчи  
(1452 - 1519)



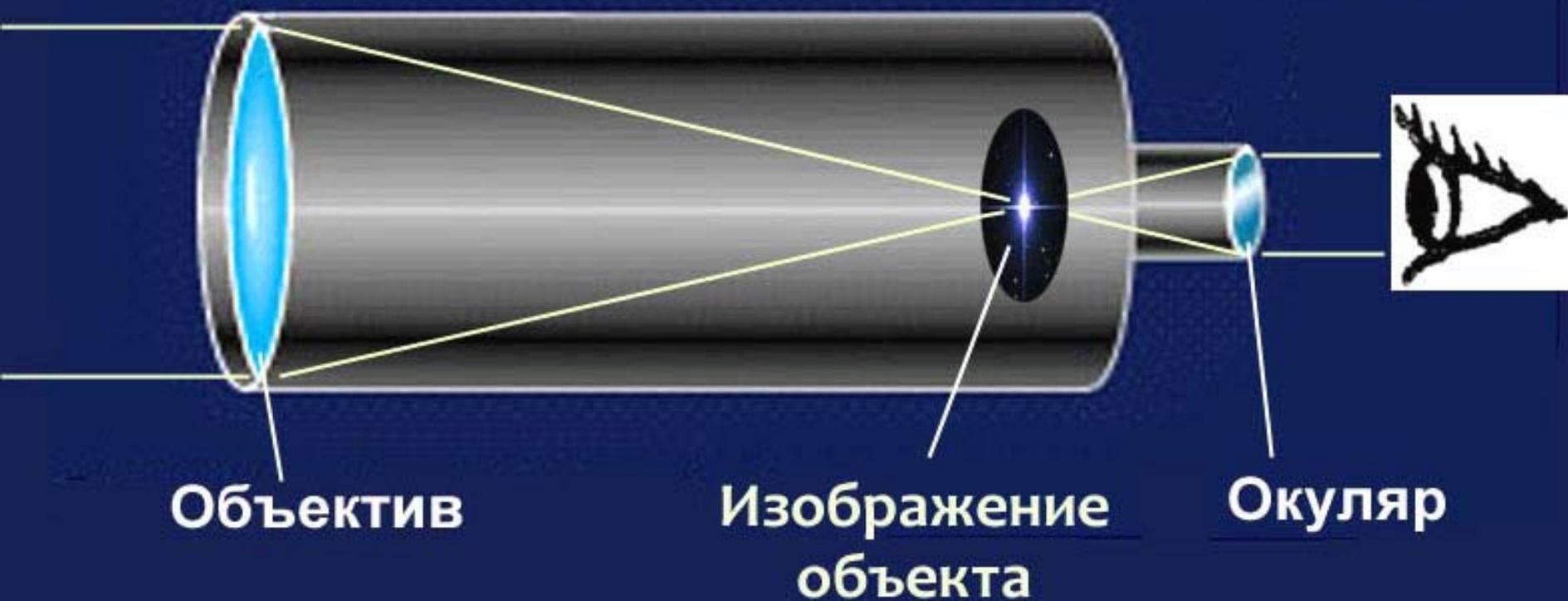


Угловое разрешение глаза около  $100'' \approx 1,5'$

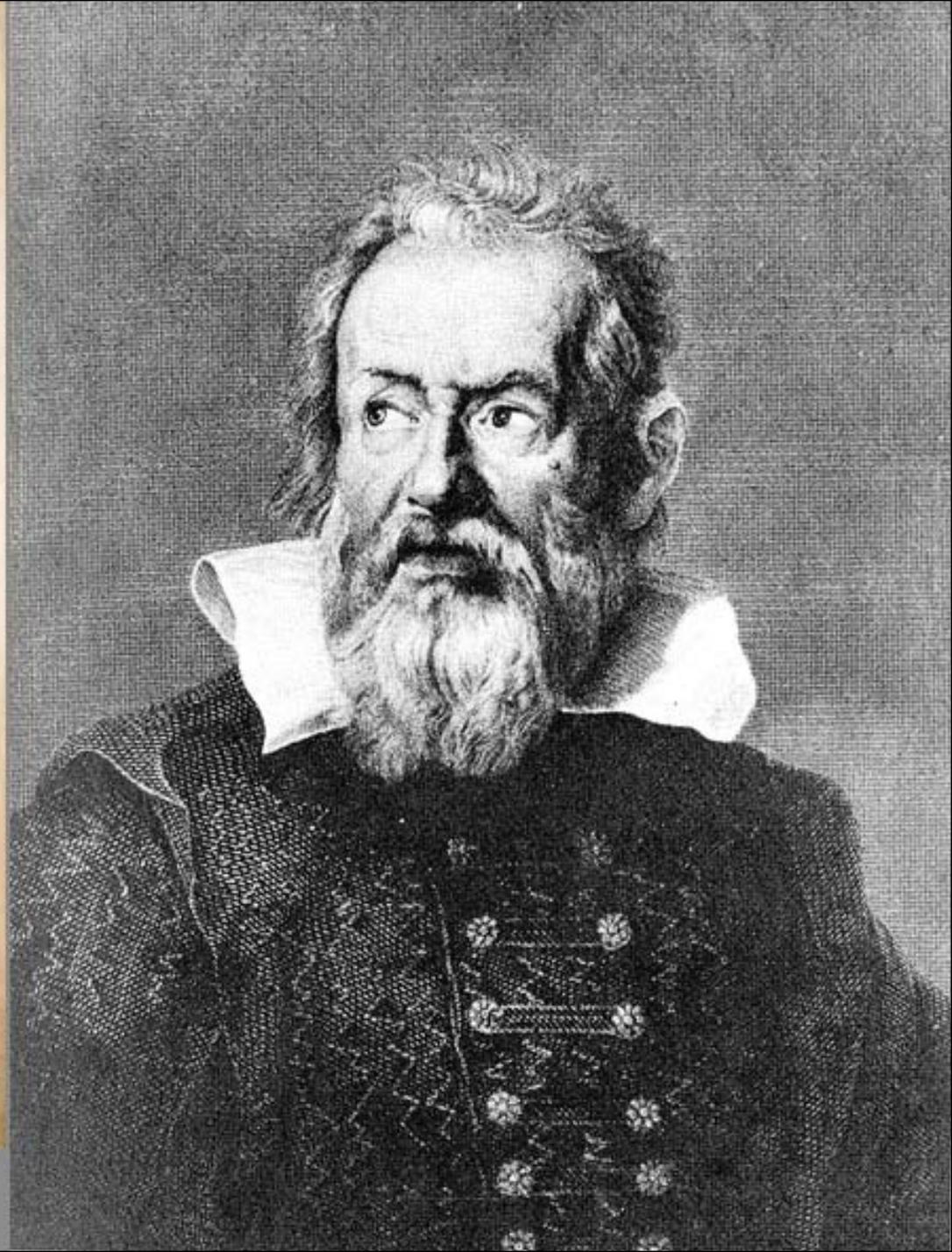


Вильям Гильберт (1540-1603)

Наблюдение Луны невооруженным глазом



**Принцип телескопа:**  
*объектив создает изображение объекта,  
а глаз рассматривает его в лупу*

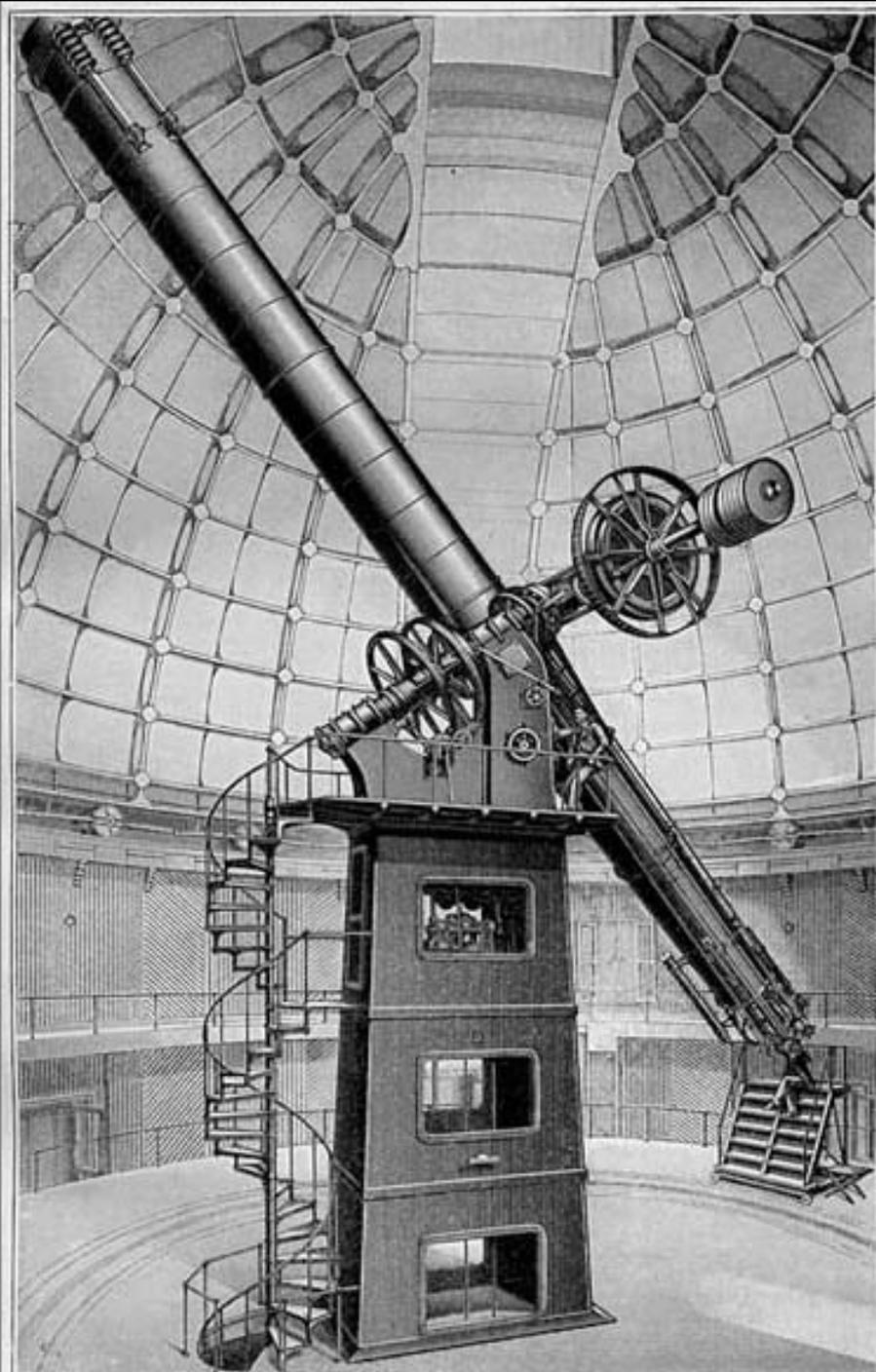


*Галилео, 1609*

36-дюймовый рефрактор  
Ликской обсерватории  
(гора Гамильтон, Калифорния, 1888 г.)



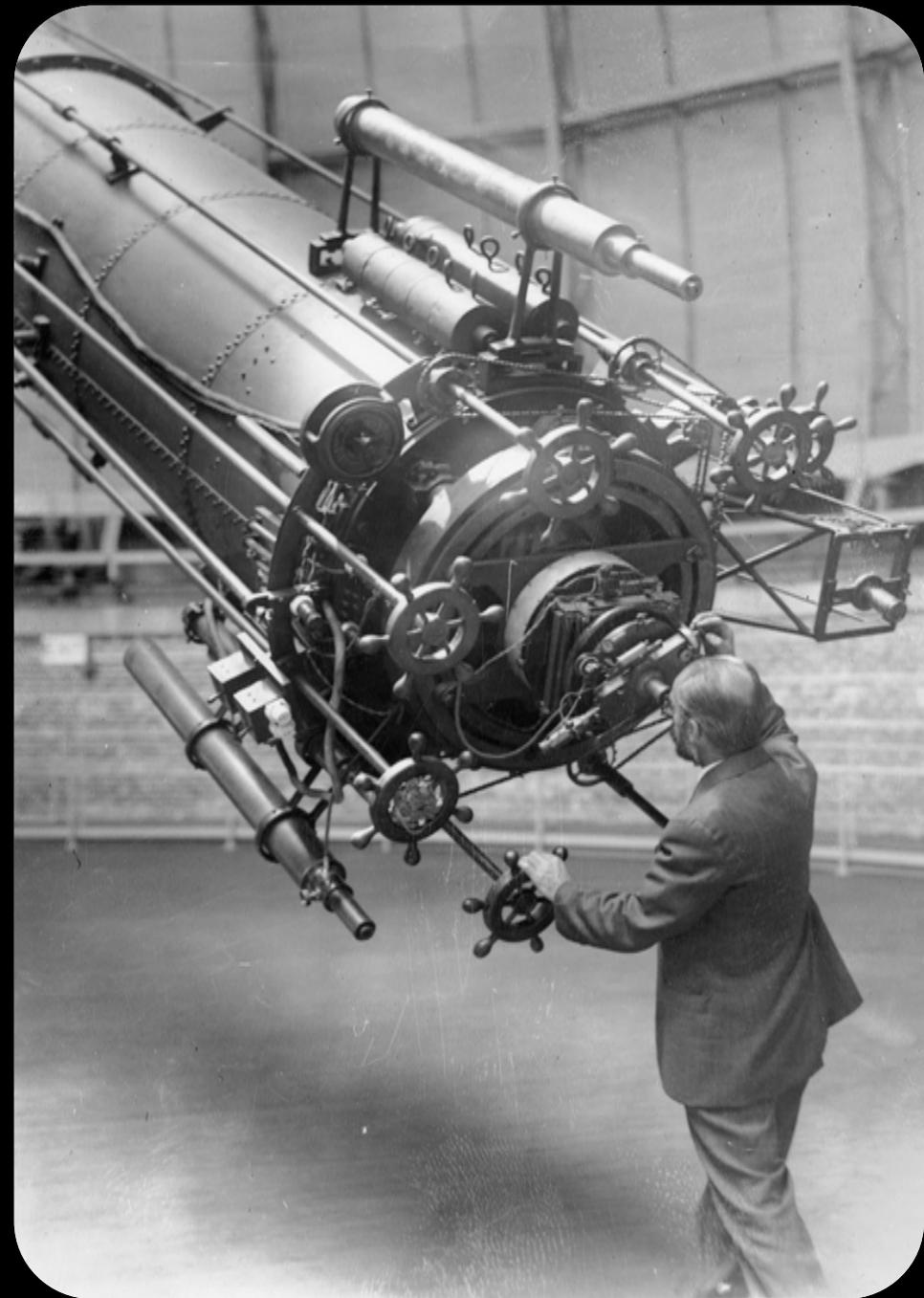
Mary Lea Shane Archives





В башне телескопа-рефрактора XIX века. Йерксская обсерватория (США)

Крупнейший в мире рефрактор: 40-дюймовый Йеркской обсерватории (США)





Исаак Ньютон  
в 1668 г.  
построил  
первый  
действующий  
телескоп-  
рефлектор



5-м рефлектор Паломарской обсерватории (США)

