



Современная астрономия  
и  
современные телескопы

Сергей Попов  
(ГАИШ МГУ)

# Факт 1

## **Астрономия – наблюдательная наука**

**В астрономии невозможны прямые эксперименты с изучаемыми объектами.**

**Это уникальное свойство для естественных наук.**



# Факт 2

**В телескоп не смотрят глазом**

**Начиная с 19 века в астрономии стала фиксировать изображение на фотопластинке, Чтобы потом детально обработать. Сейчас приемники электронные.**

**Вне видимого диапазона глаз вообще бесполезен.**

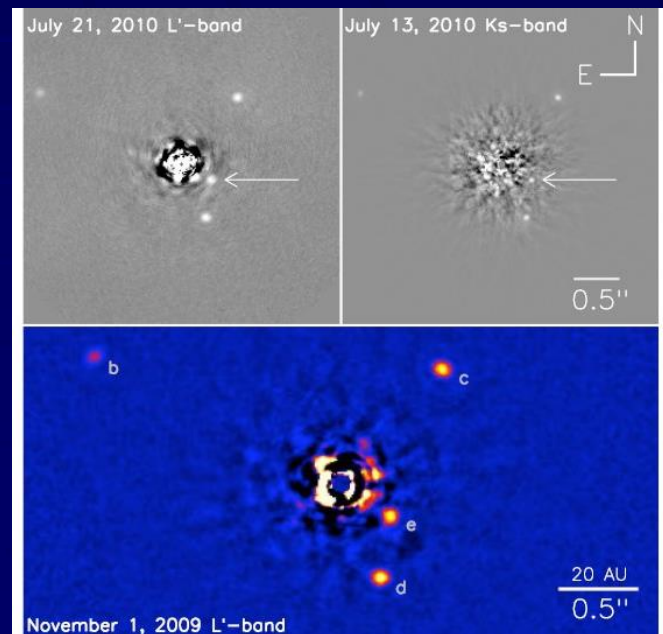


# Факт 3

**Важнейшей составляющей работы астрономов является обработка данных.**

**Среднестатистический астроном занят обработкой данных.**

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





# Факт 4

## **Астрономия стала всеволновой**

**Наблюдения ведутся от радио до гамма-лучей.  
А также есть нейтринная астрономия,  
изучение космических лучей и  
гравитационно-волновая астрономия.**



# Факт 5

**Наблюдатели не всегда сидят у телескопа**

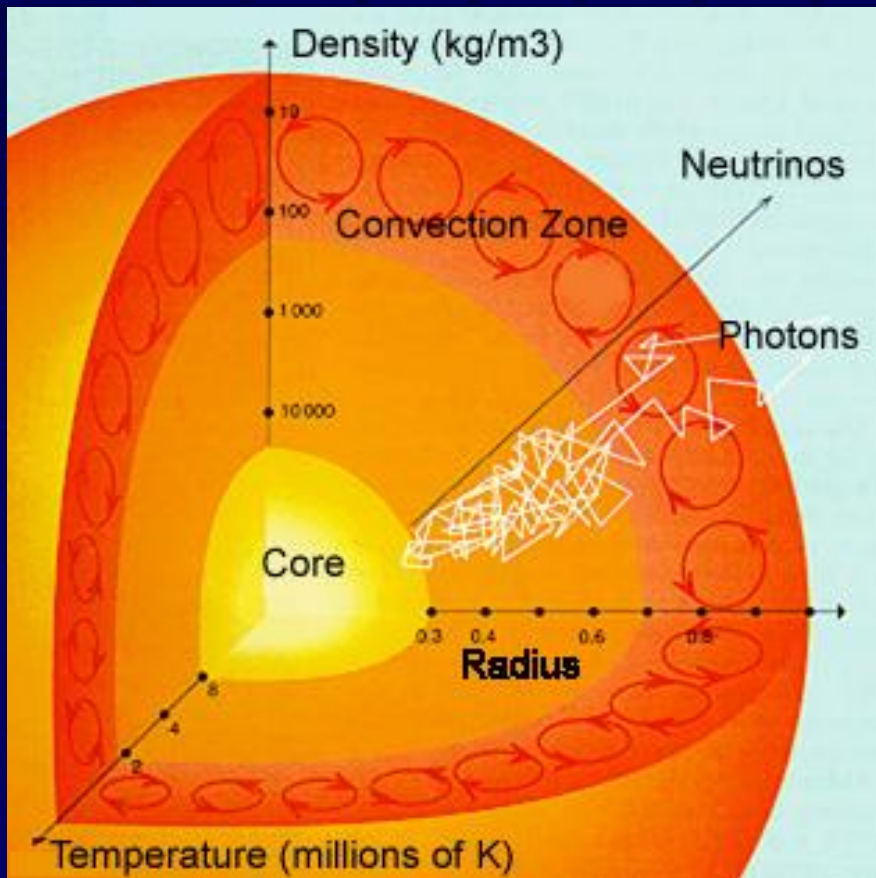
**Разумеется, космические эксперименты управляются дистанционно.**

**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

**Астрономия – в первую очередь часть физики**



**Нам интересно  
не «как выглядит»,  
а «как устроено»**

**Большинство астрономов в мире  
получили первую степень по физике**

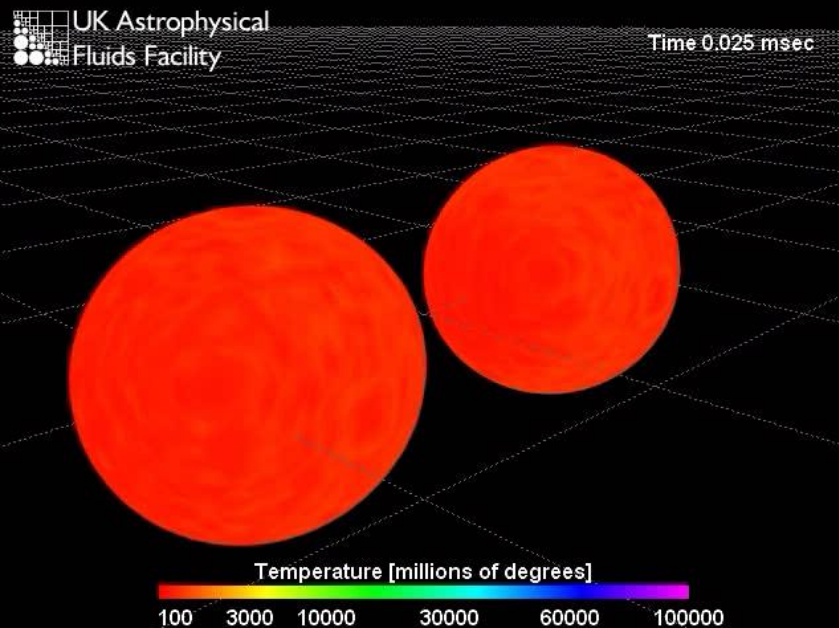
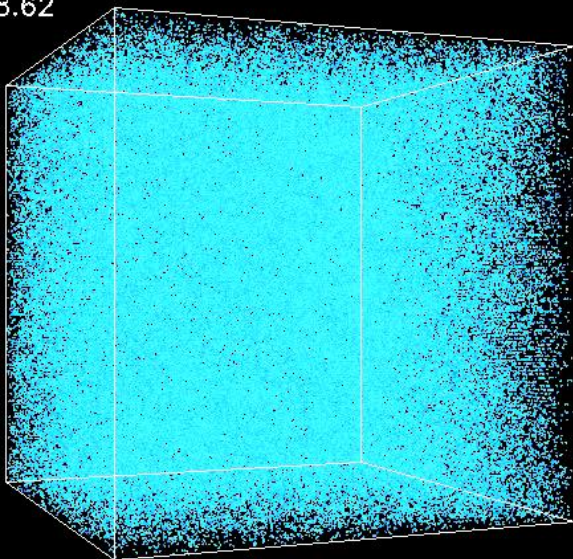


# Факт 7

**Суперкомпьютерные вычисления  
крайне востребованы в астрофизике**

**Многие астрономические задачи  
требуют колоссальных вычислительных ресурсов**

$Z=28.62$



# Факт 8

**Основные результаты получают на  
больших дорогих инструментах  
коллективного конкурсного использования**



**Giant Segmented Mirror Telescope**  
Миллиард долларов без аппаратуры



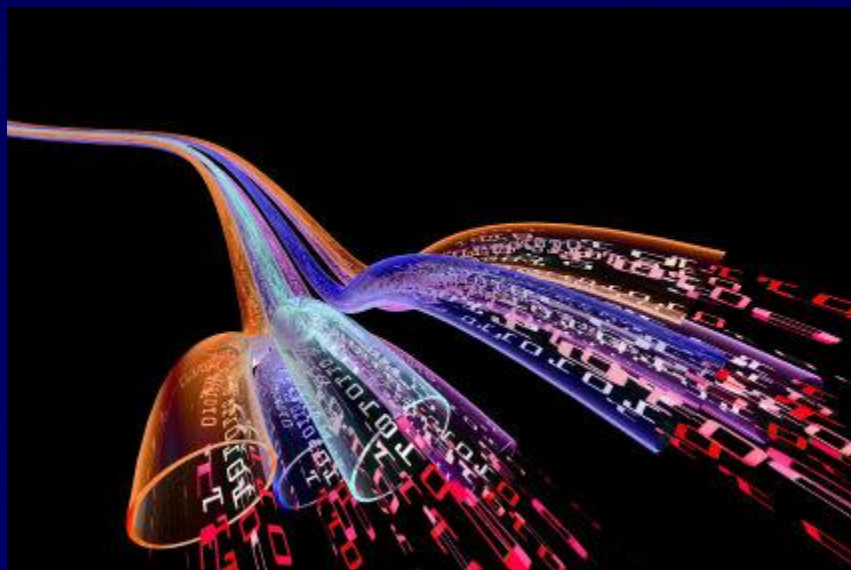
**Wide Field Camera 3**  
132 млн. \$



# Факт 9

## **Многие данные открыты**

- **Крупные дорогие инструменты должны эффективно использоваться**
- **Элемент соревновательности повышает эффективность**
- **Необходима перепроверка важных результатов независимыми исследователями**

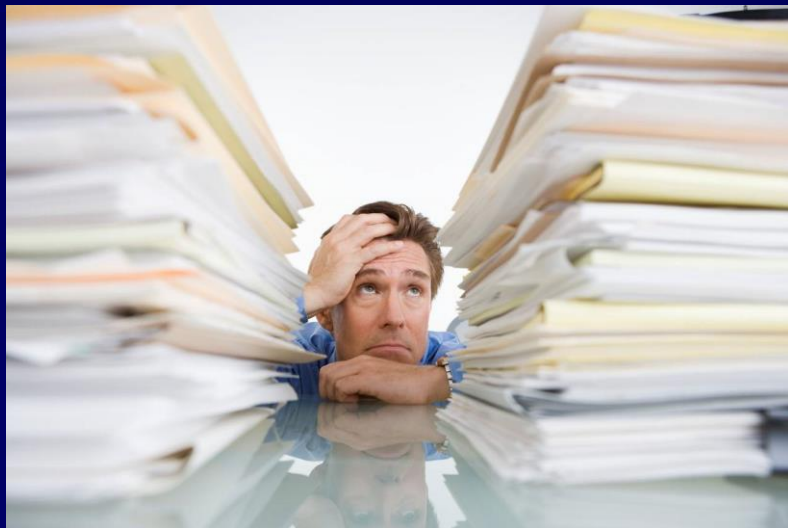


# Факт 10

**Публикуется более 1000  
оригинальных статей в месяц.**

**Астрономия переживает стадию бурного развития,  
во многом связанную с развитием и эффективным  
использованием наблюдательной техники.**

**Мы живем в очень интересное время ...**



**Вот только когда же  
все это читать?**

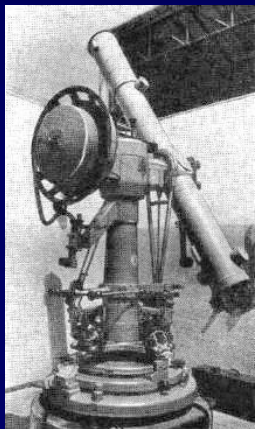
# АСТРОНОМИЯ

## Астрометрия

Измерение координат  
и времени

Расцвет: 19 век

Новое: пульсарная  
астрометрия,  
спутники



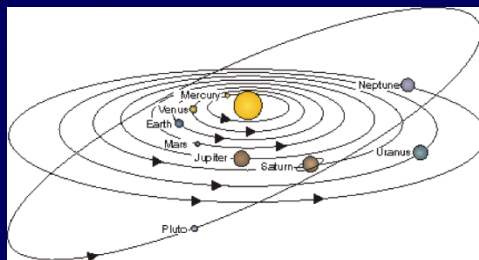
## Небесная механика

Движение небесных тел

Расцвет: 18 век –

первая половина 19 века

Новое: теория относит., хаос



## Астрофизика

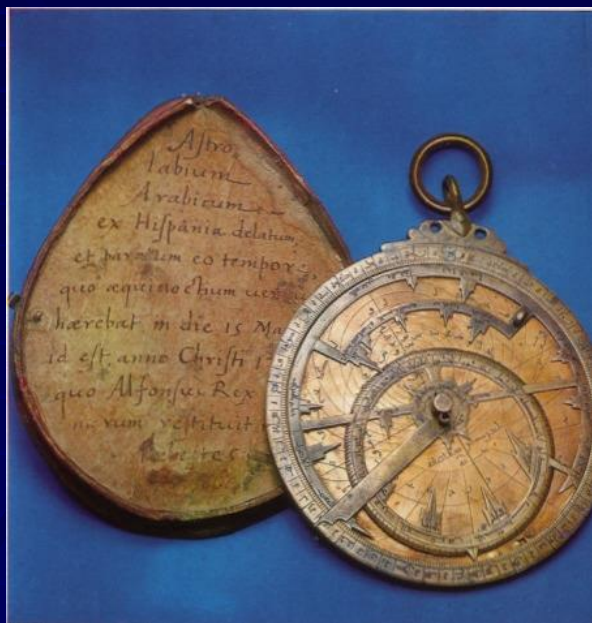
Физика небесных тел

Расцвет: сейчас

Новое: инструменты



# Астрометрия



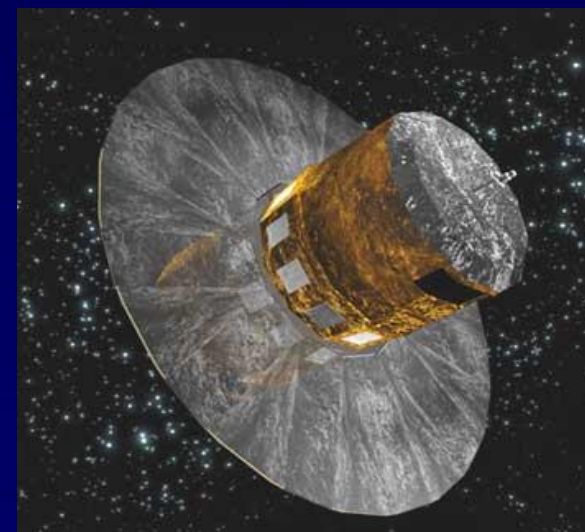
Астролябия

Прогресс в точности измерений связан с развитием техники.

Для измерения времени астрономические стандарты сейчас не используются, но в будущем ситуация может измениться благодаря наблюдениям радиопульсаров.

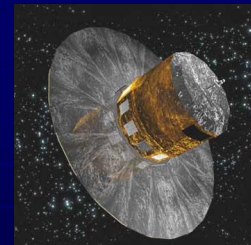


Hipparcos

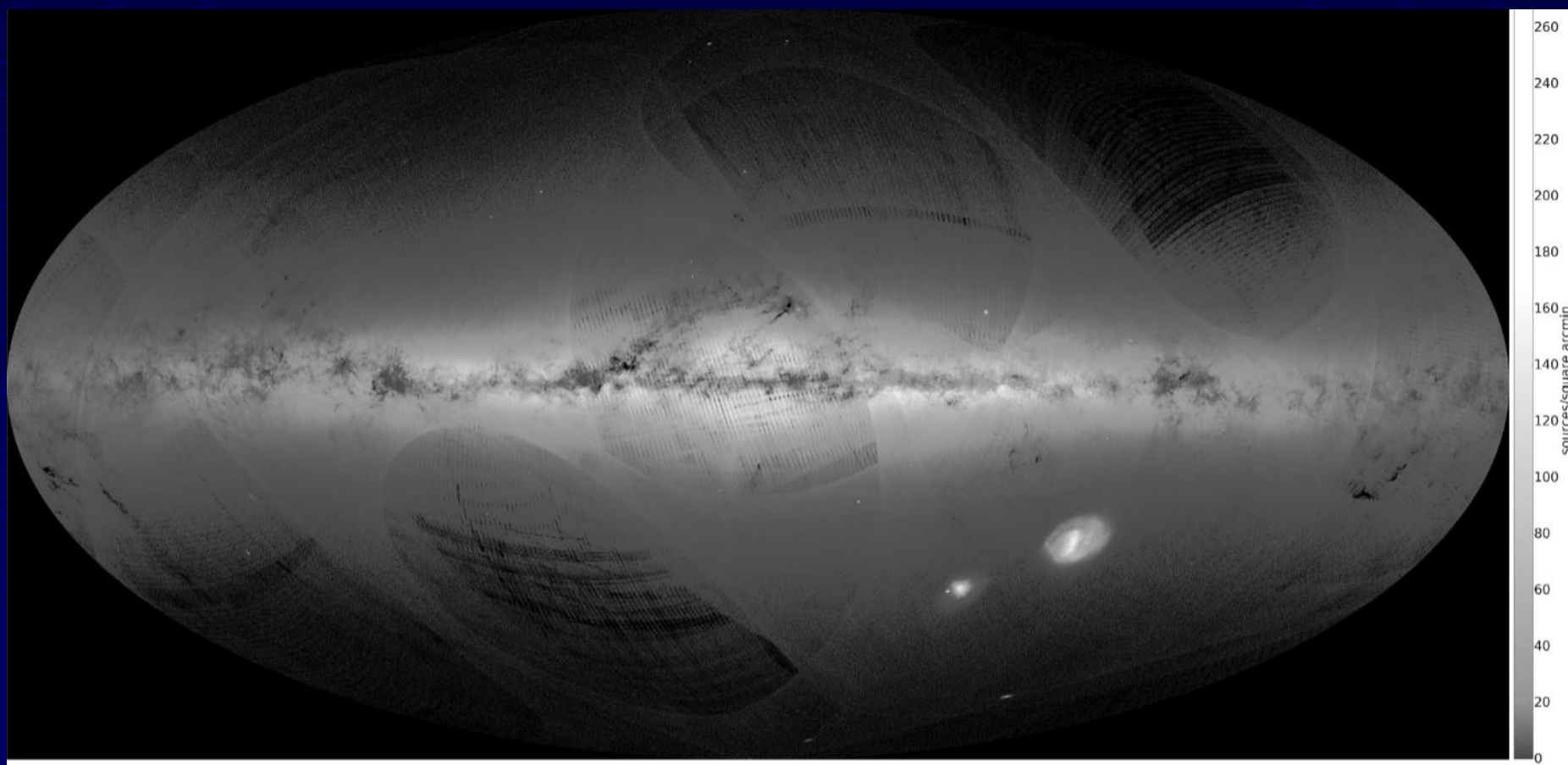


GAIA





# Первый релиз данных Gaia



1609.04172

Спутник Gaia запущен в конце 2013 г. Работа до конца 2024 г.  
Впервые даст нам трехмерную карту половины Галактики.



# Второй релиз Gaia

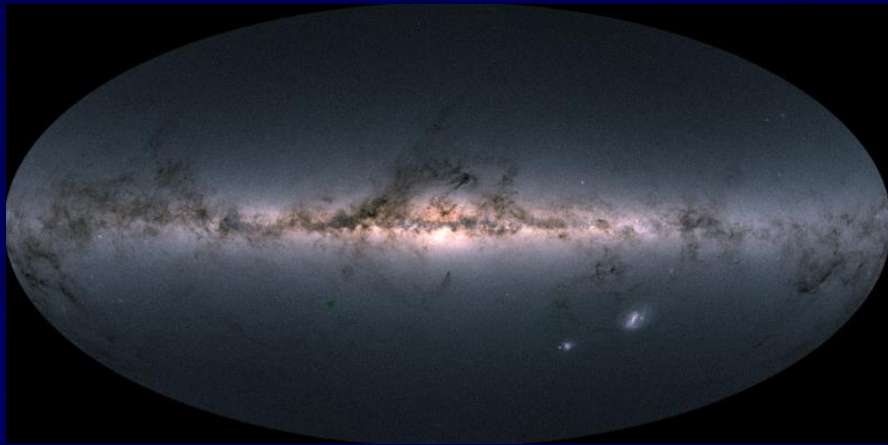
Результаты 22 месяцев наблюдений.

Координаты и блеск 1.7 млрд объектов.

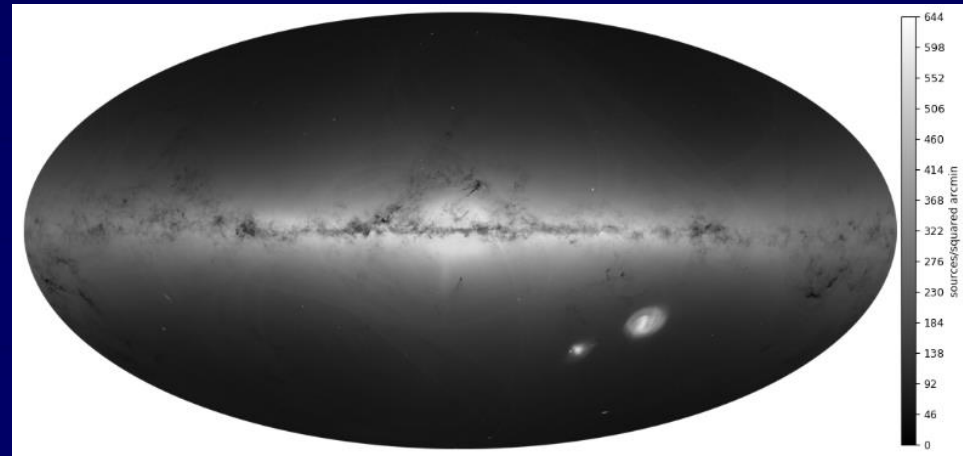
Параллаксы и собственные движения для 1.3 млрд.

А также радиальные скорости, температуры  
и другие параметры для множества звезд.

14000 малых тел Солнечной системы.



