



Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

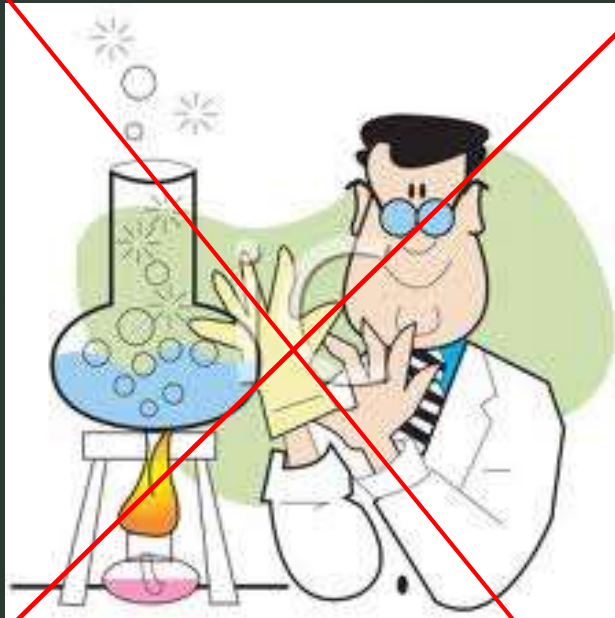
Современная астрономия и современные телескопы



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 стали фиксировать изображение на фотопластинке, чтобы потом детально изучить и обработать.

Сейчас приемники излучения электронные, данные получаются в цифровом виде.

Вне видимого диапазона глаз вообще бесполезен.

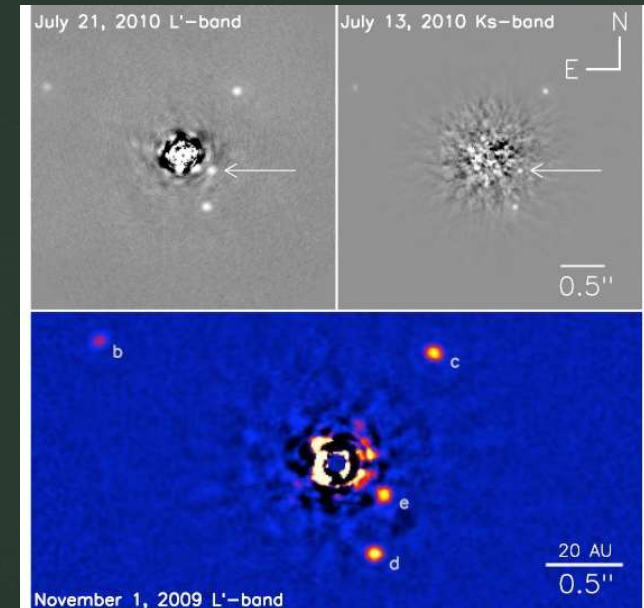


Факт 3

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 и многосигнальной

Наблюдения ведутся во всем ЭМ диапазоне: от радио до гамма-лучей. А также есть нейтринная астрономия, изучение космических лучей и гравитационно-волновая астрономия.

Multi-messenger astronomy



Факт 5

Наблюдатели не всегда сидят у телескопа

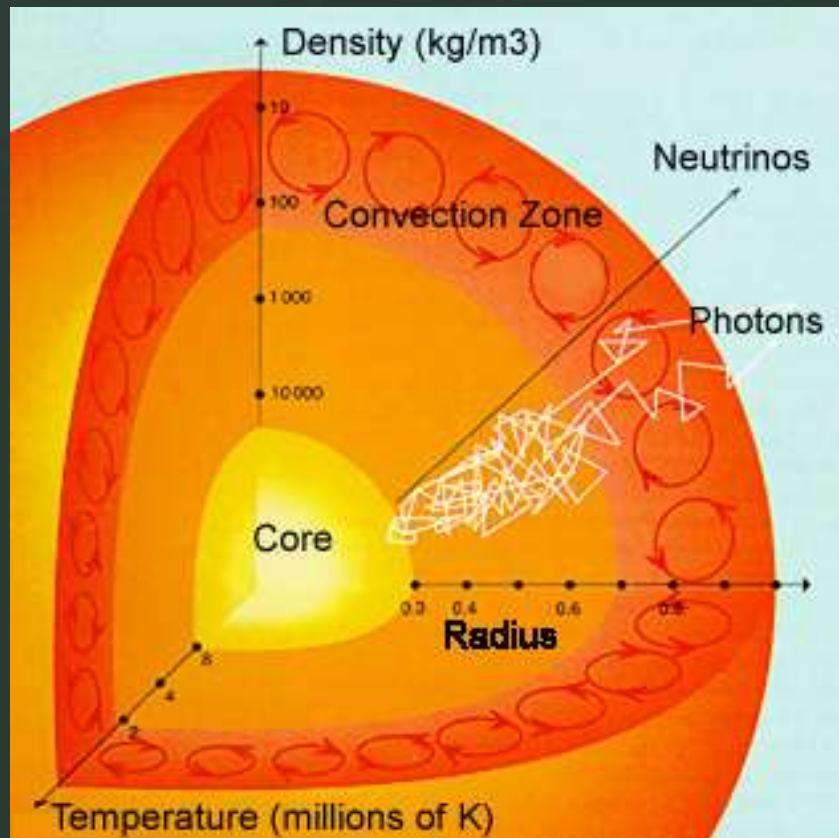
Разумеется, космические эксперименты управляются дистанционно. Но и наземные все чаще управляются издалека.

Кроме того, часто инструментом управляет команда инженеров, а астроном лишь описывается в заявке что и как наблюдать, а затем занимается обработкой данных и получение научных результатов.



Факт 6

Современная астрономия – это, в первую очередь, часть физики



Нам интересно не «как выглядит», а «как устроено», «какова природа».

Этим занимается астрофизика.

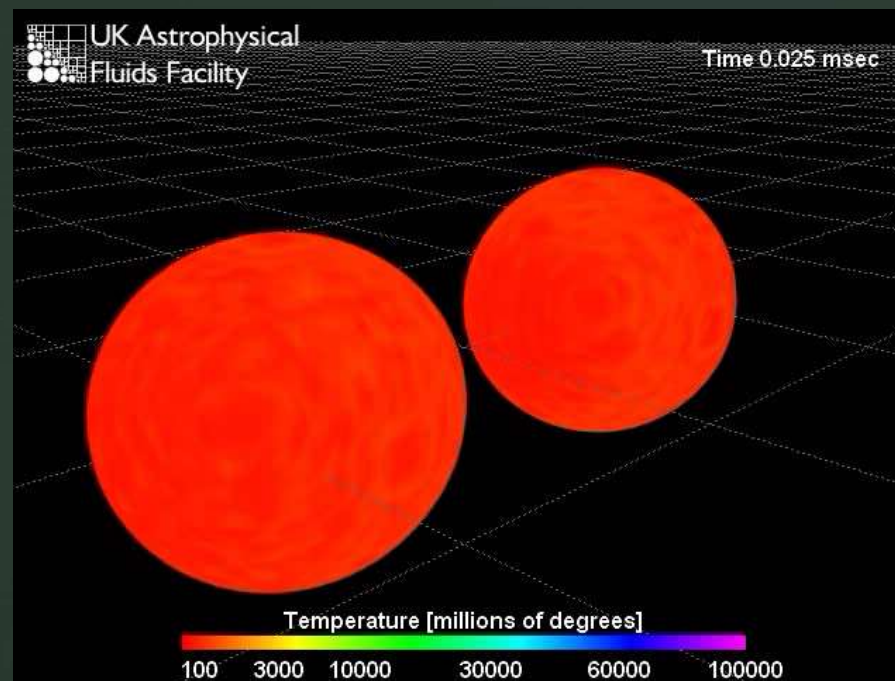
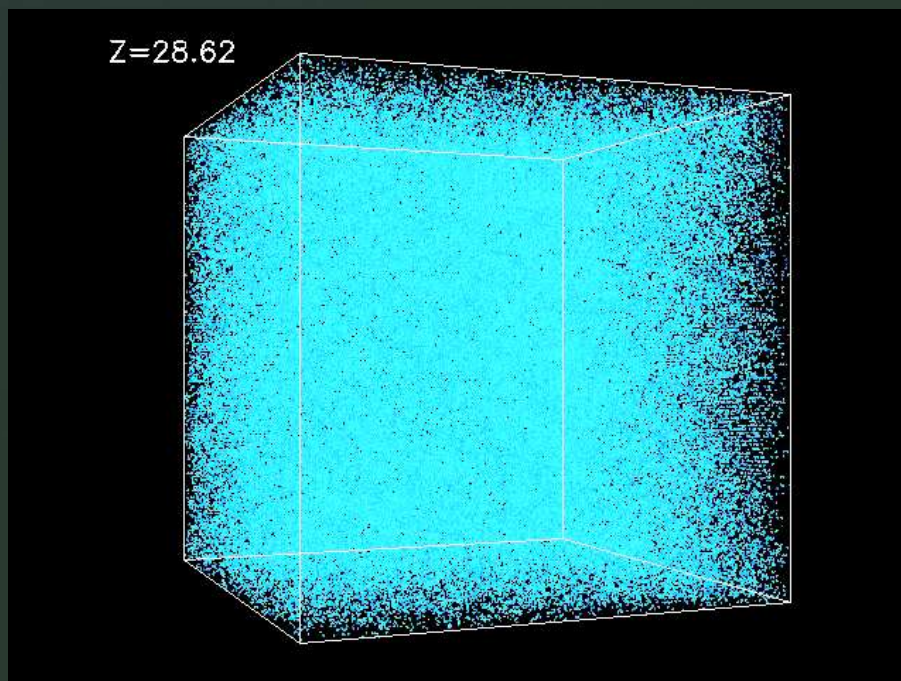
Сейчас в мире >10 000 астрономов. Плюс, большое число физиков значительную часть своей работы посвящают астрофизическим задачам.

Большинство астрономов в мире получили первую степень по физике.

Факт 7

**Суперкомпьютерные вычисления
крайне востребованы в астрофизике**

**Многие астрономические задачи
требуют колоссальных вычислительных ресурсов**



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**

Такой подход позволяет интенсифицировать исследования и повысить их качество.

Кроме того, расширяется круг исследователей, которые могут работать с архивными данными с крупных современных инструментов.

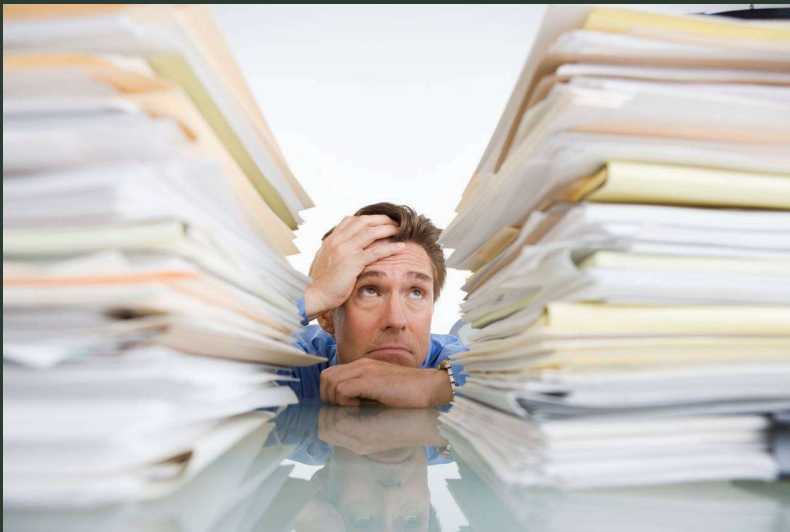


Факт 10

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?**

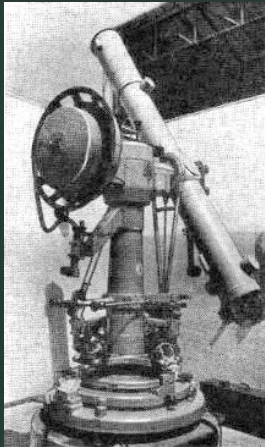
АСТРОНОМИЯ

Астрометрия

Измерение координат
и времени

Расцвет: 19 век

Новое: пульсарная
астрометрия,
спутники



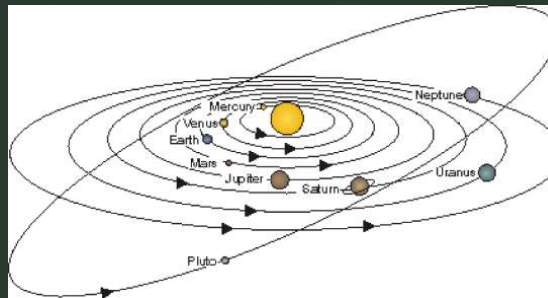
Небесная механика

Движение небесных тел

Расцвет: 18 век –

первая половина 19 века

Новое: теория относительности,
хаотическая динамика



Астрофизика

Физика небесных тел

Расцвет: сейчас

Новое: инструменты





Астролябия

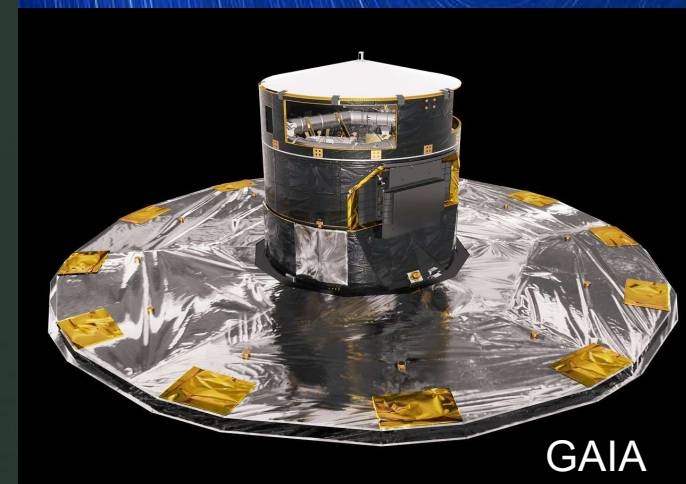
Прогресс в точности измерений связан с развитием техники.

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

Астрометрия

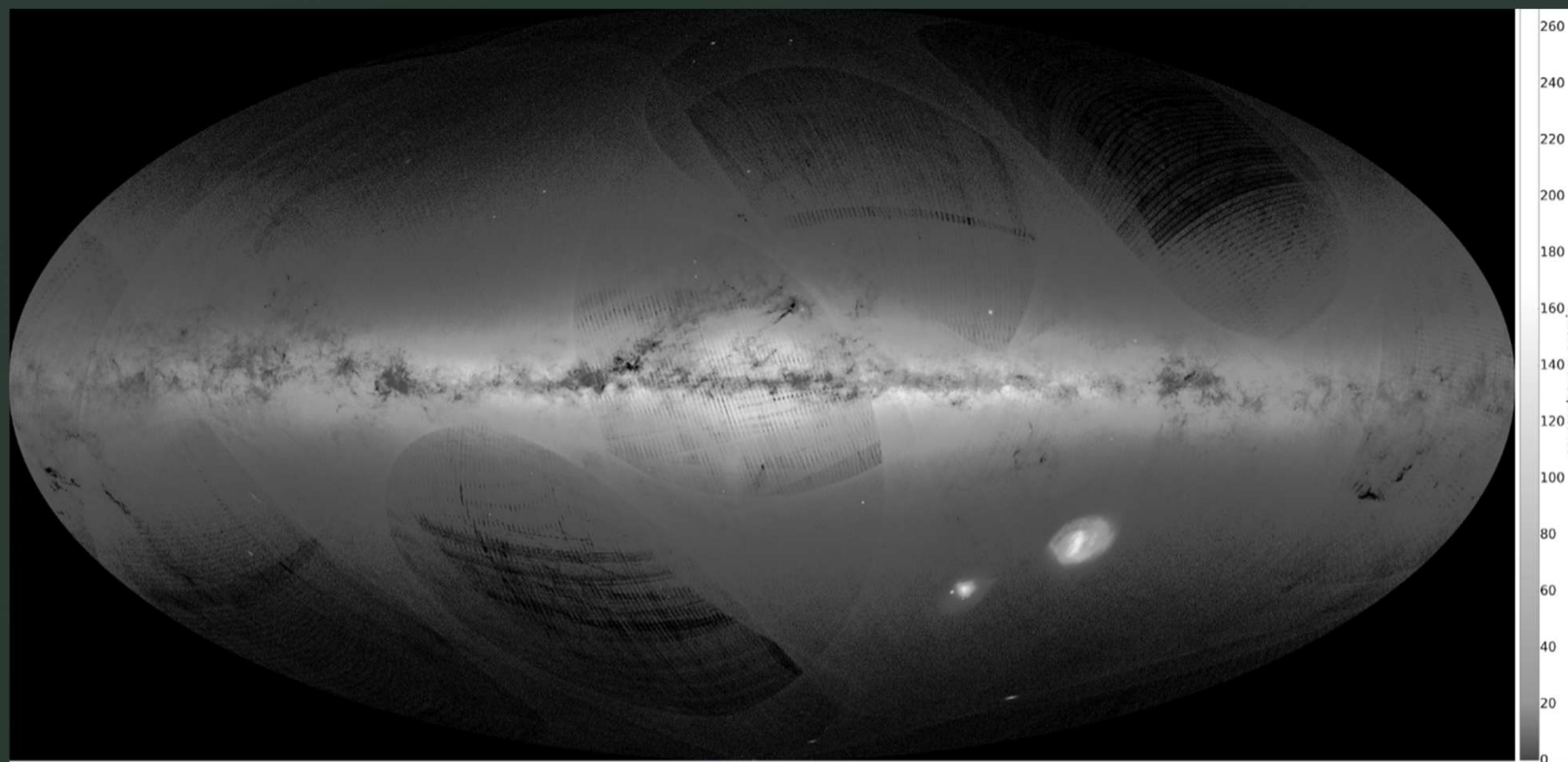
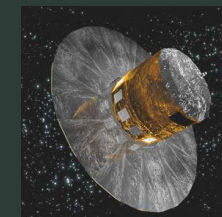


Hipparcos



GAIA

Первый релиз данных Gaia

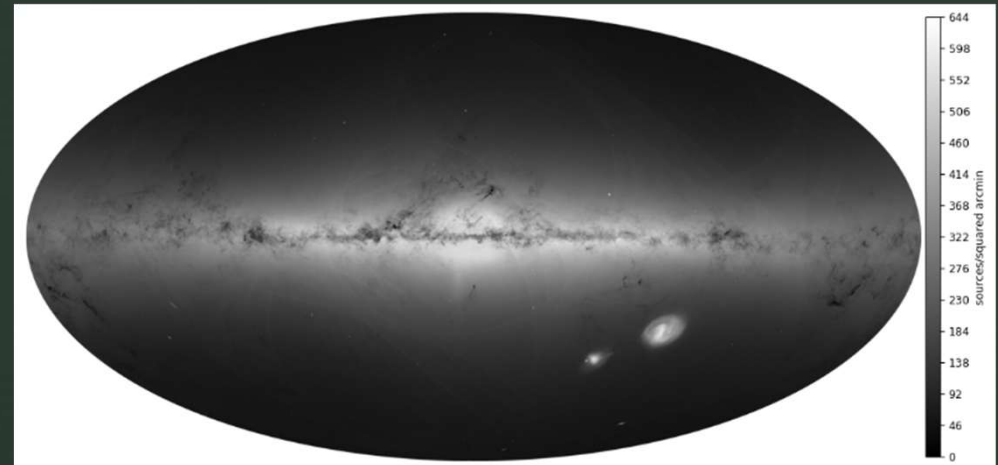
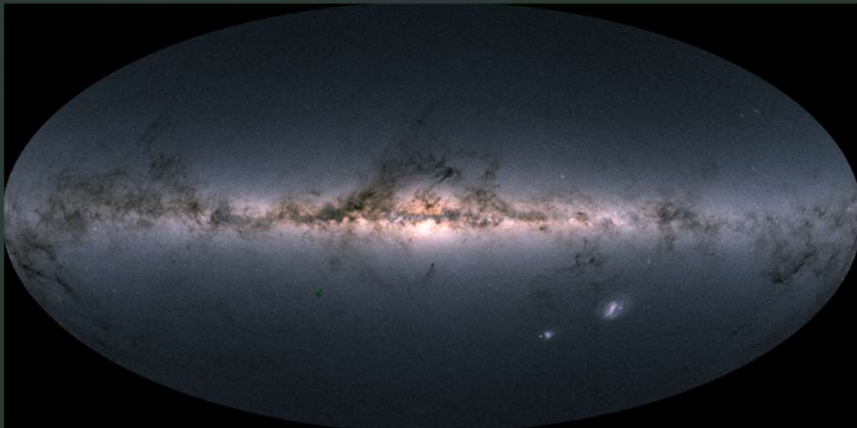


Спутник Gaia запущен в конце 2013 г. Работал до конца 2024 г.
Впервые дал нам трехмерную карту половины Галактики.

Второй релиз Gaia

Результаты 22 месяцев наблюдений.
Координаты и блеск 1.7 млрд объектов.
Параллаксы и собственные движения
для 1.3 млрд звезд.

А также радиальные скорости, температуры
и другие параметры для множества звезд.
14000 малых тел Солнечной системы.



34 месяца наблюдений

1.8 миллиарда объектов

Спектральные типы для
217 млн звезд

Микролинзирование

Планетные транзиты

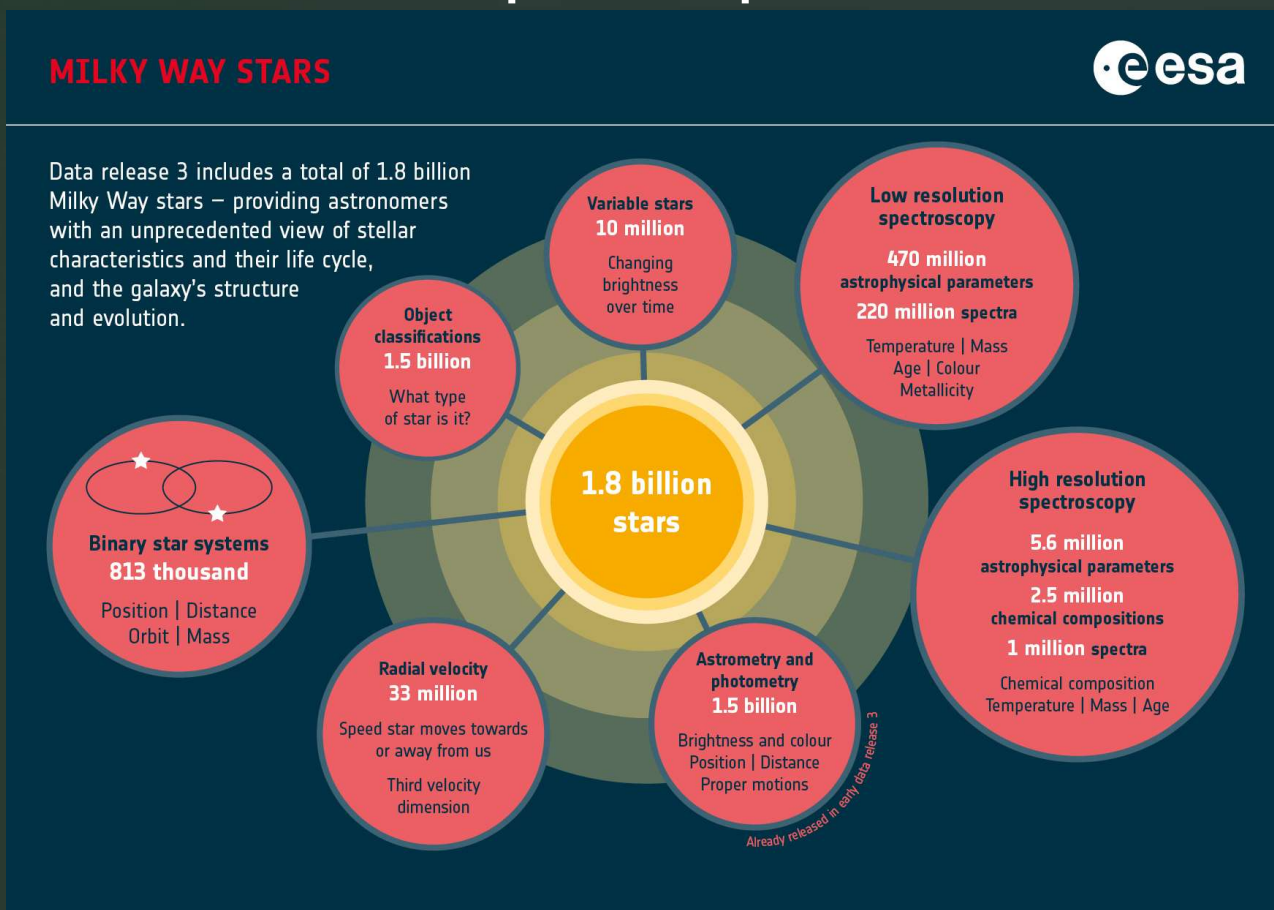
150 000 объектов
Солнечной системы

Изучение Туманности
Андромеды (M31)

6.6 млн кандидатов в квазары
1.1 млн квазаров
изучены детально

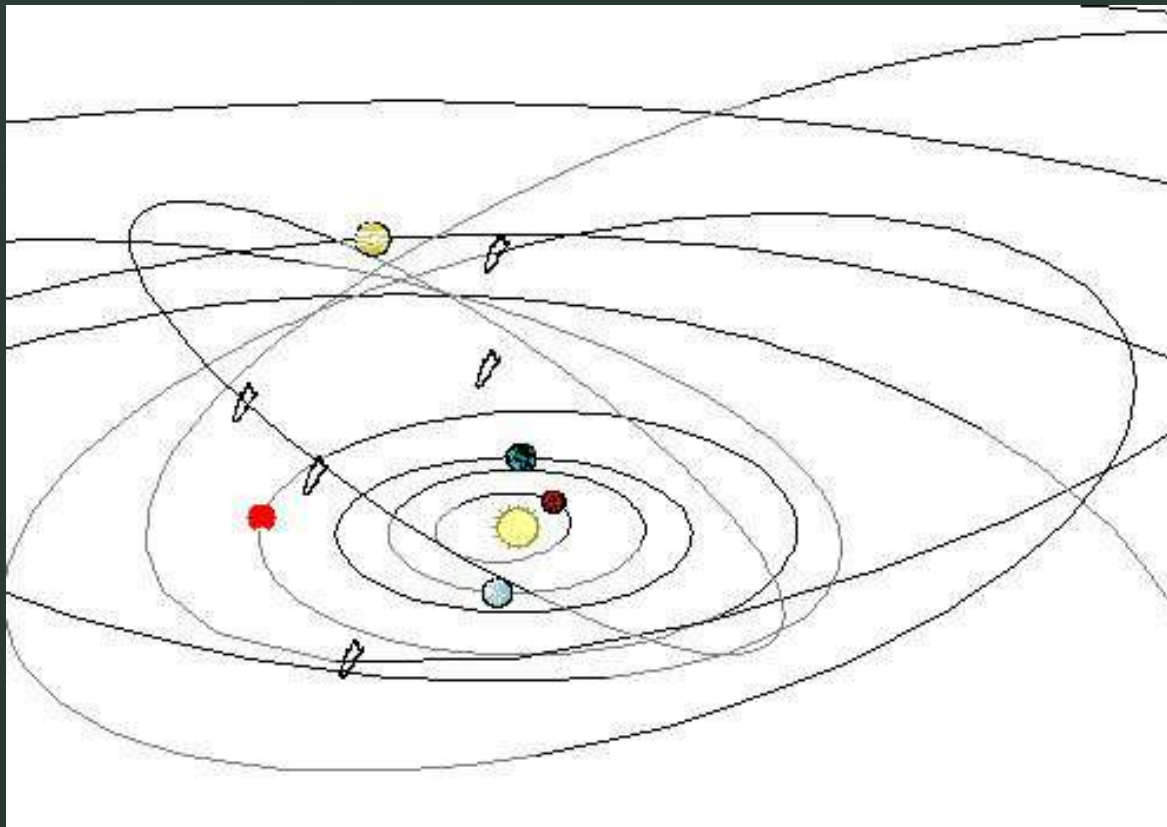
Миллионы галактик

Третий релиз Gaia



См. Summary данных 3го релиза в 2208.00211

Небесная механика



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

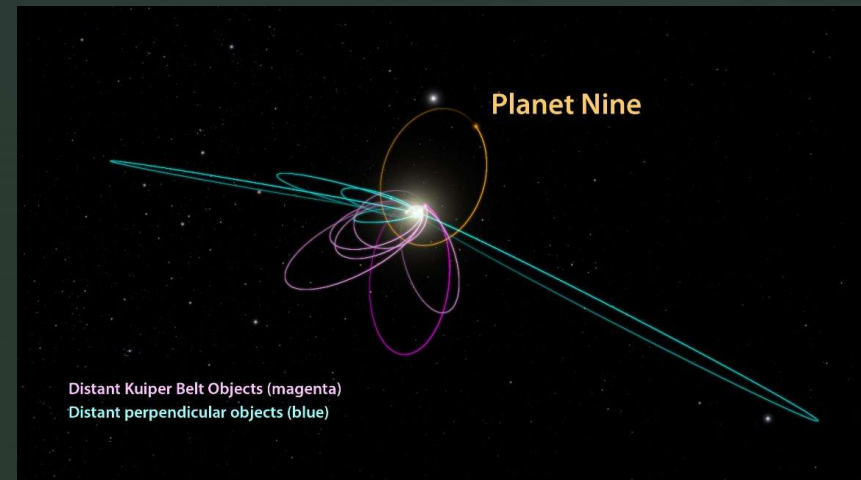
Сейчас для расчета траекторий в Солнечной системе уже приходится использовать Теорию относительности.

