

# Инструменты в приближениях геометрической и волновой оптики

Емельянов Эдуард Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
Лаборатория обеспечения наблюдений

7 апреля 2022 года



## 1 Телескоп как концентратор энергии

- Зеркало
- Линза

## 2 Формирование изображений линзами и зеркалами

- Параксиальная оптика
- Волновая оптика

## 3 Телескопы

- Рефракторы
- Рефлекторы

## 4 Аберрации

- Измерение aberrаций

## 5 Основные характеристики телескопов

## 6 Монтировка телескопа

## 7 Сходства и различия оптических и радиотелескопов

## 8 Границы возможностей наземных инструментов

## 9 Компенсация влияния атмосферы

## 10 Космические телескопы

# Телескоп как концентратор энергии. Зеркало

## Архимед

«Гиперболоид» (212 в до н.э.) — попытка сжечь осадивший римский флот под Сиракузами во время 2 пунической войны (218–201 гг до н.э.).



# Телескоп как концентратор энергии. Зеркало

## Архимед

«Гиперболоид» (212 в до н.э.) — попытка сжечь осадивший римский флот под Сиракузами во время 2 пунической войны (218–201 гг до н.э.).



# Телескоп как концентратор энергии. Зеркало

Зажжение олимпийского огня. Игры — раньше 776 г. до н.э. (до 394 г. н.э., возобновлены в 1896 г.)!



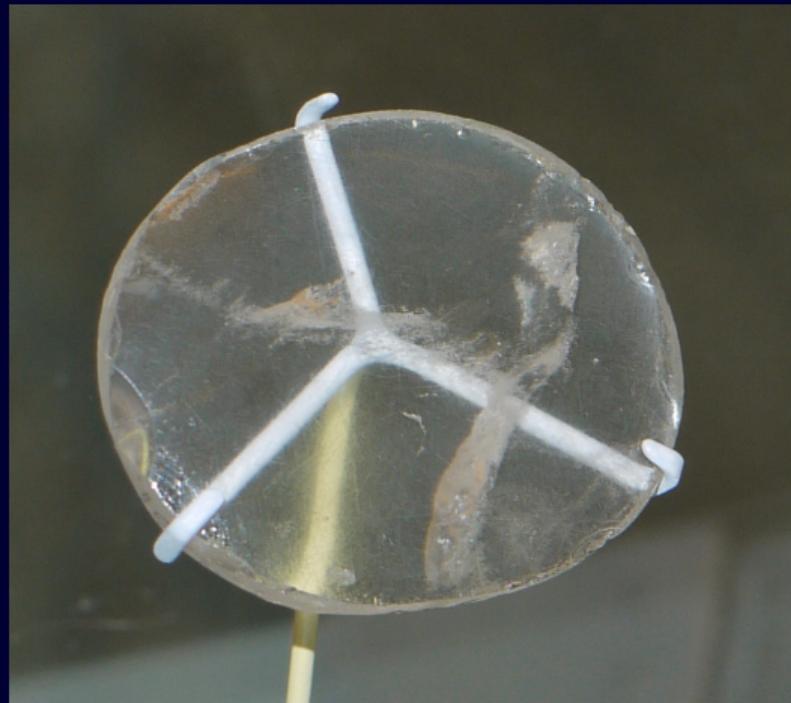
# Телескоп как концентратор энергии. Линза

**Линза** — от лат. «lens» — чечевица.

Пьеса Аристофана «Облака» (424 г. до н.э.) — добыча огня.

Древний Рим. Плиний старший (23–79 гг. н.э.) — добыча огня, коррекция зрения (император Нерон, вогнутый изумруд).

Альхазен (965–1038 гг. н.э.) — трактат по оптике, формирование изображения глазом.  
1280-е годы, Италия (Сальвино д'Армате) — очки.



Линза Нимруда (750–710 гг. до н.э.). Нимруд — одна из древних столиц Ассирии.

# Световая энергетика

Слюсарев Г.Г. О возможном и невозможном в оптике (1-е изд. 1944, 2-е изд. 1957).  
Степанов Б.И. Введение в современную оптику..., 1989.

Максимальный поток от Солнца:  $2 \text{ кал}/(\text{мин}\cdot\text{см}^2)$  ( $0.14 \text{ Вт}$ )  $\Rightarrow$  АЧТ нагреется не выше  $120^\circ\text{C}$  ( $0.16 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ). Воспламенение древесины —  $500 \div 700^\circ\text{C}$  ( $2 \div 5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ). **Альбедо!**  $\Rightarrow$   $20 \div 40$  раз выше освещенности от Солнца (и десятки минут)! Мгновенное воспламенение — сотни ватт!

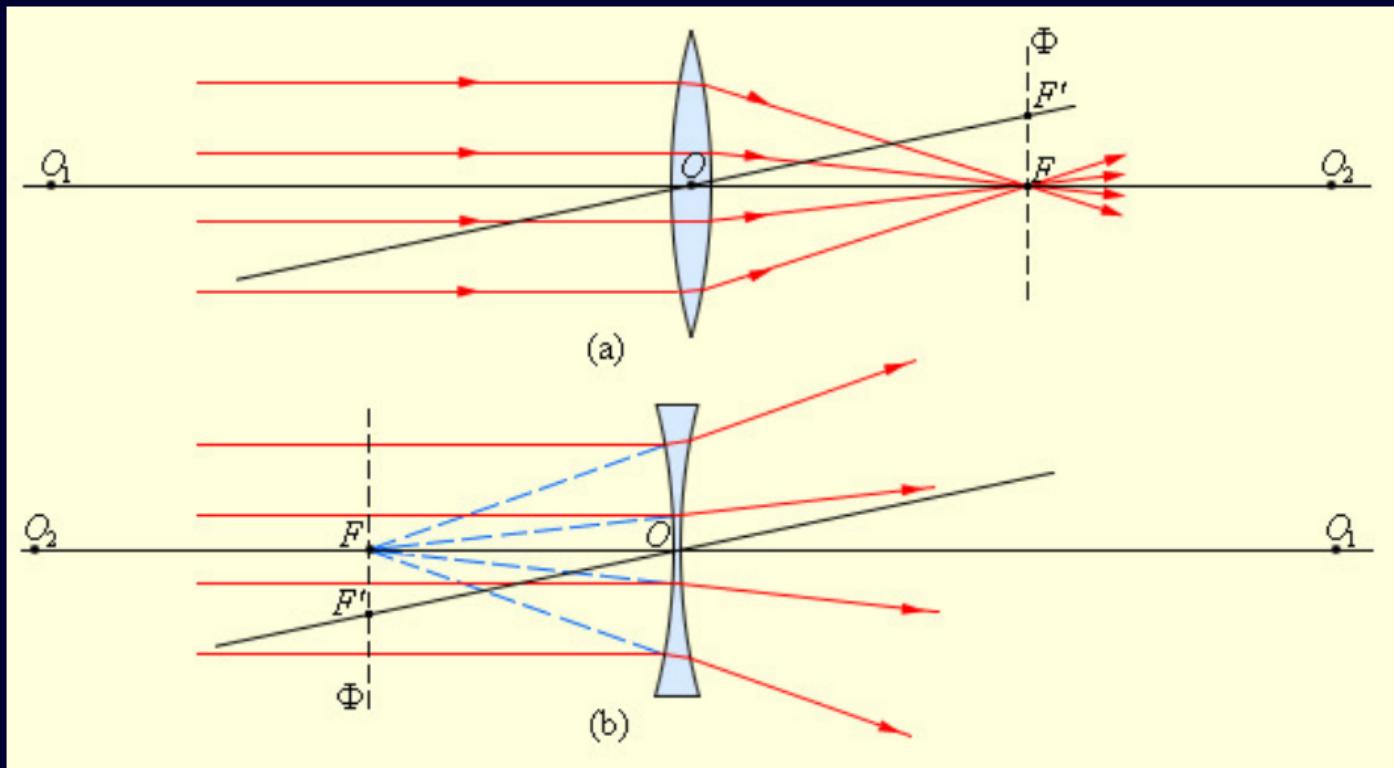
Диаметр изображения Солнца  $d = F/127 \Rightarrow$  выигрыш в освещенности:  $\frac{E}{E_0} = \left(\frac{127 \cdot D}{F}\right)^2 \Rightarrow$  светосила для  $100 \text{ Вт}/\text{см}^2$ :  $D/F \geqslant 1/5$ , т.е. диаметр «зеркала» лишь в 5 раз меньше расстояния! 3000 «зайчиков» в одну точку! Но альбено белой краски до 80%!!!

1747, фр. натуралист Бюффон построил зажигательный прибор из 168 зеркал  $15 \times 20 \text{ см}$  (с индивидуальными оправами). За несколько минут на расстоянии 47 м загорелась смолистая доска (почти АЧТ).  $E/E_0 = 36$ .

«Знамя-2» + «Новый свет», 4 февраля 1993. Парус диаметром 20 м (сектора). Диаметр пятна 8 км, освещенность сравнима с полной Луной.

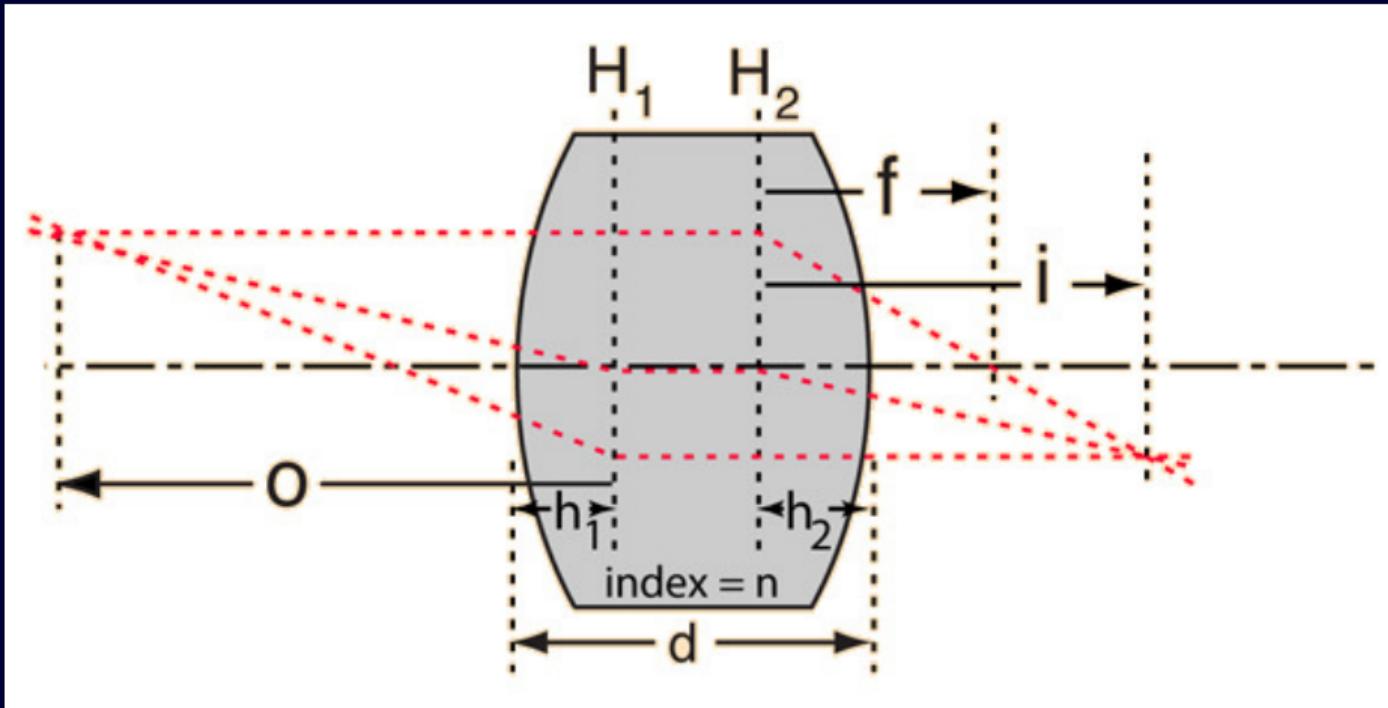
# Ход лучей в линзе

Идеальная (тонкая) линза. (О параксиальной оптике – позже).



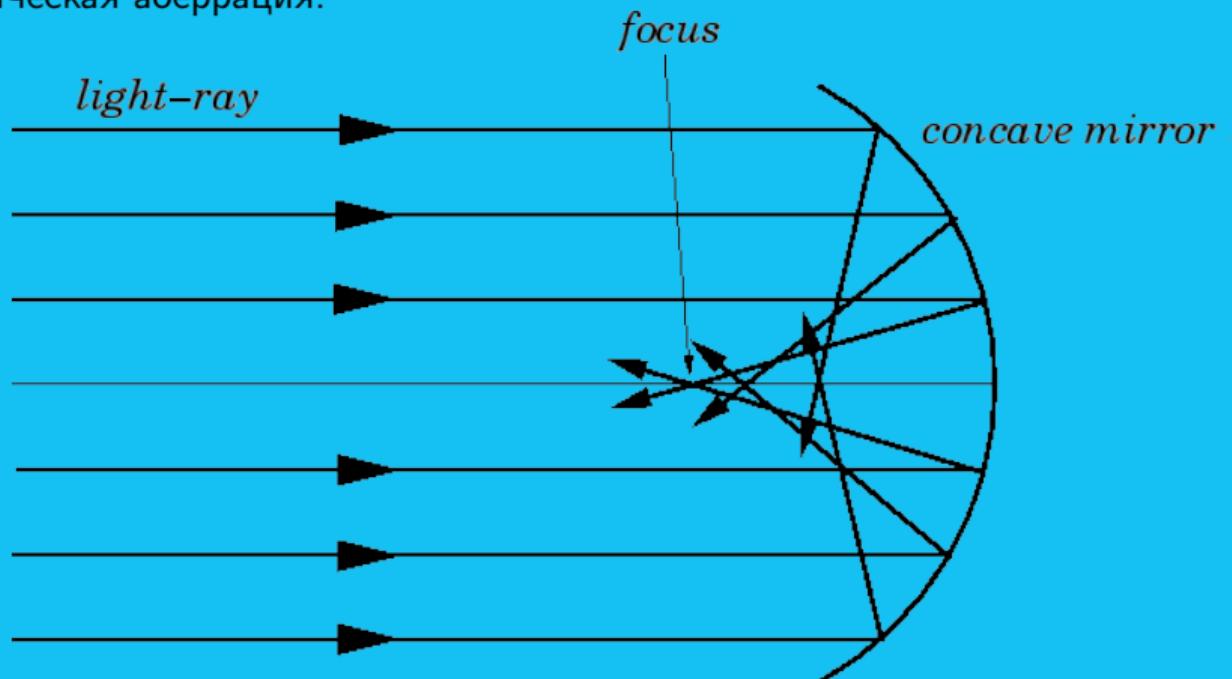
# Ход лучей в линзе

Толстая линза, главные плоскости и точки.



