



Современная астрономия  
и  
современные телескопы

Сергей Попов  
(ГАИШ МГУ)

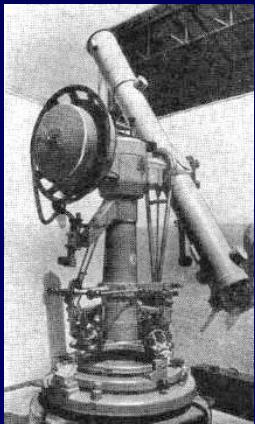
# АСТРОНОМИЯ

## Астрометрия

Измерение координат  
и времени

Расцвет: 19 век

Новое: пульсарная  
астрометрия,  
спутники

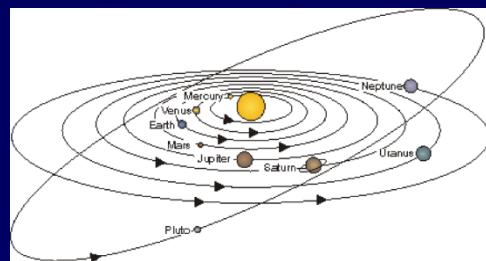


## Небесная механика

Движение небесных тел

Расцвет: 18 век –  
первая половина 19 века

Новое: теория относит., хаос

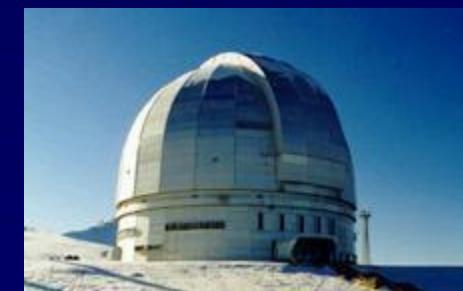


## Астрофизика

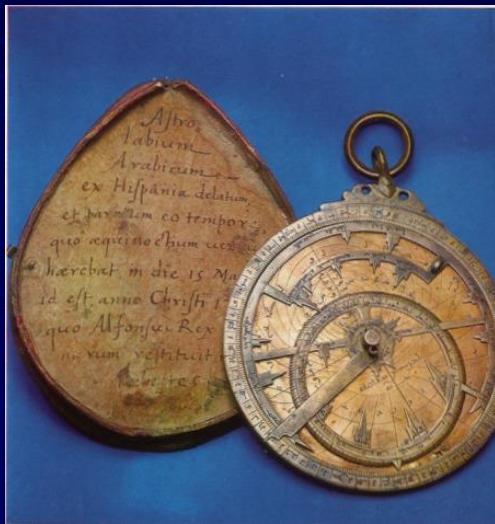
Физика небесных тел

Расцвет: сейчас

Новое: инструменты



# Астрометрия



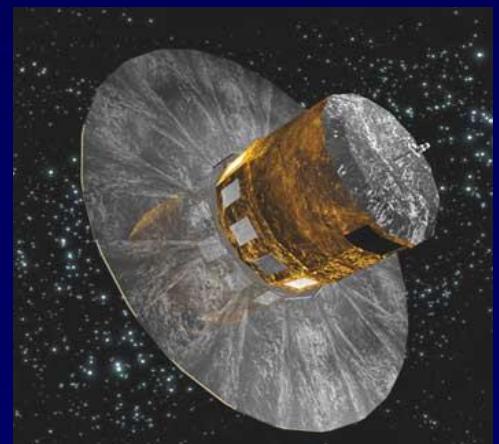
Астролябия

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.

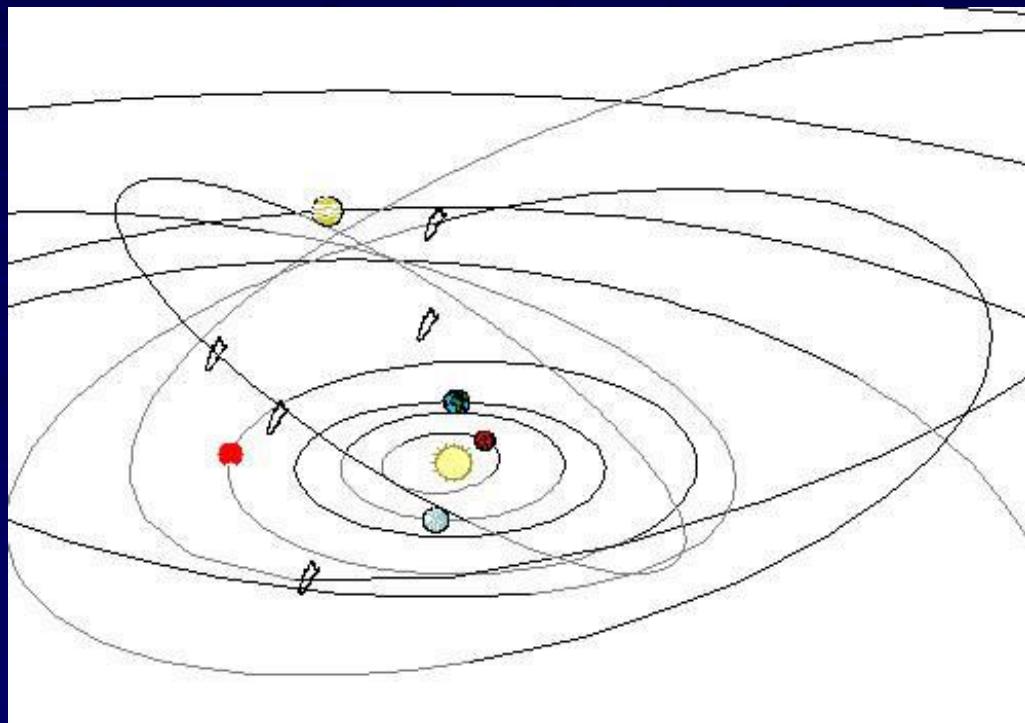


Hipparcos



GAIA

# Небесная механика



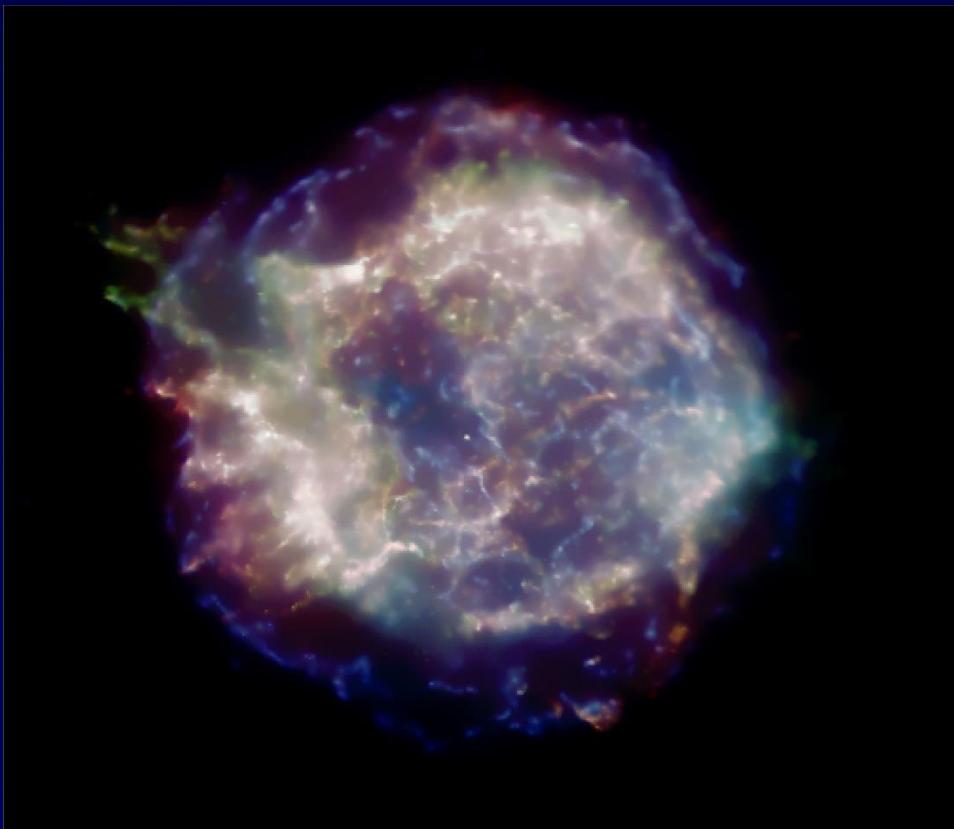
В середине 20 века новым ключевым моментом стал расчет орбит спутников.

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

Аномалия Пионеров.



# 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.*

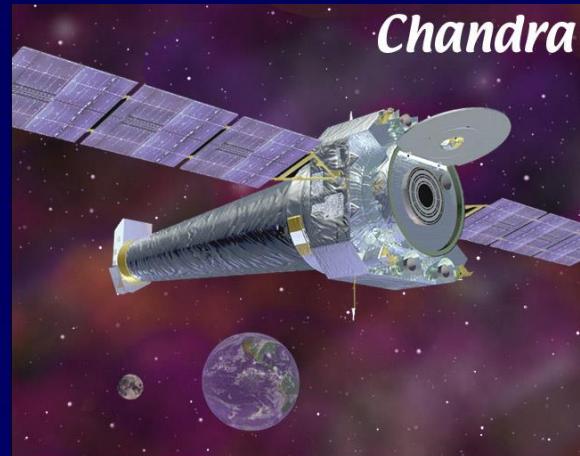
# Наблюдения, наблюдения, наблюдения ....



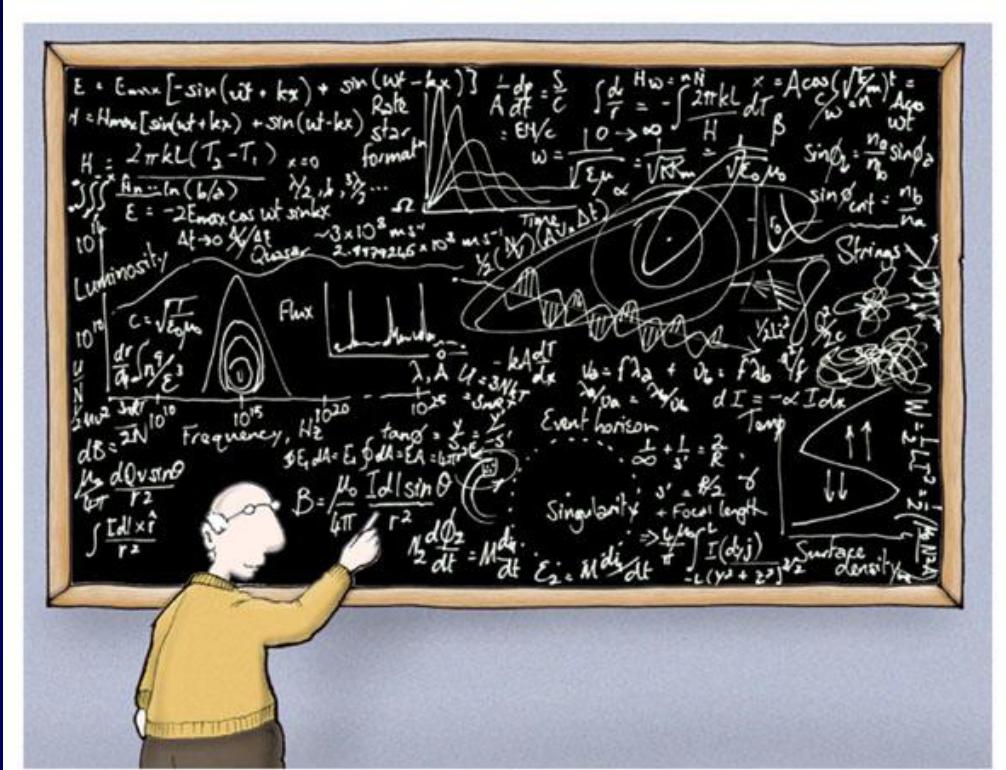
На Земле и к космосе



В радио- и в рентгеновском диапазонах



# Теория и компьютеры



Astrophysics made simple

Фактически, астрофизика – это часть физики. Поэтому в ней используется тот же математический аппарат и активно применяются численные методы.

# Российские институты и обсерватории



Специальная астрофизическая обсерватория

Российская академия наук

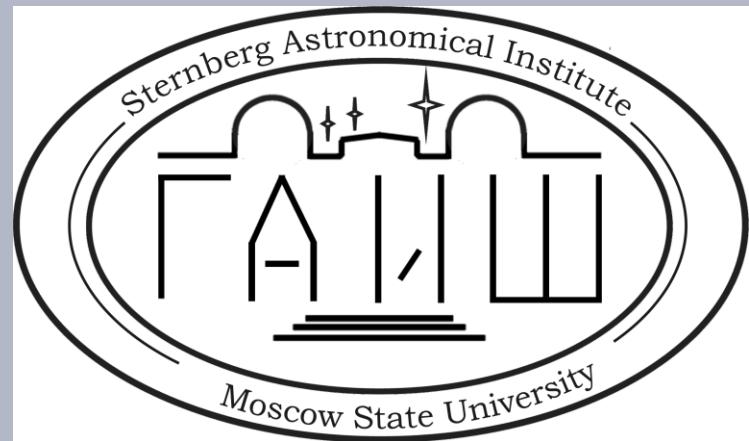
ИКИ



АКЦ ФИАН



ИНСАН



Физический Институт им. П.Н.Лебедева

РДН

АстроКосмический Центр

Пущинская  
РадиоАстрономическая  
Обсерватория

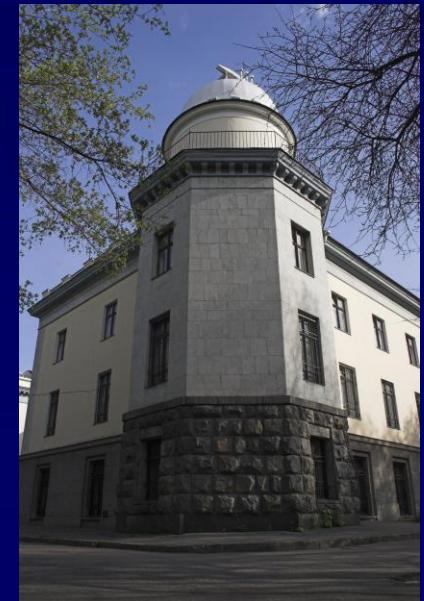
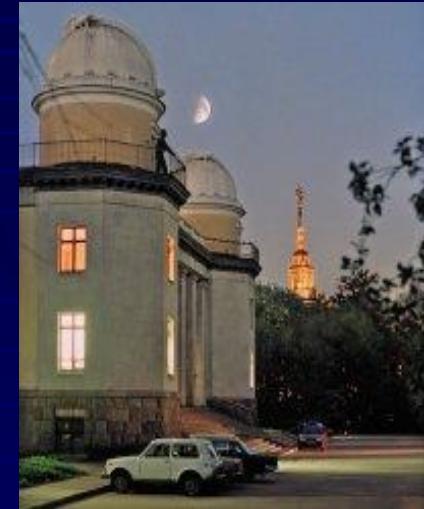


# ГАИШ МГУ

Основан в 1831 г.

