

ОТЧЁТНОСТЬ

- Домашние задания: по 1-2 задачи после каждой лекции. Оцениваются в $HW = 0..10$ баллов.
- Экзамен по окончанию модуля: 2 устных вопроса. Оценивается в $EX = 0..10$ баллов.
- Текущая накопленная оценка $HW_{\text{fin}} = \frac{1}{8} \sum_i HW_i$ (+ округление)
- Итоговая оценка: $RES = 0.5 \cdot HW_{\text{fin}} + 0.5 \cdot EX$
- Способ округления во всех случаях арифметический.
- Если $HW_{\text{fin}} = 8, 9$ или 10 , то эту оценку можно (по желанию) зачесть как итоговую и не сдавать устный экзамен в конце семестра.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ АСТРОНОМИИ

(ЛЕКЦИЯ 2. ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ. ВЕСНА 2022. ВШЭ)

АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

ТАКИЕ РАЗНЫЕ АСТРОНОМЫ

- Теоретик: Знает, почему звёзды светят. Хорошо разбирается в физике и математике.
- Наблюдатель: Знает, как измерить блеск звезды с высокой точностью. Хорошо разбирается в устройстве телескопа и понимает почему данные всегда с ошибками.
- Интерпретатор: Знает как понять, отвечают ли наблюдения модели и «что бы это значило по физике?». Неплохо разбирается в физике, математике, телескопах и статистике.
- Инженер: Знает, как сделать спектрограф и другие полезные приборы. Хорошо разбирается в электронике и оптике.
- Вычислитель: Знает, как решить сложную систему уравнений на компьютере. Неплохо разбирается в физике, математике и программировании.

КАК РАБОТАЕТ АСТРОФИЗИКА СЕГОДНЯ?

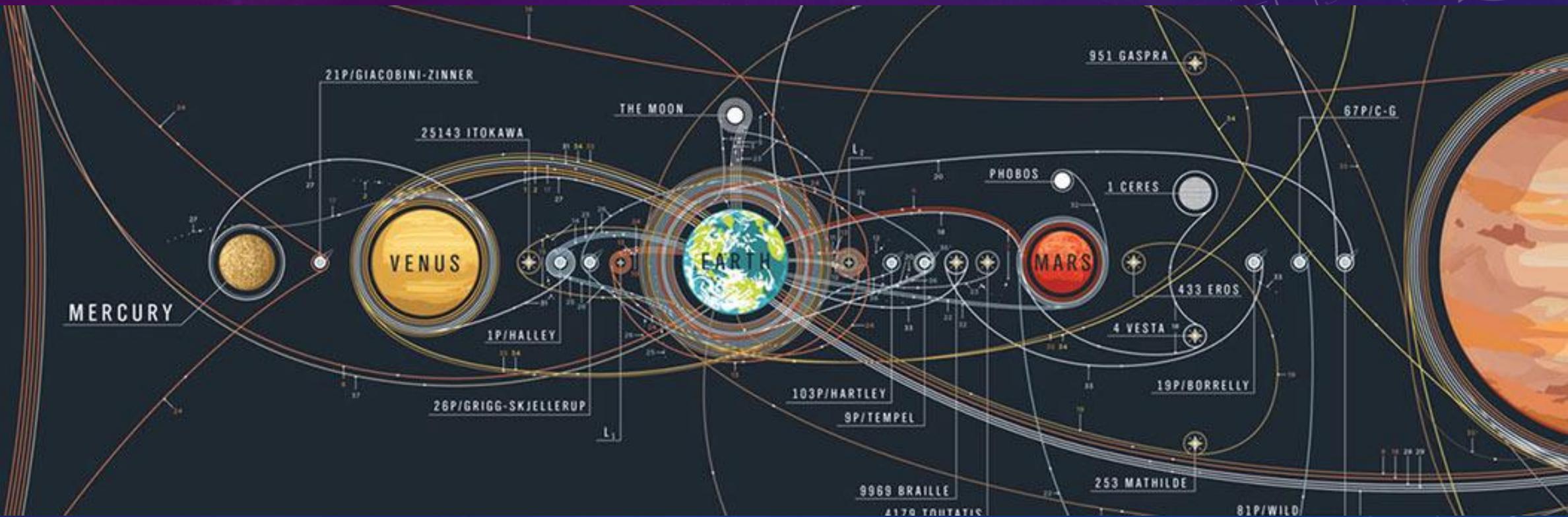
НЕСКОЛЬКО ВАЖНЫХ ФАКТОВ

ФАКТ 1: АСТРОНОМИЯ – ВСЁ ЕЩЁ НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ НАУКА

В астрономии, по большей части, невозможны прямые эксперименты с изучаемыми объектами.
Это уникальное свойство для естественных наук.



ФАКТ 1А: ХОТЯ...



Контролируемый эксперимент в астрофизике!

ФАКТ 2: В ТЕЛЕСКОП НЕ СМОТРЯТ ГЛАЗОМ

В 19 веке в астрономию пришла фотография (на фотопластинках). Последние 30+ лет используются электронные приёмники, в основном на внутреннем фотоэфекте.

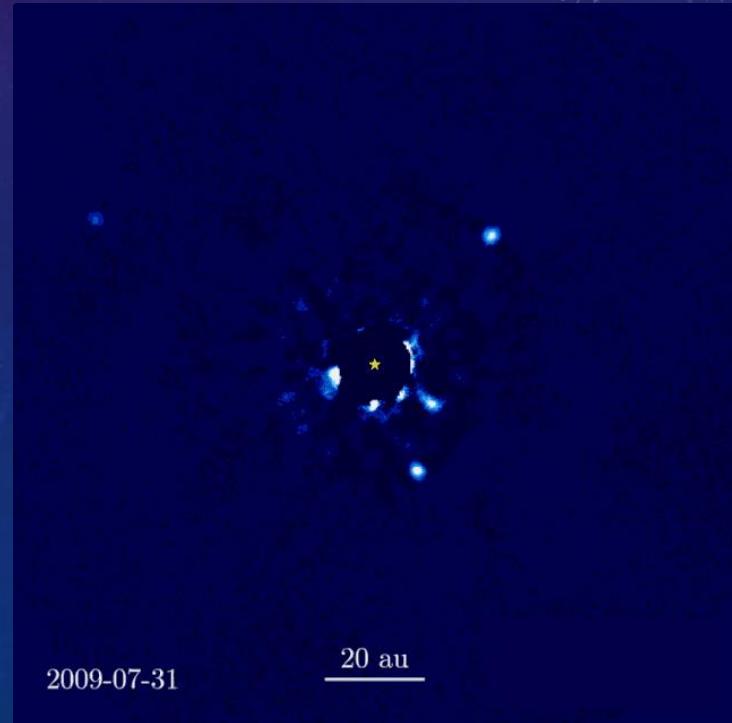
(А вне видимого диапазона глаз вообще бесполезен).



ФАКТ 3: АСТРОНОМЫ ОБРАБАТЫВАЮТ МНОГО ДАННЫХ

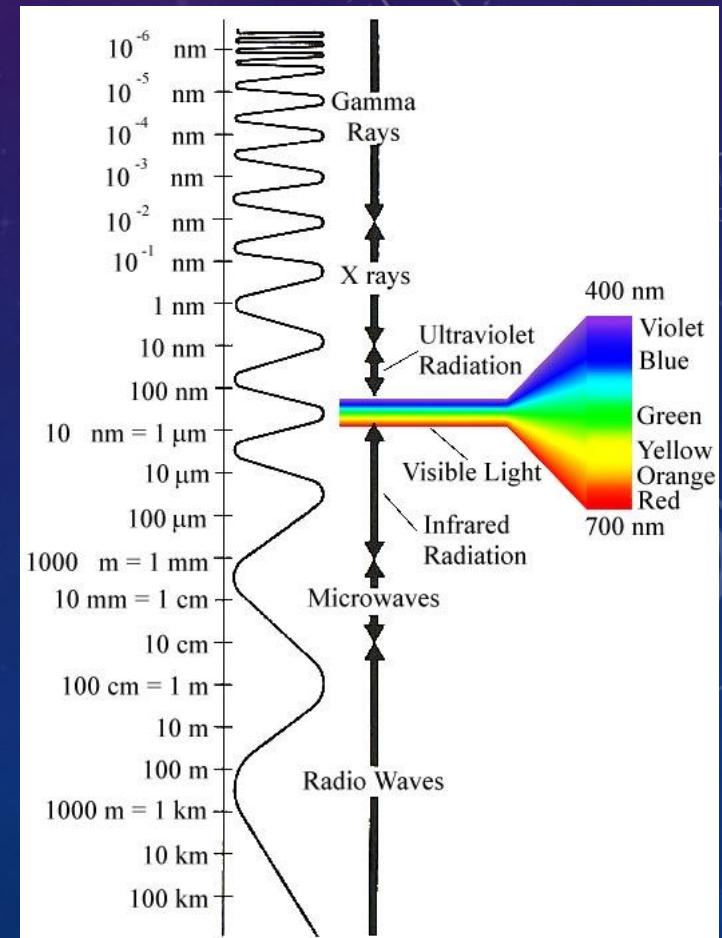
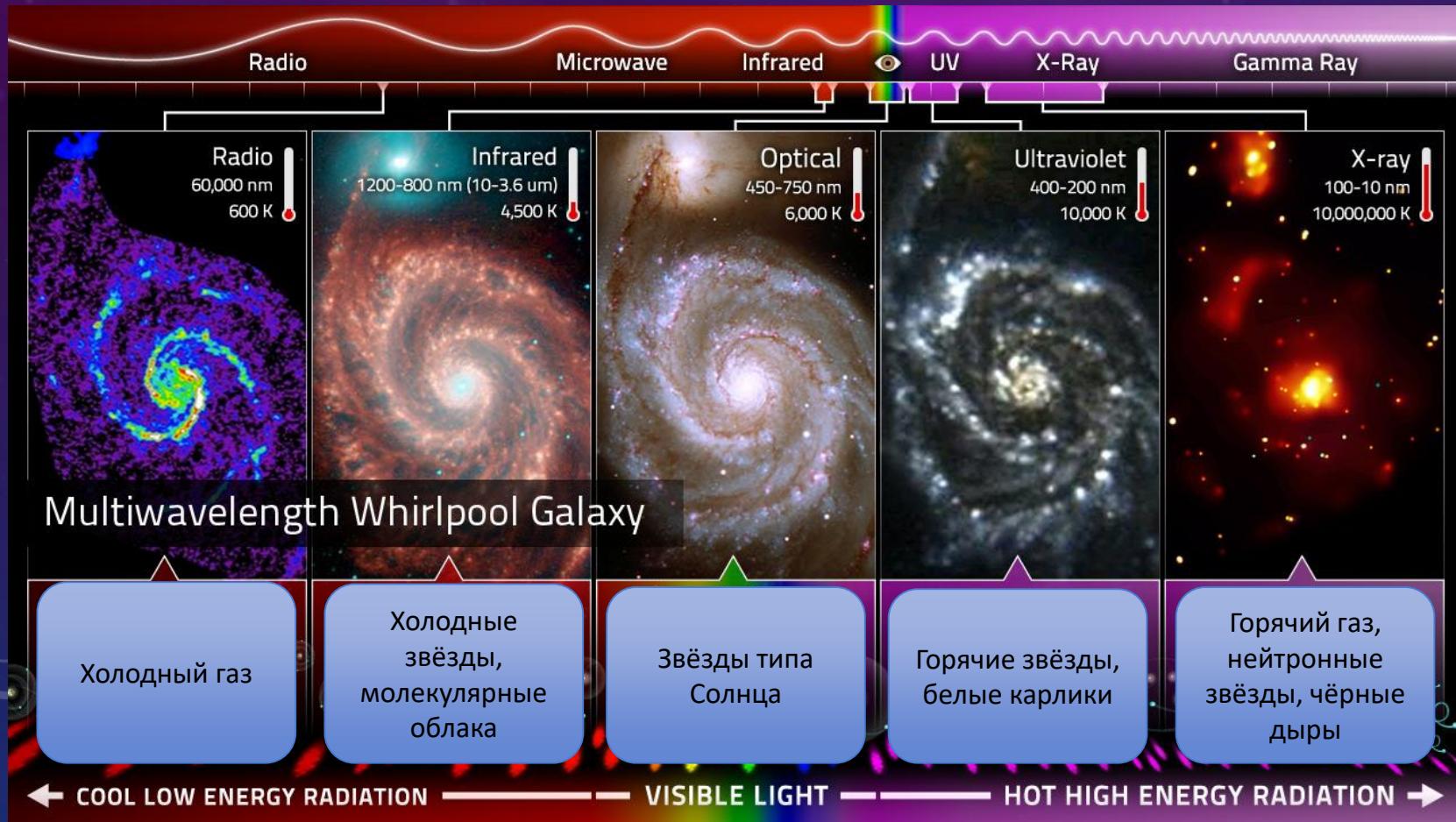
Среднестатистический астроном занят обработкой данных.

Изображения, которые вы видите, обычно являются итогом длительной и сложной обработки.



ФАКТ 4: АСТРОНОМИЯ СТАЛА ВСЕВОЛНОВОЙ

Наблюдения ведутся во всём диапазоне электромагнитного спектра: от радио до гамма-лучей.
А кроме того, наблюдаются нейтрино (и другие частицы) и гравитационные волны.



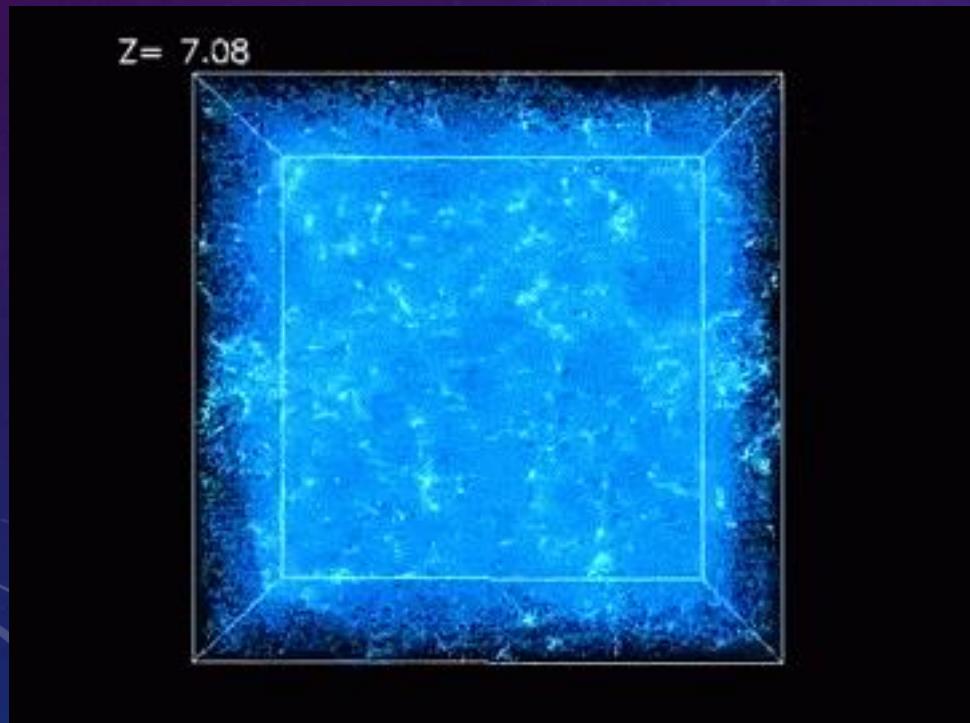
ФАКТ 5: НАБЛЮДАТЕЛЬ УПРАВЛЯЕТ НЕ ТЕЛЕСКОПОМ

Разумеется, космические эксперименты управляются дистанционно. Но и наземные все чаще управляются издалека. Кроме того, часто инструментом управляет команда инженеров, а астроном лишь описывается в заявке что и как наблюдать.



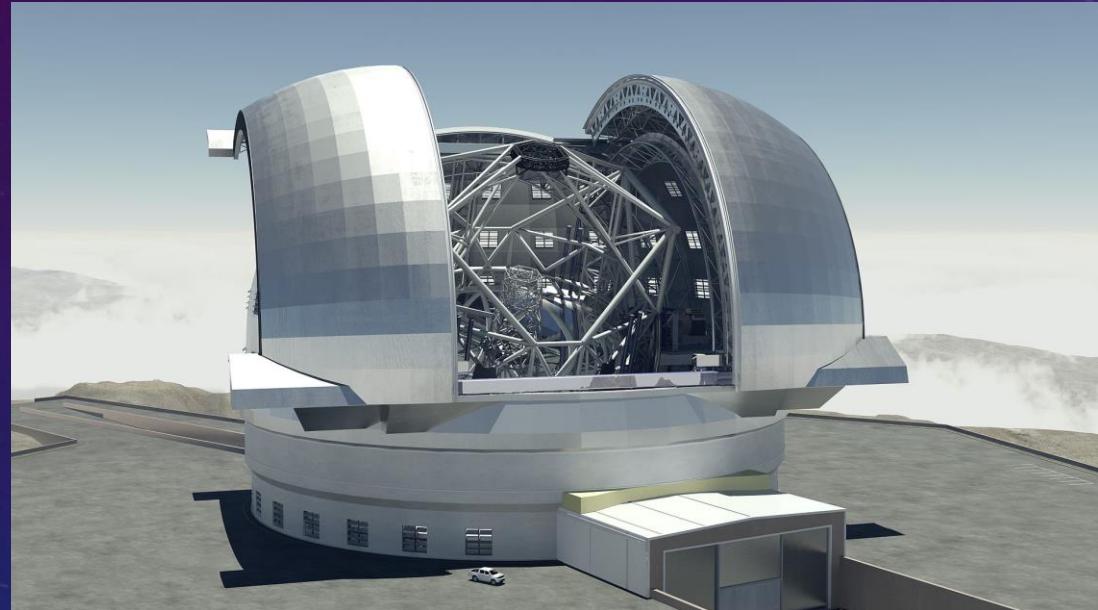
ФАКТ 6: АСТРОНОМЫ МНОГО СЧИТАЮТ

Астрономы считают на суперкомпьютерах. Многие астрономические задачи требуют колоссальных вычислительных ресурсов. Большинство тех задач, которые можно было решить лишь при помощи карандаша и бумаги были решены десятилетия назад.

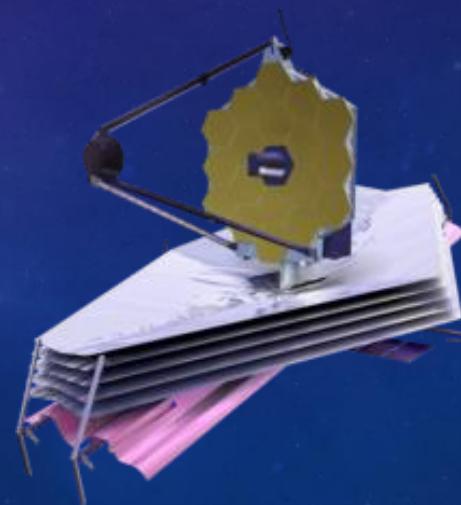


ФАКТ 7: ИГРУШКИ У НАС ОБЩИЕ

Основные результаты получают на больших дорогих инструментах коллективного конкурсного использования.



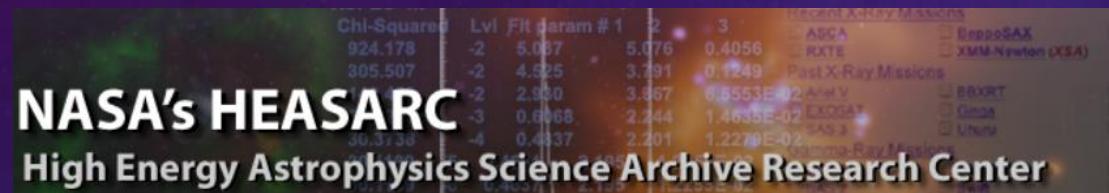
Extremely Large Telescope
(Европейская Южная Обсерватория)
Диаметр: 39.3 м
Стоимость: ~ \$2,000 М
Первый свет: 2027 г.



James Webb Telescope (NASA)
Диаметр: 6.5 м
Стоимость: ~ \$10,000 М
Первый свет: 2022 г.

ФАКТ 8: ДАННЫЕ ТОЖЕ ОБЩИЕ

Многие данные открыты. Крупные дорогие инструменты должны эффективно использоваться. Элемент соревновательности повышает эффективность, кроме того необходима перепроверка важных результатов независимыми исследователями.

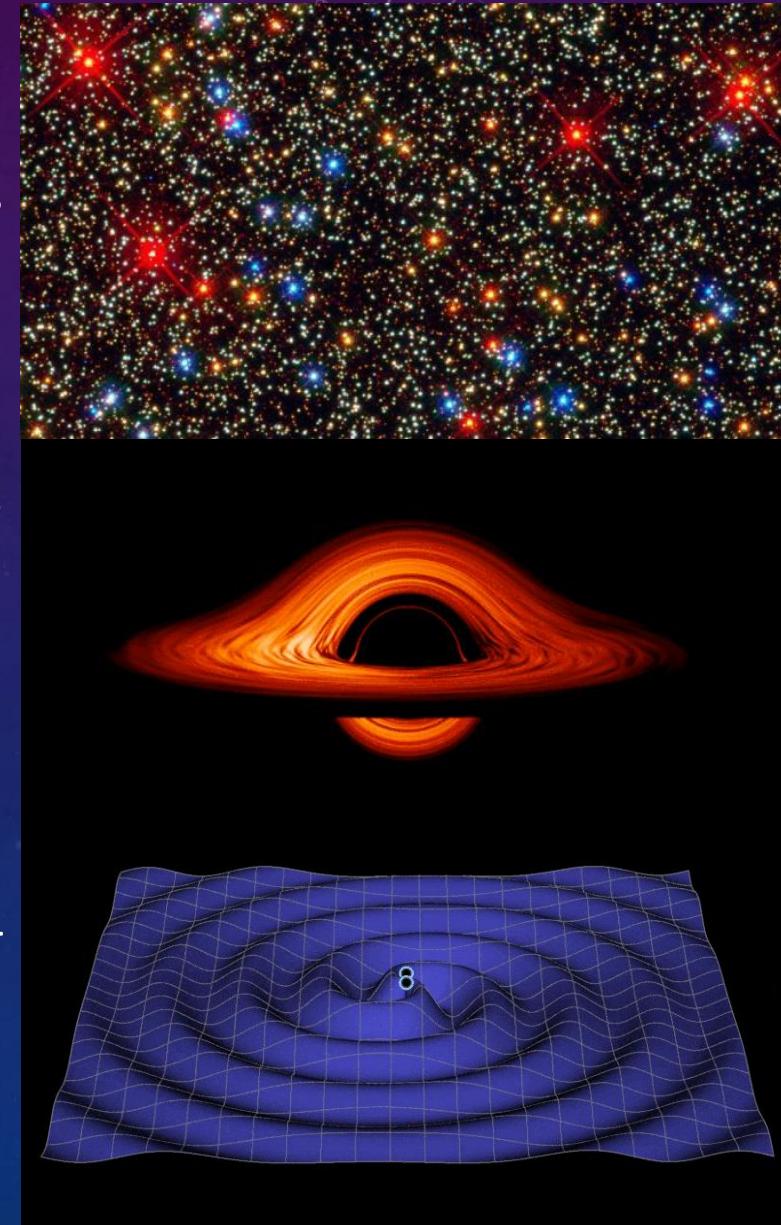


ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ АСТРОНОМИЯ

ПРО ВСЁ, ЧТО СВЕТИТ

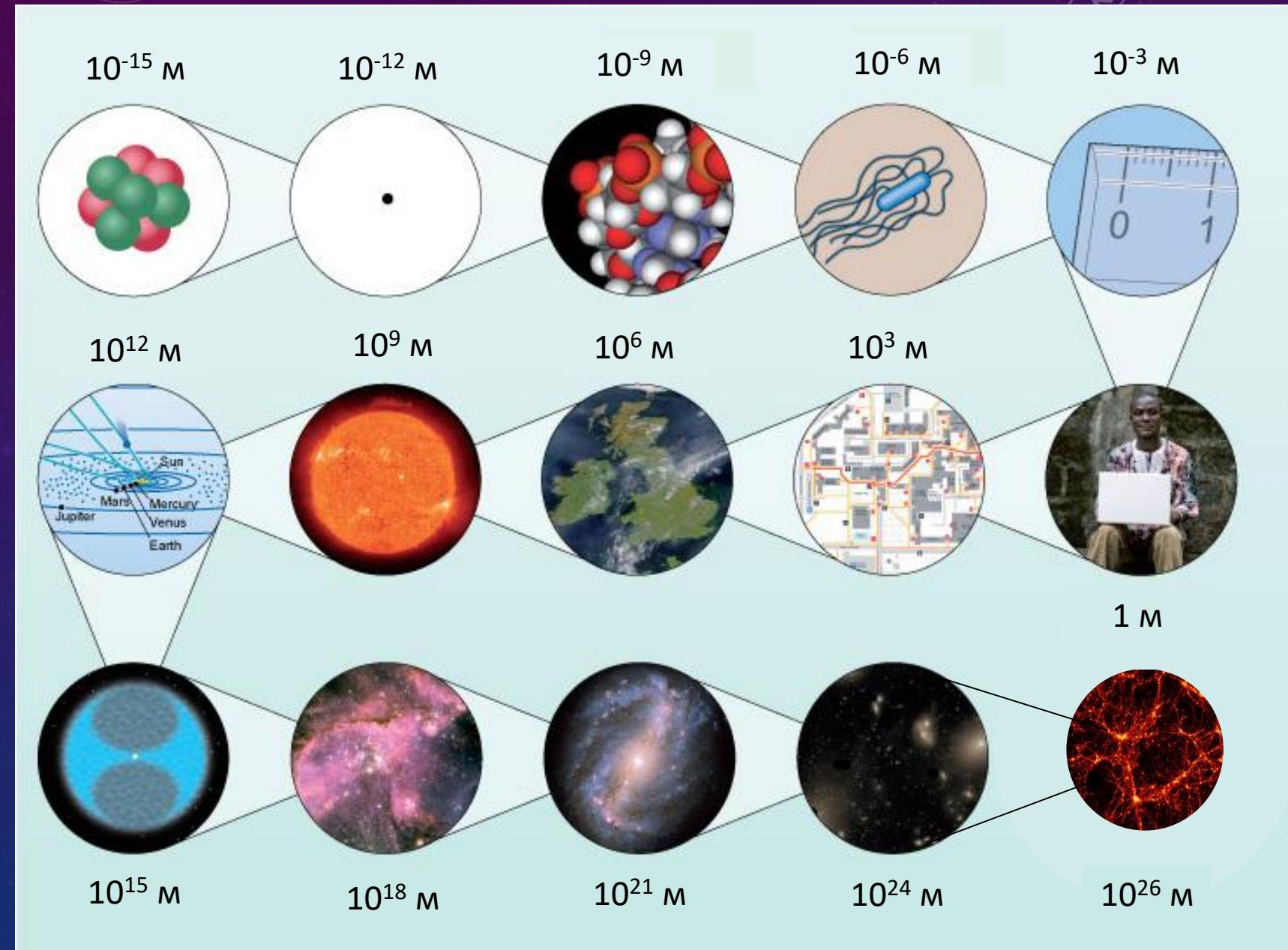
НЕ ВСЁ СВЕТИТ, НО...

