

Инструменты и методы измерений в астрономии

Инструменты и методы измерений в астрономии (4^h).

1. Сила и мощность телескопа.
2. Оптика современных телескопов. Рефлекторы и рефракторы.
3. Типы монтировок телескопов.
4. Астрографы.
5. Приемники излучения.
6. Современная астрофотометрия.
7. Радиотелескопы.
8. Радиоинтерферометры со сверхдлинной базой.
9. Лазерная локация Луны.
10. Понятие о методах внеатмосферной астрометрии.

Методы астрономических исследований

- Природа пока не позволяет нам осуществлять **прямой** эксперимент над подавляющей частью объектов Вселенной.
- Наблюдение – главное основание любой науки. Для астрономии, как правило, других способов исследований не существует.

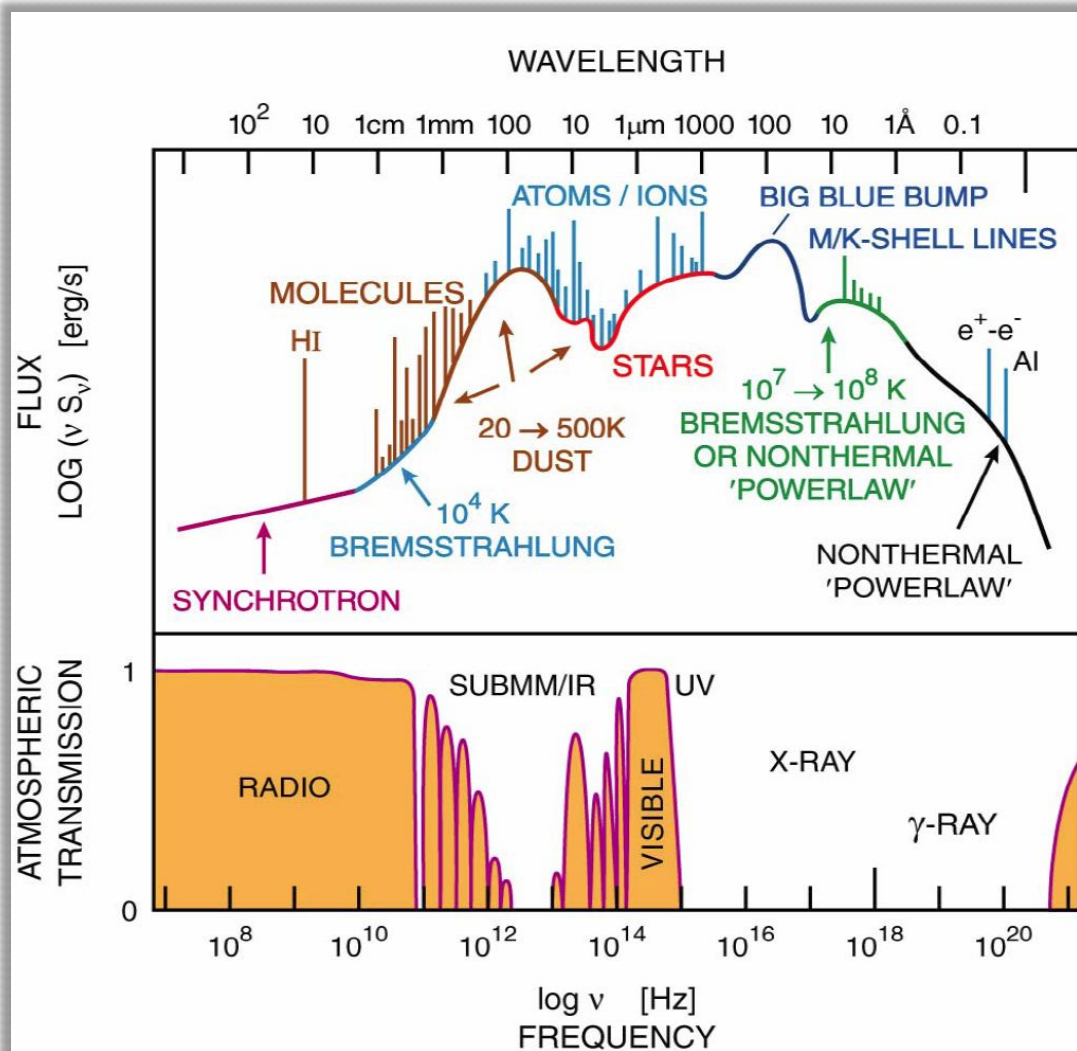
Получение информации об астрономических объектах:

- Основной объем информации дает электромагнитное излучение. Свой вклад вносят космические лучи и нейтрино. В ближайшем будущем возможно использование и гравитационных волн.
- Основное назначение телескопов: увеличить поток энергии на приемнике. Категорический императив: чем больше – тем лучше (и дороже). В различных диапазонах длин волн существенно различаются конструктивные особенности. Радио: антенны; оптика: классические зеркальные и линзовые телескопы; рентген: оптика косого падения и т. д.
- Телескопы используются для построения изображения, либо как спектрографы. На длинах волн короче 1 мм можно фиксировать отдельные фотоны, на более длинных волнах из-за теплового шума возможно только измерение напряженности электрического поля в антенне.

Астрономия: средства

- Наземные (оптические и радио) обсерватории
- Космические обсерватории
(все диапазоны электромагнитного излучения)
- Обсерватории космических лучей
- Нейтринные обсерватории
- Гравитационные обсерватории
- Космические аппараты - исследователи Солнечной системы (пока)

наблюдения: земная атмосфера



Верхняя панель:

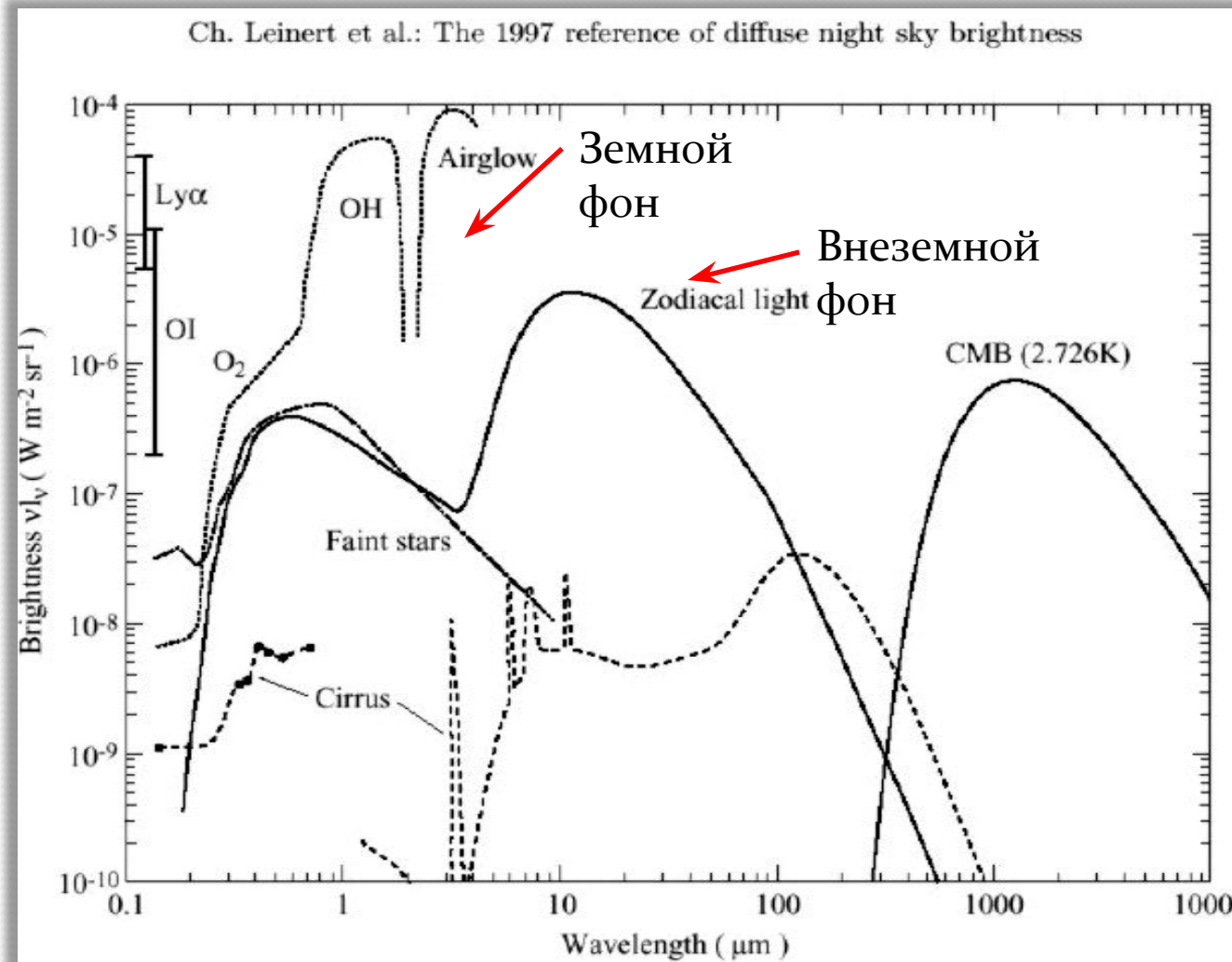
Типичный спектр активной галактики

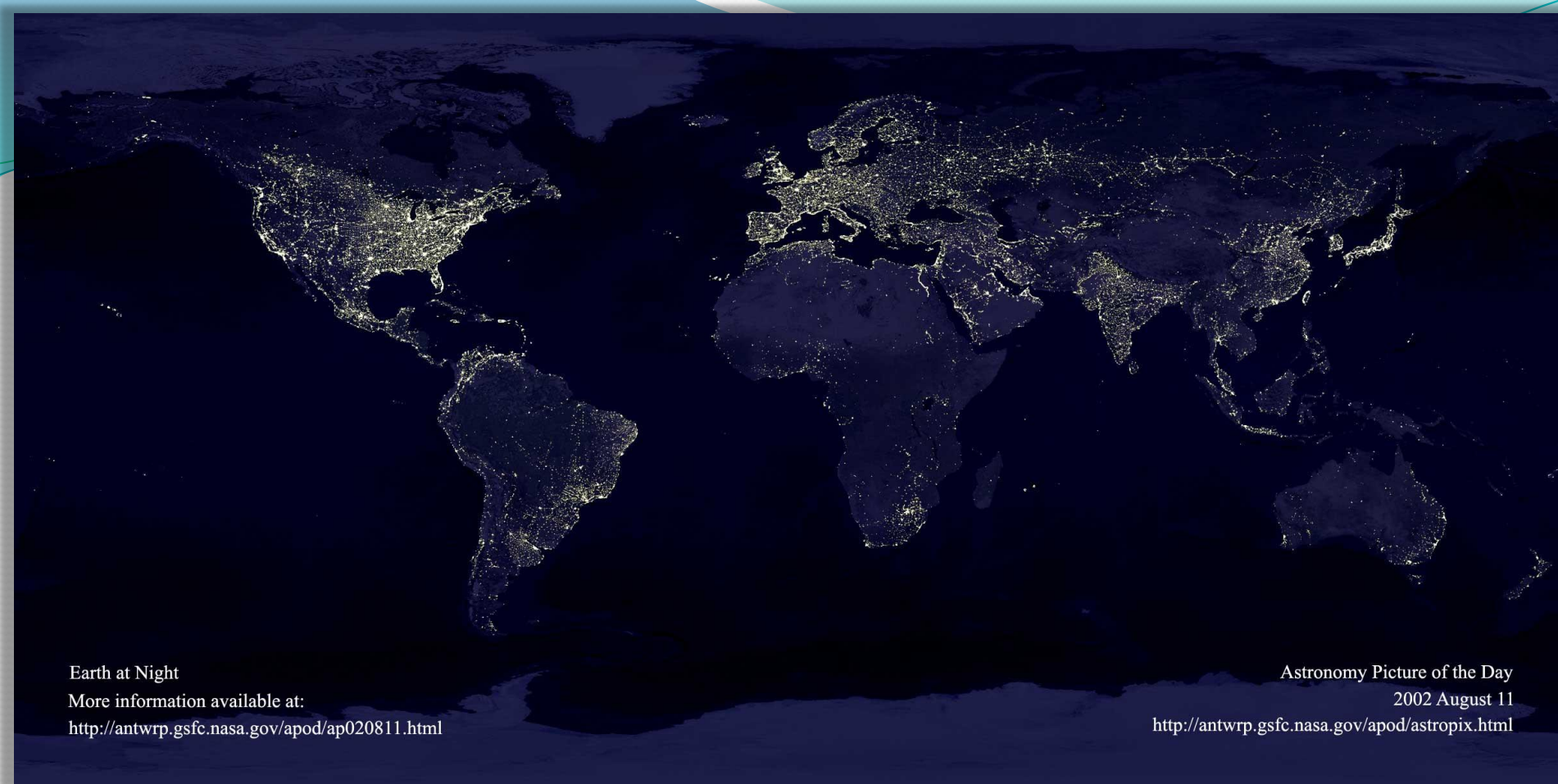
Bremsstrahlung – тормозное излучение

Нижняя панель:

Окна прозрачности атмосферы Земли (показаны оранжевым)

Факторы, ограничивающие наблюдения: засветка





Earth at Night

More information available at:

<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/ap020811.html>

Astronomy Picture of the Day

2002 August 11

<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

Яркость ночного неба – основной лимитирующий фактор при наблюдении слабых объектов. В видимой части спектра наблюдения с Земли и со спутников имеют схожий фон; в IR-диапазоне наблюдения со спутников на порядки более эффективны (ОН и IR-излучение атмосферы); в радиодиапазоне основной вклад в шумы – искусственного происхождения. **В идеале, инструменты необходимо выносить из солнечной системы и вообще из плоскости Галактики!**



Credit & Copyright: Rudi Dobesberger (Sternfreunde Steyr)

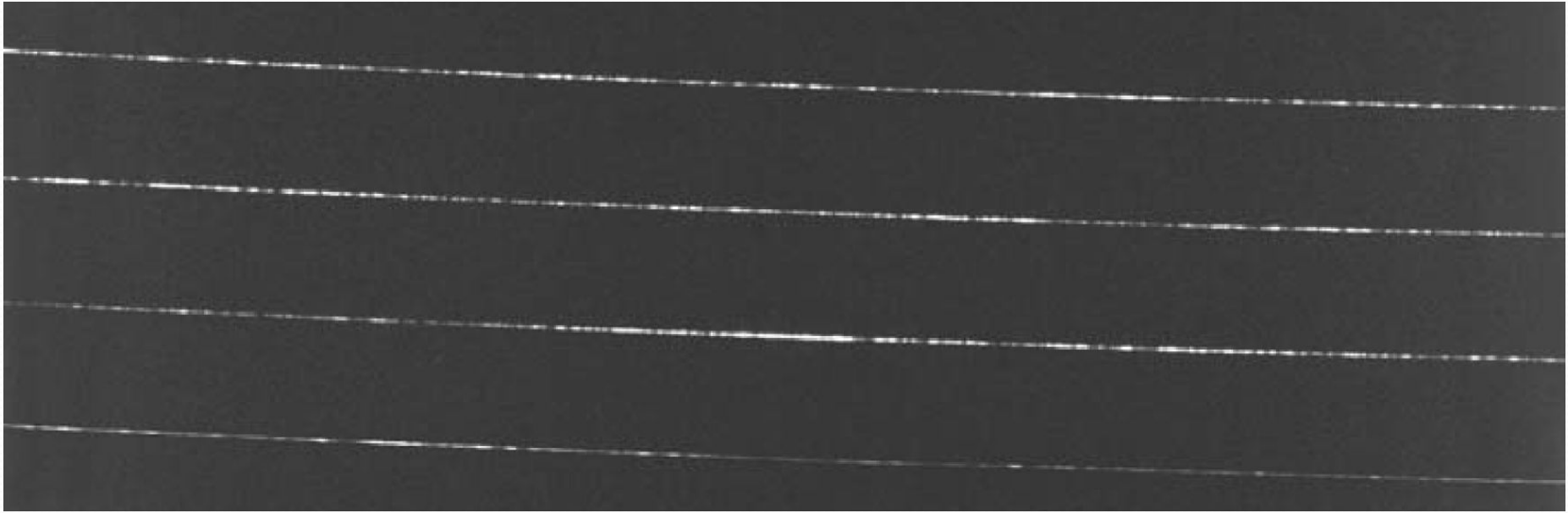
Зодиакальный свет в небе над Намибией.



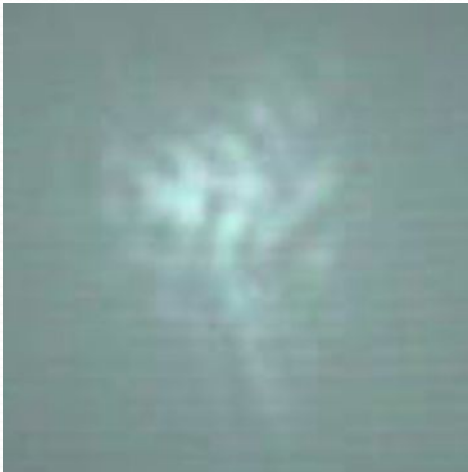
Daniel López
cielosdelteide.com

Зодиакальный свет над Ливией

Атмосфера: мерцания и размытие



Мерцание Сириуса вследствие рассеяния света на неоднородностях атмосферы



Спекл-изображение звезды в
фокальной плоскости наземного
телескопа

Лучшие места для оптических телескопов



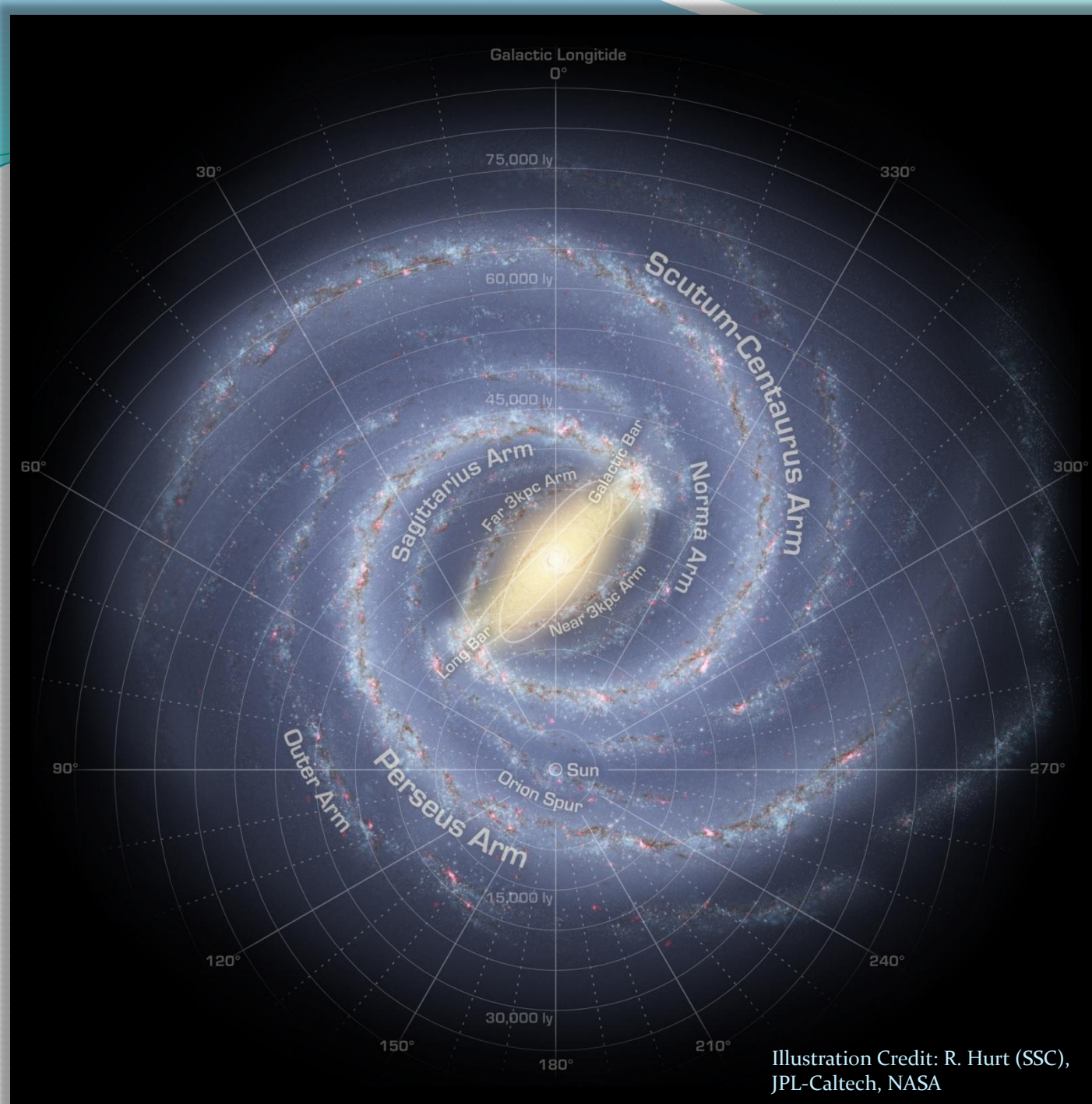
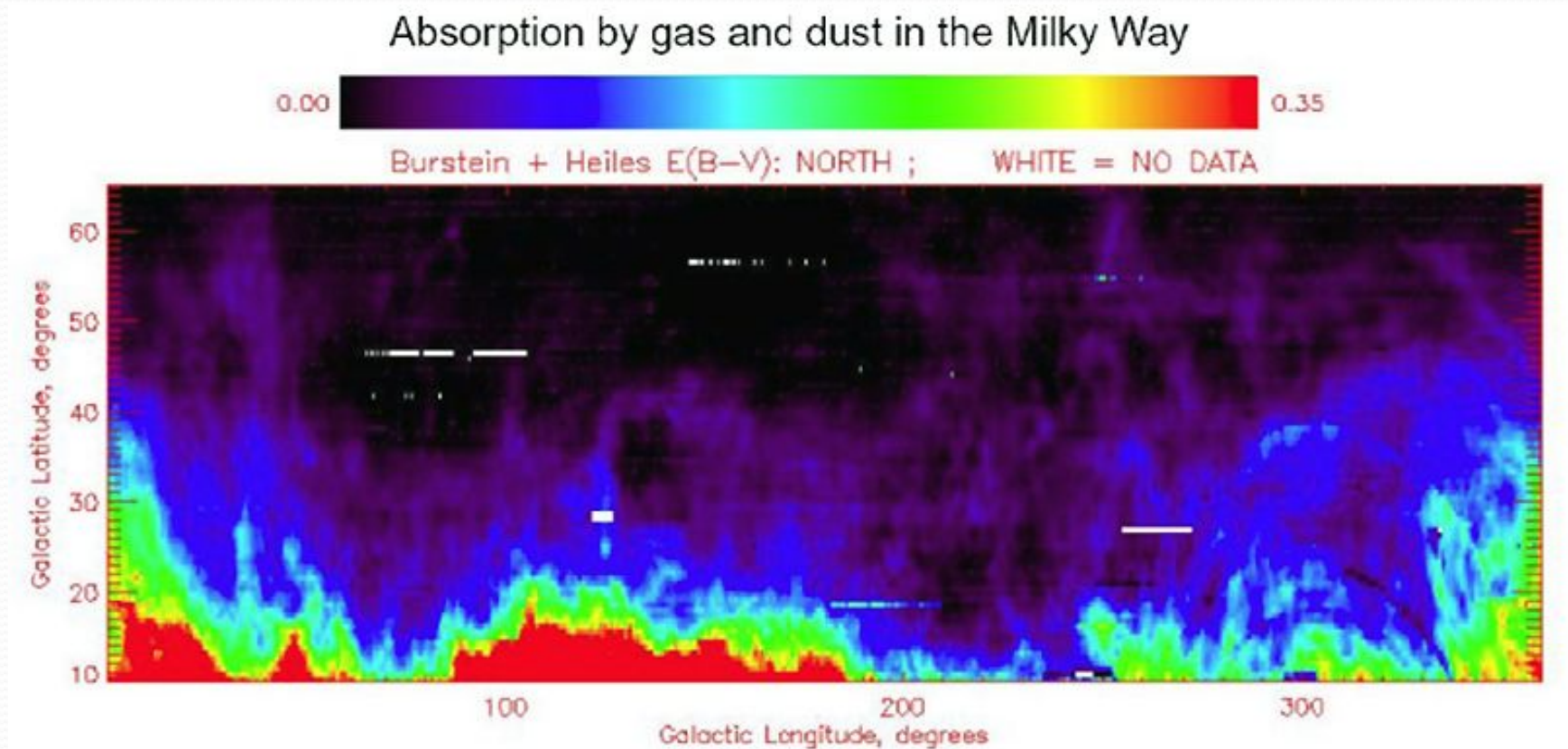


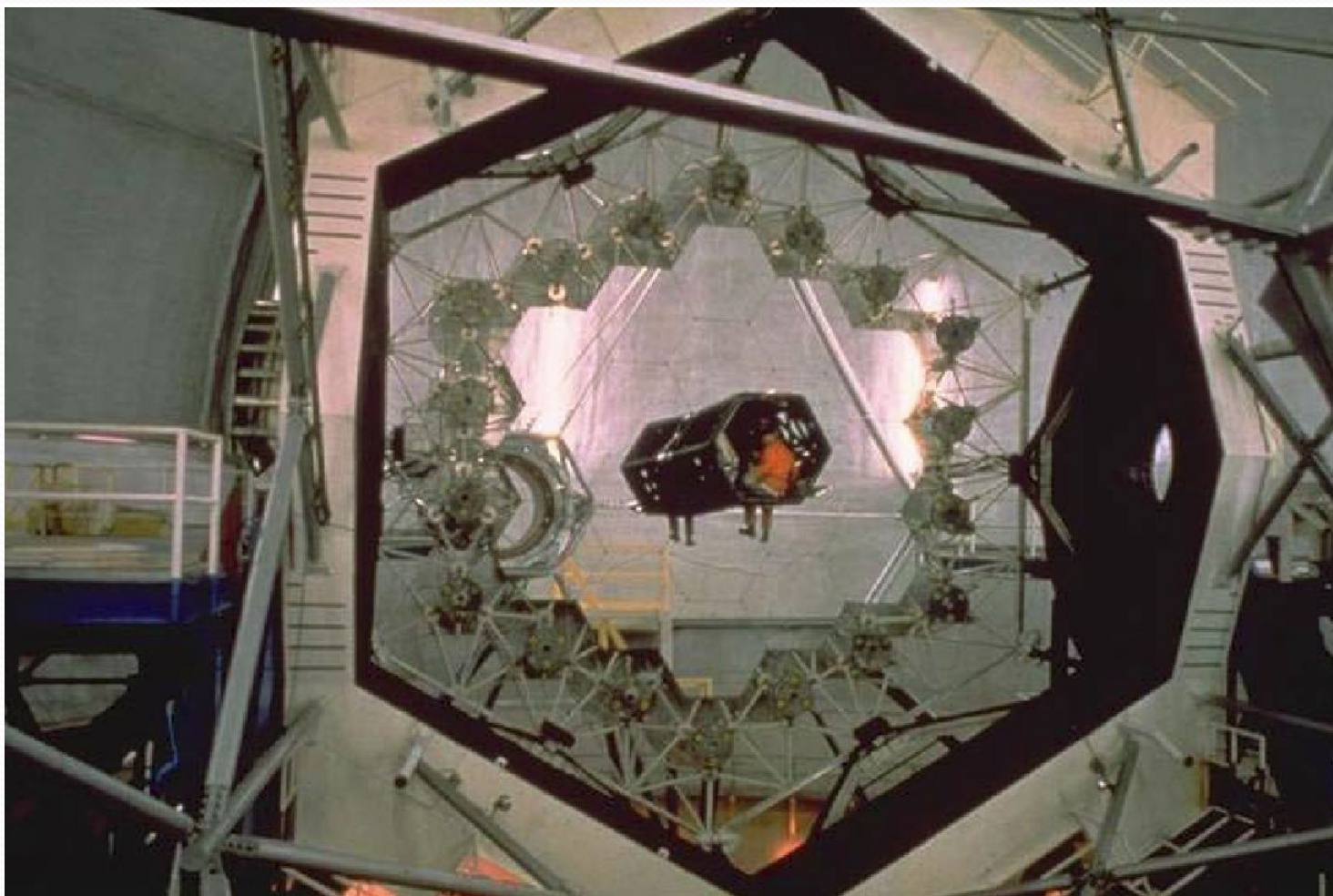
Illustration Credit: R. Hurt (SSC),
JPL-Caltech, NASA

наблюдения: экстинкция в Галактике



Показатель цвета $E(B-V) = A_B - A_V$, где $A_{B(V)}$ – поглощение света в звездных величинах, определяет поглощение и «покраснение» излучения.