Часть МГУ.  
(астрономическое отделение  
На физическом факультете)

В Москве именно там  
«учат на астронома»  
(хотя еще есть МФТИ, МИФИ)

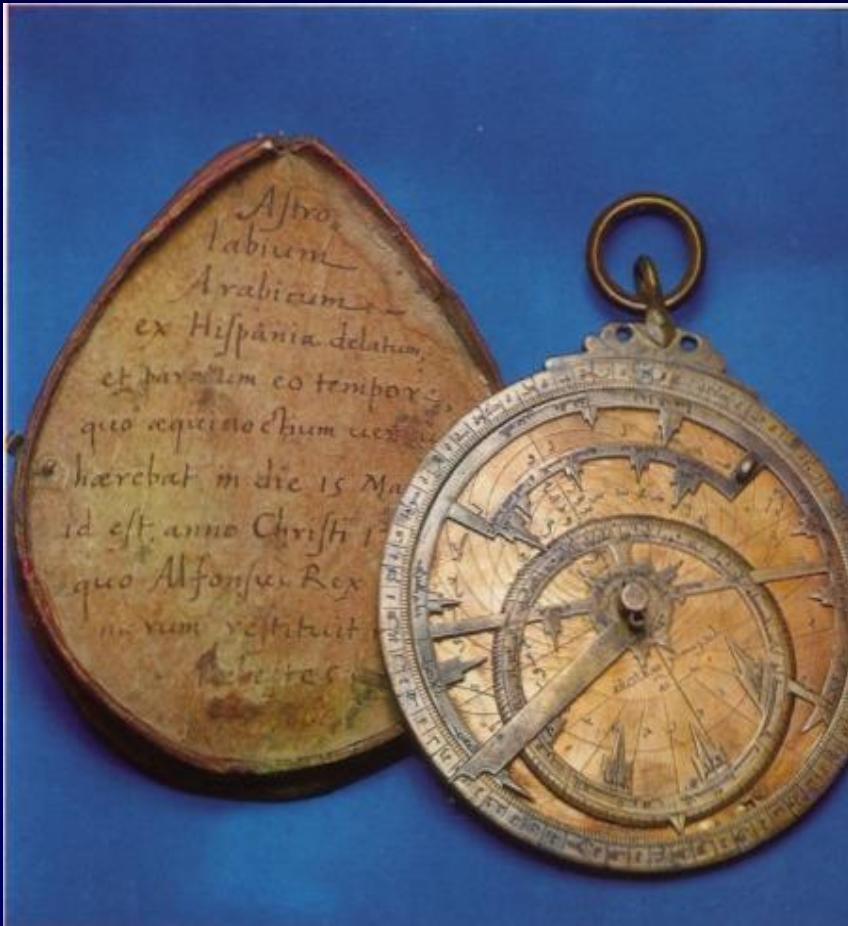


# От древности до наших дней. От телескопа Галилея до Хаббла. От радио до гамма-лучей.



- Астрономия в дотелескопическую эру
- Первые телескопы
- Современные оптические телескопы
- Всеволновая астрономия
- Радиоастрономия
- Современные оптические телескопы
- Наблюдения нейтрино
- Наблюдения космических лучей
- Наблюдения гравитационных волн

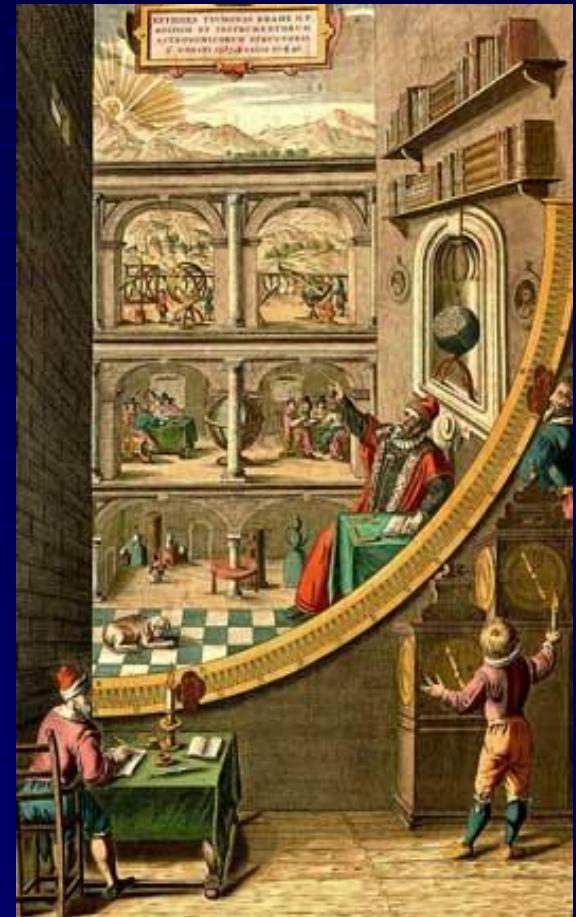
# Древняя астрономия



Измерения углов  
с помощью  
простейших  
Приборов.

Определение  
относительных  
положений звезд  
и планет.

Ну и конечно же  
определение  
времени.



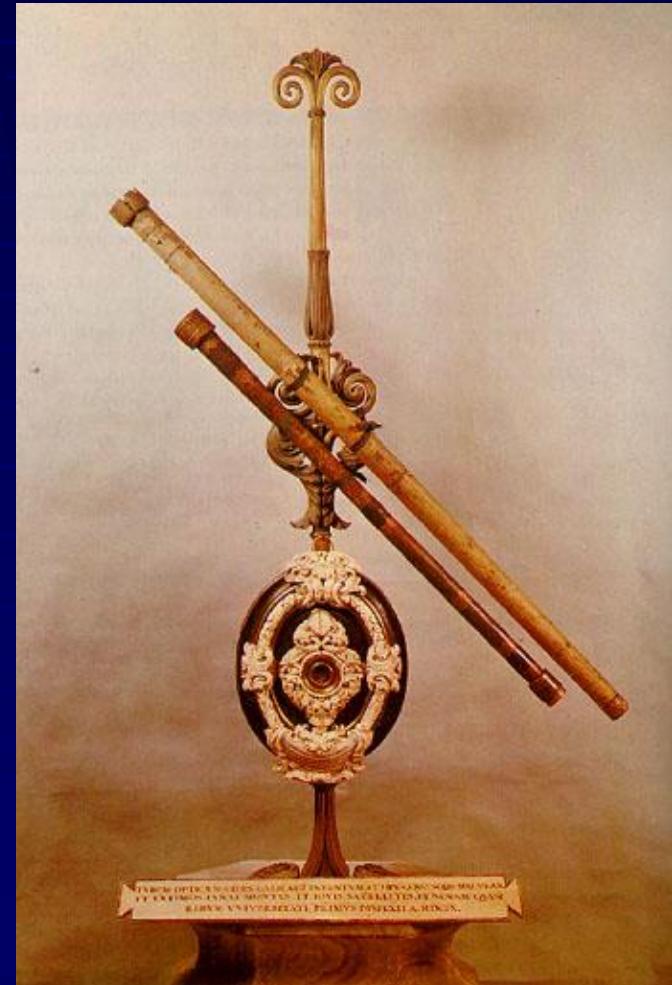
# Первые телескопы



1564-1642

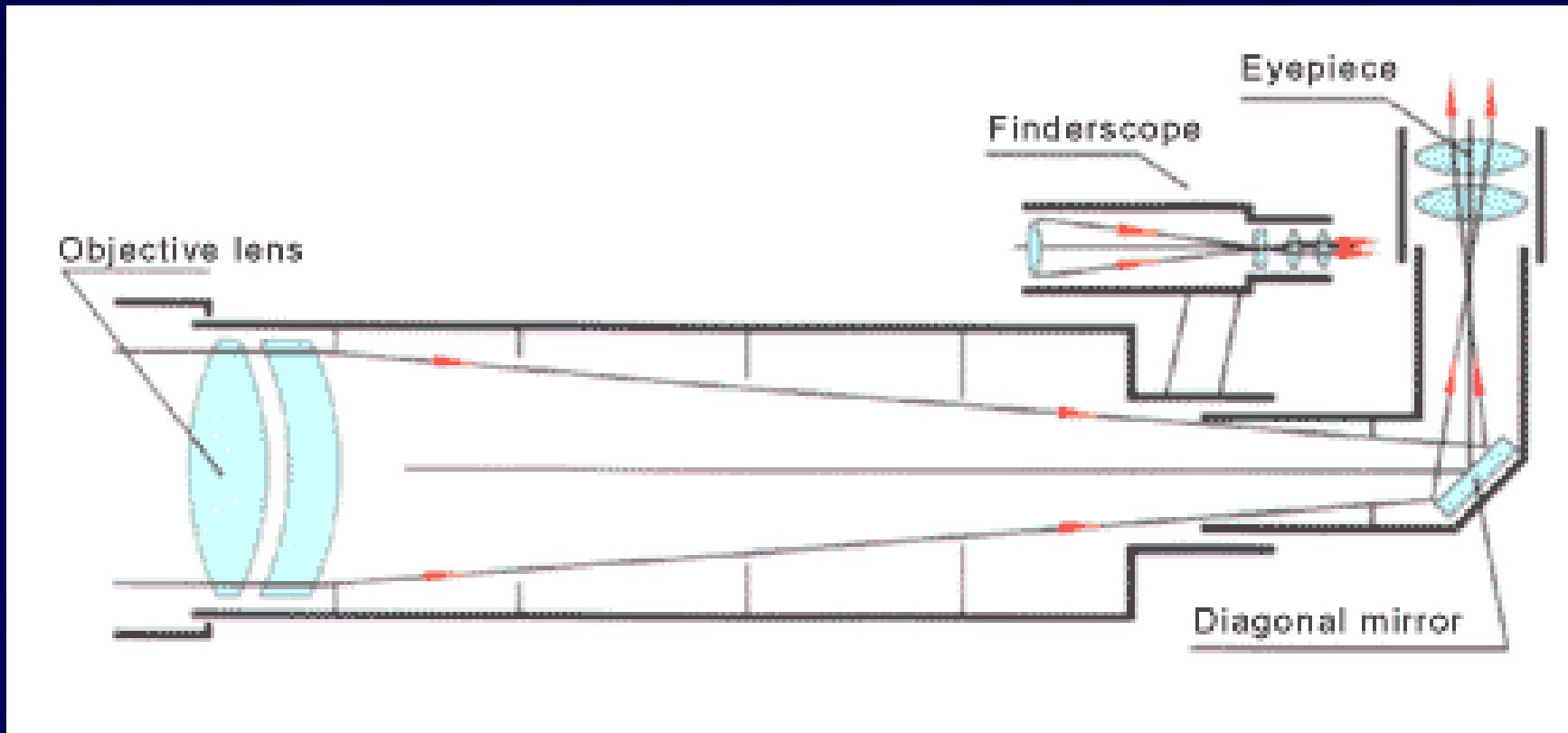


©IMSS - Firenze



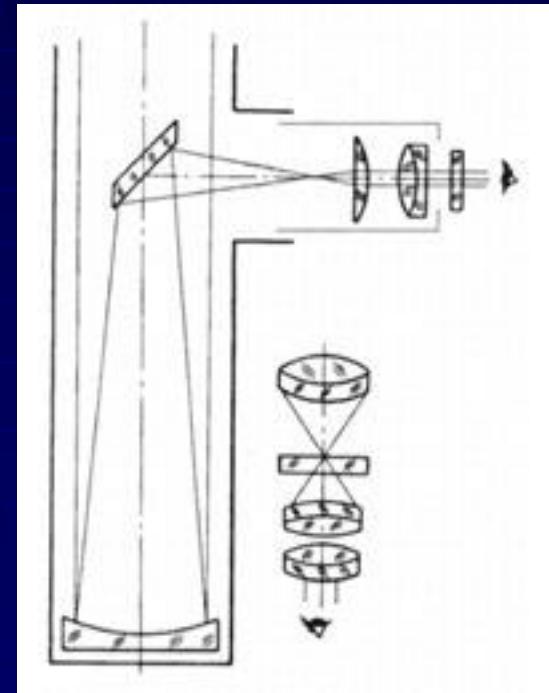
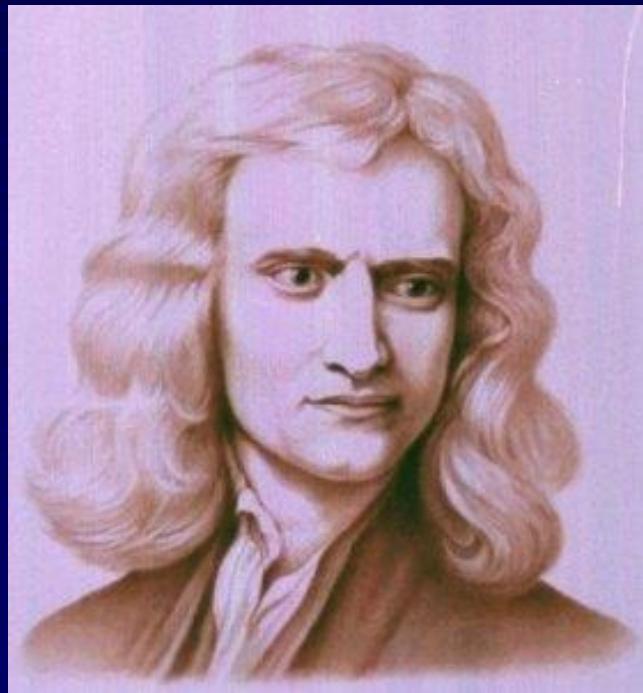
1609-10 гг.

# 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 удается сбрасывать света –  
тем более слабые объекты мы увидим.

Количество света зависит от диаметра объектива

2. Чтобы рассмотреть более мелкие детали (увеличение).

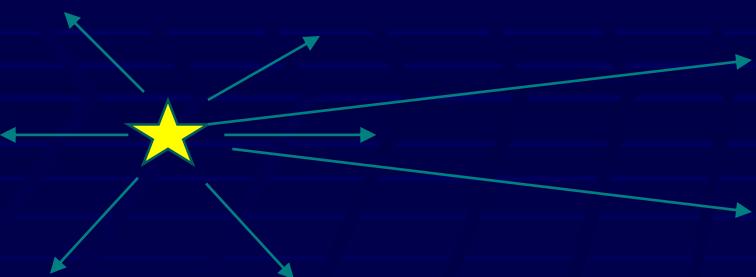
Предельное увеличение тем больше,  
чем больше диаметр объектива.

Диаметр зрачка глаза 5-8 мм.

Первые телескопы – сантиметры.

Крупные современные телескопы – до 10 метров.  
Проекты – до 100 метров!!!!

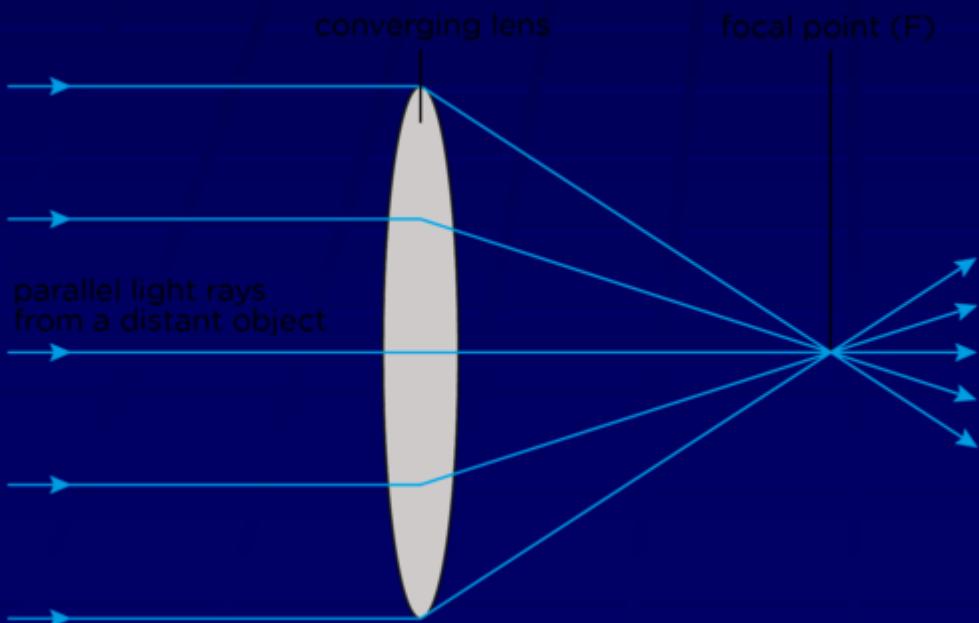
# Собирающая площадь



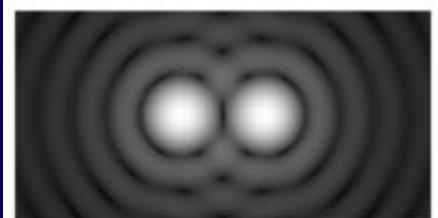
$$\text{Поток } f = L / 4\pi d^2$$

[Энергия/площадь/время]

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

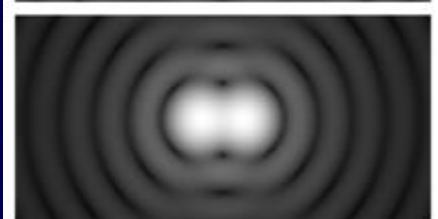


# Угловое разрешение

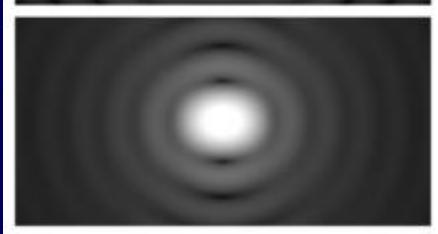


$$\theta = 1.220 \frac{\lambda}{D}$$

Определяется диаметром!