- Излучение – единственный источник информации в наблюдательной астрофизике. Причём, наблюдатель не управляет исследуемым процессом.
- Излучение звезды позволяет узнать её положение в пространстве, размер, температуру, массу, химический состав, наличие у неё планетной системы и свойства этой системы...
- Черные дыры и темное вещество не излучают, но влияют на движение и излучение материи, которая с ними взаимодействует. По её излучению можно изучать эти невидимые объекты.
- Гравитационные волны, космические лучи и потоки нейтрино – это, строго говоря, тоже излучение ;-)

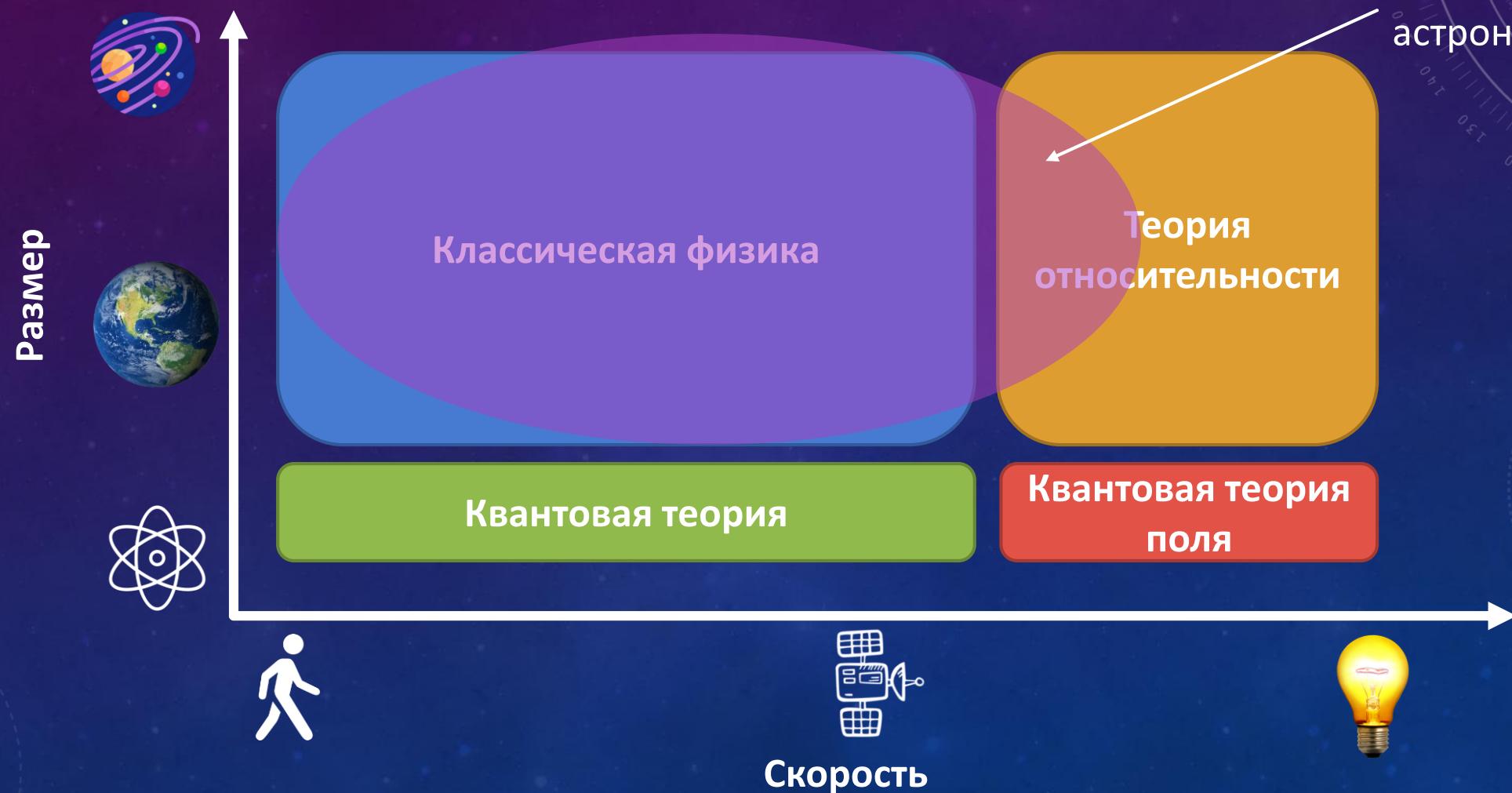


АСТРОМИР

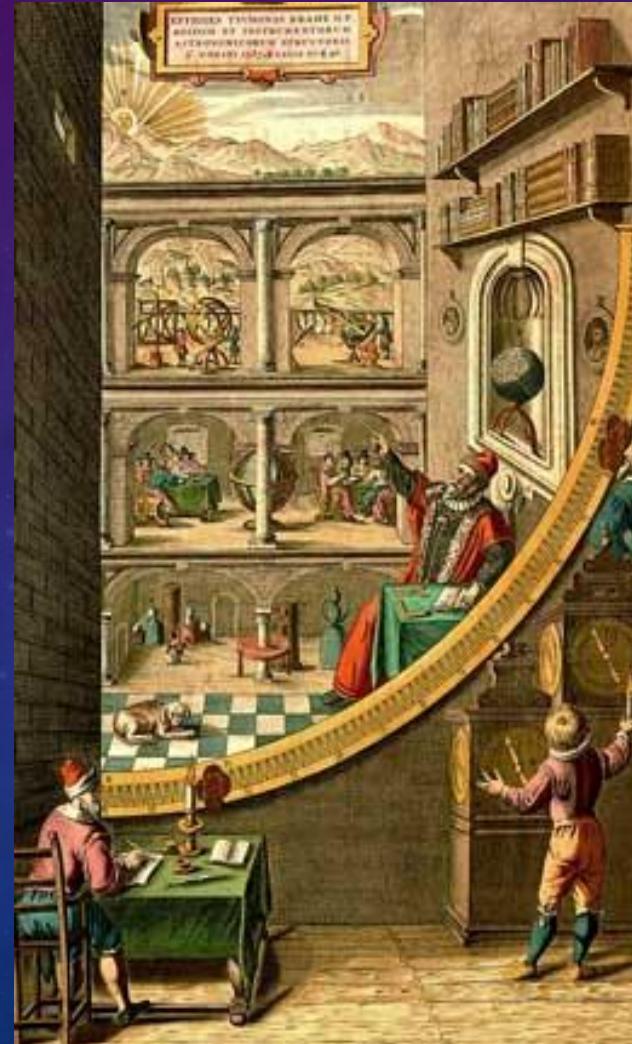
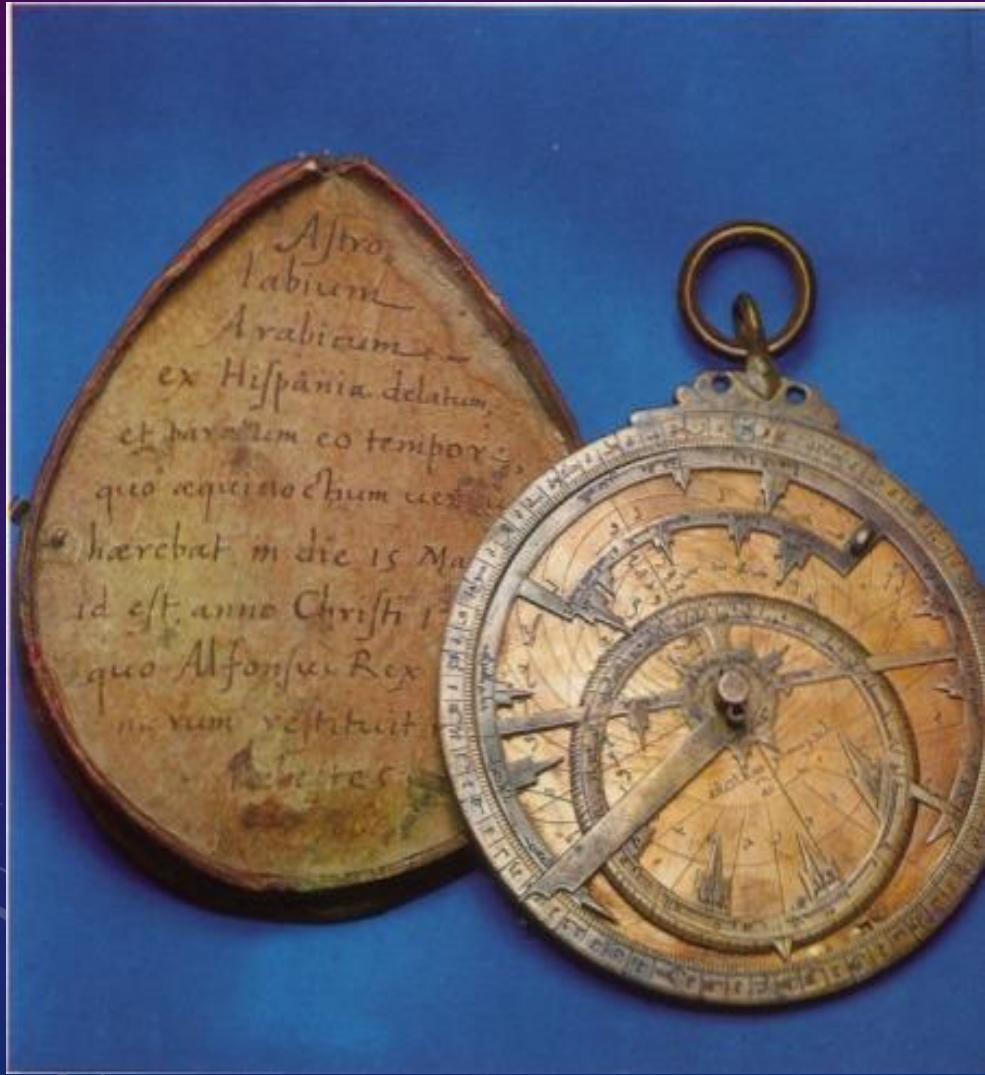
На самом деле,
масштабы нашего
мира начинаются
по крайней мере
с 10^{-35} метра....



ФИЗИКА, АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА



АСТРОНОМИЯ ДО ЭПОХИ ТЕЛЕСКОПОВ

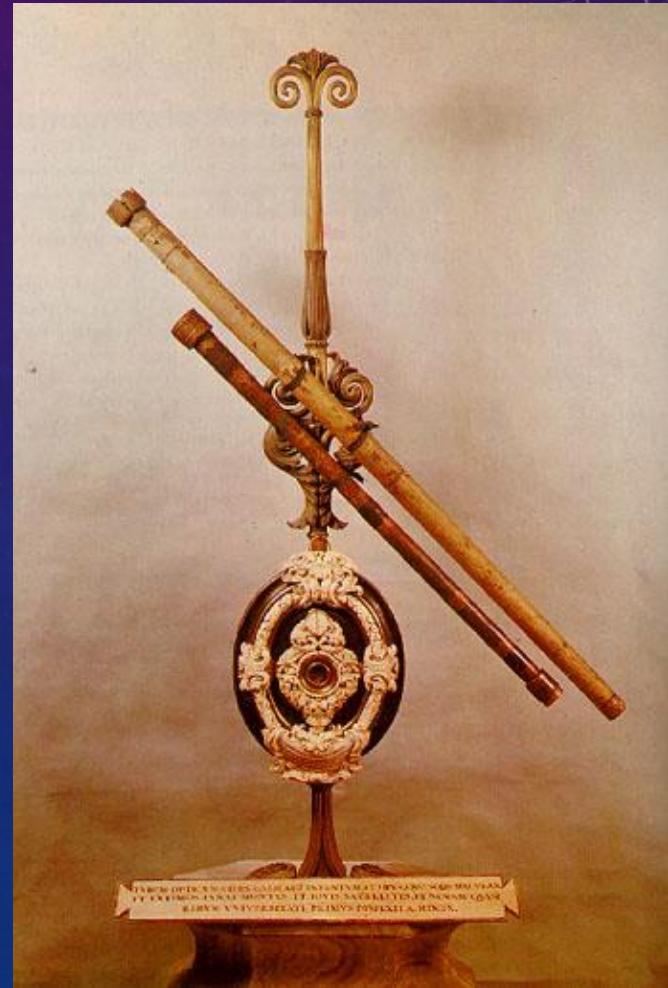


Измерения углов с помощью простейших приборов.

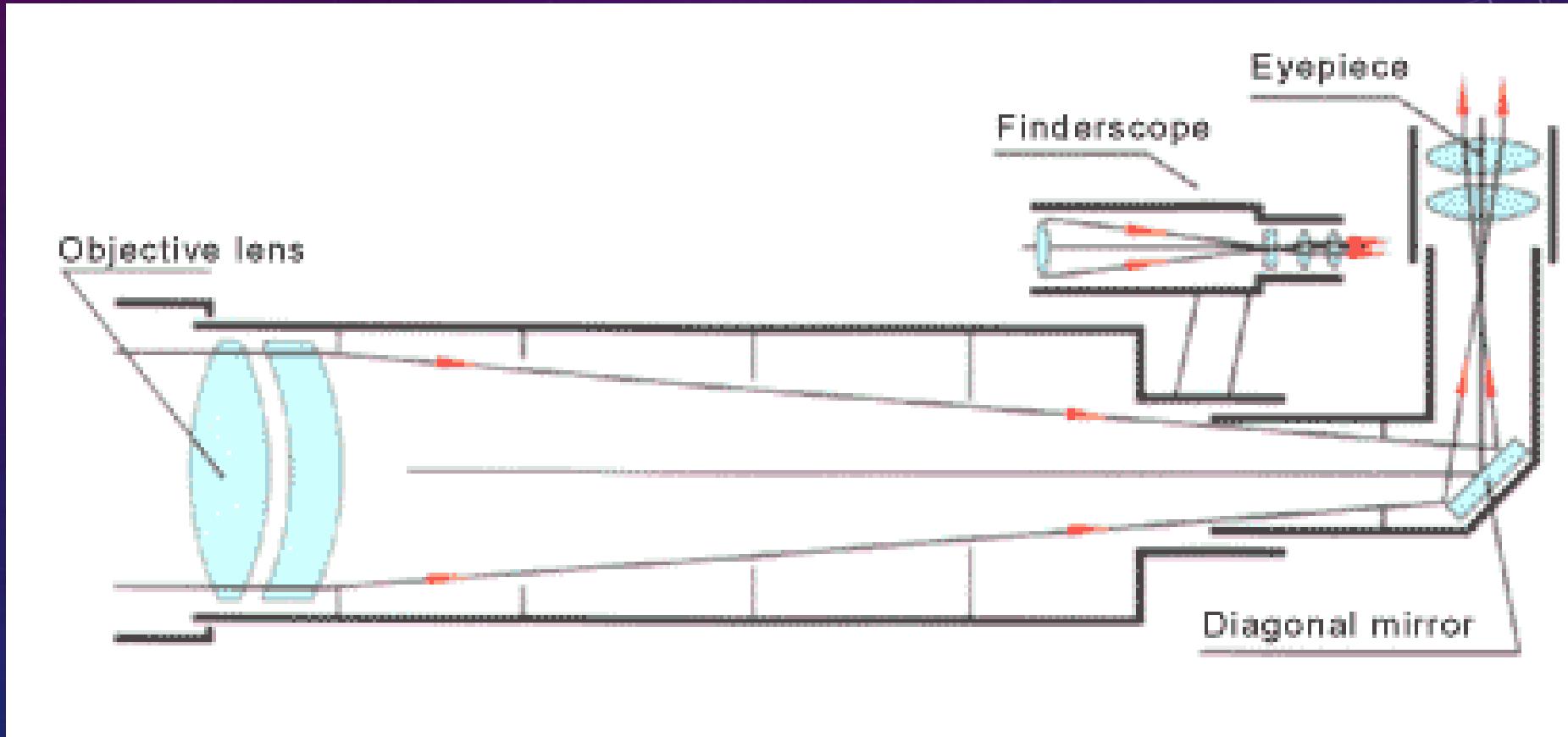
Определение относительных положений звезд и планет.

Ну и конечно же определение времени.

ПЕРВЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

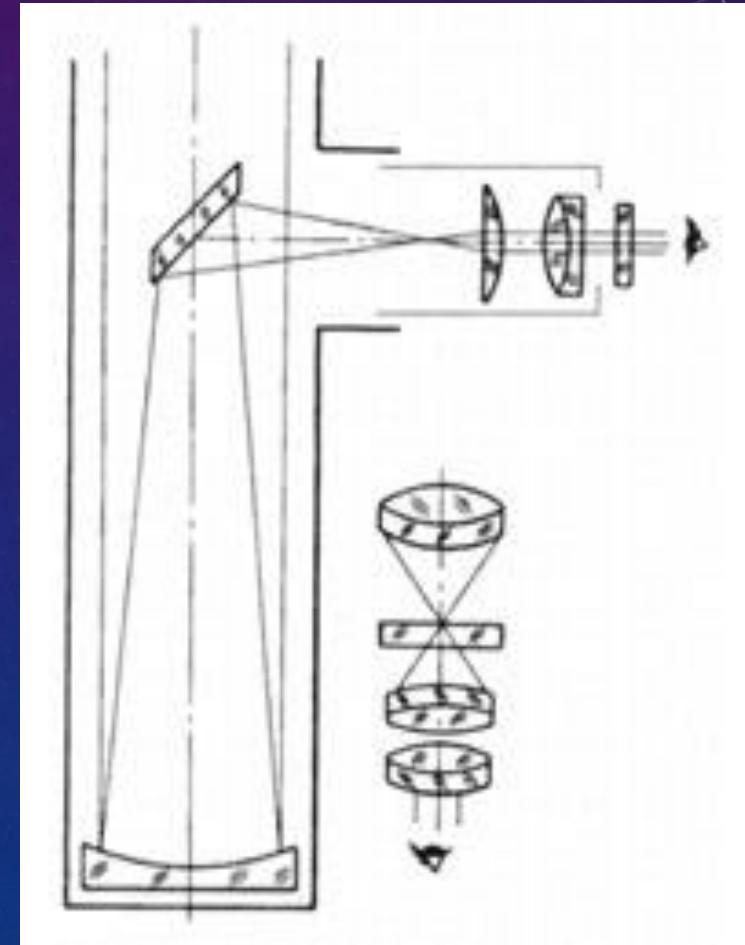


ТЕЛЕСКОПЫ-РЕФРАКТОРЫ



Объективом является собирающая линза (или система линз).

ТЕЛЕСКОПЫ-РЕФЛЕКТОРЫ

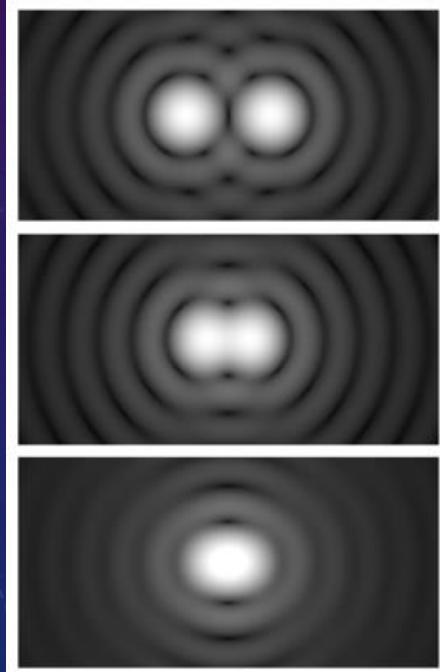


Объективом является вогнутое зеркало.

ЗАЧЕМ НУЖЕН ТЕЛЕСКОП?

Самое главное: чтобы собирать больше света!!!!

Чем больше удается собрать света – тем более слабые объекты мы увидим. Количество собираемого света тем больше, чем больше диаметра объектива.



Чтобы рассмотреть более мелкие детали.

Разрешающая способность телескопа тоже больше у телескопов с большим диаметром.

Диаметр зрачка глаза 5-8 мм.

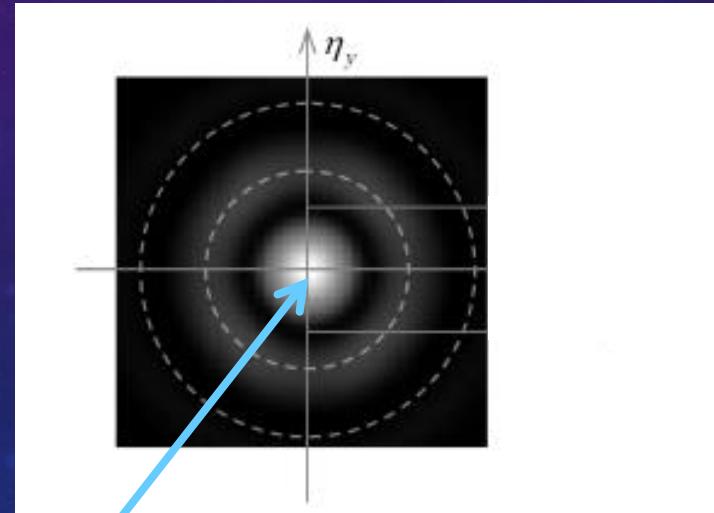
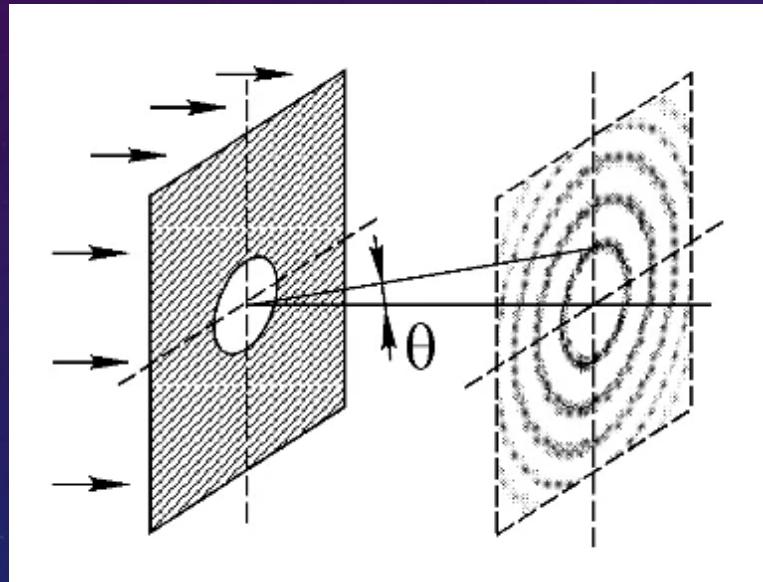
Первые телескопы – сантиметры.

Крупные современные телескопы – до 10 метров. Строящиеся 30-40 метров.

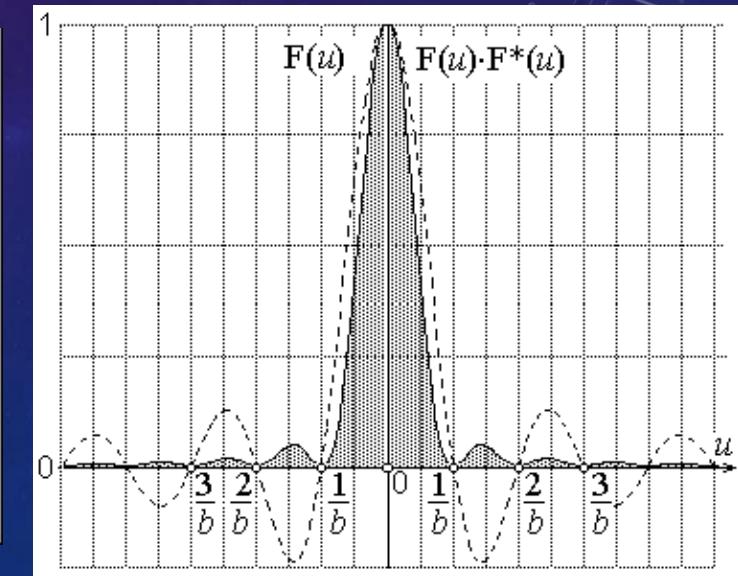
Проекты – до 100 метров!!!!

ДИФРАКЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

- Любой телескоп имеет конечные размеры!
- Изображение, которое строит телескоп, есть результат дифракции излучения на входной апертуре.



