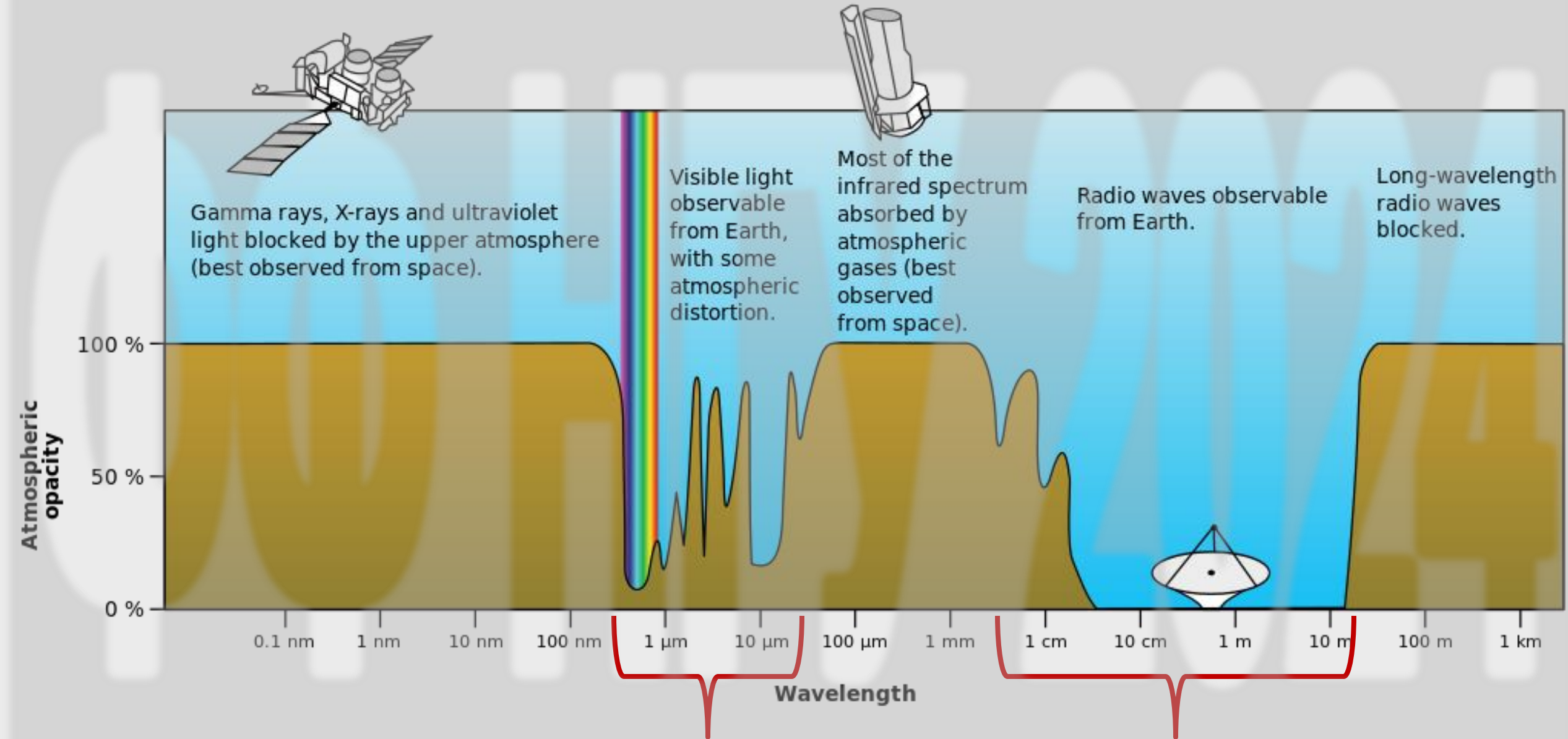




Лекция 2
Оптическая
астрономия
ФФ НГУ, 2024



Поглощение ЭМ волн в атмосфере Земли



Окна прозрачности

Видимый диапазон

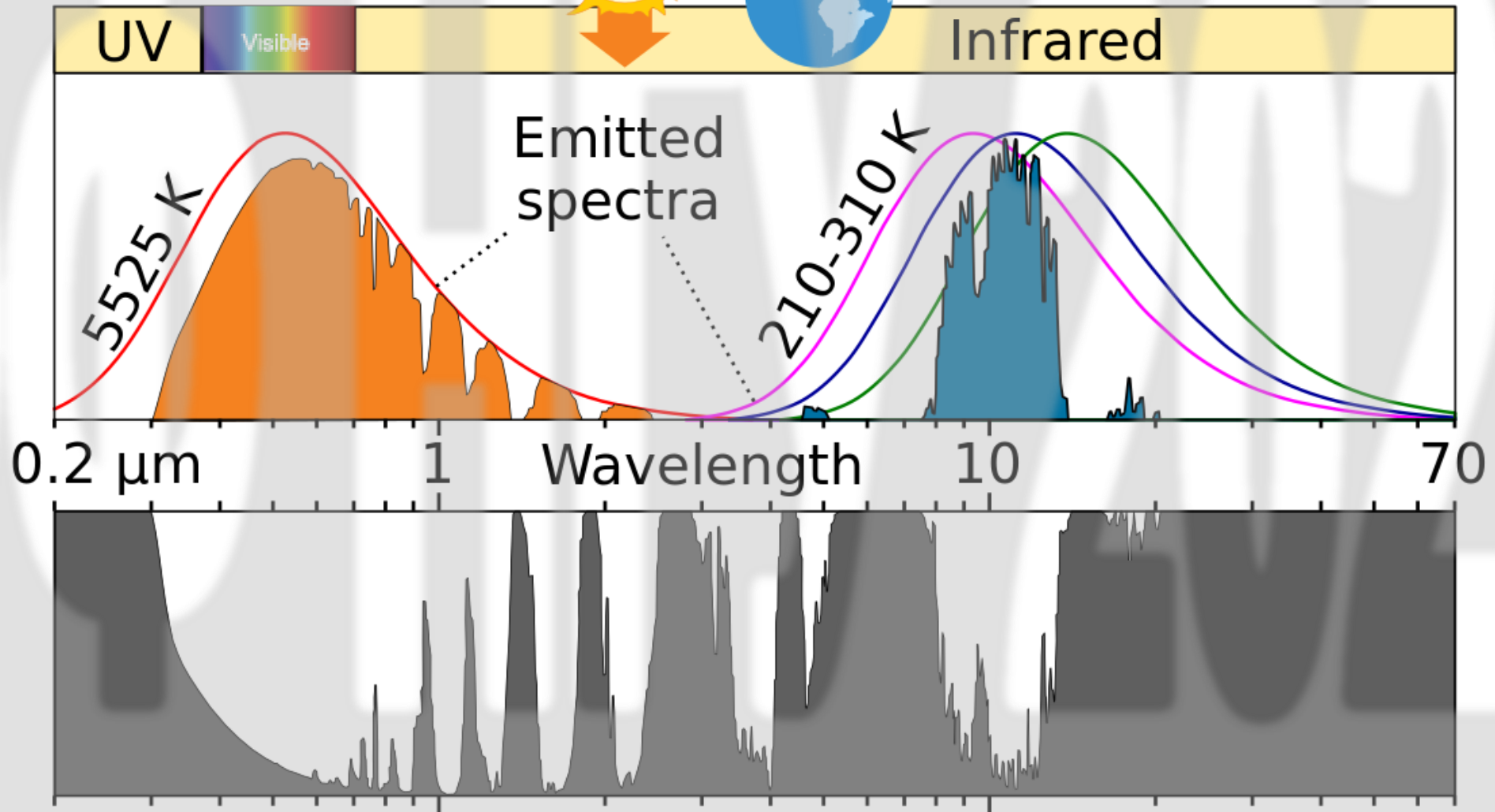
Спектр излучения Солнца



Спектр излучения Земли

Интенсивность
излучения

Поглощение
в атмосфере
Земли



Яркость: звездные величины

Идея разделить все видимые звезды группы по яркости («по блеску») принадлежит древнегреческому астроному Гиппарху (II век до н. э.)



Все видимые глазом звёзды он разделил на 6 классов – от 1-й до 6-й **звёздной величины**.

Самые яркие были обозначены как 1^m , а **самые тусклые** («слабые») обозначены как 6^m . Индекс m происходит от латинского *magnitudo* – величина.

Чем больше звездная величина, тем менее яркий объект!



Яркость: звездные величины

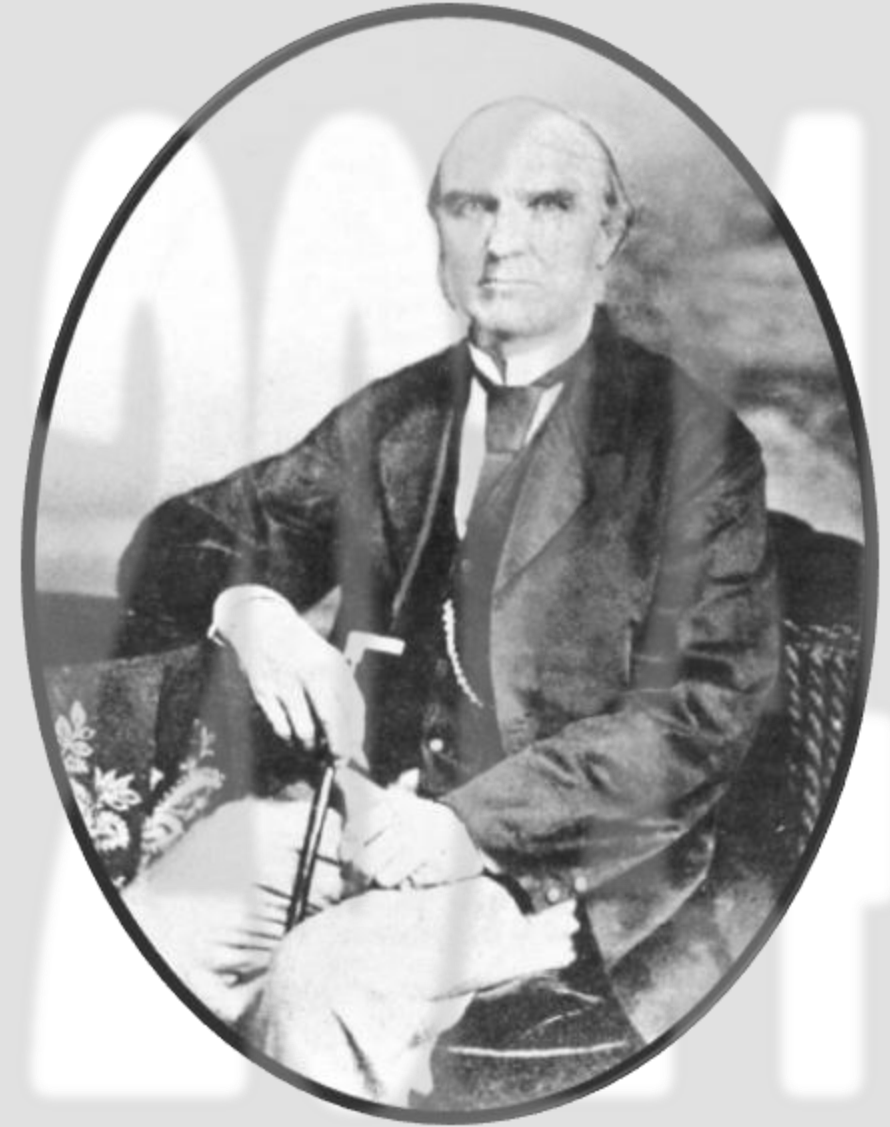
Измерения английского астронома Погсона показали, что потоки света от звёзд соседних звёздных величин различаются примерно в 2,5 раза, а различие между 1^m и 6^m составляет почти точно 100 раз.

Шкала звёздных величин – геометрическая прогрессия.

Для максимального соответствия уже устоявшейся классификации Гиппарха, Погсон предложил взять за основание шкалы звёздных величин

$$\sqrt[5]{100} \approx 2,512$$

Шкала звездных величин – относительная шкала, то есть сравниваются яркости двух объектов!



В качестве начала отсчета ($m=0$) выбрана звезда Вега (α Lyr). То есть поток от объекта измеряется в единицах потока, создаваемого звездой Вега.

Норман Погсон
1829-1891

Шкала звездных величин



L – полная мощность (светимость) излучения [L] = эрг·с⁻¹

$f = \frac{L}{4\pi d^2}$ – плотность потока [f] = эрг·с⁻¹·см⁻²

d – расстояние от источника до приемника

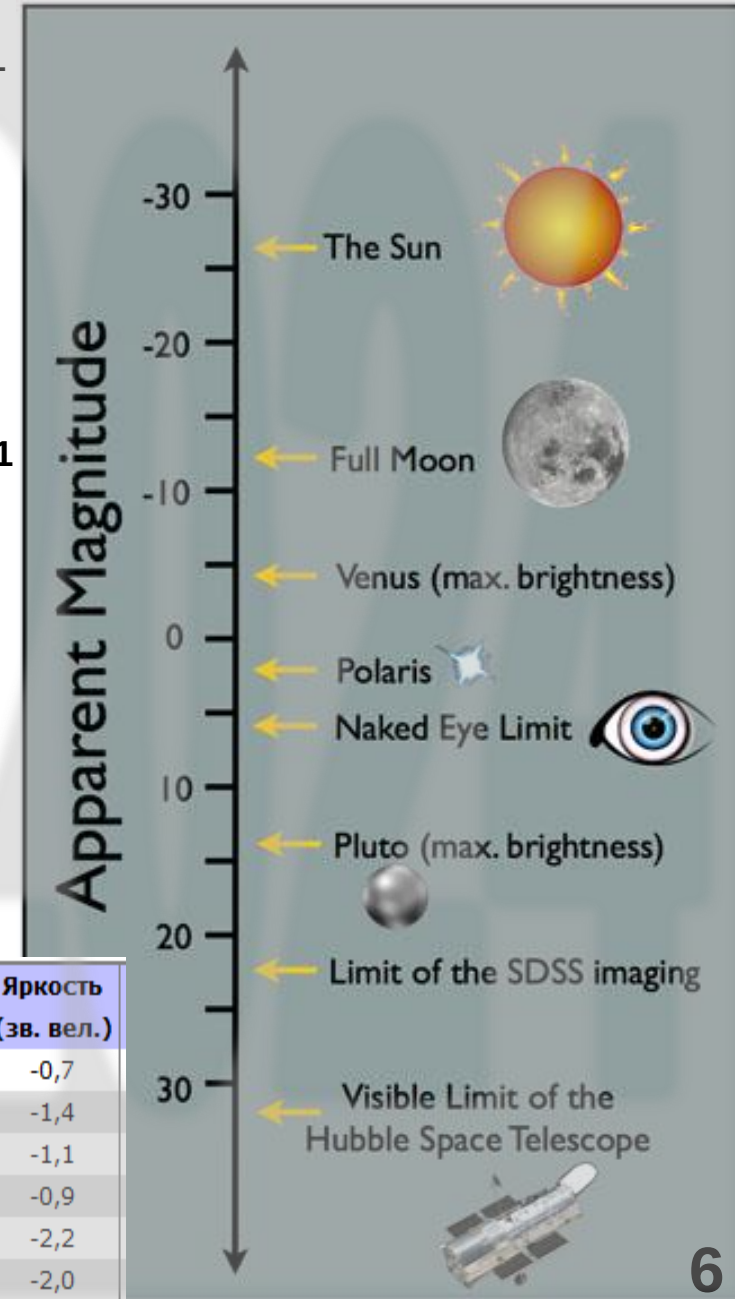
$F = S \cdot f$ – поток через площадь приемника [F] = эрг·с⁻¹

$$m = -2.5 \lg \frac{f}{f_{\text{Вега}}}$$

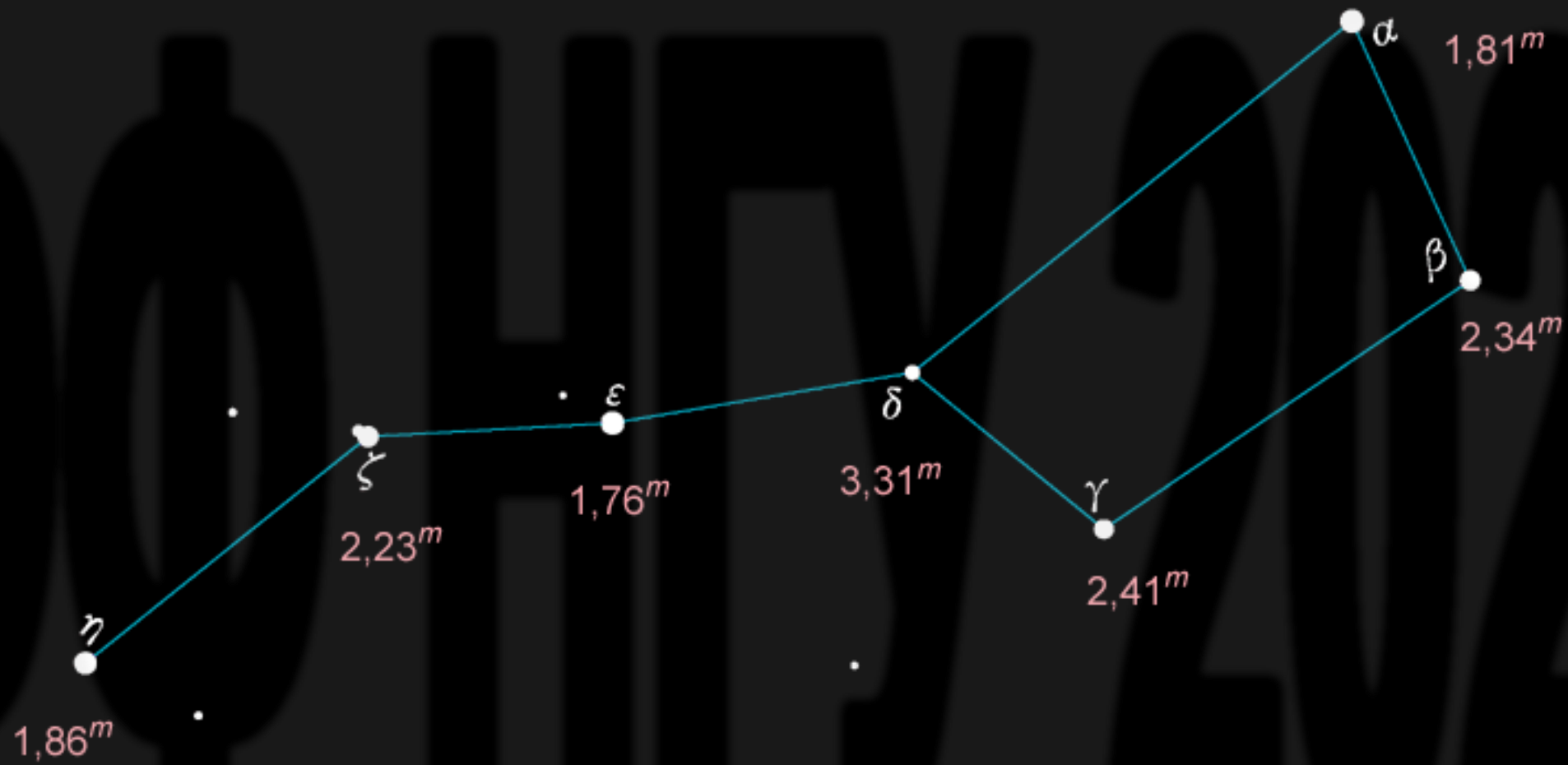
Формула Погсона:

$$m_2 - m_1 = -2.5 \lg \frac{f_2}{f_1} \quad \frac{f_2}{f_1} = 100^{(m_1 - m_2)/5}$$

В видимом диапазоне ЭМ волн, поток фотонов от звезды 0m составляет примерно 1000 штук·с⁻¹см⁻² Å⁻¹.



Дата	Яркость (зв. вел.)
фев 17	-0,7
фев 19	-1,4
фев 20	-1,1
фев 21	-0,9
фев 21	-2,2
фев 22	-2,0



Поверхностная яркость

Для протяженных объектов (туманности, галактики, шаровые скопления и т.д.) указывается интегральная звездная величина, соответствующая полному потоку излучения от объекта. Ее не следует путать с поверхностной яркостью.

Например для Туманности Андромеды – ближайшей к нам галактики, в справочниках указана видимая звездная величина 3.42m, и можно подумать, что ее отлично видно невооруженным глазом, но это не совсем так.

Видимые размеры Туманности Андромеды огромны, примерно $3^\circ \times 1^\circ$, то есть это как если свет звезды 3.42m «размазать» по этой огромной площади. Поверхностная яркость (поток с одной квадратной секунды поверхности) будет очень низкой.

В предположении равномерной яркости объекта, поверхностная яркость m_s (в звездных величинах) равна

$$m_s = m + 2.5 \lg S$$

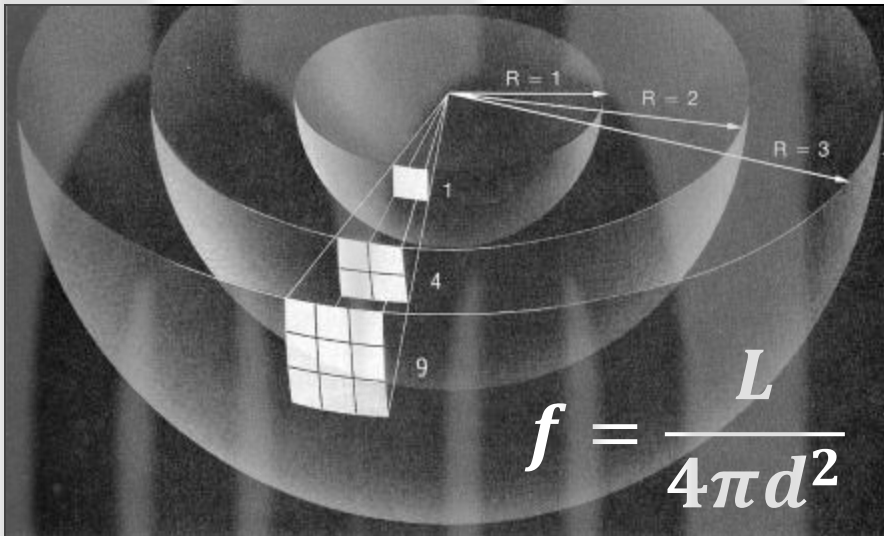
Туманность Андромеды: 3.42 m, угловой размер $3^\circ \times 1^\circ$

Средняя поверхностная яркость всего **22.3 m/сек²**!

Невооруженным глазом едва видна только ее центральная, гораздо более яркая, часть.

Абсолютная звездная величина

= видимая звездная величина, ЕСЛИ БЫ объект находился на стандартном расстоянии 10 пк.