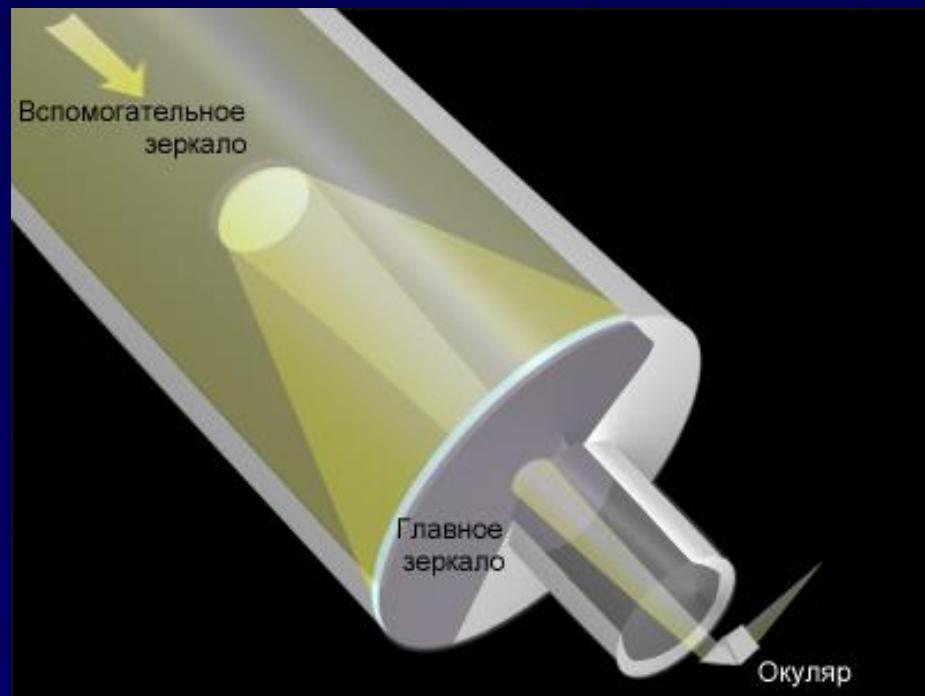
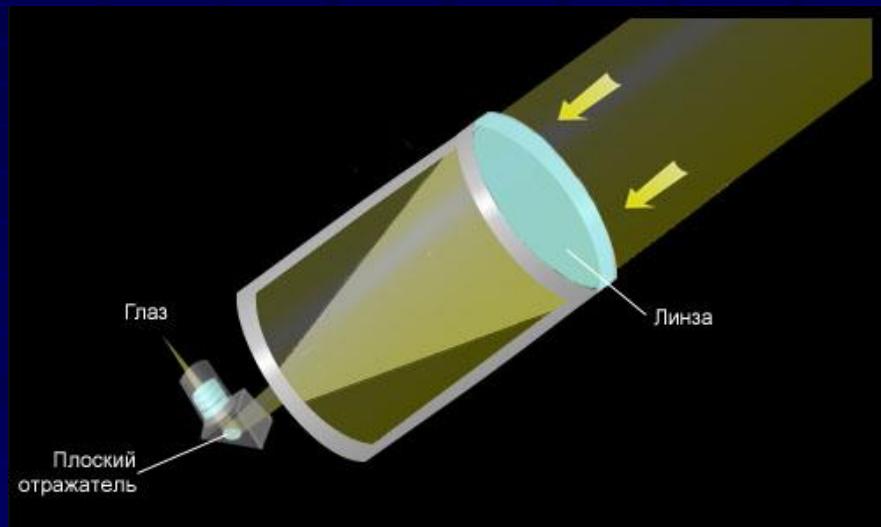


Примерно одна угловая секунда  
для синего (видимого) света  
и диаметра телескопа 10 см.

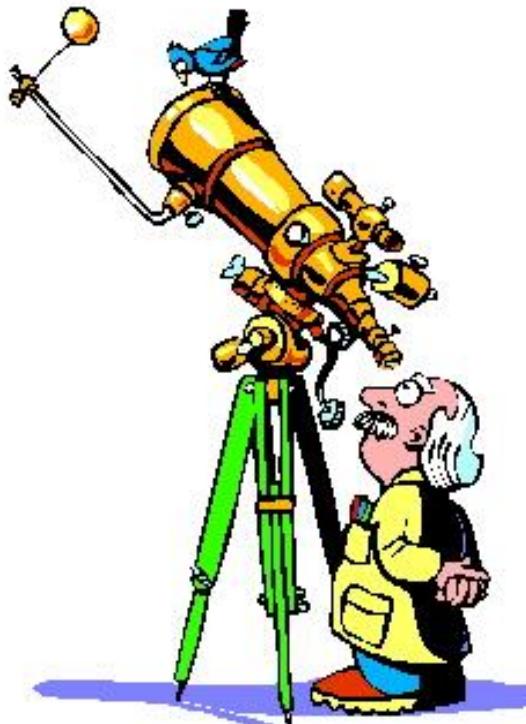


Для крупных телескопов (более метра)  
начинает ограничиваться  
параметрами атмосферы.

# Рефракторы и рефлекто́ры



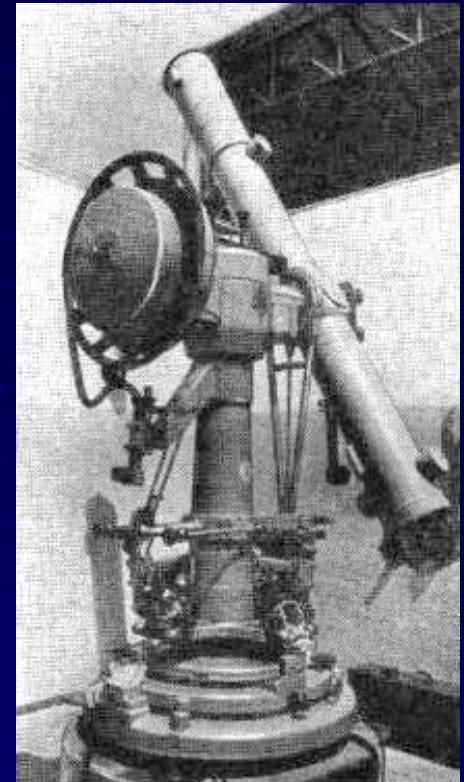
# Оптические телескопы 17-19 вв.



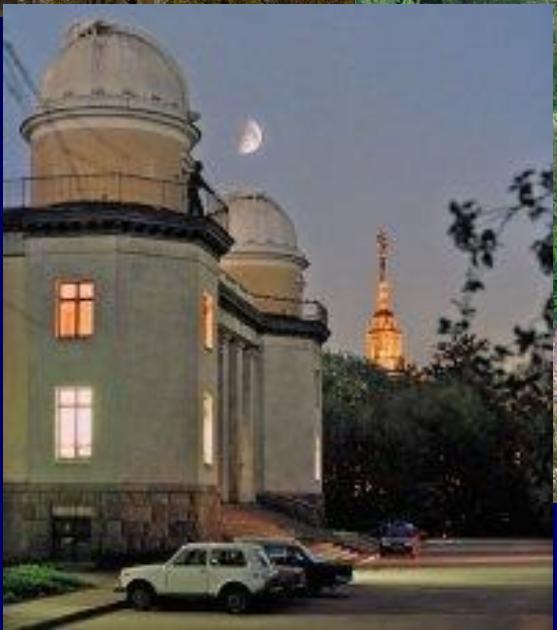
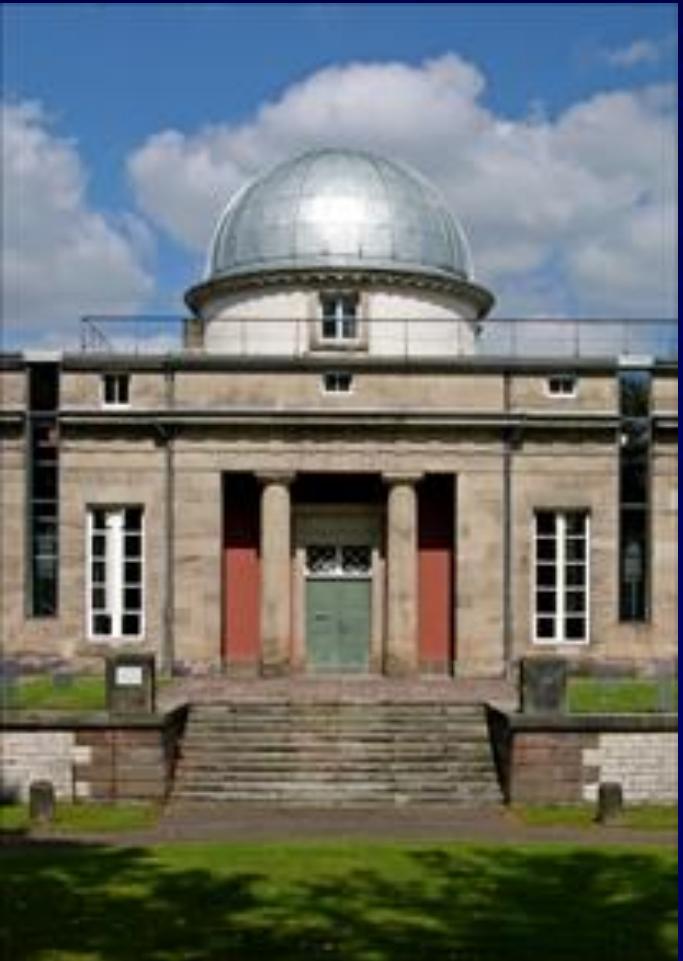
Размеры и качество телескопов росли.

Самый большой телескоп-рефрактор имеет диаметр 1 метр.

Рефлектор лорда Росса 182 сантиметра (1845 г.)



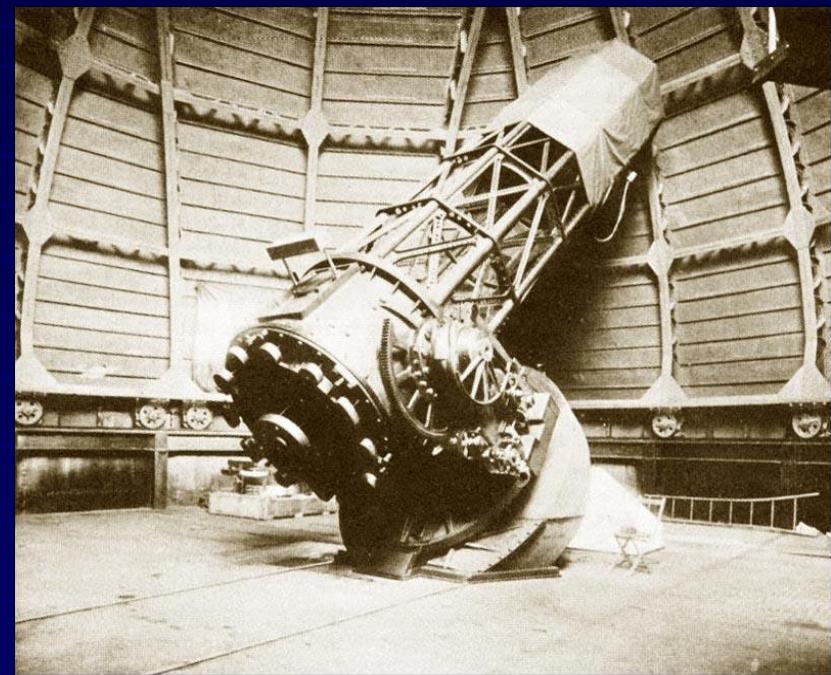
# Университетские обсерватории



# Оптические телескопы в начале 20 века



Йеркский рефрактор (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

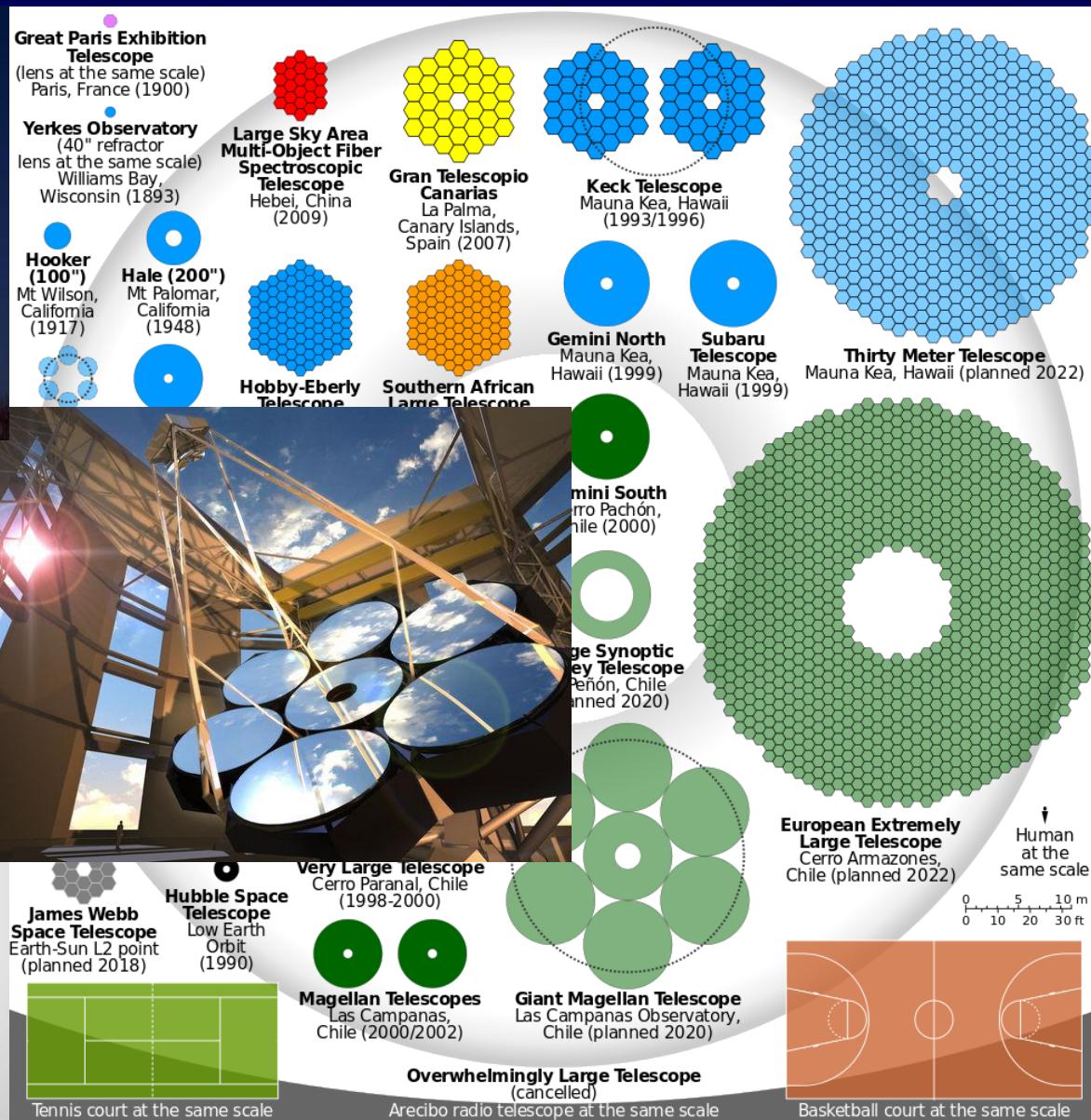


Gemini 8 метров

# Большие телескопы



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



# Система Кассегрена

## Cassegrain Telescope

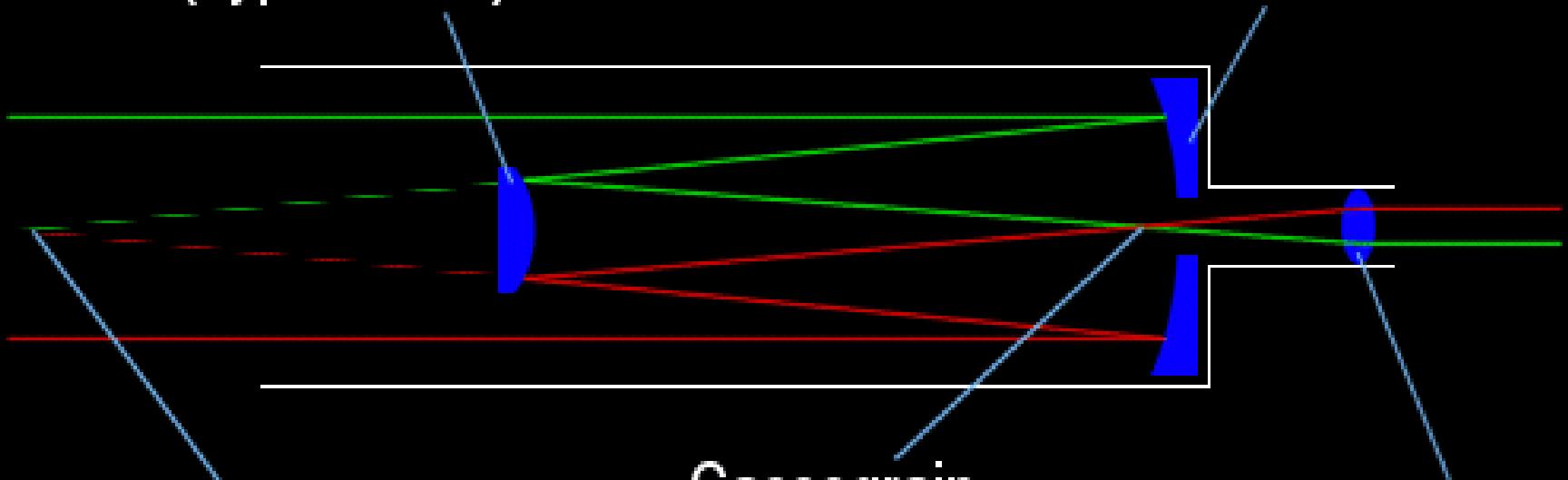
Secondary mirror  
(hyperboloid)

Primary mirror  
(paraboloid)