$E(B-V) = 0.35$ означает ослабление источника в 2.5 раза на $5500 \text{ \AA}$. Карта построена по данным о лучевой концентрации нейтрального водорода с которой жестко связана лучевая концентрация пыли.

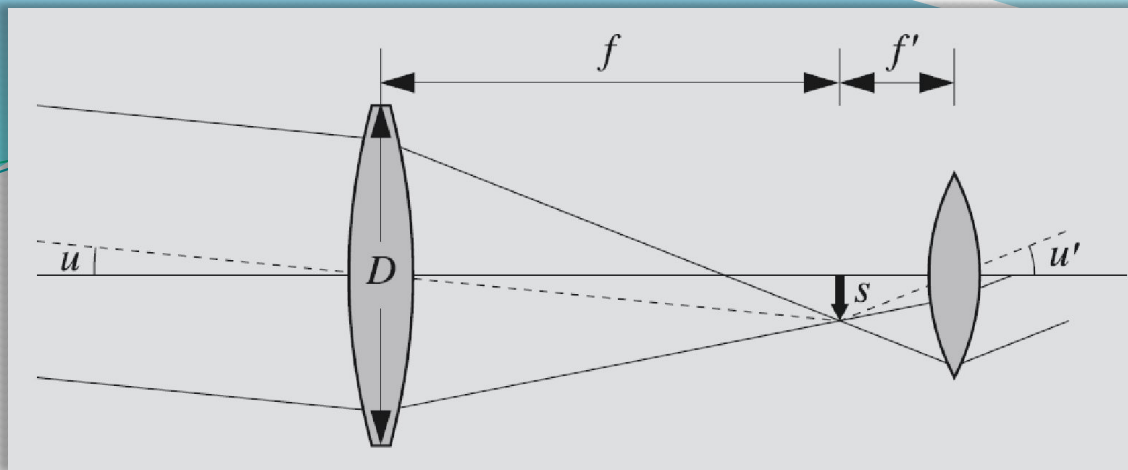


Главное зеркало 10-метрового телескопа «Кек»

Сила и мощность телескопа



Основная задача телескопа – *увеличить плотность светового потока на приемнике и увеличить видимый угловой размер протяженных объектов.*



D – апертура телескопа;

f – фокусное расстояние

объектива;

f' – фокусное расстояние окуляра (обычно отсутствует);

u – угловой размер объекта;

u' – угловой размер изображения;

s – линейный размер изображения.

$$\Phi = ES = \frac{\pi D^2}{4} E \text{ – световой поток, собираемый объективом,}$$

где E – освещенность объектива от источника. Собранный световой поток характеризует **мощность** телескопа.

$$F = \frac{D}{f} \text{ – относительное отверстие телескопа.}$$

Относительное отверстие характеризует **силу** телескопа. Инструменты с $F \sim 1$ называют **светосильными** (освещенность в фокальной плоскости, создаваемая протяженным объектом, пропорциональна F^2).

$s = f \tan u \approx fu$ – **линейный размер изображения** в фокальной плоскости, где u выражено в радианах для малых углов.

$$\omega = \frac{u'}{u} \approx \frac{f}{f'} \text{ – угловое увеличение телескопа.}$$

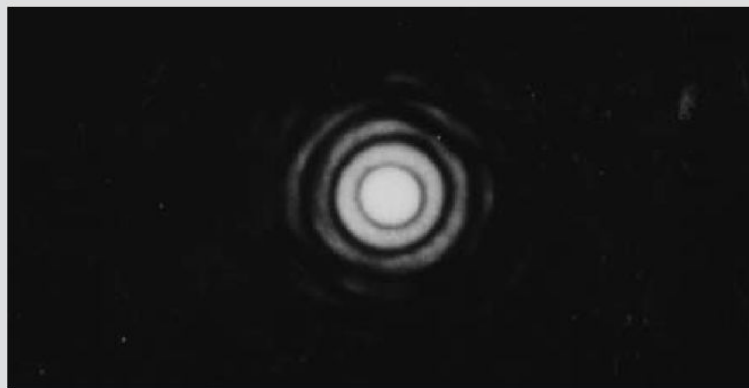
Разрешающая сила телескопа

Разрешающая сила телескопа – минимальное угловое расстояние между точечными объектами, для которого возможно различить объекты на изображении. Предел этой величины определяется рефракцией света.

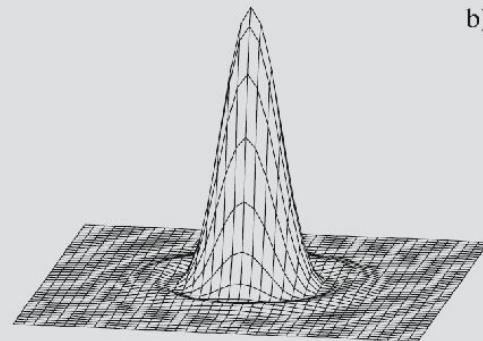
Теоретический предел углового разрешения (предел Рэля) определяется как

$$\sin \theta \cong \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}, [\theta] = \text{рад},$$

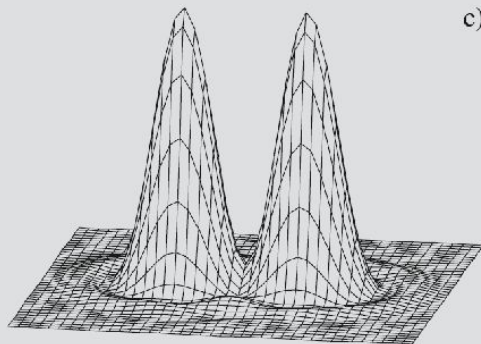
где λ – длина волны принимаемого излучения.



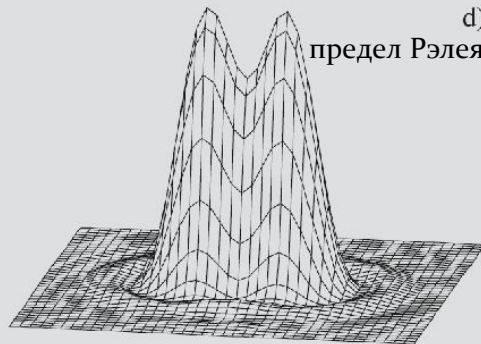
a)



b)

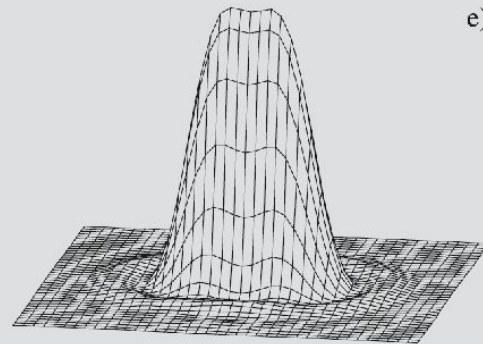


c)



d)

предел Рэля



e)

Проницающая сила – это звёздная величина наиболее слабых звёзд, видимых с помощью телескопа при наблюдении в зените. Она может быть оценена по формуле Боуэна:

$$m = 5.5 + 2.5 \log_{10} D + 2.5 \log_{10} \omega,$$

где D – апертура телескопа в миллиметрах, ω – угловое увеличение телескопа.

Проницающая сила зависит от увеличения телескопа, так как с ростом увеличения быстро уменьшается видимая яркость фона ночного неба, что облегчает видимость слабых звезд.

Чаще в литературе встречается другая, упрощённая формула:

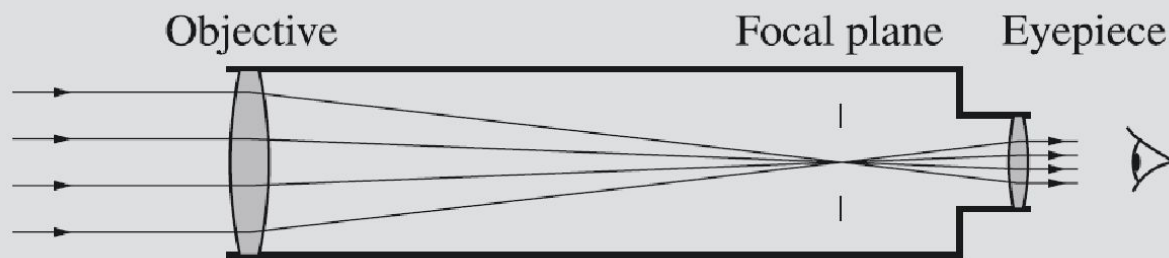
$$m = 2.1 + 5 \log_{10} D.$$

Наиболее точная формула для оценки проницающей силы выглядит так:

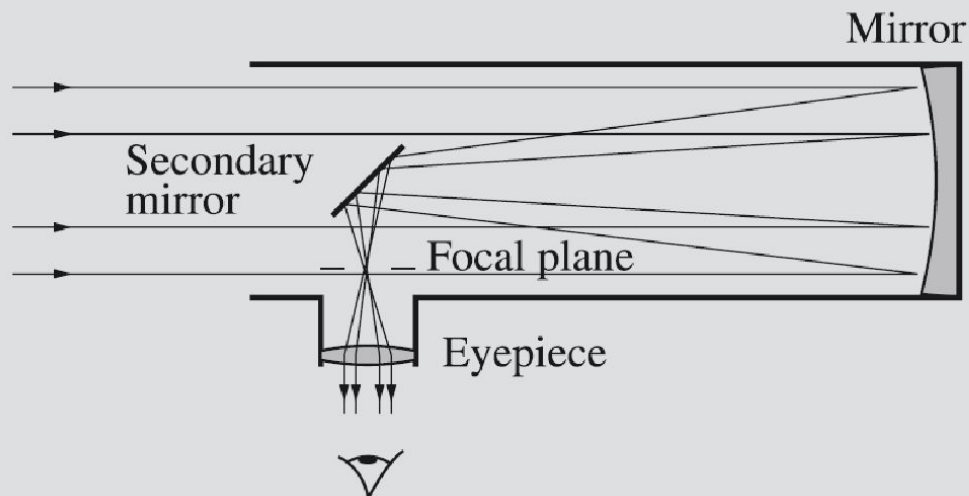
$$m = 2.5 \log_{10} \left(\frac{D}{\beta} \sqrt{\frac{Kt}{s}} \right),$$

где β – диаметр центрального максимума дифракционного изображения звезды (диска Эри) в секундах дуги; K – квантовый выход оптической системы телескопа, равный отношению числа зарегистрированных фотонов к числу попавших на приёмник излучения (глаз или ПЗС); s – яркость фона ночного неба; t – время экспозиции.

Оптика современных телескопов. Рефлекторы и рефракторы

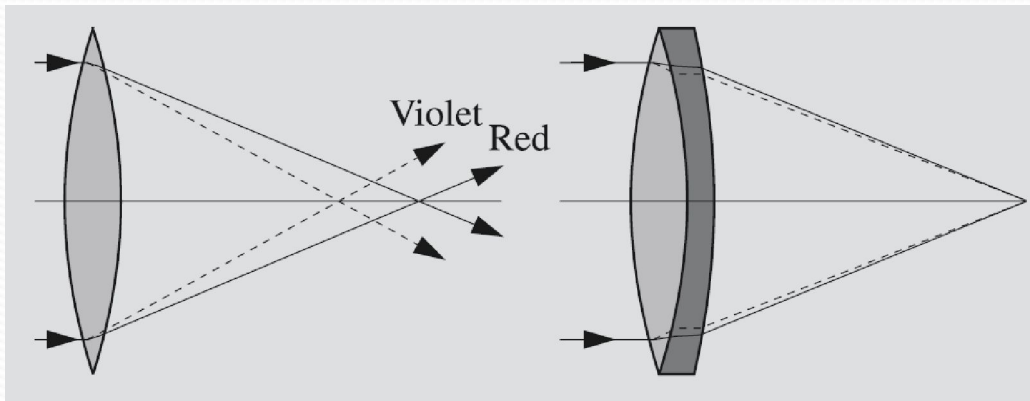


Рефрактор

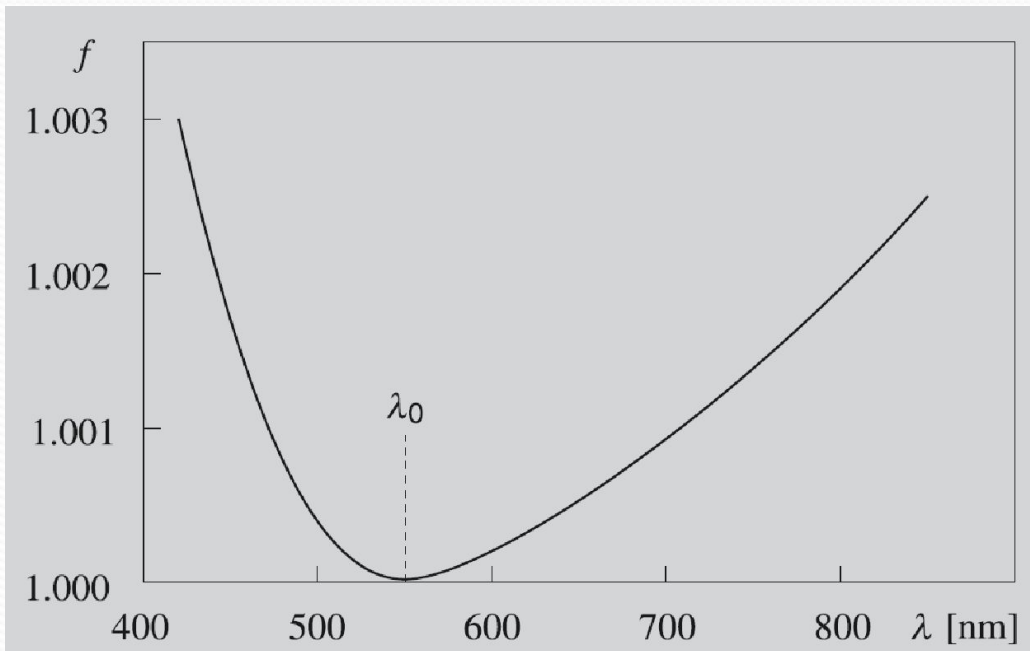


Рефлектор

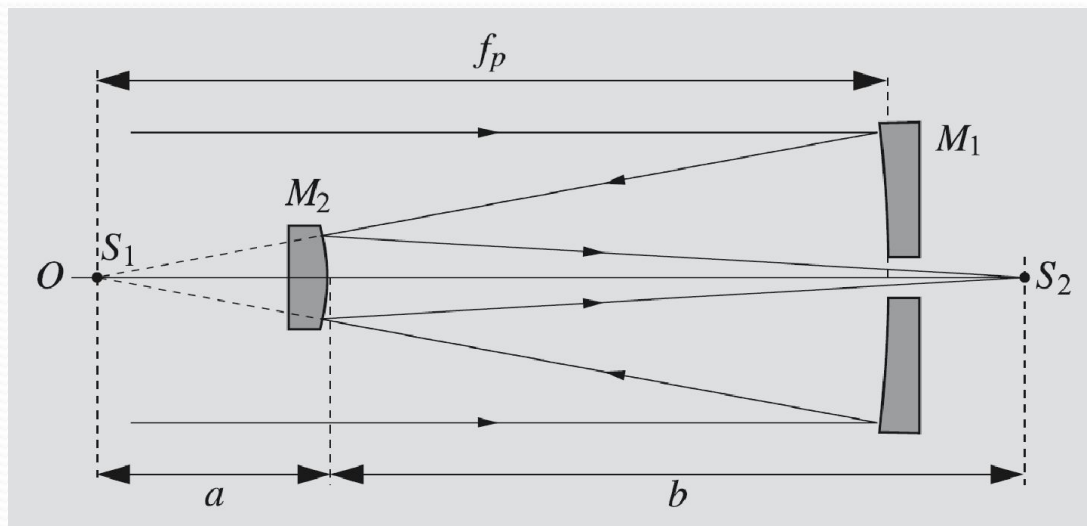
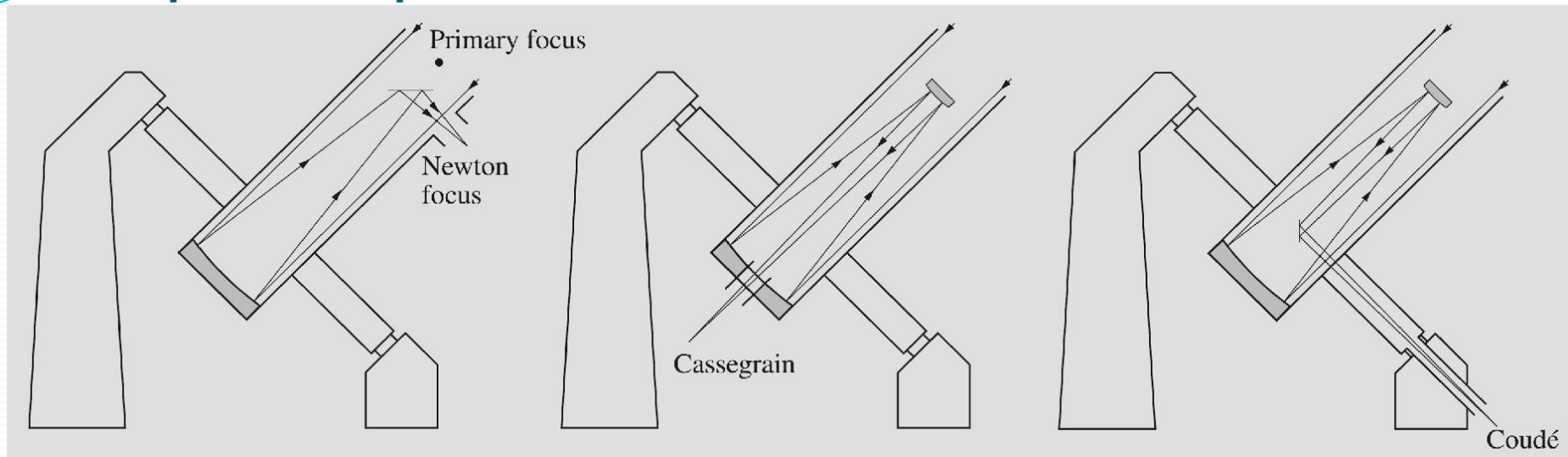
Рефрактор



Хроматическая aberrация
 $n = n(\lambda)$

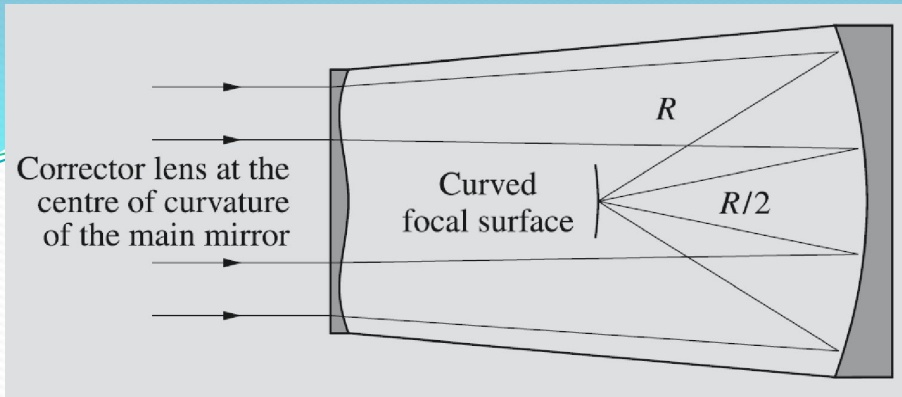


Рефлектор



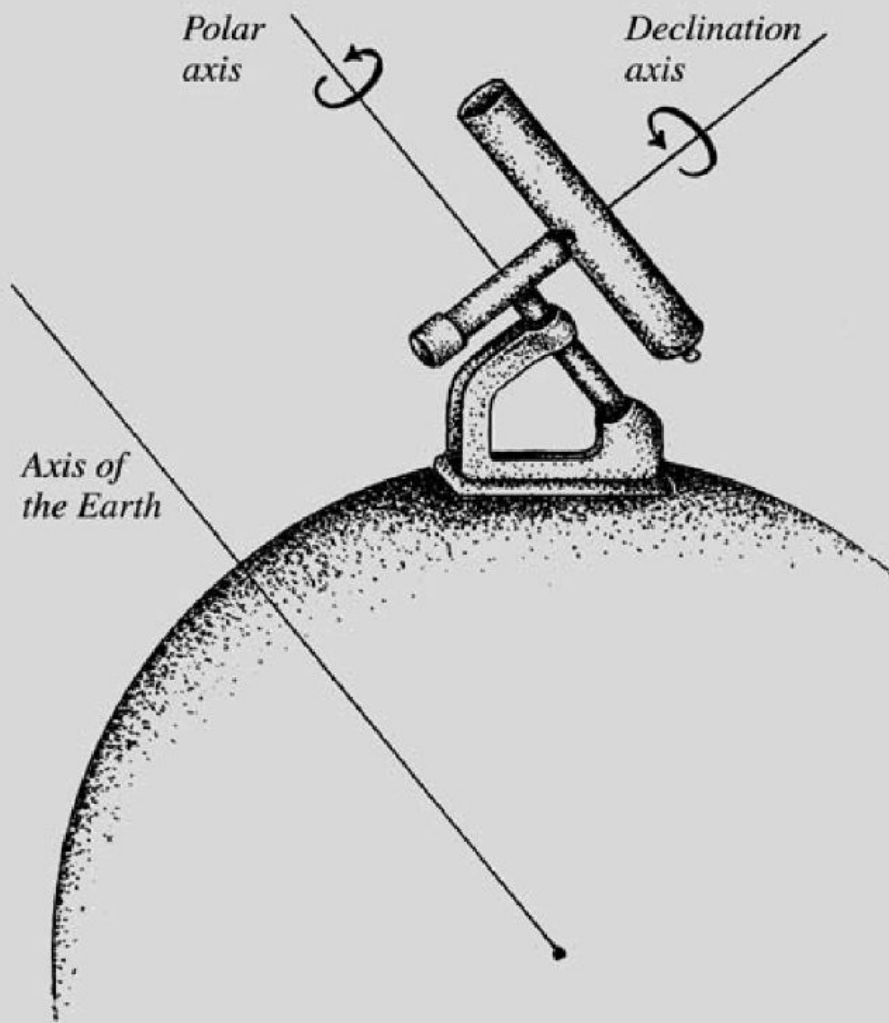
Телескоп Кассегрена

$$f_e = \frac{b}{a} f_p$$

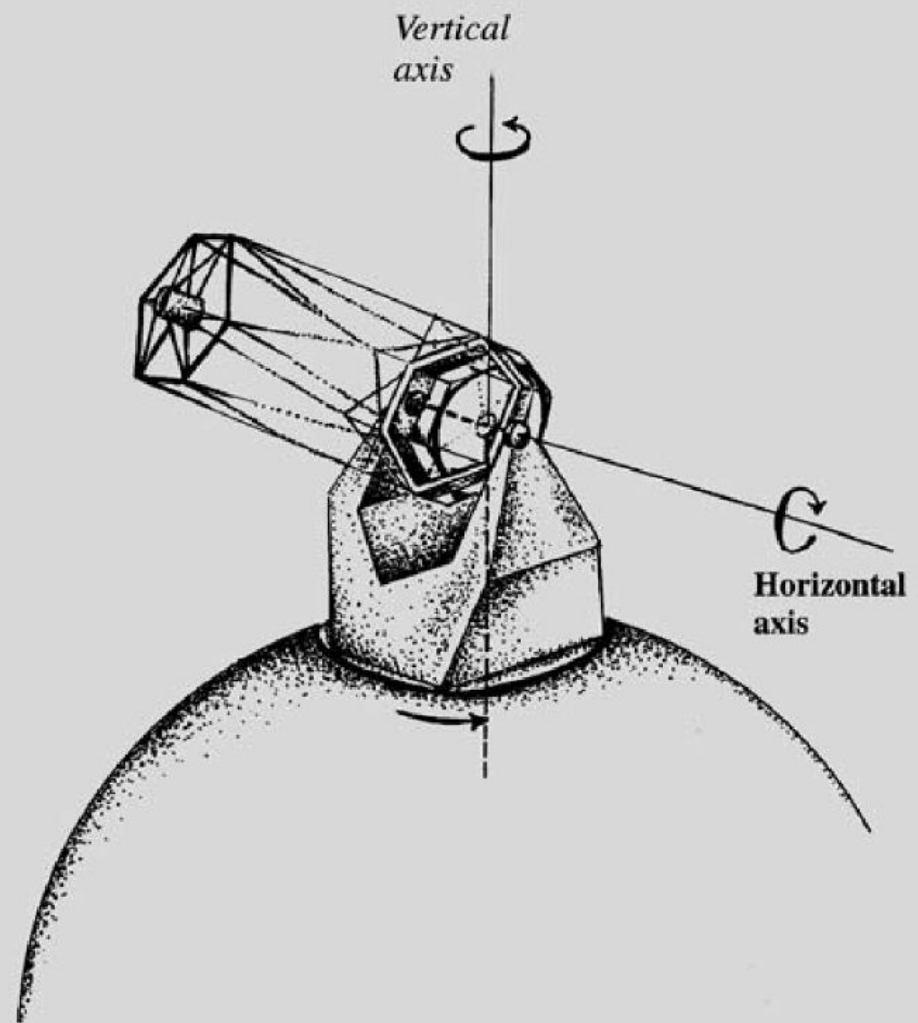


Телескоп Шмидта
Пример *катадиоптрической* системы
(линза + зеркало)