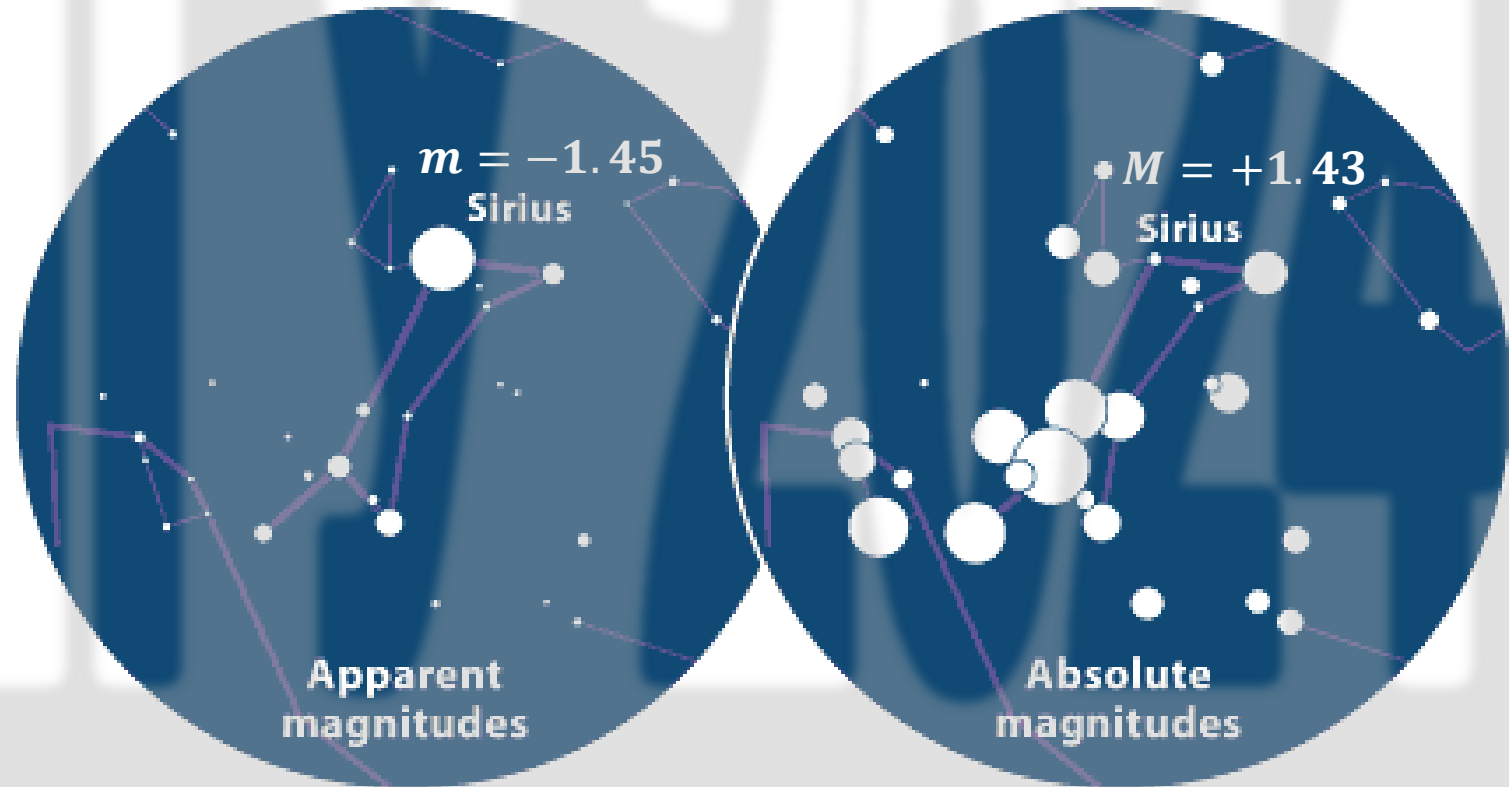
$$m = M + 5 \lg \left(\frac{d}{10} \right)$$

где d – расстояние до объекта в пк.

$m - M$: модуль расстояния
(distance modulus).

$$m - M = -2.5 \lg \frac{f_d}{f_{10}} = 5 \lg \frac{d}{10_{\text{пк}}}$$

$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}}$$



Абсолютная звездная величина Солнца $M_{\odot} = 4.8$

Вычислительный пример

Оценить интегральную видимую звездную величину скопления из 10^5 звезд типа Солнце, находящихся на расстоянии 6.8 кпк.

Пусть $F_{\odot}$ и F_* — потоки, создаваемые Солнцем и скоплением с расстояния 10 пк, а $M_{\odot}$ и M_* — их абсолютные звездные величины. Тогда:

$$\frac{F_*}{F_{\odot}} = 10^5, \quad \text{с другой стороны:} \quad \frac{F_*}{F_{\odot}} = 100^{(M_{\odot} - M_*)/5}$$

Отсюда получаем: $M_{\odot} - M_* = 2.5 \lg 10^5$

$$M_* = 4.8 - 12.5 = -7.7$$

Тогда:

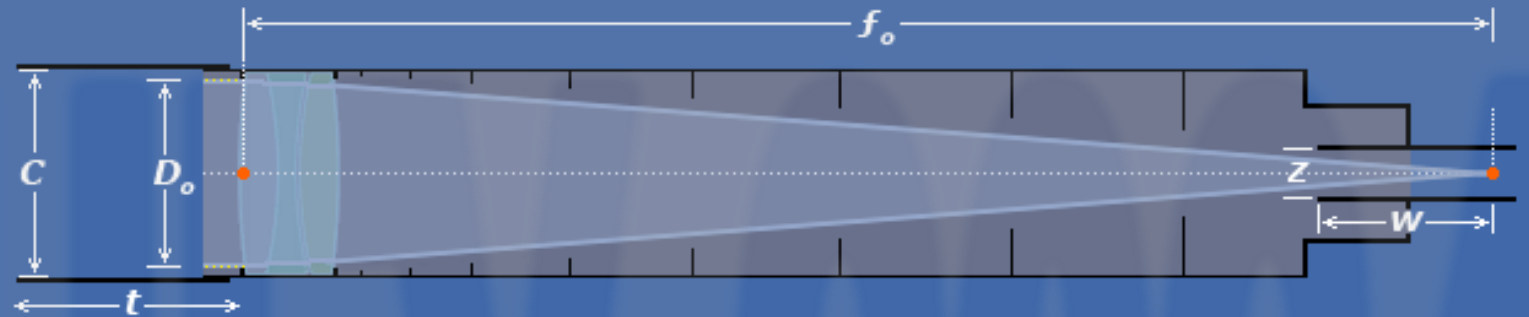
$$m = M_* + 5 \lg \left(\frac{d}{10 \text{ пк}} \right) \simeq -7.7 + 5 \lg \left(\frac{6800}{10} \right) \simeq 6.5$$

Шаровое звездное скопление
M13 в Геркулесе, $m = 5.8$.

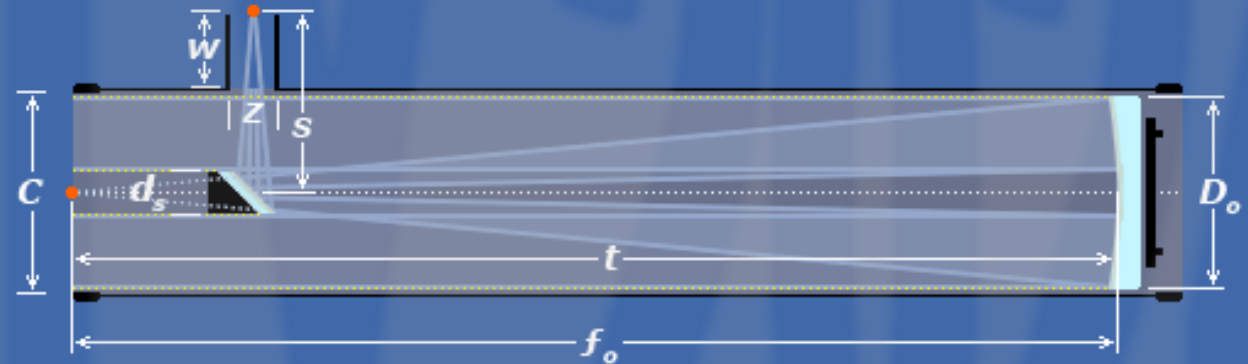


Основные оптические схемы

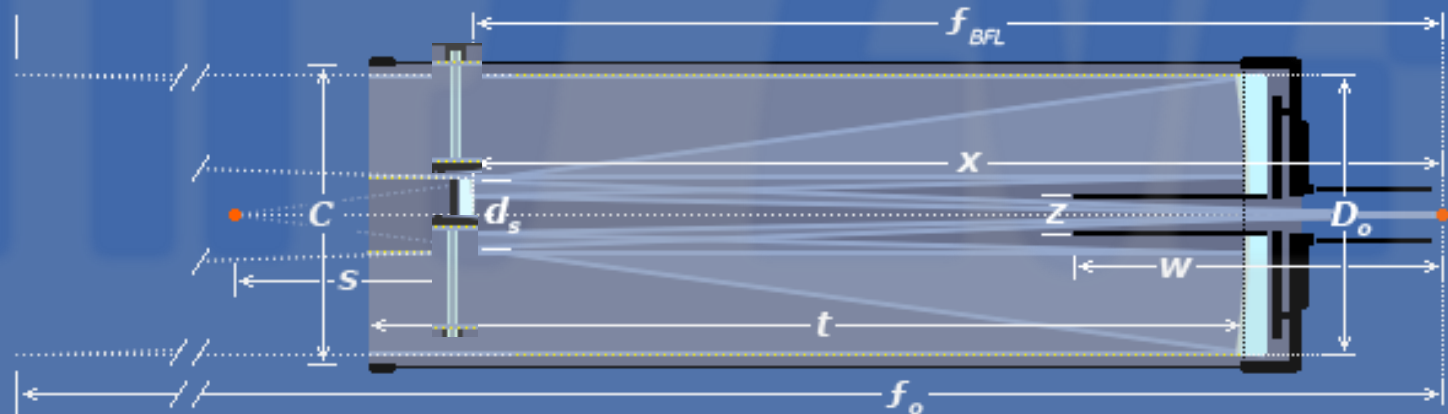
Рефрактор



Рефлектор



Катадиоптрик



Вычислительный пример

Оценить предельную звездную величину звезд, видимых глазом в телескоп с диаметром объектива D ?

Пусть D_0 – диаметр зрачка человека. Тогда поток F света от звезды, собираемый телескопом диаметром D равен:

$$F = F_0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \quad \rightarrow \quad \frac{F_0}{F} = \left(\frac{D_0}{D} \right)^2$$

С другой стороны: $\frac{F}{F_0} = 100^{(m_0 - m)/5}$

Отсюда получаем:

$$m_0 - m = -2.5 \lg \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \quad m = m_0 + 5 \lg \left(\frac{D}{D_0} \right)$$

Полагая $D_0 = 7$ мм и $m_0 = 6$ находим:

$$m \simeq 6 + 5 \lg \left(\frac{D}{0.7 \text{ см}} \right) \simeq 6.8 + 5 \lg \left(\frac{D}{1 \text{ см}} \right) \quad \rightarrow \quad \text{при } D = 15 \text{ см} \quad m \simeq 12.7$$

АБЕРРАЦИЯ ОПТИЧЕСКАЯ — искажение изображения, построенного объективом оптического прибора.

Виды аберрации в зависимости от причины и характера искажений:

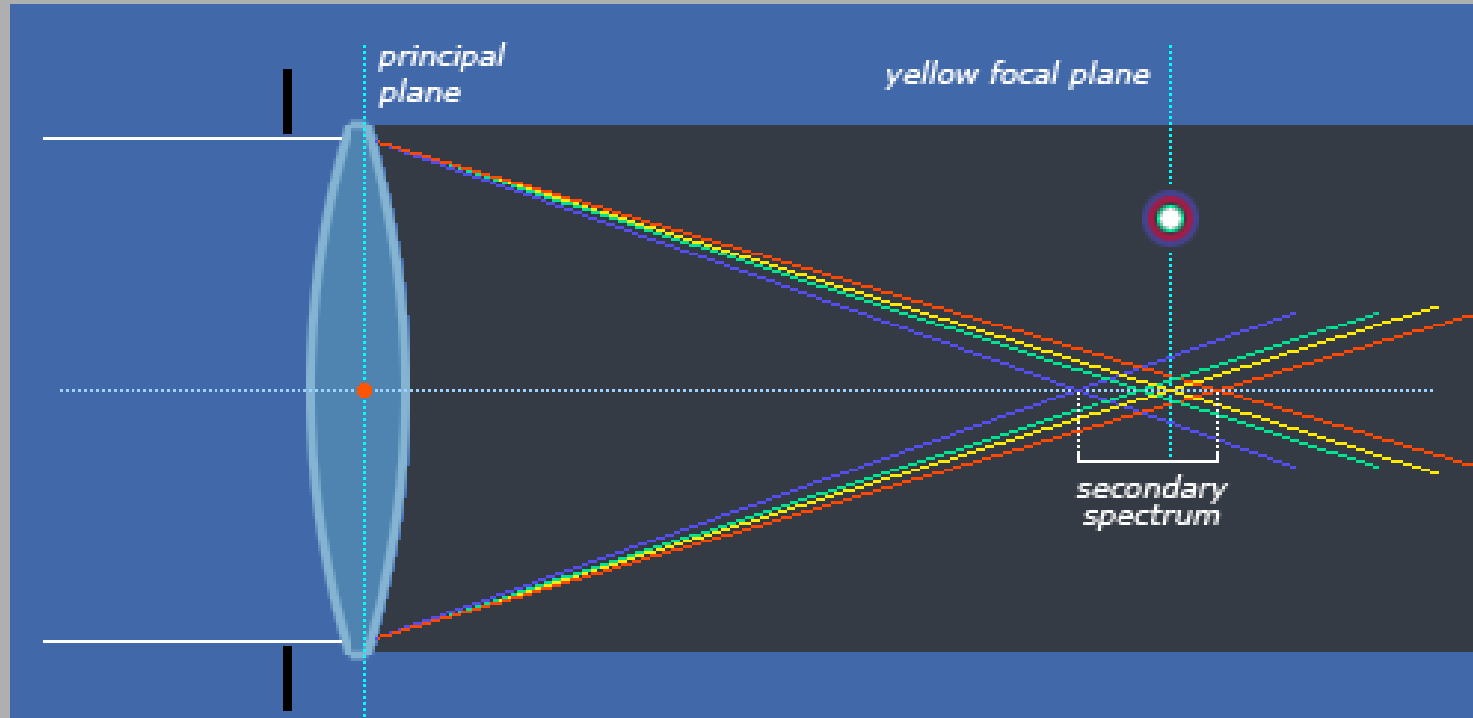
- **хроматическая аберрация**
- **сферическая аберрация**
- **кривизна поля**
- **астигматизм**
- **дисторсия**
- **кома**

НЕ ПУТАТЬ!

Аберрация света (aberration of light, stellar aberration) — кажущееся смещение направления на светило, вызванное движением наблюдателя.

Хроматическая абберрация

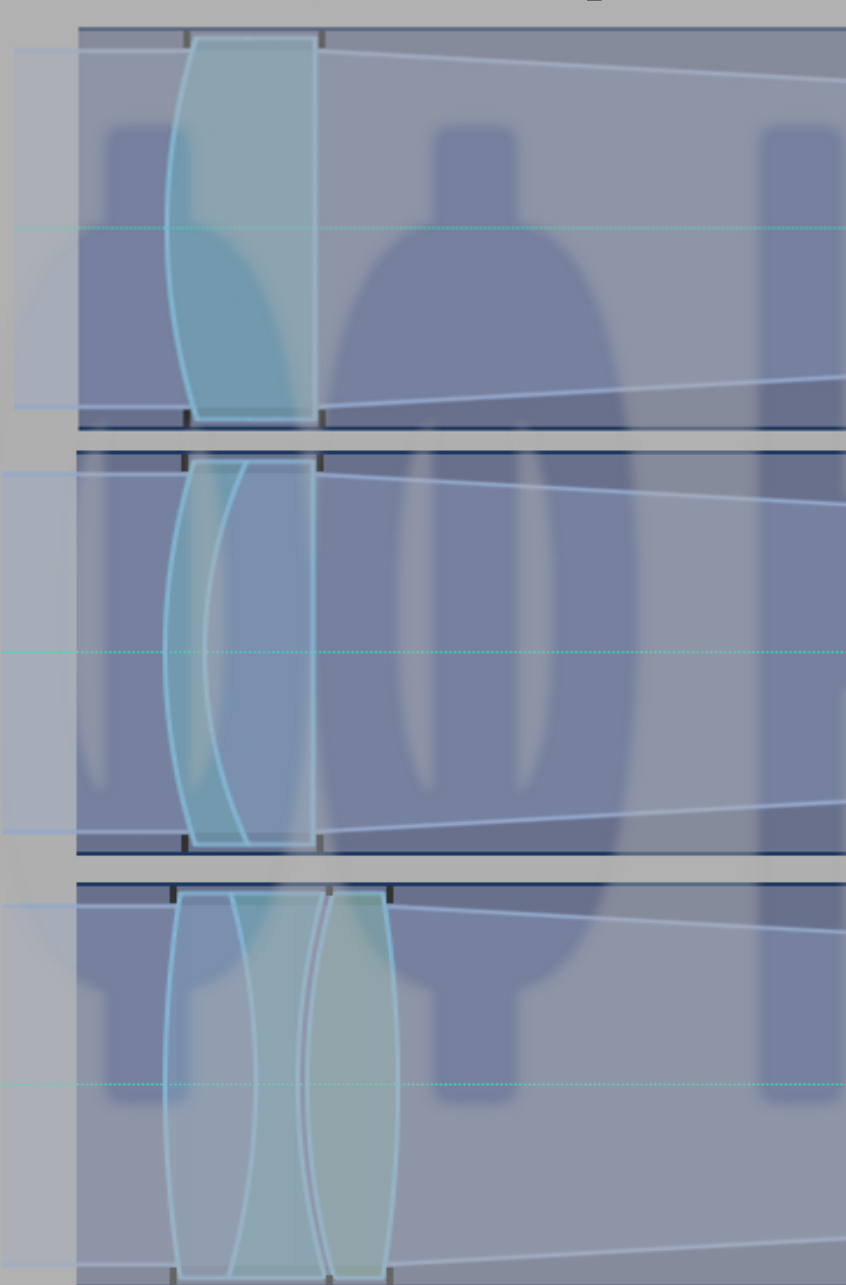
Сегмент линзы фактически является призмой, и из-за дисперсии стекла отклоняет свет различных длин волн (цвета) на разные углы.



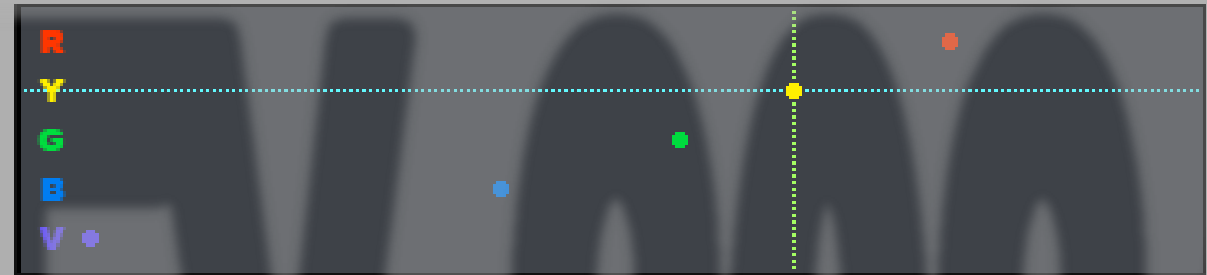
Телескопы рефлекторы лишены этого недостатка так как свет всех длин волн отражается под одним и тем же углом.

Для уменьшения хроматической абберрации в рефракторах, создаются специальные сорта стекла с малой дисперсией. Альтернативный способ борьбы с хроматическими искажениями – комбинация нескольких линз из разных сортов стекла...

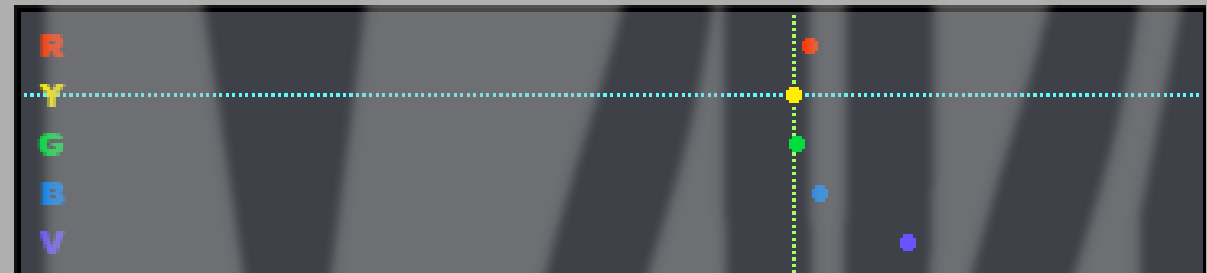
Хроматическая аберрация



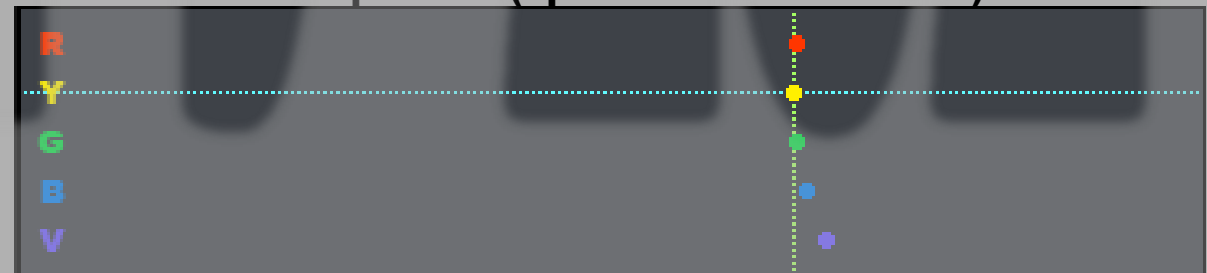
Однолинзовый рефрактор



Ахромат (дублет)



Апохромат (три и более линзы)





Однолинзовый



Ахромат



Ахромат

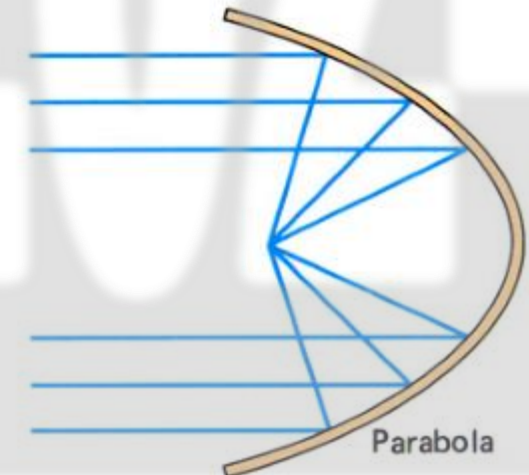
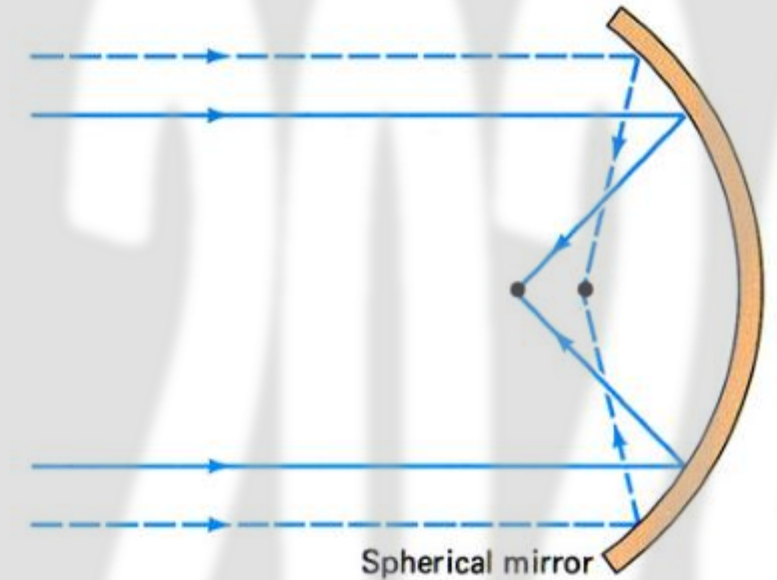
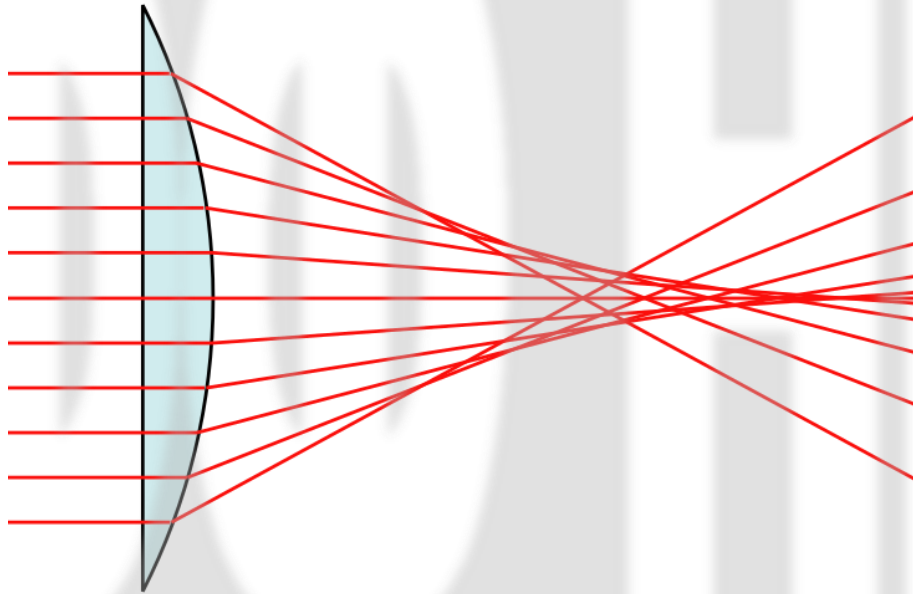


Апохромат

Однако, увеличение числа линз существенно увеличивает массу и стоимость телескопа рефрактора.