*БТА  
САО РАН*



**6 м**  
**1:4**







*Качество изображения  
и  
выбор места для обсерватории*

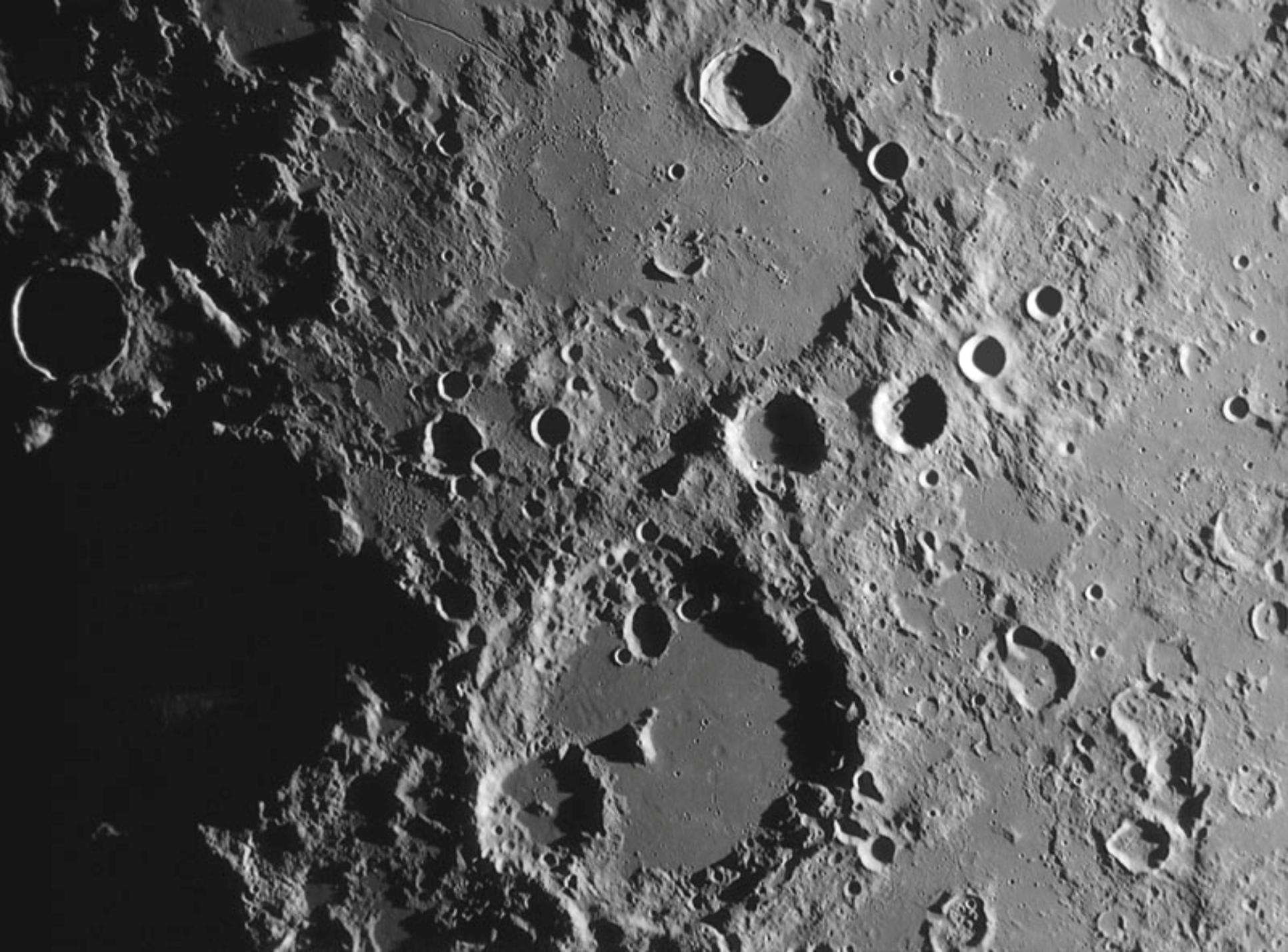


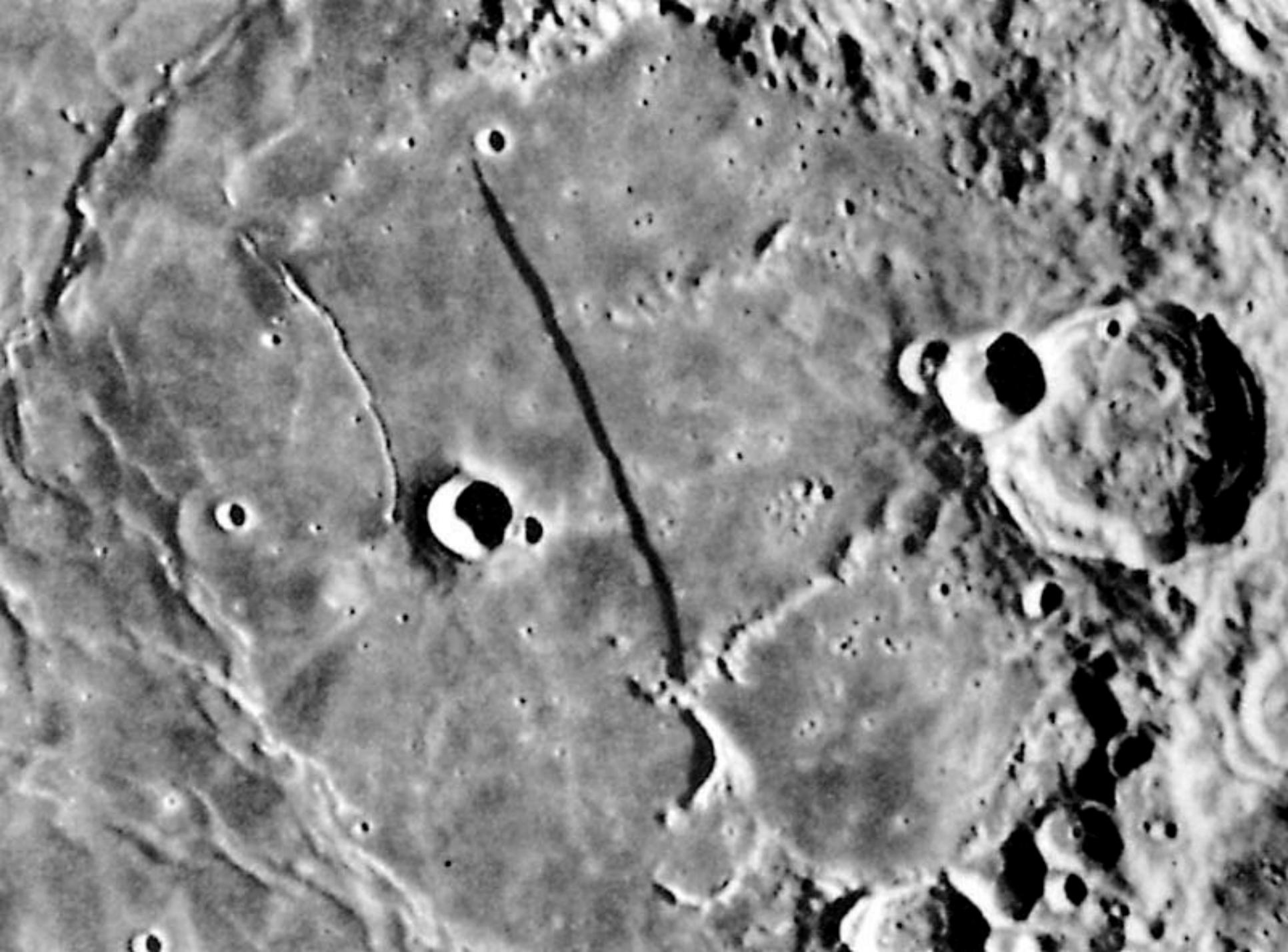
# *Атмосфера*

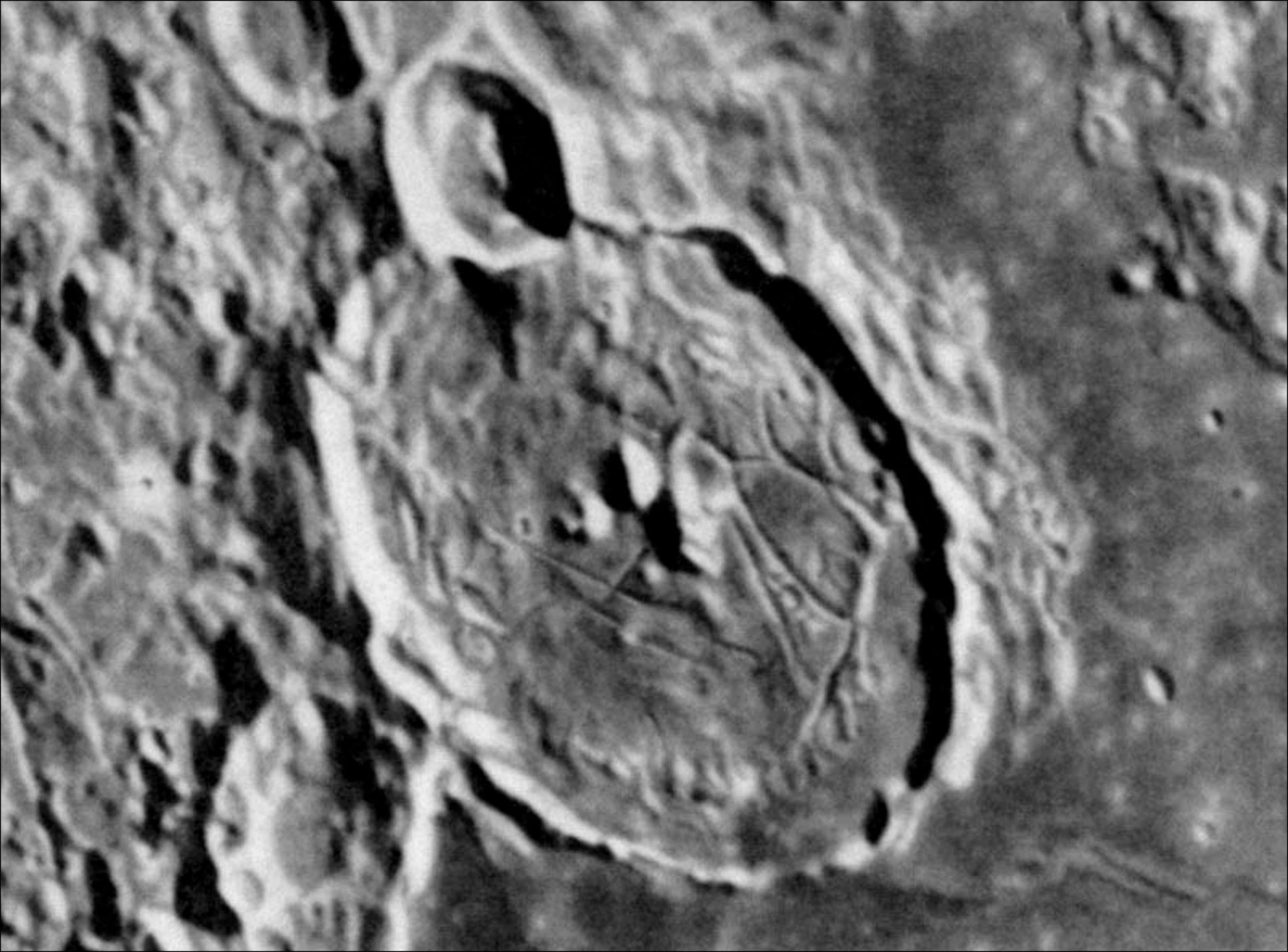
*“Мы живём на дне  
воздушного океана”*



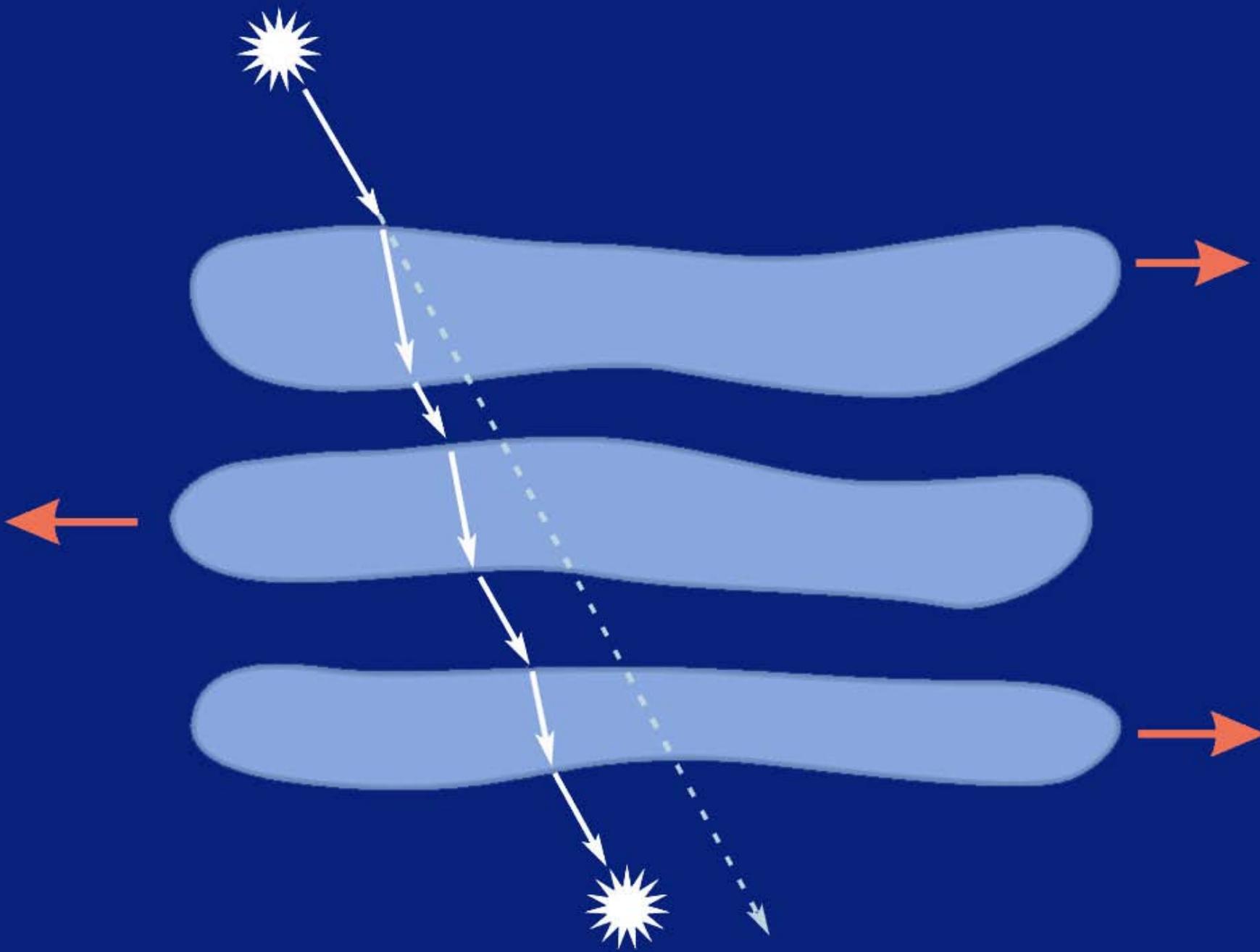


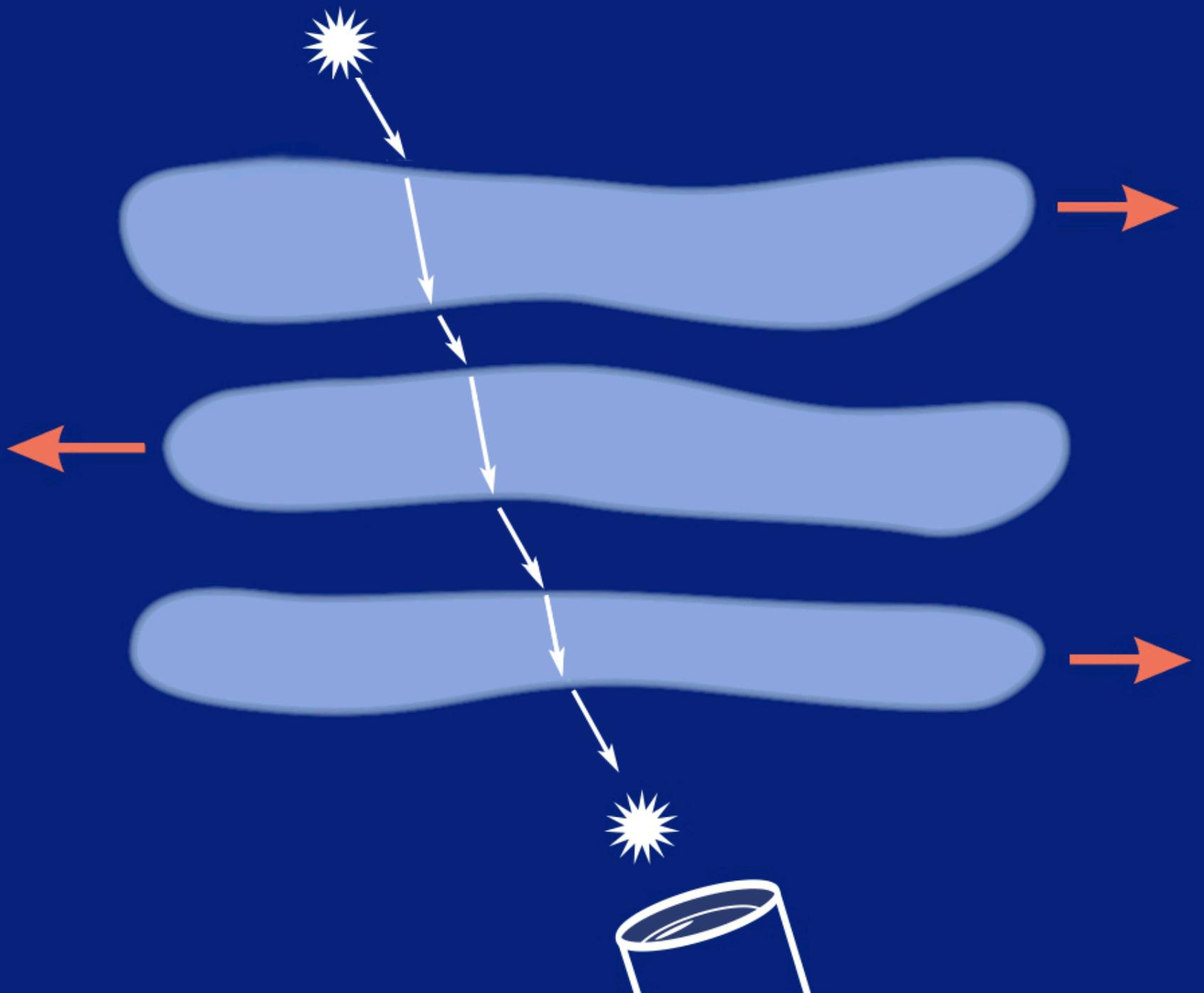


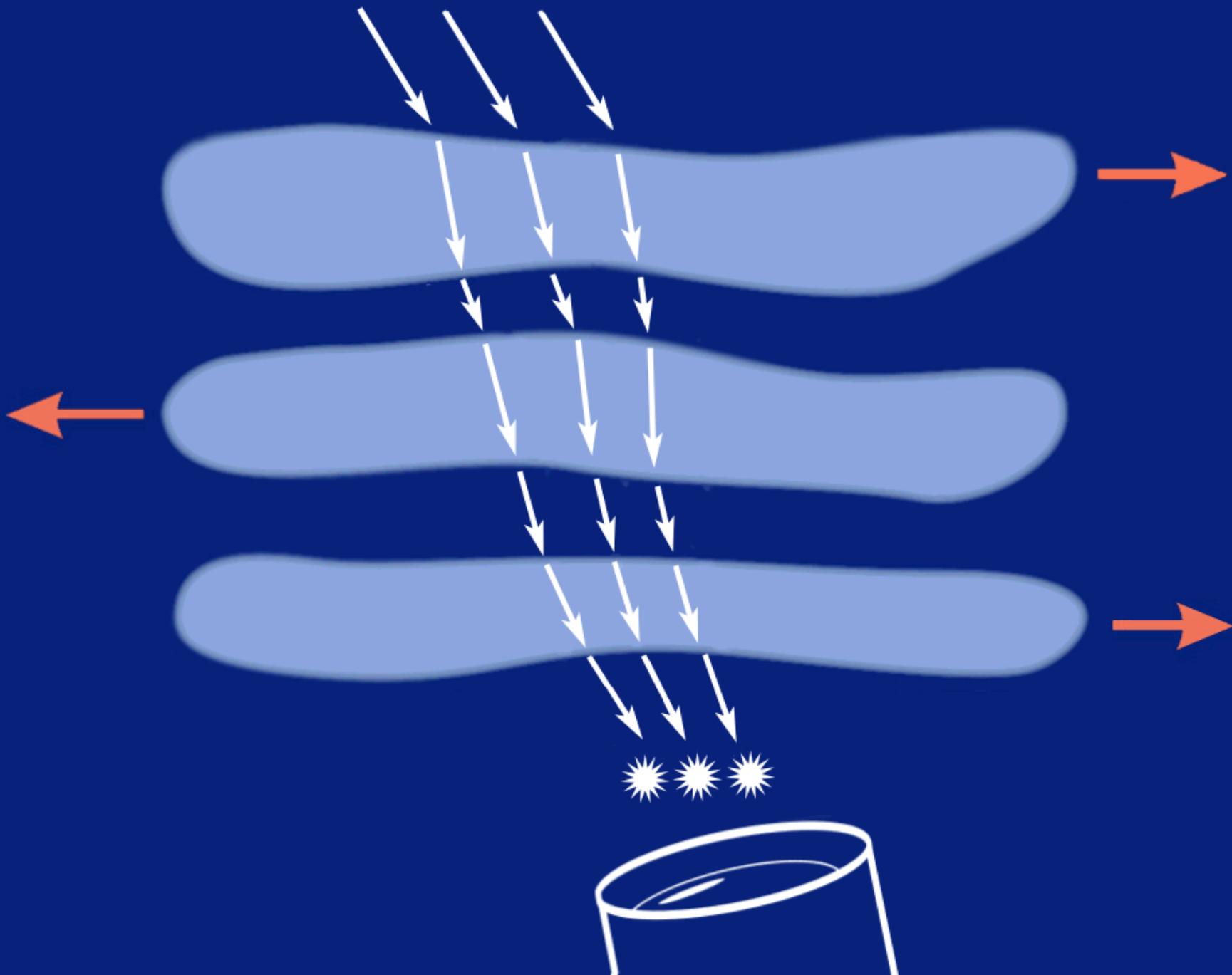














***Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга  
1954 г.***





Sphinx Obs.  
Jungfrauoch  
3500 m



Pic du Midi  
French Pyrenees  
2865 m

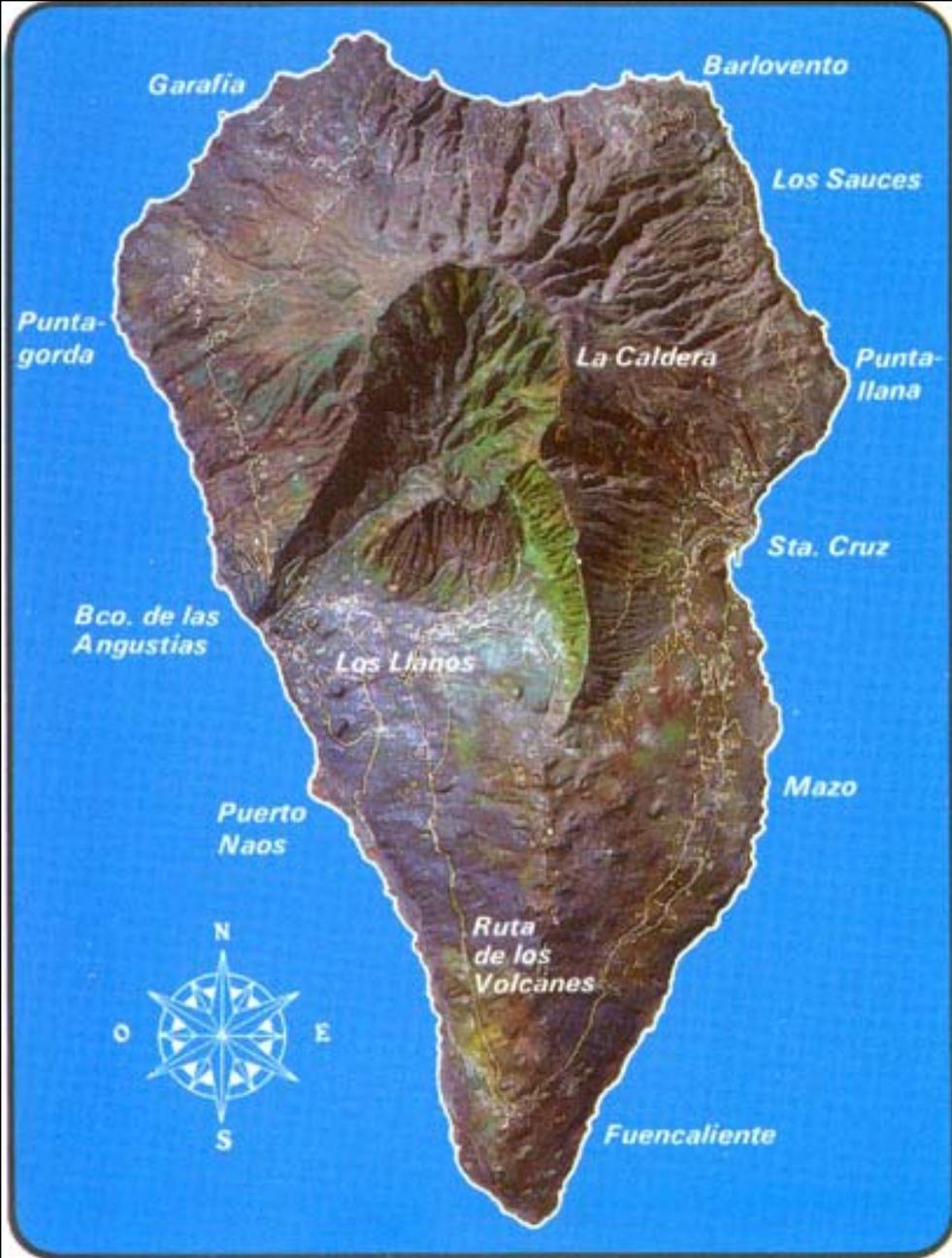




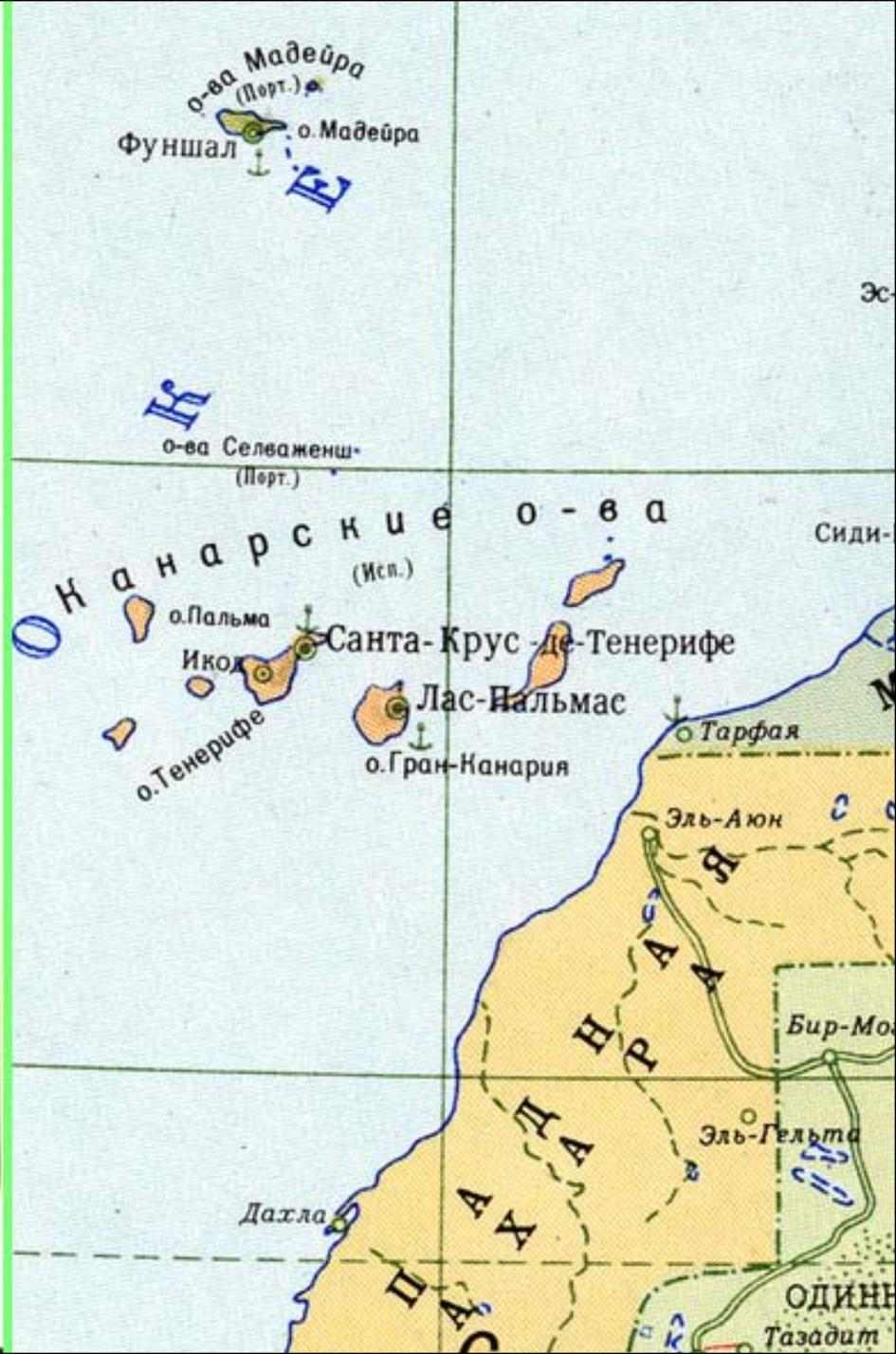


**ESO  
La Silla  
2400 m**





La Palma







*Мауна-Кеа, о.Гавайи, 4130 м*



SOFIA

NASA

DLR

N701NA







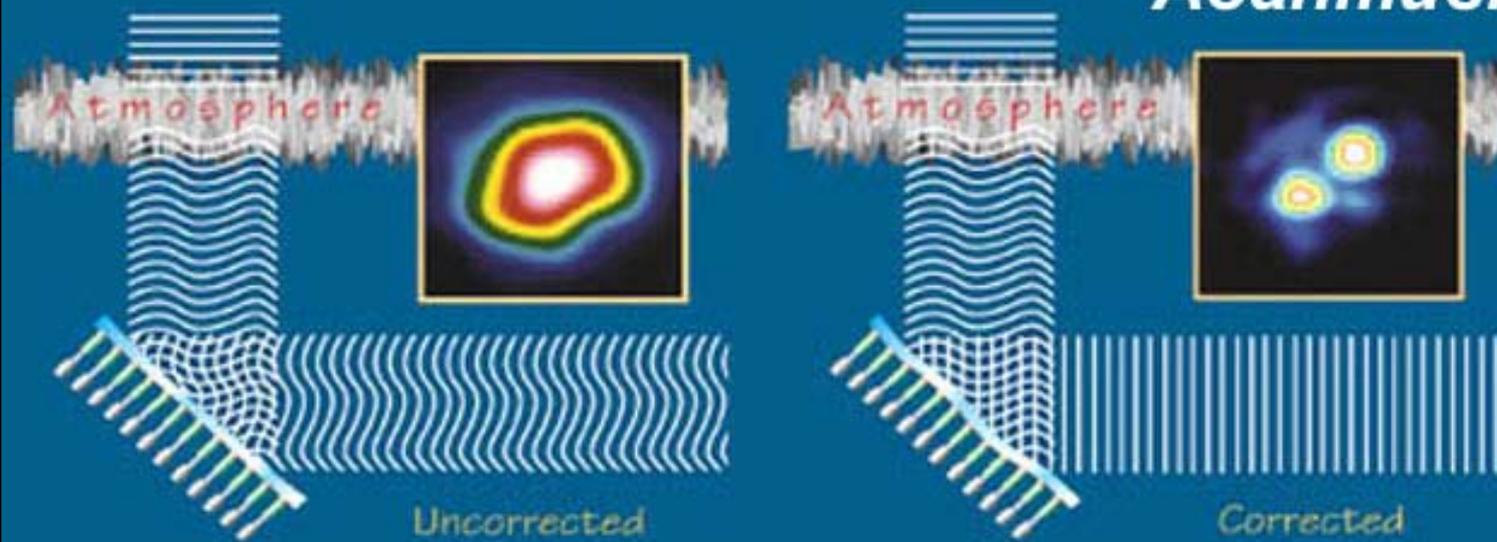




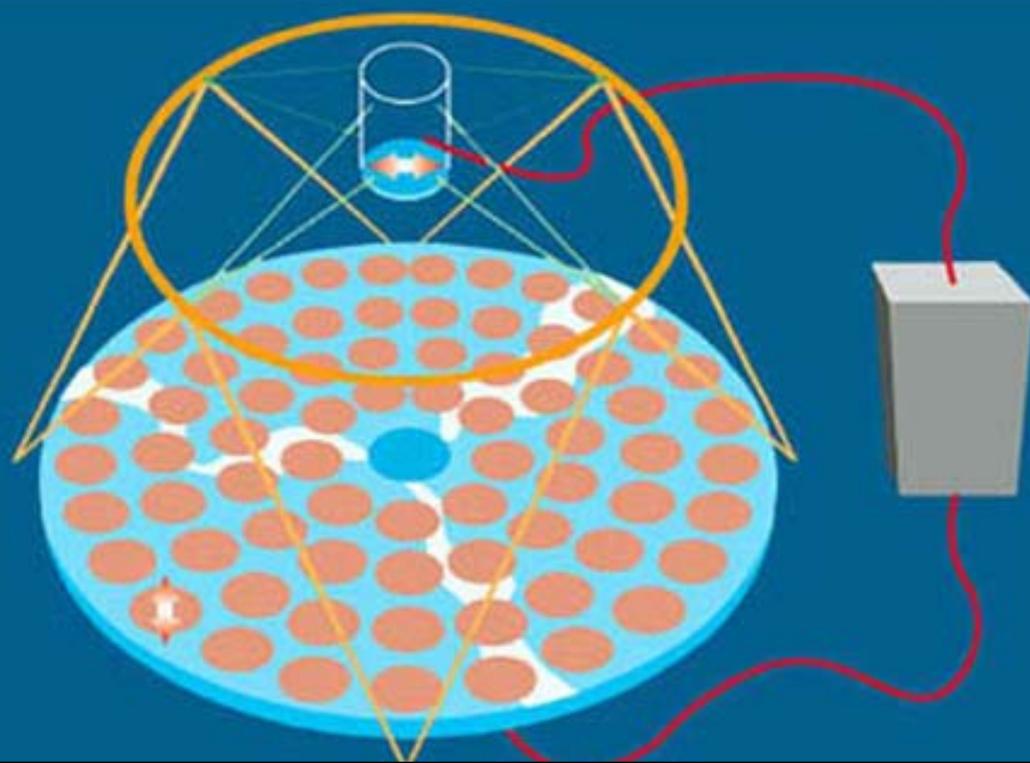
# *Адаптивная оптика*



# Адаптивная оптика

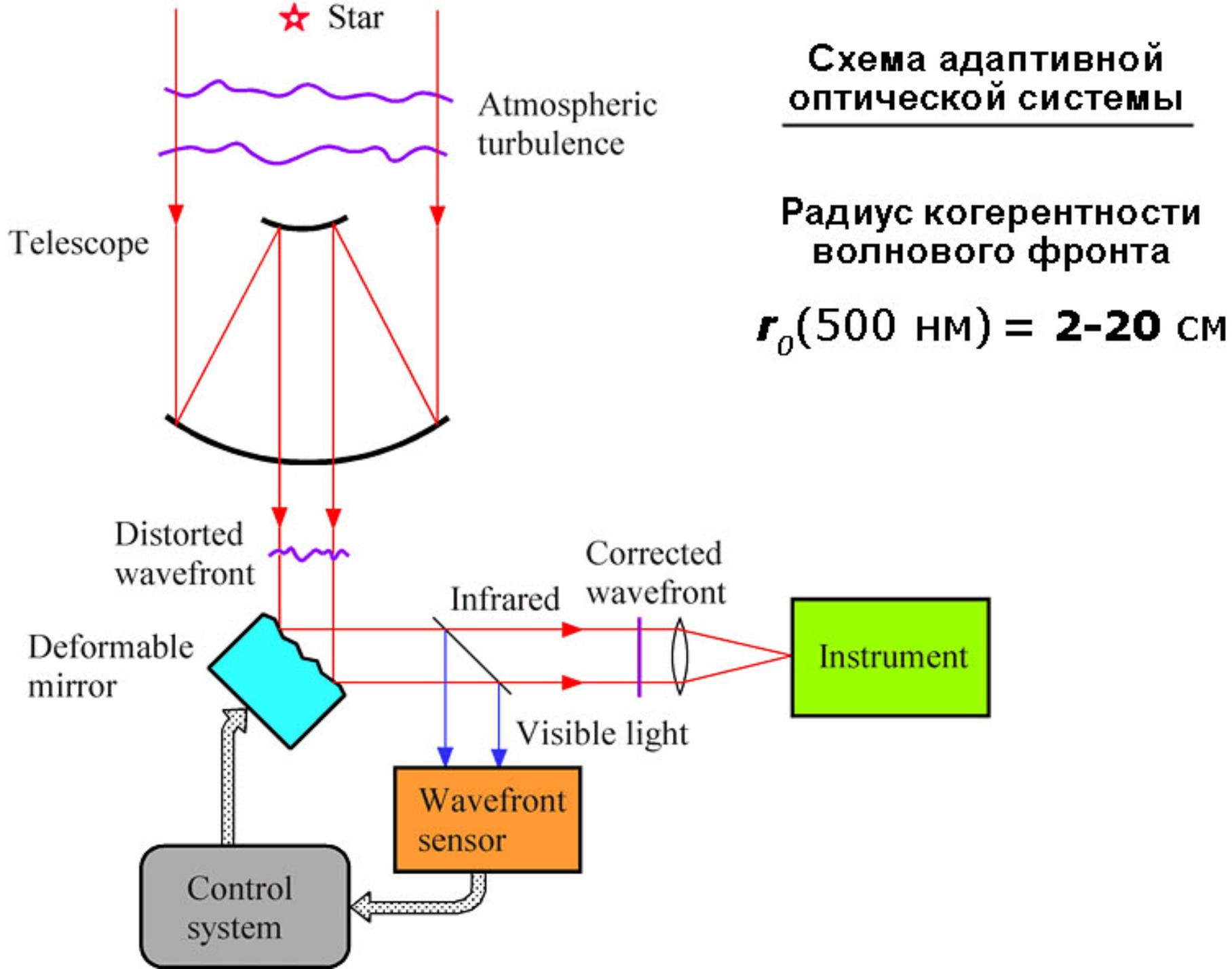


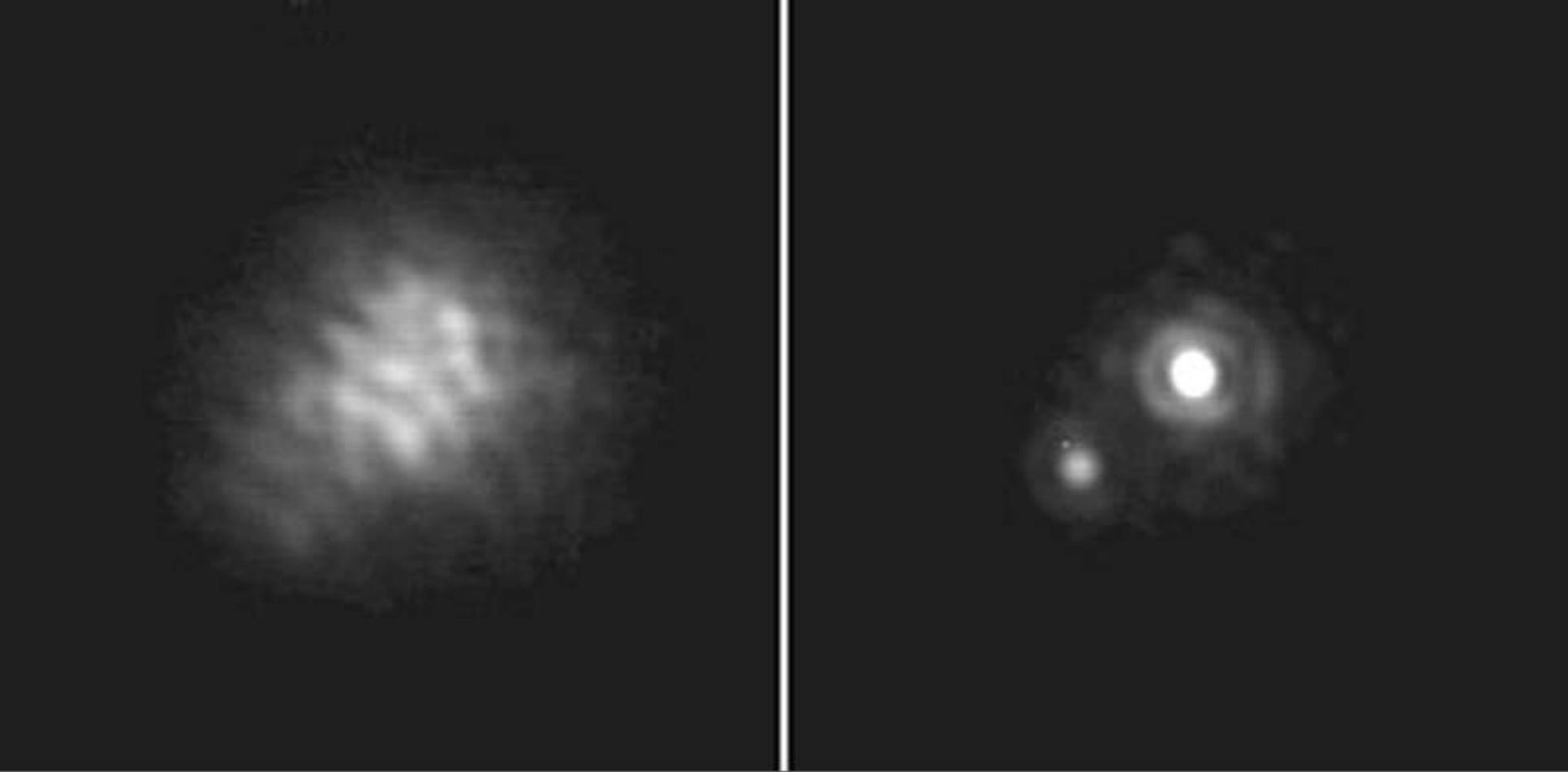
Подстройка  
формы  
мягкого  
зеркала



# Активная оптика

Поддержание формы  
главного зеркала

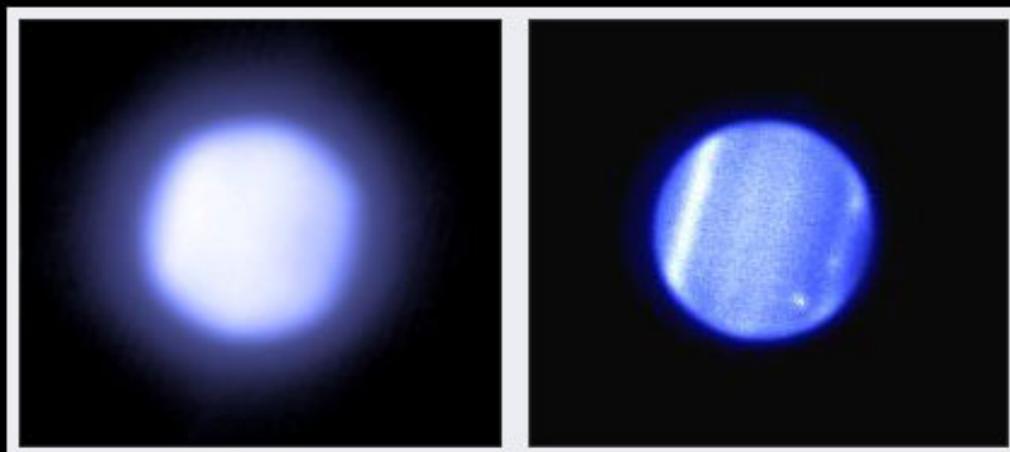




**Изображение двойной звезды,  
исправленное адаптивной оптикой  
телескопа “Субару” (Япония)**

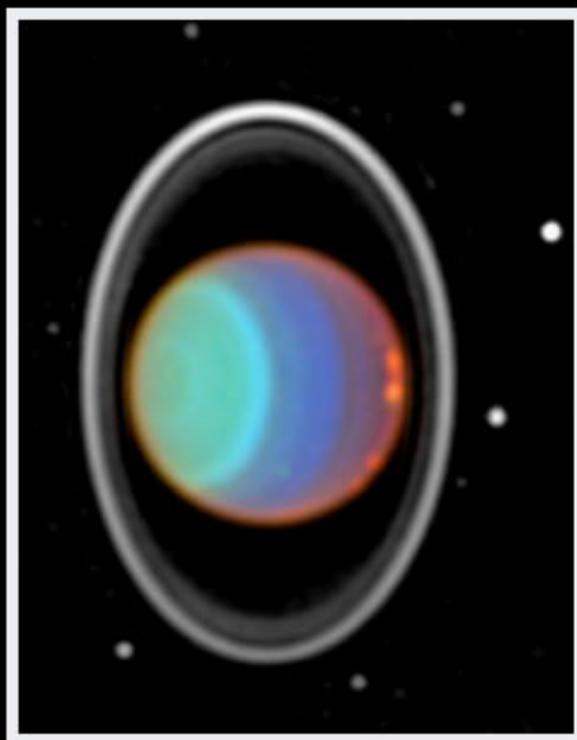
# Планета Уран

До включения



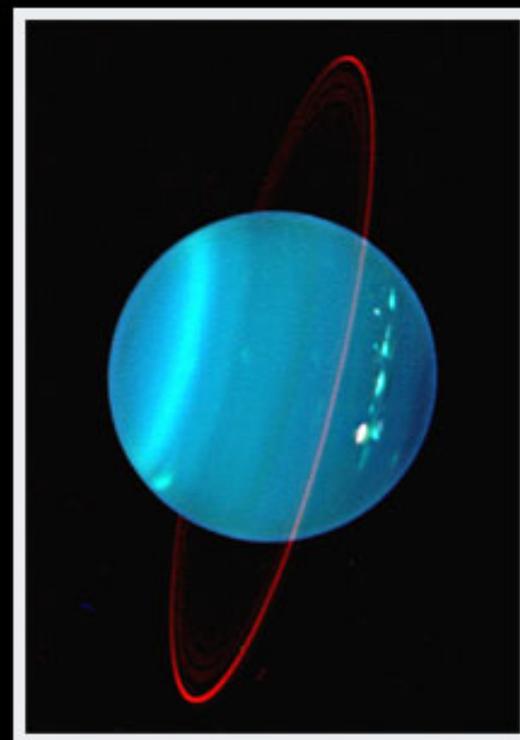
После включения

## Система адаптивной оптики

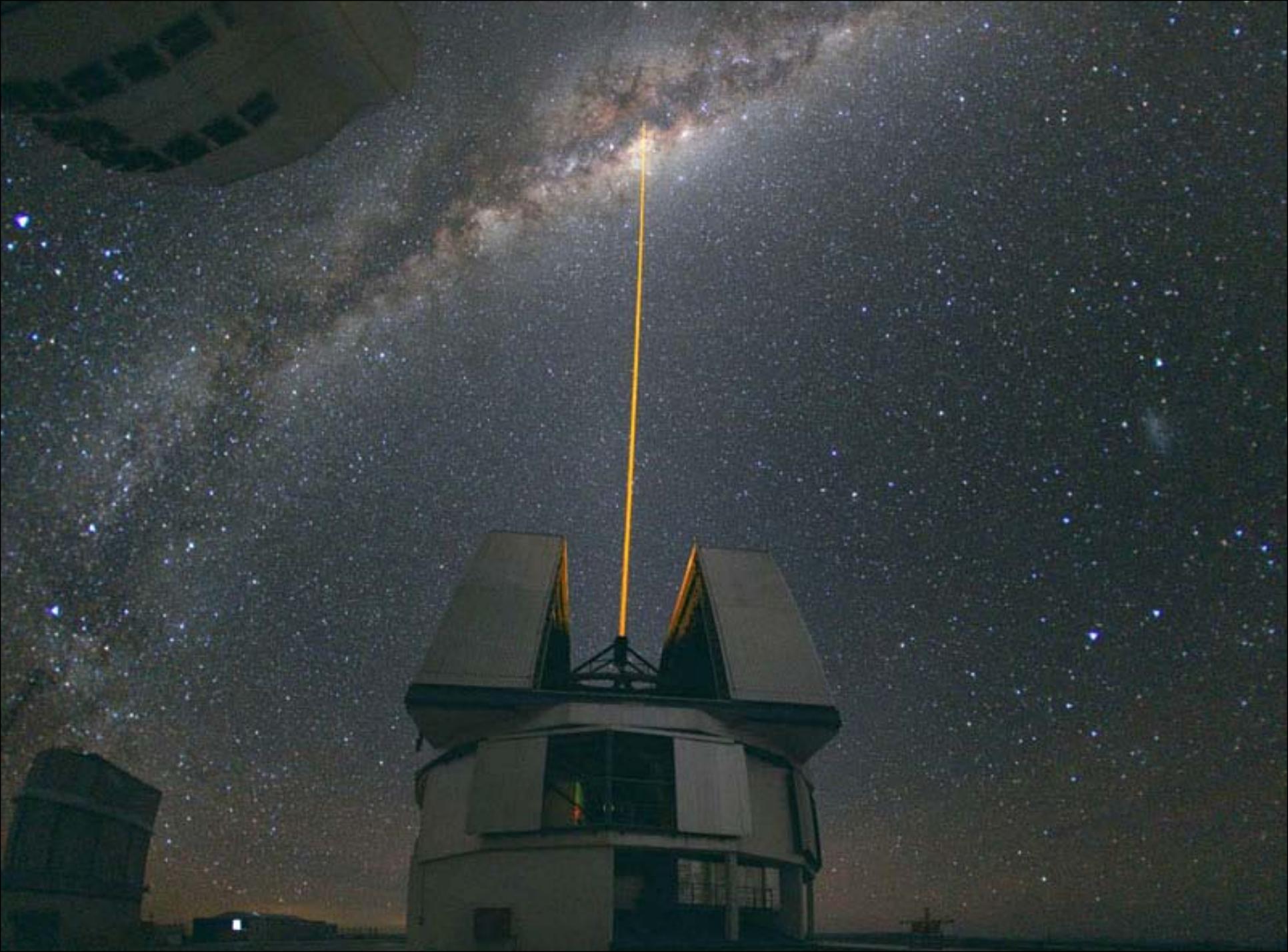


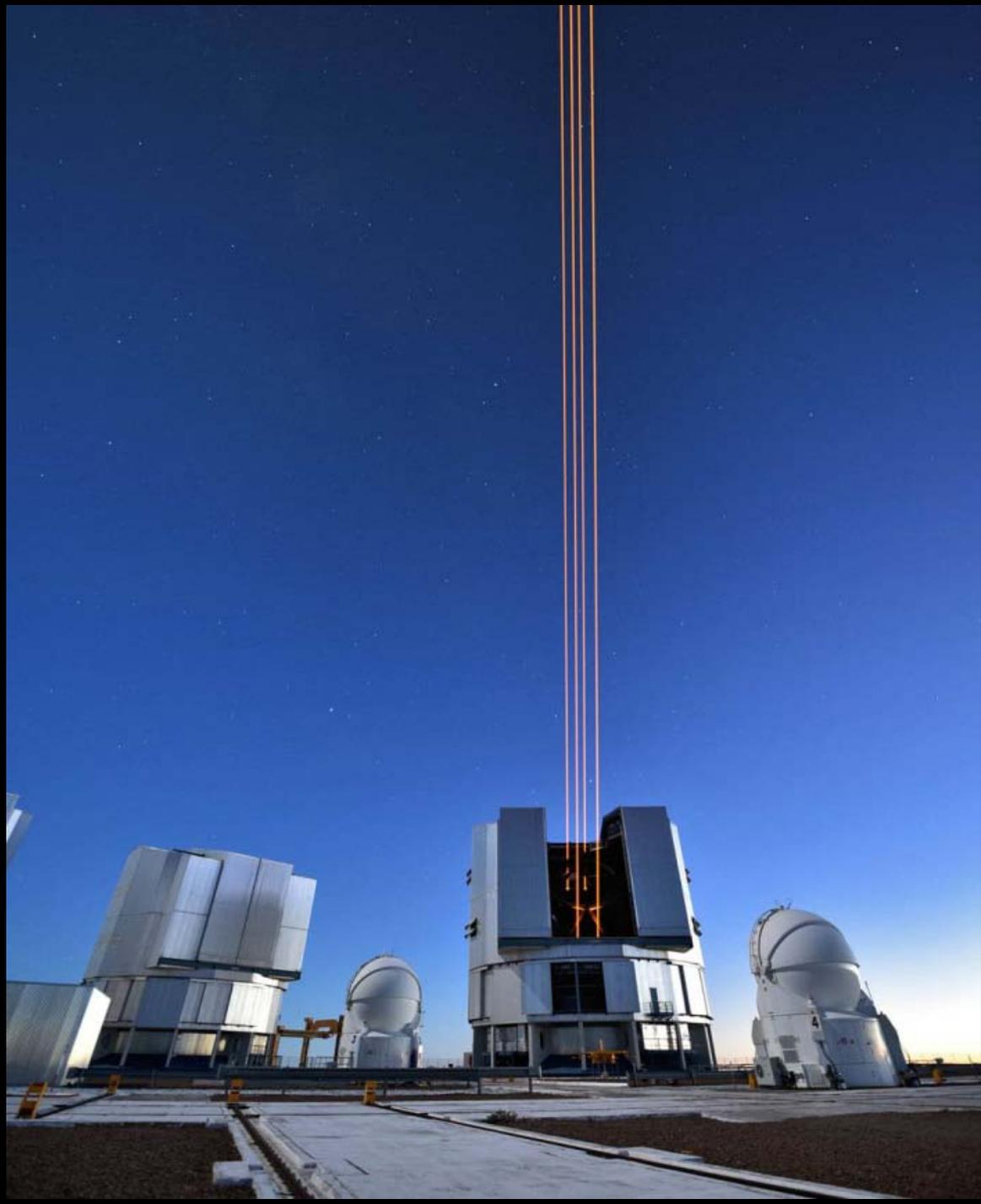
Космический  
телескоп  
"Хаббл"

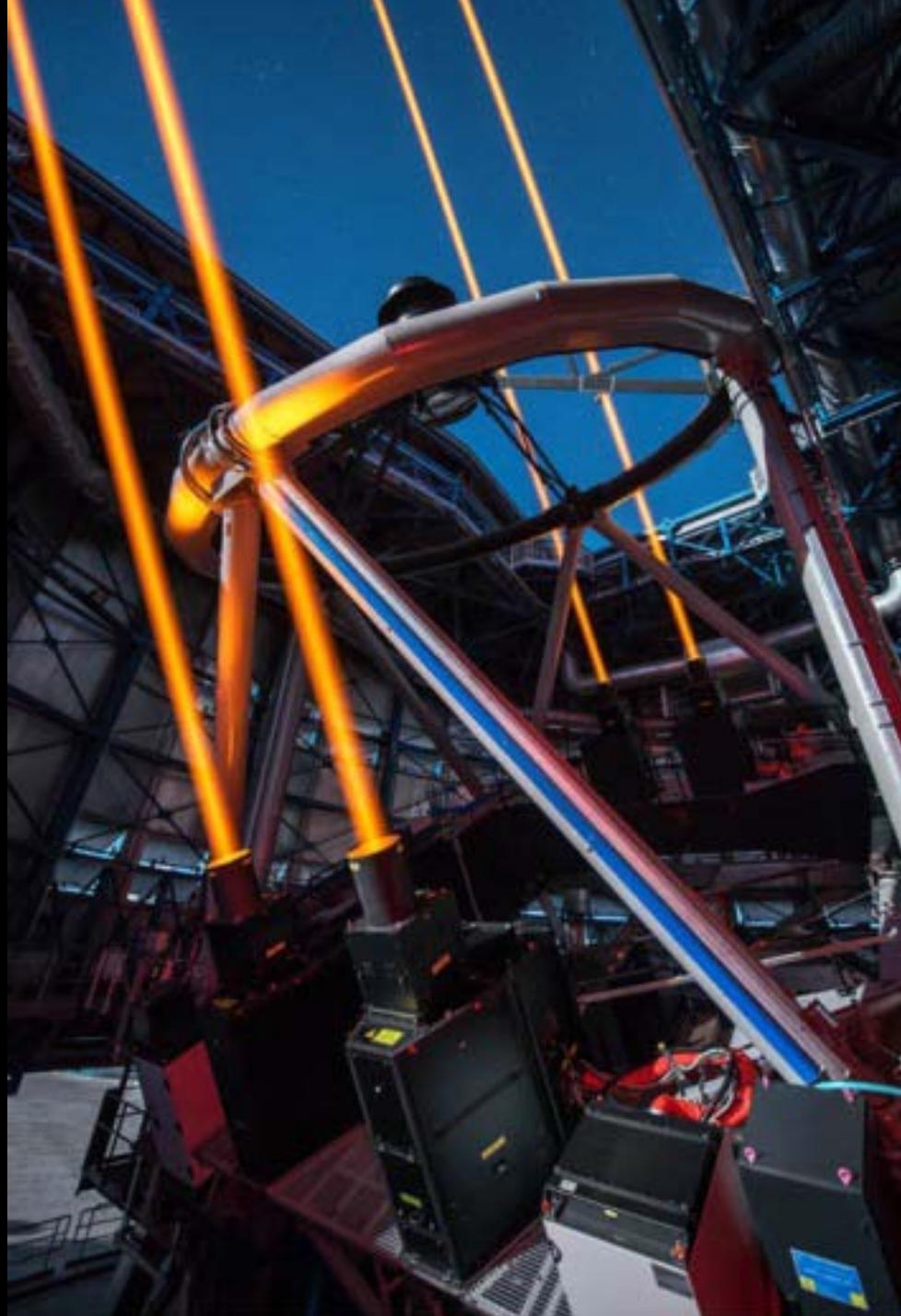
Наземный  
телескоп  
"Кек" (10 м)  
с системой  
АО