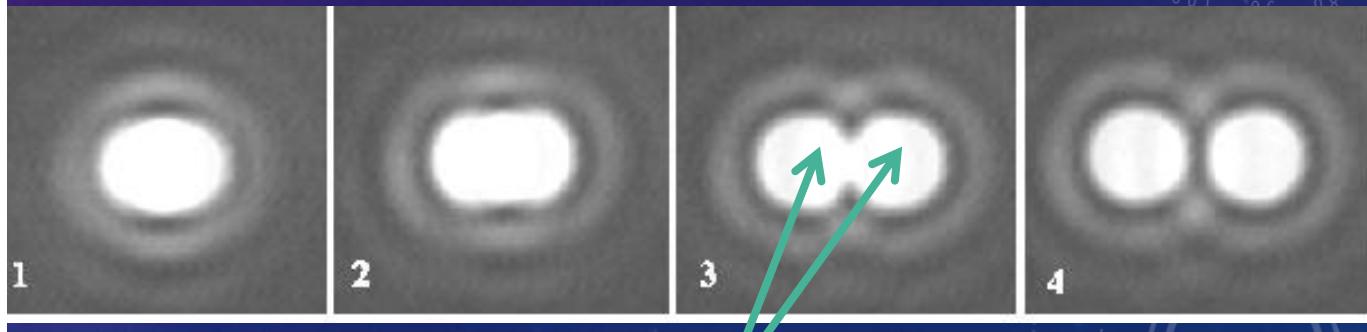
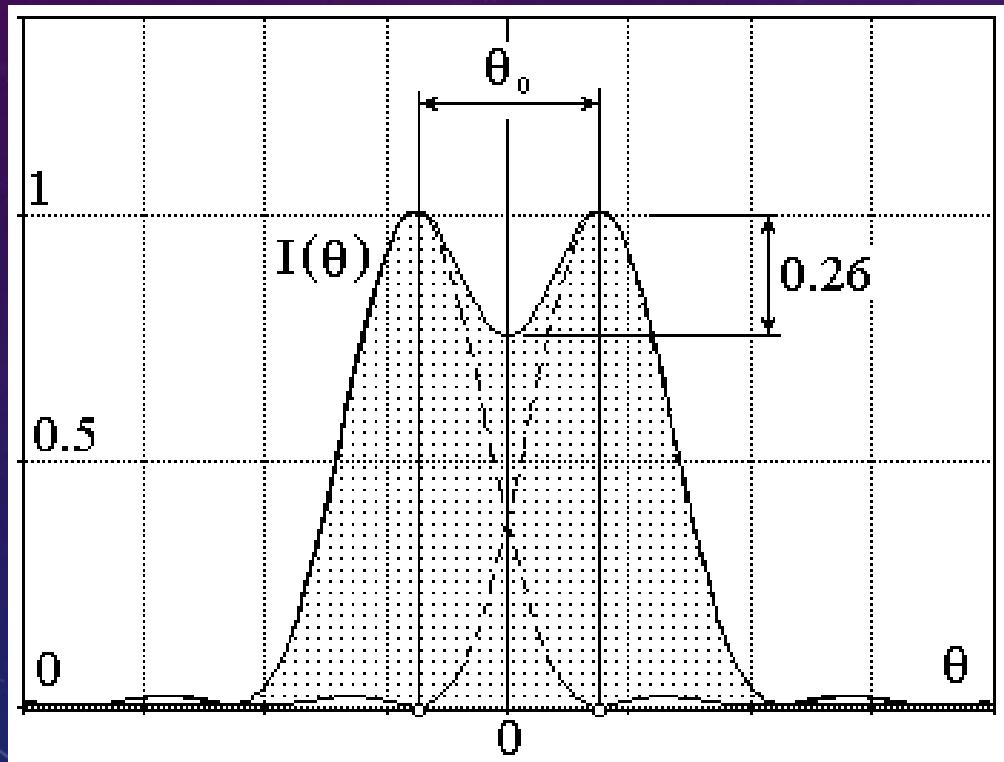
В центральном максимуме
содержится 83.8% всей энергии.



$$F(u) \propto \left[\frac{\sin(\pi bu)}{\pi bu} \right]^2$$

КРИТЕРИЙ РЭЛЕЯ

- Два точечных источника разрешаются, если максимум диска Эйри одного источника лежит дальше первого минимума второго источника.



Диск Эйри



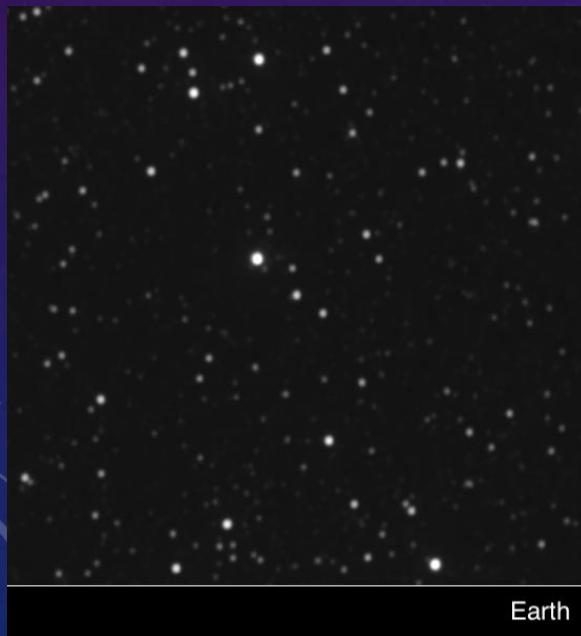
$$d_e = \underbrace{2.44 \frac{\lambda}{D}}_{\theta_e} \times F$$

фокусное расстояние

Длина волны λ	Диаметр апертуры D	Фокусное расстояние F	Угловое разрешение θ_e	Линейный размер пятна Эйри на фокальной плоскости
550 нм	6 м	24 м	0.05"	5.6 мкм
550 нм	0.65 м	35 м	0.42"	72 мкм
21 см	64 м	27.4 м	27'	22 см

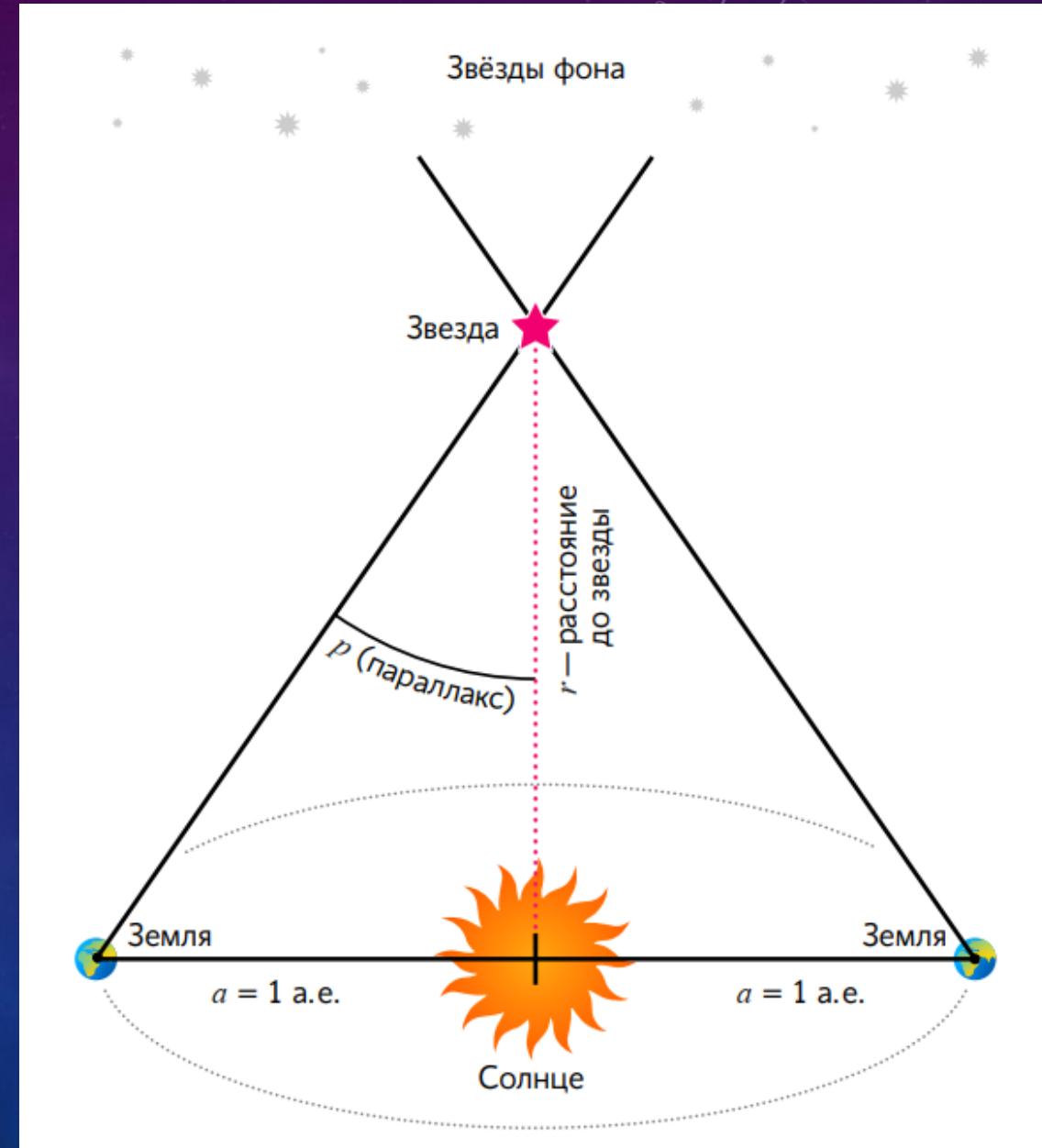
ПАРАЛЛАКС

Парсек (параллакс-секунда): расстояние, при котором большая полуось земной орбиты (1 а. е. \approx 150 млн. км.) видна под углом в 1''.

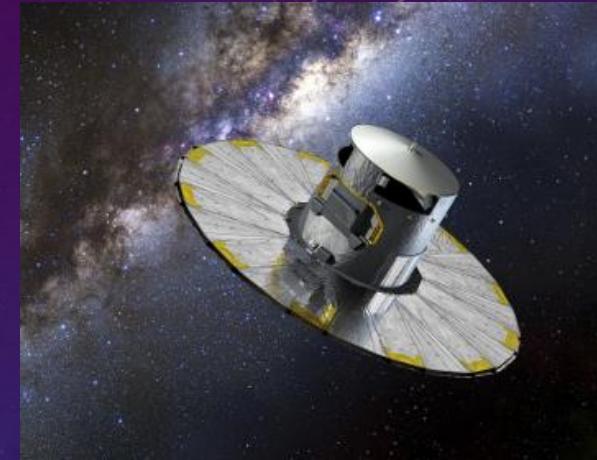
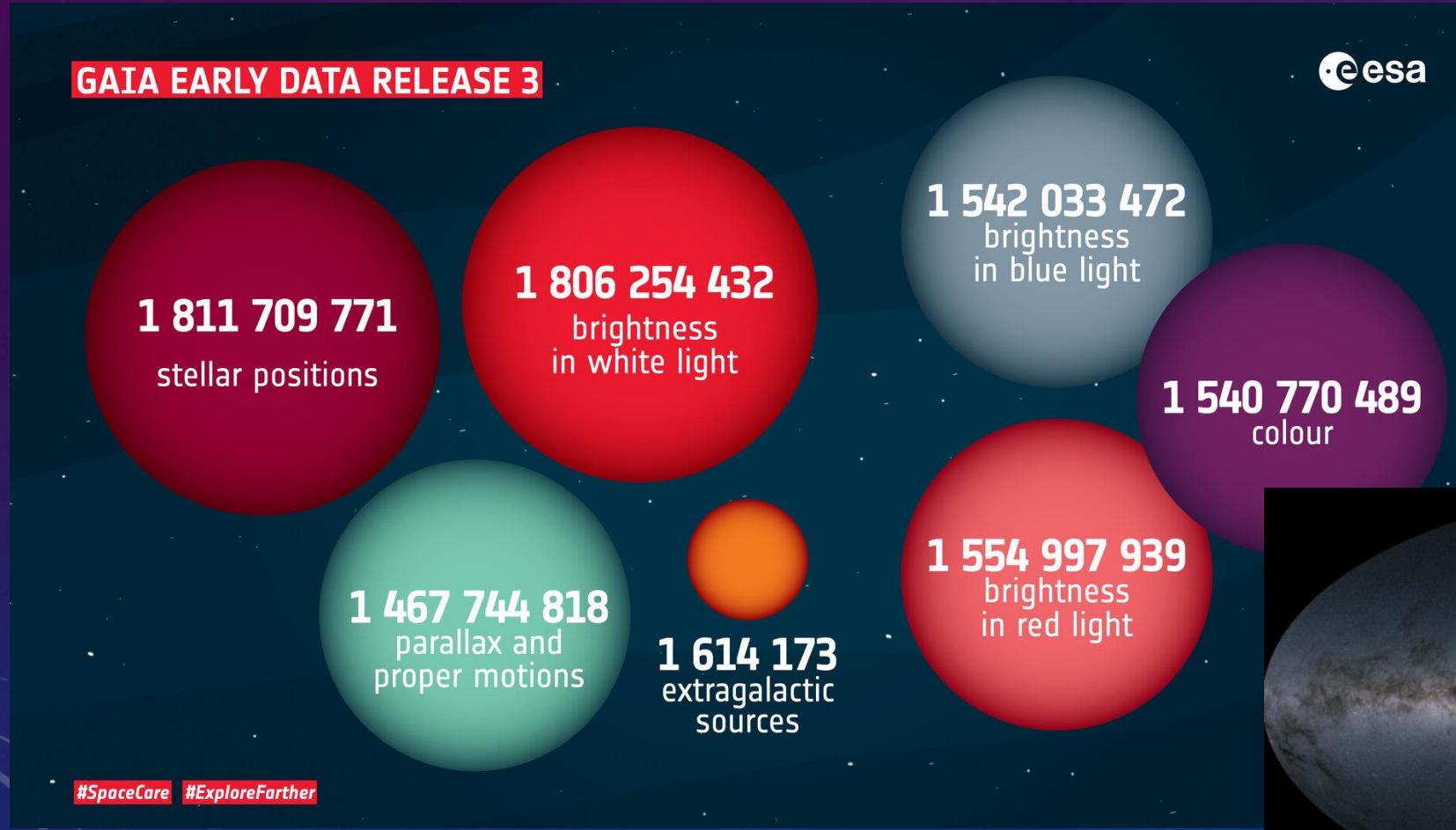


$$1 \text{ пк} \approx 3.08 \times 10^{18} \text{ см} \approx 206\,264,8 \text{ а. е.} \approx 3.26 \text{ св. года}$$

Проксима Центавра
($d = 1.3$ пк).
Вид с Земли и с
орбиты Плутона.



GAIA: СОВРЕМЕННАЯ АСТРОМЕТРИЯ

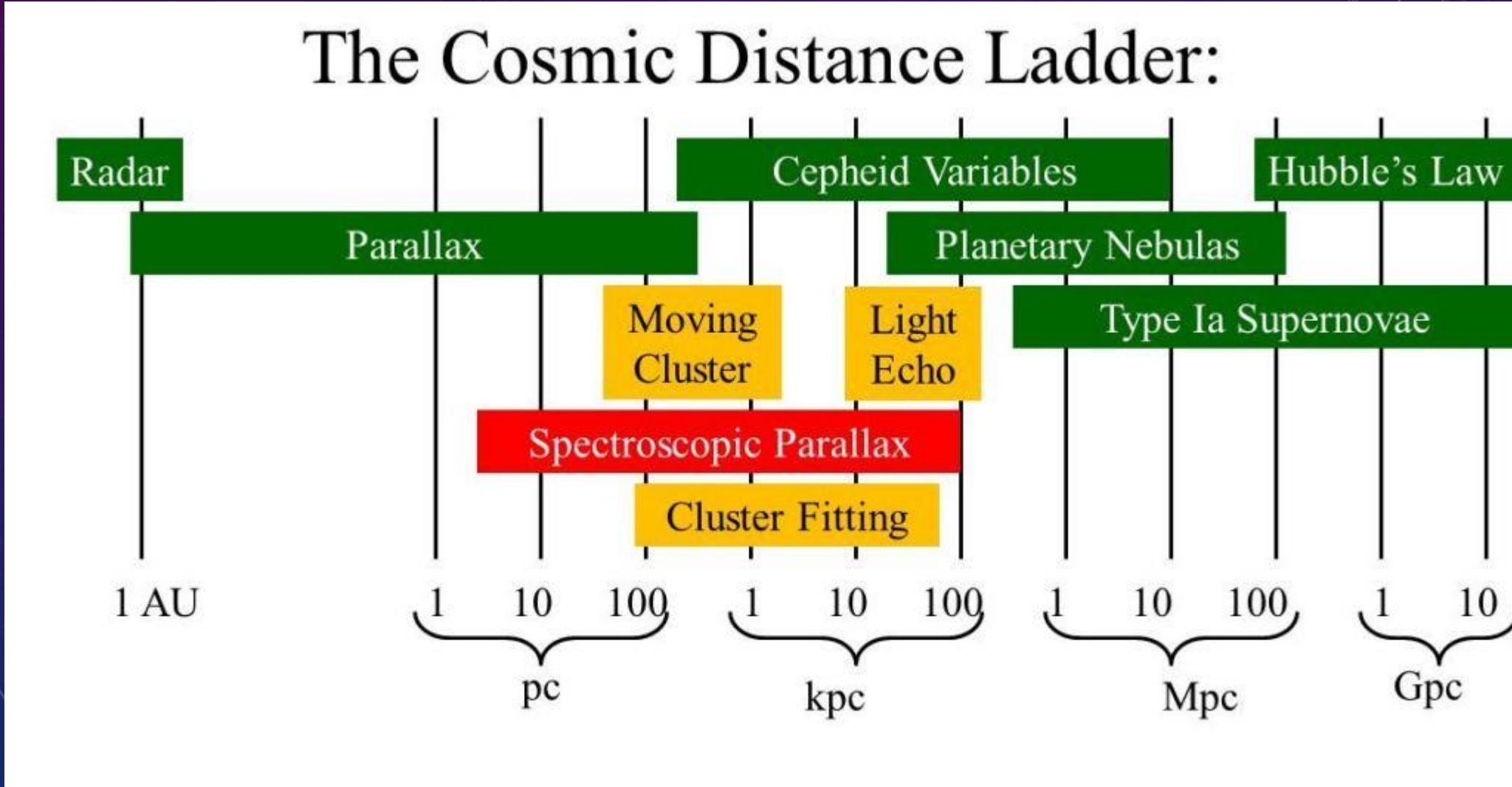


Data Release 3: 2020-2022

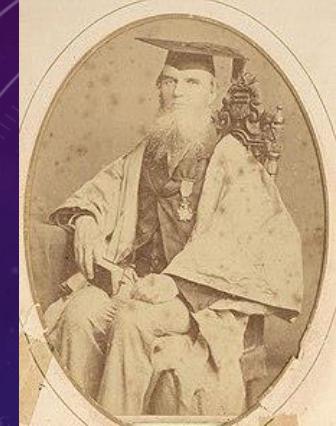
100% звёзд в пределах
100 парсек

ЛЕСТНИЦА РАССТОЯНИЙ

The Cosmic Distance Ladder:



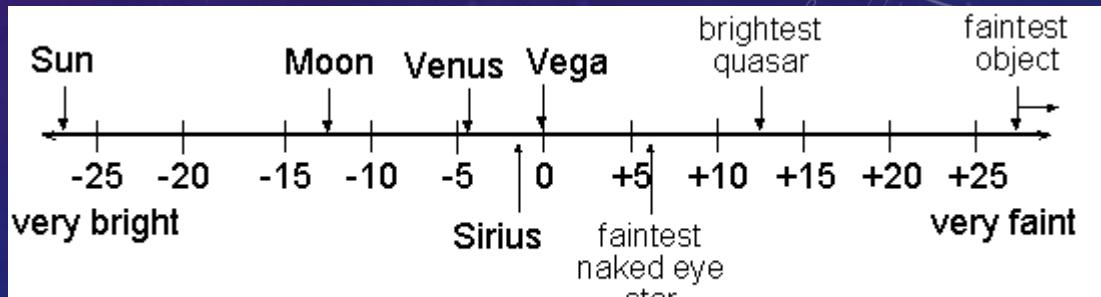
Норман Погсон
1829-1891



ЗВЁЗДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

$$m_1 - m_0 = -2.5 \lg \frac{E_1}{E_0} \text{ -- формула Погсона}$$

$E \left[\frac{\text{Дж}}{\text{М}^2 \cdot \text{сек}} \right]$ -- освещенность которую создаёт звезда на поверхности Земли.



Apparent brightnesses of some objects in the magnitude system.

$$E(0^m) \approx 2.5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Дж}}{\text{М}^2 \cdot \text{сек}} \text{ или } 10^6 \frac{\text{кв}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$$

в «визуальном» диапазоне (500-600 нм).

$$m = m_0 - 2.5 \log \int_0^{\infty} F_{\lambda} \cdot \varphi(\lambda) d\lambda$$

ПОКАЗАТЕЛЬ ЦВЕТА

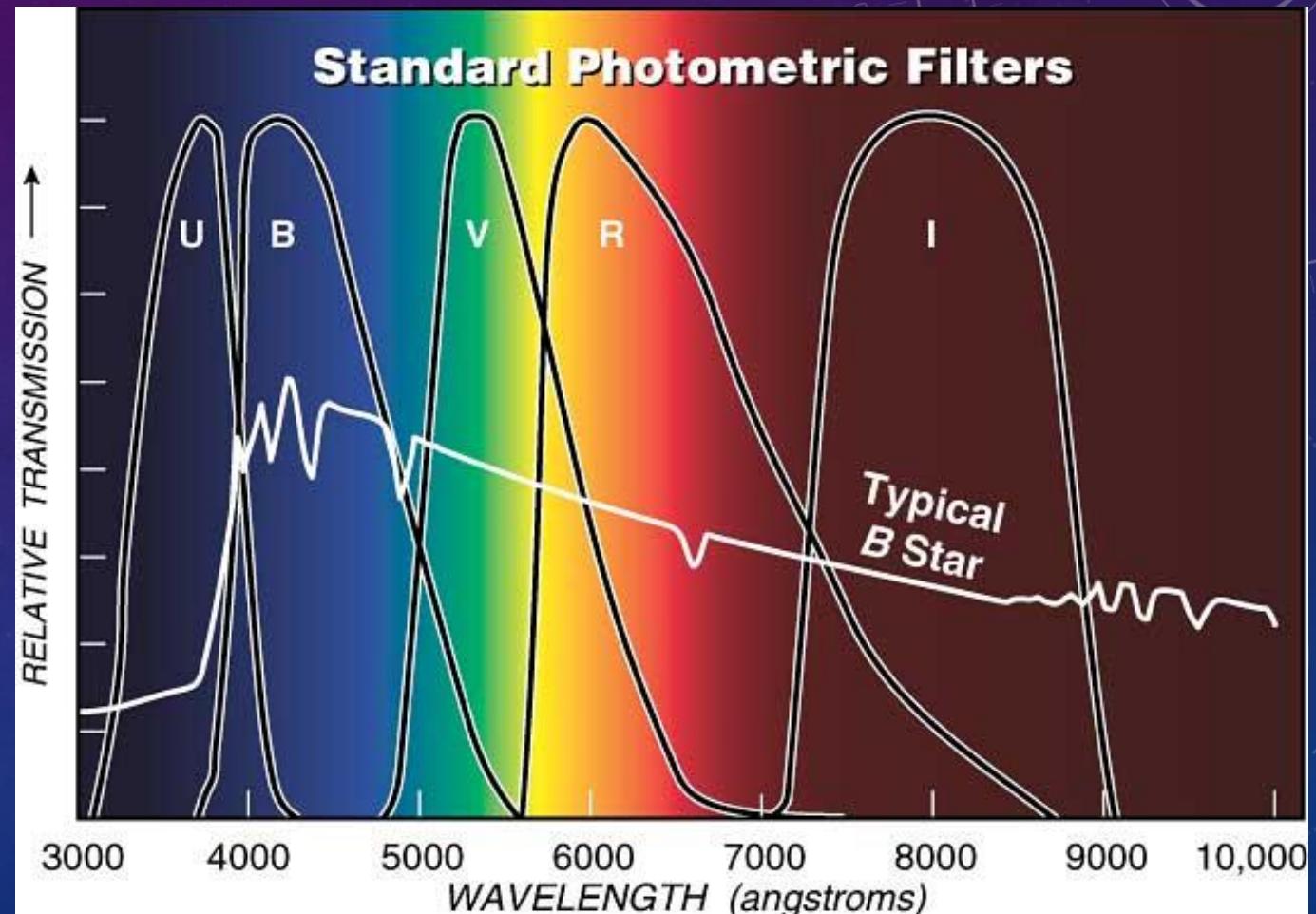
Звездная величина зависит от используемого диапазона спектра. Есть несколько фотометрических шкал.

Разность звездных величин объекта в разных диапазонах является грубой характеристикой его спектра.

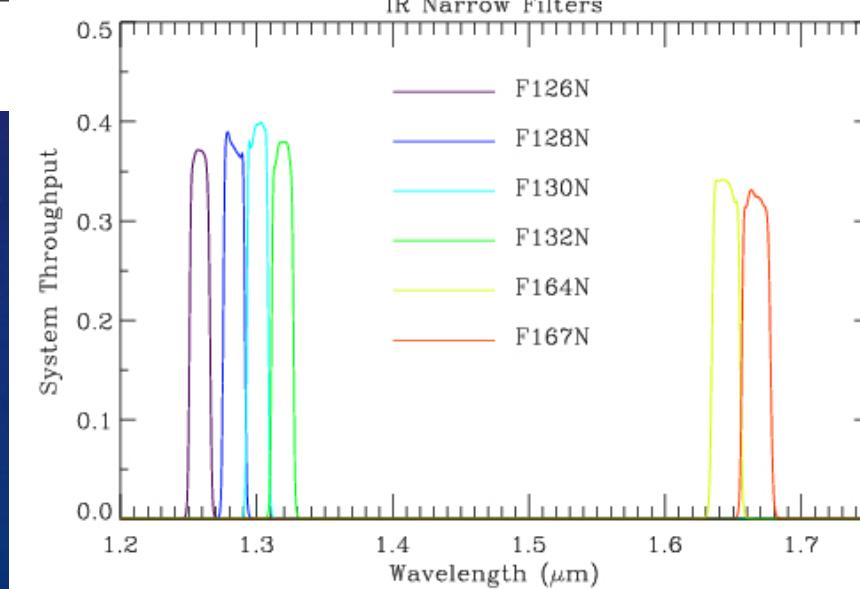
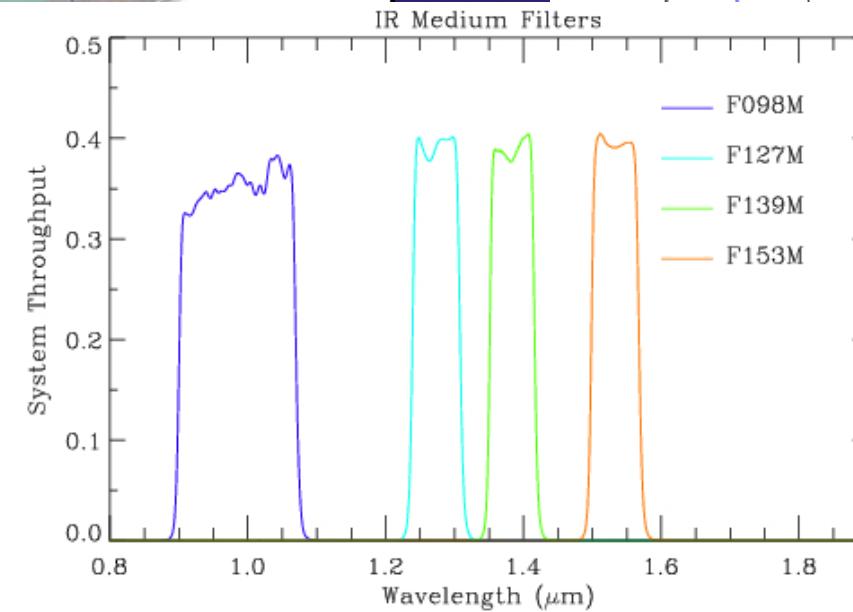
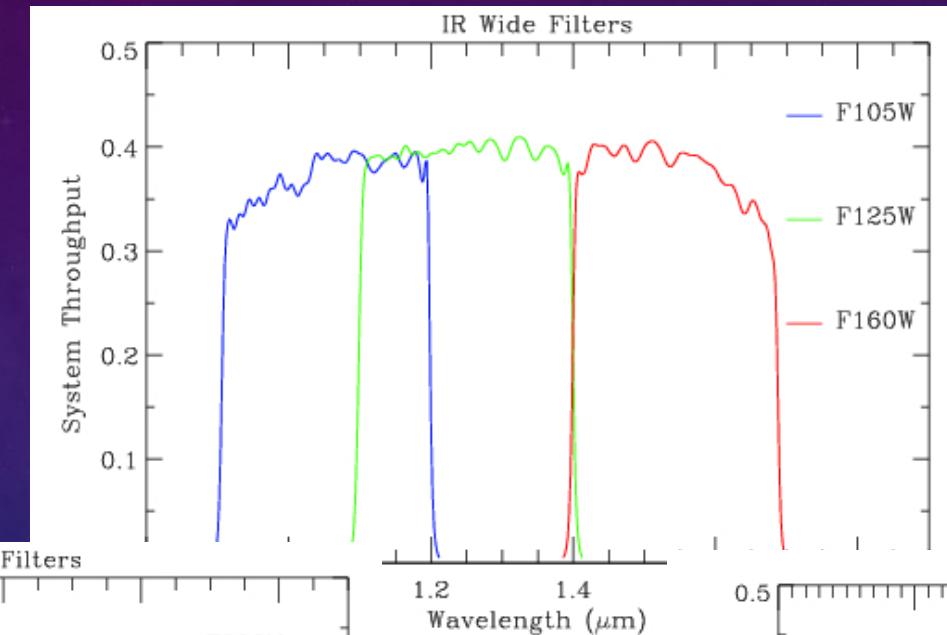
$B-V < 0$: голубая звезда

$B-V > 0$: красная звезда

$U=B=V=R=\dots$ -- белая звезда.



ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕЛЕСКОПА ХАББЛА

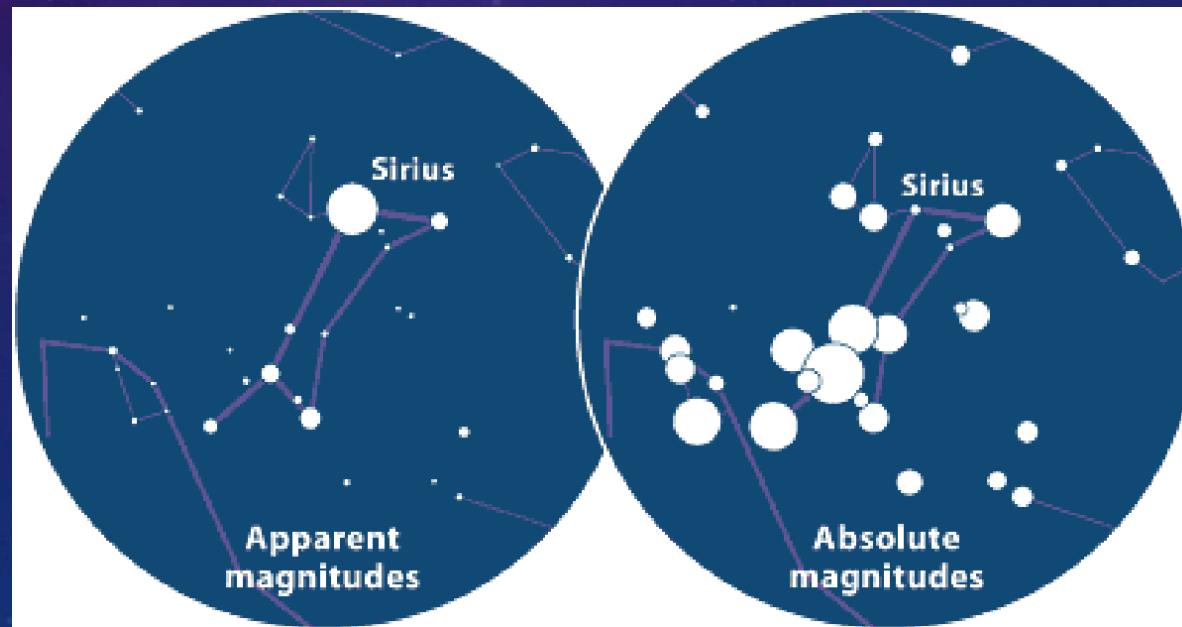


АБСОЛЮТНАЯ ЗВЁЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА

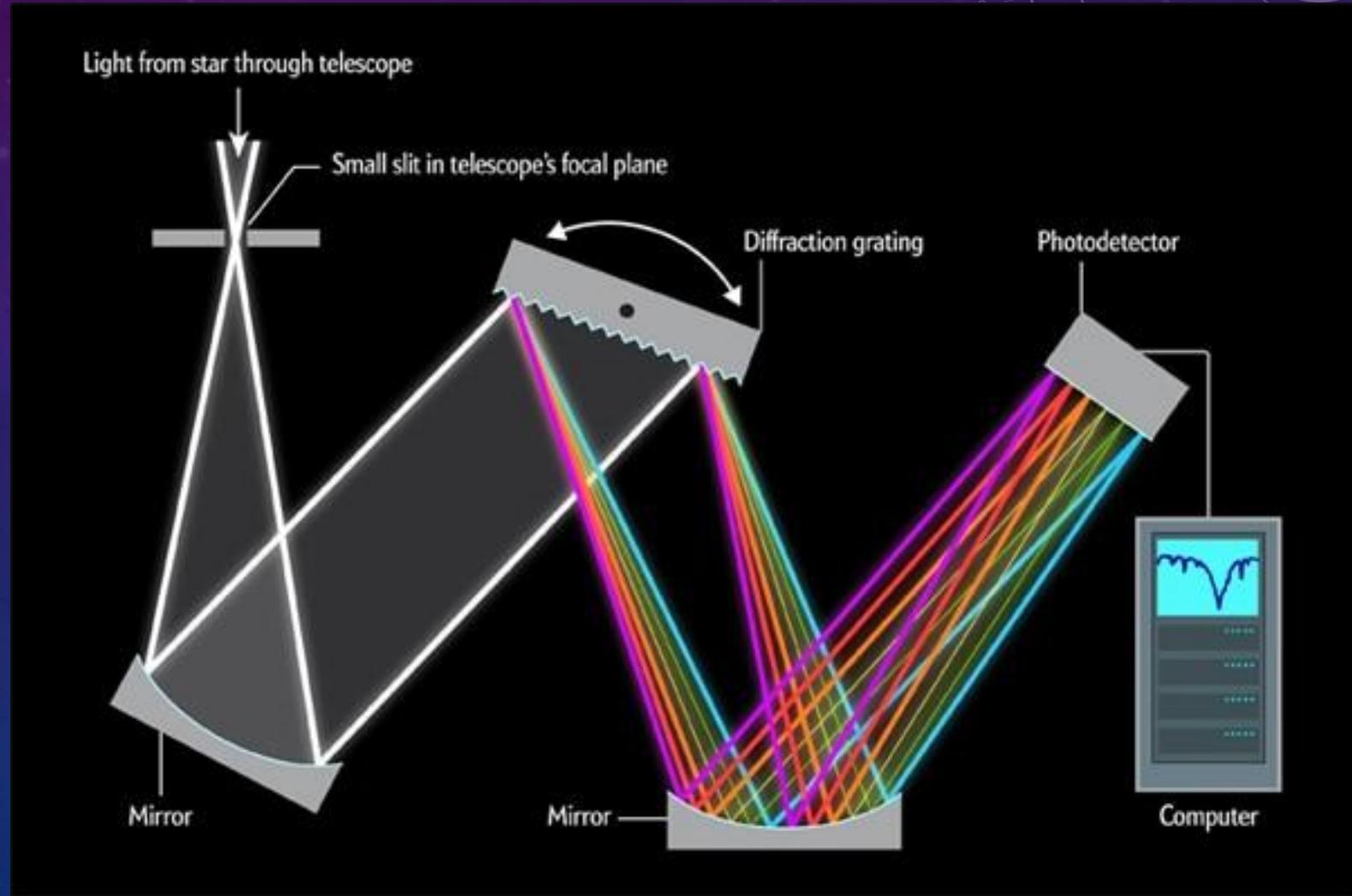
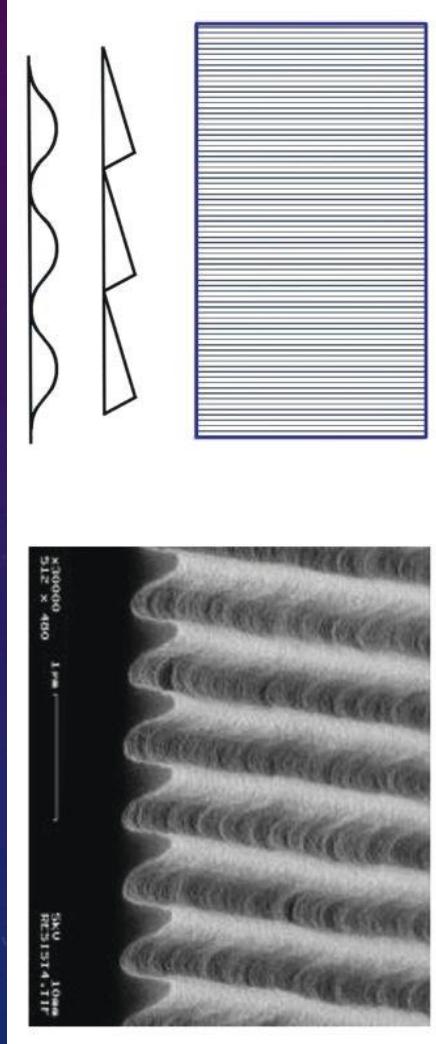
- Абсолютная звёздная величина – такая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы располагалась на расстоянии ровно в 10 пк от наблюдателя.

$$M = m - 5 \log d_{\text{пк}} + 5 = -2.5 \log L_{\text{Вт}} + 71.197$$

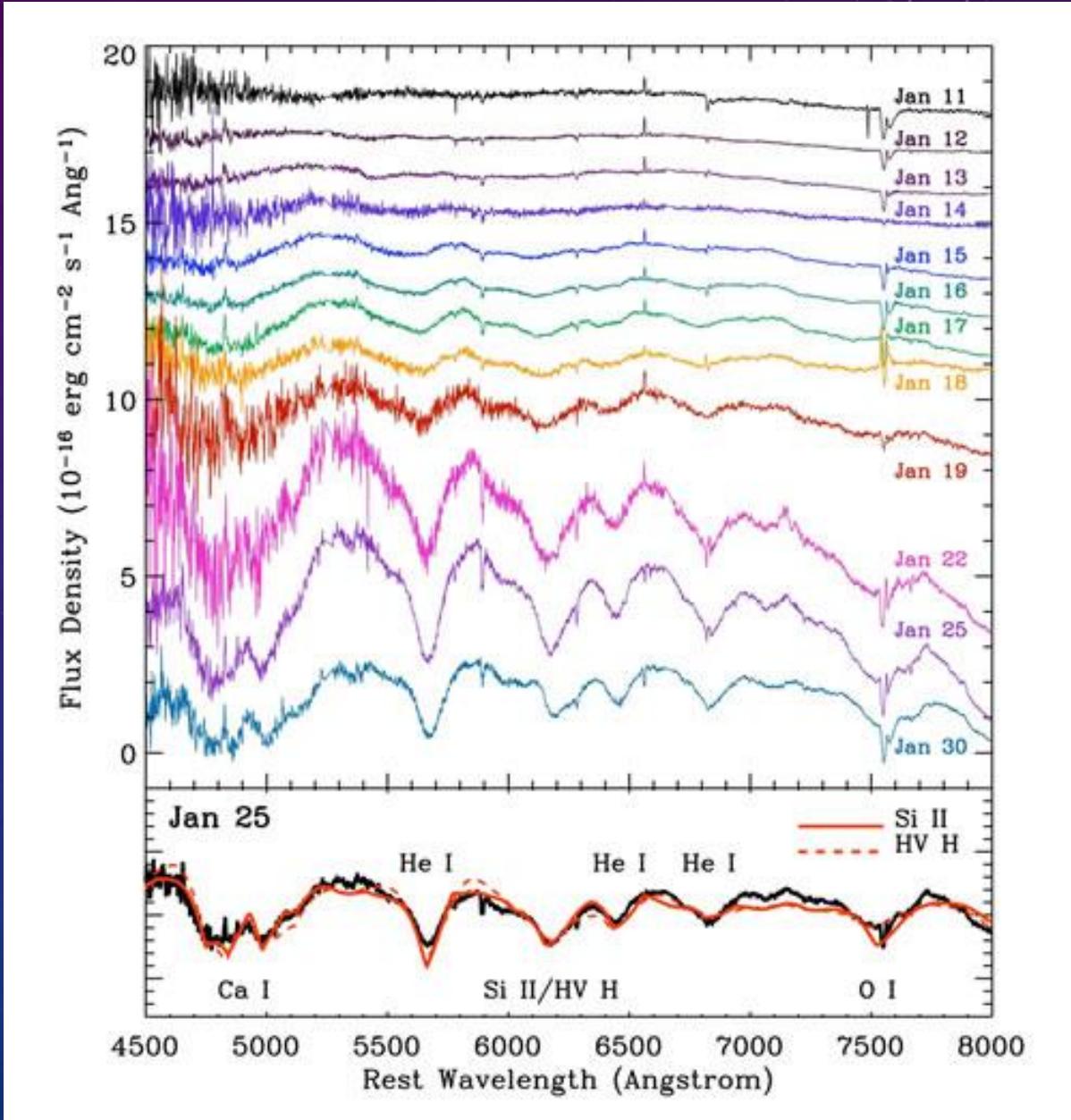
$M_{\odot} = +4.79^m$ -- *болометрическая* абсолютная величина (то есть измеренная не в каком-то фильтре, а по всему спектру целиком)



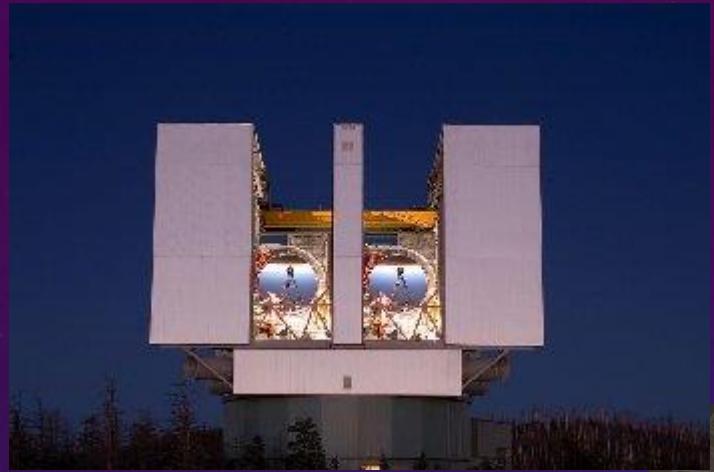
СПЕКТРОСКОПИЯ – САМЫЙ ИНФОРМАТИВНЫЙ МЕТОД АСТРОНОМИИ



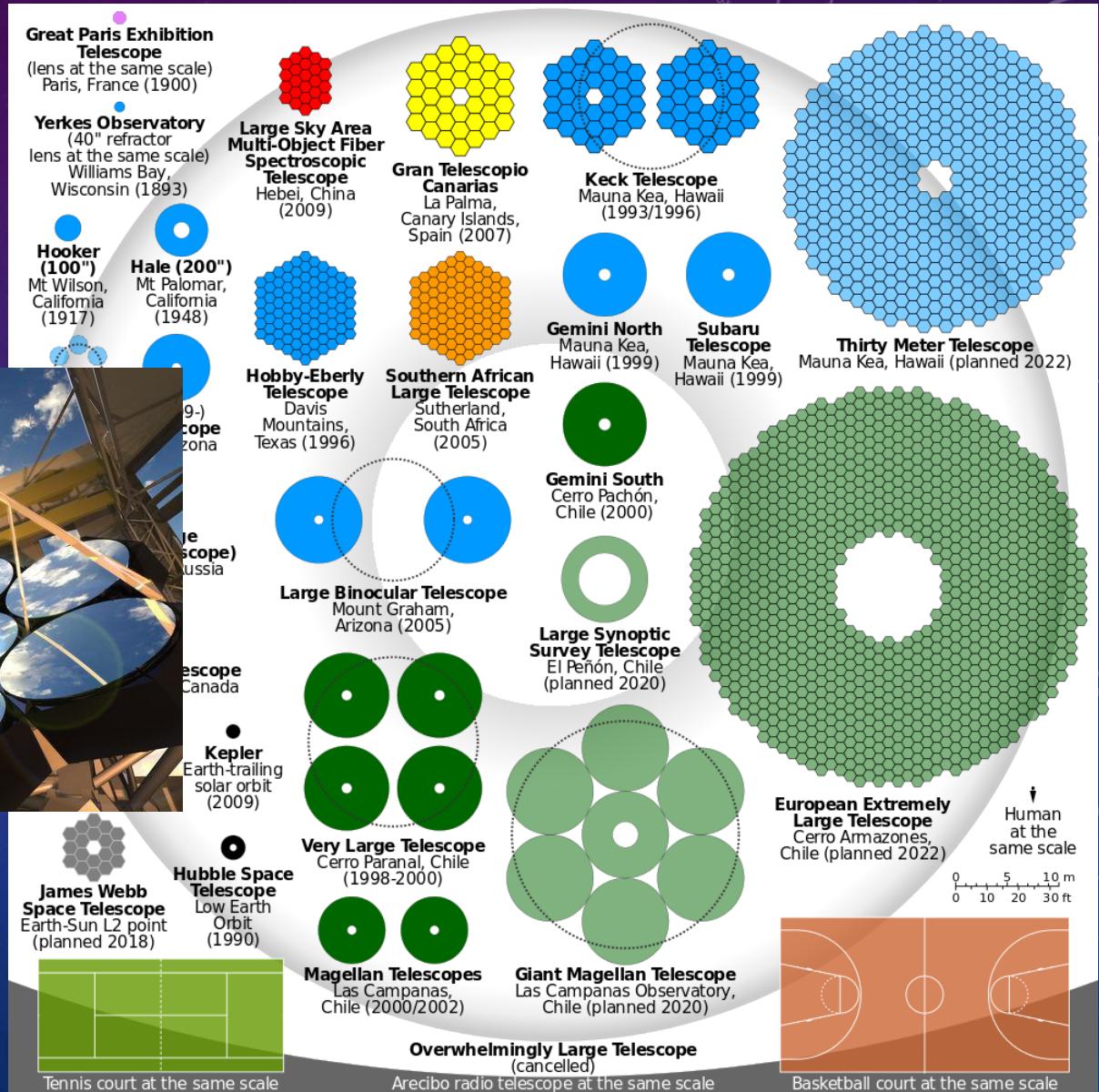
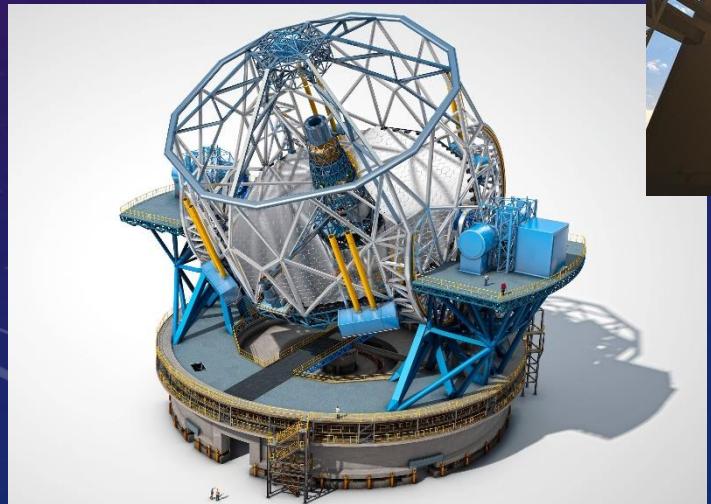
СПЕКТР СВЕРХНОВОЙ



БОЛЬШИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

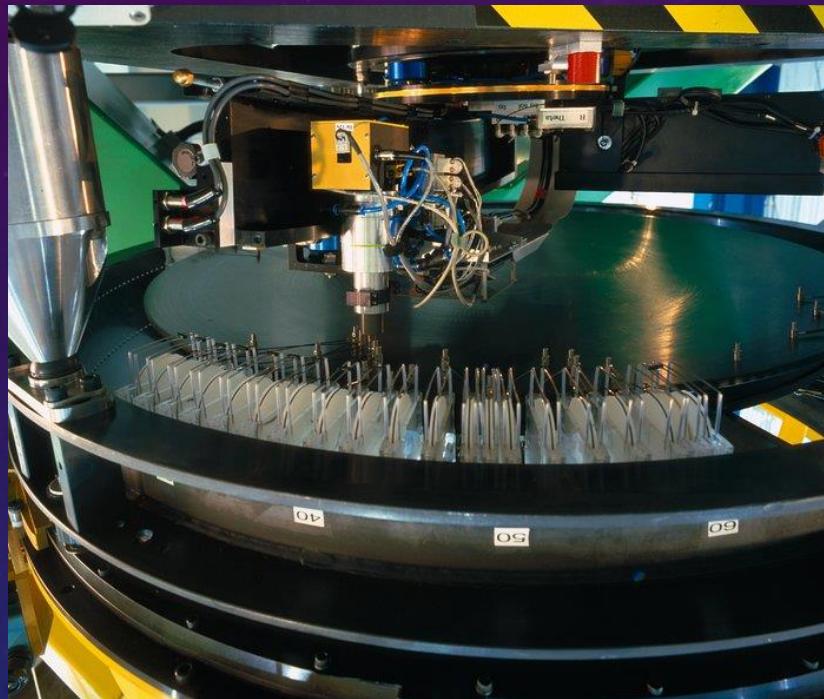


8.5 м – самые большие
цельные зеркала.
Более крупные – сегменты.



АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

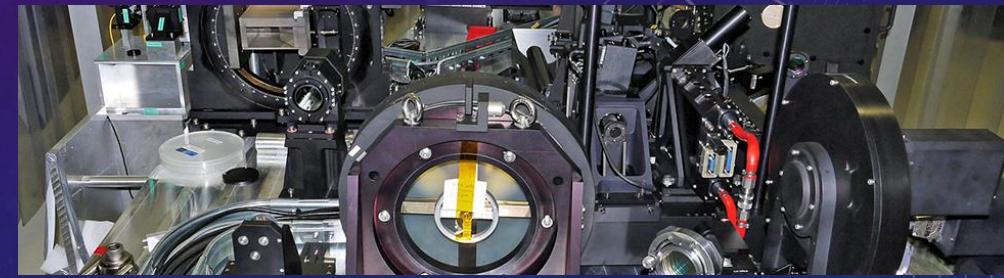
На VLT работает около 20 приборов.



FLAMES — Fibre Large Array
Multi Element Spectrograph

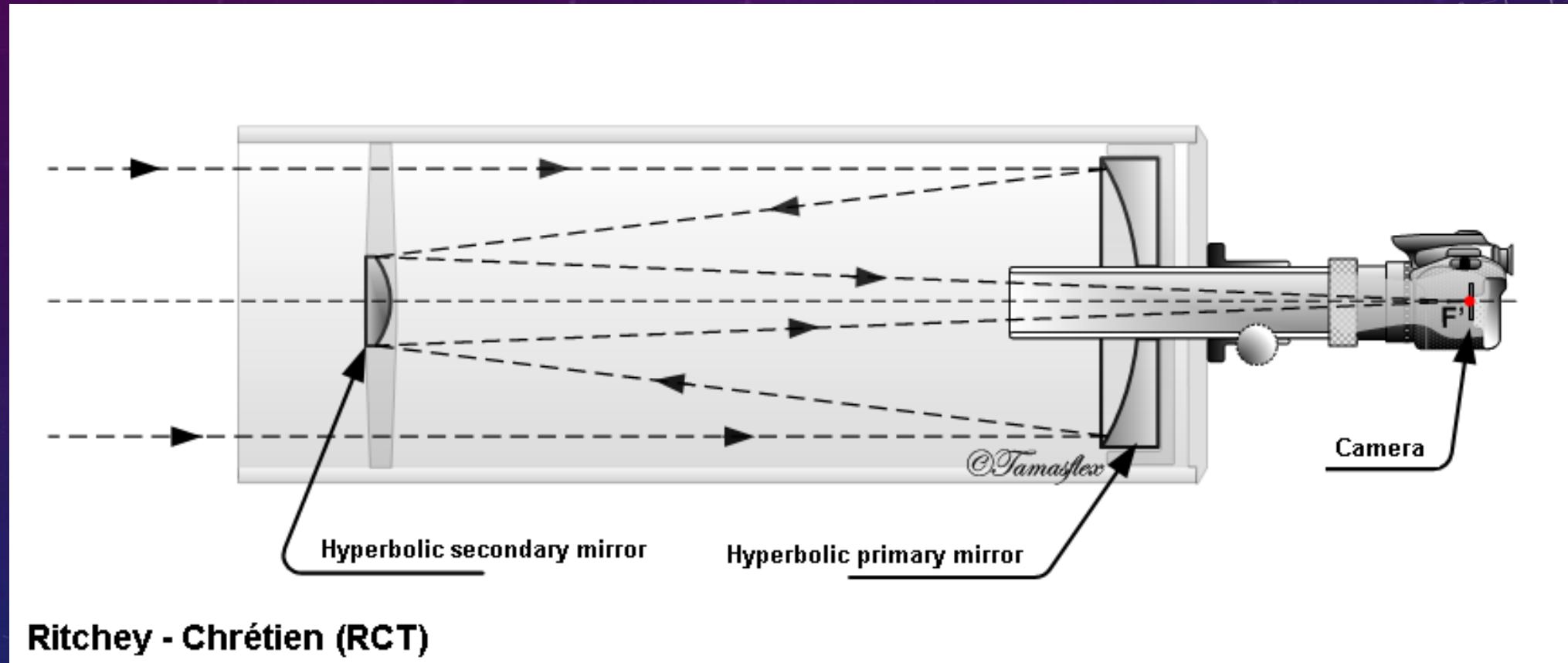


FORS 1 and FORS 2
FOocal Reducer and low dispersion Spectrograph



SPHERE - Spectro-Polarimetric
High-contrast Exoplanet REsearch instrument

СИСТЕМА РИЧИ-КРЕТЬЕНА

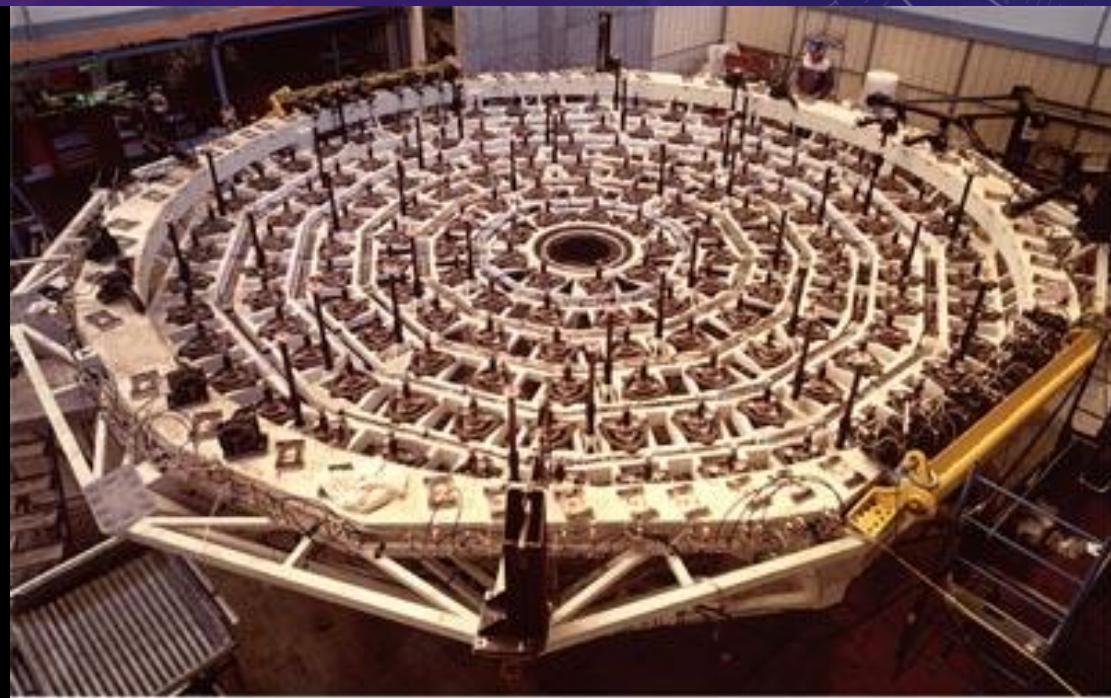
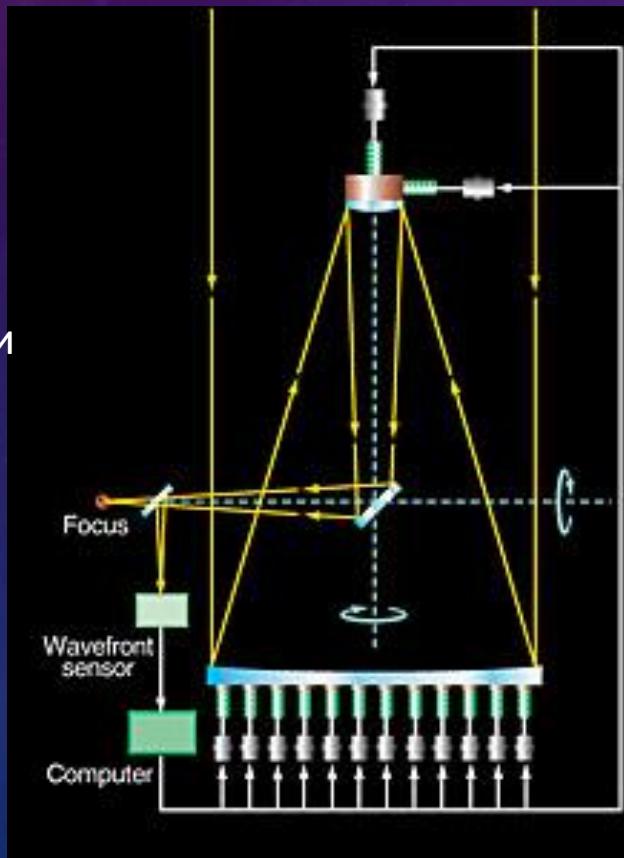


Такая схема позволяет делать светосильные инструменты

АКТИВНАЯ ОПТИКА

Изменение параметров главного зеркала с частотой менее 1 Гц для компенсации различных изменений его формы.