1804.09365

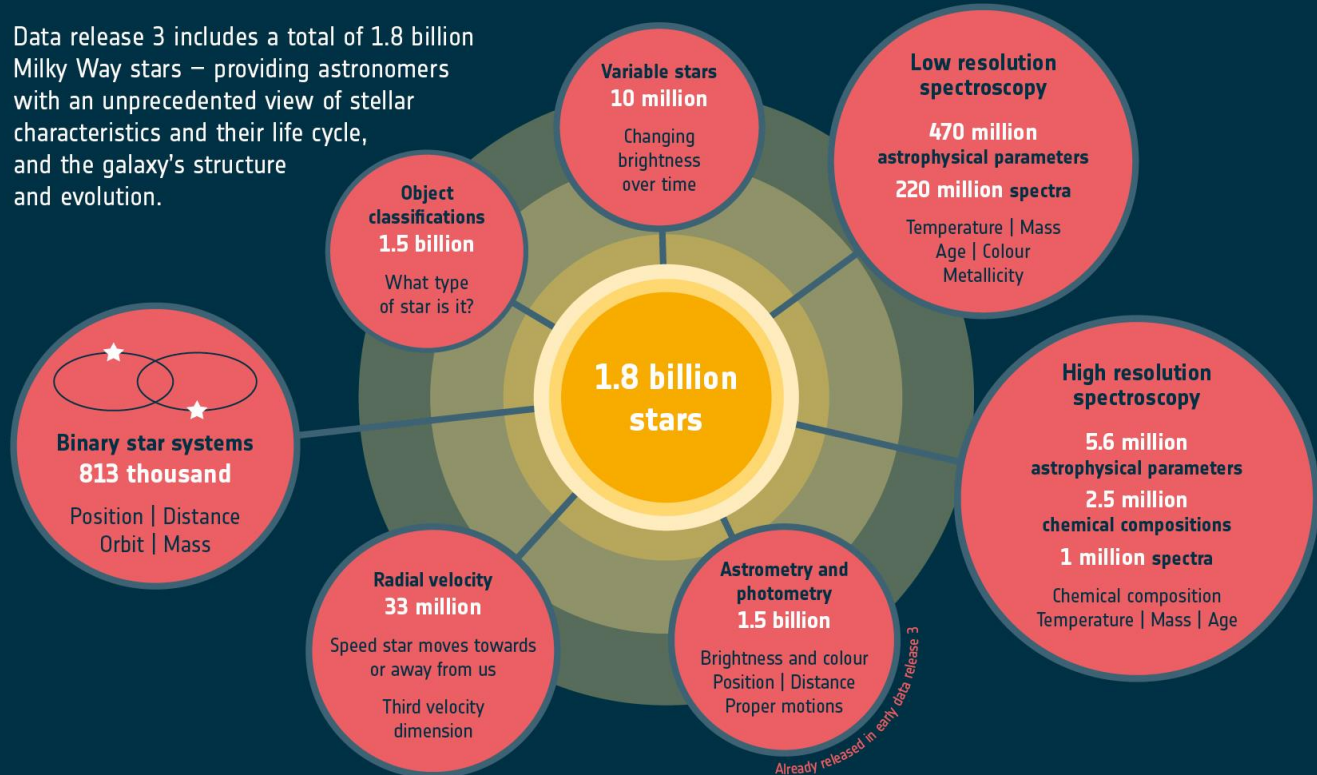


# Третий релиз Gaia



## MILKY WAY STARS

Data release 3 includes a total of 1.8 billion Milky Way stars – providing astronomers with an unprecedented view of stellar characteristics and their life cycle, and the galaxy's structure and evolution.



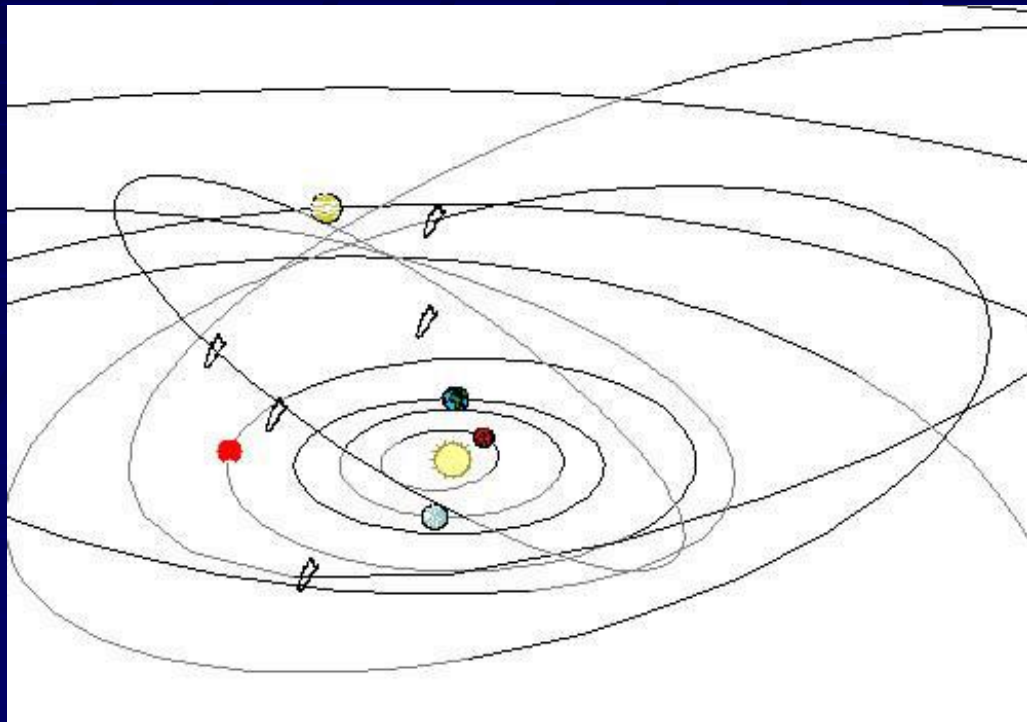
Already released in early data release 3

<https://www.gaia.ac.uk/data/gaia-data-release-3>

- 34 месяца наблюдений
- 1.8 миллиарда объектов
- Спектральные типы для 217 млн звезд
- Микролинзирование
- Планетные транзиты
- 150 000 объектов Солнечной системы
- Изучение Туманности Андромеды (M31)
- 6.6 млн кандидатов в квазары
- 1.1 млн квазаров изучены детально
- Миллионы галактик ....

См. Summary данных 3го релиза в 2208.00211

# Небесная механика



В середине 20 века новым ключевым моментом стал расчет орбит спутников.

Сейчас для расчета траекторий в Солнечной системе уже приходится использовать Теорию относительности.

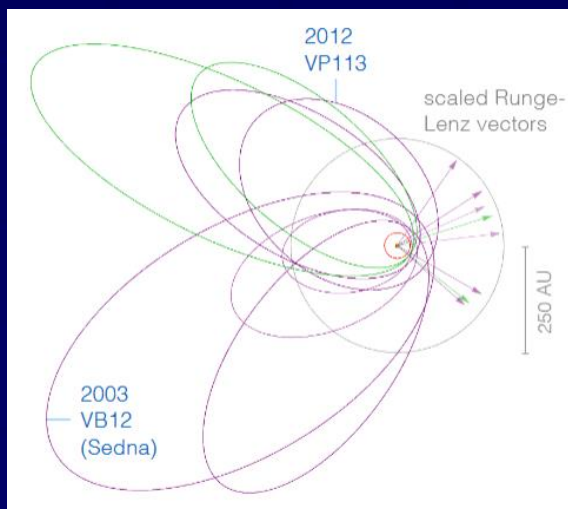
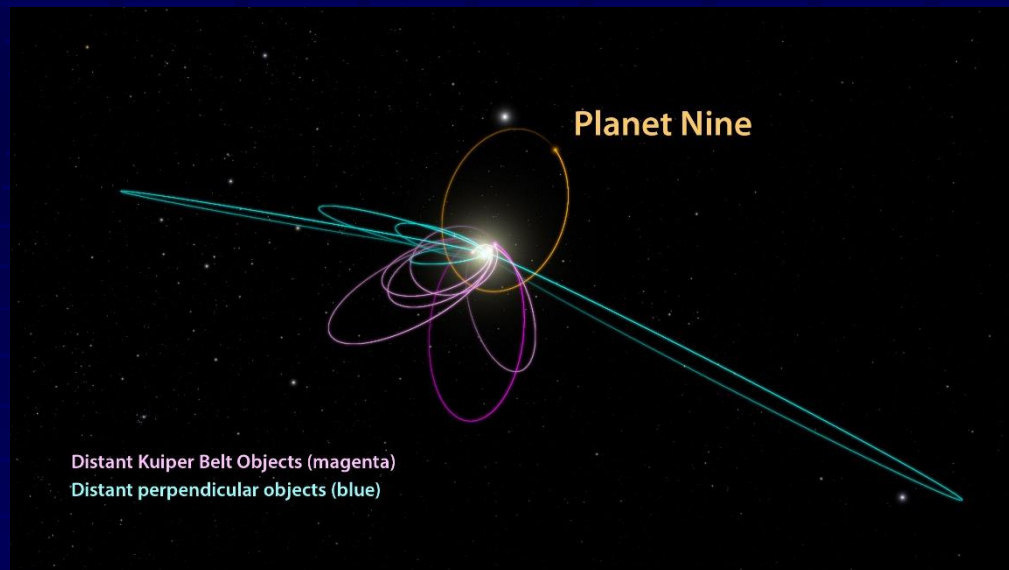
# Девятая планета

В течение нескольких лет накапливаются данные, которые свидетельствуют в пользу того, что в Солнечной системе может быть еще одна массивная планета.

В январе 2016 г. появилась работа Батыгина и Брауна, которая вывела обсуждение на новый уровень.

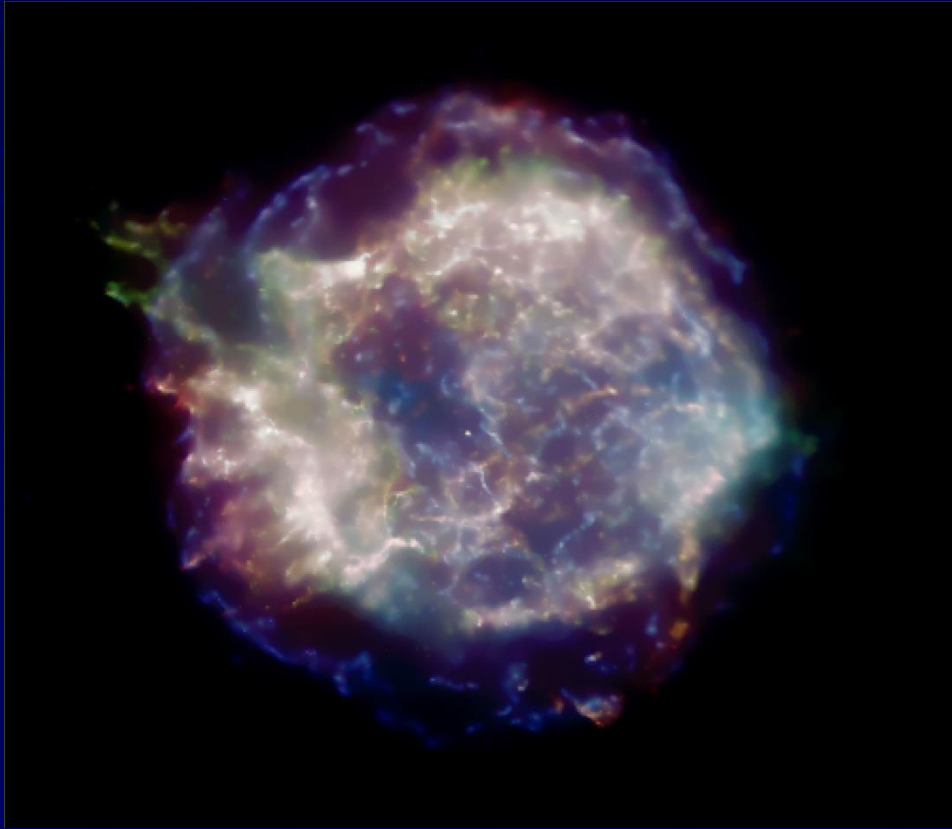
Начались активные поиски девятой планеты.

1601.05438, 1603.05712



Орбиты далеких малых тел оказываются особым способом «выстроены». Чтобы объяснить это можно привлечь гипотезу о существовании планеты с массой в несколько земных и >10 раз дальше Плутона.

# Астрофизика



Сейчас астрофизика фактически является синонимом астрономии. Это одна из самых динамичных наук. Бурный прогресс связан с тем, что мы можем пока еще строить все более крупные инструменты.

В астрофизике важна и наблюдательная, и теоретическая составляющие.



# Астрономия – наблюдательная наука



*Главная особенность астрономии состоит в том, что в ней прямой эксперимент заменен на наблюдения.*

# Наблюдения, наблюдения, наблюдения ....



На Земле и к космосе

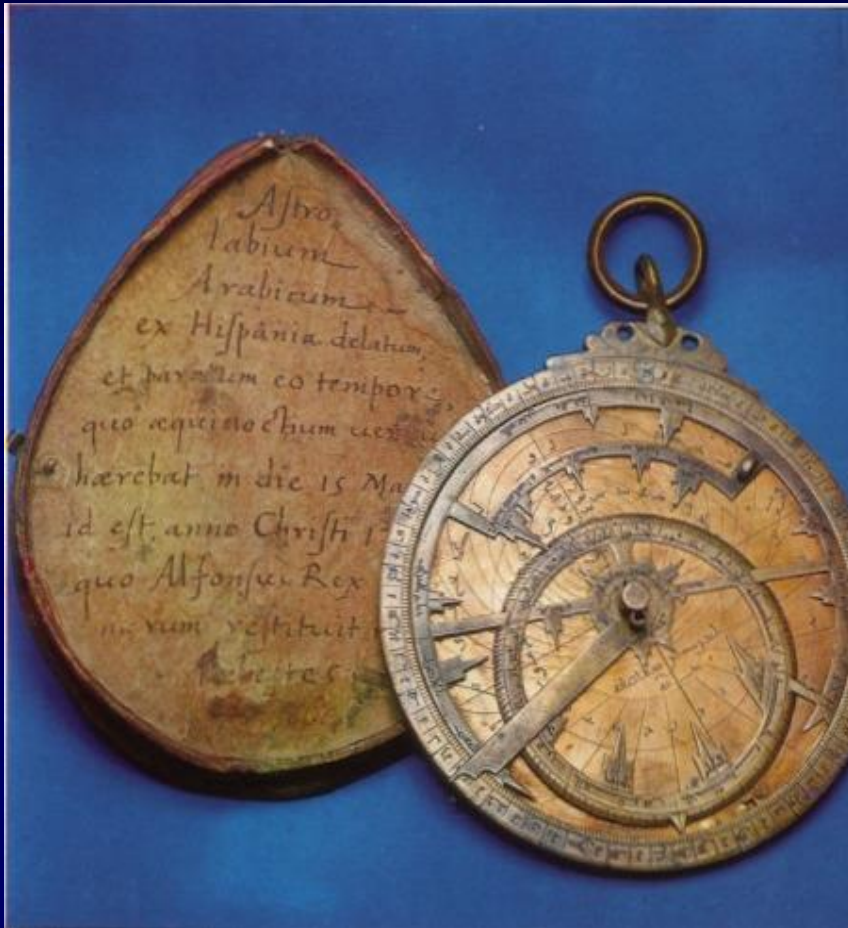


В радио- и в рентгеновском диапазонах





# Древняя астрономия



Измерения углов  
с помощью  
простейших  
Приборов.

Определение  
относительных  
положений звезд  
и планет.

Ну и конечно же  
определение  
времени.



# Первые телескопы



1564-1642

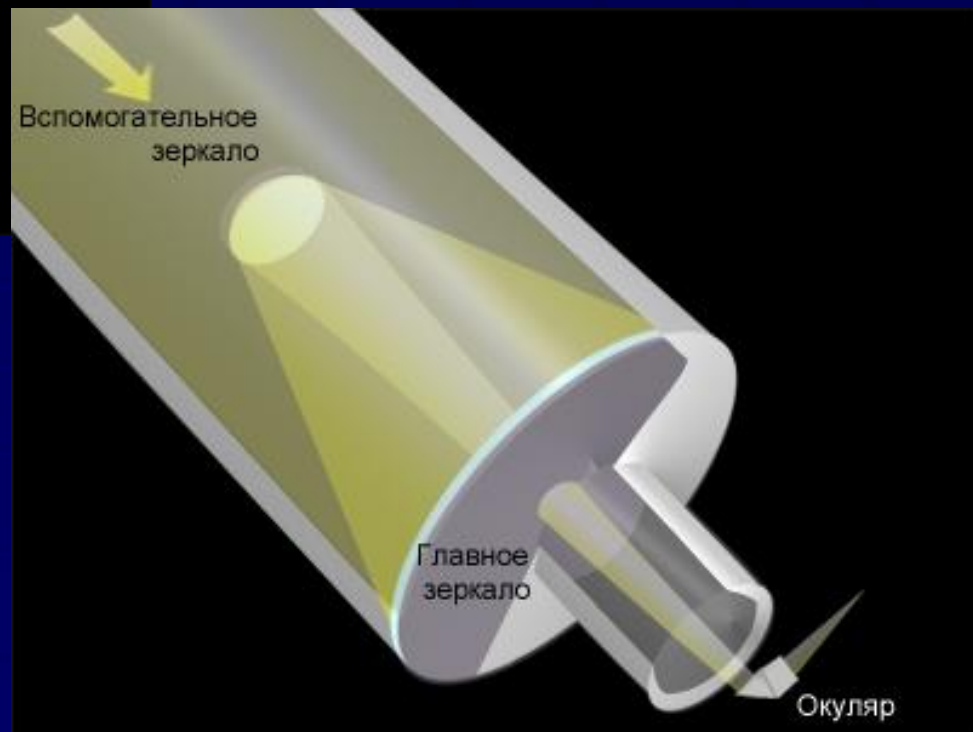
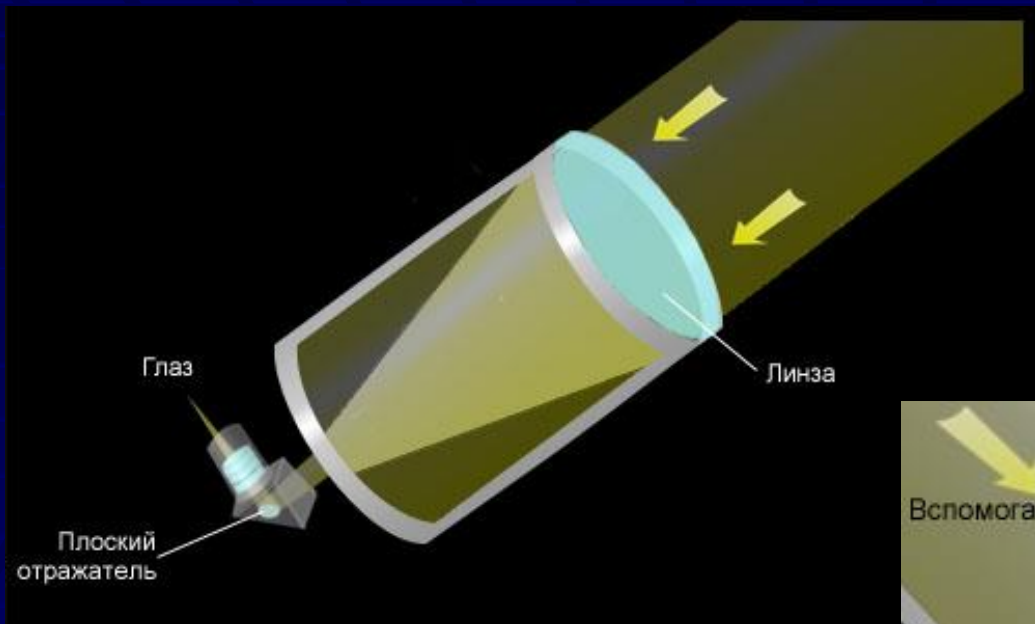


©IMSS - Firenze



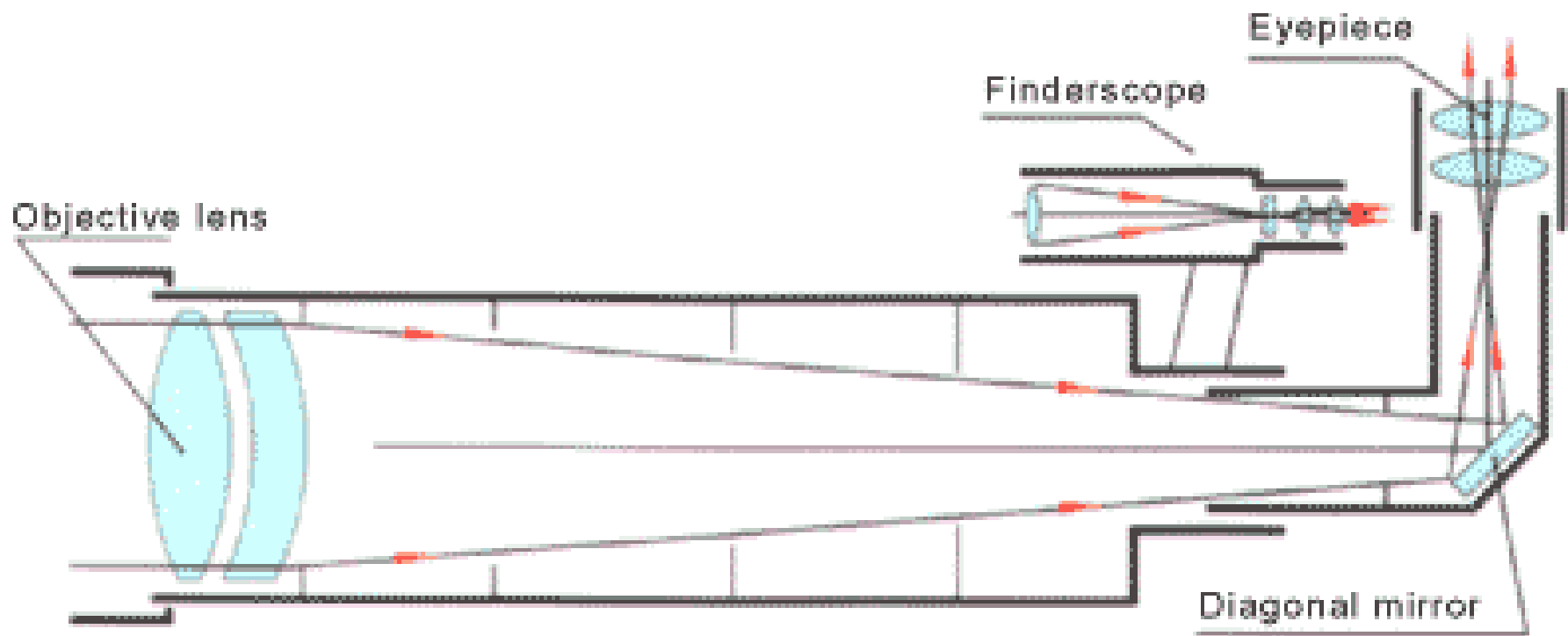
1609-10 гг.