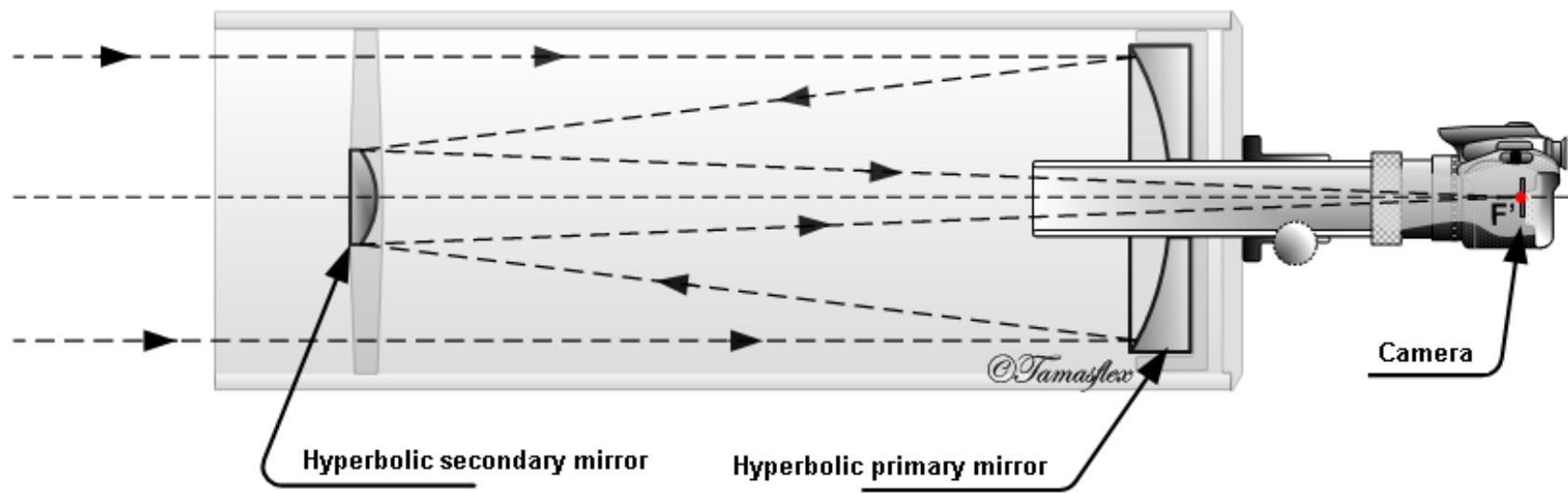
Prime focus

Cassegrain  
focus

Eyepiece



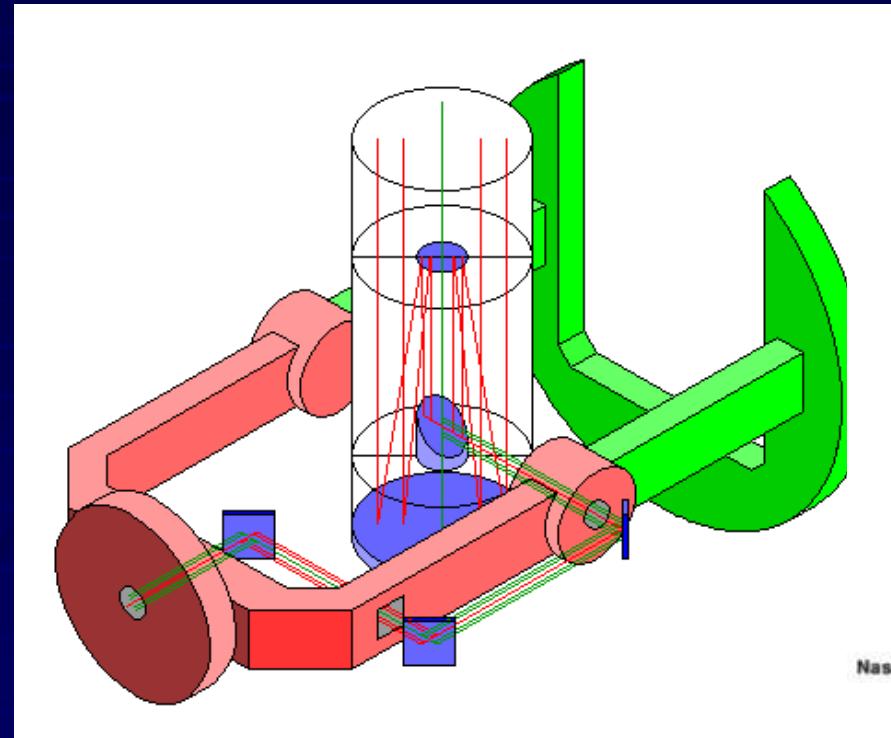
# Система Ричи-Кретьена



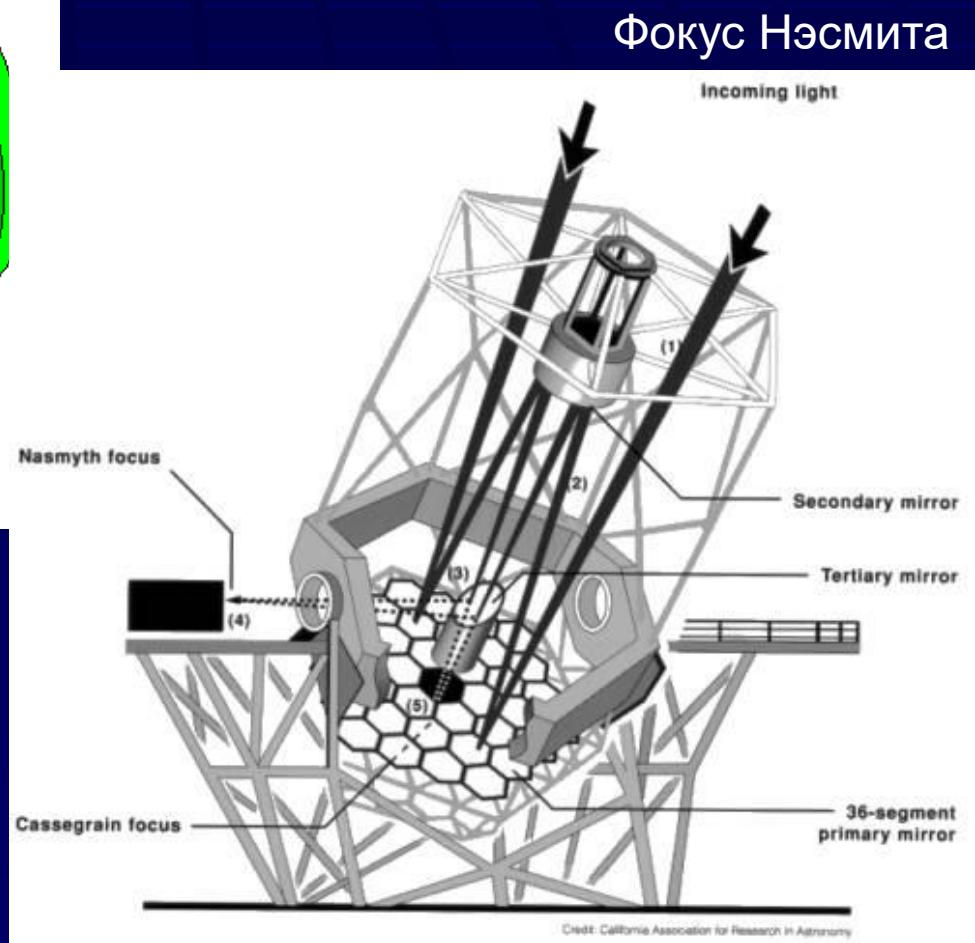
Ritchey - Chrétien (RCT)

Компактность инструмента

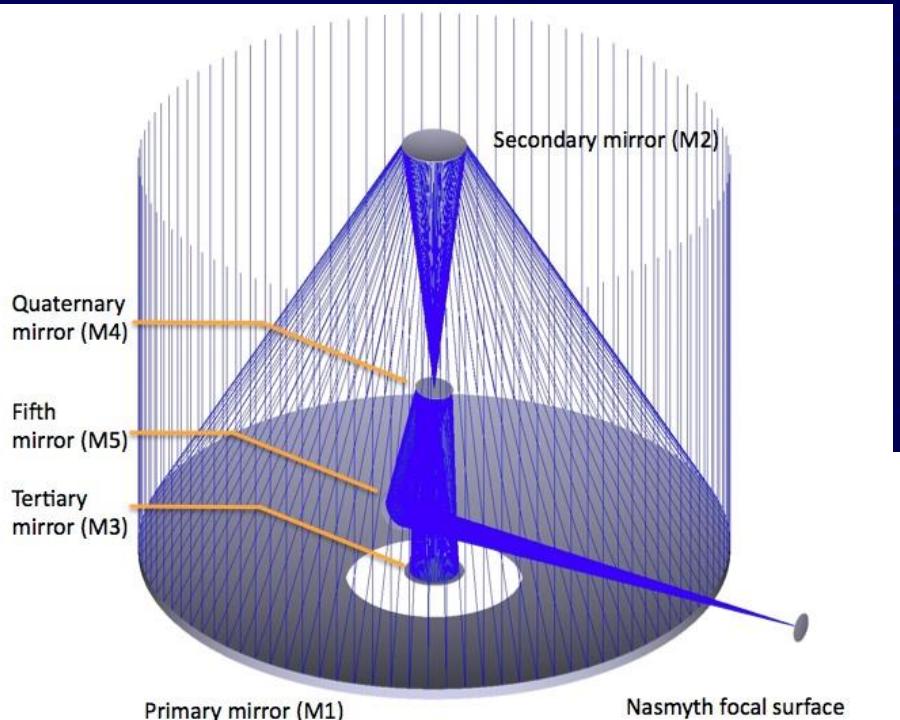
# Неподвижные фокусы



Фокус Кудэ

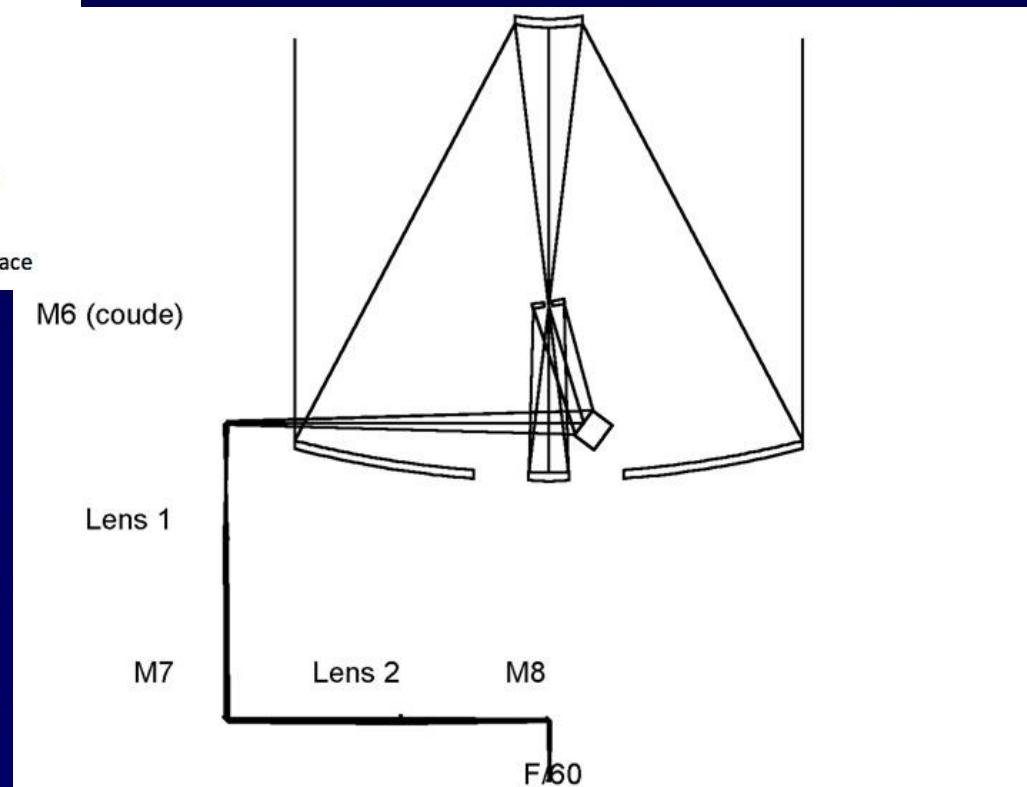


# E-ELT

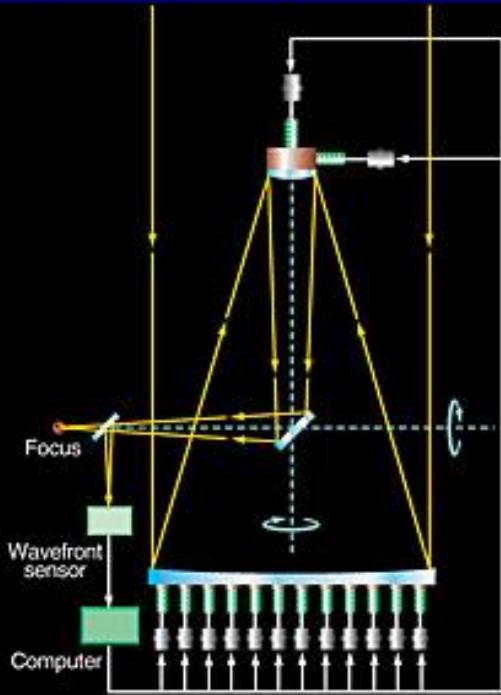


<https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/telescope/design/>

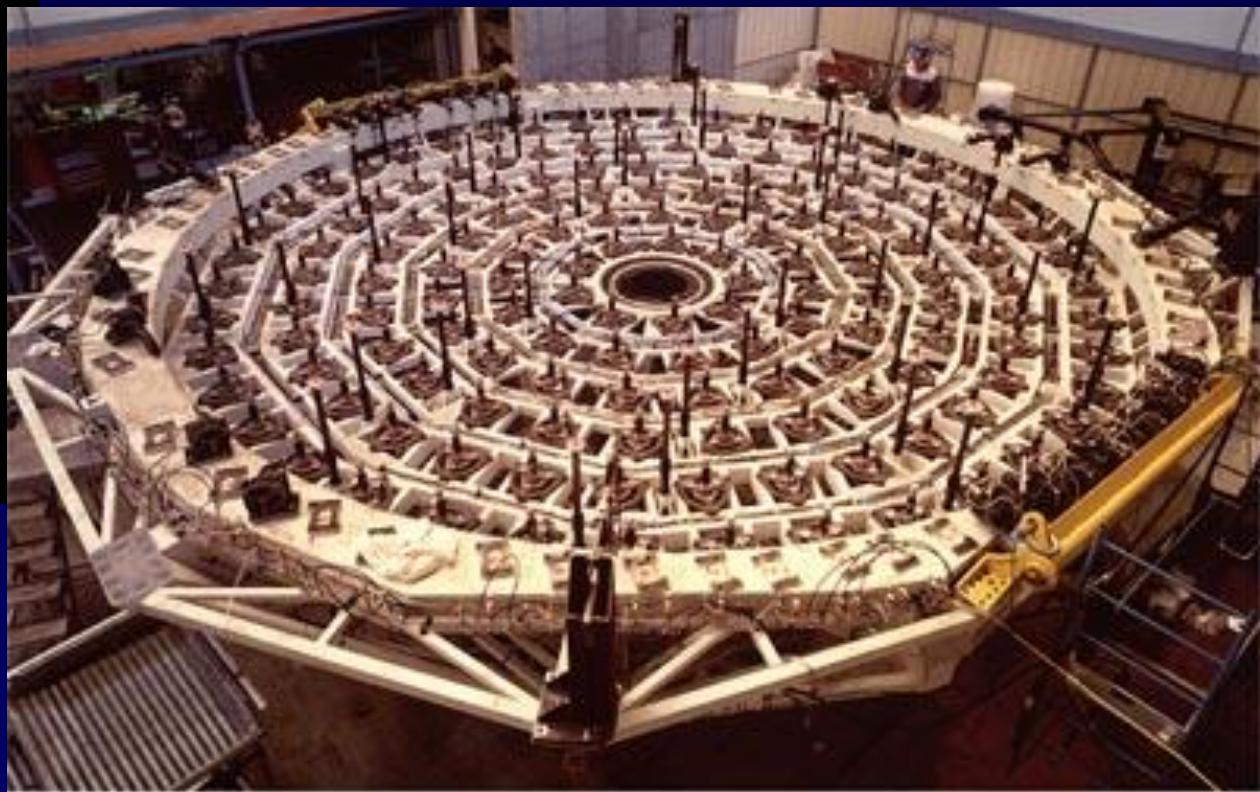
Реальные схемы могут быть сложнее и содержать несколько дополнительных оптических элементов.



