

# Лекция № 5. Астрономические инструменты.

## План

1. Оптические телескопы:
  - функции объектива телескопа;
  - разрешающая способность идеального объектива;
  - относительное отверстие и проникающая сила телескопа;
  - рефракторы;
  - рефлекторы;
  - aberrации осевых пучков;
  - aberrации наклонных пучков.
2. Радиотелескопы.
3. Космические обсерватории и аппараты.
4. Спектральные аппараты – назначение, основные элементы.
5. Приемники излучения.

Стоунхендж (построен в конце III начале II тысячелетия до н. э.)



# Оптические телескопы

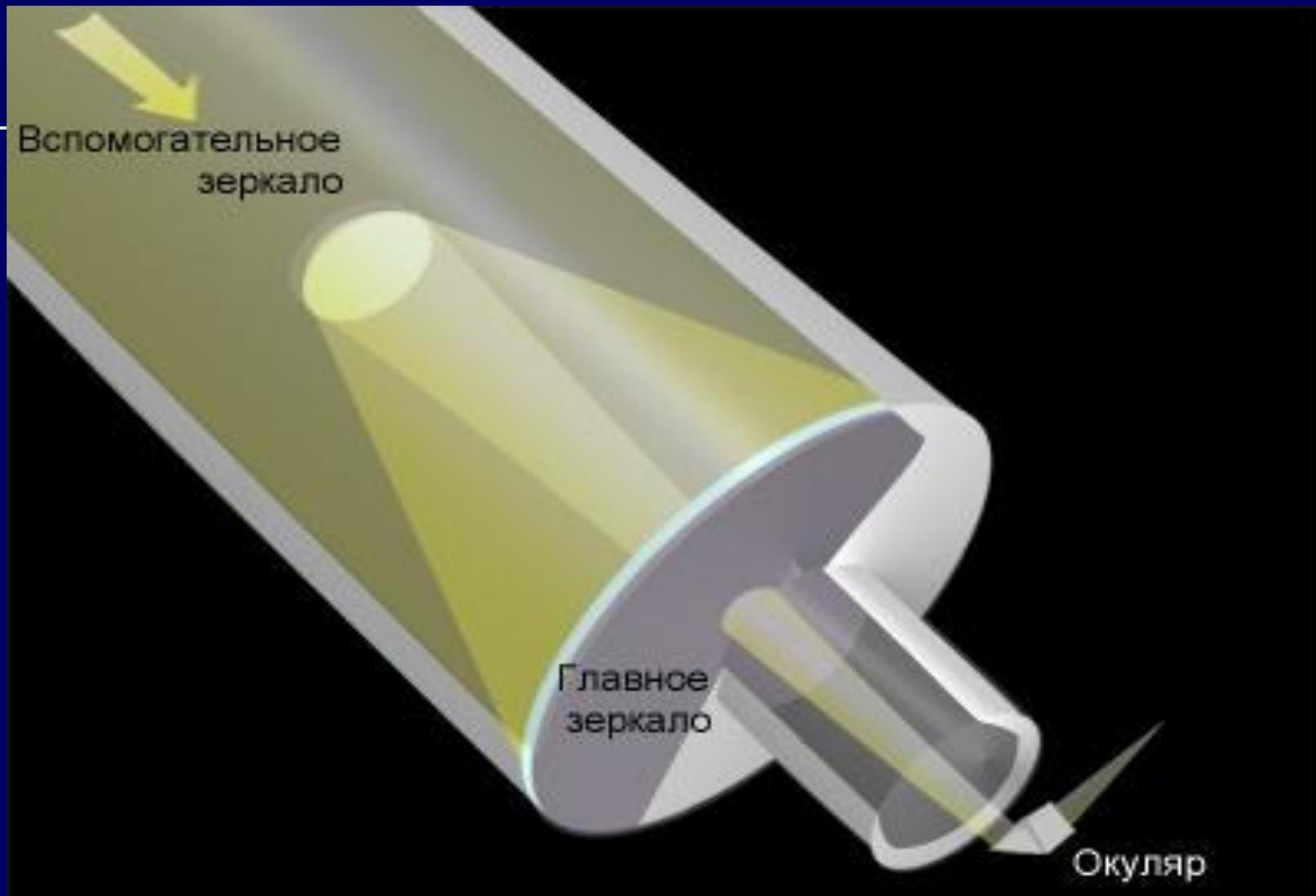
Сложные оптические инструменты, предназначенные для наблюдения космических объектов в оптической области спектра. Самым важным элементом О.Т. является его объектив. Существуют зеркальные и линзовые объективы (рефлекторы (рефлекторы и рефракторы (рефлекторы и рефракторы)). Крупнейшие О.Т. имеют диаметр объектива 6-10 м. Самый крупный О.Т. в России (Большой Телескоп Азимутальный (рефлекторы и рефракторы)). Крупнейшие О.Т. имеют диаметр объектива 6-10 м. Самый крупный О.Т. в России (Большой Телескоп Азимутальный с диаметром зеркала 6 м) находится на северном предгорье кавказского хребта (Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН (рефлекторы и рефракторы)). Крупнейшие О.Т. имеют диаметр объектива 6-10 м. Самый крупный О.Т. в России (Большой Телескоп Азимутальный с диаметром зеркала 6 м) находится на северном предгорье кавказского хребта (Специальная Астрофизическая

# Рефлектор

(от лат. reflect - отражать)

Телескоп, объективом которого служит вогнутое зеркало  
Форма зеркала может быть сферическая, параболическая или гиперболическая в зависимости от конструкции телескопа. Кроме главного зеркала для создания изображения часто используется небольшое "вторичное" зеркало (выпуклое или вогнутое), размещенное вблизи фокуса главного зеркала, а также плоские зеркала, выводящие фокальную плоскость за пределы трубы телескопа.

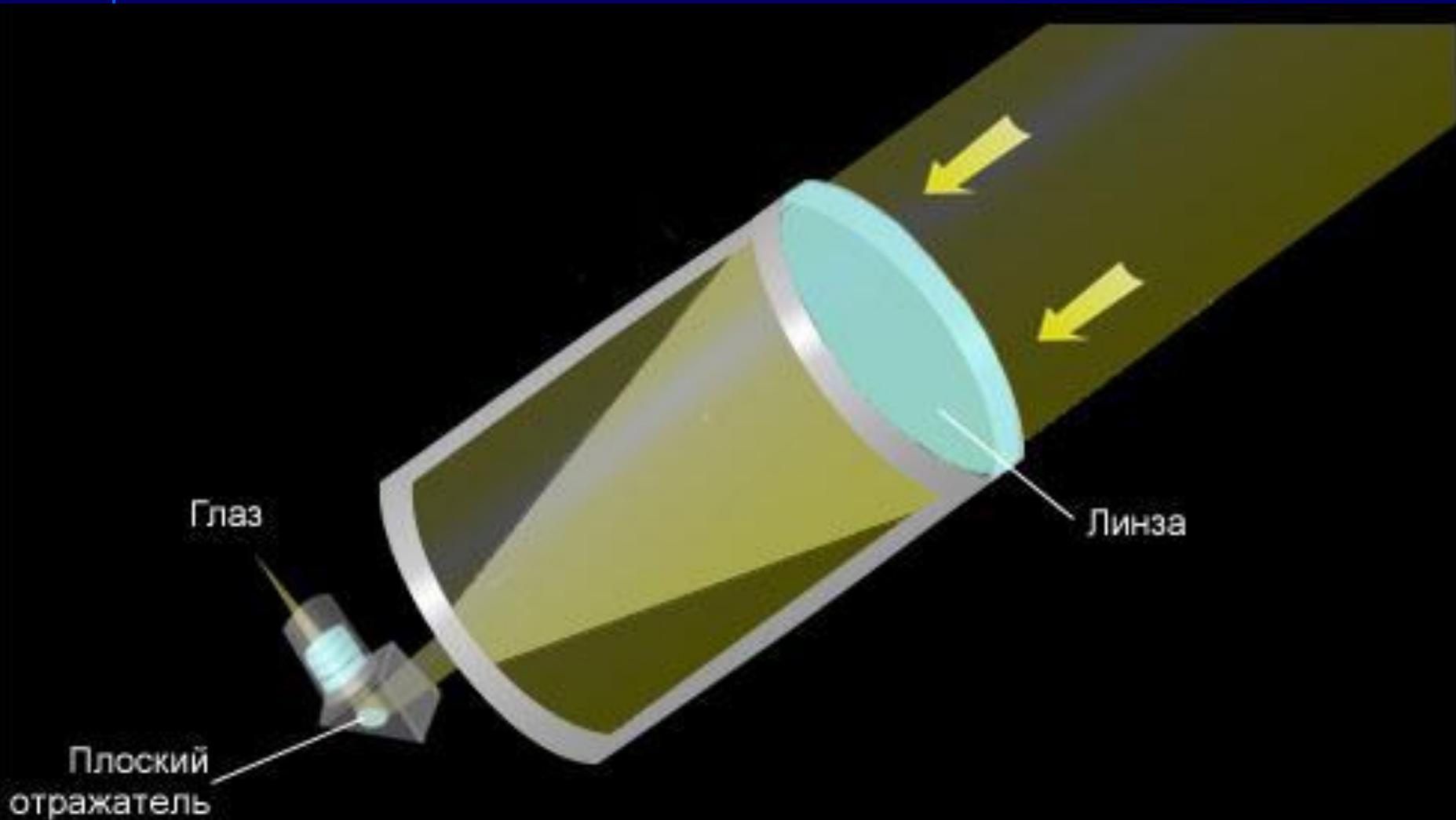
# Устройство телескопа-рефлектора



# Рефрактор

Телескоп Телескоп, в котором в качестве объектива Телескоп, в котором в качестве объектива применяется линза Телескоп, в котором в качестве объектива применяется линза. Обычно объектив из одной линзы используют лишь в простых любительских телескопах или в специальных приборах, где требуется минимальное рассеяние света (например, солнечный внеатмосферный коронограф). В большинстве телескопов-рефракторов используют сложные **ахроматические объективы**, содержащие несколько линз из разных сортов стекла; такая комбинация линз позволяет существенно снизить хроматическую aberrацию объектива.

# Устройство телескопа-рефрактора



# Идеальный телескоп

Форма изображения точечного источника (звезды) в идеальном телескопе без атмосферы определяется только дифракцией и описывается *функцией Эйри*:

$$P_0(\vec{\alpha}) = \frac{\pi D^2}{4\lambda^2} \left[ \frac{2J_1(\pi D|\vec{\alpha}|/\lambda)}{\pi D|\vec{\alpha}|/\lambda} \right]^2,$$

где:

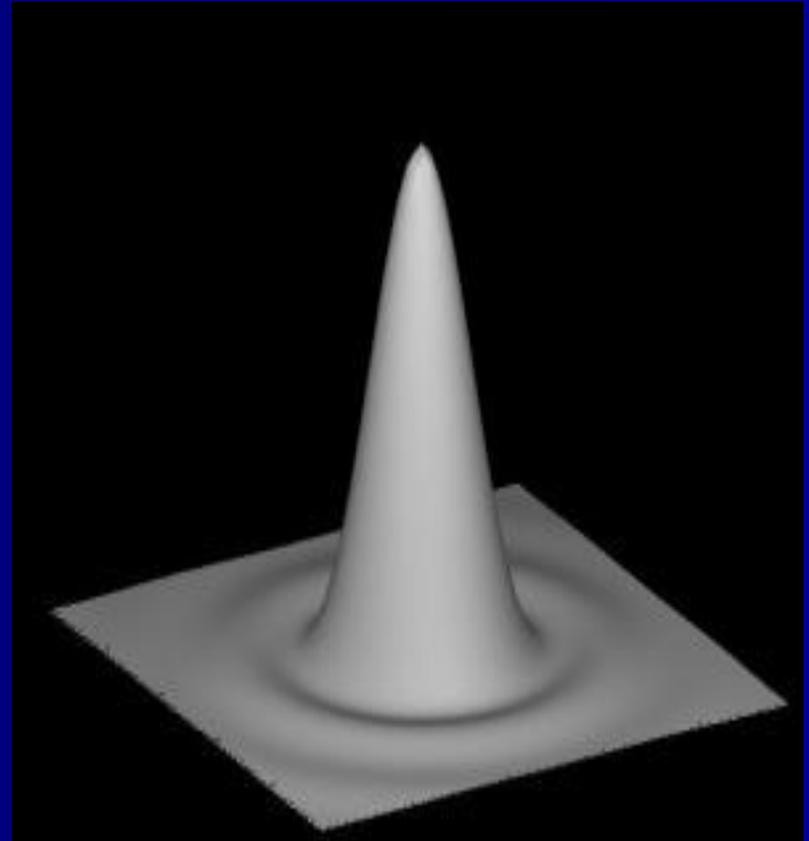
$P(\vec{\alpha})$  - интенсивность света в фокальной плоскости как функция угловой координаты ;

$\lambda$ - длина волны света;

$D$  - диаметр апертуры телескопа;

$J_1$  - так называемая функция Бесселя.

Первое темное кольцо находится на угловом расстоянии  $1.22\lambda/D$  от центра. Часто это расстояние считается мерой разрешения идеального телескопа.



# Разрешающая способность телескопа

- минимальное угловое расстояние между точечными объектами, напр., звездами, которые можно различить в телескоп отдельно. Р.с. телескопа теоретически ограничена тем, что вследствие дифракции света на краю объектива изображение даже точечного источника представляет собой кружок конечного размера. Изображения двух светящихся точек окажутся слившимися, если угловое расстояние между источниками не превышает радиуса первого темного дифракционного кольца в каждом из них:

$$\alpha = 1,22\lambda/D \quad (\text{рад}),$$

где  $\lambda$  - длина волны излучения,  $D$  - диаметр объектива. Величина определяет Р.с. идеального телескопа при идеальных условиях наблюдения. Различные несовершенства оптич. системы телескопа ухудшают его Р.с. Однако в большинстве случаев практический предел Р.с. телескопа обусловлен наличием воздушных потоков в атмосфере (турбулентностью воздуха). Турбулентность размывает изображение звезды, увеличивает его размеры и тем самым ухудшает Р.с. телескопа. При наблюдении слабых звезд повышение Р.с. играет столь же важную роль, как и увеличение диаметра объектива телескопа. Фактически Р.с. крупных телескопов составляет при хорошем качестве изображения от нескольких угловых секунд до нескольких десятых долей секунды.

# Относительное отверстие

Относительным отверстием телескопа  $A$  называется величина отношения диаметра  $D$  к фокусному расстоянию  $F$ :  $A=D/F$ . У телескопов для визуальных наблюдений типичная величина  $1/10$  и меньше. У современных телескопов  $1/4$  и больше.

# Проницающая сила телескопа

- предельная звездная величина ( $m_{\text{пред}}$ ) точечных объектов (звезд), доступных наблюдениям (измерениям) с применением данного телескопа и данного метода наблюдений.

П.с. невооруженного глаза (при условии отличного зрения) составляет

$$m_{\text{пред}} \approx 6,5^m$$

Если считать, что потери света в оптич. системе телескопа равны 40%, то П.с. телескопа при визуальных наблюдениях составит

$$m_{\text{пред}} \approx 7,1^m + 5 \lg D$$

где  $D$  - диаметр объектива телескопа в см. В том случае, когда П.с. обусловлена фоном неба, П.с. зависит от применяемого увеличения  $H$  (ф-ла Боуэна):

$$m_{\text{пред}} \approx 5,5^m + 2,5 \lg D + 2,5 \lg H$$

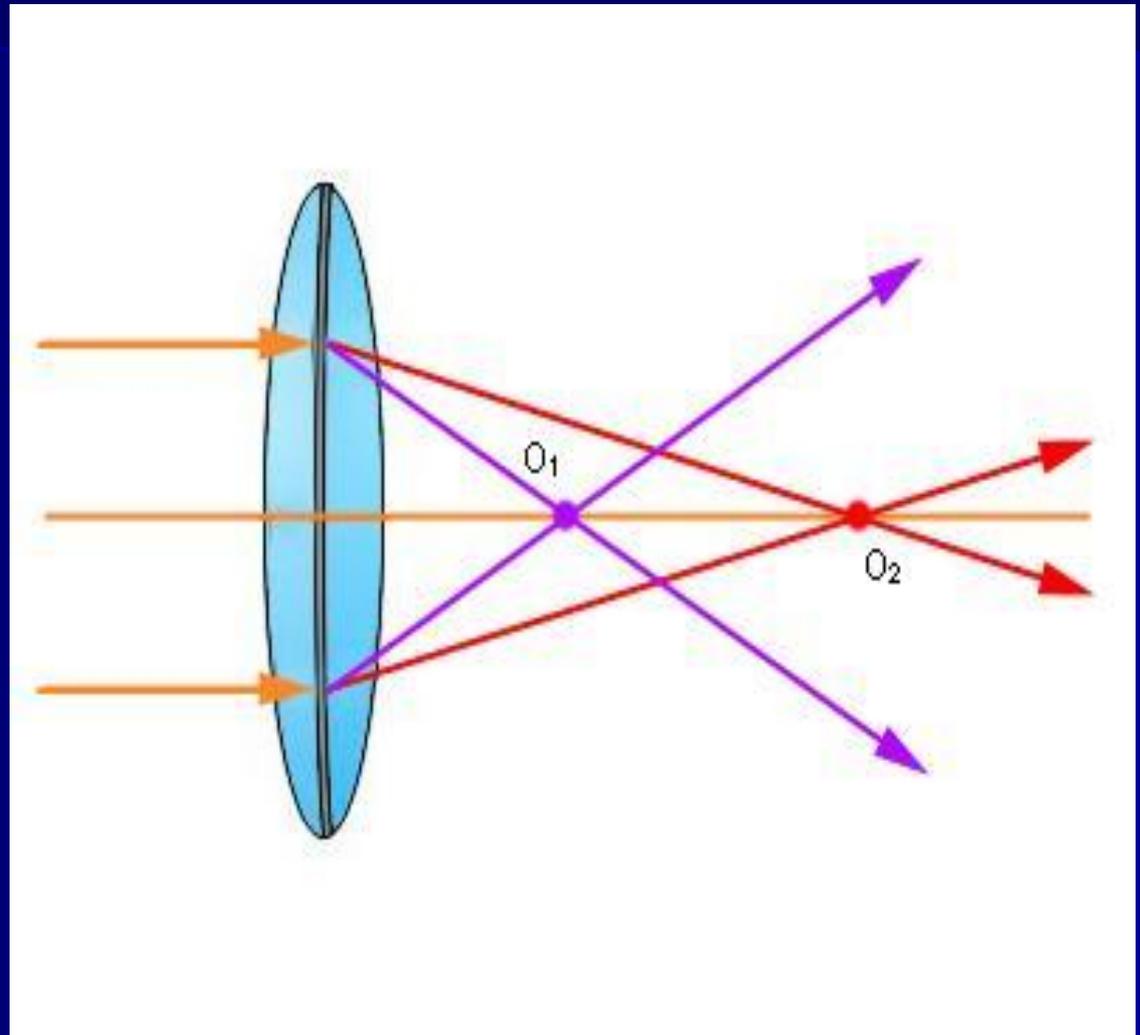
(с ростом увеличения быстро уменьшается видимая поверхностная яркость ночного неба, это облегчает видимость слабых звезд).

В общем случае П.с. зависит: от диаметра объектива телескопа; углового размера изображения звезд; фона неба; квантового выхода приемника излучения; времени накопления сигнала и др. факторов.

При фотографических наблюдениях существует предельно возможное время экспозиции  $t$ , зависящее от яркости ночного неба и светосилы телескопа. П.с., соответствующая этим предельным экспозициям, оказывается зависящей не от диаметра, а от фокального расстояния телескопа. Реально достигаемая П.с. при наблюдениях с большими телескопами составляет 27-29<sup>m</sup>.