Сферическая абберрация

С технической точки зрения, гораздо проще (=дешевле) придать оптической поверхности сферическую форму, чем более сложную (асферическую). Это приводит к сферическим aberrациям, которым подвержены как рефракторы, так и рефлекторы.

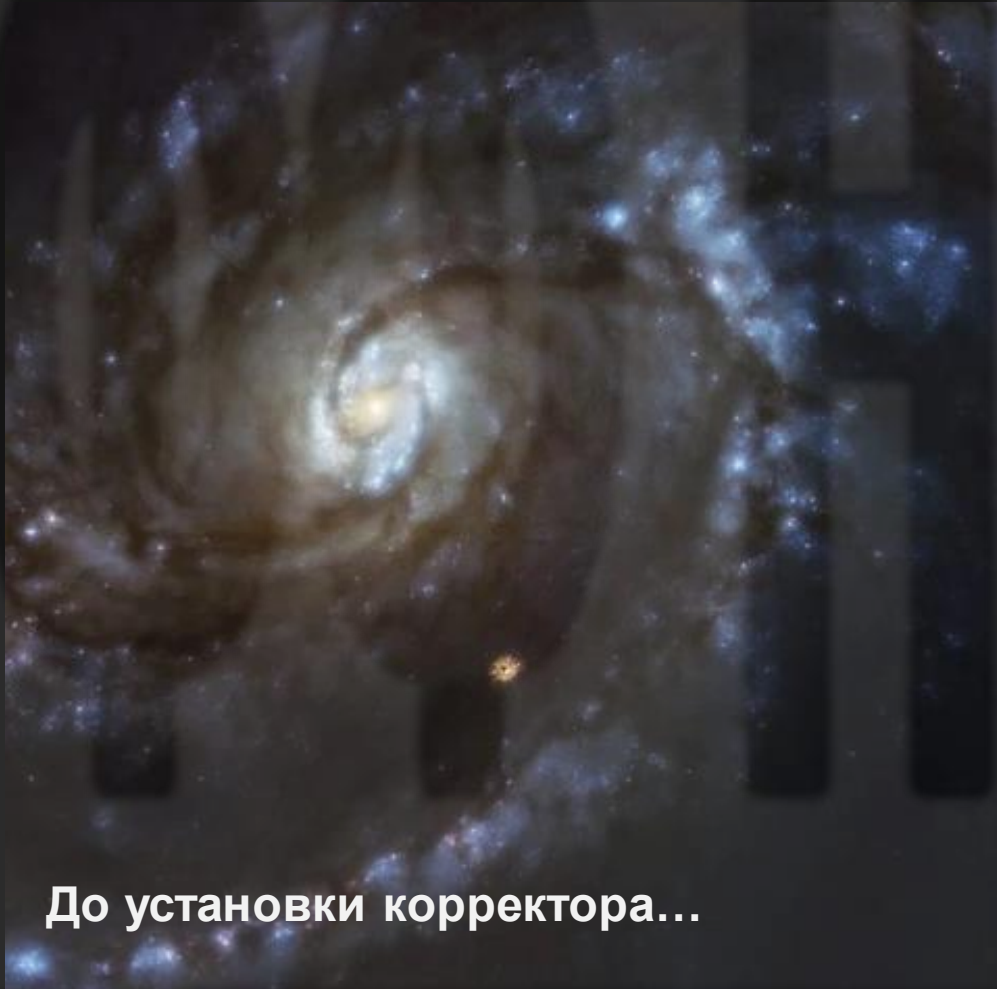


Уменьшить сферическую aberrацию можно исправлением формы оптической поверхности, либо с помощью дополнительных оптических элементов – линз и/или зеркал.

Очки для Хаббла

Из-за ошибки полировки главного зеркала телескопа Хаббл ($D=2.4$ м) его форма отличалась от заданной примерно на 2 мкм. В результате возникла сильная сферическая аберрация.

Ошибку удалось исправить с помощью корректирующей линзы (миссия шаттла).



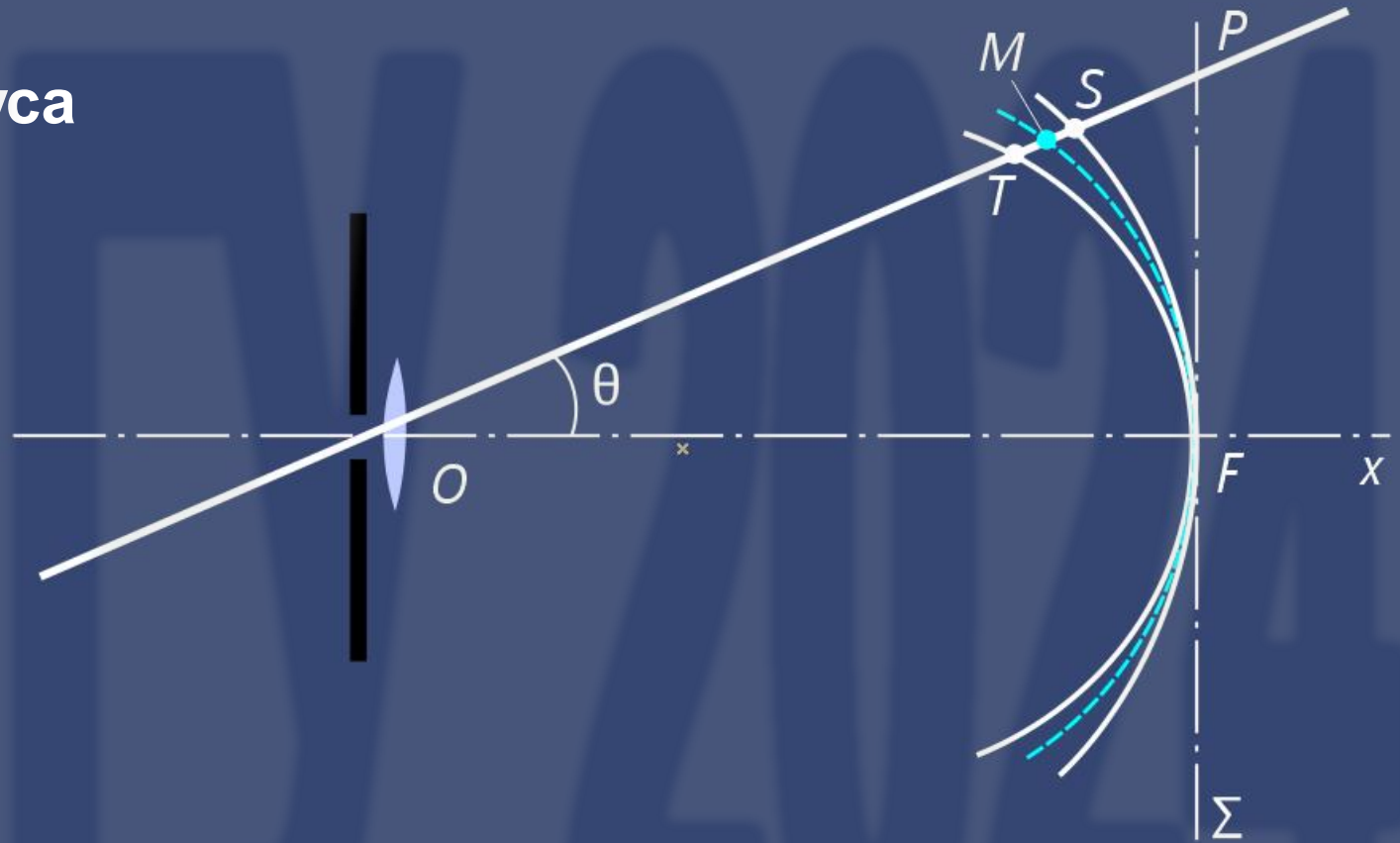
До установки корректора...



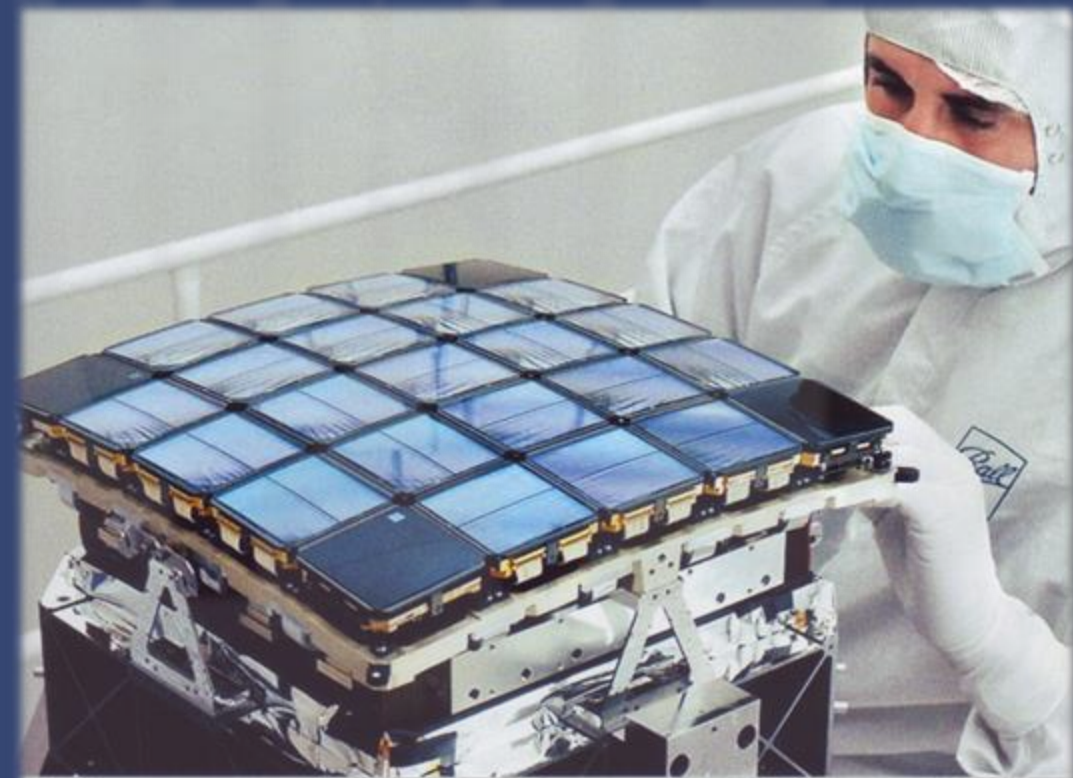
после установки

Кривизна поля

Поверхность наилучшего фокуса
не является плоской

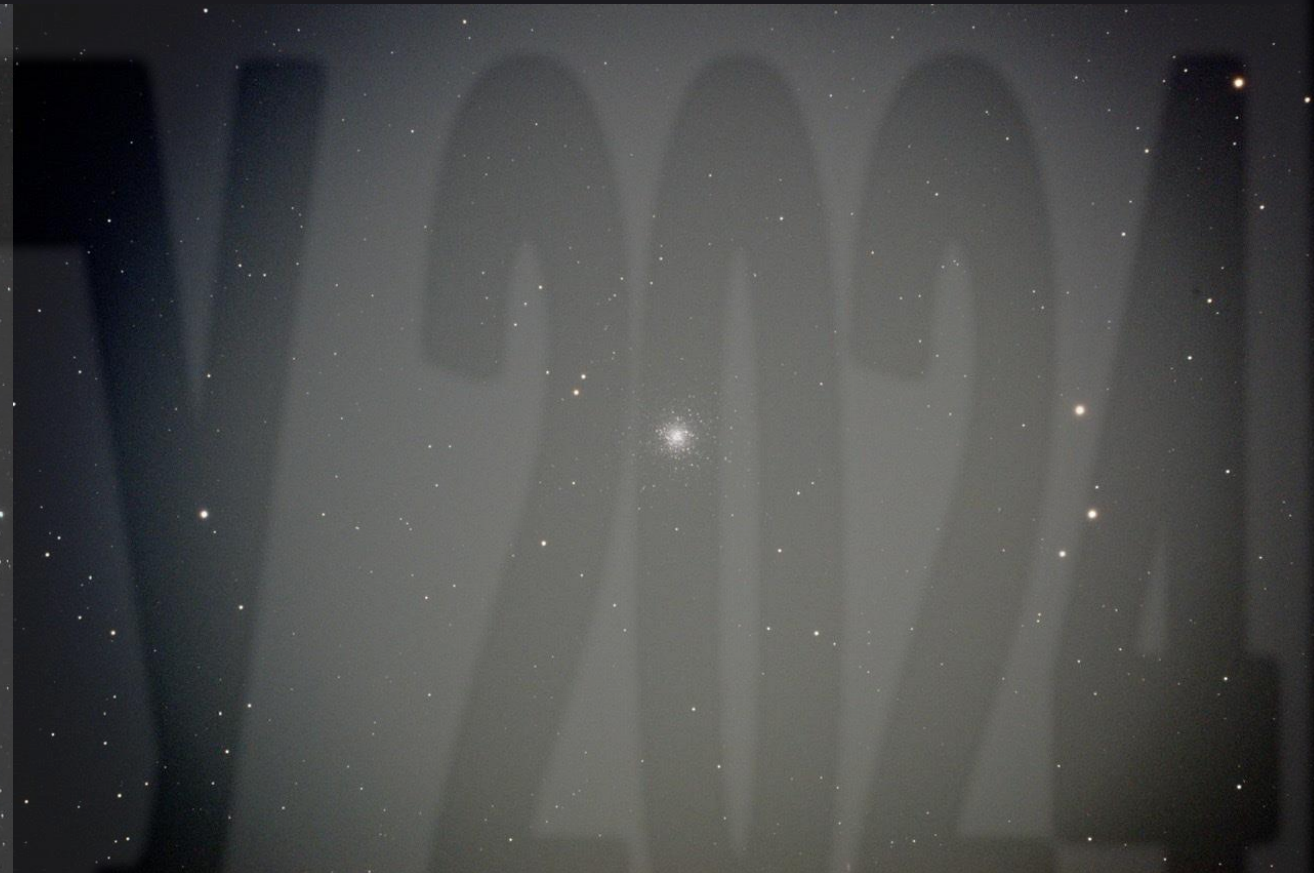


Для коррекции кривизны поля порой
проще «изогнуть» поверхность приемника
света, чем усложнять оптическую схему.



ПЗС-матрица обсерватории "Кеплер" (NASA)

Блики и виньетирование



Виньетирование – ограничение наклонных пучков света оправой или диафрагмами оптической системы, приводящее к ослаблению потока лучей, проходящего под углом к оптической оси.

Основные характеристики телескопа

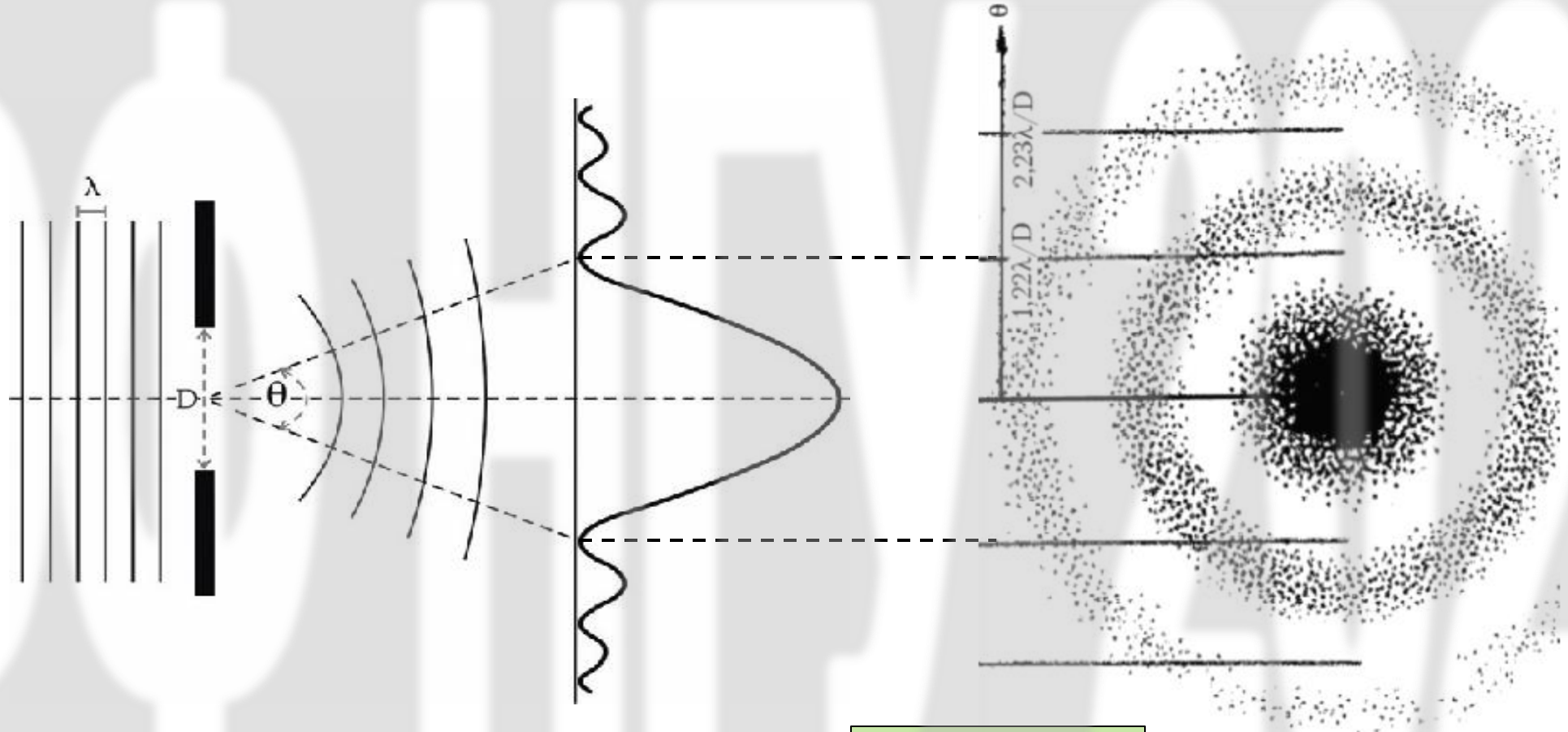
1. Диаметр и фокусное расстояние главного зеркала (aperture)

2. Поле зрения (Field of View, FOV)

3. Разрешение фотоприемника (sampling)

Разрешающая способность

Дифракция света (Фраунгофера) на круглом отверстии:



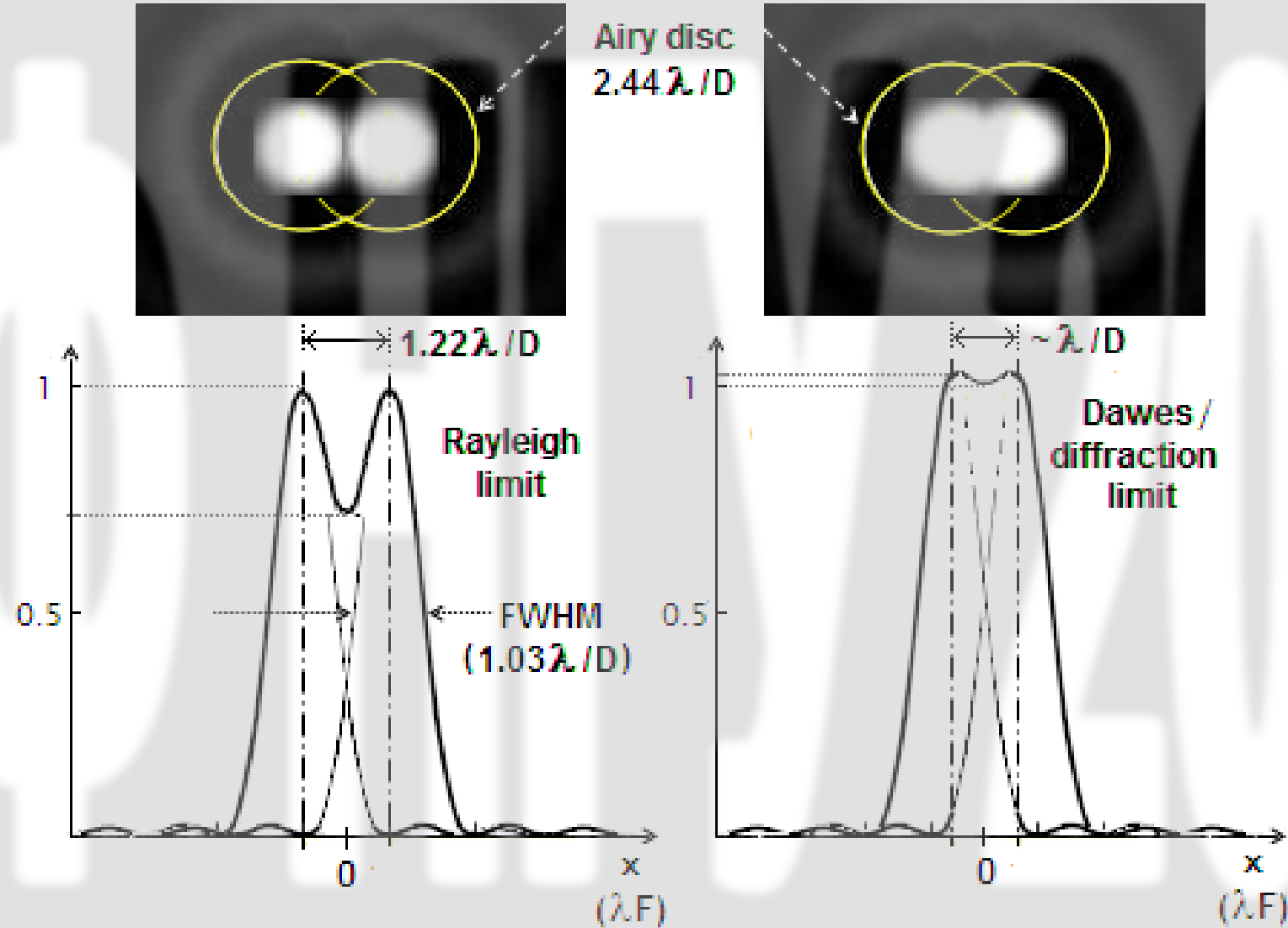
Положение (угол θ) первого минимума:

$$\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

– дифракционный предел

При этом центральное пятно содержит $\approx 85\%$ энергии падающего света.

Разрешающая способность



Если угловое расстояние между двумя звездами меньше чем $1.22 \lambda/D$, то они «сливаются» в одно пятно: дифракционный предел разрешения.

Вычислительный пример

Оценить предельную разрешающую способность глаза.

