



КОРОТКО О КУРСЕ «ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ»

ПОЛЕЗНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ЛЕКТОР

- Антон Владимирович Бирюков
Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга МГУ, ст. науч. сотр., к.ф.-м.н.
- Интересы: нейтронные звёзды, астрономия высокого временного разрешения, наблюдения и обработка наблюдательных данных (в оптическом диапазоне), астрономическое образование.
- E-mail: ant.biryukov@gmail.com, avbiryukov@hse.ru
- Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=86GcPYMAAAJ&hl=ru>
- NASA ADS: <https://ui.adsabs.harvard.edu/public-libraries/lxwSTcuaQIWMwJLLX3kgHw>

ПРОГРАММА КУРСА

- 10 лекций и 10 семинаров (семинары ведёт Александра Авдеева)
- Домашнее задание после каждой лекции*
- Устный экзамен 23 июня

1	7 апреля	Астрономия: знакомство
2	14 апреля	Астрометрия: где находятся и как движутся небесные тела?
3	21 апреля	Элементы небесной механики
4	28 апреля	Излучение в астрофизике. Методы фотометрии и спектроскопии
5	12 мая	Солнце как звезда: строение, физика, эволюция
6	19 мая	Свойства и эволюция звёзд разной массы
7	26 мая	Компактные релятивистские остатки звёздной эволюции: обзор
8	2 июня	Млечный путь и другие галактики
9	9 июня	Элементарное введение в космологию
10	16 июня	*Плазма во Вселенной, элементарное введение в МГД

ЛЕКЦИЯ I: ЗНАКОМСТВО С СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИЕЙ

3

* Тема #10 не идёт в экзамен и по ней не будет ДЗ. Возможно, она будет даже исключена из программы, если понадобится дополнительное время для завершения остальных тем курса.

ОТЧЁТНОСТЬ И ОЦЕНКИ

- Каждое домашнее задание оценивается от 0 до 10 баллов
- Ответ на экзамене также оценивается от 0 (неявка) до 10 баллов
- **Промежуточная оценка** выставляется по итогам 9 домашних заданий как среднее арифметическое. Если промежуточная оценка выше 8.0, то, по желанию студента, она может быть засчитана как итоговая. В этом случае экзамен сдавать не нужно. Итоговая оценка будет равна округлённой промежуточной (по арифметическому правилу $8.49 \rightarrow 8, 8.50 \rightarrow 9$ и т.п.).
- Для тех, кто будет сдавать экзамен, итоговая оценка будет рассчитываться как среднее арифметическое промежуточной и экзаменационной оценок (с округлением по тому же правилу).

ЛИТЕРАТУРА К КУРСУ

Основная:

- Э.В. Кононович, В. И. Мороз «Общий курс астрономии» (2004+)
https://vk.com/wall-109196188_351, <https://github.com/ant-biryukov/hse2023-astro-BSc>
- А.В. Засов, К.А. Постнов «Общая астрофизика» (2011)
https://mipt.ru/upload/medialibrary/d26/general_astrophysics.pdf,
<https://github.com/ant-biryukov/hse2023-astro-BSc>
- К.А. Постнов «Лекции по общей астрофизике для физиков»
<http://www.astronet.ru/db/msg/1176797>

ЛИТЕРАТУРА К КУРСУ

Дополнительная:

- Crash Course Astronomy
<https://www.youtube.com/watch?v=0rHUDWjR5gg&list=PL8dPuuaLjXtPAJrlysd5yGlyiSFuh0mIL>
- С.А. Ламзин «Физика и эволюция звёзд» (конспект лекций)
<https://github.com/ant-biryukov/hse2023-astro-BSc>
- К.В. Холшевников, В.Б. Титов «Задача двух тел»
<http://www.astro.spbu.ru/sites/default/files/TwoBody.pdf>
- G.B. Rybicky, A. P. Lightman “Radiative processes in Astrophysics”
<https://github.com/ant-biryukov/hse2023-astro-BSc>
- Также полезно просмотреть материалы к лекциям С.Б. Попова для МГУ и ВШЭ
<http://xray.sai.msu.ru/~polar/html/presentations.html>

ЛЕКЦИЯ I: ЗНАКОМСТВО С СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИЕЙ

ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ. ВШЭ 2022/2023. БАКАЛАВРЫ, 4-Й МОДУЛЬ.

АНТОН БИРЮКОВ (АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МГУ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА И ВШЭ), К.Ф.-М.Н

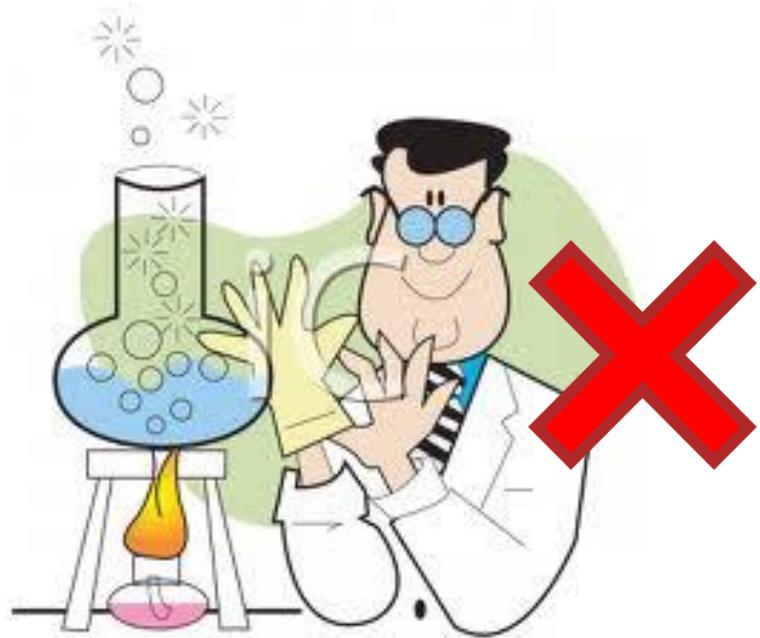


АСТРОНОМИЯ СЕГОДНЯ

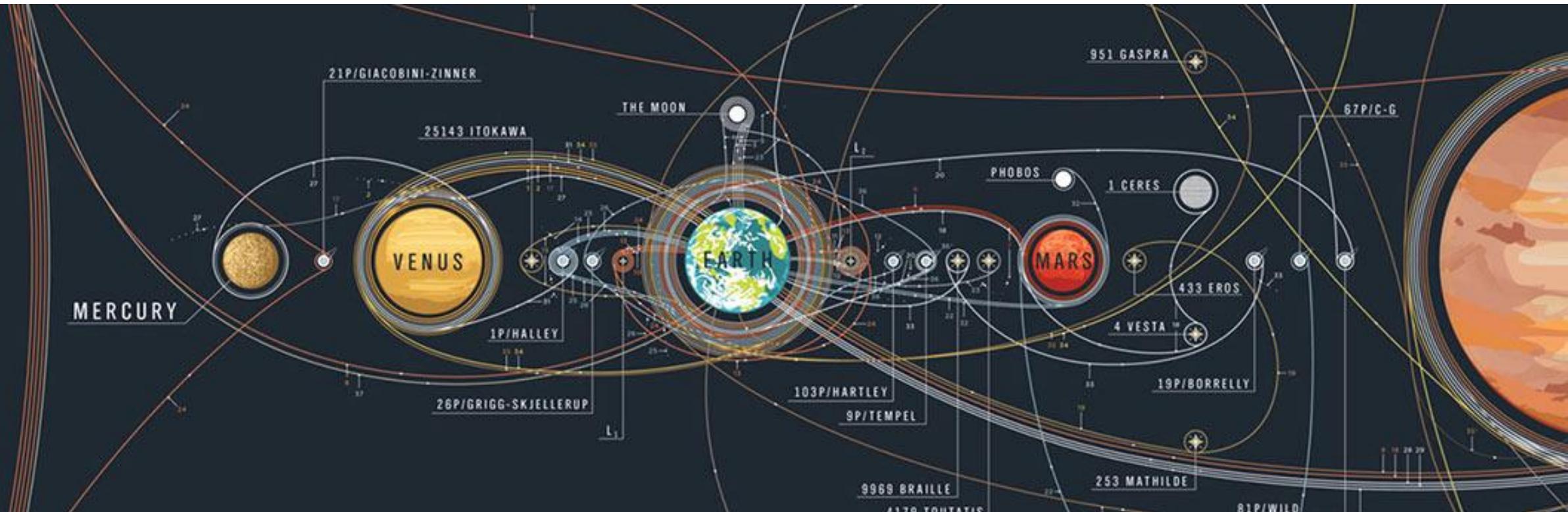
НЕСКОЛЬКО ВАЖНЫХ ФАКТОВ

ФАКТ I: АСТРОНОМИЯ ВСЁ ЕЩЁ НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ НАУКА

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



ФАКТ IА: ХОТЯ, БЫВАЕТ И КОНТРОЛИРУЕМЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ



К сегодняшнему дню отработали (или продолжают работу) около 150 успешных миссий.

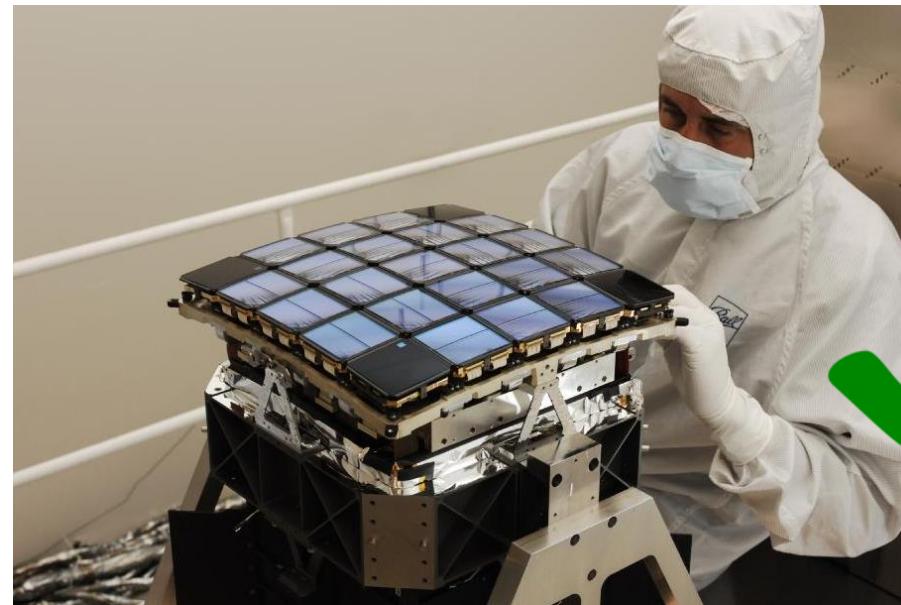
ФАКТ 2: В ТЕЛЕСКОП НЕ СМОТРЯТ ГЛАЗОМ

В 19 веке в астрономию пришла фотография (на фотопластинках). Последние 30+ лет используются электронные приёмники, в основном на внутреннем фотоэффеekte. В радиоастрономии – болометры и радиометры (антенны). В гамма-астрономии – сцинтилляторы.

А вне видимого диапазона глаз вообще бесполезен.



ЛЕКЦИЯ I: ЗНАКОМСТВО С СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИЕЙ



Сборка мозаики из CCD-матриц для фокальной плоскости космической обсерватории Kepler.

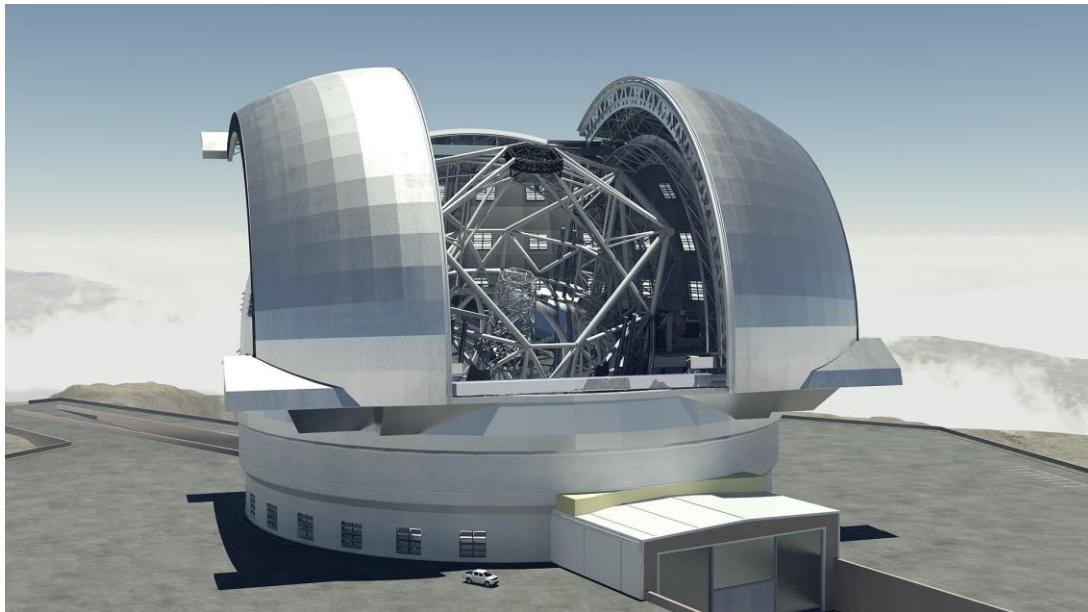
ФАКТ 3: НАБЛЮДАТЕЛЬ НЕ УПРАВЛЯЕТ ТЕЛЕСКОПОМ

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



ФАКТ 4: ИГРУШКИ У НАС ОБЩИЕ

Основные результаты получают на больших, дорогих инструментах коллективного конкурсного использования.



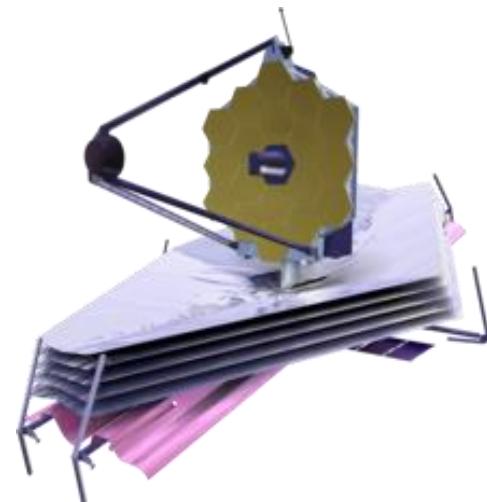
Extremely Large Telescope

(Европейская Южная Обсерватория)

Диаметр: 39.3 м

Стоимость: ~ \$2,000 М

Первый свет: 2027 г.



James Webb Telescope (NASA)

Диаметр: 6.5 м

Стоимость: ~ \$10,000 М

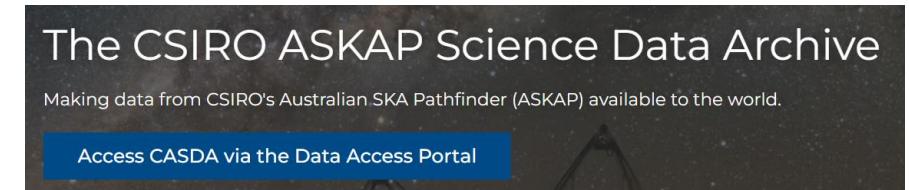
Первый свет: 2022 г.