# Рефракторы и рефлекторы



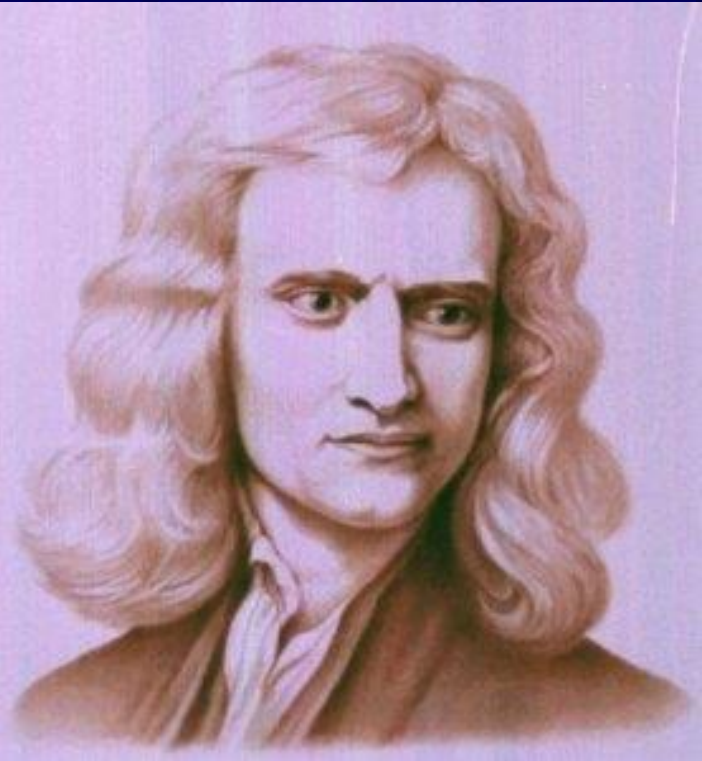


# Телескопы-рефракторы

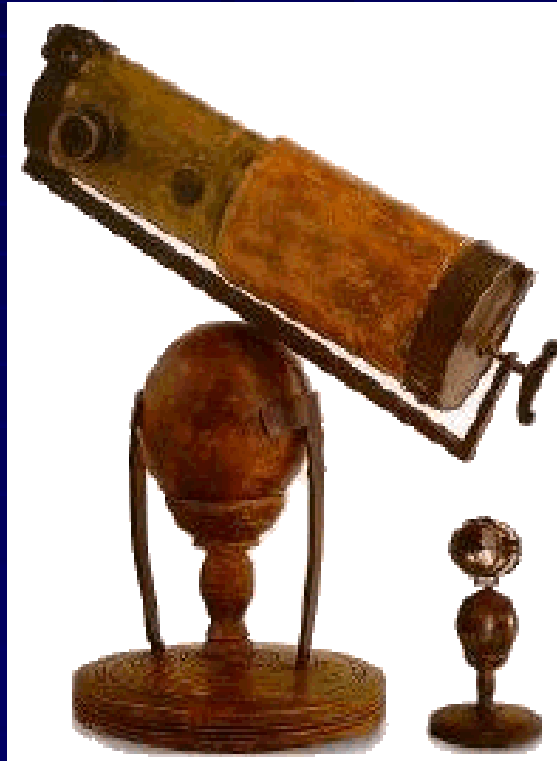


Объективом является собирающая линза (или система линз).

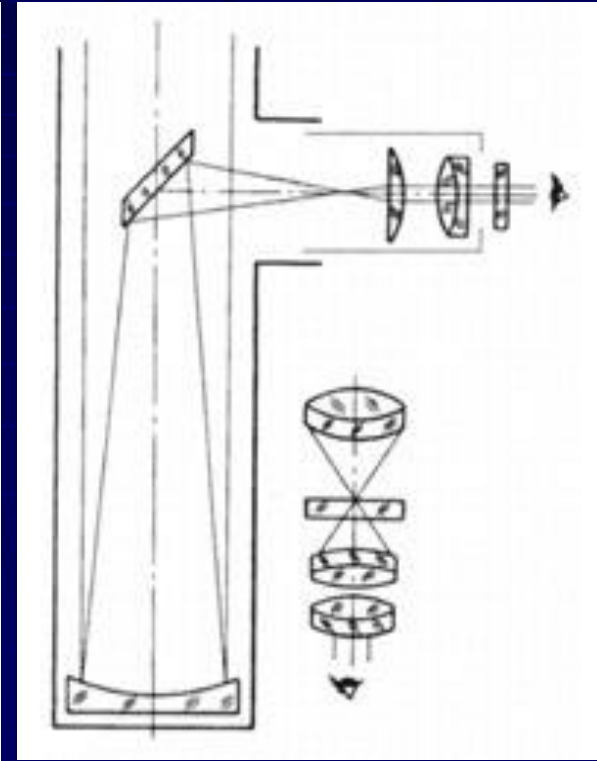
# Телескопы-рефлекторы



1668 год



Объективом является вогнутое зеркало.



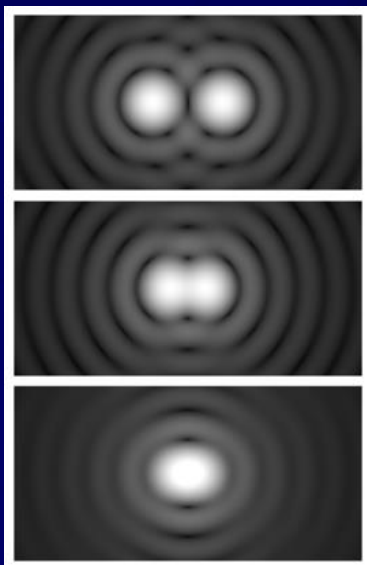
# Зачем нужен телескоп???

1. Самое главное: чтобы собирать больше света!!!!  
Чем больше удастся собрать света –  
тем более слабые объекты мы увидим.



Количество света зависит от диаметра объектива

2. Чтобы рассмотреть более мелкие детали (увеличение).  
Предельное увеличение тем больше,  
чем больше диаметр объектива.



wikipedia.org

Диаметр зрачка глаза 5-8 мм.

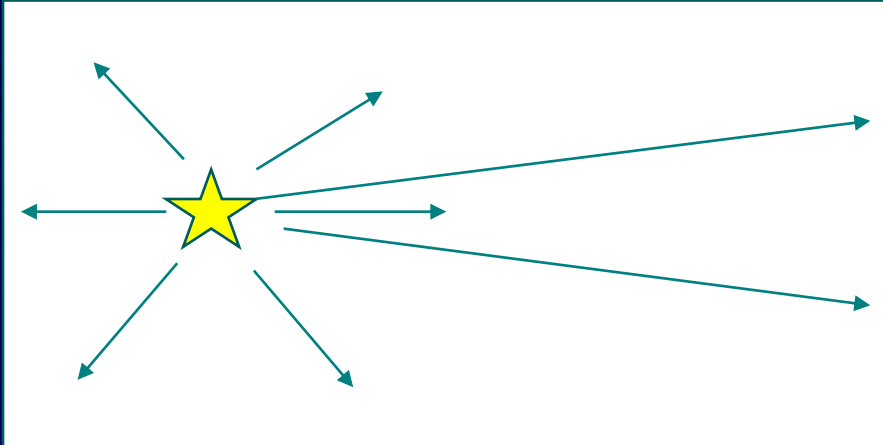
Первые телескопы – сантиметры.

Крупные современные телескопы –  
до 10 метров.

Строящиеся 30-40 метров.

Проекты – до 100 метров!!!!

# Собирающая площадь



Поток  $f=L/4\pi d^2$

[Энергия/площадь/время]

Чтобы увидеть слабые источники -  
нам надо собирать энергию  
с большой площади.

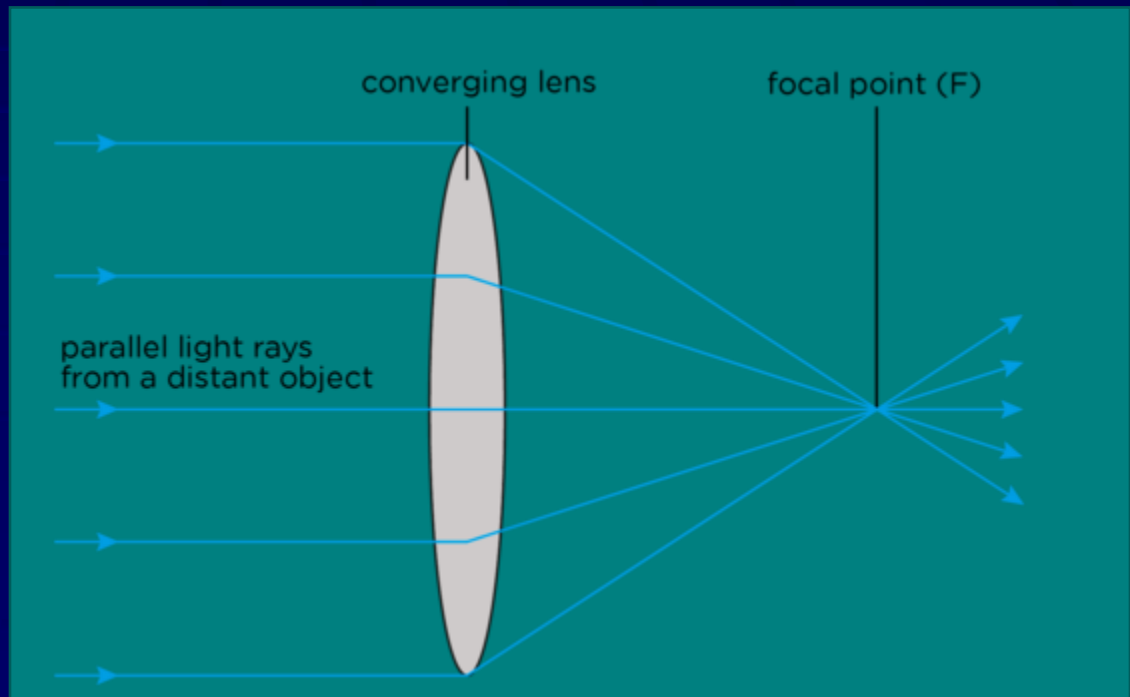
Больше энергии –  
больше фотонов!

$$E=h\nu$$

$$h=6.63 \cdot 10^{-27} \text{ эрг/с}$$

$$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$$





# Звездные величины

$$\Delta m = 5 \rightarrow 100 : 1$$

$$\Delta m = 1 \rightarrow (100)^{\frac{1}{5}} : 1 \\ \sim 2.512 : 1$$

Блеск звезд можно измерять в звездных величинах.

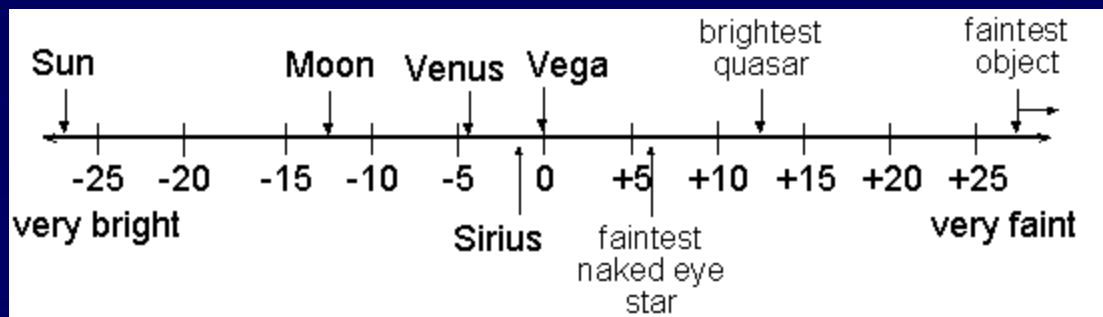
Это логарифмическая величина, что позволяет в рамках разумной шкалы характеризовать большие изменения блеска.

От звезды нулевой звездной величины мы получаем примерно 1000 квантов в секунду на кв. см на ангстрем.

$$\frac{f_2}{f_1} = 100^{(m_1 - m_2)/5}$$

or

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}\left(\frac{f_1}{f_2}\right)$$



Apparent brightnesses of some objects in the magnitude system.

# Абсолютная звездная величина

$$m - M = -2.5 \log\left(\frac{f}{f(10\text{pc})}\right)$$

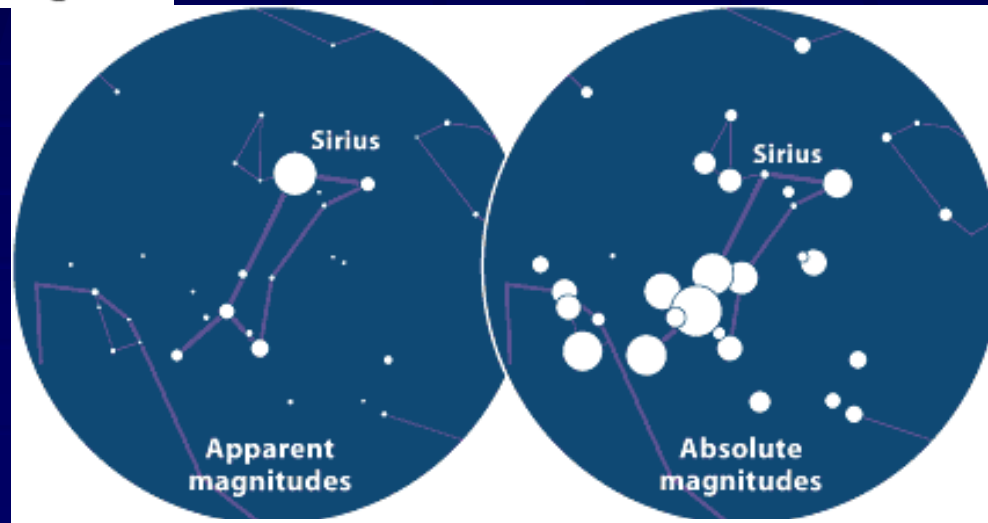
$$f = \frac{L}{4\pi d^2} \quad f(10\text{pc}) = \frac{L}{4\pi(10\text{pc})^2}$$

$$m - M = -2.5 \log\left(\left(\frac{10}{d}\right)^2\right)$$

$$m - M = -5 \log(10/d) = 5 \log d - 5$$

Абсолютная звездная величина – звездная величина, которую звезда имела бы на расстоянии 10 пк.

Абсолютная звездная величина Солнца +4.<sup>m</sup>8



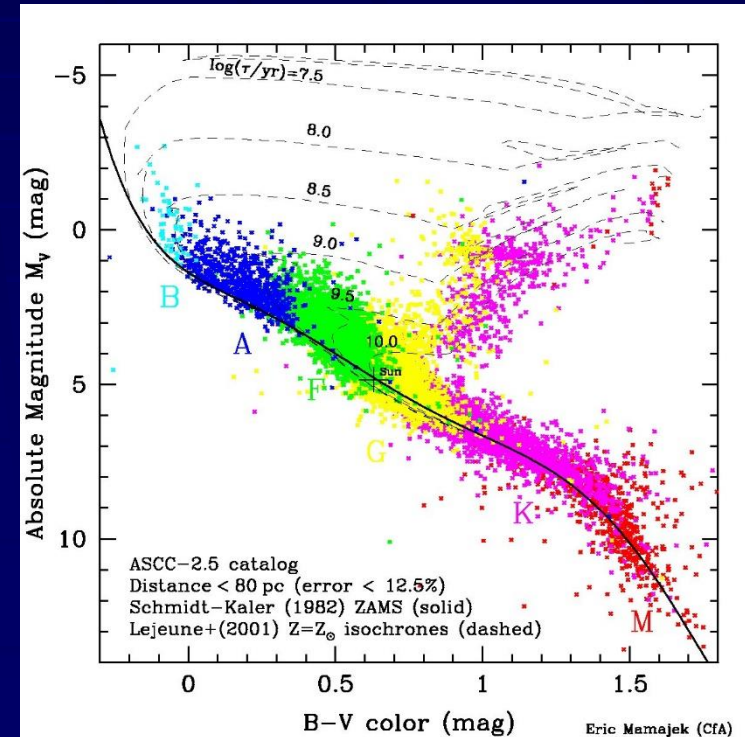
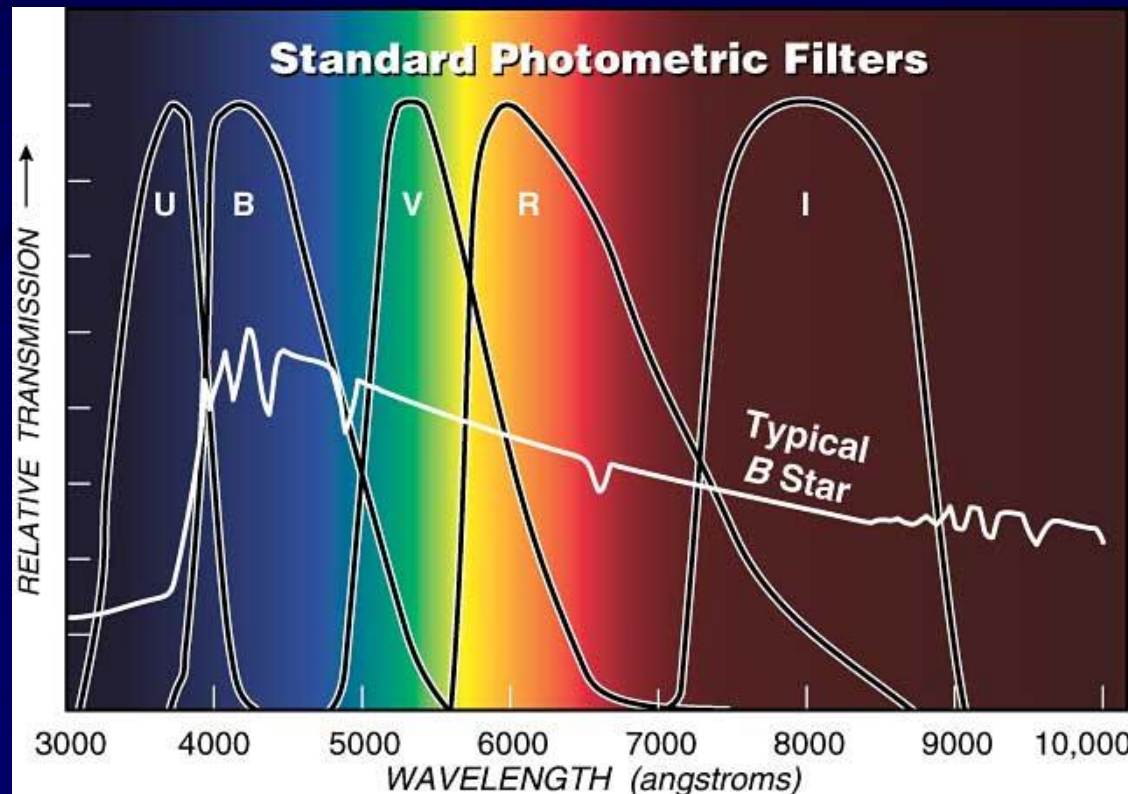
$$(m - M) = 5 \log_{10}(d) - 5$$

# Показатели цвета

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

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

От звезды нулевой величины в полосе (U, B, V) мы получаем около миллиона квантов в секунду на кв. см.



# Угловое разрешение

$$\theta = 1.220 \frac{\lambda}{D}$$

Определяется диаметром!  
(угол в радианах)

Примерно одна угловая секунда  
для синего (видимого) света  
и диаметра телескопа 10 см.

Для крупных телескопов (около метра)  
начинает ограничиваться  
параметрами атмосферы.

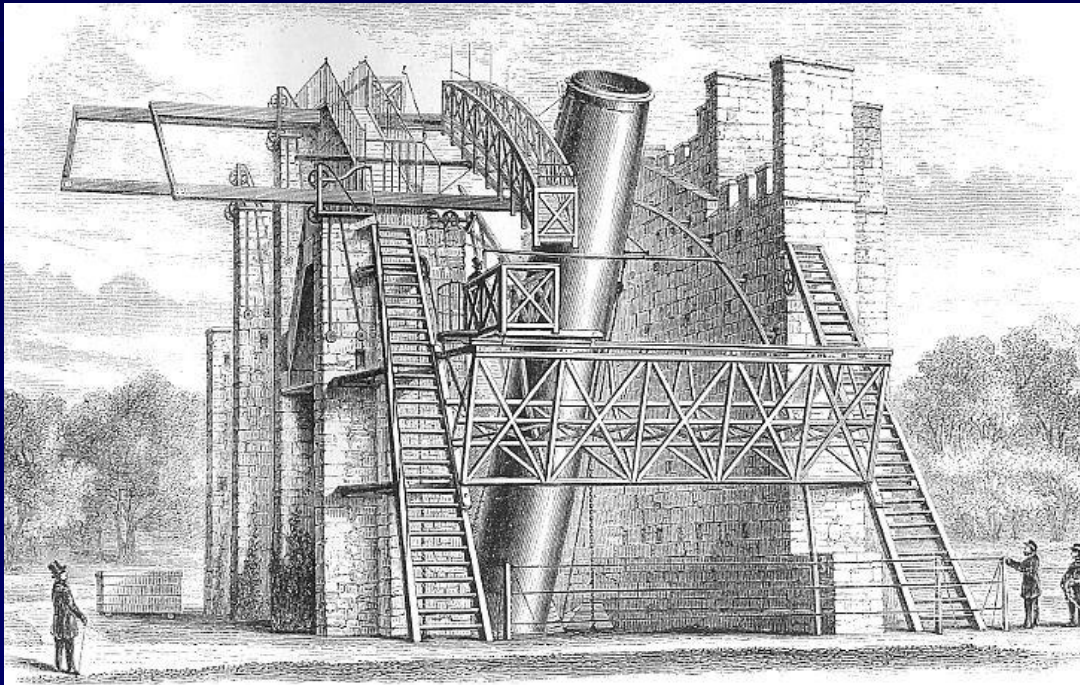
Масштаб изображения показывает какому углу соответствует  
единичная длина в фокальной плоскости:

$$L \text{ [сек. дуги/мм]} = 206265 / F \text{ [мм]}$$



# Оптические телескопы 17-19 вв.

Размеры и качество телескопов росли.



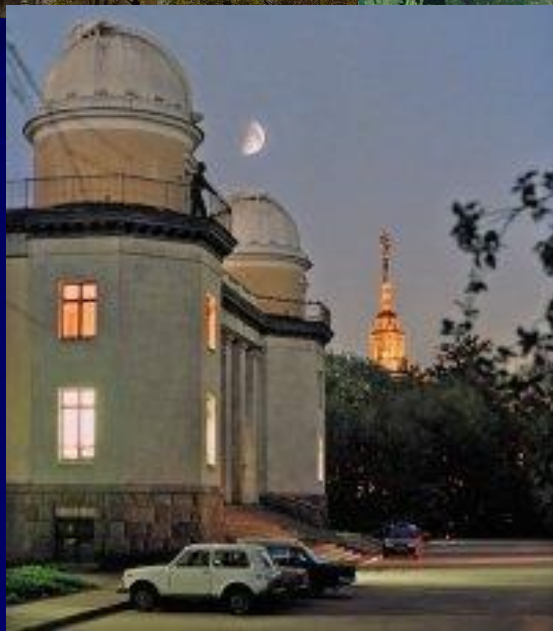
Рефлектор лорда Росса  
182 сантиметра (1845 г.)



Самый большой  
телескоп-рефрактор  
имеет диаметр 1 метр.



# Университетские обсерватории

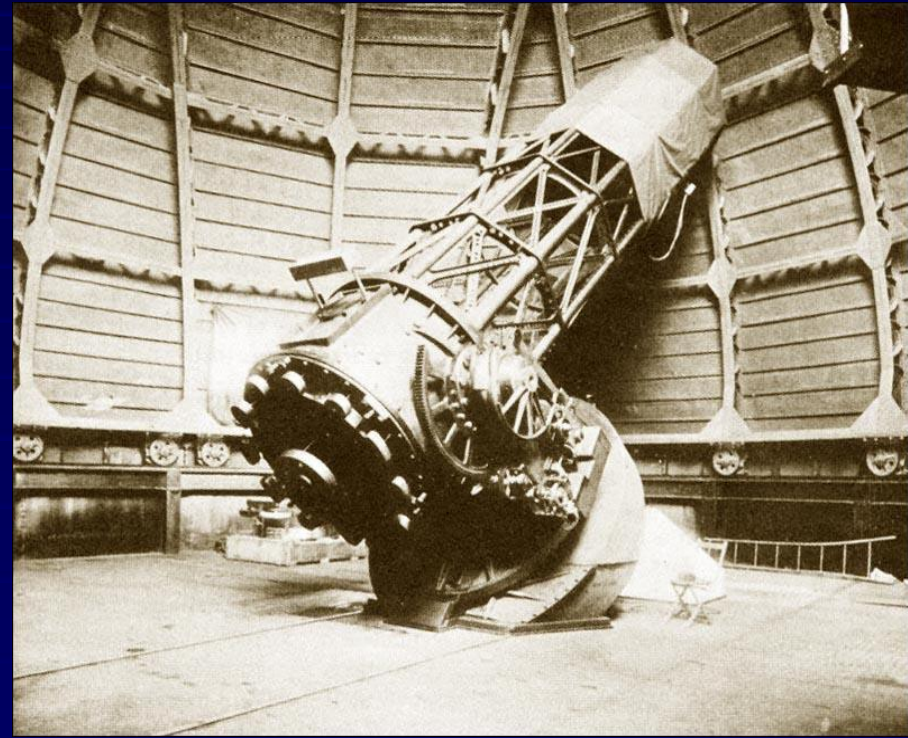




# Оптические телескопы в начале 20 века



Йеркский рефратор (102 см). 1897 год.