Пусть $D_0 = 7\text{мм}$ – диаметр зрачка человека. Тогда при наблюдении на длине волны $\lambda = 550\text{ нм}$ (желто-зеленый свет, максимум чувствительности глаза человека), разрешающая способность равна:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D_0} \simeq 1.22 \frac{550 \times 10^{-9}}{7 \times 10^{-3}} = 96 \times 10^{-6} \text{ рад} \simeq 20''$$

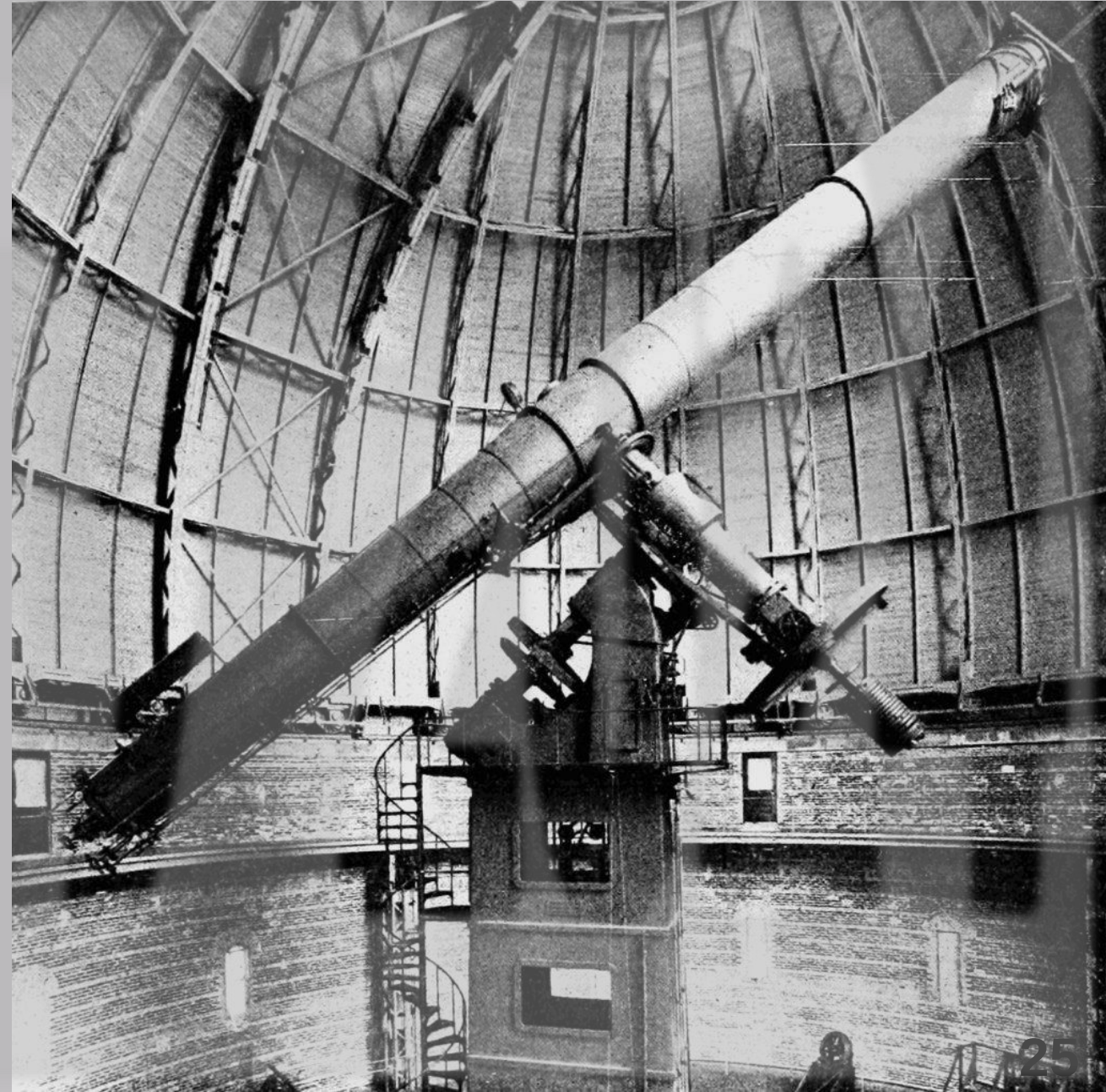
Практическое разрешения глаза чуть хуже, ближе к $60'' = 1'$.

Крупнейшие телескопы

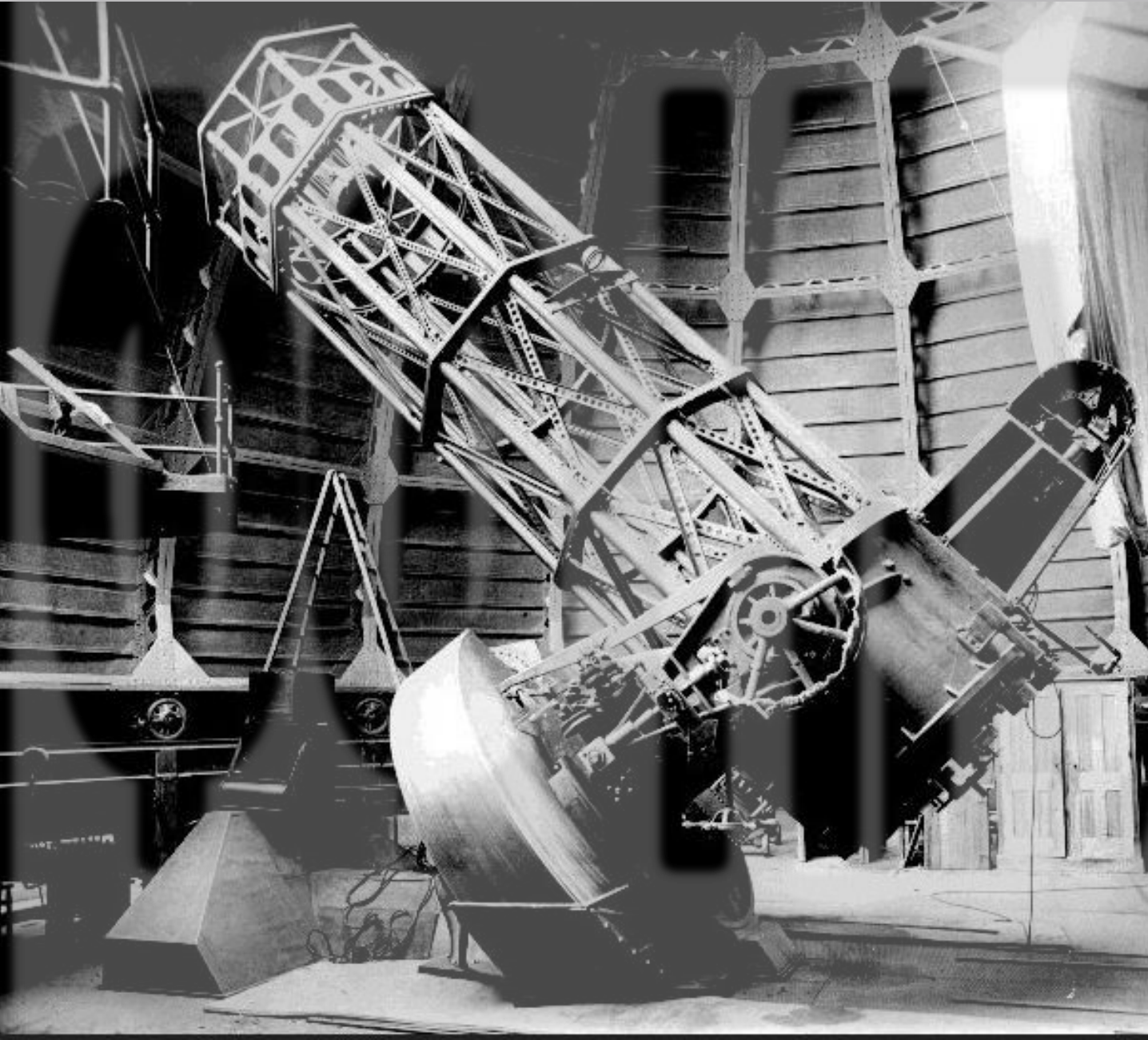
Размер телескопов рефракторов ограничивается быстро растущей сложностью изготовления линз большого размера с высокой точностью поверхностей и их огромной массой.



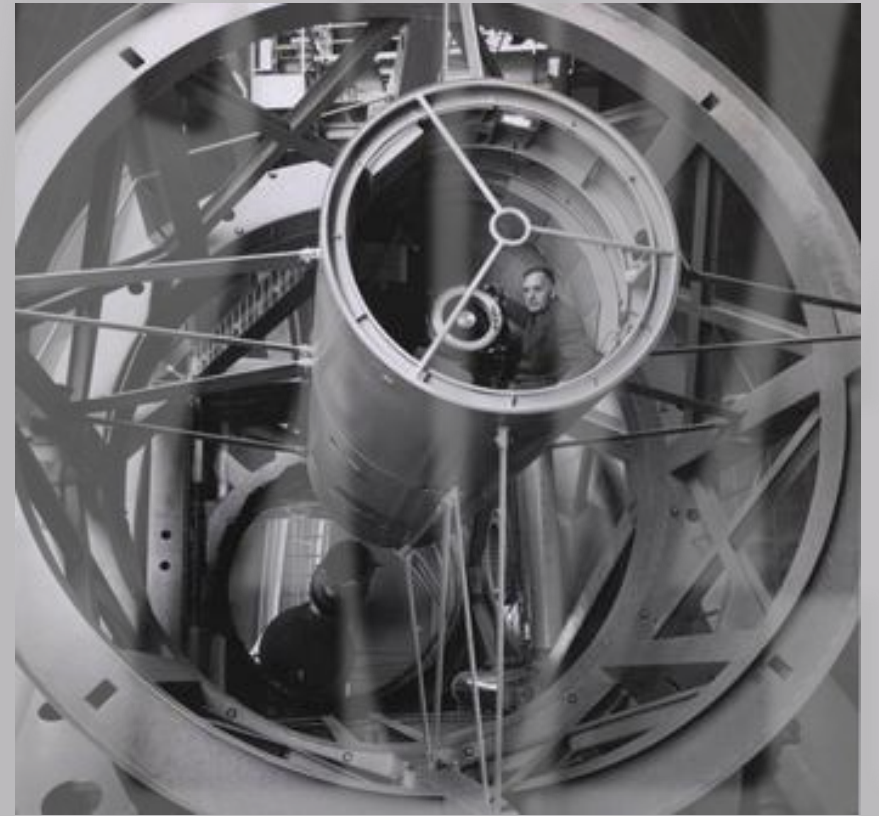
Ахромат Йеркской обсерватории.
США. 1896 год. $D=102$ см, $M=225$ кг.



Крупнейшие телескопы



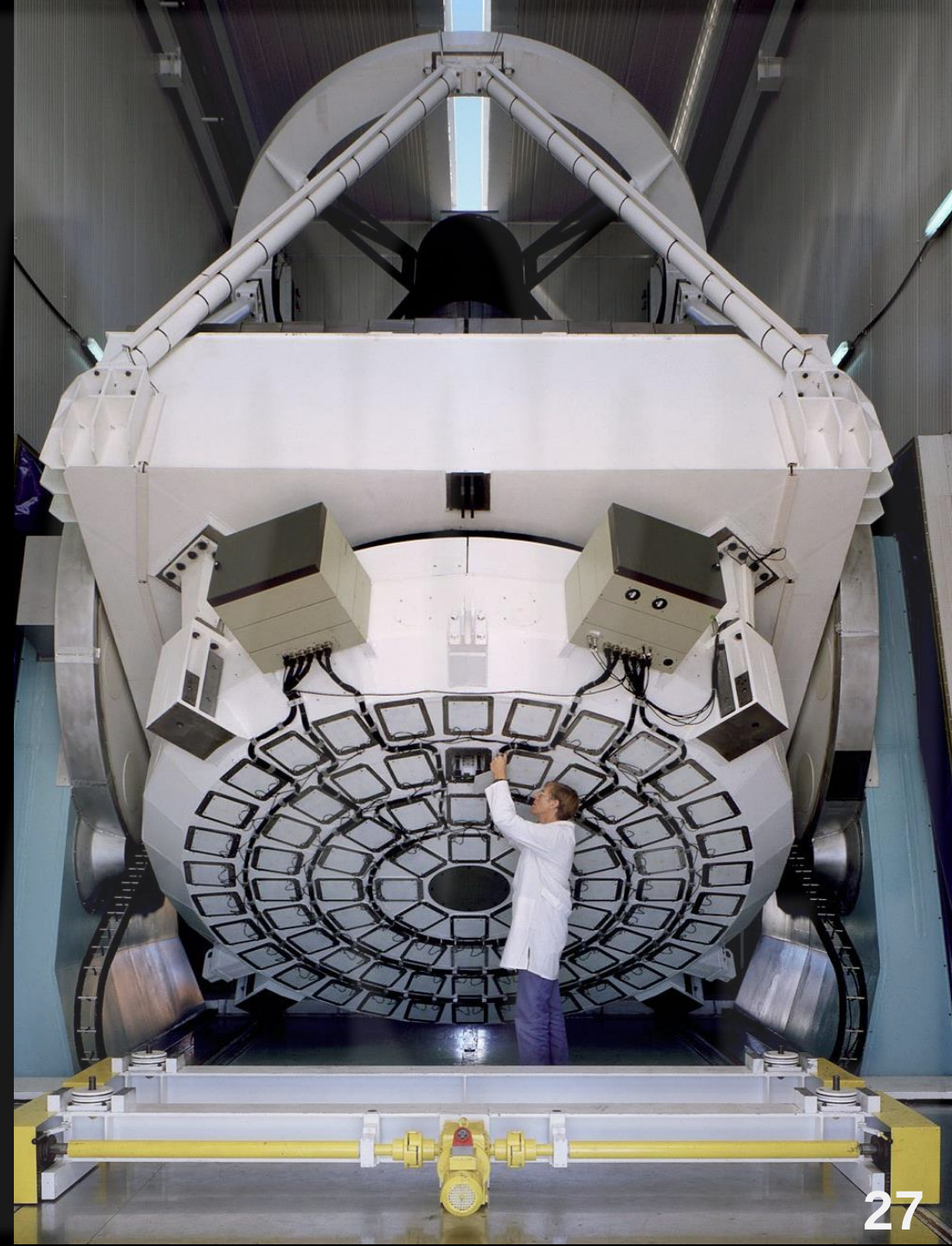
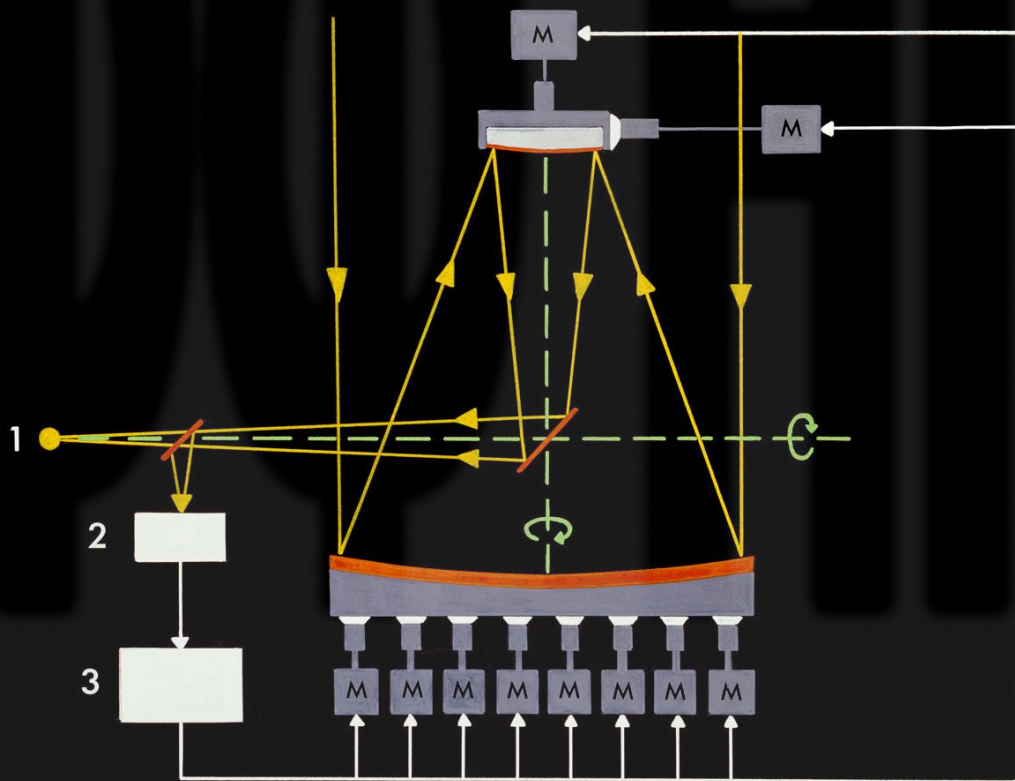
Для телескопов рефлекторов эти проблемы можно эффективно решить распределением нагрузки на зеркало. Трубу также можно существенно облегчить.



Телескоп обсерватории Mount Wilson.
США. 1920 год. $D = 5$ м.

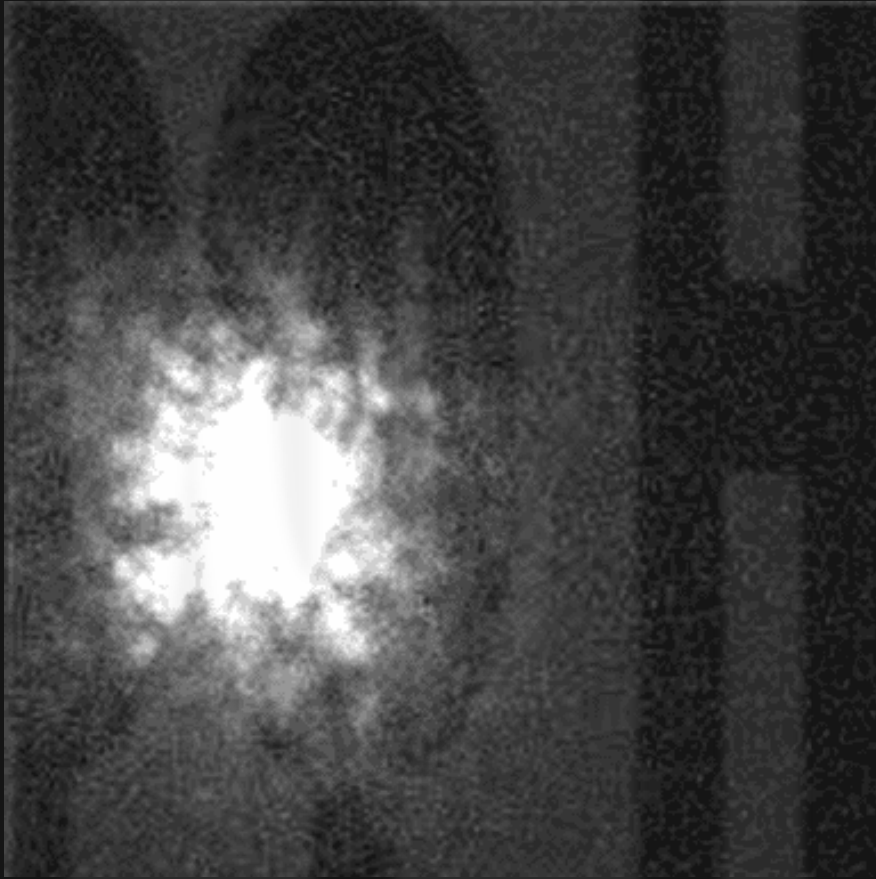
Активная оптика

Активная оптика — технология, используемая при создании телескопов-рефлекторов начиная с 1980-х годов, позволяющая менять «форму» зеркала телескопа для устранения деформаций вследствие (медленных) внешних воздействий (температуры, механического напряжения). Без применения активной оптики эффективная работа крупных телескопов (8 метров и более) была бы невозможной.



Влияние атмосферы

Типичное ограничение атмосферы на разрешающую способность телескопа составляет $1'' - 3''$. В местах с наилучшим астроклиматом (горы, низкая влажность) достигает $0.3'' - 0.5''$.



Турбулентность атмосферы оказывает определяющее влияние на качество изображения уже для телескопа с апертурой ~ 5 см. (дифракционный предел $2.5''$).

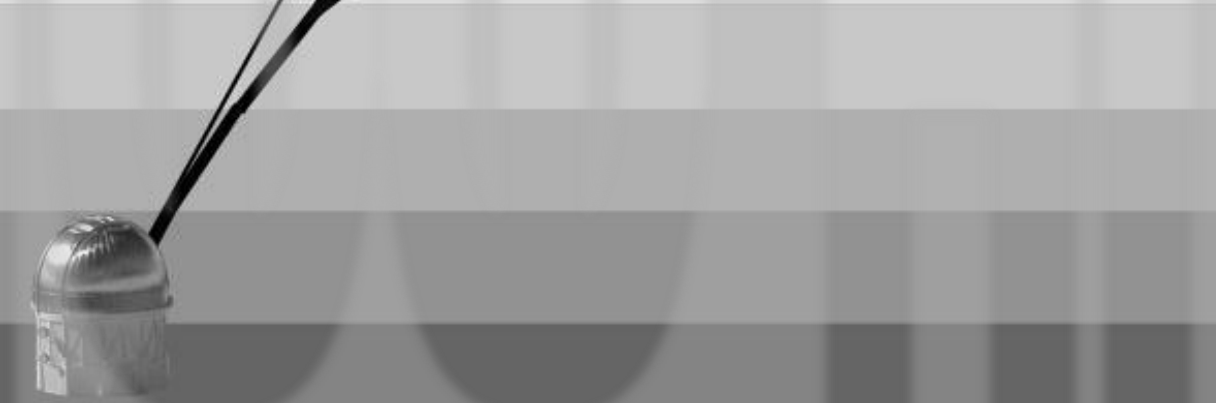
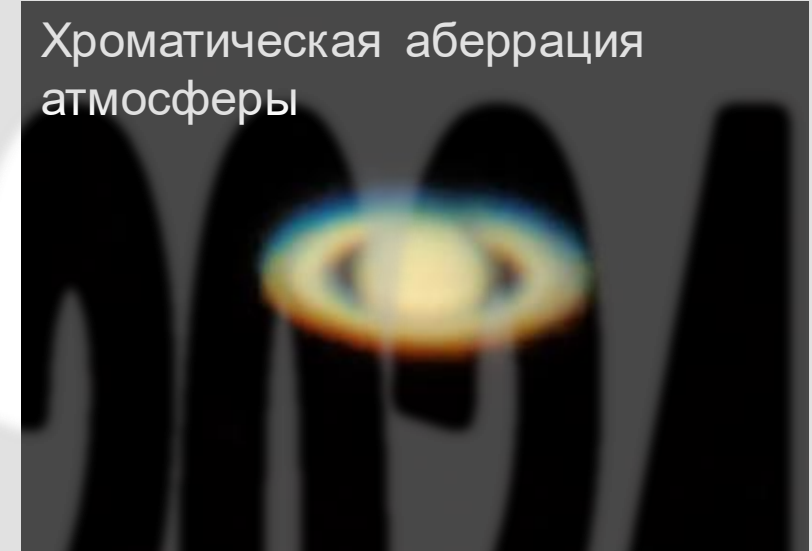
Рефракция в атмосфере

Направление,
видимое наземному
наблюдателю

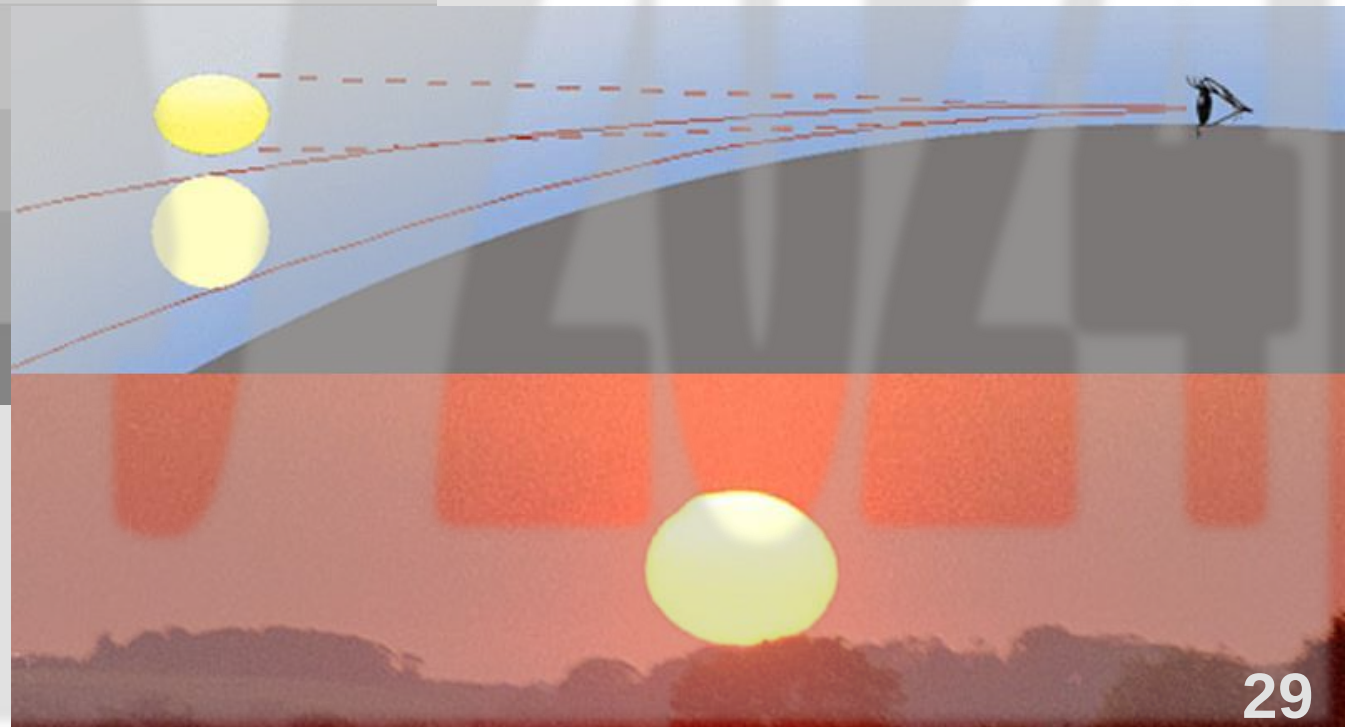
Реальное направление на
космический источник света

Приводит к изменению видимого
положения объекта.