ФАКТ 5: ДАННЫЕ ТОЖЕ ОБЩИЕ

Зачастую полученные данные сразу становятся открытыми для всех. Крупные, дорогие инструменты должны эффективно использоваться. Кроме того, необходима перепроверка важных результатов независимыми исследователями.



<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/>



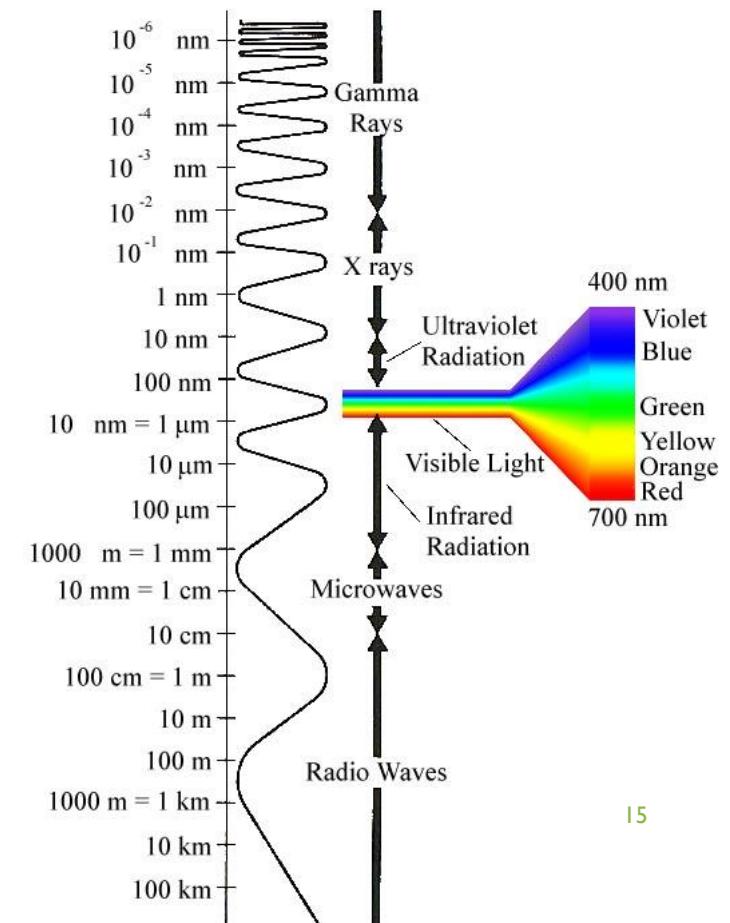
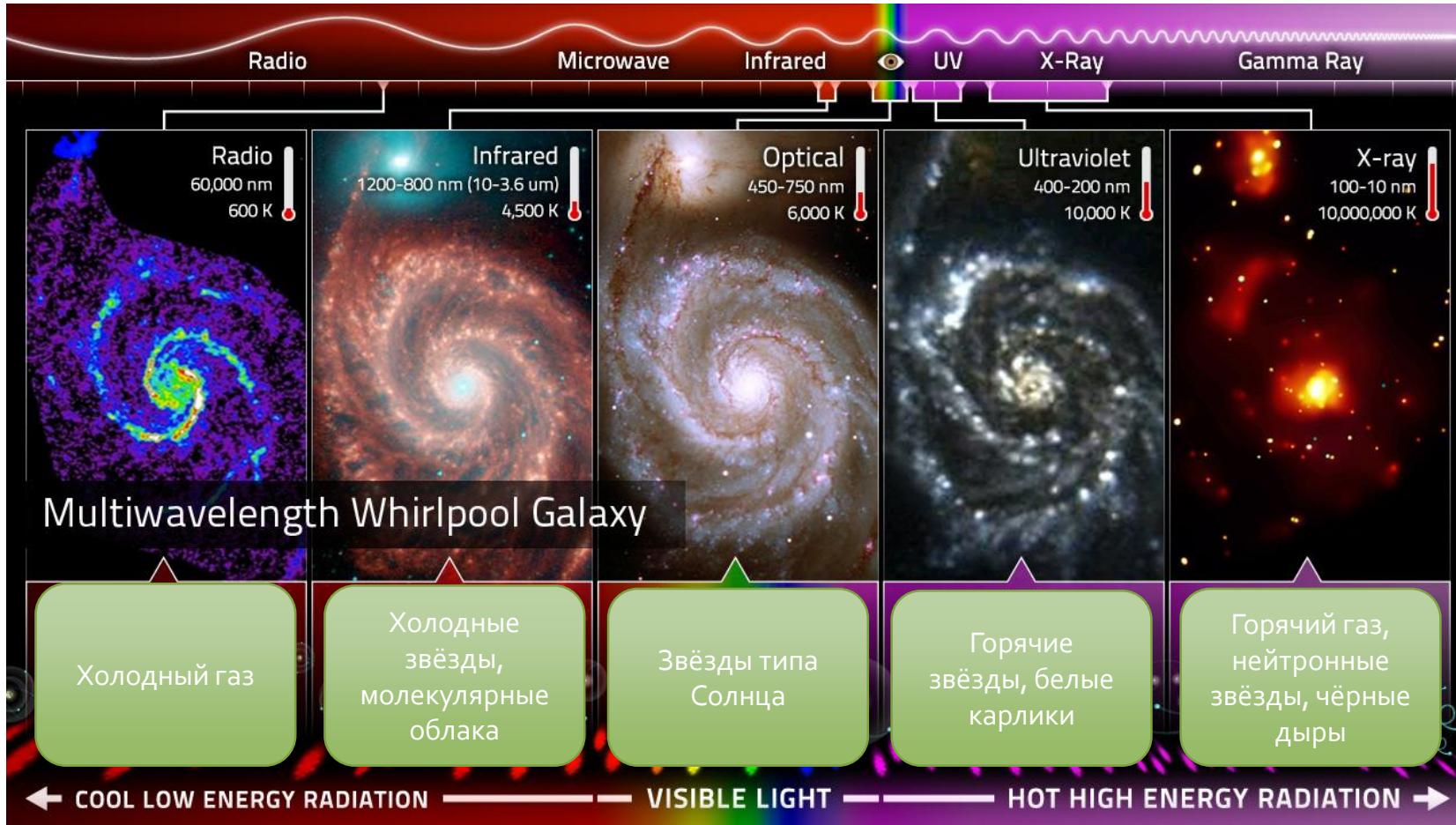
<https://research.csiro.au/casda/>



<https://sites.astro.caltech.edu/~jlc/astronomy/archives.html>

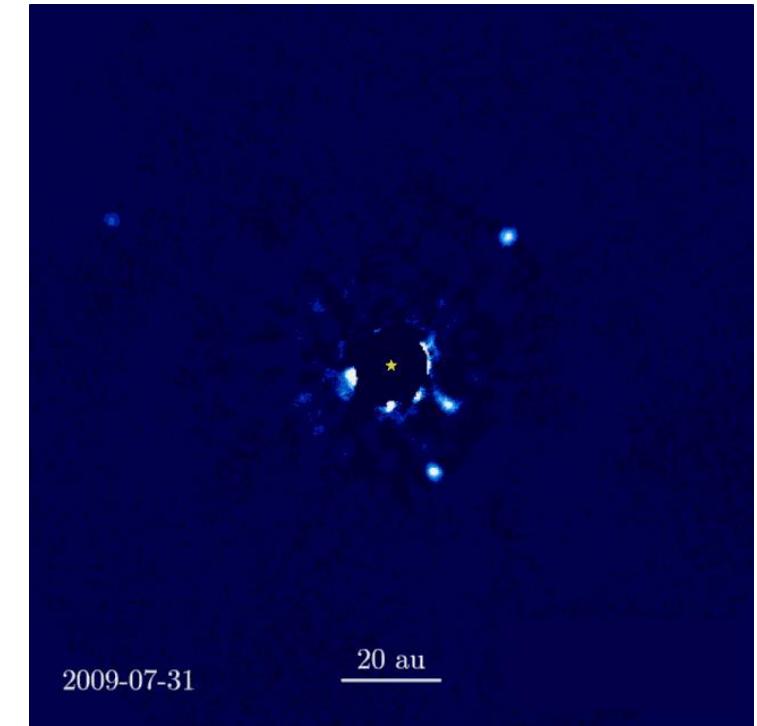
ФАКТ 6: АСТРОНОМИЯ СТАЛА ВСЕВОЛНОВОЙ

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



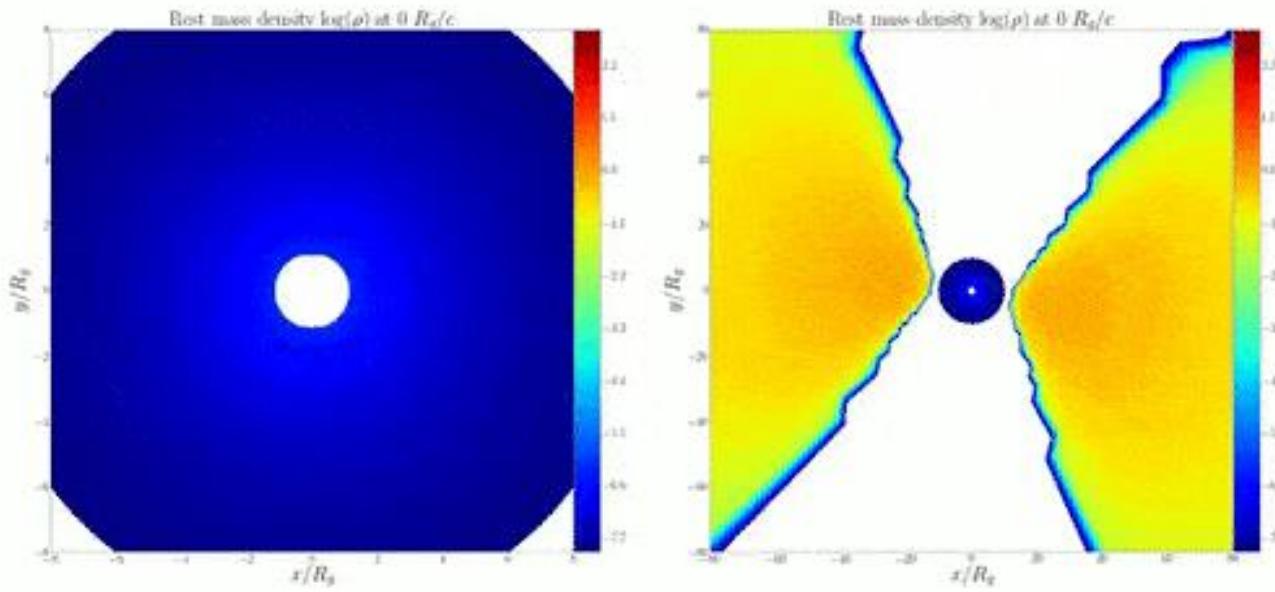
ФАКТ 7: АСТРОНОМЫ ОБРАБАТЫВАЮТ МНОГО ДАННЫХ

Среднестатистический астроном занят обработкой данных. Изображения, которые вы видите, обычно являются итогом длительной и сложной обработки.

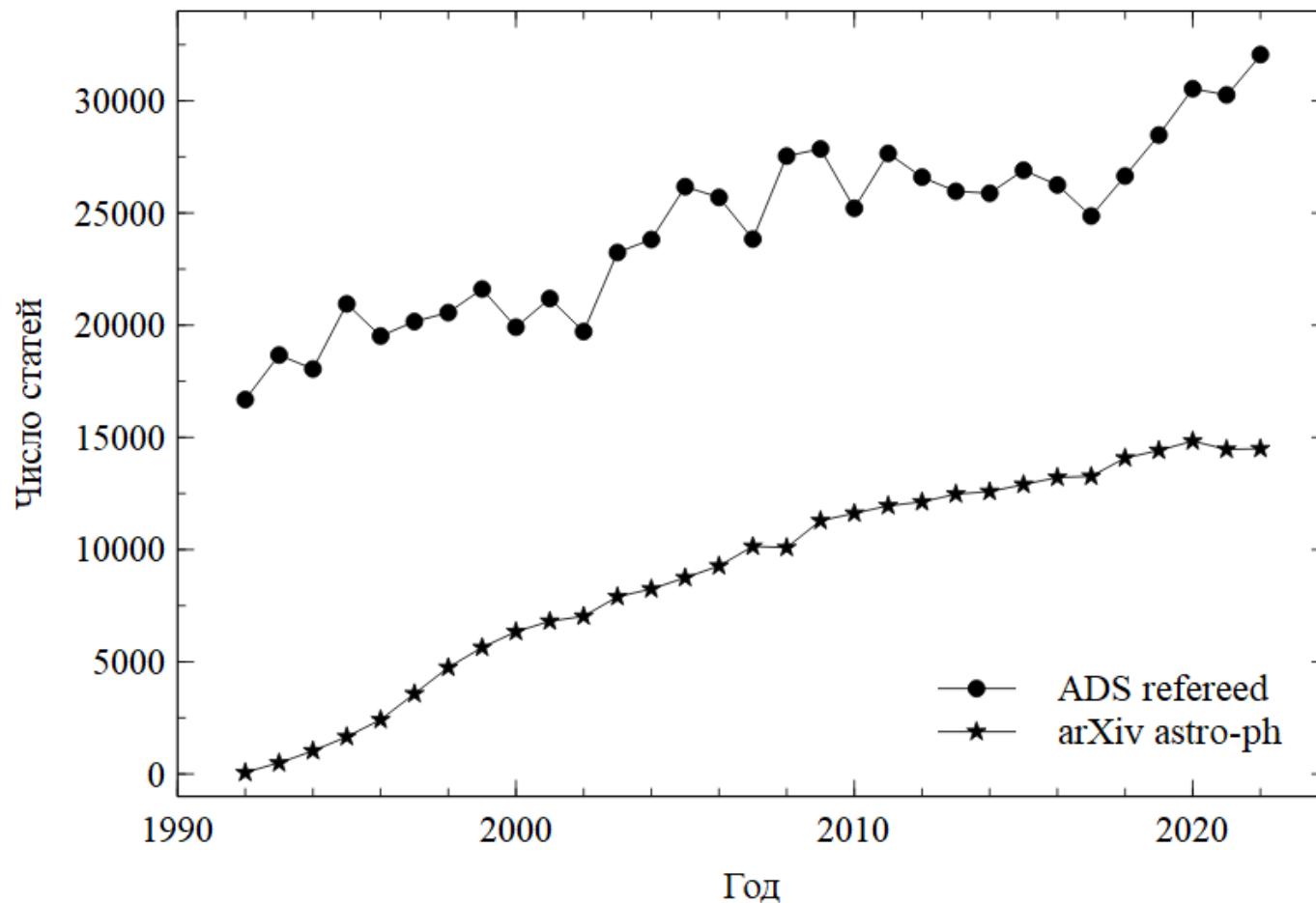


ФАКТ 8: АСТРОНОМЫ МНОГО СЧИТАЮТ

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



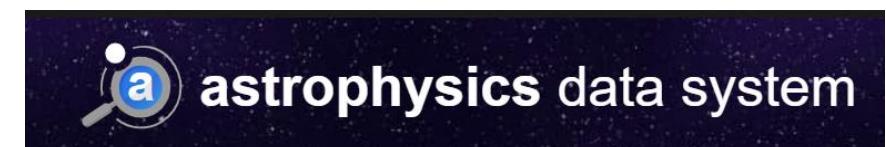
ФАКТ 9: АСТРОНОМЫ – ЭТО НЕ ТОЛЬКО АСТРОНОМЫ



arXiv.org > astro-ph

Astrophysics

<https://arxiv.org/list/astro-ph/new>



<https://ui.adsabs.harvard.edu/>

~60 тыс. из ~340 тыс. реферируемых работ по астрономии/астрофизике, опубликованных за последние 10 лет, ни разу не цитировались.