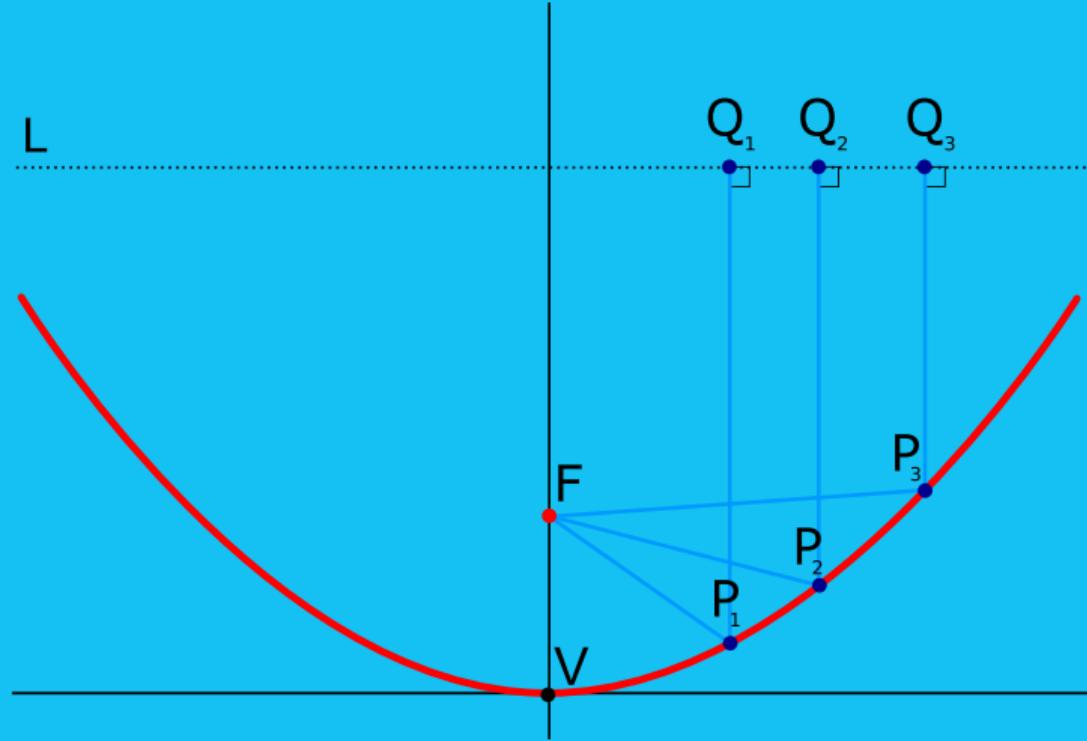
# Конические сечения

Сфера. Сферическая aberrация.



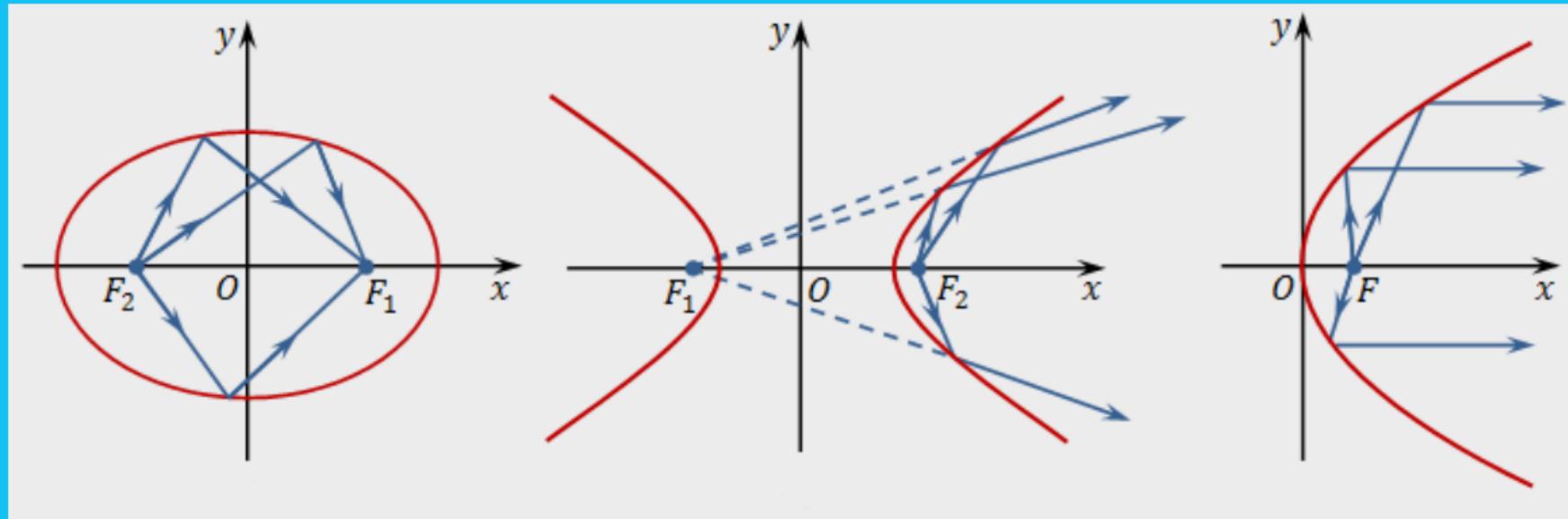
# Конические сечения

Парабола.



# Конические сечения

Эллипс, гипербола, парабола.



# Принцип Гюйгенса–Френеля

Каждый элемент волнового фронта можно рассматривать как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн.

Густав Кирхгоф придал принципу Гюйгенса строгий математический вид, показав, что его можно считать приближенной формой теоремы, называемой интегральной теоремой Кирхгофа.

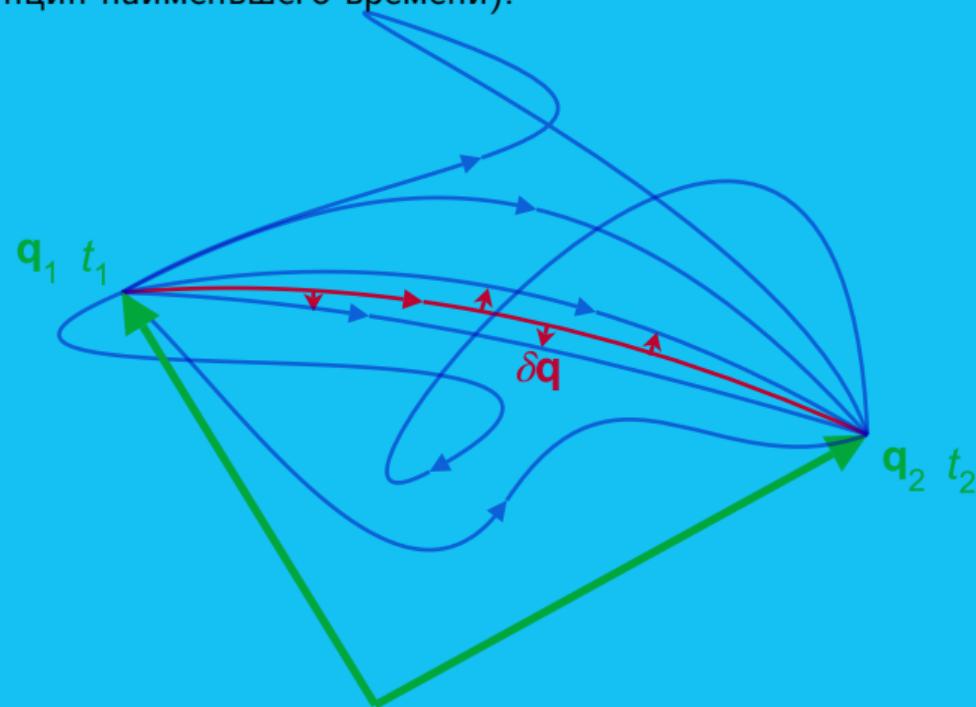
Фронтом волны точечного источника в однородном изотропном пространстве является сфера.

Амплитуда возмущения во всех точках сферического фронта волны, распространяющейся от точечного источника, одинакова.

Дальнейшим обобщением и развитием принципа Гюйгенса является формулировка через интегралы по траекториям, служащая основой современной квантовой механики. Принцип Ферма — наименьшее время распространения. Принцип наименьшего действия Гамильтона.

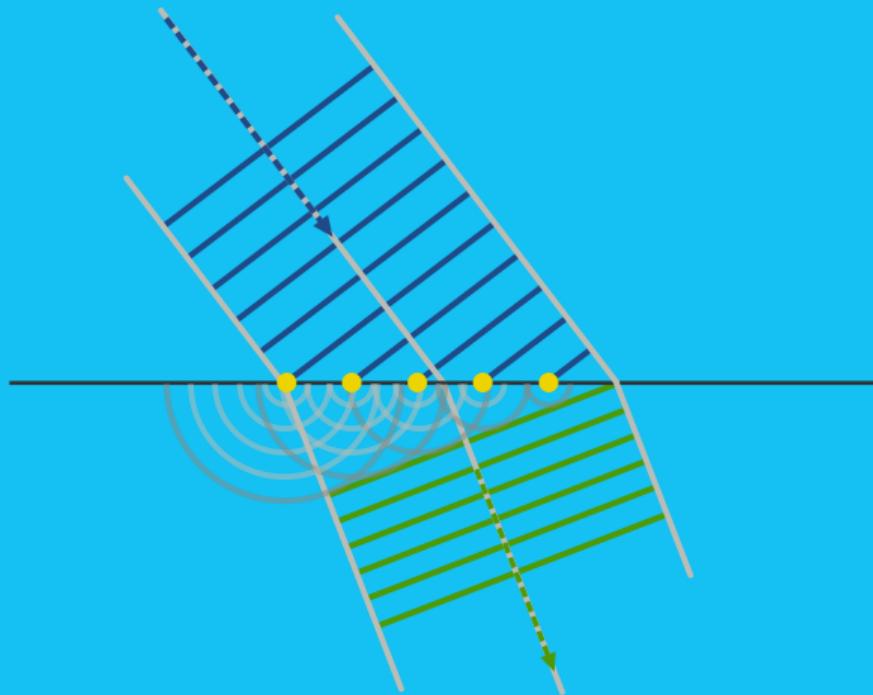
# Принцип Гюйгенса–Френеля

Принцип Ферма (принцип наименьшего времени).



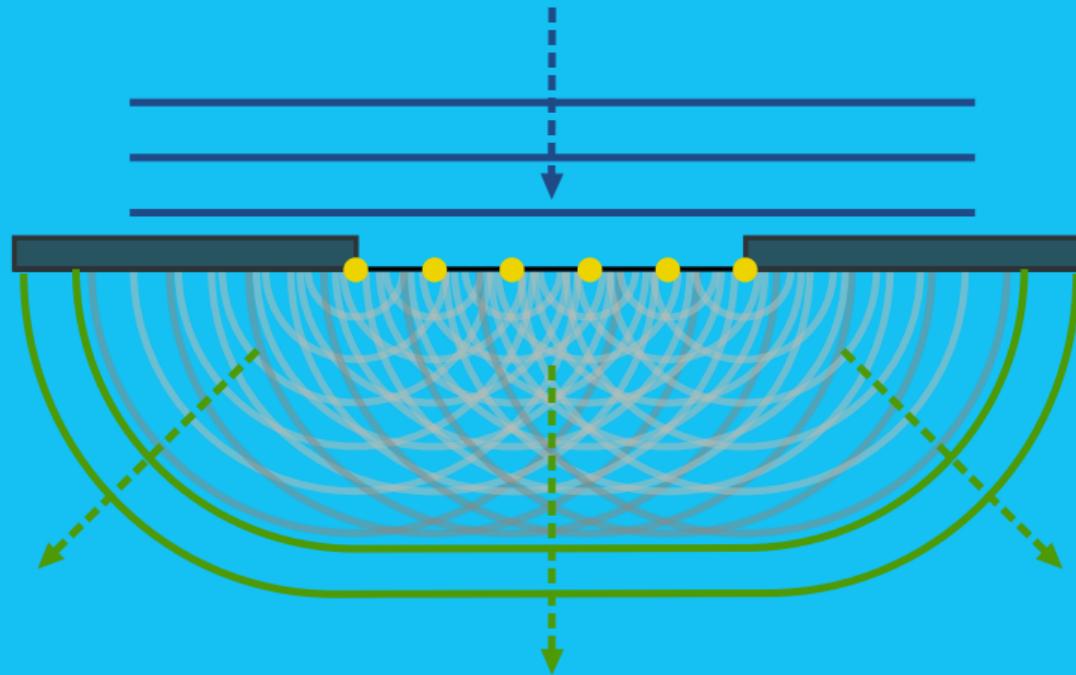
# Принцип Гюйгенса–Френеля

Рефракция — изменение направления движения. (Рота солдат, мяч).