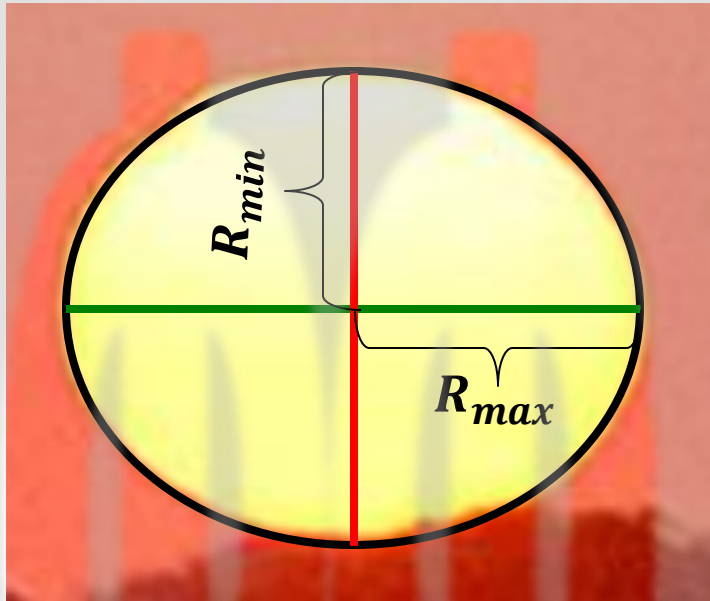
Хроматическая абберация
атмосферы



Угол рефракции зависит от высоты
объекта над горизонтом. Для протяженных
объектов это приводит к искажению
формы («сплющиванию»)

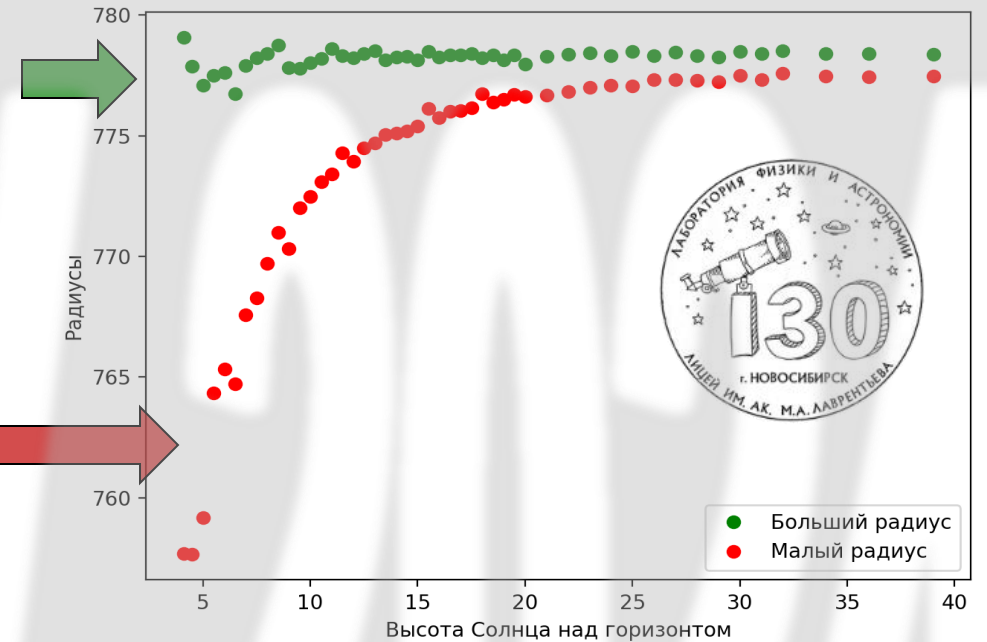


Рефракция в атмосфере



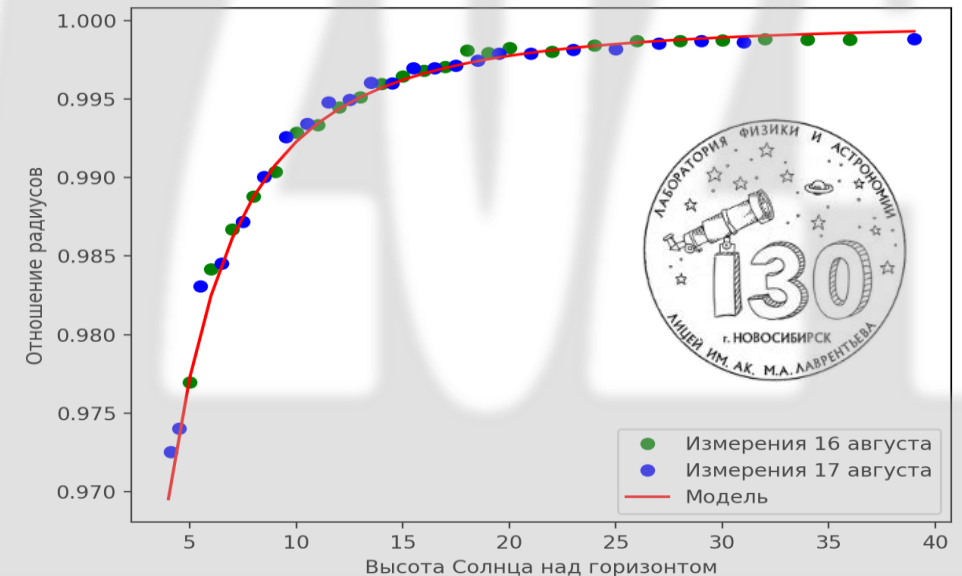
Горизонтальный видимый размер солнечного диска не меняется!

Вертикальный видимый размер солнечного диска

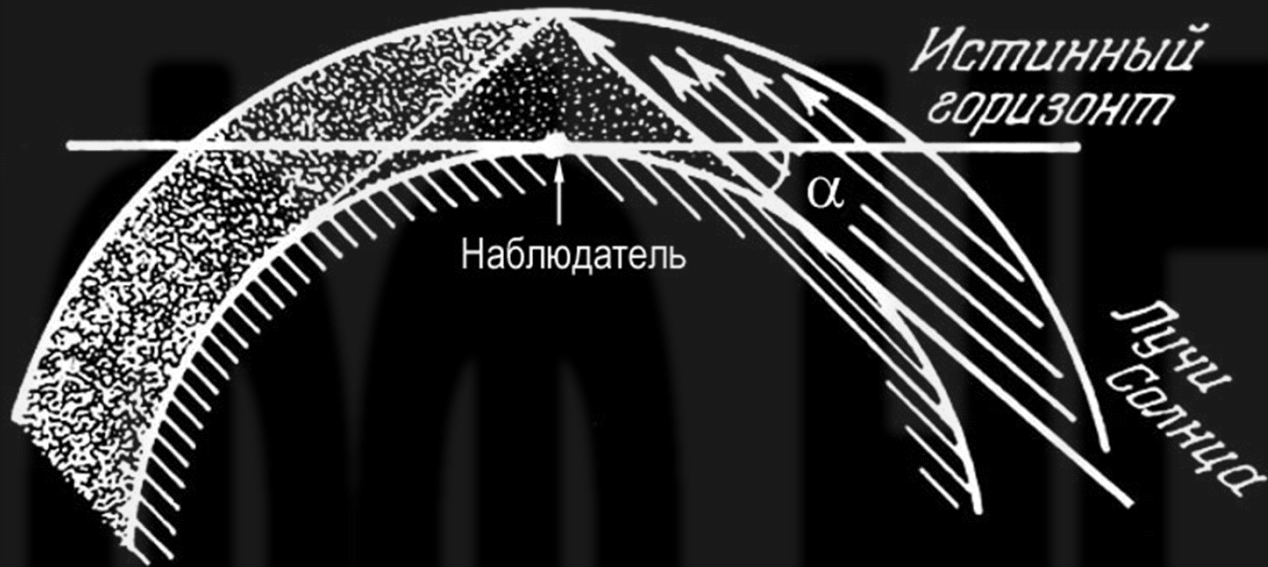


Сравнение измерений с эмпирической моделью Беннета и Симундсона (Bennett, Seamundsson).

Дифференциальная рефракция приводит к нелинейным эффектам в поле кадра, которые необходимо учитывать при высокоточных астрометрических измерениях.



Влияние атмосферы и не только



Сумерки	α
Гражданские	$0^{\circ} - 6^{\circ}$
Навигационные	$6^{\circ} - 12^{\circ}$
Астрономические	$12^{\circ} - 18^{\circ}$



Поверхностная яркость неба

Шкала Бортля:

Bortle class	Sky Brightness
1	>21.8
2	21.8 – 21.5
3	21.5 – 21.3
4	21.3 – 20.8
5	20.8 – 19.3
6	19.1 – 18.5
7	18.5 – 18.0
8,9	<18

Означает ли это, что объекты с поверхностной яркостью меньшей, чем локальная яркость неба, невозможно зарегистрировать?

В Академе, измеренная поверхностная яркость неба ~18.7

8/9

City/Inner
City Sky

7

City/
Suburbia
Transition

6

Bright
Suburban
Sky

5

Suburban
Sky

4

Suburban/
Rural
Transition

3

Rural Sky

2

Dark Sky
Site

1

Excellent
Dark Sky
Site

Туманность Андромеды

Рефрактор 15 см
Место – Ак. гордок

Почему возможно регистрировать объекты, поверхностная яркость которых меньше, чем яркость фона (засветка неба)?

Астроклимат

Для снижения влияния атмосферы, крупнейшие обсерватории размещаются высоко в горах, с низкой влажностью и пониженной турбулентностью.

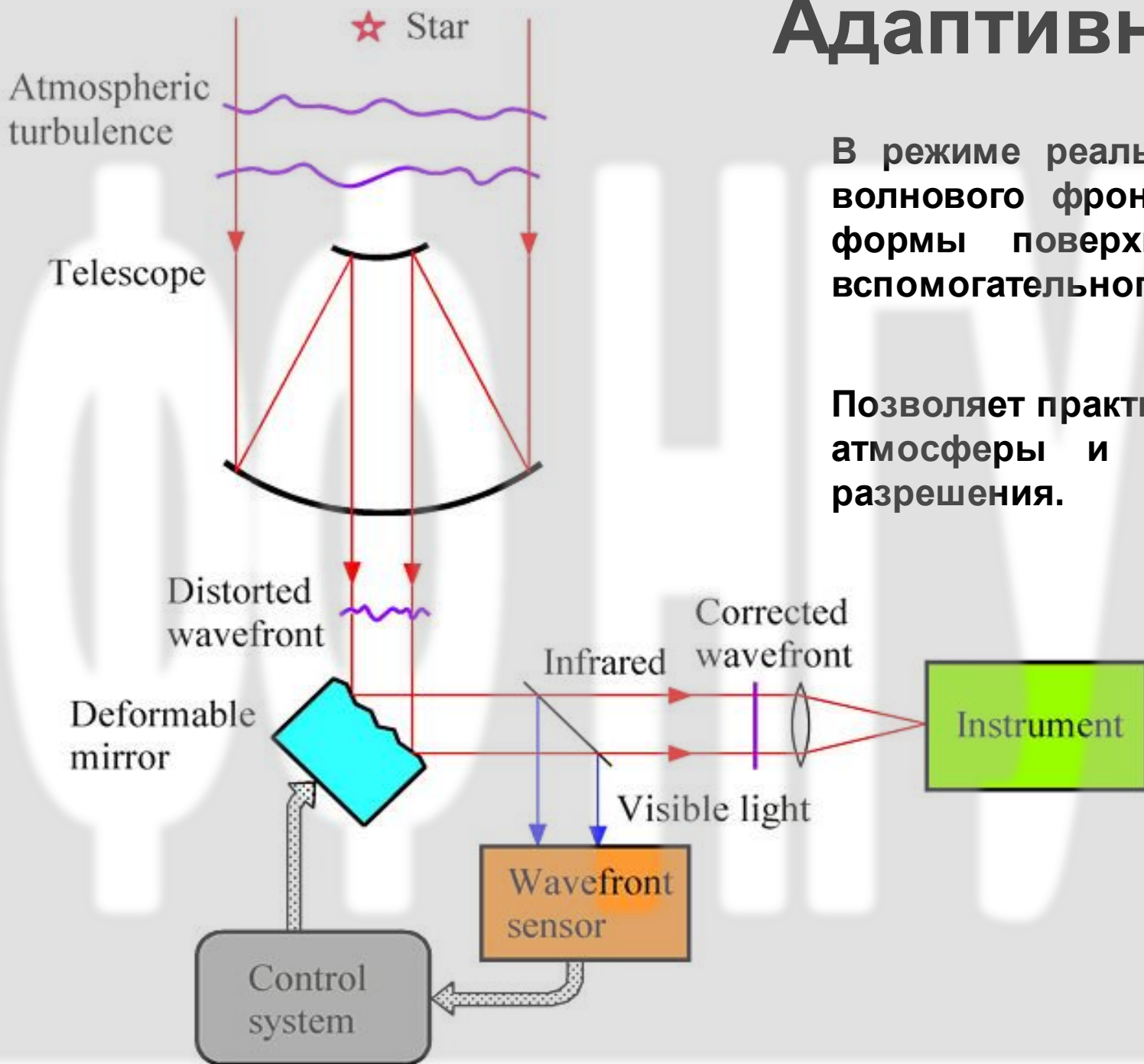


Mauna Kea, Hawaii.
Altitude ~4200 m

Адаптивная оптика

В режиме реального времени проводит коррекцию волнового фронта путем механической подстройки формы поверхности не большого главного, а вспомогательного гибкого зеркала.

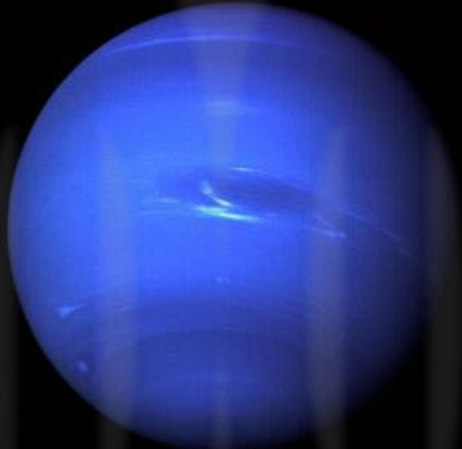
Позволяет практически полностью устранить влияние атмосферы и достичь дифракционного предела разрешения.



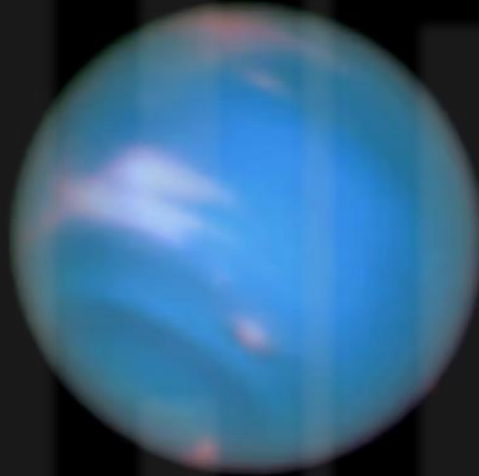
Адаптивная оптика



Планета Нептун



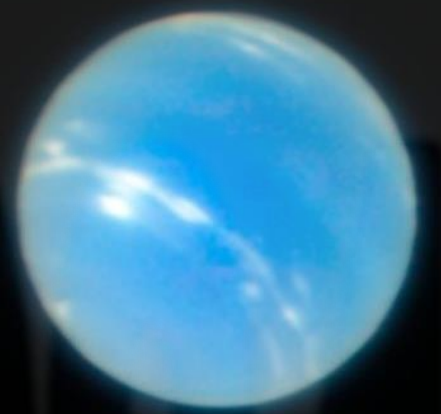
Voyager 2



HST



Без АО

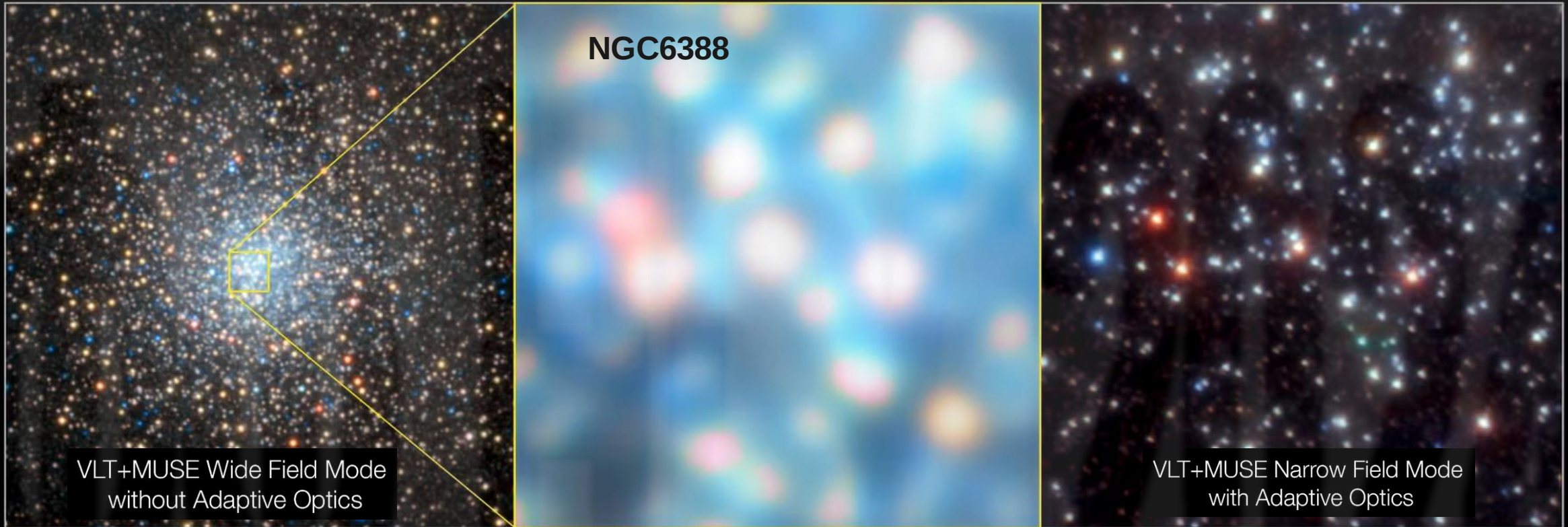


Система АО

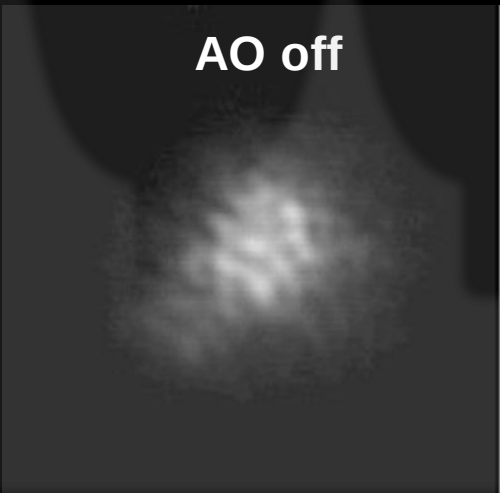


VLT

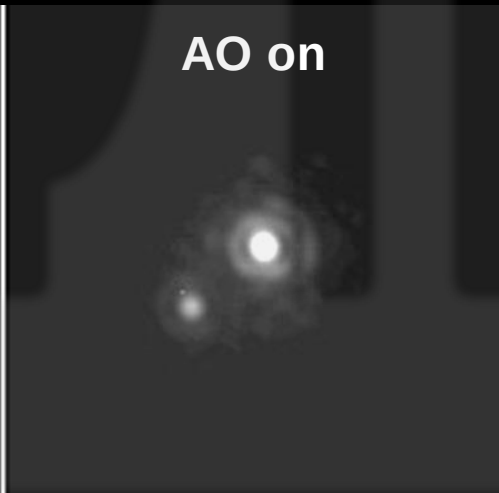
Адаптивная оптика



AO off



AO on



Изображение двойной звезды, исправленное с помощью адаптивной оптики.

Телескоп SUBARU.

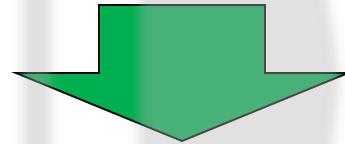
С использованием АО разрешение наземных телескопов может приблизиться к дифракционному пределу.

Lucky Imaging

Адаптивная оптика – очень дорогое и сложное оборудование, которое устанавливается только на крупнейших телескопах. Далеко не все профессиональные инструменты имеют АО.