# Активная оптика



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



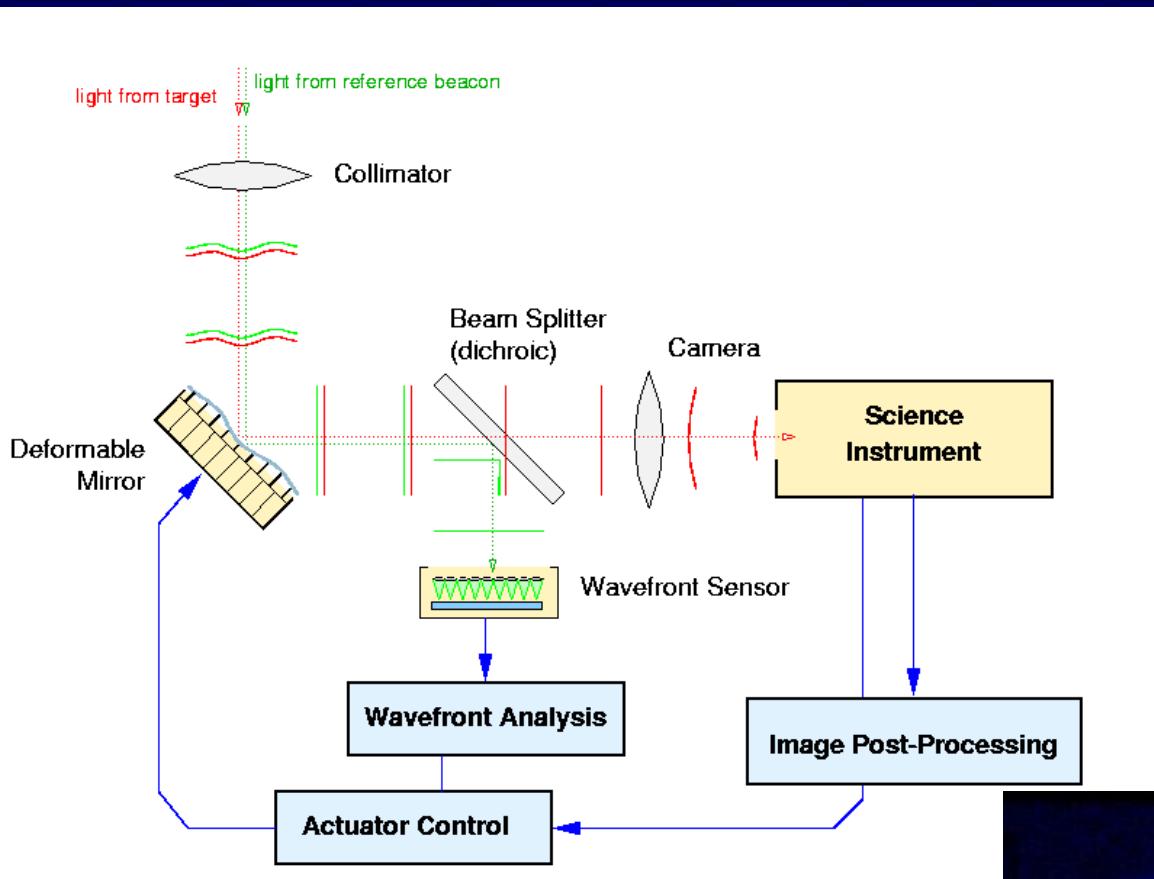
Active Mirror Supports in VLT M1 Cell

Разработана  
инженером ESO  
Raymond Wilson

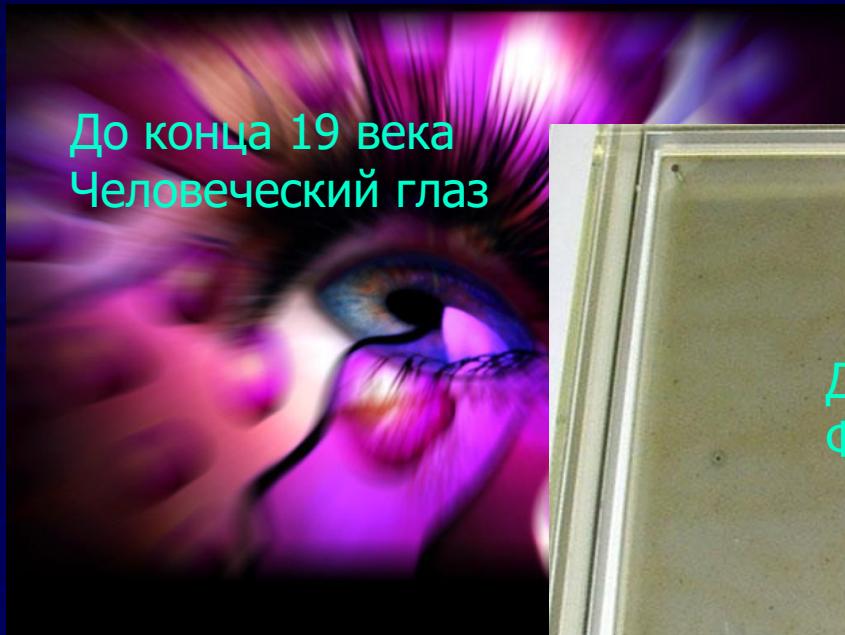
Еще проще работать  
с сегментированными  
зеркалами

# Адаптивная оптика

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

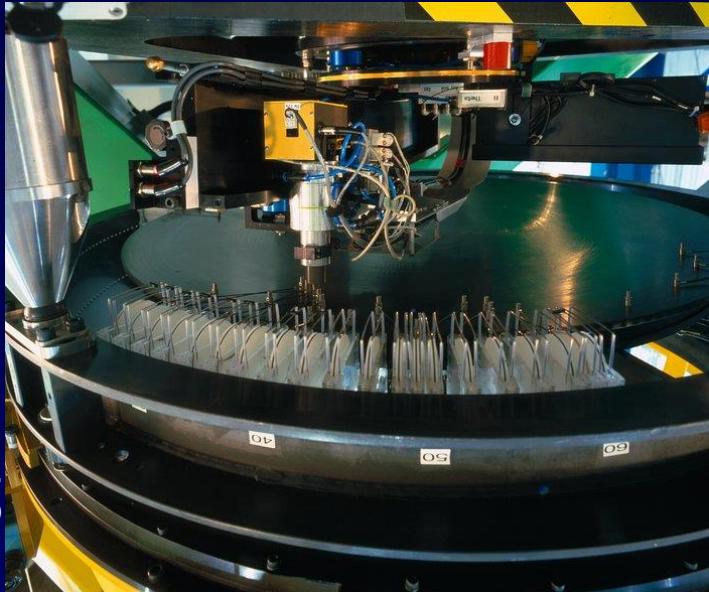


# Глаз, фото, ПЗС



# Астрономические приборы

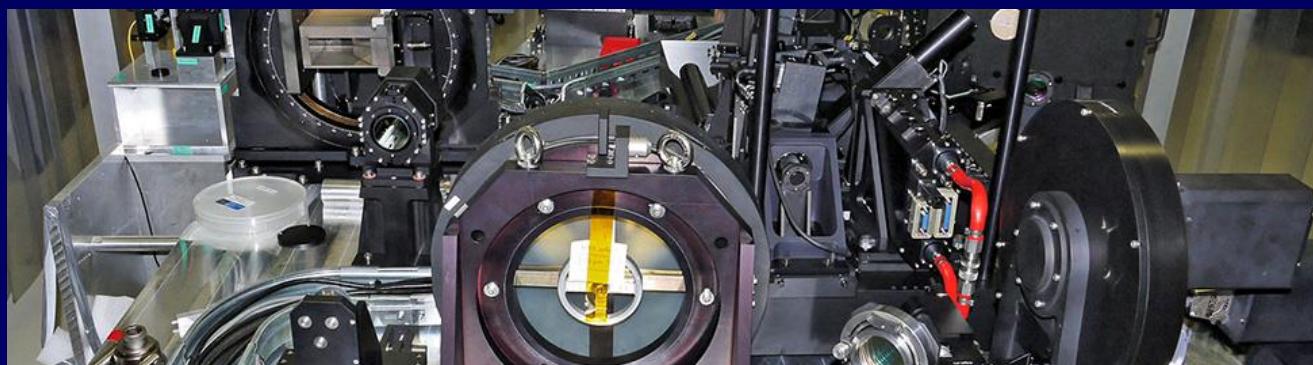
На VLT работает около 20 приборов.



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



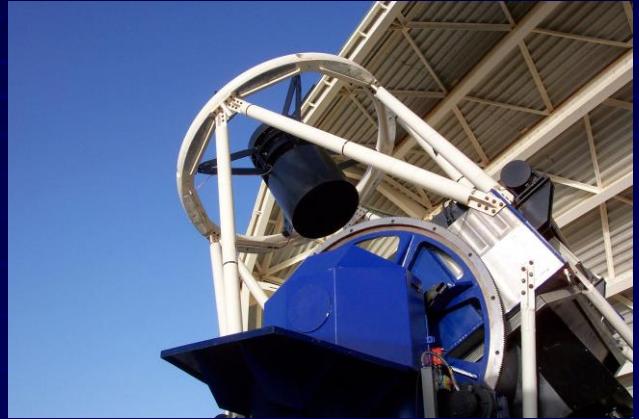
**FORS 1 and FORS 2  
FOcal Reducer and  
low dispersion  
Spectrograph**



# Телескопы-роботы и обзоры неба



Sloan digital sky survey

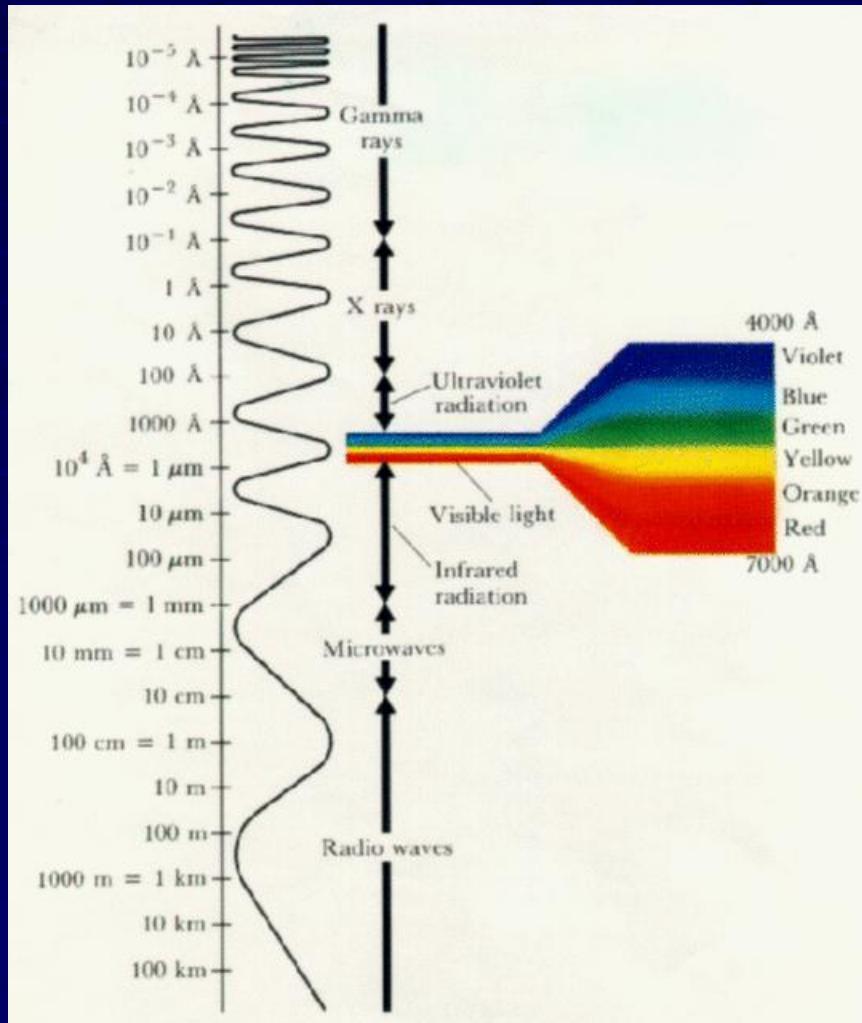


Liverpool Telescope (2m)



МАСТЕР

# Всеволновая астрономия



Наблюдения теперь проводят во всех спектральных диапазонах:

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

Разные диапазоны приносят информацию о разных процессах.

# Радиоастрономия

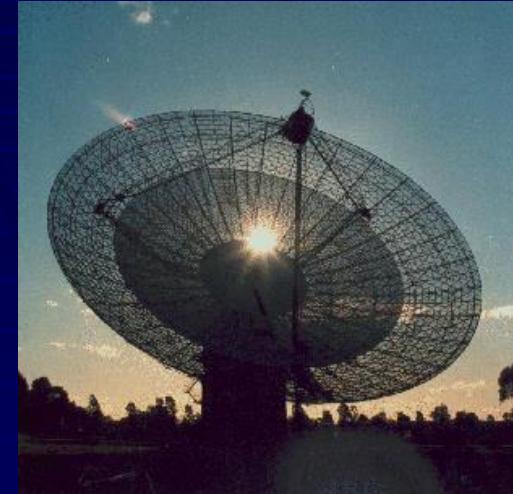
Космическое радиоизлучение было открыто в 1932 году.

Но развитие радиоастрономии началось только после Второй Мировой войны.



Два вида телескопов: «тарелки» и «рогульки»

# Современные радиотелескопы

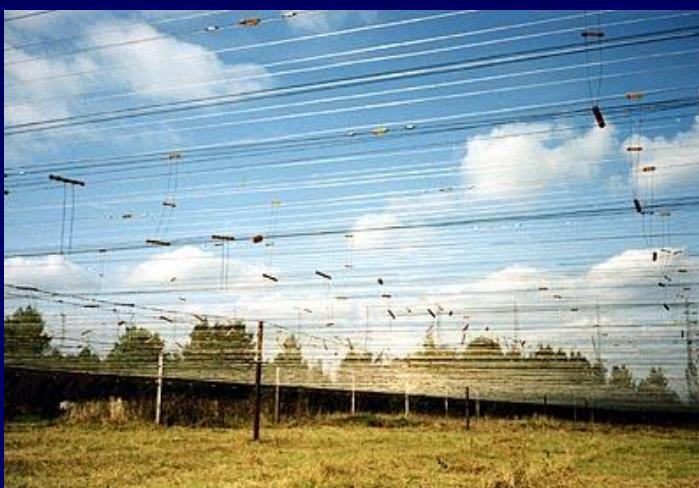


# Российские радиотелескопы

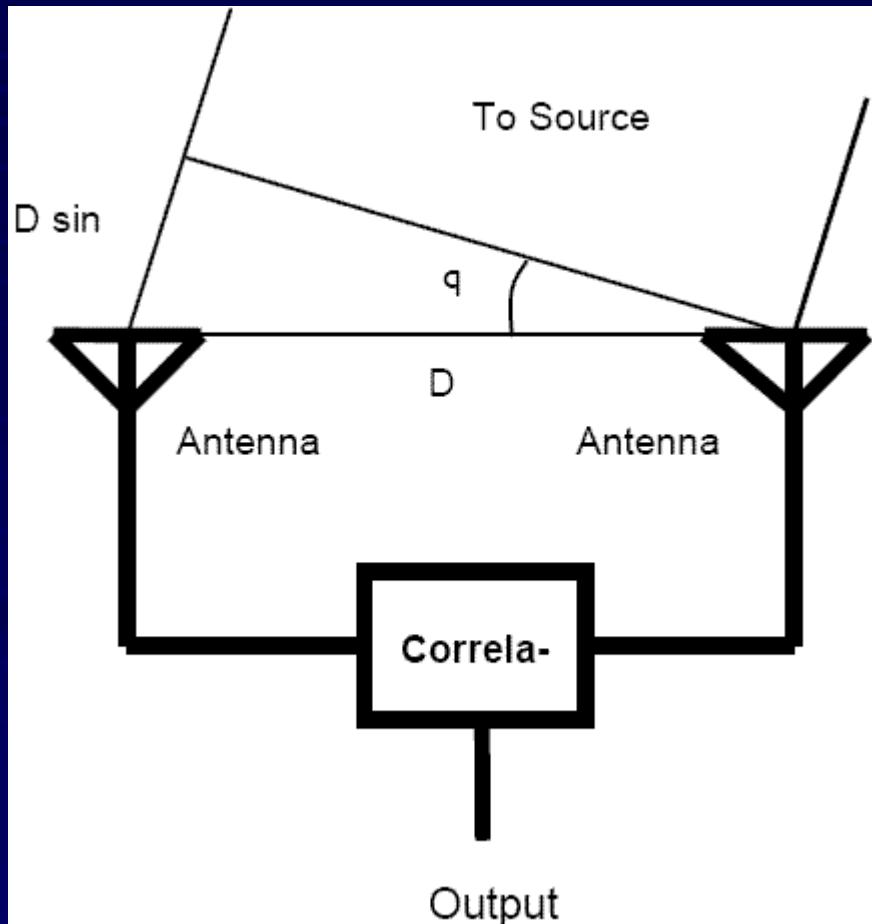


РАТАН-600

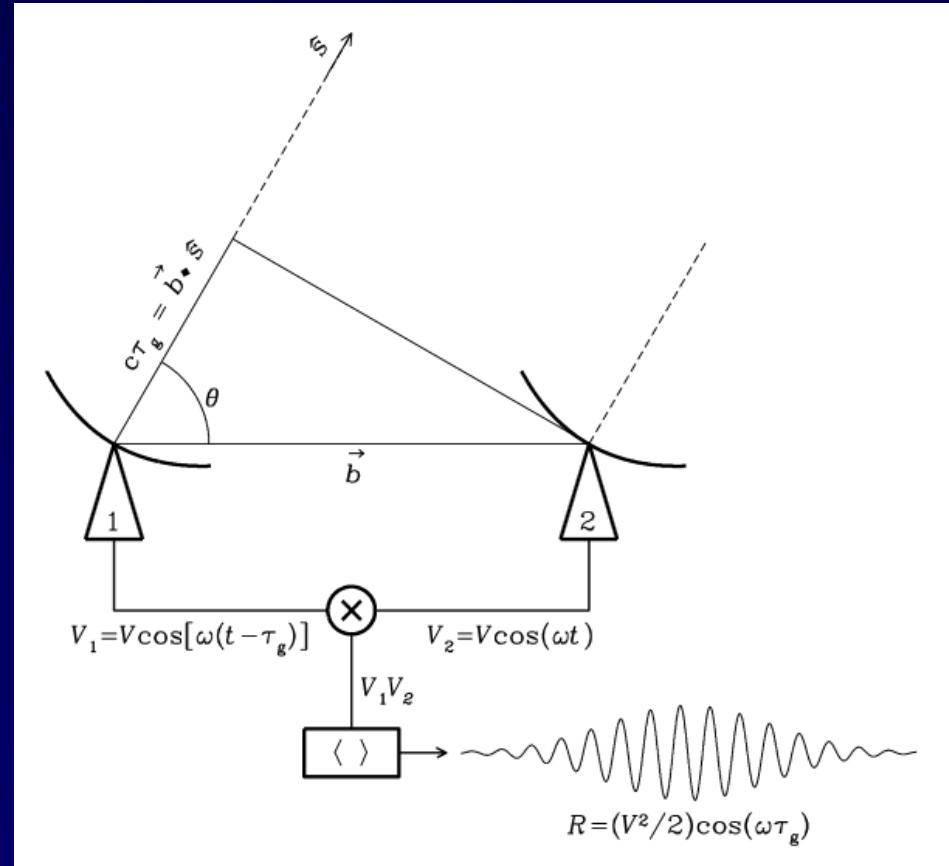
И два  
телескопа  
в Пущино:  
БСА и ДКР