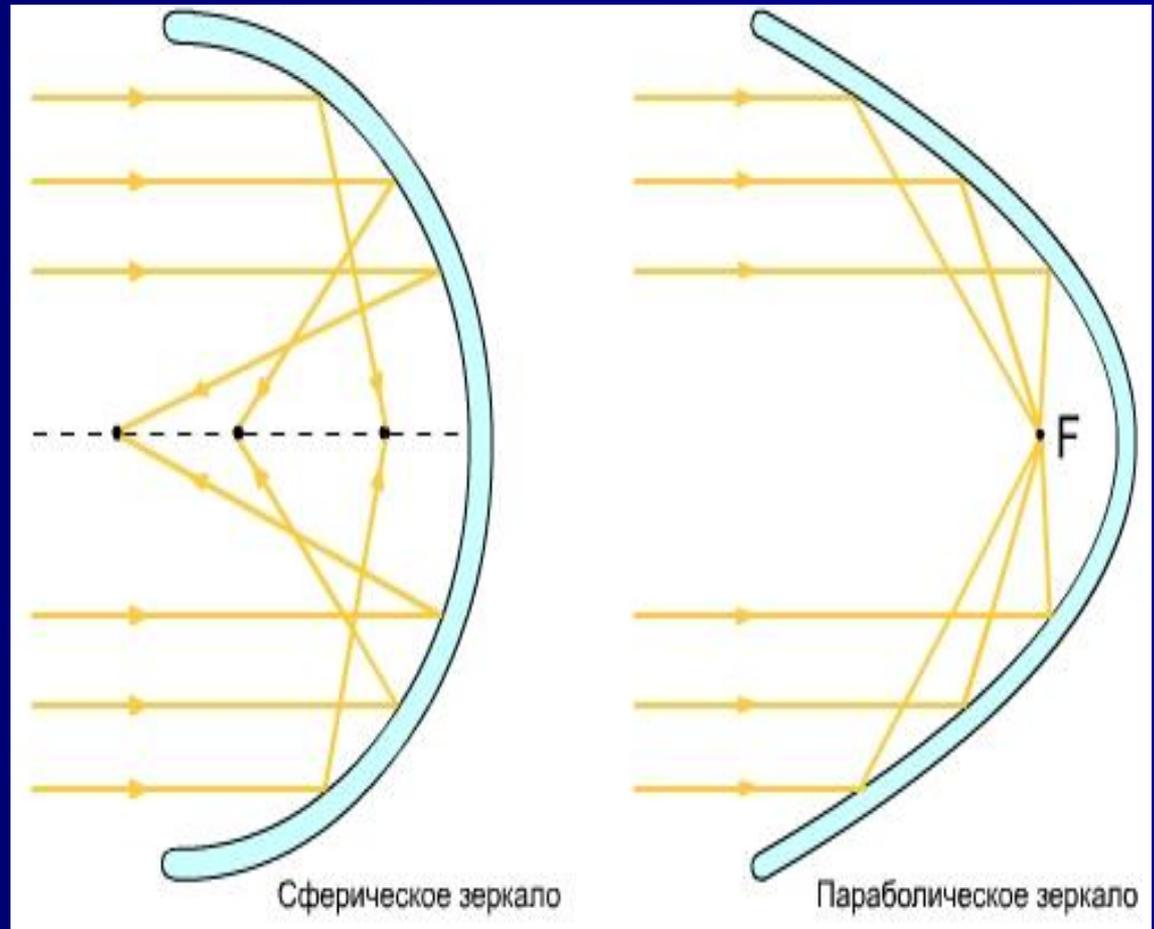
# Хроматическая aberrация создает радужный ореол вокруг звезды

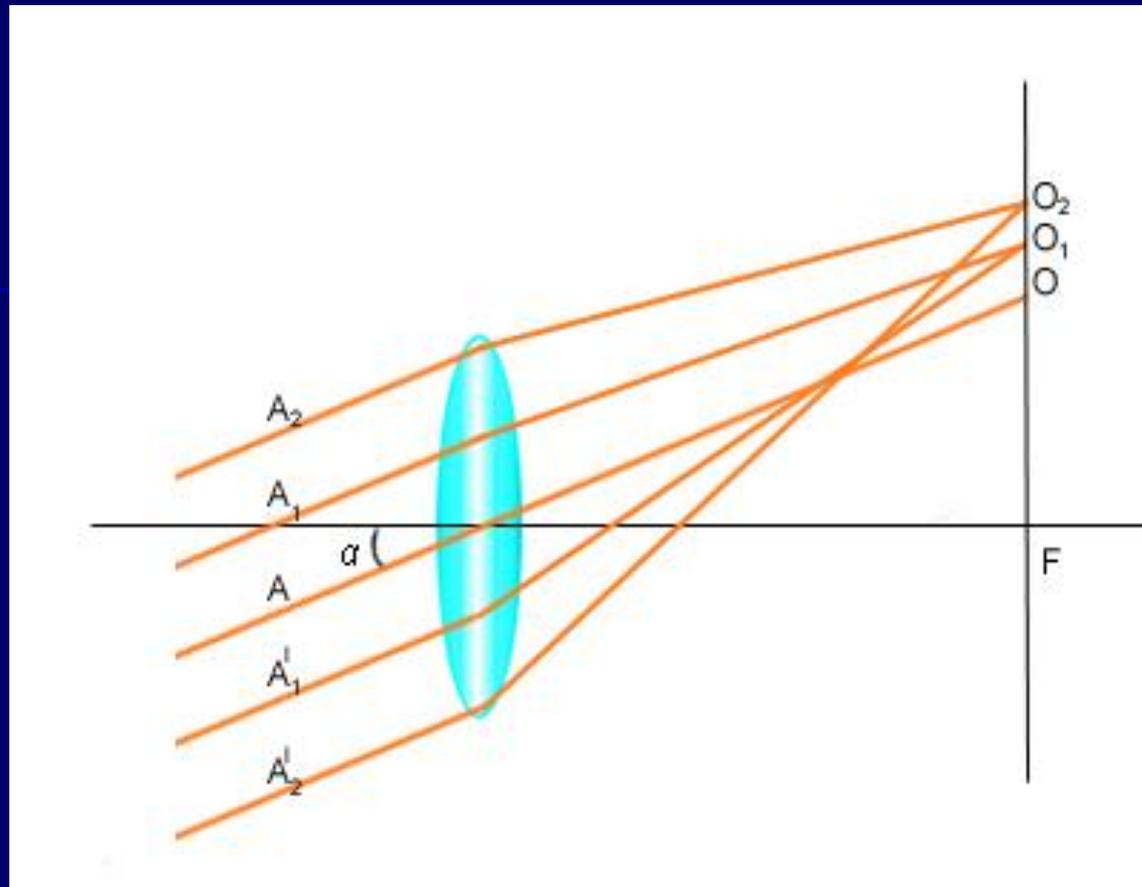
*Хроматическая aberrация* характерна для всех преломляющих оптических приборов. Возникает из-за того, что коэффициент преломления среды зависит от длины волны света. Синие лучи отклоняются линзой сильнее красных, и поэтому положения фокусов для лучей разных длин волн не совпадают. В результате изображение звезды выглядит как набор радужных колец.



# Сферическая aberrация исправляется приданием зеркалу параболической формы

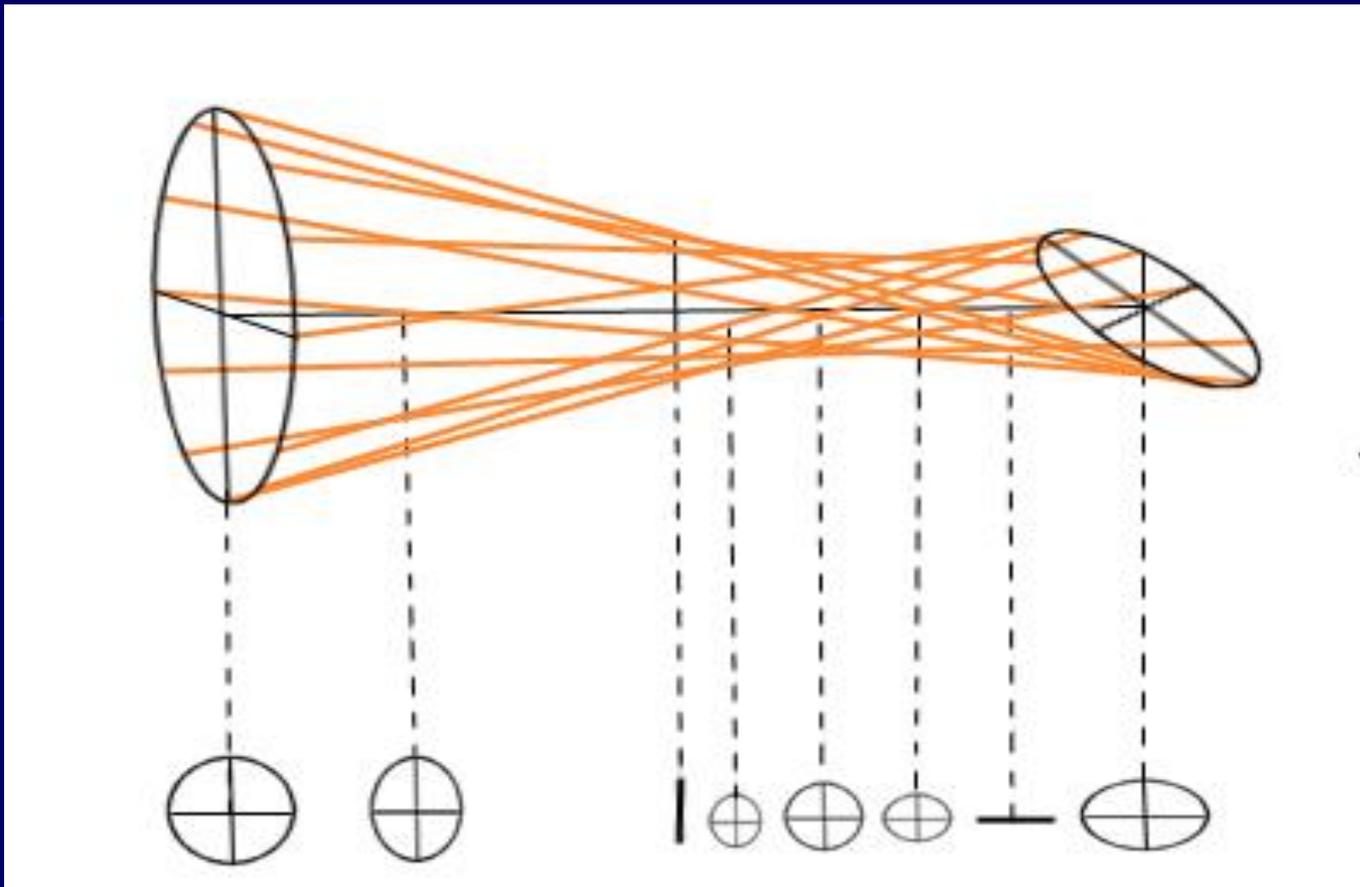
**Сферическая aberrация** возникает из-за того, что лучи света, параллельные главной оптической оси объектива, падая на сферическую поверхность линзы или зеркала, после преломления или отражения пересекаются не в одной точке. Край объектива строят изображение ближе к объективу, а центральная часть – дальше. В результате изображение имеет в фокальной плоскости нерезкий вид.



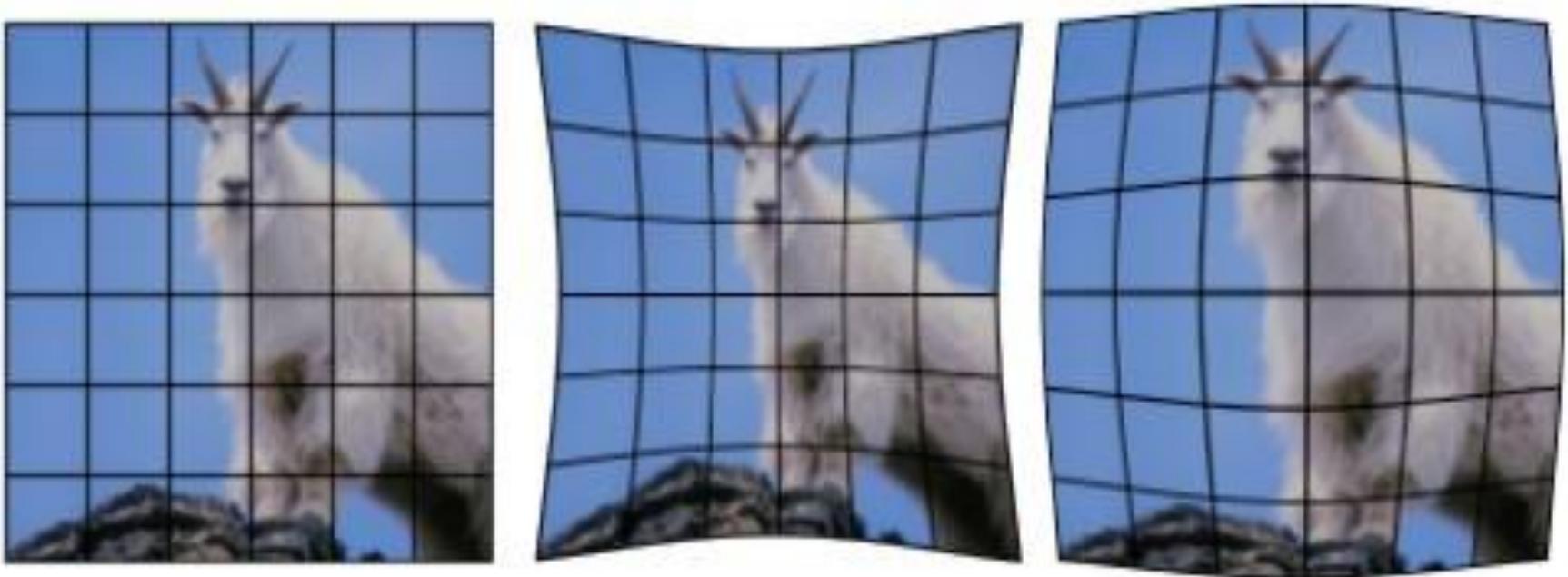


**Кома** – внеосевая aberrация, связанная с наклоном лучей света, идущих от источника, к оптической оси телескопа. При этом изображение звезды имеет вид капли или кометы с ярким ядром и большим хвостом – отсюда и пошло название aberrации. Линейные размеры пятна комы пропорциональны расстоянию звезды от оптической оси и квадрату относительного отверстия объектива.

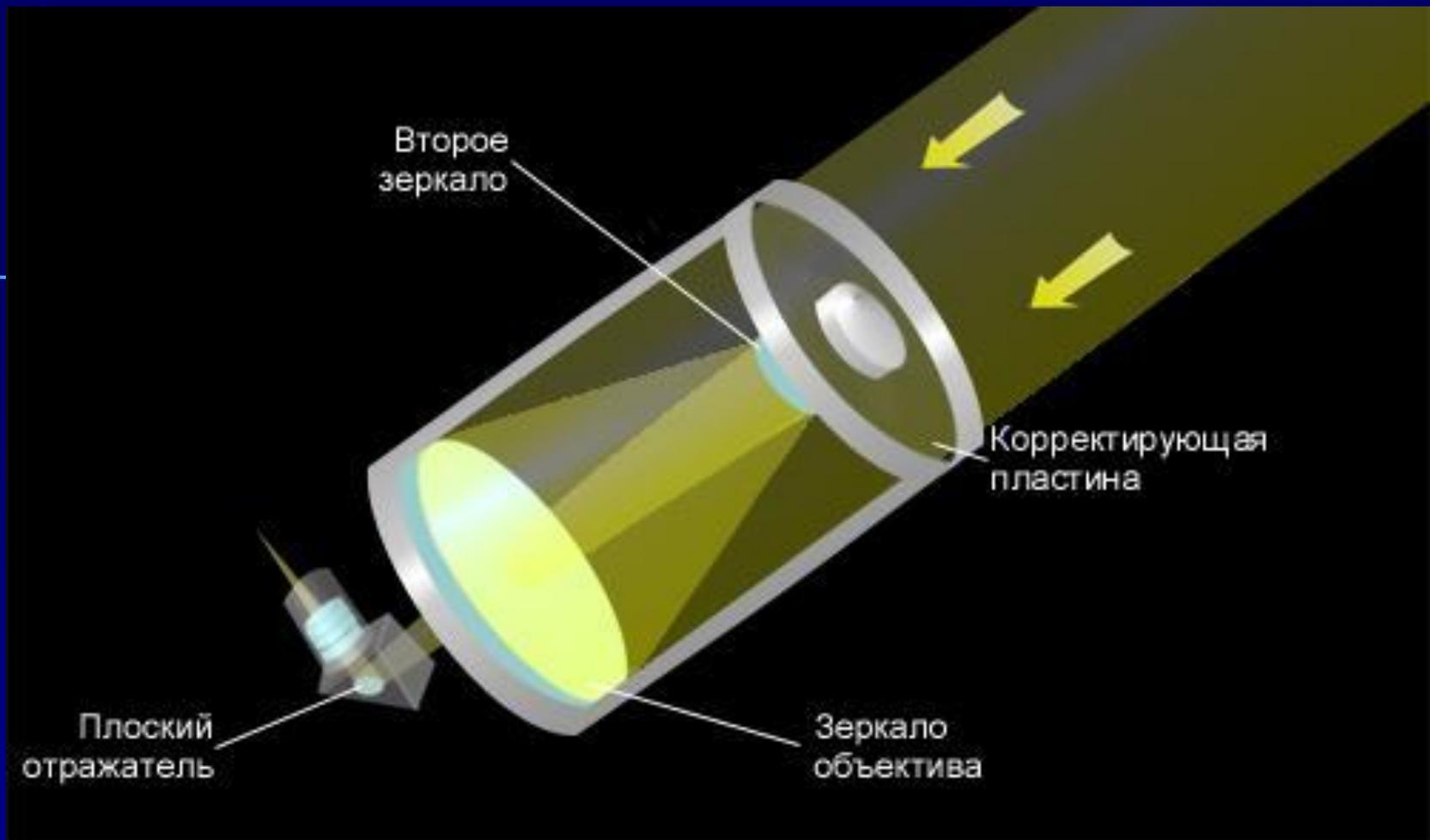
Система, свободная как от сферической aberrации, так и от комы, называется **апланатической**.



Астигматизм заключается в растягивании точечного изображения в черточку. Лучи света от объекта, идущие в разных плоскостях, не могут сфокусироваться на одной плоскости изображения. Размер астигматического изображения растет пропорционально квадрату углового расстояния звезды от центра оптической системы. Оптические системы, в которых исправлен астигматизм, называются *анастигматическими*.



**Дисторсия** связана с искажением масштабов изображения. Изображение звезды собирается в одну точку, но эта точка не совпадает с изображением звезды в идеальном телескопе. Из-за этого изображение квадрата будет иметь вид либо подушки, либо бочки. Оптические системы, свободные от дисторсии, называются **ортоскопическими**



В 1929 году Бернгардт Шмидт решил проблему создания телескопа, свободного от комы и астигматизма и обладающего большим полем. В камере Шмидта используются вогнутое сферическое зеркало и коррекционная пластинка Шмидта, которая представляет собой почти плоское оптическое стекло, надлежащим образом заретушированное с одной стороны. Центральная часть пластинки действует как слабая положительная линза, внешняя часть пластинки – как слабая отрицательная линза. Такие оптические системы называются камерами Шмидта или системами Шмидта.