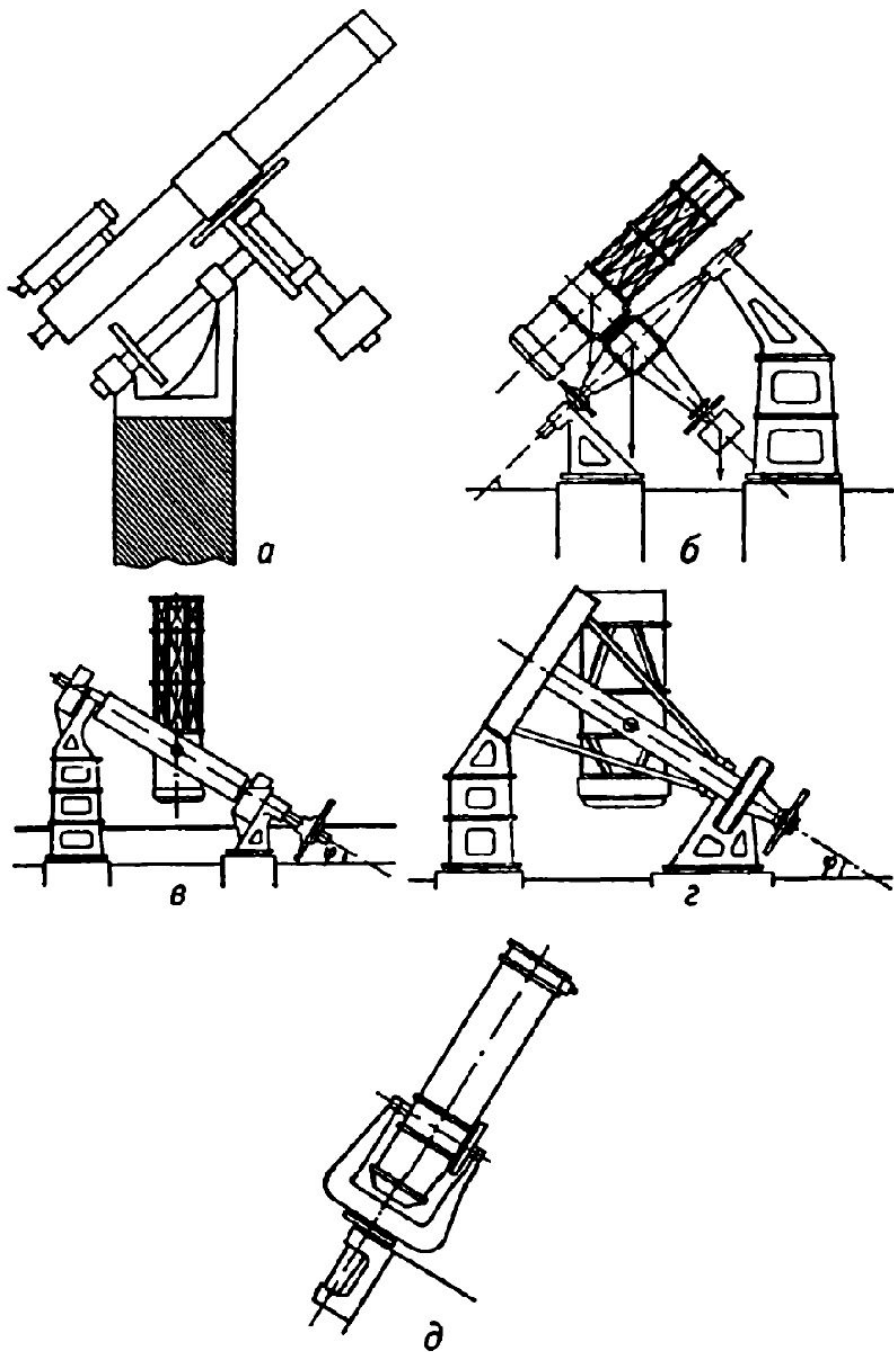
Типы монтировок телескопов



Экваториальная монтировка



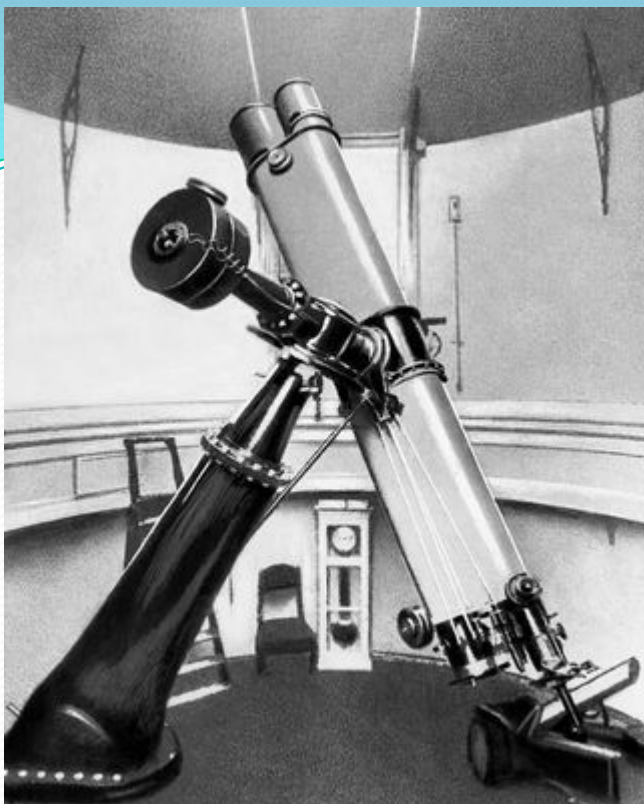
Горизонтальная монтировка



Экваториальные монтировки:

- а – немецкая монтировка;
- б – английская монтировка;
- в – монтировка с рамой;
- г – монтировка с ярмом;
- д – «вилка», или американская монтировка.

Астрографы



Нормальный астрограф Пулковской обсерватории

Астрограф (от др.-греч. ἄστρον – светило и γράφω – пишу) – телескоп для фотографирования небесных объектов.

Изначально, со времён изобретения Галилея, телескопы предназначались исключительно для визуальных наблюдений. В конце XIX в., с изобретением фотографии, в астрономию прочно вошёл фотографический метод наблюдений. В фокальную плоскость телескопа вставлялась фотопластинка или, реже, фотопленка, на которой запечатлялись требуемые объекты. Специализированные телескопы, предназначавшиеся только для фотографических наблюдений, получили название астрографов или камер.

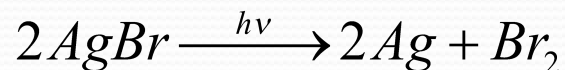
В наше время крупные инструменты предназначены в основном для фотографических наблюдений. Термин «астрограф» употребляется только по отношению к устаревшим телескопам в силу исторической традиции.

Приемники излучения

Фотографические пластинки

Светочувствительный слой – взвесь (суспензия) светочувствительных микрокристаллов (зёрен) галогенида серебра в твёрдом растворе защитного коллоида, чаще всего фотографической желатины. Фотографическая эмульсия представляет собой при температуре выше 40°C вязкую жидкость, которая с понижением температуры превращается в студень. Она наносится на стекло, целлулоидную пленку и бумагу в виде тонкого слоя, который после высушивания образует светочувствительный слой фотоматериала.

Основное соединение – бромид серебра AgBr



Фотоматериал способен накапливать сигнал, является панорамным приемником с большой информационной емкостью, обеспечивает долговременное хранение информации. Хорошо подходят для точных измерений положений источников излучения.

Низкая квантовая эффективность – 0.1 %

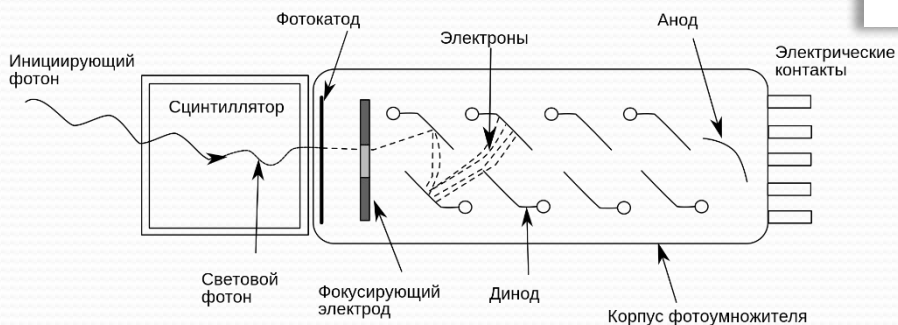
Невысокая фотометрическая точность – 5 %

Фотоэлементы и фотоумножители

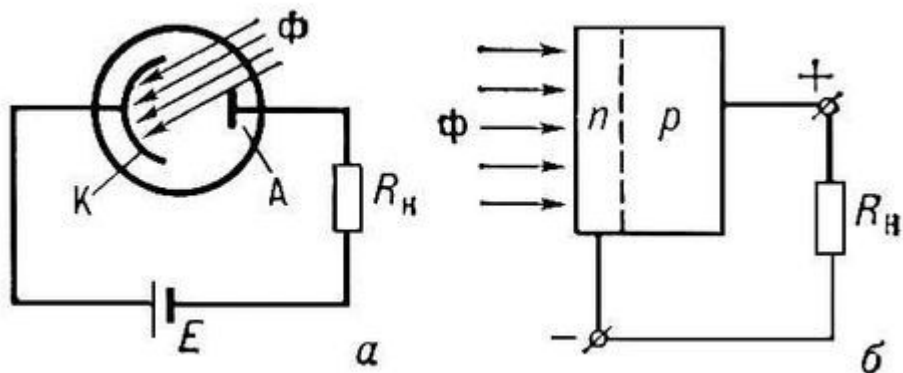
Квантовая эффективность – до 30 %

Линейный отклик на входной сигнал

Фотометрия – до 0.1 % и лучше



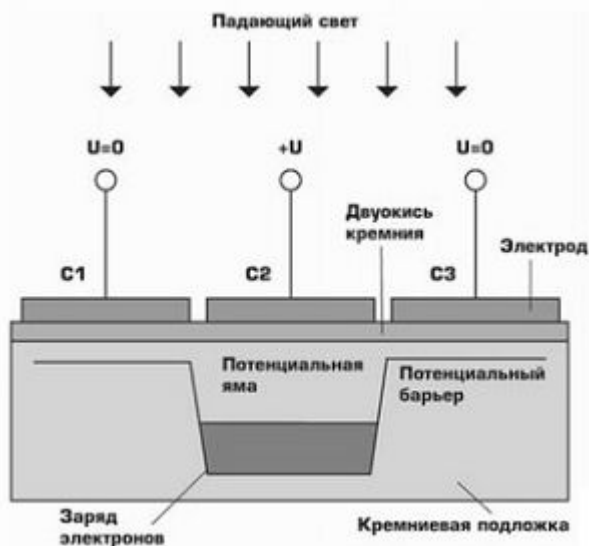
Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) — электровакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокаатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (обычно в 10^5 раз и выше).



Схематическое изображение фотоэлемента с внешним (а) и внутренним (б) фотоэффектом; К — фотокаатод; А — анод; Φ — световой поток; n и p — области полупроводника с донорной и акцепторной примесями; E — источник постоянного тока, служащий для создания в пространстве между К и А электрического поля, ускоряющего фотоэлектроны; Rн — нагрузка; пунктирной линией обозначен p — n-переход.

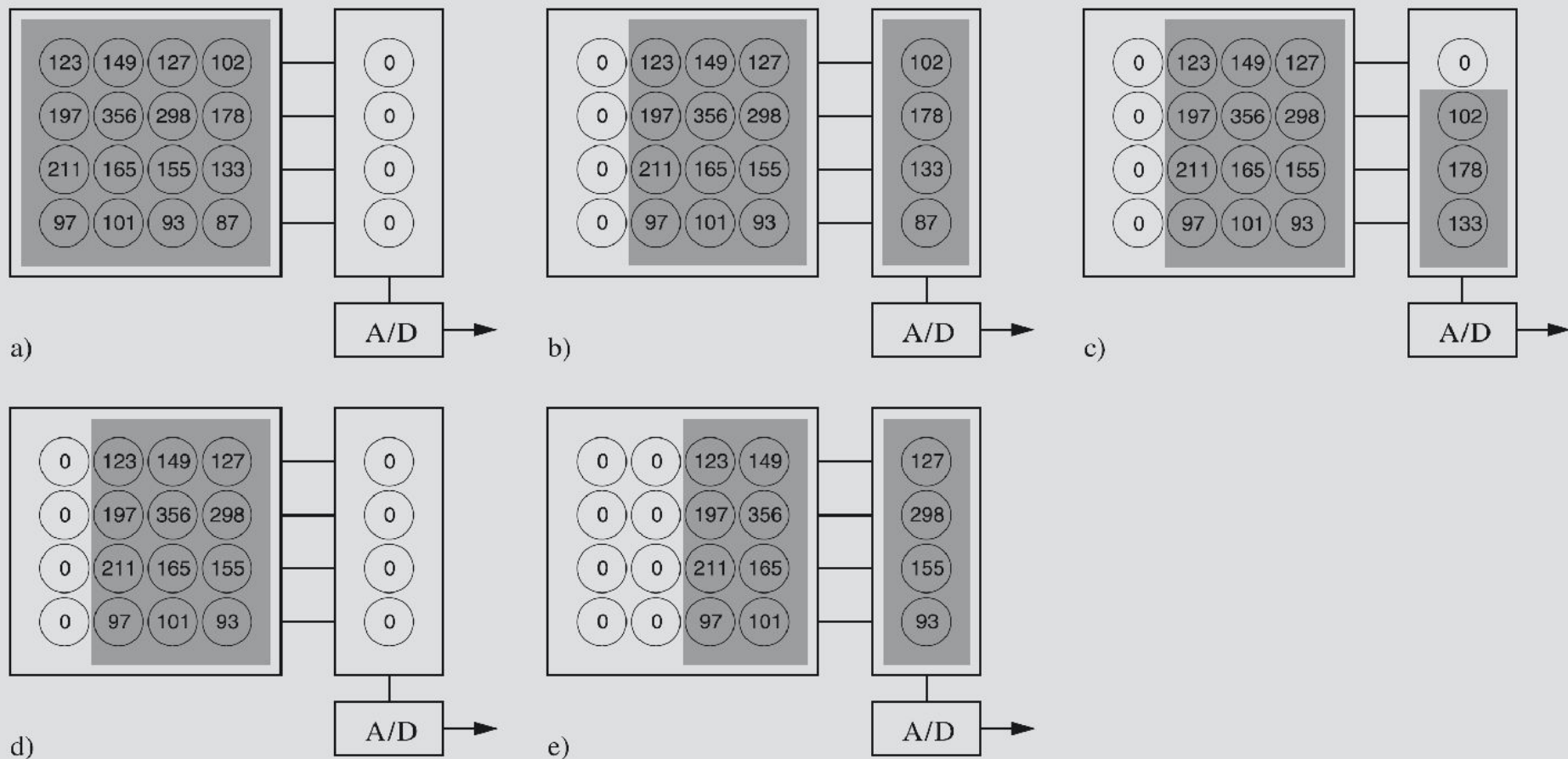
Прибор с зарядовой связью

ПЗС-матрица (сокр. от «прибор с зарядовой связью») или CCD-матрица (сокр. от англ. CCD, «Charge-Coupled Device») — специализированная аналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных фотодиодов, выполненная на основе кремния, использующая технологию ПЗС — приборов с зарядовой связью.



Символами C_1 , C_2 и C_3 обозначены МОП-конденсаторы (металл-окисел-полупроводник). Если к какому-либо электроду приложить положительное напряжение U , то в МДП-структуре возникает электрическое поле, под действием которого основные носители (дырки) очень быстро (за единицы пикосекунд) уходят от поверхности полупроводника. В результате у поверхности образуется обедненный слой, толщина которого составляет доли или единицы микрометра. Неосновные носители (электроны), генерированные в обедненном слое под действием каких-либо процессов (например, тепловых) или попавшие туда из нейтральных областей полупроводника под действием диффузии, будут перемещаться (под действием поля) к границе раздела полупроводник-диэлектрик и локализоваться в узком инверсном слое. Таким образом, у поверхности возникает потенциальная яма для электронов, в которую они скатываются из обедненного слоя под действием поля. Генерированные в обедненном слое основные носители (дырки) под действием поля выбрасываются в нейтральную часть полупроводника.

В течение заданного интервала времени каждый пиксель постепенно заполняется электронами пропорционально количеству попавшего в него света. По окончании этого времени электрические заряды, накопленные каждым пикселем, по очереди передаются на "выход" прибора и измеряются.

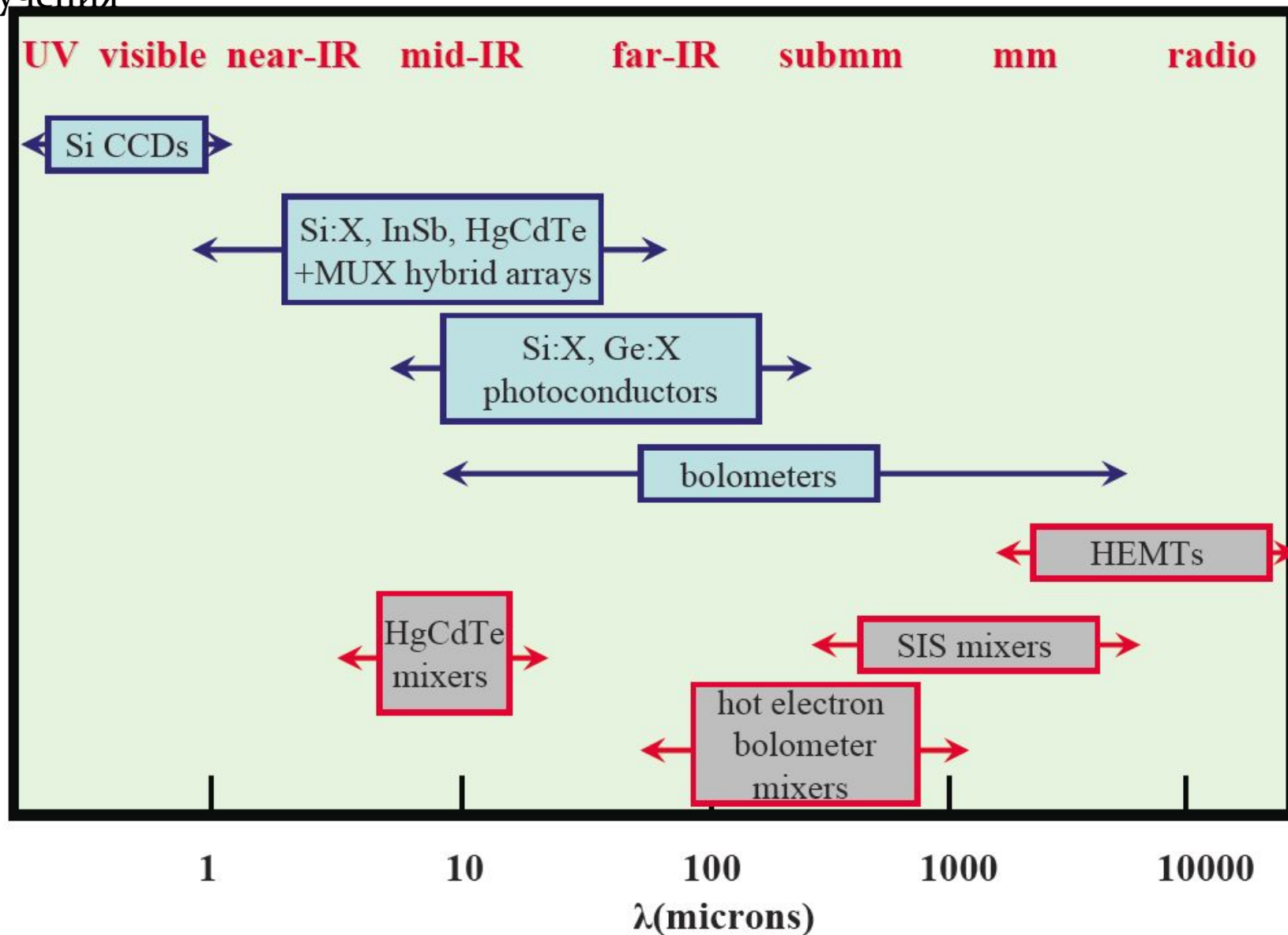


Высокая линейность отклика

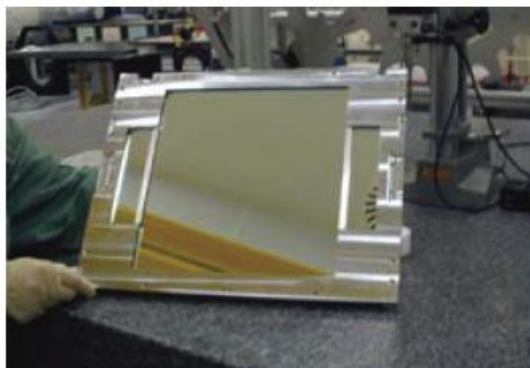
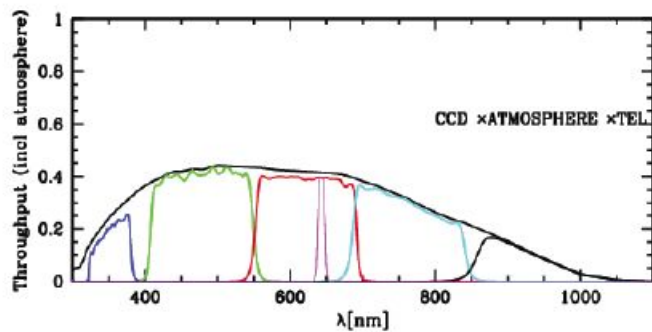
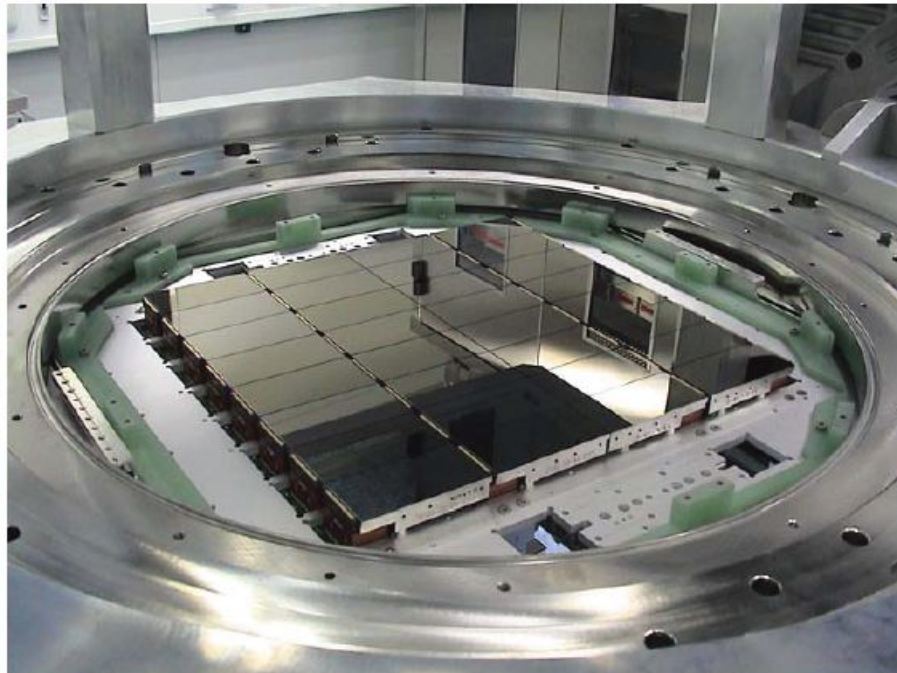
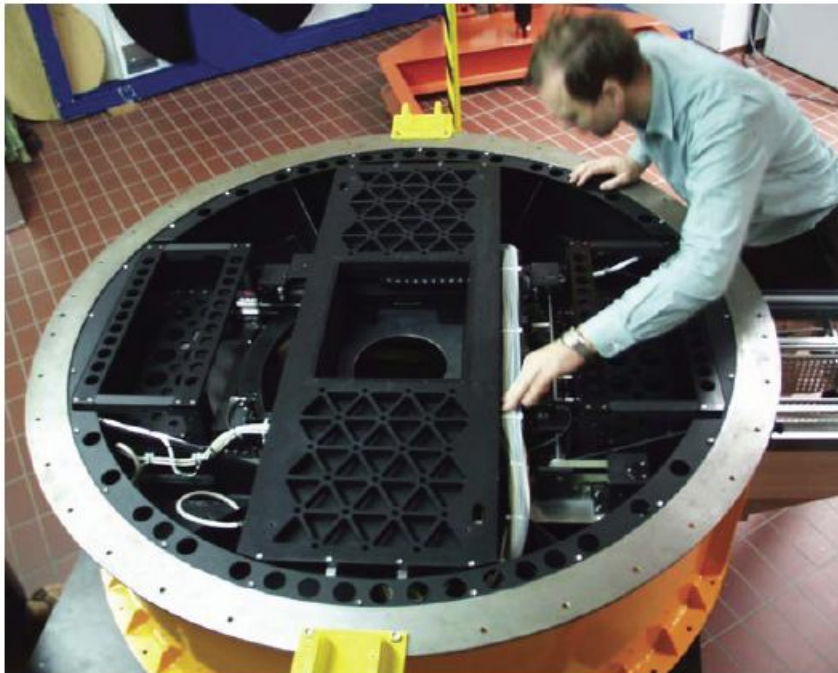
Квантовая эффективность достигает 1!