Еще проще работать
с сегментированными
зеркалами



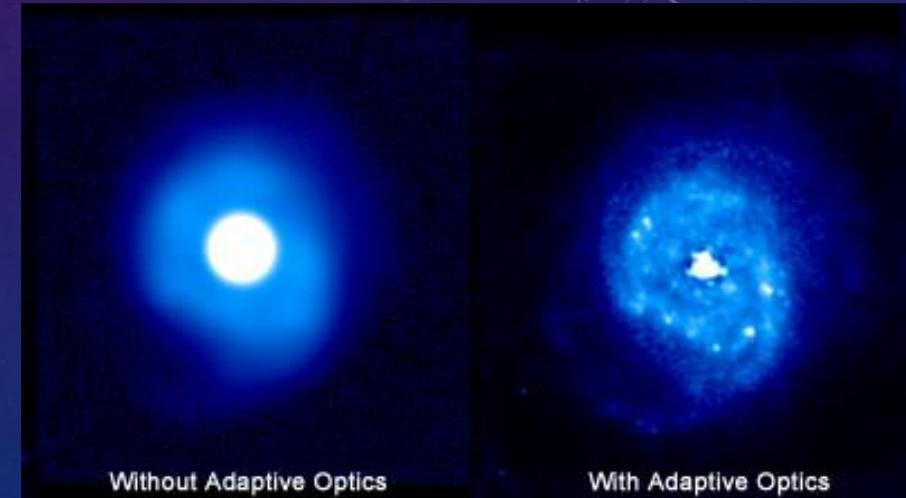
Active Mirror Supports in VLT M1 Cell

ESO PR Photo-34a/99 (13 August 1999)

© European Southern Observatory



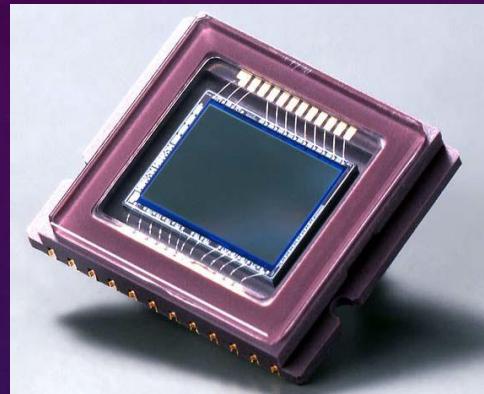
АДАПТИВНАЯ ОПТИКА



Without Adaptive Optics

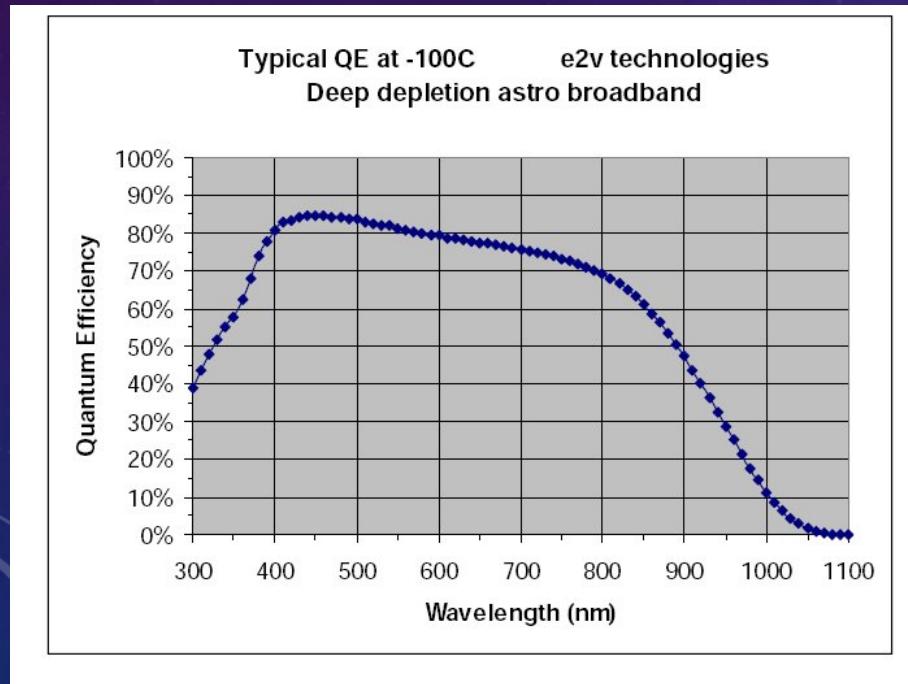
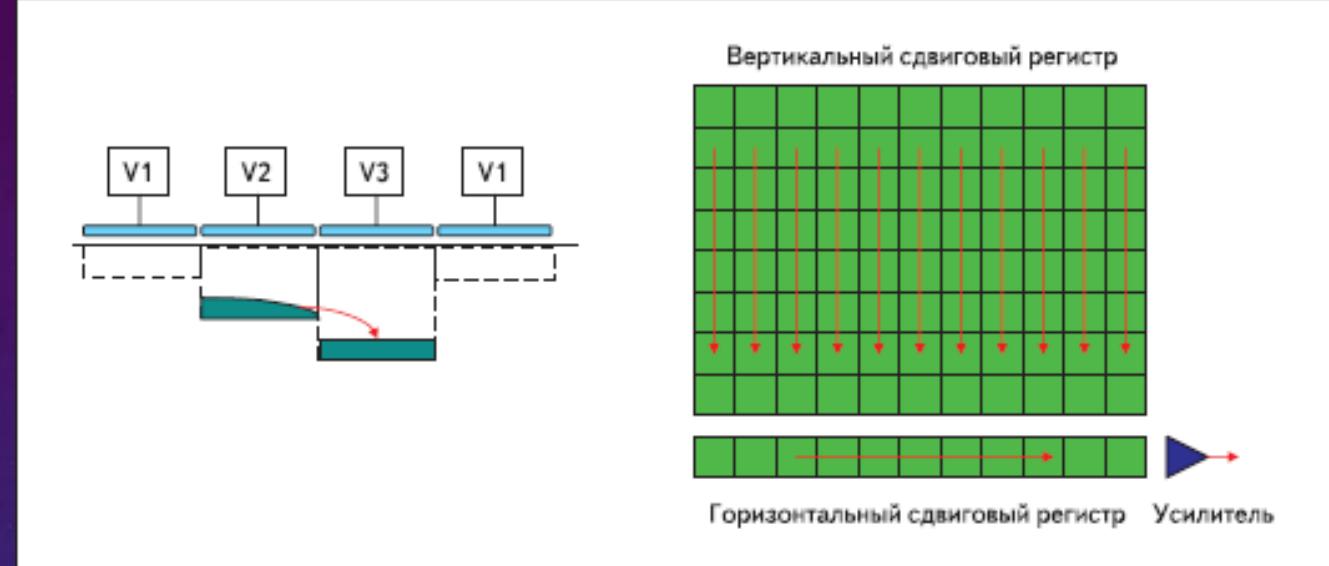
With Adaptive Optics

ДЕТЕКТОРЫ



ПЗС (CCD)

SiO₂



Высокая квантовая эффективность
Линейность
Экспозиции от 0.1 с до 10⁴ с

Но также:

КМОП (CMOS)
ФЭУ
Координатно-чувствительный детектор

ТЕЛЕСКОПЫ-РОБОТЫ И ОБЗОРЫ НЕБА



Sloan digital sky survey

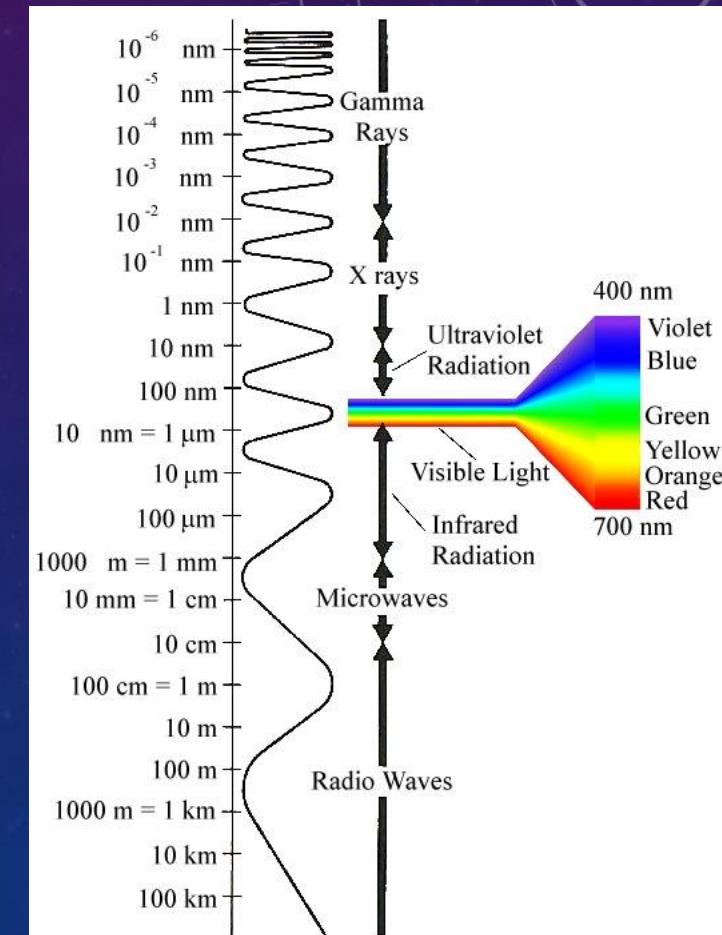


Liverpool Telescope (2m)

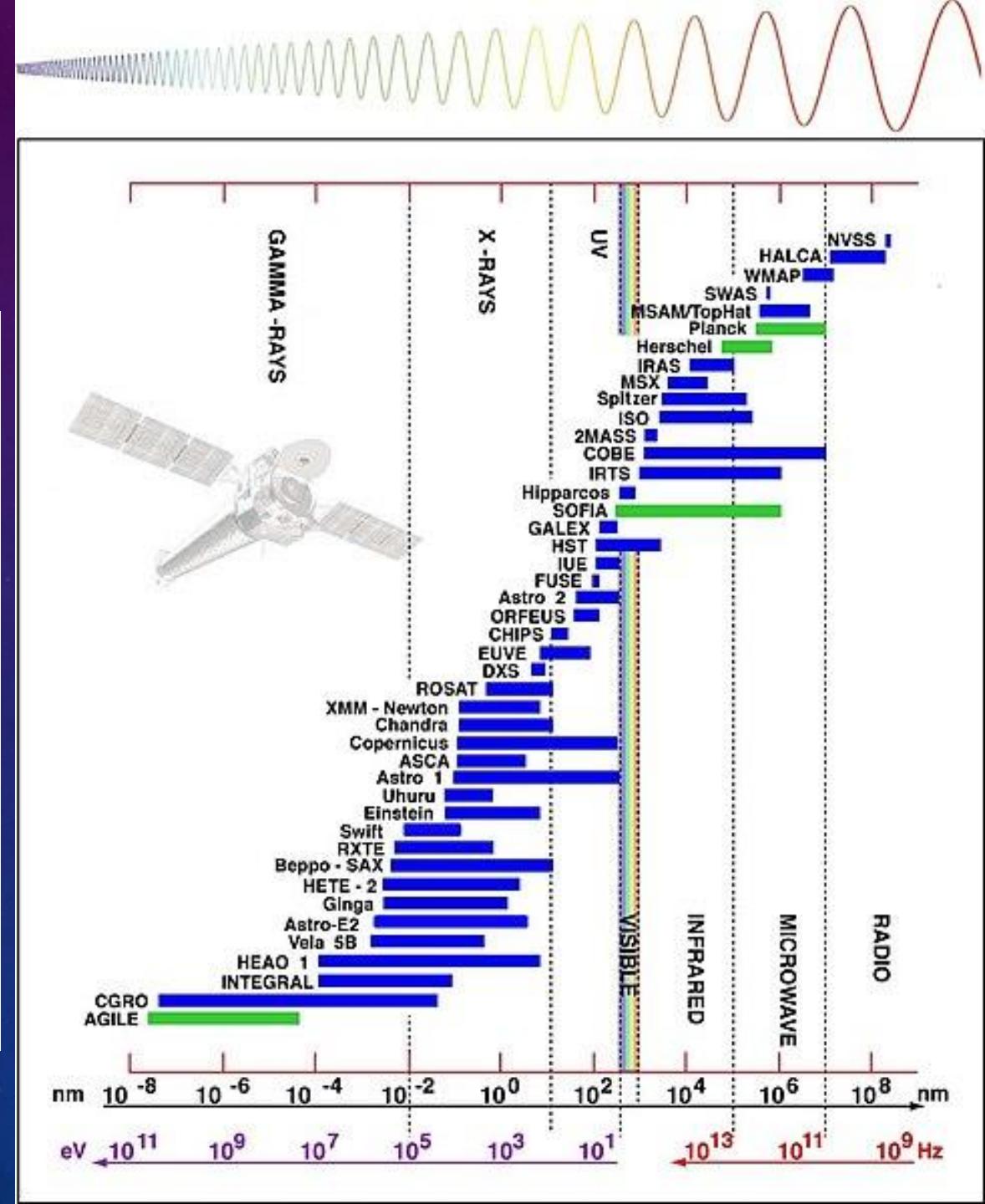
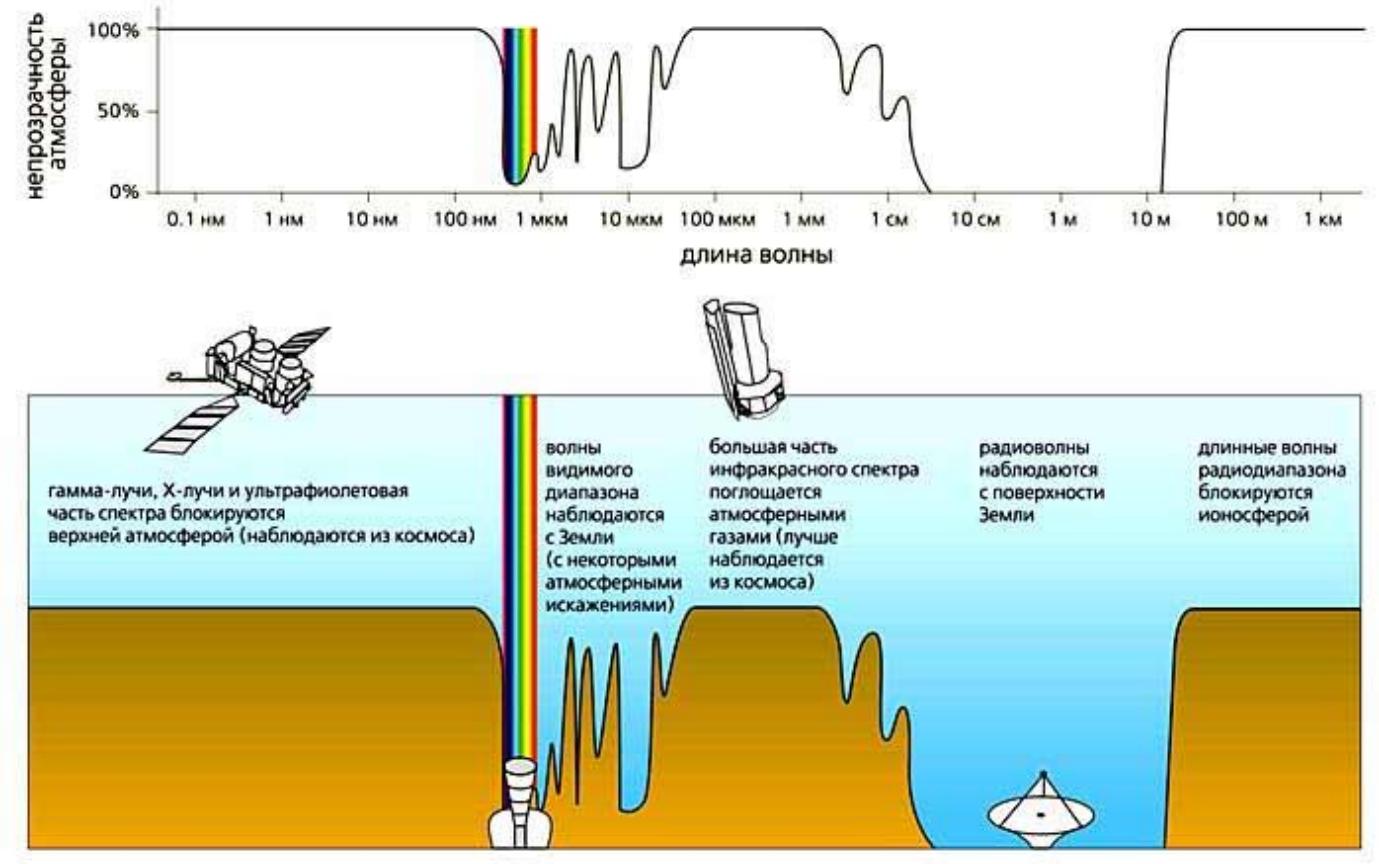


МАСТЕР

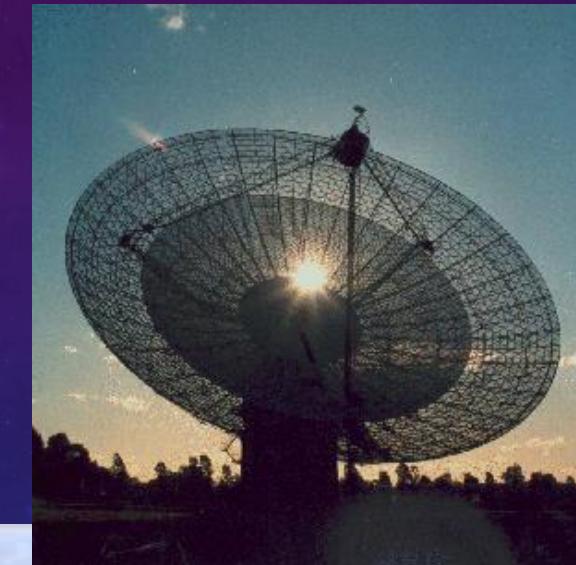
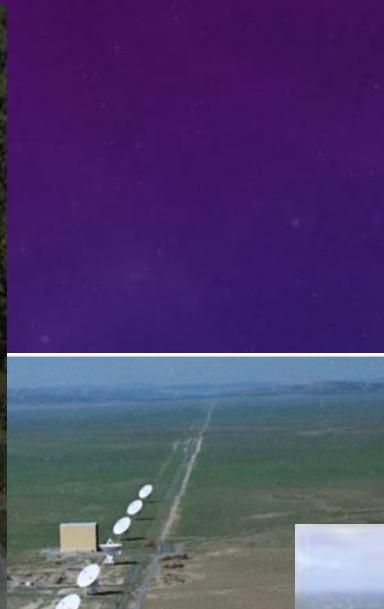
СЛАЙД-ДЕЖАВЮ: ВСЕВОЛНОВАЯ АСТРОНОМИЯ



АТМОСФЕРА



СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ



РОССИЙСКИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ



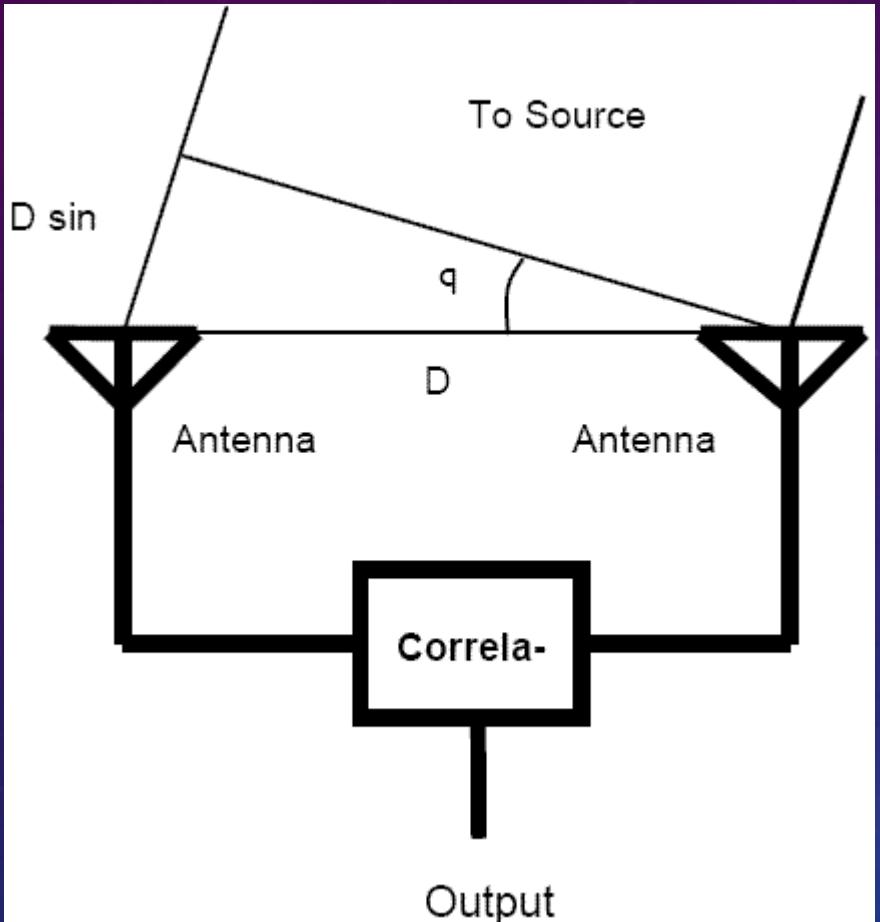
РАТАН-600 –
Радиотелескоп Академии
Наук
(Карачаево-Черкессия)



БСА -- Большая Синтезная Антенна
и РТ-22
(Пущино)