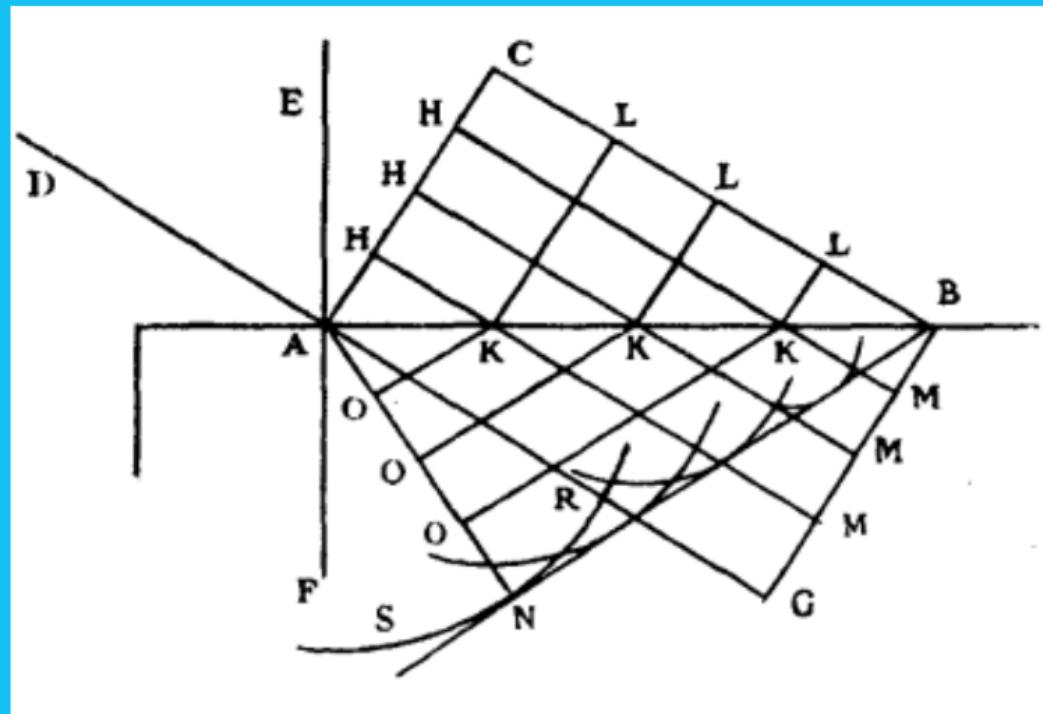
# Принцип Гюйгенса–Френеля

Дифракция на щели: каждая точка — источник вторичных волн.



# Принцип Гюйгенса–Френеля

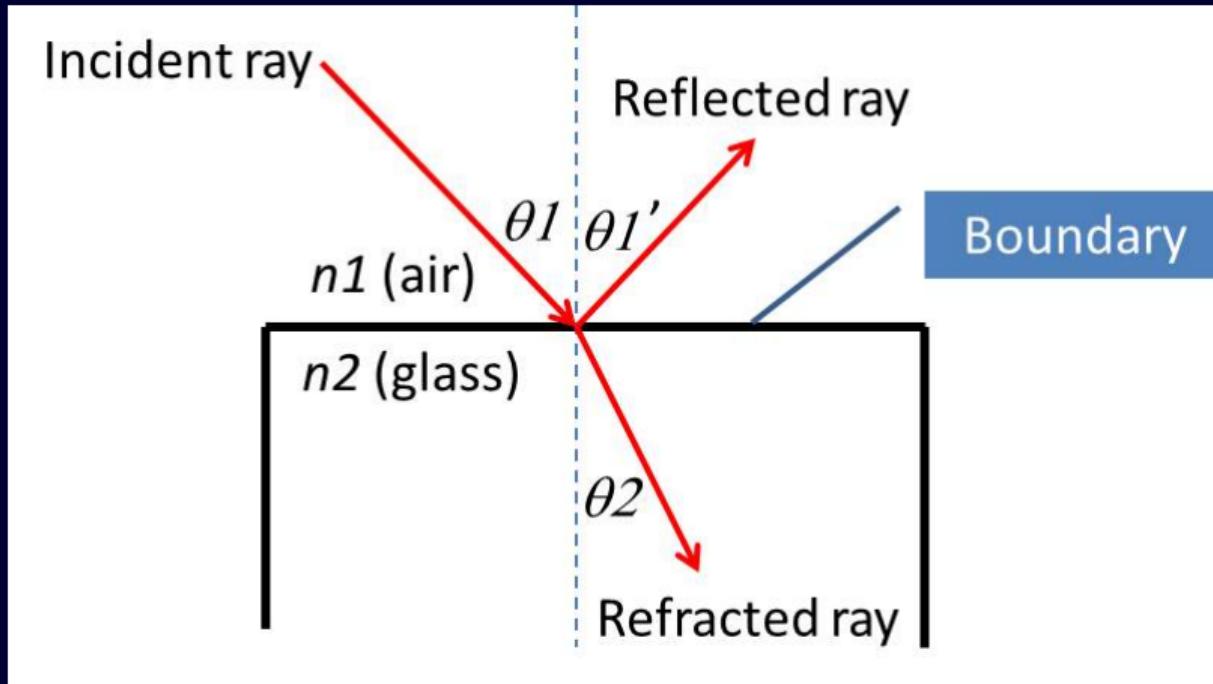
Оптическая разность хода. Огибающая формирует волновой фронт.



# Закон Снеллиуса

Виллеборд Снелль (голл), начало XVII века:

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}$$



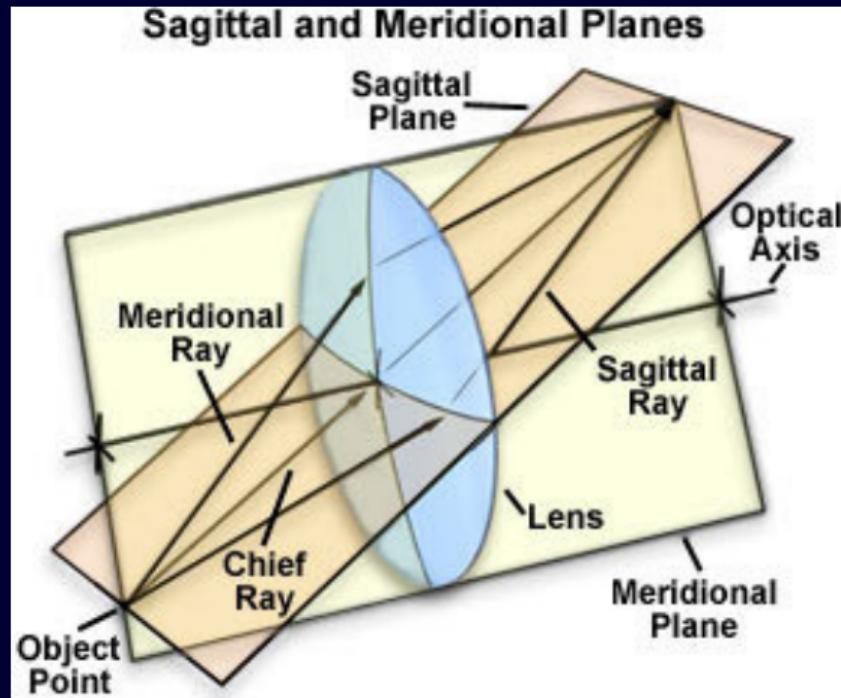
# Параксиальная (гауссова) оптика

**Параксиальное приближение** в геометрической оптике — рассмотрение только лучей, идущих под малыми углами к главной оптической оси.

$$\sin \theta \approx \theta, \operatorname{tg} \theta \approx \theta \text{ и } \cos \theta \approx 1.$$

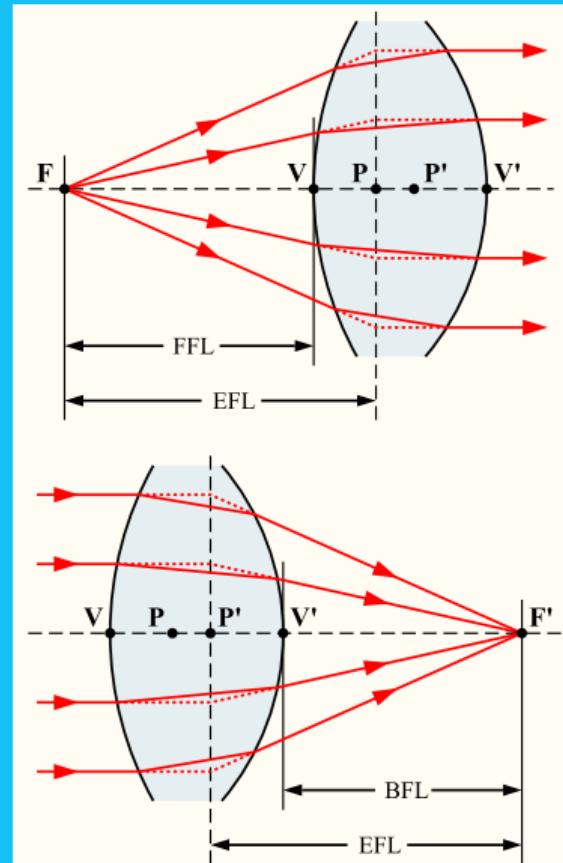
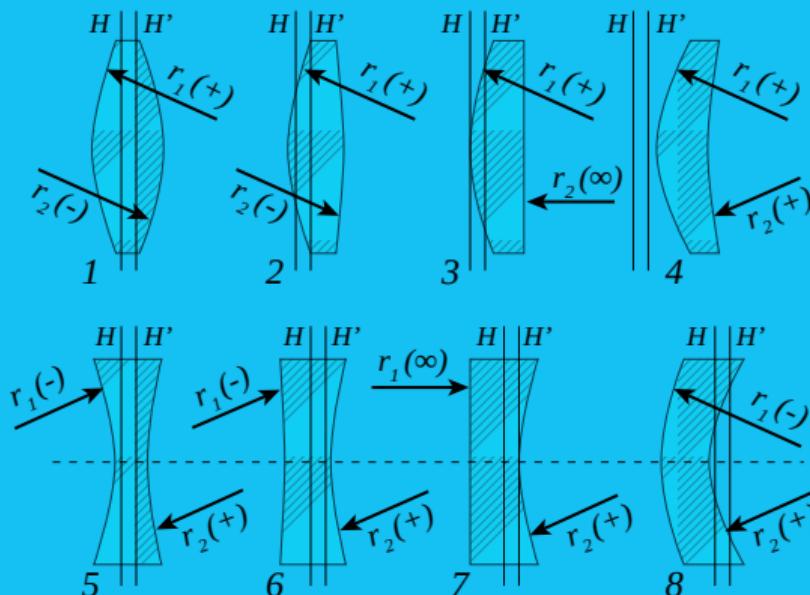
Приближение второго порядка (ряд Тейлора):  $\cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$ . Ошибка не более 0.5% вплоть до  $\theta = 10^\circ$ .

Для больших углов приходится различать меридиональные (плоскость «основной луч+оптическая ось») и сагиттальные лучи.



# Главные плоскости и кардинальные точки

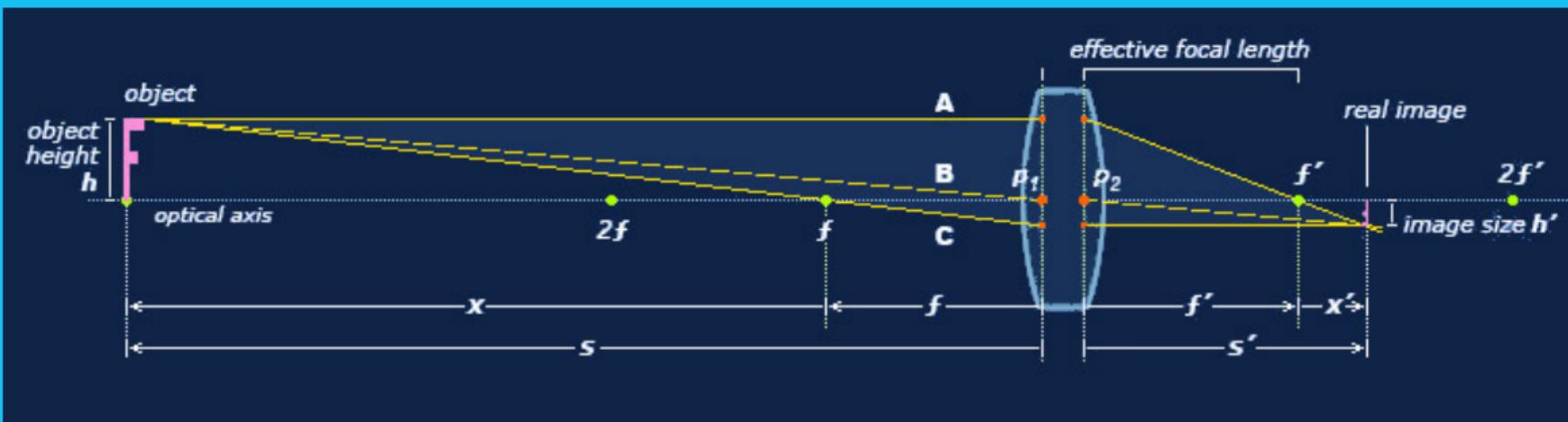
$F/F'$  – передняя и задняя фокальные точки;  $P/P'$  – передняя и задняя главные точки;  $V/V'$  – передний и задний края поверхности;  $H/H'$  – передняя и задняя главные плоскости.



# Главные плоскости и кардинальные точки

Построение изображений.