Девятая планета

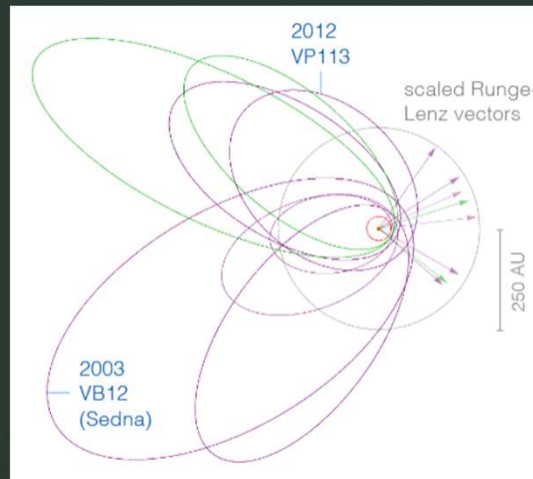
В течение нескольких лет накапливаются данные, которые свидетельствуют в пользу того, что в Солнечной системе может быть еще одна массивная планета.

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

Начались активные поиски девятой планеты.

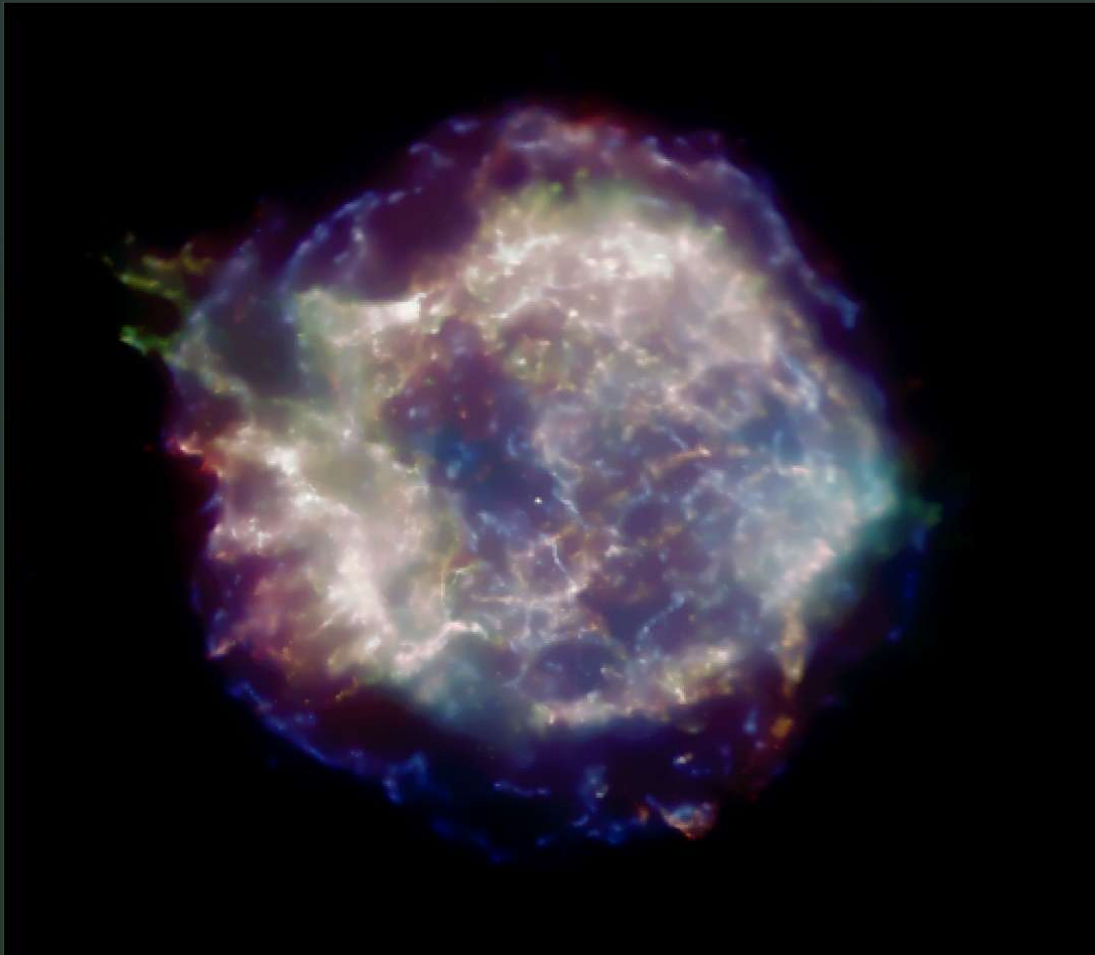


1601.05438, 1603.05712



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.

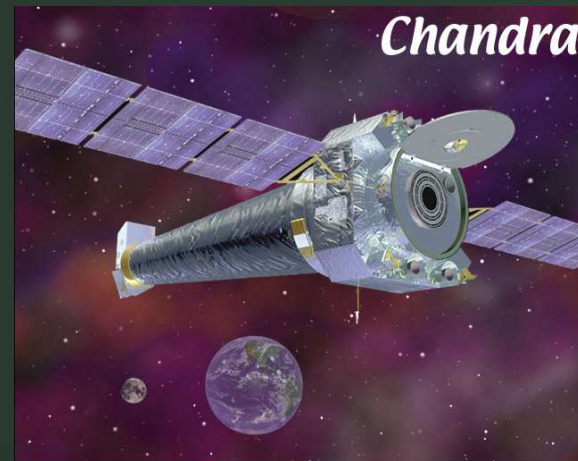
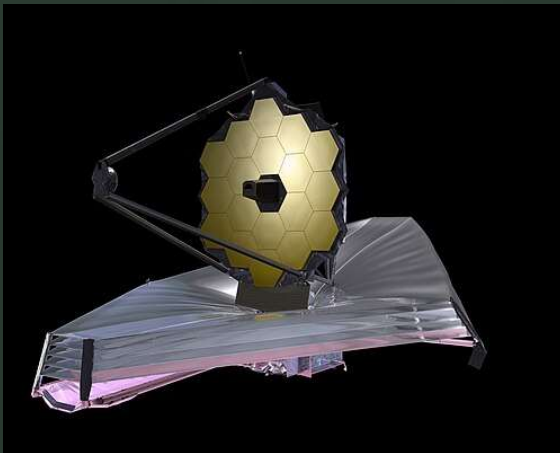
Наблюдения, наблюдения, наблюдения



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



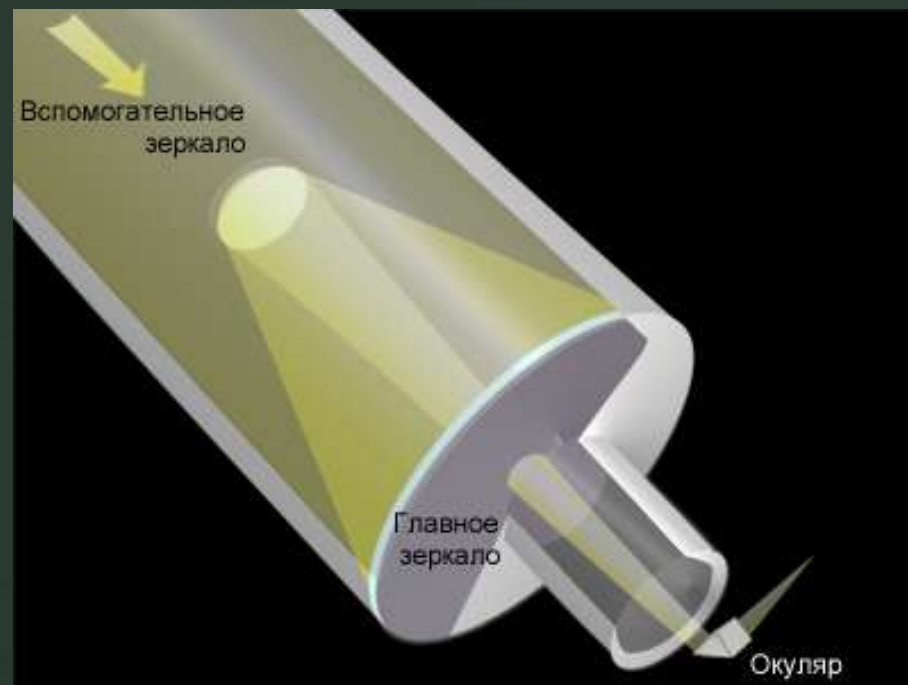
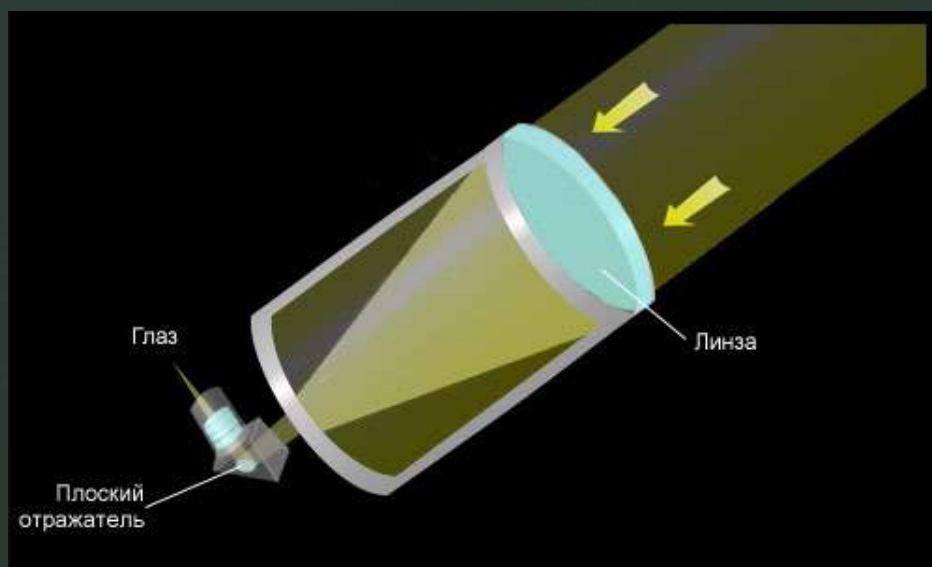
1609-10 гг.

Рефракторы и рефлекторы

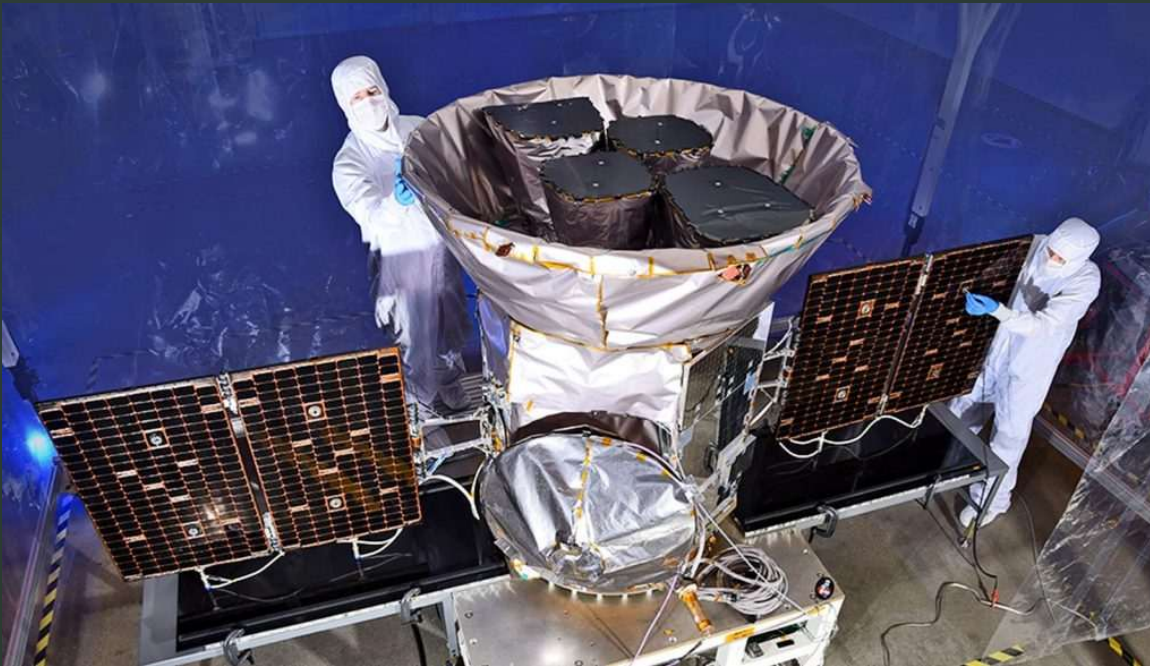
Два основных типа телескопов.

Линзовые и зеркальные.

Оба существуют с 17 века
и используются до сих пор.



И так, и эдак

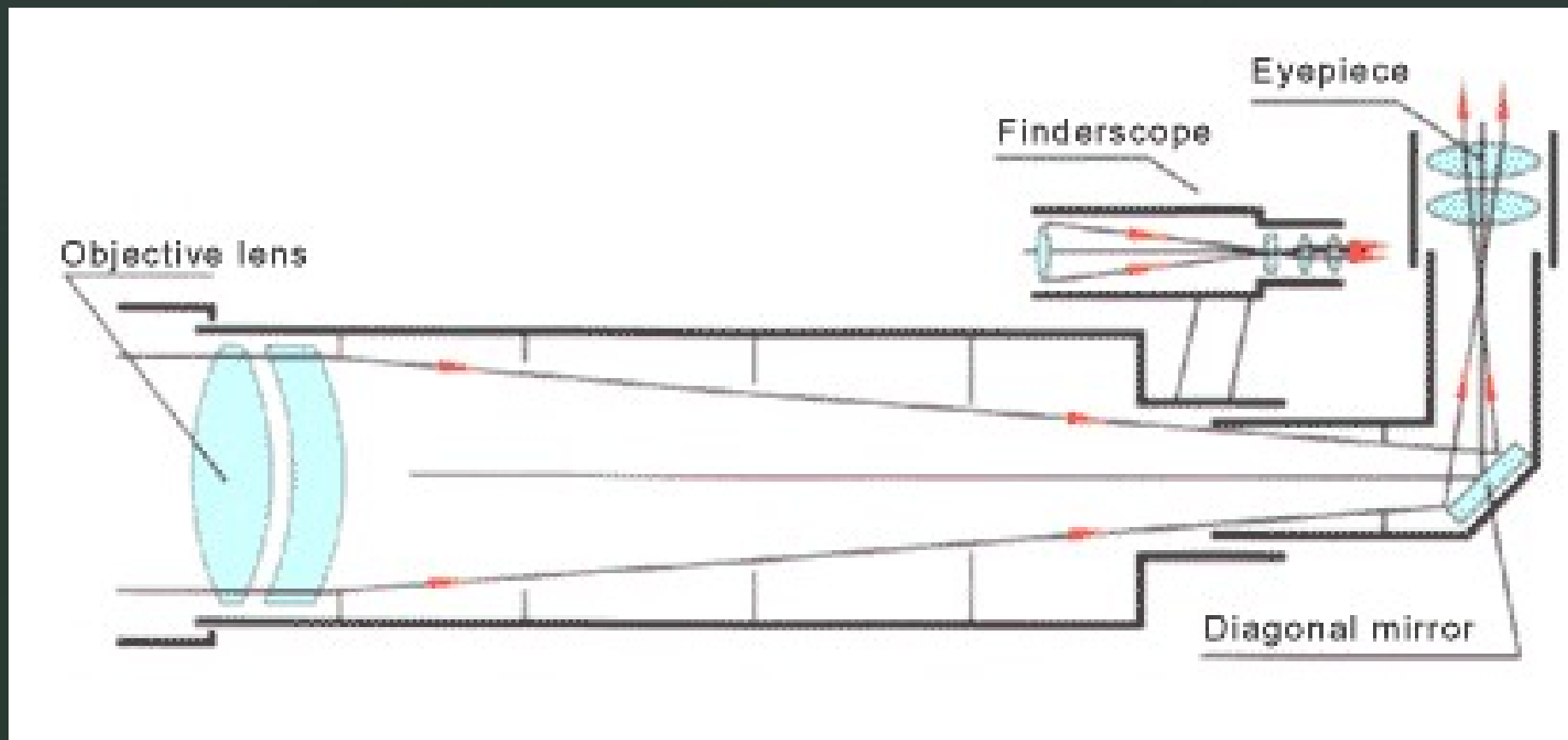


TESS – система из рефракторов



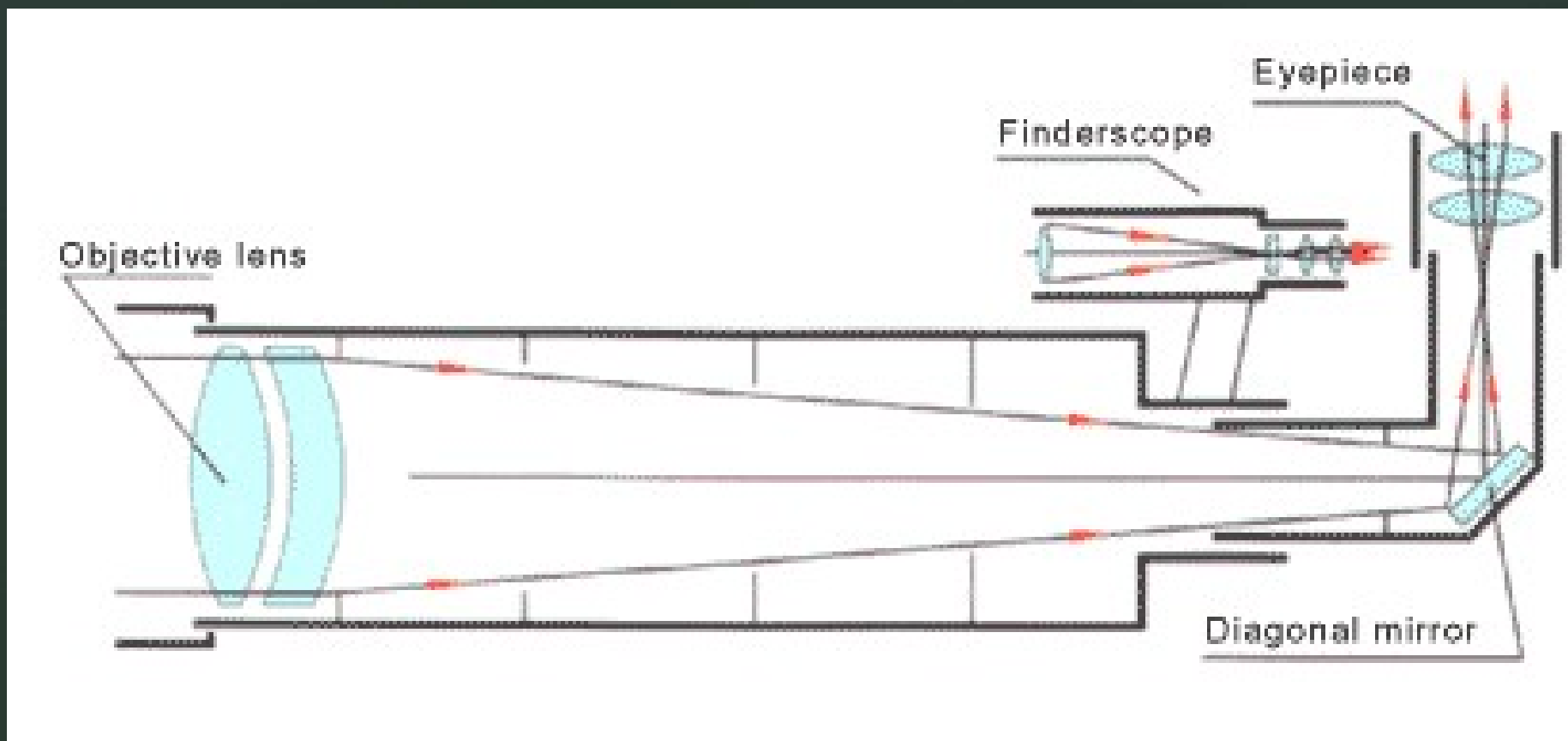
JWST - рефлектор

Телескопы-рефракторы



Объективом является собирающая линза (или система линз).

Телескопы-рефракторы

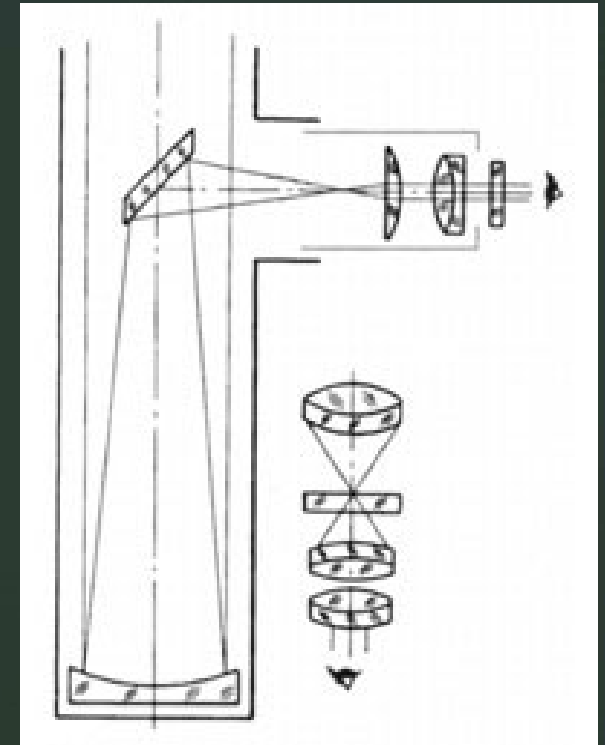


Объективом является собирающая линза (или система линз).

Телескопы-рефлекторы



1668 год



Объективом является вогнутое зеркало.

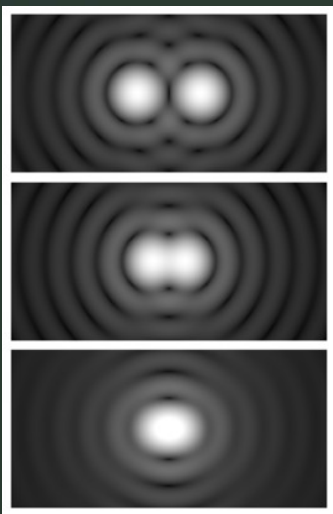
Зачем нужен телескоп???

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.



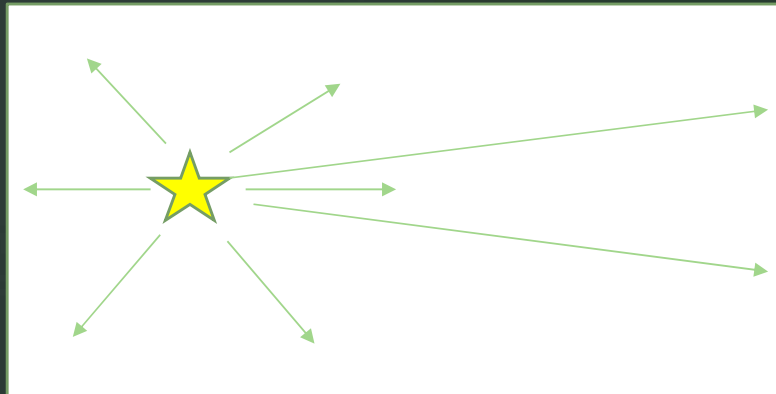
Диаметр зрачка глаза 5-8 мм.

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.

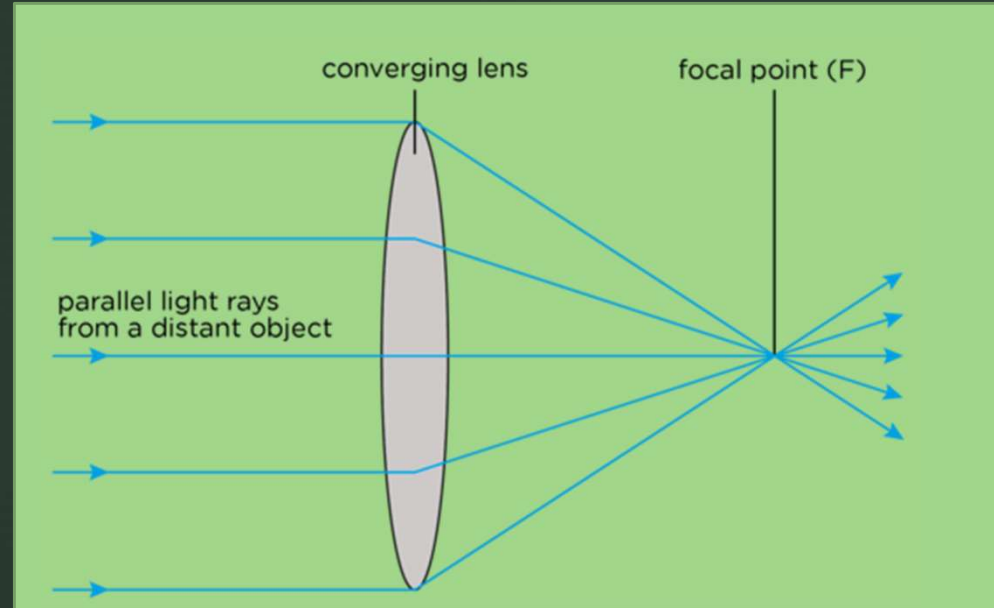
Больше энергии – больше фотонов!

$$E = h\nu$$

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

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

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



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.

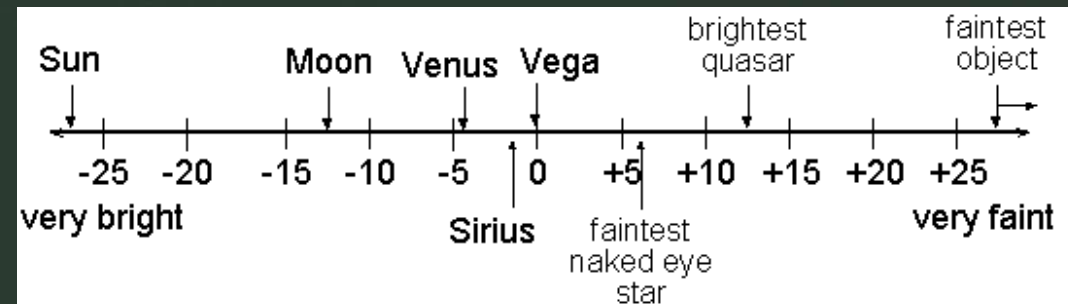
Это логарифмическая величина,
что позволяет в рамках разумной шкалы
характеризовать большие изменения блеска.