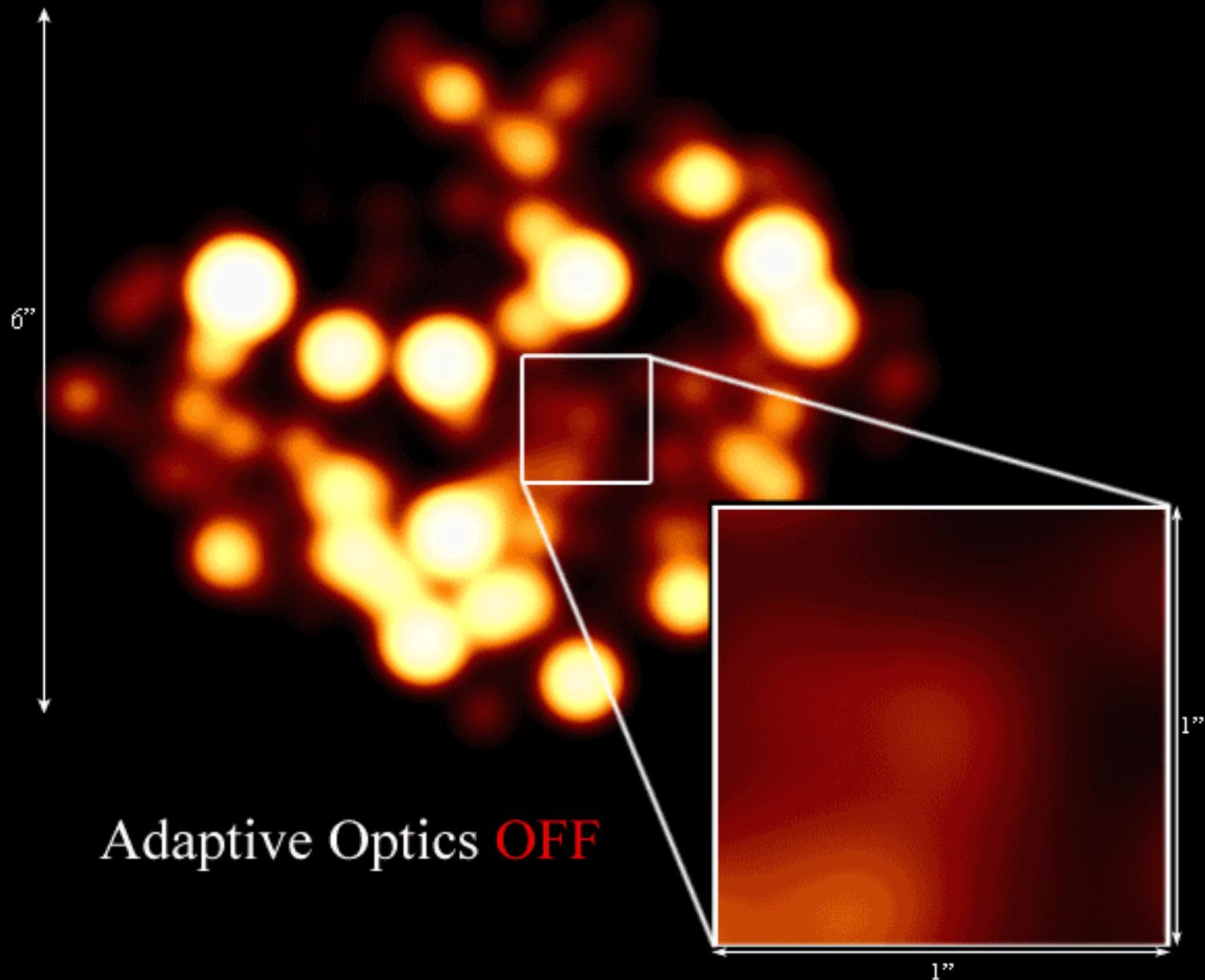




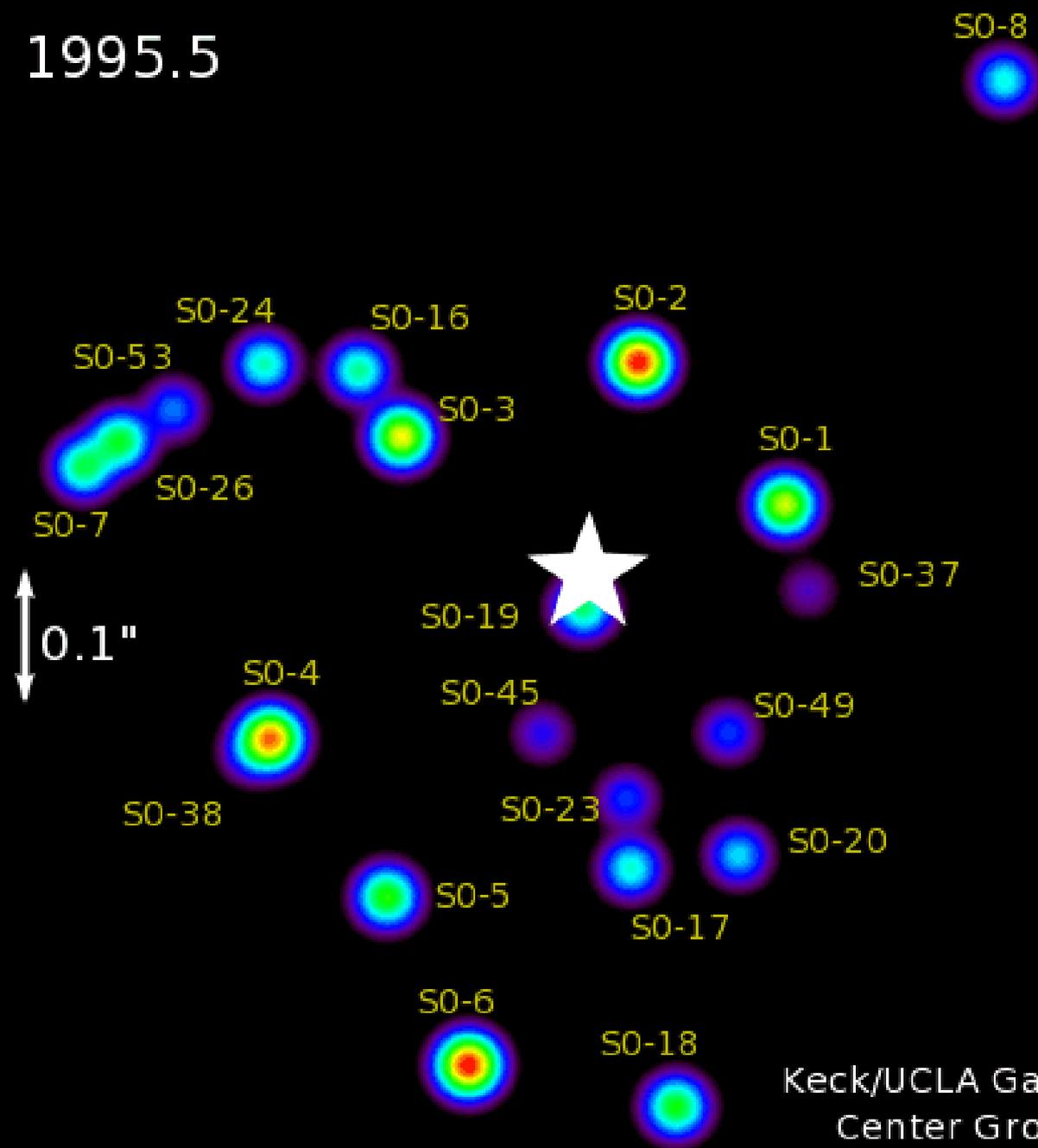




# The Galactic Center at 2.2 microns



1995.5

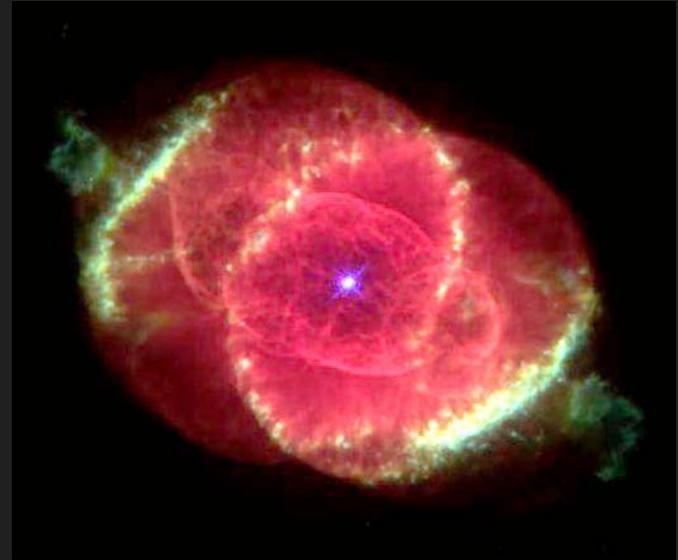


Keck/UCLA Galactic  
Center Group

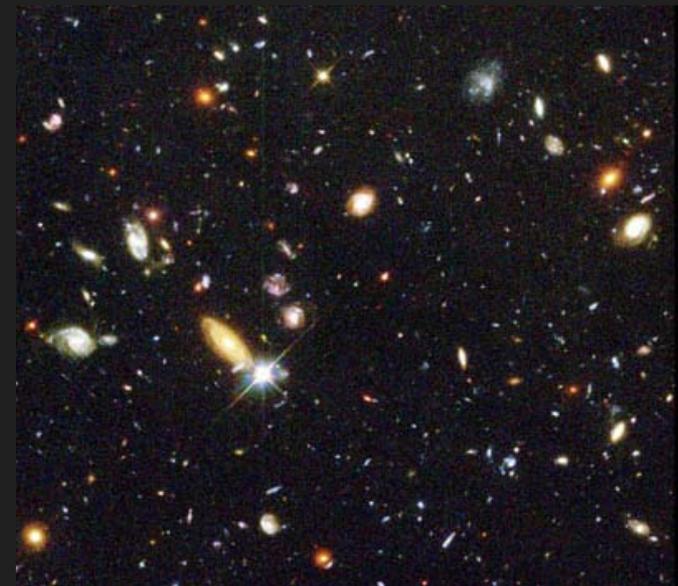


Если всё так хорошо у наземной астрономии,  
то зачем нам **космические** оптические телескопы?

Высокая чёткость  
на снимках  
протяженных  
объектов



Длительные  
экспозиции  
(тёмное небо)



а также  
непрерывная работа



Звездная  
сейсмология  
и  
прохождения  
экзопланет

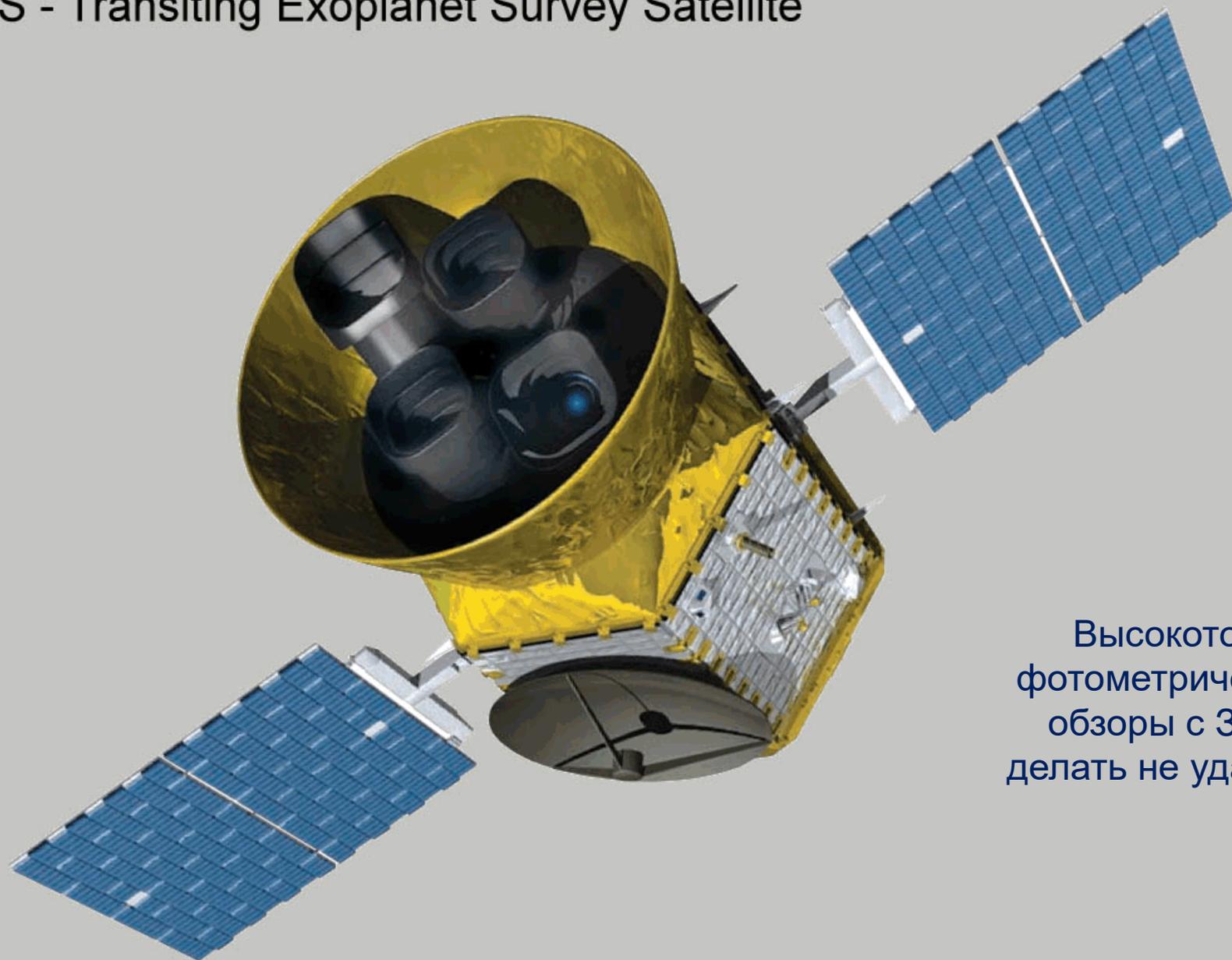


В космос  
продолжают  
отправлять  
оптические  
телескопы

Франция  
(ракета "Союз")

COROT  
2007

# TESS - Transiting Exoplanet Survey Satellite



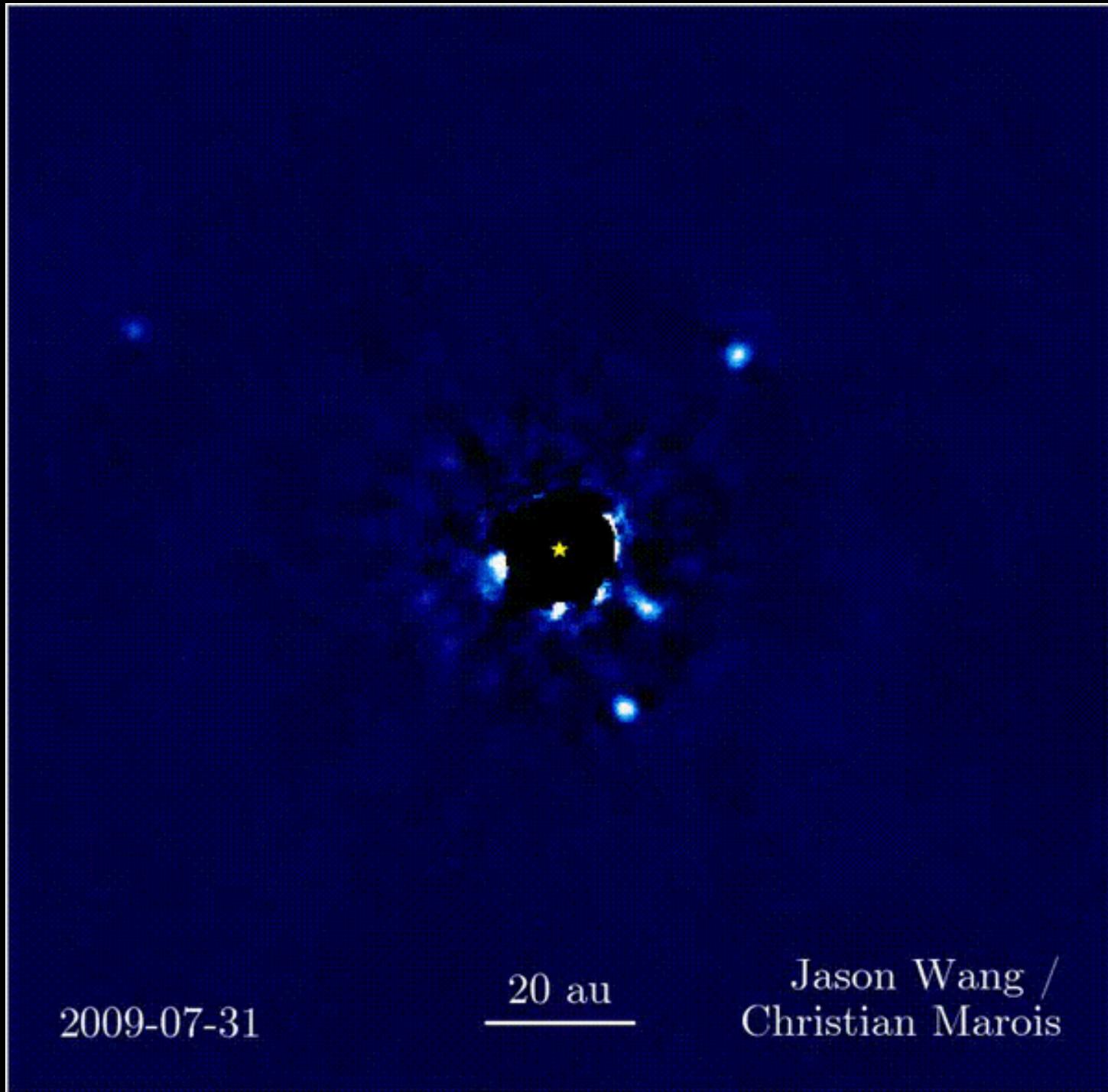
Высокоточные  
фотометрические  
обзоры с Земли  
делать не удаётся

4 камеры, поле зрения каждой  $24^\circ \times 24^\circ$

Яркие звёзды ослепляют телескоп.  
Рядом с ними не видны тусклые тела



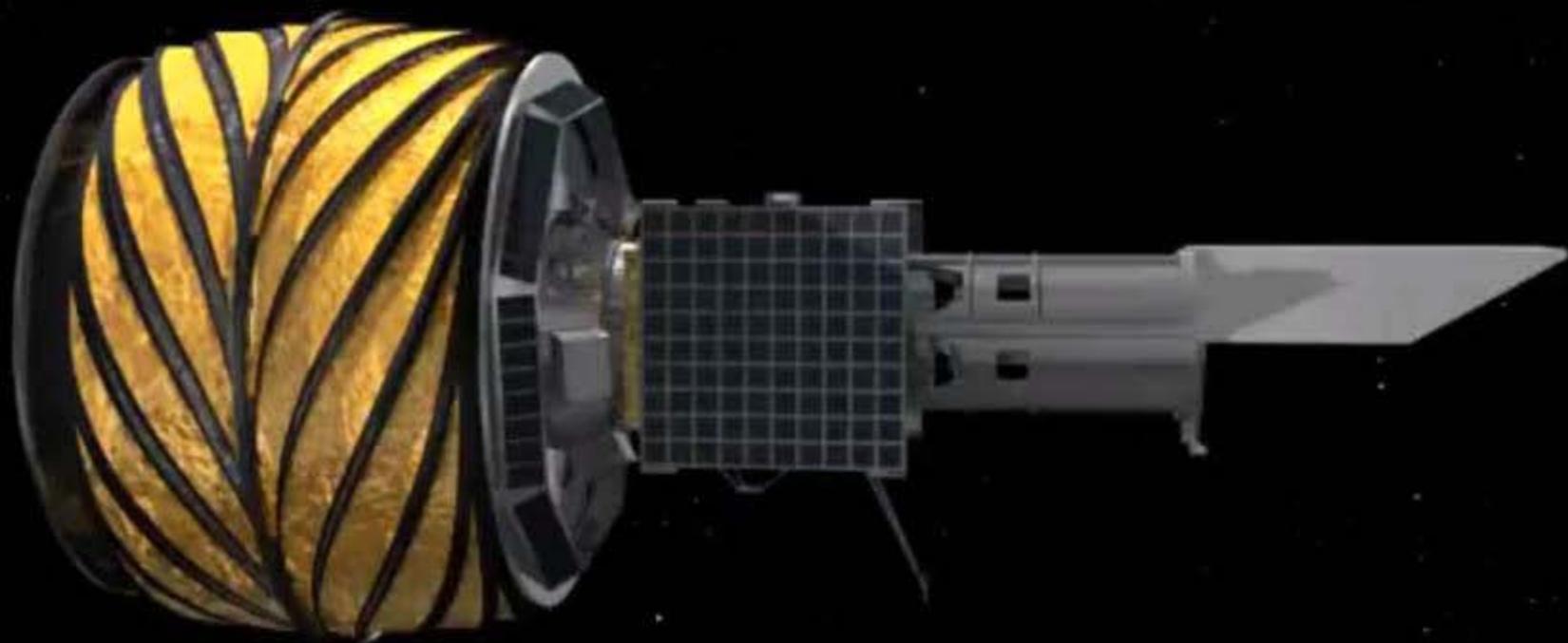
Звёздный  
коронограф



2009-07-31

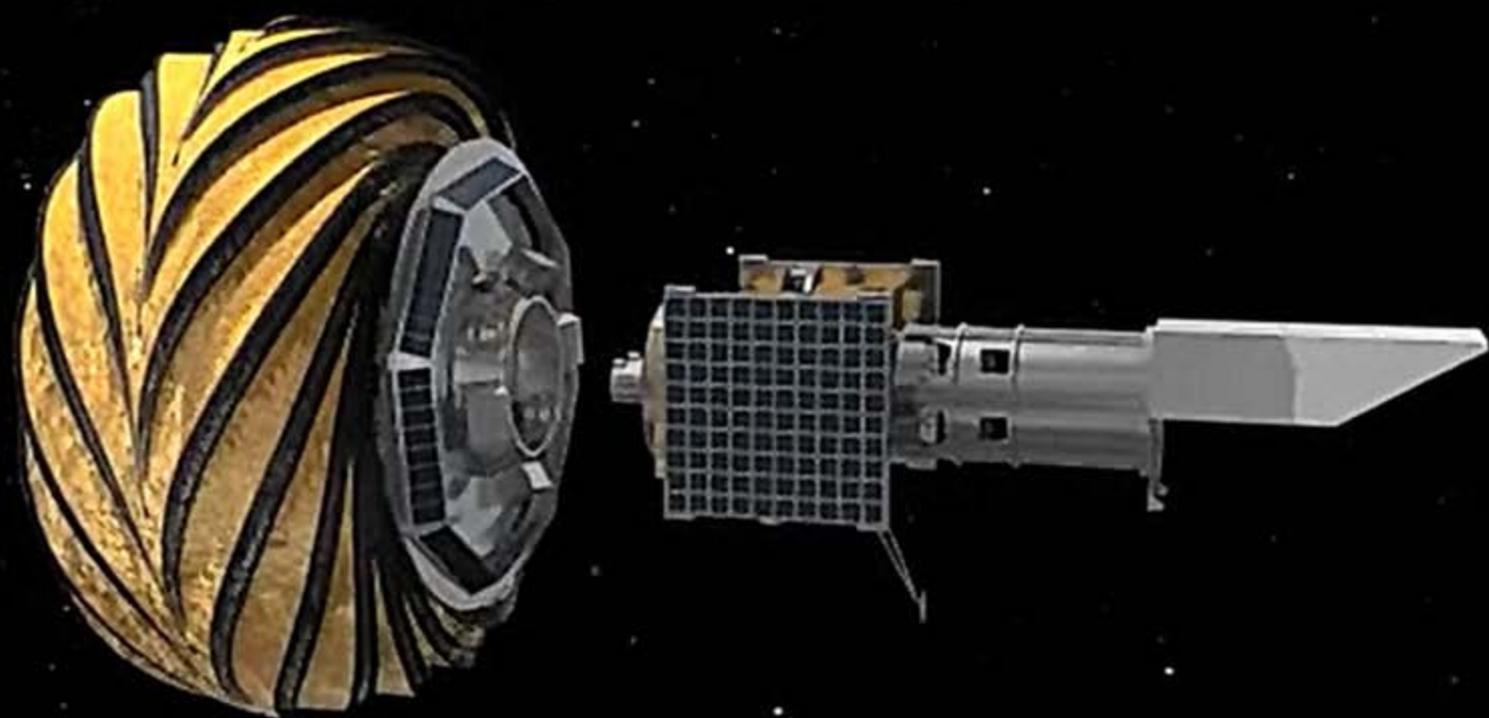
20 au

Jason Wang /  
Christian Marois



Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

Телескоп 4 м с коронографом и экран диаметром 56 м на расстоянии 72 тыс.км

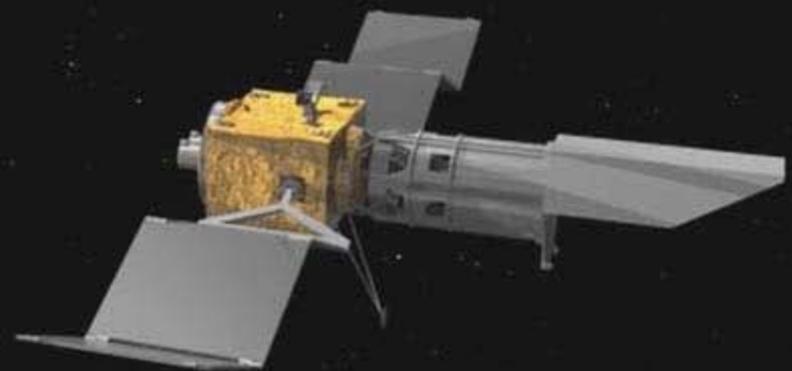


Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

Телескоп 4 м с коронографом и экран диаметром 56 м на расстоянии 72 тыс.км

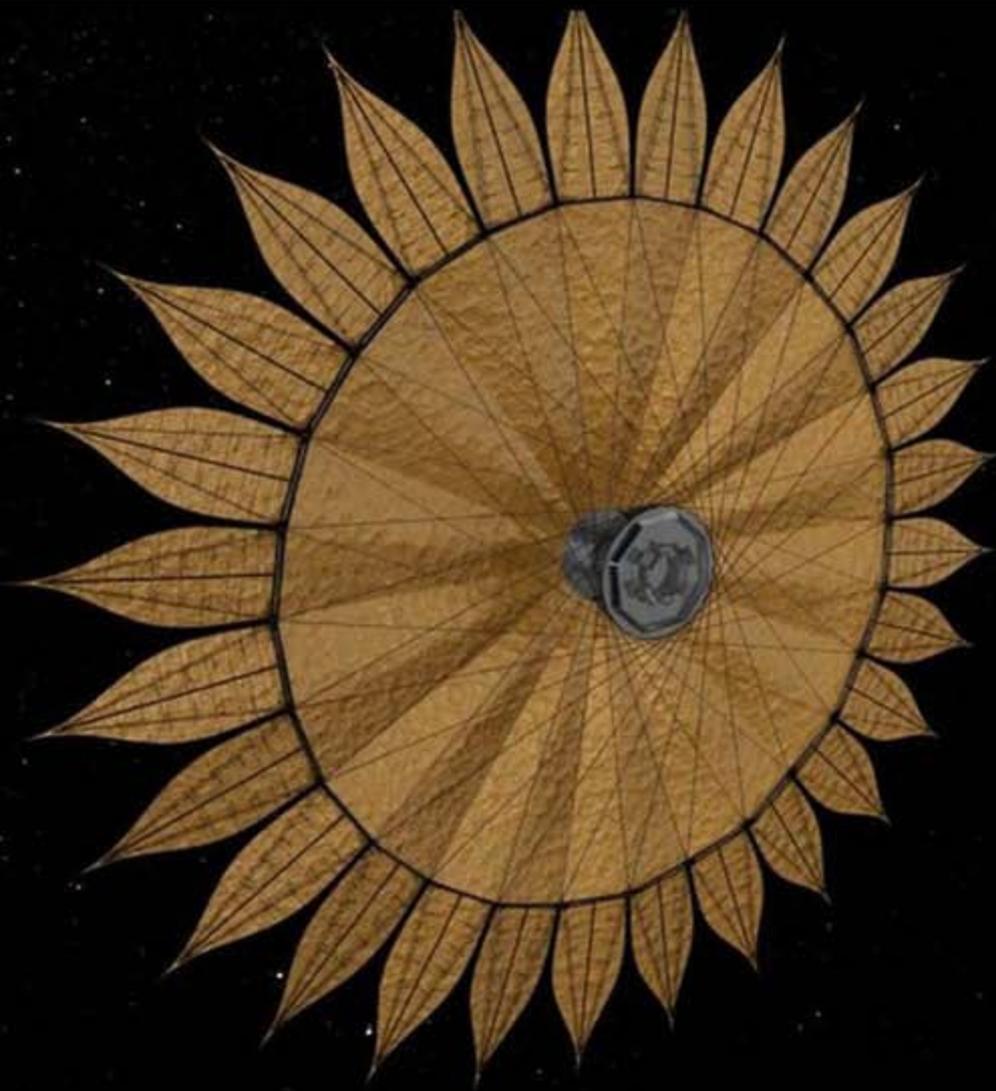


SPLOND GIF

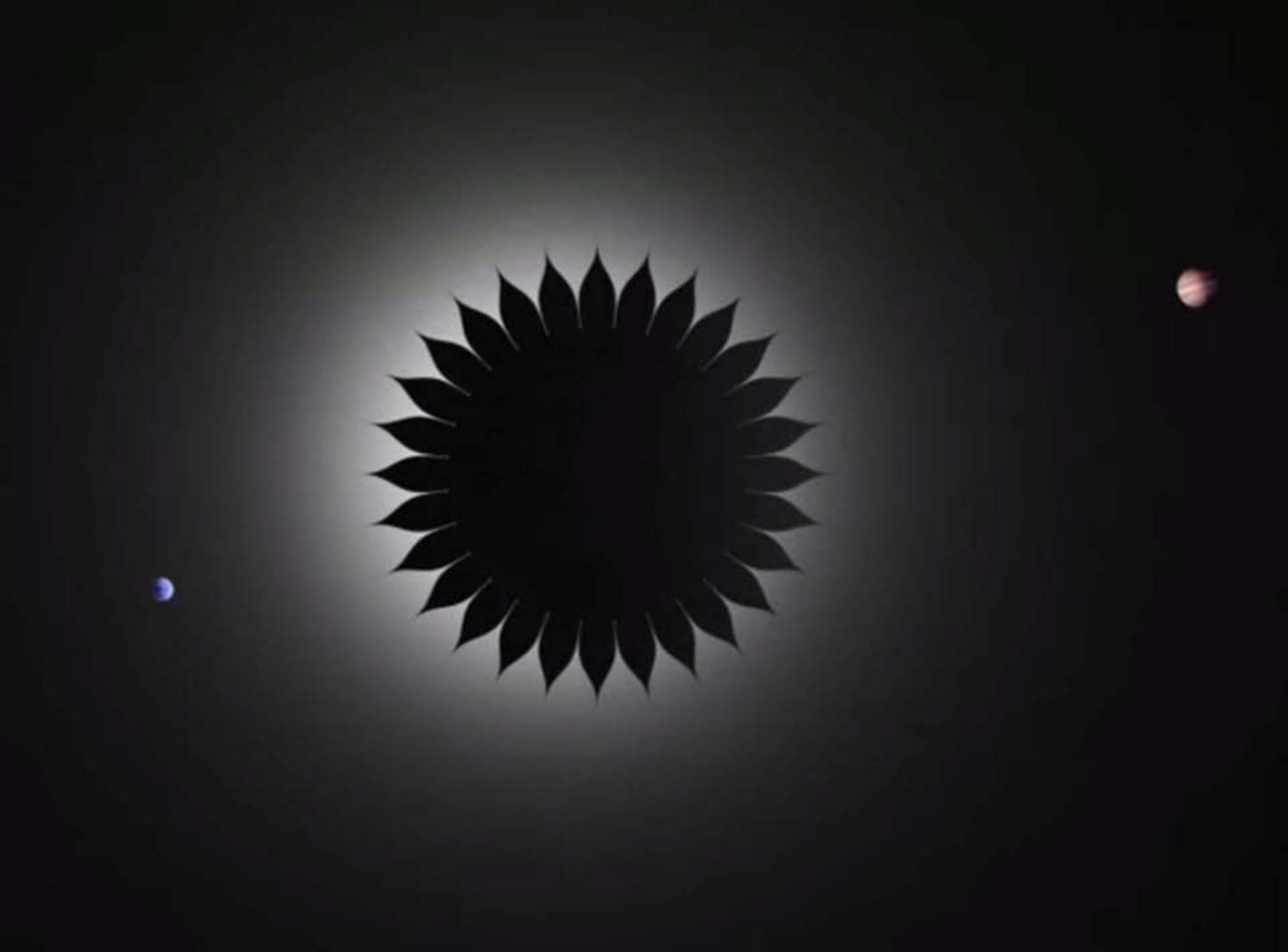


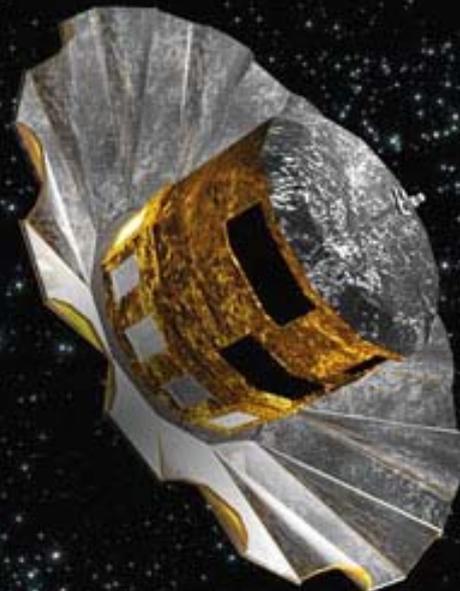
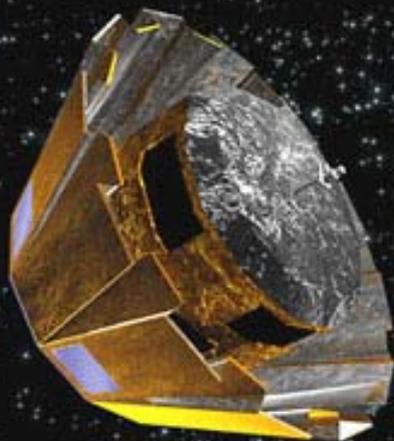
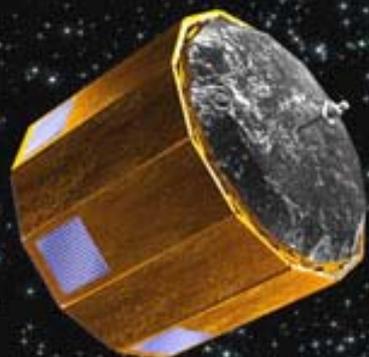
## Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