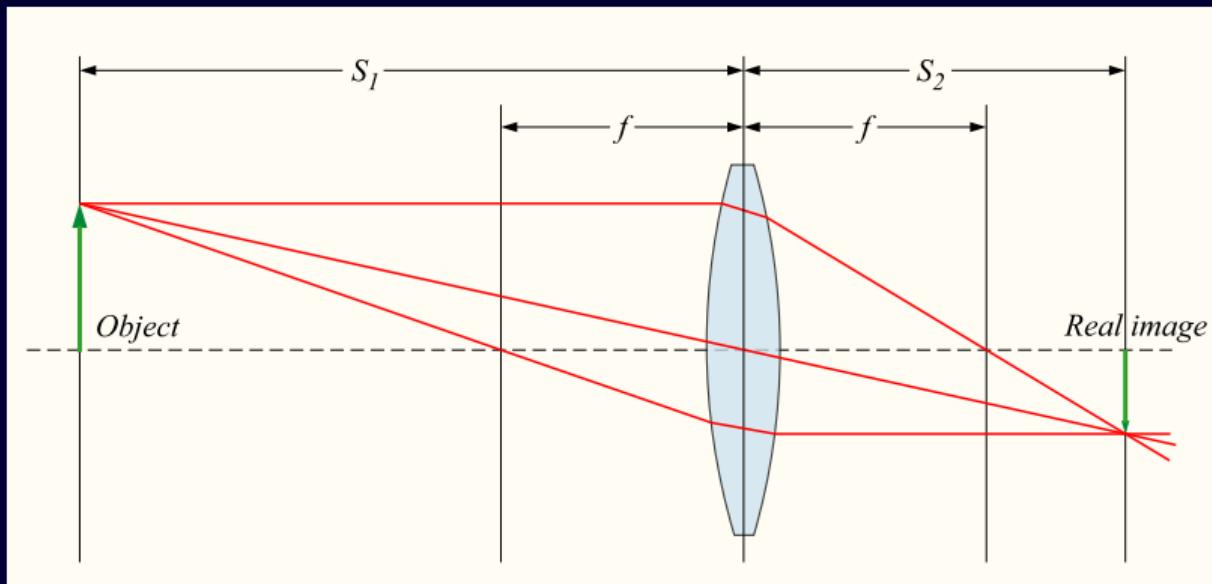
**Главная плоскость** — каждая из двух плоскостей, перпендикулярных оптической оси системы, изображающих одна в другой с линейным увеличением, равным единице. **Кардинальные точки** — две главные точки и две точки фокуса.



# Формула тонкой линзы $$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1 R_2} \right], \text{ в приближении тонкой линзы: } \frac{1}{f} \approx (n - 1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$ The diagram illustrates the optical properties of a thin lens. A vertical line represents the optical axis. A blue lens is positioned on the axis. Two parallel red light rays enter the lens from the left. One ray passes straight through the lens, while the other is refracted towards the lens's focal point. A dashed line extends from the focal point through the lens to the second ray. The distance between the lens and the focal point is labeled $f$ . The distance between the lens and the second ray is labeled $d$ . Labels include "Axis" for the central horizontal line, "Focal point" for the intersection of the dashed lines, and $R_1$ and $R_2$ indicating the radii of curvature of the lens surfaces. A small vertical line at the bottom is labeled "Телескопы". Емельянов Э.В. (САО РАН) 7 апреля 2022 года 12 / 49

# Формула тонкой линзы

$$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{1}{f}$$



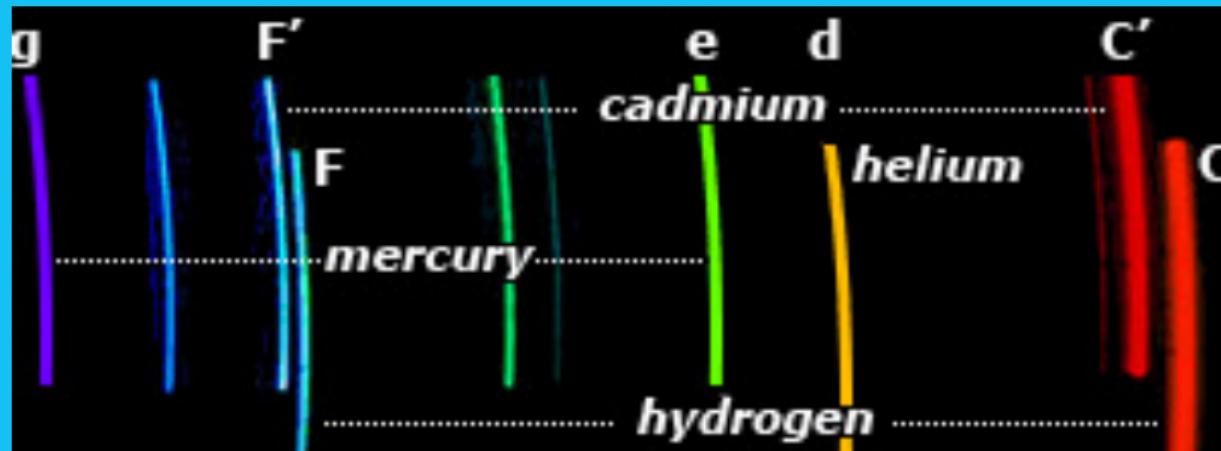
# Дисперсия

## Числа Аббе (по фраунгоферовым линиям)

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}, \quad V_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}$$

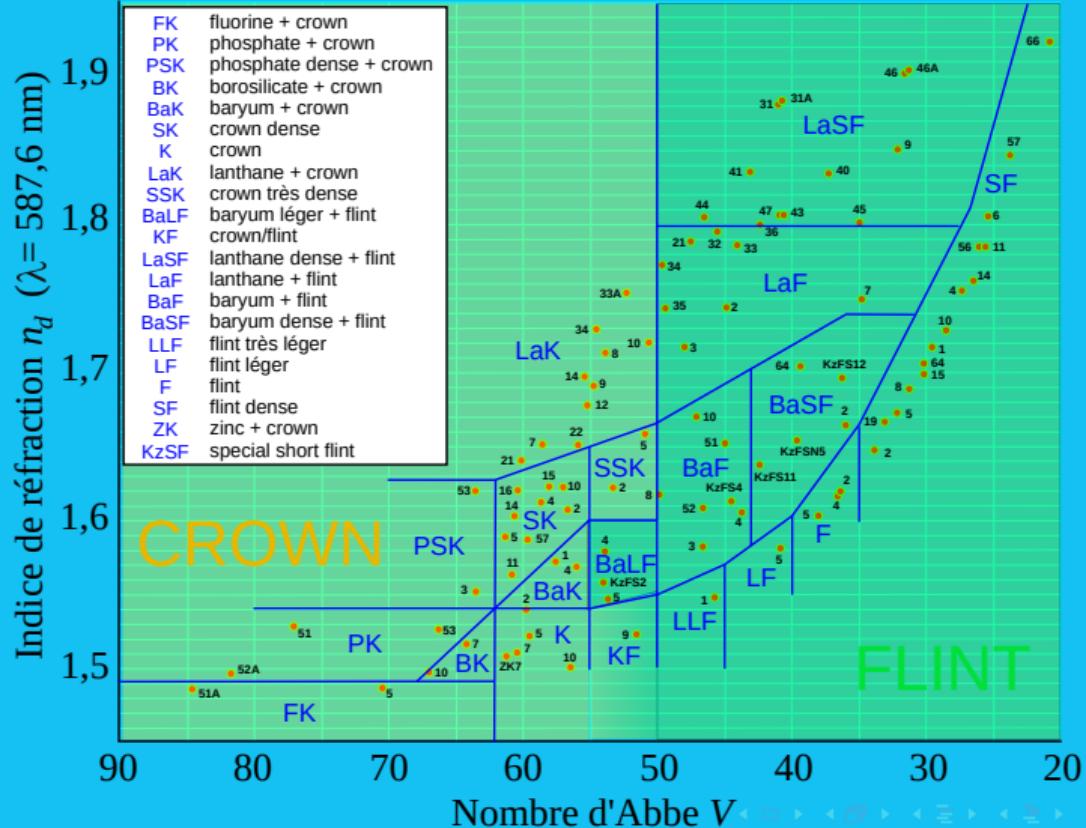
Показатель частной дисперсии ( $PgF$ ):  $PgF = \frac{n_g - n_F}{n_F - n_C}$ .

d (He) – 587.6 нм, F ( $H_\beta$ ) – 486.1 нм, C ( $H_\alpha$ ) – 656.3 нм, e (Hg) – 546.1 нм, F' (Cd) – 480.0 нм, C' (Cd) – 643.9 нм, g ( $H_\gamma$ ) – 435.8 нм.



# Дисперсия

Диаграмма Аббе



# Дисперсия



crown ( $n = 1.55$ ,  $V_d = 70$ )

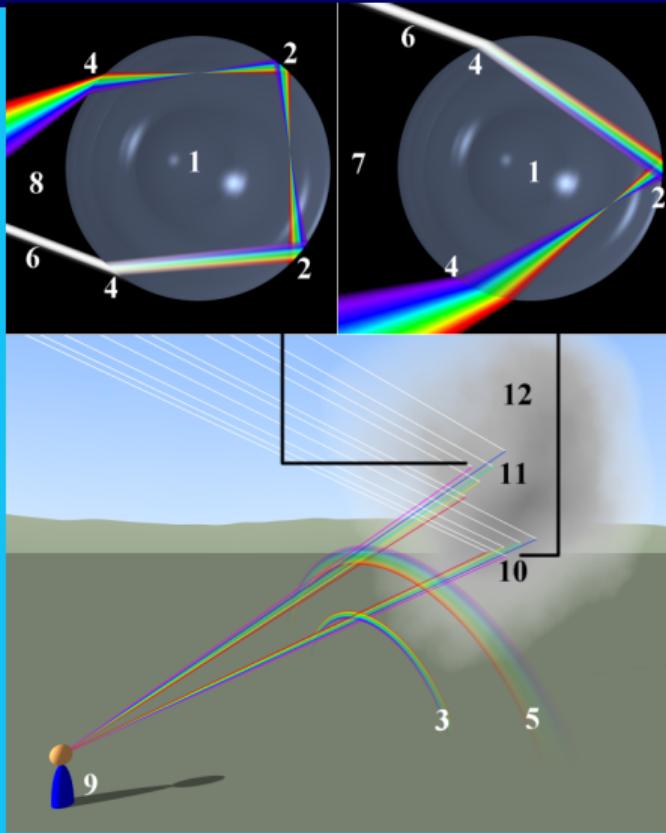


flint ( $n = 1.9$ ,  $V_d = 23$ )

# Дисперсия

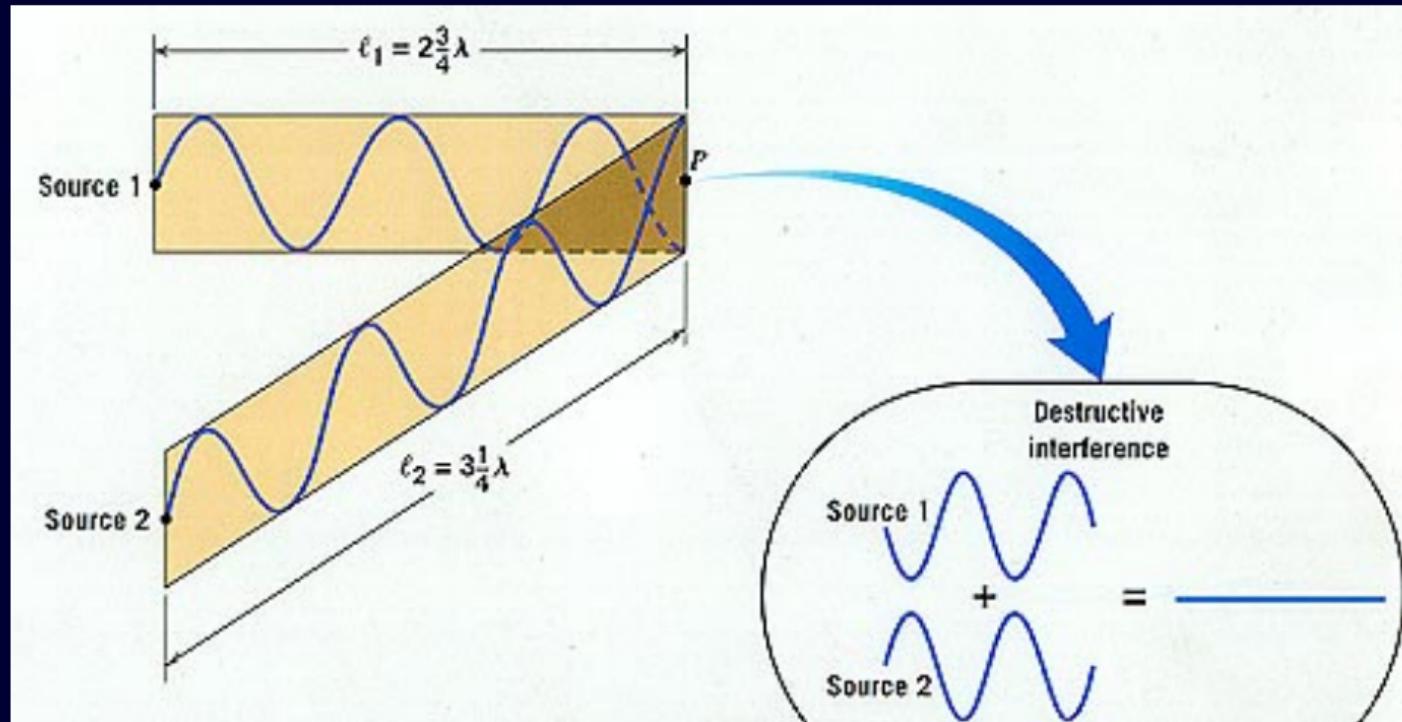
## Схема образования радуги

- 1) сферическая капля
  - 2) внутреннее отражение
  - 3) первичная радуга
  - 4) преломление
  - 5) вторичная радуга
  - 6) входящий луч света
  - 7) ход лучей при формировании первичной радуги
  - 8) ход лучей при формировании вторичной радуги
  - 9) наблюдатель
  - 10) область формирования первичной радуги
  - 11) область формирования вторичной радуги
  - 12) облако капелек