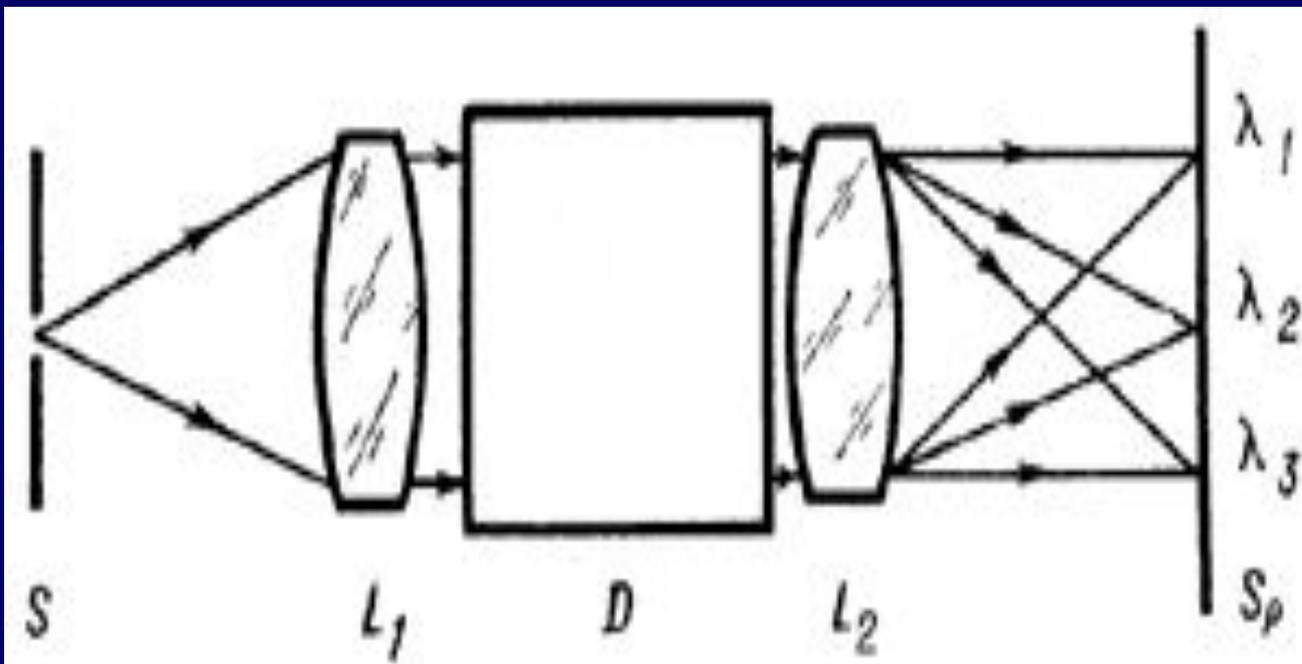
## Принципиальная схема телескопа им. Хаббла



# Спектральные приборы

- оптич. инструменты, предназначенные для изучения зависимости интенсивности  $I$  излучения лабораторных или небесных источников света от длины волны или частоты  $\nu$ . С.п. используются и при исследованиях в др. диапазонах электромагнитного излучения, напр. в радиодиапазоне, в рентгеновском и гамма-диапазонах, однако в этих диапазонах длин волн часто используются др. принципы построения аппаратуры, анализирующей зависимость  $I(\lambda)$  или  $I(\nu)$ .

Классические спектрографы содержат диспергирующие элементы, осуществляющие разделение падающего излучения по направлениям в зависимости от длины волны: дисперсионные элементы (призмы различных типов), дифракционные элементы (плоские или вогнутые дифракционные решетки, прозрачные или отражающие), интерференционные элементы (полупрозрачные отражающие пластины).



**Рис. 1. Схема классического спектрального прибора (спектрографа или спектрометра):**

$S$  - входная щель прибора;  $L_1$  и  $L_2$  - объективы коллиматора и камеры (линзовые, зеркальные или зеркально-линзовые);  
 $D$  - диспергирующее устройство (призма или дифракционная решетка);  
 $S_p$  - спектр, регистрация которого может производиться последовательно или параллельно;  $\lambda_i$  – положения резкого изображения входной щели для определенных длин волн.

# Приемники излучения

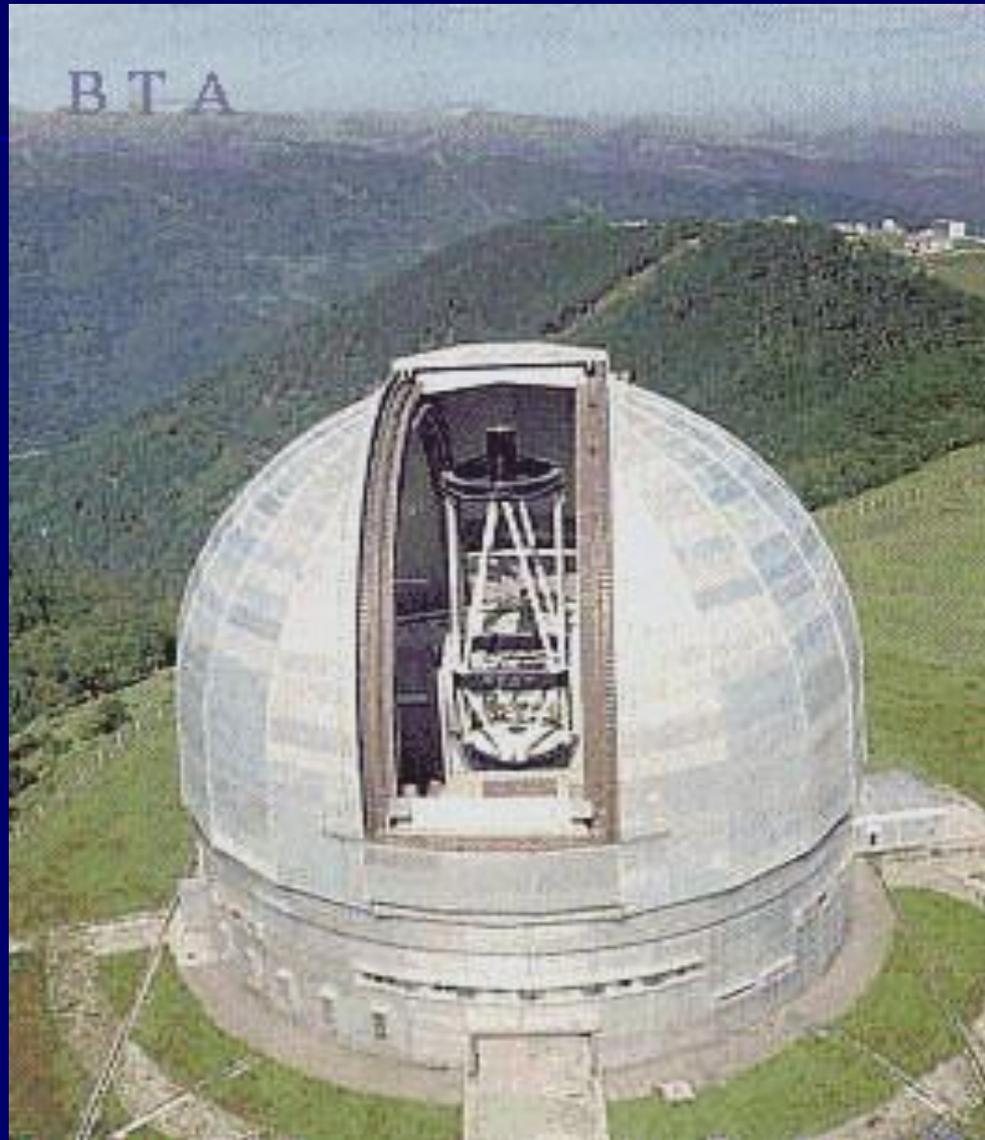
Телескоп собирает излучение на приемник. Им может быть глаз наблюдателя, фотографическая пластинка, фотоумножитель, болометр, телевизионная камера и т. д. Отметим некоторые важные параметры, которыми характеризуются приемники излучения:

1. *Спектральная характеристика* — зависимость чувствительности от длины волны.
2. *Чувствительность* — отношение сигнала на выходе приемника к измеряемому потоку или освещенности.
3. *Порог чувствительности* — минимальное значение потока или освещенности, которое может быть зарегистрировано.
4. *Шумы* — флуктуации на выходе приемника, ограничивающие точность измерений и порог чувствительности. Они могут быть связаны как со свойствами самого приемника, так и падающего на него излучения.
5. *Световая характеристика* — зависимость сигнала на выходе от потока (освещенности). Она может быть линейной, логарифмической или подчиняться более сложному закону.
6. *Динамический диапазон* — отношение максимального значения потока (освещенности), которое может быть измерено, к минимальному.

## Классическая башня оптического телескопа



6-м телескоп БТА САО РАН (Северный Кавказ, 2100 м)



## About ESO

ESO is the intergovernmental European research organisation for Astronomy in the Southern Hemisphere. It is supported by Belgium, Denmark, Finland, France, Germany, Italy, the Netherlands, Portugal, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. More countries are expected to join during the next years.

- ESO operates the La Silla Paranal Observatory. At the Paranal site ESO operates the La Silla Paranal Observatory. At the Paranal site it runs the world's prime optical/infrared astronomical facility, the Very Large Telescope Array (VLT). Located 130 km south of Antofagasta, this 2,600 m high mountain is in the driest part of the Atacama desert. The VLT consists of four 8.2-meter and four 1.8-meter telescopes. Several of the telescopes can be used in combination as a unique, giant interferometer (Very Large Telescope Interferometer, VLT) ESO operates the La Silla Paranal Observatory. At the Paranal site it runs the world's prime optical/infrared astronomical facility, the Very Large Telescope Array (VLT). Located 130 km south of Antofagasta, this 2,600 m high mountain is in the driest part of the Atacama desert. The VLT consists of four 8.2-meter and four 1.8-meter telescopes. Several of the telescopes can be used in combination as a unique, giant interferometer (Very Large Telescope Interferometer, VLT). In addition, ESO operates the La Silla site, 600 km north of Santiago de Chile, at 2,400 m altitude where state-of-the-art medium-sized telescopes are in operation. More than 1500 proposals are made each year for the use of the ESO telescopes.
- The ESO Headquarters are located in Garching, near Munich, Germany. This is the scientific, technical and administrative centre of ESO where technical development programmes are carried out to provide the Observatory with the most advanced instruments. There are also extensive astronomical data facilities. The ESO Headquarters also houses the joint ESO/ESA European Coordination Facility for the Hubble Space Telescope.
- ESO is currently engaged in a major new project for the construction of an array of 12-m telescopes for observation in the mm/sub-mm wavelength domain. Known as the Atacama Large Millimeter Array (ALMA), this is a joint European/North American project. Japan is expected to join this project. Furthermore, studies for an extremely large optical telescope are being undertaken by ESO.

Обсерватория Сьерро-Параналь (ESO), высота 2635 м



Обсерватория Сьерро-Параналь (ESO), высота 2635 м



Обсерватория Сьерро-Параналь (ESO), высота 2635 м



Обсерватория Сьерро-Параналь (ESO), высота 2635 м



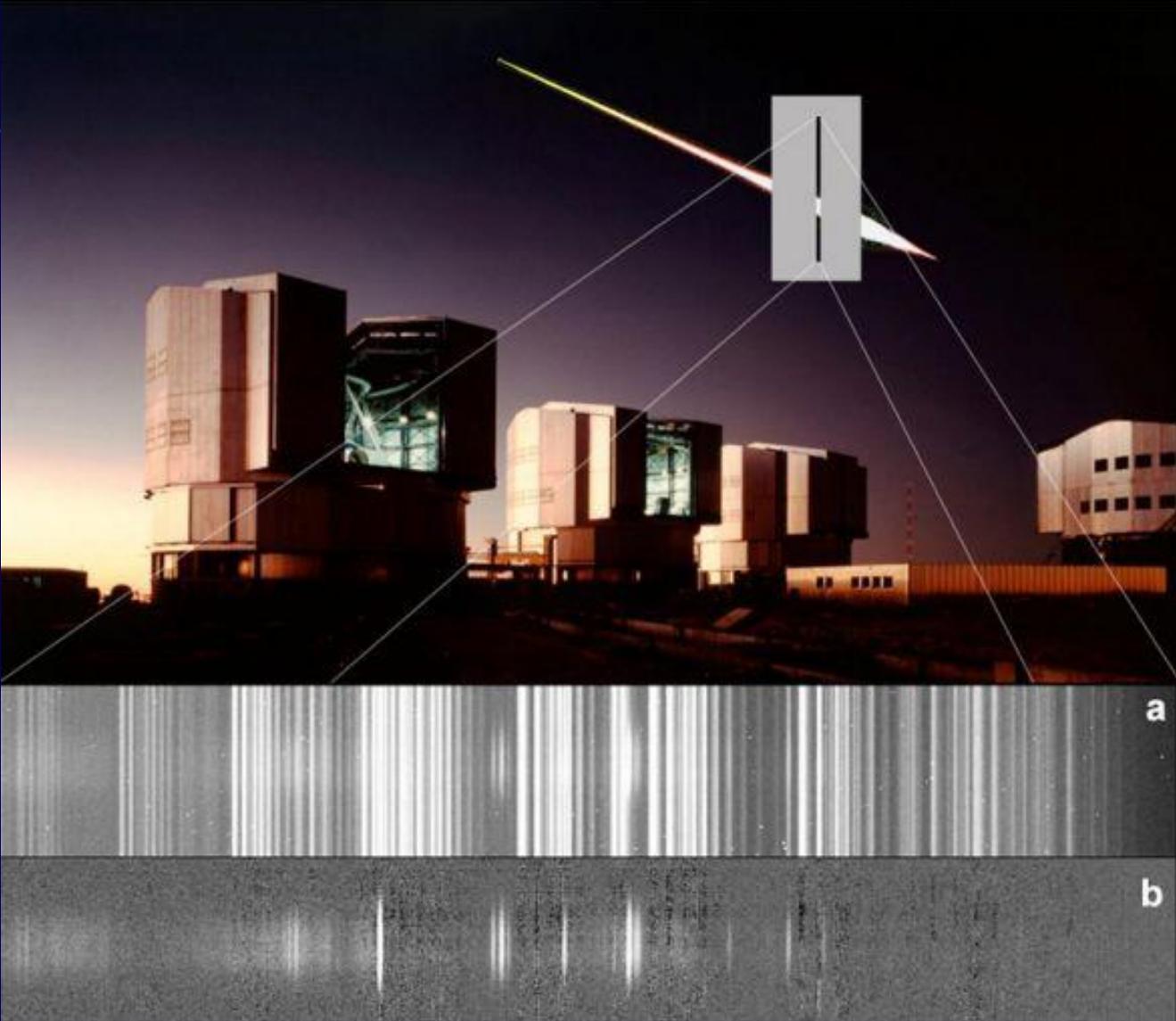
## VLT (обсерватория Сьерро-Параналь, Чили)



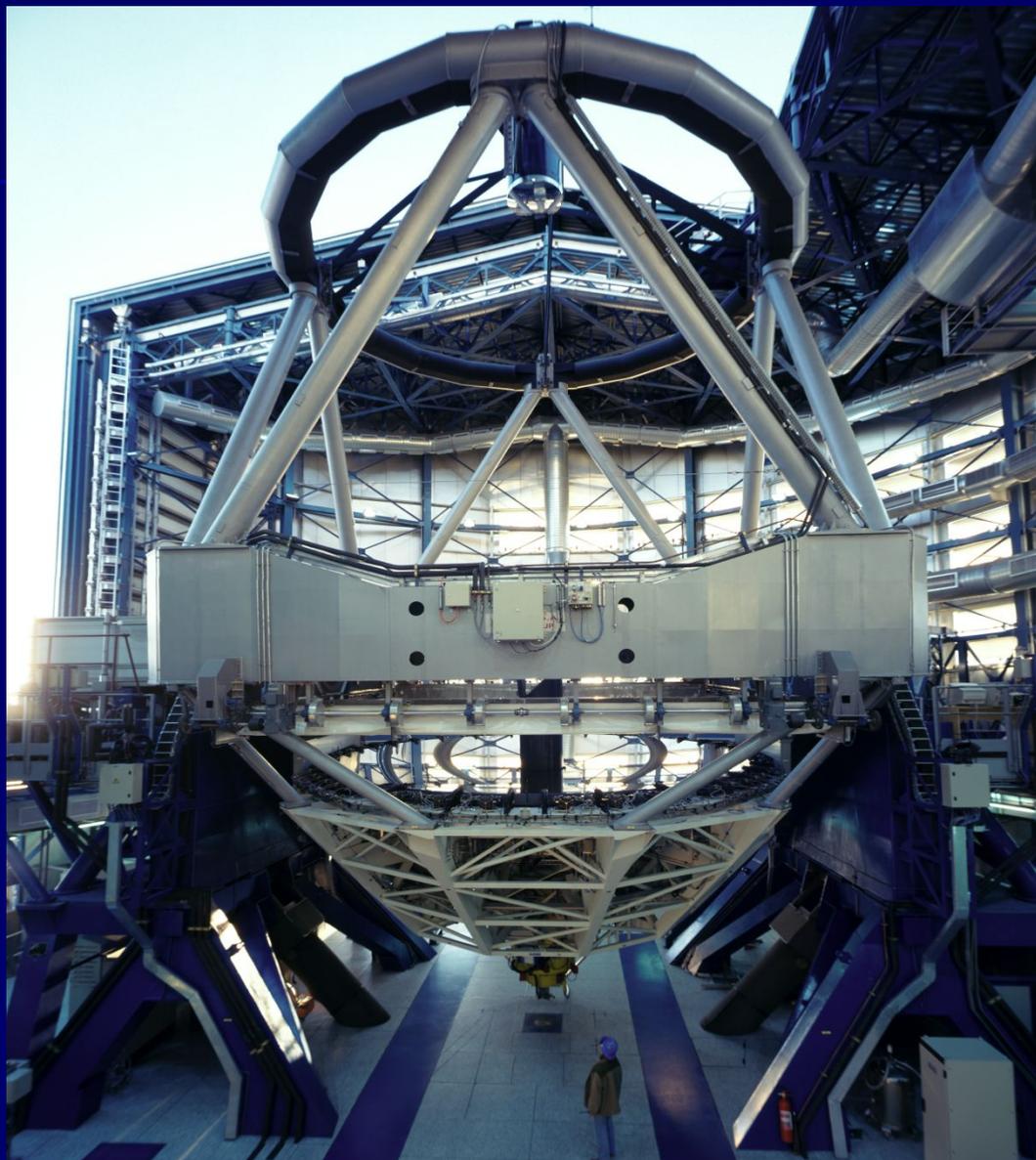
# VLT (ESO, Чили)



VLT

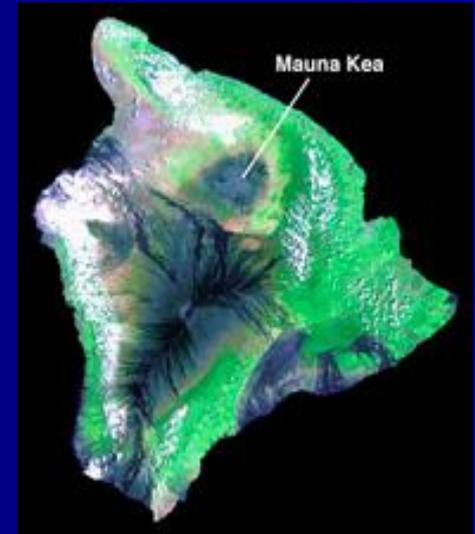


## 8-м телескоп Кьюеен (VLT)



## ABOUT THE W.M. KECK OBSERVATORY

- *Radar image of the "Big Island" of Hawaii.* From a remote outpost on the summit of Hawaii's dormant Mauna Kea volcano, astronomers at the W.M. Keck Observatory probe the deepest regions of the universe with unprecedented power and precision. Their instruments are the twin Keck Telescopes, the world's largest optical and infrared telescopes. Each stands eight stories tall and weighs 300 tons, yet operates with nanometer precision. At the heart of each Keck Telescope is a revolutionary primary mirror. Ten meters in diameter, the mirror is composed of 36 hexagonal segments that work in concert as a single piece of reflective glass.
- Made possible through grants totaling nearly \$200 million from the W.M. Keck Foundation and NASA, the observatory is operated by CARA for the California Institute of Technology, and the University of California, with the National Aeronautics and Space Administration (NASA), which joined the partnership in October, 1996. The Keck I telescope began science observations in May, 1993; Keck II began operation in October, 1996.