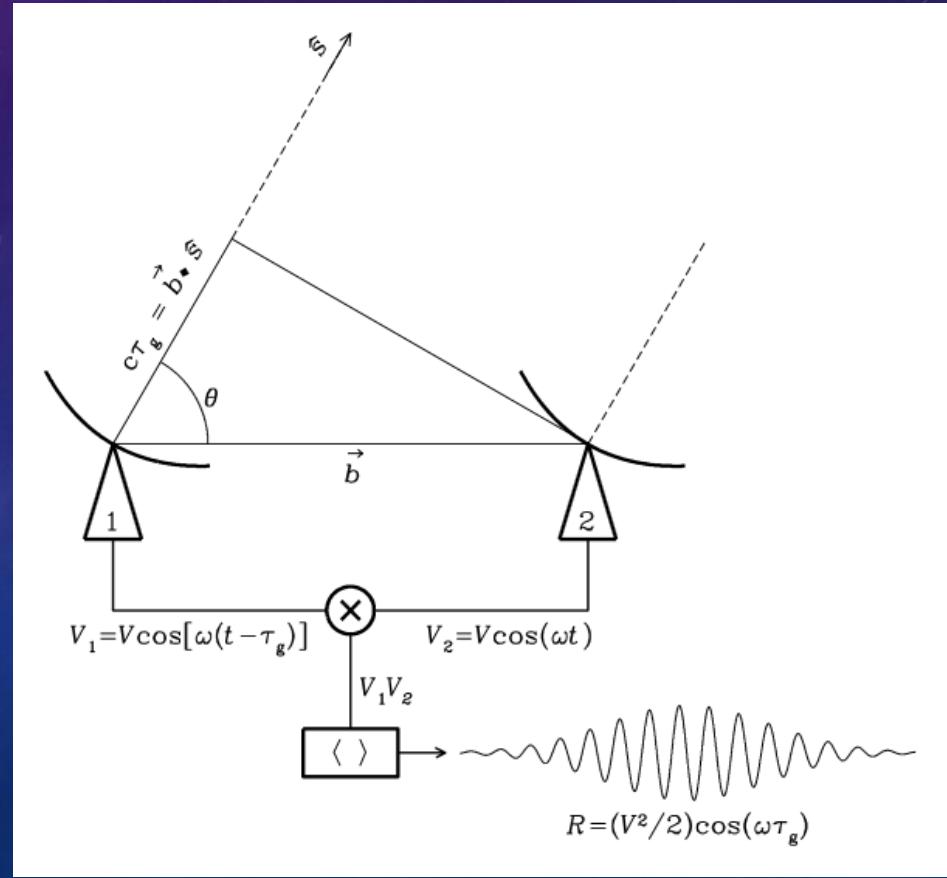


ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

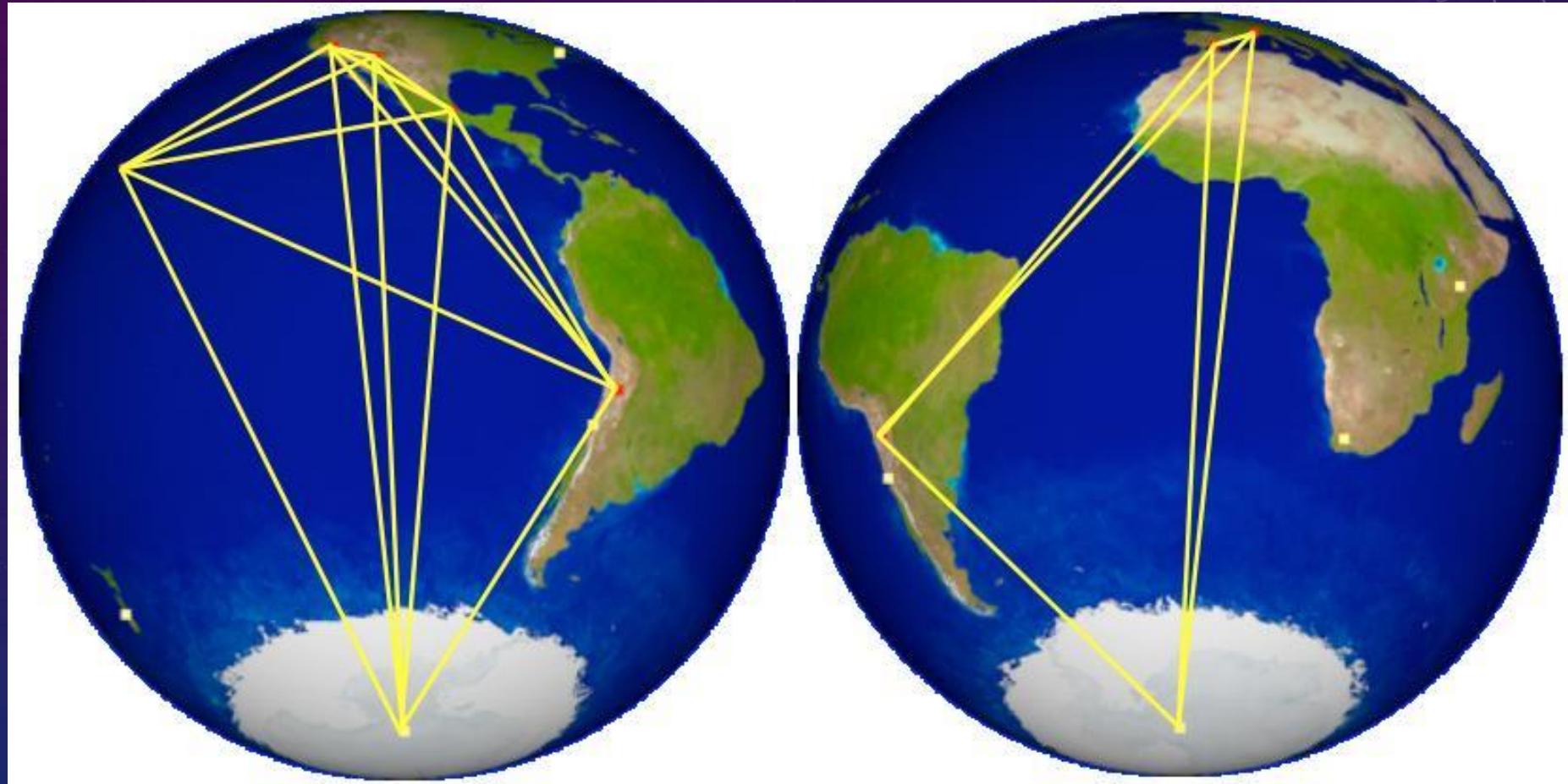


$$\theta = 2.44 \frac{\lambda}{D} \text{ rad}$$

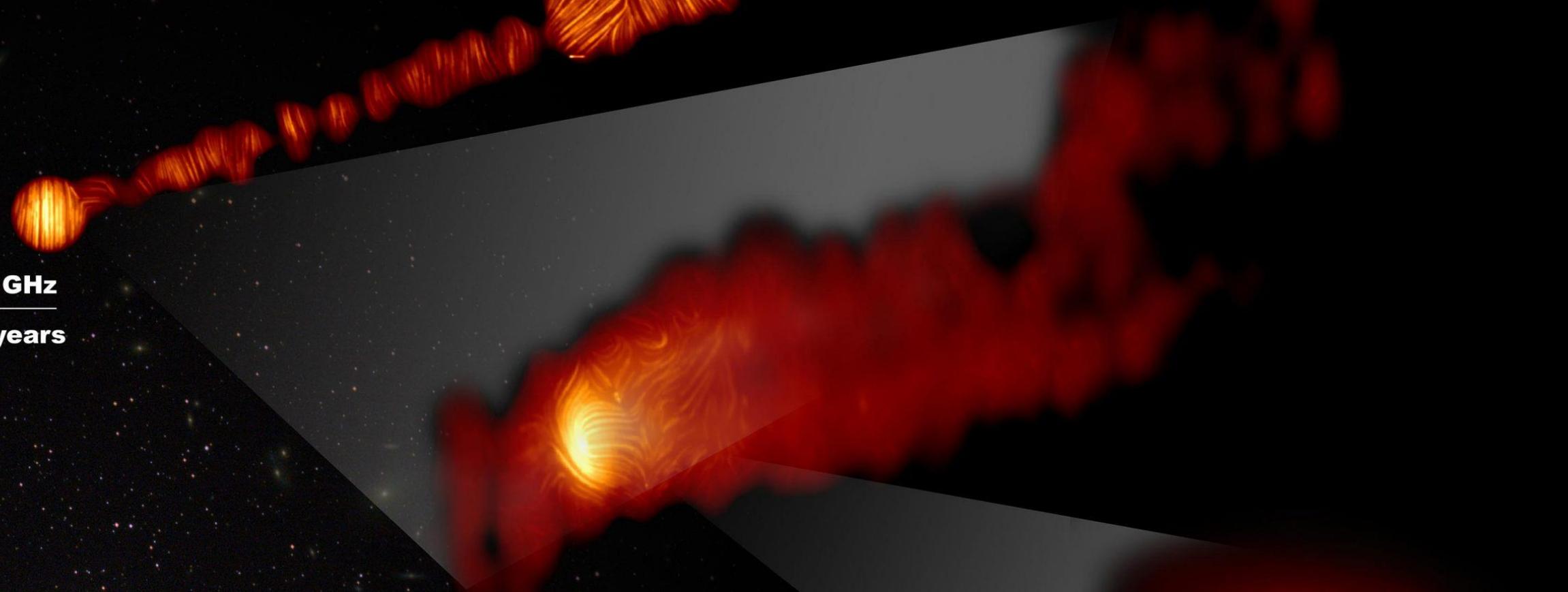
Высокое угловое разрешение
в направлении, соединяющем
два телескопа.



ТЕЛЕСКОП ГОРИЗОНТА СОБЫТИЙ



В 2019 г. были представлены результаты по галактике M87.



ALMA 230 GHz

1300 light years

VLBA 43 GHz

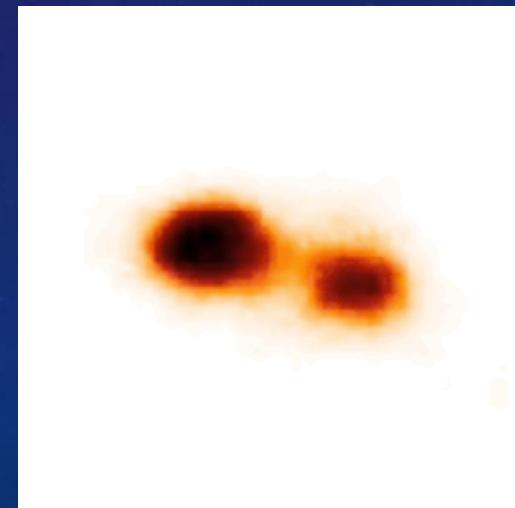
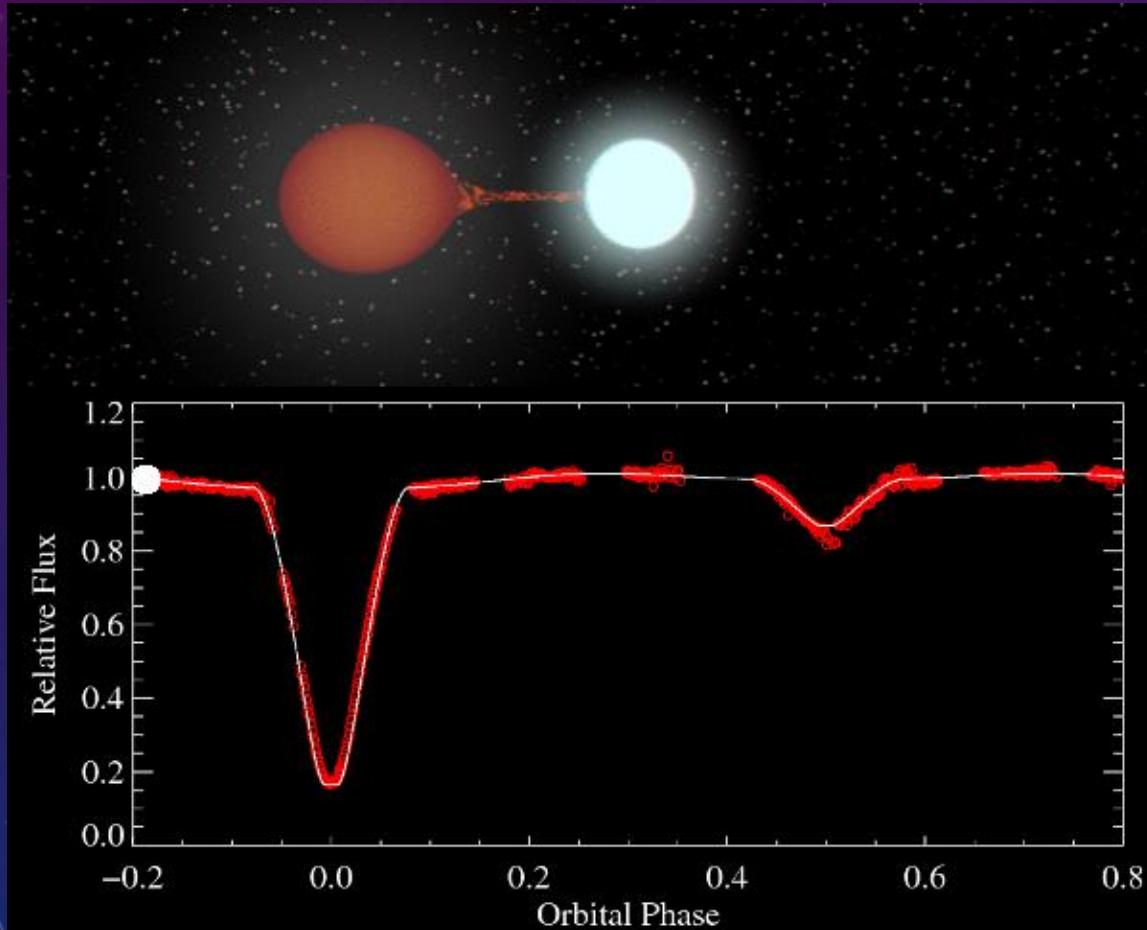
0.25 light years

EHT 230 GHz

0.0063 light years

CHARA (США)

ОПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР



РАДИОАСТРОН

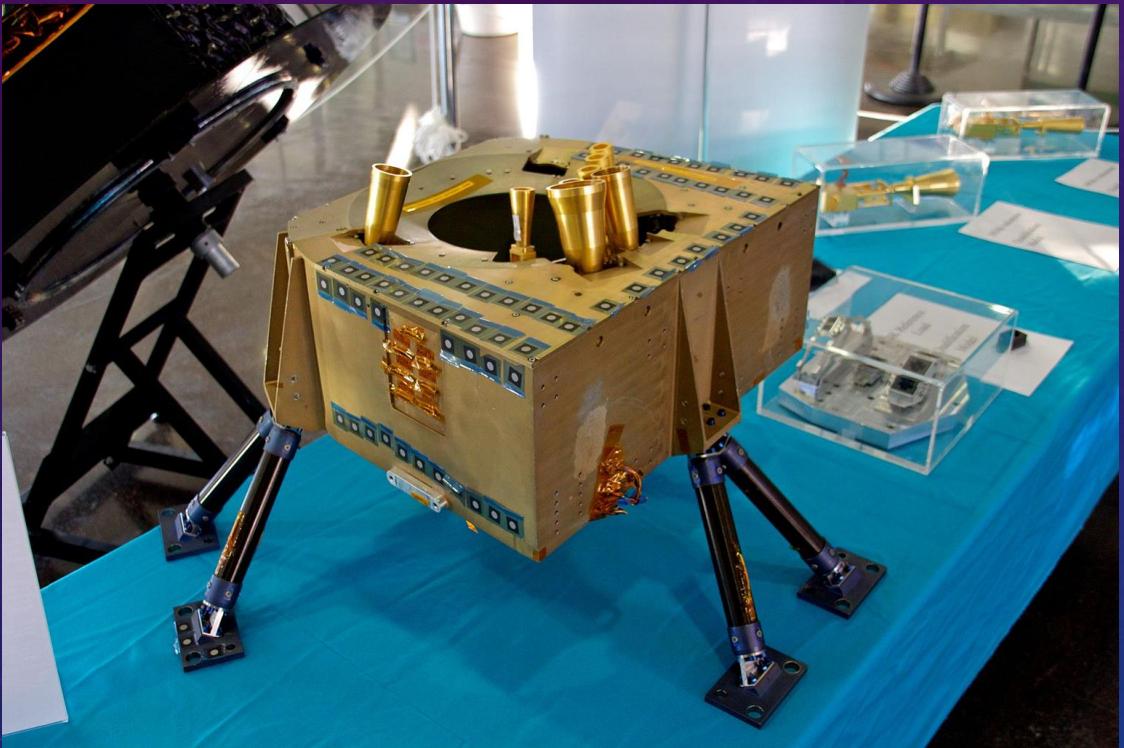


Космический интерферометр (2011-2019)

Рекордное угловое разрешение:
 $\sim 10^{-5}$ угловой секунды.

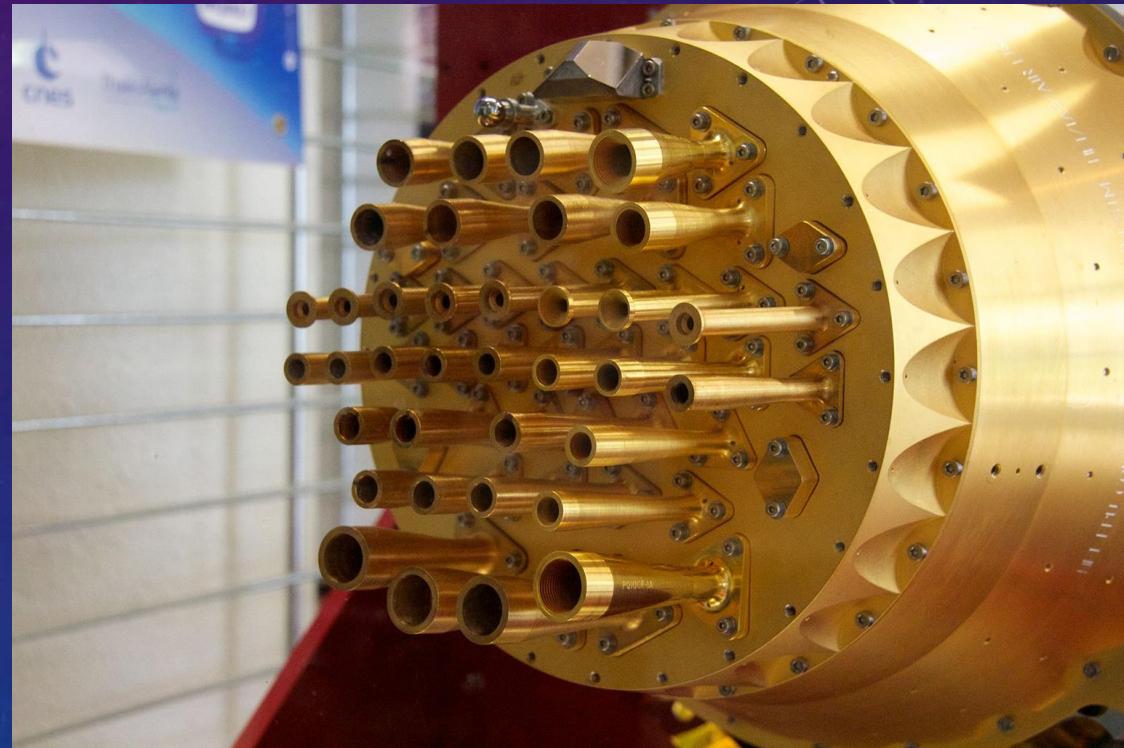
ПРИЁМНИКИ СПУТНИКА PLANCK

Low Frequency Instrument (30-70 ГГц)



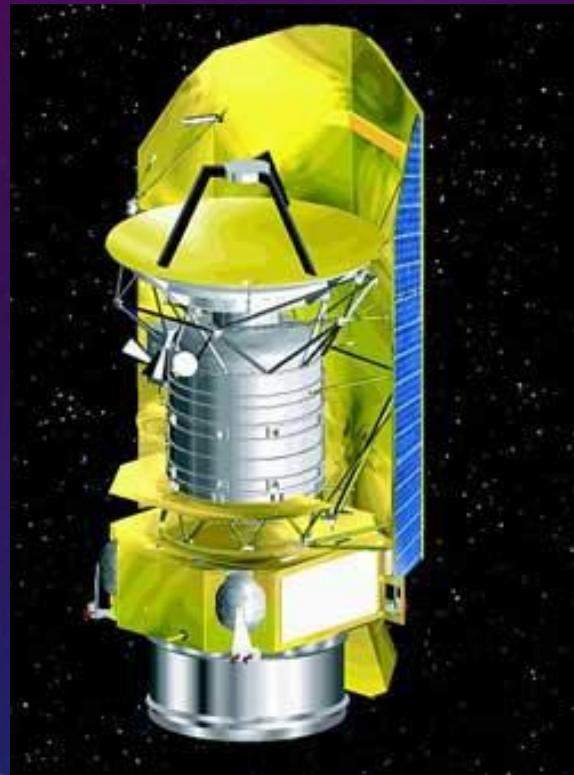
22 (транзисторных)
микроволновых приемника

High Frequency Instrument (100-850 ГГц)



48 болометров

ИНФРАКРАСНАЯ АСТРОНОМИЯ

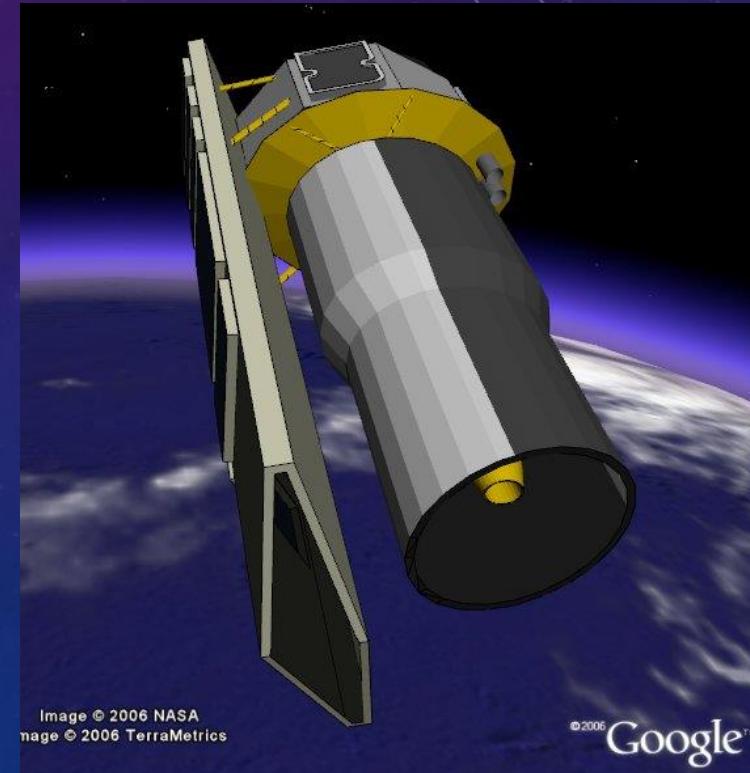


Гершель

Многие астрофизические процессы лучше наблюдать в ИК диапазоне.

В первую очередь – рождение звезд и планет.

Необходимо охлаждение аппаратуры, что приводит к короткому сроку работы.



Спитцер

Image © 2006 NASA
page © 2006 TerraMetrics

©2006 Google™

РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ

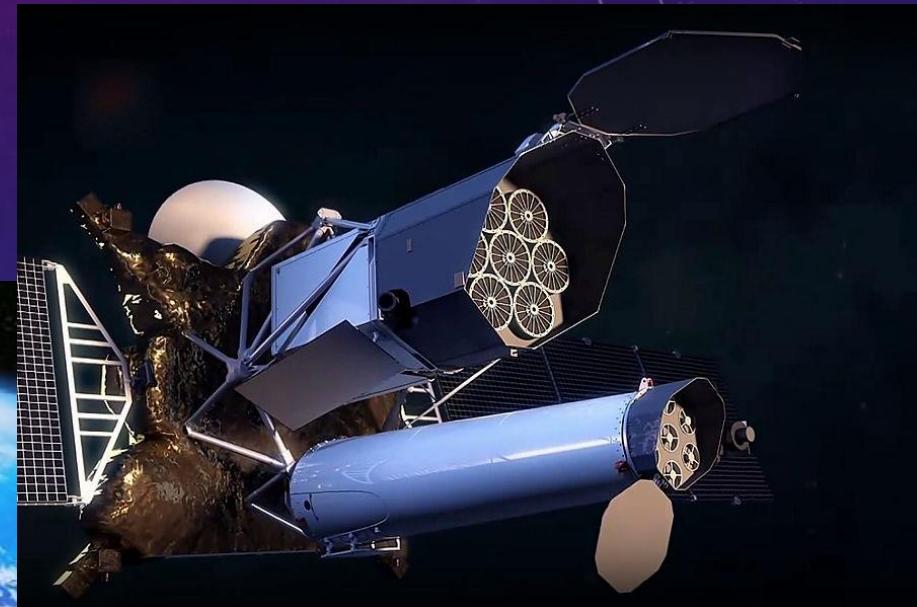


Chandra



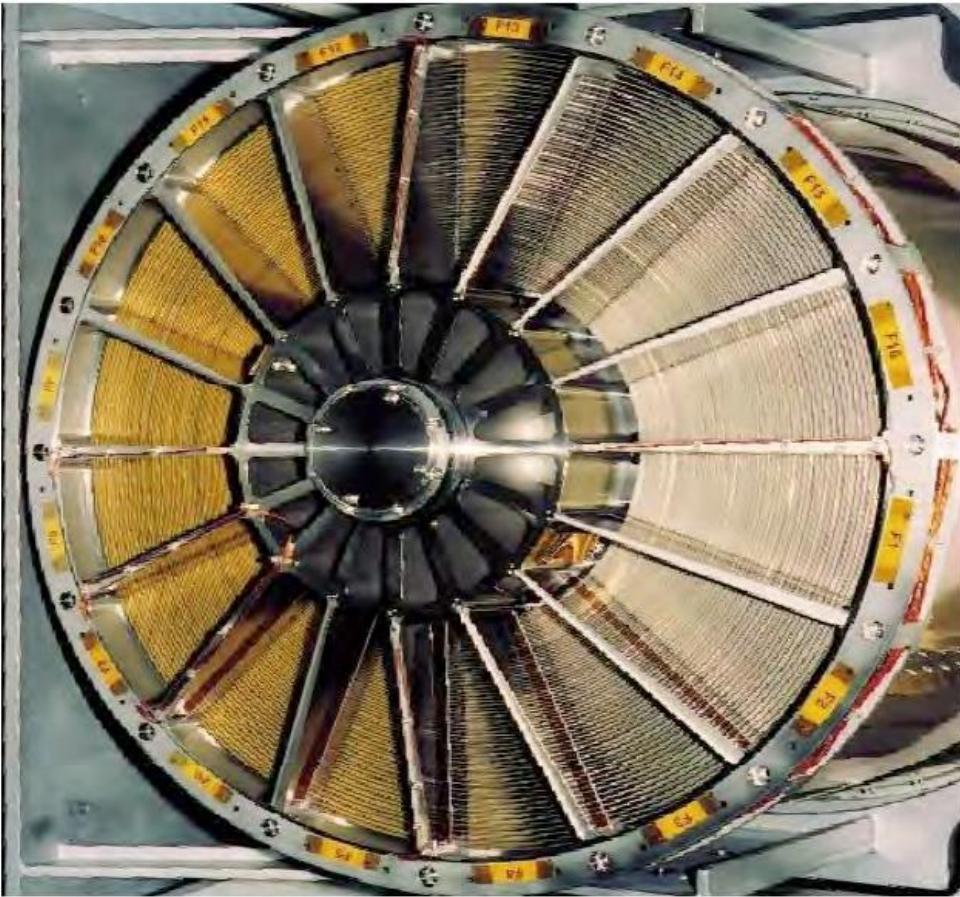
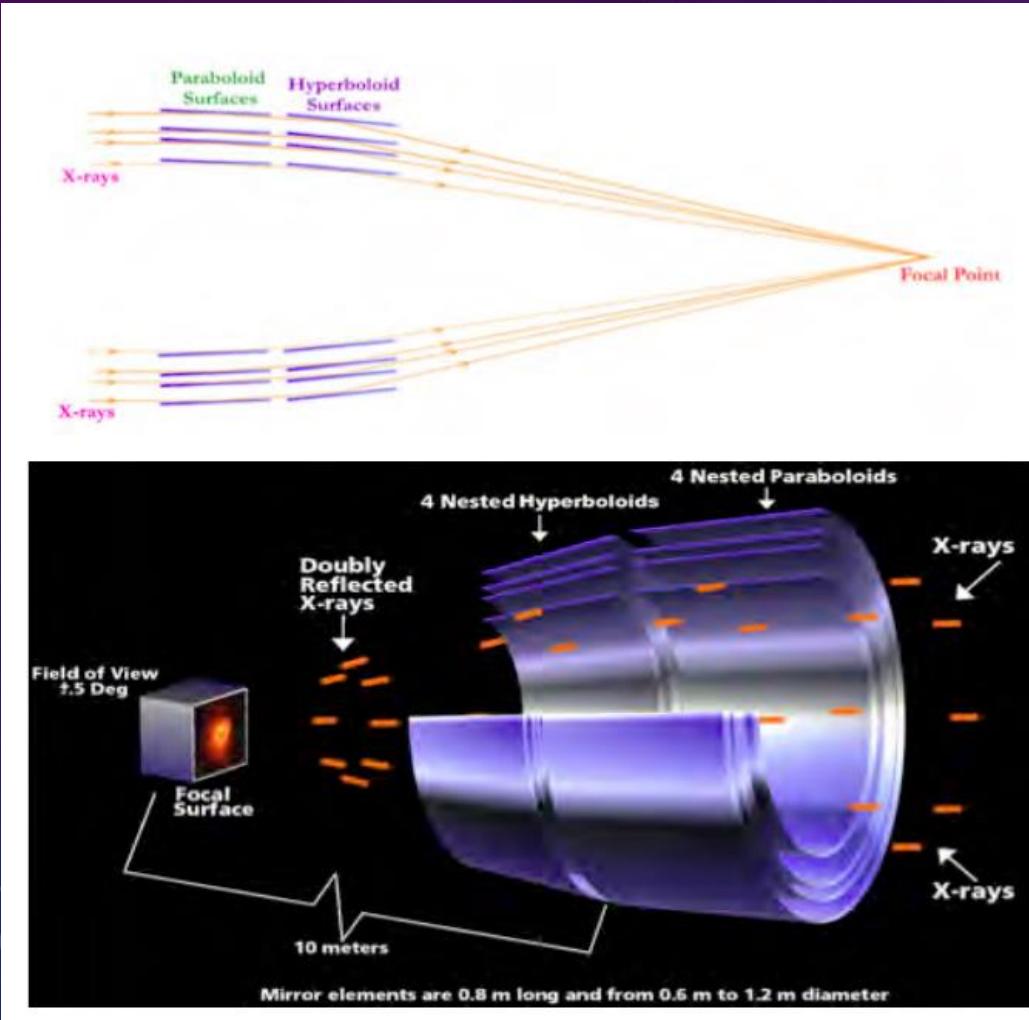
XMM-Newton