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

or

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

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



Абсолютная звездная величина

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

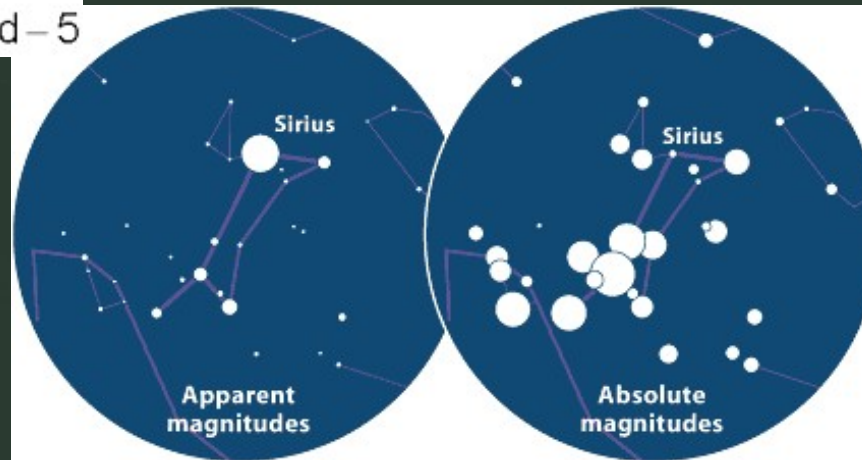
$$f = \frac{L}{4\pi d^2} \quad f(10\text{pc}) = \frac{L}{4\pi (10\text{pc})^2}$$

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

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

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

Абсолютная звездная величина Солнца $+4.^m8$

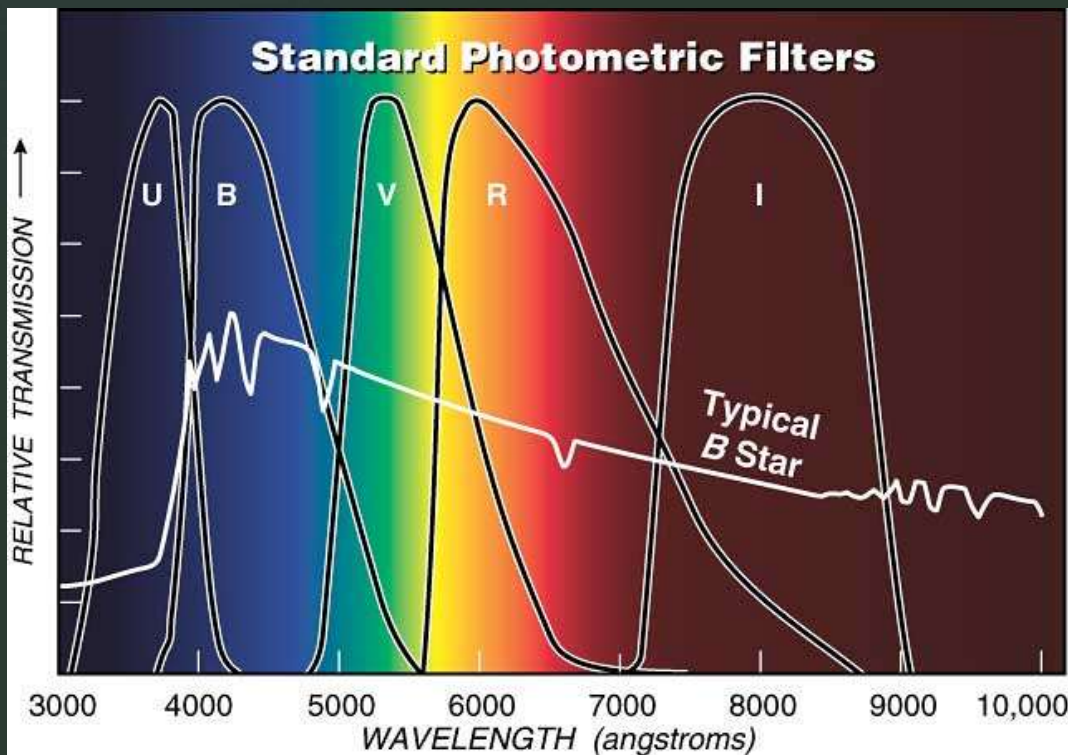


$$(m - M) = 5 \log_{10}(d) - 5$$

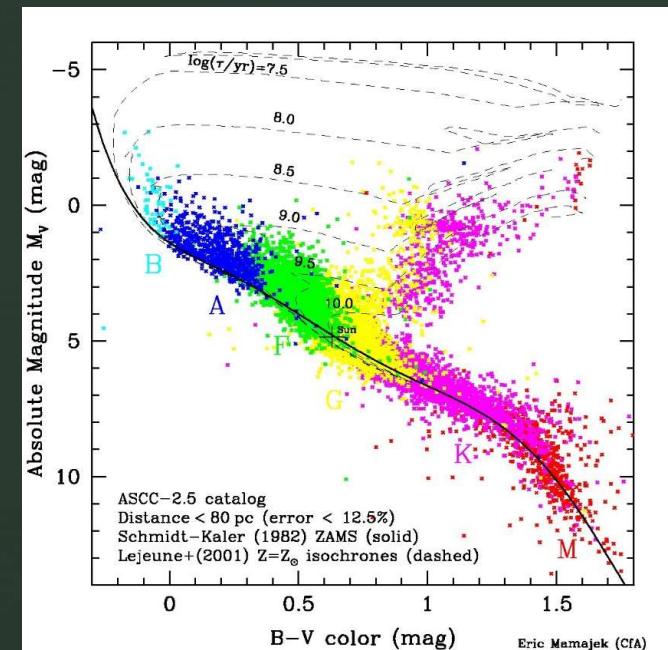
Показатели цвета

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

Определяется диаметром!
(угол в радианах)

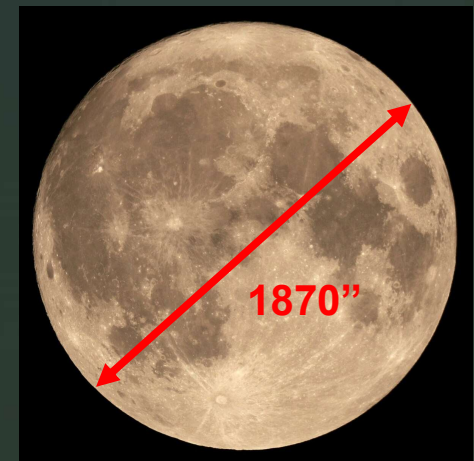
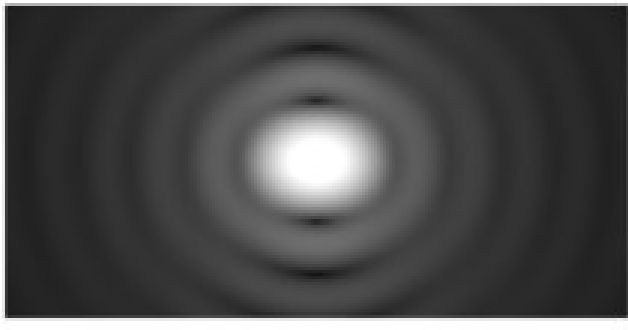
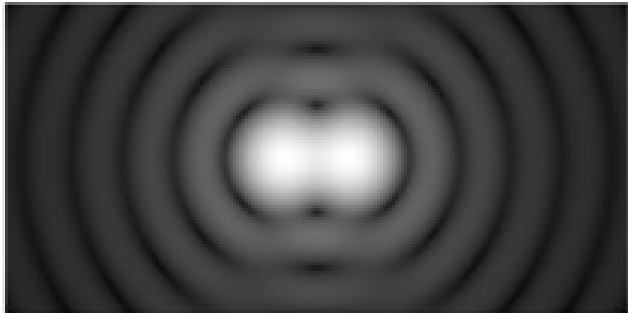
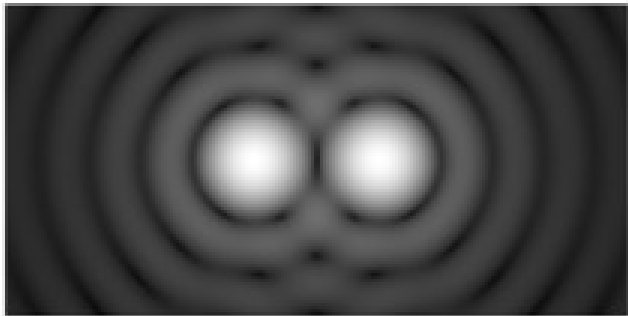
$$\theta = 1.220 \frac{\lambda}{D}$$

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

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

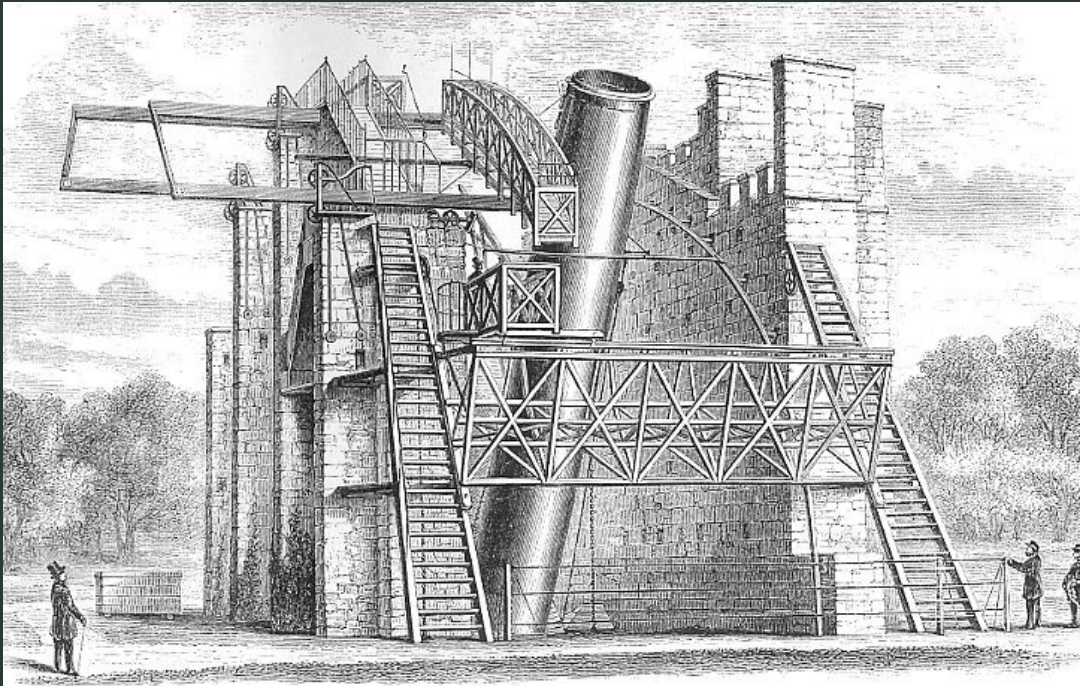
Масштаб изображения показывает какому углу соответствует
единичная длина в фокальной плоскости:

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



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.

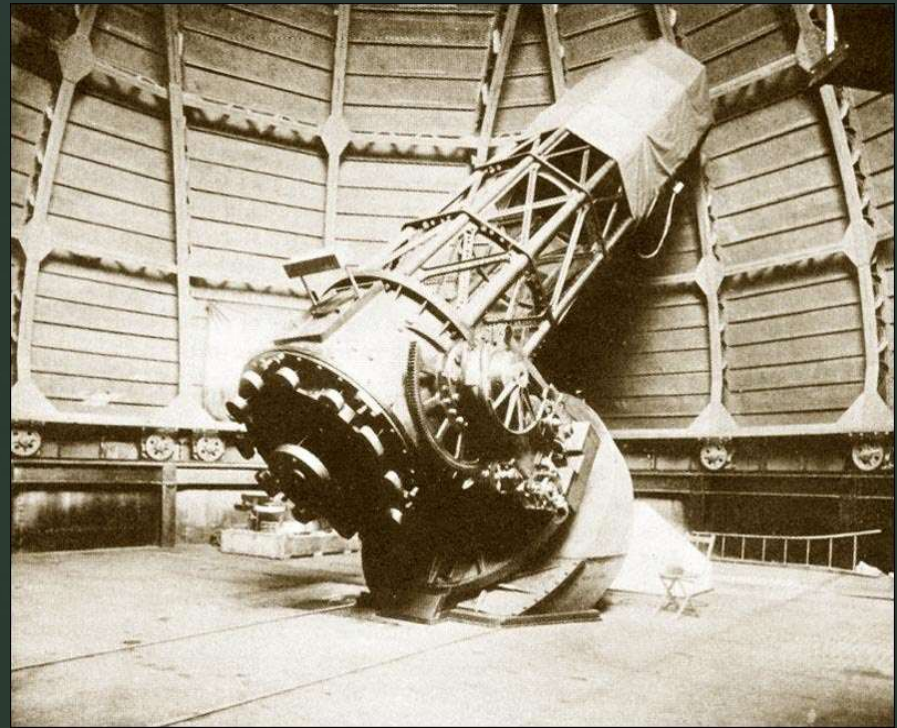
Университетские обсерватории



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

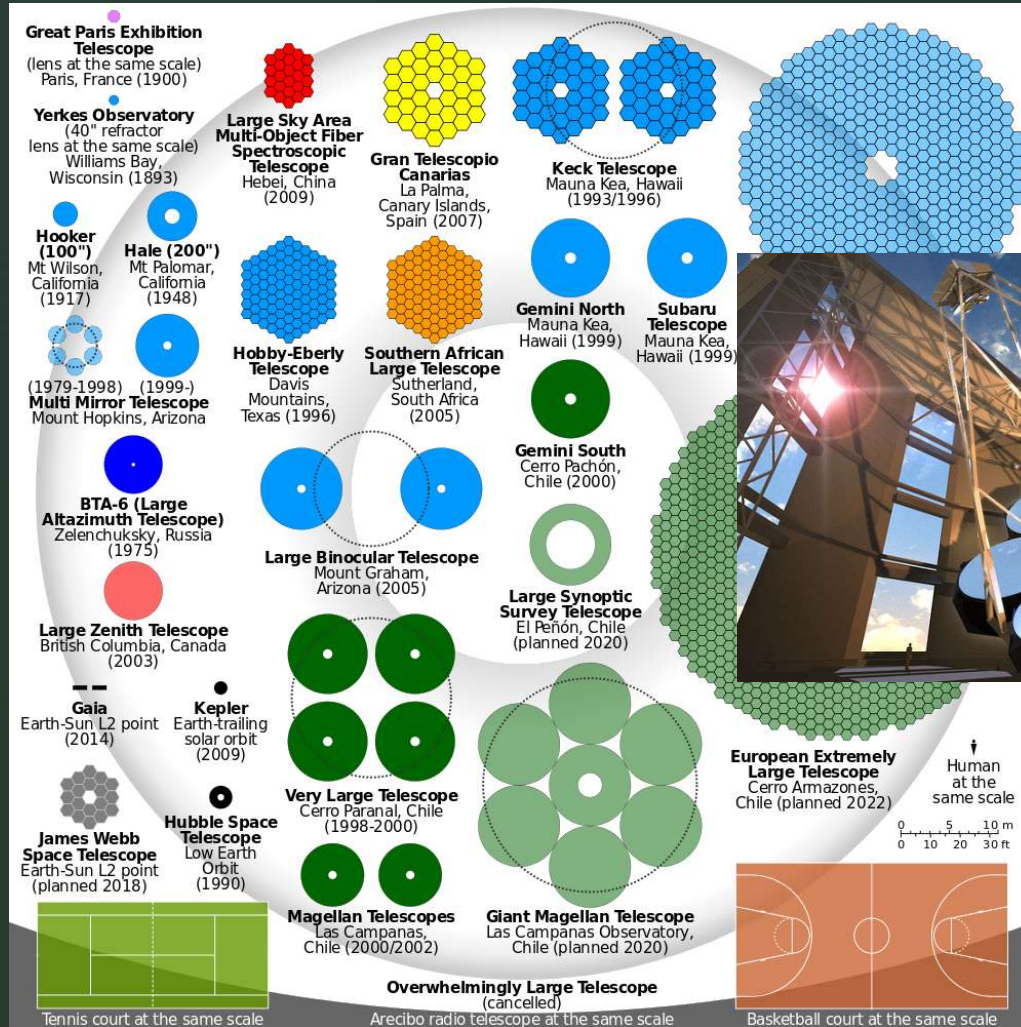


Gran Telescopio Canarias. 10.4 метра



LSST. 8.4 метра

Большие телескопы

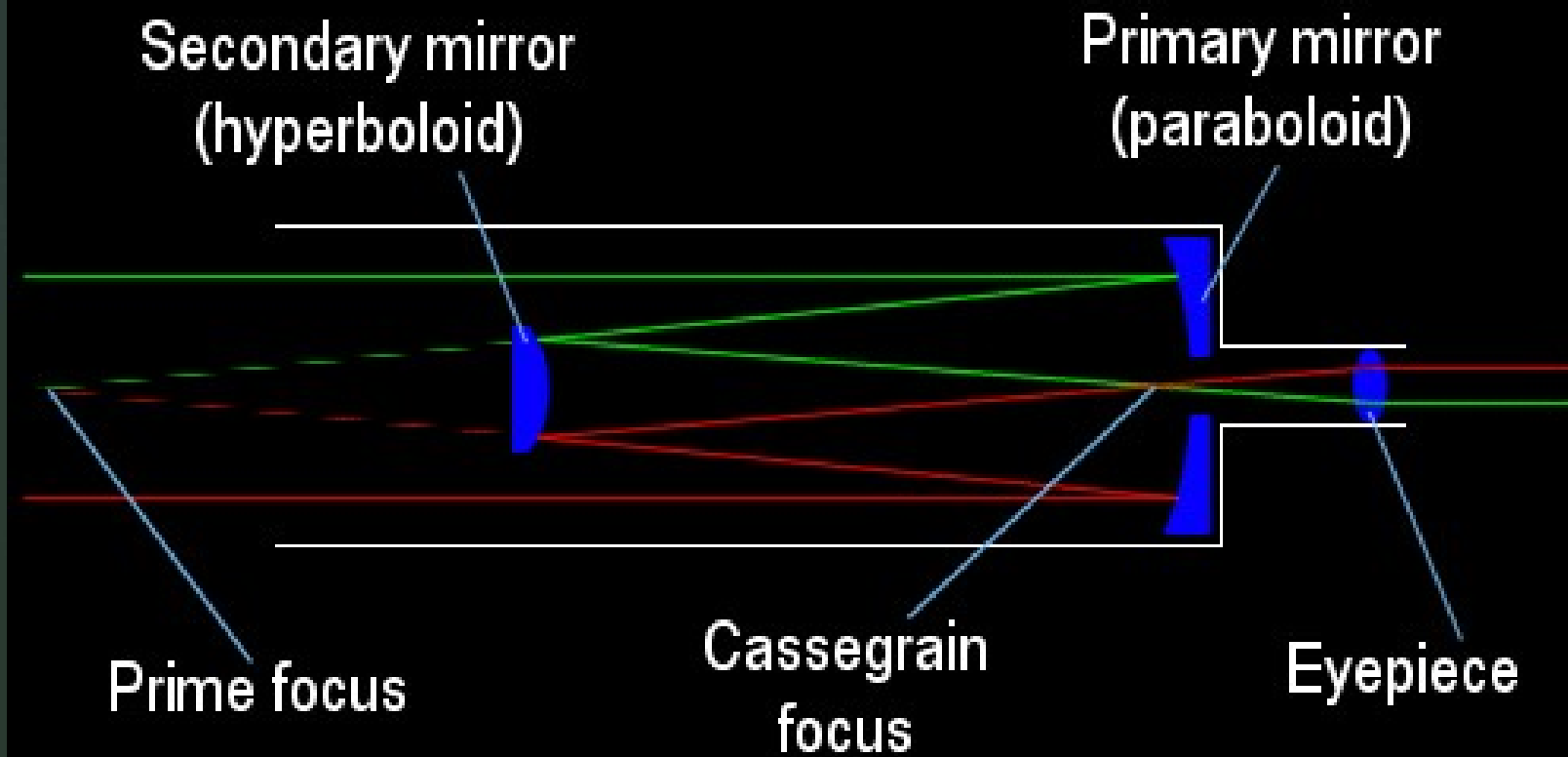


8.5 м – самые большие цельные зеркала.
Более крупные – сегменты.

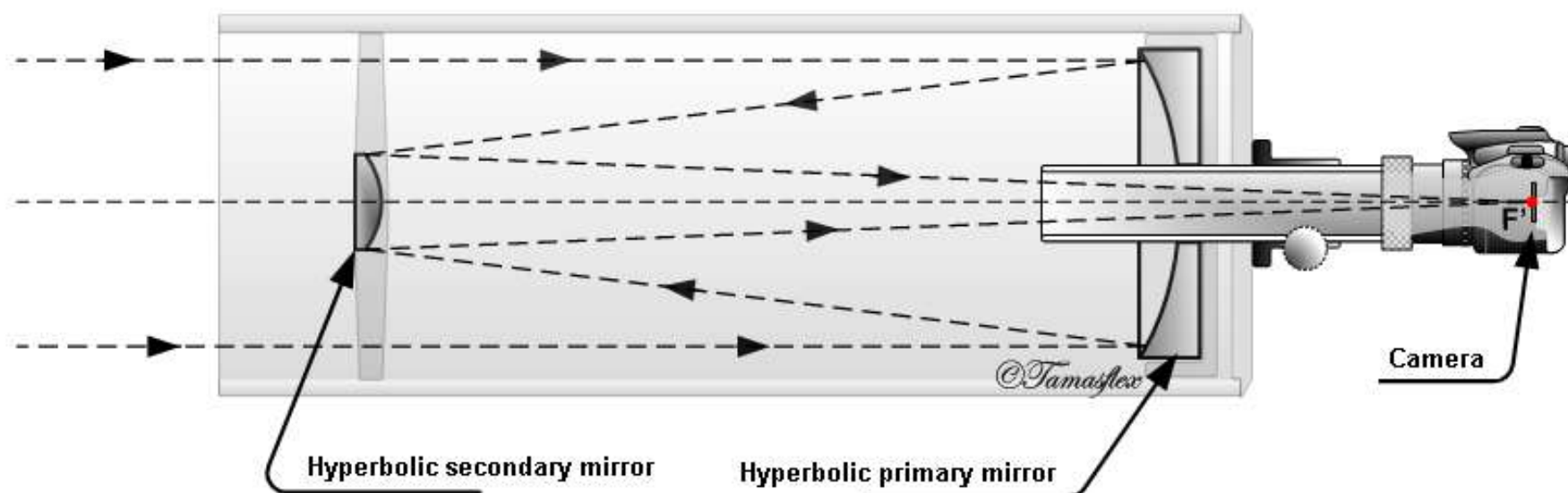


Система Кассегрена

Cassegrain Telescope



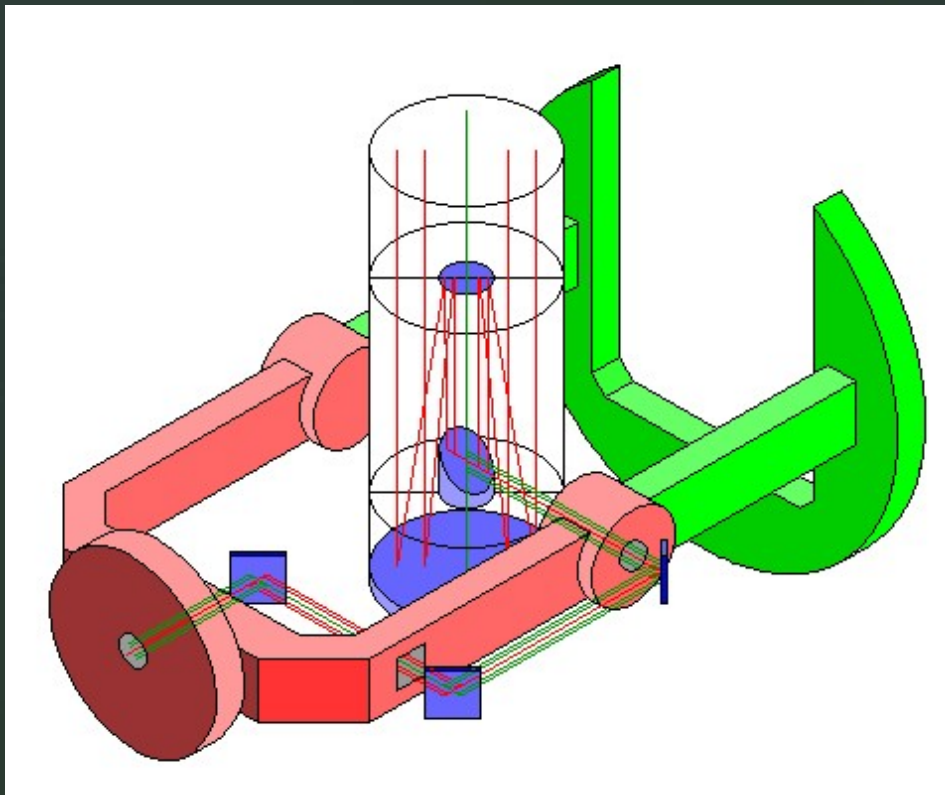
Система Ричи-Кретъена



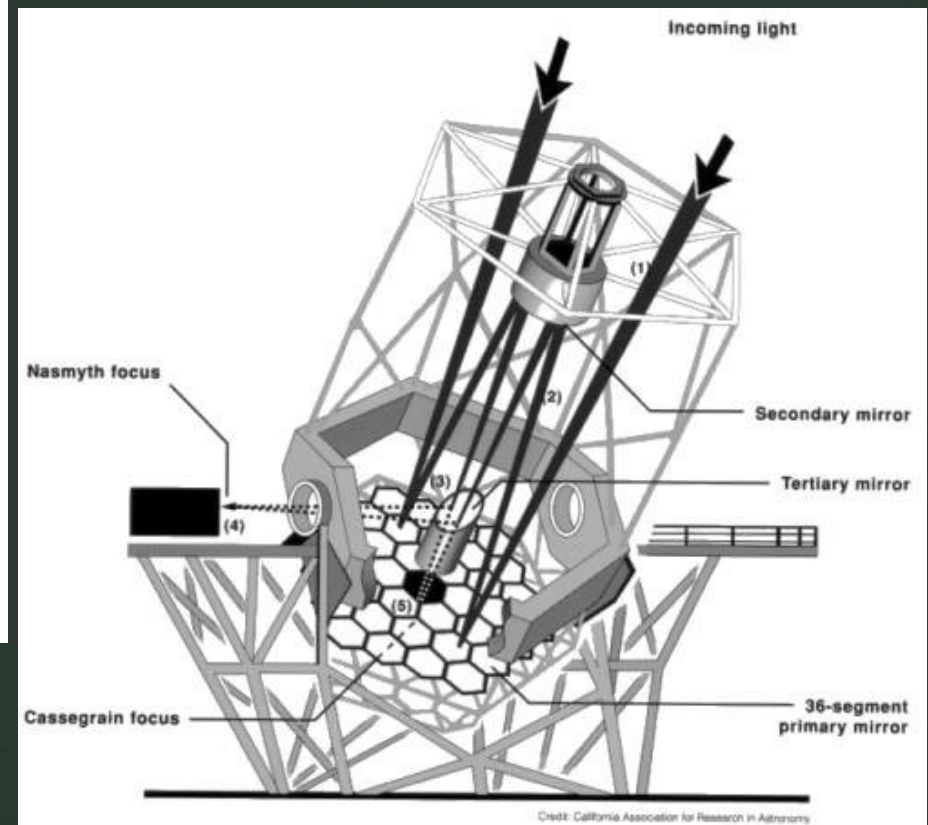
Ritchey - Chrétien (RCT)