Маунт Вилсон.  
Рефлектор (152 см). 1908 г.

**В двадцатом веке в «войне телескопов» победили рефлекторы!**

# Современные оптические телескопы



БТА 6 метров



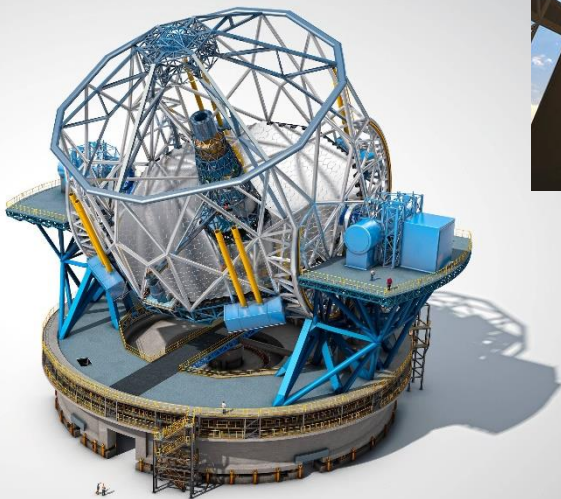
Gemini 8 метров



# Большие телескопы



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



**Great Paris Exhibition Telescope**  
 (lens at the same scale)  
 Paris, France (1900)

**Yerkes Observatory**  
 (40" refractor lens at the same scale)  
 Williams Bay, Wisconsin (1893)

**Hooker (100")**  
 Mt Wilson, California (1917)

**Hale (200")**  
 Mt Palomar, California (1948)

**Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope**  
 Hebei, China (2009)

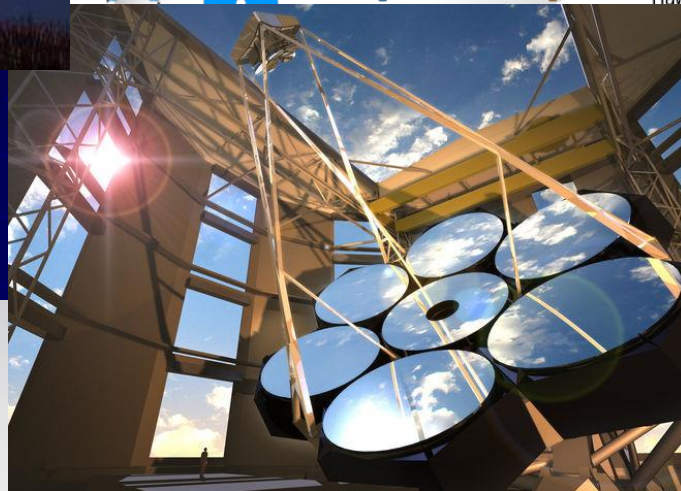
**Gran Telescopio Canarias**  
 La Palma, Canary Islands, Spain (2007)

**Keck Telescope**  
 Mauna Kea, Hawaii (1993/1996)

**Gemini North**  
 Mauna Kea, Hawaii (1999)

**Subaru Telescope**  
 Mauna Kea, Hawaii (1999)

**Thirty Meter Telescope**  
 Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)



**Gemini South**  
 Cerro Pachón, Chile (2000)

**European Synoptic Telescope**  
 Cerro Armazones, Chile (planned 2020)

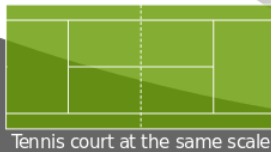
**James Webb Space Telescope**  
 Earth-Sun L2 point (planned 2018)

**Hubble Space Telescope**  
 Low Earth Orbit (1990)

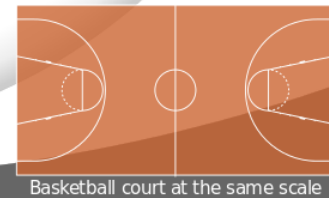
**Very Large Telescope**  
 Cerro Paranal, Chile (1998-2000)

**Magellan Telescopes**  
 Las Campanas, Chile (2000/2002)

**Giant Magellan Telescope**  
 Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)



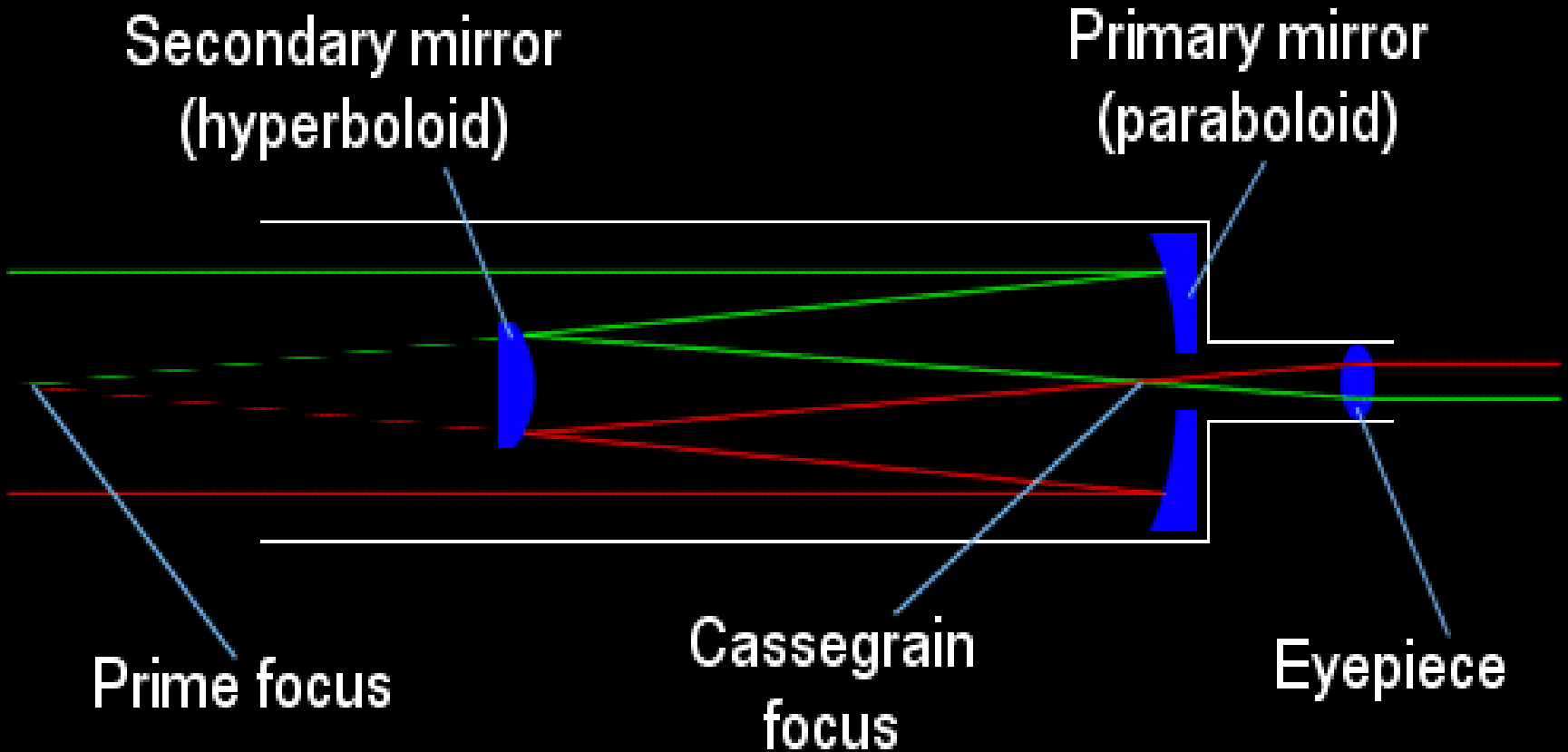
**Overwhelmingly Large Telescope**  
 (cancelled)  
 Arecibo radio telescope at the same scale



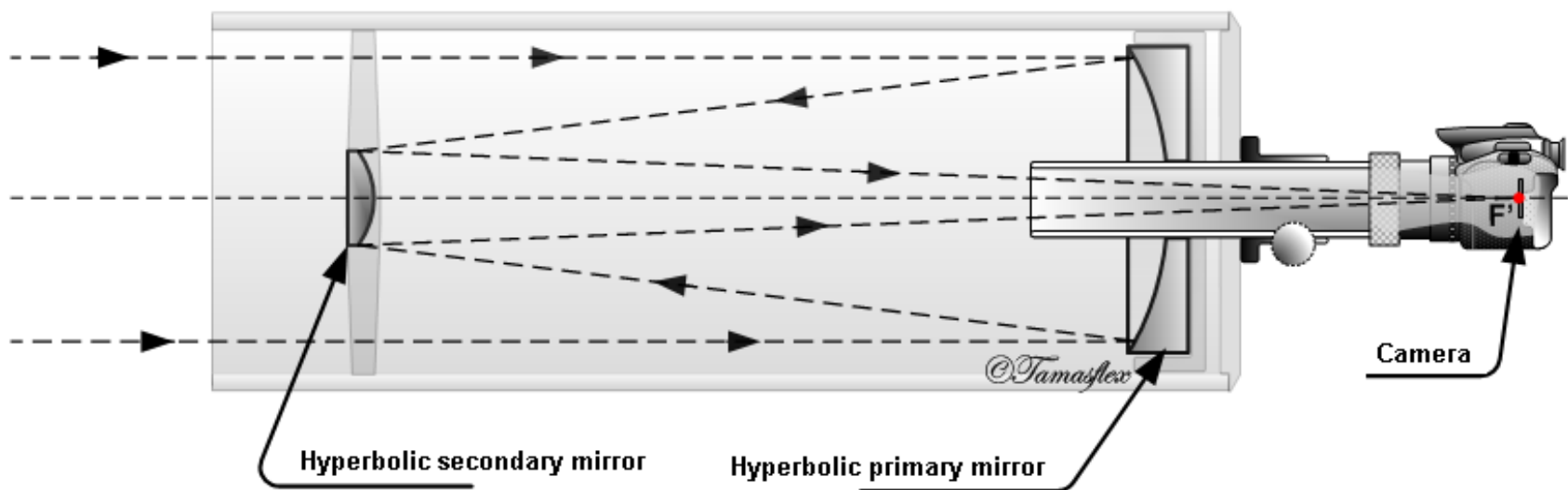
Human at the same scale  
 0 5 10 m  
 0 10 20 30 ft

# Система Кассегрена

## Cassegrain Telescope



# Система Ричи-Кретьена

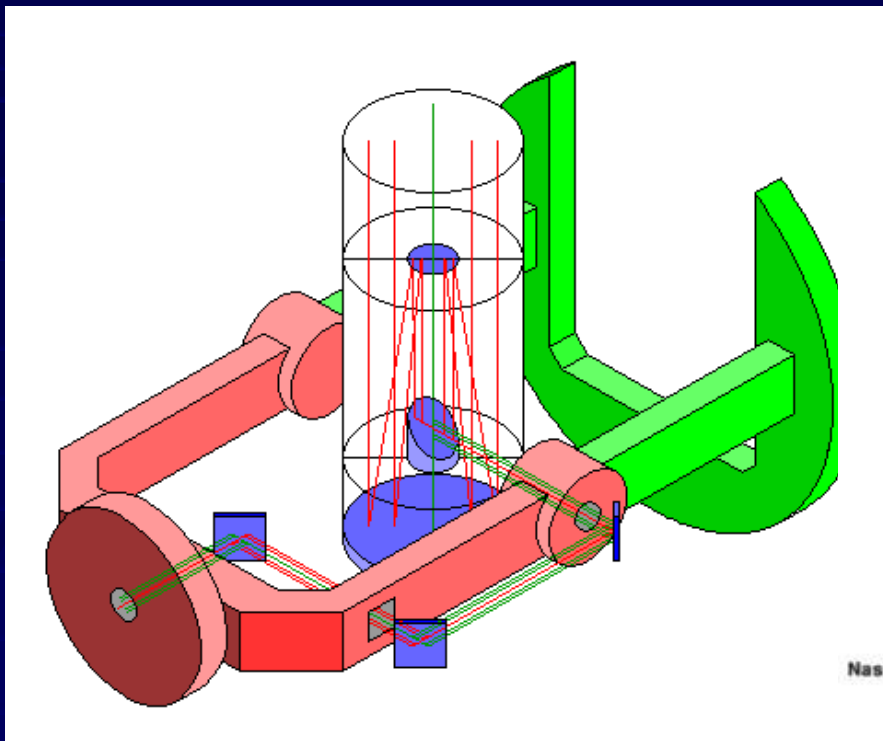


**Ritchey - Chrétien (RCT)**

Компактность инструмента

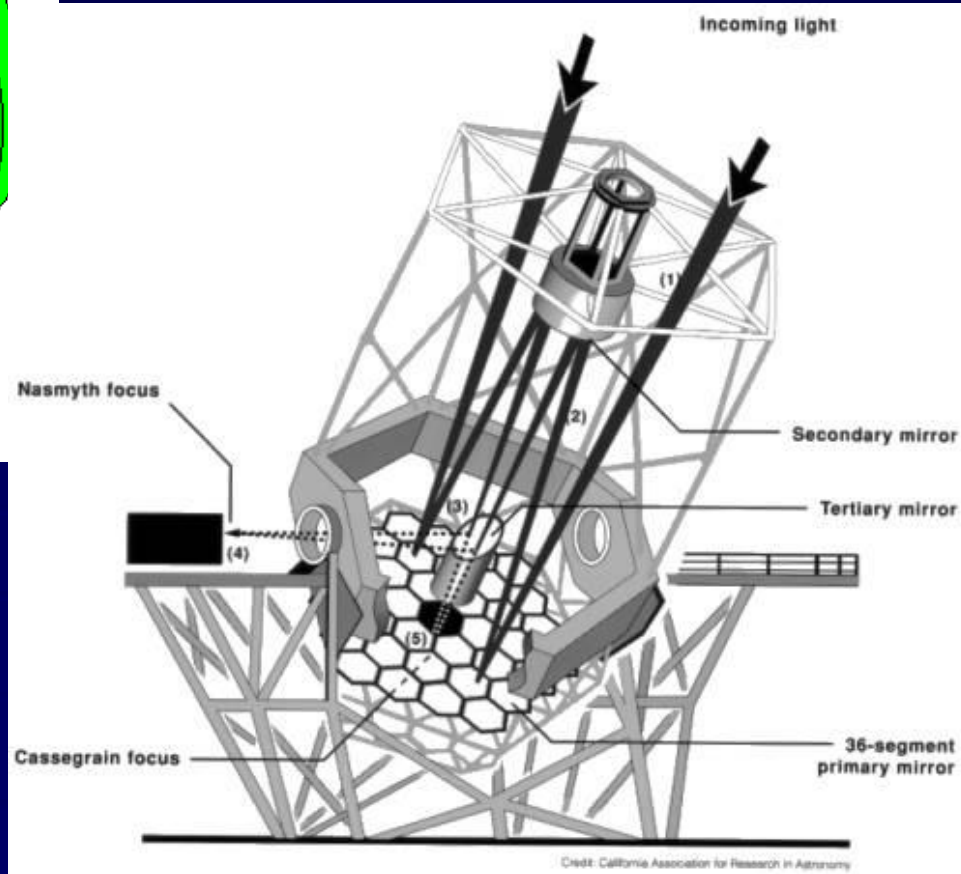
# Неподвижные фокусы

<http://www.quadibloc.com/science/opt03.htm>



Фокус Кудэ

Фокус Нэсмита



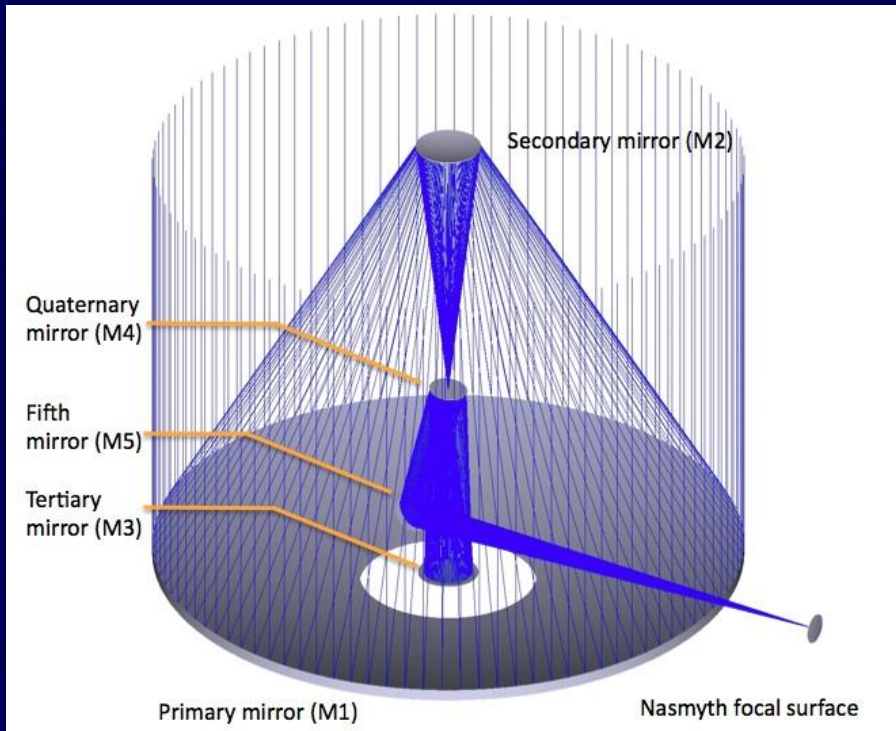
<http://www.faculty.virginia.edu/ASTR5110/lectures/optics1/optics1.html>

Credit: California Association for Research in Astronomy

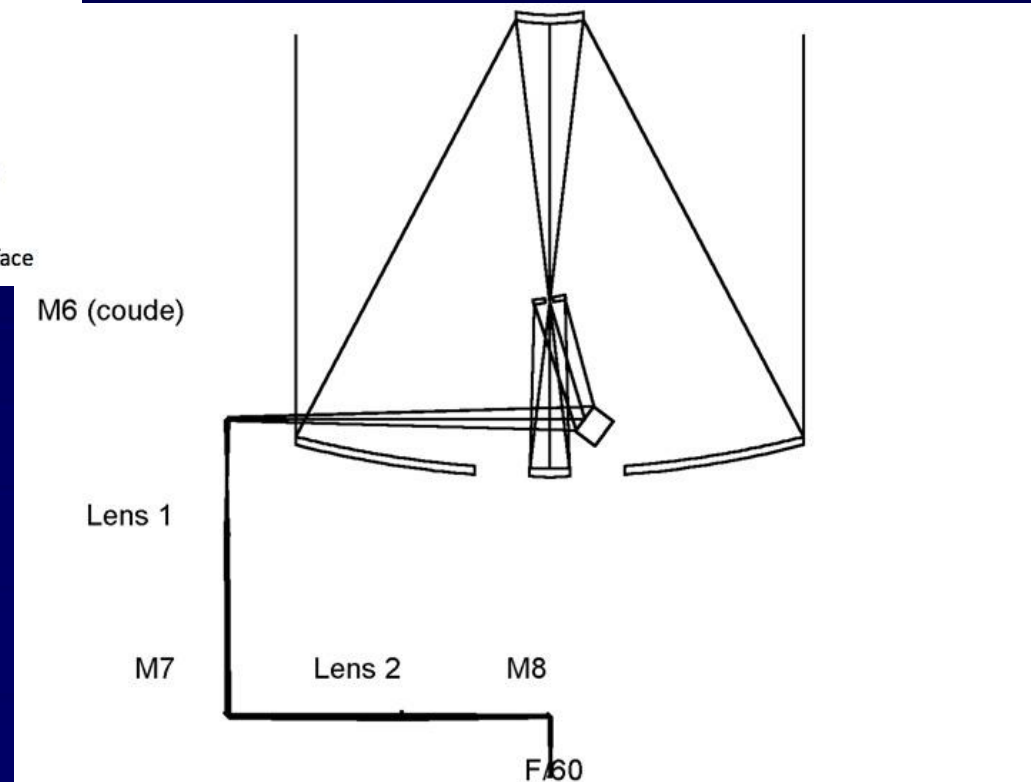


# ELT

Реальные схемы могут быть сложнее и содержать несколько дополнительных оптических элементов.