Телескоп 4 м с коронографом и экран диаметром 56 м на расстоянии 72 тыс.км



Диапазоны: видимый, UV, NIR, IR. Полная масса около 19 тонн.  
Запускается в точку L2 двумя тяжелыми ракетами





## Gaia

Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, ESA

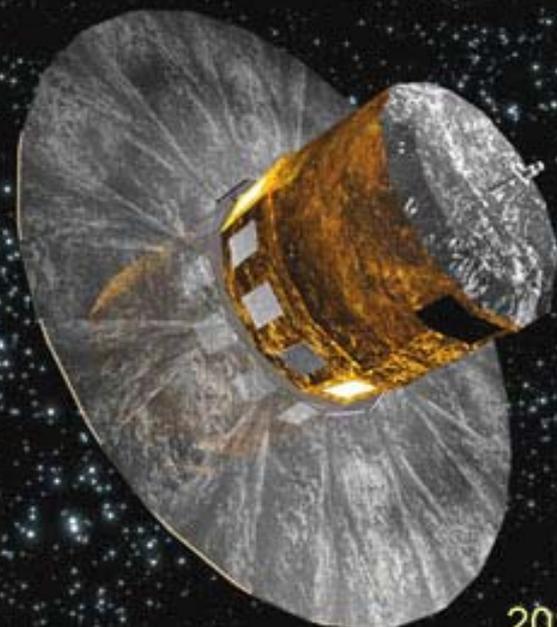
$$m_{\text{lim}} = 20$$

---

$$m > 15$$
$$24 \mu \text{ arcsec}$$

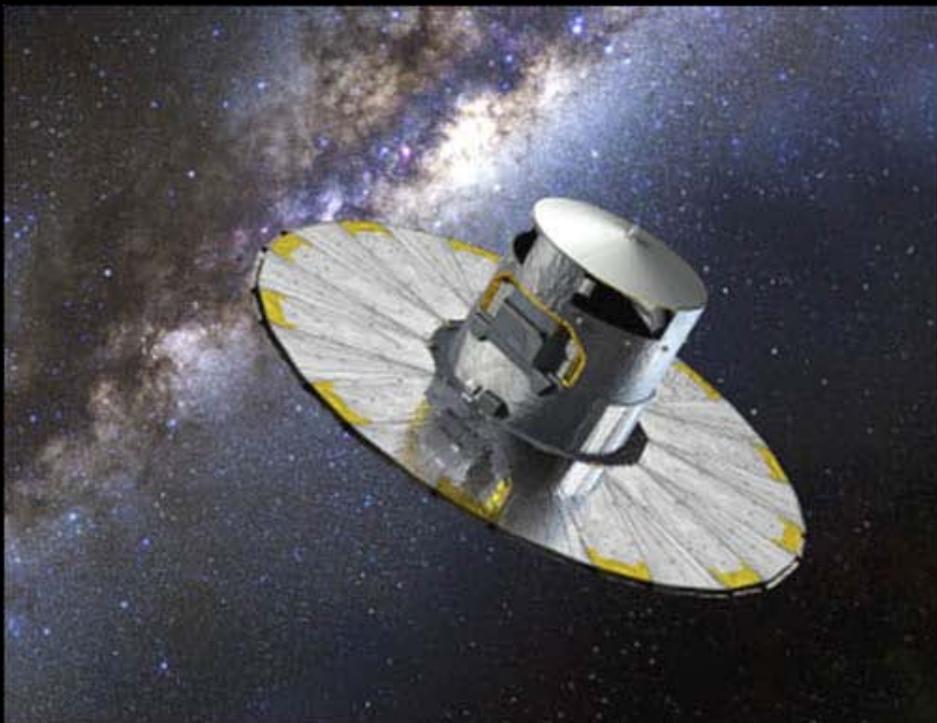
---

“Союз” в точку L<sub>2</sub>



2013

Измерять углы астрономы умеют с **астрономической точностью**



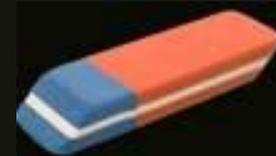
**Задача:** измерить положение и блеск 1 млрд объектов (звёзд, квазаров...) с точностью от 20 микросекунд дуги ( $15^m$ ) до 200 микросекунд дуги ( $20^m$ )

## Космическая обсерватория Gaia (ESA)

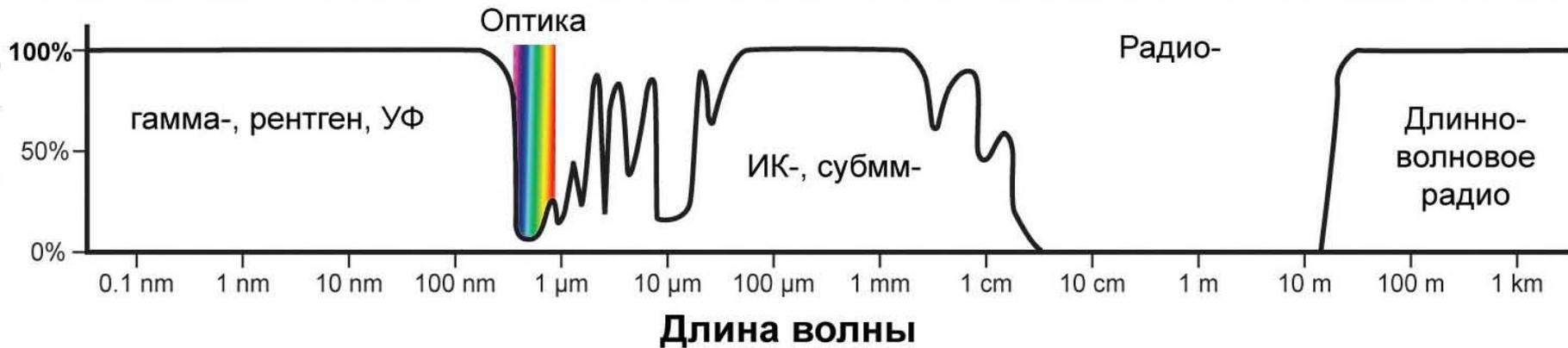
Спутник с двойным телескопом запущен в 2013 г. на орбиту вокруг Солнца так, что движется по орбите синхронно с Землей в 1,5 млн км от неё (в точке L2).

Он измеряет положение звёзд в тысячи раз точнее, чем это можно сделать с поверхности Земли.

Под углом 20 мксек дуги с Земли был бы виден ластик на Луне!



Поглощение  
в атмосфере



Gamma Rays, X-Rays and Ultraviolet Light blocked by the upper atmosphere (best observed from space).

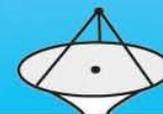


Visible Light observable from Earth, with some atmospheric distortion.



Most of the Infrared spectrum absorbed by atmospheric gasses (best observed from space).

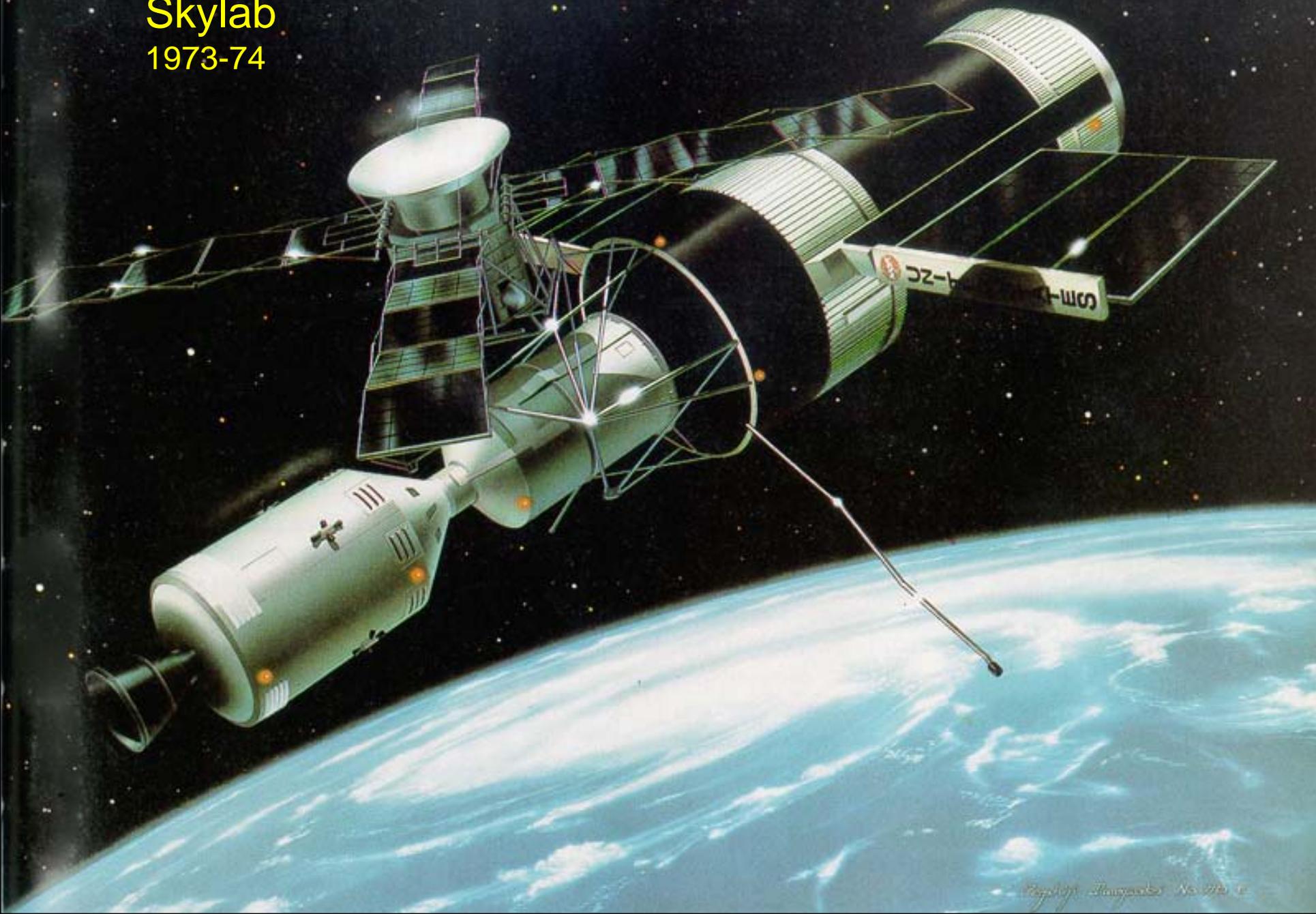
Radio Waves observable from Earth.

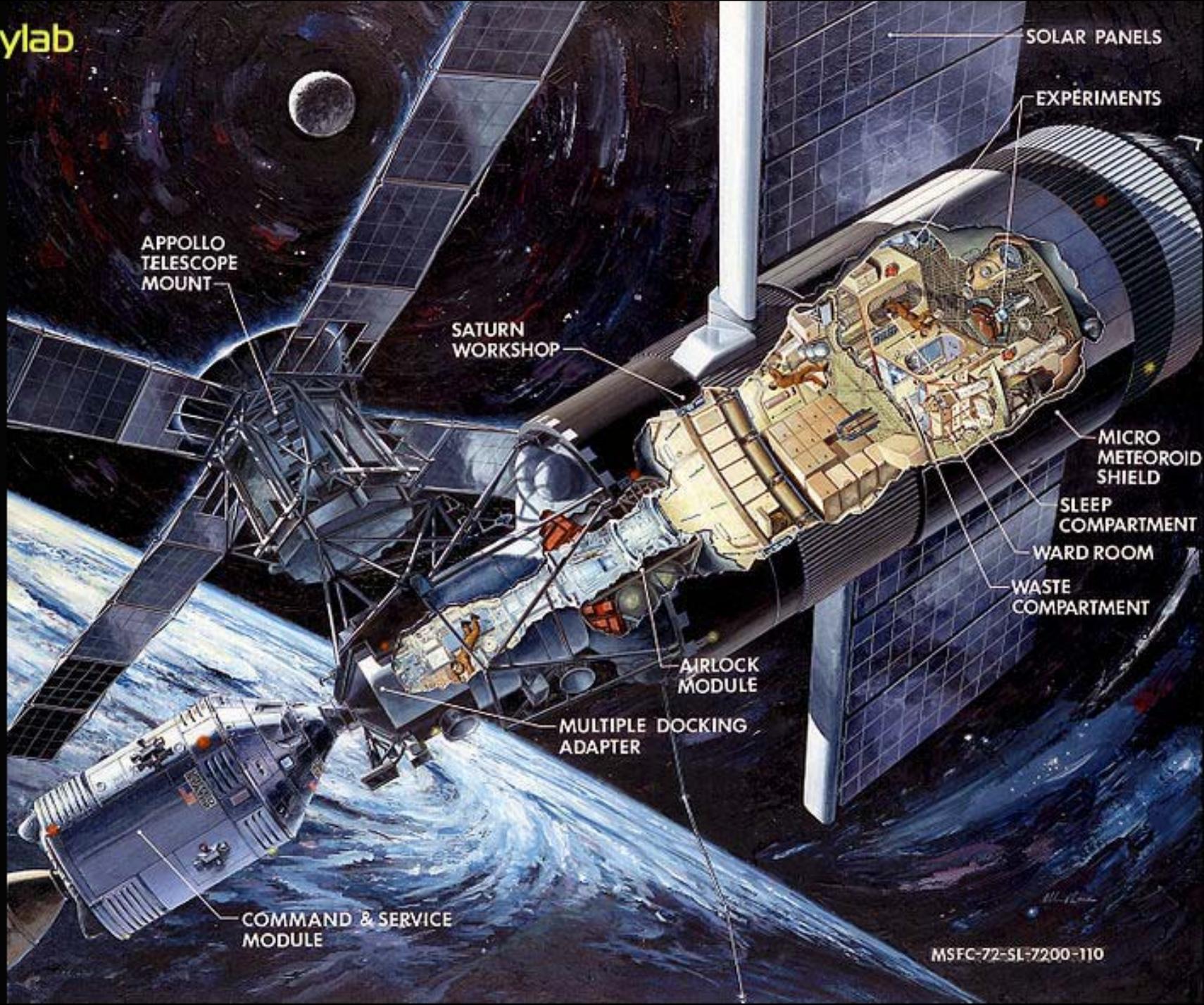


Long-wavelength Radio Waves blocked.

# Skylab

1973-74





APPOLLO  
TELESCOPE  
MOUNT

SATURN  
WORKSHOP

SOLAR PANELS

EXPERIMENTS

MICRO  
METEOROID  
SHIELD

SLEEP  
COMPARTMENT

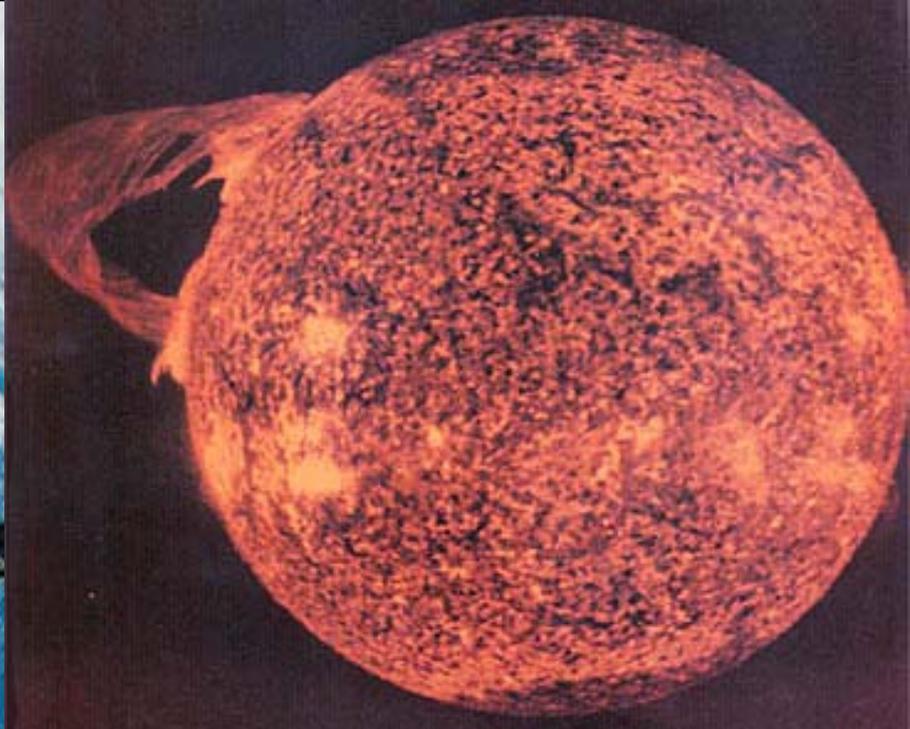
WARD ROOM

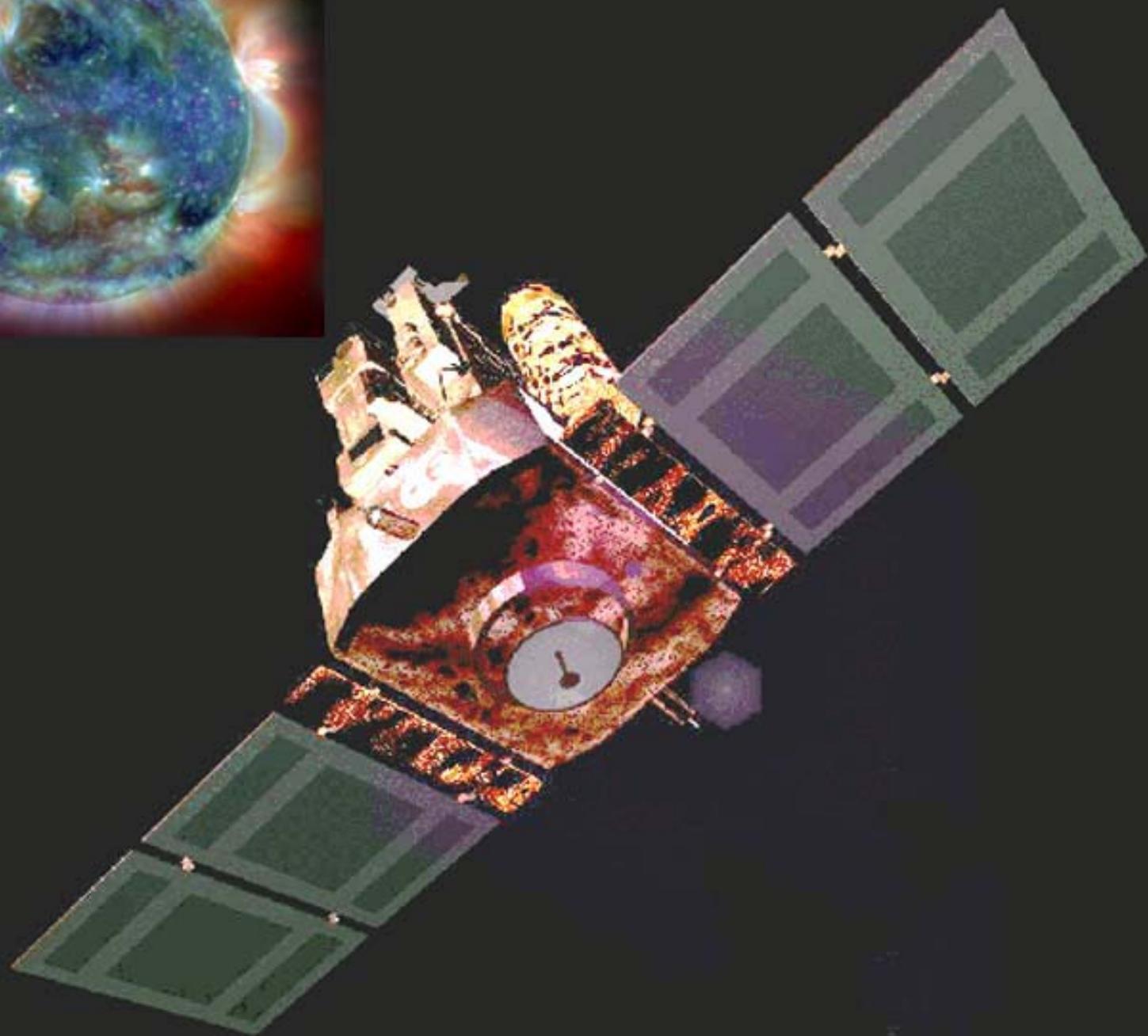
WASTE  
COMPARTMENT

AIRLOCK  
MODULE

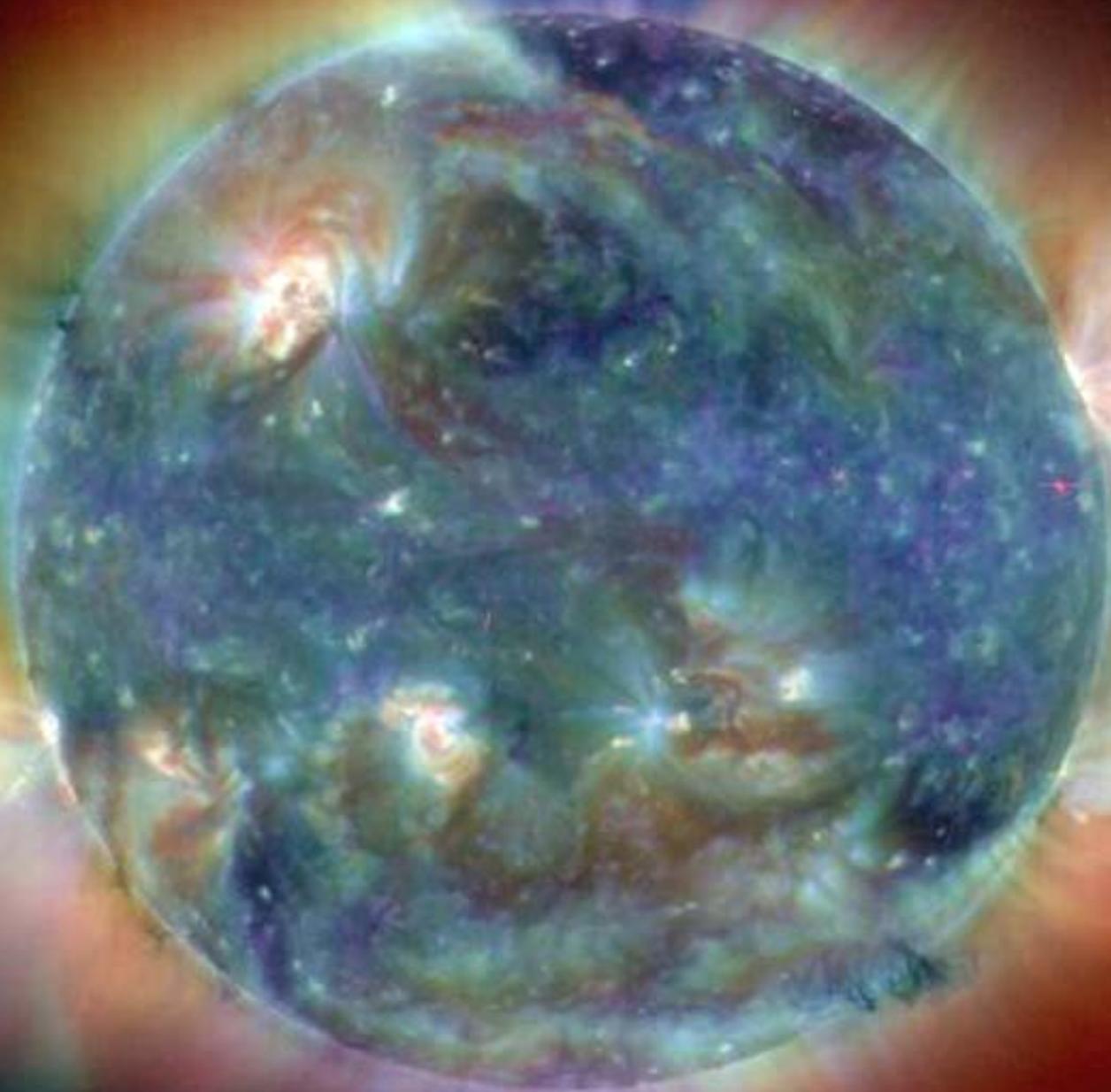
MULTIPLE DOCKING  
ADAPTER

COMMAND & SERVICE  
MODULE





SOHO



# Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE, NASA, 2009-2024)

Запущен 14 дек 2009 г. на околоземную орбиту, 490 км.  
Телескоп диаметром 40 см, диапазоны 3.4, 4.6, 12 и 22 мкм.  
Охлаждение – твёрдый водород (испарился в феврале 2011 г.)

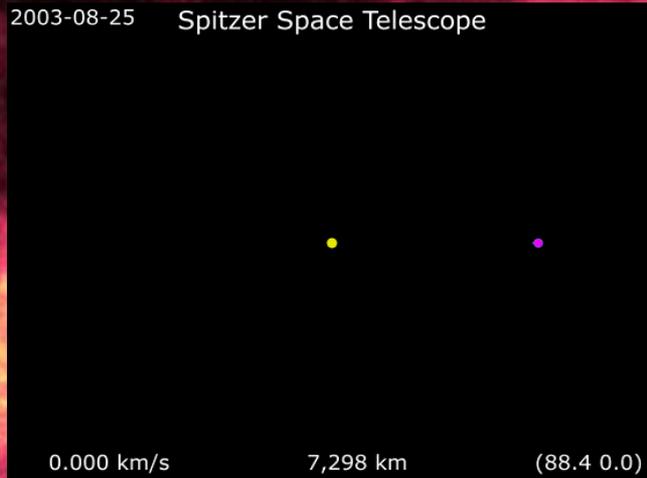
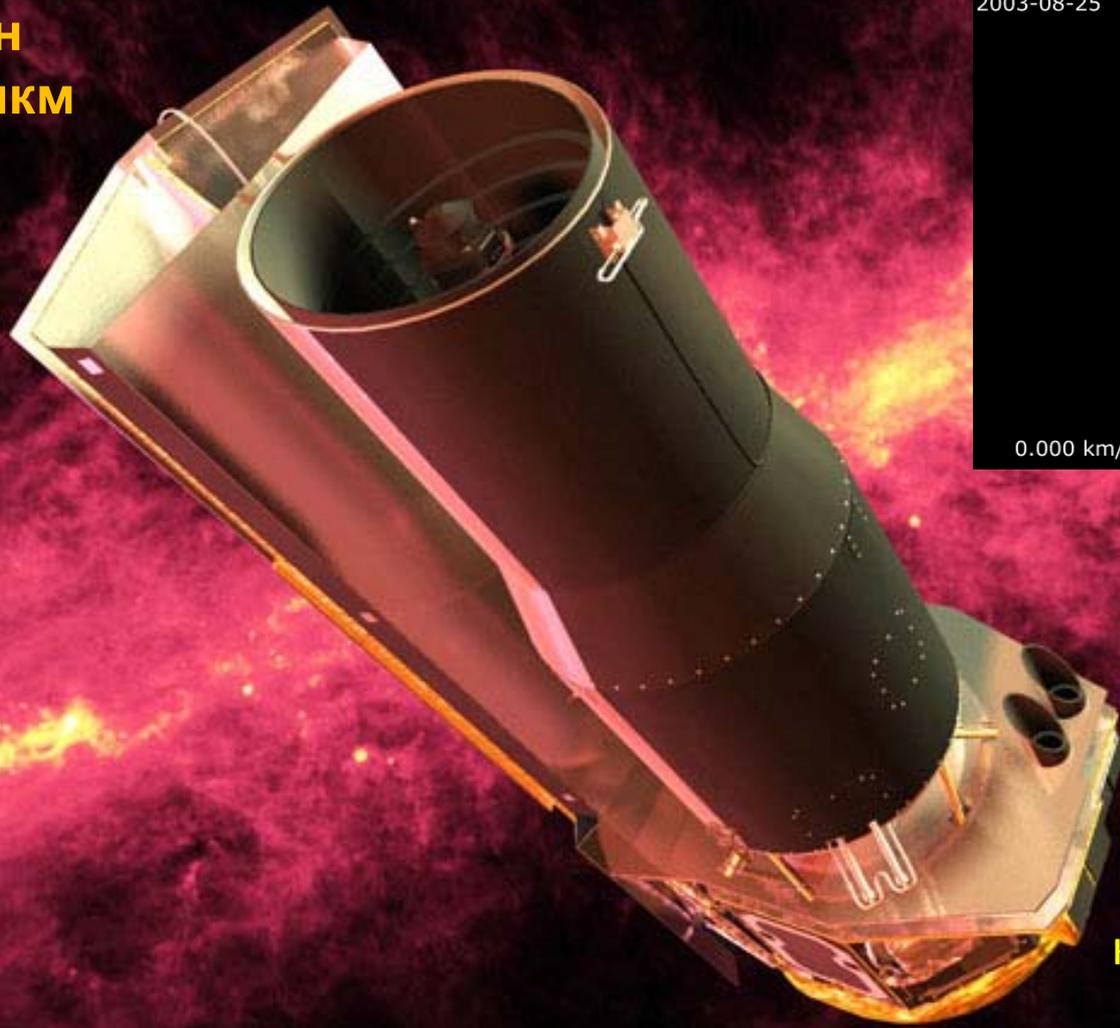


С 2013 г. стал использоваться как оптический телескоп под именем **NEOWISE** (Near-Earth Object WISE)

8 ноября 2024 г.  
упал на Землю  
из-за торможения  
в атмосфере  
(год активного Солнца)

# Spitzer Space Telescope (2003 – 2020 гг.)

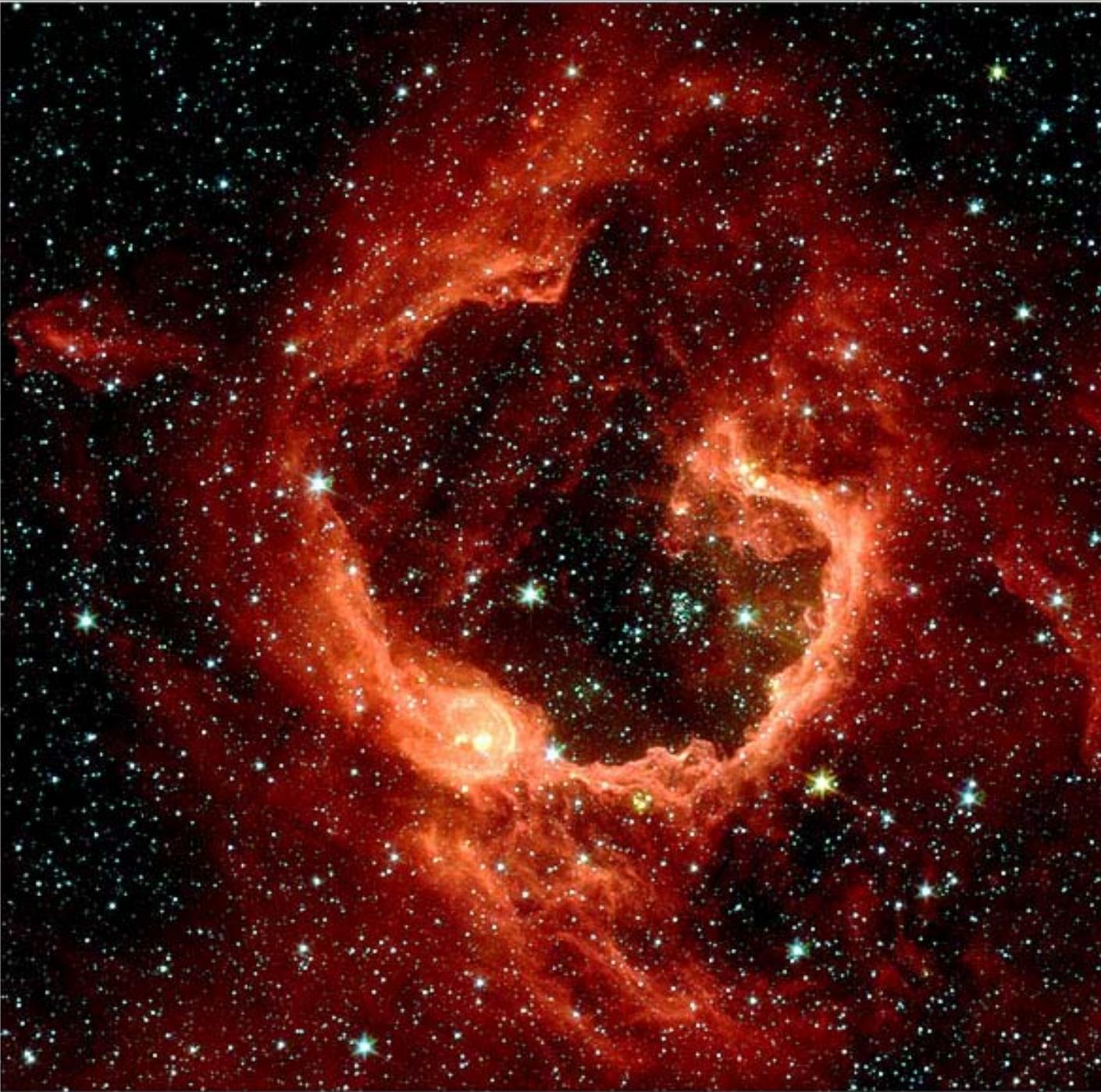
**Диапазон  
3.6 – 160 мкм**



Жидкий гелий испарился в 2009 г. Но два самых коротковолновых канала продолжали работать до 2020 г. с той же чувствительностью, что и до исчерпания гелия

Орбита околосолнечная с периодом 373 сут

Спитцер



*Взаимодействие  
массивных  
звезд с МЗС  
приводит к  
формированию  
гигантских  
пузырей и  
оболочек H I*