# Вид на Мауна-Кеа



## Обсерватория на горе Мауна Кея (Гавайи)

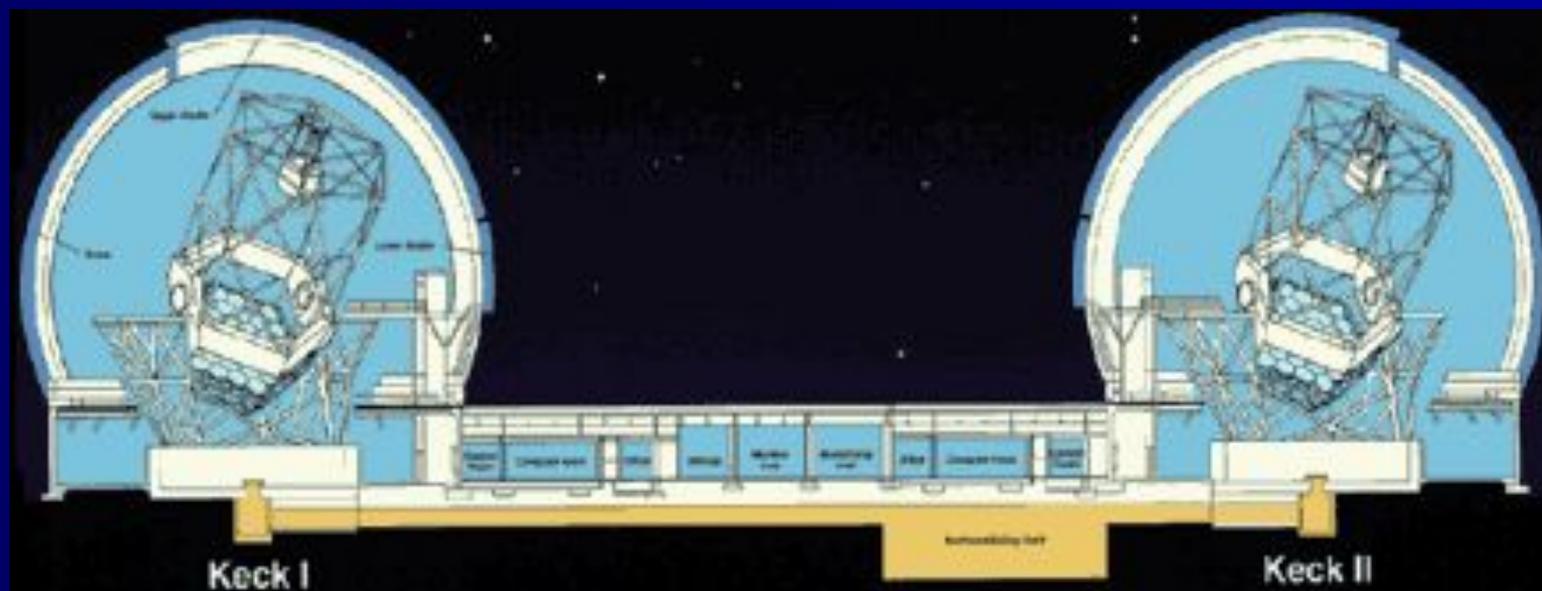


Обсерватория У.М. Кека Обсерватория У.М. Кека  
(Калифорнийский технологический институт Обсерватория У.  
М. Кека (Калифорнийский технологический институт ,  
Калифорнийский университет)



Photo Credit P. J. Stomski, 1996

## Схема 10-м телескопов им. У.М. Кека



## 10-м телескопы им. У.М. Кека



## 10-м телескопы им. У.М. Кека



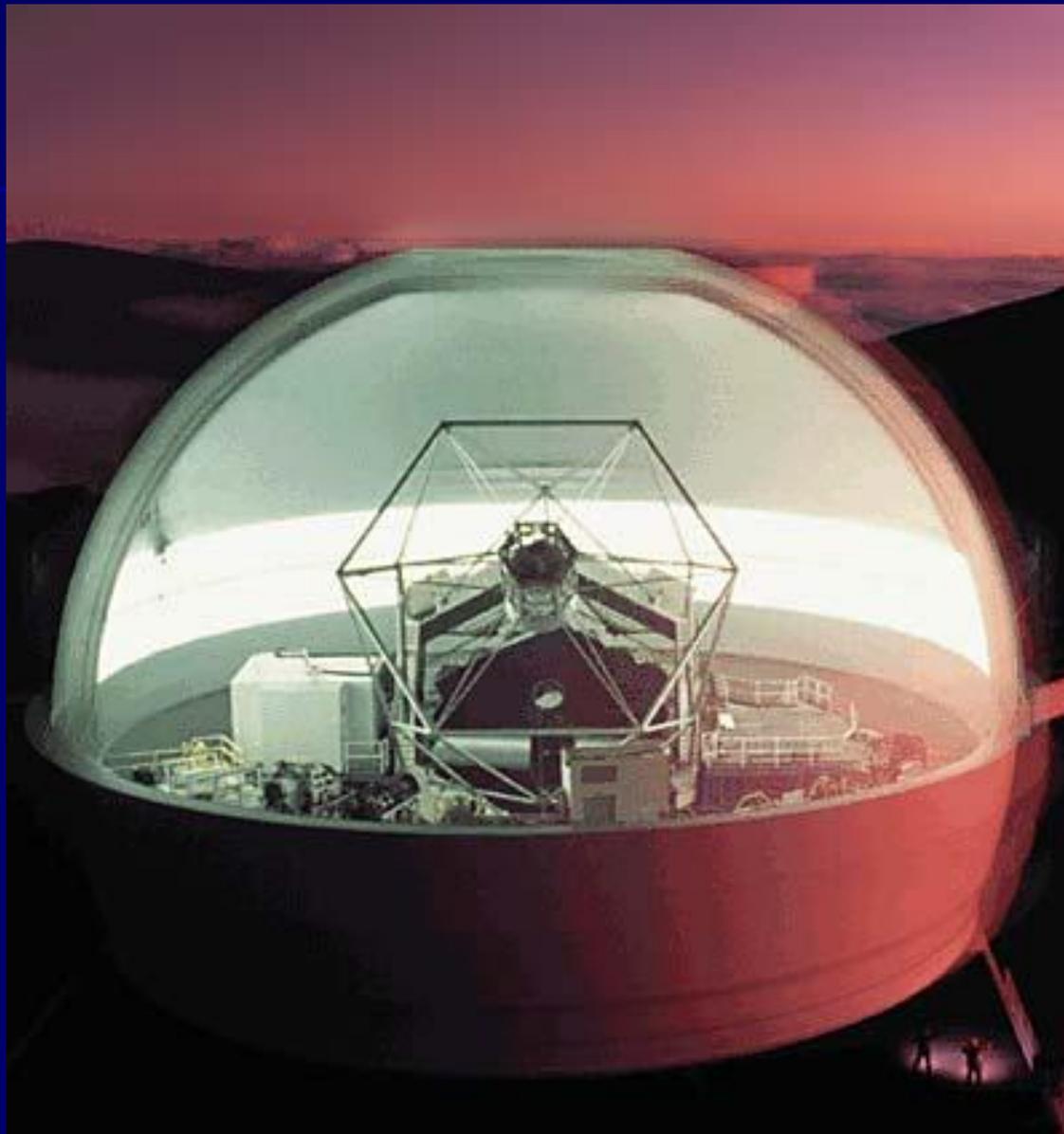
## Keck и 8-м телескоп Subaru



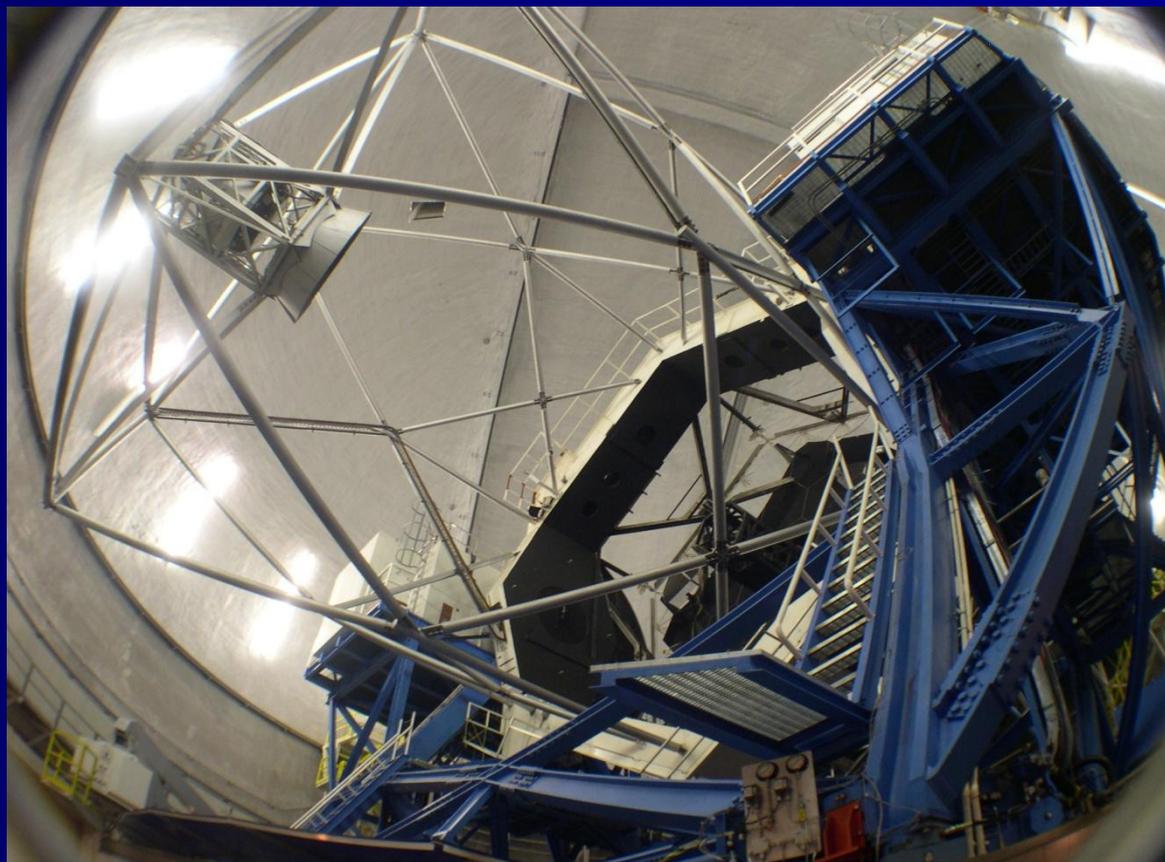
**8-м телескоп Subaru (слева) и 10-м телескоп им. У.М. Кека**



## 10-м телескоп им. У.М. Кека



## 10-м телескоп

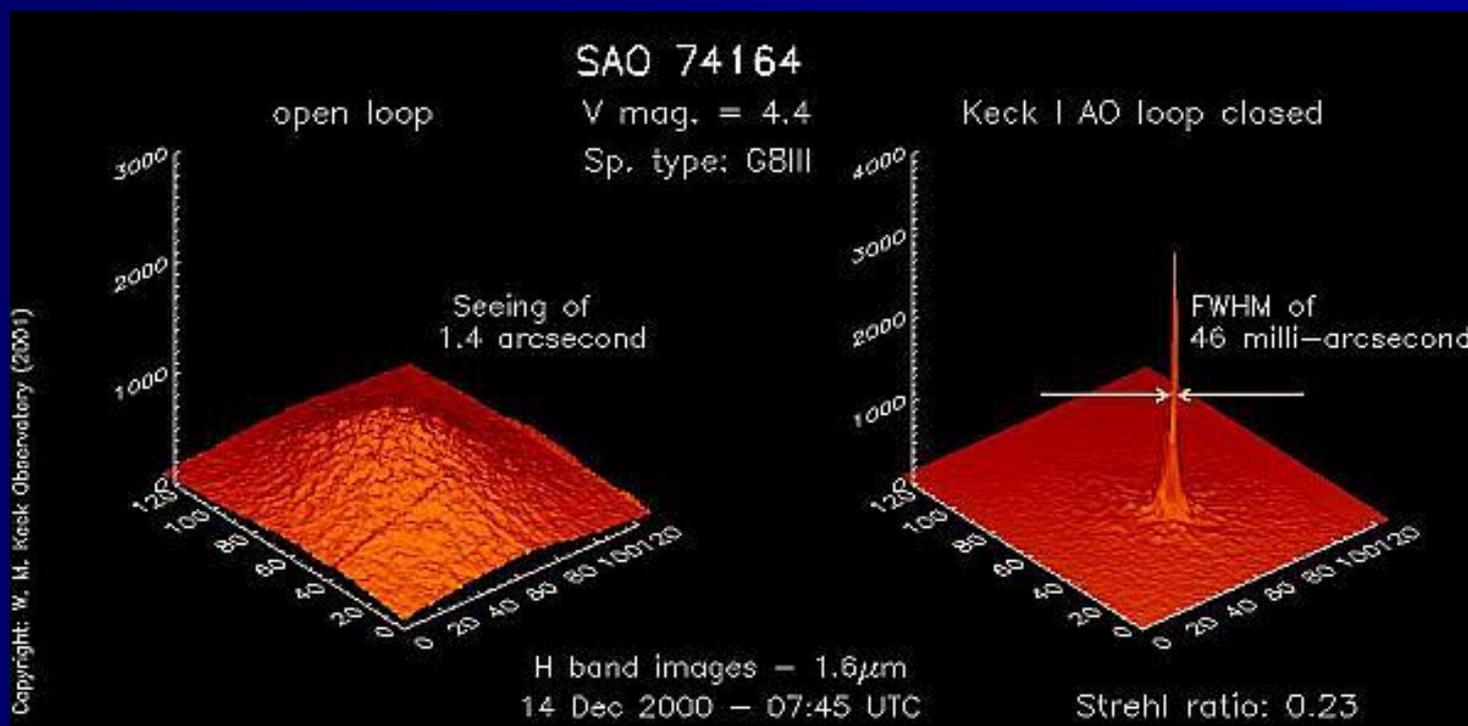


## 10-м зеркало



# Изображения звезд, полученные на 10-м телескопе Кека с включенным и выключенным исправлением турбулентности.

турбулентности.



# 10-м телескоп имени Кека



## Франко-канадский 3.6-м телескоп



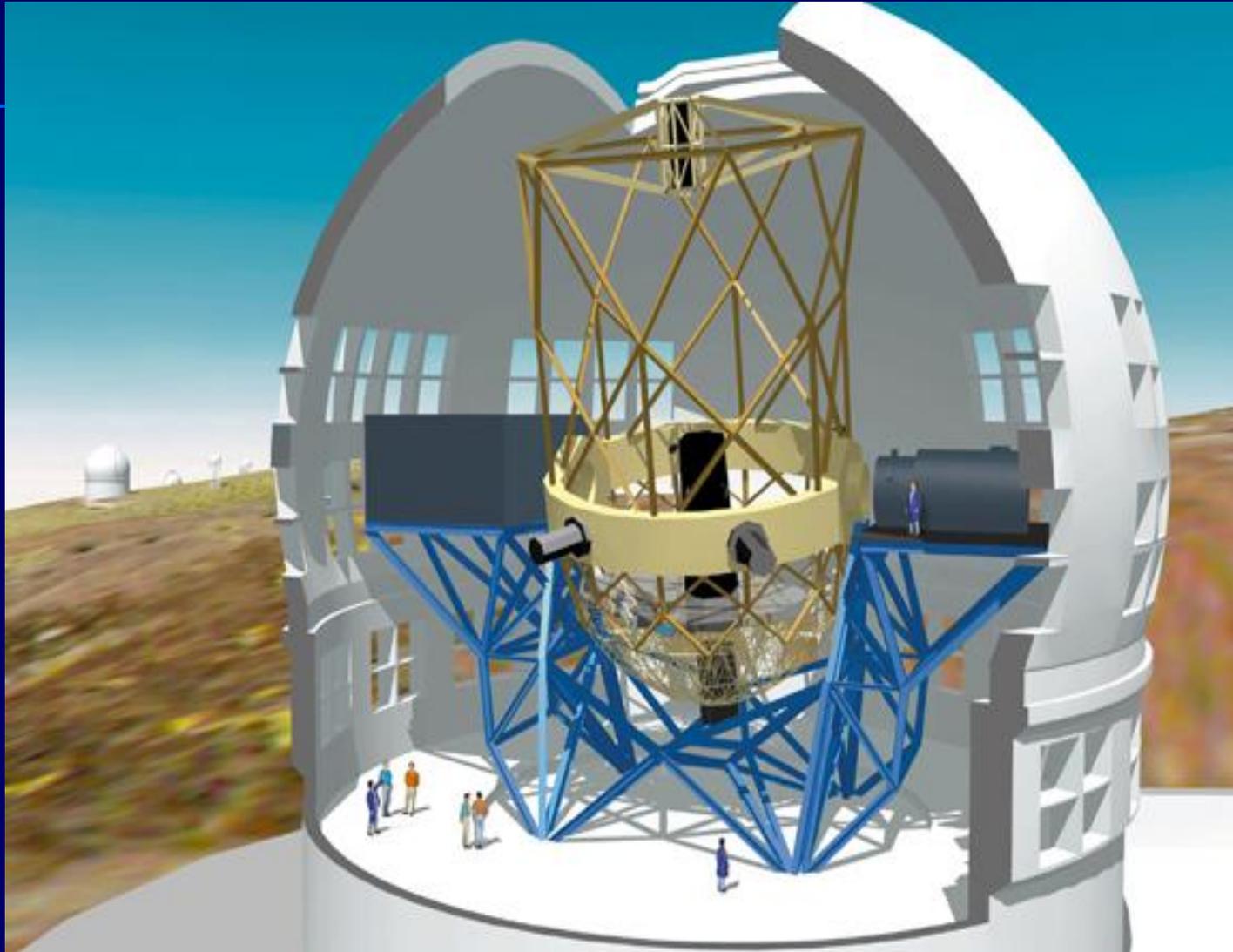
Обсерватория Мак-Дональд  
(на переднем плане 9.5-м Хобби-Эберли телескоп)