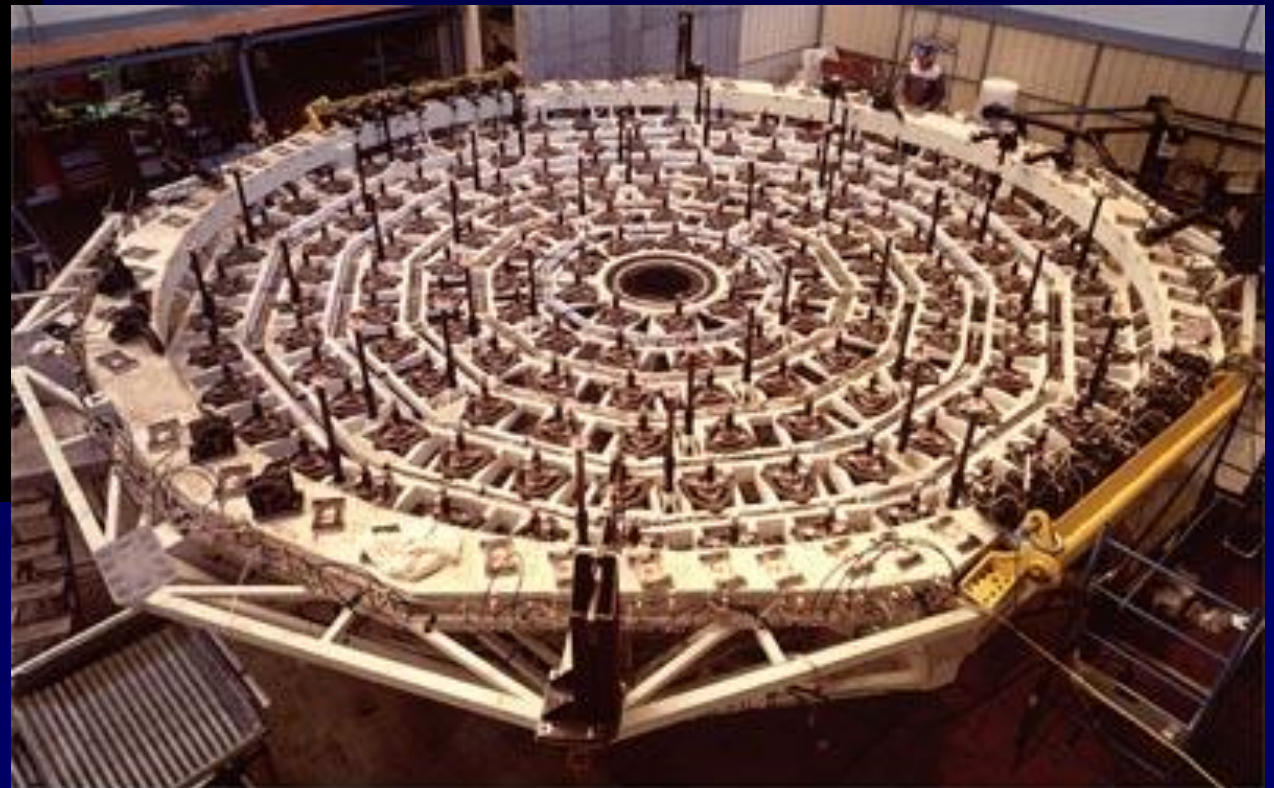
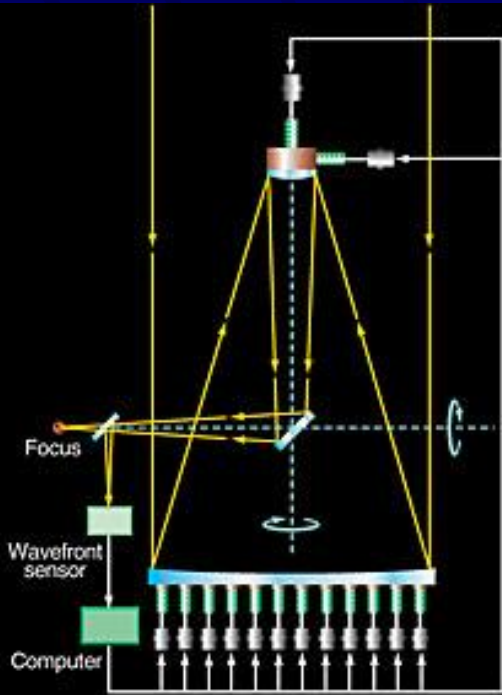


<https://www.eso.org/sci/facilities/elt/telescope/design/>



# Активная оптика

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



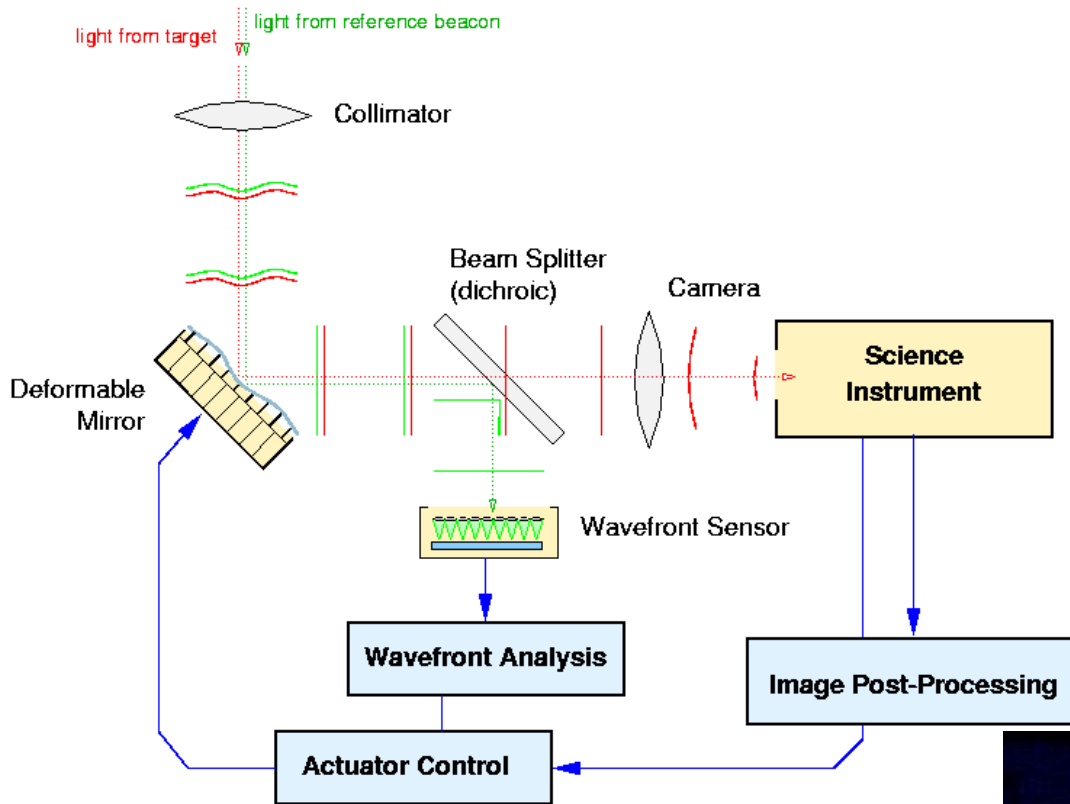
Разработана инженером ESO Raymond Wilson

Еще проще работать с сегментированными зеркалами

Active Mirror Supports in VLT M1 Cell

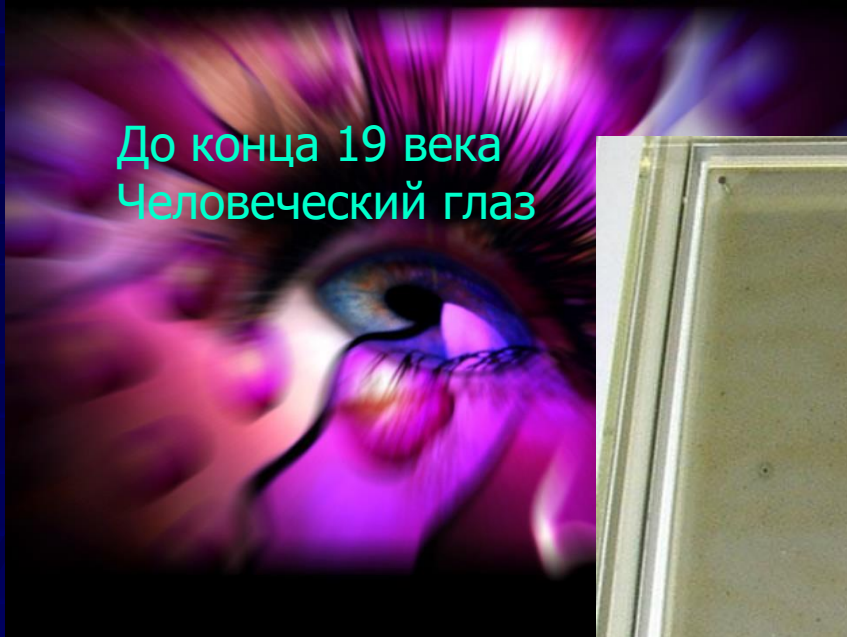
# Адаптивная оптика

<http://cfao.ucolick.org/ao/how.php>





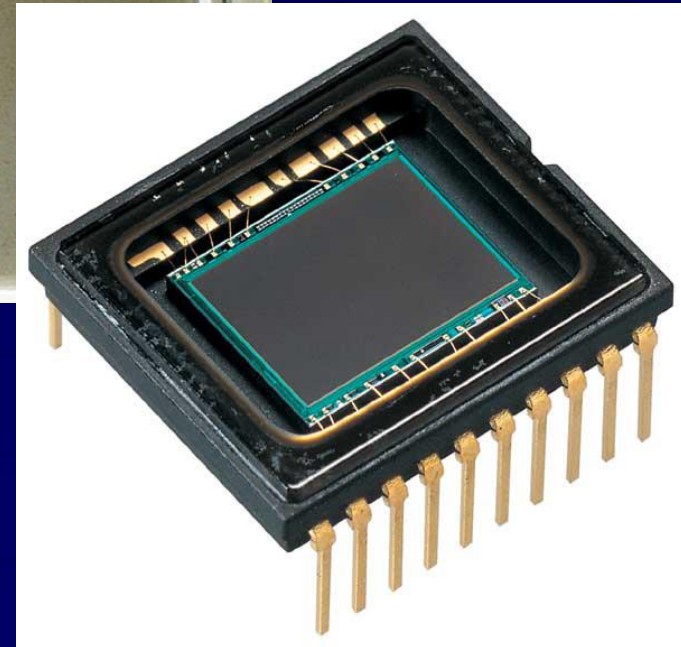
# Глаз, фото, ПЗС



До конца 19 века  
Человеческий глаз



До конца 20 века  
Фотопластинки

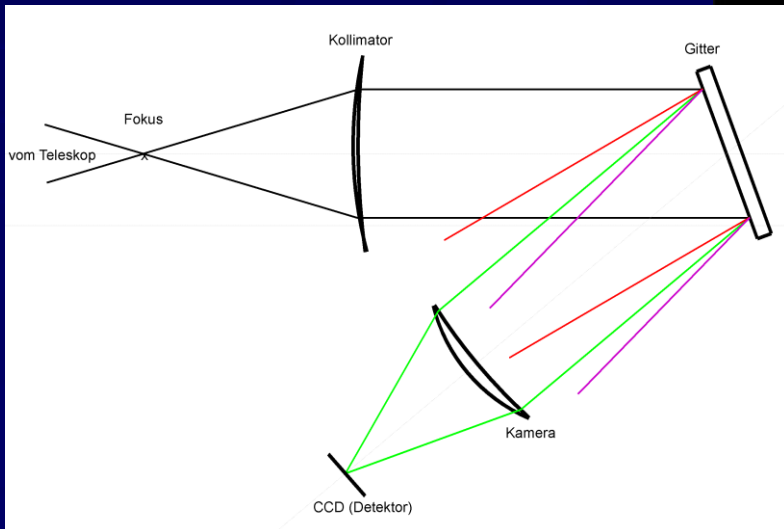
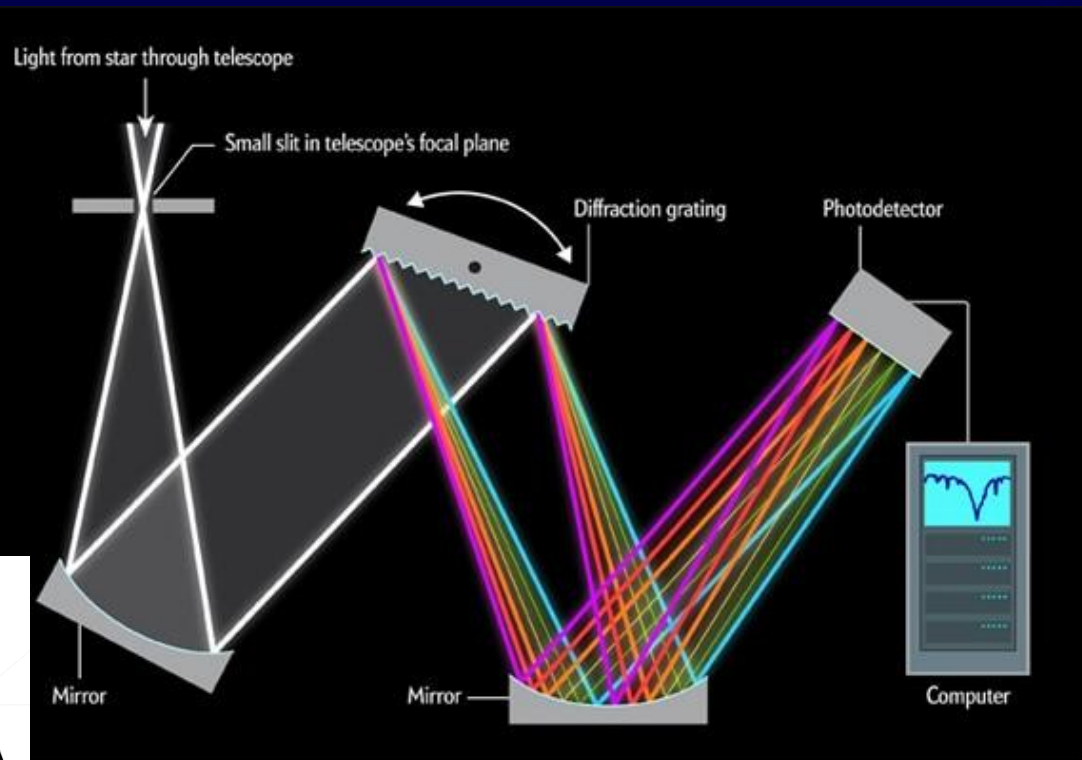
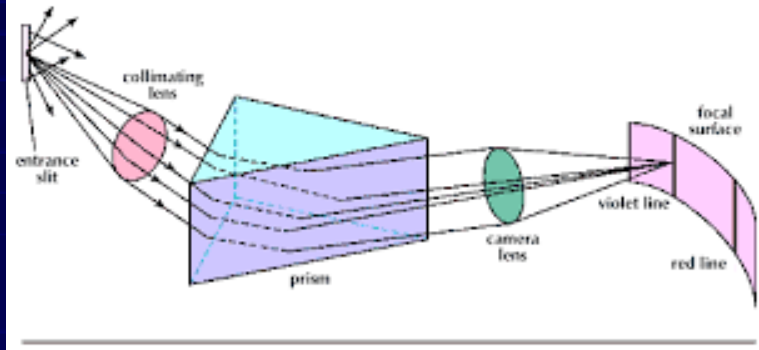


Предел – счет фотонов.



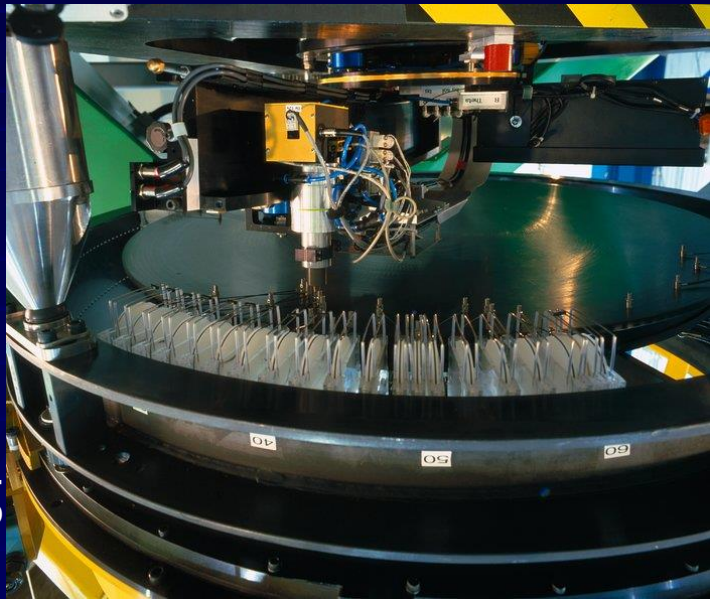
# Спектроскопия

Principles of a Prism Spectrograph



# Астрономические приборы

На VLT работает около 20 приборов.

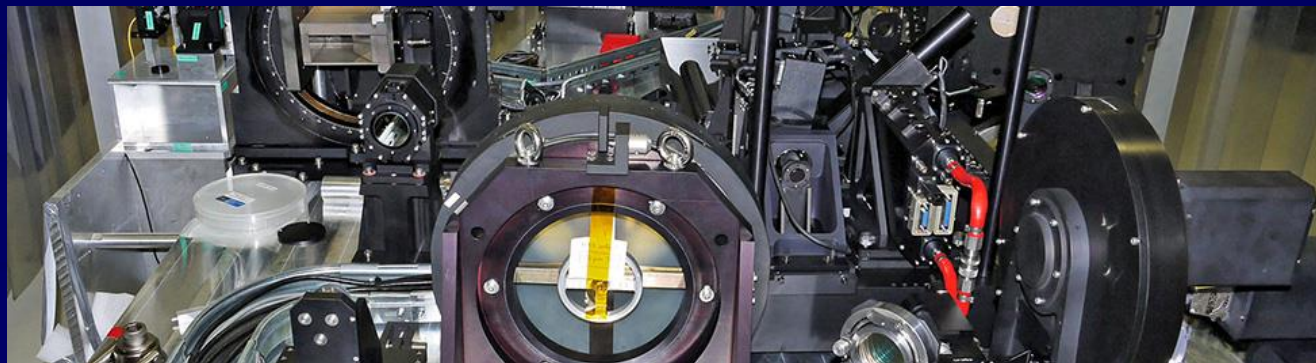


**FLAMES — Fibre Large Array  
Multi Element Spectrograph**



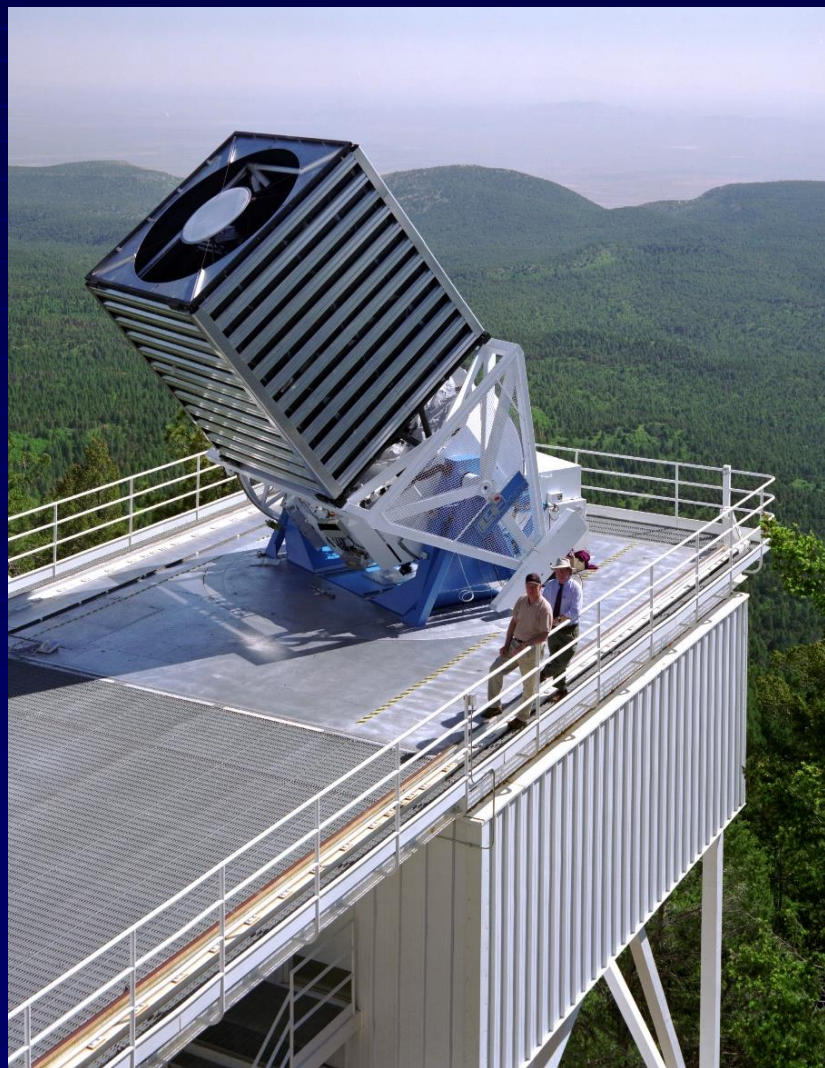
**FORS 1 and FORS 2  
FOcal Reducer and  
low dispersion  
Spectrograph**

**SPHERE - Spectro-Polarimetric  
High-contrast Exoplanet REsearch instrument**

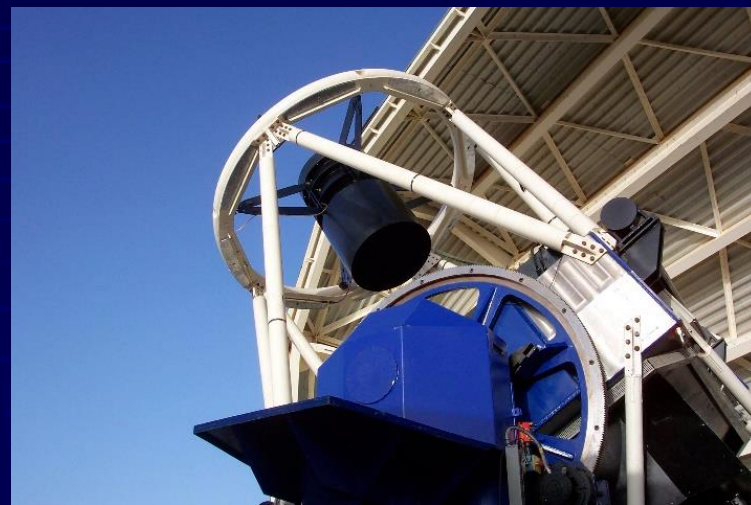




# Телескопы-роботы и обзоры неба



Sloan digital sky survey

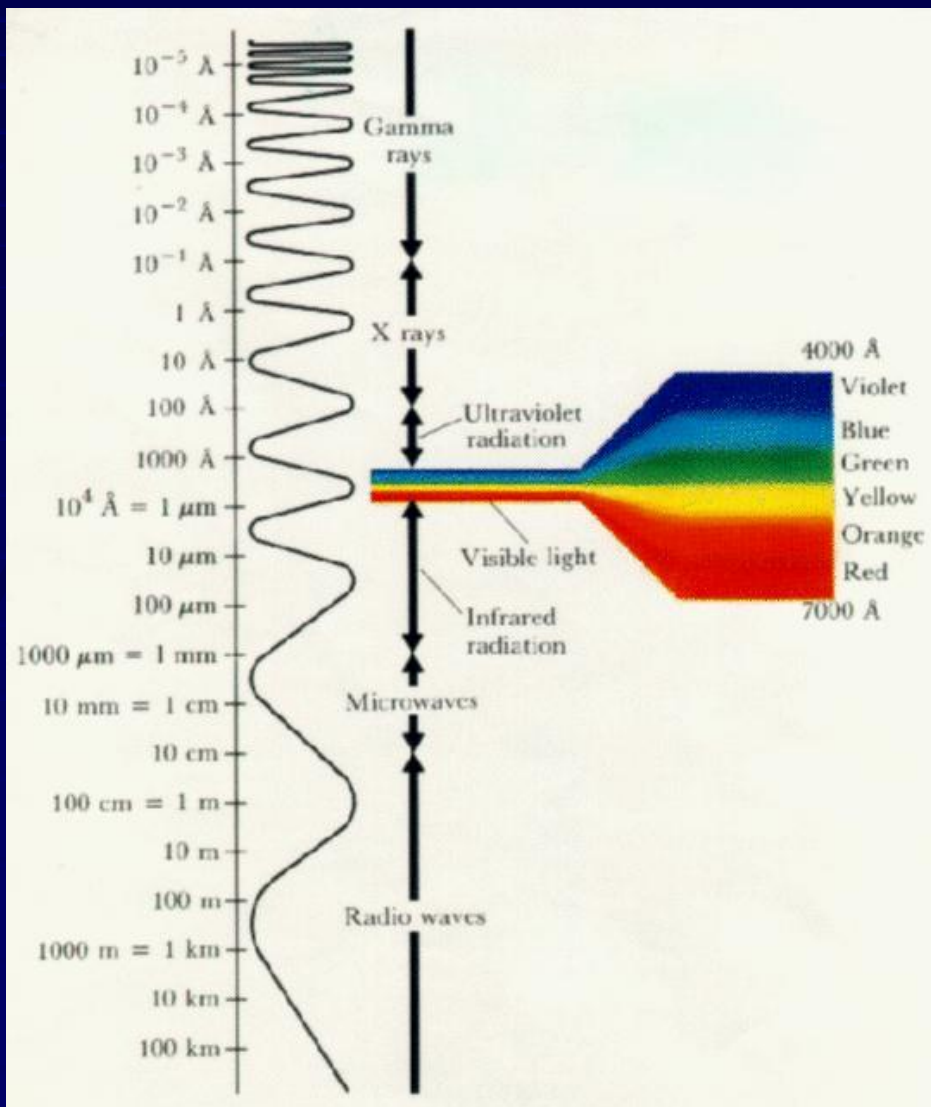


Liverpool Telescope (2m)



MACTEP

# Всеволновая астрономия



Наблюдения теперь проводят во всех спектральных диапазонах:

- Радио
- Инфракрасном
- Оптическом
- Ультрафиолетовом
- Рентгеновском
- Гамма

Разные диапазоны приносят информацию о разных процессах.