Компактность инструмента

Неподвижные фокусы

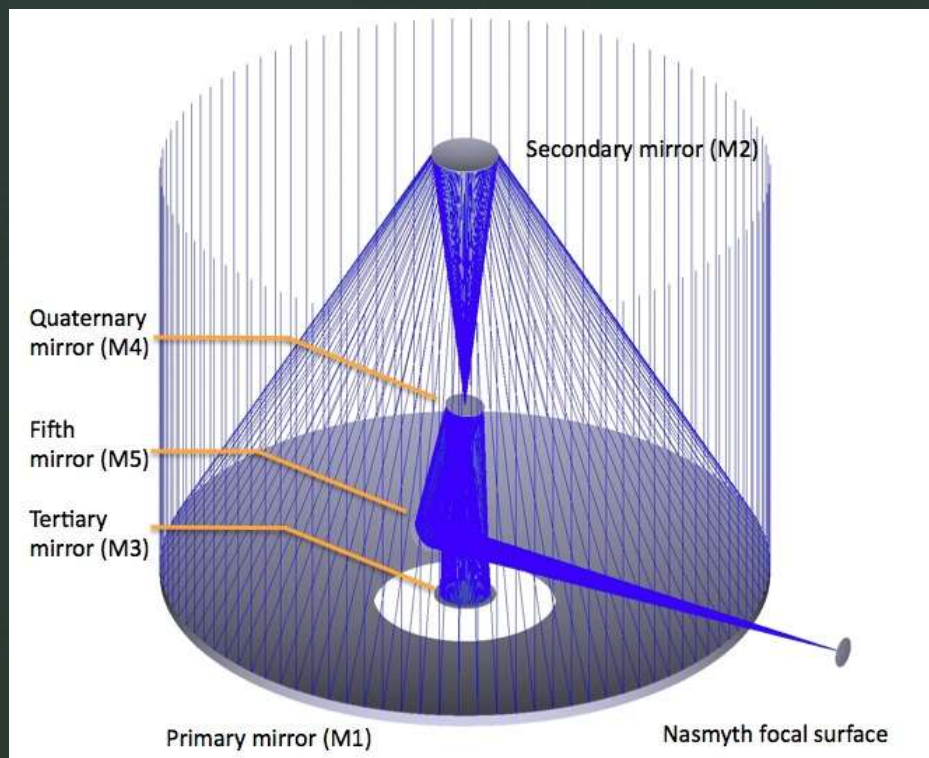


Фокус Кудэ

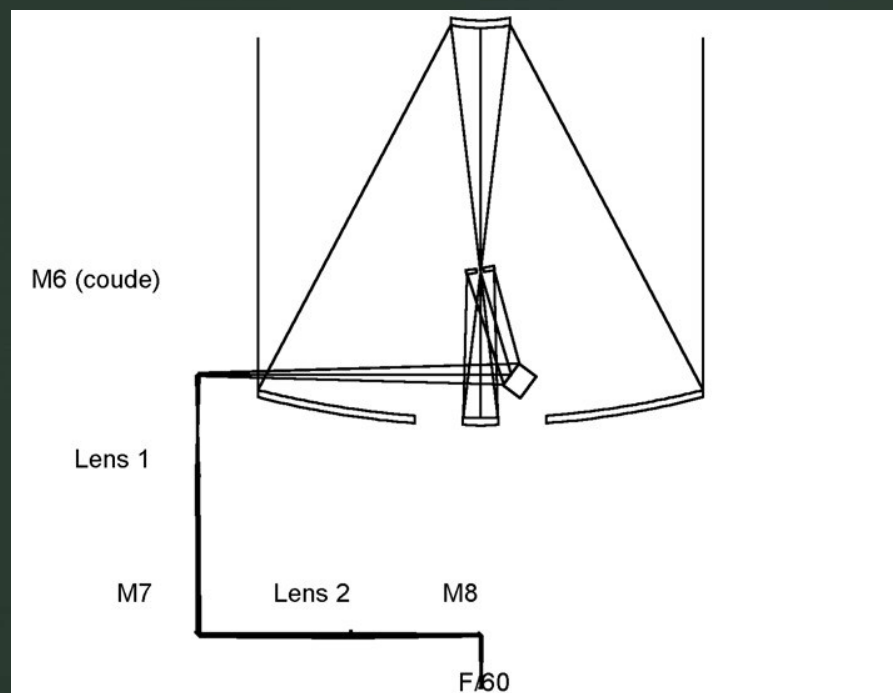


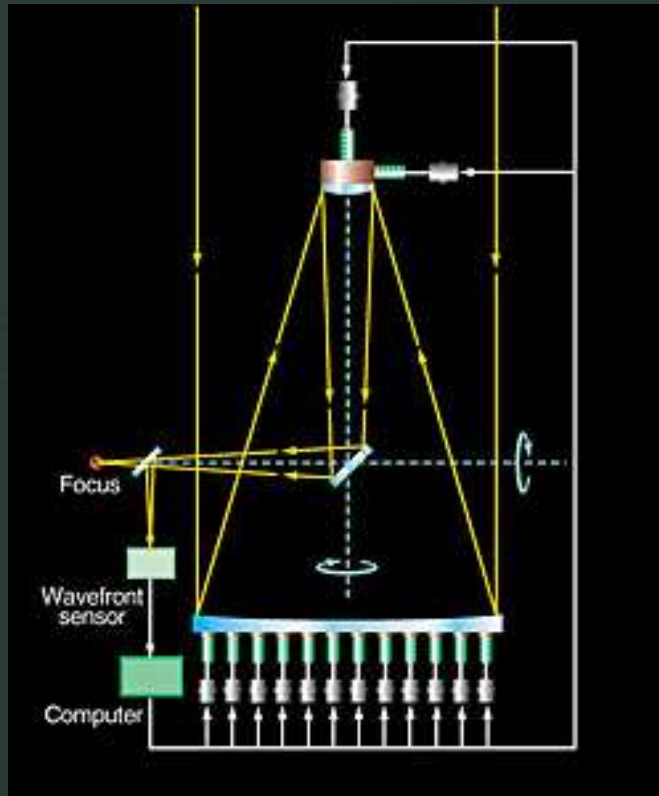
Фокус Нэсмита

ELT



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



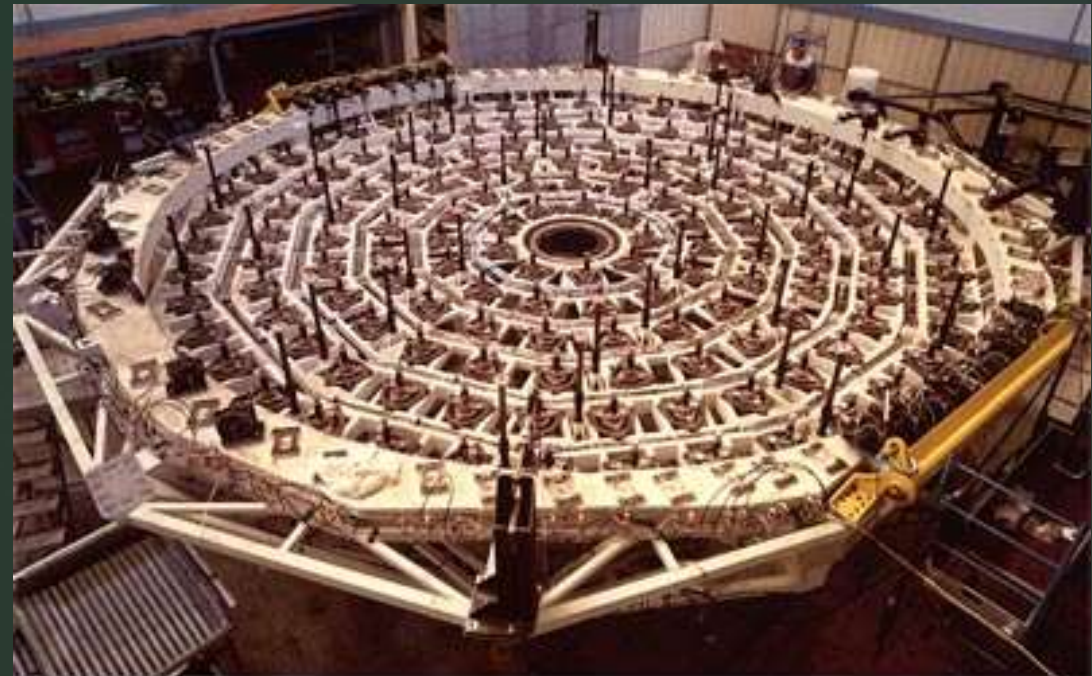


Разработана инженером ESO
Raymond Wilson

Еще проще работать
с сегментированными зеркалами

Активная оптика

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



Active Mirror Supports in VLT M1 Cell

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

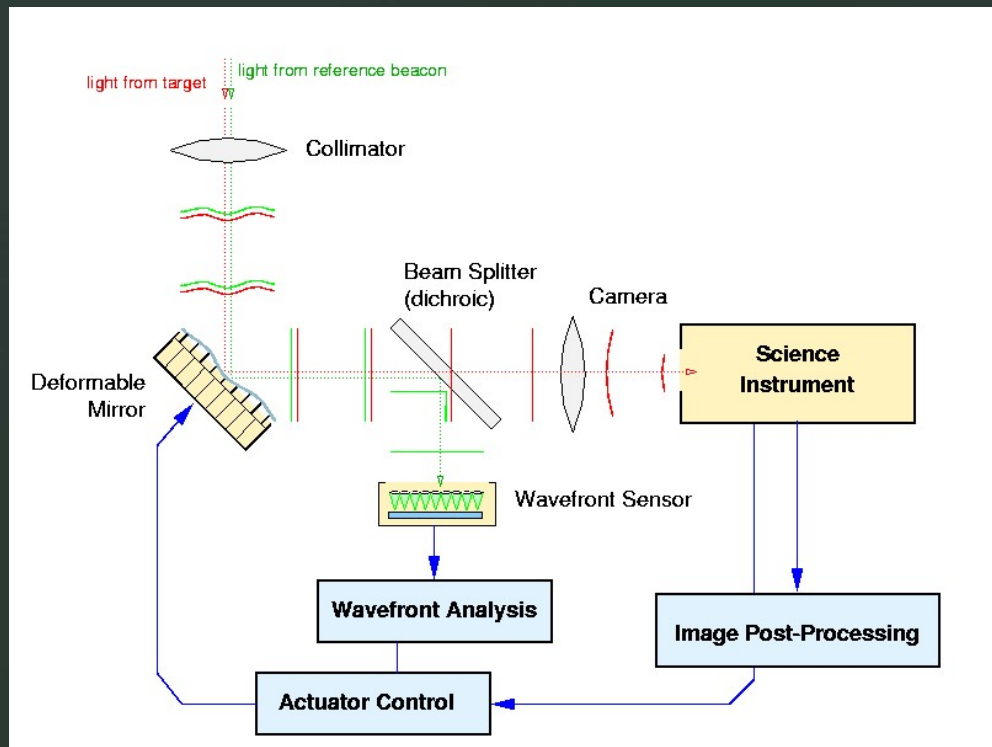
© European Southern Observatory



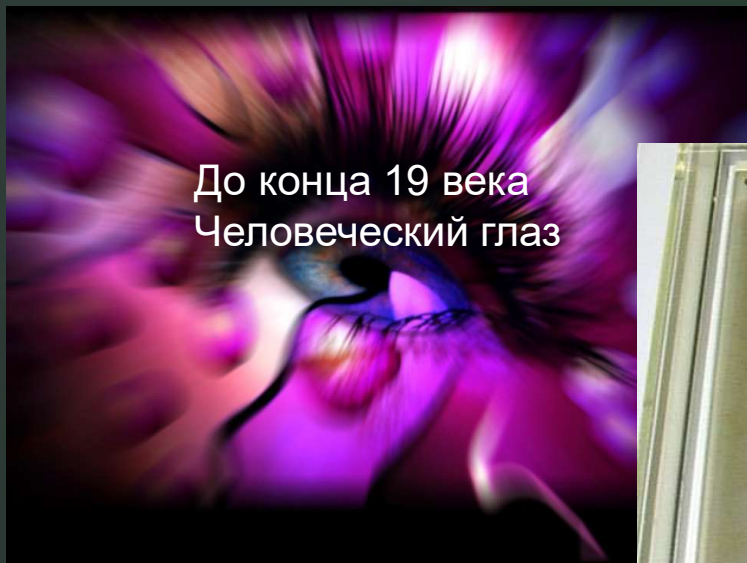
Адаптивная оптика

Системы адаптивной оптики позволяют компенсировать негативное влияние дрожания изображения из-за влияния атмосферы.

Внедрение этой технологии потребовало развития техники, в том числе компьютеров.



Глаз, фото, ПЗС



До конца 19 века
Человеческий глаз



До конца 20 века
Фотопластинки

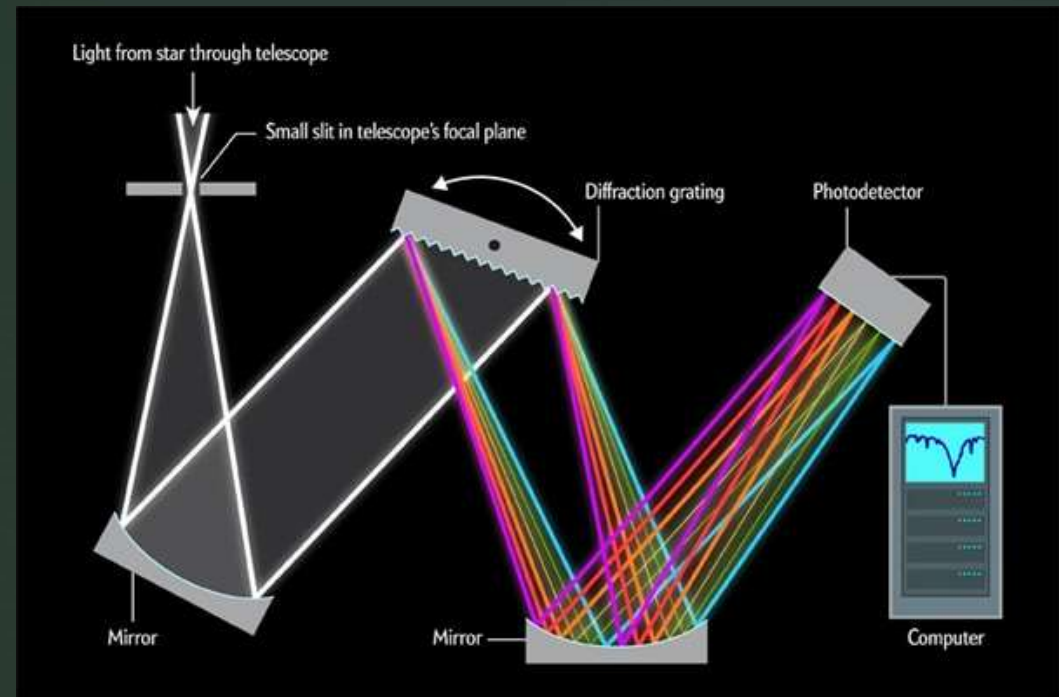
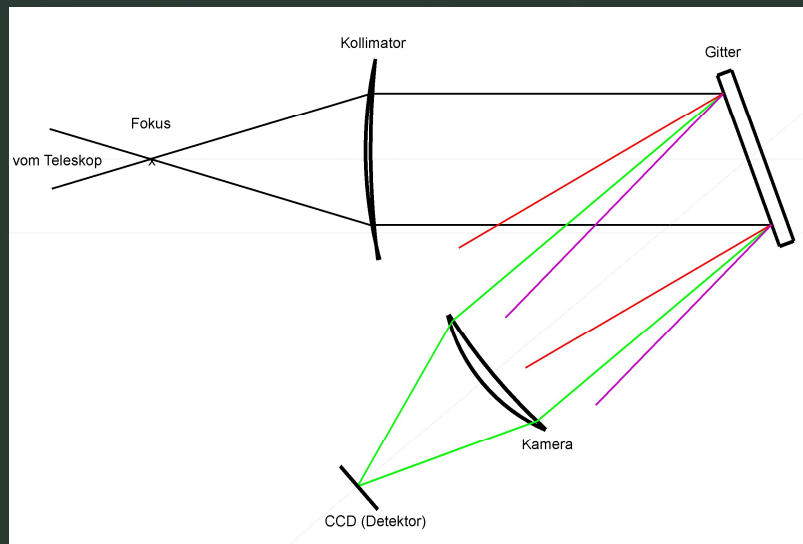
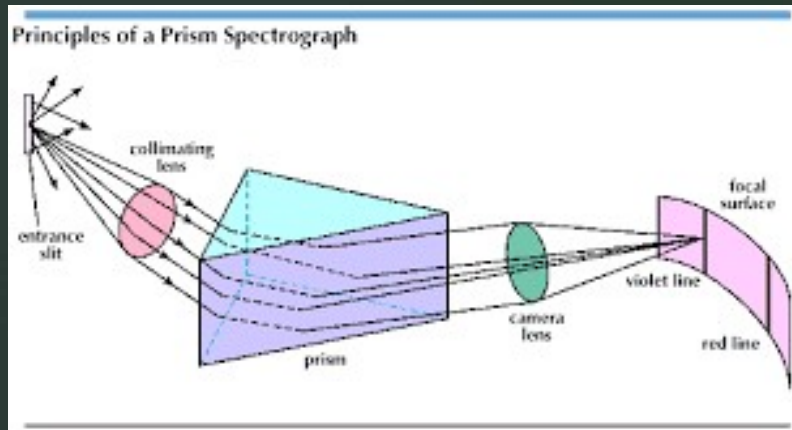


Предел – счет фотонов.

На протяжении развития астрономии использовались различные методы регистрации сигналов.

Цифровые методы не только обладают высокой чувствительностью, но и сразу дают возможность использования сложных алгоритмов для обработки данных.

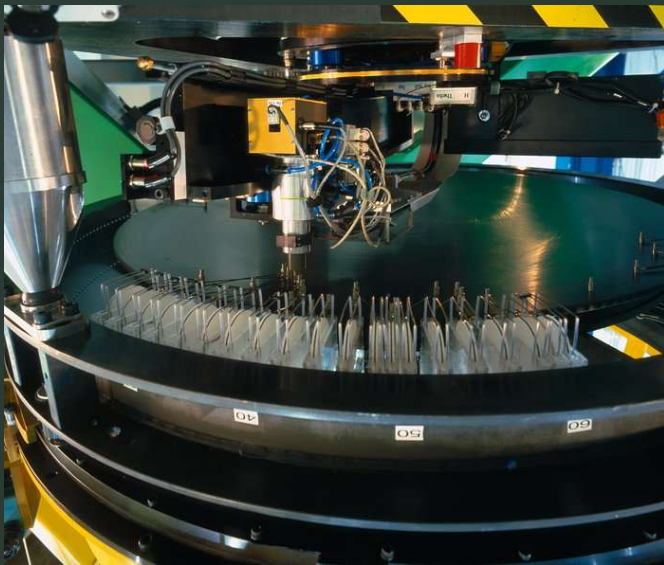
Спектроскопия



Спектральный анализ является одним из основных методов получения астрофизических данных. Он позволяет получать данные о химическом составе и физических условиях (температура, скорость и тд.).

Астрономические приборы

На VLT работает около 20 приборов.



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

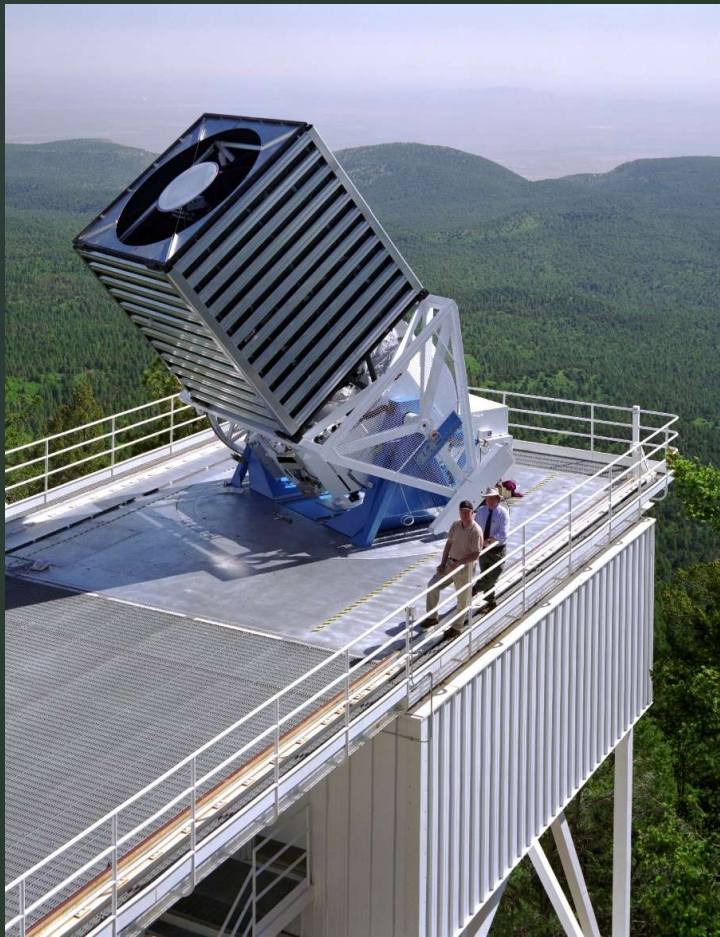


**FORS 1 and FORS 2
FOcal Reducer and
low dispersion
Spectrograph**

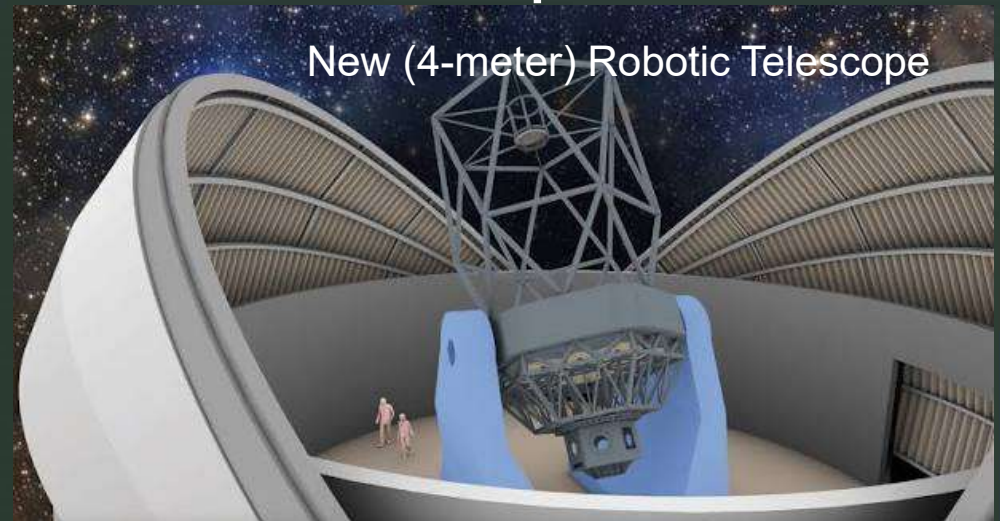
**SPHERE - Spectro-Polarimetric
High-contrast Exoplanet REsearch instrument**



Телескопы-роботы и обзоры неба

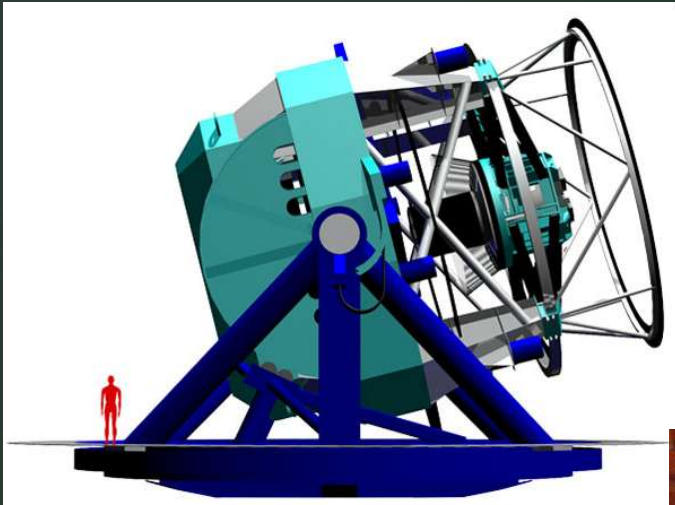


Sloan digital sky survey



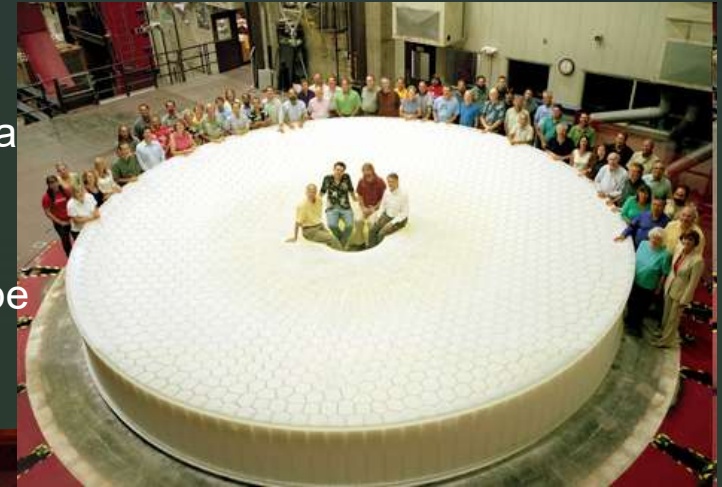
Zwicky Transient Factory

Large Synoptic Survey Telescope



Телескоп 8.5 метра
Поле зрения 3.5 градуса
Камера 3.2 гигапикселя

Simonyi Survey Telescope



Очень широкий круг задач.

Начало наблюдений – 2025 г.



LSST ~ \$473млн. +
~ \$168 млн. камера
+ частные деньги
~ \$40 млн
~\$70 млн. в год – операционные
расходы

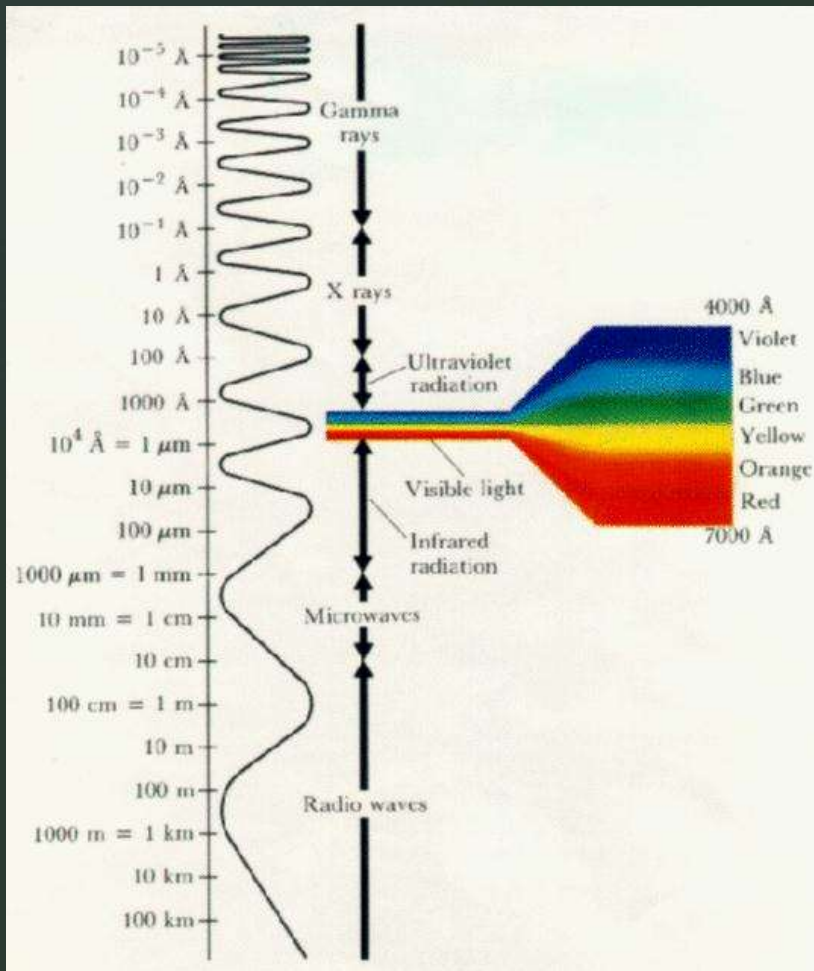
LSST – телескоп нового поколения

В 2025 г. Появились первые результаты наблюдений LSST (Обсерватория имени Веры Рубин)



Lsst.org; <https://rubinobservatory.org>; <https://rtn-095.lsst.io/RTN-095.pdf>

Всеволновая астрономия



Наблюдения теперь проводят во всех спектральных диапазонах:

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

Разные диапазоны приносят информацию о разных процессах.

Что и как излучает?

Тепловое излучение:

Излучение газа

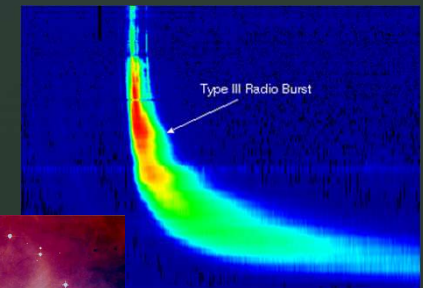
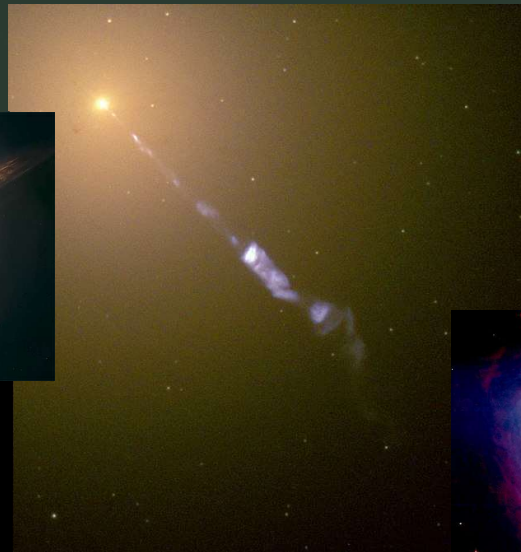
- Теплого (звезды)
- Холодного (облака газа)
- Горячего (аккреционные диски)

Существует множество разных механизмов излучения, важных для разных диапазонов спектра

Нетепловое излучение:

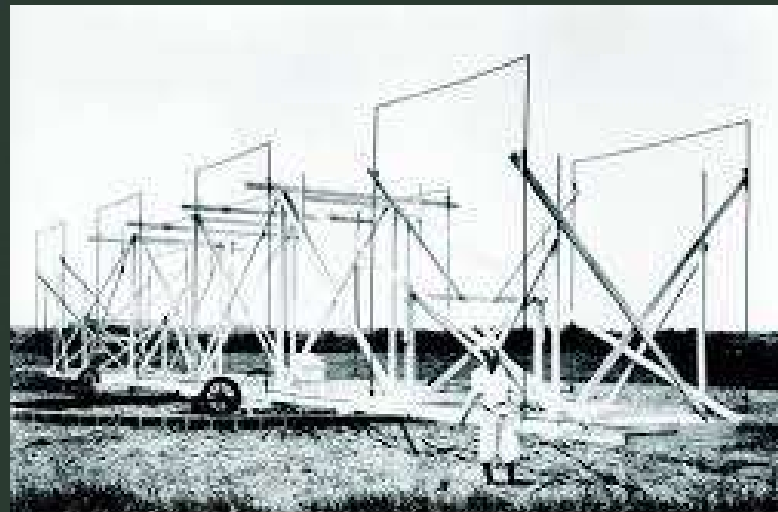
Ускоренные электроны

- Солнечные вспышки
- Пульсары
- Джеты



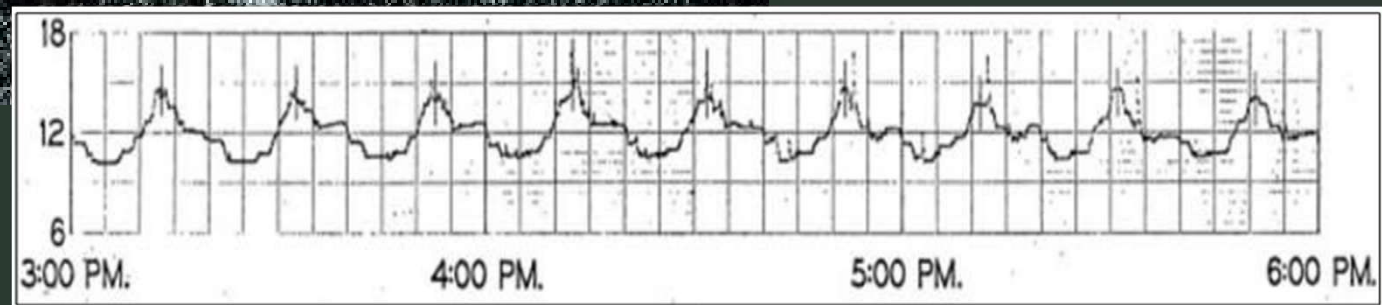
Радиоастрономия

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



В 1933 г. Карл Янский впервые зарегистрировал радиоизлучение от Млечного Пути.

Бурное развитие радиоастрономии началось после Второй мировой войны.



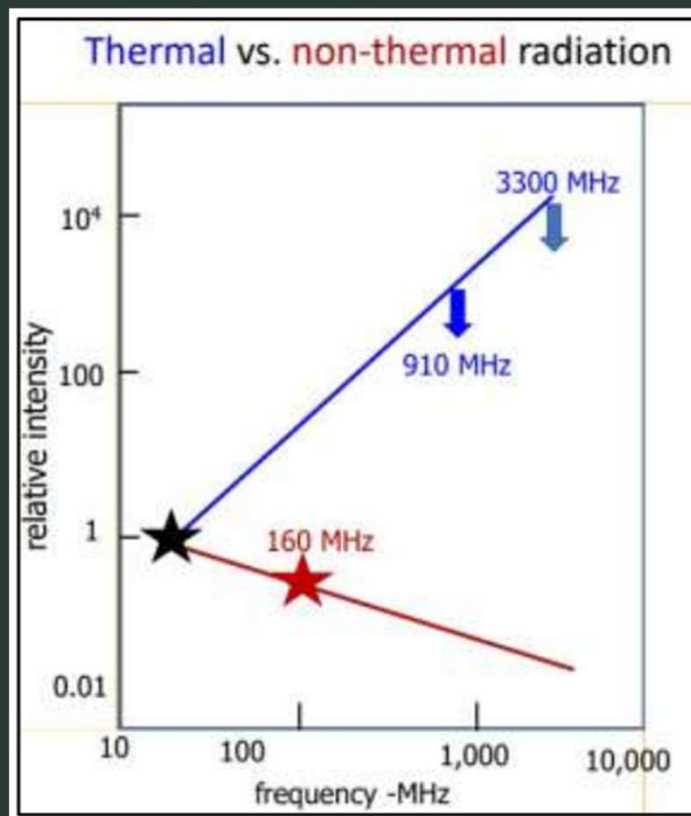
Первая «тарелка». Грот Ребер

1937 г.