ФАКТ 9А: ТАКИЕ РАЗНЫЕ АСТРОНОМЫ

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



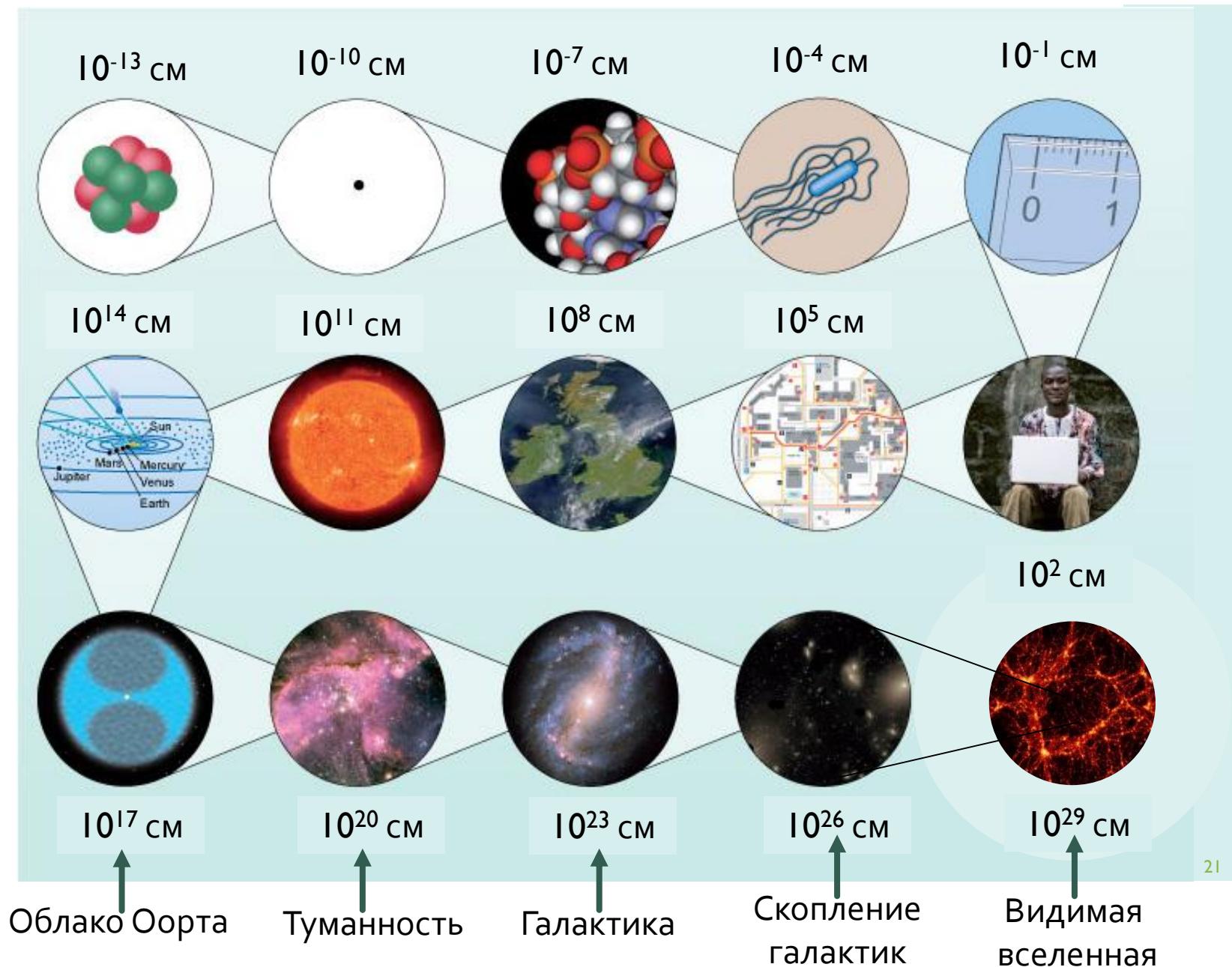
МЕТОДЫ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ АСТРОНОМИИ

КАК ИССЛЕДУЮТ ТО, ЧТО СВЕТИТ?

МИР АСТРОНОМИИ

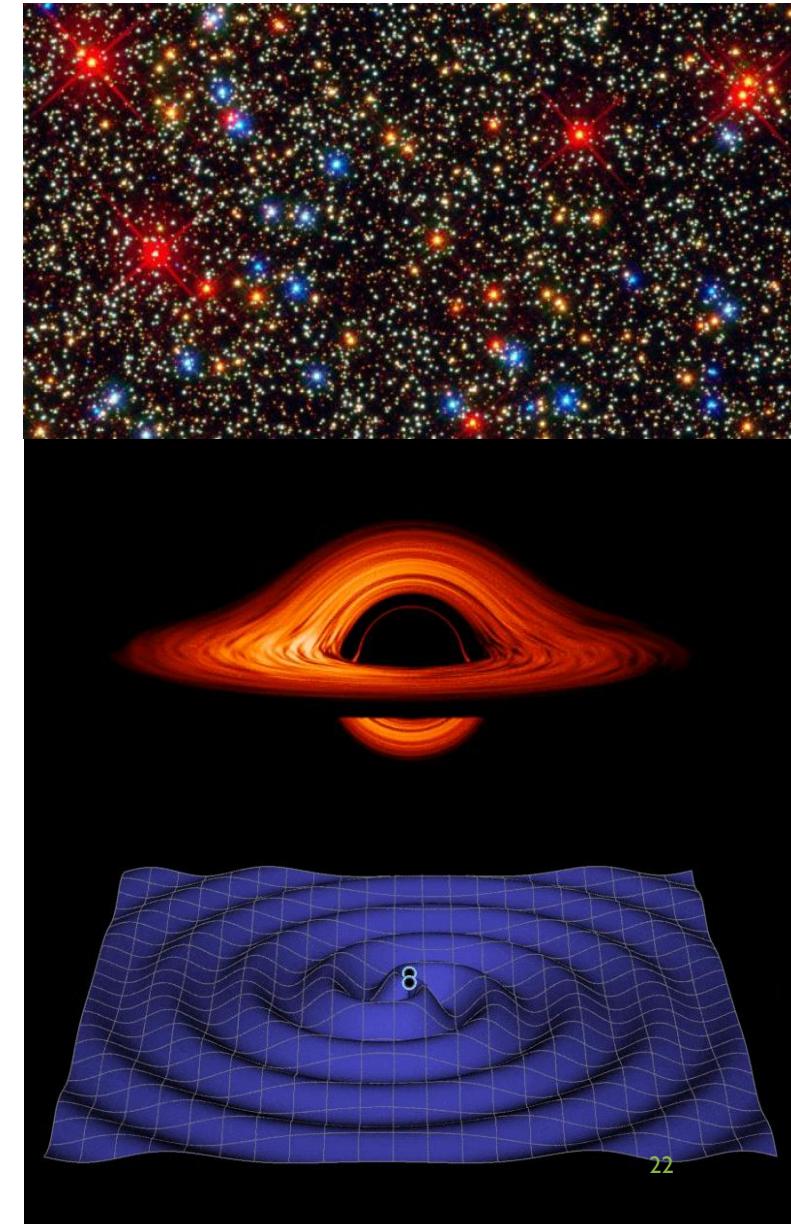
Астрономия – это наука о происхождении, строении, эволюции небесных тел и образованных ими систем.

Масштабы, интересные астрофизикам, начинаются с планковской длины (10^{-33} см) и заканчиваются, по крайней мере, наблюдаемой вселенной (10^{29} см).



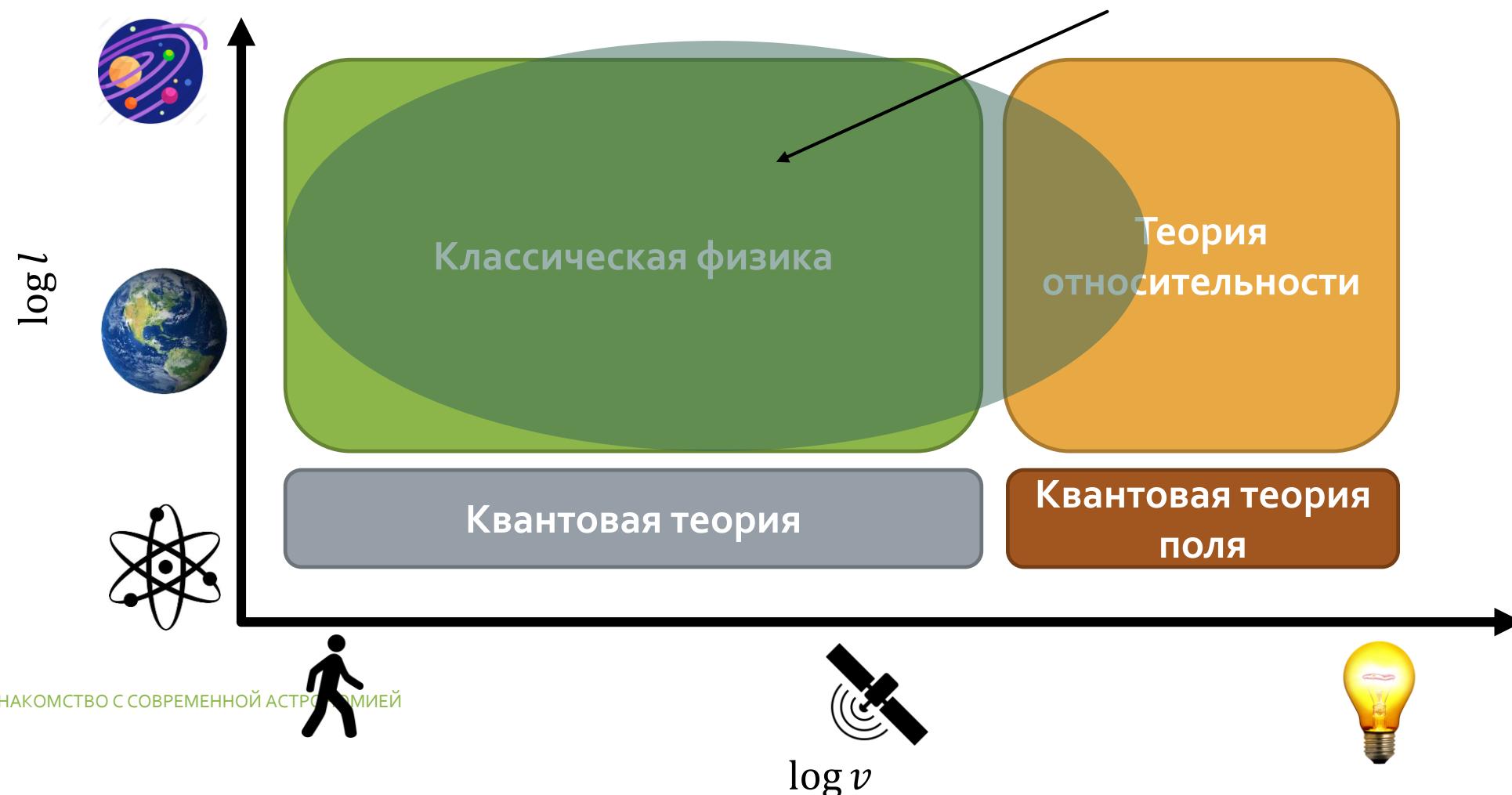
ТАК-ТО НЕ ВСЁ СВЕТИТ! Но...

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



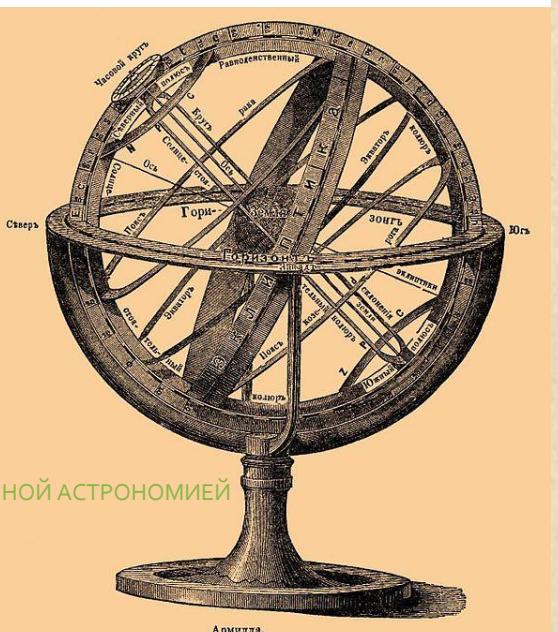
АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

Классическая астрономия:
астрометрия + фотометрия + небесная механика =
“геометрия с астрономическим сюжетом”