# Радиоастрономия

Космическое радиоизлучение было открыто в 1932 году.  
Но развитие радиоастрономии началось только после Второй Мировой войны.



Два вида телескопов: «тарелки» и «рогульки»

# Современные радиотелескопы





# Российские радиотелескопы

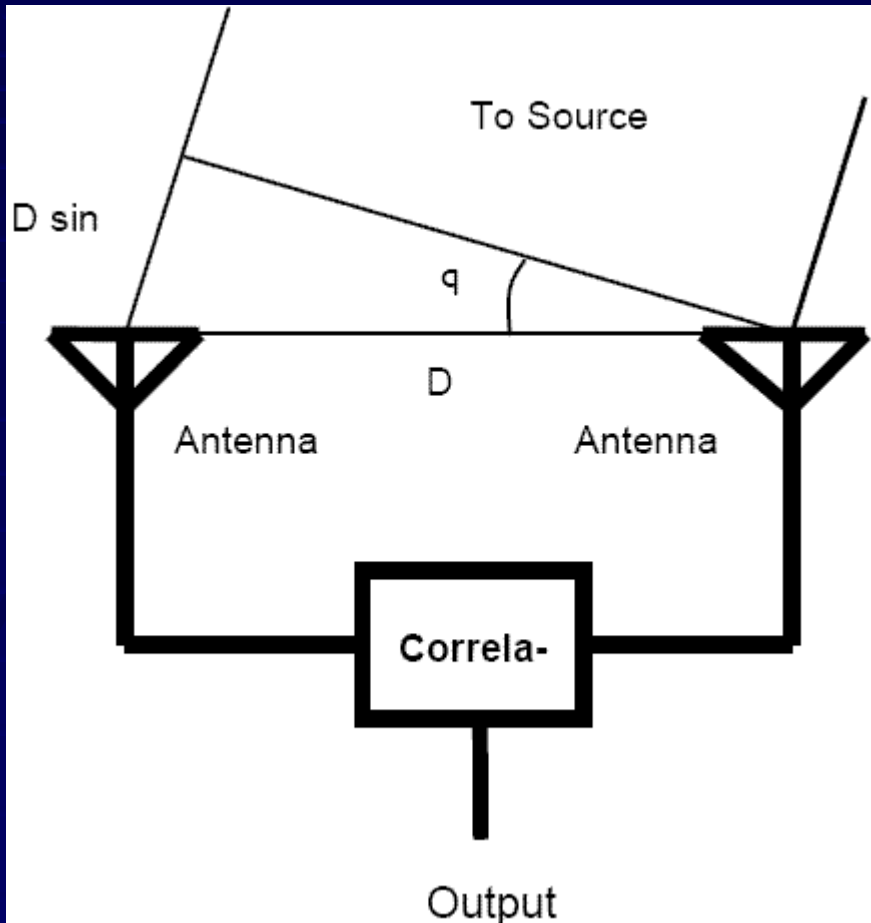


РАТАН-600

И два  
телескопа  
в Пуцино:  
БСА и ДКР

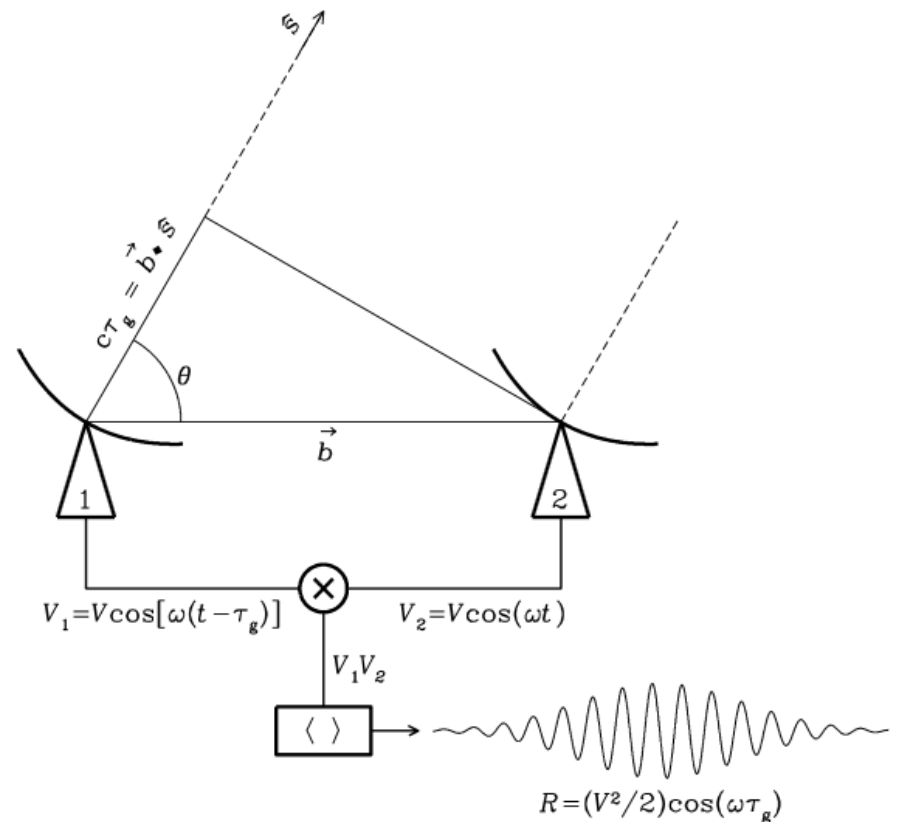


# Интерферометры



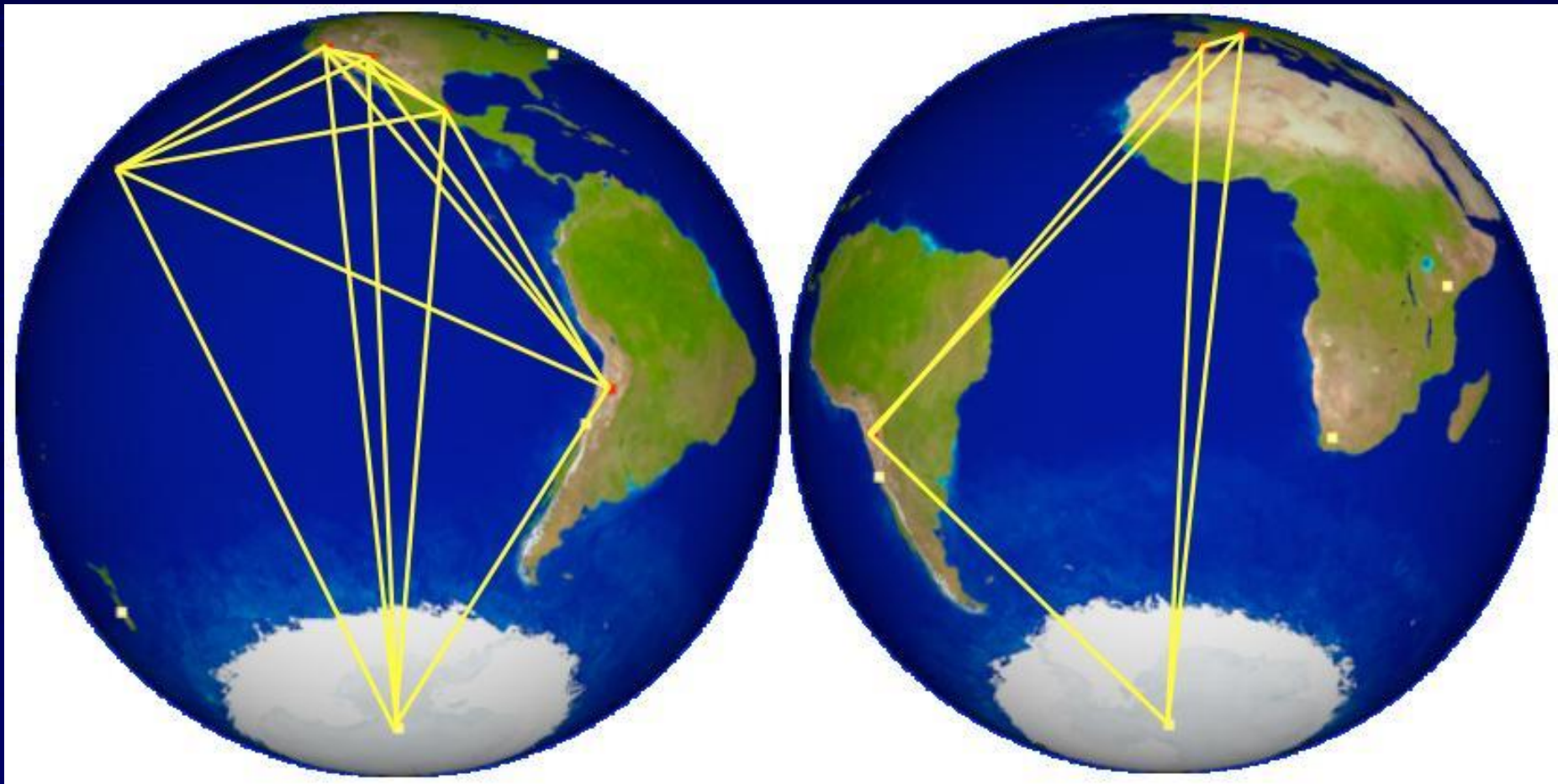
$$\theta = 1.220 \frac{\lambda}{D}$$

Высокое угловое разрешение  
в направлении, соединяющем  
два телескопа.

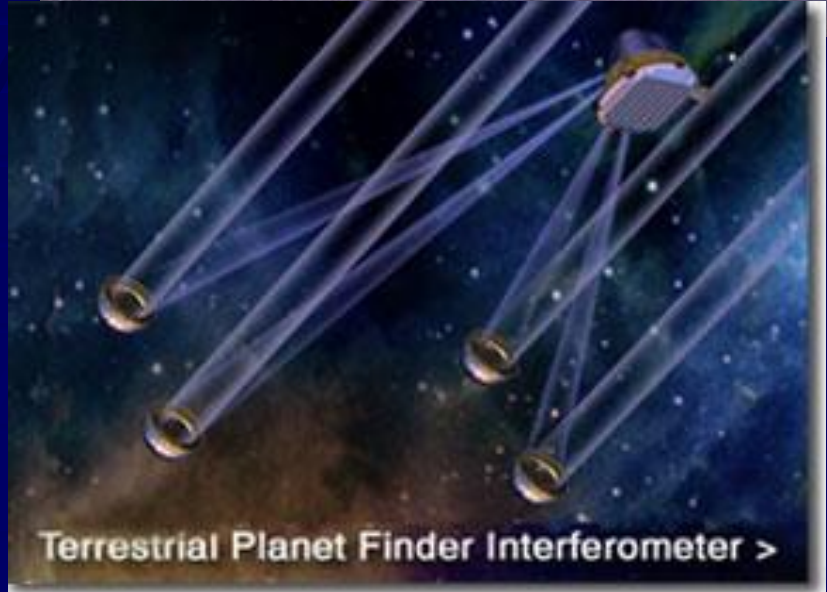
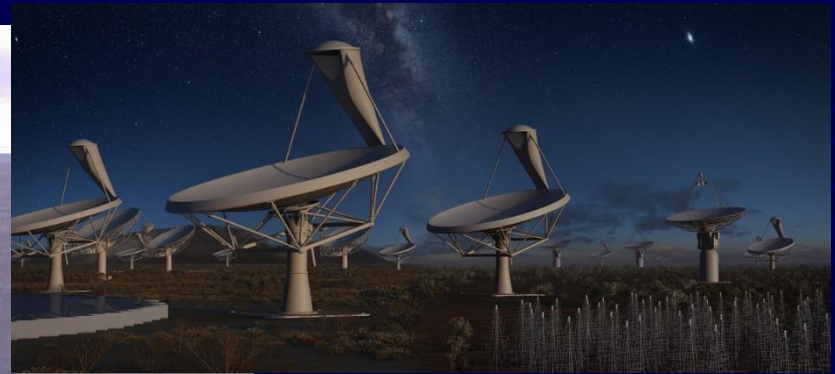




# Телескоп горизонта событий



# Оптика и радио





# Радиоастрон

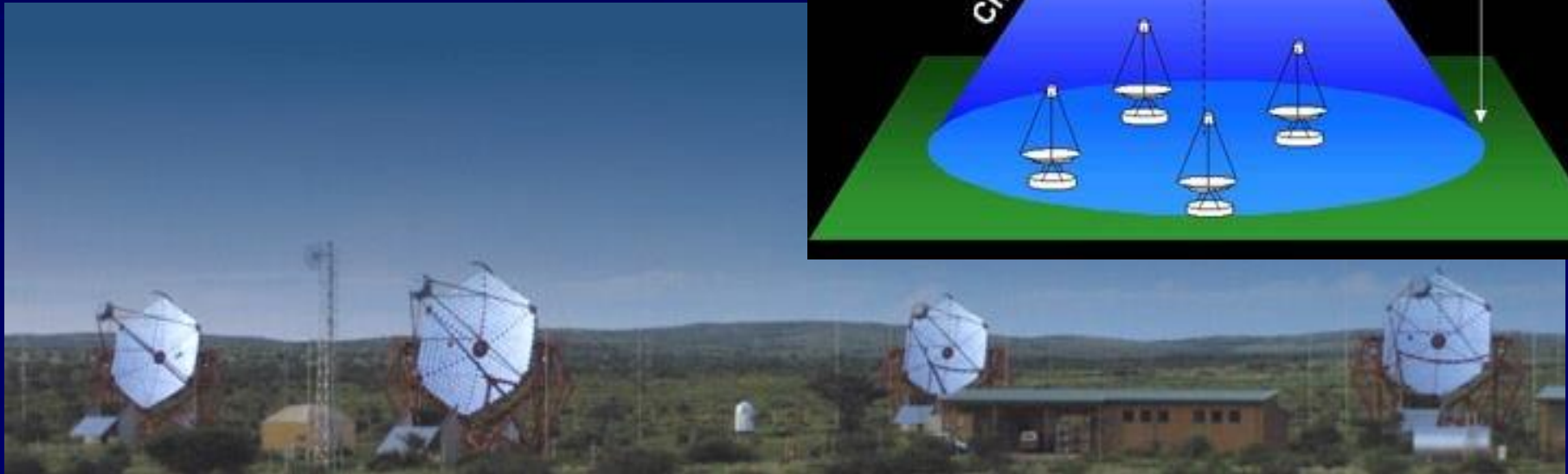
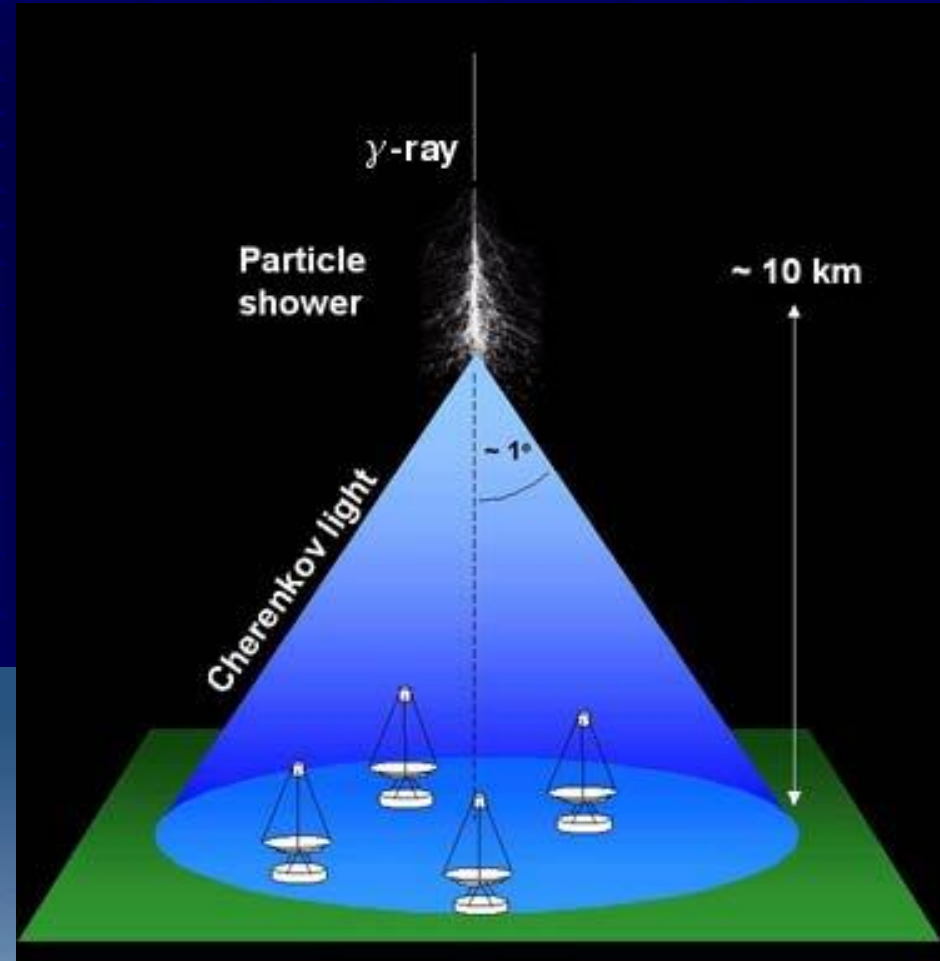


Космический  
интерферометр

Рекордное  
угловое разрешение

# Гамма-астрономия на Земле

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





# Не только электромагнитные волны

От космических объектов приходит не только электромагнитное излучение.

На Землю прилетают различные частицы:  
протоны, электроны, нейтрино ...

Кроме того, существуют т.н. гравитационные волны.

# О чем рассказывают космические лучи и почему они важны

**Космические лучи – это одновременно и объект, и инструмент исследования.**

1. Новый канал информации.
2. Вопрос о происхождении и эволюции.
3. Открытие новых частиц. Естественные ускорители.
4. В Галактике КЛ динамически важны.  
Их плотность энергии порядка энергии магнитного поля и тепловой энергии газа.



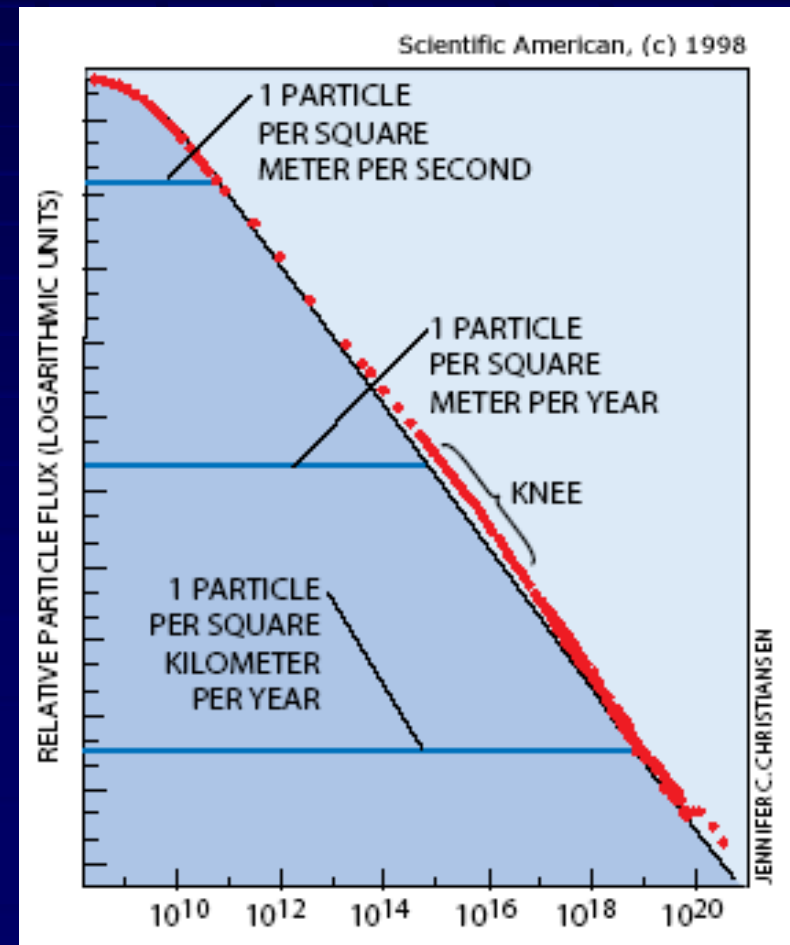
# Спектр космических лучей

На 90% космические лучи состоят из протонов, на 10% - из альфа-частиц, остальное – более тяжелые ядра, электроны, и тд.

Для первичных КЛ у Земли:  
 $I=0.2-0.3$  частиц/(см<sup>2</sup> с ср)  
 $N=10^{-10}$  частиц/см<sup>3</sup>  
 $W=10^{-12}$  эрг/см<sup>3</sup>=1 эВ/см<sup>3</sup>

Первичные КЛ поверхности Земли практически никогда не достигают (лишь около 1%).

Вторичные частицы: на 70% мюоны и на 30% электроны и позитроны.



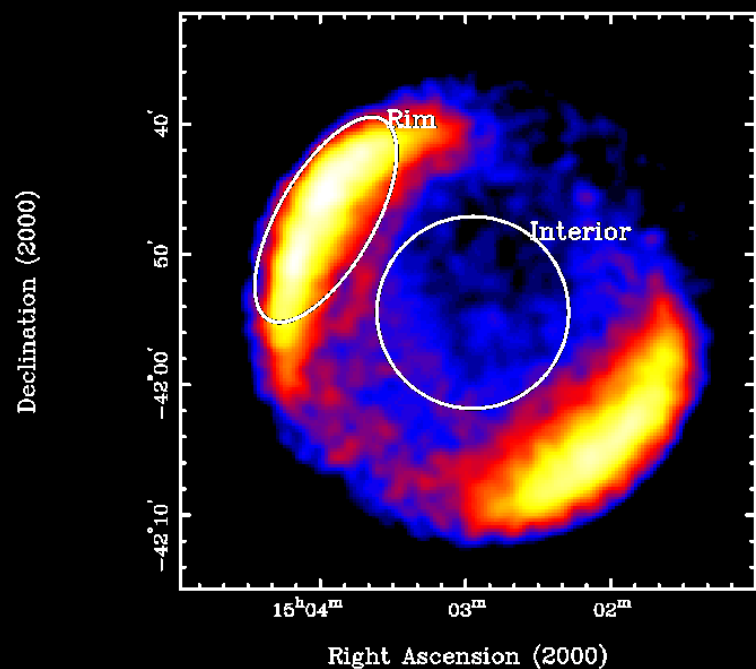


# Происхождение

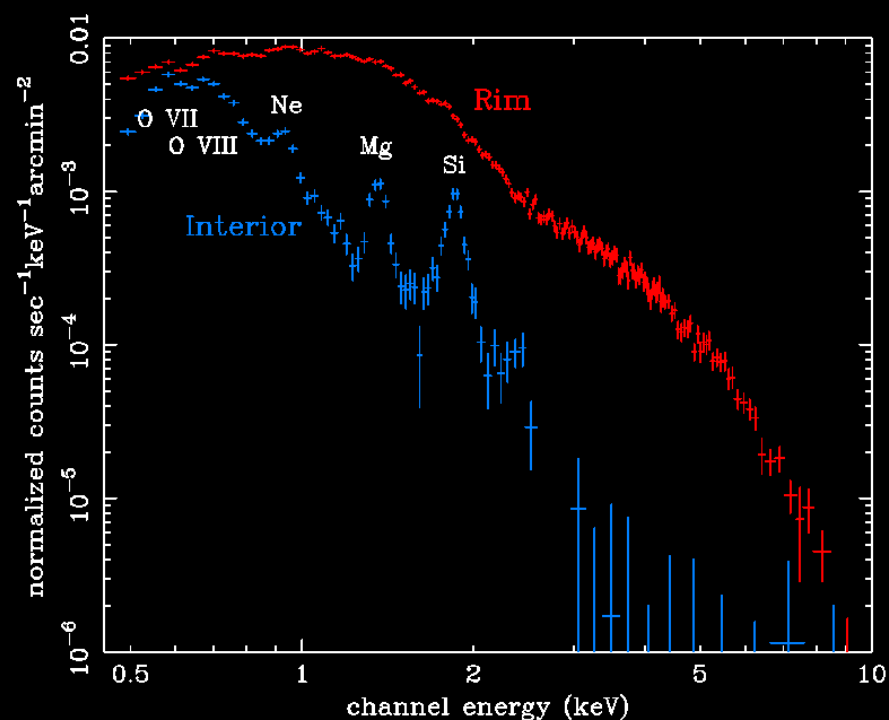
Галактические космические лучи в основном связаны с остатками сверхновых.