Фокусирующая оптика



Spektr-RG (eROSITA + ART-XC)

РЕНТГЕН: ЗЕРКАЛА КОСОГО ПАДЕНИЯ

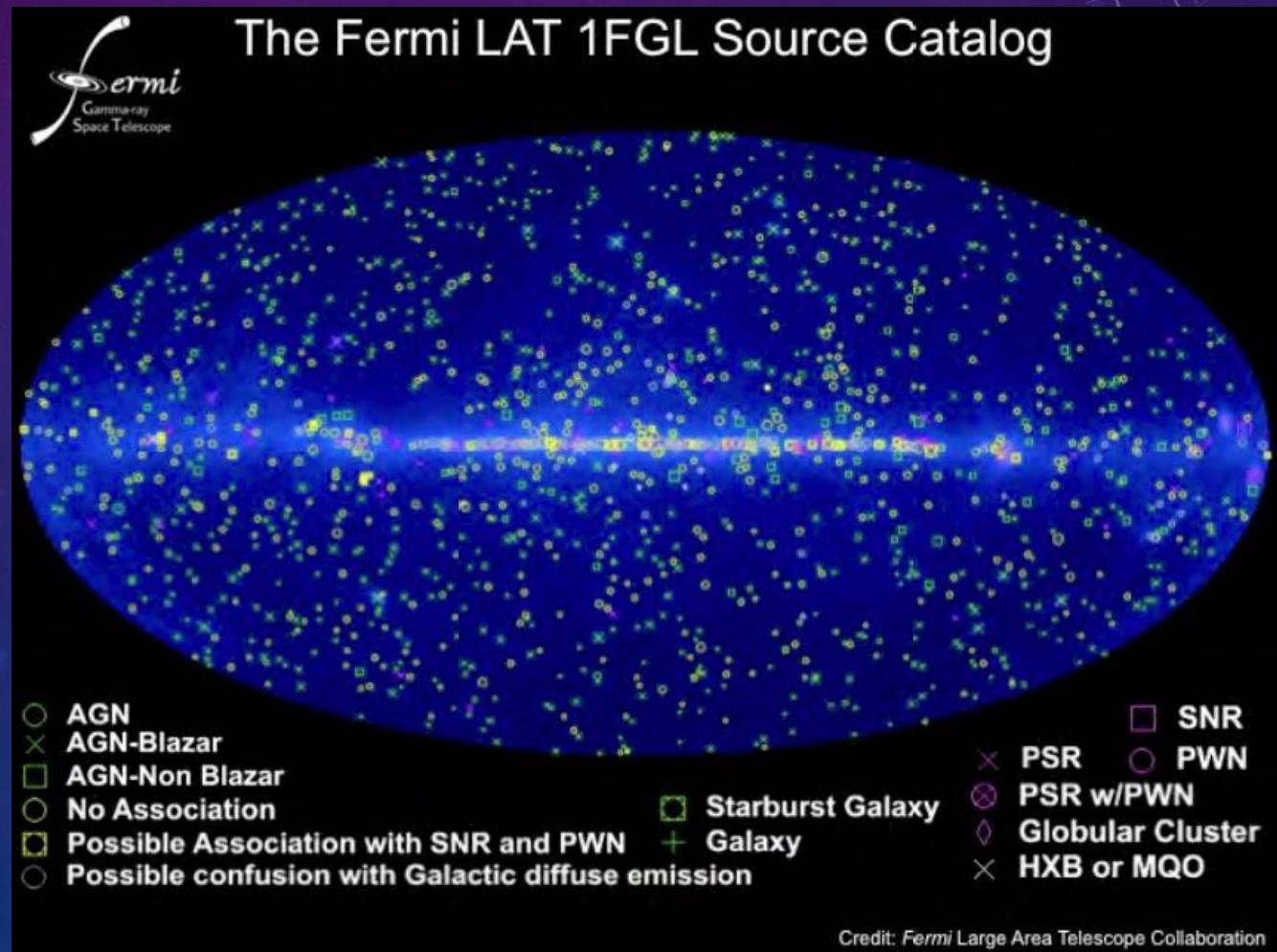


XMM-Newton mirrors during integration

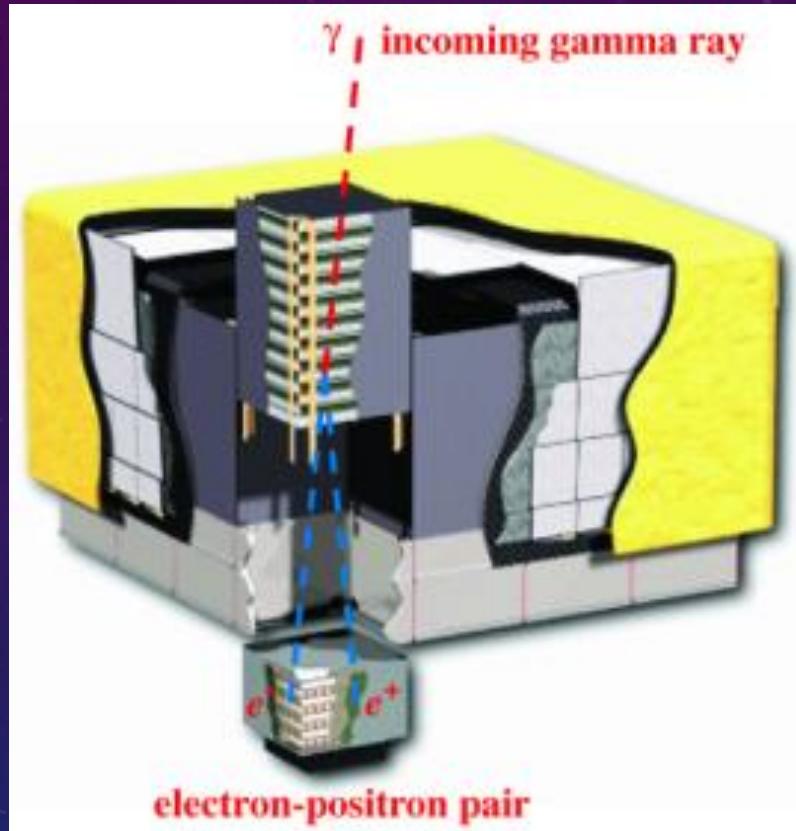
Image courtesy of Dornier Satellitensysteme GmbH

European Space Agency

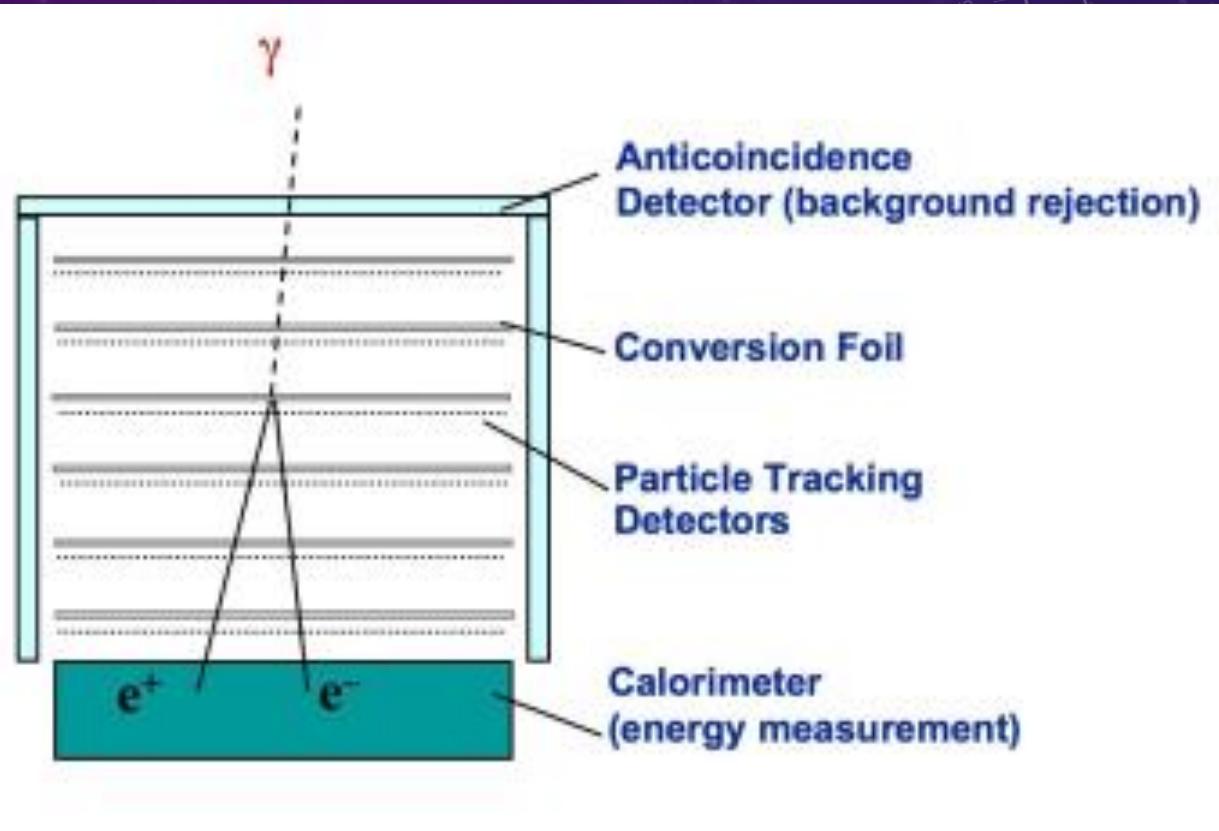
FERMI – ГАММА-ОБСЕРВАТОРИЯ



ДЕТЕКТОР FERMI LAT

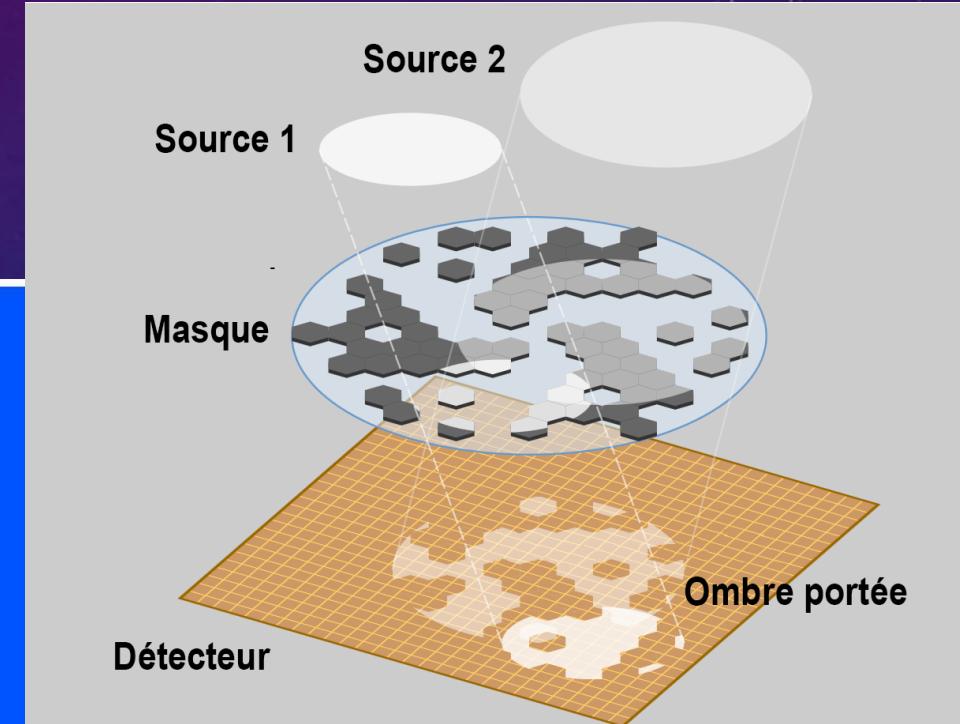
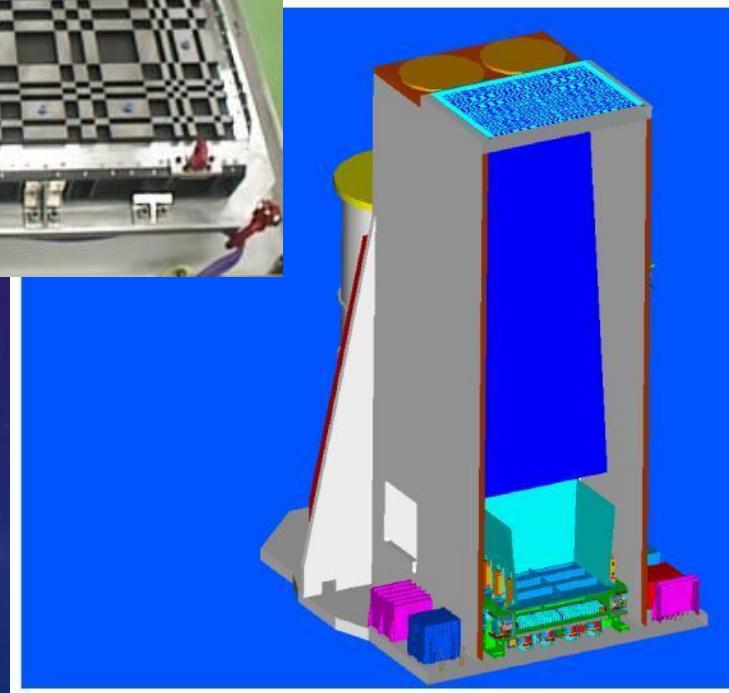


Large Area Telescope
Нет фокусировки. Регистрируются
частицы. Причем – вторичные!

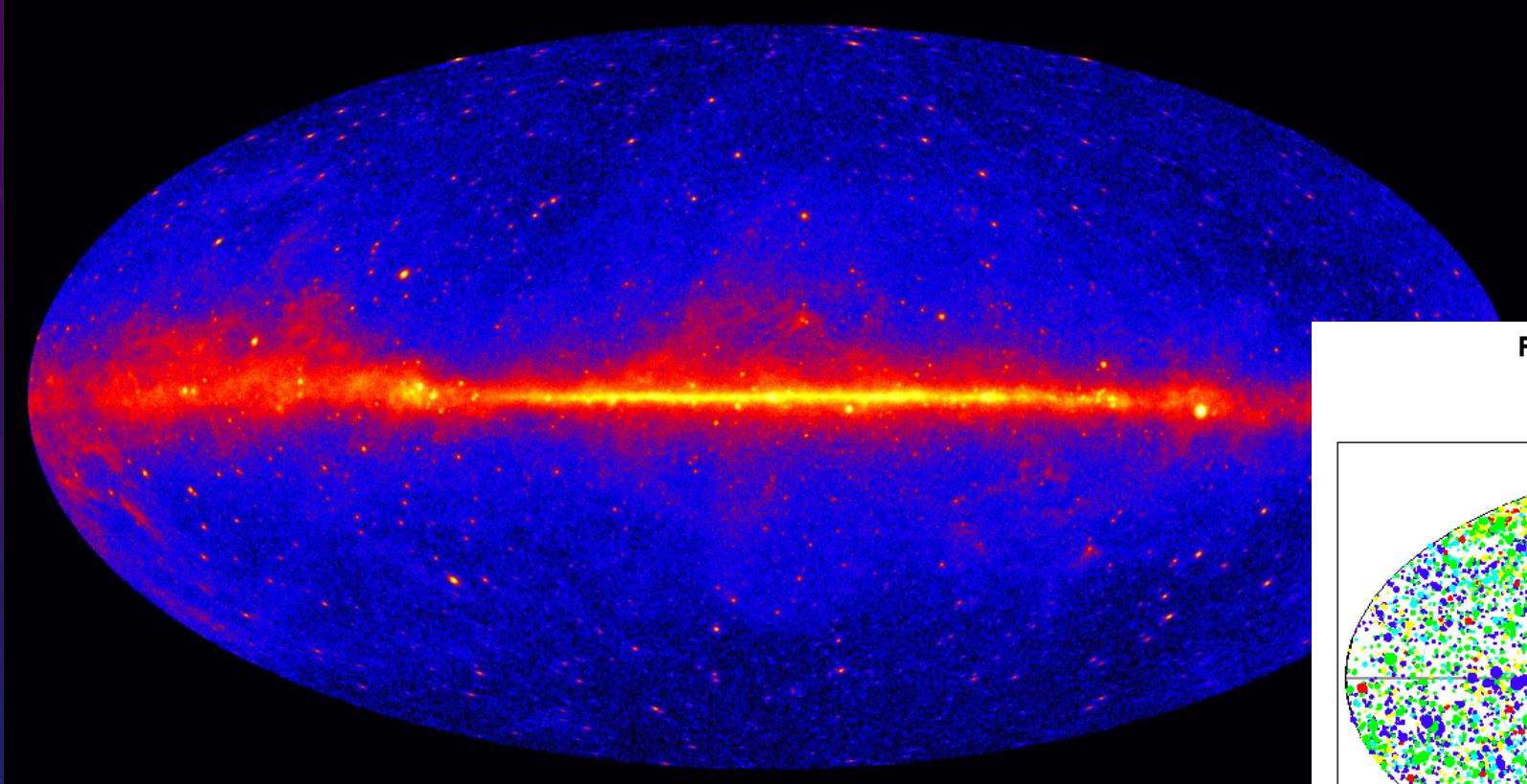


Для настройки прибора его надо калибровать.
В случае Ферми это проводилось в ЦЕРНе.

КОДИРУЮЩИЕ МАСКИ (INTEGRAL)



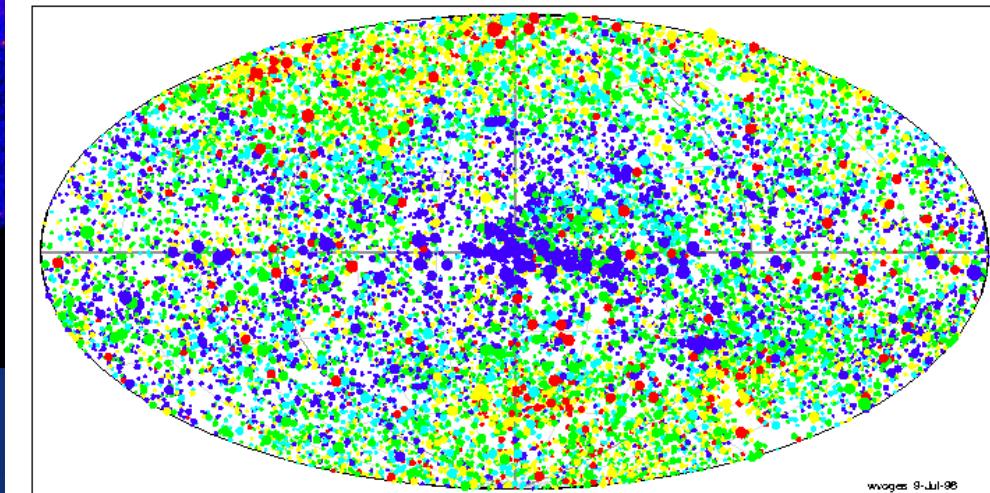
ОБЗОРЫ



FERMI

ROSAT ALL-SKY SURVEY Bright Sources

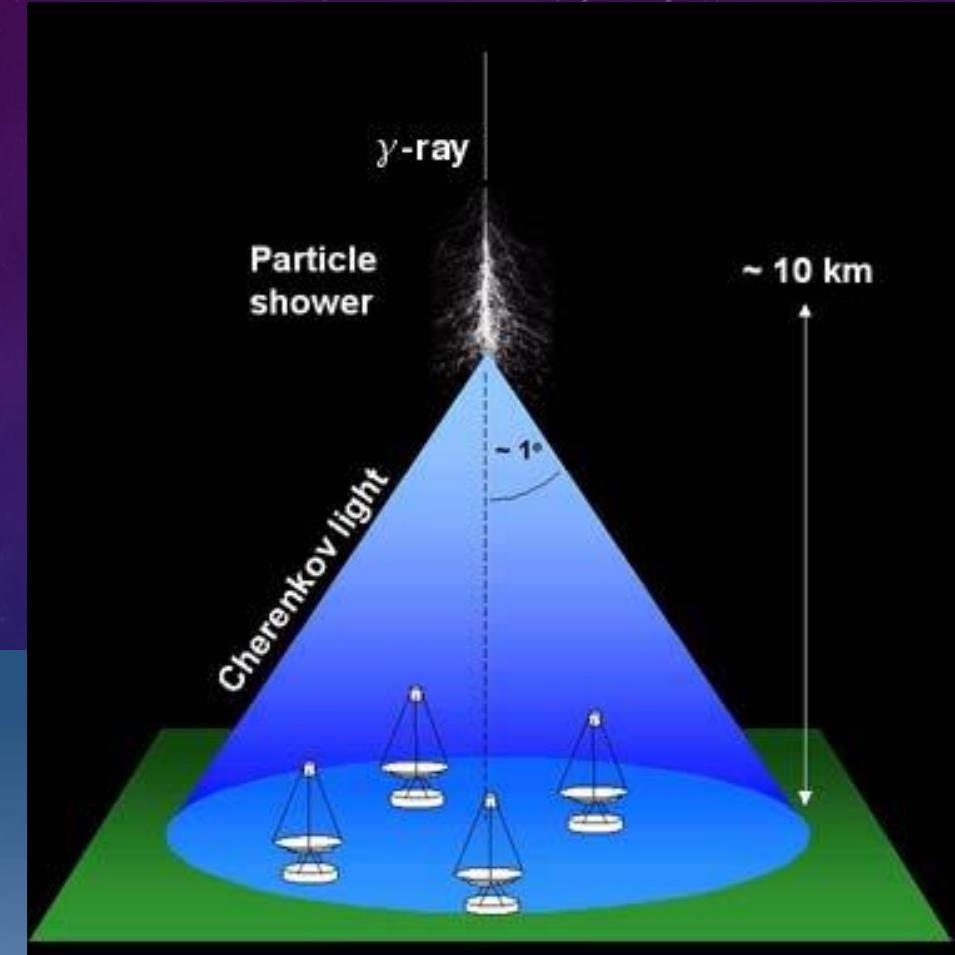
Aitoff Projection
Galactic II Coordinate System



Energy range: 0.1 - 2.4 keV
Number of RASS-II sources: 18811
Hardness ratio: -1.0 | -0.4 | -0.2 | 0.2 | 0.6 | 1.0 (soft -> hard : magenta - red - yellow - green - cyan)

КВАНТЫ СВЕРХ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Влетая в атмосферу Земли гамма-квант очень высокой энергии (ТэВ) приводит к появлению вспышки в оптическом диапазоне.



H.E.S.S.