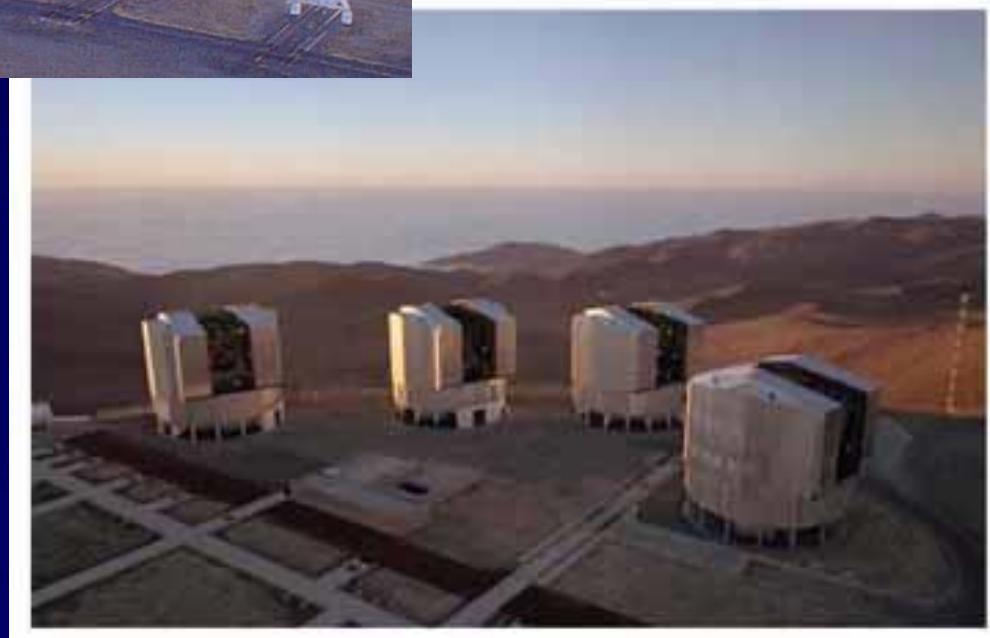
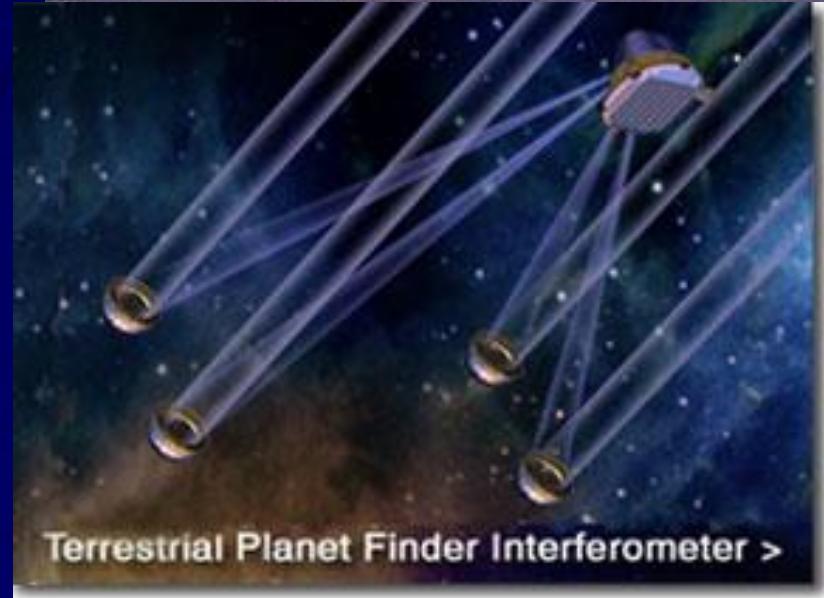
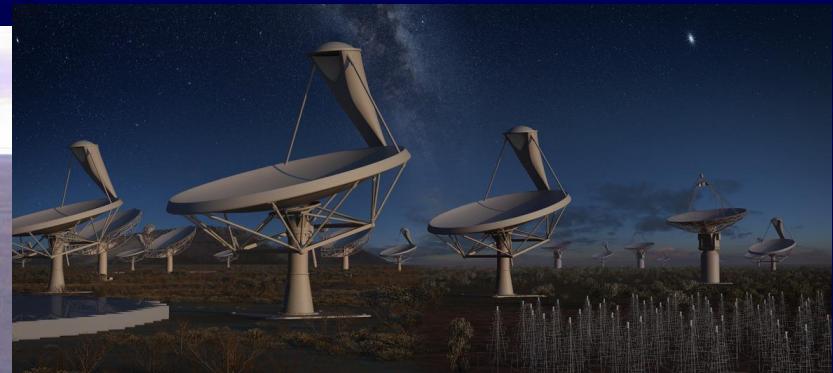
# Интерферометры



Высокое угловое разрешение  
в направлении, соединяющем  
два телескопа.



# Оптика и радио



# Радиоастрон



Космический  
интерферометр

Рекордное  
угловое разрешение

# Гамма-астрономия на Земле



H.E.S.S.

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

# Не только электро-магнитные 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 чём 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.



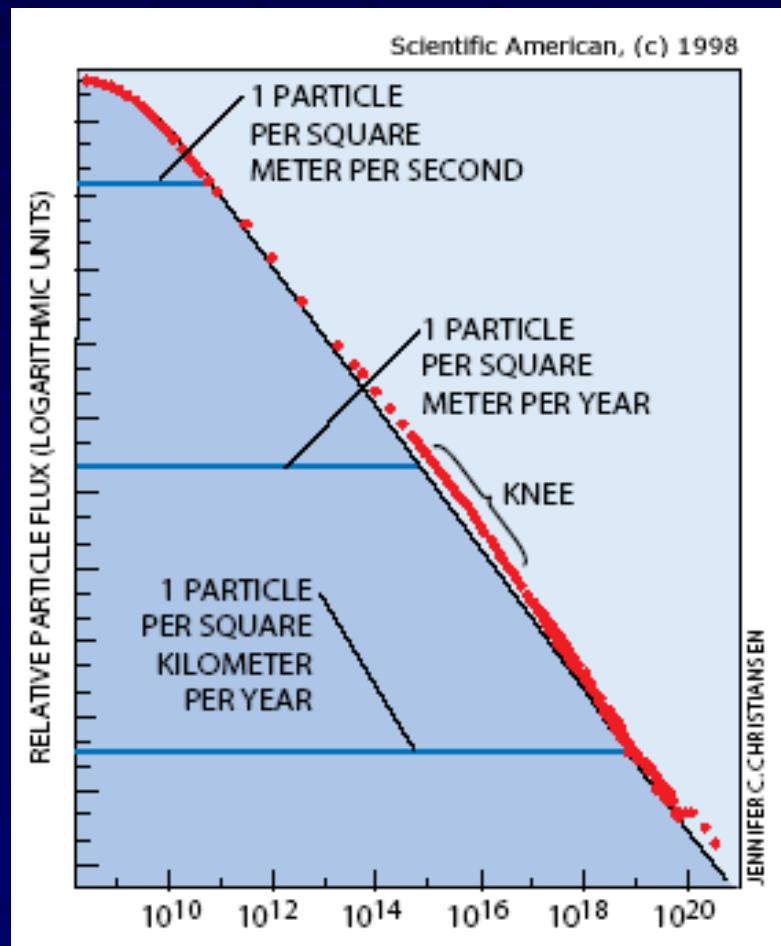
# Спектр космических лучей

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

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

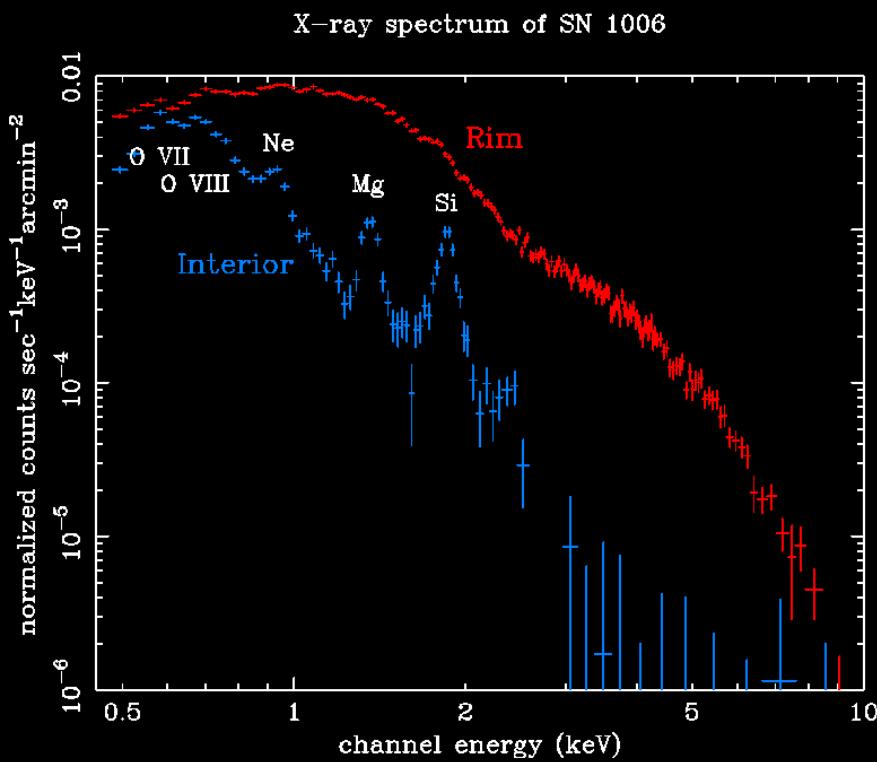
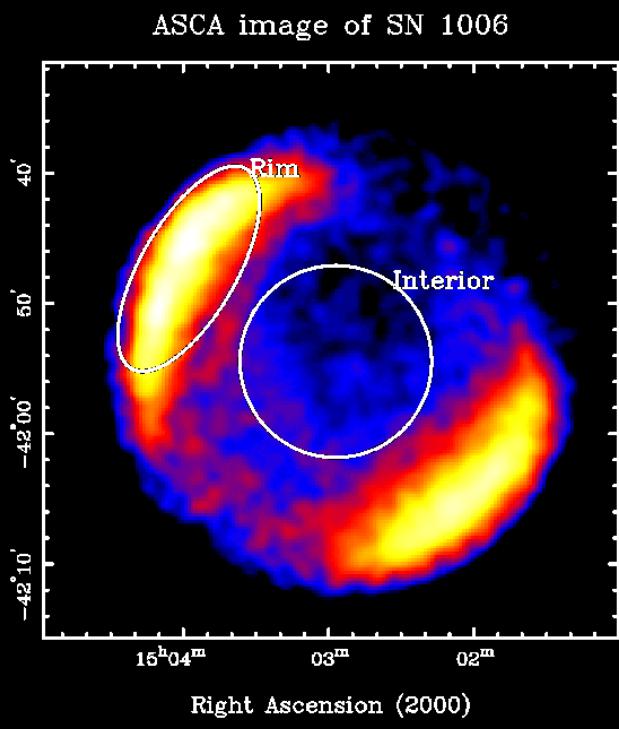
Первичные КЛ поверхности Земли практически никогда не достигают (лишь около 1%).

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

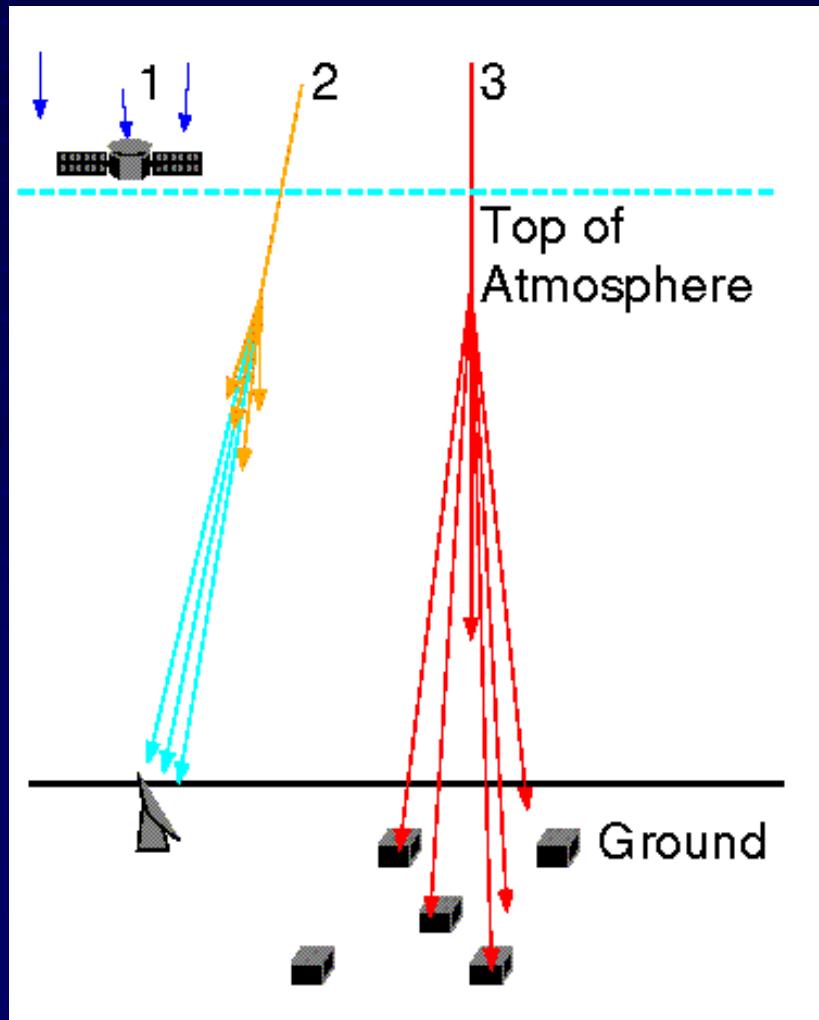


# Происхождение

Галактические космические лучи в основном связаны с остатками сверхновых.



# 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



PAMELA



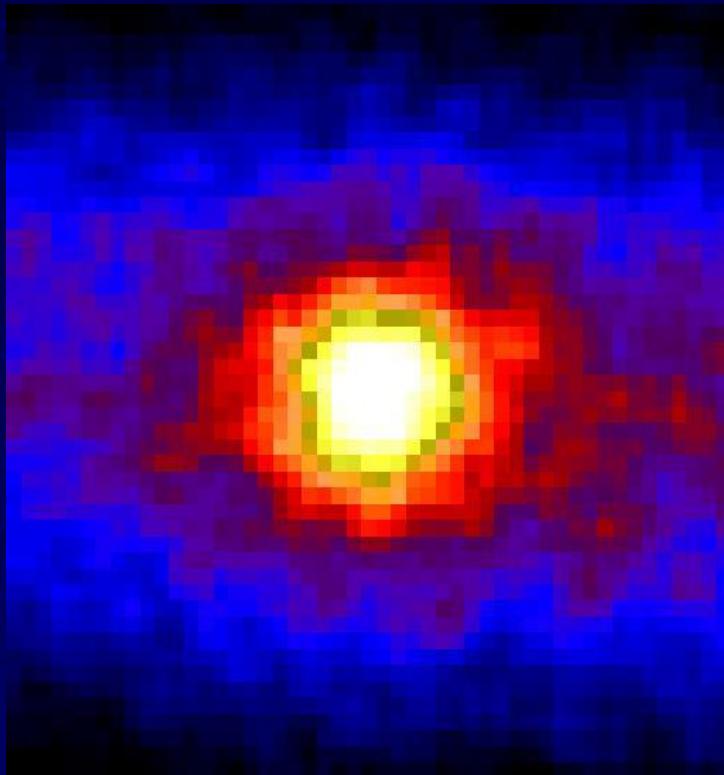
Полеты Гесса (1912 г.)

# Обсерватория имени Оже



Более 1000 наземных детекторов.  
Плюс 24 телескопа.