Рентгеновское излучение остатка сверхновой SN1006 говорит о наличии электронов с энергиями 100-200 ТэВ!

ASCA image of SN 1006



X-ray spectrum of SN 1006





Межзвездн  
Плотность  
энергии (д

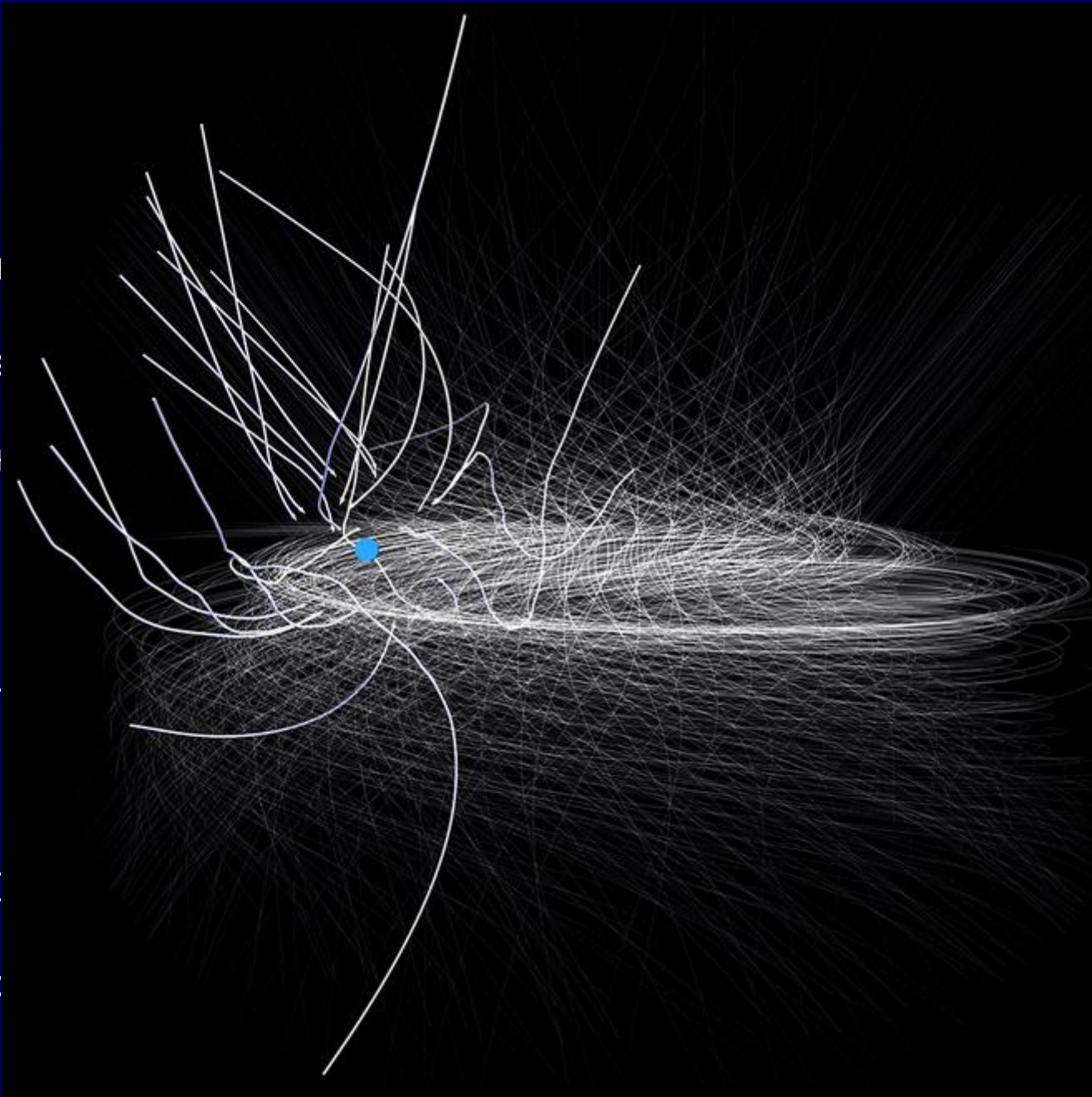
Минималы  
300 пк ~

Рассмотри

Кривизна т  
 $r_H \sim E/eH$   
 $r_H = 3.3 \cdot 10^1$

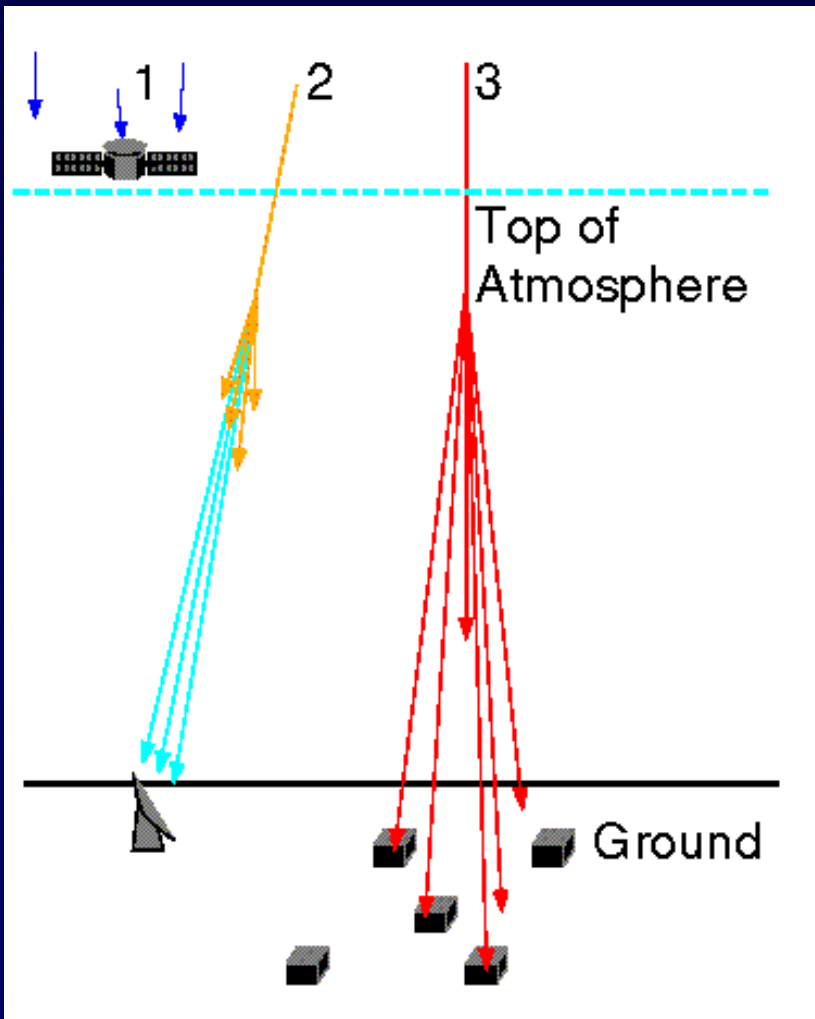
При  $E > 3 \cdot 10^1$

В реальнос



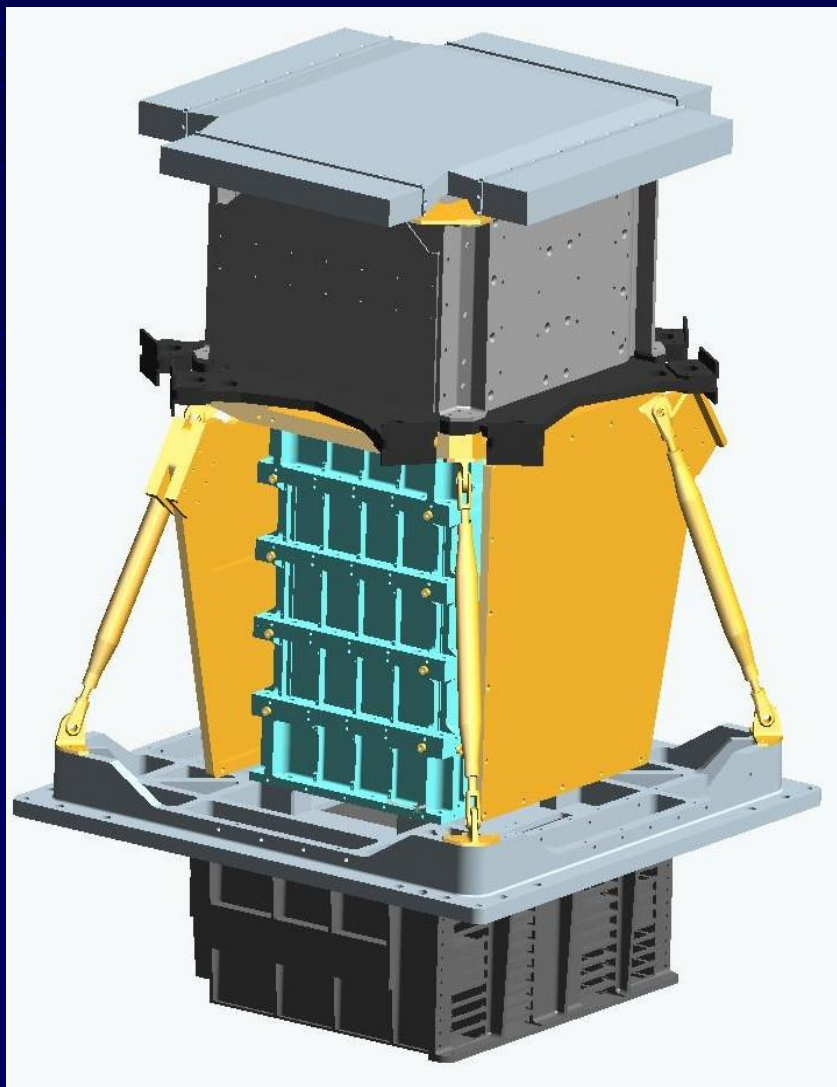
идать диск.

# Регистрация космических лучей



- Можно регистрировать первичные космические лучи над атмосферой на космических аппаратах, или же в самой верхней атмосфере на баллонах
- Можно регистрировать оптическое излучение, возникающее при взаимодействии первичных частиц с атмосферой
- Наконец, можно регистрировать сами вторичные частицы наземными детекторами

# Наблюдения космических лучей



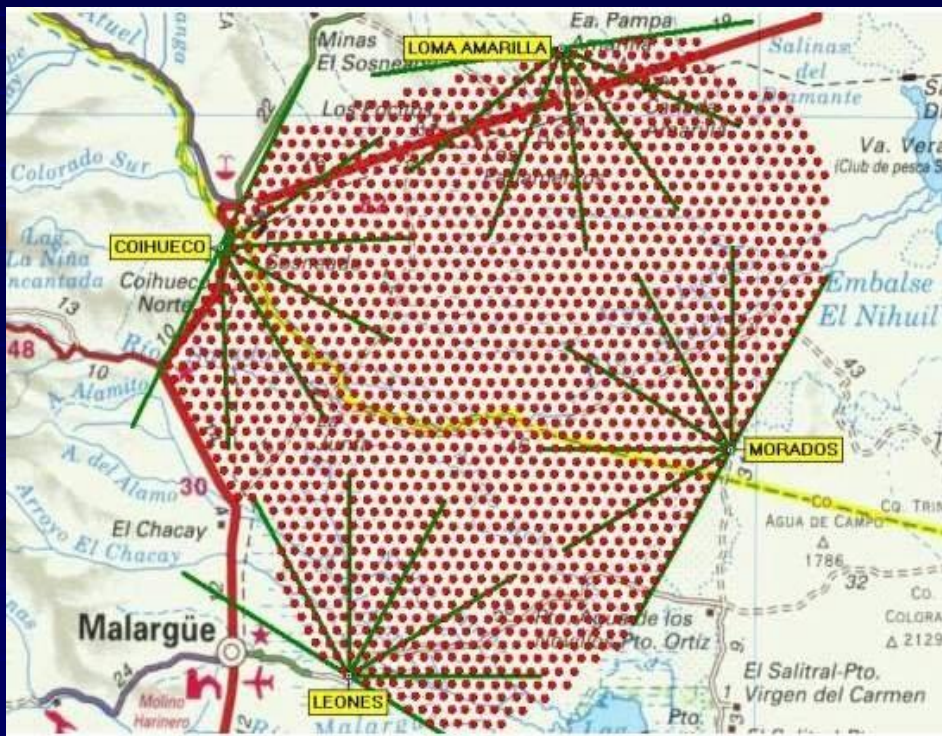
РАМЕЛА



Полеты Гесса (1912 г.)

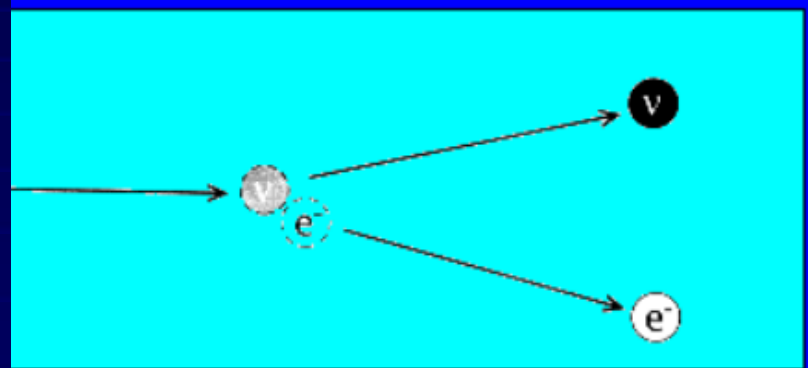
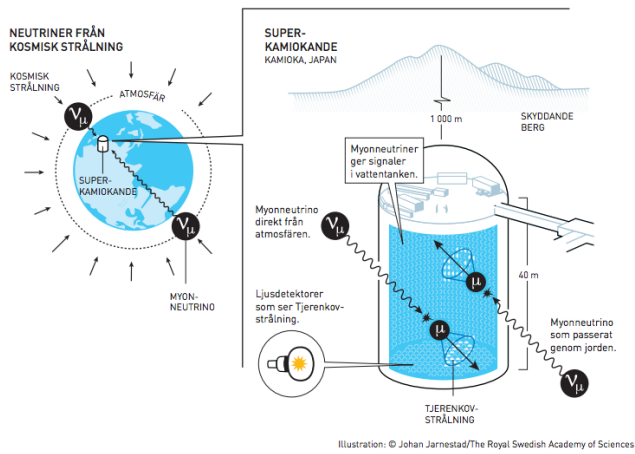
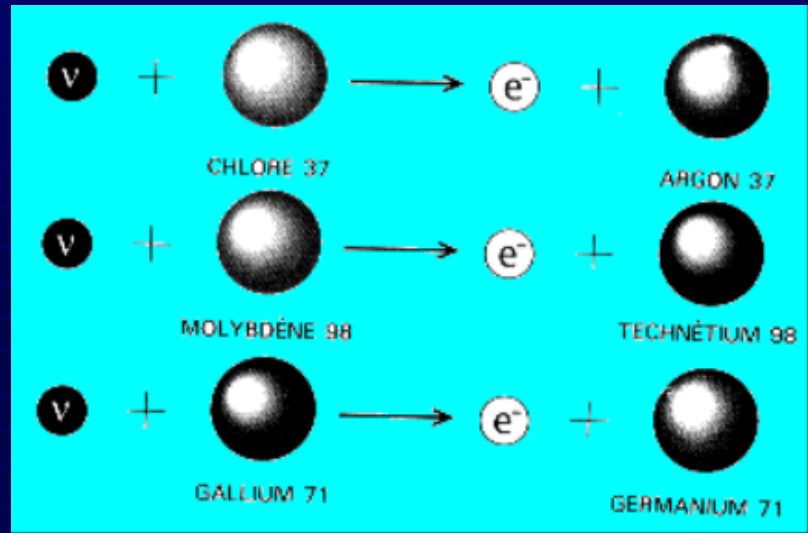
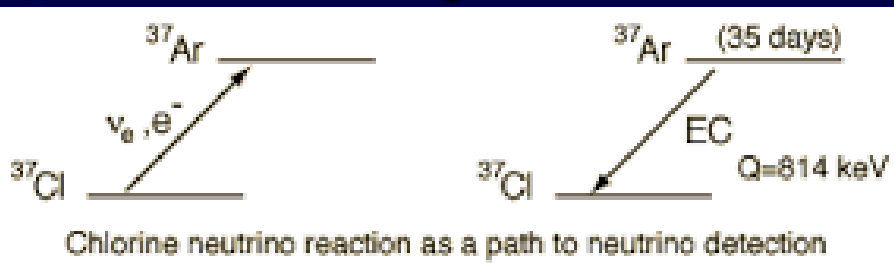


# Обсерватория имени Оже



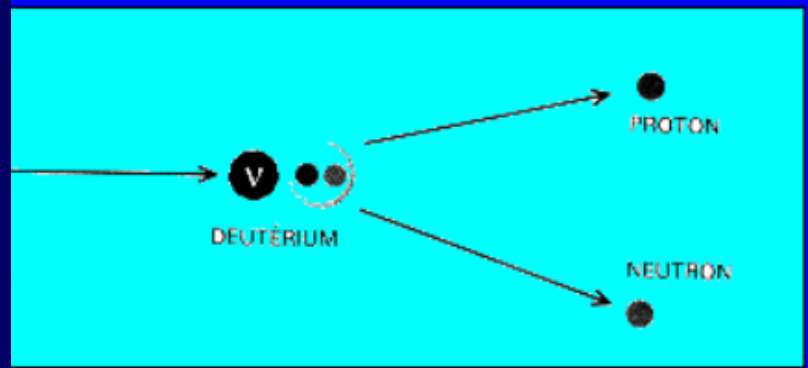
Более 1000 наземных детекторов.  
Плюс 24 телескопа.

# Нейтринные эксперименты



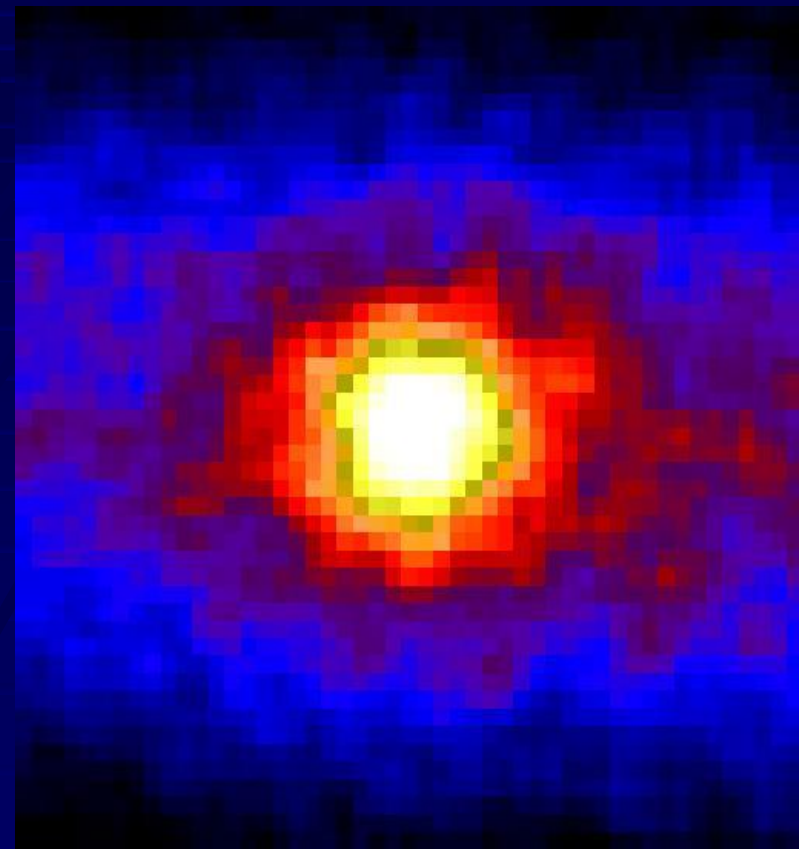
CC Charged Current Reaction	$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$	$E_{threshold} = 1.4 MeV$
NC Neutral Current Reaction	$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$	$E_{threshold} = 2.2 MeV$
ES Elastic Scattering Reaction	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	$E_{threshold} \approx 0$

*x denotes that this reaction will take place with any neutrino.*





# Нейтринная астрофизика



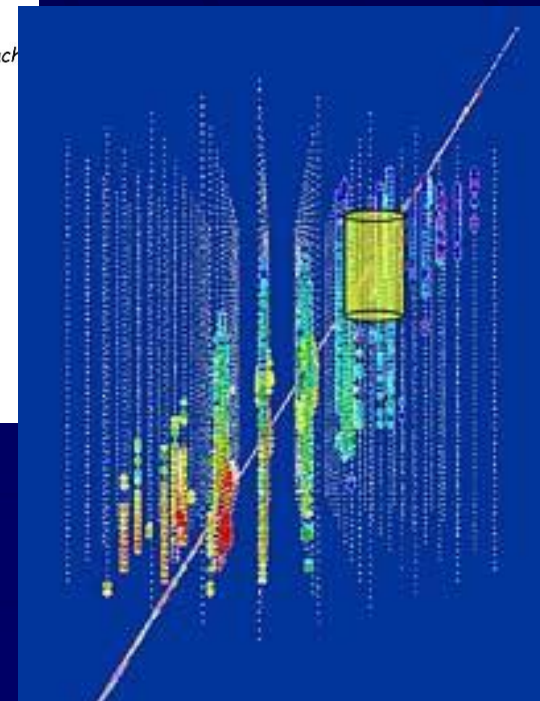
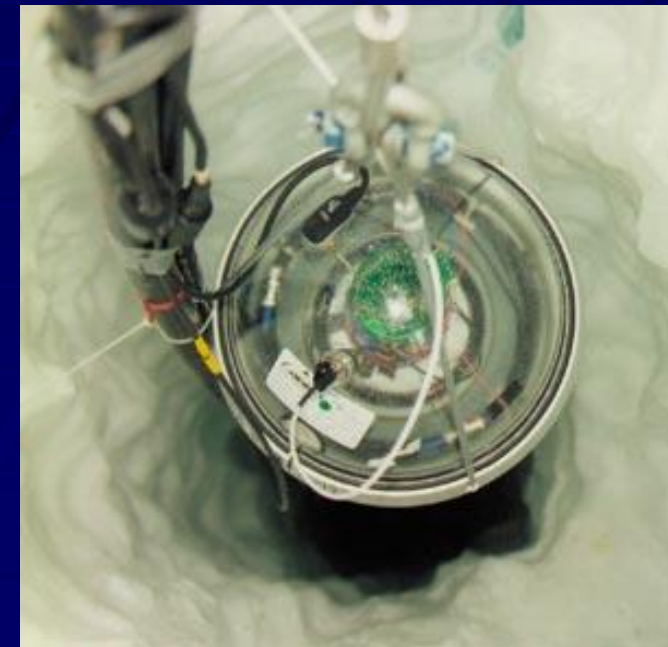
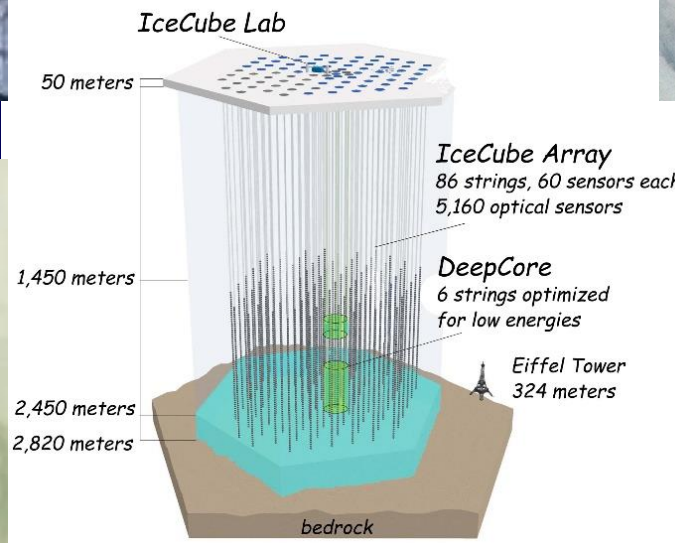
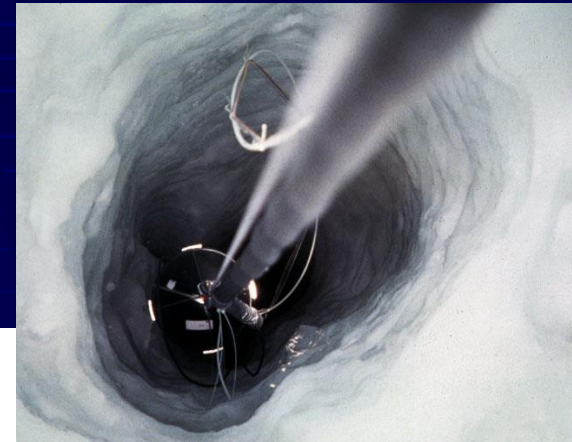
Нейтрино от Солнца