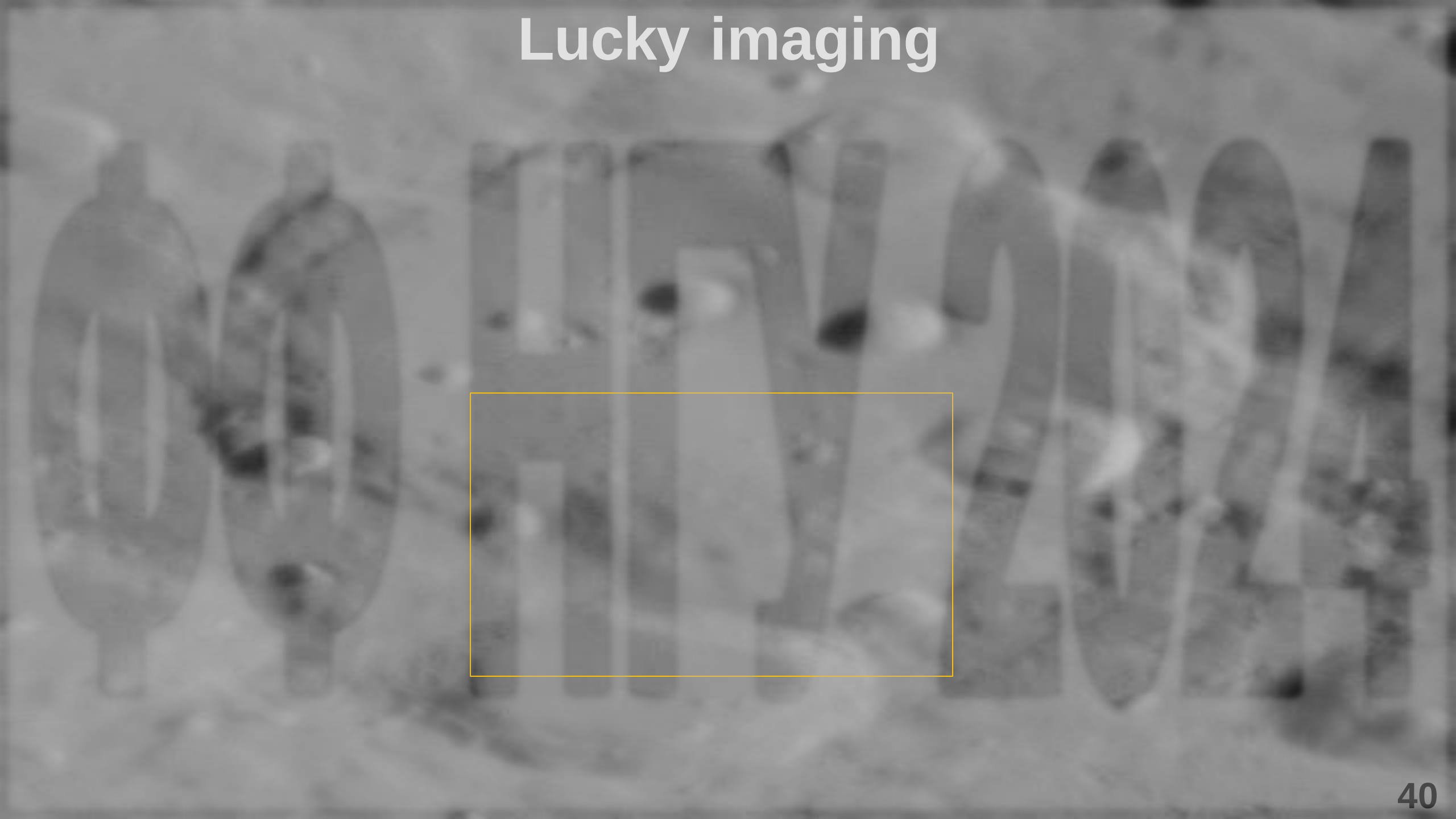
При работе с телескопами средних и малых размеров (в основном любительского уровня), для снижения влияния атмосферы в некоторых случаях используется методика Lucky imaging (Удачный кадр).

Турбулентность атмосферы – процесс стохастический, и на короткие промежутки времени ее состояние может стать гораздо более спокойным.

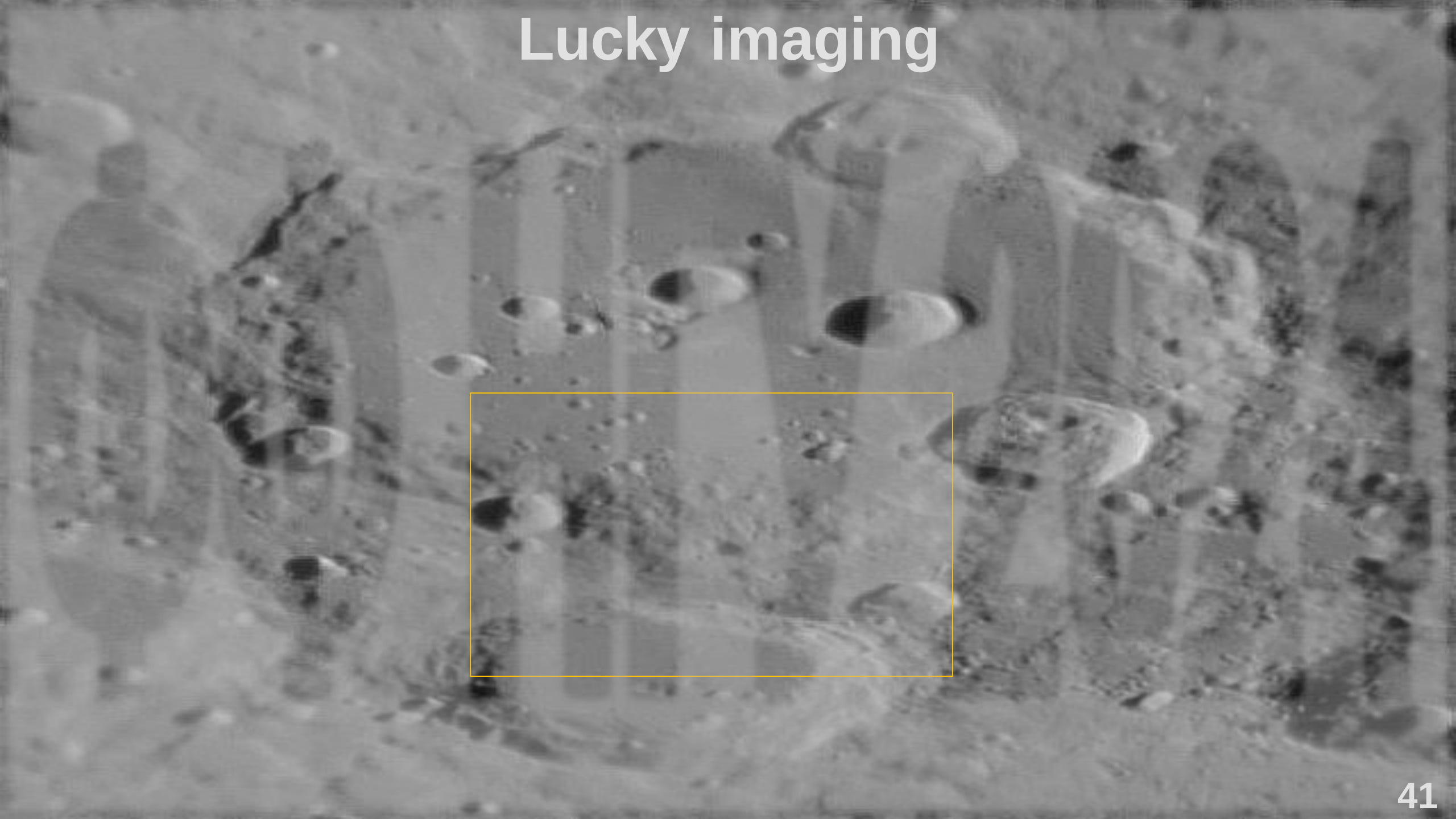


Идея метода – делать очень БОЛЬШОЕ количество (тысячи) кадров с очень короткой (десятки миллисекунд) экспозицией. Выбирая и комбинируя кадры, сделанные в моменты спокойной атмосферы, можно существенно повысить угловое разрешение, и даже достичь дифракционного предела.

Lucky imaging

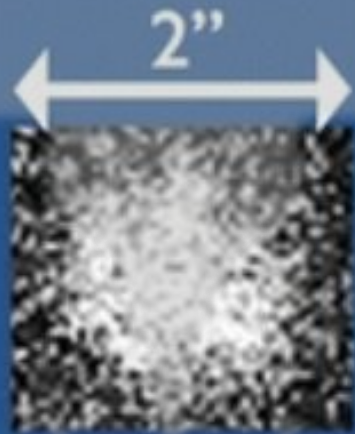


Lucky imaging

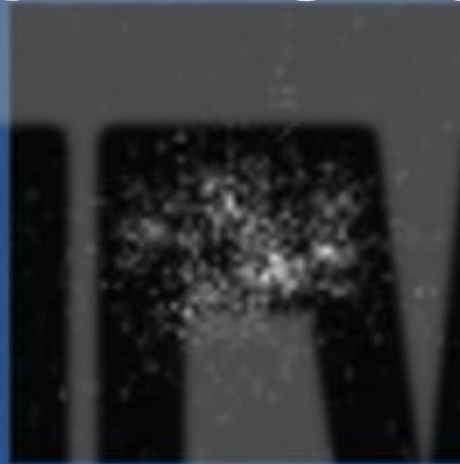


Lucky imaging

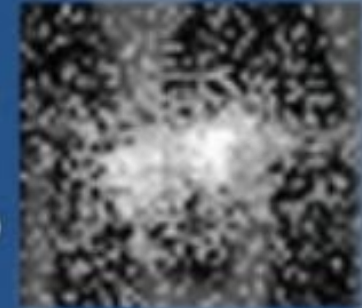
Телескоп
Calar Alto 2.2 m
экспозиция 25мс



Frame with
lowest
Strehl ratio



Frame with
highest
Strehl ratio



Sum of all
50000
frames



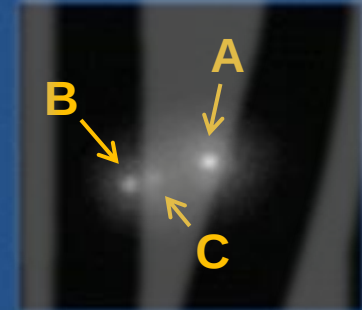
Sum of all 50000
frames with
center of gravity
shifted to the
same reference
position



Best 25000
frames with
brightest pixel
shifted to the
same reference
position



Best 5000
frames with
brightest pixel
shifted to the
same reference
position



Best 500
frames with
brightest pixel
shifted to the
same reference
position

Угловое расстояние между компонентами АВ: $0.493''$; ВС: $0.157''$

Основные характеристики телескопа

1. Диаметр и фокусное расстояние главного зеркала (aperture)

2. Поле зрения (Field of View, FOV)

3. Разрешение фотоприемника (sampling)

Поле зрения

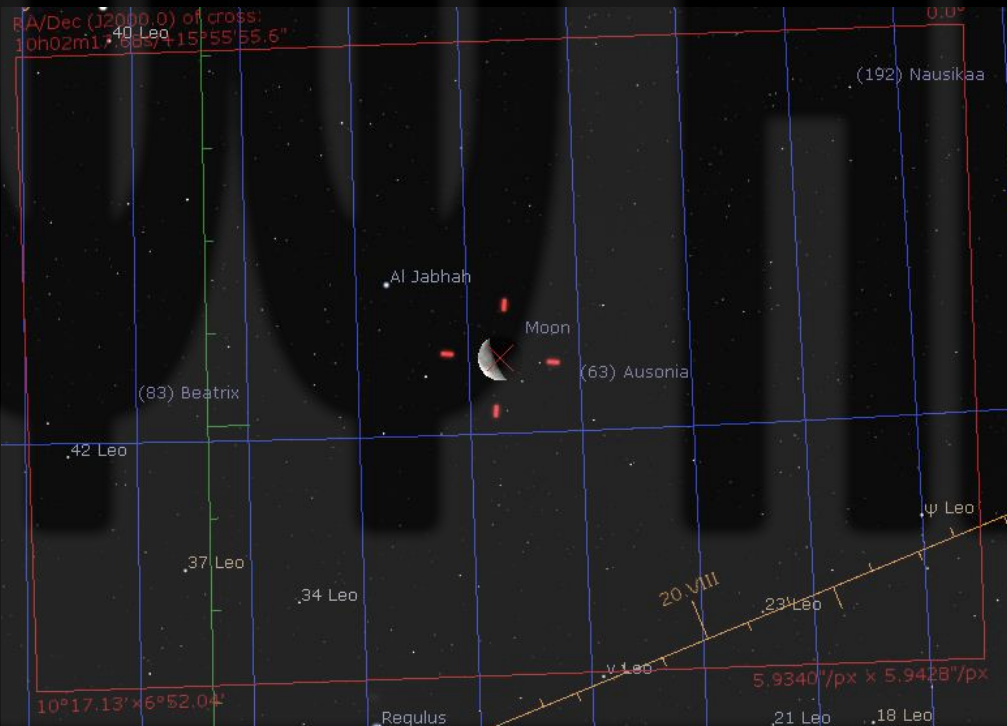
Поле зрения (Field Of View) – максимальный угол между направлениями на объекты, изображения которых фиксируются приемником (глазом, фотопластинкой, CCD камерой). Зависит от фокусного расстояния телескопа и размеров приемника света.

$$FOV = 2 \cdot \arctan\left(\frac{w}{2F}\right)$$

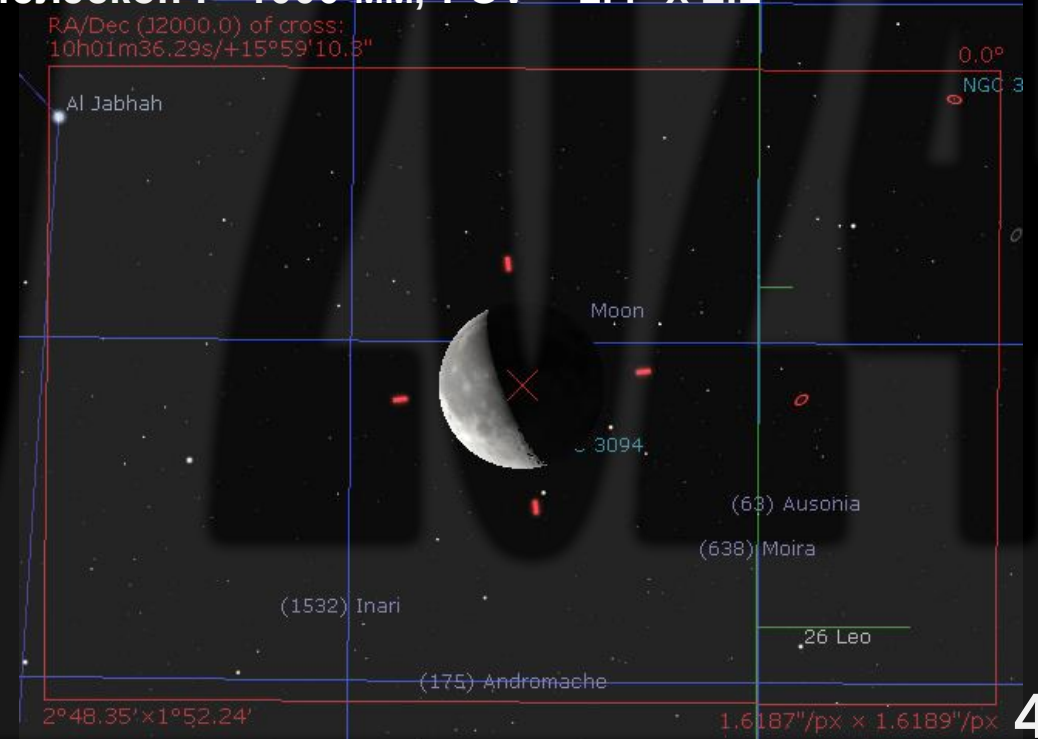
w – размер фотоприемника

F – фокусное расстояние

full-frame камера (24x36 мм) и
фотообъектив F=200 мм, FOV = 6.9° x 10.3°



full-frame камера (24x36 мм) и любительский
телескоп F=1000 мм, FOV = 1.4° x 2.1°



Широкоугольная
камера Шмидта

Диаметр поля 6°

Требуется
1200 экспозиций
для съемки неба

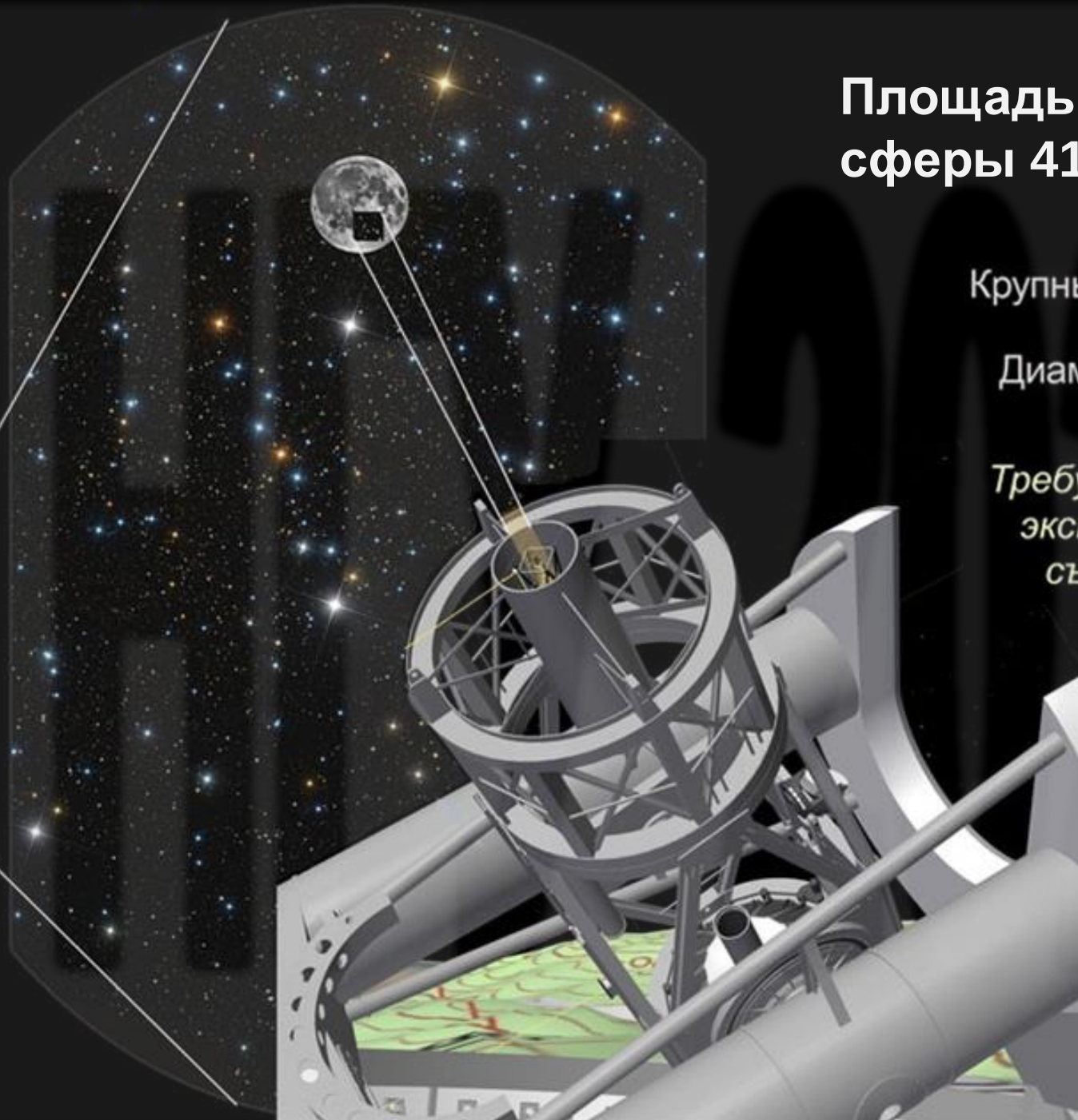


Площадь небесной
сферы 41253 кв. гр.

Крупный рефлектор

Диаметр поля $10'$

Требуется 1,5 млн
экспозиций для
съемки неба



Основные характеристики телескопа

1. Диаметр и фокусное расстояние главного зеркала (aperture)

2. Поле зрения (Field of View, FOV)

3. Разрешение фотоприемника (sampling)

Разрешение

Разрешение (Sampling) – поле зрения соответствующее размеру пиксела камеры.

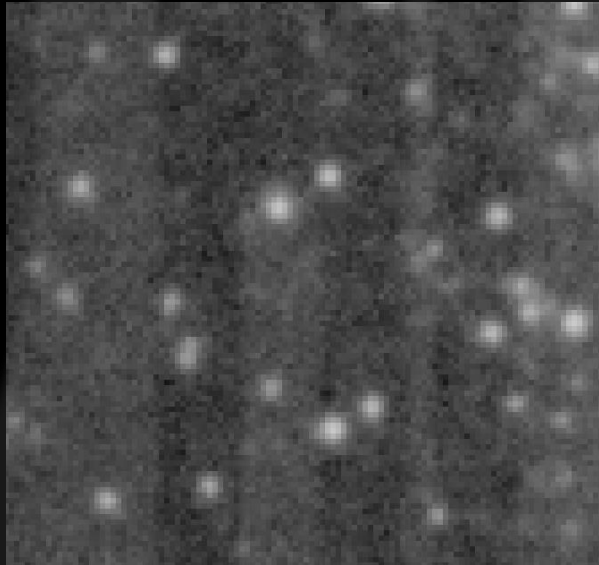
$$S = 2 \cdot \arctan \left(\frac{d}{2f} \right) \simeq \frac{d}{F}$$

d – размер пиксела

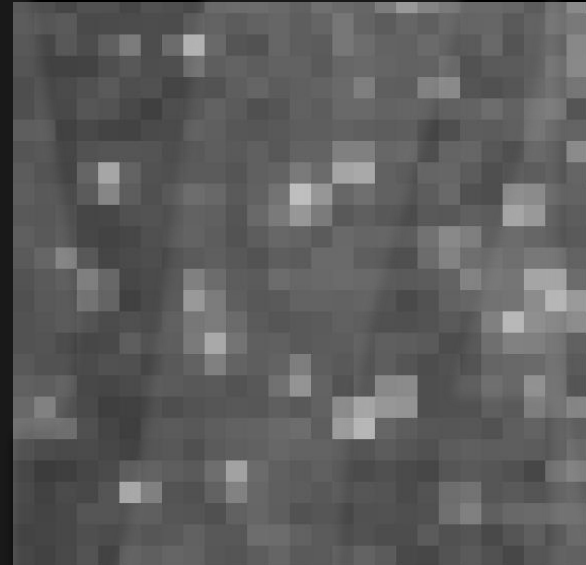
F – фокусное расстояние

Типичный размер пиксела астрономических камер составляет от 3 до 15 мкм.

CMOS камера с пикселом
4x4 мкм и любительский
телескоп $F=1000$ мм $S =$
 $0.8'' \times 0.8''$



CCD камера с пикселом
7x7 мкм и фотообъектив
 $F=200$ мм, $S = 14'' \times 14''$



Поскольку разрешающая способность телескопа, как правило, ограничивается атмосферой, разрешение много лучше $1''$ нецелесообразно (приводит к удорожанию камеры и увеличению объема данных).

Вычислительный пример

Оценить предельную разрешающую способность глаза.