Спектральный диапазон чувствительности ПЗС составляет 50 - 14000 нм

Приемники излучения



OmegaCAM 16000x16000 pixels (~35 cm) 1 квадратный градус!



Современная астрофотометрия



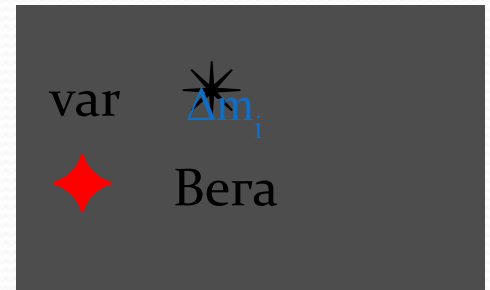
АСТРОФОТОМЕТРИЯ - раздел практической астрофизики, занимающийся световыми измерениями. Измерение светового потока даёт основную информацию о звёздах, галактиках, туманностях и др. астрономических объектах.

Для исследования распределения энергии в спектрах звёзд и др. астрофизич. объектов применяется многоцветная фотометрия, т. е. измерение светового потока в нескольких определённых участках спектра. Результат измерения принято выражать в звёздных величинах m - относительных (безразмерных) единицах

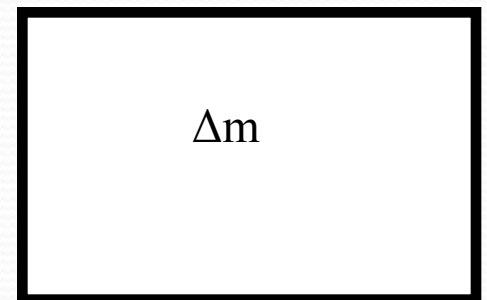
Абсолютная астрофотометрия:
сравнение с источниками с известным
абсолютным (т. е. в $\text{Вт м}^{-2} \text{нм}^{-2}$)
распределением энергии в спектре.



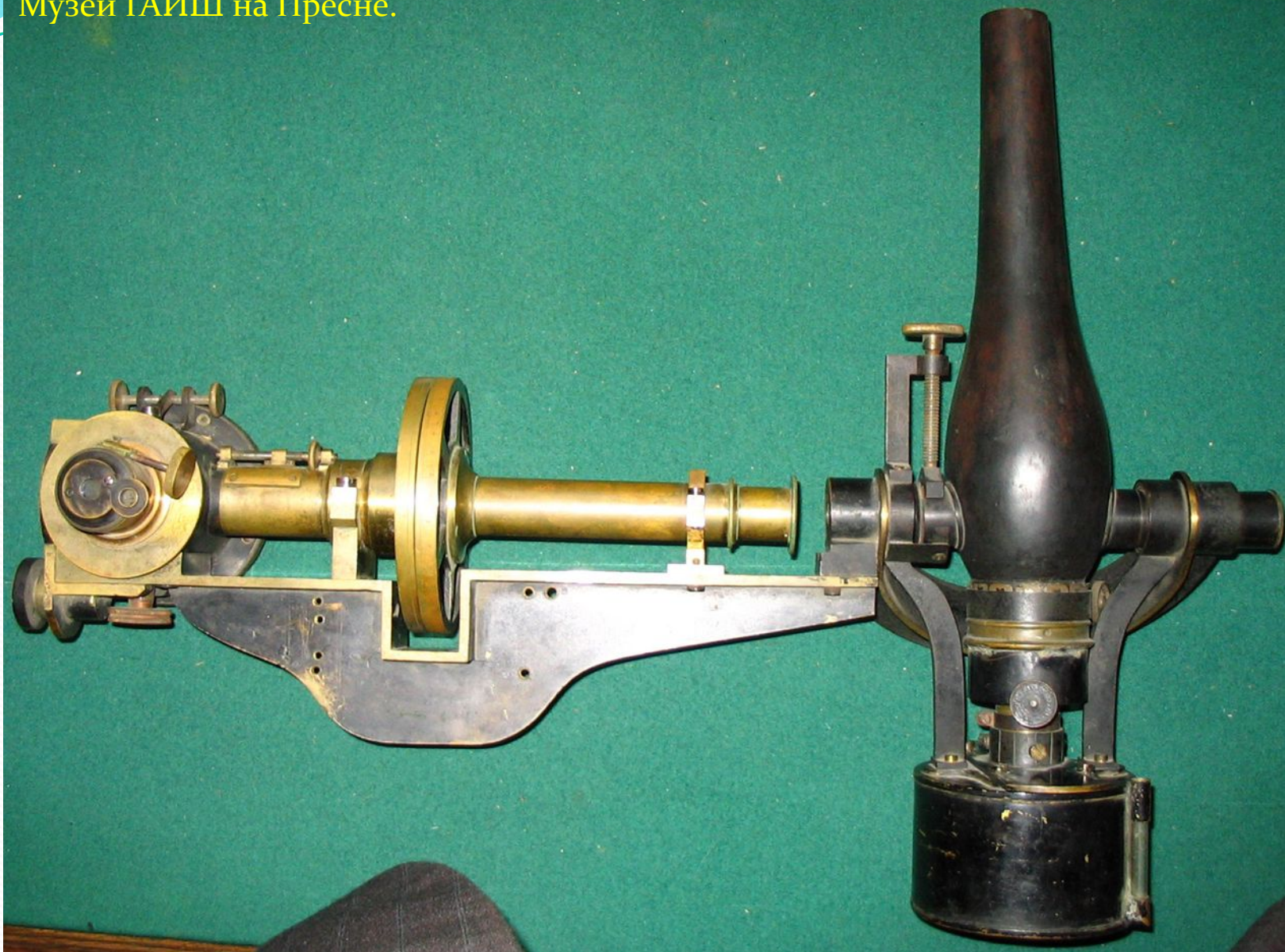
Относительно-абсолютная фотометрия:
сравнение со стандартом с известными
величинами



Относительно-относительная фотометрия:
отношение световых потоков (разность
звездных величин)



Внешний вид фотометра В.К. Цераского.
Музей ГАИШ на Пресне.



Классификация астрофотометрических методов по точности

Фотометрия

пороговая $\sigma > 0,1$

грубая $0,03 < \sigma < 0,1$

точная $0,005 < \sigma < 0,03$

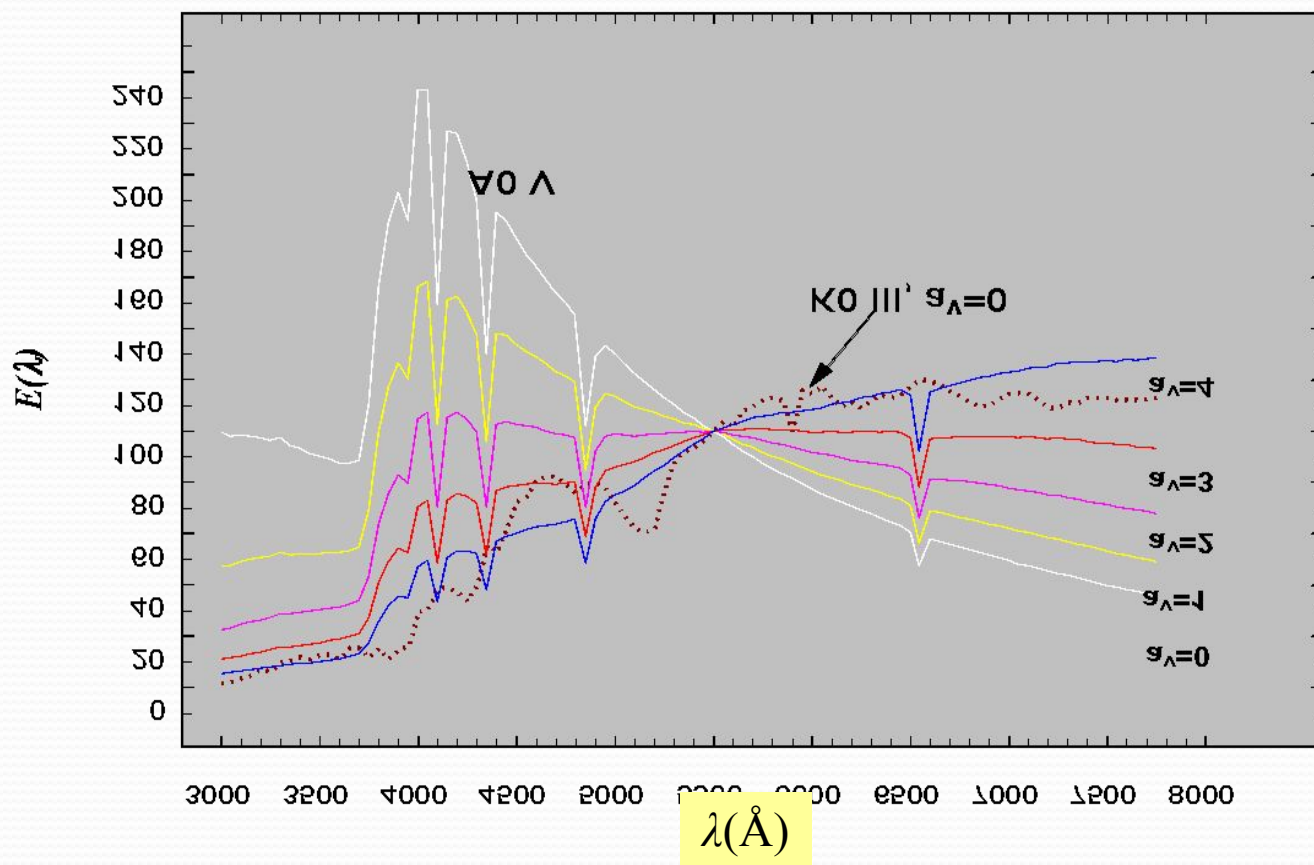
высокоточная $\sigma < 0,005$

$$m = \text{const} - 2,5 \lg \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) T(\lambda) d\lambda$$

Еще один мешающий фактор: межзвездная экстинкция

Подавляющее большинство звезд наблюдаются сквозь межзвездную пыль, которая ослабляет свет звезд и делает его более красным.

Межзвездная экстинкция искажает распределение энергии в спектре звезды и вносит дополнительное неизвестное: межзвездное покраснение звезды



Что делать?

В принципе, если получить высокоточный и высокодисперсный спектр звезды в широком спектральном интервале, то можно определить все основные параметры, включая межзвездную экстинкцию.

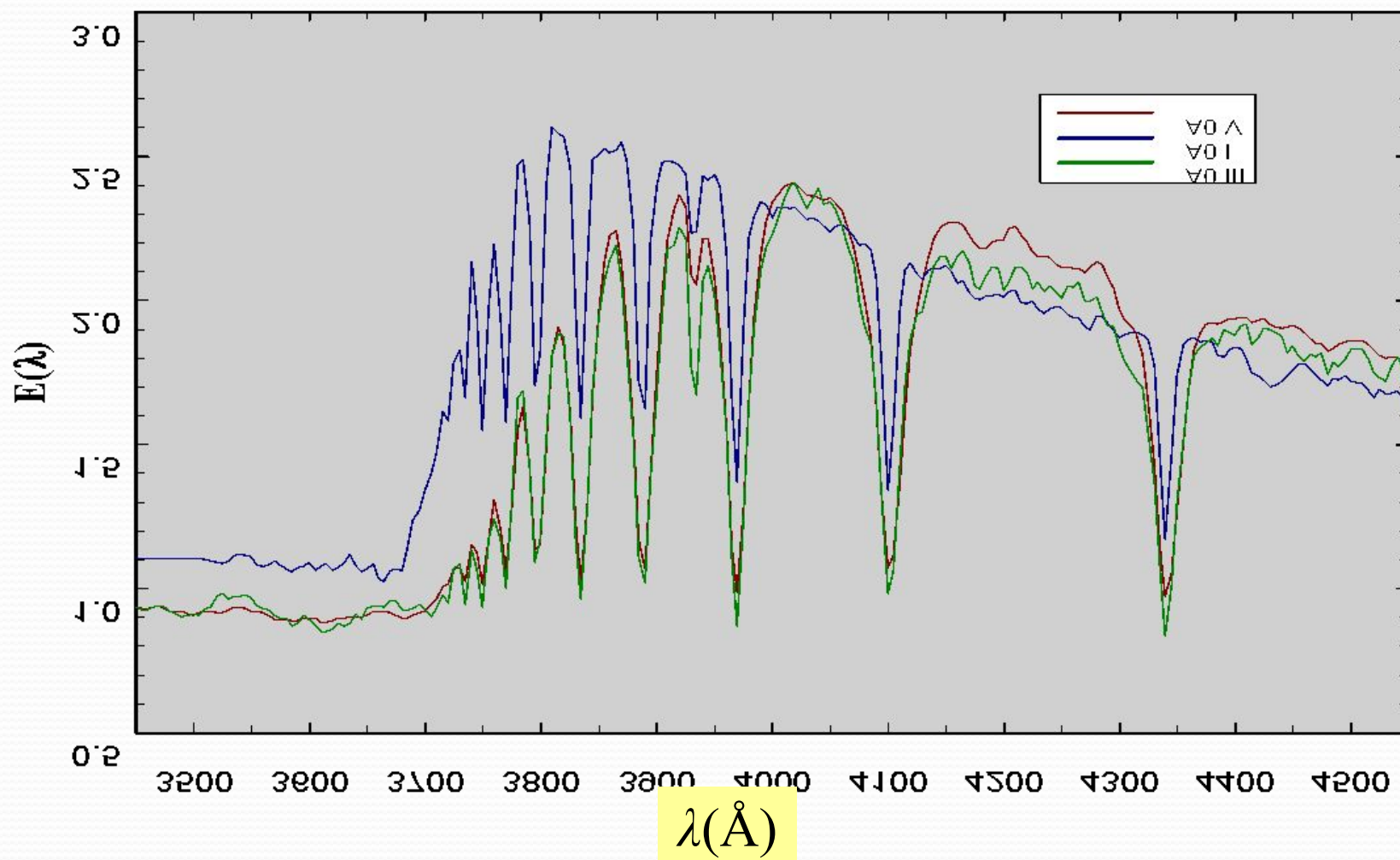
Многие задачи можно решить, используя более грубый метод: многоцветную фотометрию

Фотометрическая система

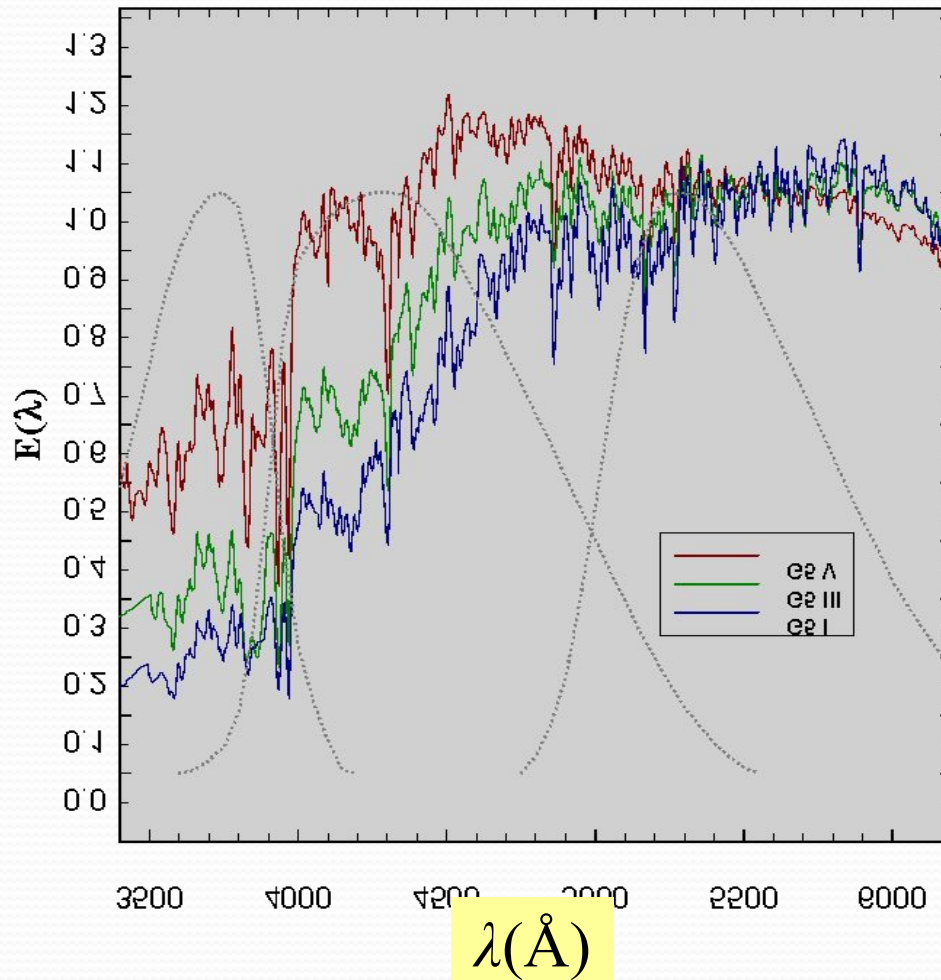
В. Страйжис:

Информация о температурах, ускорениях силы тяжести, химических составах, эволюционных стадиях и других физических свойствах звезд, а также об их межзвездном покраснении может быть получена или с помощью анализа спектров звезд, или путем фотометрии их света в определенных интервалах длин волн. Набор участков спектра, описываемых определенными кривыми реакции, в которых проводится измерение интенсивности излучения небесного объекта с какой-то конкретной целью, носит название фотометрической системы. Фотометрическая система может содержать от одной до нескольких десятков полос.

Эффект светимости для звезд спектрального класса A0



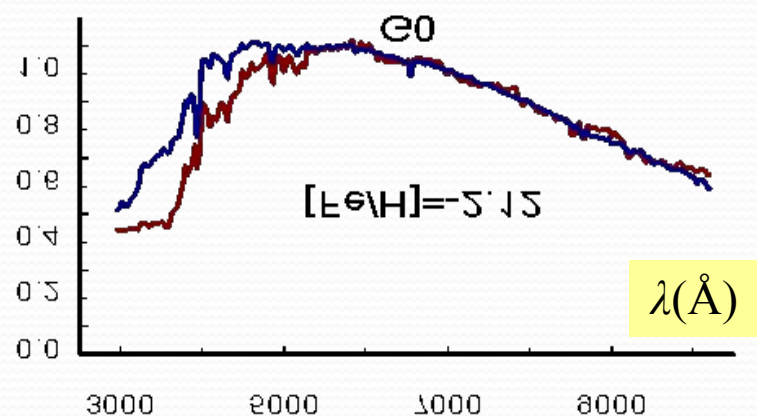
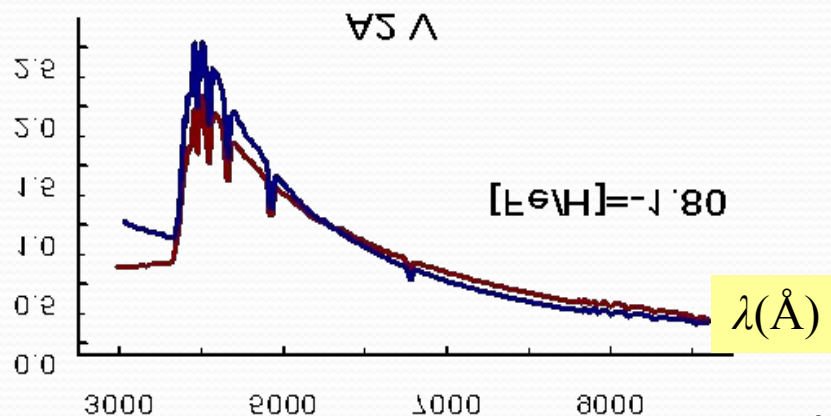
Эффект светимости для звезд спектрального класса G5



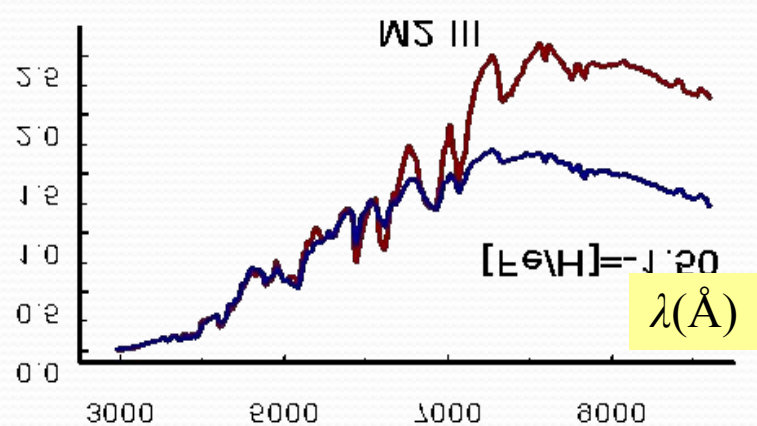
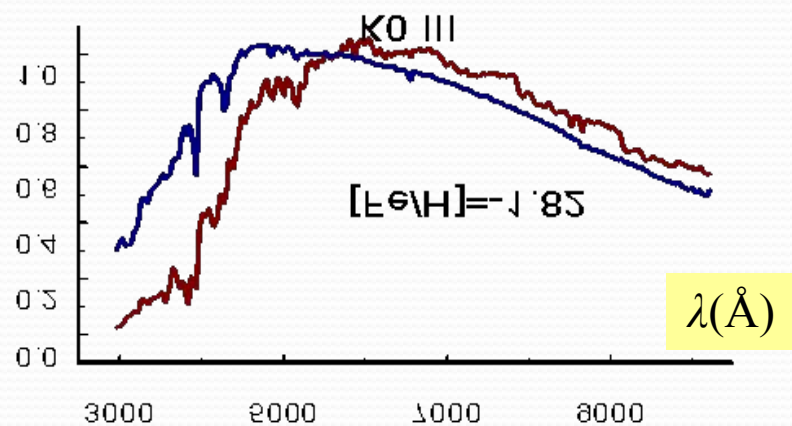
Sp* *U – B* *B – V