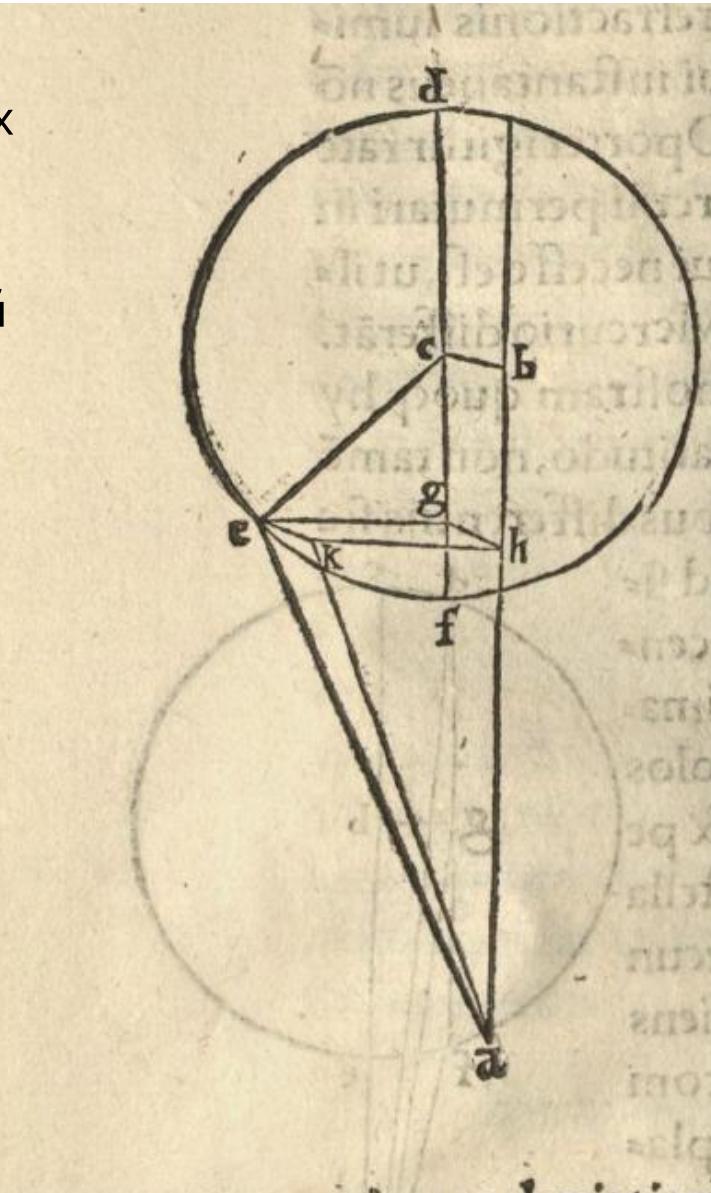


АСТРОНОМИЯ ДО ЭПОХИ ТЕЛЕСКОПОВ

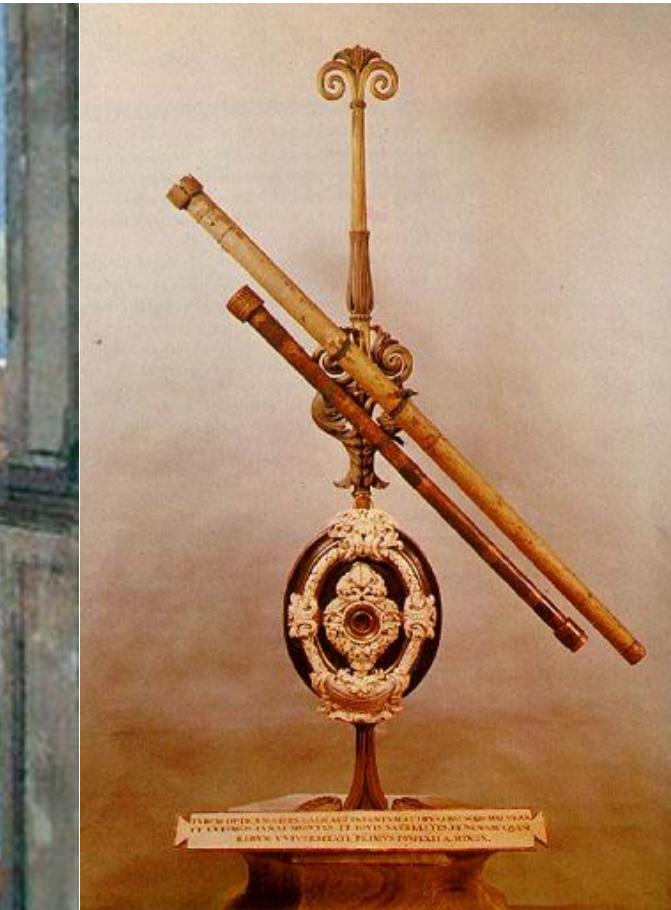
- Измерения углов с помощью простейших угломерных приборов.
- Определение относительных положений звезд и планет.
- Определение времени.



ЛЕКЦИЯ 1: ЗНАКОМСТВО С СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИЕЙ



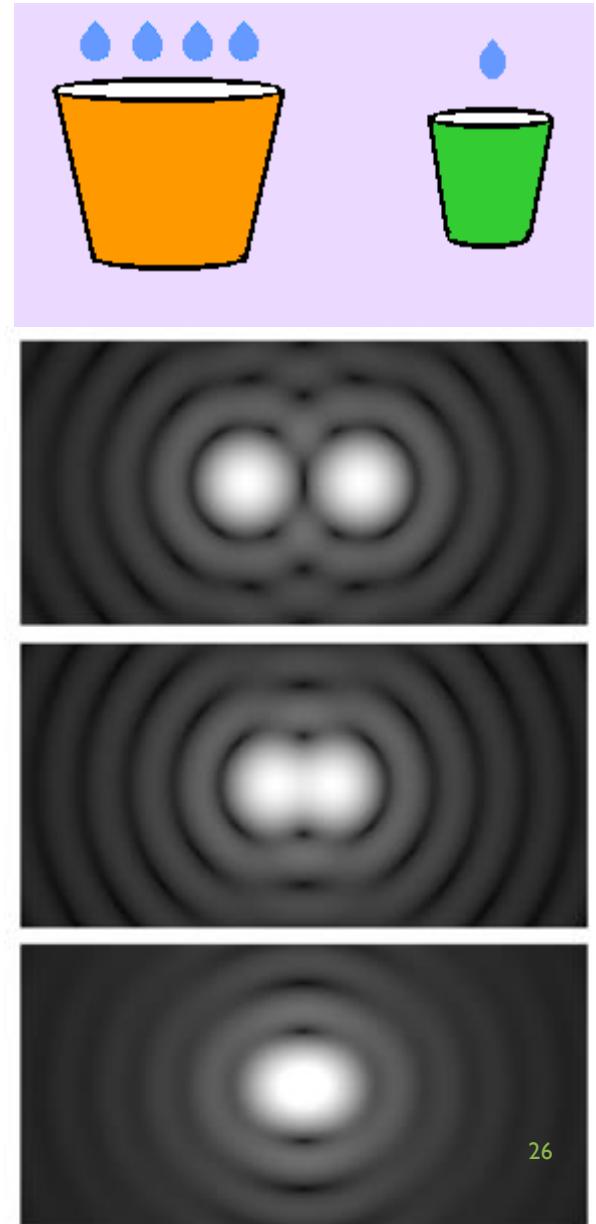
ПЕРВЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ: ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ



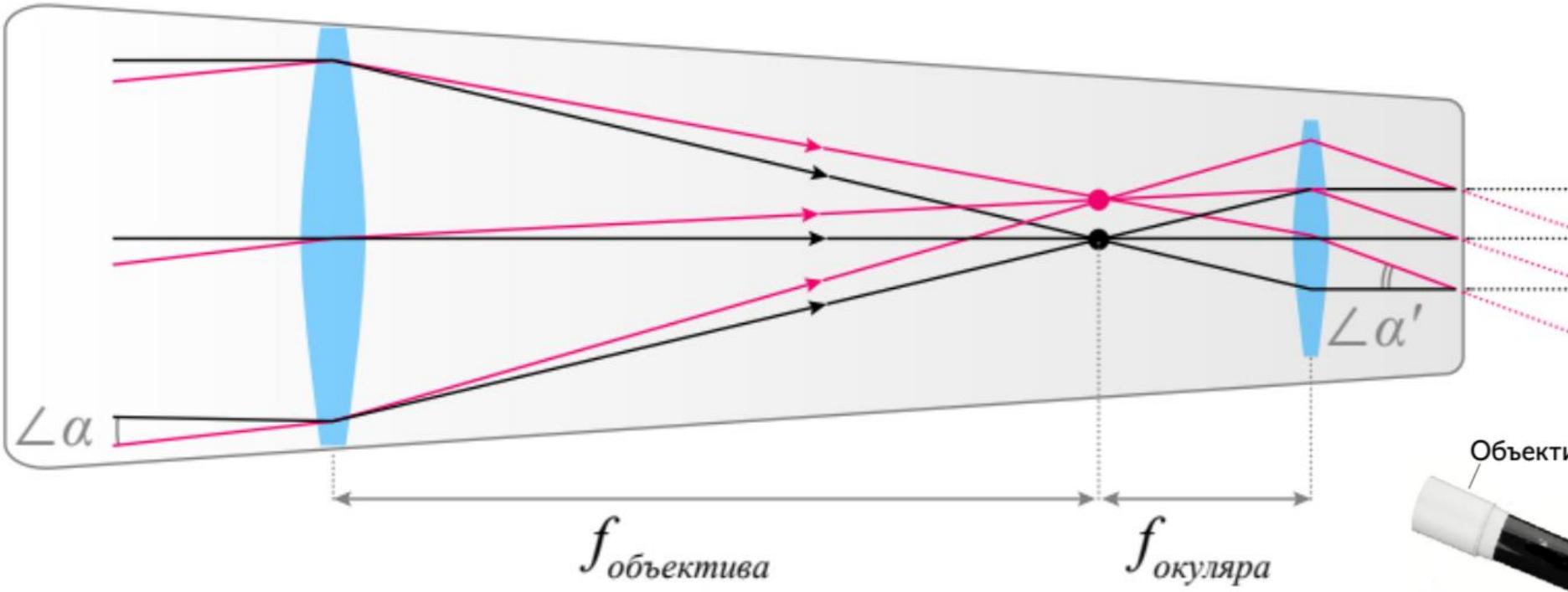
Палец
Галилея

ЗАЧЕМ НУЖЕН ТЕЛЕСКОП?

- Во-первых: чтобы собирать больше света за единицу времени! Чем больше удается собрать света – тем более слабые объекты мы увидим. Количество собираемого света $F \propto D^2$
- Во-вторых: чтобы рассмотреть более мелкие детали. Разрешающая способность телескопа $\theta \propto \lambda/D$
- Диаметр зрачка глаза 5-8 мм.
Д первых телескопов – сантиметры.
Д крупных современных телескопов – до 10 метров.
Строящийся Extremely Large Telescope будет иметь диаметр 40 метров.
Существуют проекты телескопов с D до 100 метров!



ТЕЛЕСКОПЫ-РЕФРАКТОРЫ

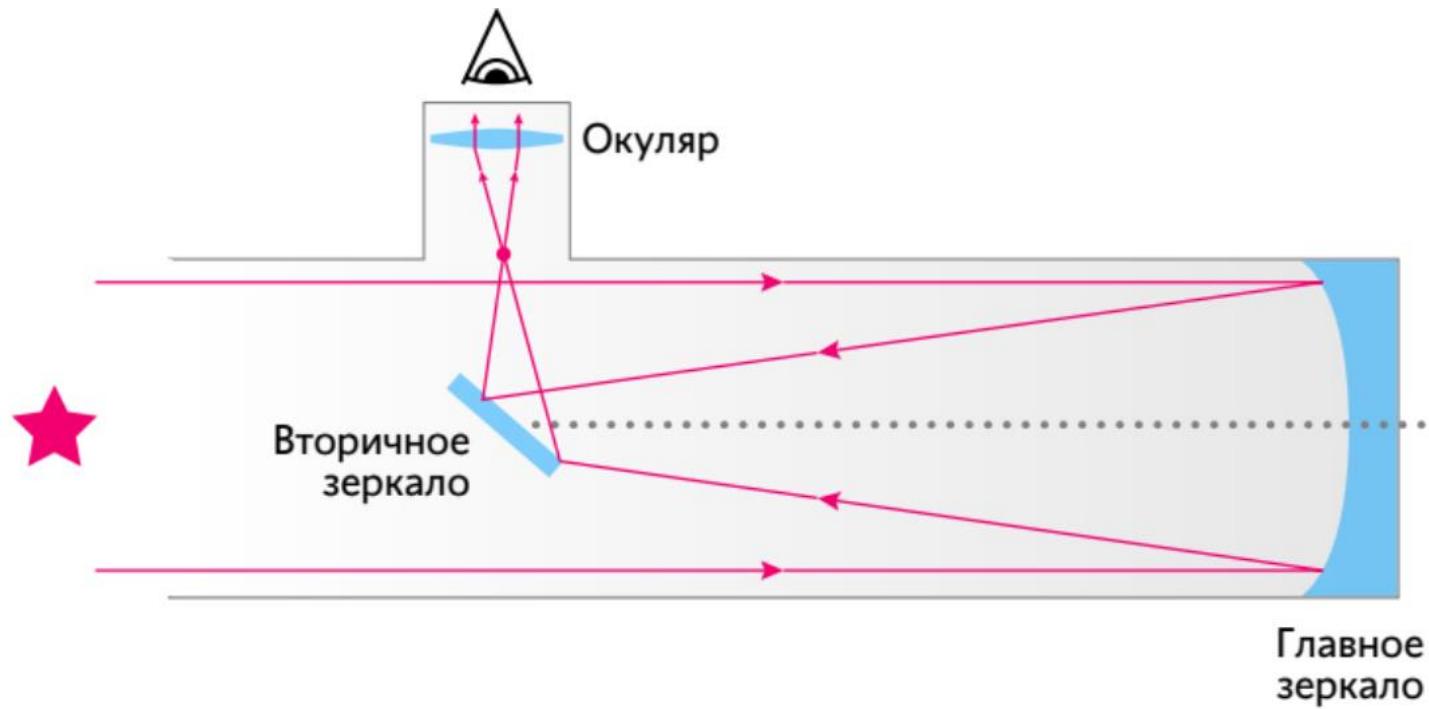


Объективом является собирающая линза (или система линз).

$$\text{“Увеличение” } G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f_{\text{объектива}}}{f_{\text{окуляра}}}$$



ТЕЛЕСКОПЫ-РЕФЛЕКТОРЫ



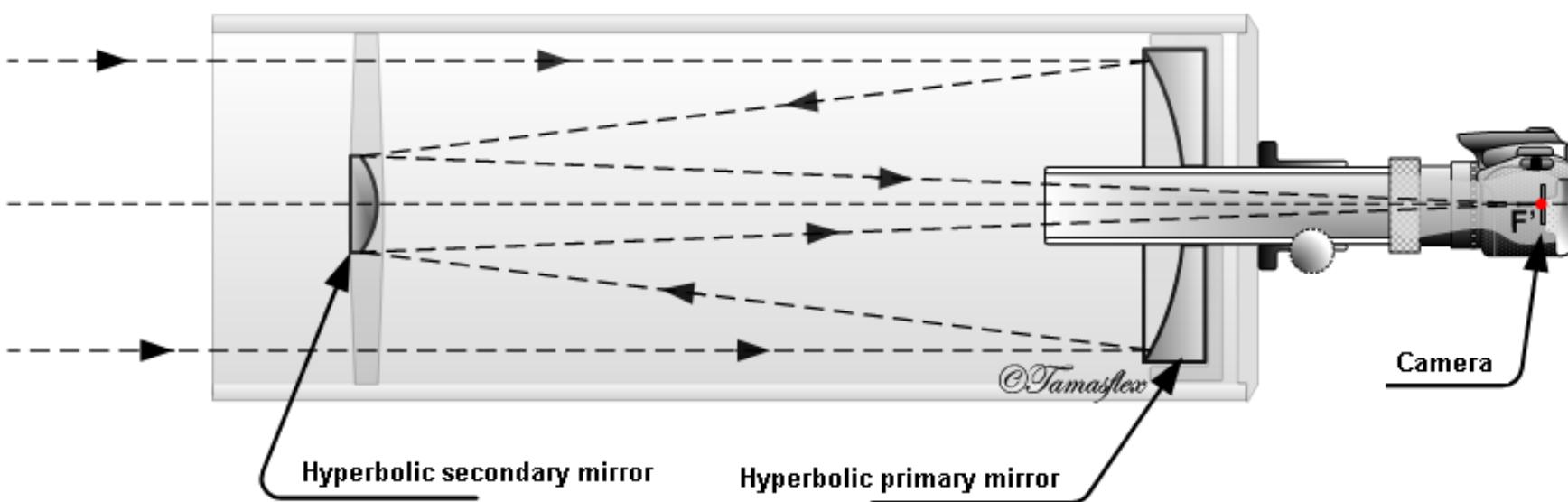
Объективом является вогнутое зеркало
(сфера, парабола или гипербола).