## Датский солнечный телескоп (Канарские острова)



# Gran Telescopio Canarias, 2002.



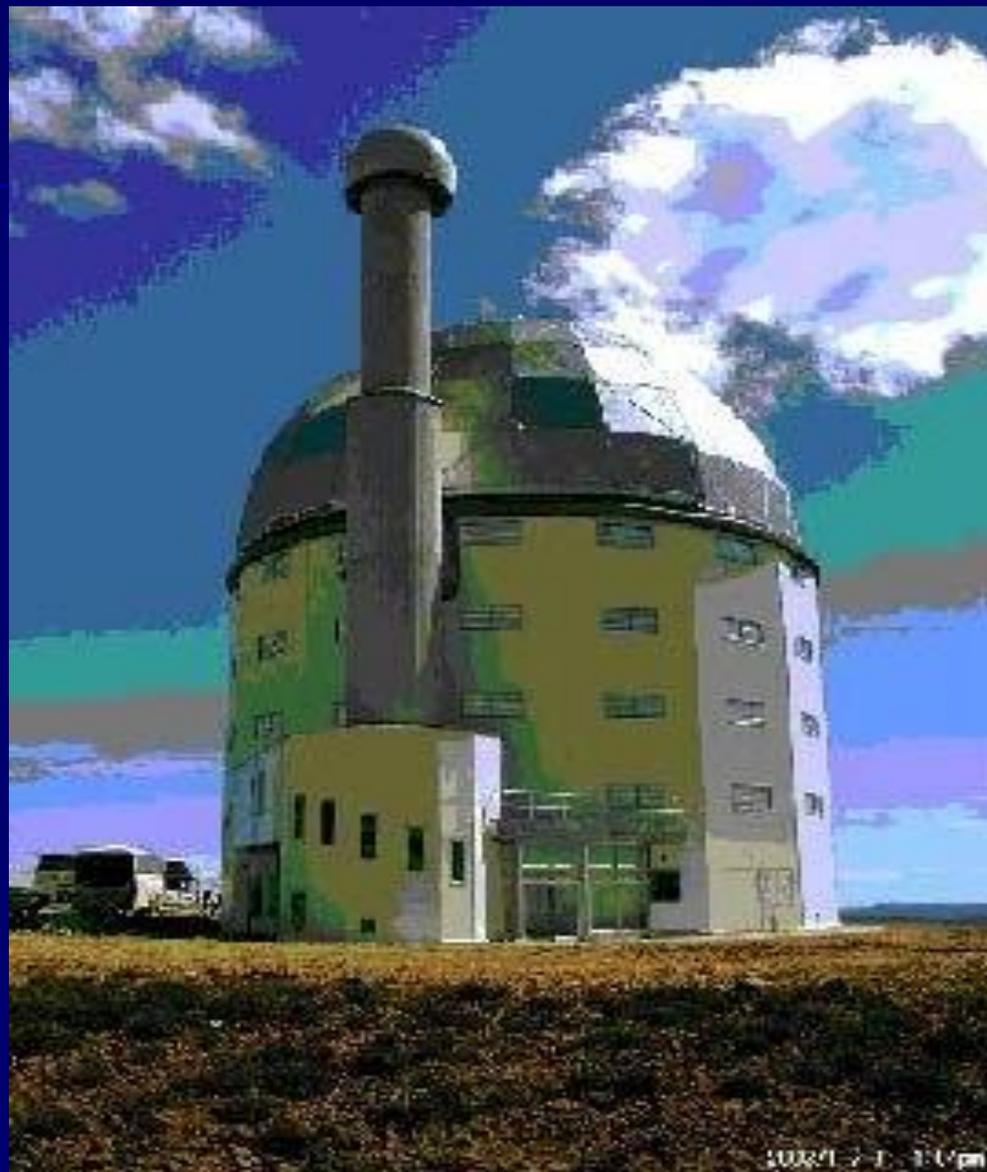
## Западноевропейская обсерватория на Канарских островах



**Южно-Африканская астрономическая обсерватория. Башня  
Большого  
Южно-Африканского телескопа показана в разрезе. Перед ней  
видны три основных действующих телескопа.(1,9м, 1,0м и 0,75м).**



Башня телескопа (SALT) БЮАТ.



Большой Южно-Африканский Телескоп (Southern African Large Telescope - SALT)



## 35-м оптический телескоп (проект США, 2012 г.)



Ошеломляюще Большой Телескоп OWL (**проект, 2020 г.**)  
(*OverWhelmingly Large Telescope - Ошеломляюще Большой Телескоп*)



# РАДИОТЕЛЕСКОПЫ

## 76-м радиотелескоп им. Лоувелла



# Радиотелескоп РТ-22 (КрАО, п. Кацивели)



Передающая 70-м антенна в Евпатории, Крым, Украина



# Приемная 64-м антенна в Медвежьих Озерах, Подмосковье



# The Parkes radio telescope at dusk (64 m)



# The Parkes radio telescope at dusk (64 m)



# The Australia Telescope Compact Array at dawn



# Аресибо: крупнейший телескоп



VLA



VLA



## 100-метровый радиотелескоп в Грин-Бэнк



**3-метровое зеркало немецкого субмиллиметрового телескопа KOSMA действительно является зеркалом в обычном понимании этого слова. Правда, точность изготовления его поверхности 20-30 мкм не идет ни в какое сравнение с точностью ювелирно исполненных зеркал оптических телескопов, измеряемой в нанометрах. Но для волн длиннее 0.3 мм этого вполне хватает. (Швейцарские Альпы, 3135 м).**



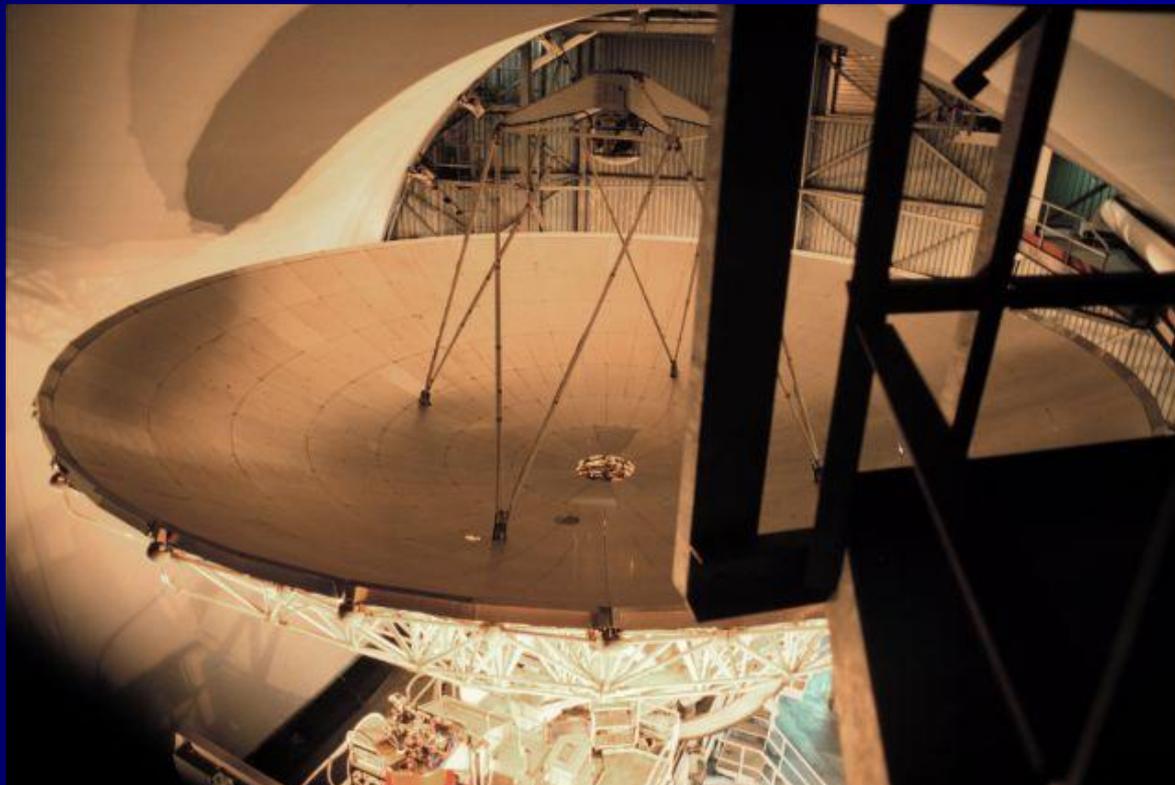
# Телескоп имени Джеймса Кларка Максвелла (JCMT)



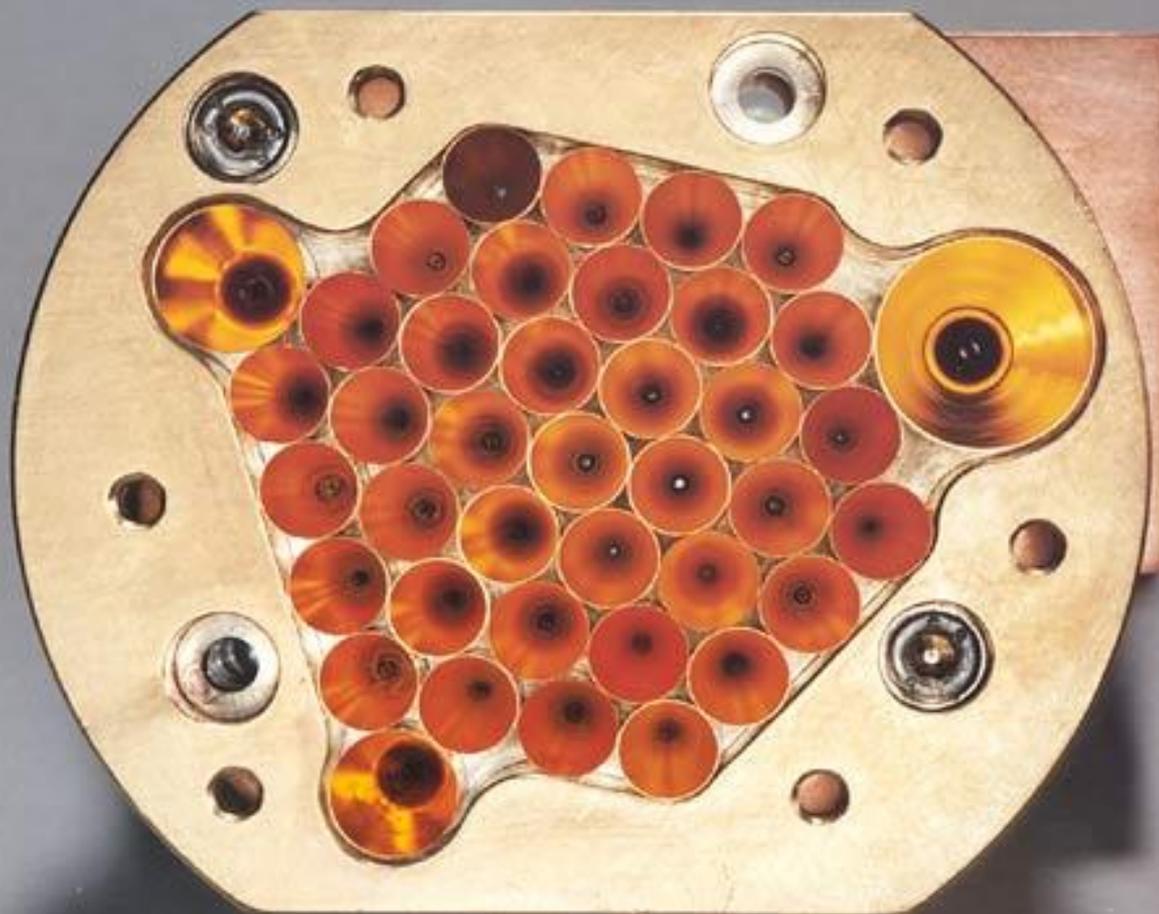
**Телескоп Максвелла в рабочем положении (Мауна Кеа, Гавайи). Скрывающая телескоп защитная мембрана из горетекса подсвечена изнутри.**



**Главное 15-метровое зеркало телескопа JCMT изготовлено из 276 отдельных алюминиевых фрагментов, плотно стыкованных вместе. Свой первый свет оно увидело в 1987 году. Несмотря на очень высокую точность изготовления поверхности, его все же чаще называют не зеркалом, а антенной, или "тарелкой": просто потому, что субмиллиметровый диапазон формально уже не относится к оптическому, но тяготеет к радио.**

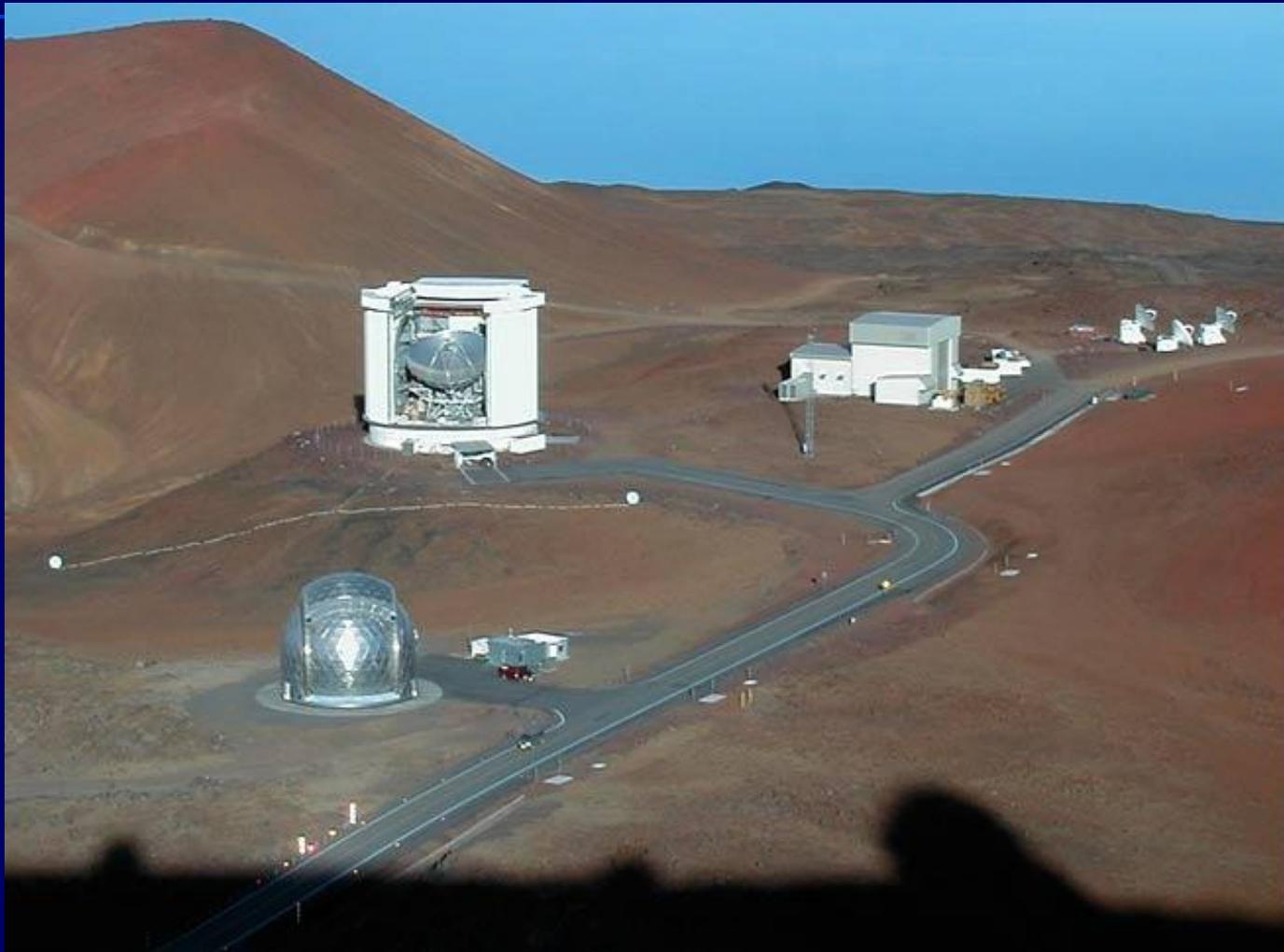


**Длинноволновый массив камеры SCUBA, состоящий из 37 болометрических приемников, на которые проецируется область неба диаметром 2.3 угловых минуты. Три дополнительных конических раструба по краям - однопискельные фотометры для более длинноволновых окон прозрачности**

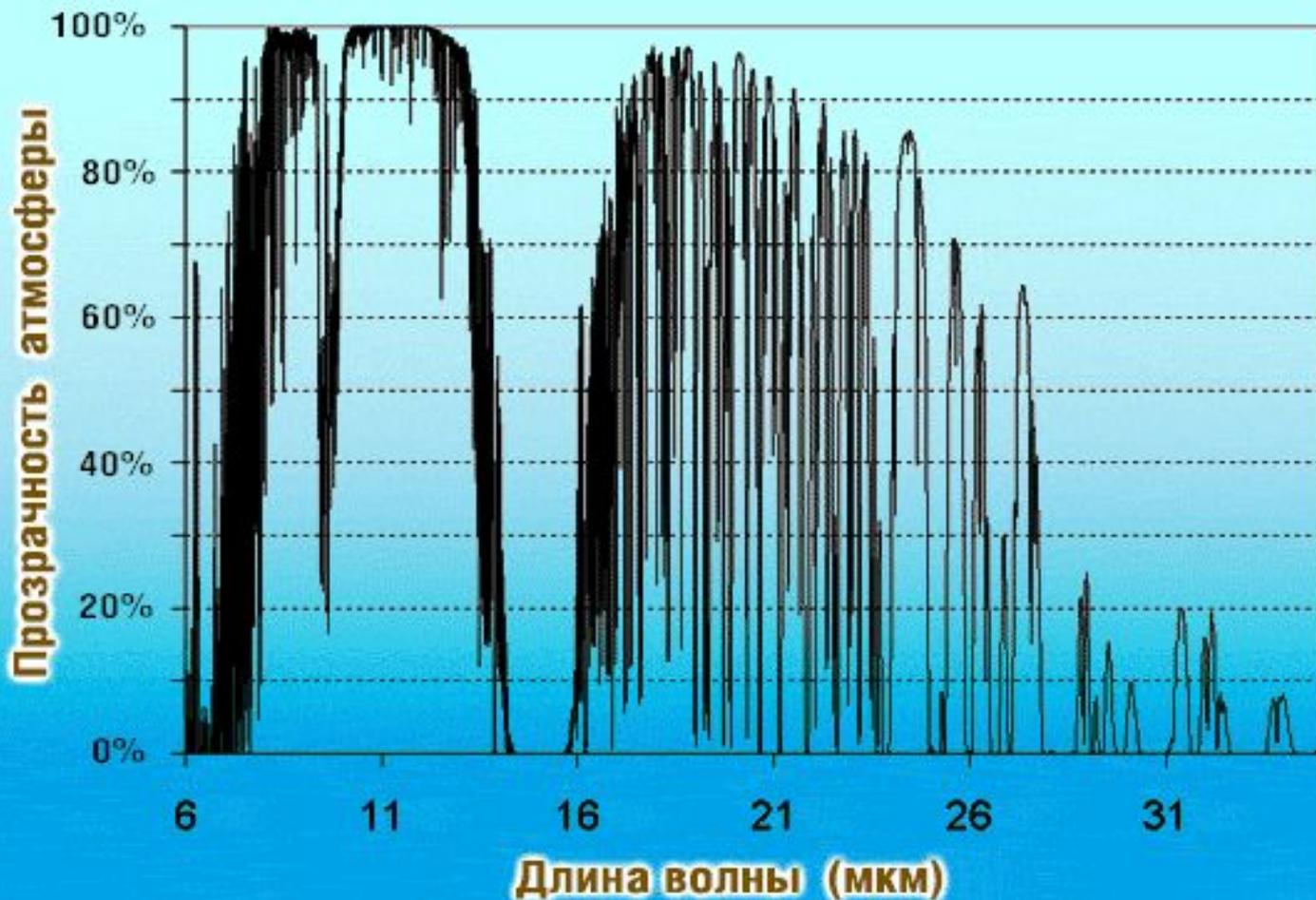


На этой редкой фотографии телескоп Максвелла запечатлен "раздетым" - перед снятием вторичного зеркала для запланированной переполивовки мембрана из горетекса всегда удаляется. Главное зеркало, или антенна, занимают почти все пространство под каруселью.