*Не исключено,  
что в них  
формируется  
следующее  
поколение  
звезд*

**Star-Forming "Bubble" RCW 79**

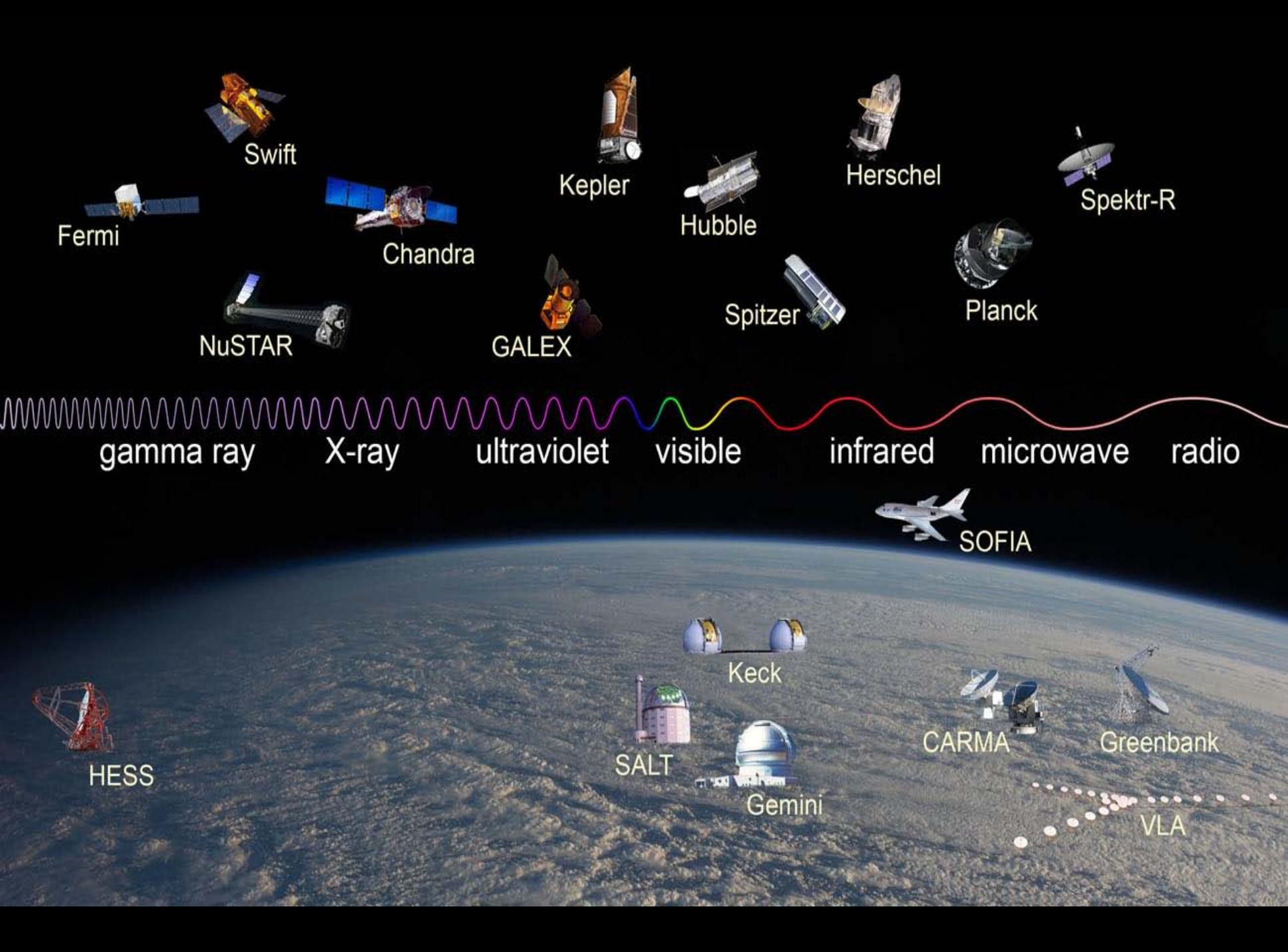
**Spitzer Space Telescope • IRAC**

NASA / JPL-Caltech /

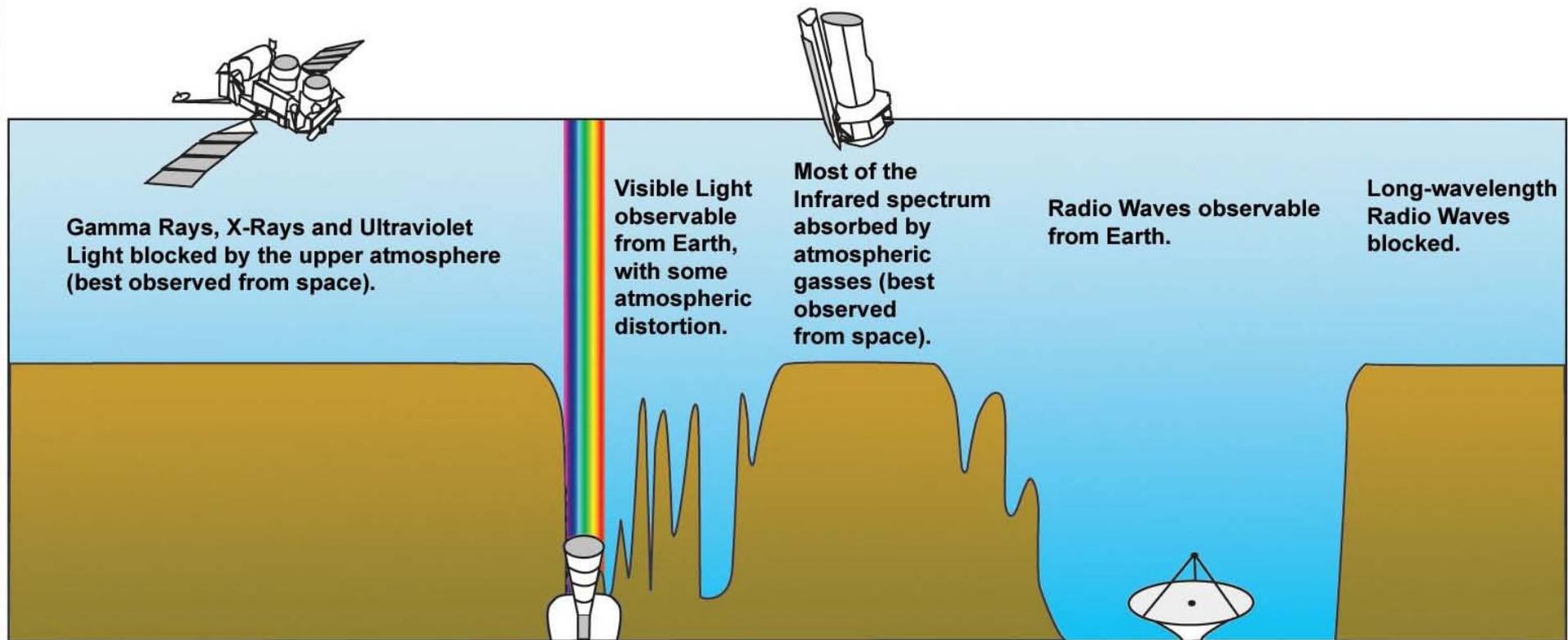
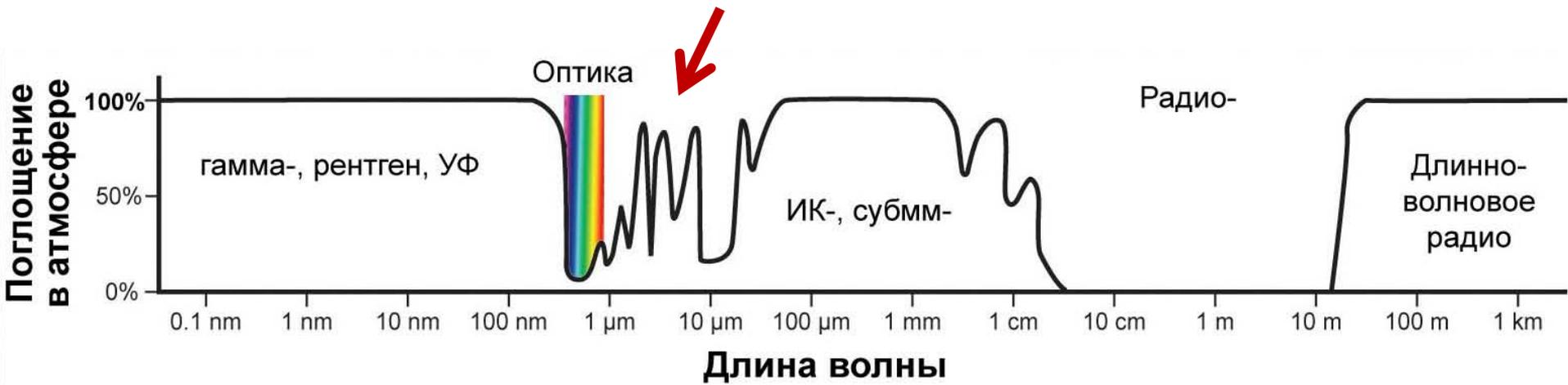
E. Churchwell (University of Wisconsin-Madison)



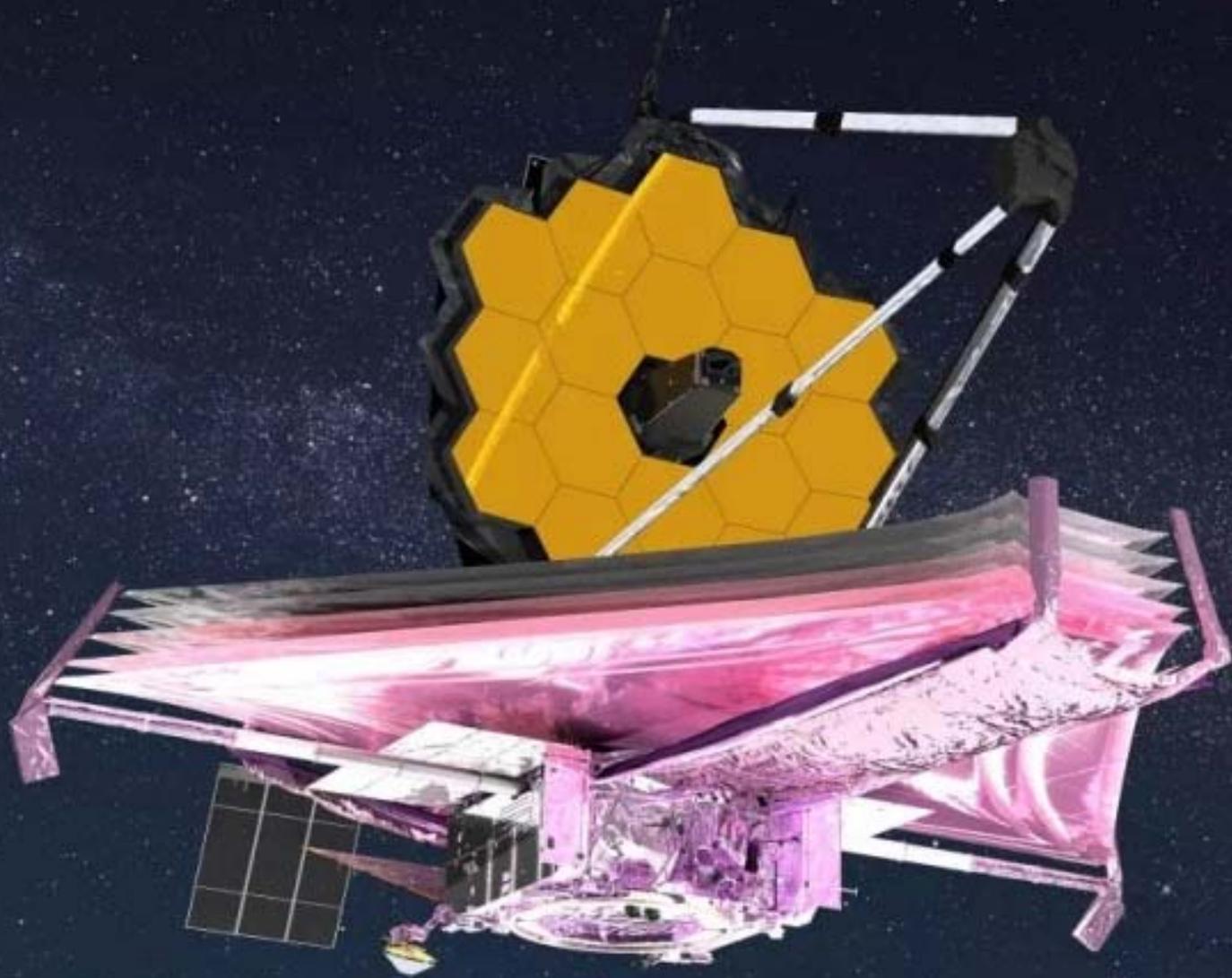
РадиоАстрон 2011 г.

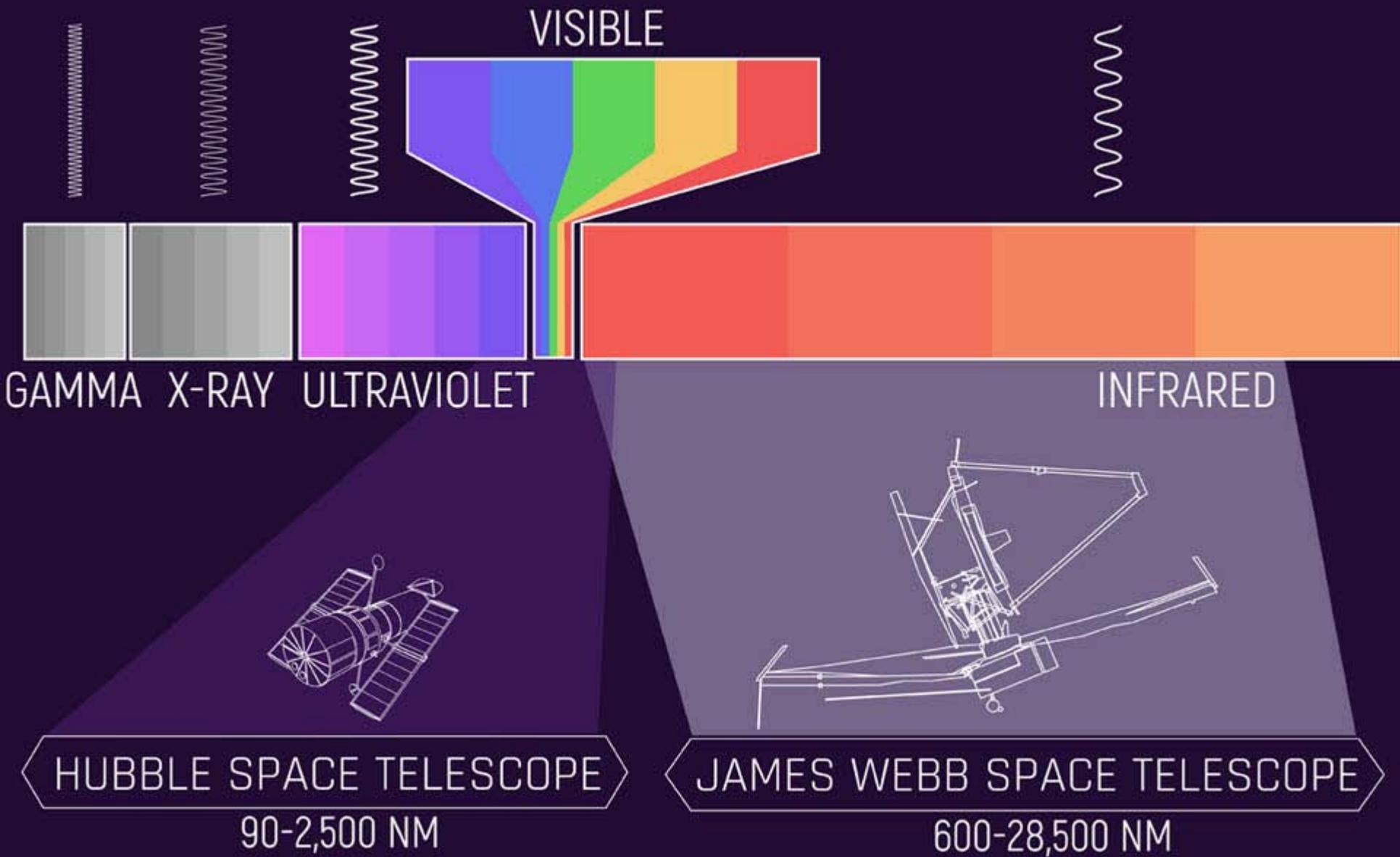


# Ближний и средний ИК



# James Webb Space Telescope





Диапазоны чувствительности космических телескопов

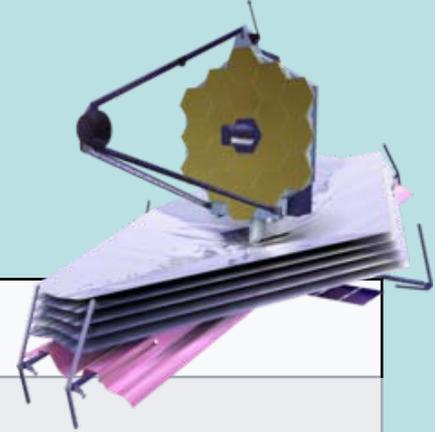
# Страны-участники кооперации JWST

## Participating countries

-  Austria
  -  Belgium
  -  Canada
  -  Czech Republic
  -  Denmark
  -  Finland
  -  France
  -  Germany
  -  Greece
  -  Ireland
  -  Italy
  -  Luxembourg
  -  Netherlands
  -  Norway
  -  Portugal
  -  Spain
  -  Sweden
  -  Switzerland
  -  United Kingdom
  -  United States
- А где Япония?

Operator: STScI (NASA)

# Важные моменты проекта JWST

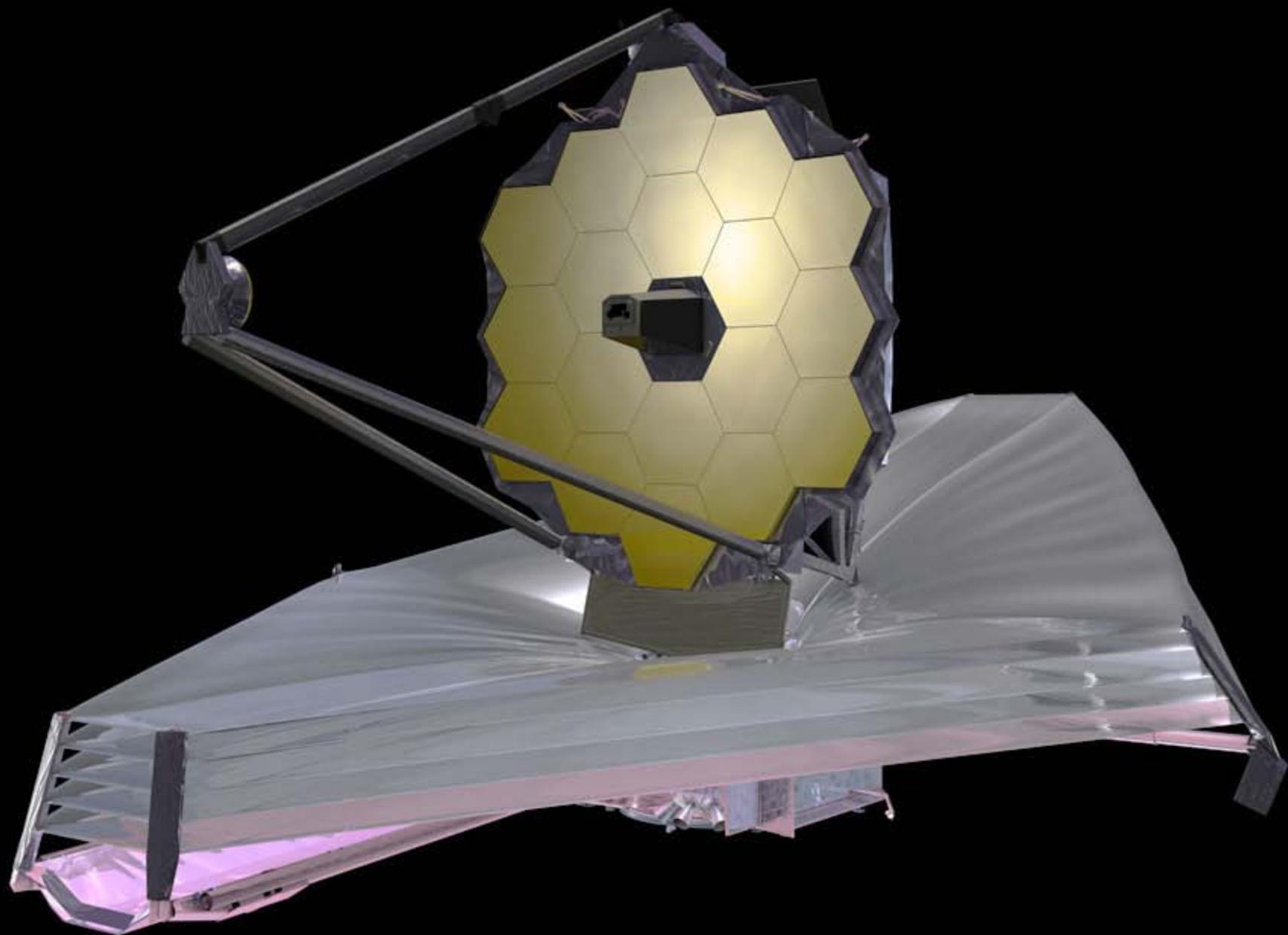


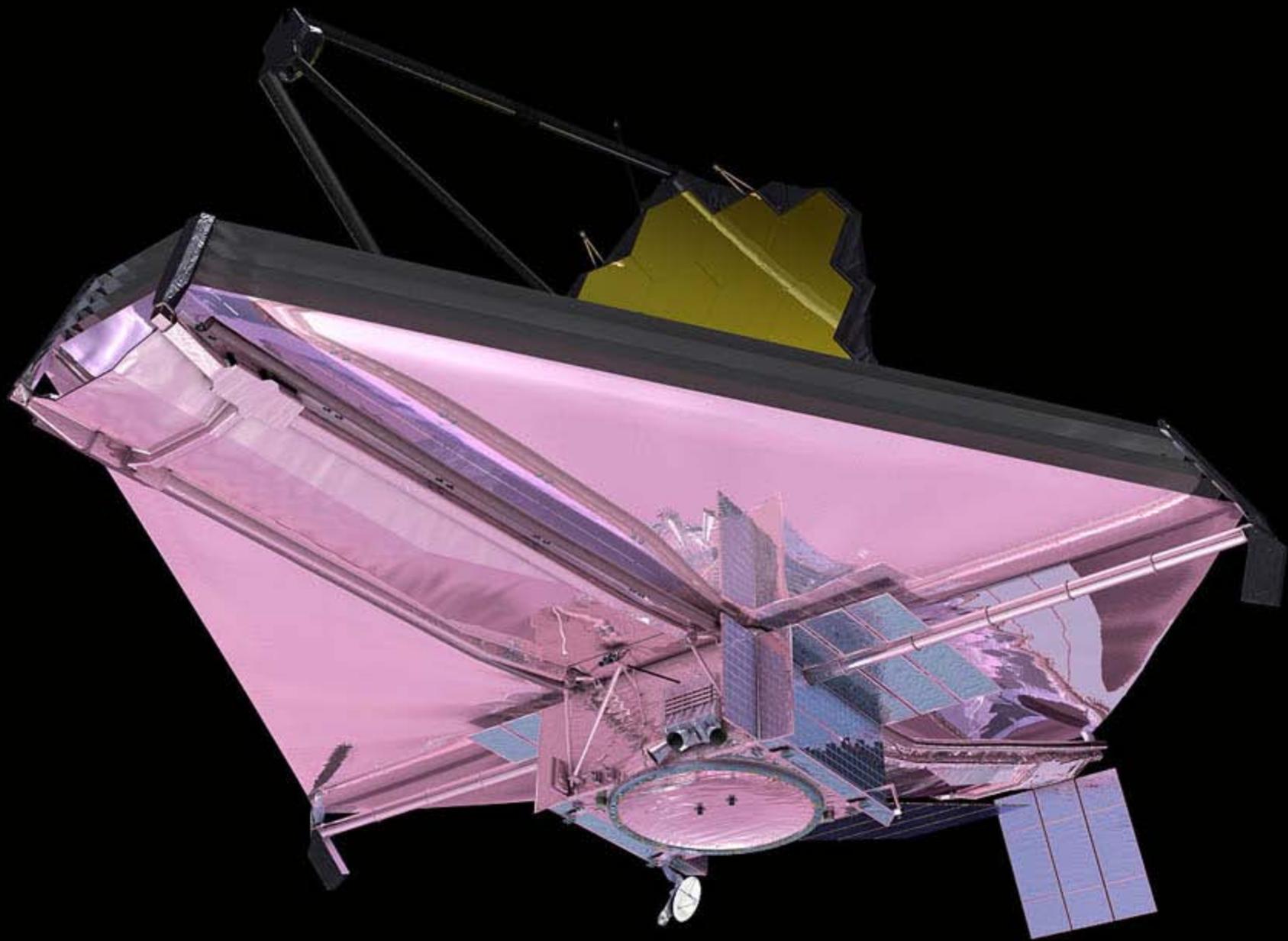
Selected events	
Year	Events
1996	Next Generation Space Telescope project started (8 m)
2002	Named James Webb Space Telescope, Chg to 6 m
2003	TRW contract awarded to build
2004	NEXUS cancelled
2007	ESA/NASA MOU (Memorandum of understanding)
2010	MCDR passed (Mission Critical Design Review)
2011	Proposed cancel
2016	Final assembly completed
2021	Launch

James Webb Space Telescope

6,5 м

25 декабря 2021 г.

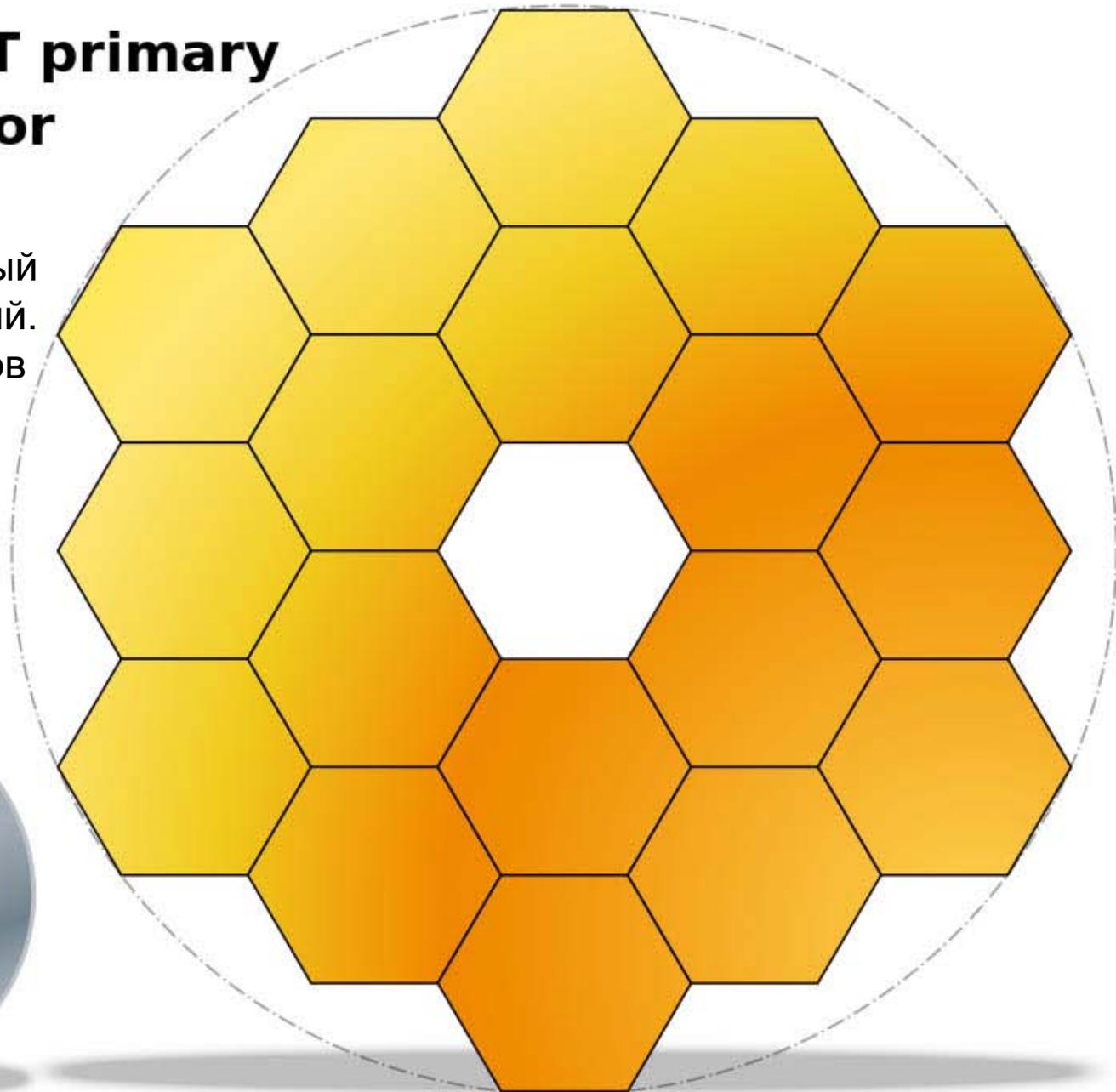




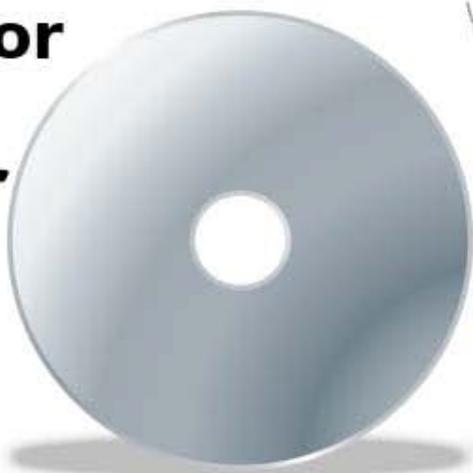


# JWST primary mirror

Позолоченный бериллий.  
18 сегментов



# Hubble primary mirror



# WEBB AND ARIANE 5: A FIT MADE PERFECT

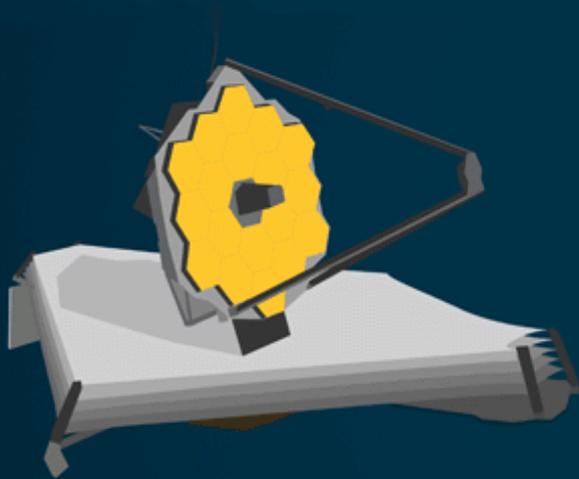
ESA is flying Webb on an Ariane 5 rocket, which has been customised for this extraordinary telescope.



## Webb

Height  
8 m

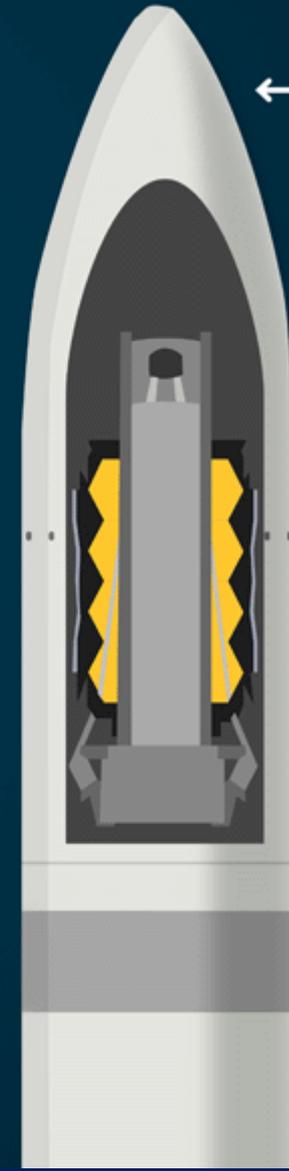
5-layered  
sunshield  
21.2 x 14.2 m



## Folded Webb

Height  
10.66 m

Width  
4.5 m



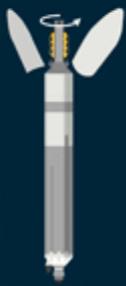
## Fairing

Height  
17 m

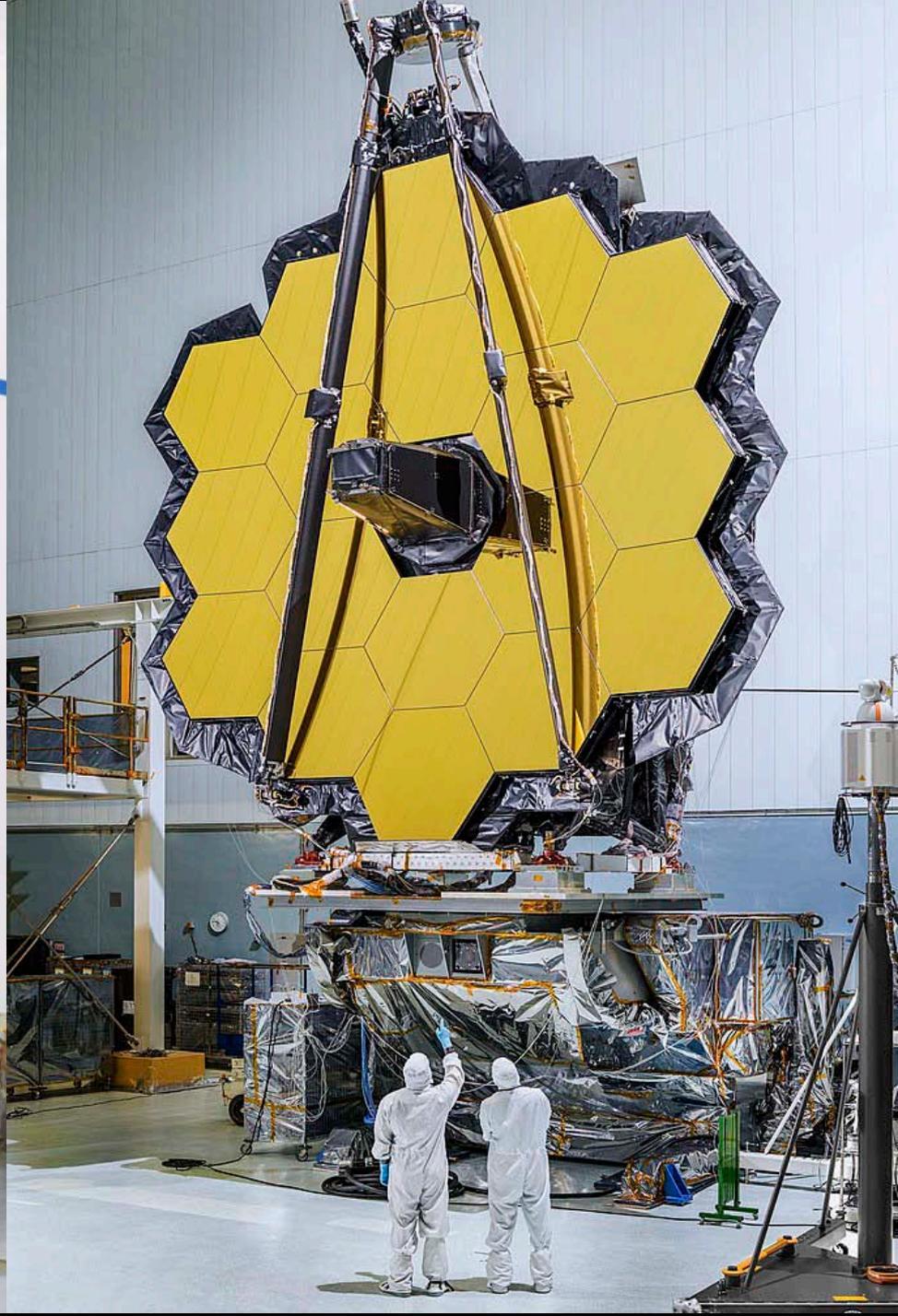
Diameter  
5.4 m

28 venting ports  
allow depressurisation  
during launch sequence

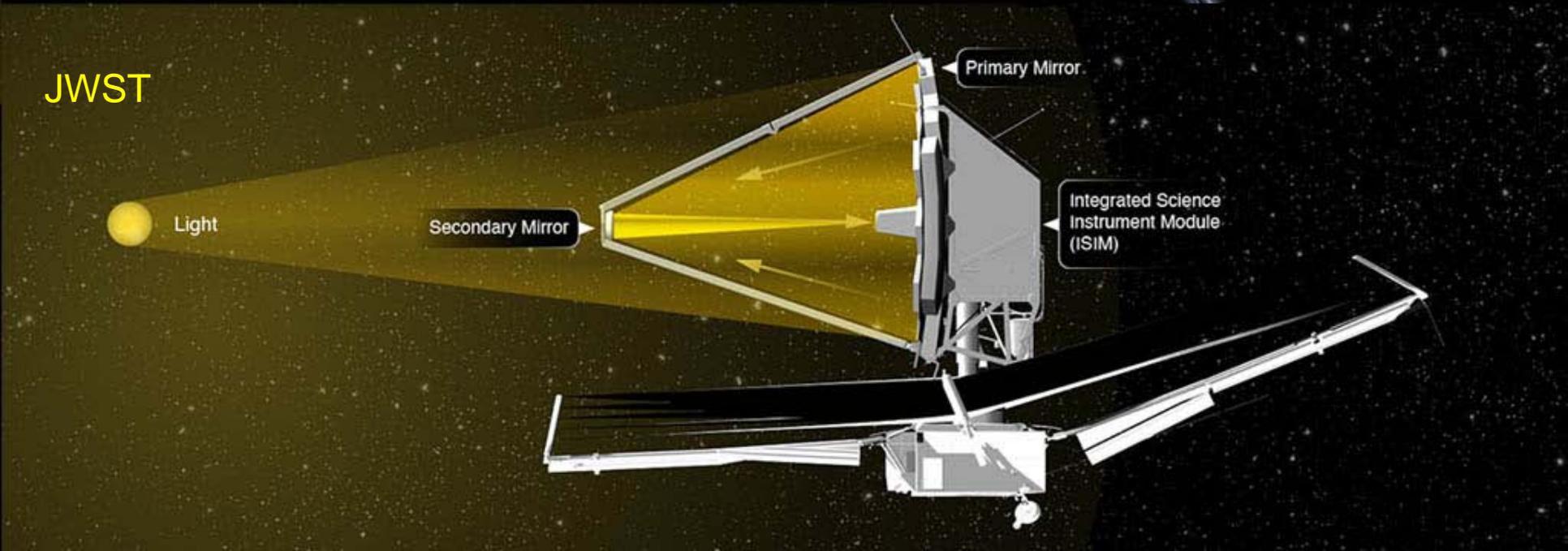
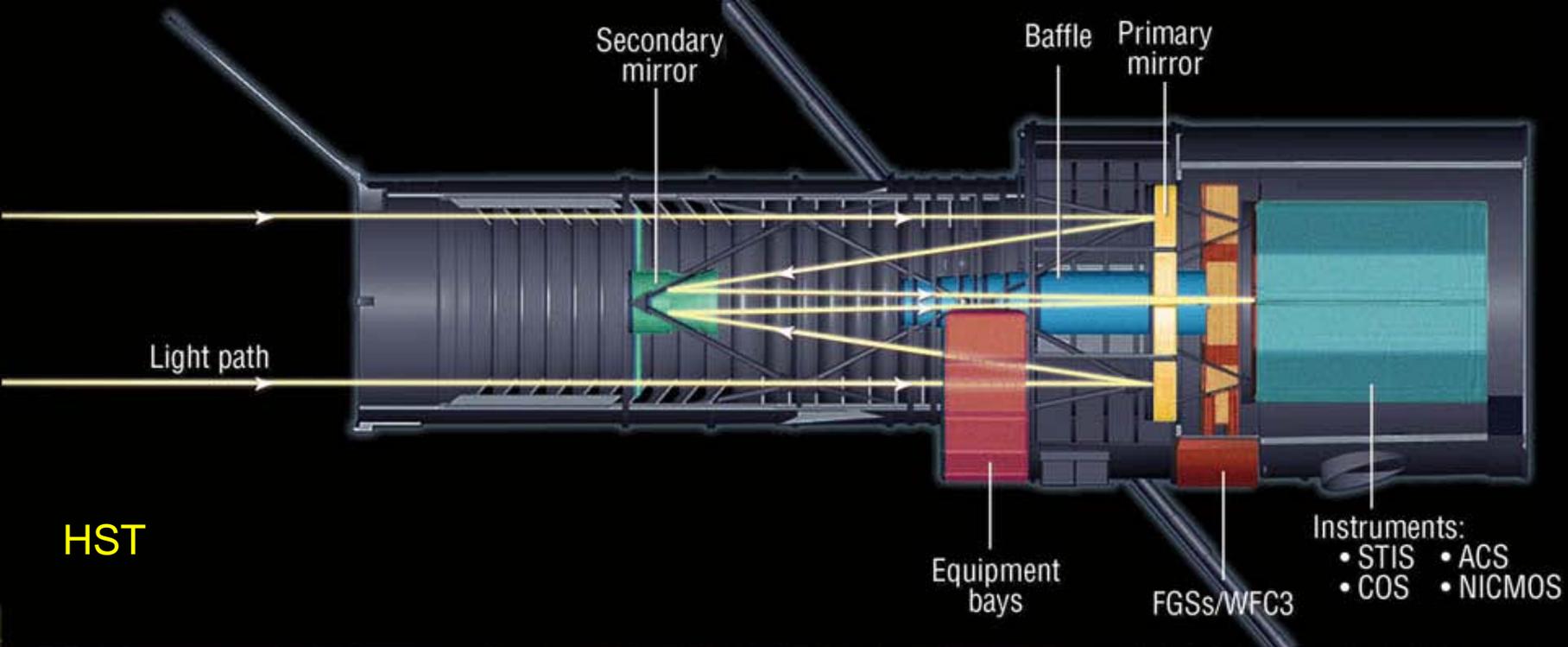
Oscillating  
rolling manoeuvre to protect  
Webb from solar radiation  
after fairing separation