# Нейтринная астрофизика



Нейтрино от Солнца



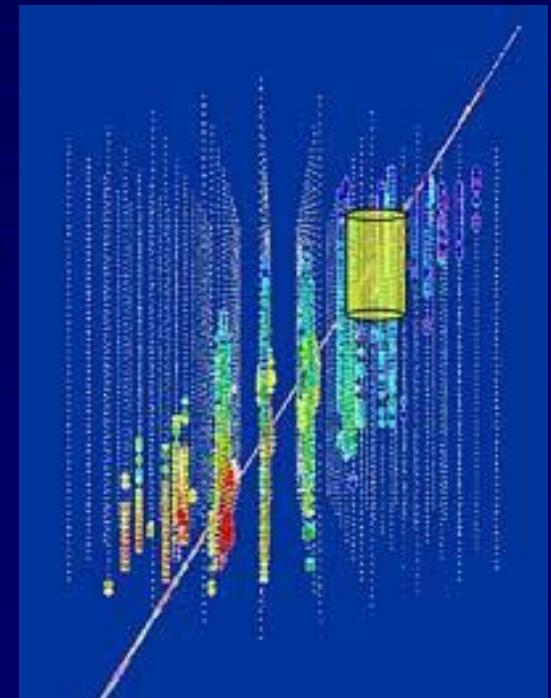
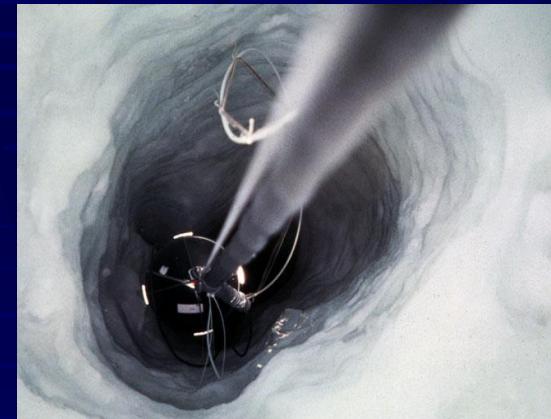
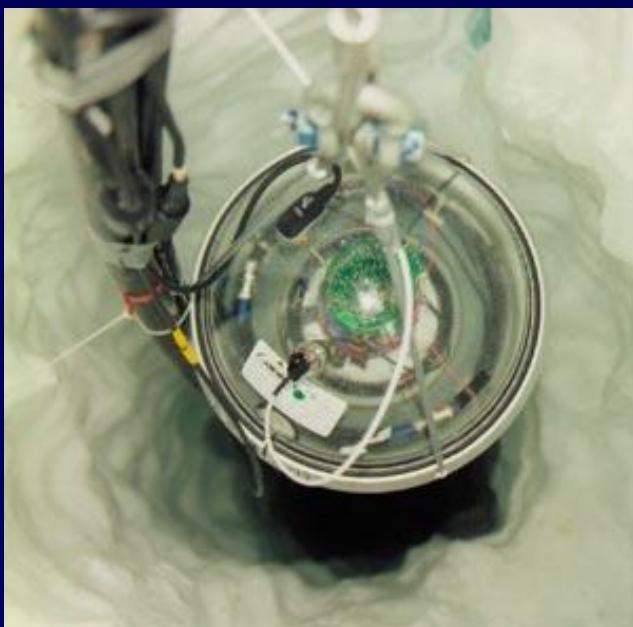
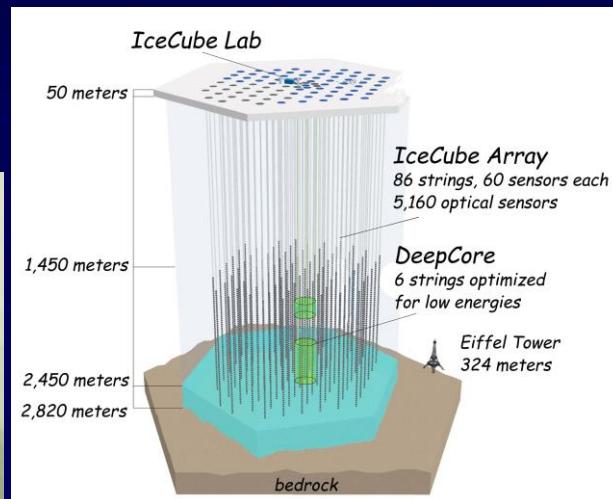
Нейтрино от взрывов сверхновых

© Anglo-Australian Observatory

# Наблюдения нейтрино



Эксперименты AMANDA  
и IceCube в Антарктиде



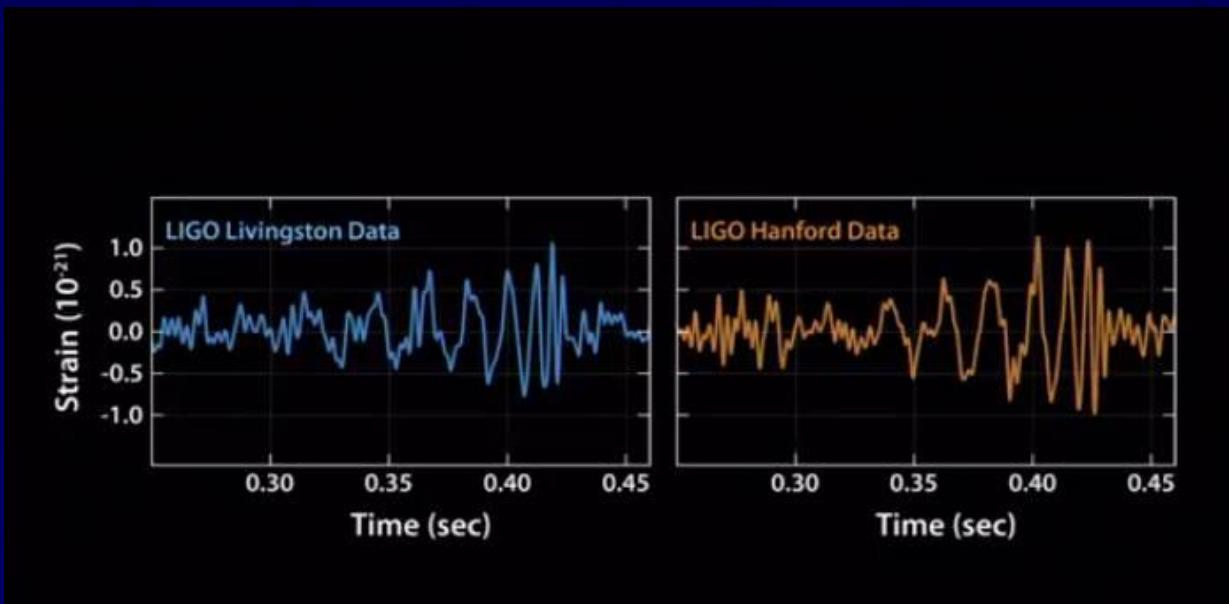
# Гравитационные волны



Предсказаны Общей теорией относительности.

Возникают при слиянии нейтронных звезд и черных дыр.

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



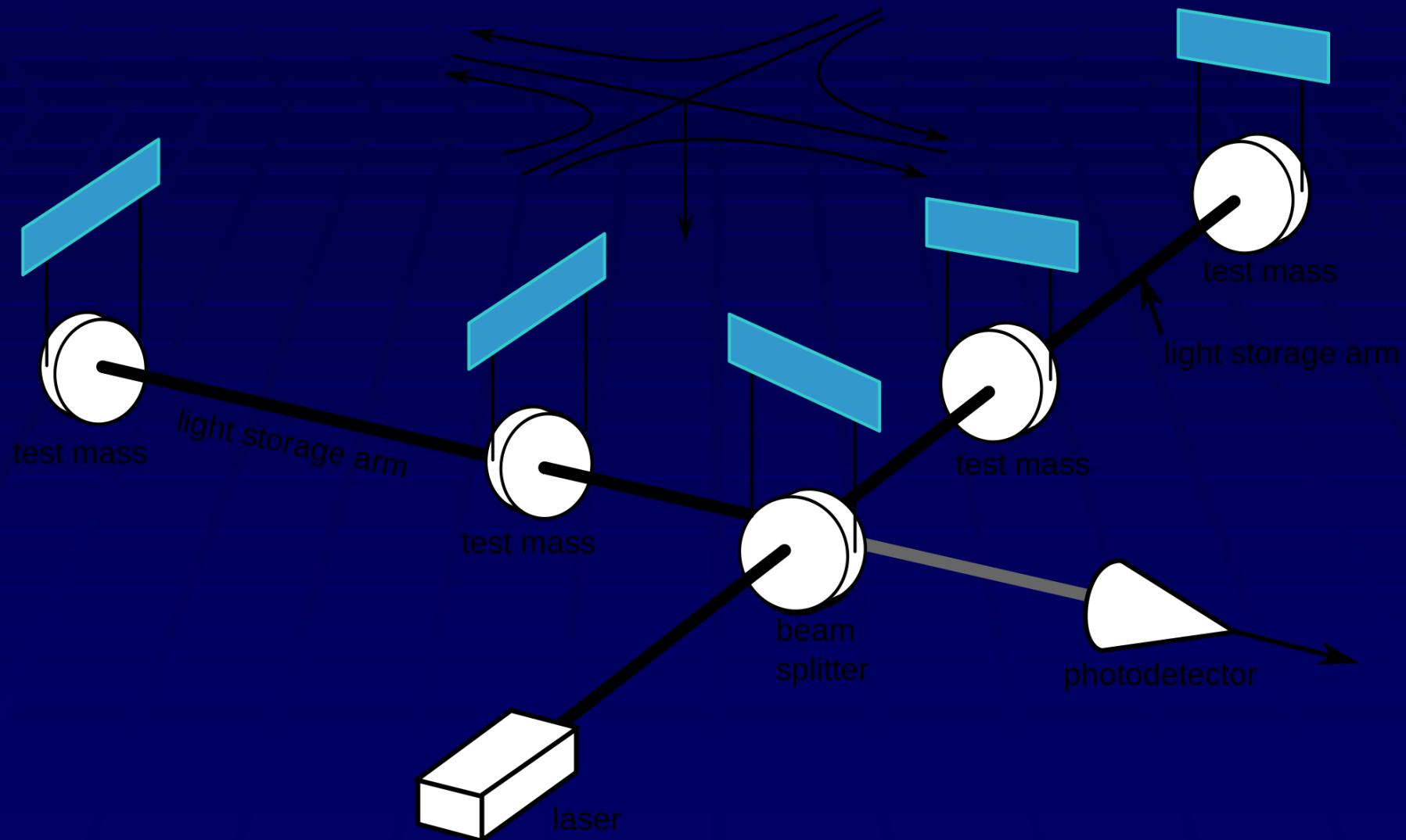
# Детекторы гравитационных волн



Первый детектор  
Вебера



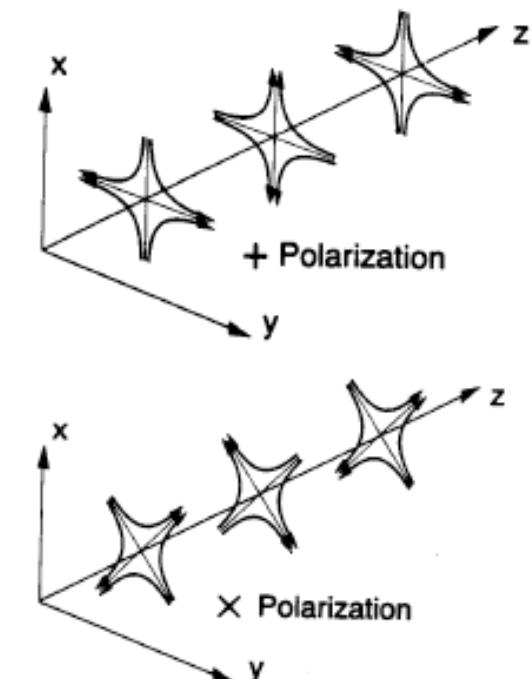
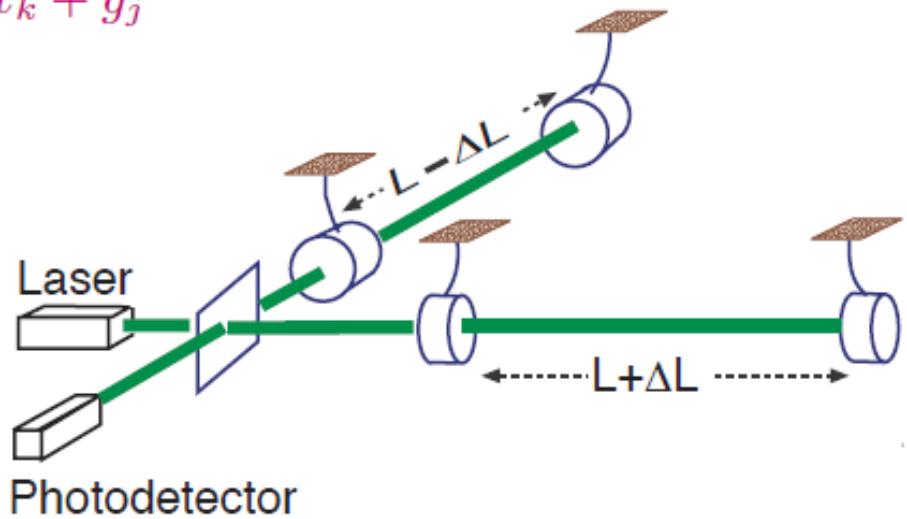
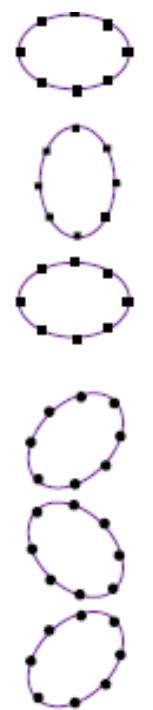
Эксперимент VIRGO



# Изменение длины плеч

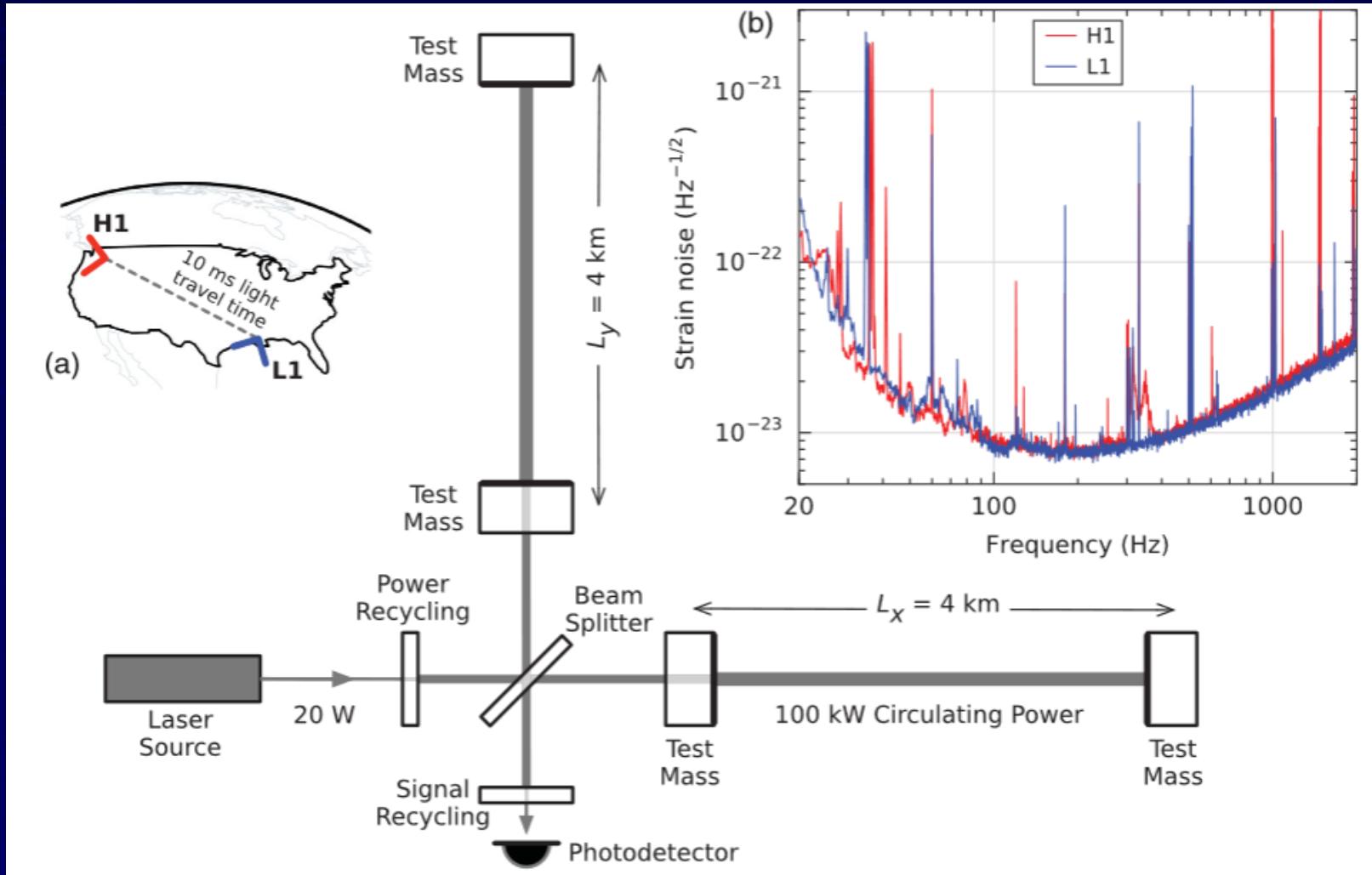
Прохождение граввовны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра. Это можно измерить.