*На переднем плане:* купол ближайшего соратника телескопа Максвелла - 10-метрового субмиллиметрового телескопа CSO Калифорнийского технологического университета. В паре с JCMT, он превращается в неподвижный одноплечевой интерферометр.



**Рис. 1.** Прозрачность атмосферы в среднем ИК-диапазоне над вершиной Мауна Кеа. Хорошо видно, что с ростом длины волны она катастрофически падает. В день измерения мощность колонки водяного пара над вершиной составляла всего 1.2 мм.

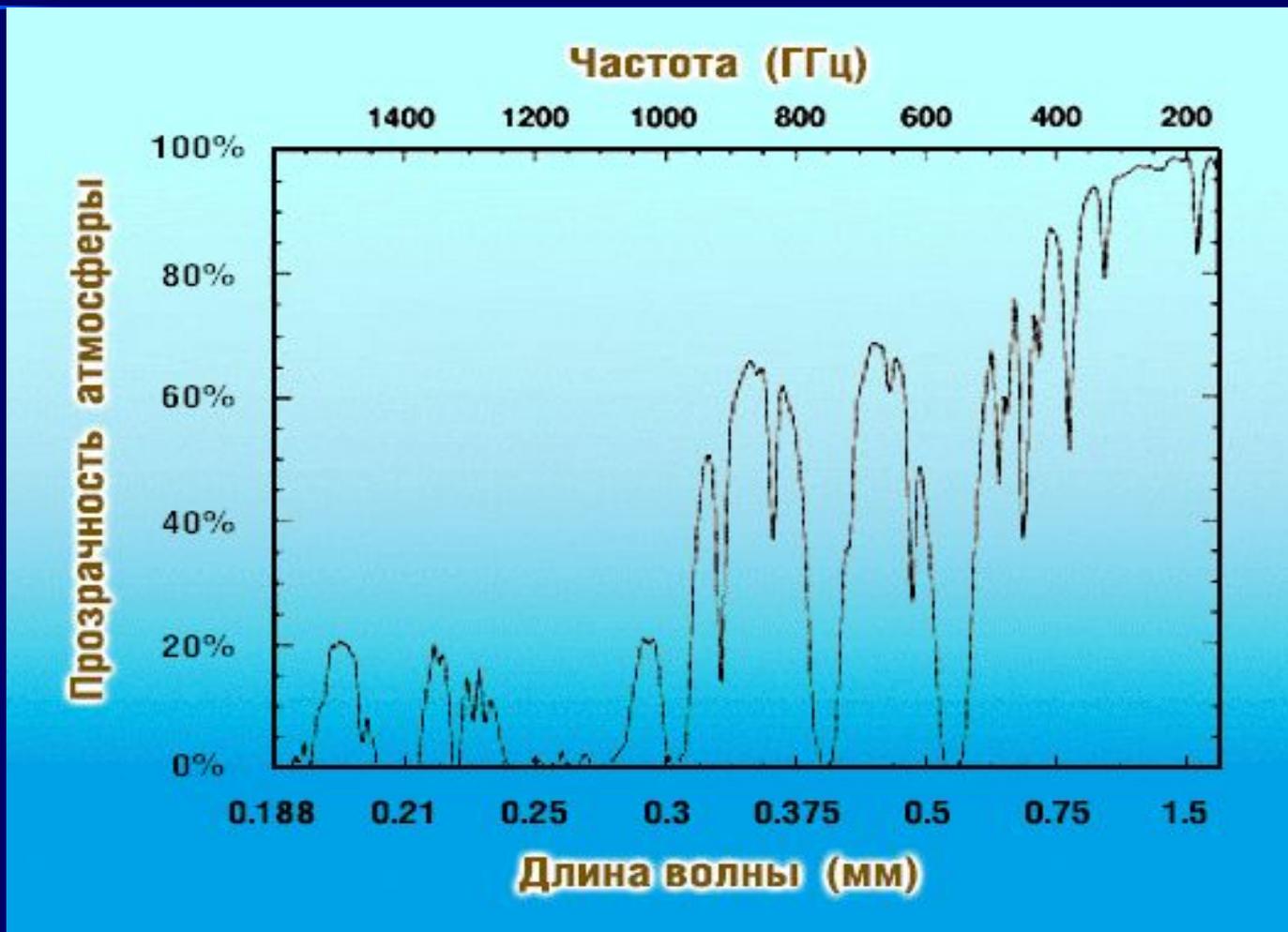


**Судя по голубому небу, это не Марс! Мы находимся в Атакаме - одной из самых высокогорных пустынь мира, точнее в местечке под названием Льлано де Чайнатор. Впереди высится вершина Серро-Часкон (около 5700 м), а слева за кадром - другой великан, вершина Серро-Чайнатор (около 5600 м). Тени в полдень падают в Атакаме строго на юг... Нет, нет, не подумайте, место это не заколдовано - просто мы находимся в южном полушарии.**

**Здесь, на высоте 5050 метров над уровнем моря через несколько лет планируется создать инструмент, которому будет под силу не только разглядывать детали мощных пылевых дисков около Вега-подобных светил, но и регистрировать гораздо более слабые запыленные пояса реликтовых планетезималей, подобные нашему поясу Койпера. Кто знает, может быть именно с этих высот астрономы возвестят миру о том, что не 5% и даже не 15%, а почти все 100% звезд главной последовательности имеют планетные системы.**



**Рис. 2. Прозрачность атмосферы в субмиллиметровом диапазоне (0.188 - 1.5 мм), измеренная японскими астрономами над высокогорной чилийской пустыней Атакама у северо-восточного склона горы Чайнатор в районе Пампа ля Бола (4800 м) - около места, где планируется построить крупнейший в мире массив субмиллиметровых телескопов, работающих в режиме интерферометра (ALMA).**

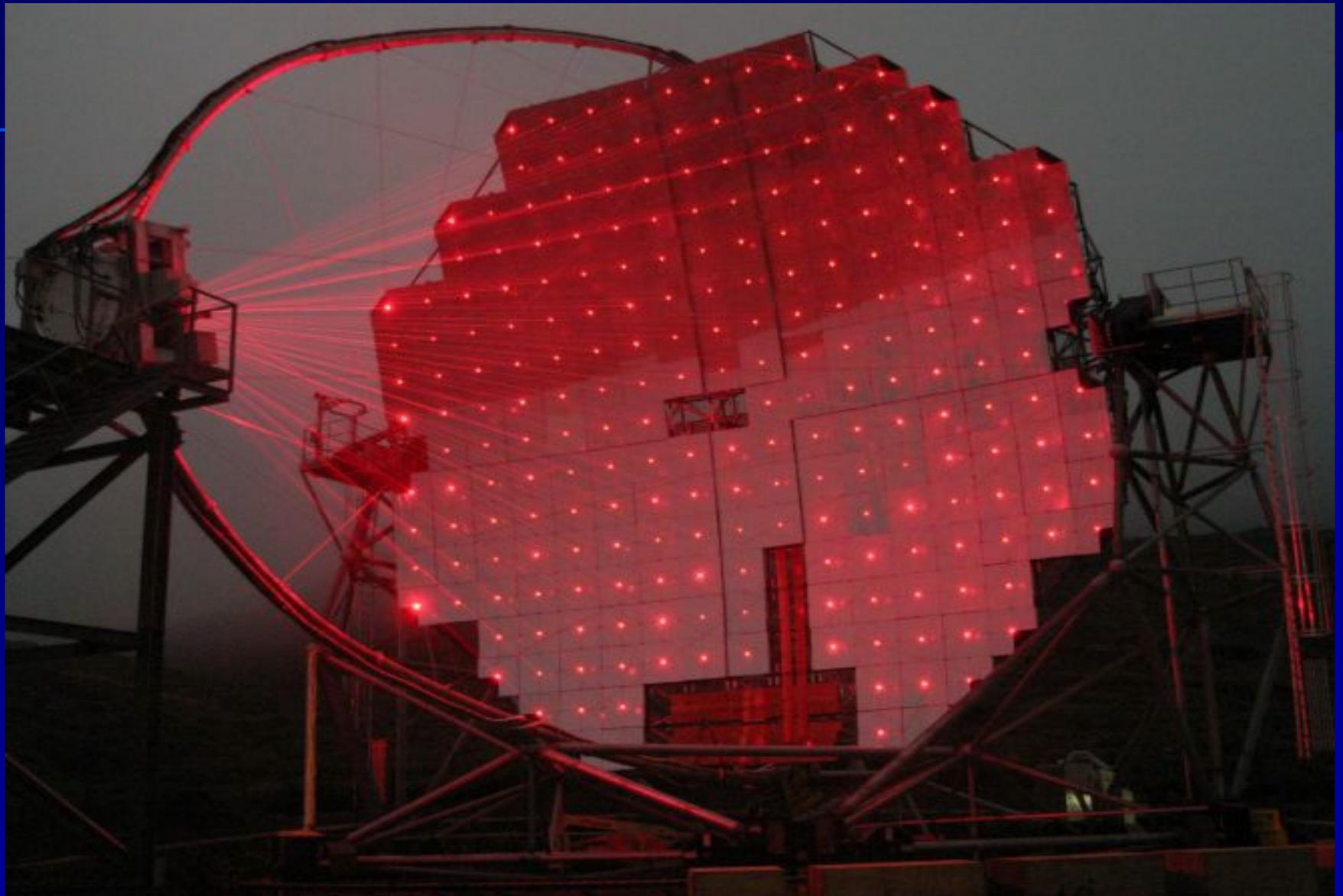


# ГАММА-ТЕЛЕСКОПЫ

# Гамма-телескоп HESS



**MAGIC is the** Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope



# КОСМИЧЕСКИЕ ОБСЕРВАТОРИИ

## Discovery on Its Way to Hubble



# Hubble Against Earth's Horizon



# Hubble Docked with Discovery



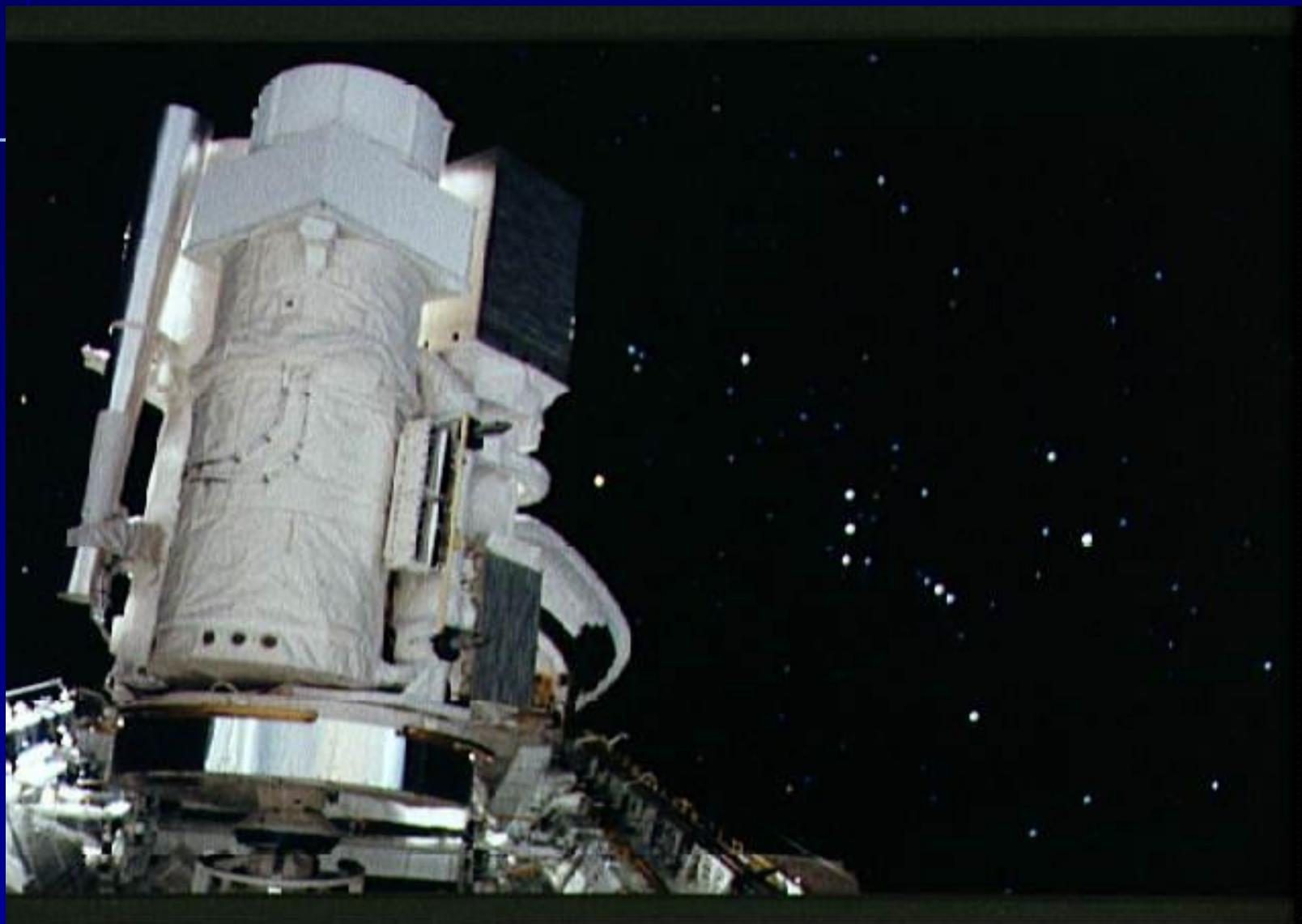
# Hubble Docked with the Shuttle Endeavor



Световое эхо от V838 Единорога (ноябрь 2005 г.)



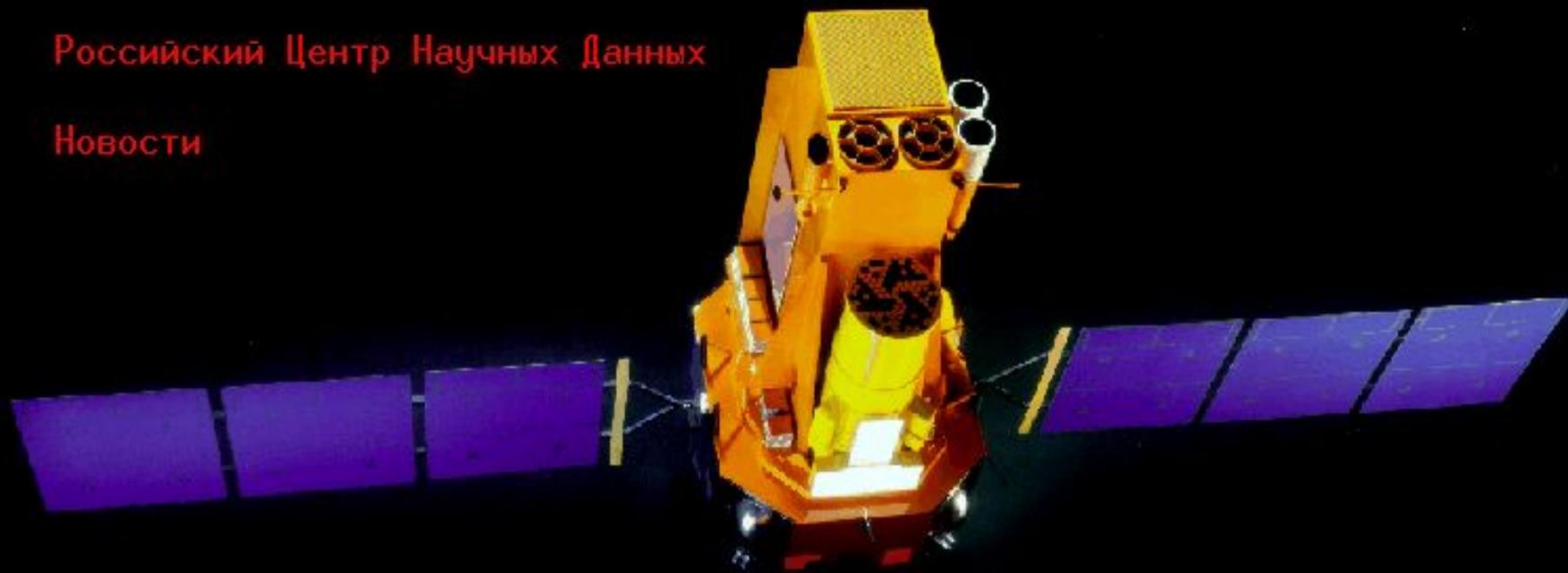
# Астро-1 на орбите



# Международная астрофизическая гамма- обсерватория ИНТЕГРАЛ

Российский Центр Научных Данных

Новости



МЕЖДУНАРОДНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ГАММА-ОБСЕРВАТОРИЯ

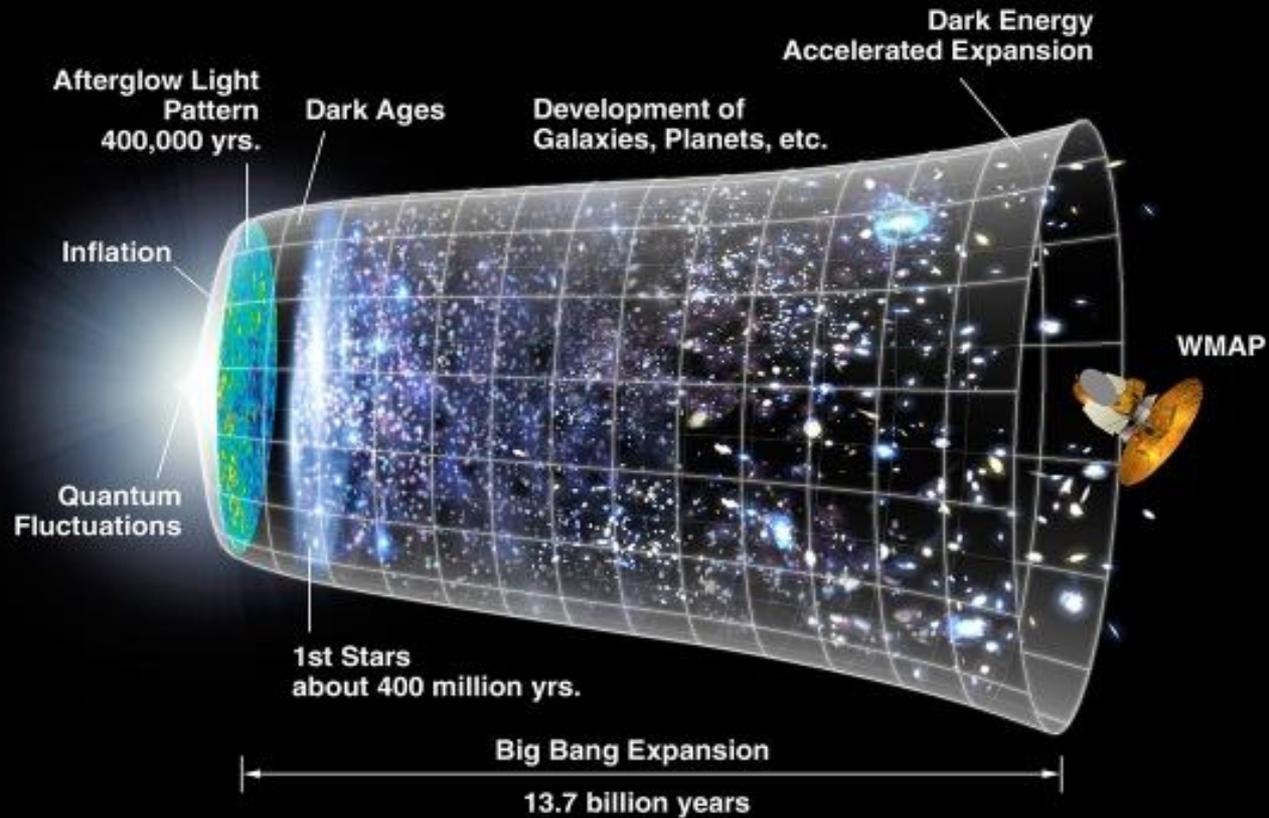
## Космическая обсерватория "Чандра"