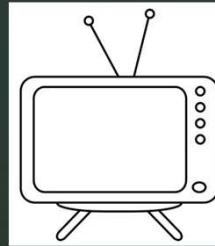
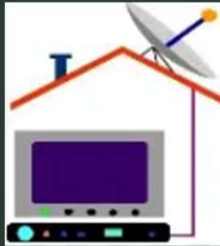
«Домашний» радиотелескоп.

Диаметр 10 метров.

Ребер первым показал,
что излучение,
открытое Янским,
нетепловое.



Два типа антенн



Два вида телескопов:
«тарелки» и «рогульки».

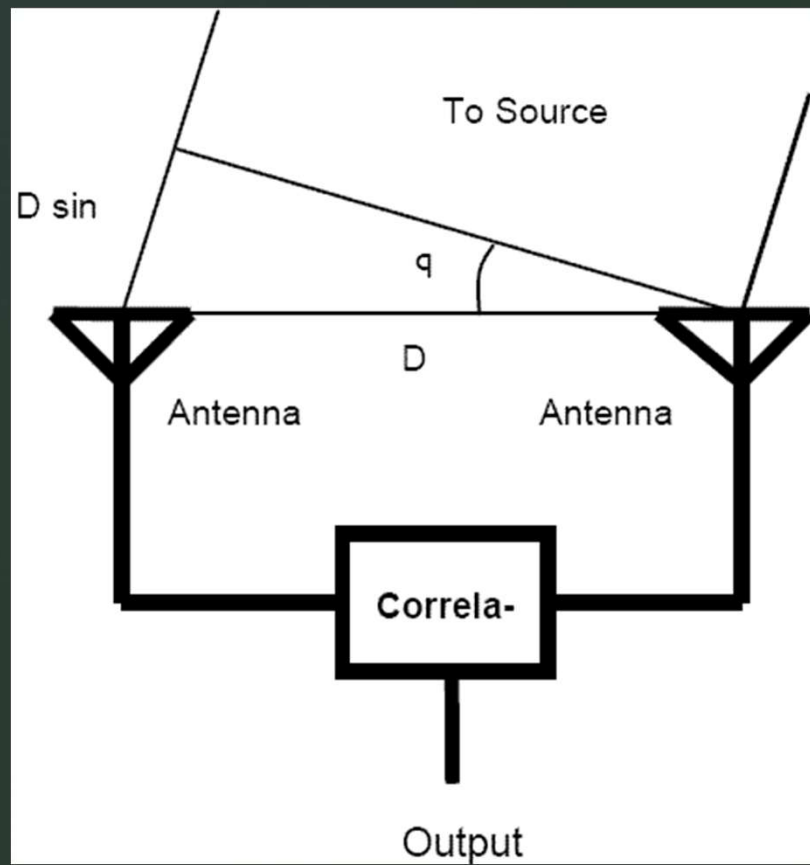
Первые работают похоже
на оптические
телескопы-рефлекторы.



Современные радиотелескопы

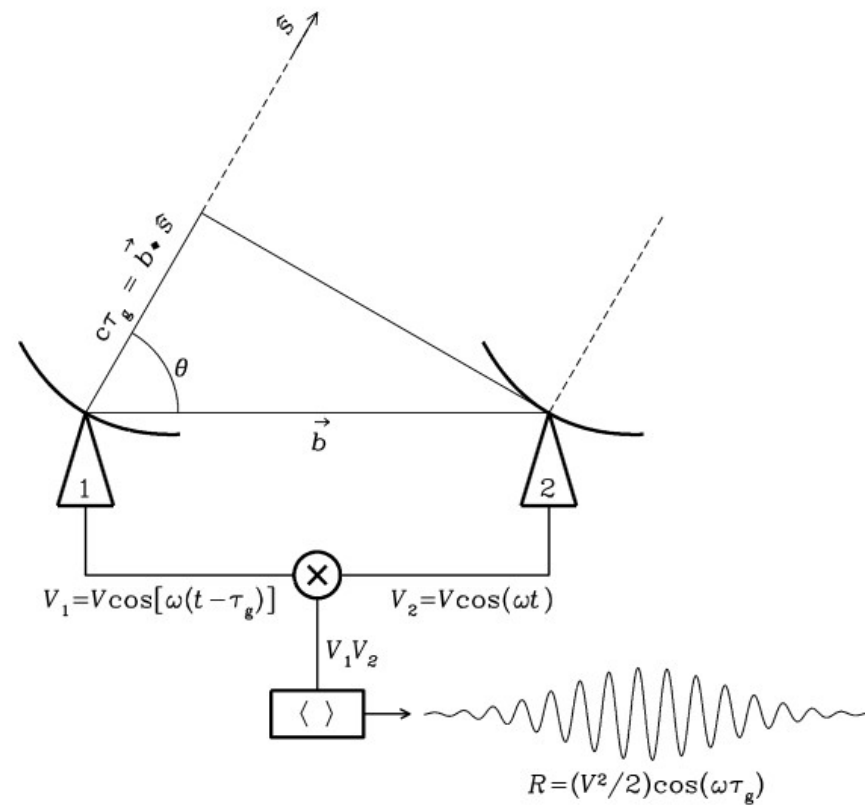


$$\theta = 1.220 \frac{\lambda}{D}$$



Интерферометры

Высокое угловое разрешение в направлении, соединяющем два телескопа.



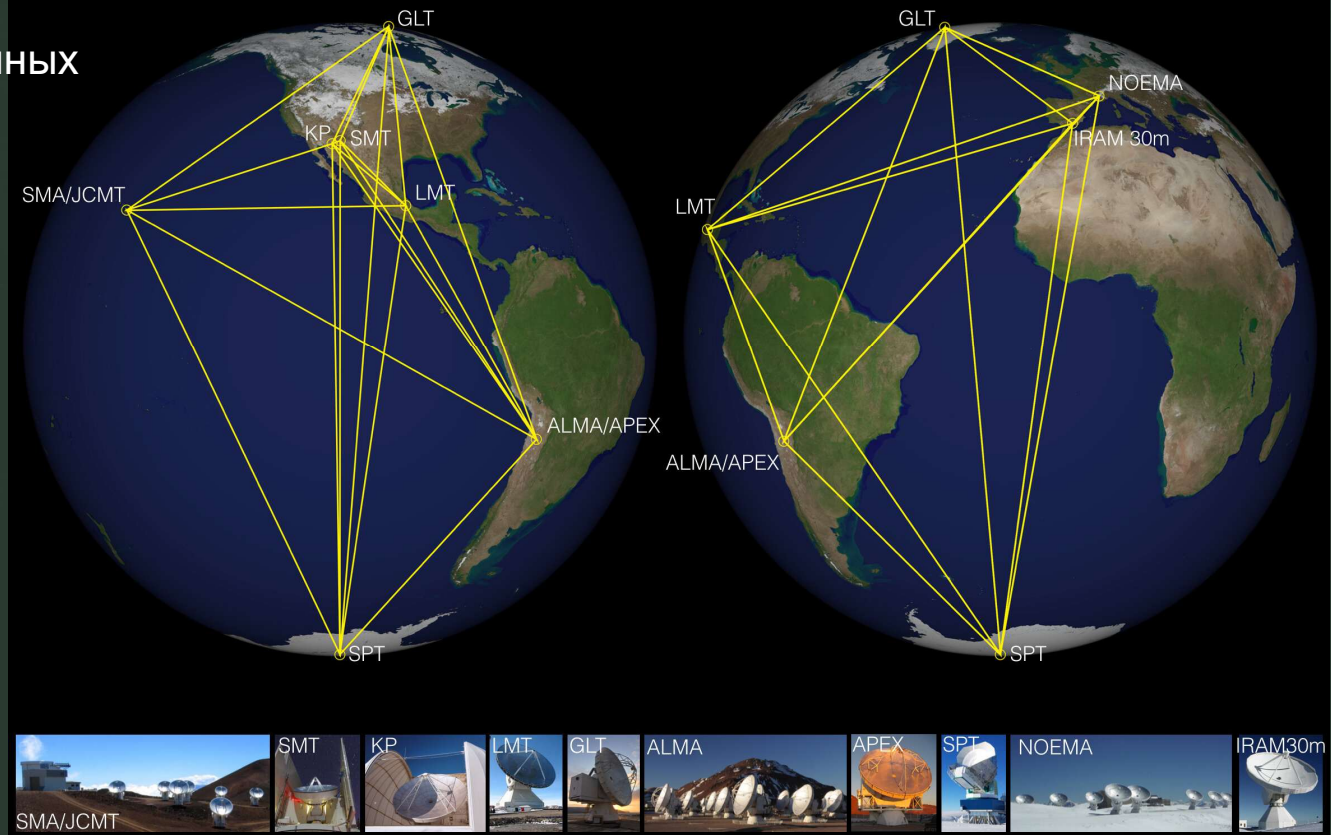
Телескоп горизонта событий

Совместная работа и обработка данных на нескольких независимых инструментах, установленных по всему земному шару.

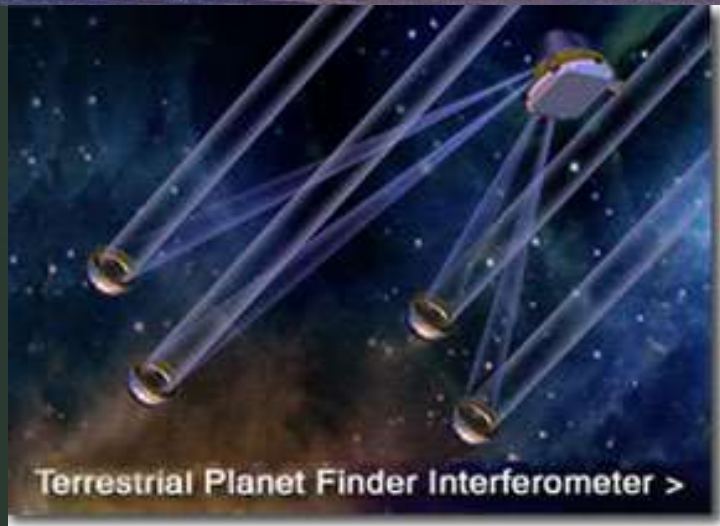
Позволяет добиться очень высокого углового разрешения за счет большой базы и использования высоких частот.



Event Horizon Telescope



Оптика и радио



Радиоастрон



Космический
интерферометр

Рекордное
угловое разрешение

Проблемы:

- малые срок работы
- недостаточно высокая частота
- малый размер космической антенны
- малая площадь наблюдаемого участка неба

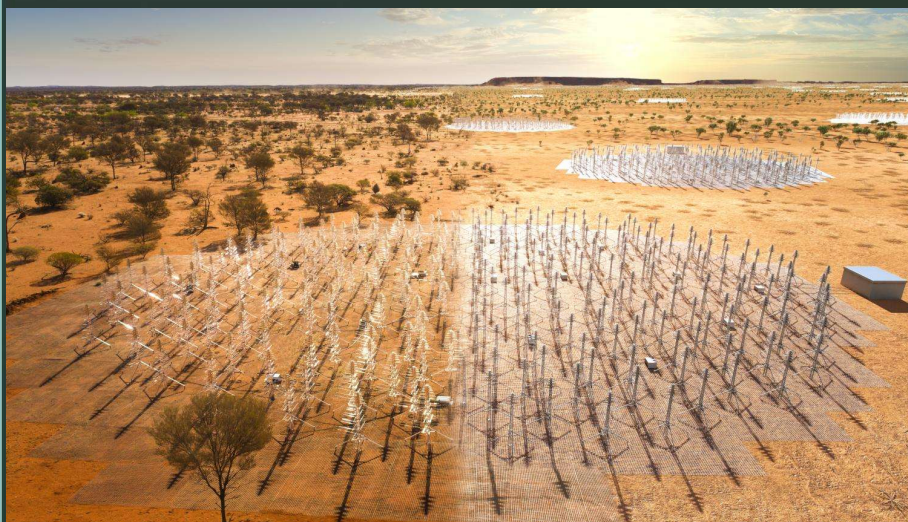


SKA – Square Kilometer Array

Гигантская система.

Часть установки будет размещена в Австралии, а часть – в Южной Африке.

Начало работы первой фазы установки – 2027 год.



ASKAP и MeerKAT

Два прототипа SKA – в Австралии и Южной Африке



Оба инструмента активно работают, получая множество интересных результатов. Например, в области изучения радиопульсаров и быстрых радиовсплесков.



Deep Synoptic Array

2000 5-метровых антенн. Рабочие частоты 0.7-2 GHz
Уже работает DSA-110.
Окончательный ввод в строй в 2028 году.



New generation VLA (ngVLA)

Длина волны: от миллиметров до сантиметров (1.2-116 ГГц)

Будет 224 антенн диаметром 18 метров и еще 19 6-метровых.

Постройка: 2026-2035 гг.

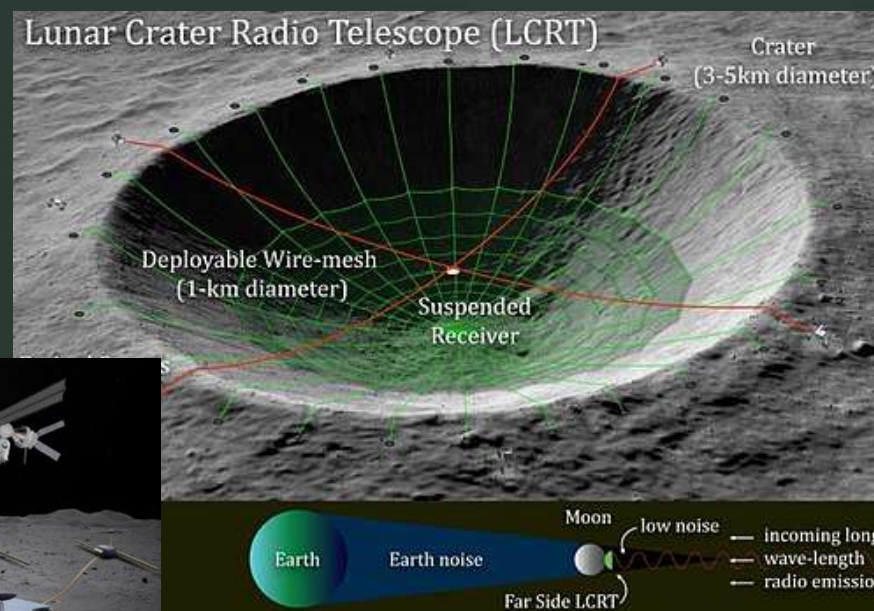


ngVLA LIFECYCLE PHASE	TOTAL (BY2018\$)	FUNDING SOURCES		SCHEDULE
		USA (75%)	INT (25%)	
DEVELOPMENT*	\$ 12,327,645	\$ 12,327,645	\$ -	FY18-19
DESIGN	\$ 95,713,658	\$ 71,785,243	\$ 23,928,414	FY20-24
CONSTRUCTION	\$ 2,263,078,238	\$ 1,697,308,679	\$ 565,769,560	FY25-34
OPERATIONS**	\$ 2,126,363,159	\$ 1,594,772,369	\$ 531,590,790	FY28-54
DIVESTMENT	\$ 139,413,972	\$ 104,560,479	\$ 34,853,493	FY55-57

LuSEE (2301.10345)



Лунные проекты



LCRT (2509.08066)



FARSIDE (2003.06881; 1907.05407)

Гамма-астрономия на Земле

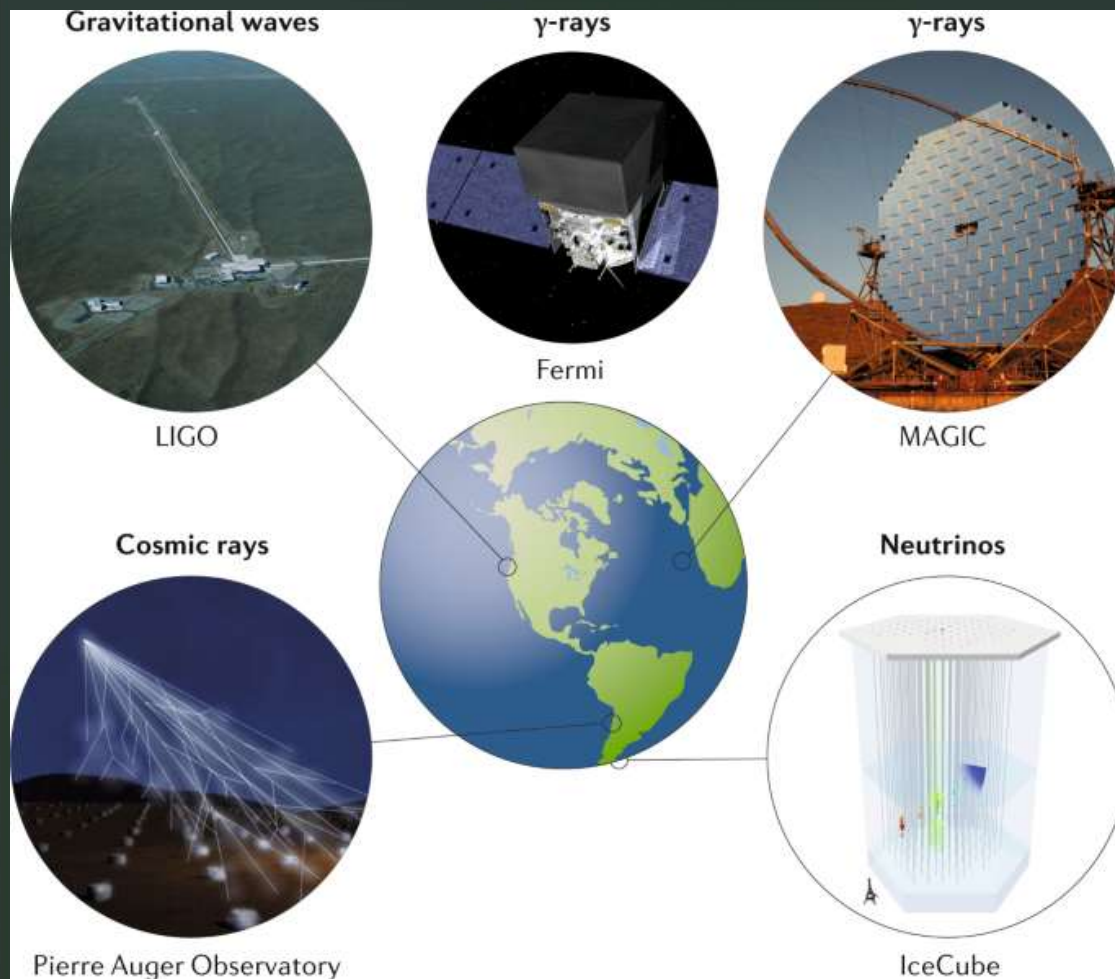
Влетая в атмосферу Земли, гамма-квант очень высокой энергии приводит к появлению вспышки в оптическом диапазоне.

Это позволяет использовать наземные телескопы для целей гамма-астрономии.

Используются специальные сети телескопов с большим размером антенны, но скромным угловым разрешением.



Не только электромагнитные волны



От космических объектов приходит не только электромагнитное излучение.

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

Кроме того, существуют 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.



Исследования космических лучей



1912: Виктор Гесс
(Victor Hess)
Нобелевская
премия 1936 г.

Изучение космических лучей составило как бы отдельное научное направление на стыке физики частиц и астрофизики.

Доказательство космической природы ионизирующего излучения было получено в 1912 г. Виктором Гессом с помощью наблюдений на воздушном шаре.

Космические частицы могут иметь большую энергию, которую несколько десятилетий не удавалось достичь в лабораторных установках.

Постоянно появляются новые установки как наземные, так и космические.



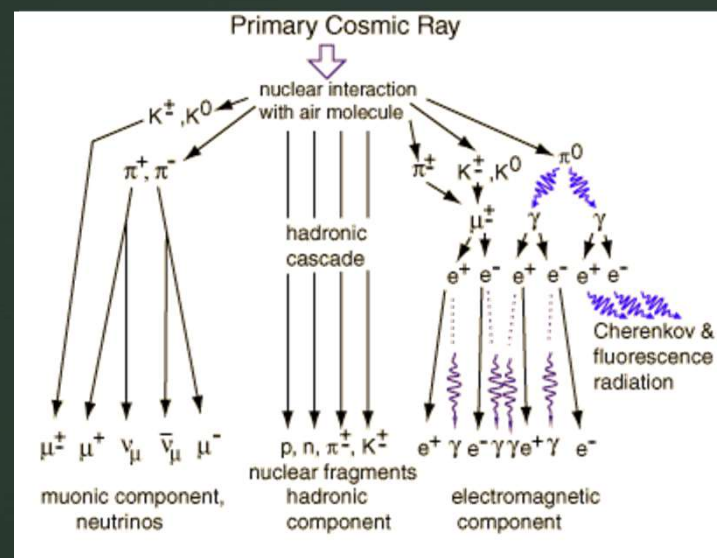
Ускорители для бедных

До конца 50-х гг. физики, пока у них не появились мощные ускорители, активно использовали потенциал космических лучей.

Несколько крупнейших открытий было сделано с помощью наблюдений КЛ. Например, так в 1932 году Карлом Андерсоном был открыт позитрон.

В 1936 г. он же открыл мюоны, исследуя космические лучи.

В настоящее время данные по космическим лучам представляют большой интерес для физики высоких энергий.



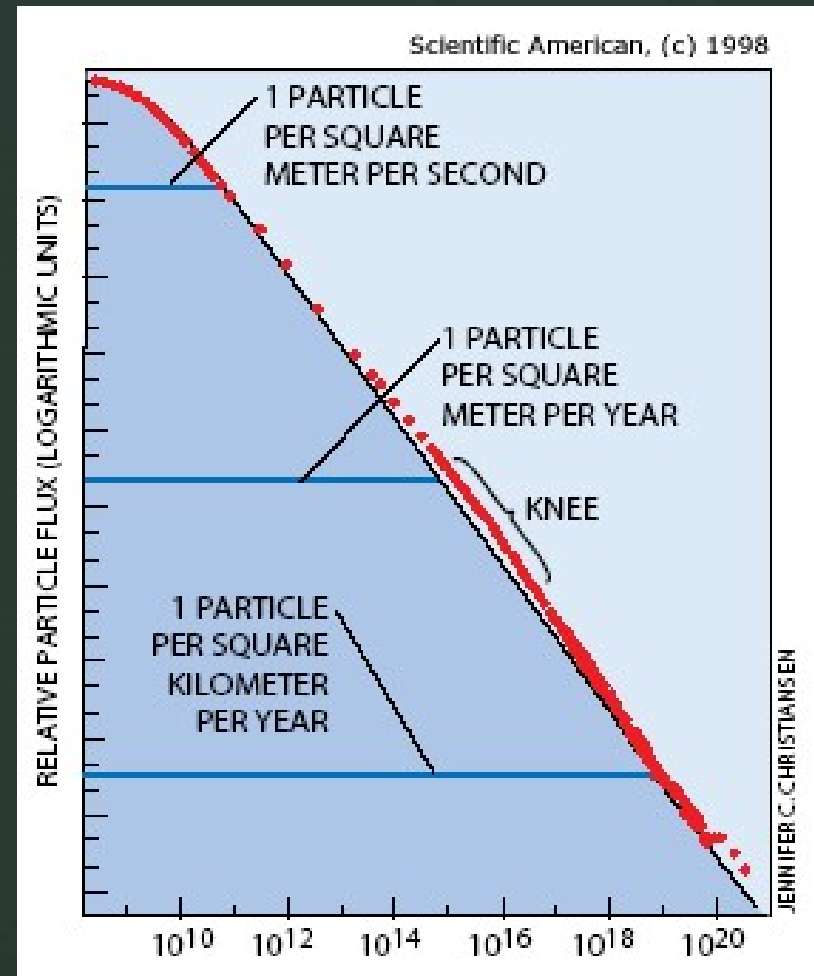
Спектр космических лучей

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/(см² с ср)
 $N = 10^{-10}$ частиц/см³
 $W = 10^{-12}$ эрг/см³ = 1 эВ/см³

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

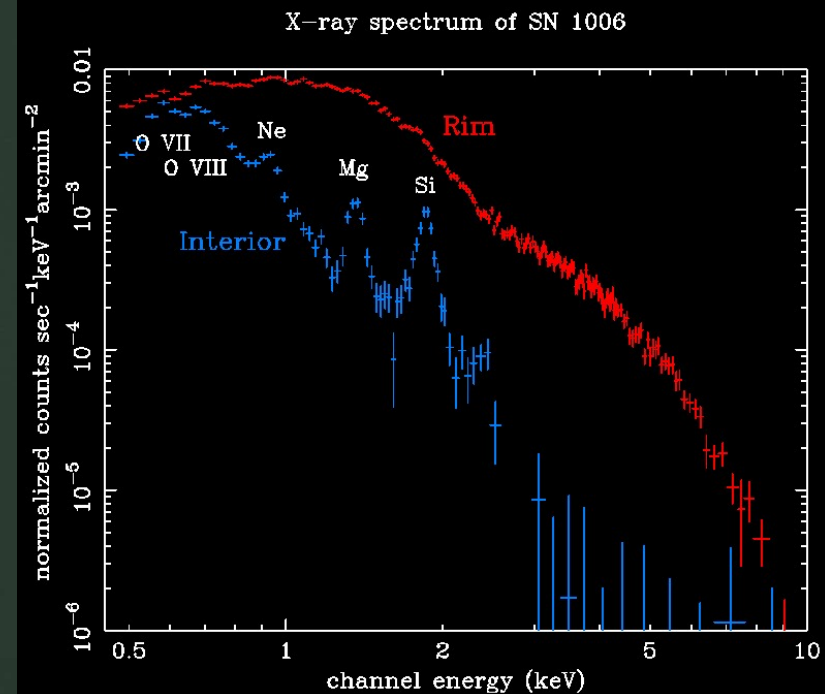
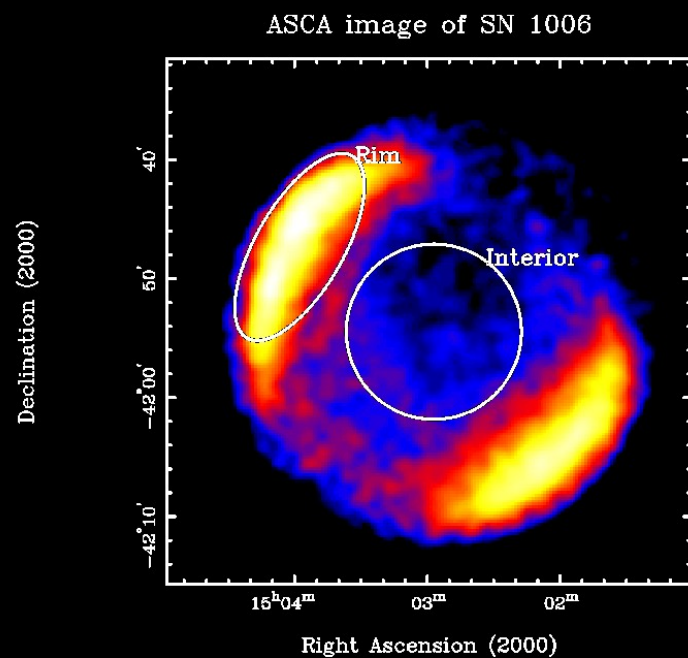
Вторичные частицы: на 70% мюоны и на 30% электроны и позитроны.



Происхождение

Галактические космические лучи в основном связаны с остатками сверхновых.