Пусть $D_0 = 7\text{ мм}$ – диаметр зрачка человека. Тогда при наблюдении на длине волны $\lambda = 550\text{ нм}$ (желто-зеленый свет, максимум чувствительности глаза человека), разрешающая способность равна:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D_0} \simeq 1.22 \frac{550 \times 10^{-9}}{7 \times 10^{-3}} = 96 \times 10^{-6} \text{ рад} \simeq 20''$$

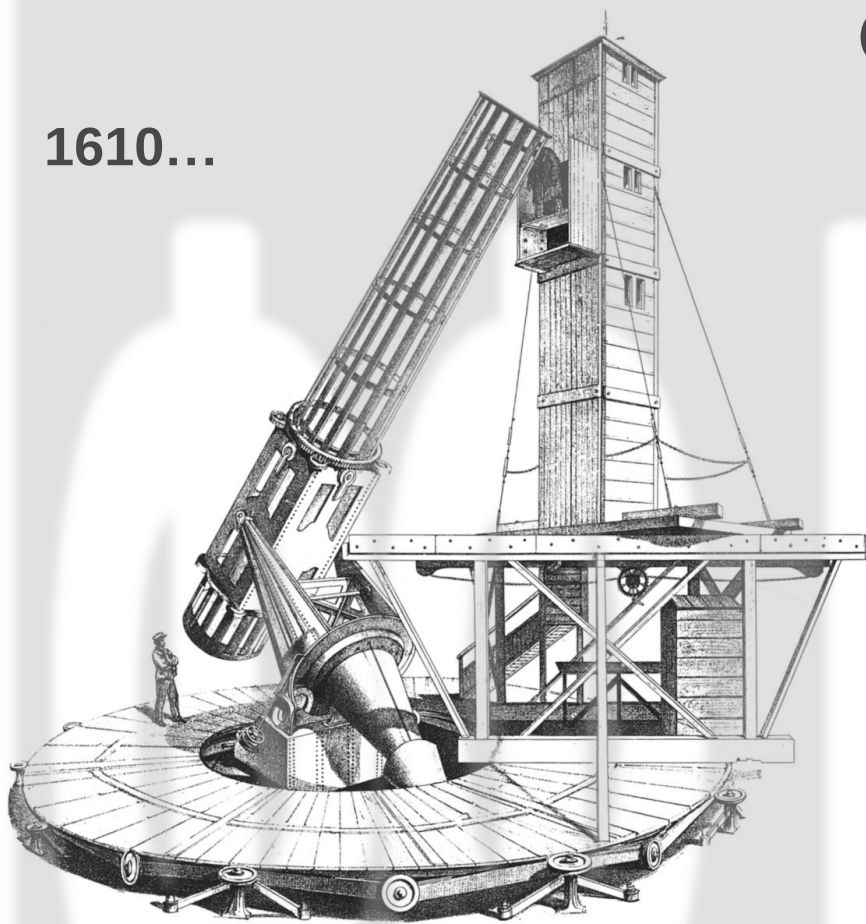
Нужно учитывать, что помимо оптической системы, необходима регистрирующая аппаратура, характеристики которой должны соответствовать характеристикам оптической системы. В случае глаза роль детекторов света выполняют палочки (цветное зрение) и колбочки (ночное зрение). Размер рецепторов глаза (пикселей фотокамеры) должен соответствовать разрешающей способности оптической системы.

$$S = \theta F \simeq 10^{-4} \times 0.03 = 3 \times 10^{-6} \text{ м} = 3\text{ мкм}$$

Интересно, что примерно таким и является размер палочек/колбочек глаза человека.

Фотоприемники

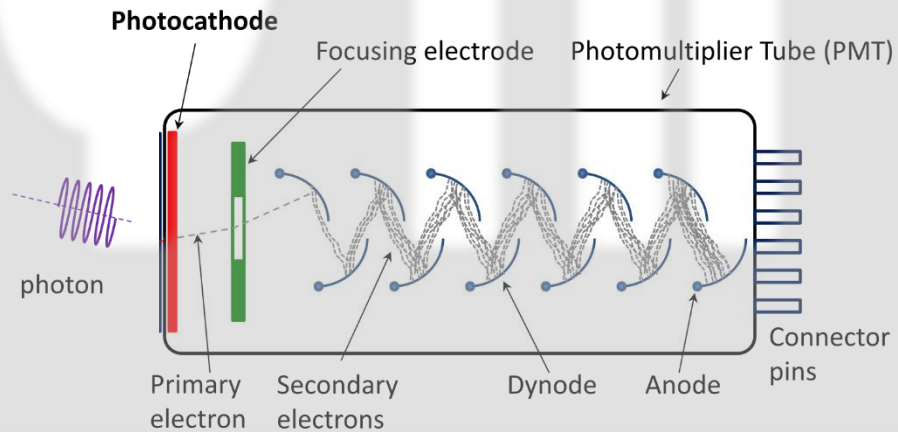
1610...



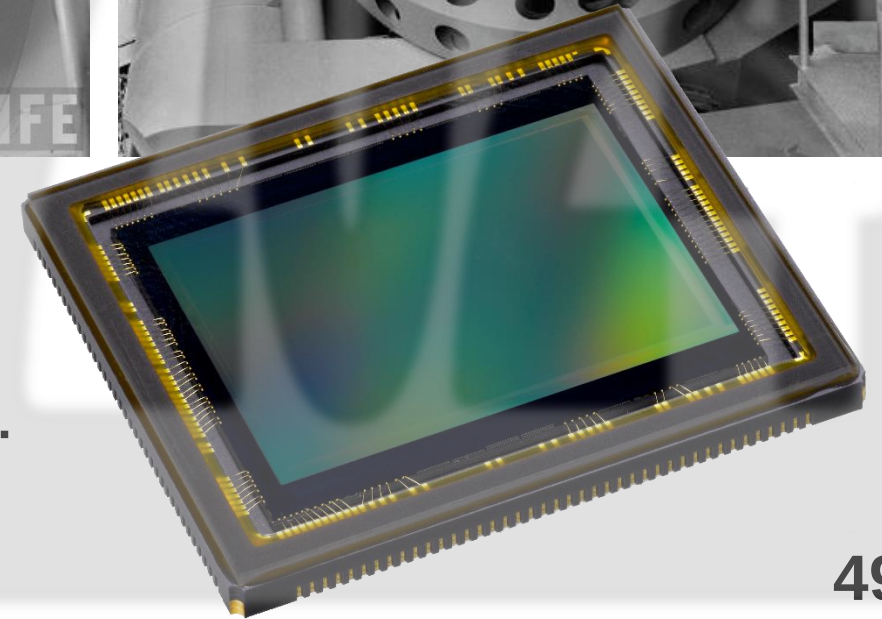
~1850...



~1950...
В ОСНОВНОМ
для
фотометрии

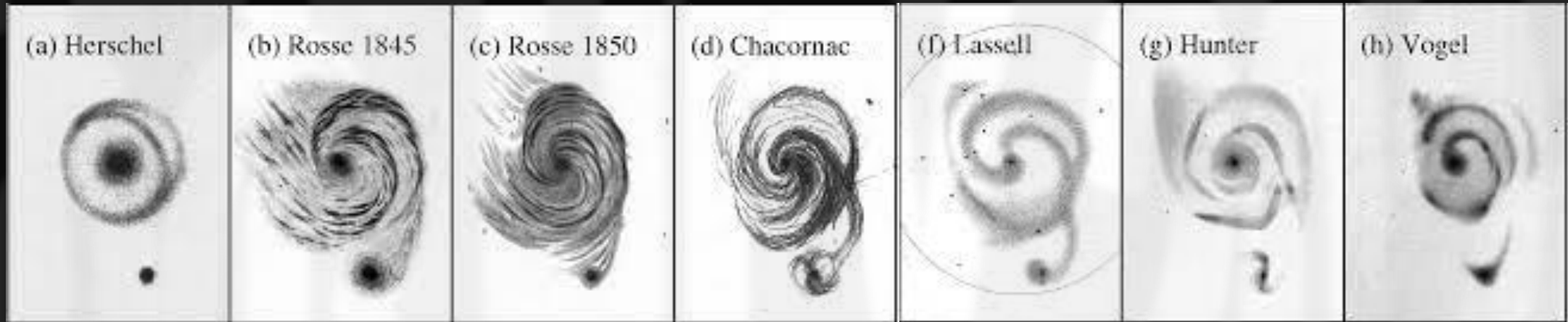


1990...



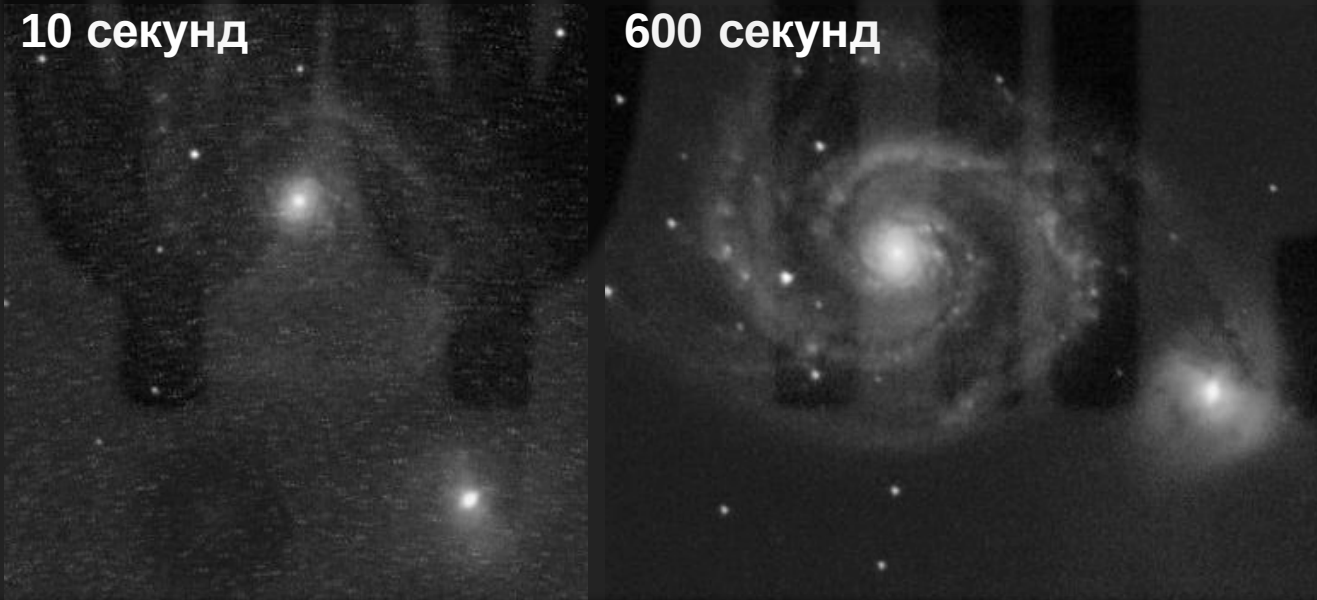
Фотоприемники

1. Объективная фиксация изображения



10 секунд

600 секунд



2. Возможность накапливать свет

3. Проводить измерения

4. Архивация данных

Эффективность приемника света

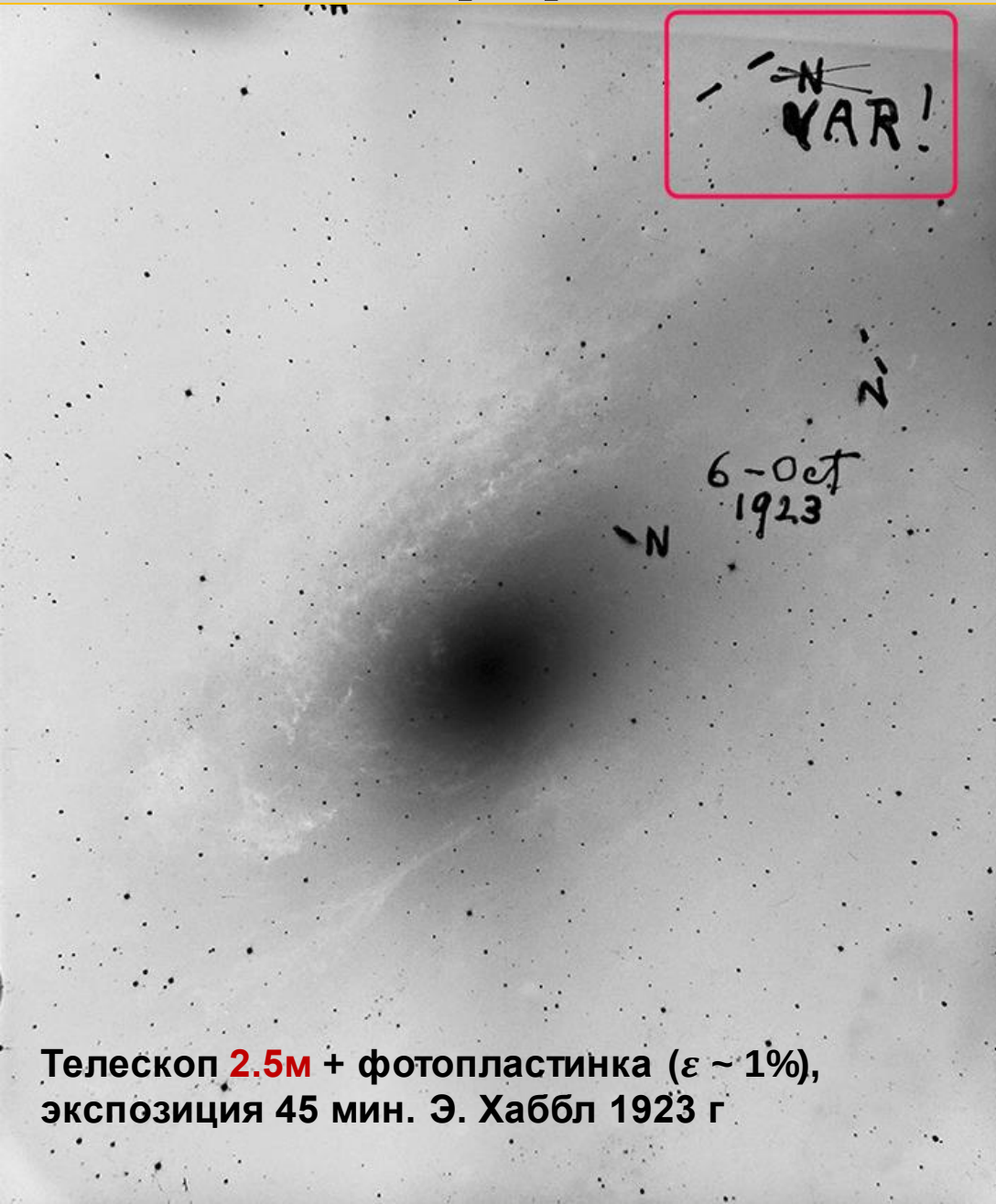
(квантовый выход)

В фотографии требуется около 100-200 фотонов, чтобы создать скрытое изображение в зерне фотоэмульсии. То есть квантовая эффективность 0.5 – 1%

В фотокатоде фотоумножителя для выбивания одного фотоэлектрона требуется в среднем 10 фотонов. С учетом эффективности фокусирующей системы типичная квантовая эффективность ФЭУ составляет 5 – 15%.

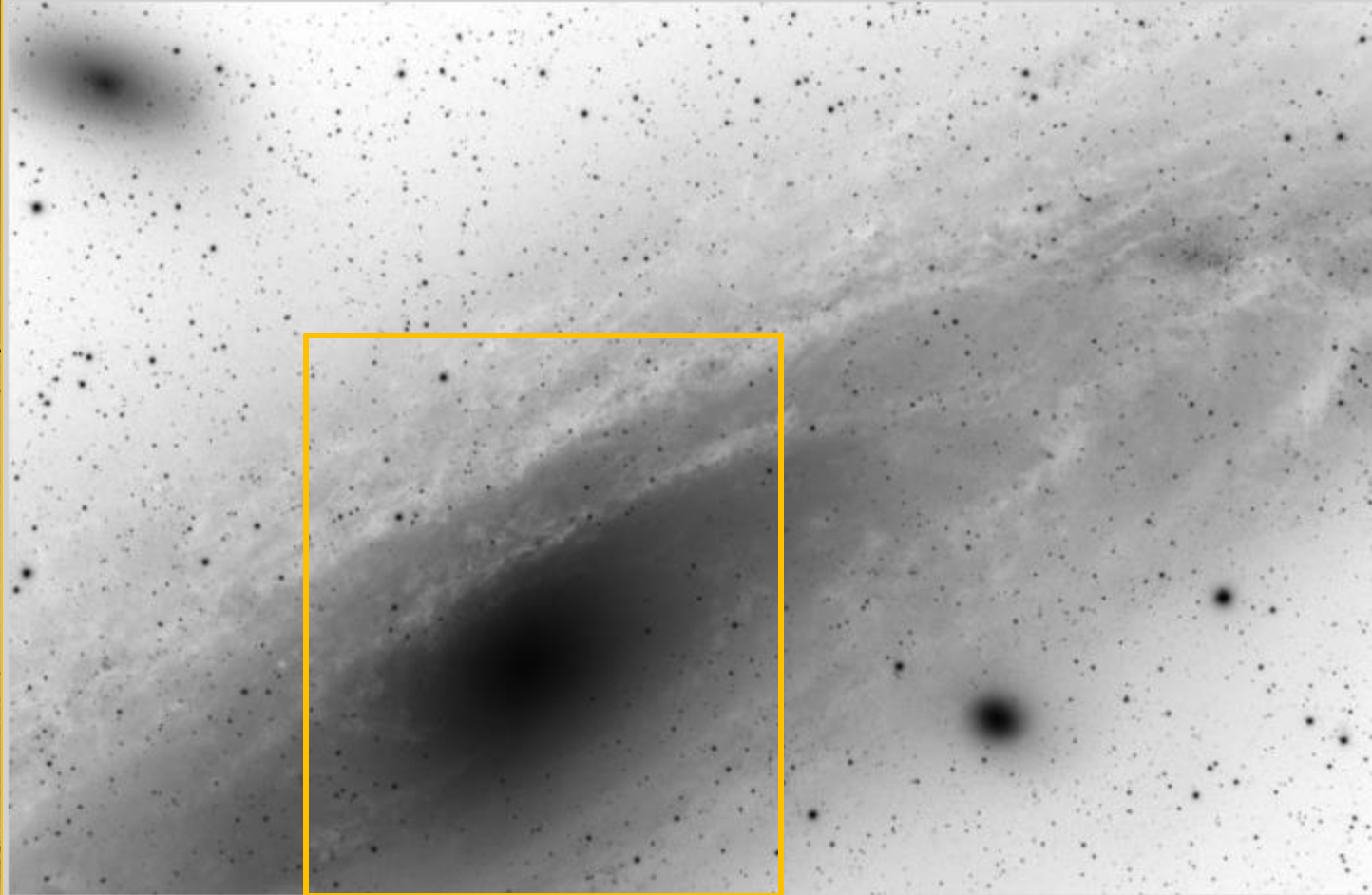
В современных полупроводниковых матрицах (CCD и CMOS) квантовая эффективность равна 50 – 60%, а в максимуме может достигать 90%!

Эффективность приемника света



Телескоп **2.5м** + фотопластинка ($\varepsilon \sim 1\%$),
экспозиция 45 мин. Э. Хаббл 1923 г

Телескоп **0.15м** + CMOS матрица ($\varepsilon \sim 80\%$),
экспозиция 90 мин. Лицей 130, 2022г



Вычислительный пример

Оценить предельную звездную величину точечного источника, который может быть надежно зарегистрирован (накопить ~1000 фотонов) в видимом диапазоне шириной $\Delta\lambda = 100\text{нм}$ телескопом диаметром 0.15 м за время экспозиции 1 час, при средней квантовой эффективности 50%.

$$D = 0.15 \text{ м} \quad n = 1000 \text{ фотонов} \quad \Delta t = 3600 \text{ с} \quad \varepsilon = 0.5$$

$$f_0 = 10^3 \Delta\lambda \simeq 10^3 \times 1000 \simeq 10^6 \frac{\text{фот}}{\text{см}^2 \text{с}} \quad \text{— поток от звезды с } m = 0$$

$$n = f_m \cdot S \cdot \Delta t \cdot \varepsilon \quad f_m = \frac{n}{S \Delta t \varepsilon} = \frac{4 \cdot 1000}{\pi \cdot (15)^2 \cdot 3600 \cdot 0.5} \simeq 3.1 \times 10^{-3}$$

$$\frac{f_0}{f_m} = \frac{10^6}{3.1 \cdot 10^{-3}} \simeq 3.2 \cdot 10^8$$

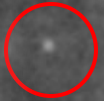
$$m = 2.5 \lg \left(\frac{f_0}{f_m} \right) \simeq 21.3$$

Туманность Андромеды

Рефрактор 15 см

Время экспозиции ~1 ч.

~20m



Характеристики CCD/CMOS приемников

В фотокамерах для научных исследований число мегапикселей – важный, но вовсе не основной параметр.

1. Квантовый выход
2. Спектральный диапазон
3. Тепловой шум
4. Разрядность АЦП
5. Линейность отклика
6. Глубина колодца
7.

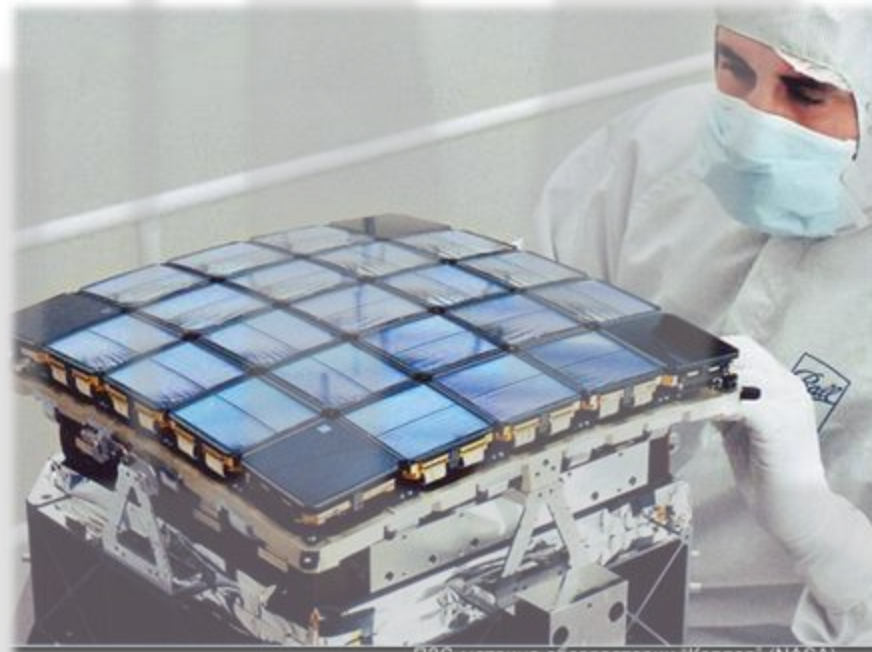
Размер CCD матрицы:

17.6 мм X 13.52 мм

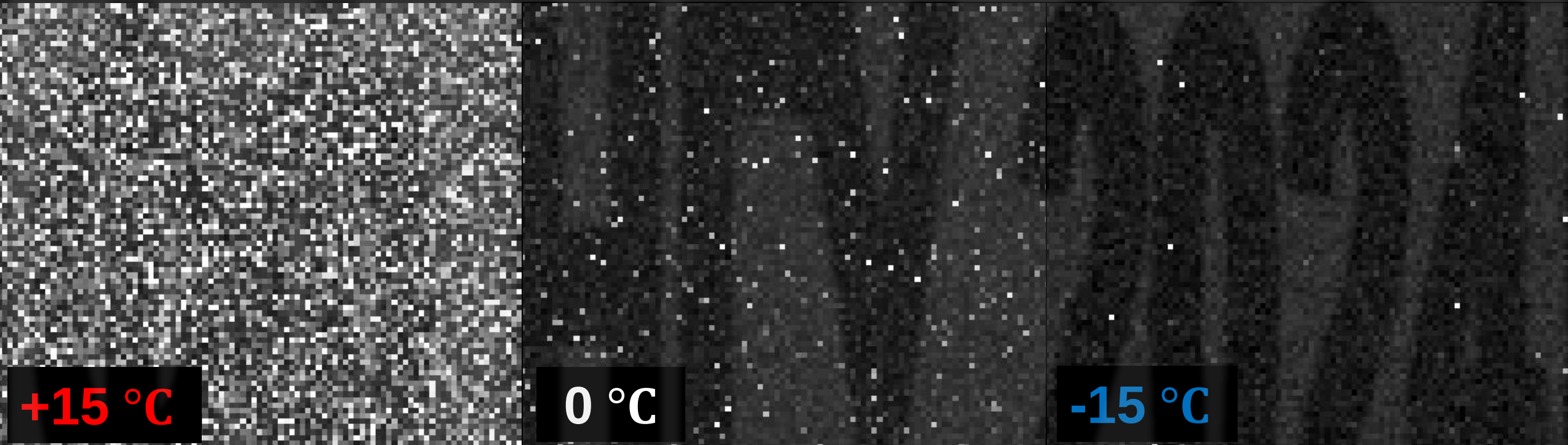
Размер CCD пиксела:

5.4 мкм X 5.4 мкм

Разрядность АЦП: 16 бит

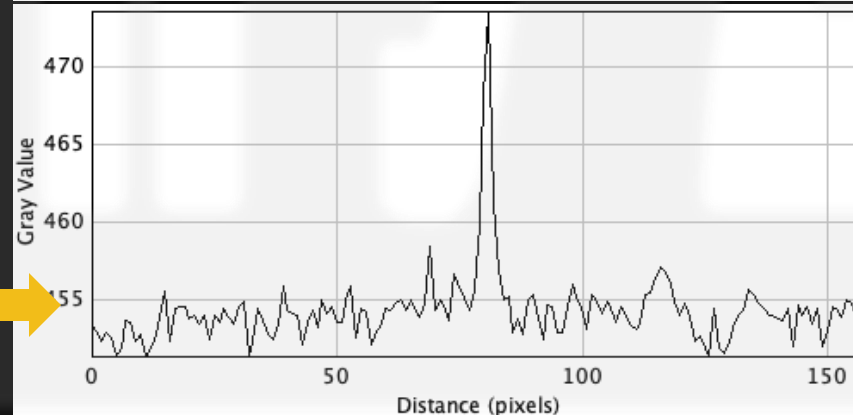
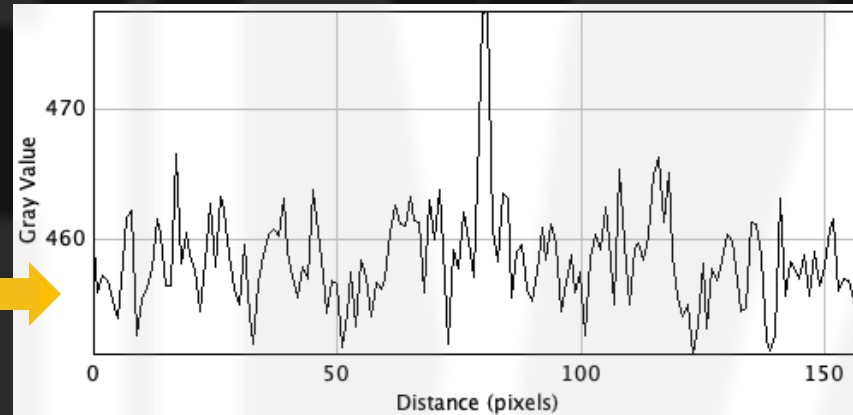
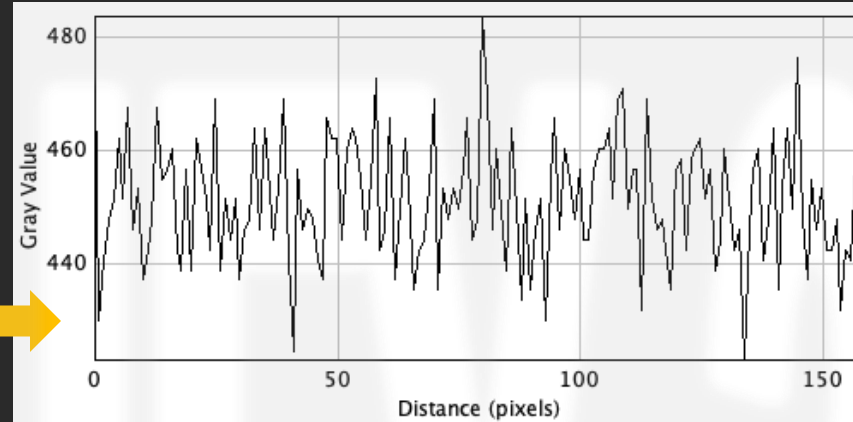
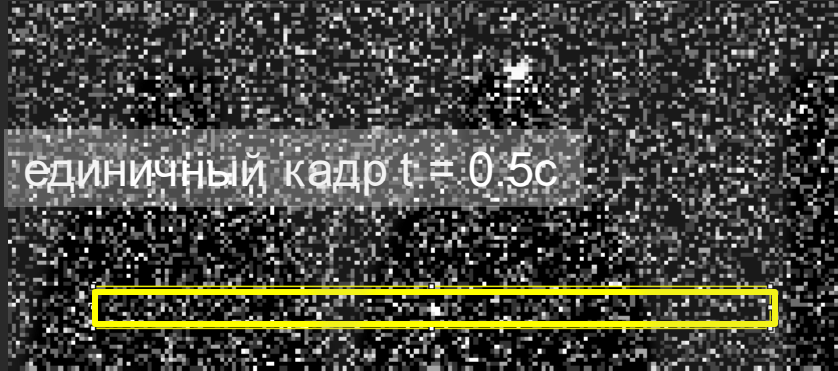


Темновой ток



В современных фотокамерах предусмотрена система охлаждения CCD матрицы. В камерах любительского уровня — на основе элементов Пельтье, в профессиональных обсерваториях — до криогенных температур с помощью жидкого азота или гелия.

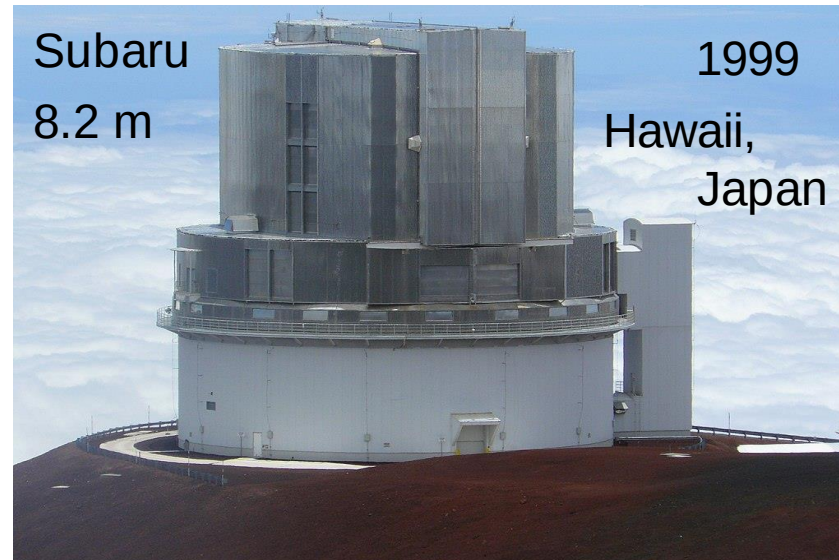
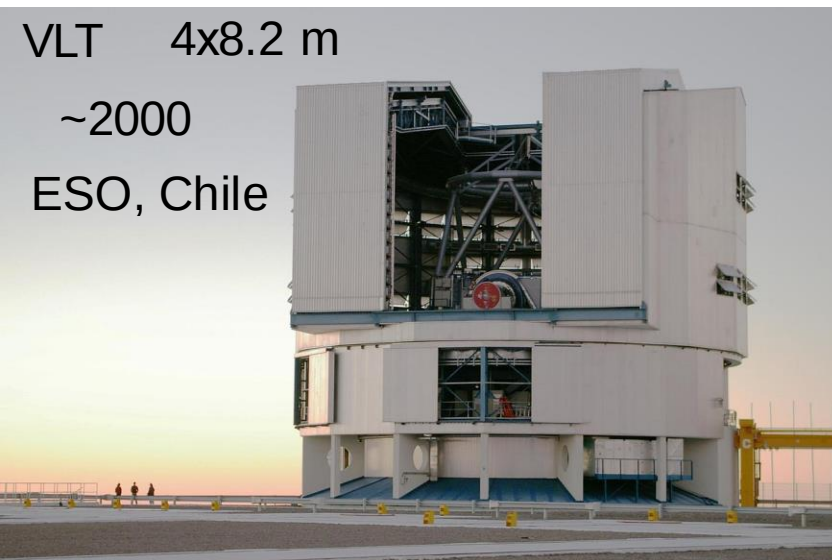
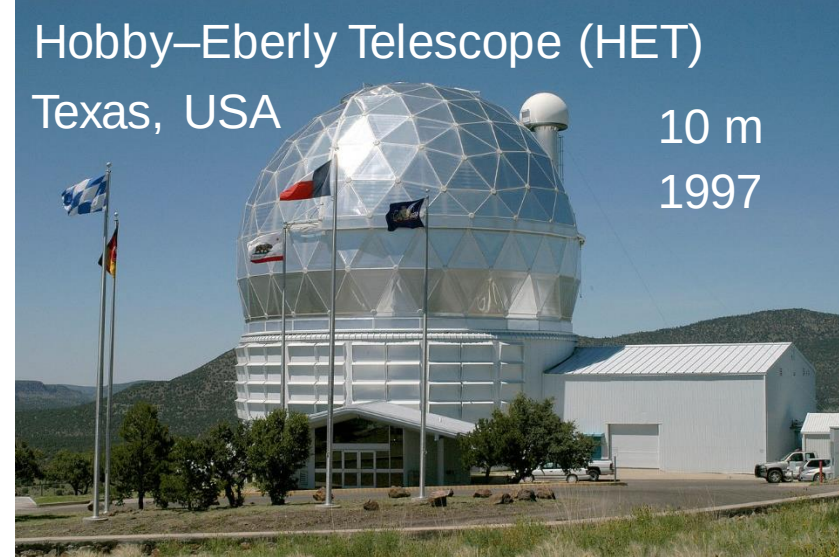
Засветка неба, шумы



Для регистрации предельно слабых объектов необходимо отделить его сигнал от шума, который в том или ином виде присутствует всегда.

Когда другие возможности снижения уровня шума исчерпаны (охлаждение камеры, снижение естественной засветки неба), дополнительного эффекта можно достигнуть статистическими методами.

Современные телескопы

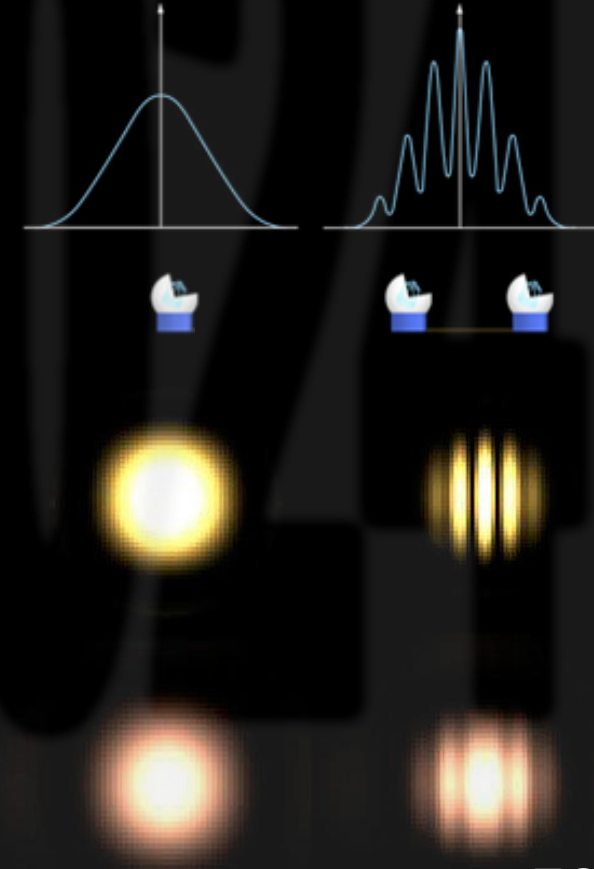
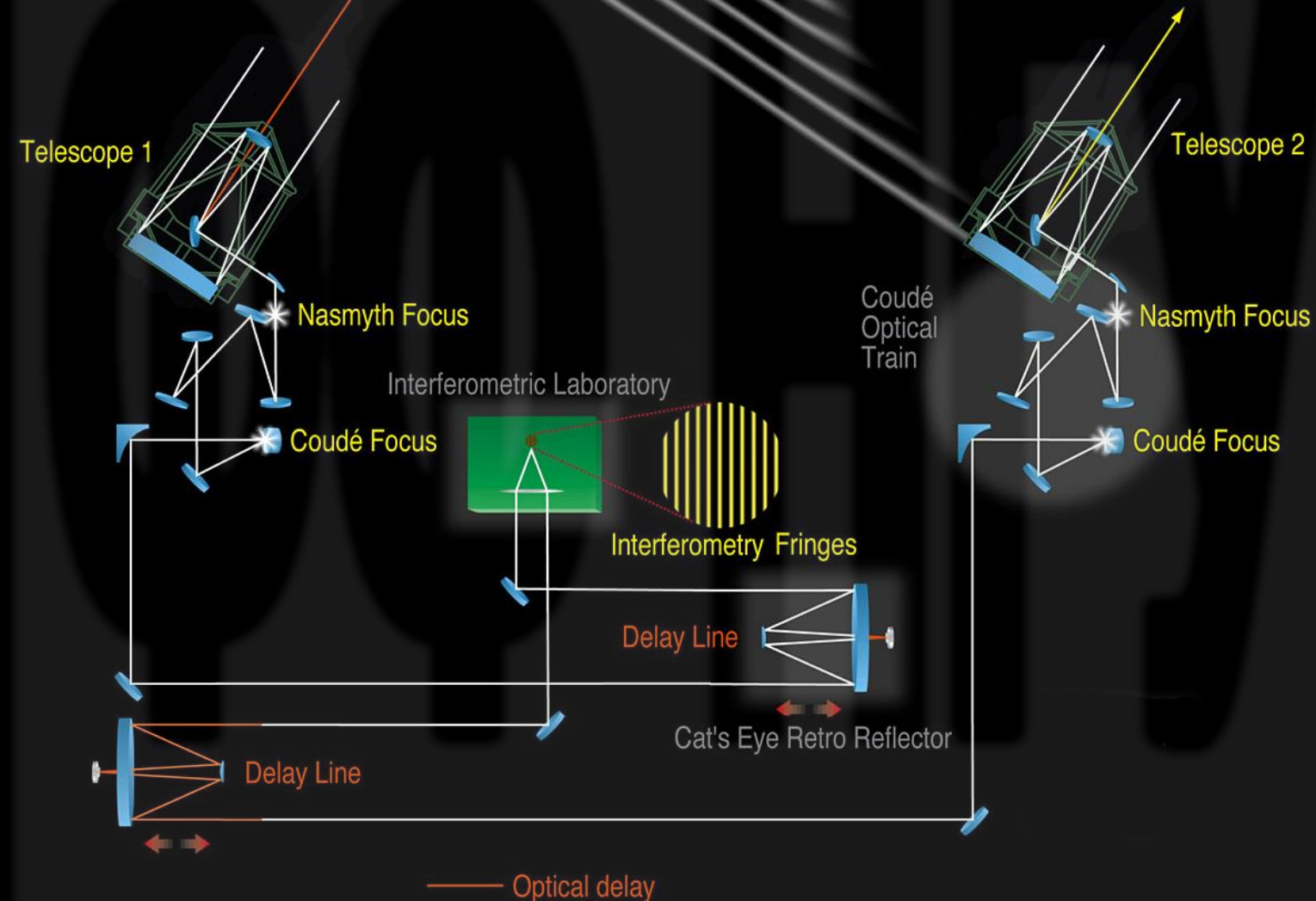


Оптическая интерферометрия

- При работе в режиме интерферометра, эффективный диаметр D зеркала в формуле для разрешающей способности

$$\delta\theta \simeq 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

равен расстоянию между телескопами!



Интерферометр VLT



Name	E (m)	N (m)	On-ground baseline length (m)
UT1-UT2	24.8	50.8	56.5
UT1-UT3	54.8	86.5	102.4
UT1-UT4	113.2	64.3	130.2
UT2-UT3	30	35.7	46.6
UT2-UT4	88.3	13.5	89.3
UT3-UT4	58.3	-22.2	62.4

VLT может наблюдать в видимом и ближнем ИК диапазонах.

Вычислительный пример

Оценить, на каком расстоянии интерферометр VLT с базой 100 м способен разрешить диск звезды сверхгиганта типа Бетельгейзе ($R = 760 R_{\odot}$) на длине волны 1000 нм.

С расстояния в один парсек угловой размер диска Бетельгейзе был бы равен:

$$\theta = \frac{2R[\text{а. е.}]}{d[\text{пс}]} \simeq \frac{1.4 \times 10^6 \times 760}{1 \times 150 \times 10^6} \simeq 6.6''$$

При наблюдениях на длине волны 1000 нм, предельное разрешение VLT равно :

$$\delta\theta \simeq 1.22 \frac{\lambda}{D} \simeq 1.22 \frac{10^{-6}}{100} = 0.0025''$$

Принимая, что для надежного разрешения угловой размер объекта должен примерно в три раза превышать предельное разрешение прибора:

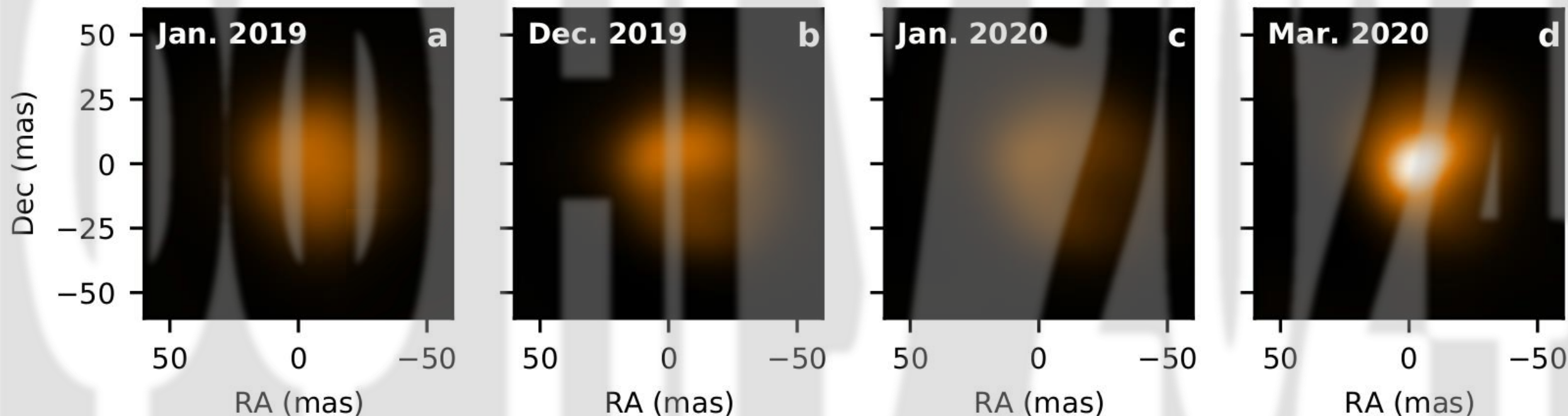
$$d_{\max} \sim \frac{\theta}{3\delta\theta} \simeq \frac{6.6''}{3 \times 0.0025} \simeq 900 \text{ пк}$$

Расстояние до Бетельгейзе около 170 пк, значит VLT может не только различить диск звезды, но и крупные детали на ее поверхности!

Вычислительный пример

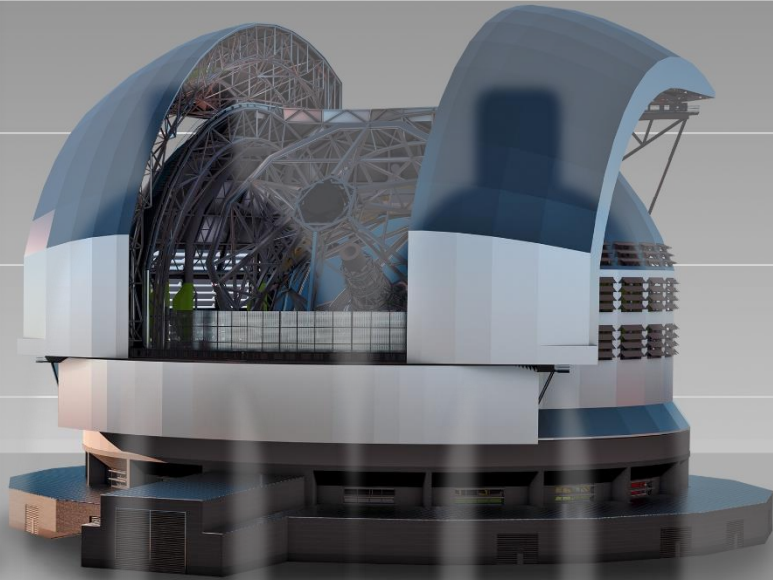
Размер самого диска при этом будет

$$\theta \simeq \frac{7}{170} \simeq 0.040''$$



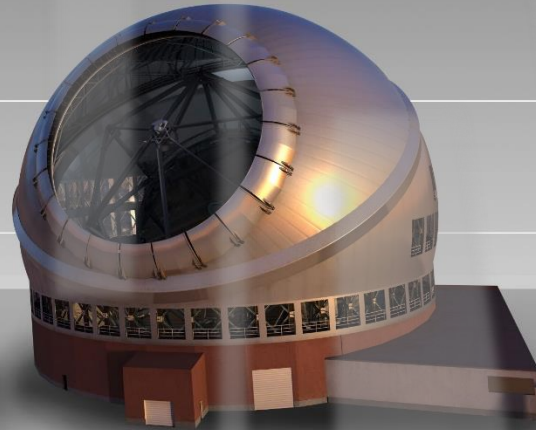
В 2019-2020 годах наблюдалось существенное (почти на одну звездную величину) снижение яркости Бетельгейзе (the great dimming). По наблюдениям VLT и других инструментов, на поверхности звезды (возможно) образовалось огромное пятно или часть диска закрыл выброс вещества звезды.

Строящиеся телескопы



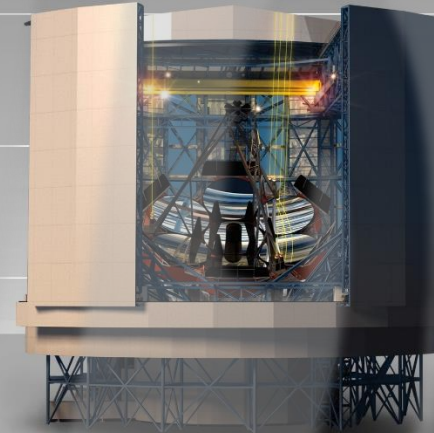
Extremely Large Telescope

39.3 m, Chile, 2025



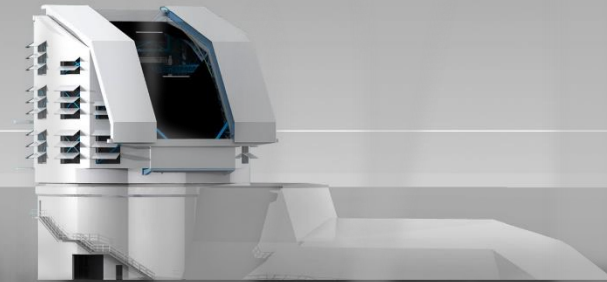
Thirty Meter Telescope

30 m, ????



Giant Magellan Telescope

25.4 m, Chile, ~2030



Large Synoptic Survey Telescope

8.4 m, Chile, 2025

100 m

80 m

60 m

40 m

20 m



Very Large Telescope

Extremely Large Telescope

Keck Telescope

Thirty Meter Telescope

Gran Telescopio
Canarias

Subaru Telescope

South African
Large Telescope

New Technology
Telescope

Giant Magellan Telescope

Large Synoptic Survey Telescope

Large Synoptic Survey Telescope (Vera Rubin Observatory)



$$\frac{D}{F} \simeq \frac{8.4}{10.3} \simeq 1/1.23$$

3.2 Гп CCD камера (FOV = 10 кв.град.) при температуре -100°C.

Экспозиция 15 секунд каждые 20 секунд => полный обзор доступной части неба за 3-4 ночи до 24.5 звездной величины и до 27.8 при сложении изображений.