<i>G5 V</i>	<i>-0.065</i>	<i>0.663</i>
<i>G5 IV</i>	<i>0.154</i>	<i>0.739</i>
<i>G5 III</i>	<i>0.298</i>	<i>0.887</i>
<i>G5 II</i>	<i>0.401</i>	<i>0.903</i>
<i>G5 I</i>	<i>0.639</i>	<i>1.050</i>

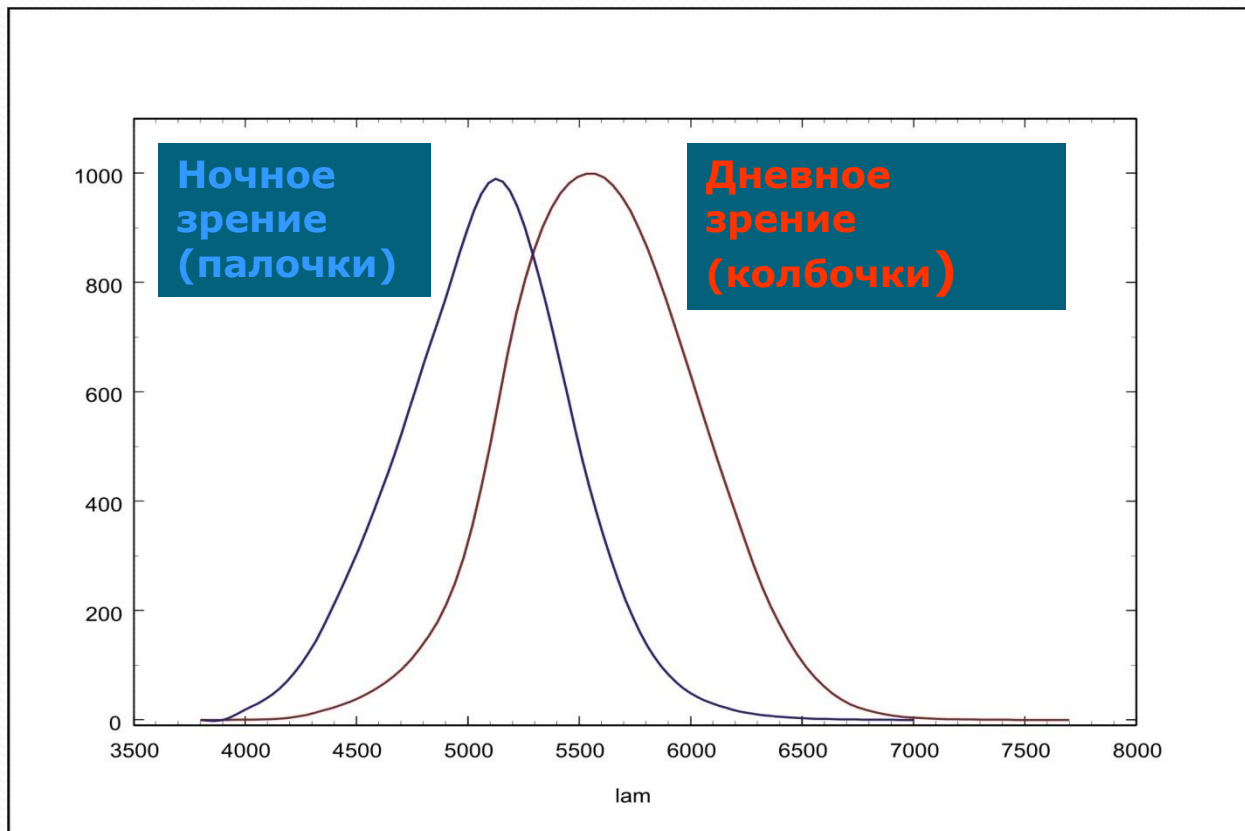
Эффект химического состава для звезд различных спектральных классов



— дефицит металлов
— нормальный химсостав



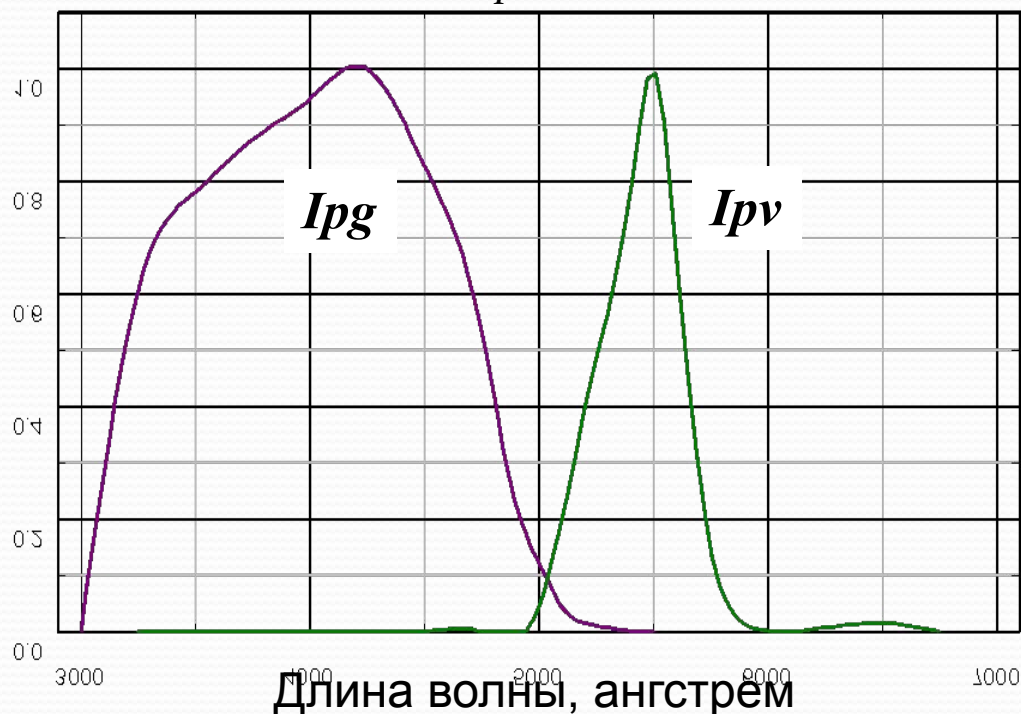
Первая в истории фотометрическая система: кривая спектральной чувствительности человеческого глаза



День: относительная спектральная световая эффективность
(устар.: кривая видности)

«Международная» система I_{pg} , I_{pv} – первая многоцветная фотометрическая система

Реализовывалась фотографическим путем с помощью несенсибилизированных (m_{pg}) и ортохроматических (m_{pv}) фотоэмульсий.



Первые фотоэлектрические системы

Первые фотоэлектрические наблюдения звезд были выполнены на рубеже первого и второго десятилетий XX в. До середины 1950-х гг. большое количество наблюдений было выполнено в разных реализациях двухцветных систем. В частности, была сделана попытка реализовать «Международную систему» фотоэлектрически (система R,V; Стеббинс, Уитфорд, Джонсон, работы с 1938 до 1950 г.).

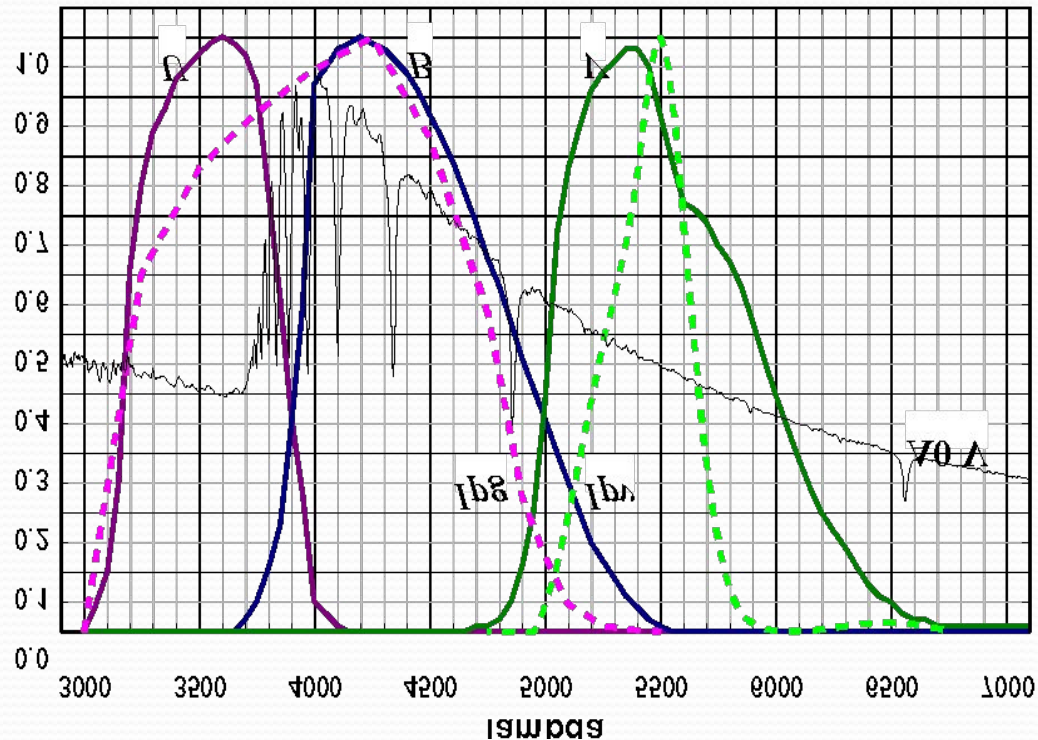
К сожалению, эти работы выполнялись в своих собственных системах, не придерживаясь каких-либо стандартных кривых реакции и их результаты имеют сейчас лишь исторический интерес.

Из важных достижений того времени следует назвать разработанный В. Б. Никоновым оригинальный метод учета ослабления света в земной атмосфере.



В.Б.Никонов

Интернациональная система и система *UBV*



Джонсон обнаружил, что причиной расхождений является неодинаковое включение ультрафиолетового излучения в области бальмеровского скачка в синюю фотометрическую полосу. Он добавил в состав синей кривой реакции светофильтр, обрезающий ультрафиолетовое излучение за бальмеровским скачком.

Джонсон по возможности строго определил и опубликовал кривые реакции системы *UBV*. *UBV* типичная широкополосная система.

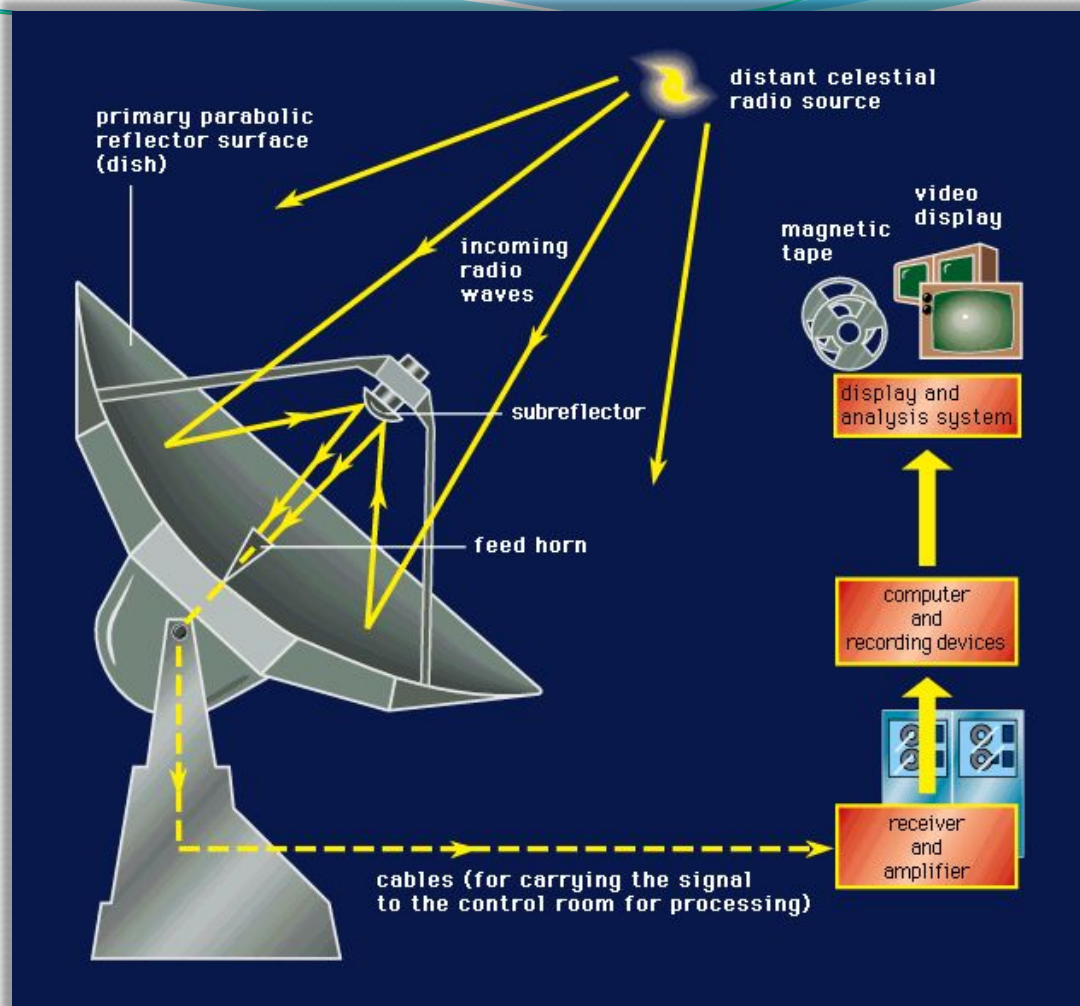
Задачи современной фотометрии:

1. Отождествить звезды в поле зрения, определить участок неба и ориентацию космического аппарата. Проблема: измерения проводятся не в той спектральной области, в которой составлены каталоги.
2. Нельзя непосредственно получить спектры миллионов слабых звезд. Можно восстановить распределение энергии на основе данных многоцветной фотометрии. Результат: величины в любой фотометрической полосе; физические характеристики звезд. Требование: высокая точность величин и показателей цвета.
3. Изучение переменности звезд остается важнейшей задачей астрофизики возникают новые задачи, требующие предельно высокой точности фотометрии: пульсации с малыми амплитудами, астросейсмология и т. д.
4. Сегодняшняя точность параллаксов $0.002''$, перспектива: $0.00001''$. Прохождение света через оптические элементы зависит от длины волны. Редукция координат должна проводиться с учетом данных высокоточной фотометрии (уравнение блеска, уравнение цвета).

Радиотелескопы

Радиоизлучение от космических объектов принимается специальными установками, называемыми **радиотелескопами**, которые состоят из антенны и очень чувствительного приемника – **радиометра**. В настоящее время космическое радиоизлучение исследуется в длинах волн от одного миллиметра до нескольких десятков метров.

Принцип работы радиотелескопа больше схож принципом работы фотометра, нежели оптического телескопа. Радиотелескоп **не может строить изображение непосредственно**, он лишь измеряет энергию излучения, приходящего с направления, в котором «смотрит» телескоп. Таким образом, чтобы получить изображение протяженного источника, радиотелескоп должен промерить его яркость в каждой точке.

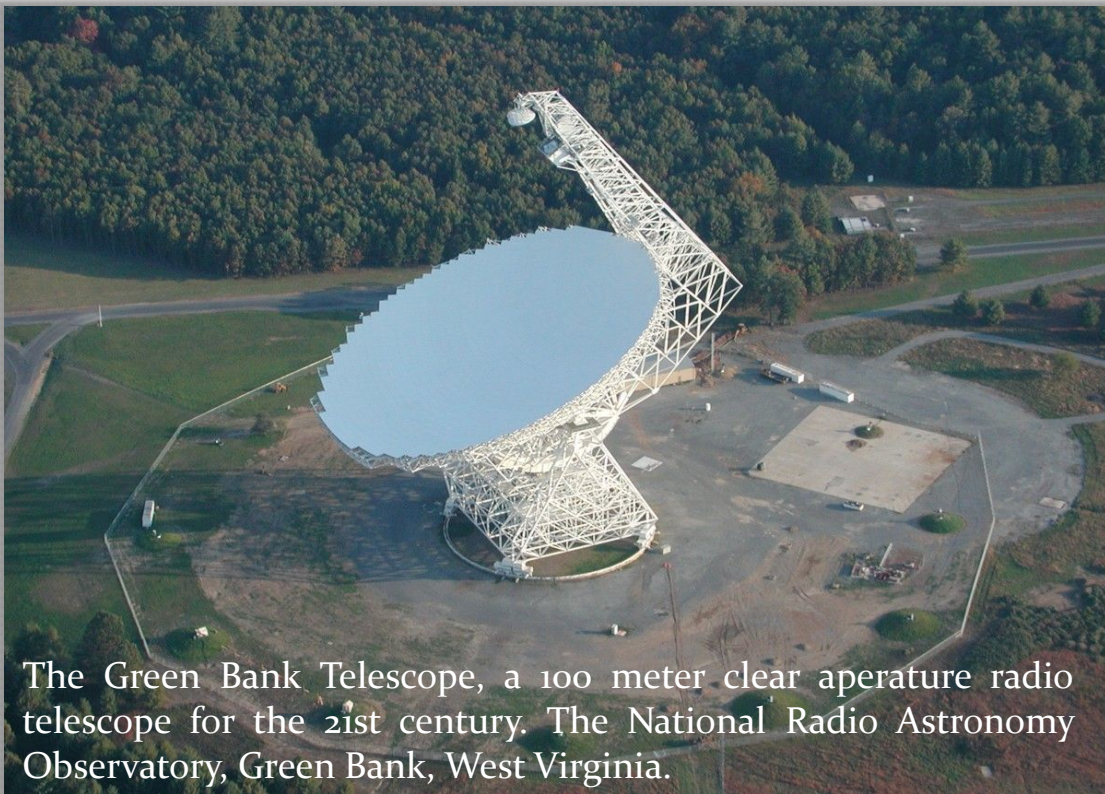


Классификация радиотелескопов

Антенны с заполненной апертурой

Антенны этого типа похожи на зеркала оптических телескопов и являются наиболее простыми и привычными в использовании. Антенны с заполненной апертурой просто собирают сигнал от наблюдаемого объекта и фокусируют его на приёмнике. Записанный сигнал уже несет в себе научную информацию и не нуждается в синтезе. Недостатком таких антенн является низкая разрешающая способность. Антенны с заполненной апертурой можно разделить на несколько классов по форме их поверхности и методу монтирования.

Параболоиды вращения. Практически все антенны такого типа устанавливаются на альт-азимутальных монтировках и являются полноповоротным. Главным их преимуществом является то, что такие радиотелескопы могут, как и оптические, наводиться на объект и вести его.



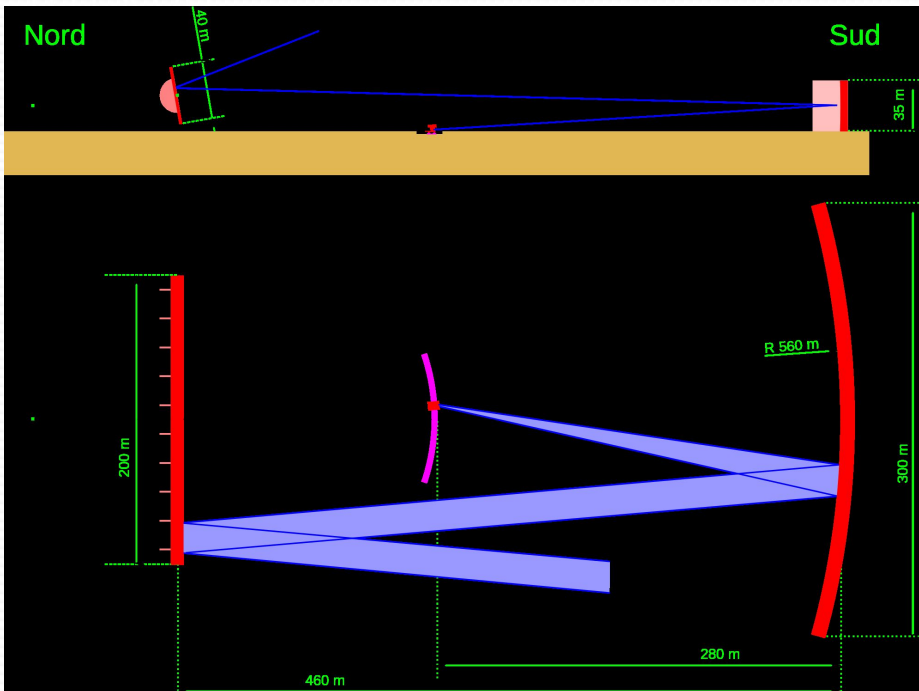
The Green Bank Telescope, a 100 meter clear aperture radio telescope for the 21st century. The National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, West Virginia.

The 15 m Maxwell submm telescope on Mauna Kea, Hawaii, is located in a dry climate at an altitude of 4100 m. Observations can be made down to wavelengths of 0.5mm.





Параболические цилиндры. Строительство полноповоротных антенн сопряжено с определёнными трудностями, связанными с огромной массой таких конструкций. Поэтому строят неподвижные и полуподвижные системы. Стоимость и сложность таких телескопов растёт гораздо медленнее с их ростом размеров. Параболический цилиндр собирает лучи не в точке, а на прямой, параллельной его образующей (фокальная линия). Из-за этого телескопы данного типа имеют несимметричную диаграмму направленности и различное разрешение по разным осям.



Антенны с плоскими отражателями. Для работы на параболическом цилиндре требуется, чтобы на фокальной линии было размещено несколько детекторов, сигнал с которых складывается с учетом фаз. На коротких волнах это сделать непросто из-за больших потерь в линиях связи. Антенны с плоским отражателем позволяют обойтись лишь одним приёмником. Такие антенны состоят из двух частей: подвижного плоского зеркала и неподвижного параболоида. Подвижное зеркало «наводится» на объект и отражает лучи на параболоид. Параболоид концентрирует лучи в точке фокуса, где располагается приёмник.



Земляные чаши. Представителем этого типа стал 300-метровый радиотелескоп Аресибо. Он расположен в карстовой воронке, дно которой вымощено алюминиевыми листами в форме сфероида. приёмник на специальных опорах подвешивается над зеркалом. Недостатком данного инструмента является то, что ему доступна область неба в пределах 20° от зенита.

Китай приступил к строительству телескопа с 500-метровой апертурой сферического отражателя (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, FAST). Предварительная подготовка проекта заняла четырнадцать лет.

Сферический отражатель FAST будет состоять из 4600 рабочих панелей. Мощность телескопа в десять раз превзойдет возможности крупнейшего на сегодня подобного сооружения, возведенного американскими специалистами в обсерватории Аресибо (Пуэрто-Рико).

До сих пор астрономы могли наблюдать лишь 1 760 пульсаров. С помощью FAST можно будет обнаружить от семи до десяти тысяч импульсных источников радиоизлучения в течение одного года. Наблюдение пульсаров помогло ученым сделать несколько важных открытий – к примеру, подтвердить существование гравитационного излучения, предсказанного общей теорией относительности.





Антенные решётки (синфазные антенны)

Такой телескоп состоит из множества элементарных облучателей (диполей или спиралей) расположенных на расстоянии меньшем, чем длина волны. Благодаря точному управлению фазой каждого элемента, удастся добиться высокой разрешающей способности и эффективной площади. Недостатком таких антенн является то, что они изготавливаются под строго определённую длину волны.

БСА (BSA) – Большая сканирующая антенна – радиотелескоп меридианного типа с заполненной апертурой – представляет собой плоскую эквидистантную решетку из 16384 волновых диполей размером 187 x 384 м соответственно в направлении Восток-Запад и Север-Юг. Изначально рабочая частота была 102,5 МГц $\pm$ 1,5 МГц, но после того как этот диапазон был отдан для радиовещания пришлось переделать телескоп для работы на частоте 109–113 МГц.



ДКР-1000 (DCR-1000) – Диапазонный Крестообразный Радиотелескоп 1000-метровый – радиотелескоп меридианного типа с незаполненной апертурой – состоит из двух антенн Север-Юг и Восток-Запад, расположенных в форме креста.

Антенна Север-Юг была разрушена «охотниками за цветным металлом» в конце 90-х годов XX в. и с тех пор не восстановлена.

Антенны с незаполненной апертурой

Наиболее важными для целей астрономии являются две характеристики радиотелескопов: разрешающая способность и чувствительность. При этом чувствительность пропорциональна площади антенны, а разрешение – максимальному размеру. Таким образом, самые распространенные круглые антенны дают наихудшее разрешение при той же эффективной площади. Поэтому в радиоастрономии появились телескопы с малой площадью, но большой разрешающей способностью. Такие антенны получили название ***антенн с незаполненной апертурой***, так как они имеют «дыры» в апертуре, превосходящие длину волны. Чтобы получить изображение с таких антенн, наблюдения нужно проводить в режиме синтеза апертур. Для апертурного синтеза достаточно двух синхронно работающих антенн, расположенных на некотором расстоянии, которое называют базой.