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



Межзвездн
Плотность
энергии (да

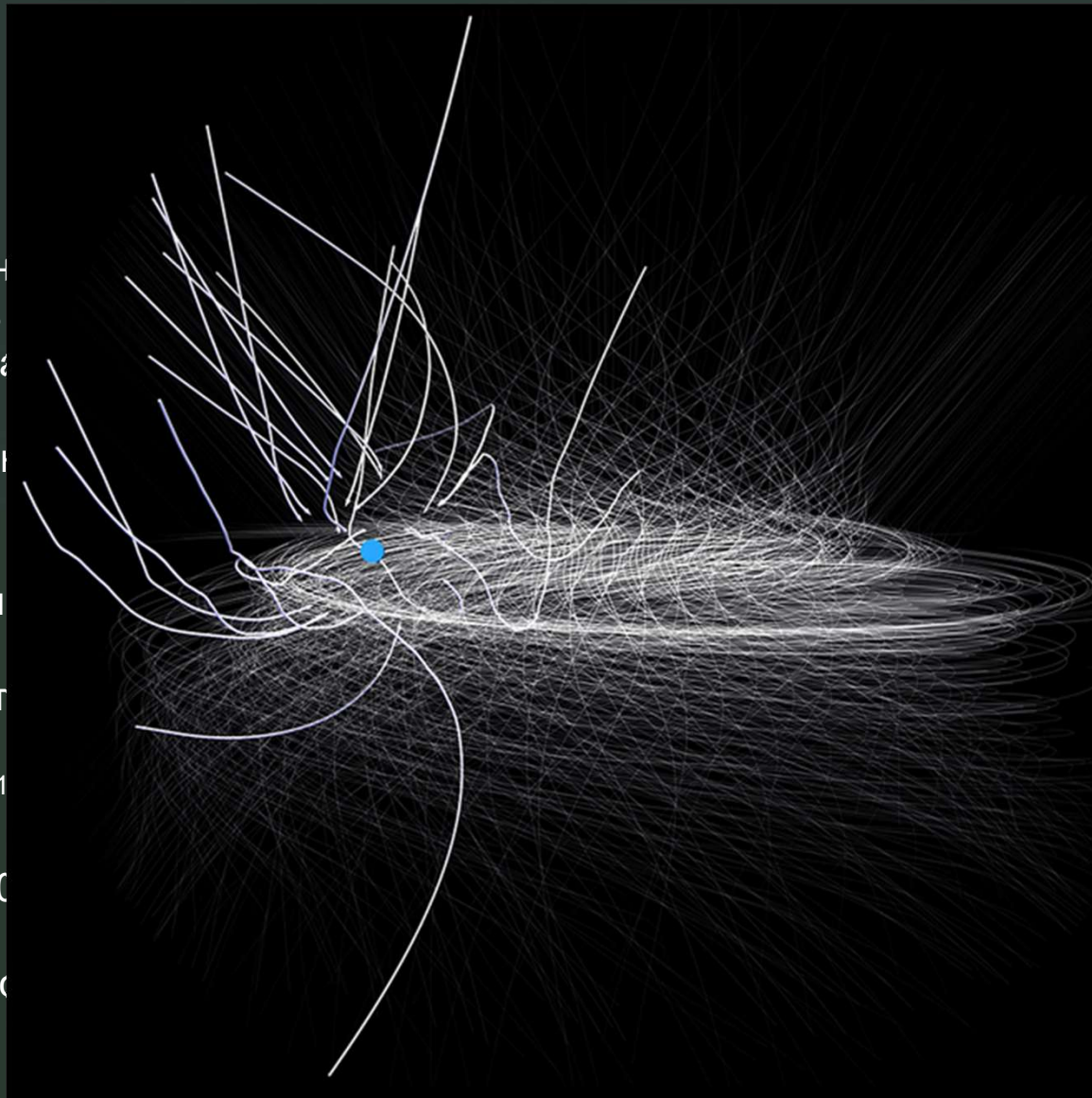
Минималы
300 пк ~

Рассмотри

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

При $E > 3 \cdot 10$

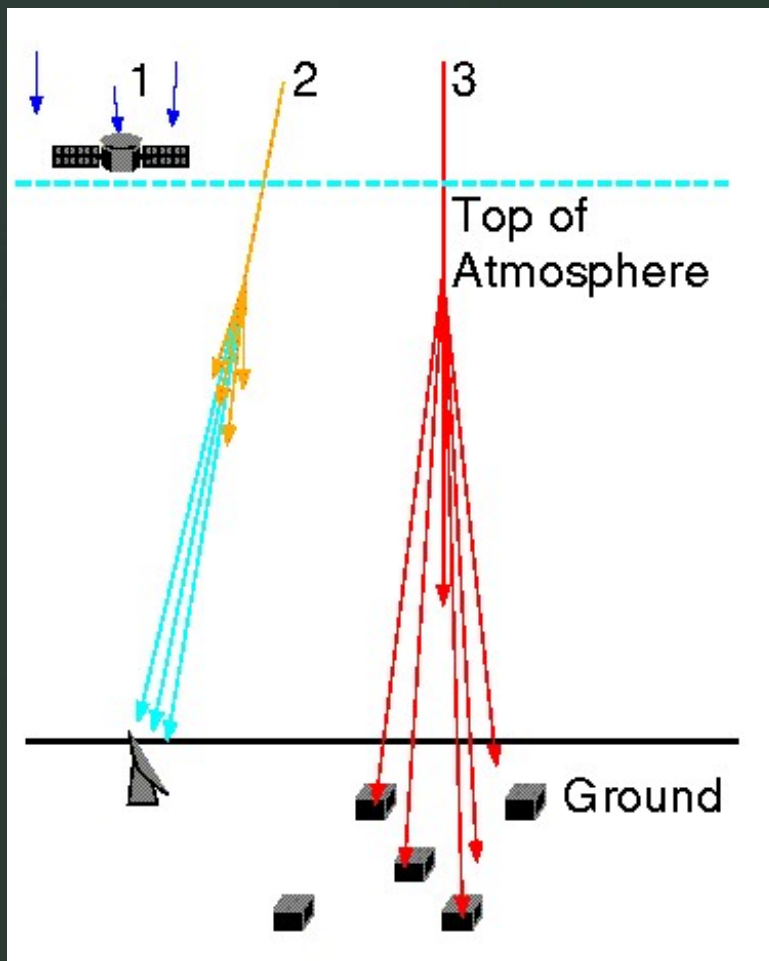
В реальнос



учей в
актике

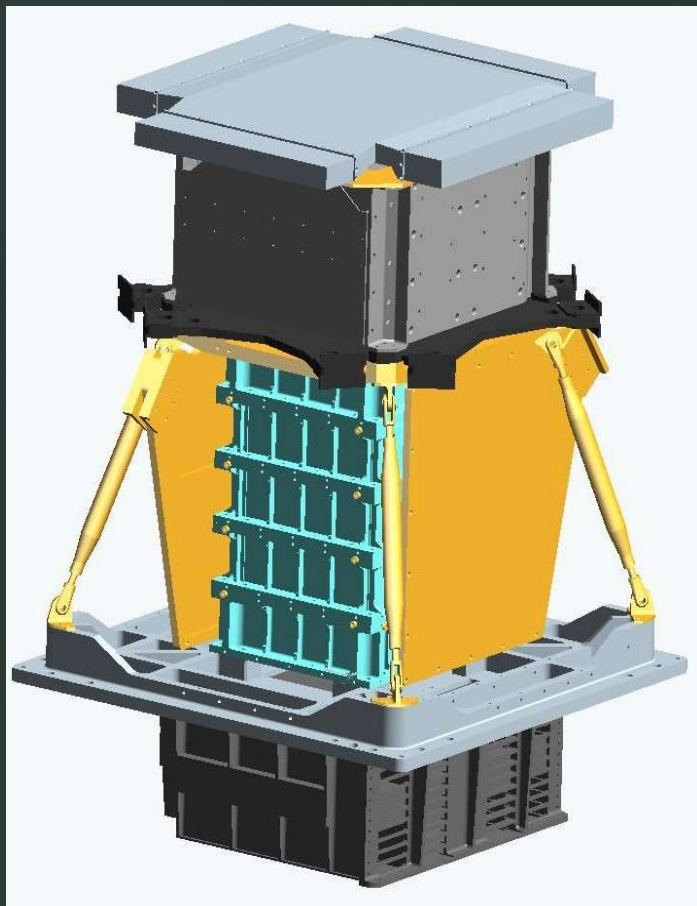
идать диск.

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

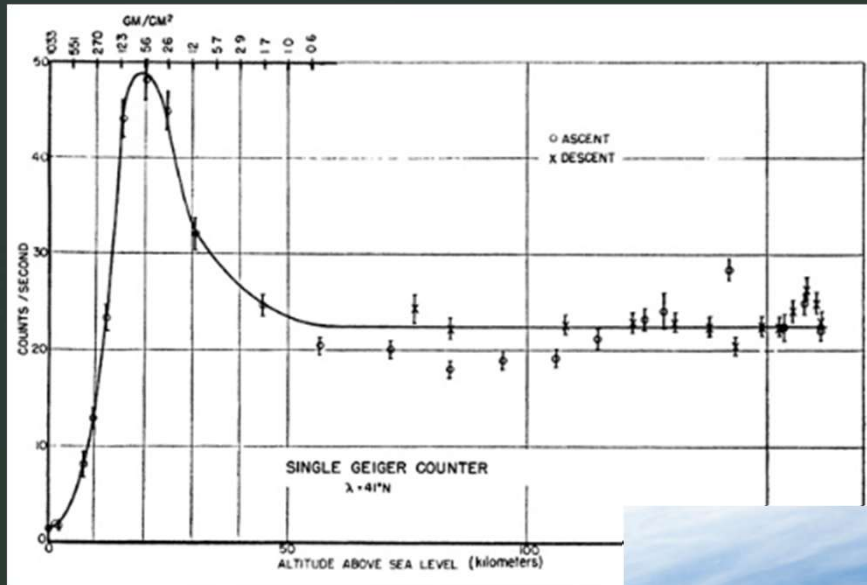


PAMELA

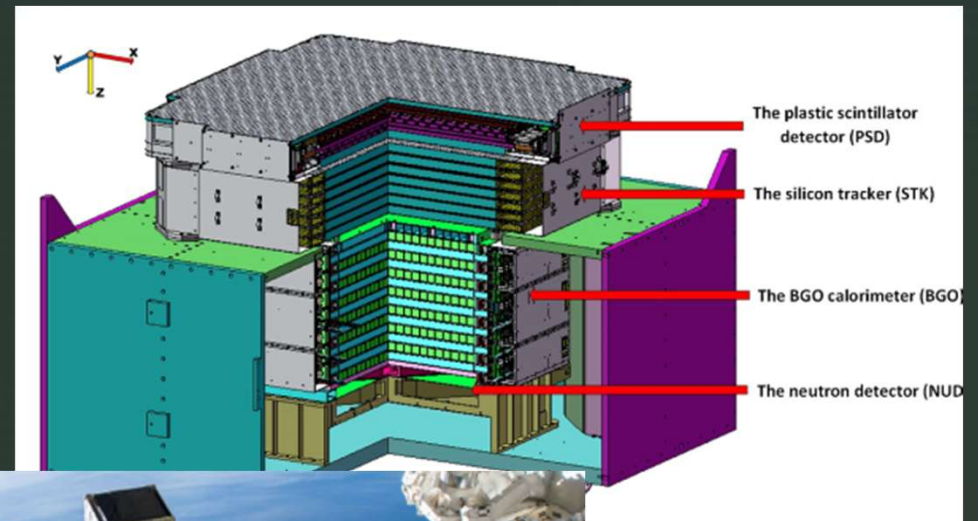


Полеты Гесса (1912 г.)

Космические наблюдения



Ван Аллен и др. (1947 г.).
Счетчик Гейгера на ракете V2.



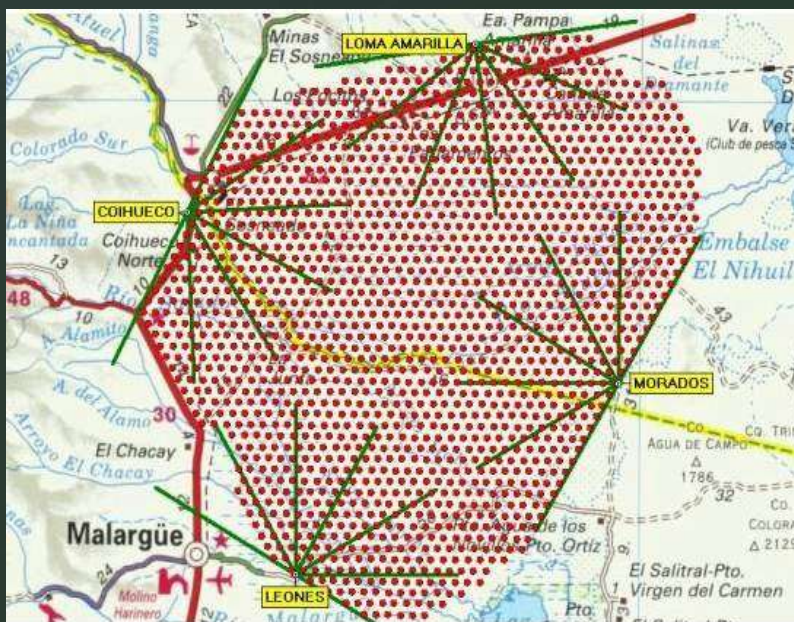
DAMPE



CALET (МКС)

Обсерватория имени Оже

Самая крупная действующая обсерватория для наблюдения космических лучей сверхвысоких энергий.

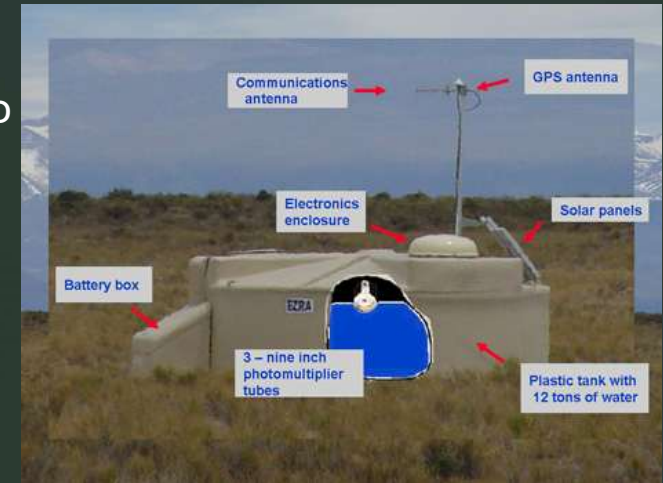


Более 1000 наземных детекторов. Плюс 24 телескопа.

Черенковские детекторы

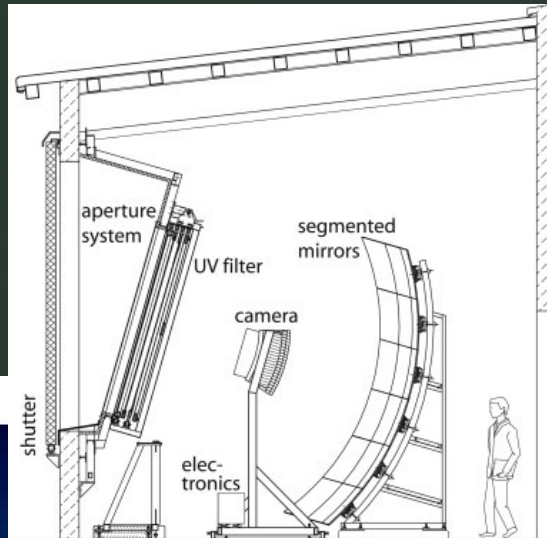
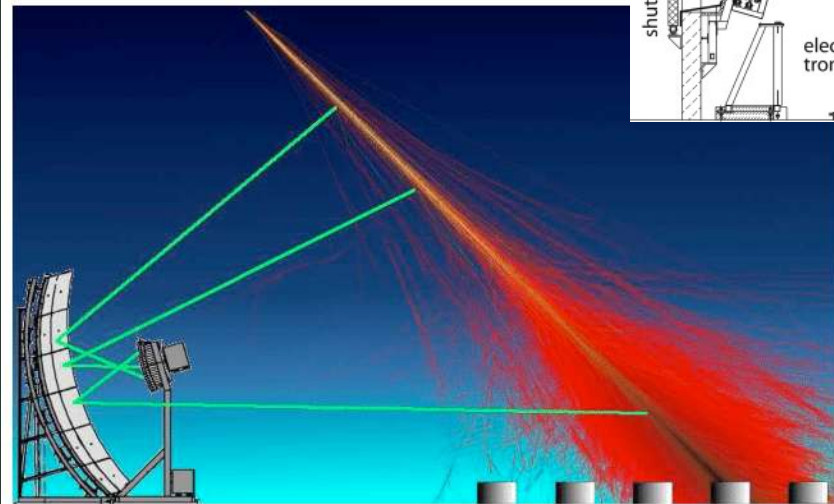


Множество относительно простых детекторов для регистрации вторичных частиц — мюонов.



Оптические детекторы обсерватории Оже

Частица высокой энергии порождает в атмосфере Земли широкий атмосферный ливень — поток разнообразных частиц.



Широкий атмосферный ливень также сопровождается оптической и ультрафиолетовой вспышкой за счет эффекта флуоресценции.



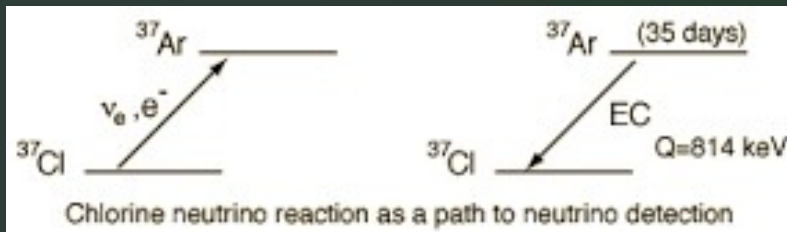
Апгрейд. Phase II



Добавлены SSD детекторы и радиоантенны

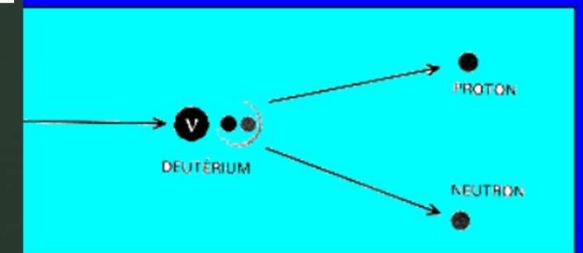
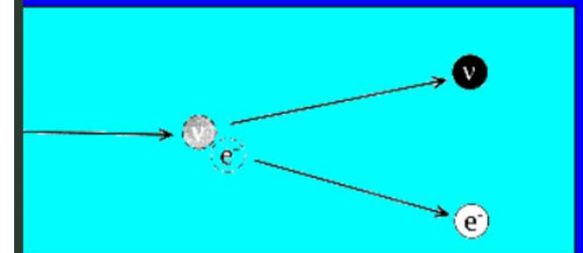
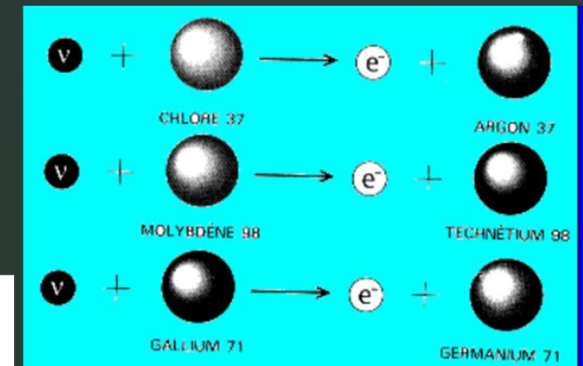
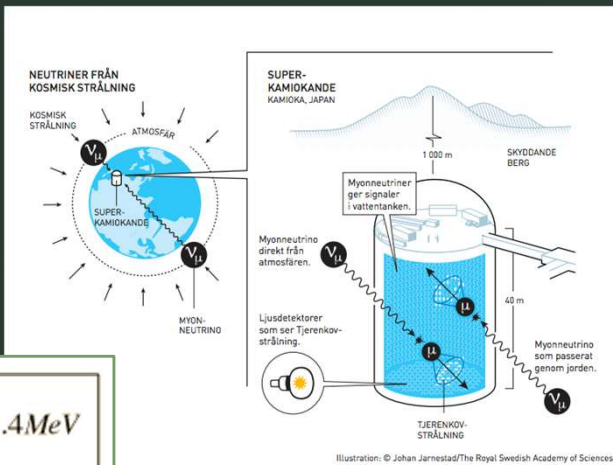
Теперь будет работать до 2035 года.

Нейтринные эксперименты



Существуют различные методы прямой и косвенной регистрации нейтрино.

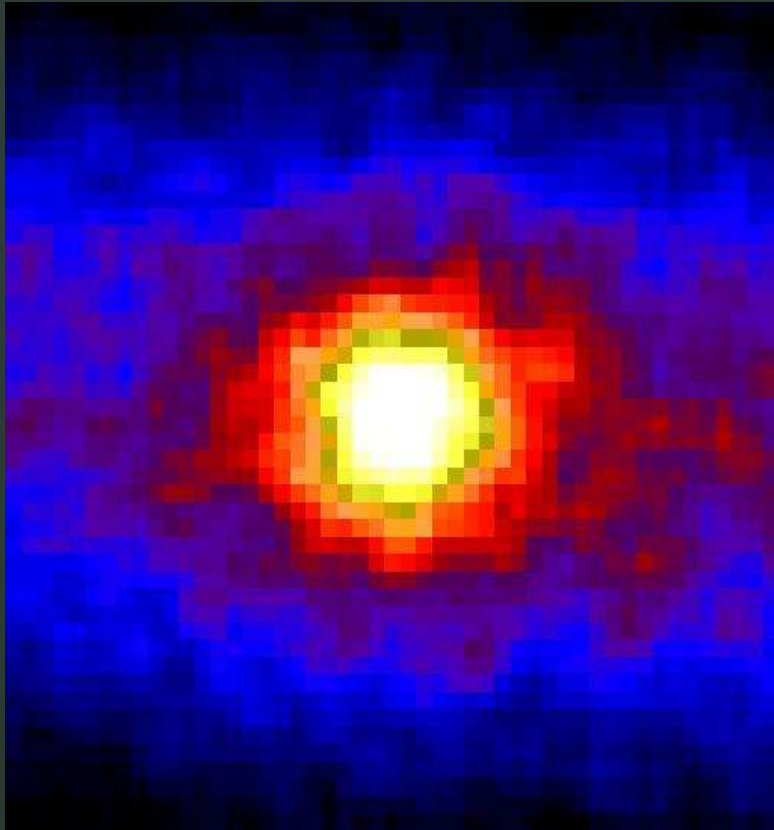
- Превращение элементов
- Излучение электрона (мюона)
- Распад дейтерия



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

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

Нейтринная астрофизика



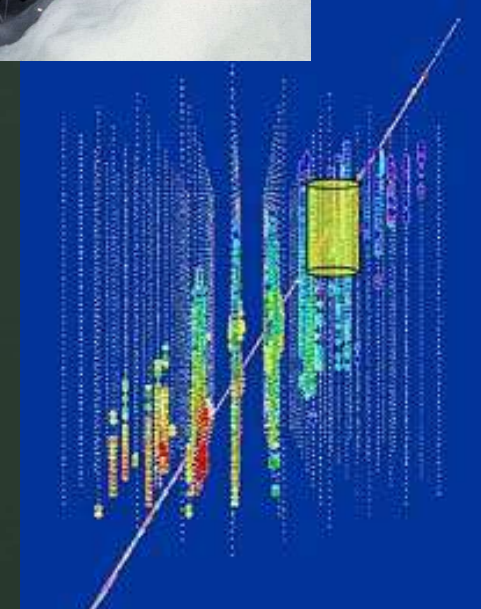
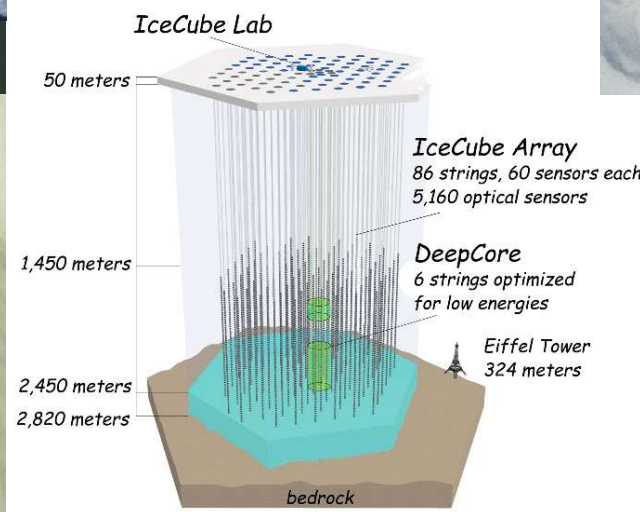
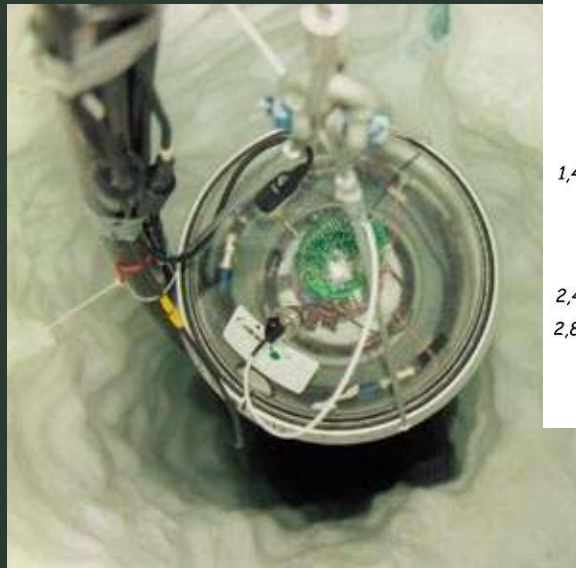
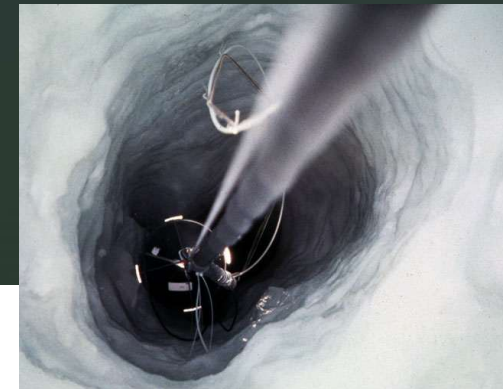
Нейтрино от Солнца



Нейтрино от взрывов сверхновых

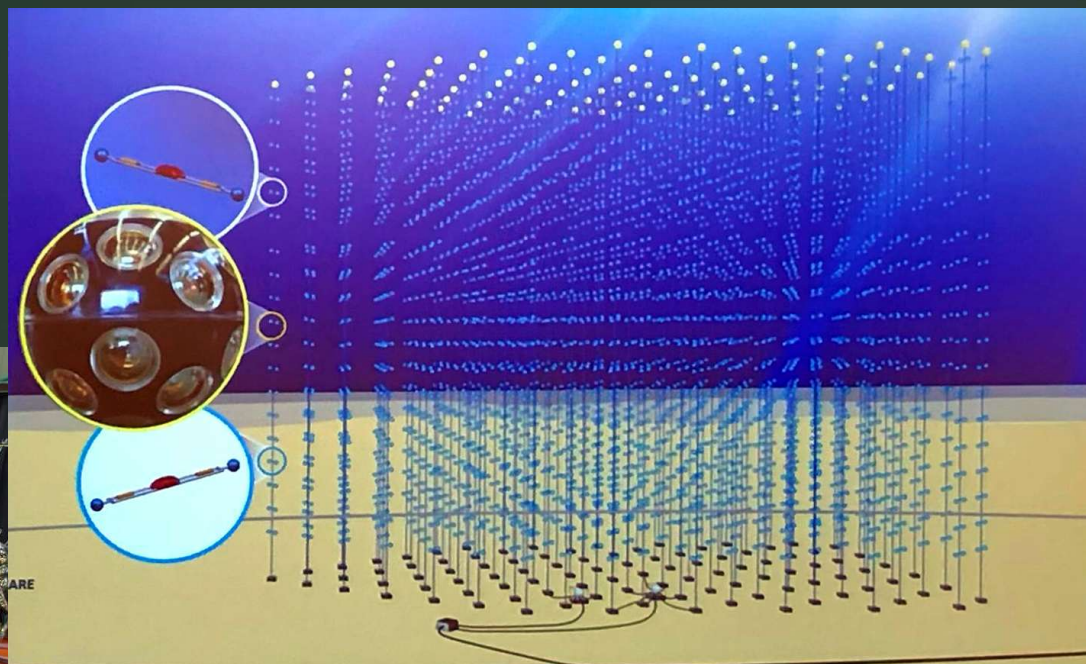
Наблюдения нейтрино

Эксперименты AMANDA
и IceCube в Антарктиде



Морской детектор KM3NeT

Итало-французские детекторы.
Средиземное море: вблизи Тулона и Сицилии).
Еще один планируется у побережья Греции.

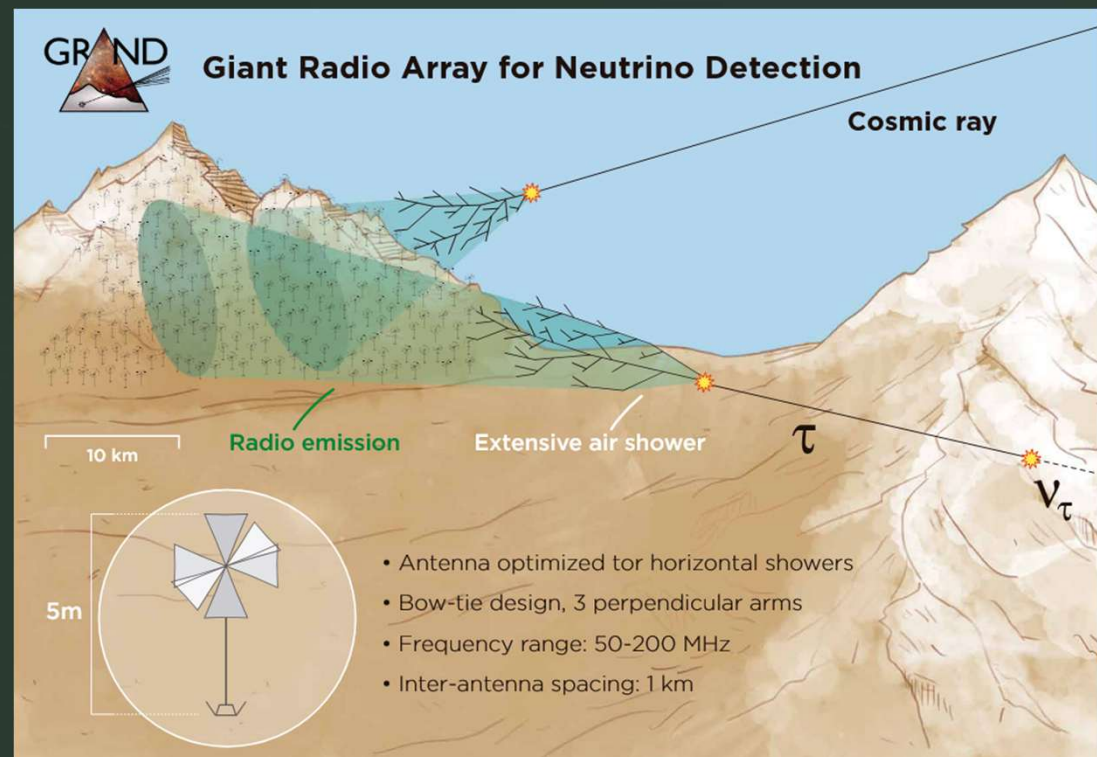


Радиорегистрация нейтрино

Установки GRAND: Китай и Аргентина

Планы – по 200 000 антенн в каждой.
Сейчас работают небольшие сети
для отработки технологий.

Следующий этап –
по 10 000 антенн (2030е).