Рефлектор Ньютона

ТЕЛЕСКОПЫ-РЕФЛЕКТОРЫ

Современные большие телескопы, как правило, построены по схеме Ричи-Кретьена(-Касегрена)



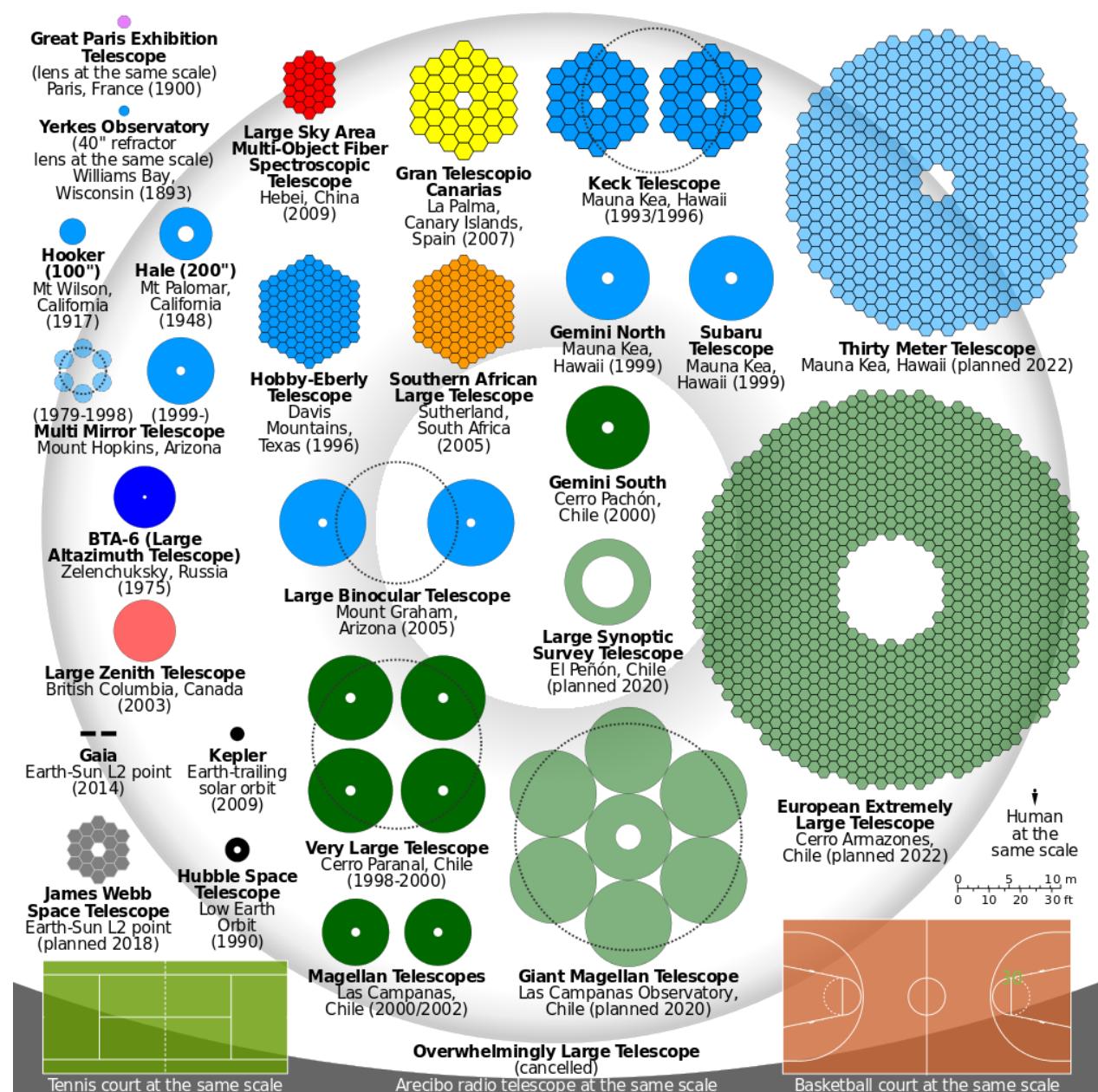
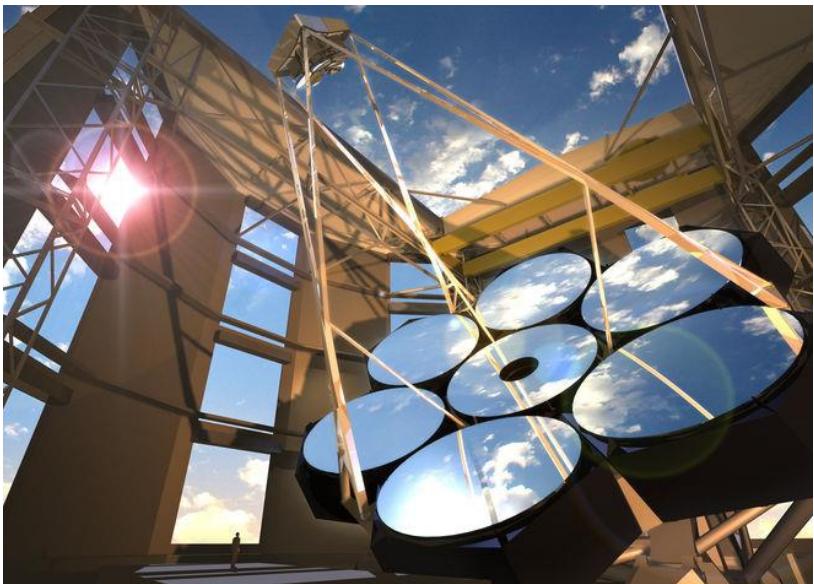
Ritchey - Chrétien (RCT)



**Gran Telescopio Canarias,
D = 10.4m, Канарские острова**

БОЛЬШИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

- Самые большие цельные зеркала имеют диаметр 8.5 метров (Very Large Telescope, Чили).
- Более крупные зеркала – сегментированы.



БОЛЬШИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

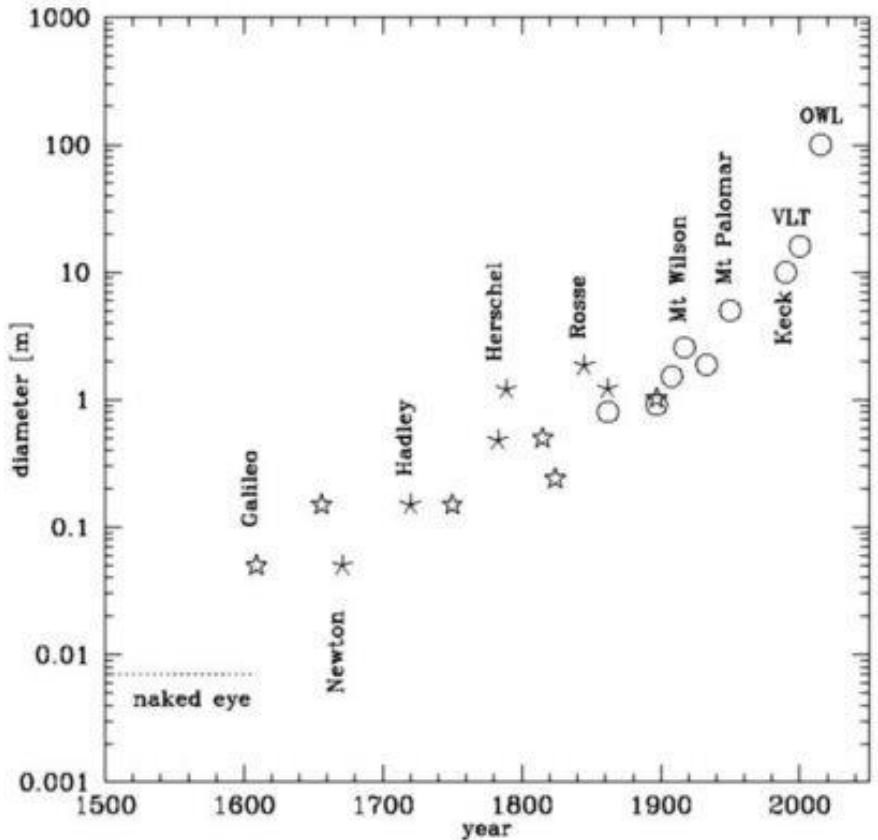
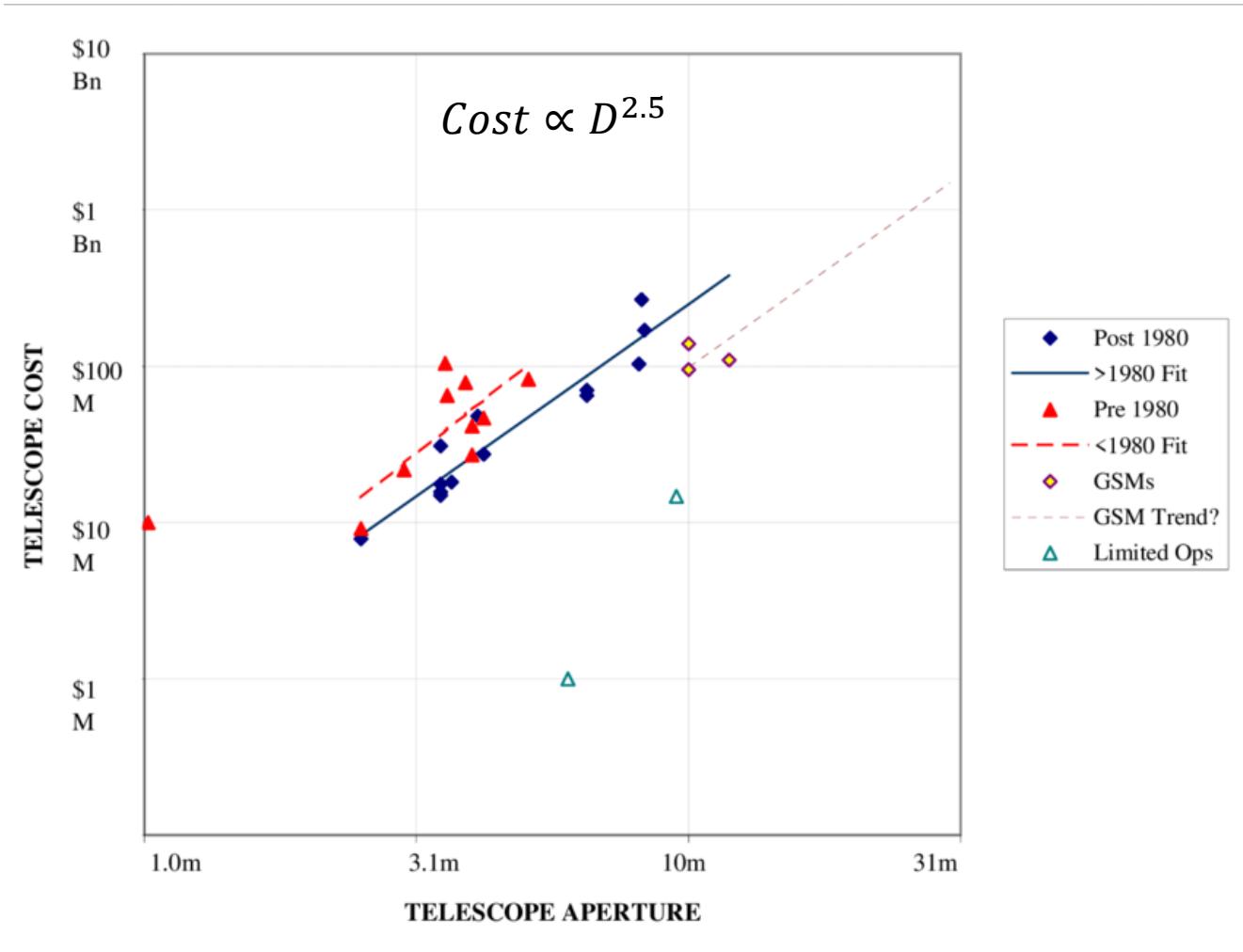


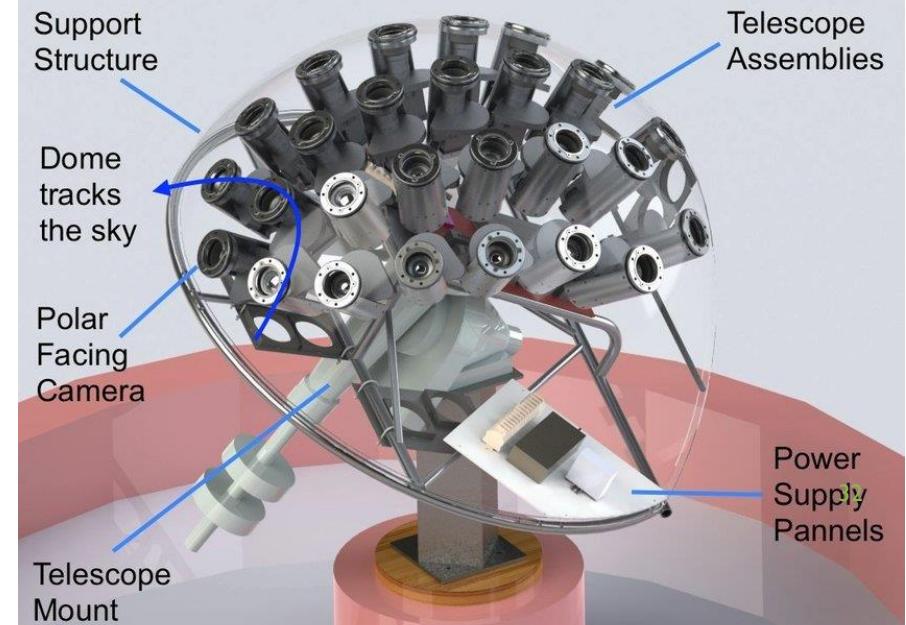
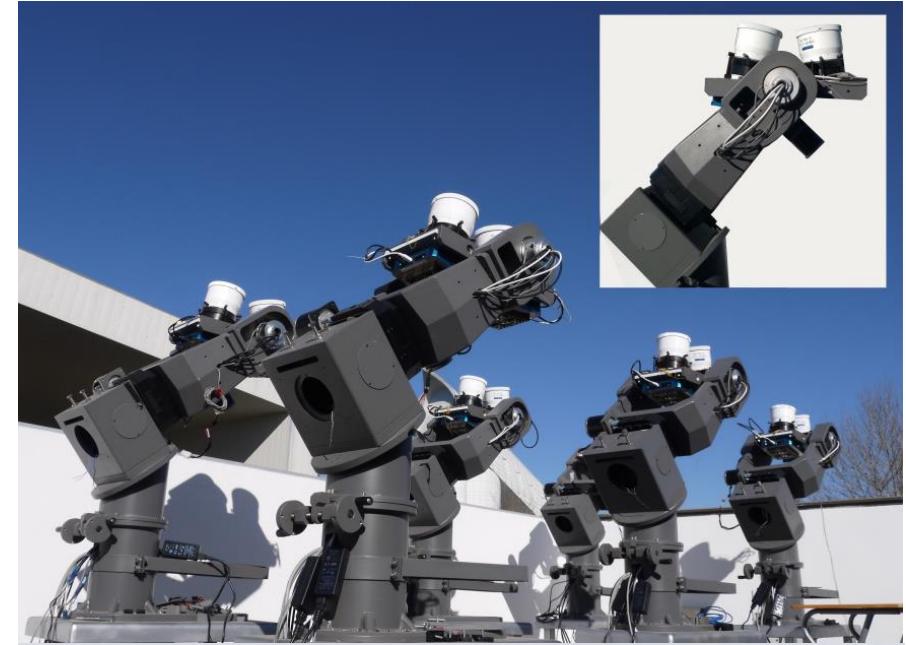
Figure 1. Brief history of the telescope. Stars refer to refractors, asterisks to speculum reflectors, circles to modern glass reflectors.

Some telescopes are identified.



МАЛЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

- Диаметр от ~1 до ~40 см.
- Существенно дешевле больших телескопов.
- Большое поле зрения (десятки градусов, в то время как поле зрения больших телескопов обычно лишь несколько угловых минут).
- Высокое временное разрешение (доли секунды).
- Используются для наблюдения транзиентов (новые, сверхновые, гамма-всплески и пр.) и быстропротекающих явлений (метеоры).



АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

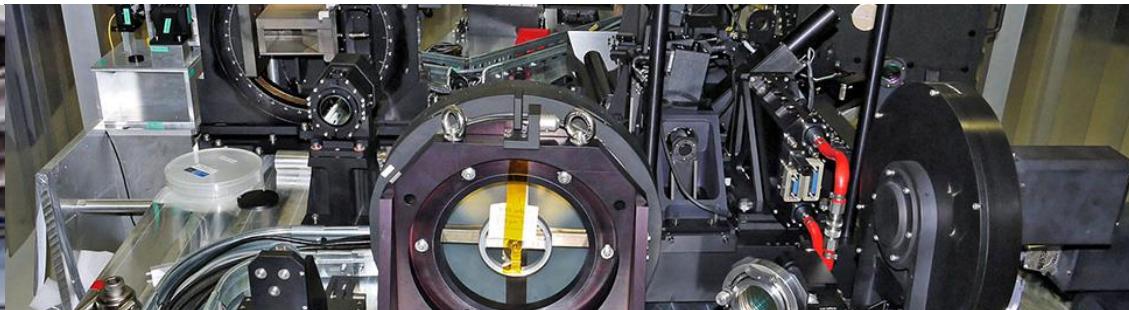
На больших телескопах работают десятки приборов (цифровые камеры, спектрографы, поляриметры). Каждый из этих приборов, как правило, заточен под конкретную задачу.



FLAMES — Fibre Large Array
Multi Element Spectrograph

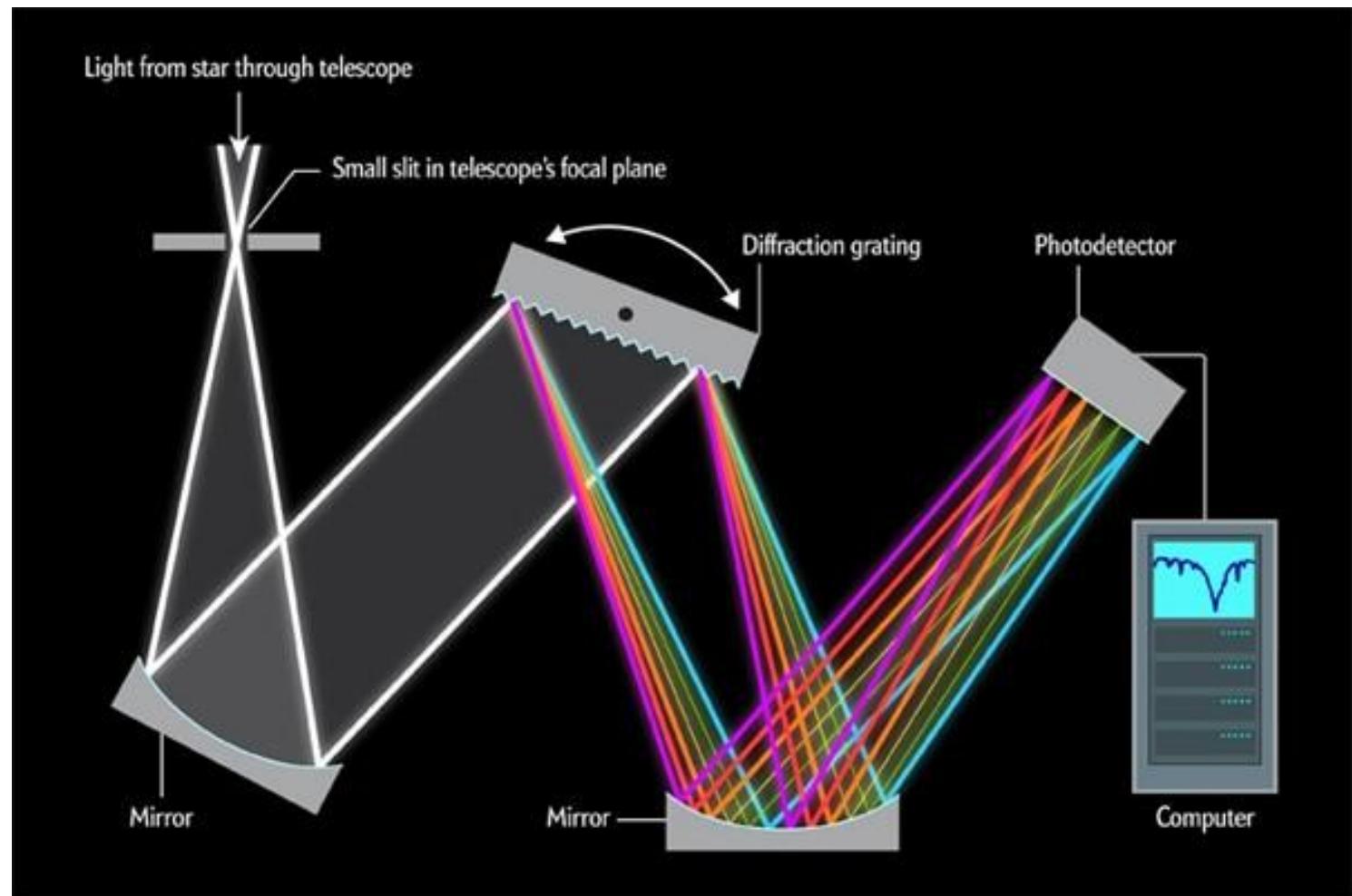
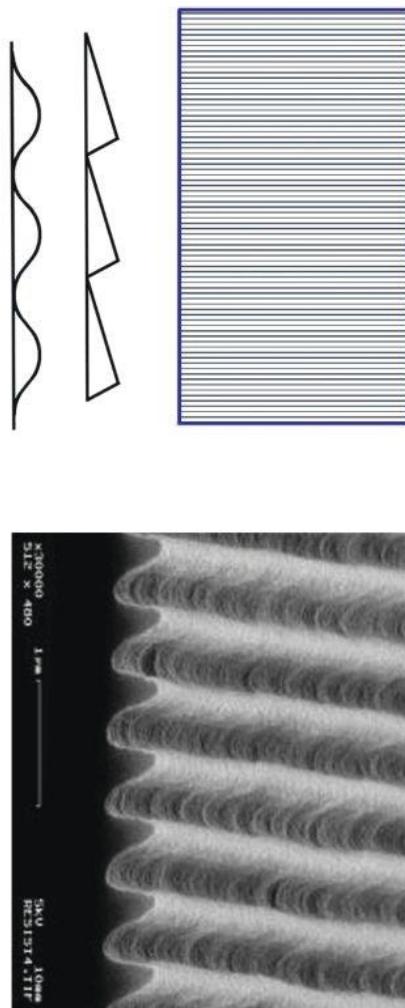


FORS I and FORS 2
FOocal Reducer and low dispersion Spectrograph

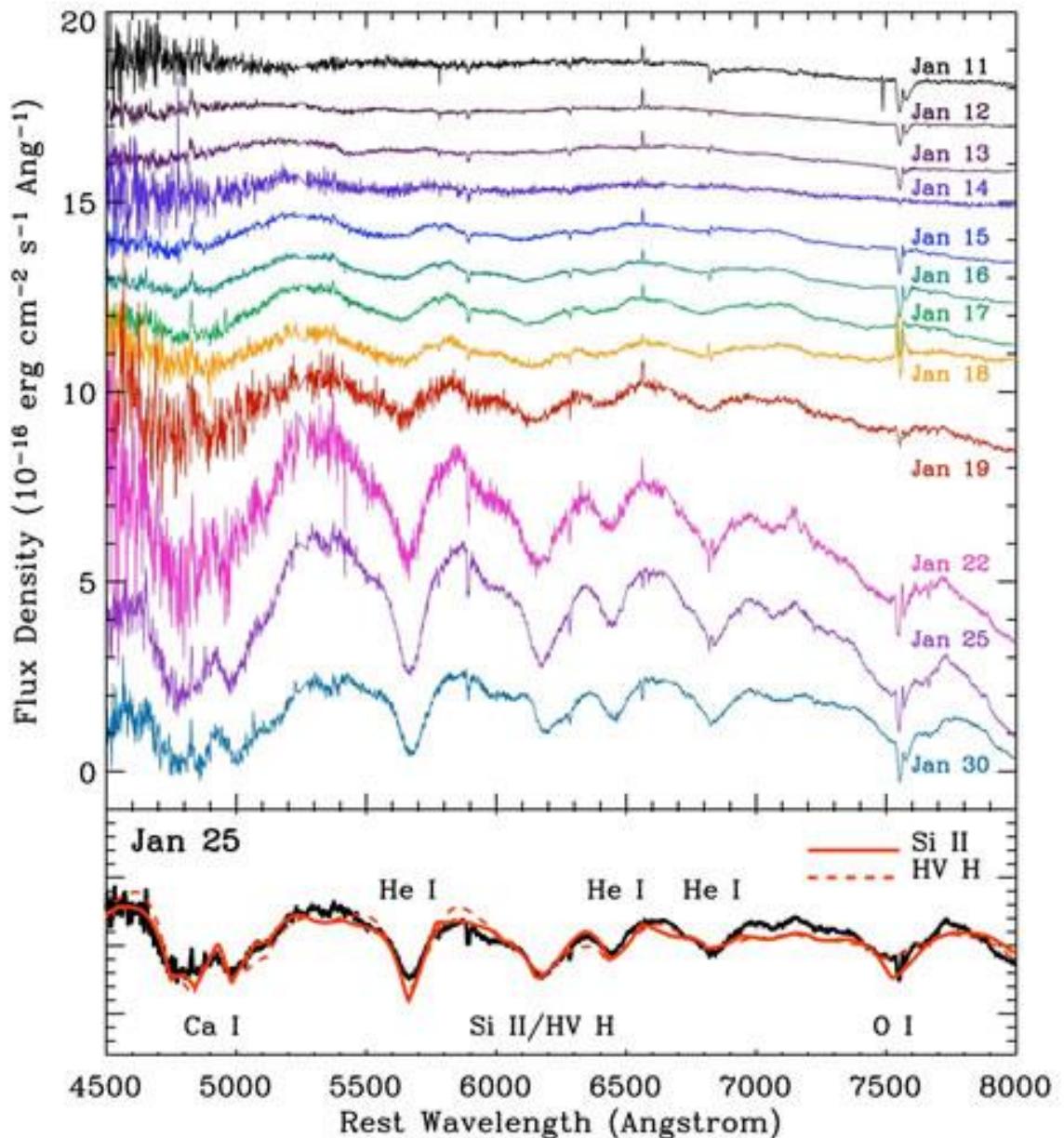
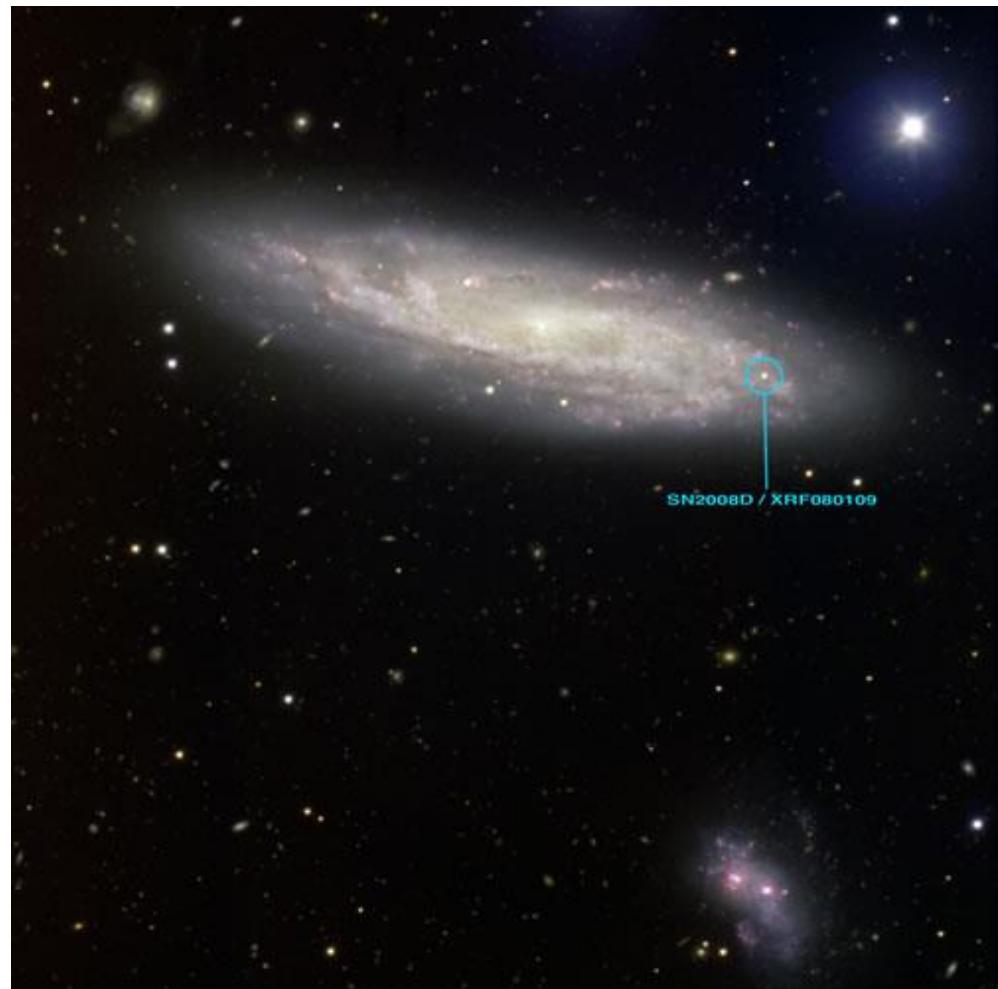


SPHERE - Spectro-Polarimetric
High-contrast Exoplanet
REsearch instrument

СПЕКТРОСКОПИЯ – САМЫЙ ИНФОРМАТИВНЫЙ МЕТОД



СПЕКТР СВЕРХНОВОЙ



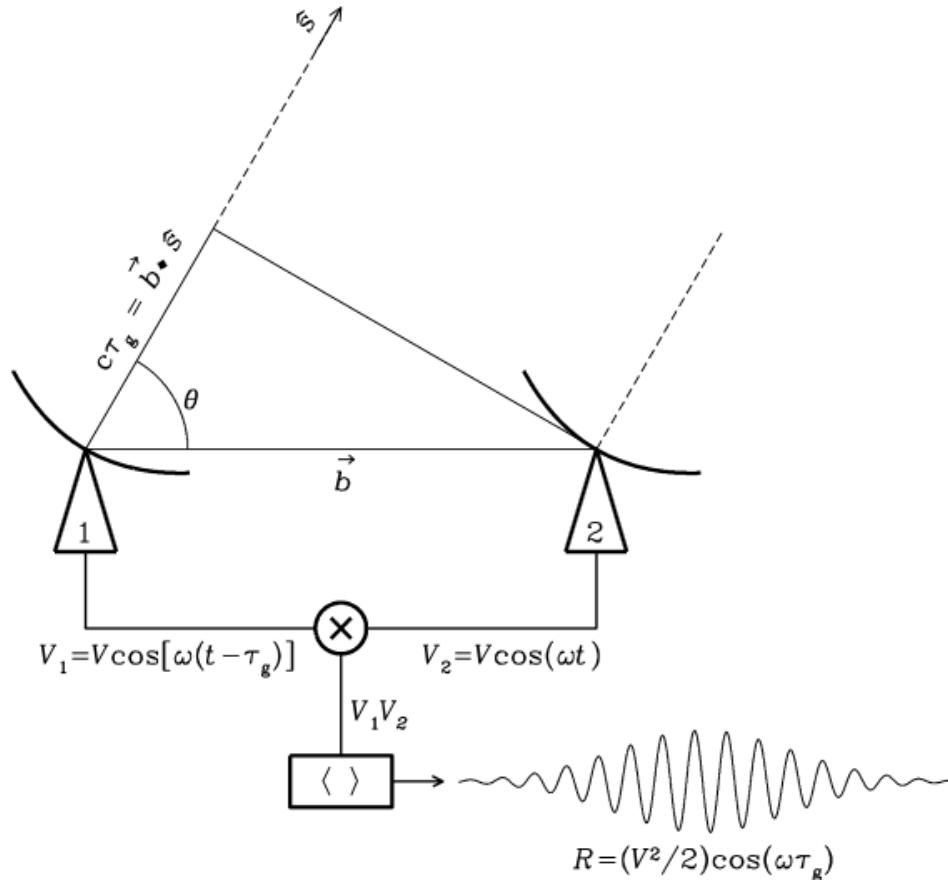
РАДИОТЕЛЕСКОПЫ

- Диаметр 5-500 м.
- Рабочий диапазон от миллиметрового до метрового.
- Легко объединяются в интерферометры.