РАТАН-600



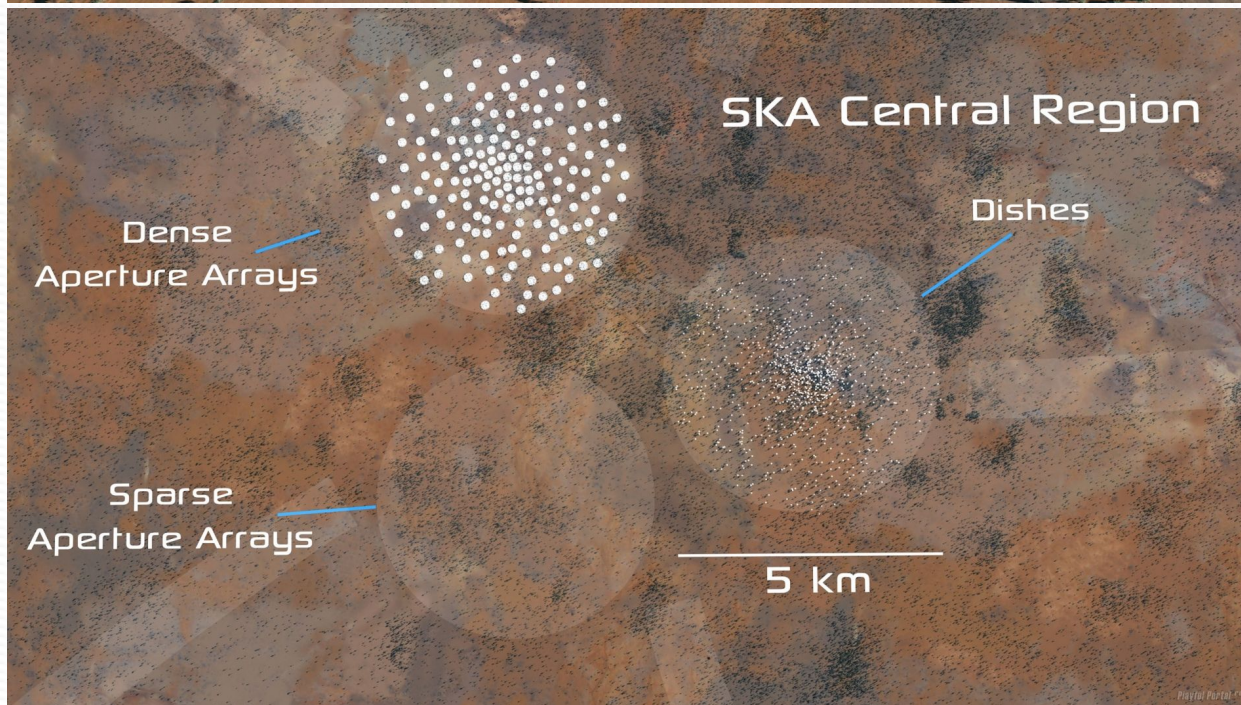
VLA (Very Large Array /Очень Большая Антенная Решётка, Сверхбольшая Антенная Решётка) – 27 радиотелескопов в штате Нью Мексико (США), работающих как единая многовибраторная сложная антенна – антенная решётка.

Антенны радиотелескопов 25 метров в диаметре. Их общая чувствительность эквивалентна антенне диаметром 36 километров. VLA использовался для поисков воды на Меркурии, микро-квазаров, радио-корон вокруг звёзд и многих других исследований.



В 2012 г. принято решение о строительстве самого большого и мощного в мире радиотелескопа SKA (Square Kilometer Array). Его элементы будут предположительно расположены между Австралией, Новой Зеландией и южной Африкой.

Стоимость проекта, в котором участвуют 20 стран, около 2 млрд. долларов. Радиотелескоп SKA, представляющий собой 3 тысячи 15-метровых «тарелок» и еще большего количества простых антенн, как ожидается, по чувствительности будет превосходить все существующие сегодня инструменты как минимум в десятки раз. Первый этап строительства SKA планируется завершить к 2016-20 гг., а к 2024 г. радиотелескоп, который призван помочь ученым ответить на фундаментальные вопросы о развитии Вселенной, уже будет полностью готов к научной работе.





ALMA

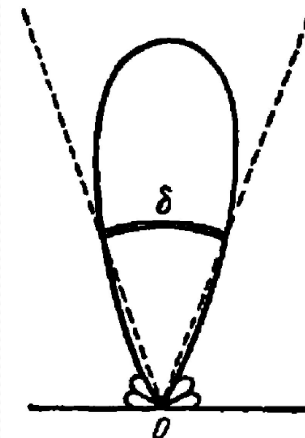


Atacama Large Millimeter Array (ALMA) – международный проект, целью которого является постройка крупнейшей астрономической обсерватории в Чили. По завершению проекта комплекс будет состоять как минимум из 66 радиотелескопов 7 и 12 метров в диаметре каждый, объединённых в единый радиоинтерферометр. Для корреляции совместной работы всех антенн на станции установлен суперкомпьютер, способный выполнять 17 квадриллионов операций в секунду.

Принципы работы радиотелескопов

Для описания угловой разрешающей силы радиотелескопа применяется специальная характеристика – **диаграмма направленности**. Диаграммой направленности называется зависимость чувствительности радиотелескопа от положения точечного источника радиоизлучения по отношению к антенне.

Радиотелескоп с симметричной параболической антенной имеет диаграмму направленности, симметричную относительно ее оси. Примерный вид такой диаграммы показан на рисунке.



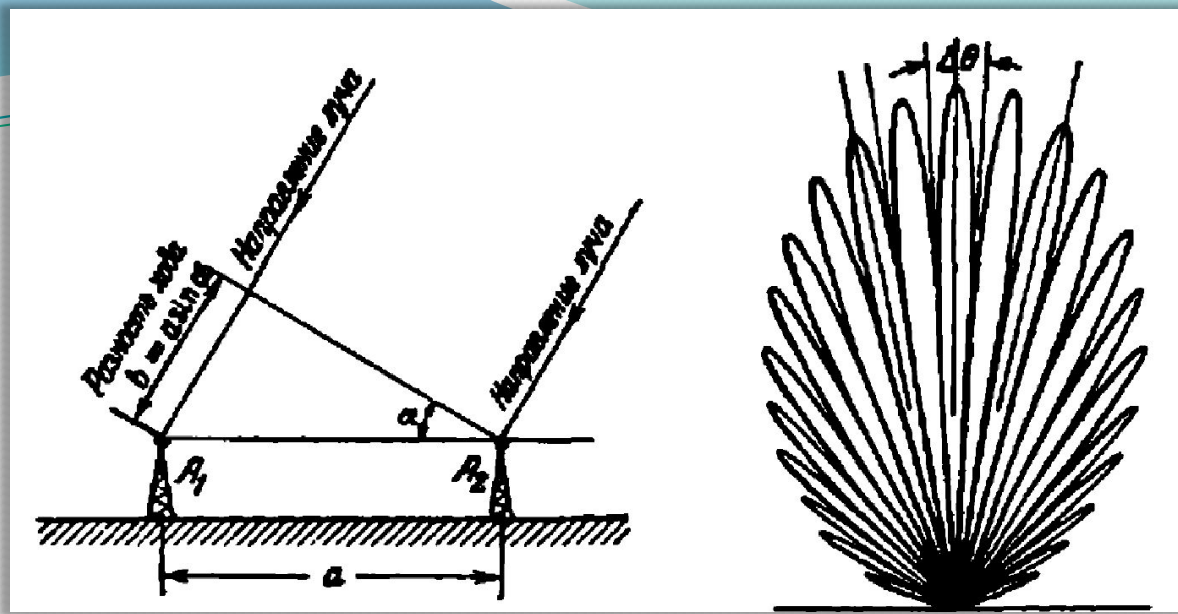
Угловое разрешение радиотелескопа (т. е. минимальный угол между двумя источниками, которые регистрируются как отдельные) приблизительно равно ширине диаграммы направленности «по половине мощности» (угол δ на рисунке).

Физическая причина, ограничивающая теоретическое угловое разрешение, – это дифракция, так же как и в оптических телескопах.

Так как длины волн в радиодиапазоне очень велики, то радиоастрономические зеркала, несмотря на огромные размеры, значительно уступают по угловому разрешению оптическим. Так, 300-метровая антенна Аресибо на своей рабочей длине волны в 70 см может обеспечить угловое разрешение

$$\delta = \frac{0.7}{300} = 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \approx 8'.$$

т. е. в несколько сотен раз хуже среднего практического предела оптического телескопа (1-3"). Тем не менее имеется способ, который позволяет сравнивать разрешающую силу тех и других телескопов. Это можно сделать с помощью **радиоинтерферометра**.



Простейший радиоинтерферометр представляет собой систему из двух антенн разнесенных на некоторое расстояние a , которое называется **базой интерферометра**. Облучатели обеих антенн передают сигналы на вход одного и того же приемника.

На антенну A_1 электромагнитная волна приходит с некоторым запаздыванием по отношению к A_2 . Если запаздывание («разность хода») равно целому числу длин волн,

$$b = a \sin \alpha = n\lambda,$$

то сигналы на входе приемника складываются, так как они приходят в одной фазе. Если же

$$b = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda,$$

то сигналы вычитаются, так как приходят в противофазе. В результате диаграмма направленности интерферометра состоит из узких лепестков, угловое расстояние между максимумами (и минимумами) которых равно

$$\Delta\theta = \sin^{-1} \frac{(n+1)\lambda}{a} - \sin^{-1} \frac{n\lambda}{a} \approx \frac{\lambda}{a}$$

вдоль направления, параллельного базе.

Расстояние a может быть сделано очень большим:

$$a \gg D;$$

поэтому интерферометрами можно разрешить очень близко расположенные точечные источники.

Если угловые размеры источника много больше, чем $\Delta\theta$, то источник практически не регистрируется интерферометром. Изменяя длину базы, можно определить размеры и распределение яркости источника вдоль одной координаты. Прodelав такой же ряд измерений при другой ориентации базы, можно узнать распределение яркости и по другой координате.

Разработана методика радиоинтерферометрических наблюдений с использованием двух и более отдельных приемников. В этом случае антенны интерферометра могут быть разнесены на тысячи километров. С помощью таких систем в радиоастрономии удалось получить угловое разрешение порядка 10^{-4} секунды дуги – намного лучше, чем дают оптические телескопы.

Если антенны всего две, то придется проводить наблюдение, затем менять базу, проводить наблюдение в следующей точке, опять менять базу и т. д. Такой синтез называется **последовательным**. По такому принципу работает классический радиоинтерферометр. Недостаток последовательного синтеза состоит в том, что он требует много времени и не может выявить переменность радиоисточников на коротких временах. Поэтому чаще применяется **параллельный** синтез. В нём участвует сразу много антенн (приёмников), которые одновременно проводят измерения для всех нужных баз.

Крупные массивы типа VLA часто относят к последовательному синтезу. Однако, ввиду большого количества антенн, практически все базы уже представлены, и дополнительных перестановок обычно не требуется.

Лазерная локация Луны

Лазерная локация Луны – измерение расстояний между двумя точками на поверхностях Земли до Луны соответственно посредством лазерной локации с использованием уголковых отражателей, находящихся на поверхности Луны, или без них (на ранних этапах исследований). Научное значение таких экспериментов состоит в уточнении гравитационной постоянной и проверки теории относительности; уточнении ряда параметров движения динамической системы Земля-Луна; получении новых данных о физических свойствах и внутреннем строении Земли и Луны, и т. п.

Площадь пучка от сигнала на поверхности Луны составляет 25 км^2 (площадь уголковых отражателей при этом – примерно 1 м на 1 м). Отражённый от прибора на Луне свет в течение примерно одной секунды возвращается в телескоп, далее проходит через систему фильтрации для получения фотонов на нужной длине волны и для отсева шумов.

С 1970-х годов точность измерения расстояния увеличилась с нескольких десятков (порядка 40) до нескольких (порядка 2-3) сантиметров. Новая станция Apache Point может достигнуть точности порядка миллиметров.

Точность измерения времени в настоящем – порядка 30 пикосекунд (что и соответствует примерно двум сантиметрам точности измерения расстояния).



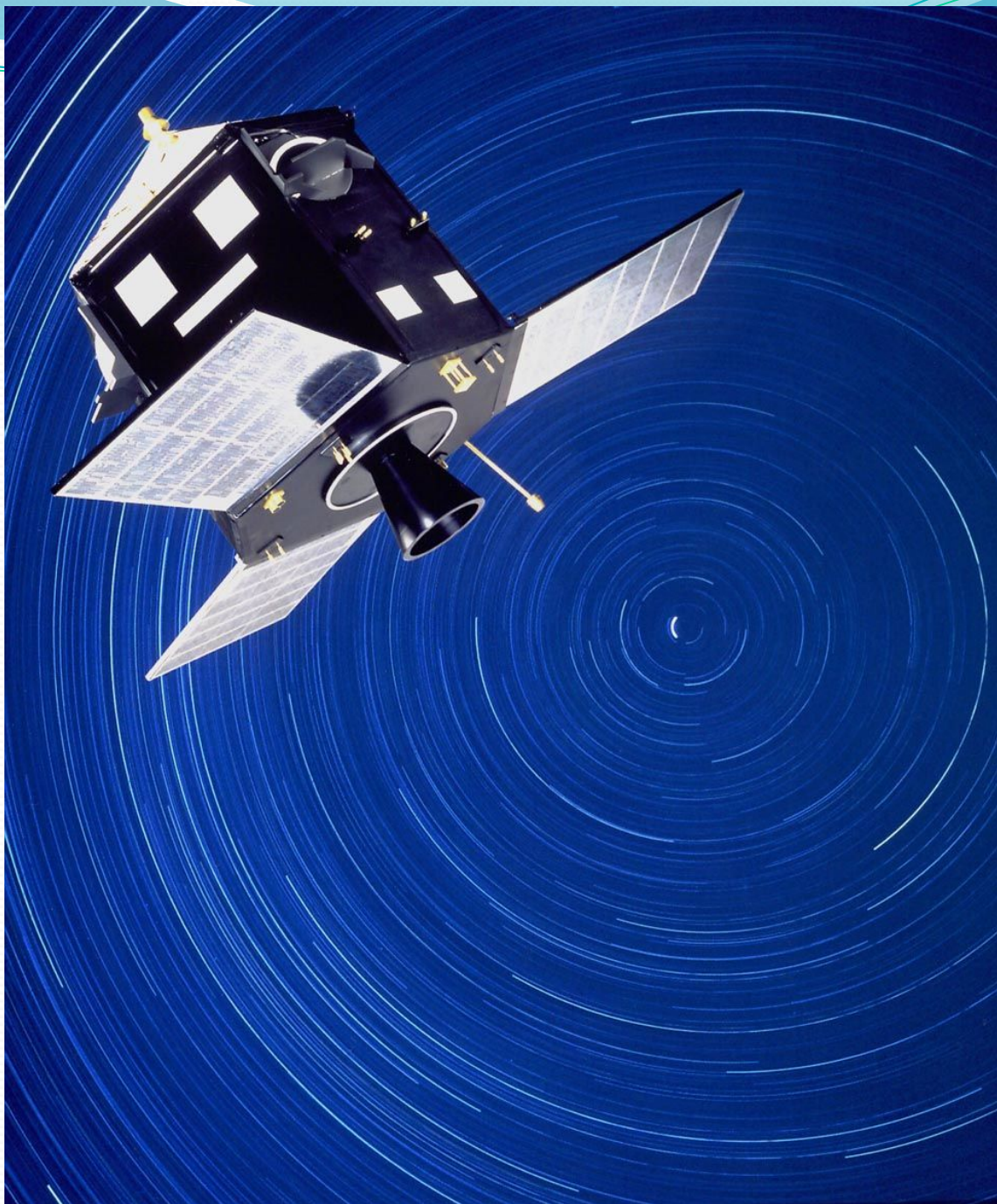
Внеатмосферная астрометрия

Перед запуском спутника Гиппаркос и космического телескопа имени Хаббла (КТХ) все астрометрические измерения выполнялись с Земли. Это накладывало на наблюдения определенные ограничения.

1. Турбулентность атмосферы непрерывно изменяет видимое направление на источник: изображение является суммой движущихся мгновенных изображений. Поэтому, результирующее изображение гораздо хуже того, что можно было бы ожидать только от одного телескопа. Адаптивная оптика позволяет преодолеть эффекты атмосферных возмущений, но работает только в очень малом поле зрения (несколько секунд дуги), и в астрометрии еще не применялась.
2. Атмосферная рефракция систематически изменяет видимое направление на небесные тела. Это изменение является функцией физического состояния и влажности атмосферных слоев. Поэтому поправку за рефракцию никогда нельзя будет определить точно.
3. Наземные инструменты движутся вместе с Землей. Чтобы наблюдаемые положения небесных тел правильно преобразовать в неподвижную систему отсчета, надо знать параметры, которые определяют ориентацию Земли в пространстве. Вращение Земли измеряется специальными астрометрическими методами.
4. Когда несколько инструментов используются для получения астрометрических результатов (например, когда объединяются наблюдения, выполненные на нескольких астрометрических инструментах большого поля для получения общего каталога положений), то каждый инструмент вносит в каталог свои собственные систематические ошибки. Эти ошибки не могут быть исключены полностью, и в сводном каталоге в результате появляются зонные ошибки.

Большинство причин, из-за которых появляются ошибки, исчезает в космосе. Но возникают другие проблемы, среди которых выделим техническую сложность создания инструментов, их стоимость, сложность проведения наблюдений. Поэтому только часть задач астрометрии будет решена из космоса, и наземную астрометрию еще рано списывать. Она должна специализироваться на решении специфических задач, таких как астрометрия в малом поле, слежение за явлениями, зависящими от времени (двойными звездами, движением астероидов и спутников, системой Земля-Луна).

Hipparcos [hi'pa:kɔs] (акроним от High Precision Parallax Collecting Satellite – спутник для сбора высокоточных параллаксов; созвучно с именем древнегреческого астронома Гиппарха (др.-греч. Ἰππάρχος), составителя первого в Европе звёздного каталога) – космический телескоп Европейского космического агентства (ЕКА), предназначенный для астрометрических задач: измерения координат, расстояний и собственных движений светил. Спутник был запущен в 1989 г. и за 37 месяцев работы собрал информацию более чем о миллионе звёзд. Точность измерений составила 10^{-3} " (миллисекунда дуги). Hipparcos – первый и на данный момент единственный завершивший свою работу космический астрометрический проект.



Оптическая система представляла собой катадиоптрический телескоп системы Шмидта. Перед объективом стояло два плоских зеркала, сводивших в одно поле зрения две площадки на небе, отстоящие друг от друга на 58° .

Параметры:

диаметр апертуры: 290 мм;

фокусное расстояние: 1400 мм;

масса аппарата: 500 кг;

максимальная точность: $0,001''$.

Спутником было выполнено свыше 3 млн наблюдений 118 324 звёзд, включенных в основную программу (это почти все звёзды до 9^m), и несколько десятков миллионов наблюдений примерно 1 млн звёзд, с помощью вспомогательной аппаратуры (вначале планировалось включить 100 тыс. звёзд по основной программе, но потом ее минимум увеличили).

Каталог	Hipparcos	Tycho
Система каталога	ICRS	ICRS
Средняя эпоха наблюдений	1991,25	1991,25
Число звёзд	118 218	1 058 332
Предельная звёздная величина	8^m	$11,5^m$
Точность положений	$\approx 0.001''$	$0.007''\text{—}0.025''$
Точность собственных движений	$\approx 0.001''/\text{год}$	—
Точность параллаксов	$\approx 0.001''$	—
Средняя точность фотометрии	$\approx 0,002^m$	$0,06^m\text{—}0,1^m$

Каталог Hipparcos

Точность измерения параллаксов каталога позволила значительно уточнить представления о расстояниях до звёзд. По результатам космического эксперимента, для 20 000 звёзд расстояния стали известны с точностью не хуже 10 %, а для 49 000 звёзд – не хуже 20 %. Вскоре после публикации результатов Международный астрономический союз рекомендовал использовать каталог Hipparcos как первичную реализацию Международной небесной системы координат (ICRS) в оптическом диапазоне.

Связь с опорной системой координат в радиодиапазоне – ICRF – осуществлялась через:

- РСДБ наблюдения радиозвёзд вблизи квазаров;
- наблюдения радиозвёзд с телескопом VLA;
- измерения угловых расстояний от звёзд Hipparcos'а до внегалактических источников на космическом телескопе Хаббл в оптическом диапазоне;
- фотографические и ПЗС-наблюдения квазаров;
- фотографические обзоры.

Авторы каталога Hipparcos указывают следующие оценки точности совпадения системы ICRF и системы каталога:

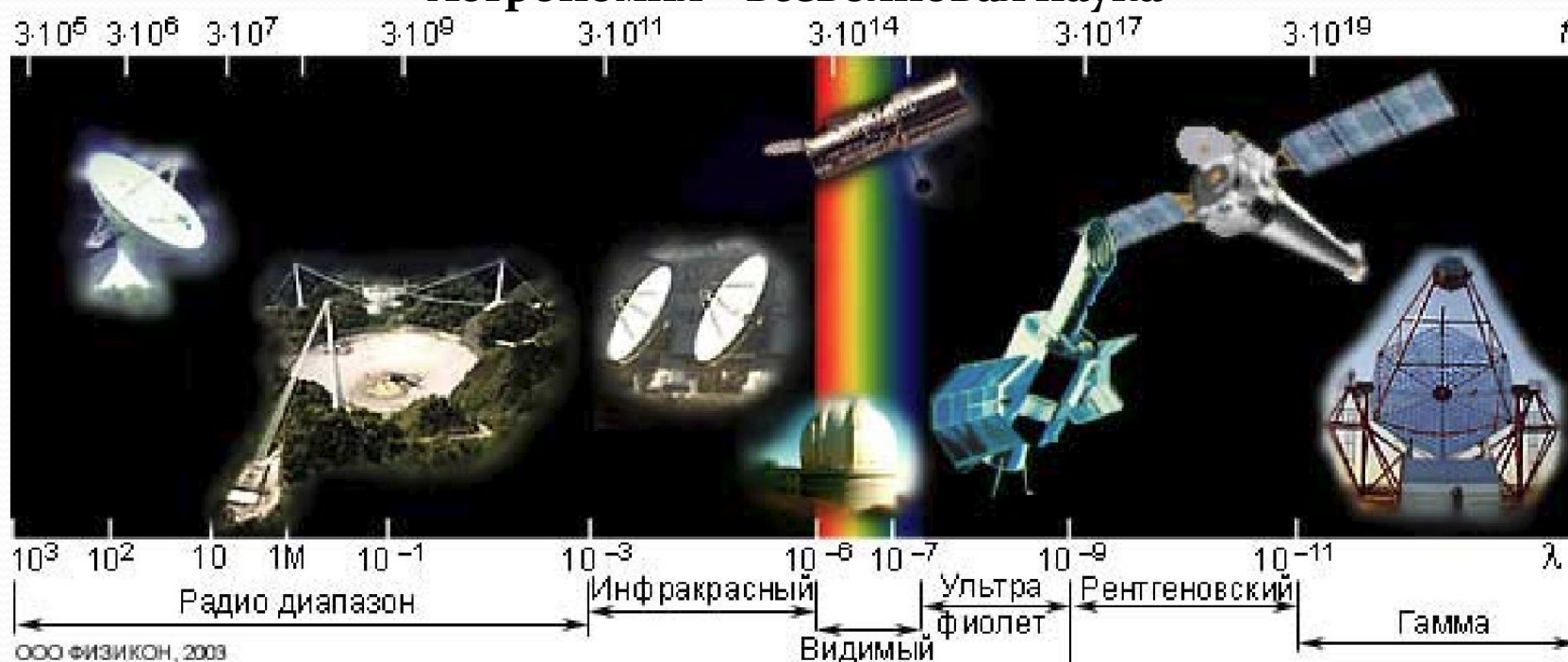
- рассогласование между системами по направлению осей может составлять 0.6 миллисекунд дуги;
- вращение одной системы координат относительно другой может составлять около 0.25 миллисекунд дуги в год.

Впоследствии из числа объектов каталога, определяющих опорную систему, было рекомендовано исключить двойные звёзды, некоторые переменные звёзды, и те, относительно которых имеются сомнения в точности данных. Соответствующая опорная система координат получила название HCRF.