НЕ-ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ АСТРОНОМИЯ

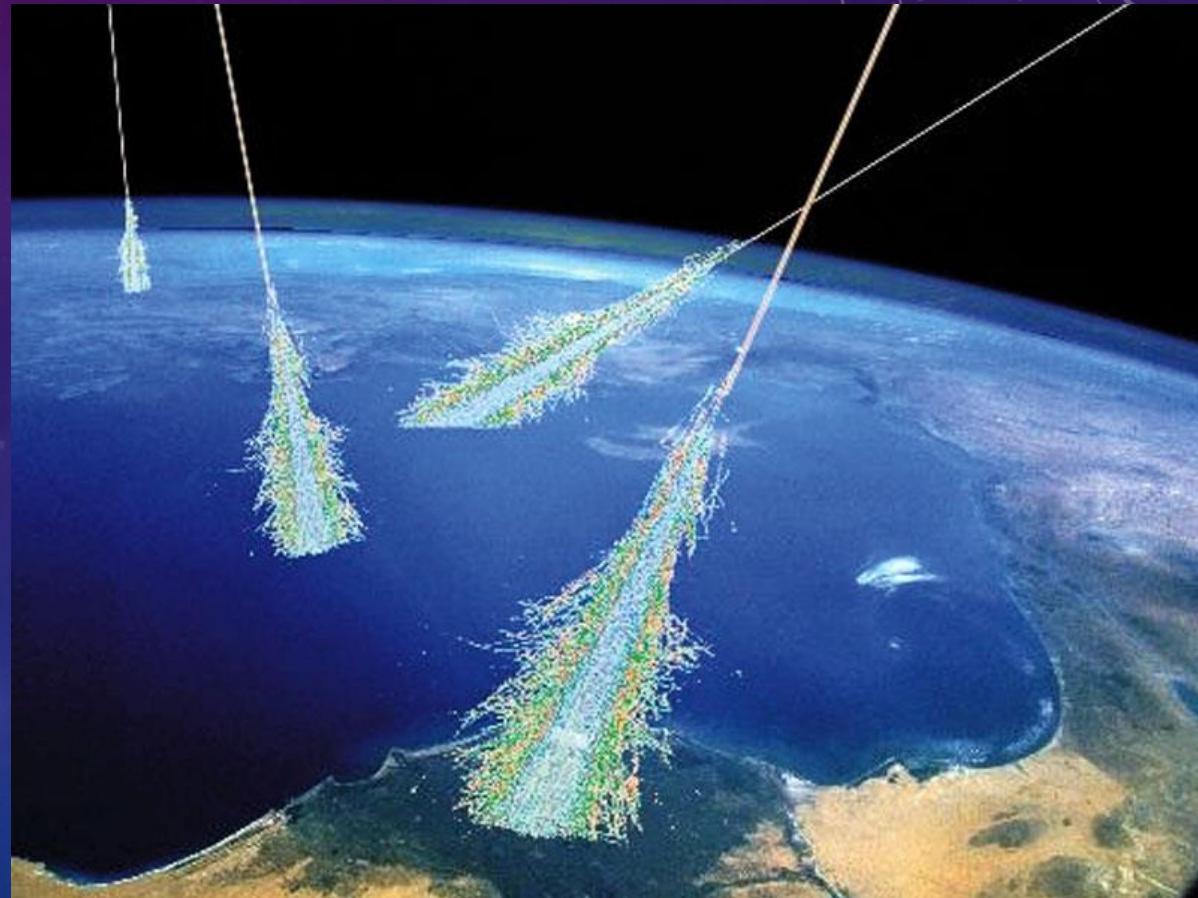
ПРО ВСЁ, ЧТО ЛЕТАЕТ

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Космические лучи – это потоки заряженных частиц, которые пронизывают межпланетную и межзвёздную среду.

Космические лучи нередко обладают энергиями, значительно превышающими те, которые достижимы в земных ускорительных экспериментах.

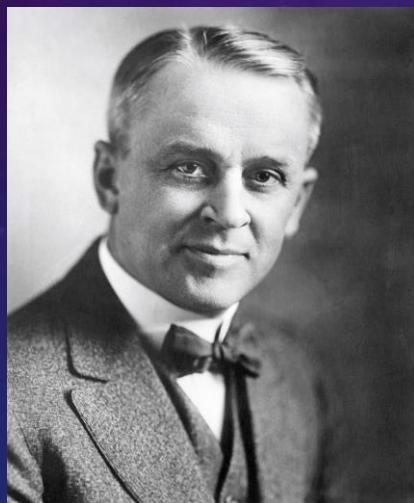
Поэтому они – важная природная лаборатория, по изучению элементарных частиц.



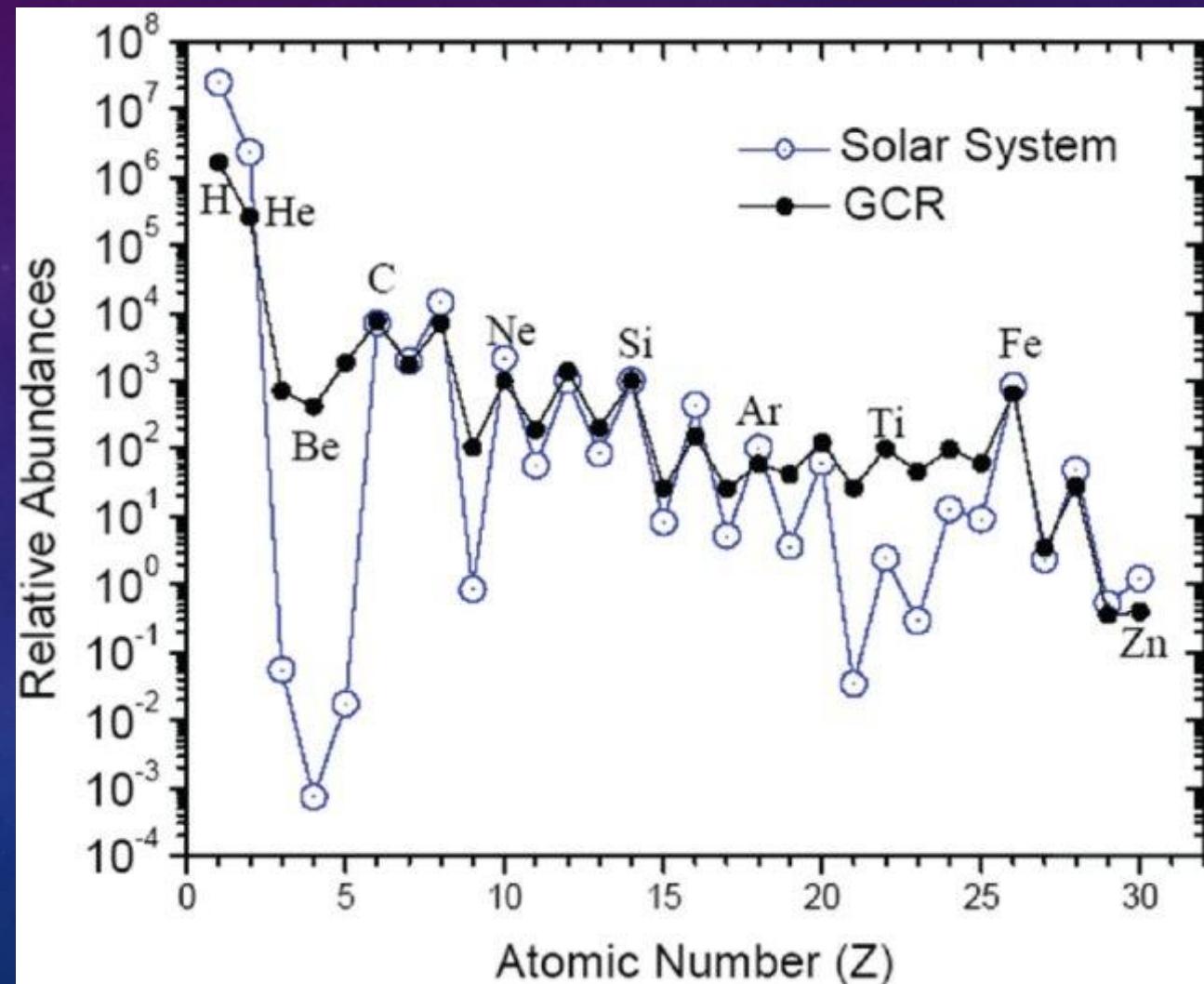
СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ



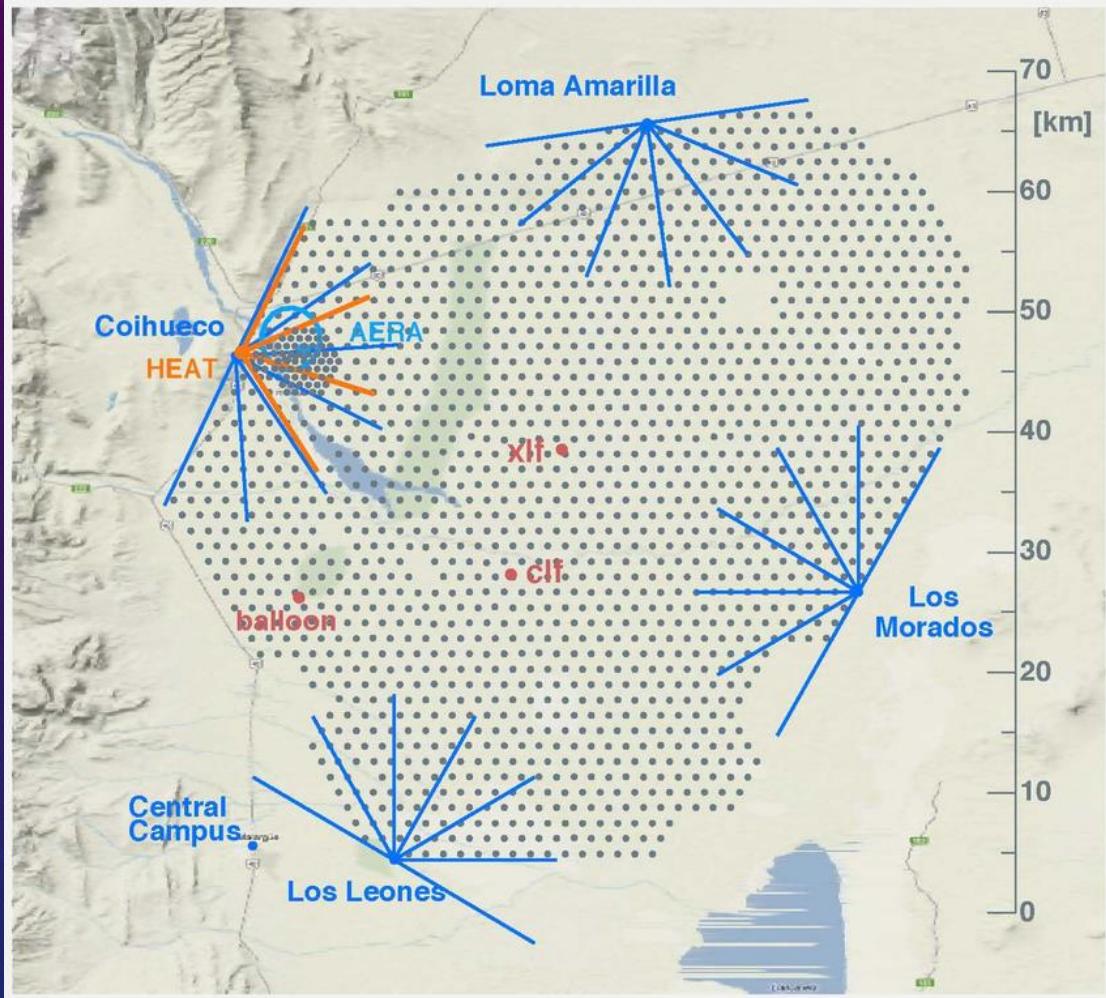
Виктор Гесс
(1883-1964)



Роберт Милликен
(1868-1953)

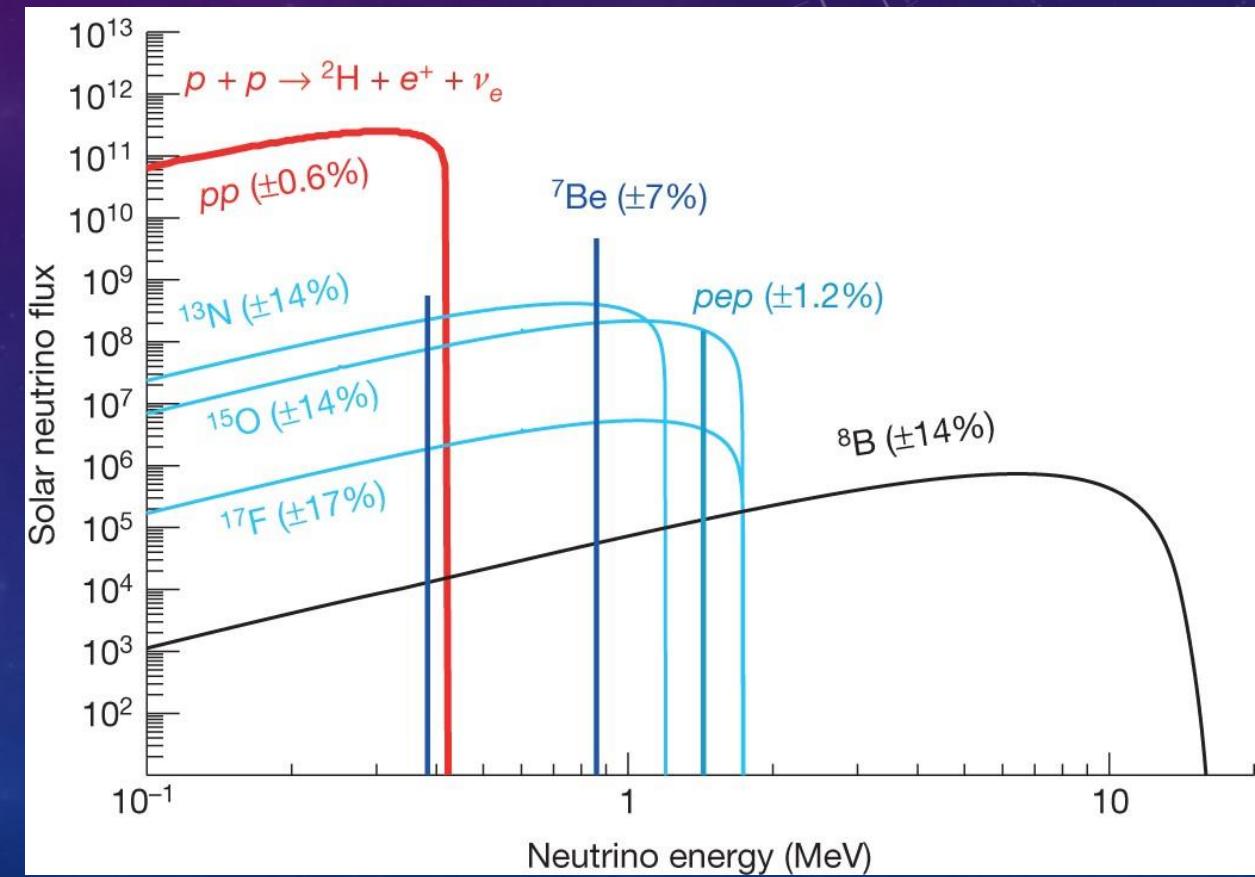
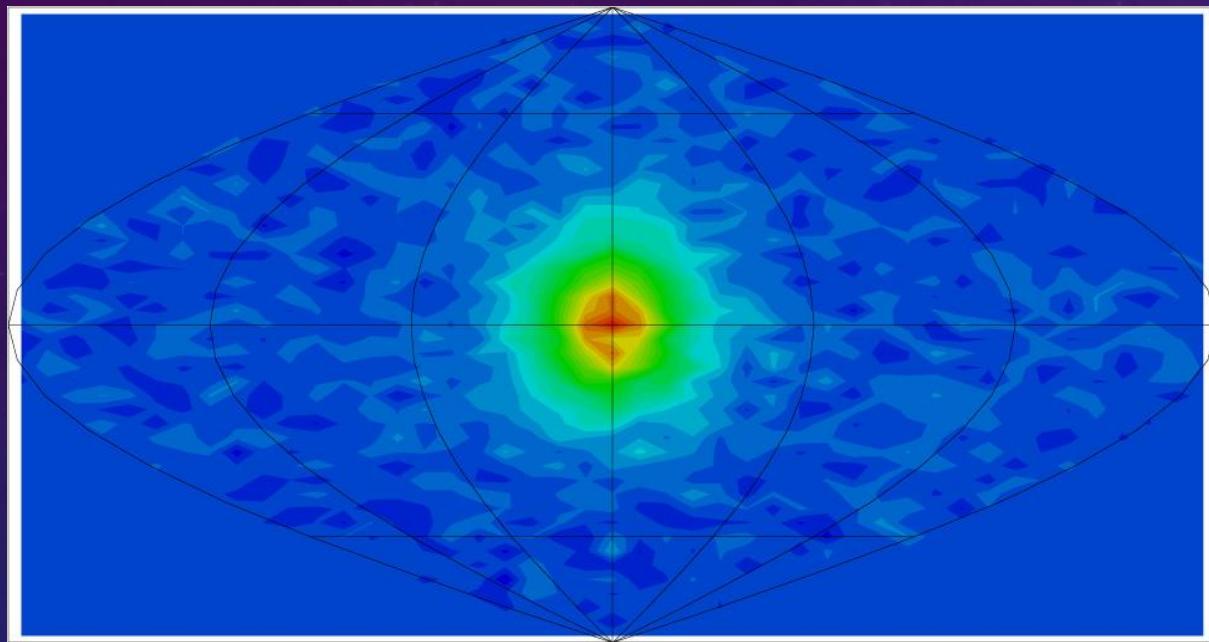


НАБЛЮДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

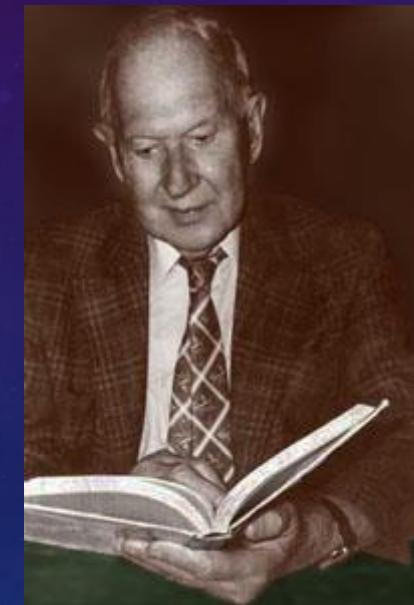
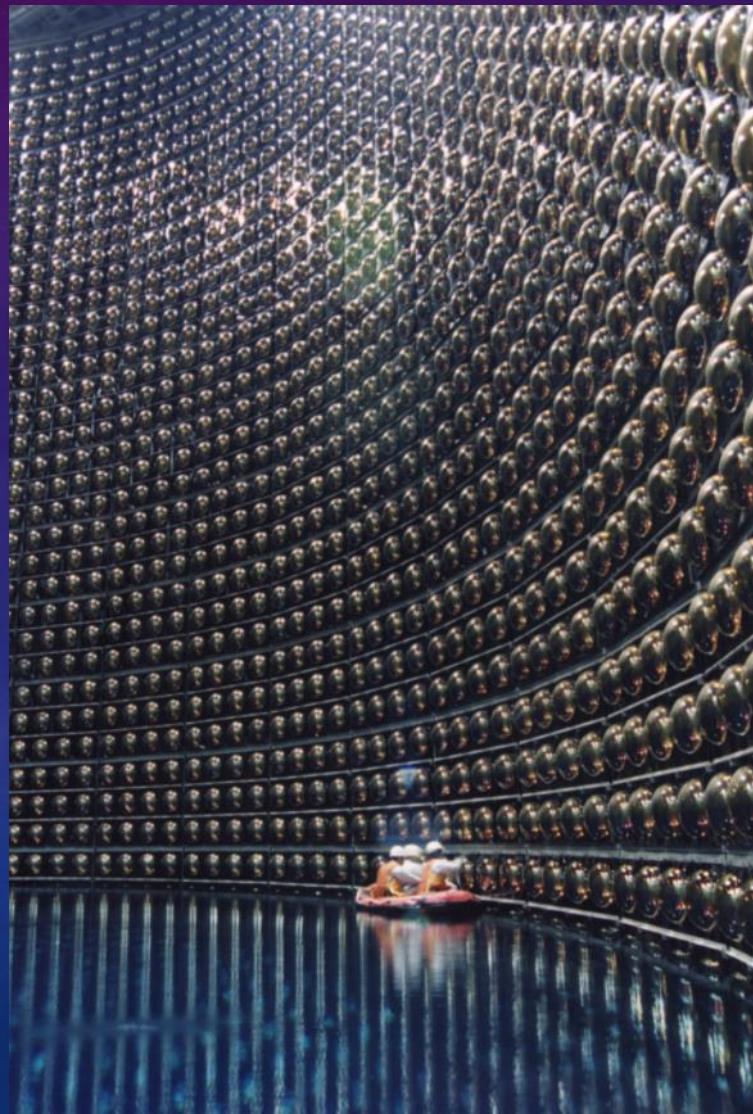


Обсерватория им. Пьера Оже (Аргентина)

НЕЙТРИНО ОТ СОЛНЦА

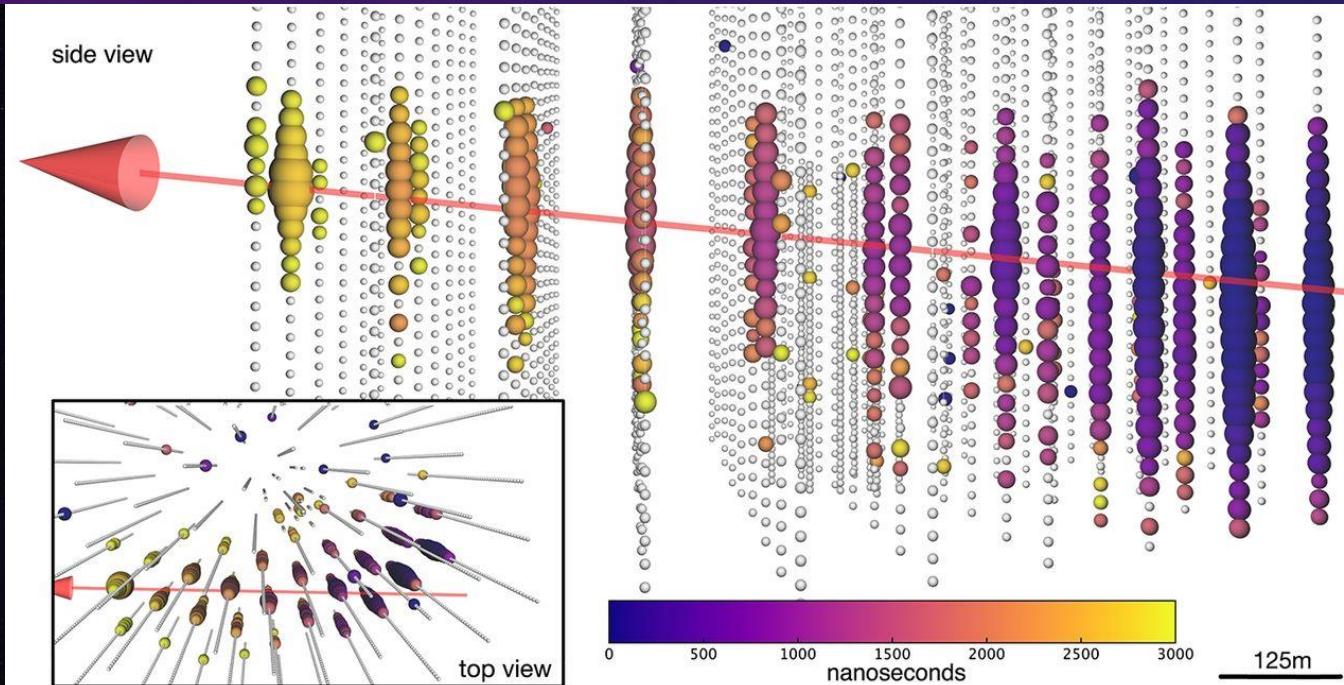
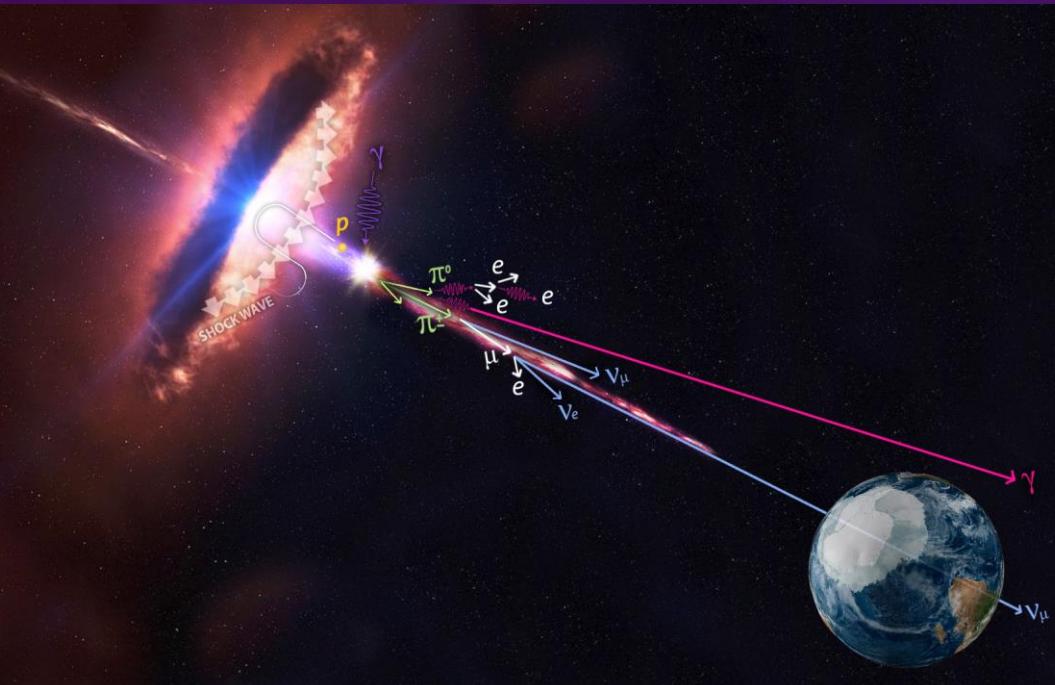


НЕЙТРИННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ



Моисей Марков
(1908-1994)

ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ НЕЙТРИНО



22 сентября 2017 года телескоп IceCube зарегистрировал нейтрино сверхвысокой энергии со стороны одного из блазаров.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Какую звёздную величину будет иметь звезда светимостью $100L_{\odot}$, расположенная на расстоянии в 20 кпк? Учите, что межзвёздное поглощение в направлении зезды составляет 1 зв. величину на килопарсек.
2. Глубина потенциальной ямы ПЗС составляет 100 тыс. электронов (то есть в каждом пикселе может накопиться не более 100 тыс. отсчётов сигнала).
 - (а) С какой максимальной относительной точностью такой детектор может позволить измерять яркость источников, если поток фотонов считать пуассоновым, а изображение источника занимает на плоскости детектора площадь в 4 пикселя?
 - (б) Выразите эту точность в звёздных величинах.