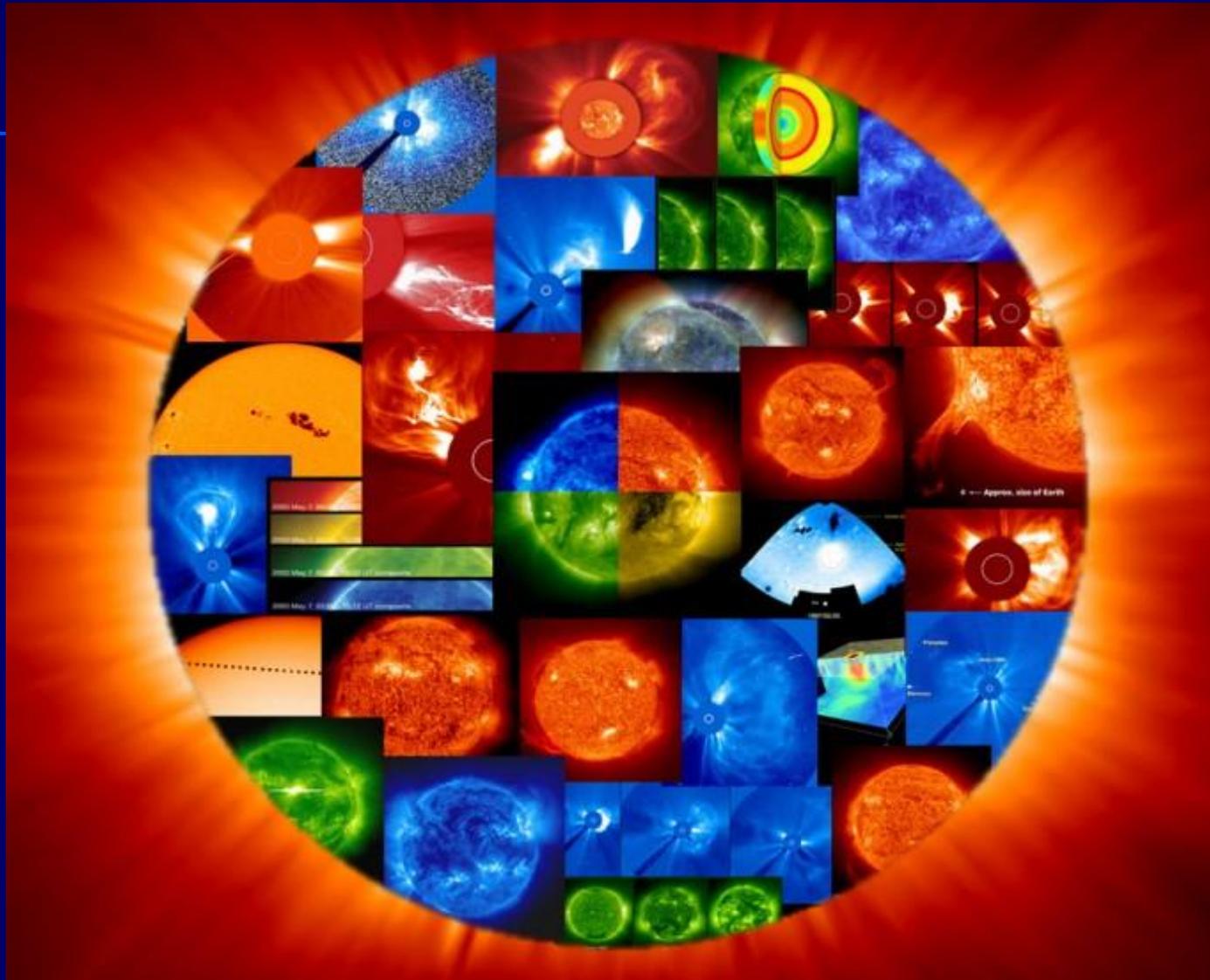
Космический аппарат WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)



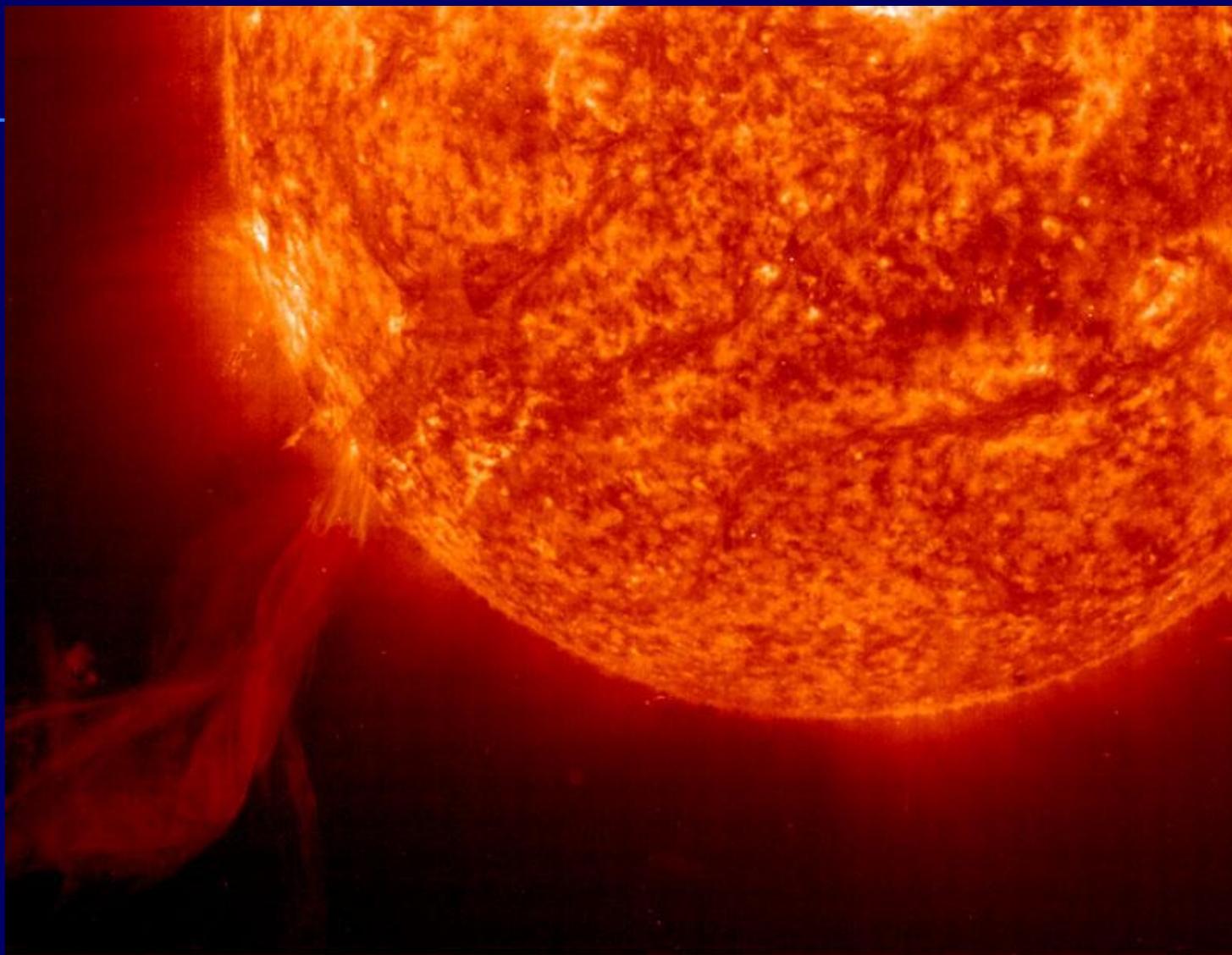
# Раздувание Вселенной



# SOHO: непрерывные наблюдения Солнца



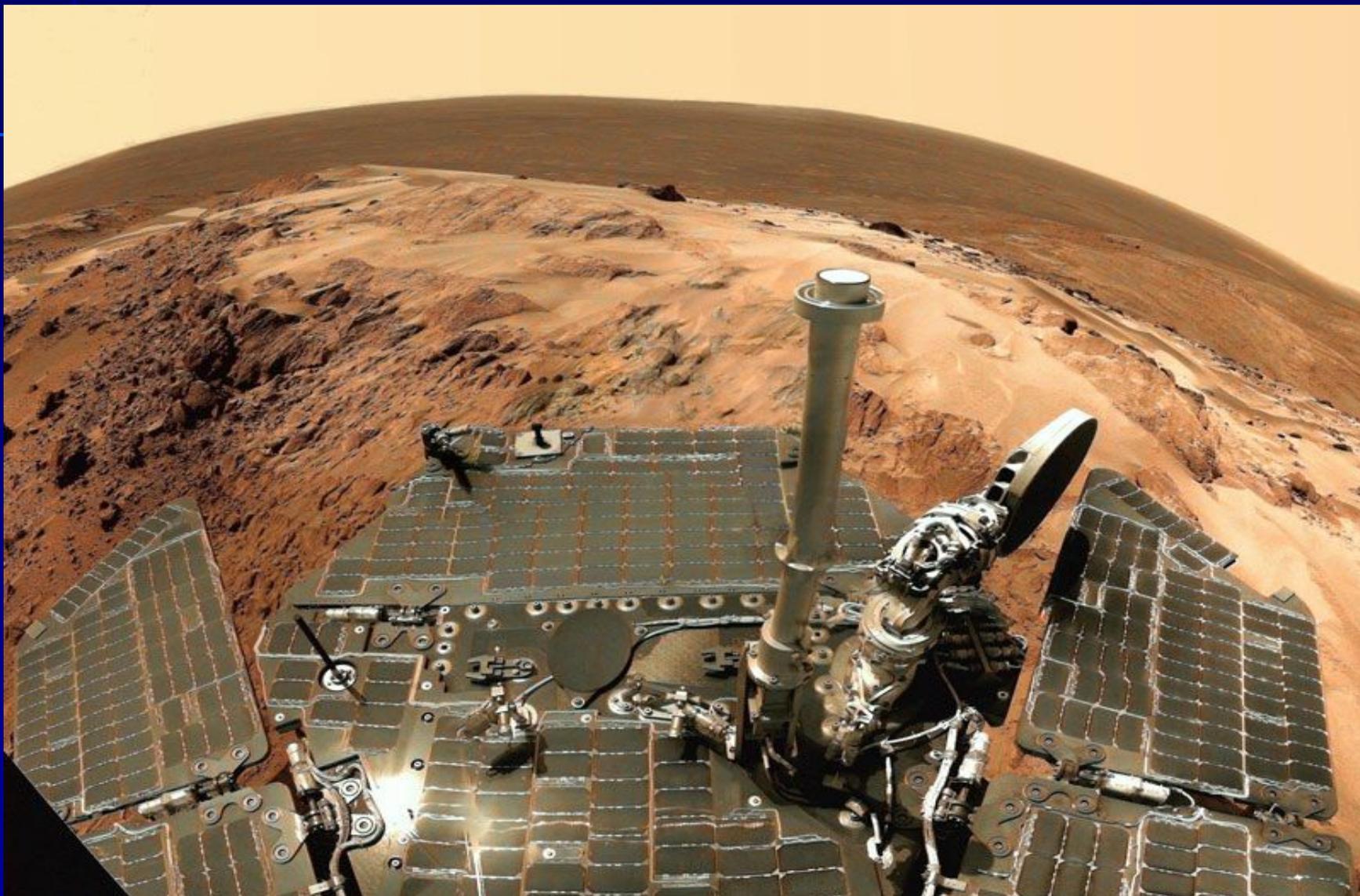
Протуберанец, сфотографированный SOHO (ноябрь 2005 г.)



ПРЯМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЛ  
СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ  
С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ



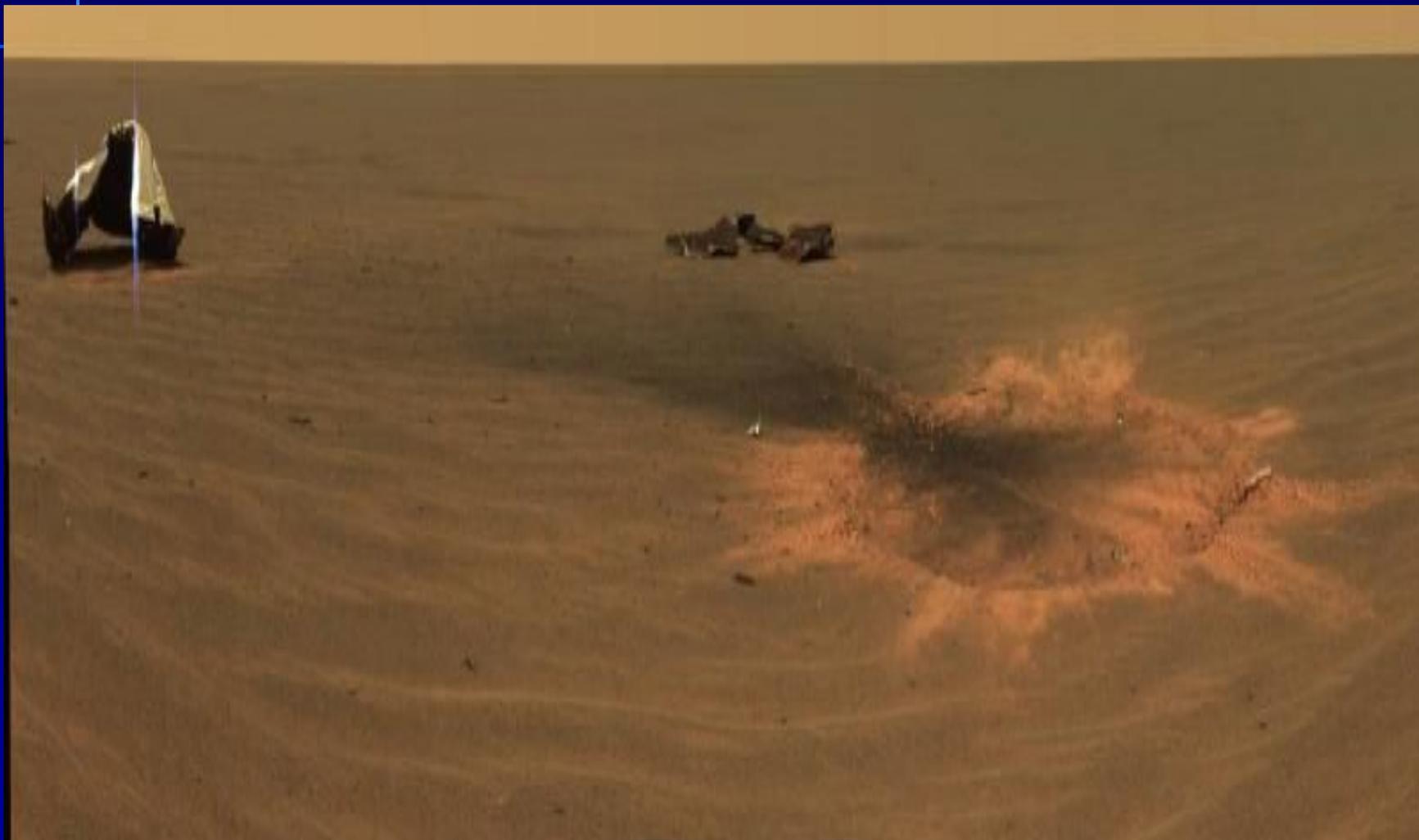
# Марсоход Спирит - вид внутри кратера Гусева на Марсе



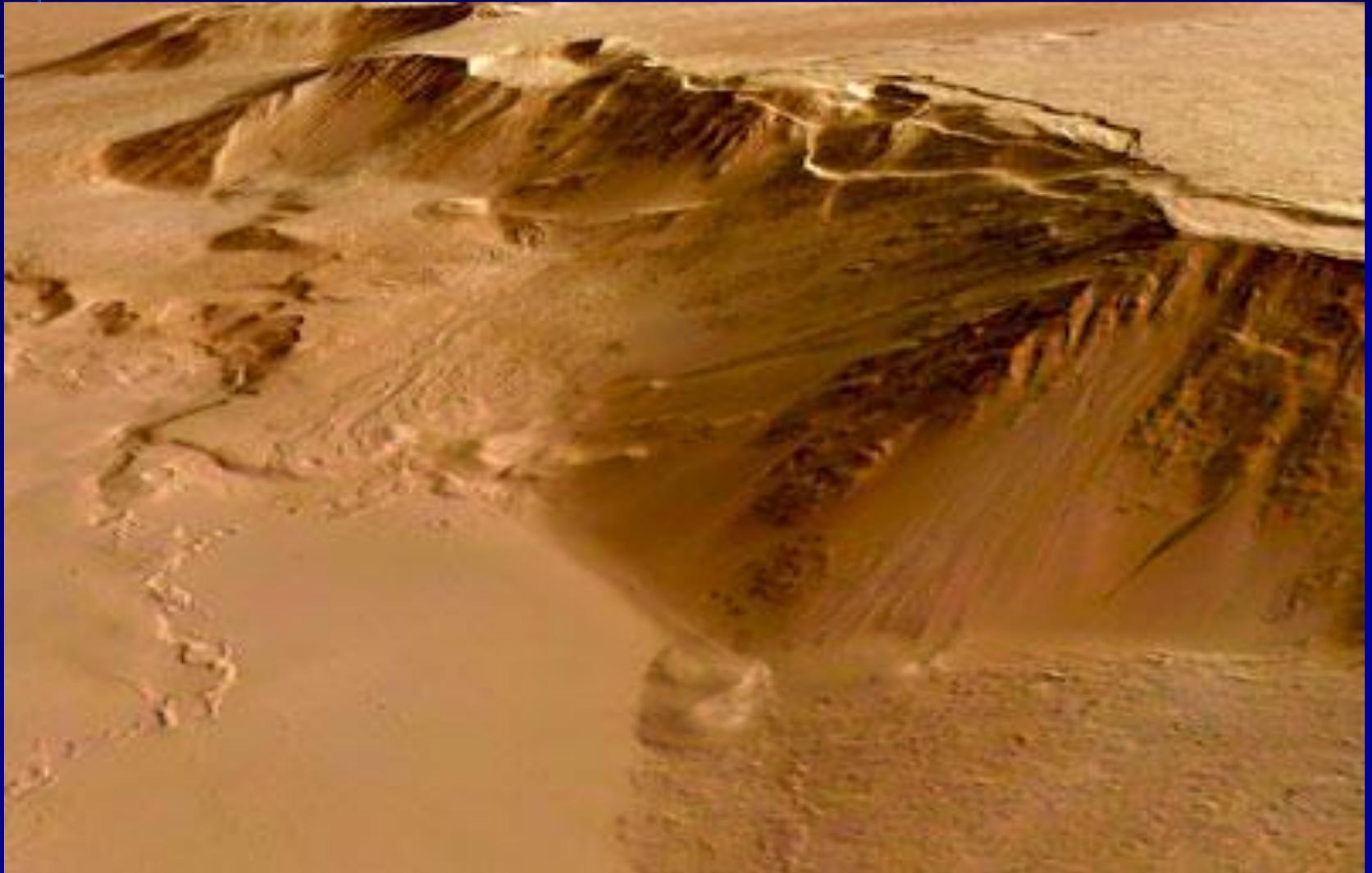
# Марсоход Оппортьюнити: цифровой монтаж