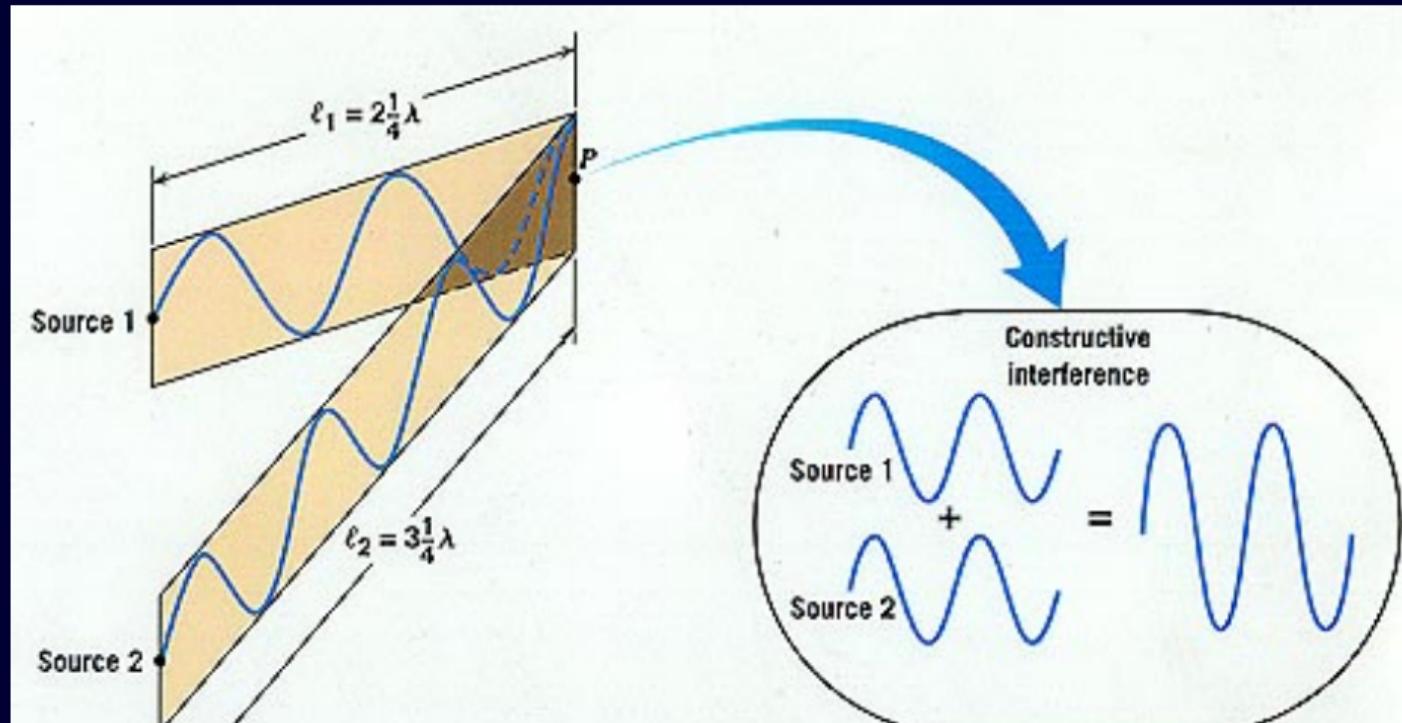
# Интерференция

Интерференция волн — взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга.



# Интерференция

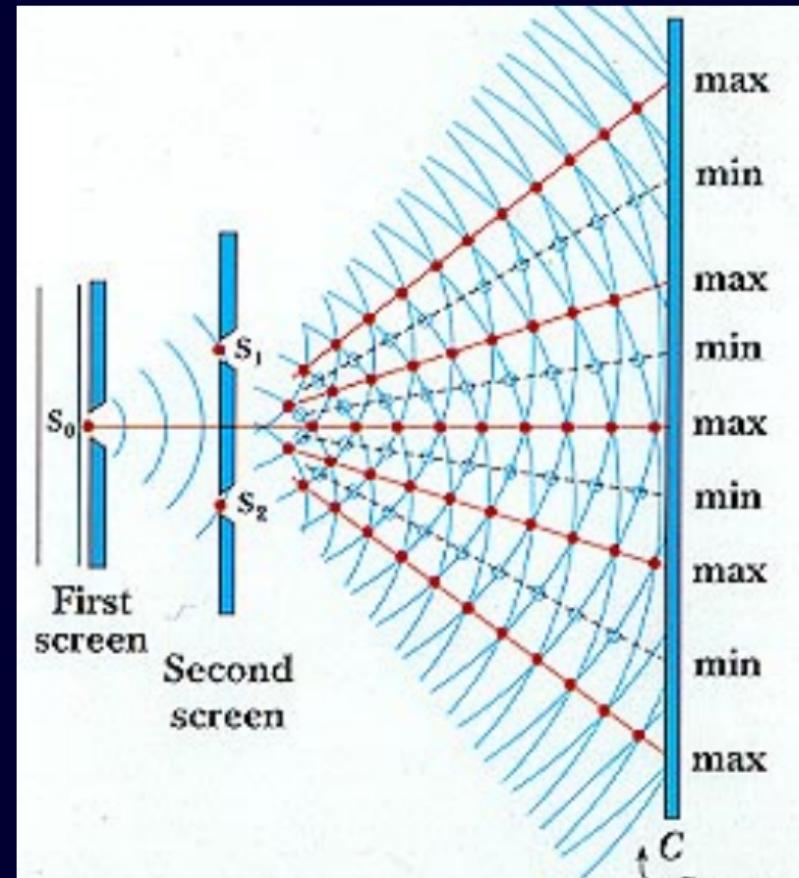
Интерференция волн — взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга.



# Интерференция

## Опыт Юнга

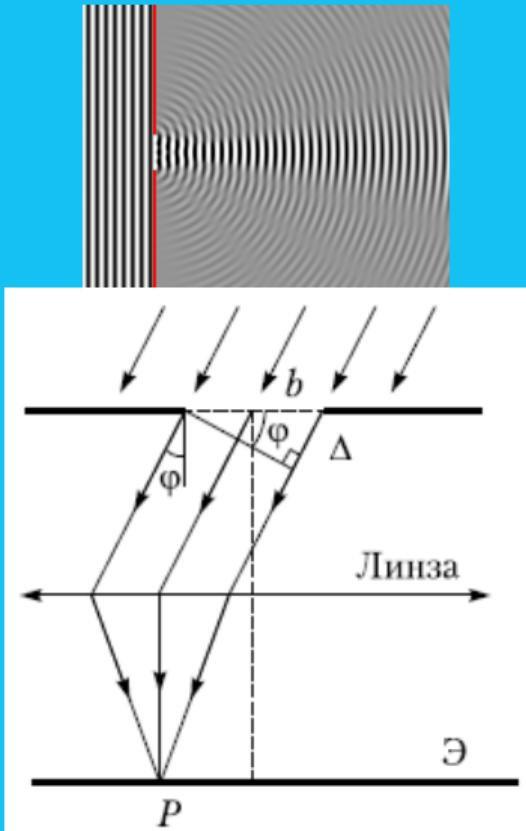
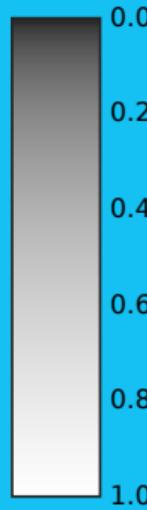
Томас Юнг, 1803. Ширина щелей приблизительно равна длине волны излучаемого света. Доказательство волновой природы света. Интерференционная картина возникает на экране, когда ширина прорезей близка к длине волны излучаемого монохроматического света. Если ширину прорезей увеличивать, то освещённость экрана будет возрастать, но контраст интерференционной картины будет падать вплоть до полного её исчезновения.



# Дифракция

**Дифракция** — явление, которое проявляется как отклонение от законов геометрической оптики при распространении волн.

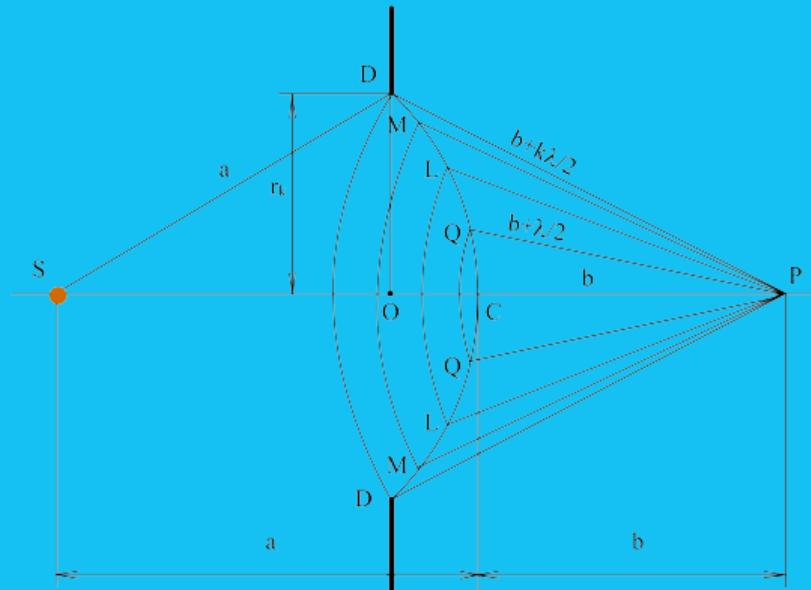
$b \sin \varphi = k\lambda$ . Диск Эйри:  $\sin \theta_{min1} \approx 1.22 \frac{\lambda}{d}$   
Формула Эйри:  $s'' = \frac{2.76}{a}$  (а в дюймах).



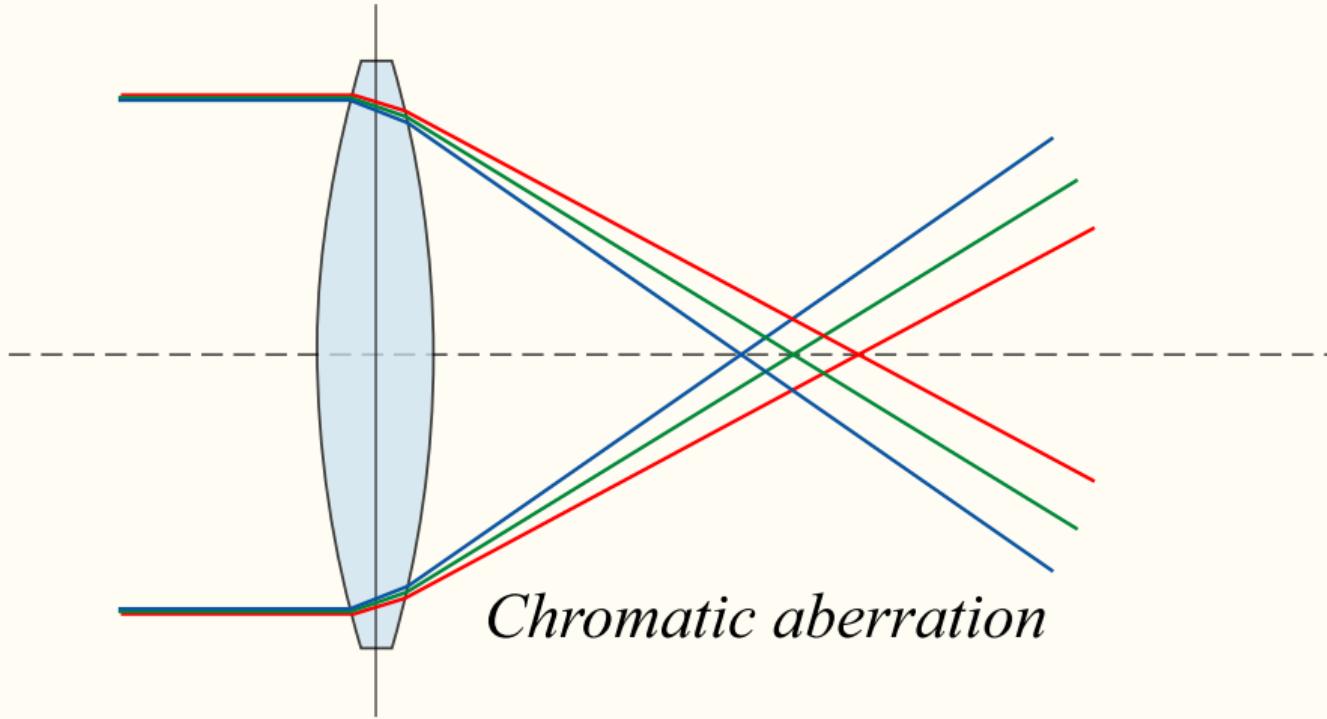
# Дифракция

Дифракция Фраунгофера (в дальней зоне):

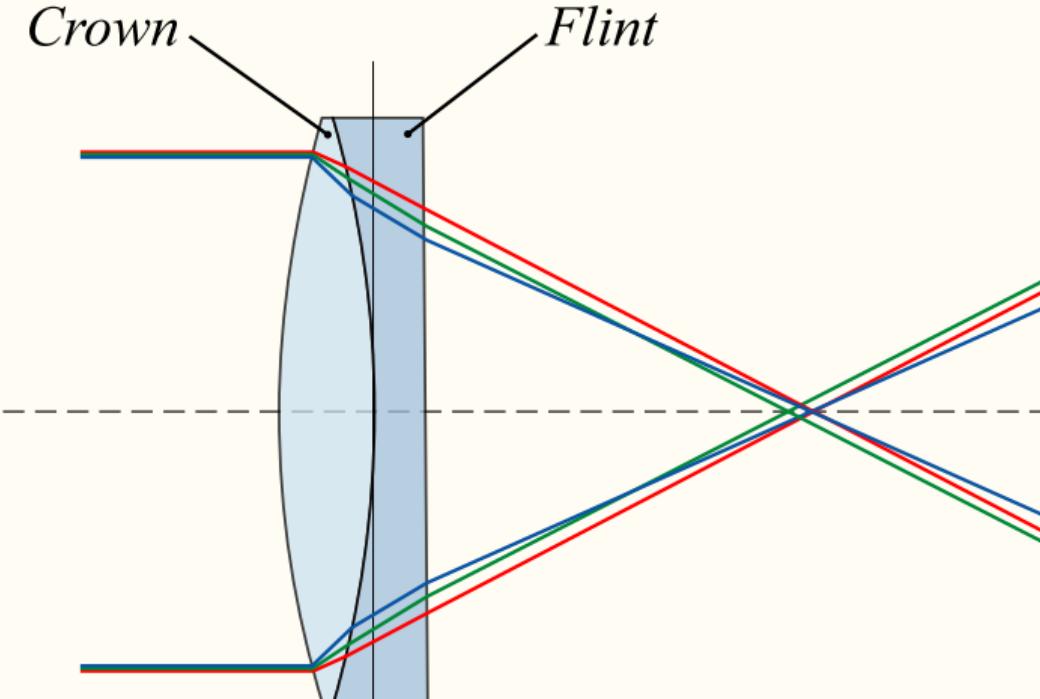
$\frac{W^2}{L\lambda} \ll 1$ ,  $W$  – ширина щели,  $L$  – расстояние.  $\Phi = \frac{W^2}{L\lambda}$  – число Френеля.  
Дифракция Френеля:  $\Phi > 1$ .