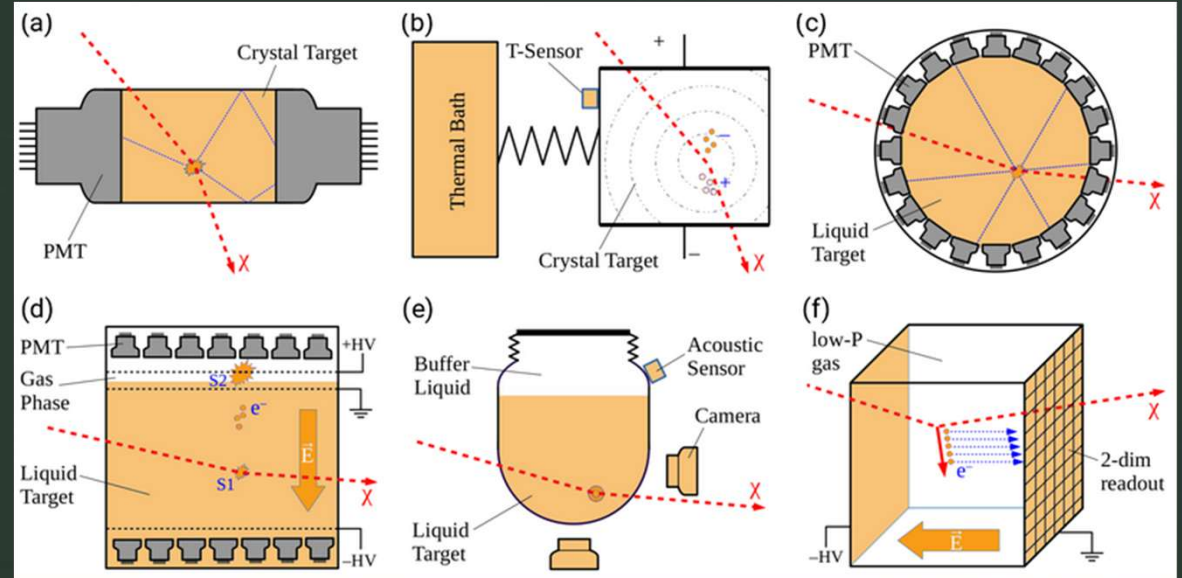
Детекторы темного вещества

Существует множество типов детекторов темного вещества.

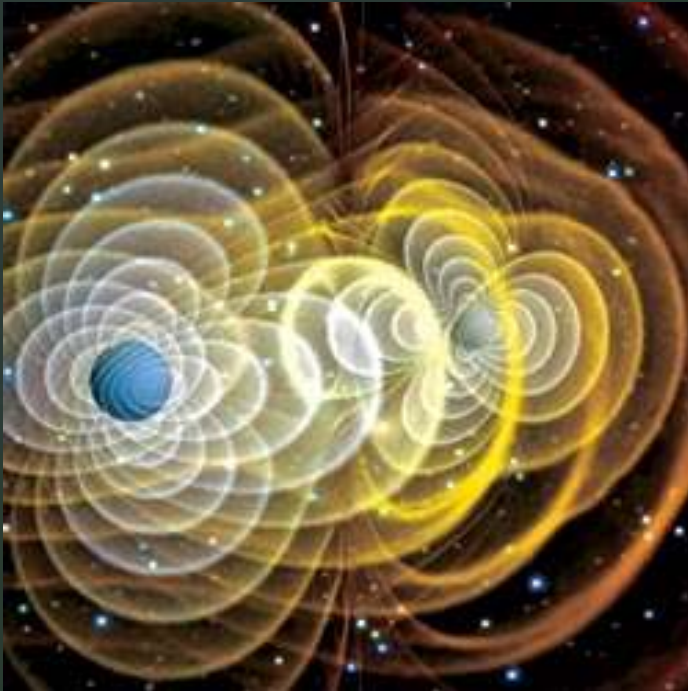
В результате взаимодействия

- может излучаться свет
- звук (фононы)
- появляться свободные электроны
- выделяться энергия (нагрев)
- могут происходить превращения элементов (нейтрино)
-

См. обзоры в 1709.00688,
0806.3917, 1903.03026, 2310.20472



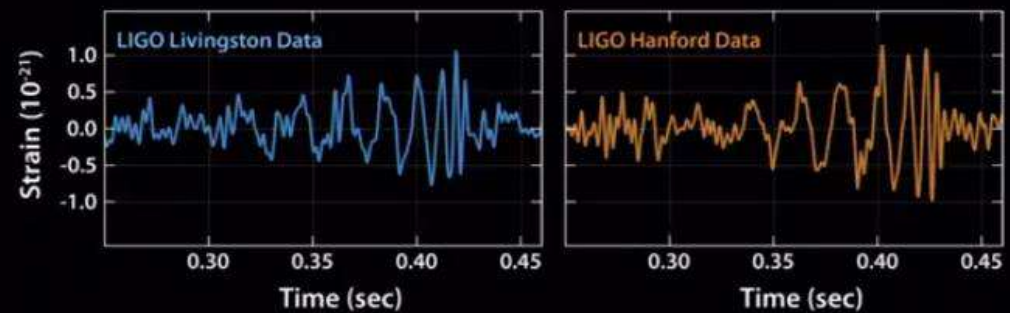
Гравитационные волны



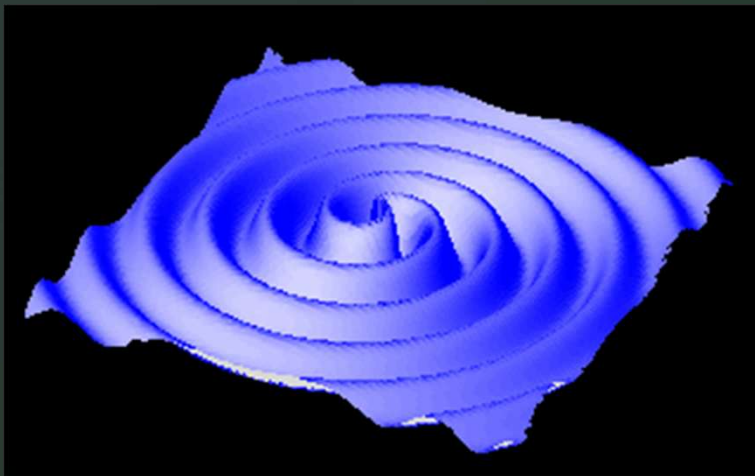
Предсказаны Общей теорией относительности.

Возникают при слиянии нейтронных звезд и черных дыр.

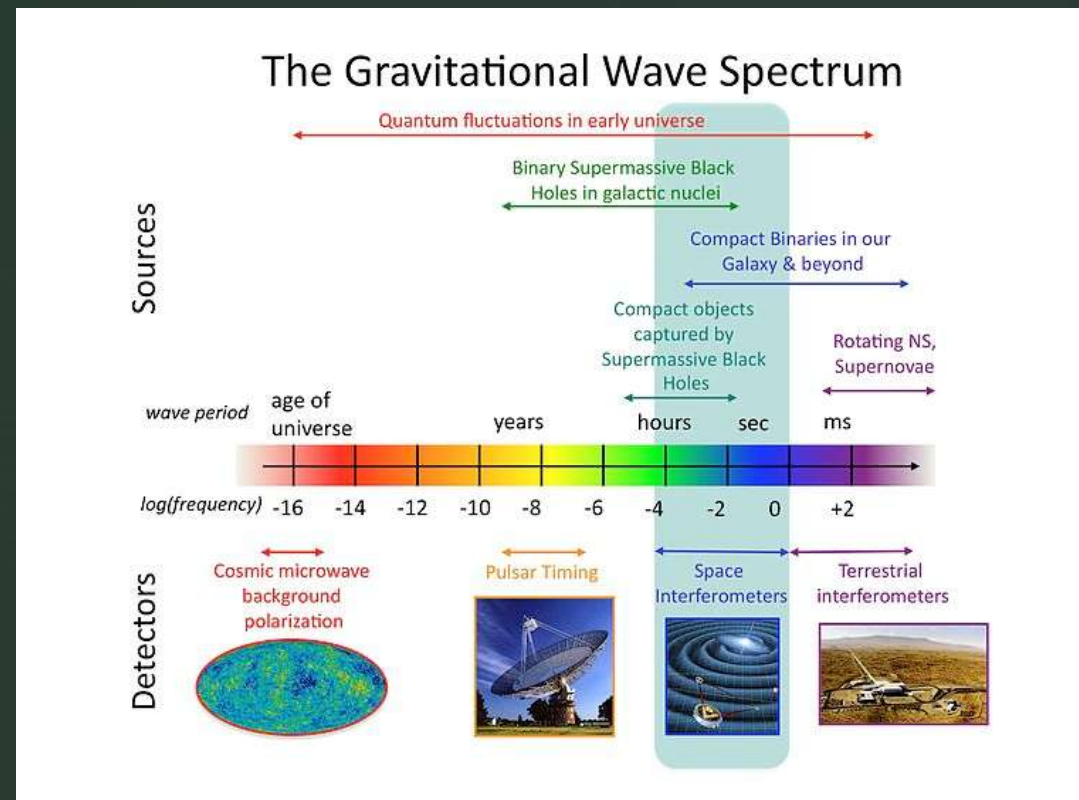
А также при вращении нейтронных звезд и при эволюции тесных двойных звезд.



Спектр гравитационных волн



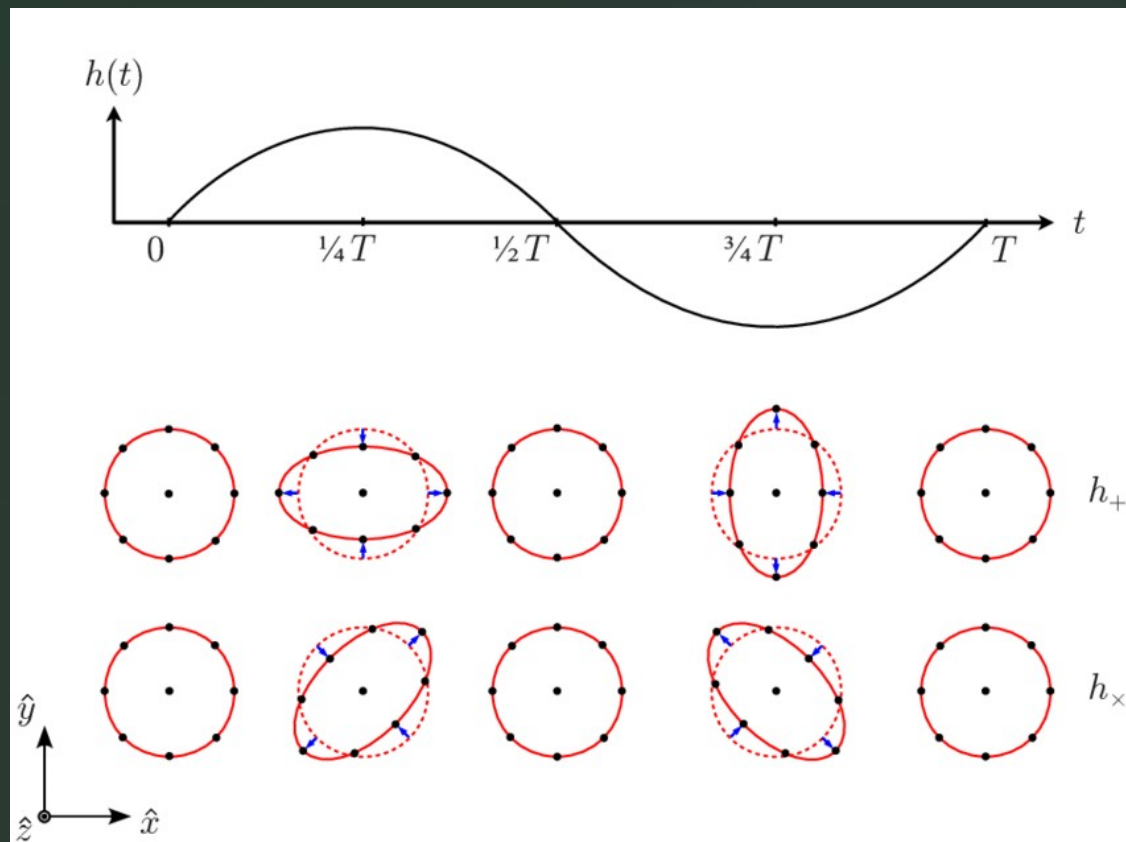
- Космология
- Пары сверхмассивных черных дыр
- Пары черных дыр звездных масс и нейтронные звезды
- Сверхновые, вращающиеся НЗ, etc.



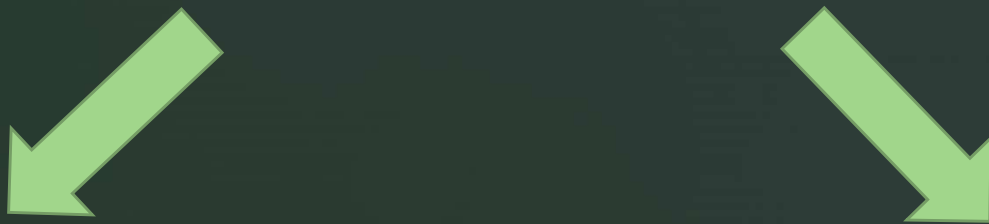
Влияние гравитационной волны

Действие гравитационной волны аналогично эффекту приливов.

Важно, что волны переносят энергию, и ее взаимодействие с детектором можно зарегистрировать.



Методы регистрации



Прямые методы:

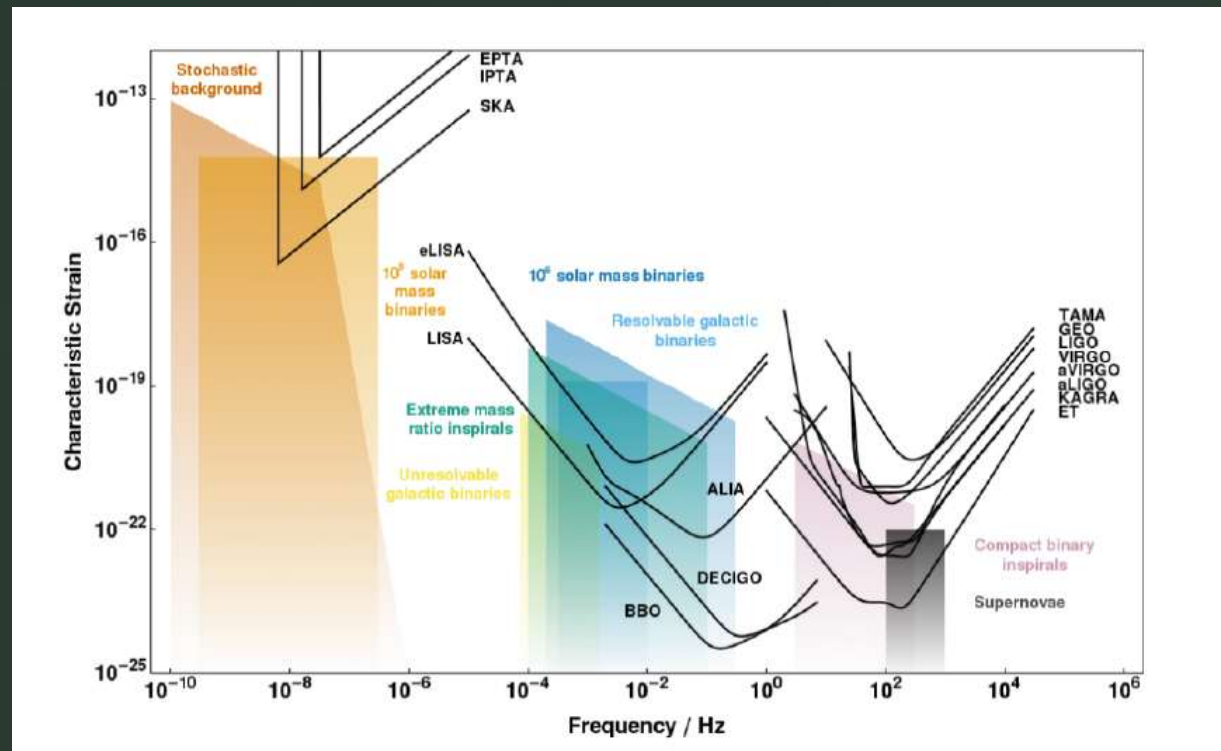
- Твердотельные (бар) детекторы
- Наземные лазерные интерферометры
- Космические лазерные интерферометры

Косвенные (астрономические) методы:

- Тайминг радиопульсаров
- Астрометрические наблюдения смещения положений звезд
- Наблюдения влияния гравитационных волн на различные объекты
- Наблюдения поляризации реликта

Разные методы в разных диапазонах

- Первичные гравволны – наблюдения поляризации реликтового излучения
- Длинные волны – пульсарные проекты
- Промежуточные длины – космические интерферометры
- Слияния двойных – наземные интерферометры



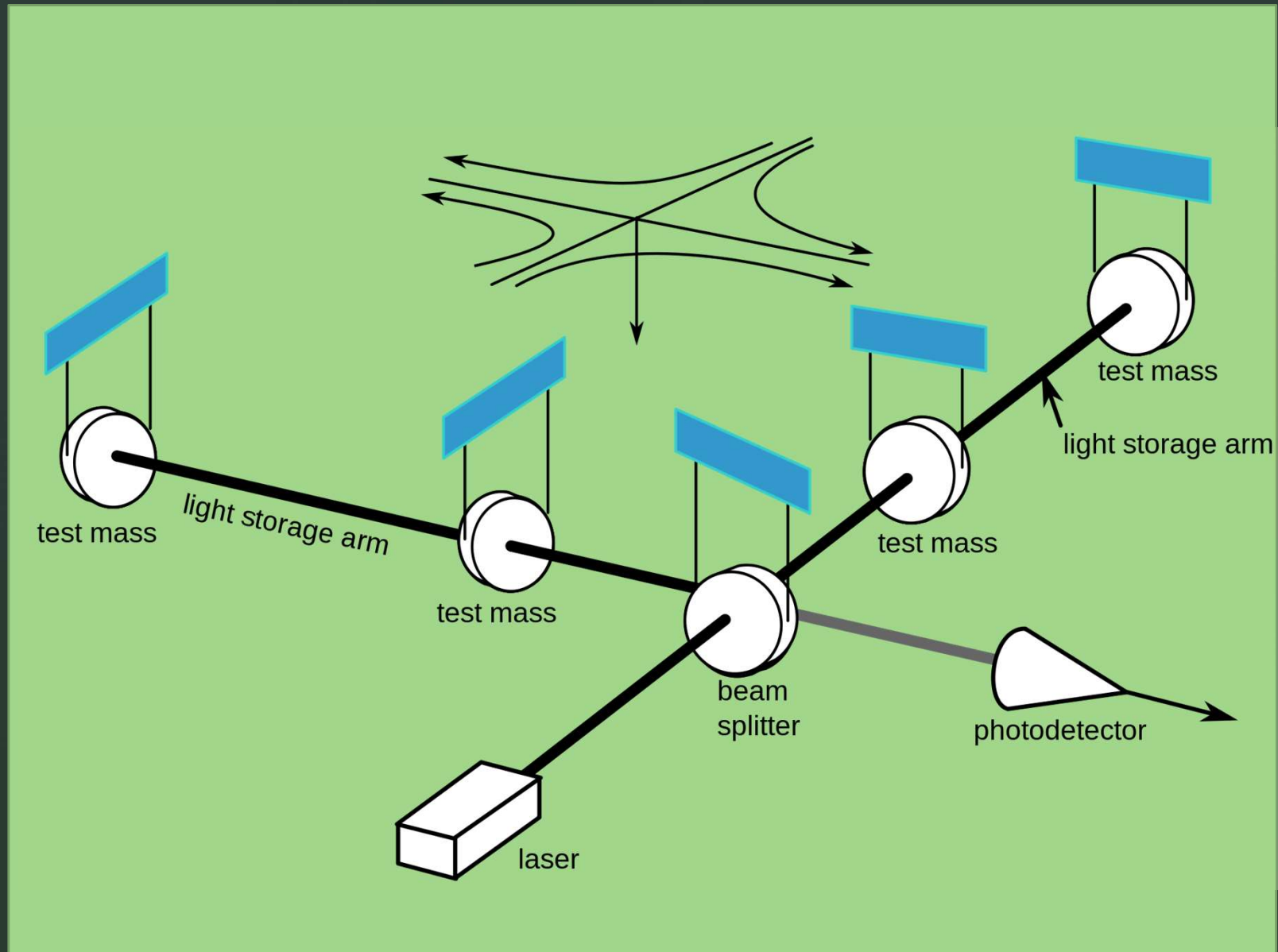
Детекторы гравитационных волн



Первый детектор Вебера



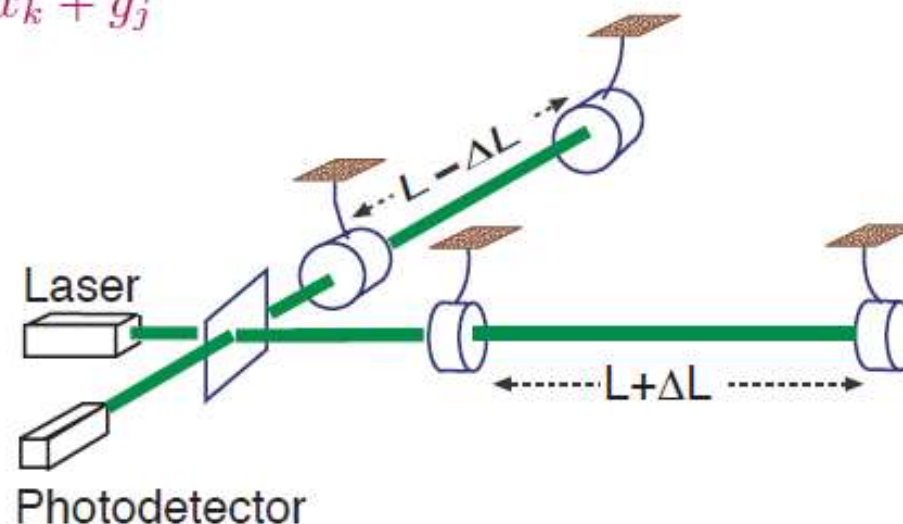
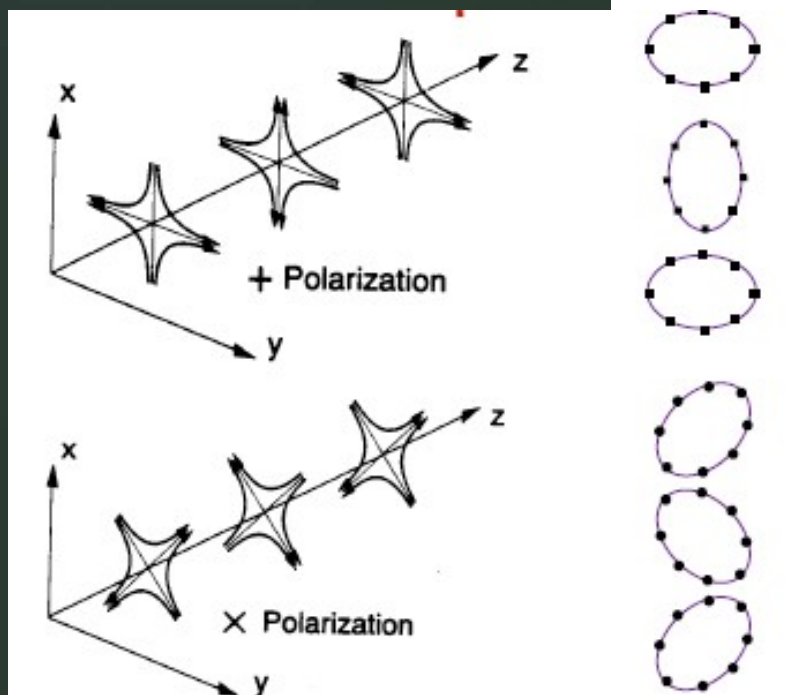
Эксперимент VIRGO



Изменение длины плеч

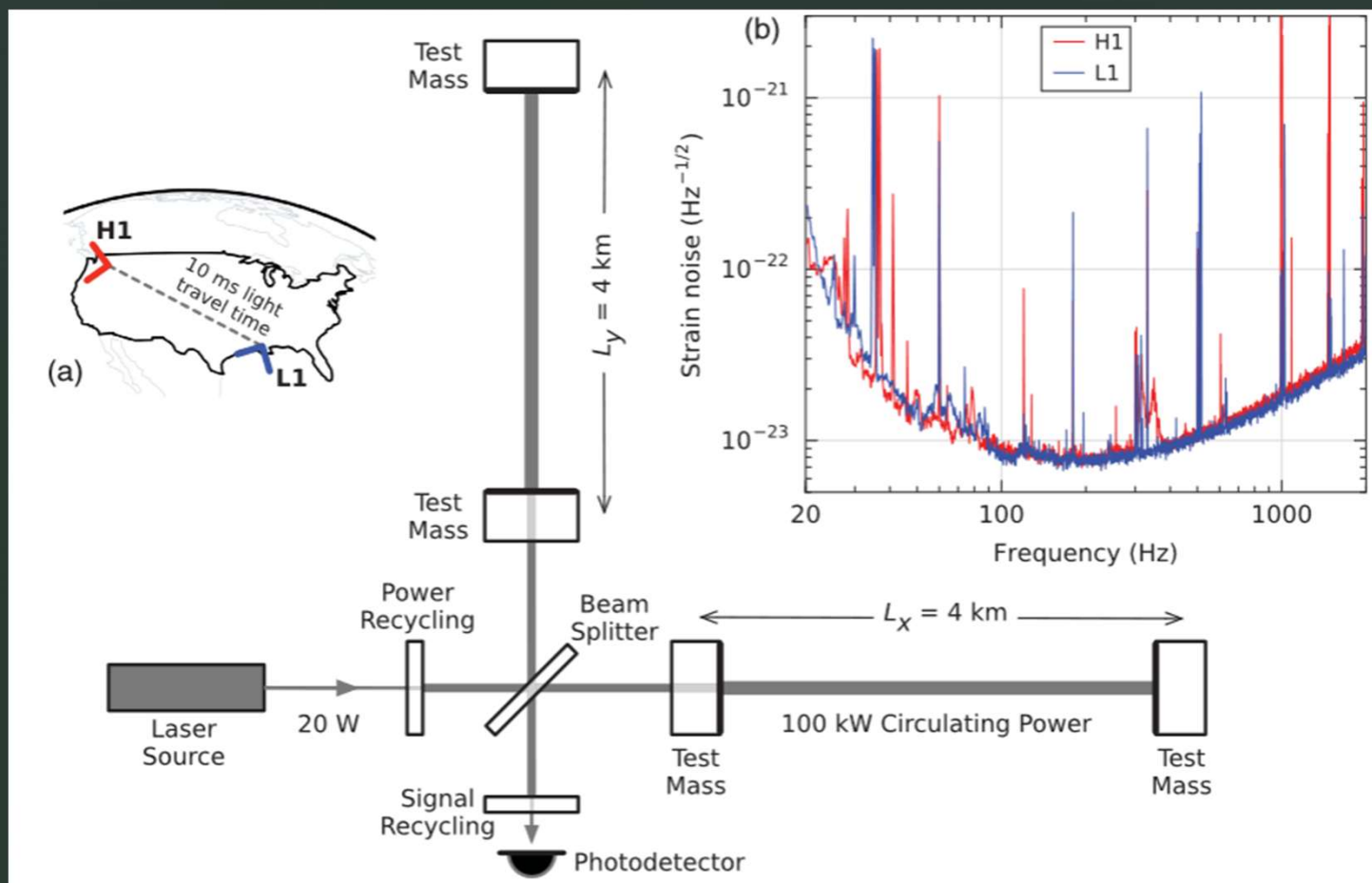
Прохождение гравитационной волны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра. Это можно измерить.