# Посадка на Марс Opportunity



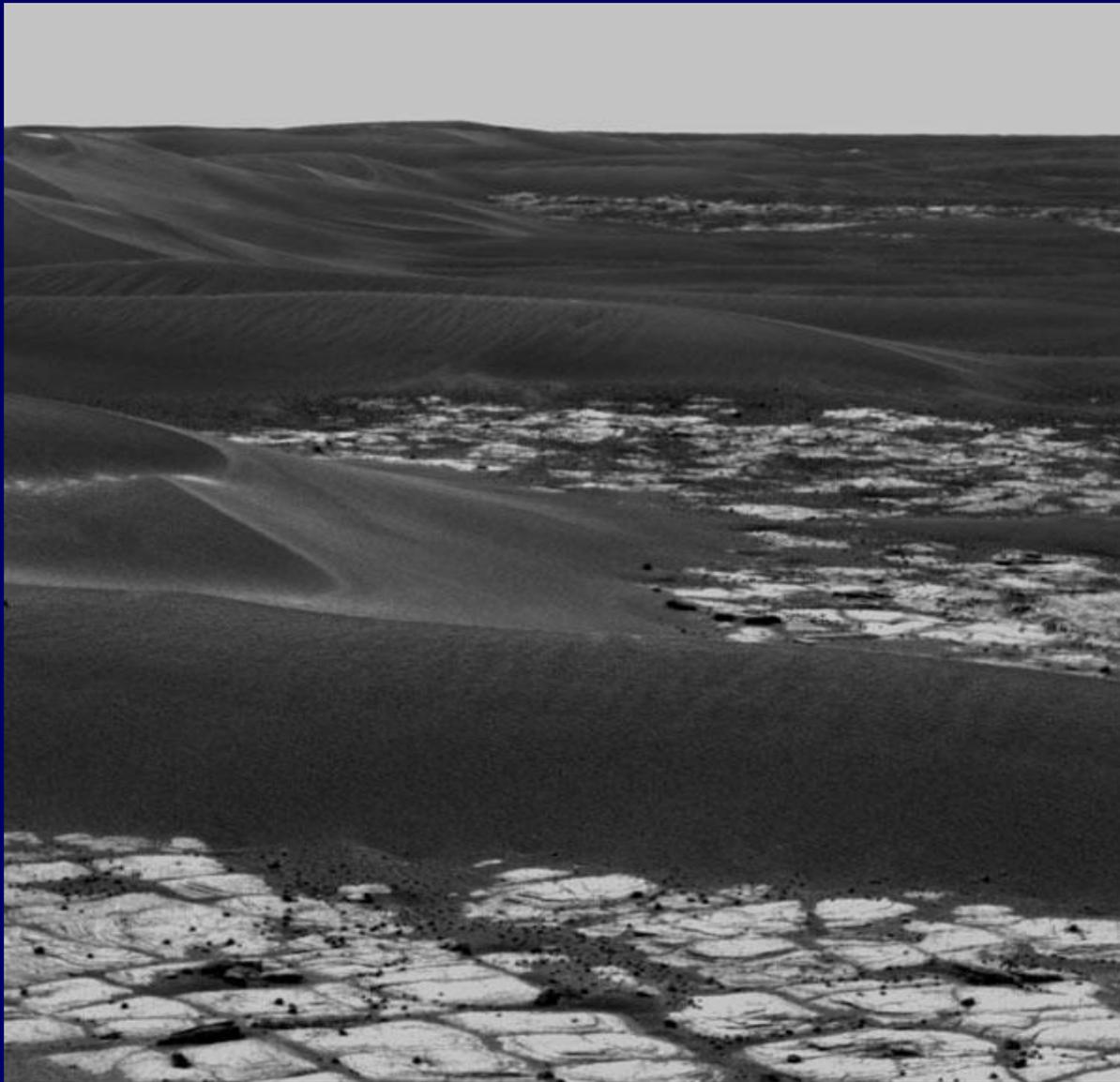
**Perspective view of the eastern scarp of Olympus Mons, looking south-west**



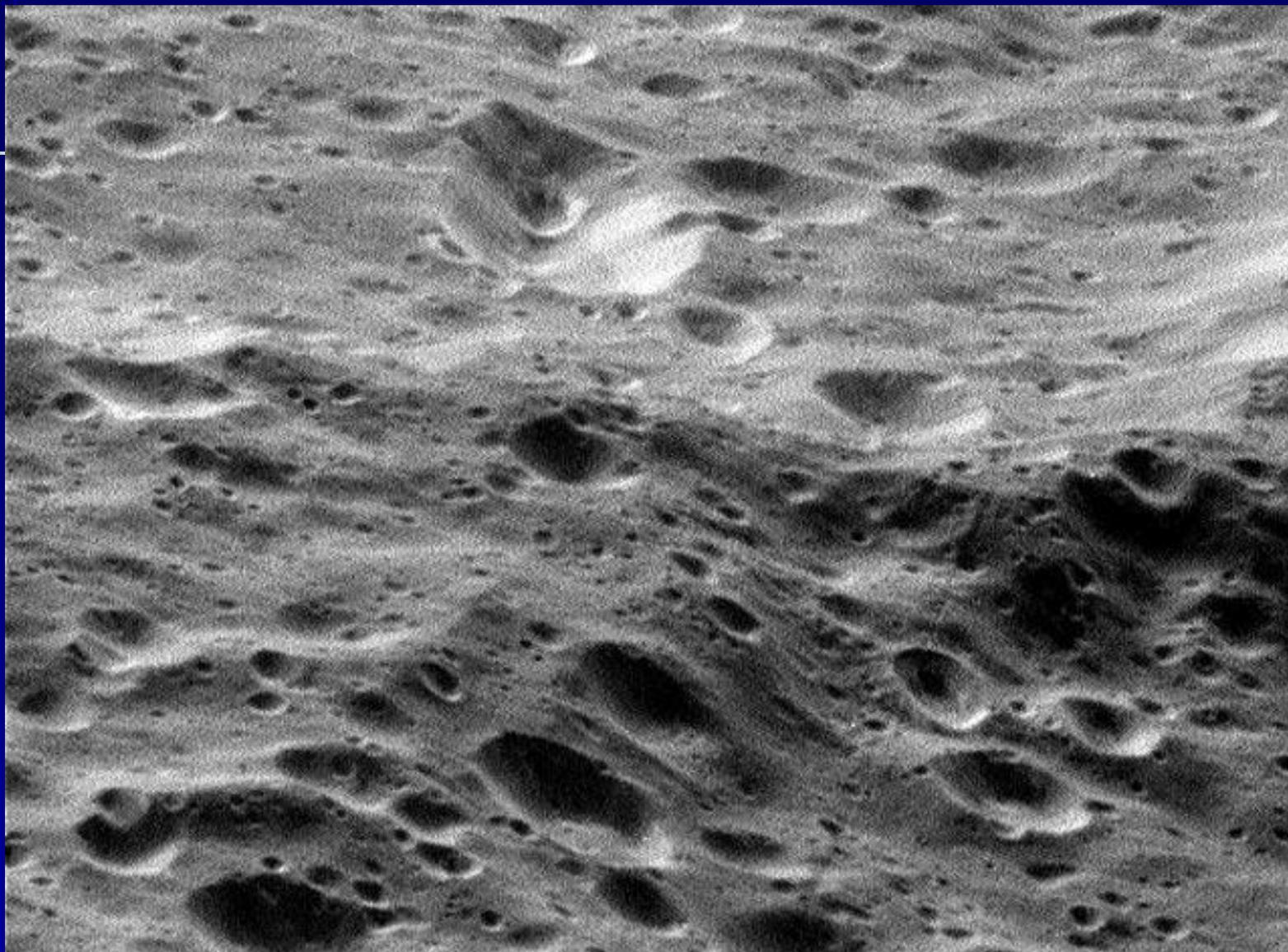
# Заход Солнца на Марсе (Спирит)



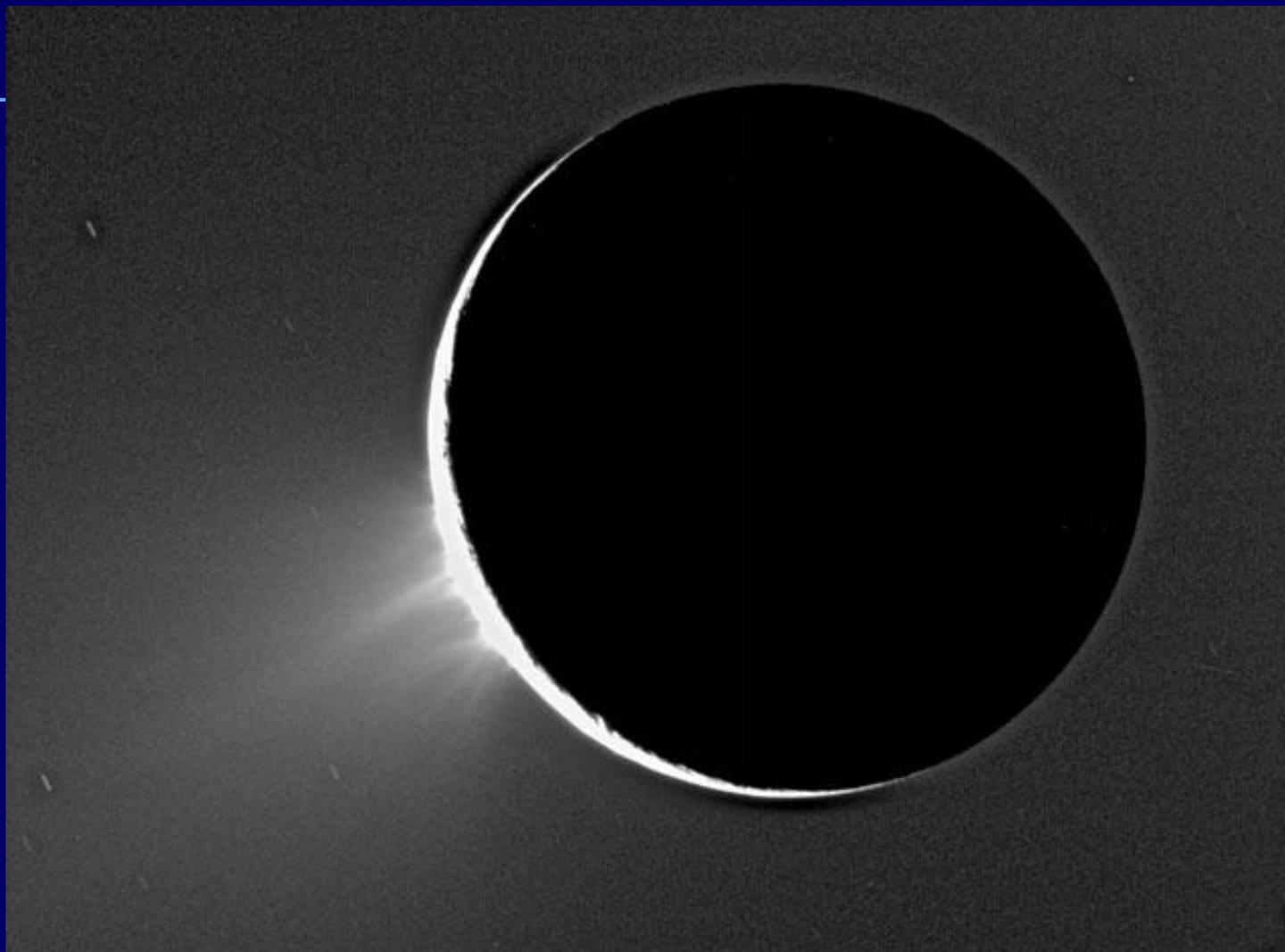
## Дюны на Марсе



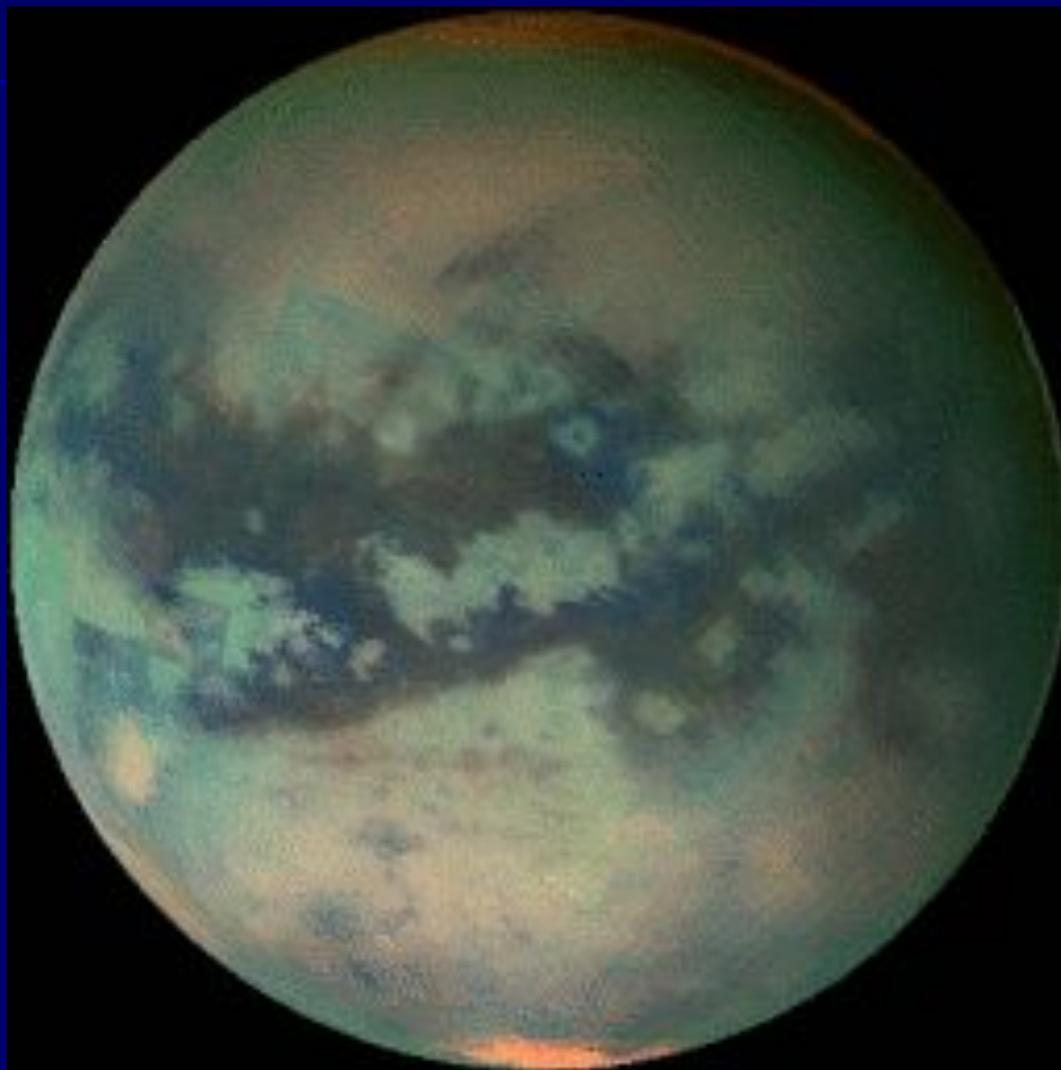
Вид на Рею с высоты 620 километров



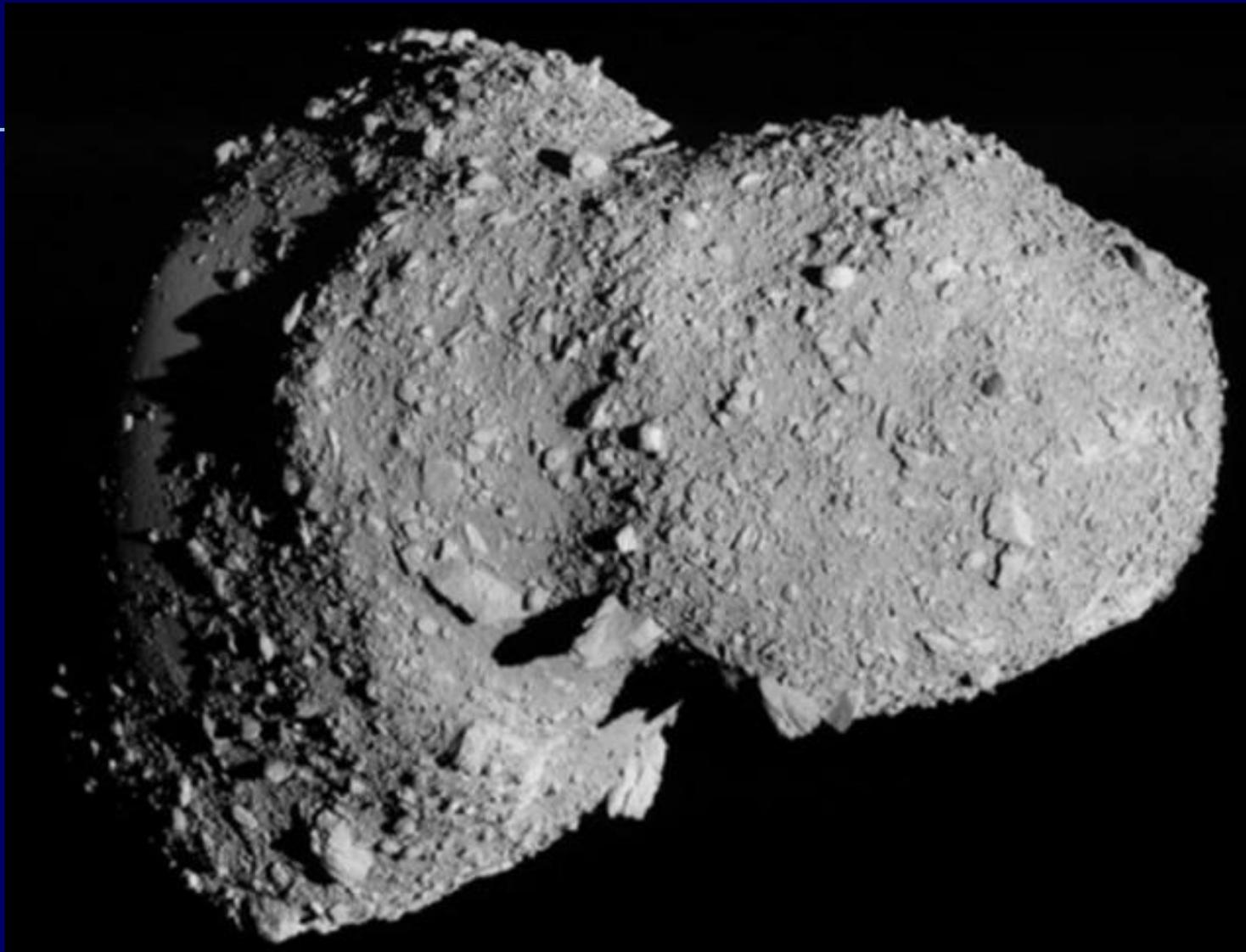
Ледяные фонтаны открыты на спутнике Сатурна Энцеладе (декабрь 2005 г.)



Вращающийся Титан в инфракрасном свете (февраль 2006 г.)



## Отсутствующие кратеры на Итокаве



# Тень Хиябуса на астероиде Итокава