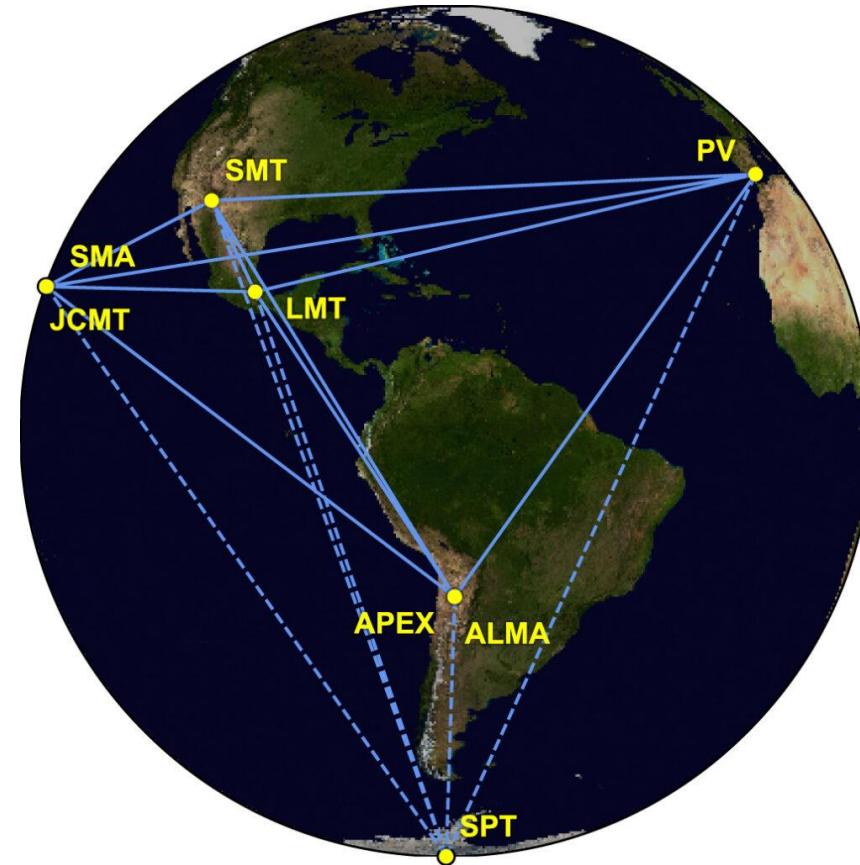


ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

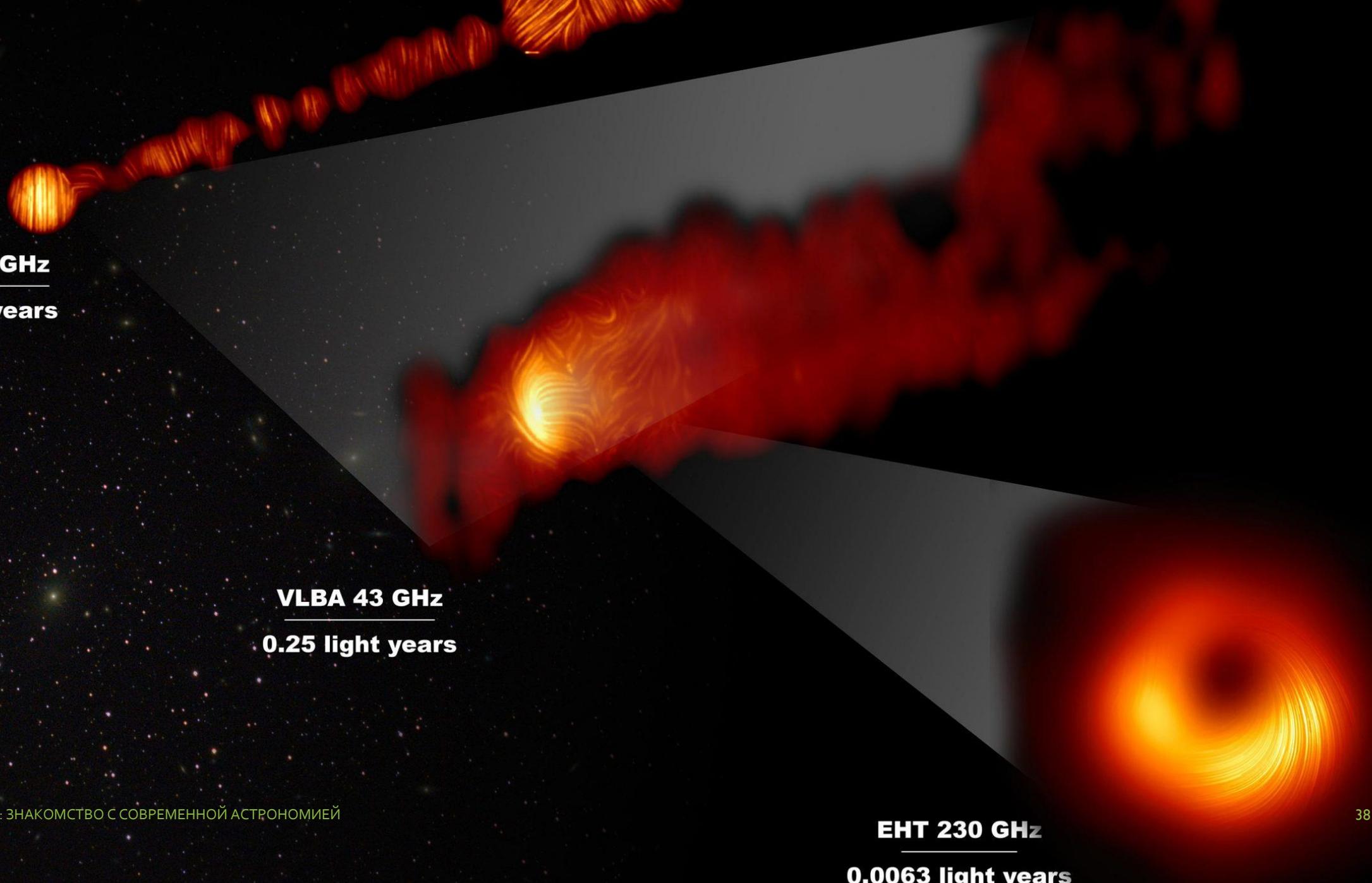
Высокое угловое разрешение в направлении, соединяющем два телескопа: $\theta = 2.44\lambda/D$ рад.



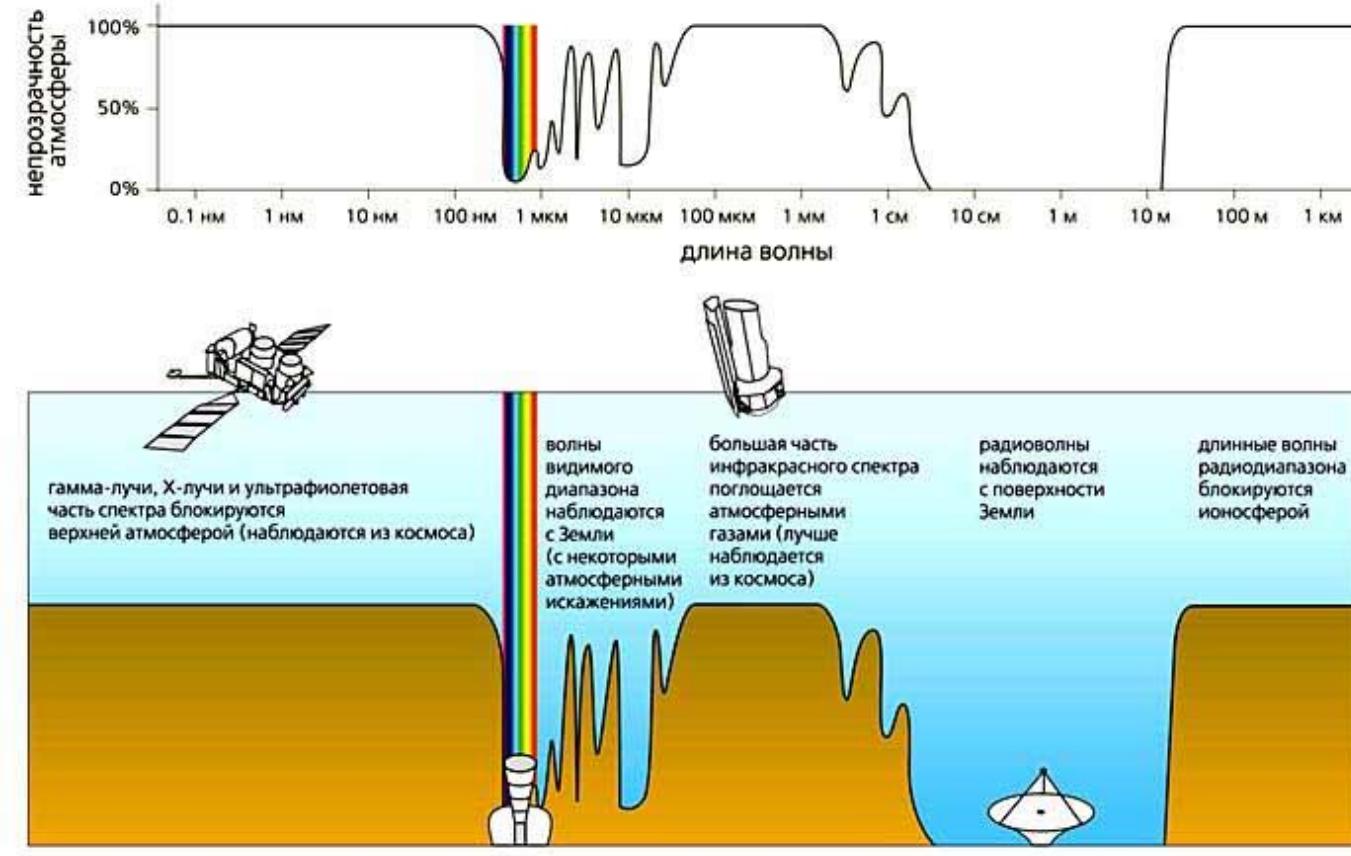
Лекция 1: сплошное и субгреческое астрономии



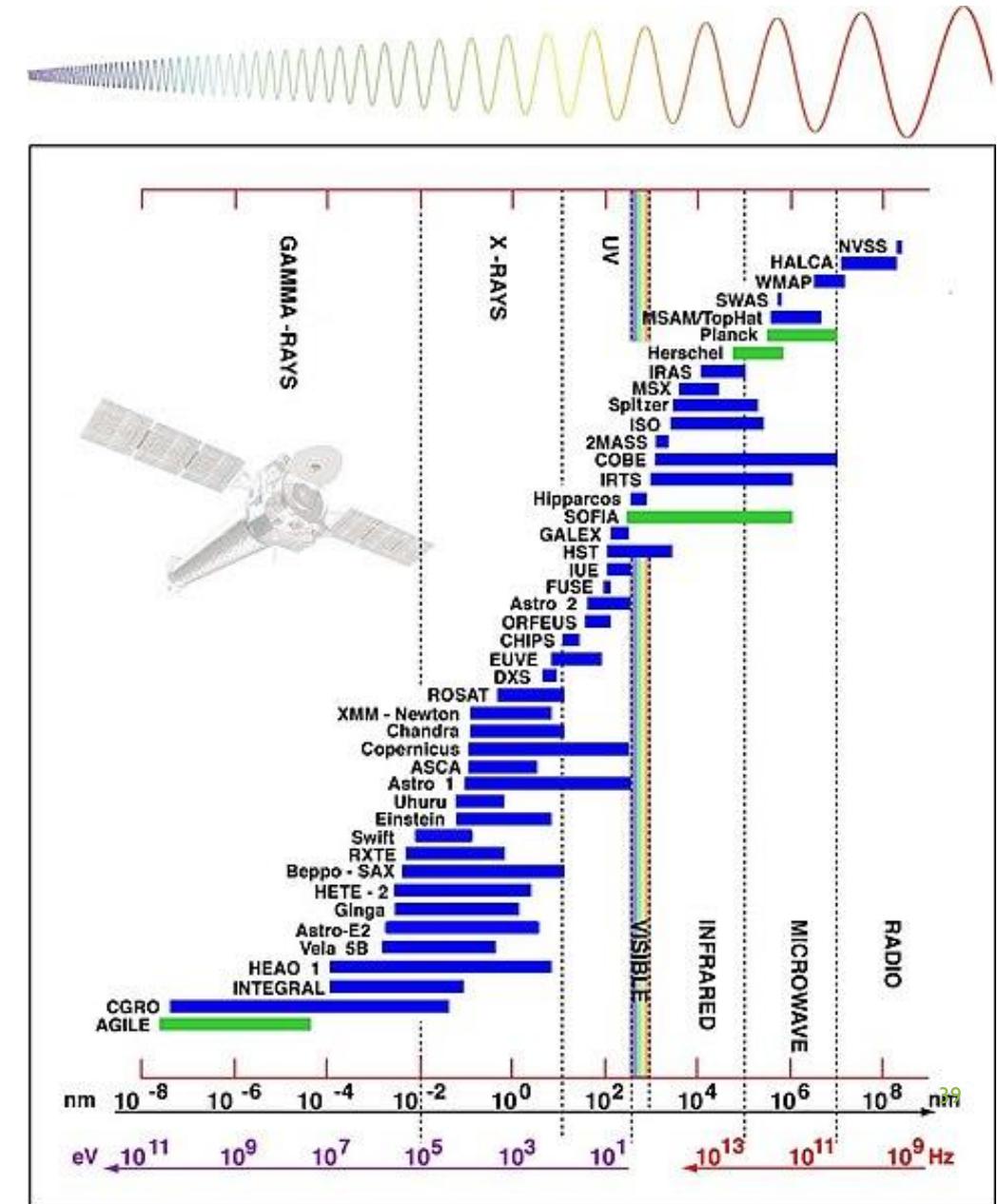
Ориентация некоторых баз для Event Horizon Telescope



КОСМИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ



ЛЕКЦИЯ 1: ЗНАКОМСТВО С СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИЕЙ

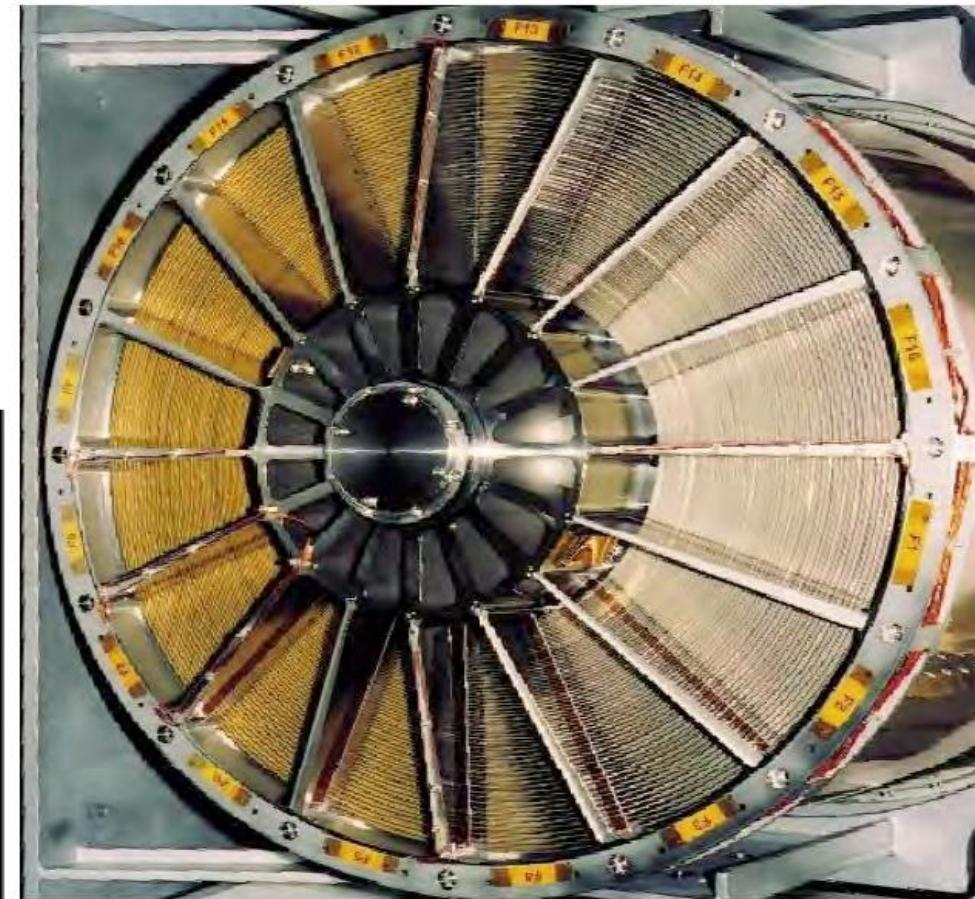
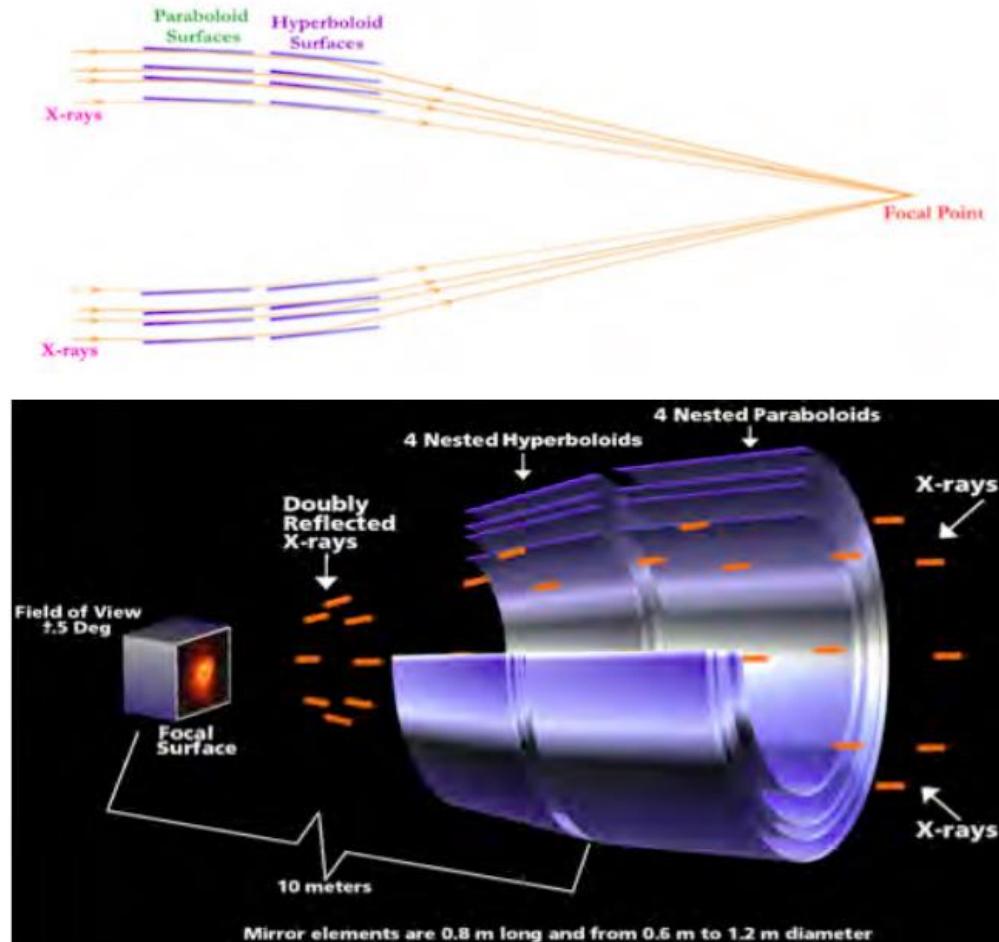


РЕНТГЕНОВСКИЕ И ГАММА-ТЕЛЕСКОПЫ

- Основные инструменты астрофизики высоких энергий.
- В рентгене – фокусирующая оптика.
- Зачастую работают в режиме счёта отдельных фотонов.



ЗЕРКАЛА КОСОГО ПАДЕНИЯ



XMM-Newton mirrors during integration

Image courtesy of Dornier Satellitensysteme GmbH

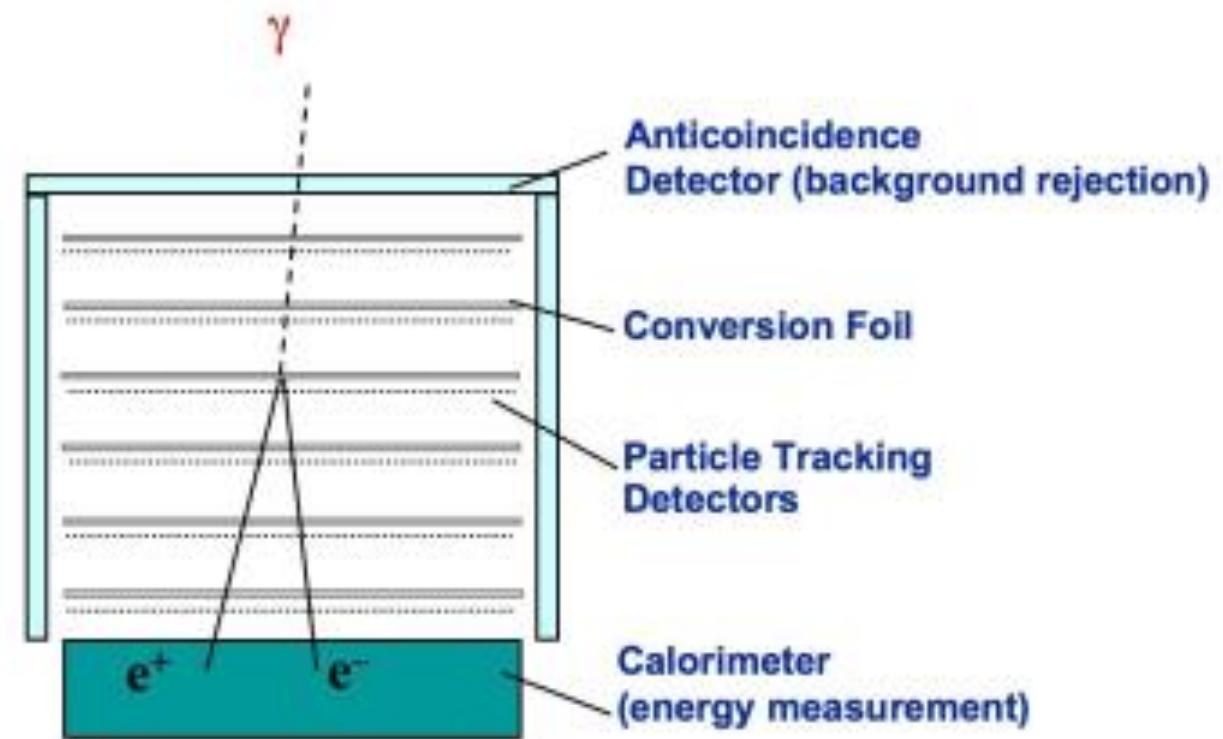
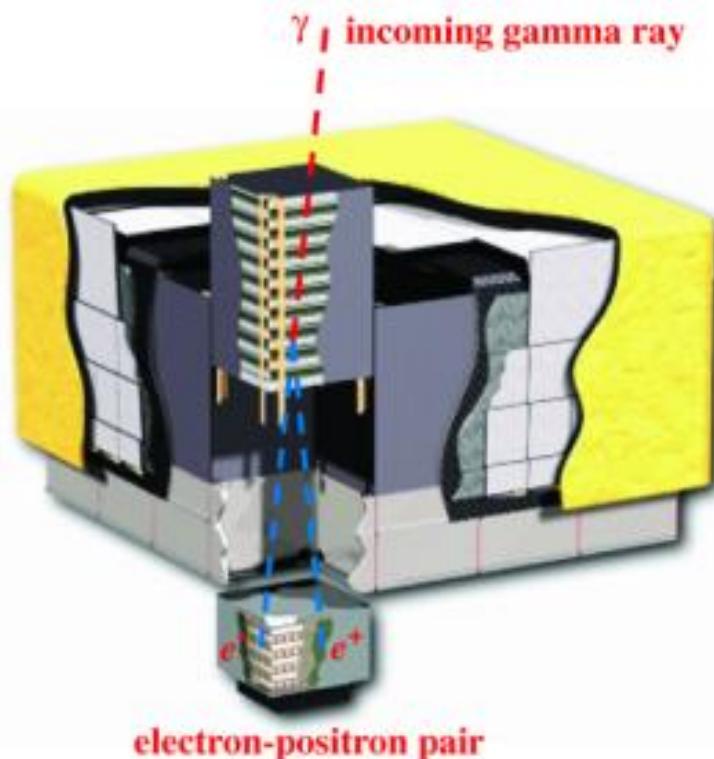
European Space Agency

ГАММА-ОБСЕРВАТОРИЯ FERMI

Large Area Telescope

Нет фокусировки. Регистрируются частицы.

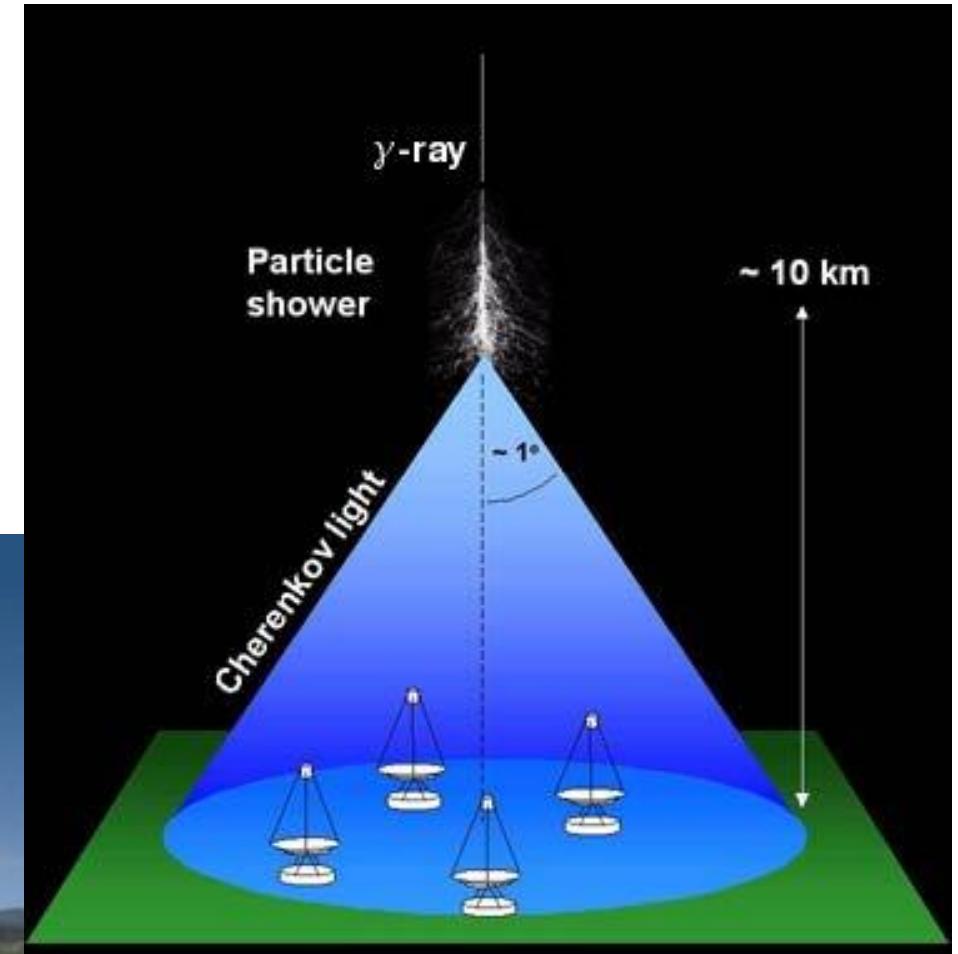
Причем – вторичные!



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

СВЕРХВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ

- Влетая в атмосферу Земли, гамма-квант очень высокой энергии (ТэВ) приводит к появлению вспышки черенковского излучения в оптическом диапазоне.
- Эту вспышку наблюдают на «черенковских телескопах». Их диаметр 20-30 м, но качество оптики «плохое».



ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Звезду (например, Солнце) можно представить как газовый шар, находящийся в гидростатическом равновесии. Это значит, что на каждом расстоянии r от её центра выполняется *уравнение гидростатического равновесия*:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{GM_r\rho}{r^2},$$

где P – давление, ρ – плотность, а $M_r = 4\pi \int_0^r \rho(r')r'^2 dr'$ – полная масса внутри сферы радиуса r . Ориентируясь на это уравнение, **получите количественные оценки (из соображений размерности)** для:

- давления в центре Солнца $P_c = P(0)$,
- температуры в центре Солнца $T_c = T(0)$.

Газ звезды считайте идеальным и состоящим из атомов водорода. Масса Солнца равна $M_\odot = 2 \cdot 10^{33}$ г, а радиус $R_\odot = 7 \cdot 10^{10}$ см