size of a  
tennis court







Диаметр: 6 м  
Масса: 850 т



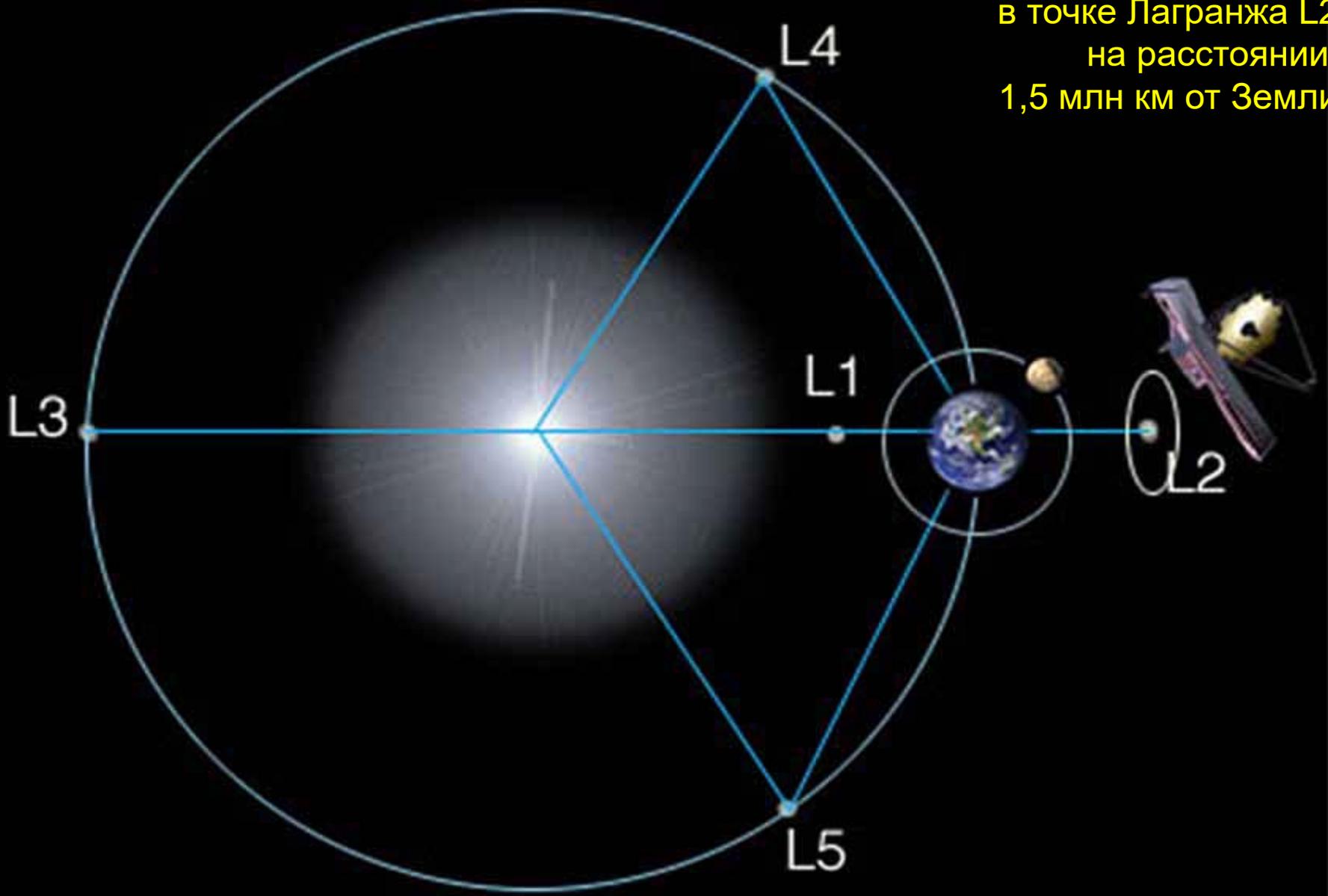
БТА

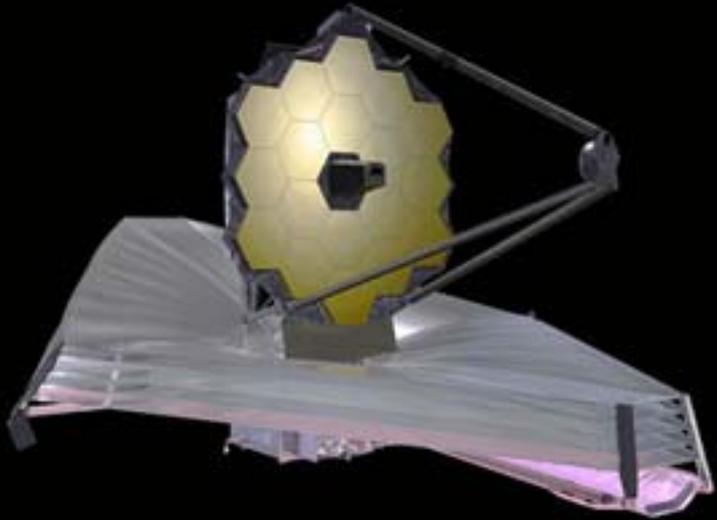
Диаметр: 6,5 м  
Масса: 6,2 т



JWST

JWST работает  
в точке Лагранжа L2  
на расстоянии  
1,5 млн км от Земли





## JWST

Масса: 6,2 т

Носитель: Ariane 5

Стоимость: \$10 млрд (2021 dollars)

Диаметр объектива: 6,5 м

Диапазон: 0,6 – 28,3 мкм (Опт – ср.ИК)

Температура: -223 °C

Высота орбиты: 1,5 млн км

Годы работы: 2022 – ?

## HST

Масса: 11,1 т

Носитель: Space Shuttle

Стоимость: \$12 млрд (2015 dollars)

Диаметр объектива: 2,4 м

Диапазон: 0,2 – 2,4 мкм (УФ – бл.ИК)

Температура: около 10 °C

Высота орбиты: 600 км

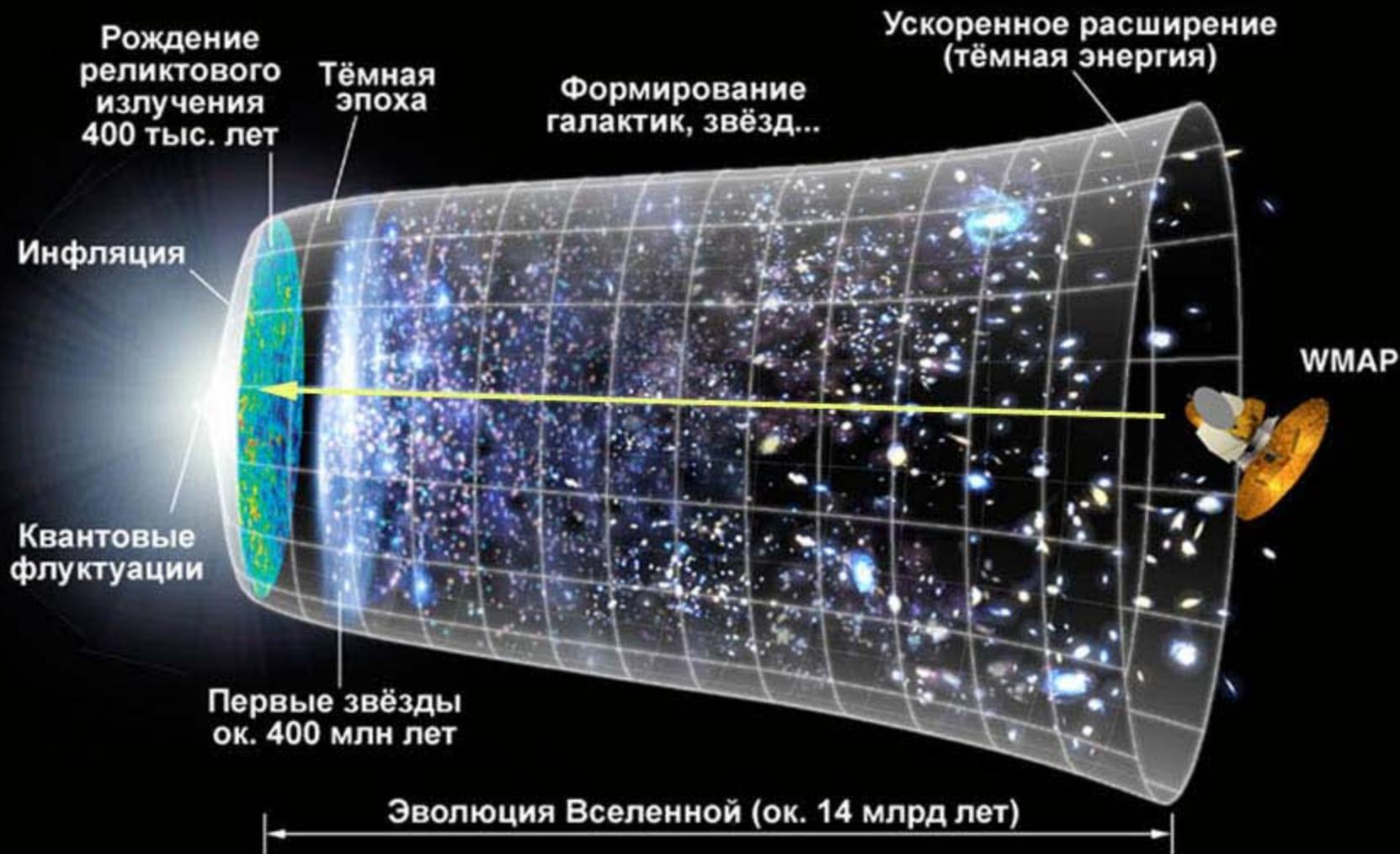
Годы работы: 1990 – 2030/40



# Телескоп – машина времени: мы видим только прошлое Вселенной



# Телескоп – машина времени: мы видим только прошлое Вселенной

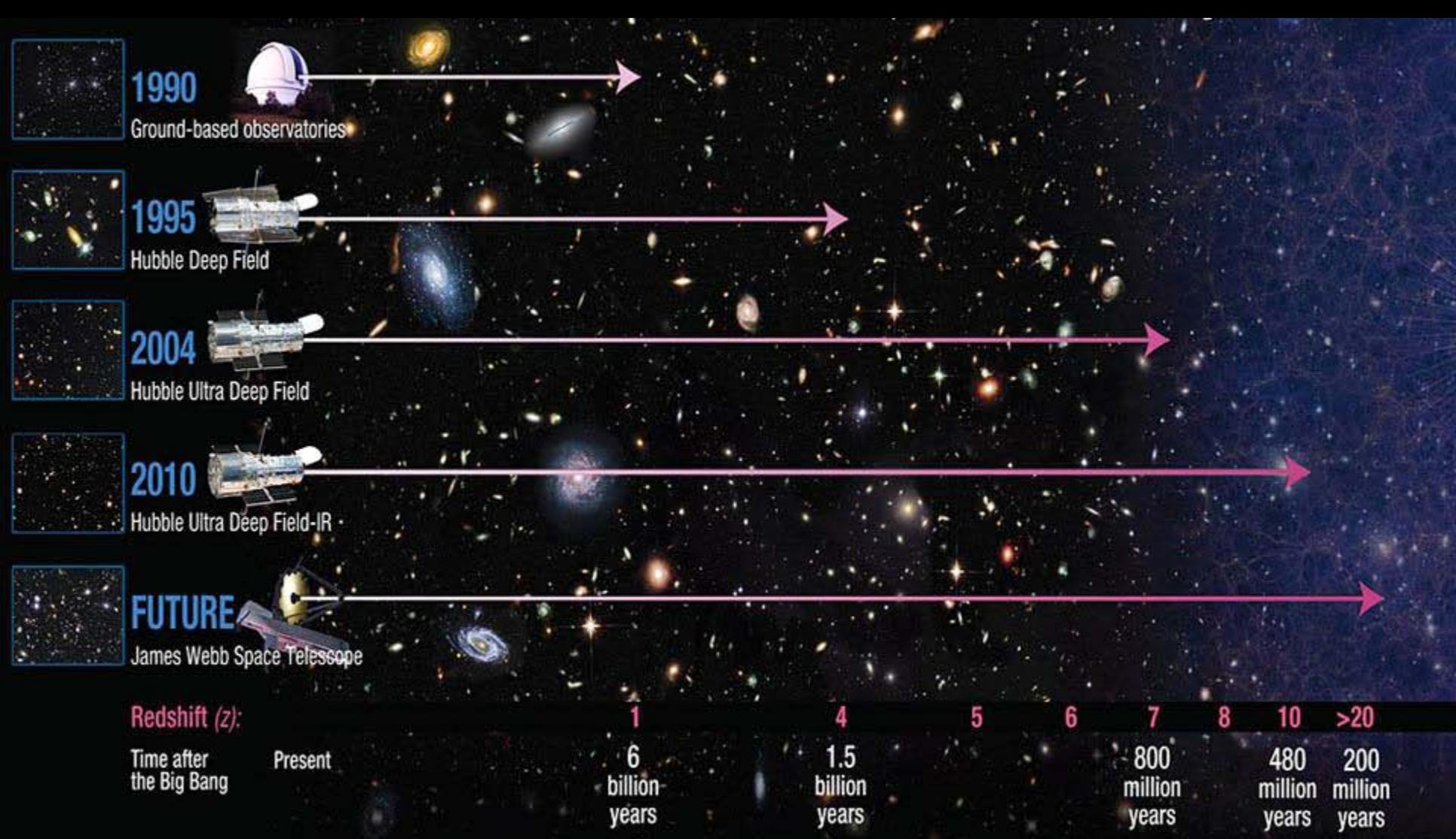


# Телескоп – машина времени: мы видим только прошлое Вселенной



# Телескоп – машина времени: мы видим только прошлое Вселенной

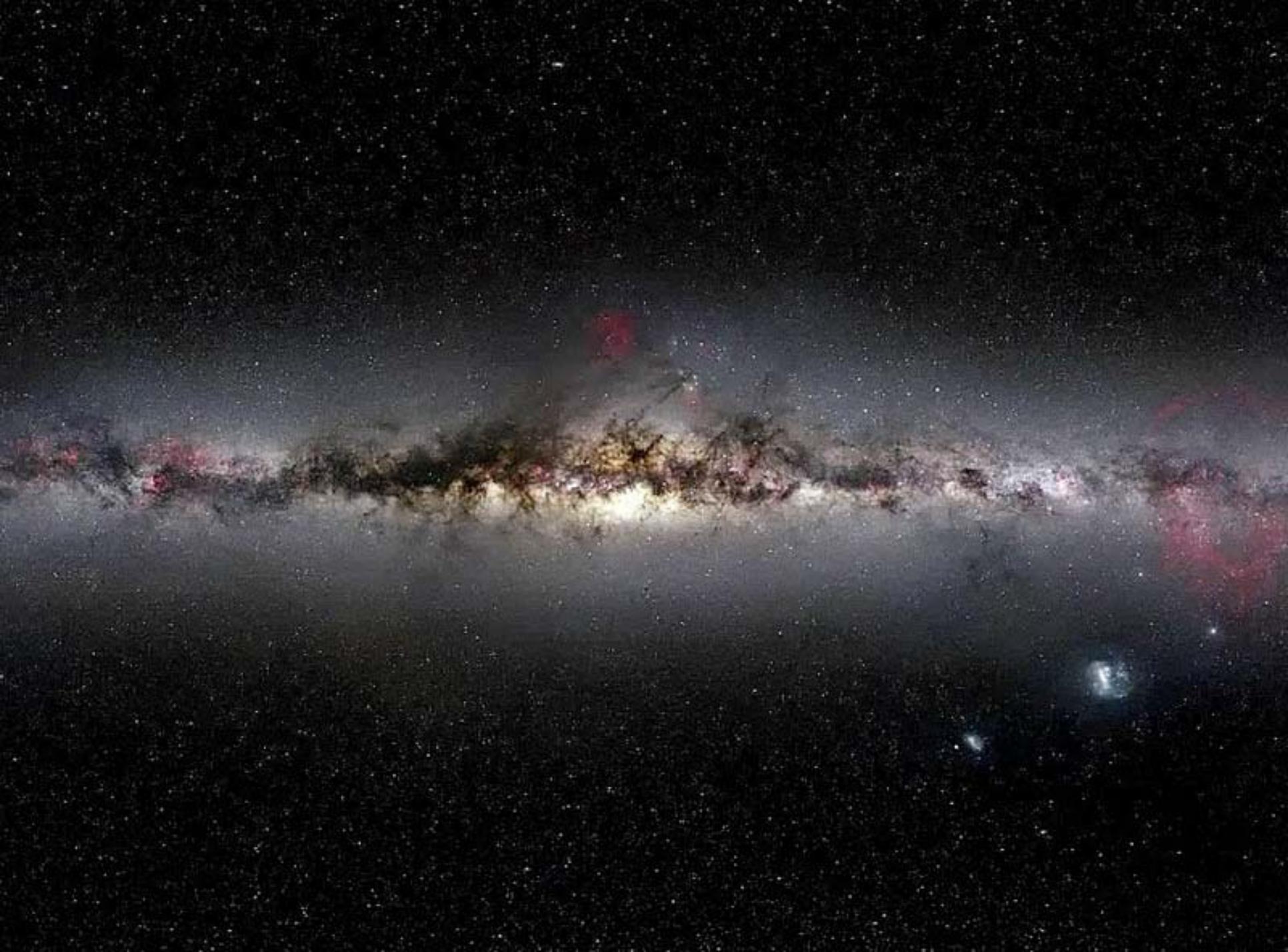




Заглянем во Вселенную поглубже!



D Bennett



# Газово-пылевое облако Barnard 68 (B 68). Глобула Бока

Впервые в 1919 г. занесено в *Каталог тёмных туманностей* Эдуарда Барнарда (E.E.Barnard)

Определяется как *molecular cloud*, *dark absorption nebula*, *Bok globule*

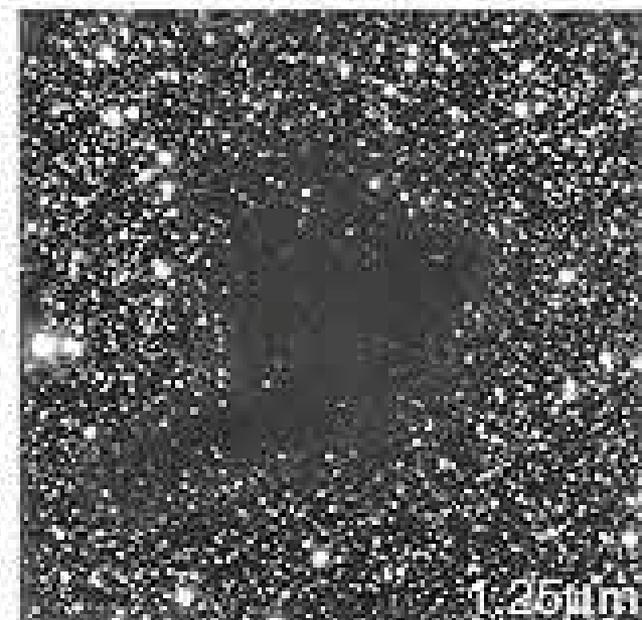
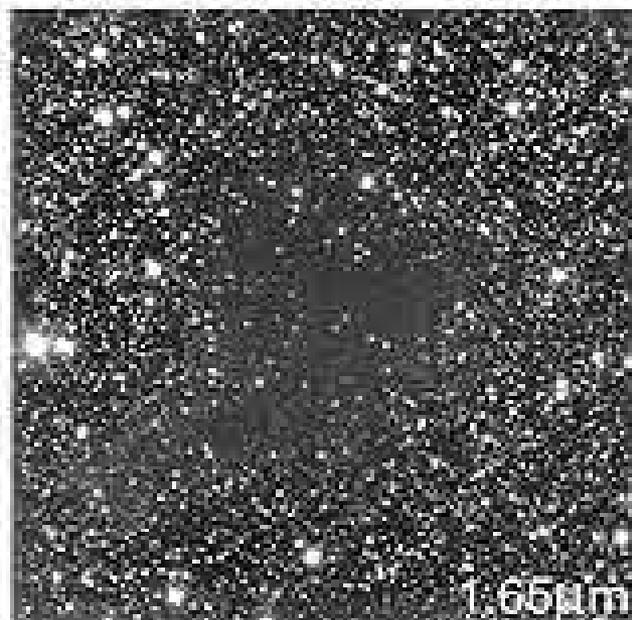
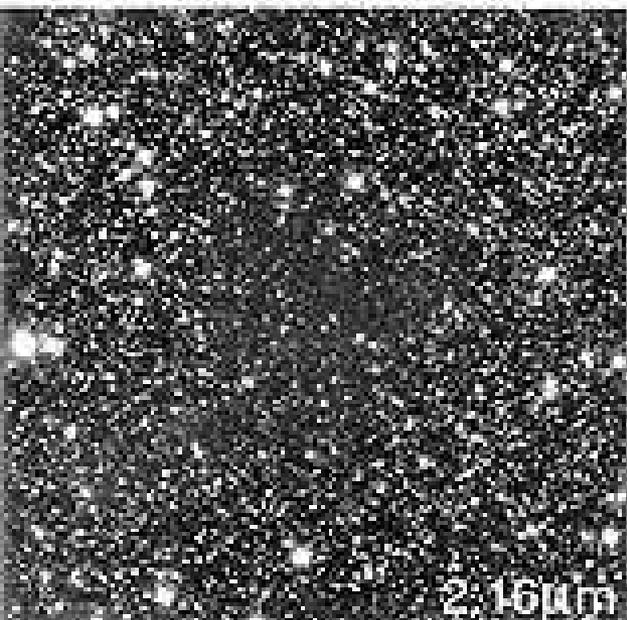
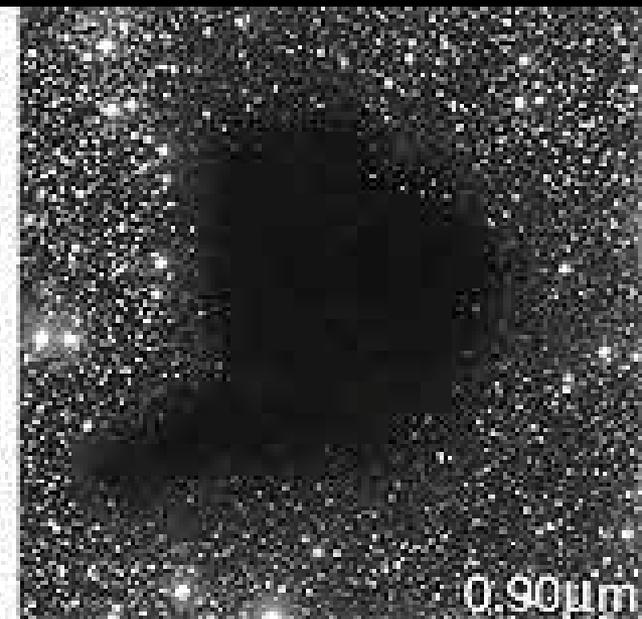
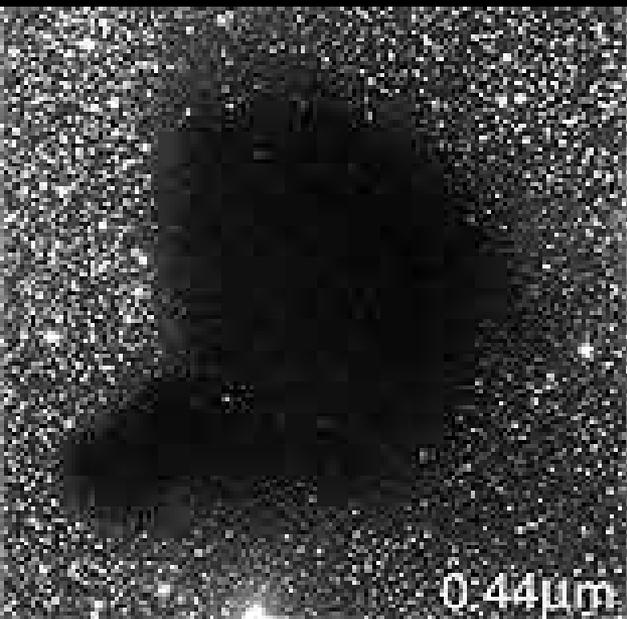
Располагается в созвездии Змееносец на расстоянии 500 св. лет (около 150 пк)

Диаметр ок. 0,5 св. года.  
Масса ок.  $2 M_{\odot}$ .  
Температура 16 К

Облако находится на грани гравитационного коллапса

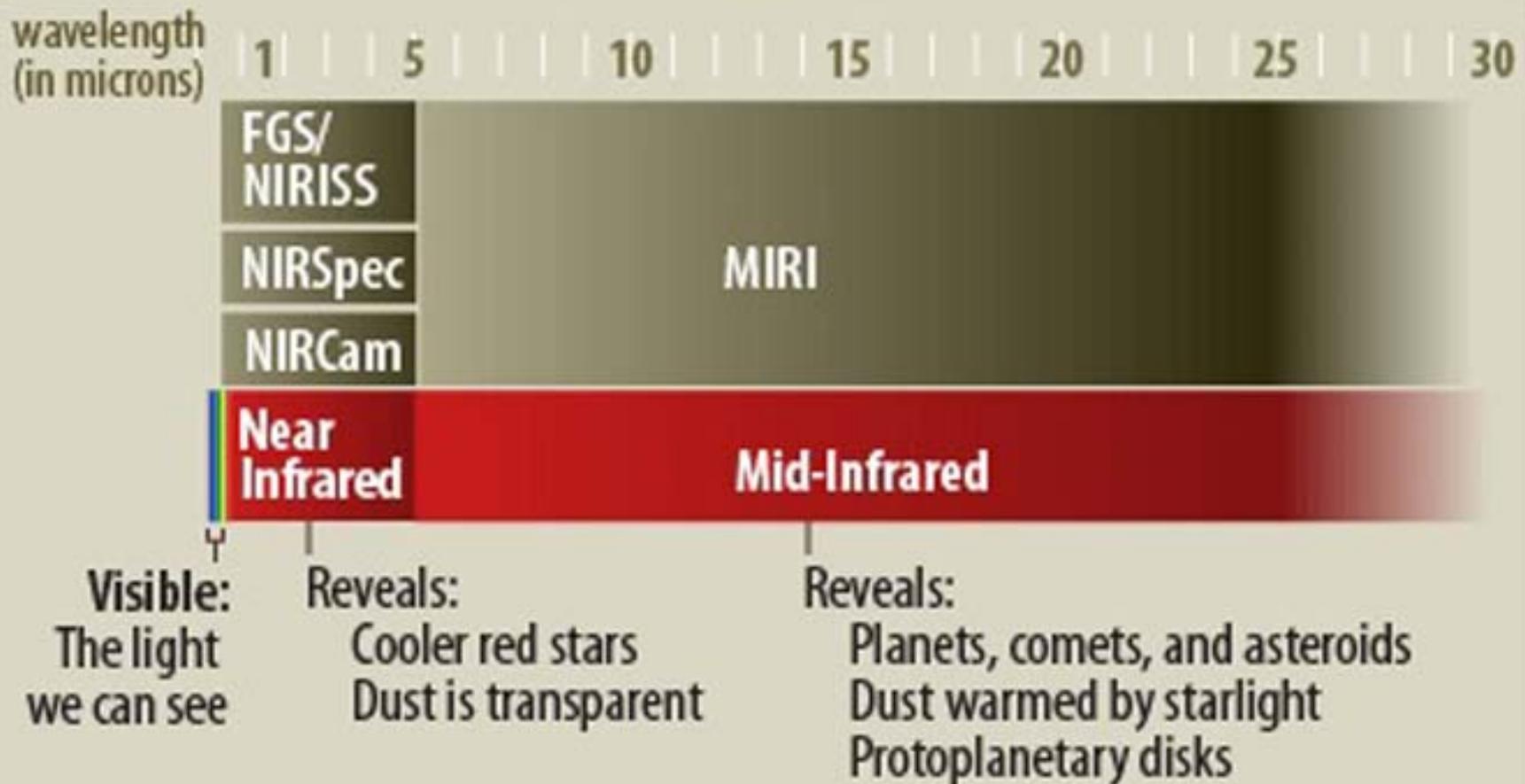


# Газово-пылевое облако Barnard 68 (B 68) в разных диапазонах излучения



# Приборы JWST NIRCam и MIRI

## Infrared sensitivity of Webb's instruments



## Приборы телескопа James Webb

Всего 4 прибора, которые будут работать в 17 режимах.

### **Камера ближнего инфракрасного диапазона (NIRCam)**

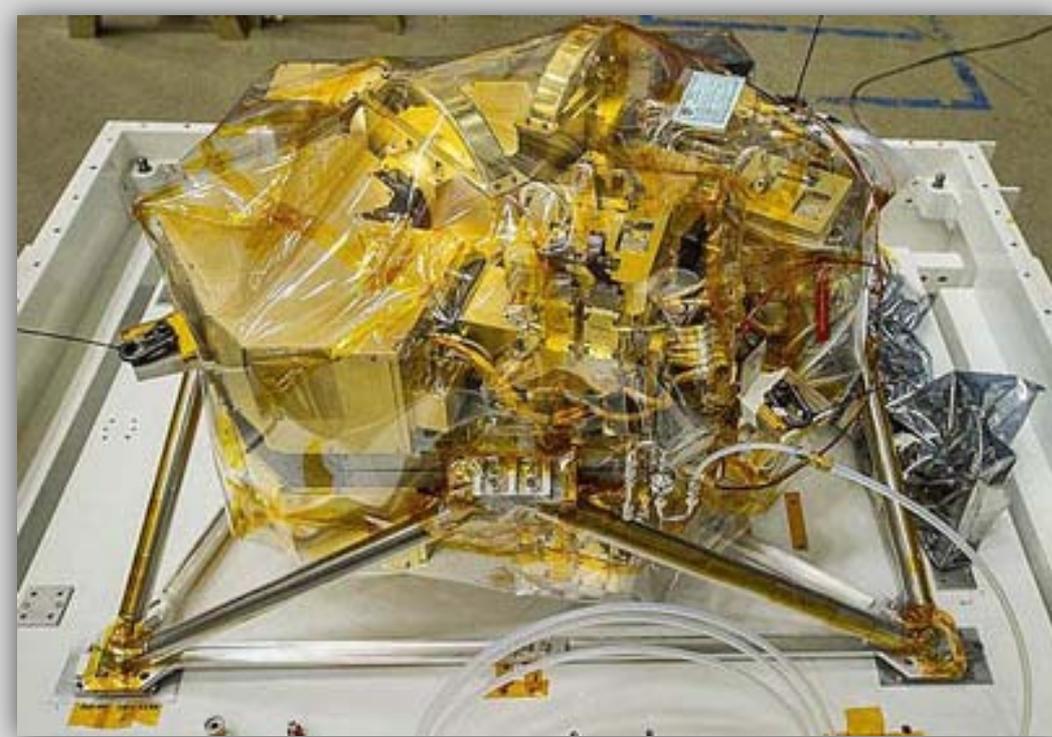
Поле зрения **2,2 x 2,2 угл. мин.** (У телескопа «Хаббл» 2,4 x 2,4 угл. мин)

Делает снимки в диапазоне от видимого до ближнего ИК (**0,6 - 5,0 мкм**).