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



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

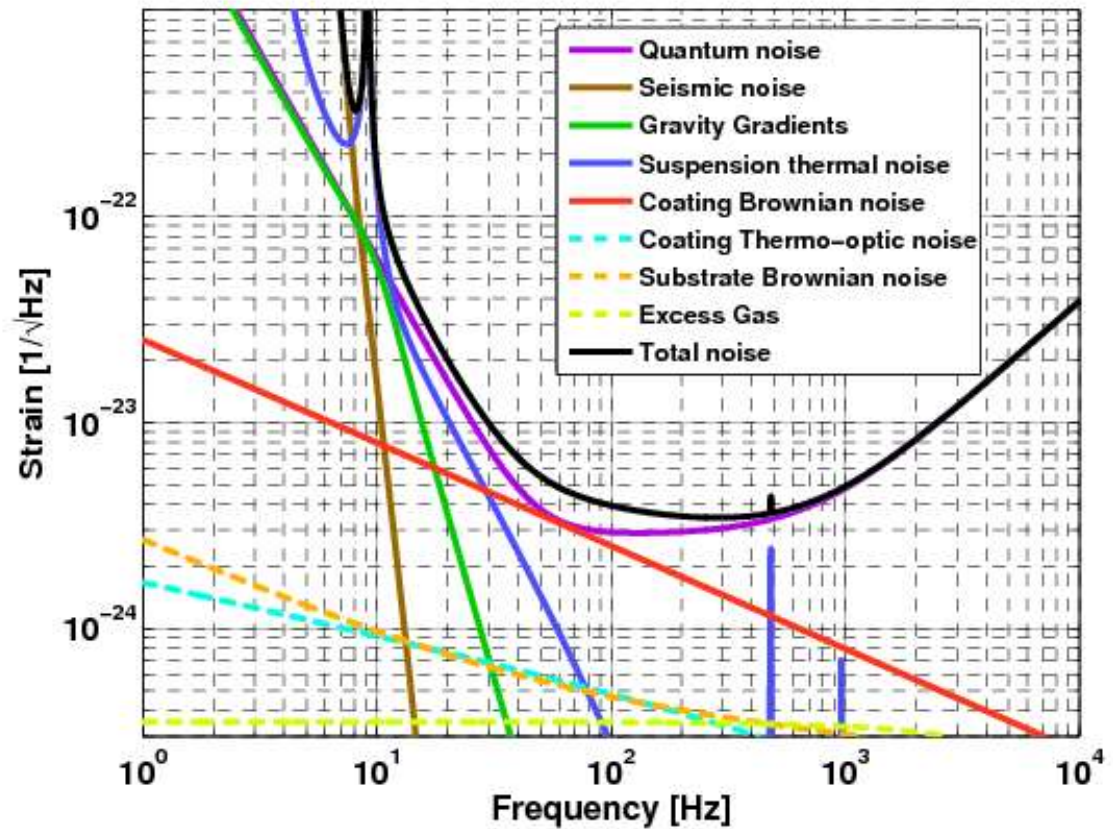
Детекторы и их чувствительность



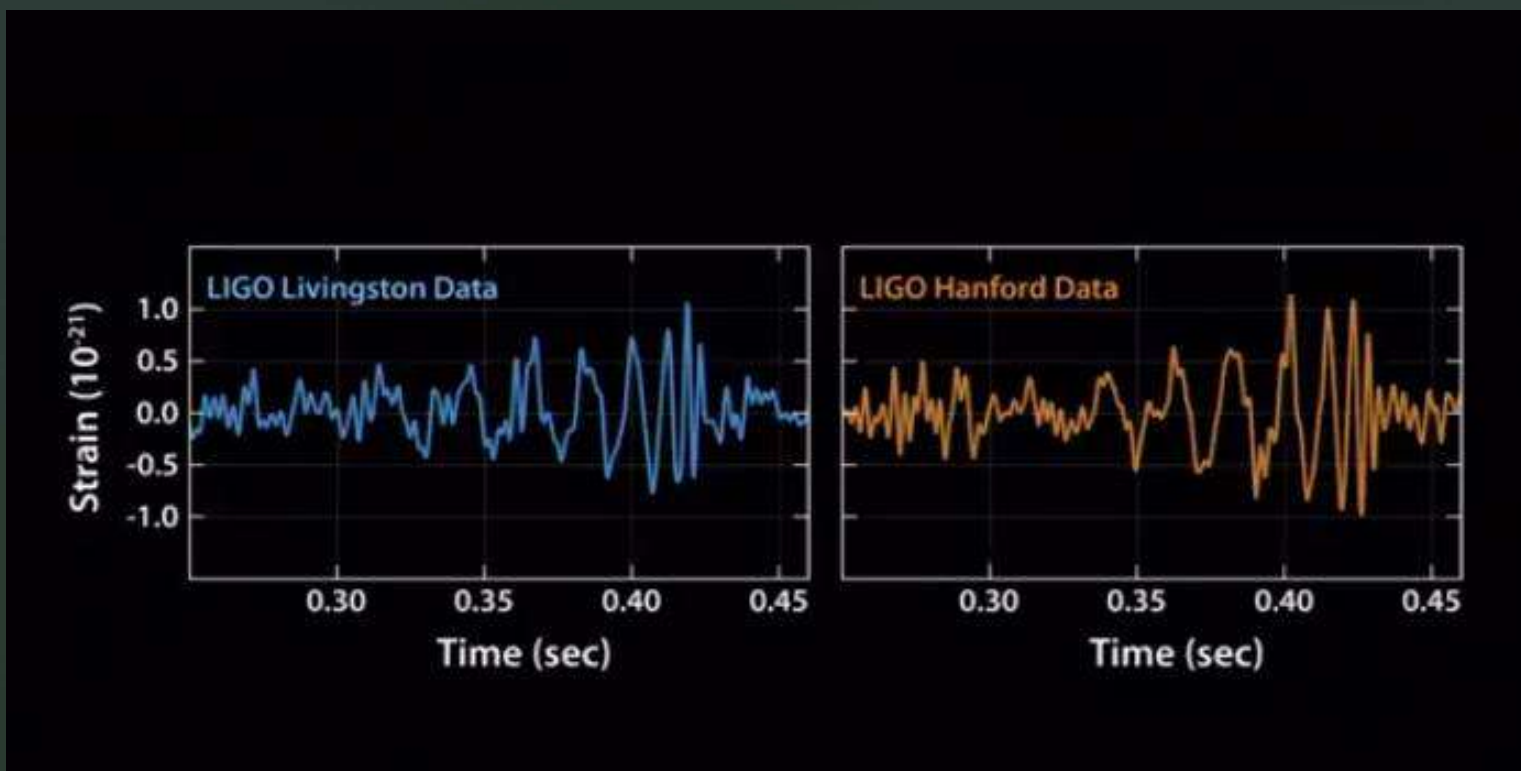
Разнообразные шумы

Влияют как внешние шумы, так и шумы самого детектора.

Совершенствование инструментов в первую очередь связано с борьбой с шумами.



Первый всплеск: GW150914

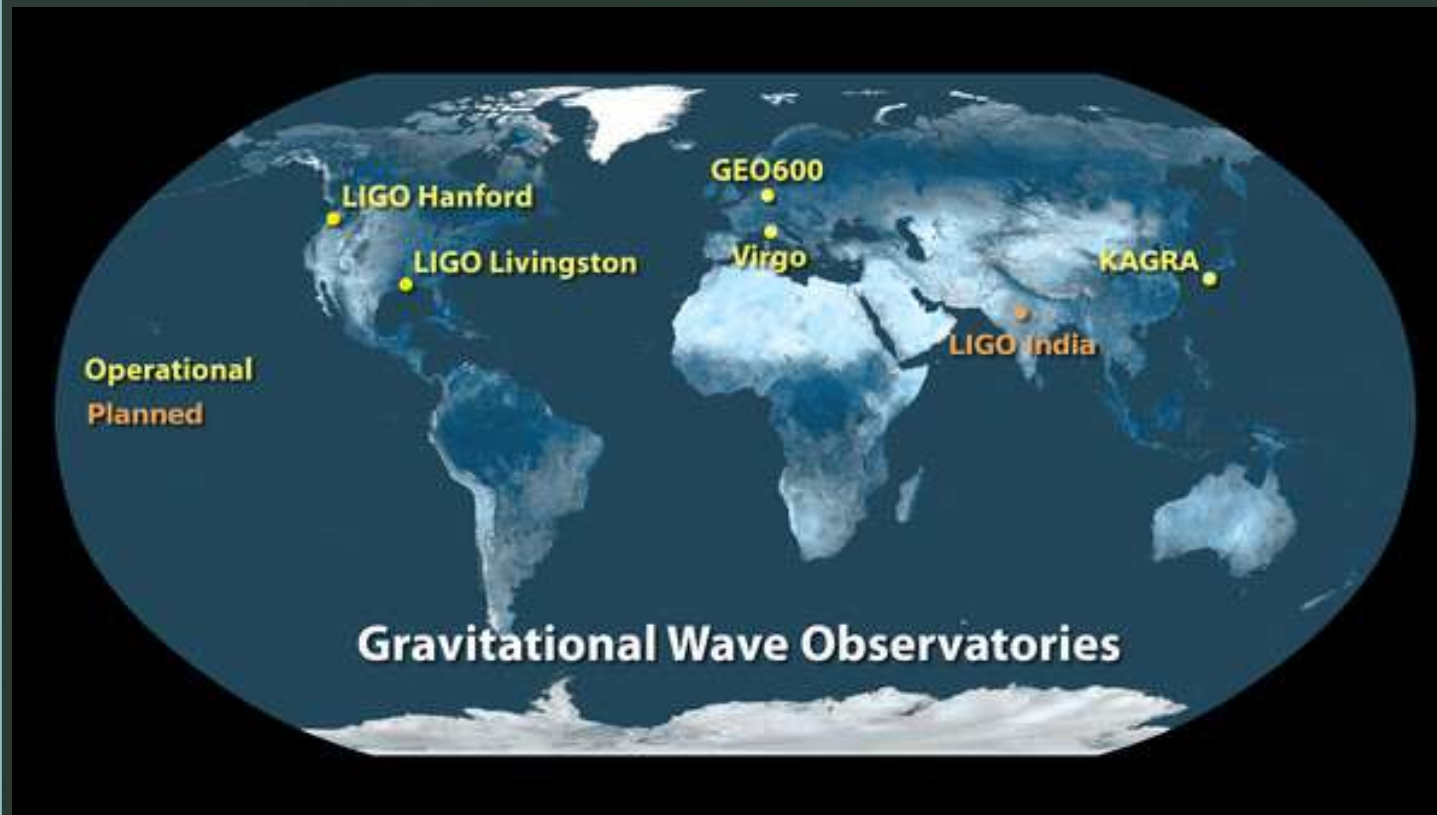


Официальное объявление 11 февраля 2016 года.
За 16 дней совместных наблюдений двух детекторов
надежно обнаружено одно событие – слияние двух черных дыр в >400 Мпк от нас.

Современные и будущие детекторы

В Advanced LIGO большой вклад внесли Австралия, Великобритания и Германия.

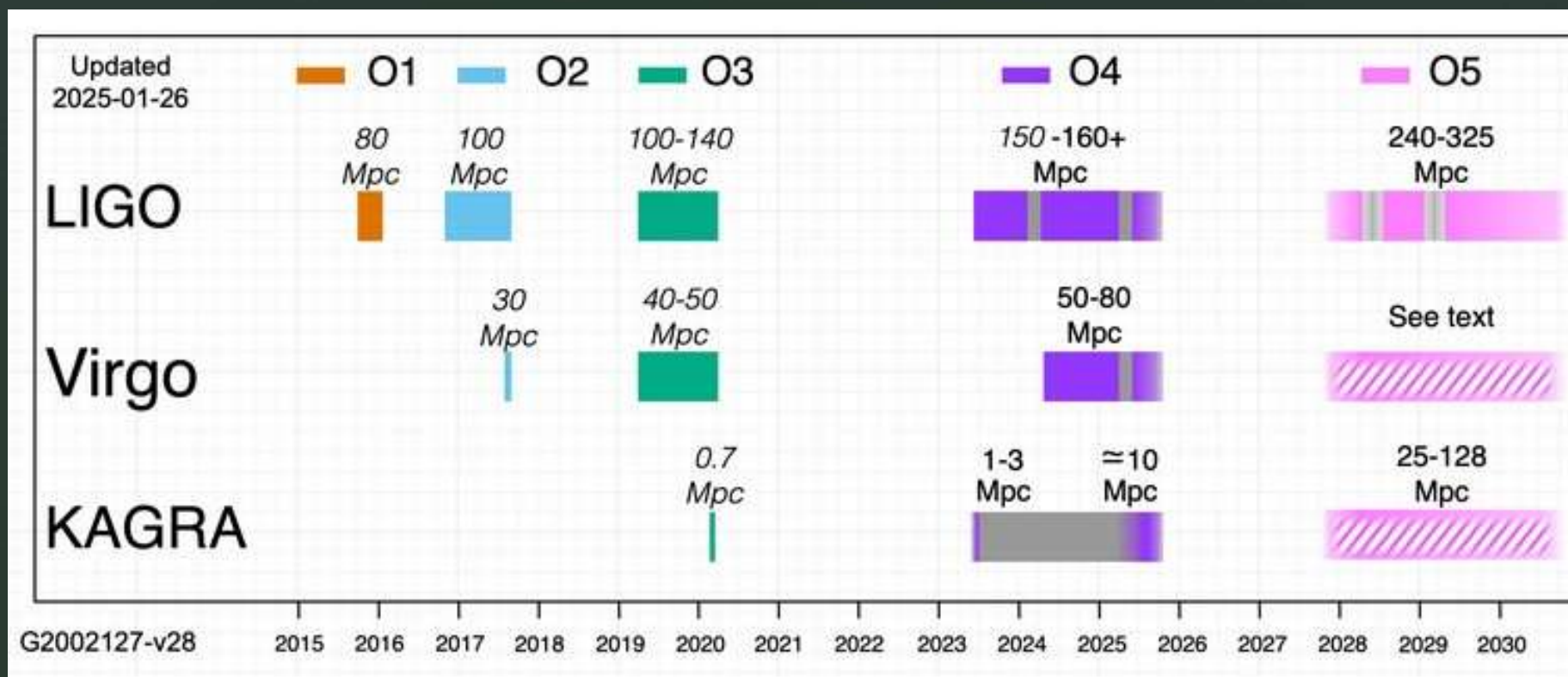
В текущую работу Virgo – Нидерланды и Франция.



LIGO-India в >2030 г.

KAGRA - с 2020 г.

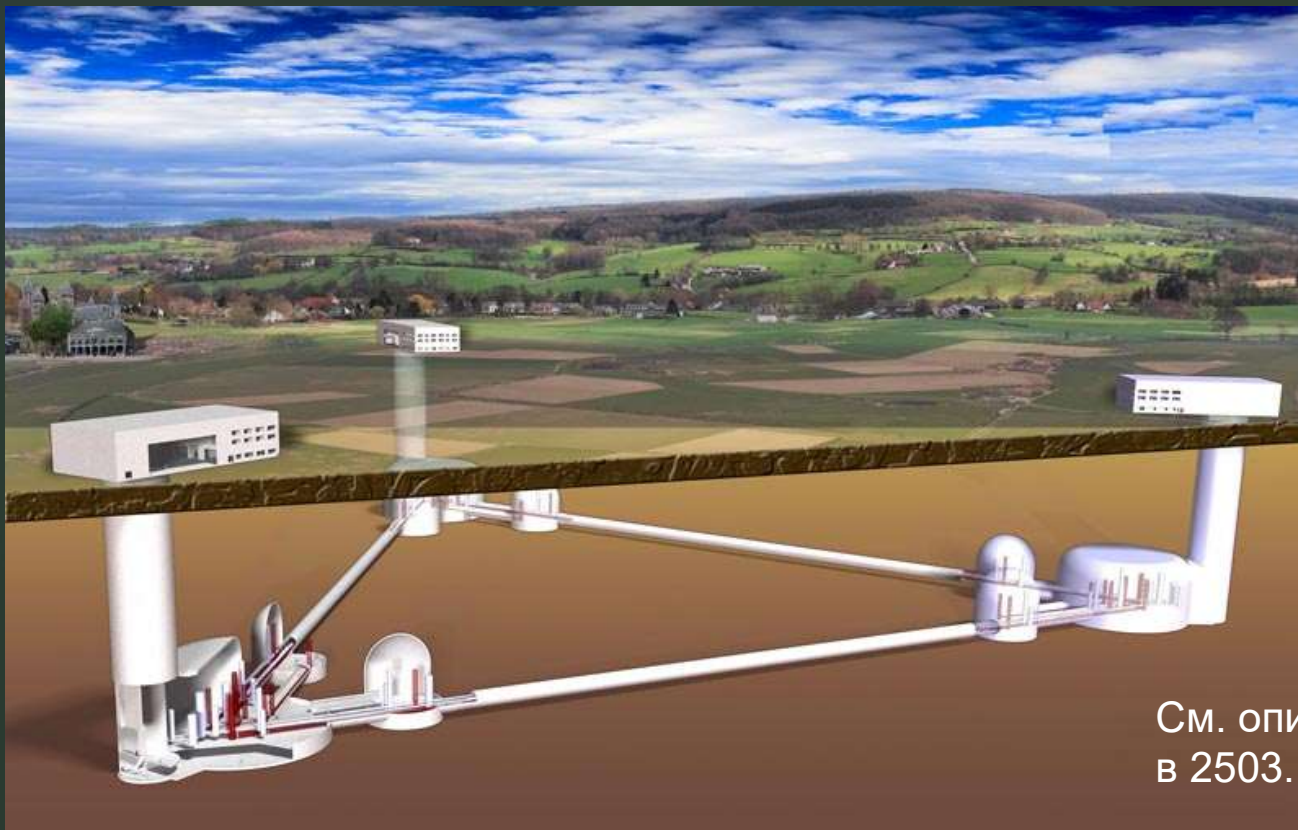
Совместные наблюдения в ближайшем будущем



Возможно, будет еще полугодовой сеанс наблюдений в конце 2026-начале 2027 гг.

Einstein Telescope

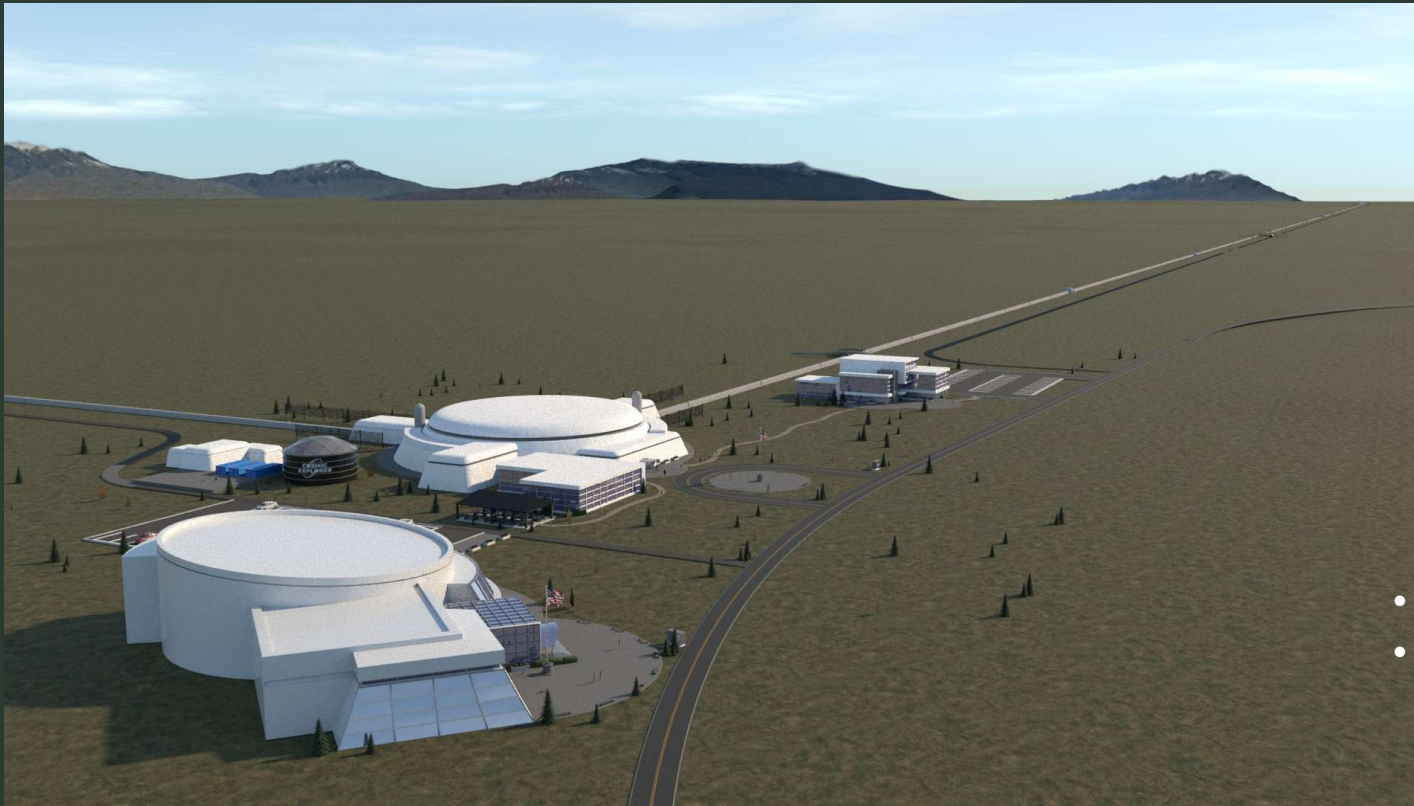
Установка третьего поколения. В 2017 г. закончился этап технической разработки проекта. Широкая полоса 1Hz- 10 kHz. Высокая чувствительность.



См. описание научных задач
в 2503.12263.

Cosmic Explorer

Американский проект детектора следующего поколения.



Новое поколение детекторов с более высокой чувствительностью позволит изучать интересные эффекты, связанные со слияниями черных дыр и нейтронных звезд.

- Релаксация горизонта
- «Эхо» от горизонта или гипотетической поверхности

Пульсары и гравитационные волны

Сажин (1978), Детвейлер [Detweiler] (1979)

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -H^{ij} \left[h_{ij}(t_e, x_e^i) - h_{ij}(t_e - D/c, x_p^i) \right]$$

$$R(t) = - \int_0^t \frac{\delta\nu}{\nu} dt.$$

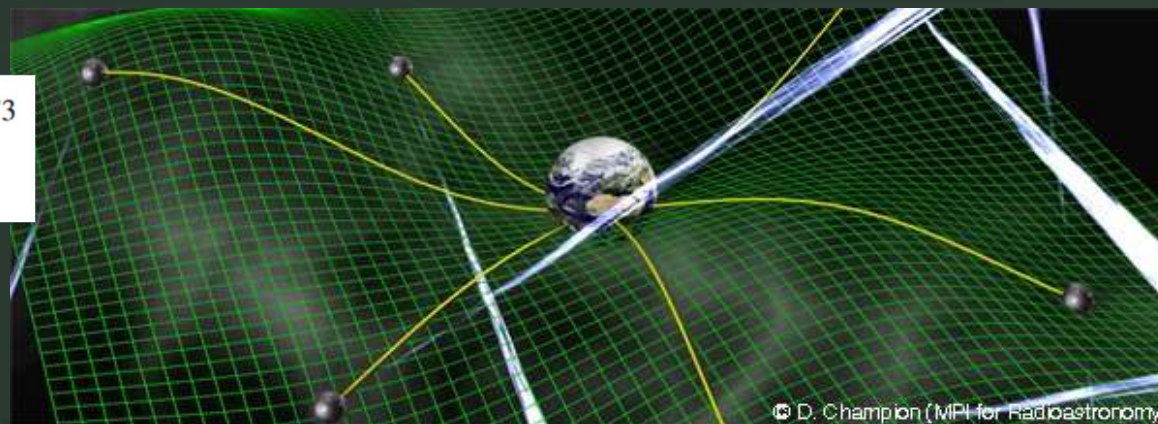
$$R_e(t) = \int_0^t \frac{P_+ A_+(t) + P_\times A_\times(t)}{2(1 - \gamma)} dt$$

$$\Delta t \sim 10\text{ns} \left(\frac{1\text{Gpc}}{d} \right) \left(\frac{M}{10^9 M_\odot} \right)^{5/3} \left(\frac{10^{-7}\text{Hz}}{f} \right)^{1/3}$$

Наблюдения большого количества радиопульсаров с хорошими временными характеристиками должны позволить выделить сигнал в точке наблюдения.

Будут наблюдаться скоррелированные изменения отклонения во времени прихода импульсов.

Периоды волн $\sim$ (недель – лет)



© D. Champion (MPI for Radioastronomy)

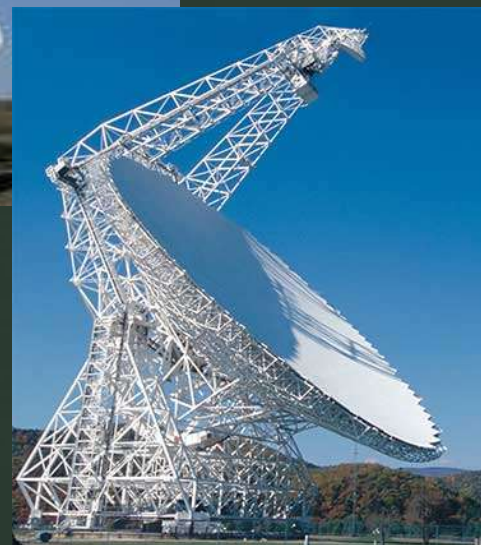
Три проекта и их объединение

$\text{IPTA} = \text{PPTA} + \text{EPTA} + \text{NANOGrav}$

<http://ipta4gw.org/>



PPTA – Телескоп в Парксе
NANOGrav – GBT и Аресибо
EPTA – Эффелсберг, Сардиния,
Джодрелл Бэнк, Нанси, Вестерборк

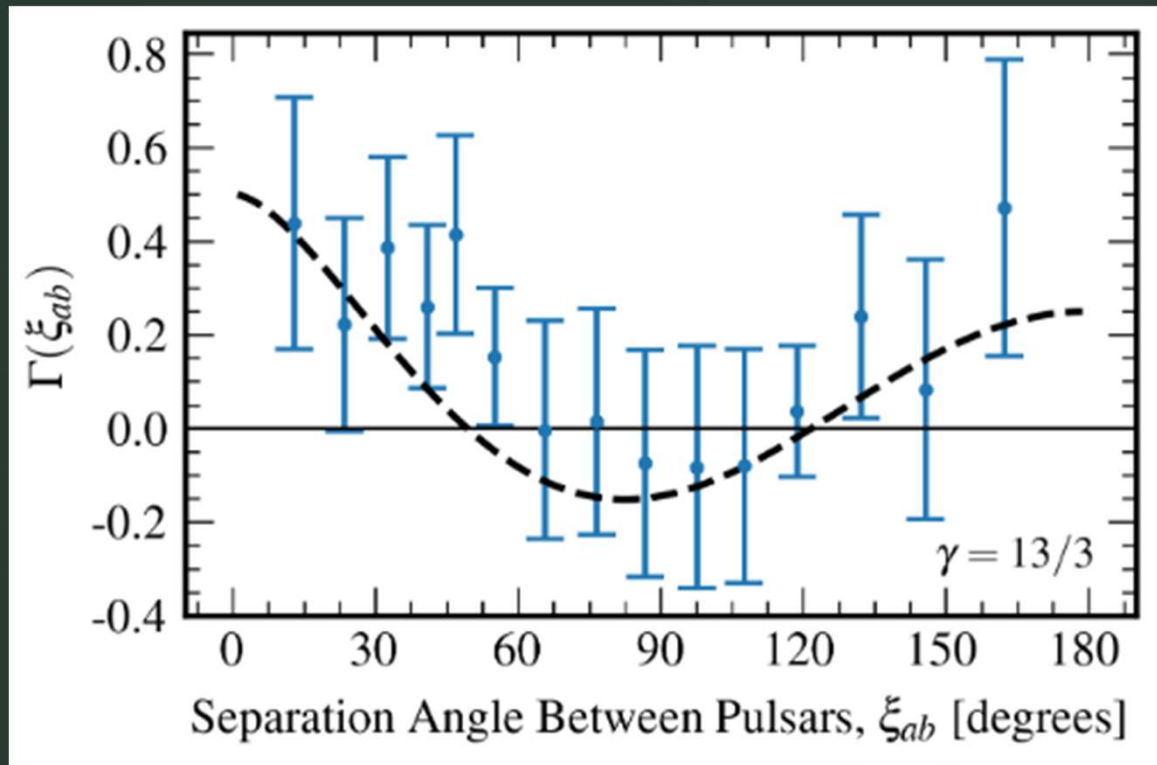


Гравволновой фон

В 2023 г. впервые появились заявления о регистрации сигнала, соответствующего ожиданиям для гравволнового фона.

ERTA (24.7 года, 25 пульсаров)
NANOGrav (15 лет, 68 пульсаров)
RPTA (18 лет, 30 пульсаров)
InPTA (3.5 года, 10 пульсаров)
+ китайская сеть CPTA
+ MeerKAT

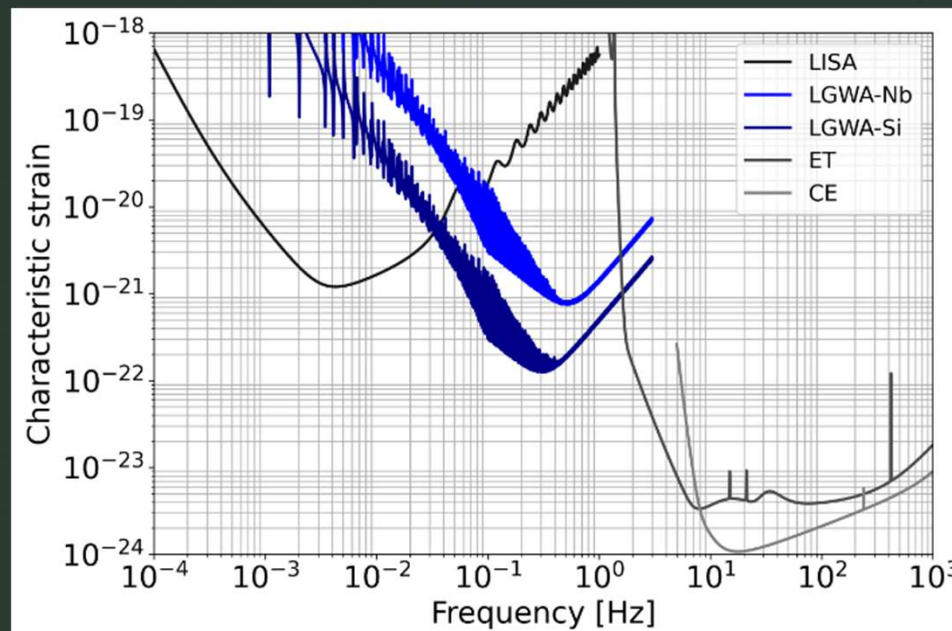
+SKA (скоро)
+идеи по гамма-наблюдениям



2306.16213, 2306.16214

Лунная гравволновая антенна

0.001-1 Hz. Вибрации Луны, вызванные гравволнами.



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 Ютубе
<https://www.youtube.com/@superobjects>

А. В. Засон, К. А. Постнов

Общая АСТРОФИЗИКА

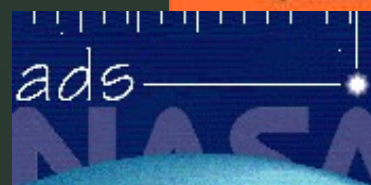


ВСЕЛЕННАЯ

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



Cornell University
Library

arXiv.org



Совместный проект
Политехнического
музея и издательства
«Аполлон-конфессант»

КНИГИ ПОЛИТЕХА