Каталог Tycho-2

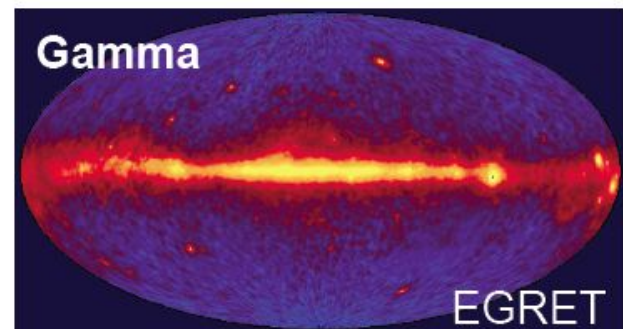
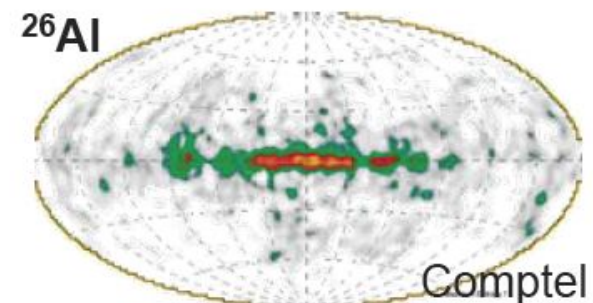
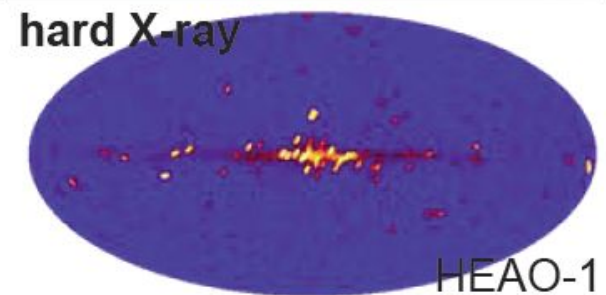
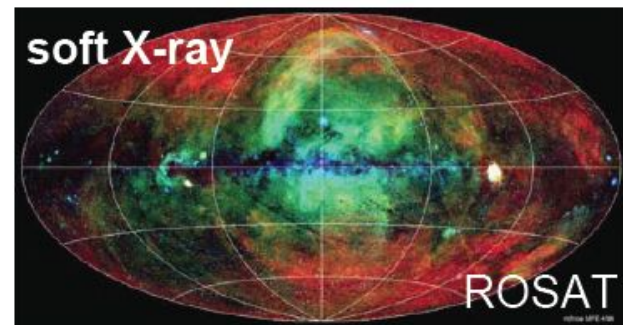
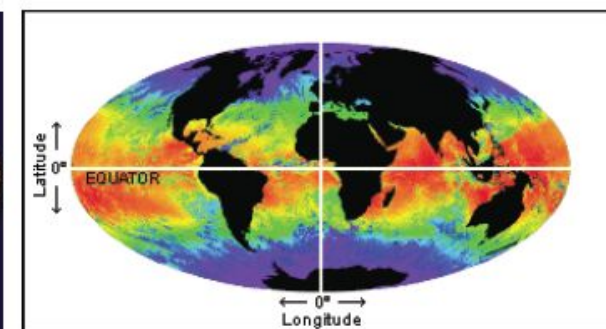
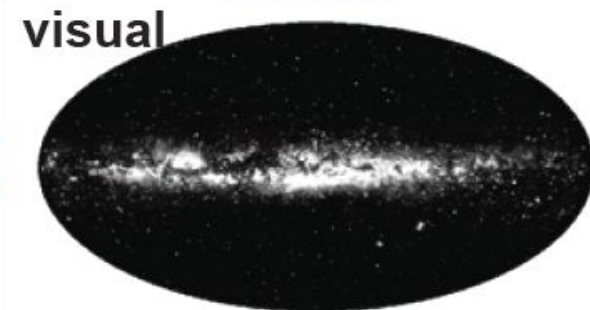
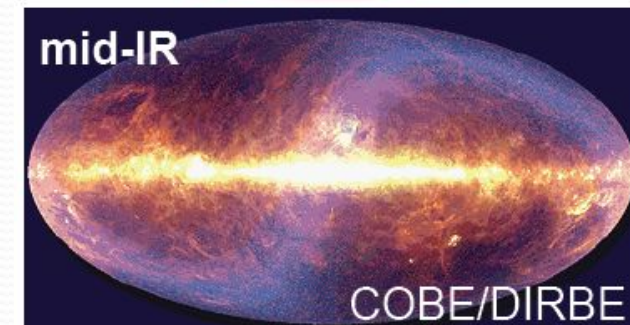
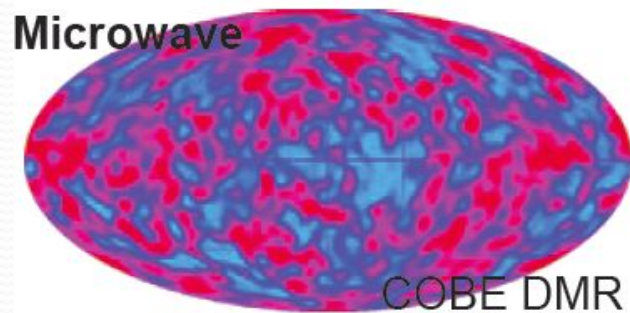
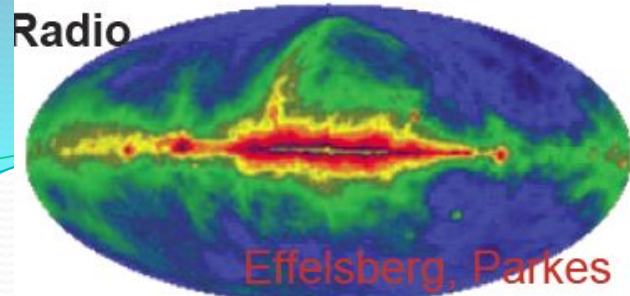
Еще одним результатом является каталог Tycho-2. В отличие от каталогов Hipparcos и Tycho, он базируется не только на результатах наблюдений спутника. При его создании использовано множество наземных наблюдений для уточнения собственных движений. Содержит около 2.5 млн звёзд, для которых приводятся положения, собственные движения, звёздные величины в системах, близких к стандартным системам B и V, а также другие сведения. Точность положений для звёзд 9 величины – около 0.05 секунд дуги, собственных движений 0.002 – 0.003 секунд дуги/год. Каталог был опубликован в 2000 г. и заменил собой каталог Tycho.

Астрономия – всеволновая наука



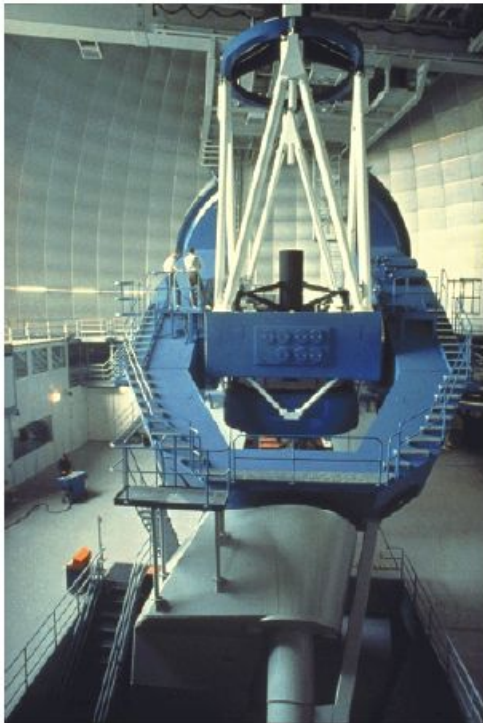
Multi-λ Sky

... или кто открыл воду???



Оптические телескопы

Calar Alto 3.5m



Very Large Telescope 8m



Hubble Space Telescope (2.6m)



Large Binocular Telescope (2x8m)

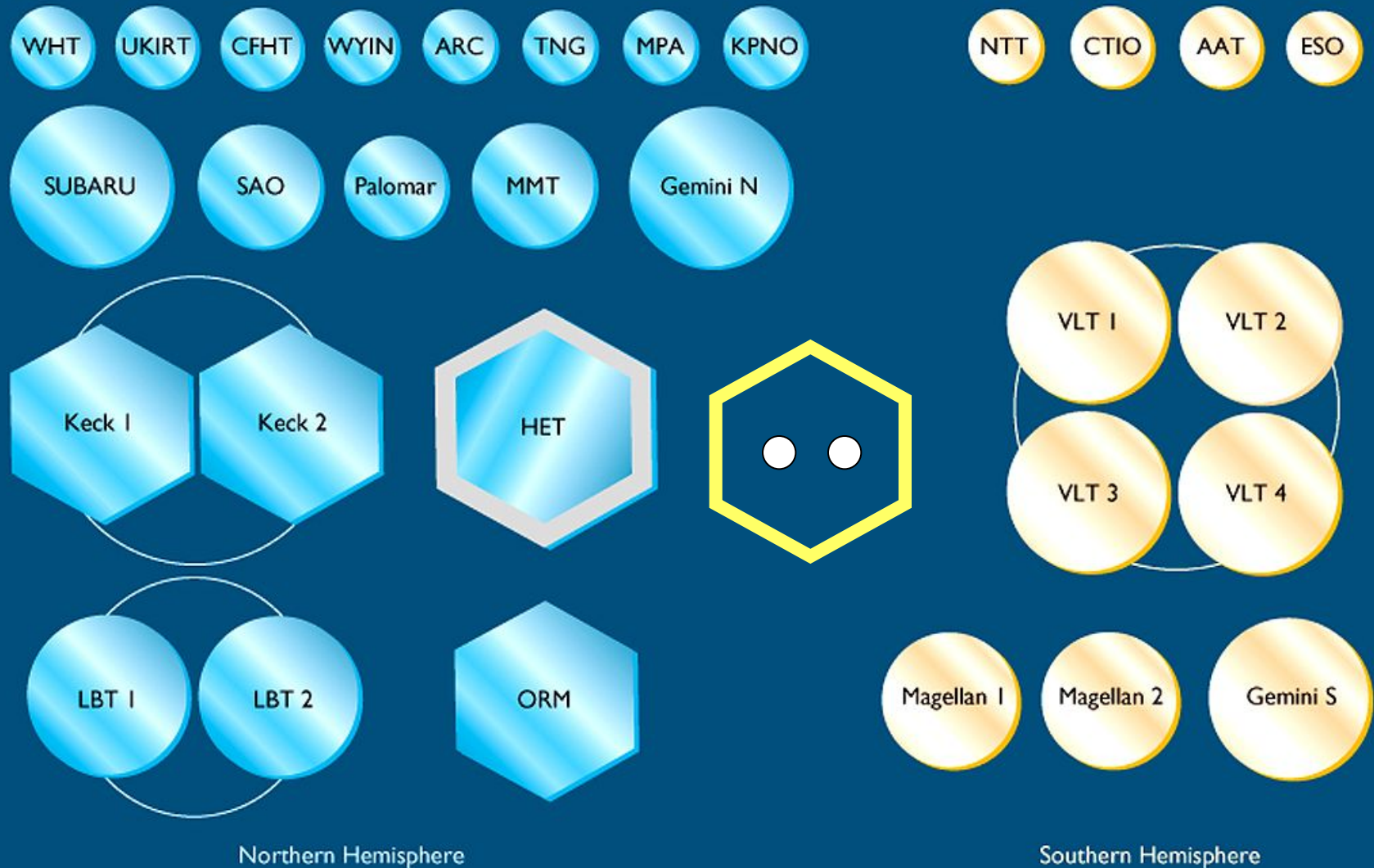




Башня 4,2-метрового телескопа им. В.Гершеля на о. Пальма

Крупнейшие телескопы

COLLECTING AREA OF THE LARGE TELESCOPES

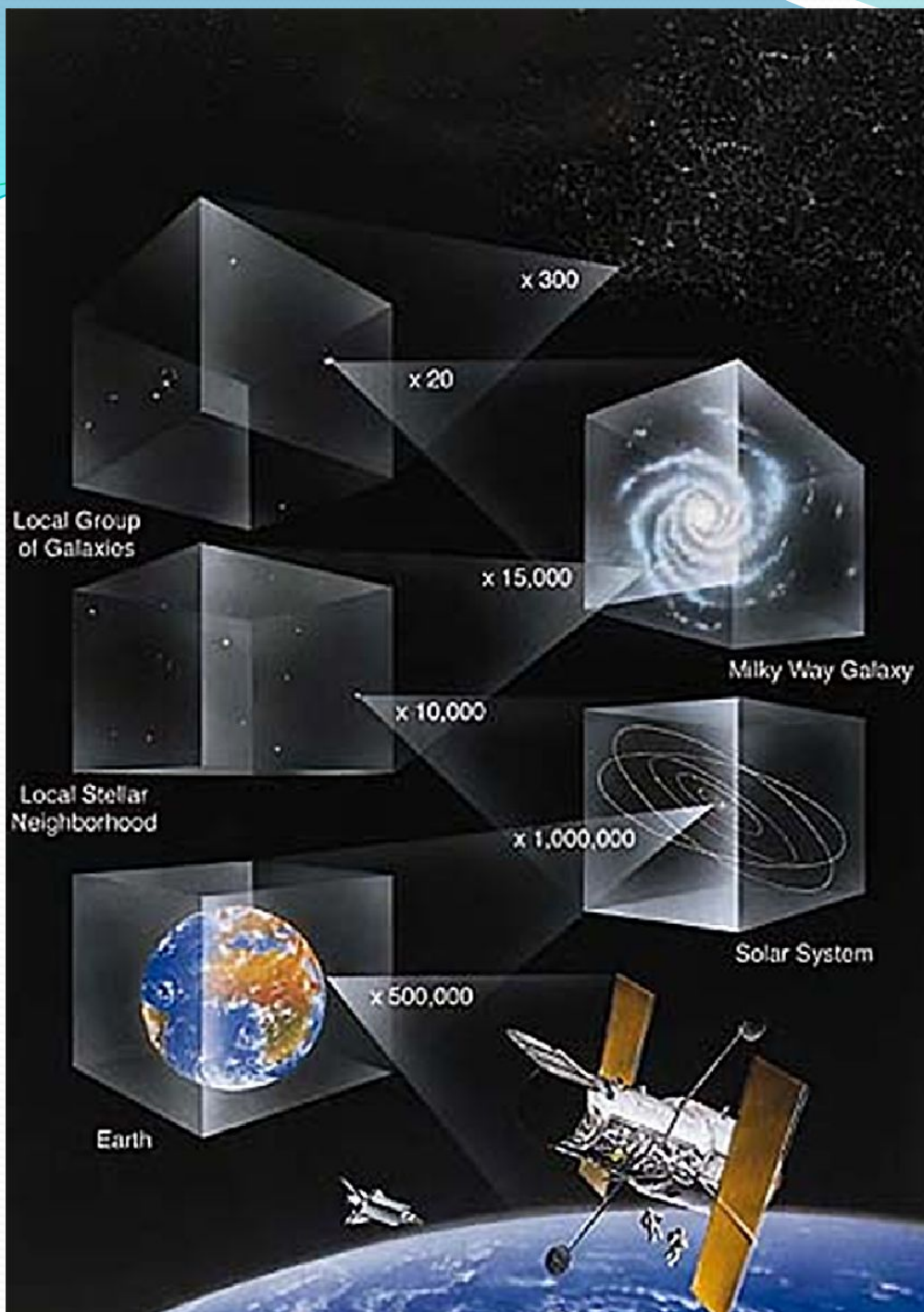


Зачем их строят?

Необходимость построения больших телескопов определяется тем, что современная наука ставит задачи, требующие достижения предельной чувствительности инструментов для регистрации информации, поступающей к нам в виде излучения от **самых слабых источников** – космических объектов.

К таким задачам прежде всего относятся:

- Проблемы происхождения Вселенной
- Образование и эволюция звезд, галактик и планетных систем
- Физические свойства материи в экстремальных астрофизических условиях
- Астрофизические аспекты зарождения и существования жизни во Вселенной



Характерные масштабы объектов во Вселенной

Об эффективности приемников излучения, и других факторах

В настоящее время эффективность приемников в оптическом диапазоне, понимаемая как доля регистрируемых квантов от общего числа пришедших на чувствительную поверхность приемника приближается к теоретическому пределу (т. е. к 100%) и дальнейшие пути совершенствования связаны с увеличением формата приемников, ускорению обработки сигнала и т. д.

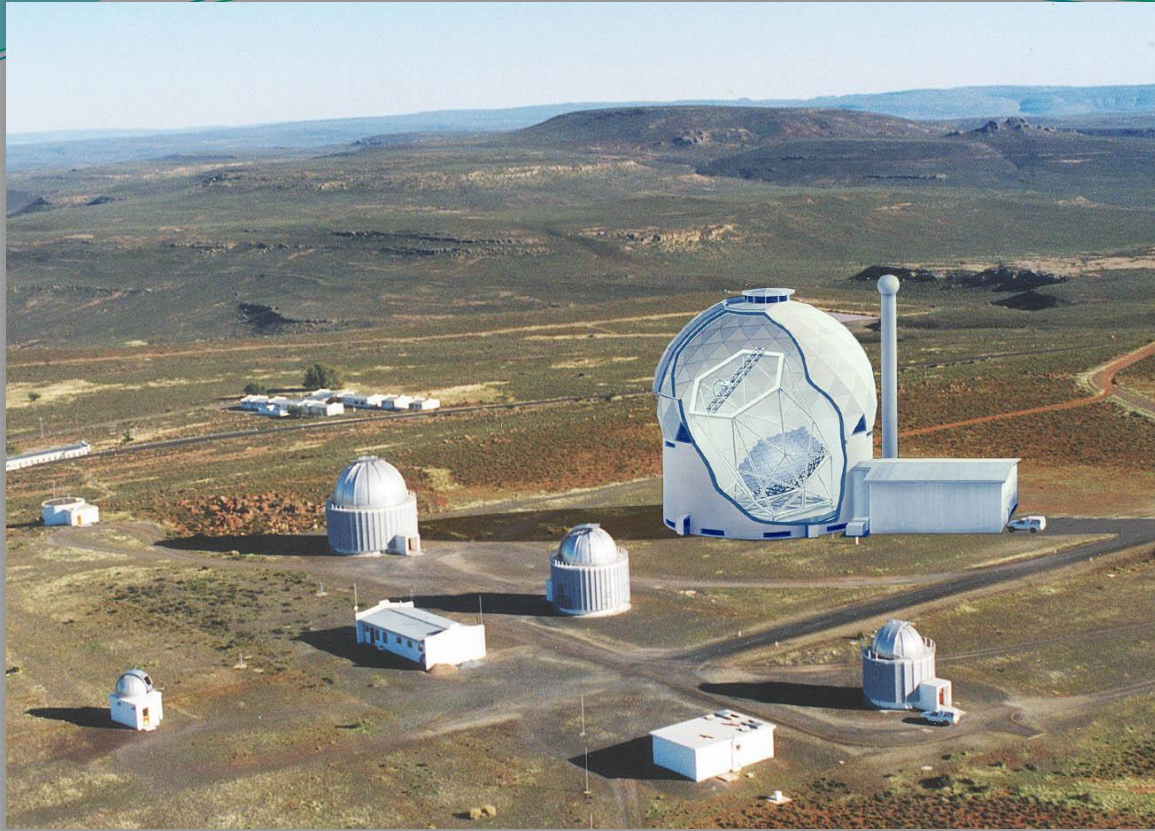
Уменьшение стоимости

Столетия практического опыта в телескопостроении привели к простому способу сравнительной оценки стоимости телескопа S с диаметром зеркала D .

Для телескопов со сплошным главным зеркалом: $S \sim D^3$

Для современных больших инструментов: $S \sim D^2$

Southern African Large Telescope



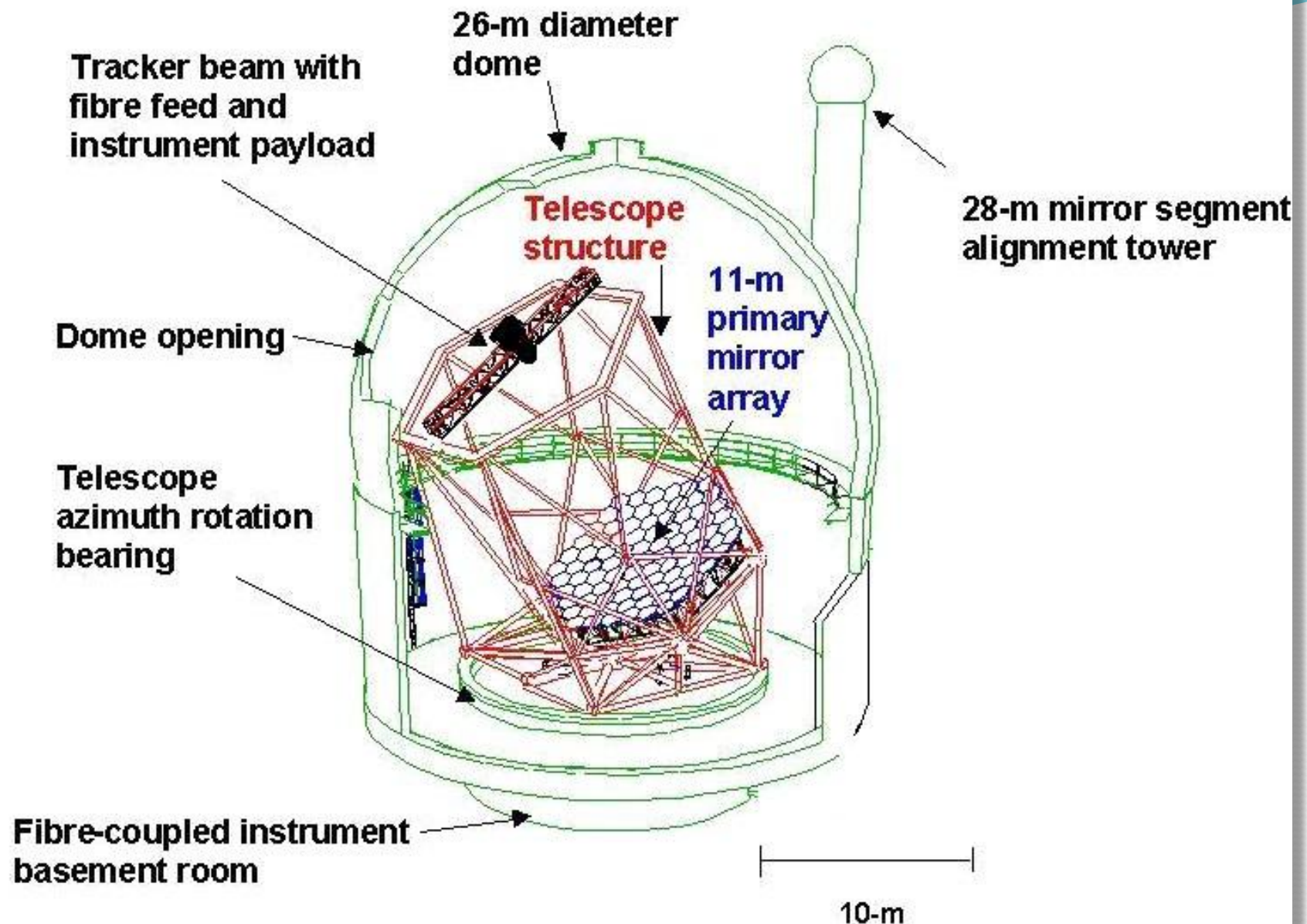
An International Consortium

Partners in

- United States
- United Kingdom
- Ireland
- Germany
- Poland
- New Zealand

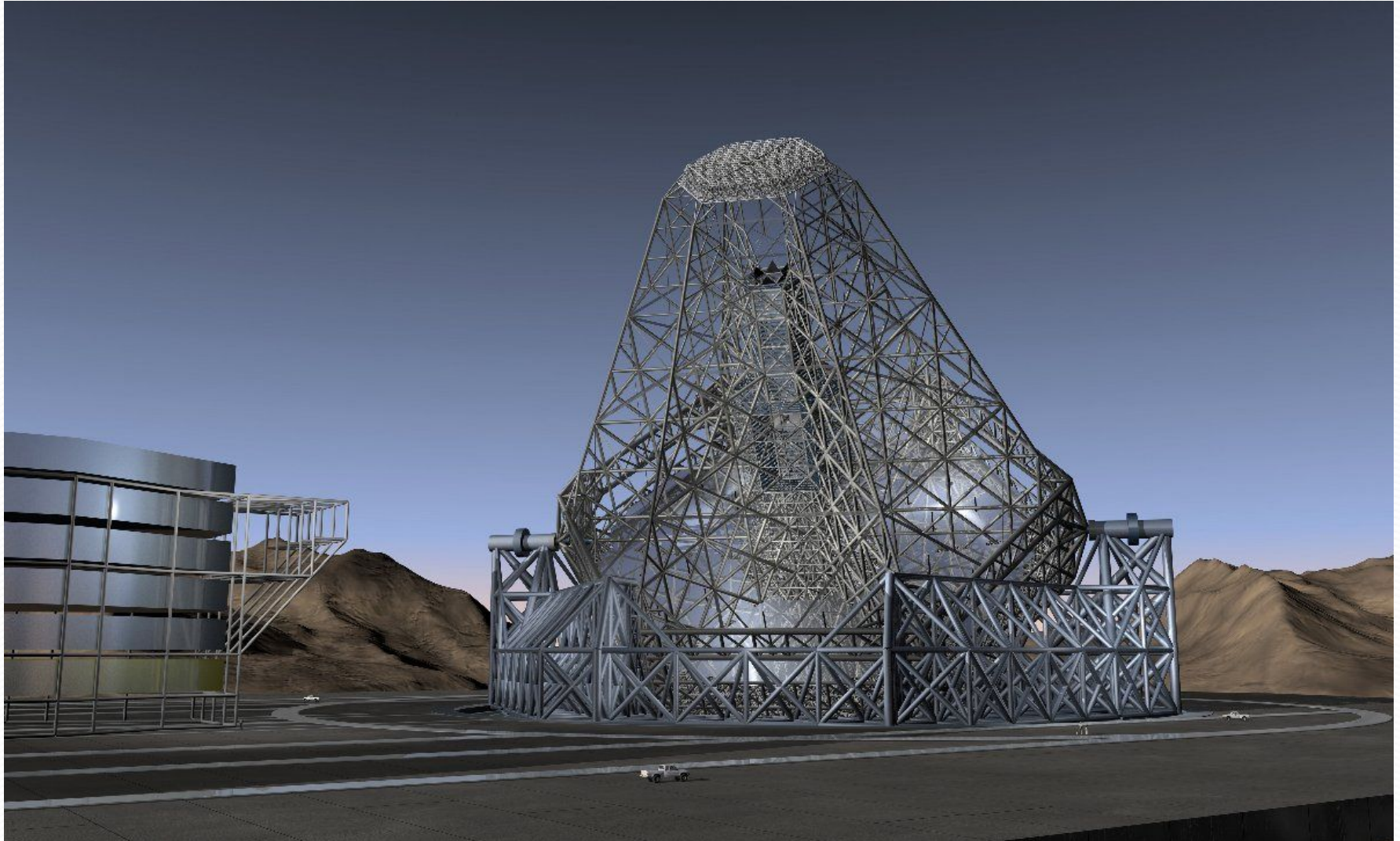
www.salt.ac.za

It has an approximately 10-metre diameter spherical primary mirror, comprised of 91 identical hexagonal segments. The telescope is tilted at a fixed angle of 37 degrees from the zenith, so that it moves only in azimuth, rotating into position on air bearings and remaining stationary during each observation. Precise pointing and tracking are handled by the moving optical corrector assembly and instrument payload at the top of the telescope tube.