Цели: глубокие поля, галактики, области звездообразования, планеты Сол.сист.

#### Режимы (основные):

- 1) Широкопольная бесщелевая спектроскопия (квазары).
- 2) Коронаграф. Использует черный диск в приборе, чтобы блокировать звездный свет для обнаружения света от экзопланет.
- 3) Наблюдение временных рядов (режим «киносъемки») и с гризмой, чтобы получать спектры атмосфер транзитных экзопланет.



## **Спектрограф ближнего инфракрасного диапазона (NIRSpec)**

для многообъектной спектроскопии. Хотя бесщелевая спектроскопия позволяет получать спектры всех объектов в поле зрения, она часто накладывает спектры нескольких объектов друг на друга, а фоновый свет снижает чувствительность.

У NIRSpec есть **микрозатворное устройство** с четвертью миллиона крошечных управляемых затворов. Открытие затвора там, где есть интересный объект, и закрытие затвора там, где его нет, позволяет получить чистые спектры **до 100 источников одновременно**.

## **Спектроскопия интегрального поля NIRSpec.**

Создает спектр для **каждого** пикселя на небольшой площади, а не в одной точке, всего для 900 пространственных элементов. Этот режим дает наиболее полные данные об отдельной цели.  
Пример: далекая галактика, усиленная гравитационной линзой.

**Временные ряды ярких объектов NIRSpec.** Спектроскопические наблюдения временных рядов транзитных экзопланет и других объектов, которые быстро меняются со временем.

Пример: наблюдение за горячей экзопланетой размером с Землю по всей её орбите для составления карты температуры планеты.

# Приборы телескопа James Webb

## Прибор среднего ИК диапазона (MIRI) – от 5 до 29 мкм

Прямые снимки сильно запылённых областей, спектроскопия низкого и среднего разрешения (молекулы). Коронаграф: прямые снимки и в поляризованном свете (пылевые диски и экзопланеты).



## Апертурно-маскирующая интерферометрия NIRISS

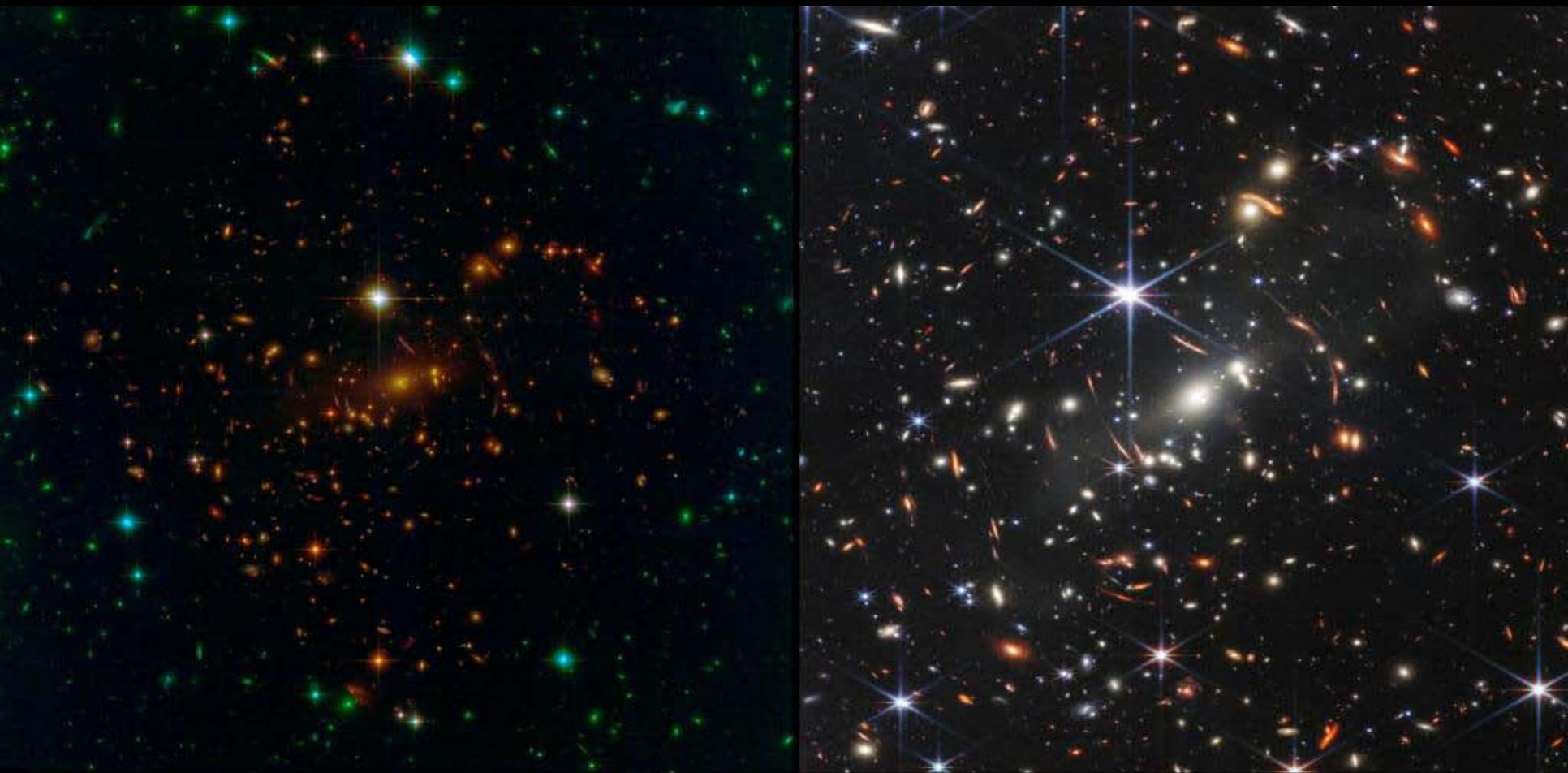
(Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph, совмещен с гидом Fine Guidance Sensor, FGS)

Есть маска для блокировки света от 11 из 18 сегментов главного зеркала. Это даёт контрастное изображение, при котором рядом с яркими источниками можно увидеть слабые

## Прибор для получения изображений в ближнем ИК (0,8-5 мкм) и бесщелевой спектрограф .

Задачи: бесщелевая спектроскопия одного объекта. Чтобы наблюдать за планетами вокруг ярких близлежащих звезд, выводит звезду из фокуса и распределяет свет по множеству пикселей, чтобы избежать насыщения детекторов.

Пример: небольшие экзопланеты TRAPPIST-1b и 1c



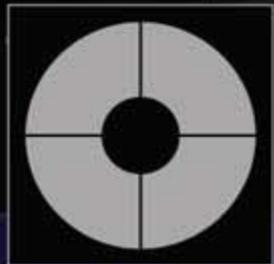
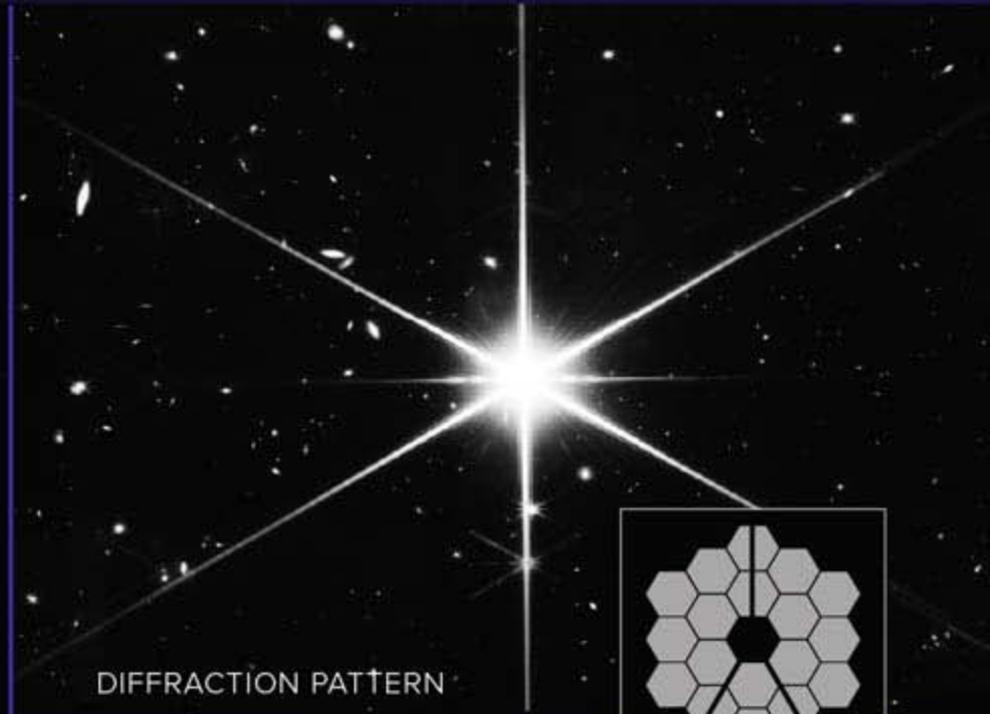
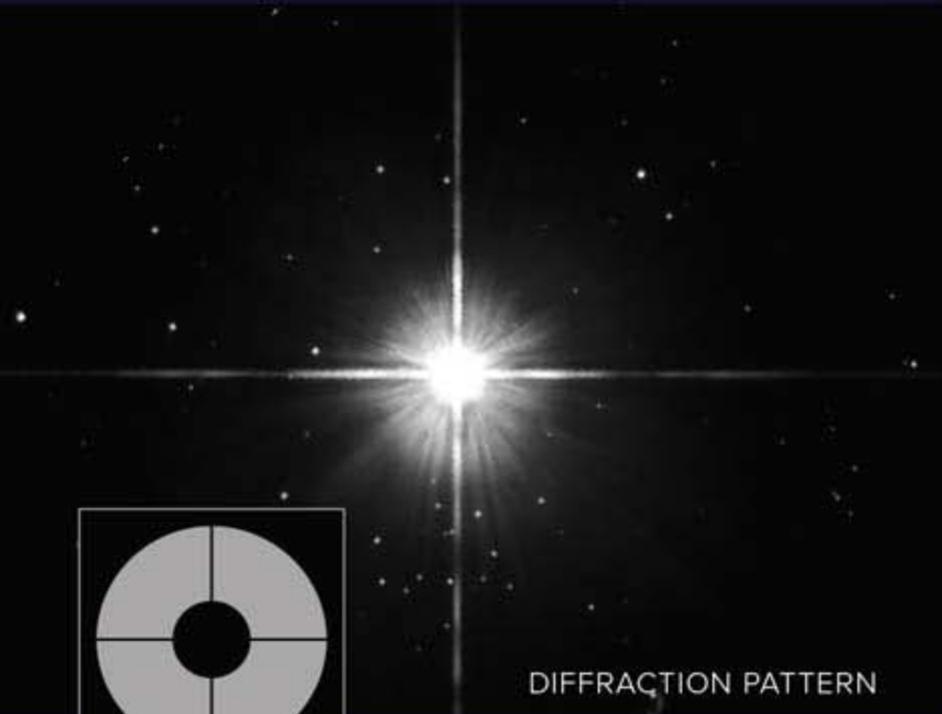
Сравнение снимков одной области с телескопов Хаббла (слева) и Джеймса Уэбба (справа).  
Изображение предоставлено: НАСА, ЕКА, CSA и STScI

# HOW DOES DIFFRACTION HAPPEN?

Light, which has wave-like properties, tends to radiate from a central point outward, similar to how water behaves when a stone is tossed into it. As light encounters an edge, it is bent and redirected, sending it in different directions. In situations where these light waves meet and interact, they can either become more amplified or cancel each other out. These areas of amplification and cancellation form the light and dark spots that show in diffraction patterns.

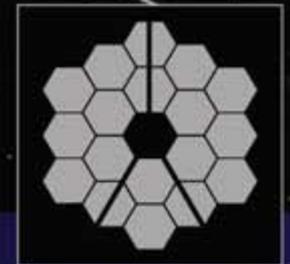
HUBBLE

WEBB



DIFFRACTION PATTERN

DIFFRACTION PATTERN



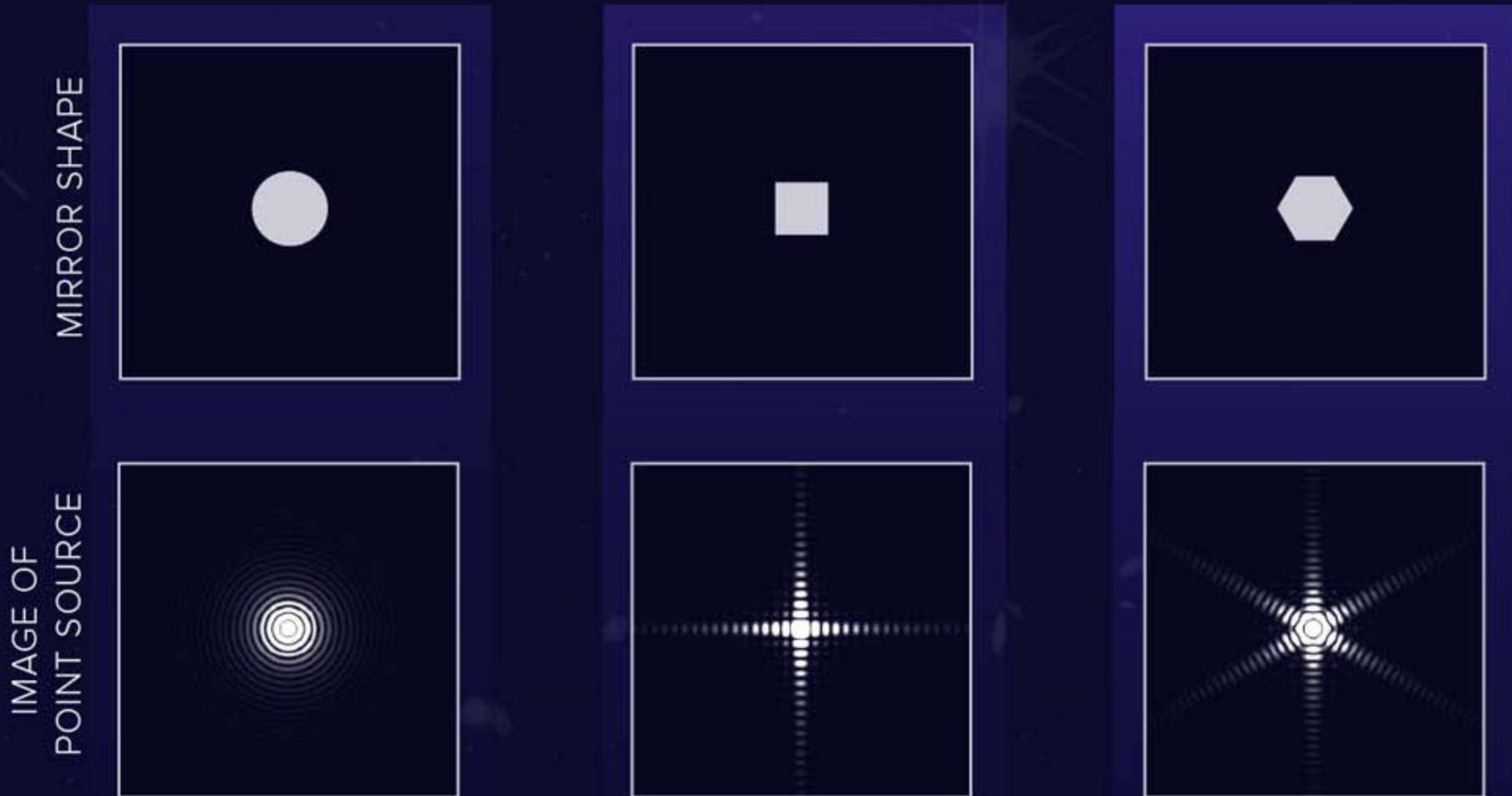
MIRROR AND STRUTS

MIRROR AND STRUTS

# PRIMARY MIRROR INFLUENCE

Primary mirrors in reflecting telescopes cause light waves to interact as they direct light to the secondary mirror. So, even if a telescope had no struts, it would still create a diffraction pattern.

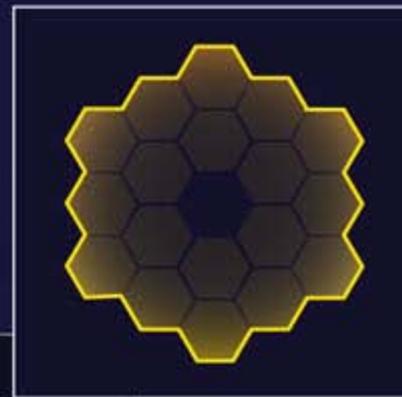
The shape of the primary mirror, in particular the number of edges it has, determines the mirror's diffraction pattern. Light waves interact with those edges to create perpendicular diffraction spikes.



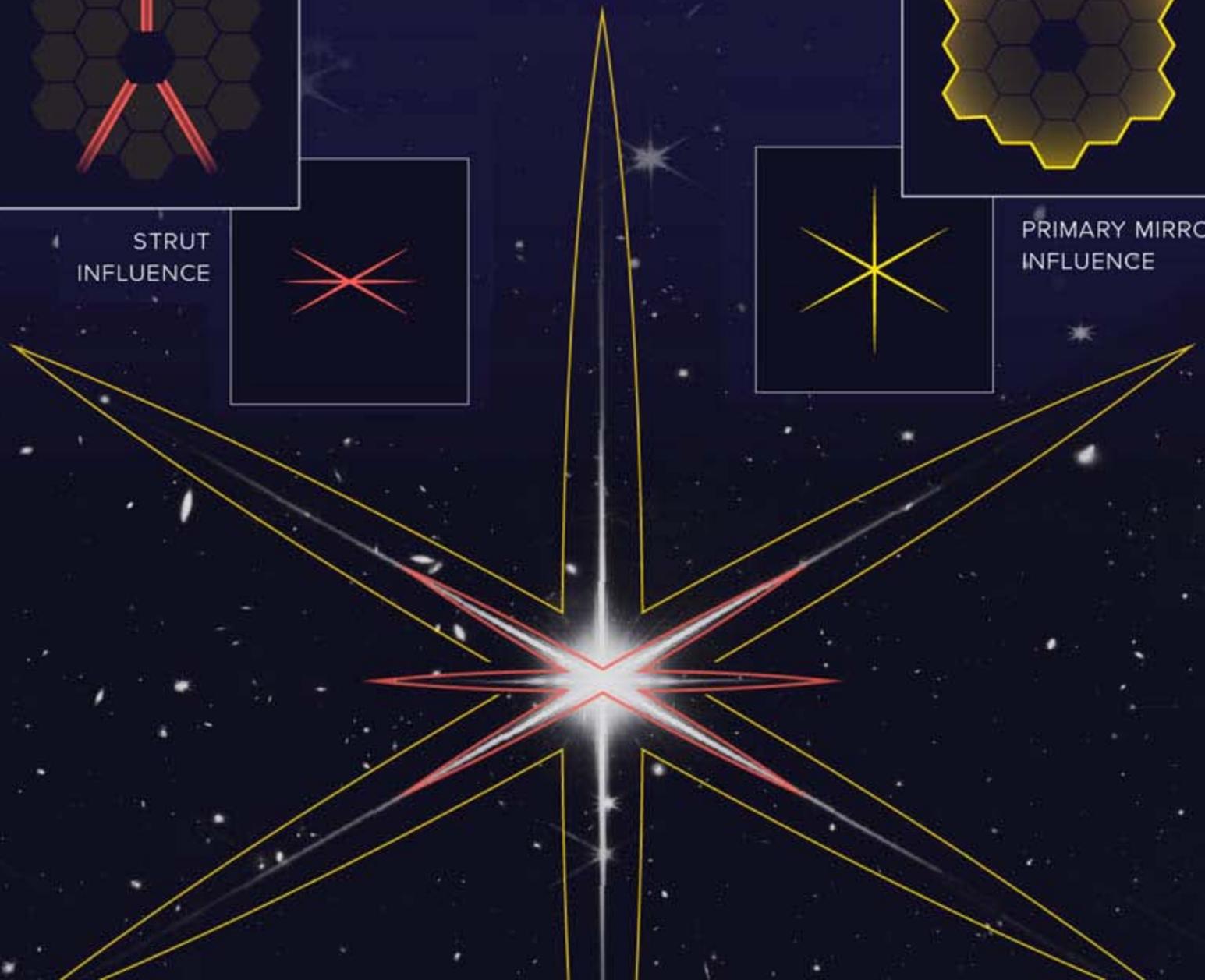
# WEBB'S EIGHT-POINTED STARS

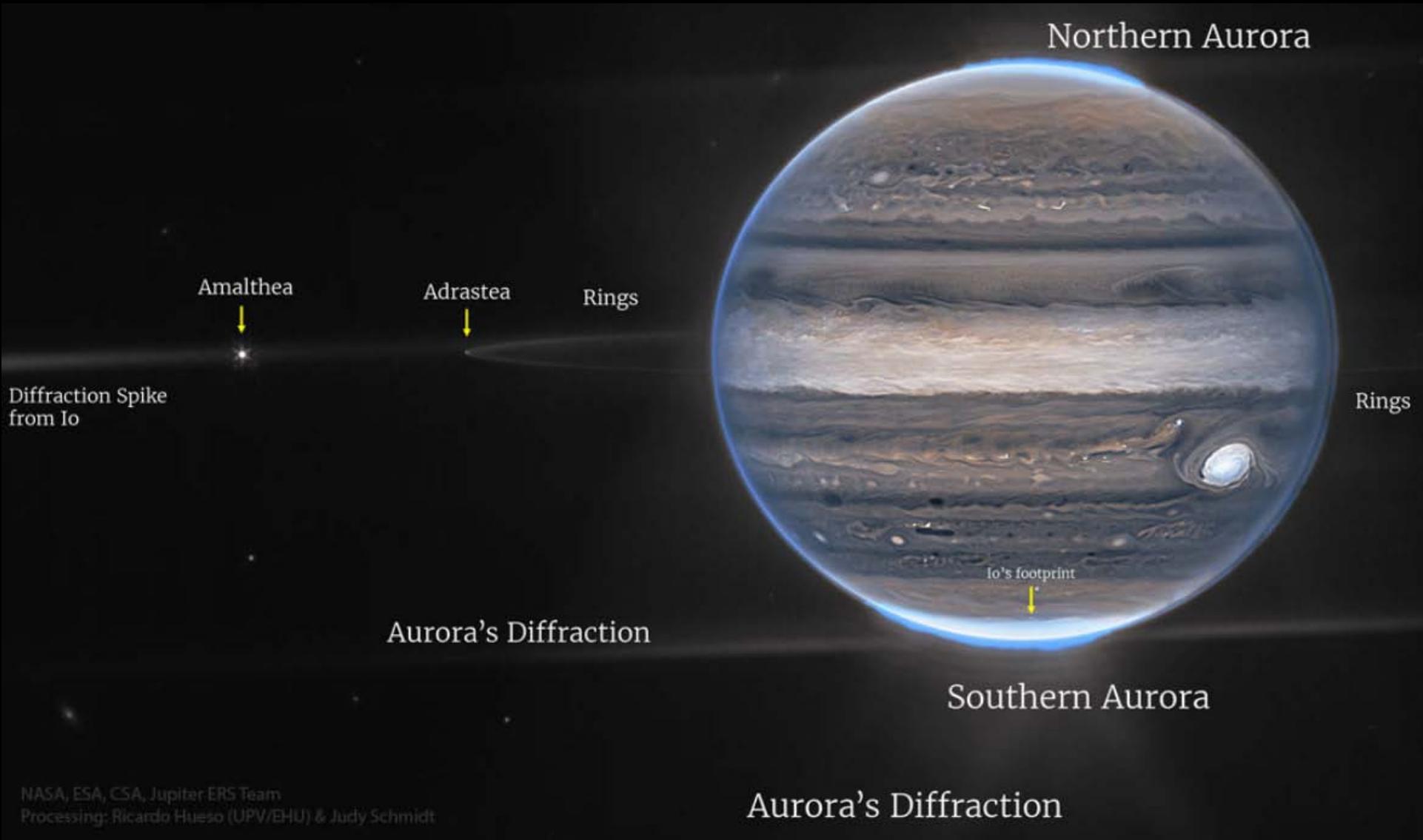


STRUT  
INFLUENCE



PRIMARY MIRROR  
INFLUENCE





NASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team  
Processing: Ricardo Hueso (UPV/EHU) & Judy Schmidt

Сатурн

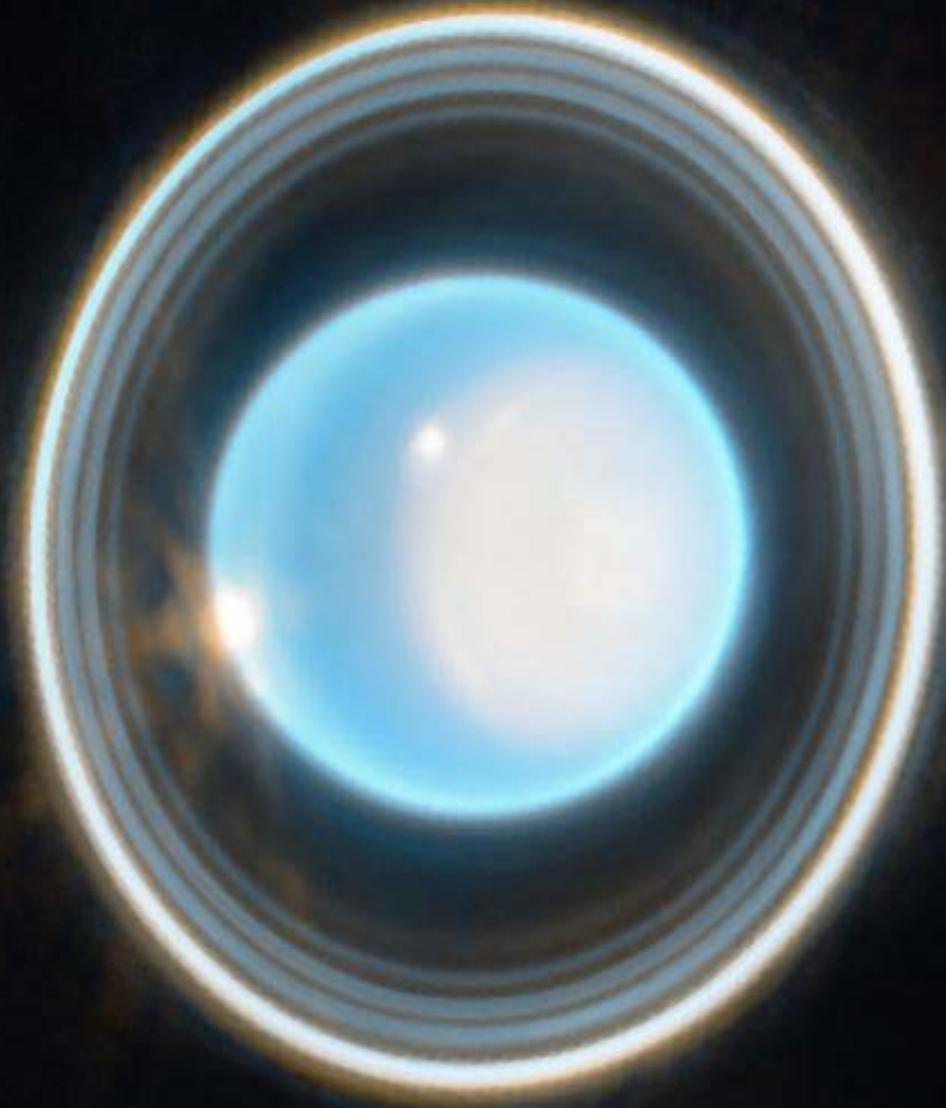
ИК (JWST)



Оптика (HST)



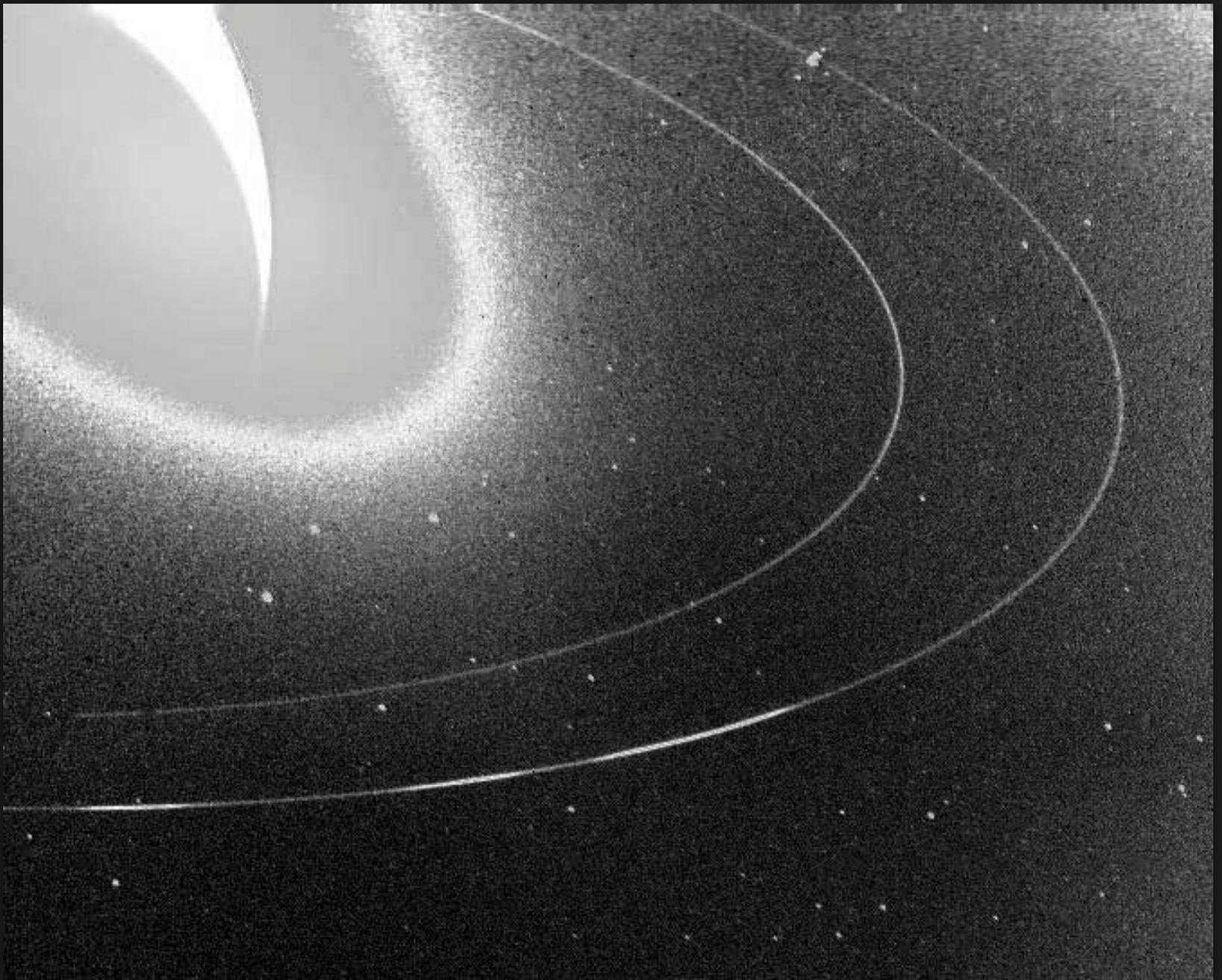
Уран  
JWST 2022



# Нептун

JWST 2022

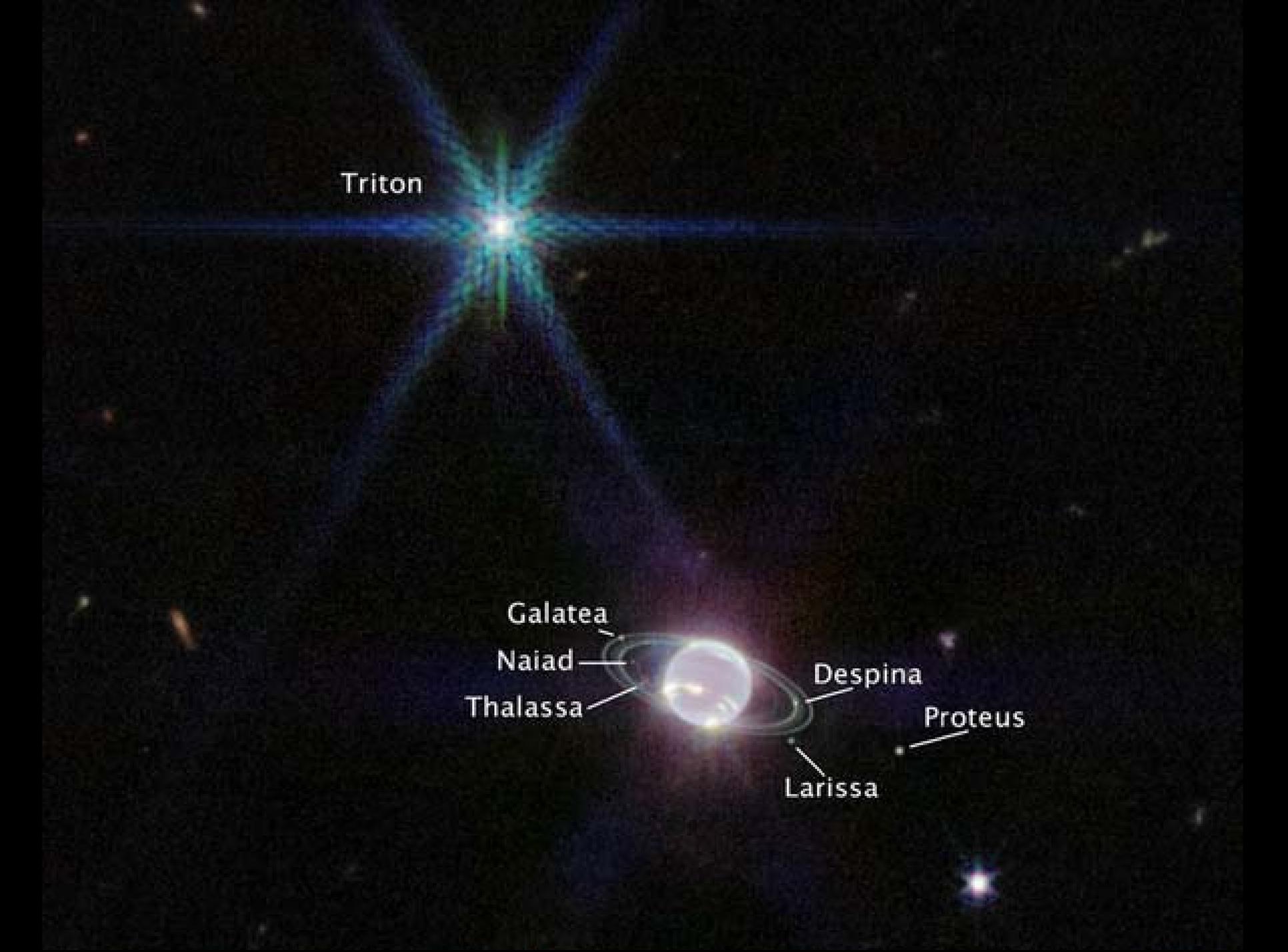




Нептун «Вояджер-2»