# Хроматическая аберрация



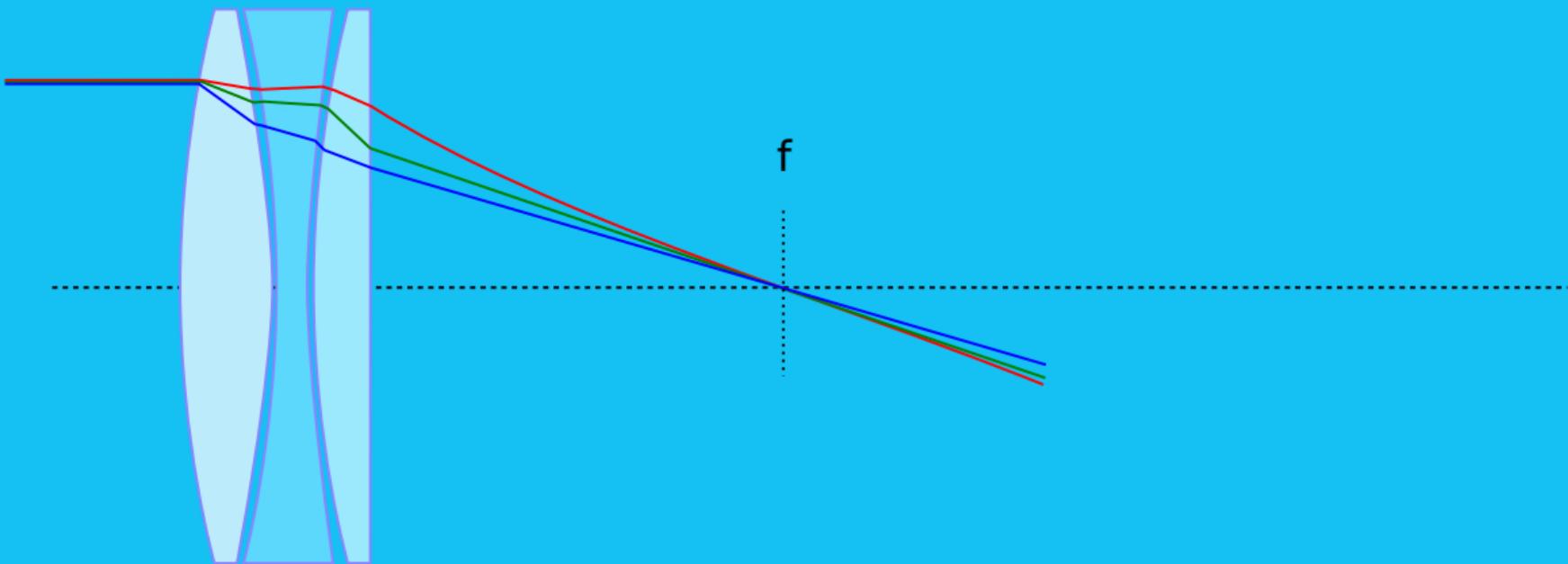
# Хроматическая аберрация



*Achromatic doublet*

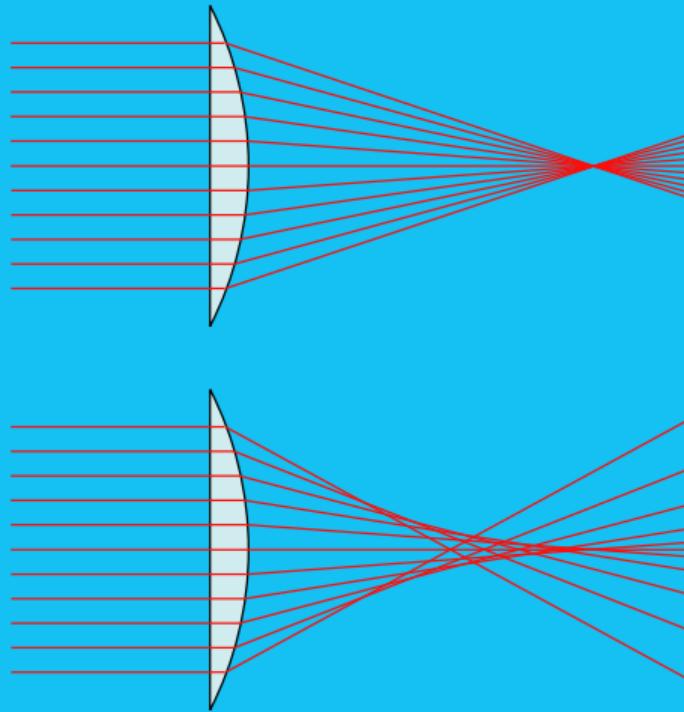
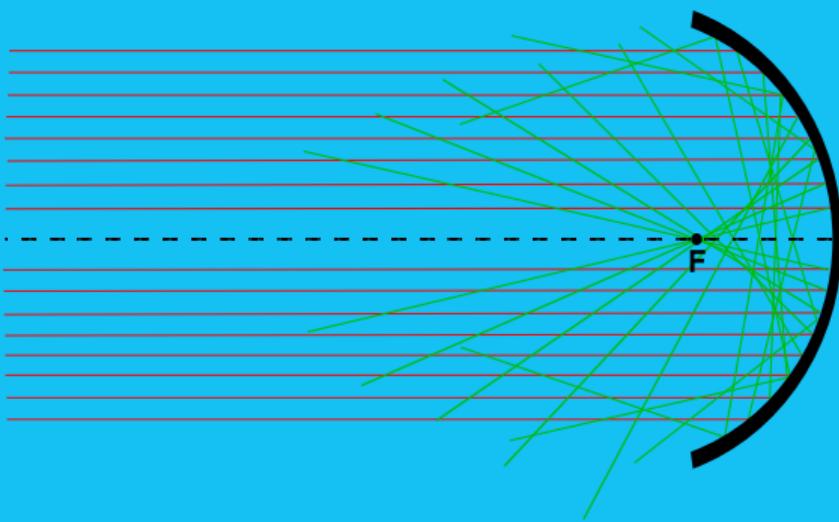
# Хроматическая аберрация

Апохромат



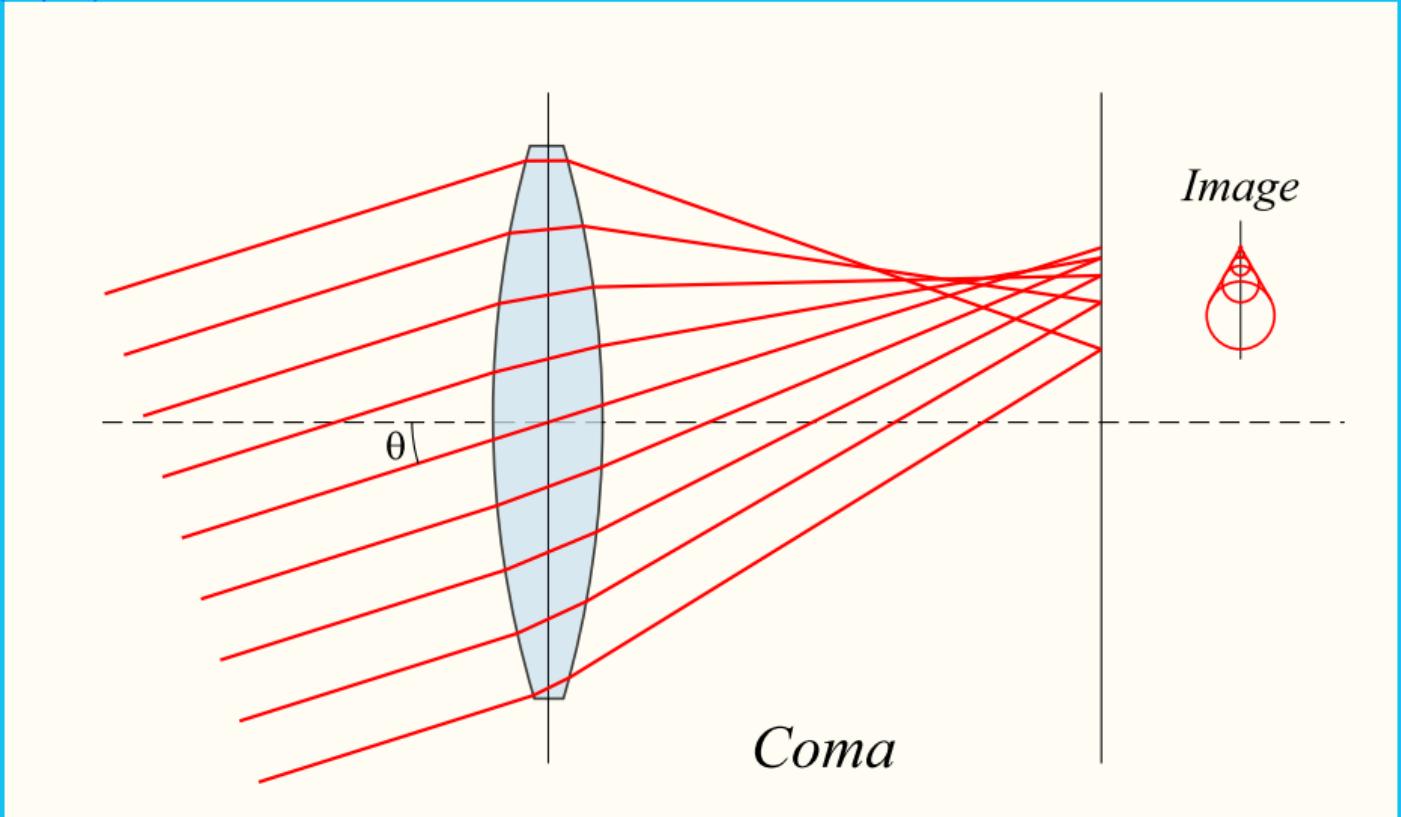
# Монохроматические aberrации

Сферическая aberrация,  $\propto (D/F)^3$



# Монохроматические aberrации

Кома,  $\propto (D/F)^2$

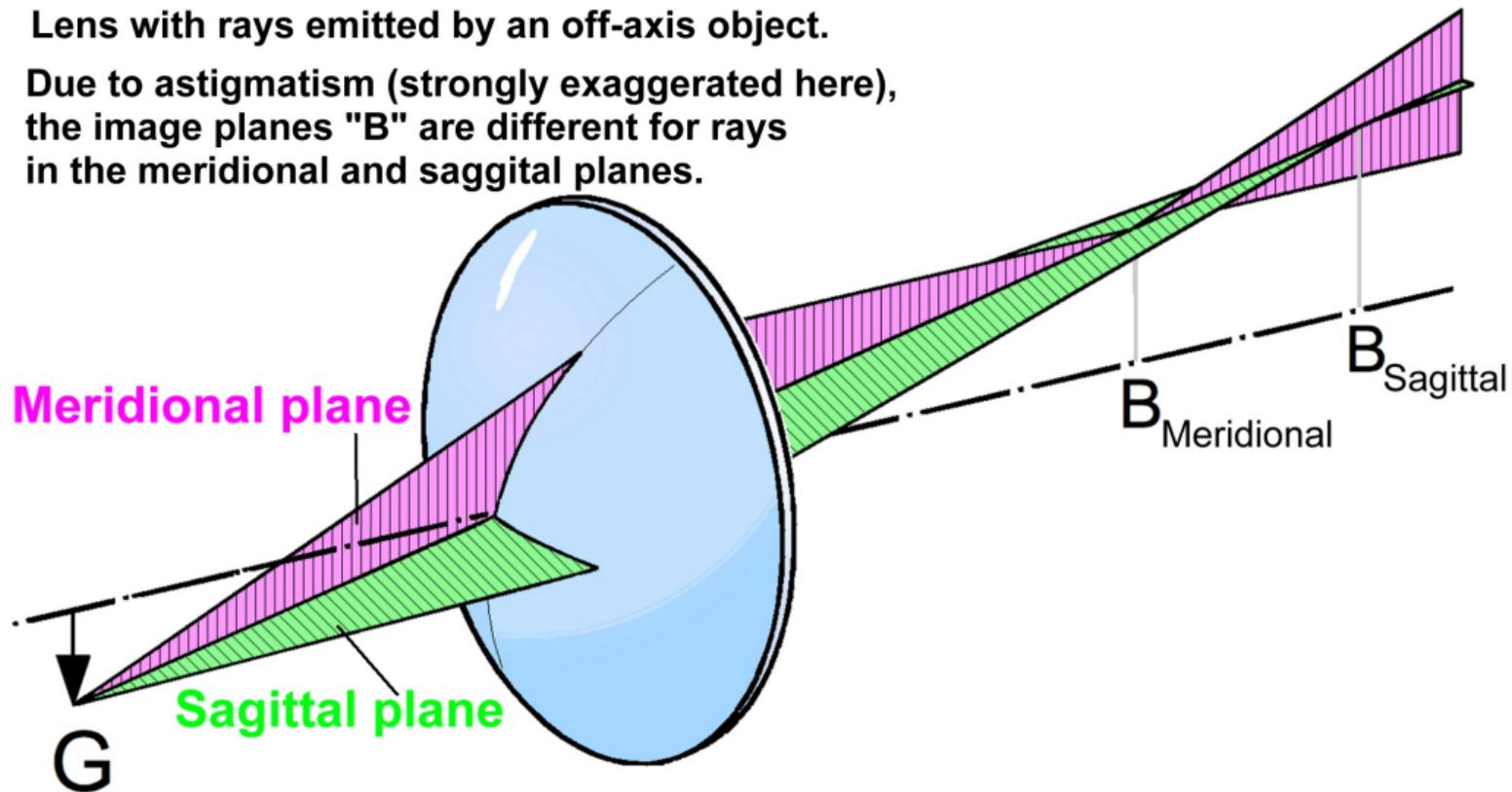


# Монохроматические aberrации

## Астигматизм, $\propto (D/F)$

Lens with rays emitted by an off-axis object.