Нейтрино от взрывов сверхновых

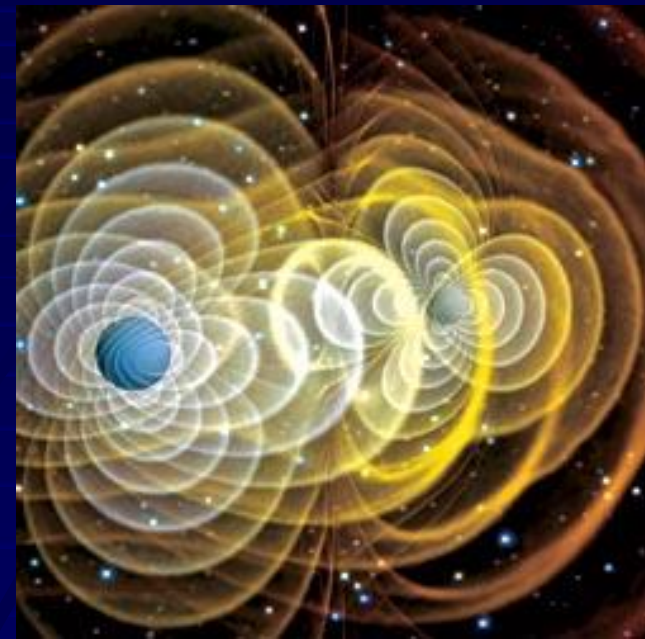
# Наблюдения нейтрино

Эксперименты AMANDA  
и IceCube в Антарктиде





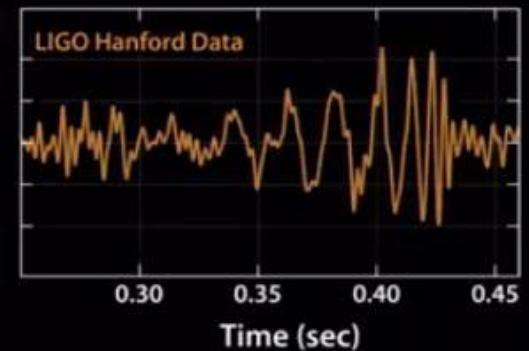
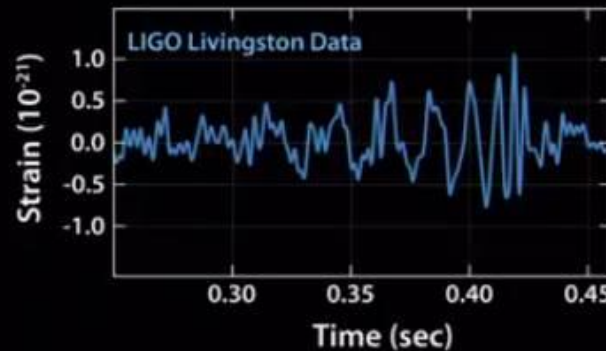
# Гравитационные волны



Предсказаны Общей теорией относительности.

Возникают при слиянии нейтронных звезд и черных дыр.

А также при вращении нейтронных звезд и при эволюции тесных двойных звезд.



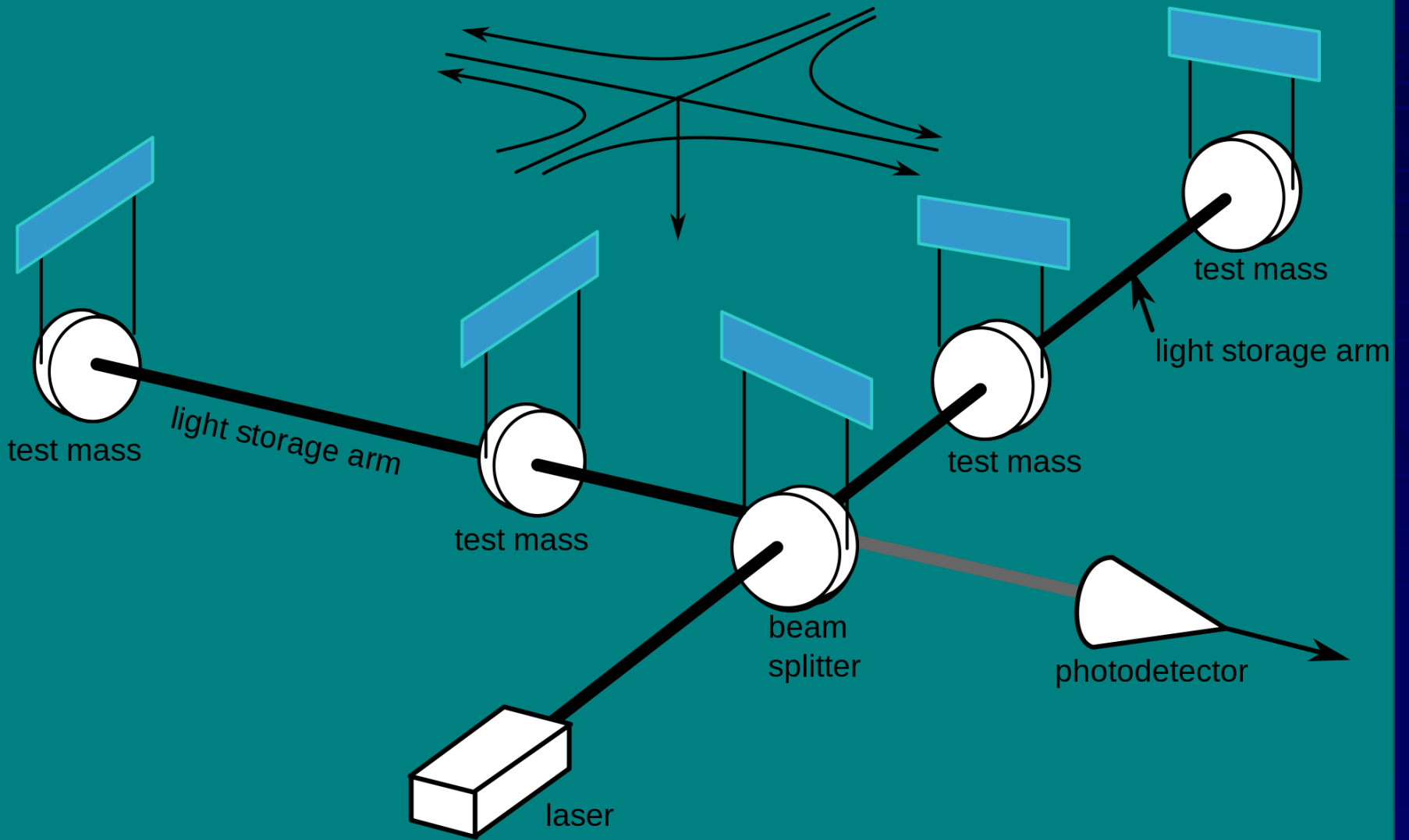
# Детекторы гравитационных волн



Первый детектор  
Вебера



Эксперимент VIRGO

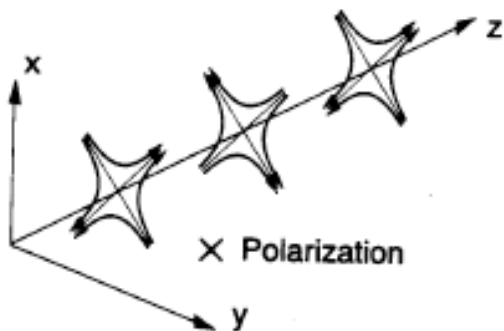
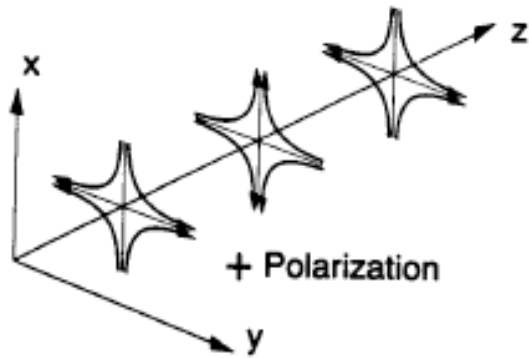
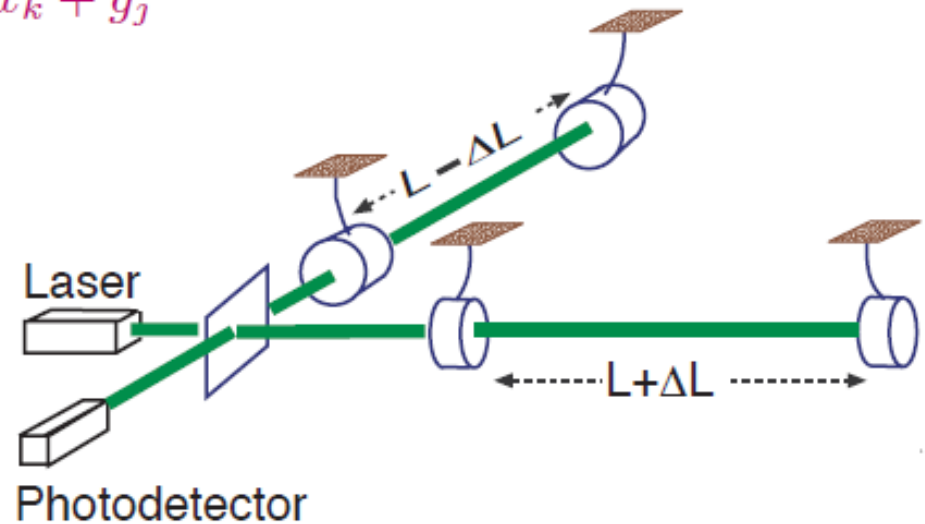




# Изменение длины плеч

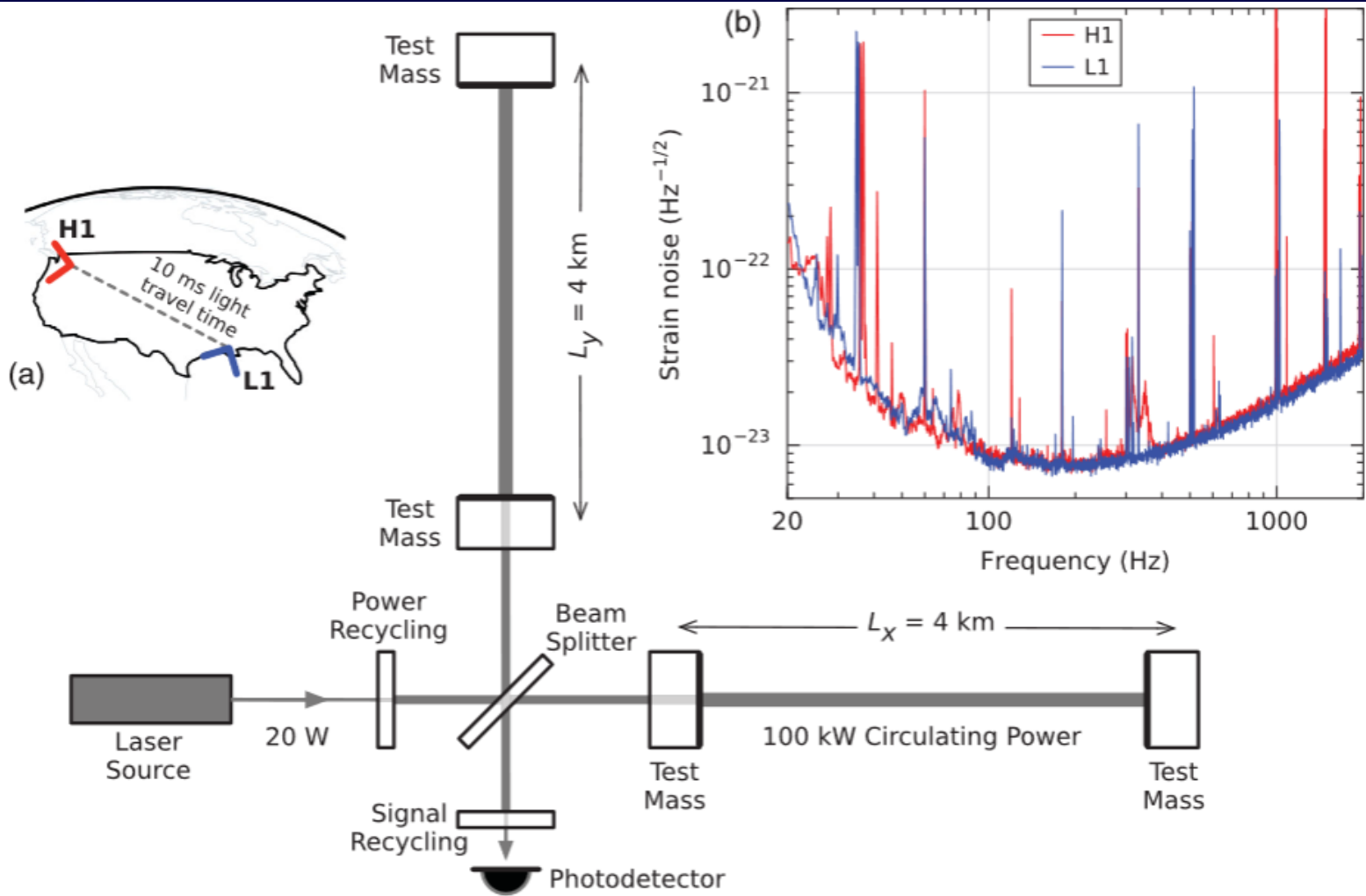
Прохождение гравволны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра. Это можно измерить.

$$\ddot{x}_j = \frac{1}{2} \ddot{h}_{jk}^{GW} x_k + g_j$$



Относительное изменение длины плеч пропорционально амплитуде гравитационной волны. Измерение происходит довольно сложным способом.

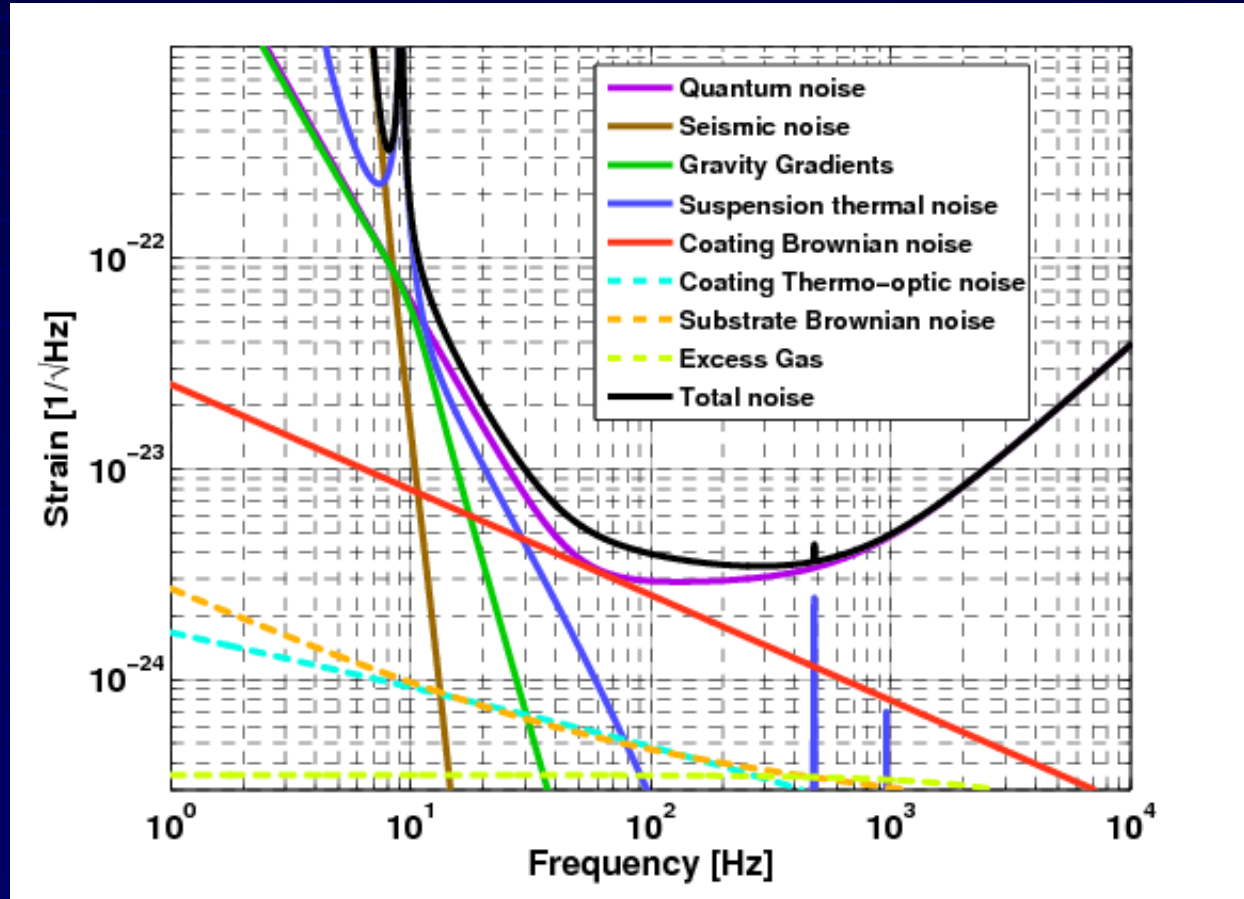
# Детекторы и их чувствительность



# Разнообразные шумы

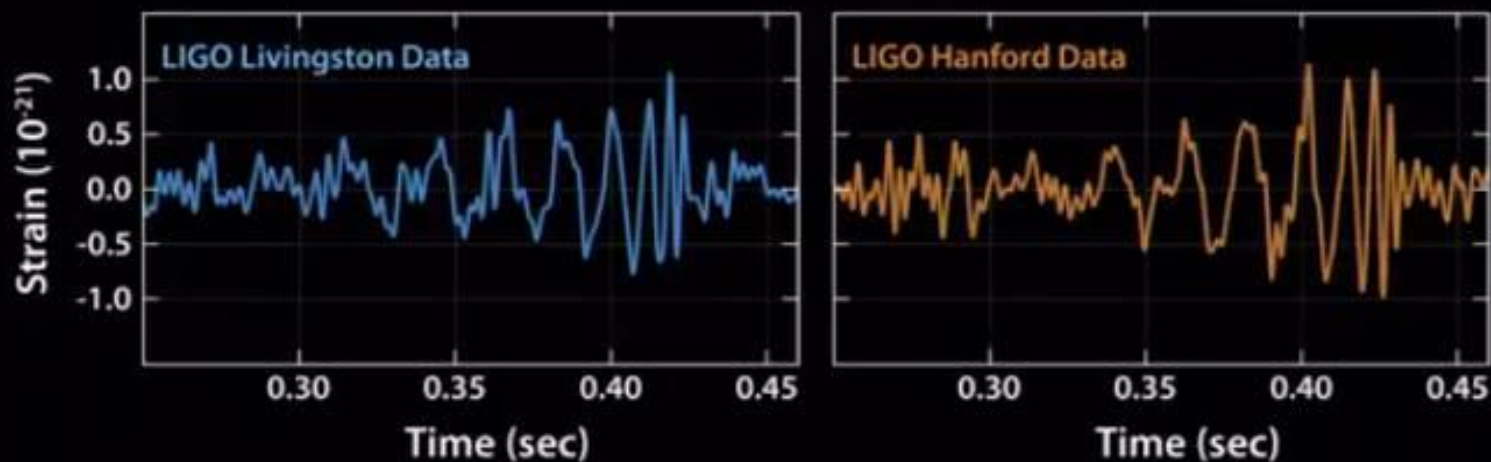
Влияют как внешние шумы, так и шумы самого детектора.

Совершенствование инструментов в первую очередь связано с борьбой с шумами.





# GW150914 13-50 по Московскому времени



<http://www.ligo.org>

Официальное объявление 11 февраля 2016 года.  
За 16 дней совместных наблюдений двух детекторов  
надежно обнаружено одно событие – слияние двух черных дыр в  $>400$  Мпк от нас.

# Итак .....

Астрономия – наблюдательная наука.

Наблюдения идут во всех диапазонах спектра.

Для многих видов наблюдений детекторы необходимо выводить в космос.

Наблюдают не только электромагнитные волны, но и различные виды частиц.

Открыты гравитационные волны.

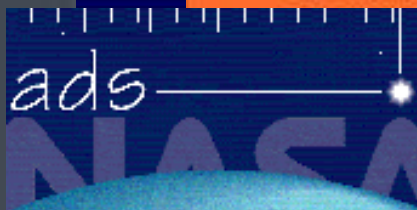
Лекции будут выкладываться у меня на сайте  
<http://xray.sai.msu.ru/~polar/>

См. также мой канал на Ютьюбе  
<https://www.youtube.com/channel/UCGk5wyYgpGKuu5Wkjg0WlZQ>

# Источники

А. В. Засон, К. А. Постнол

## Общая АСТРОФИЗИКА



Cornell University  
Library

arXiv.org

# ВСЕЛЕННАЯ

Краткий путеводитель по пространству и времени: от Солнечной системы до самых далеких галактик и от Большого взрыва до будущего Вселенной

**СЕРГЕЙ ПОПОВ**

Ученый и популяризатор науки, доктор физико-математических наук, профессор РАН и лауреат премии «За верность науке» 2015 года

Vsenauka.ru



Совместный проект  
Политехнического  
музея и издательства  
«Альпина нон-фикшн»

КНИГИ ПОЛИТЕХА