Triton

Galatea  
Naiad  
Thalassa  
Despina  
Larissa  
Proteus



**Carina  
nebula**



Hubble composite

**HST**



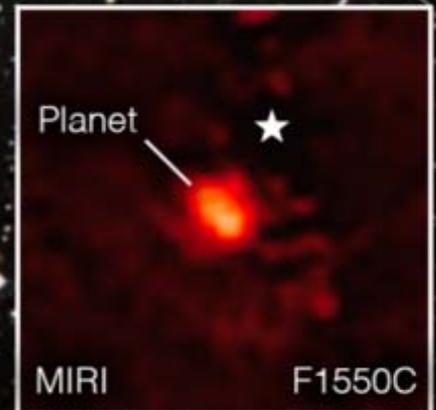
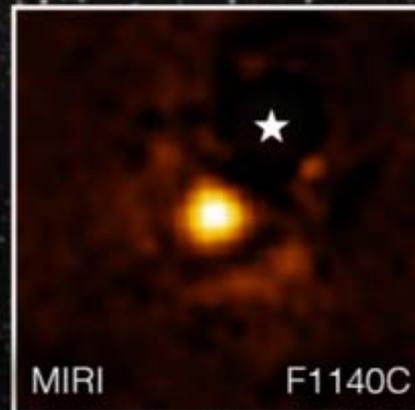
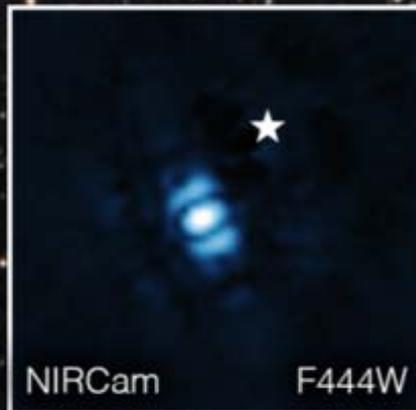
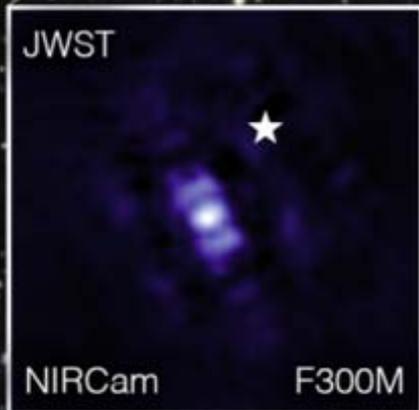
**JWST**



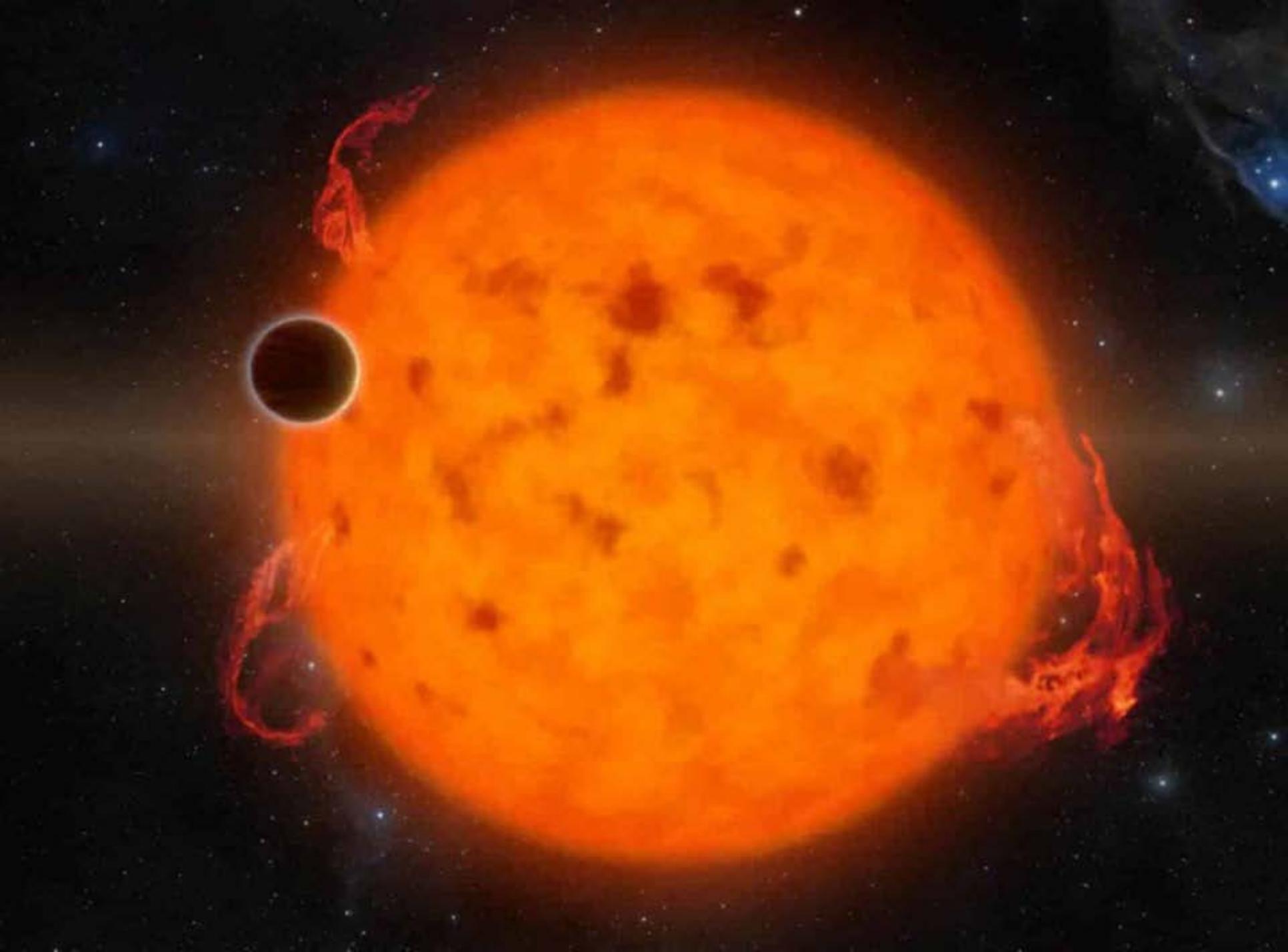
NGC 7496

Star  
HIP 65426

Exoplanet  
HIP 65426 b



Корonoграф NIRCам



# Экзопланета K2-18b

$M = 9 M_{\oplus}$ ,  $R = 2,4 R_{\oplus}$

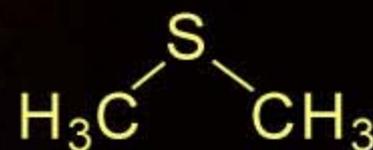
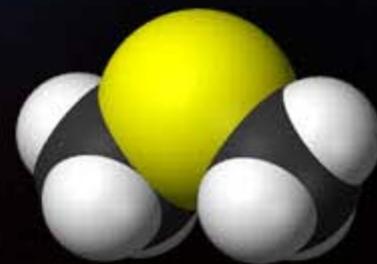
мини-нептун

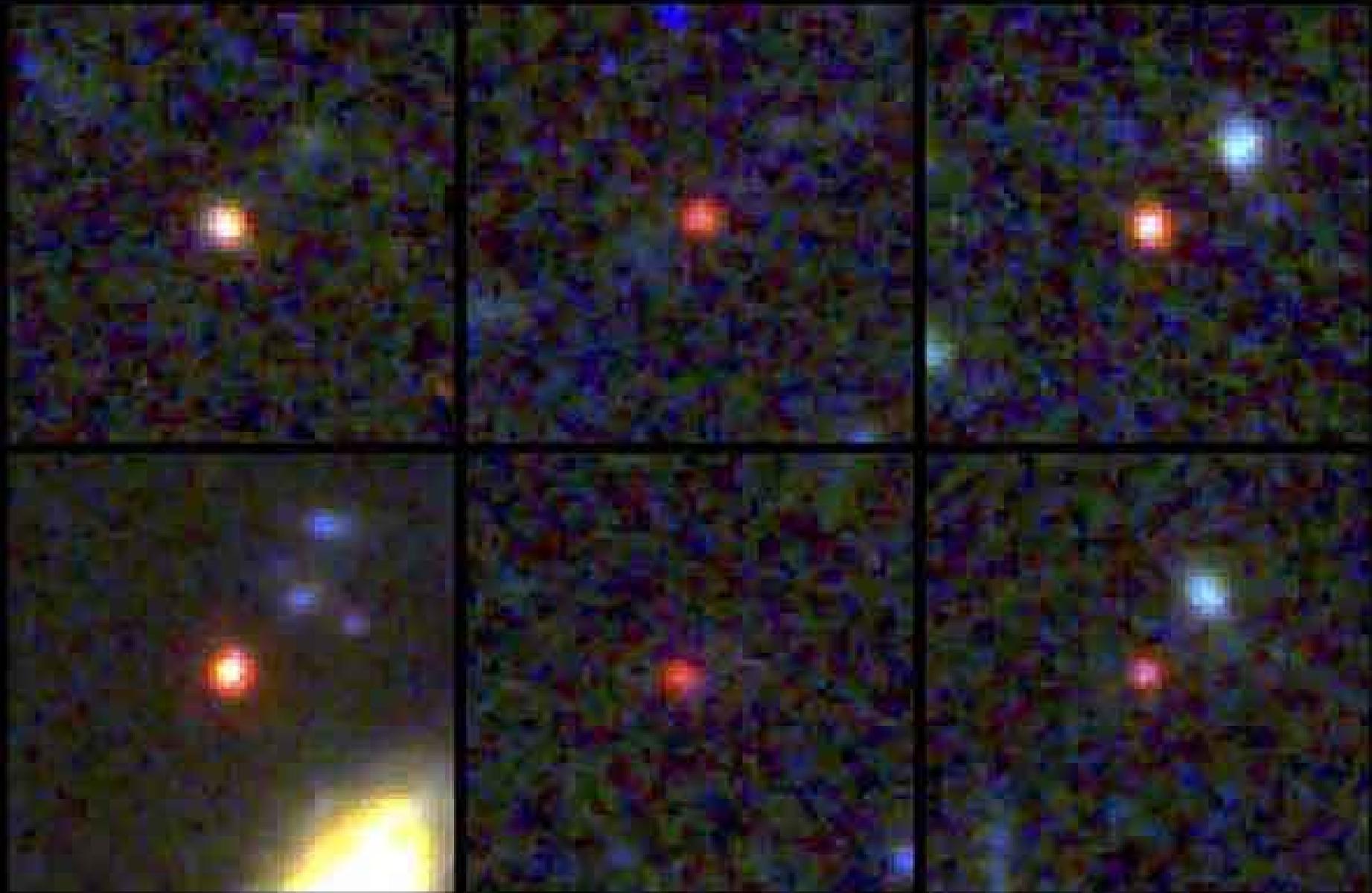
Орб. период 33 сут

JWST в сен 2023 г.

в водородно-гелиевой  
атмосфере водяной пар,  
углекислый газ, метан и  
признаки диметилсульфида,

который на Земле является только  
продуктом морского фитопланктона!





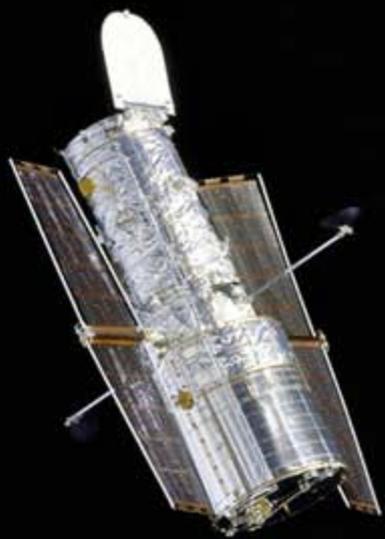
JWST Самые далёкие галактики с  $z \sim 17$



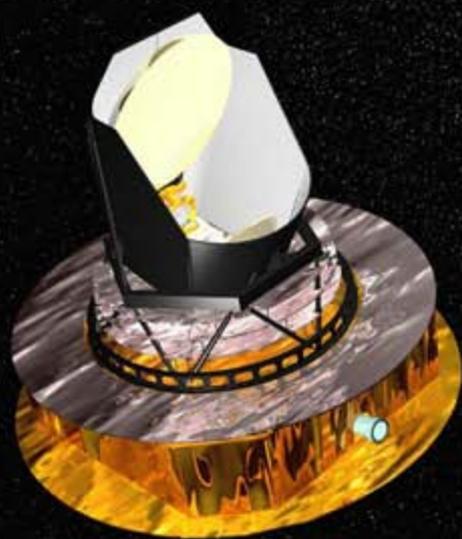
Многие из недавно обнаруженных JWST чёрных дыр находятся на красных смещениях от 4 до 6, что соответствует времени, когда Вселенной было от 1 до 1,5 млрд лет.

JWST обнаружил несколько самых далеких чёрных дыр, которые когда-либо видели. Подтвержденный рекордсмен сидит в центре галактики GN-z11 с красным смещением 10,6 . Значит, уже через 400 млн лет после Большого взрыва зародыши черных дыр уже сформировались и смогли создать сверхмассивный объект.

JWST заметил вероятную чёрную дыру с  $z = 8,7$  в галактике CEERS 1019. Дыра накопила 9 млн массы Солнца за первые 570 млн лет существования Вселенной. И есть даже кандидат в чёрные дыры с красным смещением 12.



Хаббл



Планк



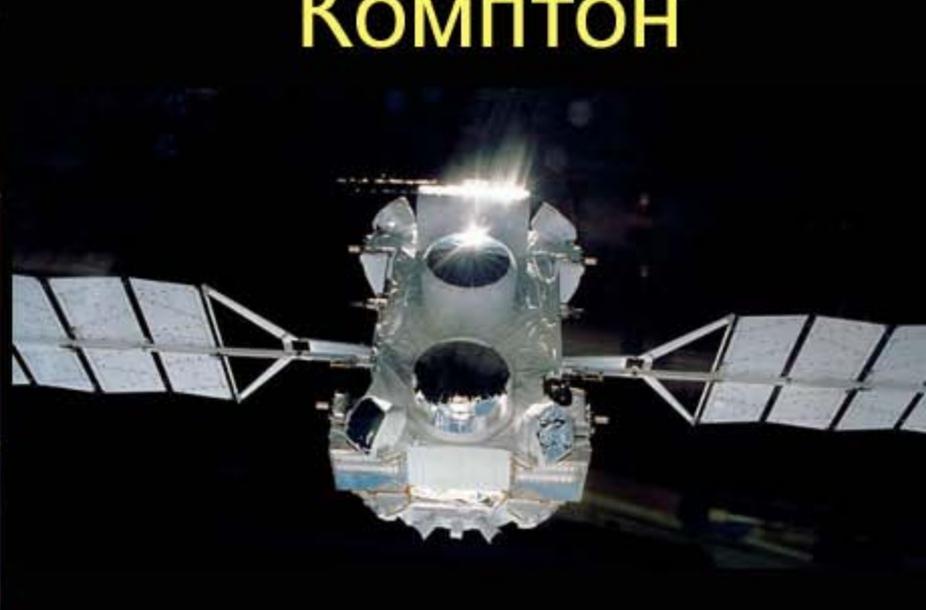
Гершель



Спитцер

Чандра

Комптон



# James Webb Space Telescope

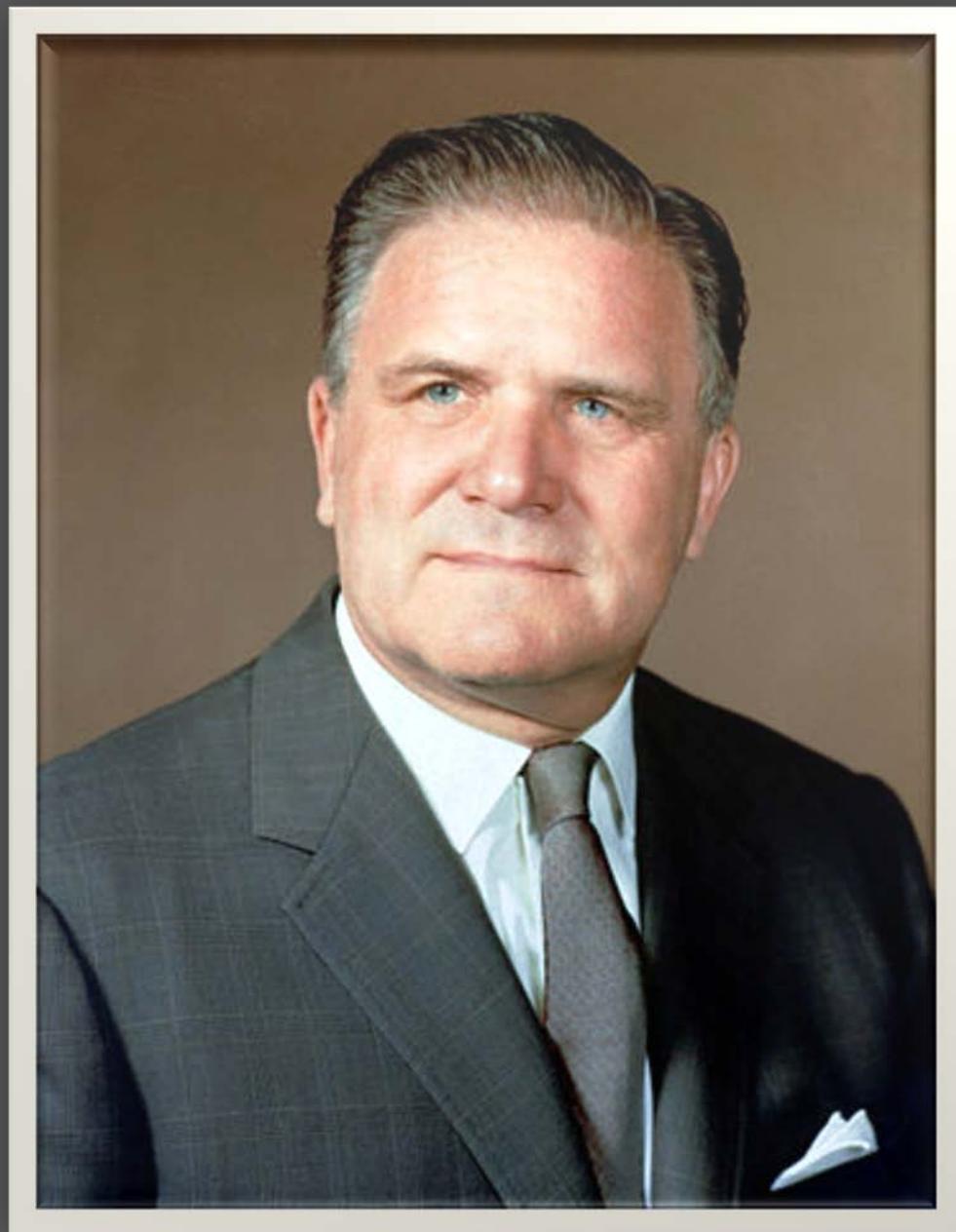
**James Edwin Webb** (1906-1992)

американский гос. чиновник.

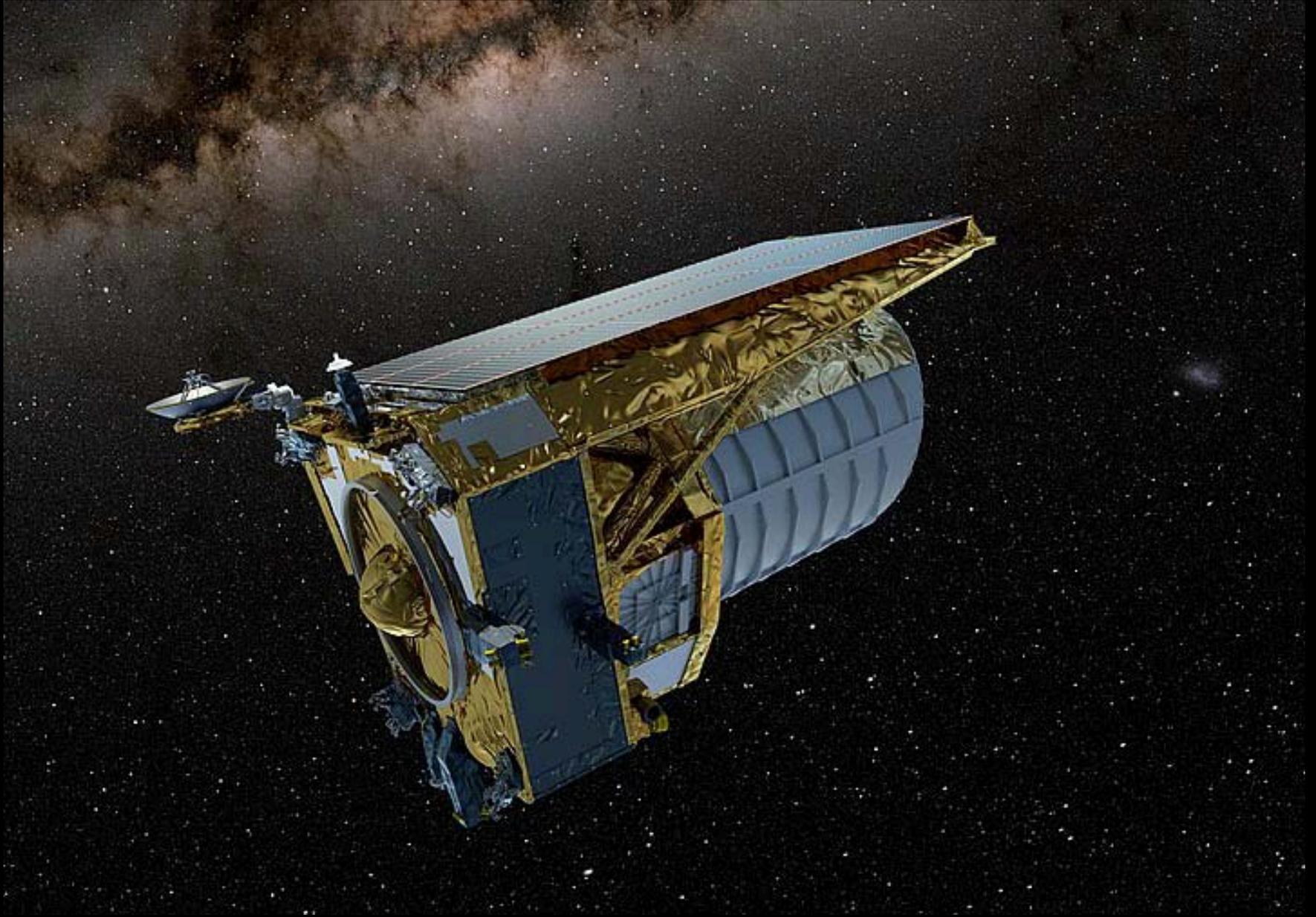
Образование - учитель рисования и юрист. В разных гос. структурах руководил финансами и персоналом.

Опыта в аэрокосмической области не имел, но был назначен администратором НАСА в 1961 г. Фактическое техническое руководство всеми ракетными программами НАСА в период работы Уэбба осуществлял **Вернер фон Браун**.

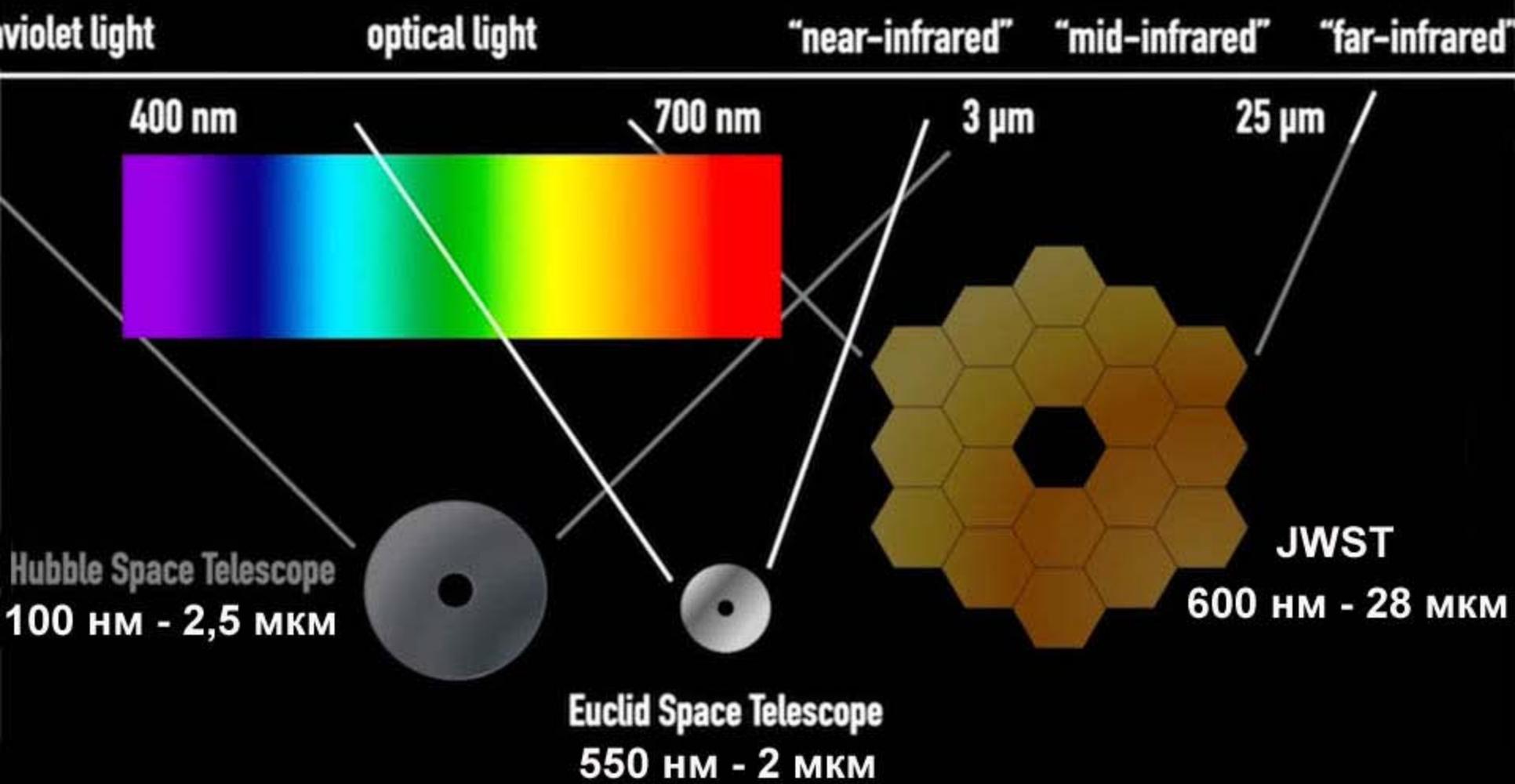
Более 1200 ученых и инженеров НАСА выразили протест против увековечивания имени Уэбба. Многие в знак протеста используют в своих научных работах только сокращенное название JWST и договорились расшифровывать его иначе: **Just Wonderful Space Telescope**, "просто замечательный космический телескоп"



**Euclid** (ESA, 1.07.2023 в точку L2, размер 4,5 x 3,1 м, вес 2 т)  
апертура 1,2 м, 550 нм (зелёный) – 2 мкм (NIR), разрешение 0,1" (opt) – 0,3" NIR  
Трёхзеркальный анастигмат Корша с полем зрения диаметром 0,56 градуса



# Спектральный диапазон «Эвклида» меньше, чем у «Хаббла»



**Nancy Grace Roman Space Telescope (NASA)**  
Wide-Field Infrared Survey Telescope, WFIRST  
Joint Dark Energy Mission

Запуск намечен  
на май 2027 г.



Диаметр объектива 2,4 м  
Диапазон 0,48–2,30 мкм (В–NIR)  
Камера 301 Мрix  
Поле зрения 0,28 кв. градуса

Dr. Nancy Grace Roman, NASA's first Chief of Astronomy.  
Goddard Space Flight Center in Greenbelt, Maryland, 1972



Hubble

WFIRST

**Roman Space Telescope (NASA)**

2026 ?



# PLATO

PLAnetary Transits and Oscillations of stars (ESA)

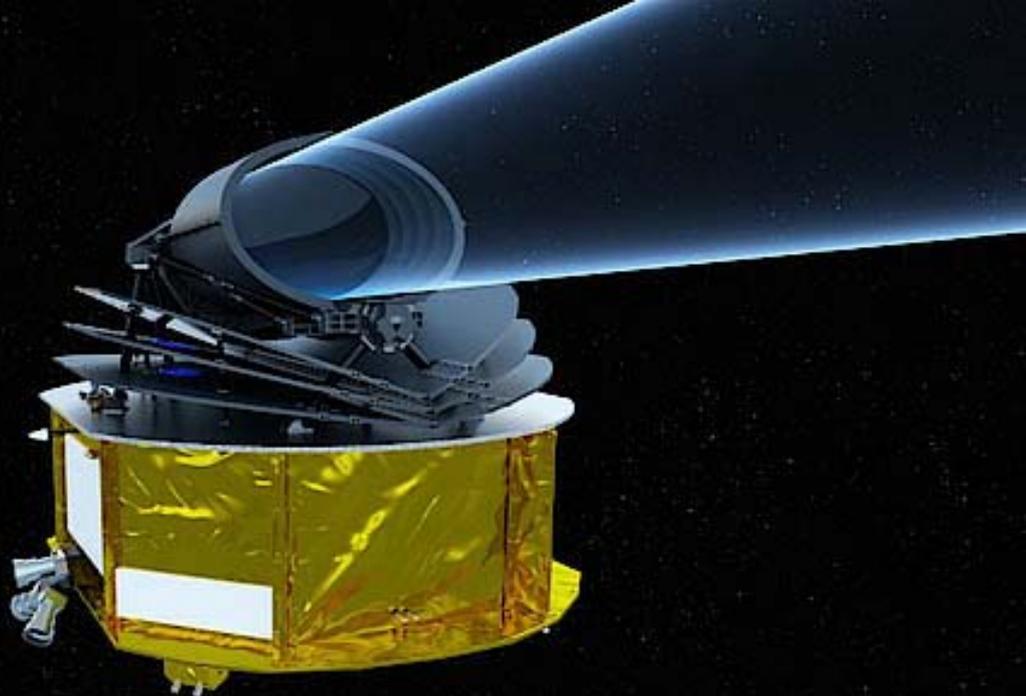
26 telescopes, 120 mm each

Sun - Earth  $L_2$

2029 ?

На 4 года работы  
в точке Лагранжа  $L_2$

Телескоп Кассегрена,  
спектрометр оптического  
и ближнего ИК диапазонов



## ARIEL

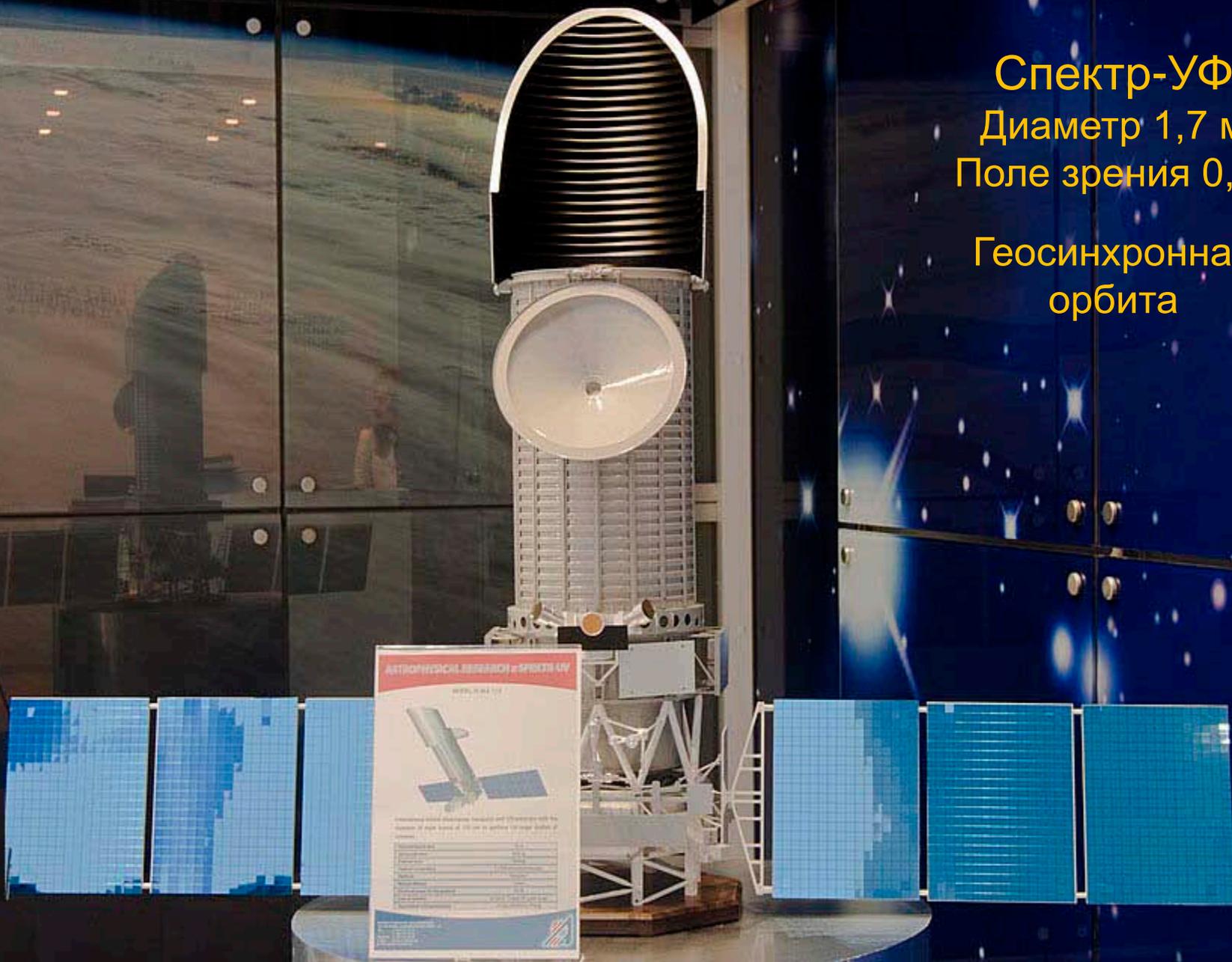
Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (ESA)

Главное зеркало 1,1 x 0,7 м

The mission is aimed at observing at least 1000 known exoplanets using the transit method, studying and characterising the planets' chemical composition and thermal structures.

Спектр-УФ  
Диаметр 1,7 м  
Поле зрения 0,5°

Геосинхронная  
орбита



## **Extra-Atmospheric Astronomy and the New James Webb Space Telescope**

**V. G. Surdin\***

*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia*

*\*e-mail: vsurdin@gmail.com*

Received May 10, 2024; revised May 21, 2024; accepted May 30, 2024

**Abstract**—The optical properties of the atmosphere limit the capabilities of ground-based astronomy. Taking telescopes beyond the atmosphere has allowed not only to significantly expand the spectral range of observations, but also to achieve great success in measurements in the visible range. In part, this has stimulated the creation of adaptive optical systems for ground-based telescopes. Of particular interest in the study of planets and exoplanets are observations in the IR and submm ranges. The capabilities of ground-based observations in these ranges are expanding, but will always remain limited. Extra-atmospheric astronomy has absolute priority in this. The article provides an overview of extra-atmospheric observatories in the UV, visible and IR ranges. Particular attention is paid to the new James Webb Space Telescope (JWST).

**Keywords:** extra-atmospheric astronomy, UV astronomy, IR astronomy, James Webb Space Telescope

**DOI:** 10.1134/S0038094624601038

### INTRODUCTION

We live at the bottom of an air ocean that distorts the rays coming from space and absorbs them partially

exceeding 100–150 km, solar UV radiation heats the Earth's upper atmosphere to a temperature of about 1000 K (Shustov, 2019).



*В* начале XXI века астрономия остается в авангарде естествознания. Вместе с физиками астрономы работают над фундаментальными проблемами, способными изменить наше представление о природе. До сих пор не раскрыты тайны «темного вещества», составляющего основную массу галактик, и «темной энергии», ускоряющей расширение Вселенной. Не выяснены механизмы взрывов звезд и активности ядер галактик. Нет общепринятых теорий происхождения планет, галактик и самой Вселенной. Но работа во всех этих направлениях идет в нарастающем темпе, и каждый день приносит удивительные открытия.

Под ред. В. Г. Сурдина  
4-е изд. 2019 г.

ISBN 978-5-9221-1495-0



НЕБО И ТЕЛЕСКОП



АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

# НЕБО И ТЕЛЕСКОП



# МНОГОКАНАЛЬНАЯ АСТРОНОМИЯ

- Электромагнитные волны
- Нейтрино
- Космические лучи
- Гравитационные волны
- Астрономическая картина мира



Под ред. академика  
Черепашука А. М.  
2022 г.