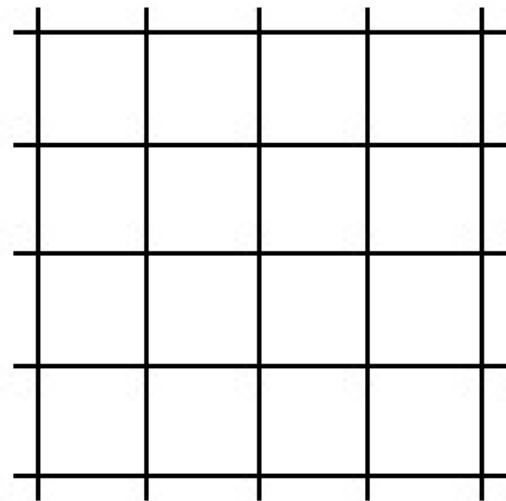
Due to astigmatism (strongly exaggerated here),  
the image planes "B" are different for rays  
in the meridional and saggital planes.



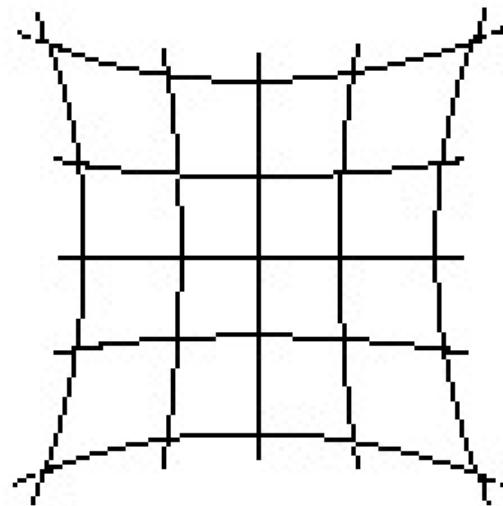
# Монохроматические aberrации

## Дисторсия

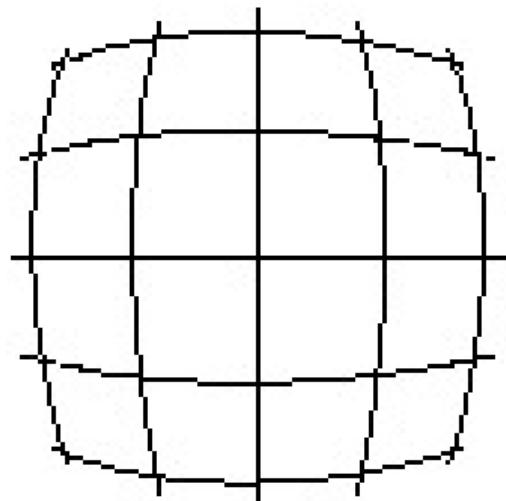
ОБЪЕКТ



PINCUSHION  
DISTORTION

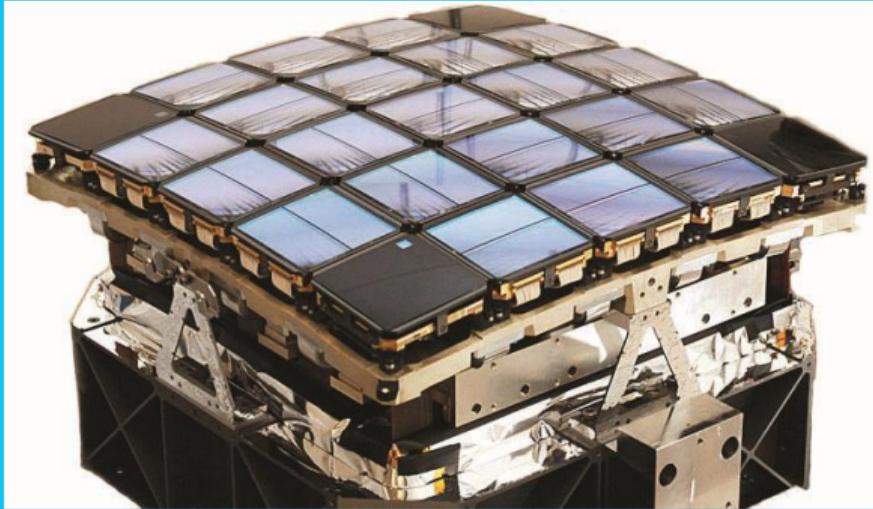
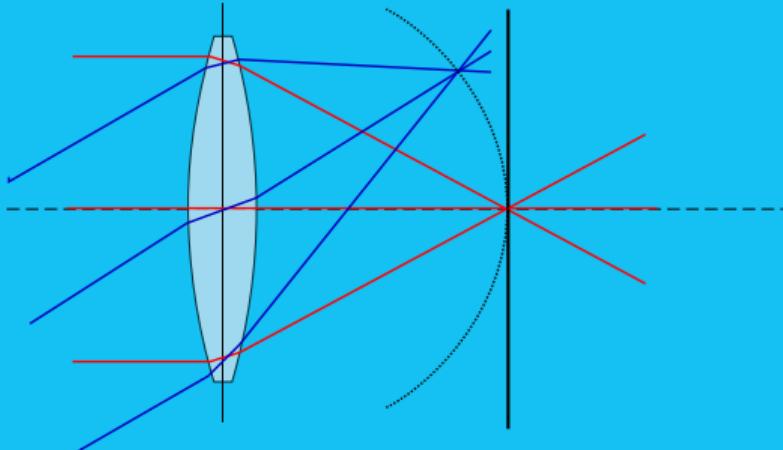


BARREL  
DISTORTION



# Монохроматические aberrации

Кривизна поля — фокальная плоскость «Кеплера»



# Полиномы Цернике

Четные полиномы Цернике:  $Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cos(m\varphi)$ ,

Нечетные:  $Z_n^{-m}(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \sin(m\varphi)$ ,

где  $m$  и  $n$  – положительные целые,  $n \geq m$ ;

$\varphi$  – угловая координата;  $\rho$  – радиус-вектор ( $0 \leq \rho \leq 1$ );  $R_n^m$  – радиальные полиномы.

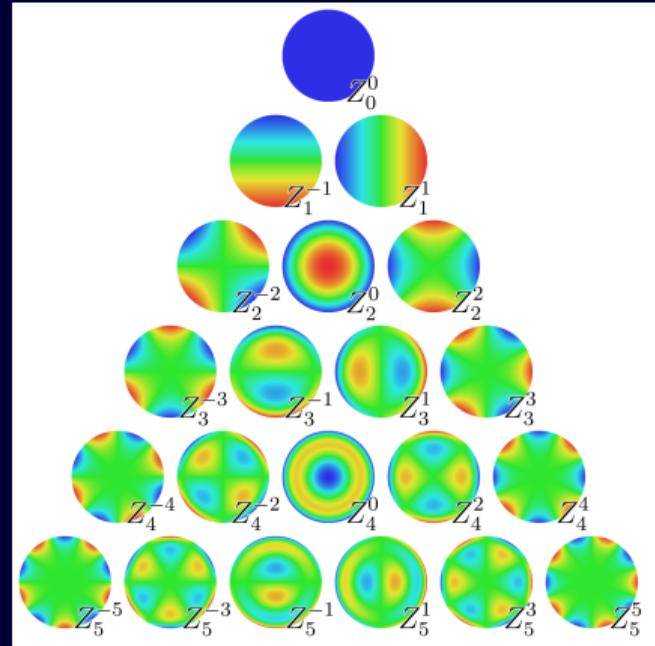
Полиномы Цернике ортонормальны,  $|Z_n^m(\rho, \varphi)| \leq 1$ .

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} \rho^{n-2k} \text{ для четных } n-m,$$

$$R_n^m \equiv 0 \text{ для нечетных } n-m.$$

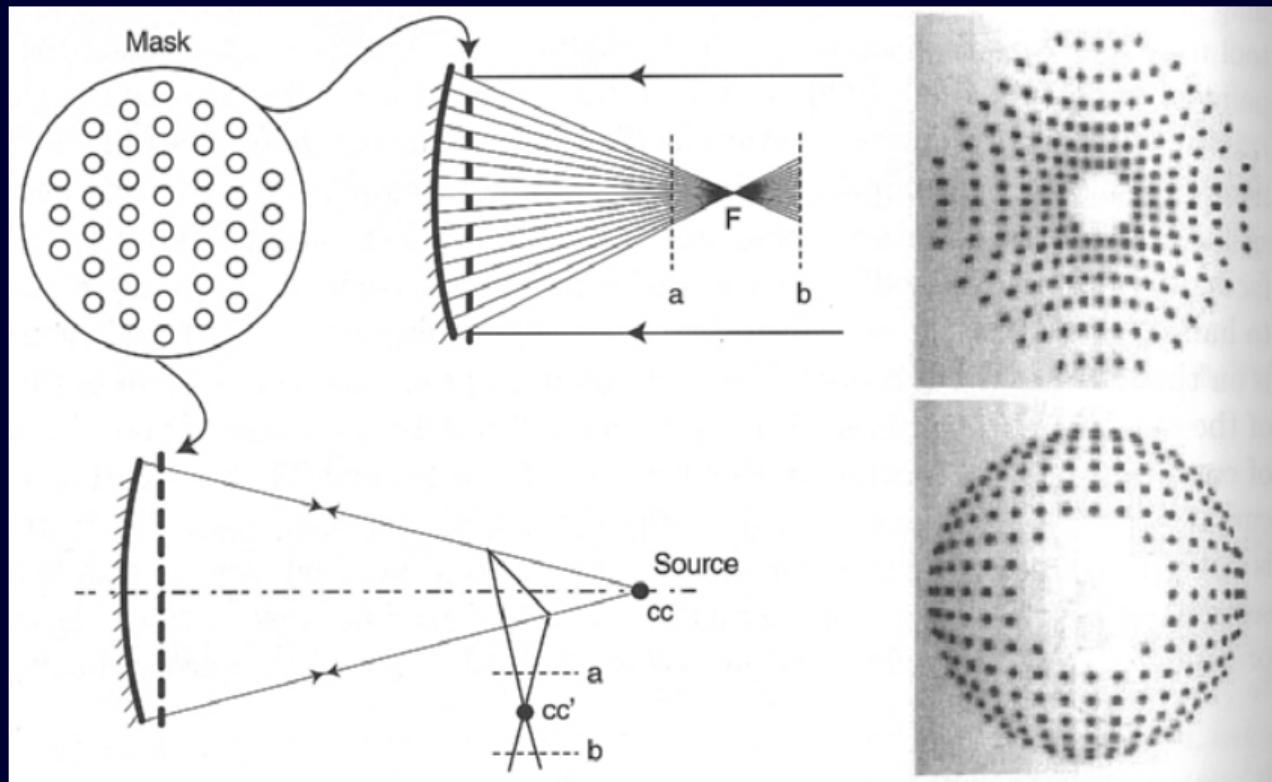
# Полиномы Цернике

$Z$	$Z_j$	Name
$Z_0^0$	1	Смещение
$Z_1^{-1}$	$2\rho \sin \varphi$	Вертикальный наклон
$Z_1^1$	$2\rho \cos \varphi$	Горизонтальный наклон
$Z_2^{-2}$	$\sqrt{6}\rho^2 \sin 2\varphi$	Астигматизм (косой)
$Z_2^0$	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Дефокус
$Z_3^{-1}$	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \sin \varphi$	Вертикальная кома
$Z_3^1$	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \cos \varphi$	Горизонтальная кома
$Z_4^0$	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Сферическая aberrация



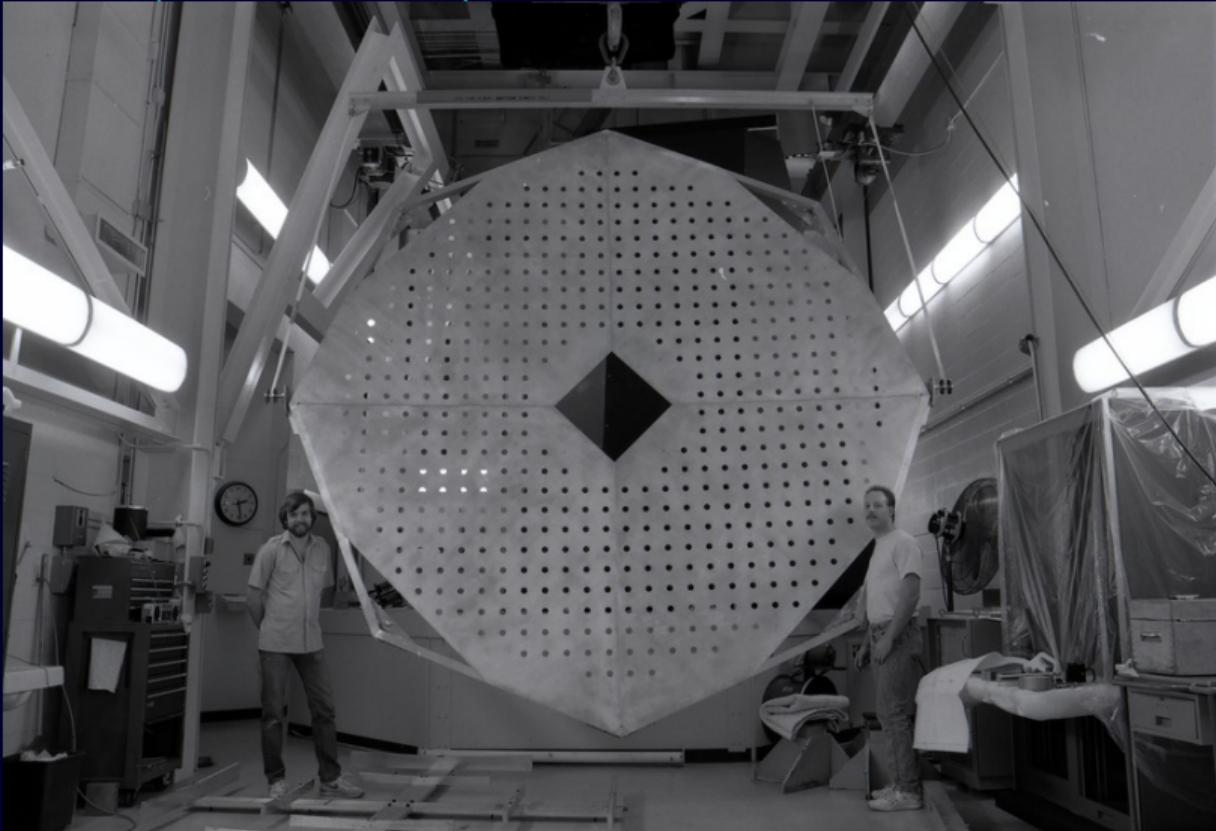
# Метод Гартманна

Суть методики



# Метод Гартманна

Экран 3.5-м телескопа (WIYN, Китт-Пик)