OWL (*Overwhelmingly Large*)

ESO



Параметры телескопа OWL:

- Диаметр входного зрачка – **100 м**
- Площадь собирающей поверхности $> 6000 \text{ м}^2$
- Многоступенчатая система адаптивной оптики
- Диффракционное качество изображения
Для видимого участка спектра – в поле 30 угл. сек.
Для ближнего ИК – в поле 2 угл.мин.
- Поле ограниченное качеством изображения, допускаемым атмосферой (seeing) – 10 угл.мин.
- Рабочий спектральный диапазон – 0.32 – 12 микрон
- Вес – 12 500 тонн

Для OWL выбрано относительное отверстие $f/8$. Предлагается использовать телескоп еще за 3 года до заполнения главного зеркала. 60-м апертуру планируется заполнить к 2012. Стоимость проекта – 905 миллионов евро.

Космические обсерватории



Хаббл (HST). 2,6 м



Интеграл (рентгеновский диапазон)

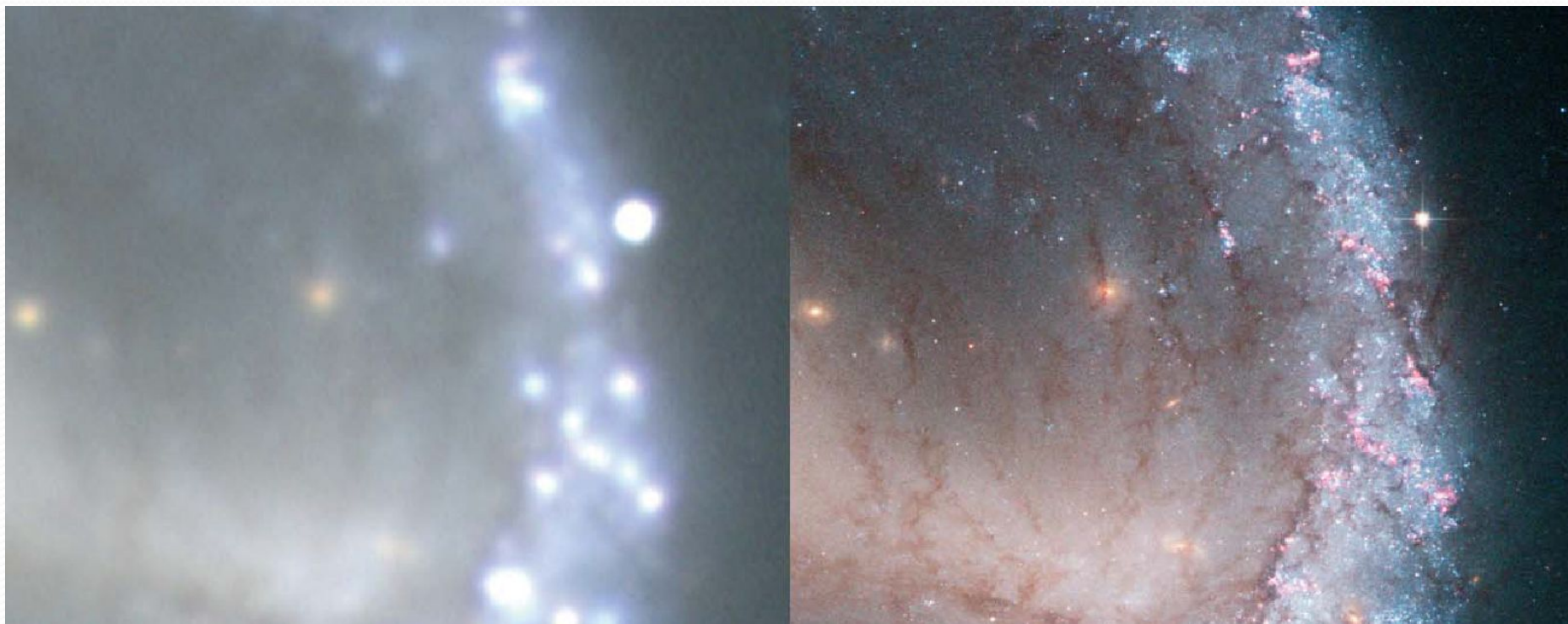


CXO (1999):
Chandra X-Ray
Observatory



CGRO (1991): Compton
Gamma-Ray Observatory⁸⁶

Орбитальные обсерватории. Можно ли обойтись наземными инструментами?



NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

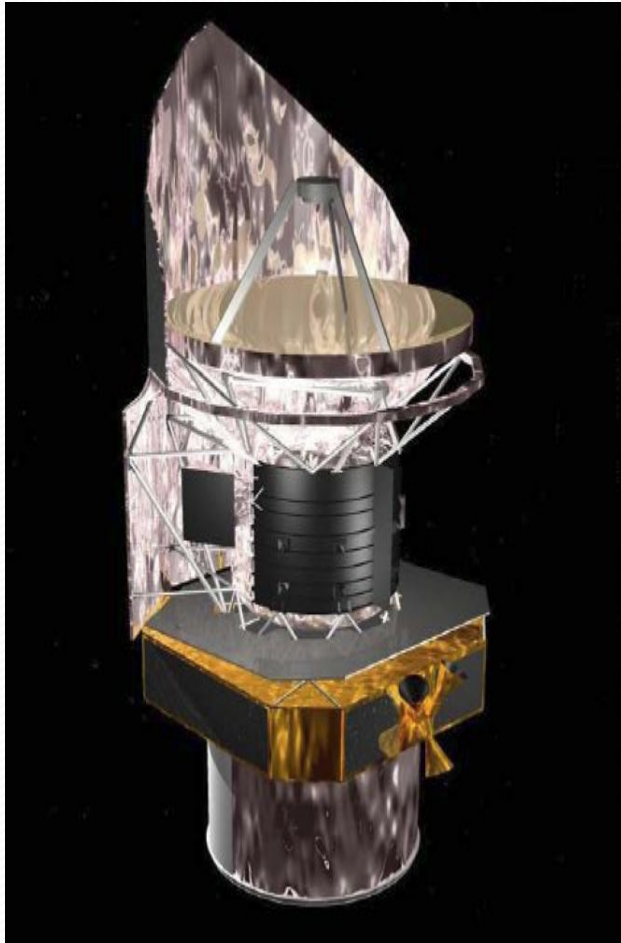
Снимок галактики NGC1300 телескопом Хаббл (справа) и наземным телескопом с сопоставимой площадью зеркала

IR и субмиллиметровые телескопы

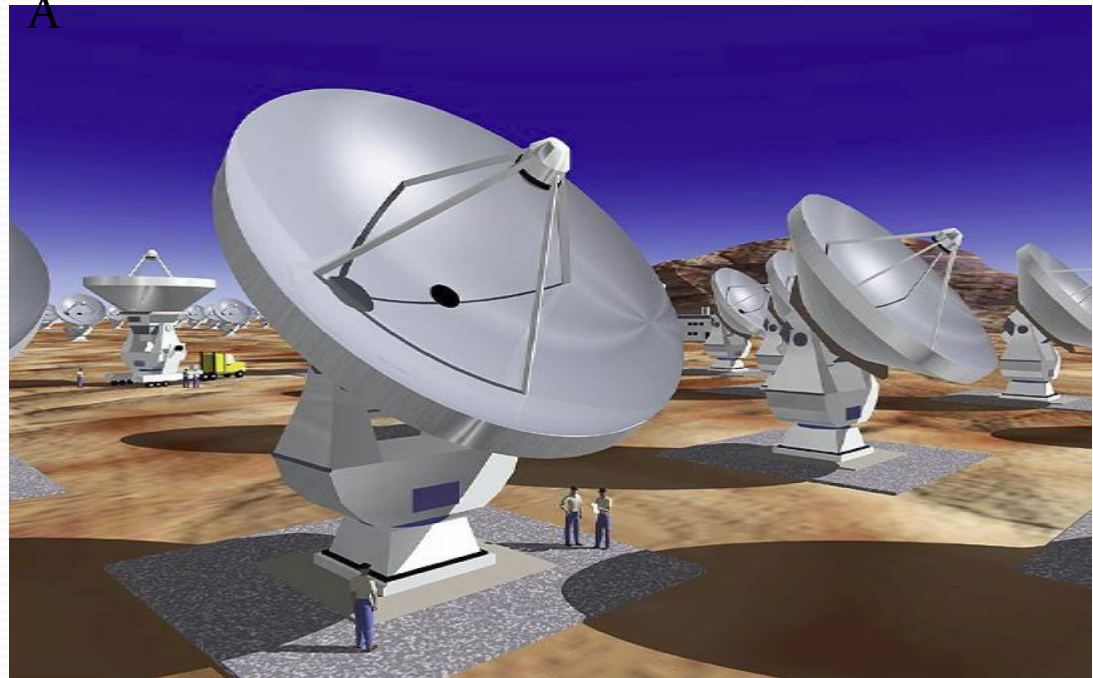
SOFI
A



Herschel



ALMA
A



Радио и миллиметровые телескопы



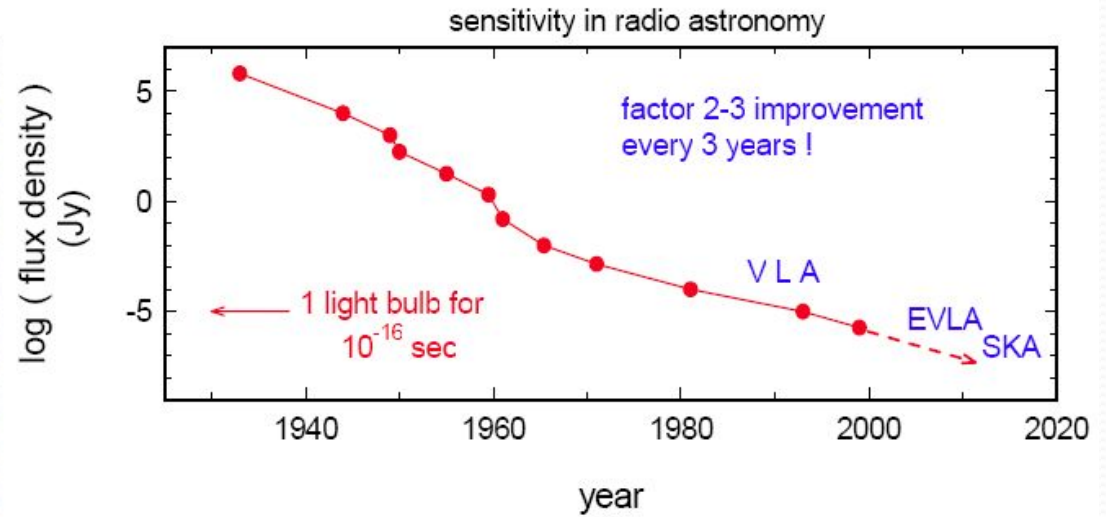
Very Large Array



Pico Veleta



Effelsberg





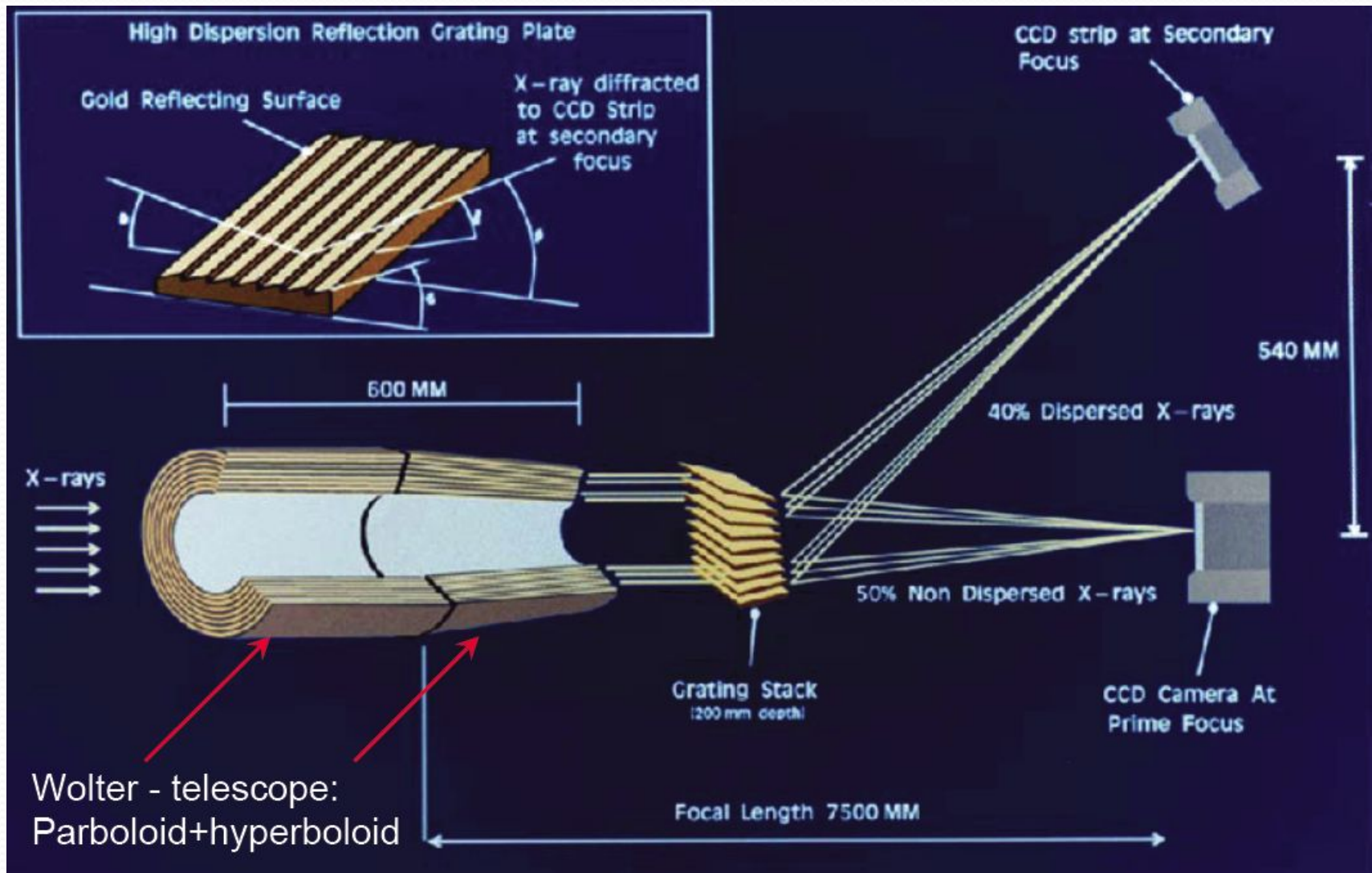
Австралия,
PARCS

Пушино,
РТ-22

Инструменты высоких энергий

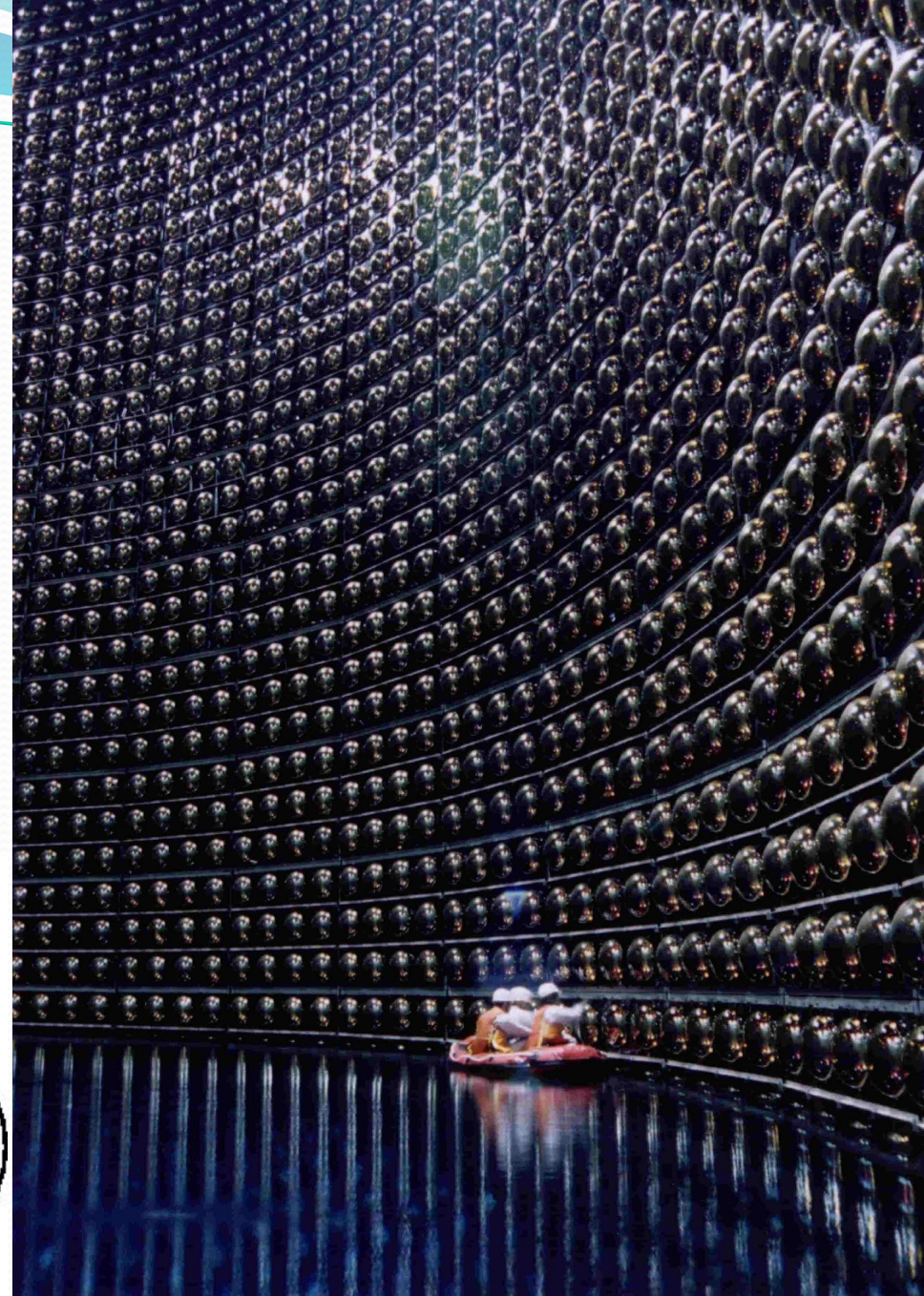
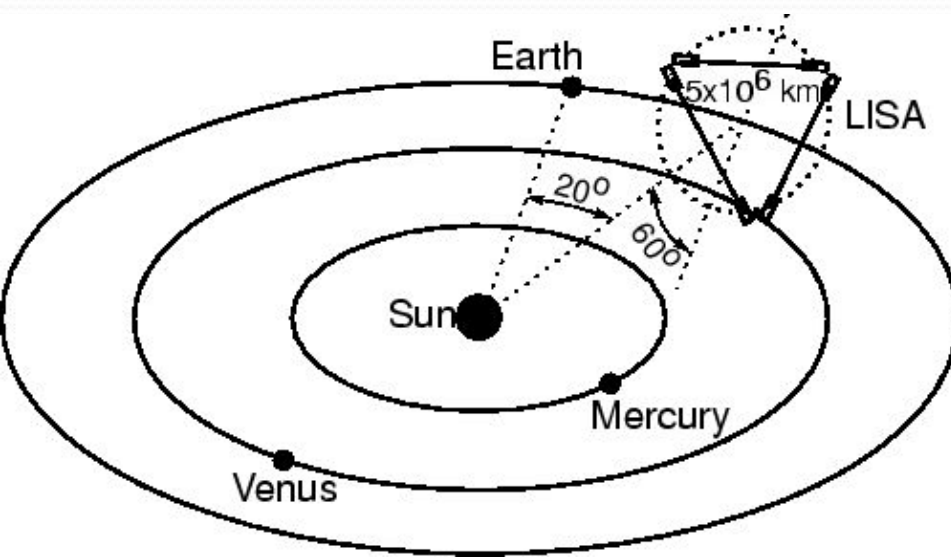


Рентгеновский спутник XMM-Newton



SuperKamiokande – нейтринный телескоп

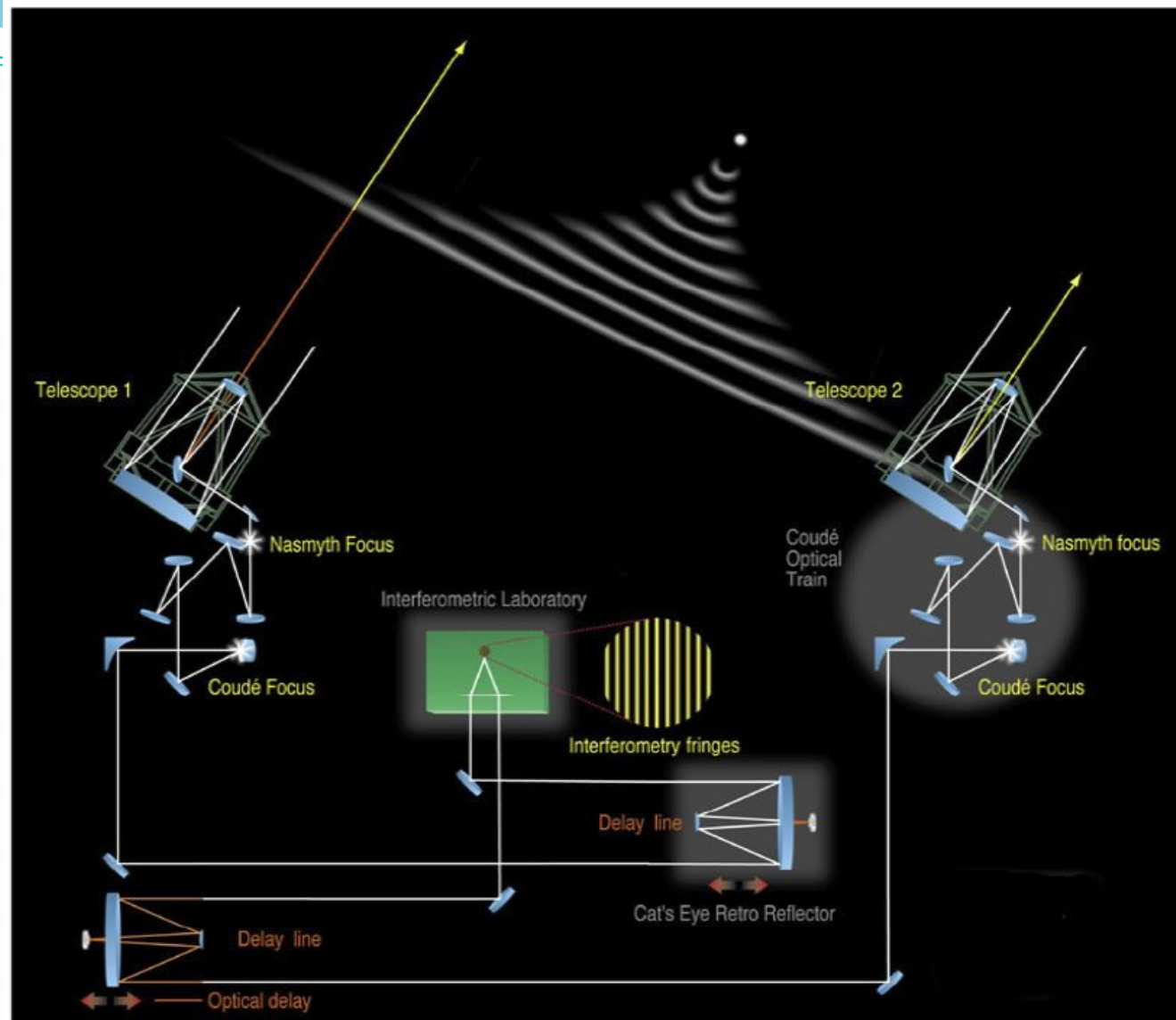
Гравитационный телескоп LISA



Интерферометры

ESO Very Large Telescope - Interferometer

Каждый телескоп – 8 м



Overview of the VLT Interferometer

ESO PR Photo 10c/01 (18 March 2001)

© European Southern Observatory



Адаптивная оптика

Коррекция воздействия
турбулентной атмосферы
деформируемым зеркалом