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



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

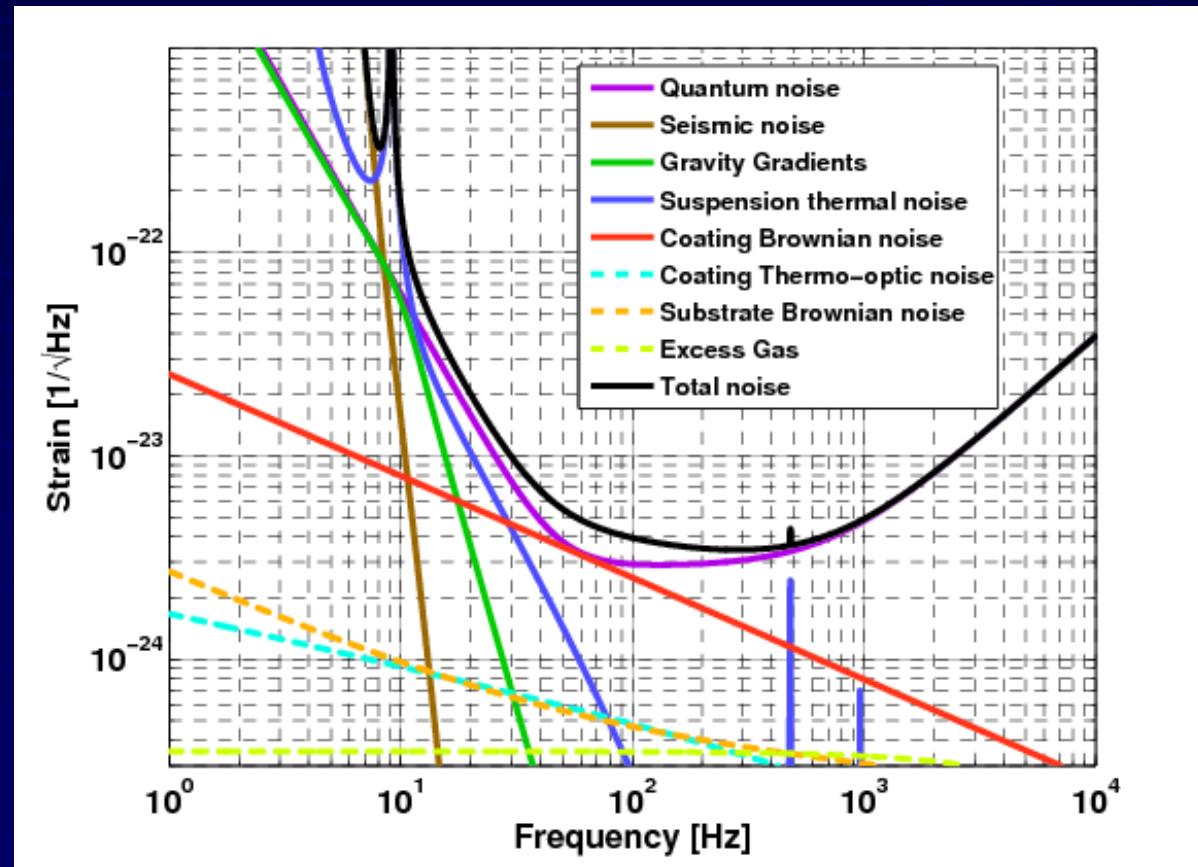
# Детекторы и их чувствительность



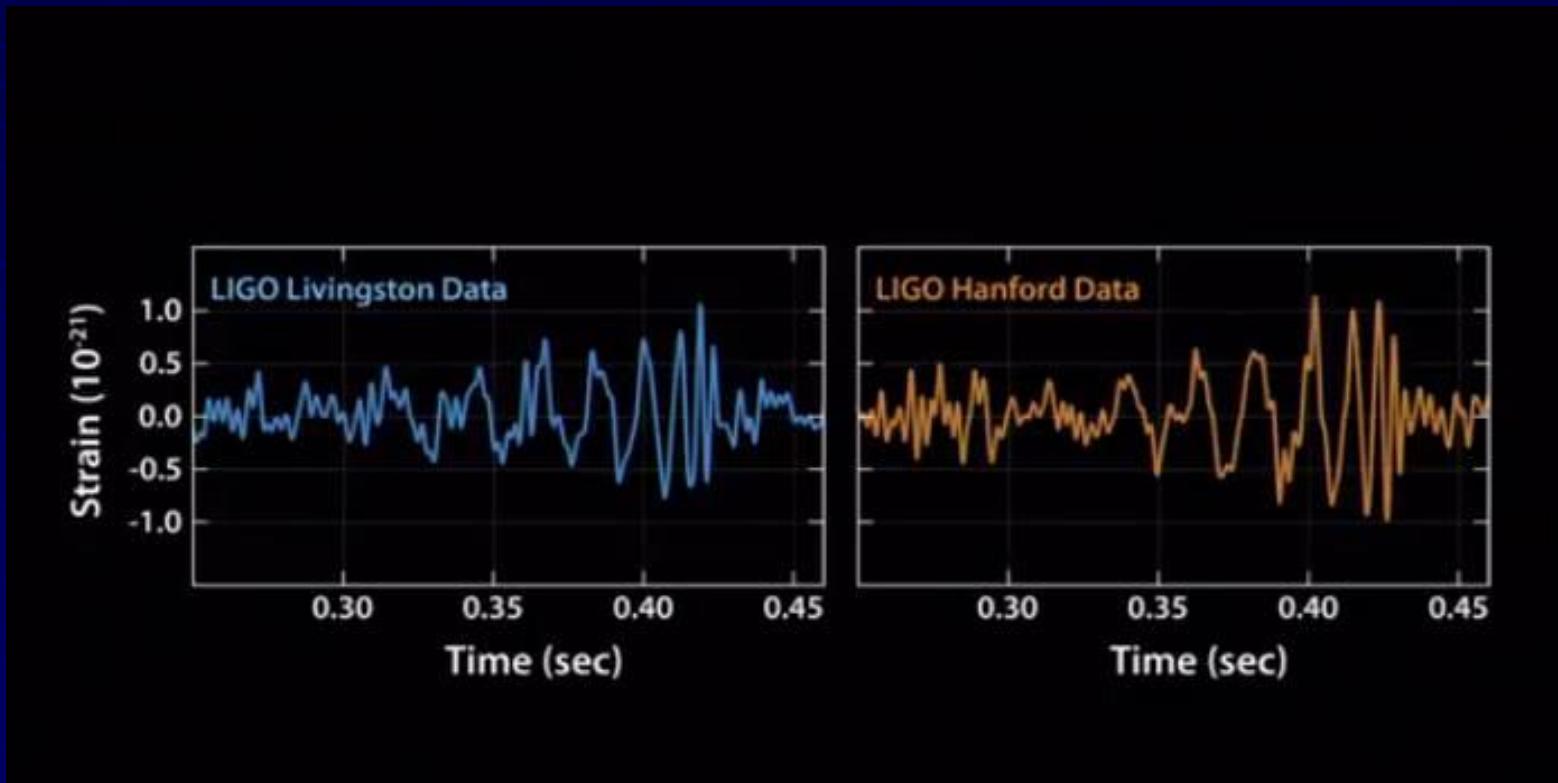
# Разнообразные шумы

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.

# Источники



A screenshot of a website page from 'Большой науки'. At the top, there is a logo consisting of orange dots forming a circle, followed by the letters 'Э\_e | Л\_ | Е\_e | M\_m | E\_e | H\_n | T\_t | Ы\_y' and a bracketed set of characters 'Большой науки'. Below this is a blue bar with the text 'Содержание'. The main title 'Книжный клуб' is displayed prominently. Underneath it, a navigation bar includes 'Главная / Книжный клуб' and 'Энциклопедия'.



# 10 фактов об астрономии

# Факт 1

**Астрономия – наблюдательная наука**

**В астрономии невозможны прямые эксперименты  
с изучаемыми объектами.  
Это уникальное свойство для естественных наук.**

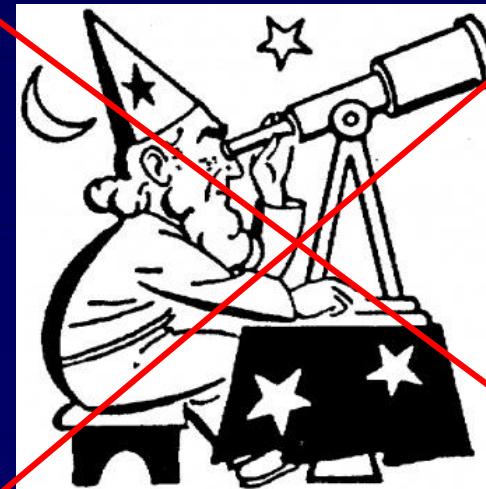


# Факт 2

**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.**

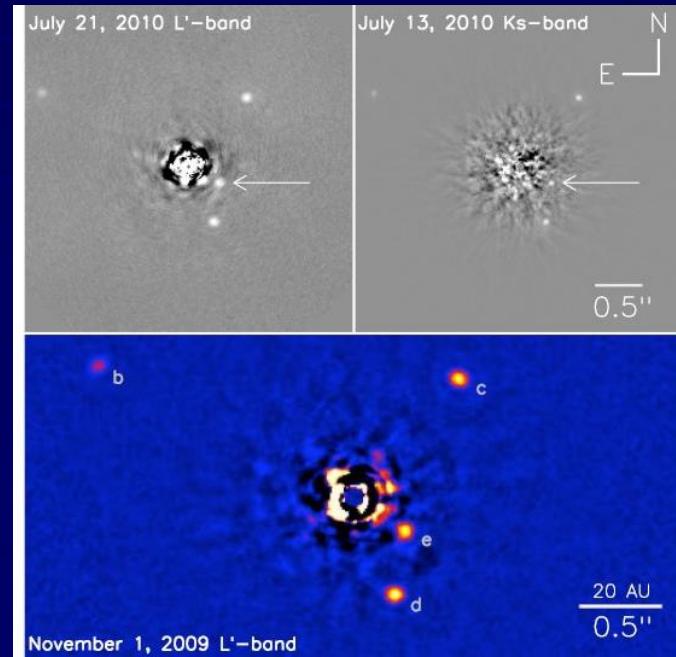


# Факт 3

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

**Среднестатистический астроном занят обработкой данных.**

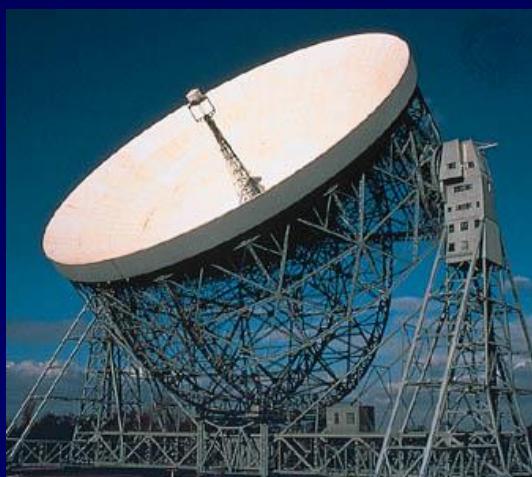
**Изображения, которые вы видите, обычно являются итогом длительной и сложной обработки.**



# Факт 4

**Астрономия стала всеволновой**

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



# Факт 5

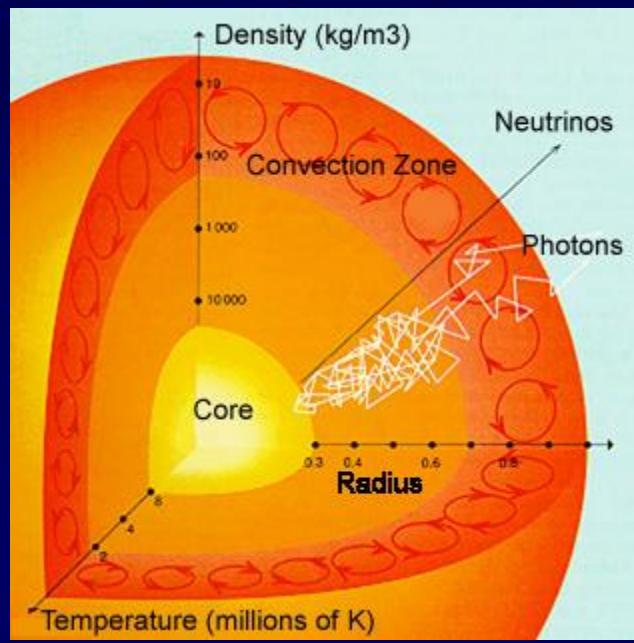
**Наблюдатели не всегда сидят у телескопа**

**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 – часть физики



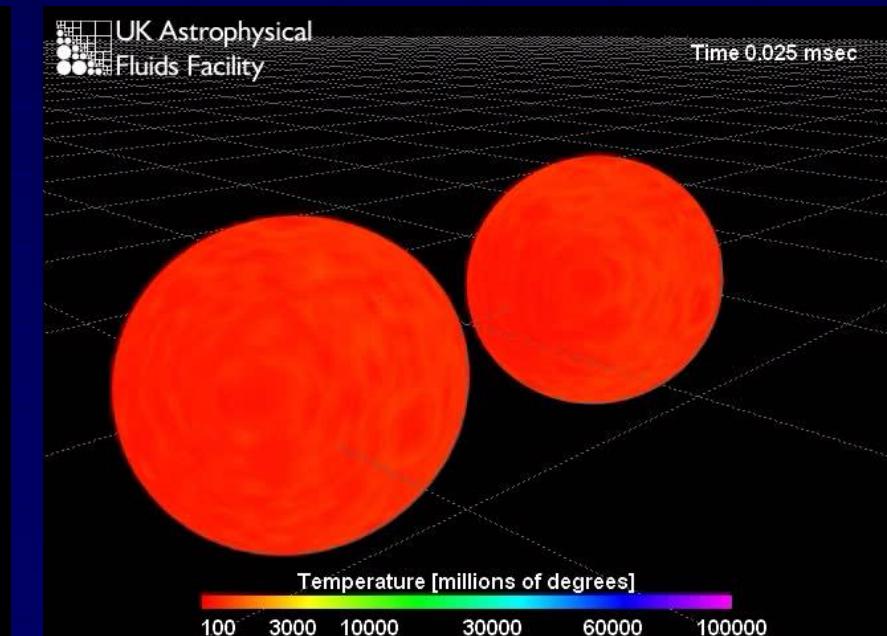
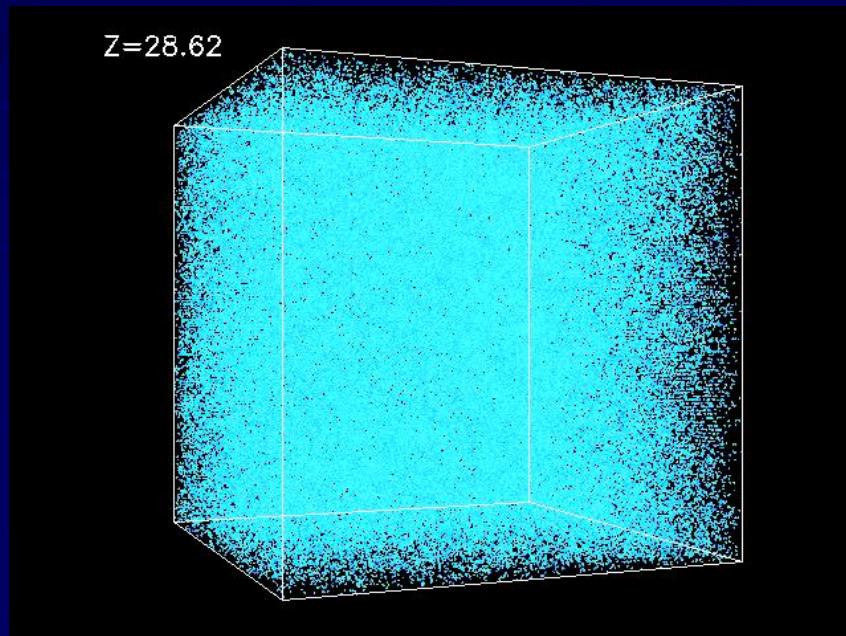
**Нам интересно  
не «как выглядит»,  
а «как устроено»**

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

# Факт 7

**Астрономы считают на суперкомпьютерах**

**Многие астрономические задачи  
требуют колоссальных вычислительных ресурсов**



# Факт 8

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



**Giant Segmented Mirror Telescope**  
Милиард 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 2000  
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 - ...

- Современная бурно развивающаяся наука
- Являющаяся в некотором смысле частью физики
- Проводит наблюдения по всех диапазонах спектра
- ... а также используя потоки частиц и гравитационные волны
- Строит одни из самых дорогих научных установок
- Активно применяет суперкомпьютеры для расчетов
- ... и обработки данных
- Пытается эффективно использовать данные, открывая их всем
- Производит огромный поток результатов

**Смотрите на звезды!**