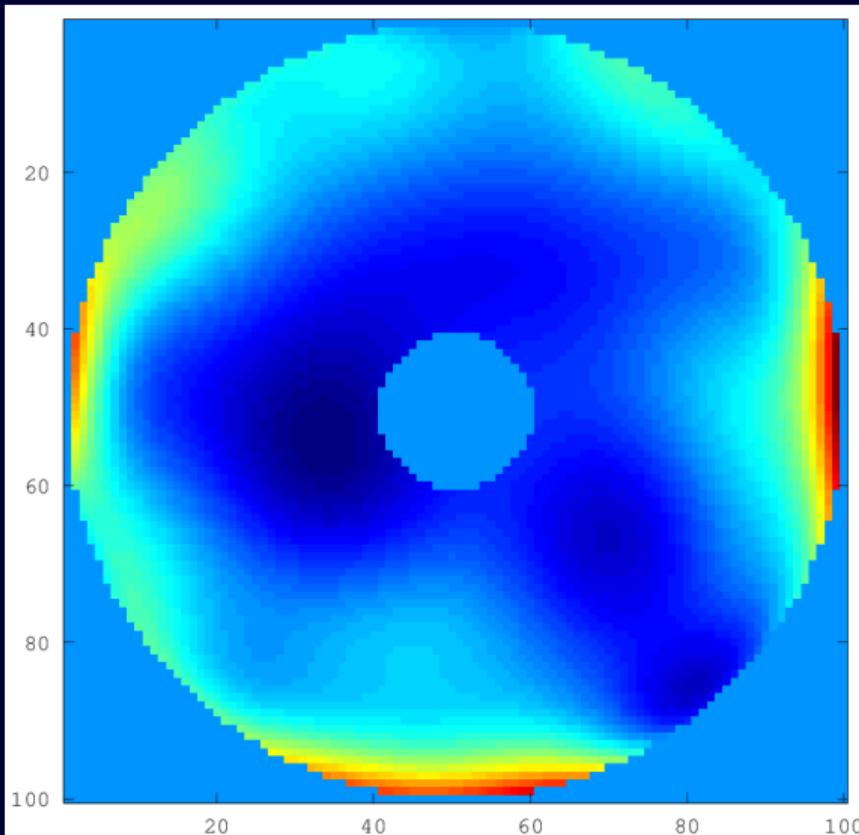
# Метод Гартманна

Экран БТА

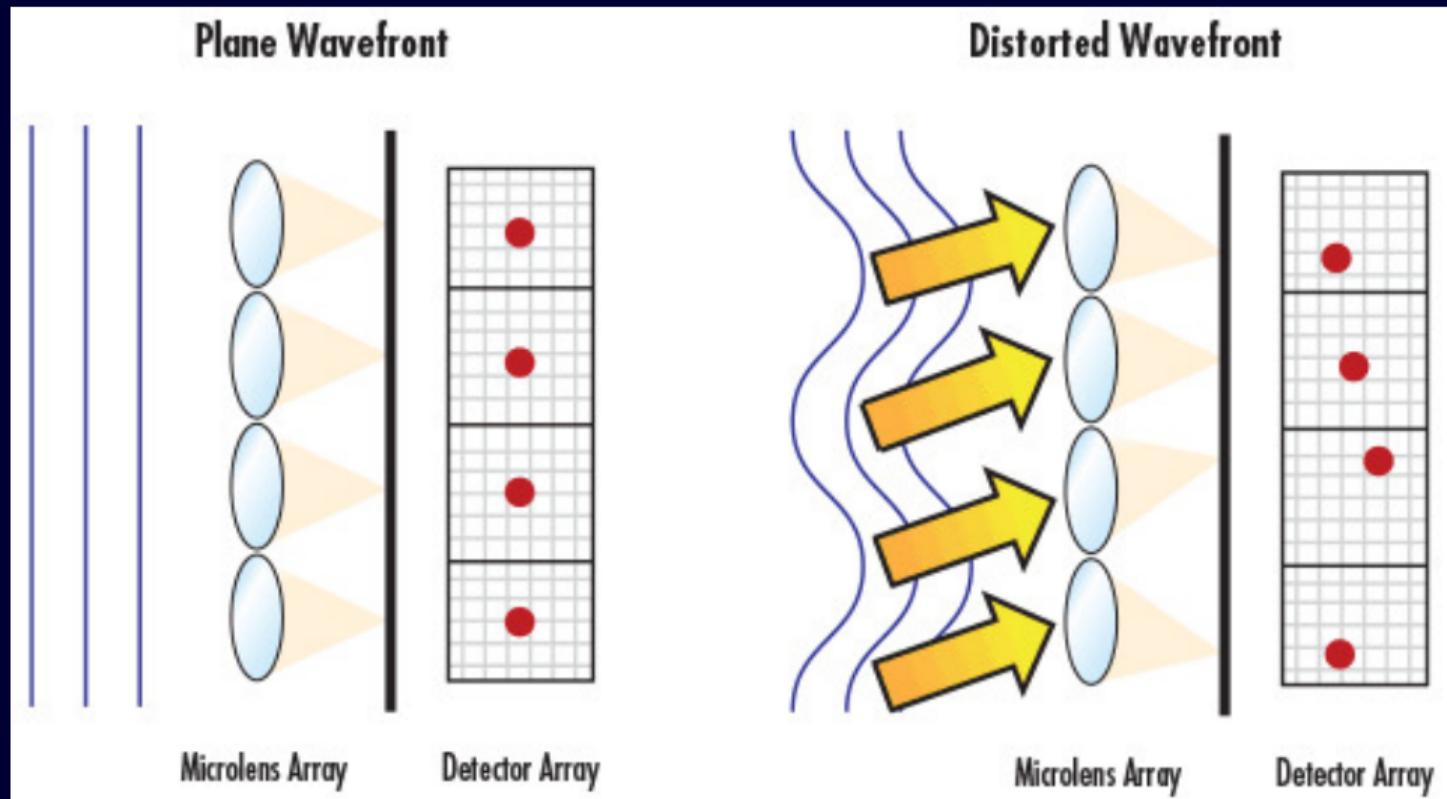


# Метод Гартманна

Волновой фронт



# Метод Шака-Гартманна



# Метод Шака-Гартманна

## Шак-Гартманн на БТА

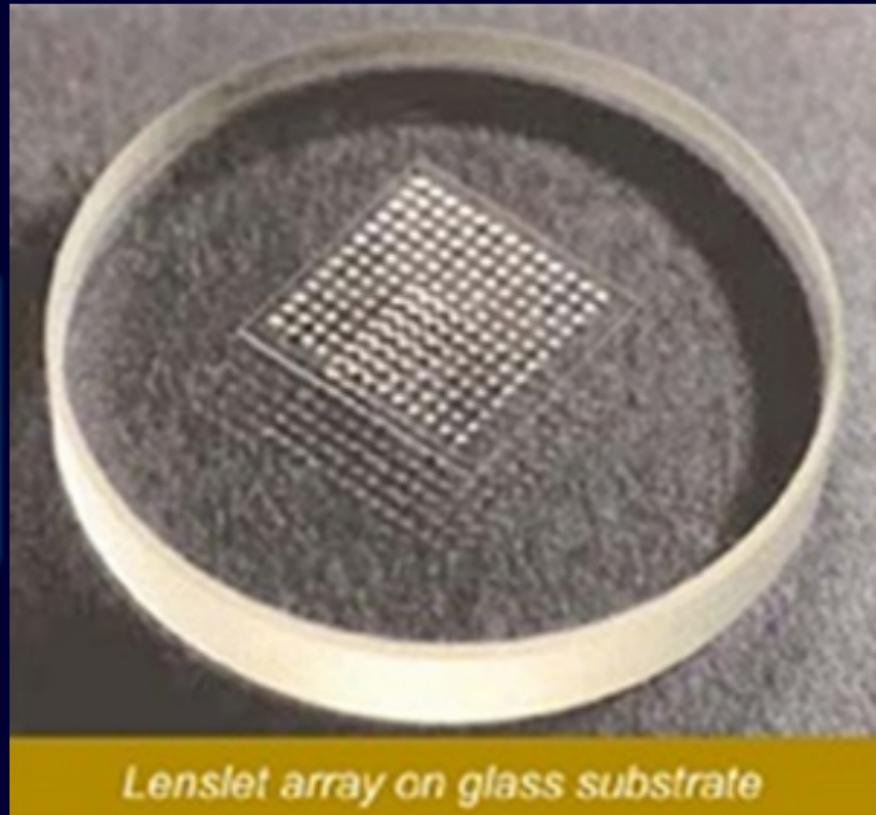
ООО «Визионика», ИПЛИТ РАН.

Применяется с 2015 года.

Имеет более высокое разрешение.

Единственный доступный для БТА метод.

Растр  $60 \times 60$  APO-Q-P1000-F40 (61 × 61 мм).



*Lenslet array on glass substrate*

# Метод Шака-Гартманна

## Шак-Гартманн на БТА

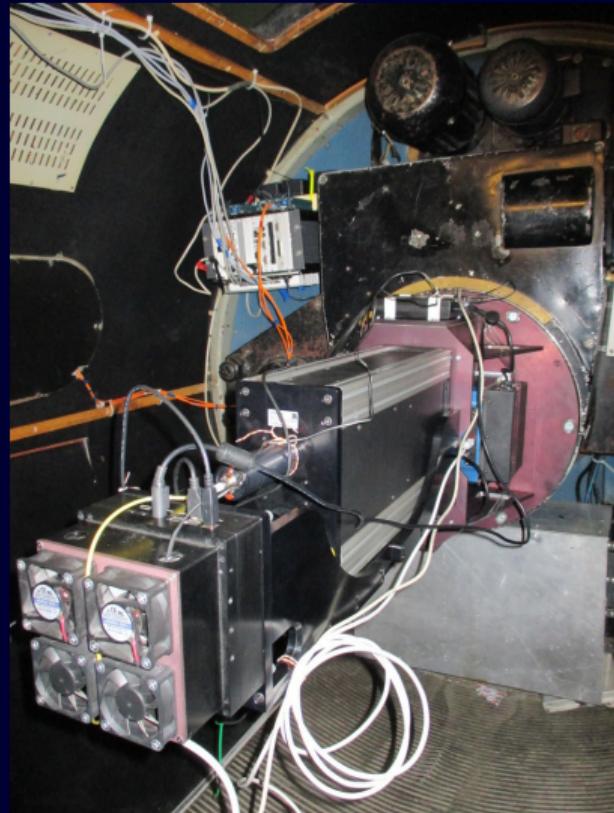
ООО «Визионика», ИПЛИТ РАН.

Применяется с 2015 года.

Имеет более высокое разрешение.

Единственный доступный для БТА метод.

Растр  $60 \times 60$  APO-Q-P1000-F40 (61 × 61 мм).



# Метод Шака-Гартманна

## Шак-Гартманн на БТА

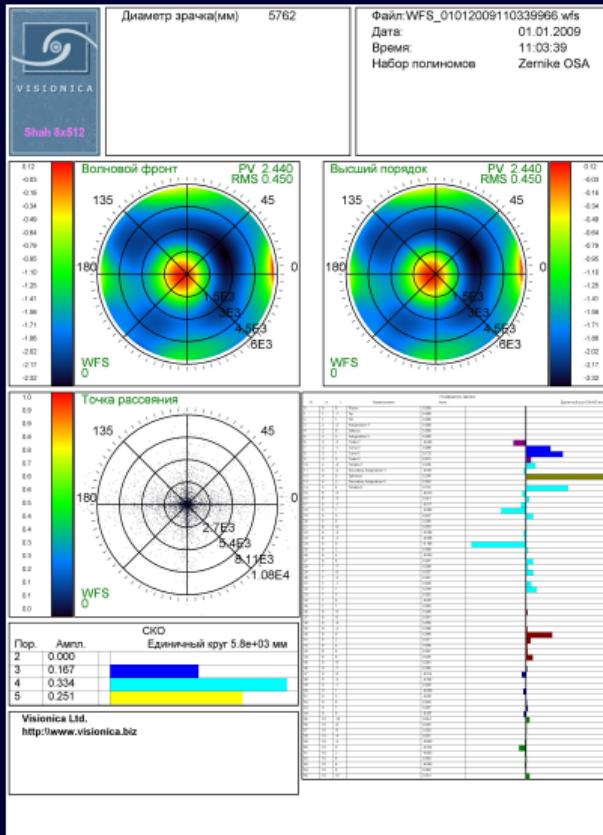
ООО «Визионика», ИПЛИТ РАН.

Применяется с 2015 года.

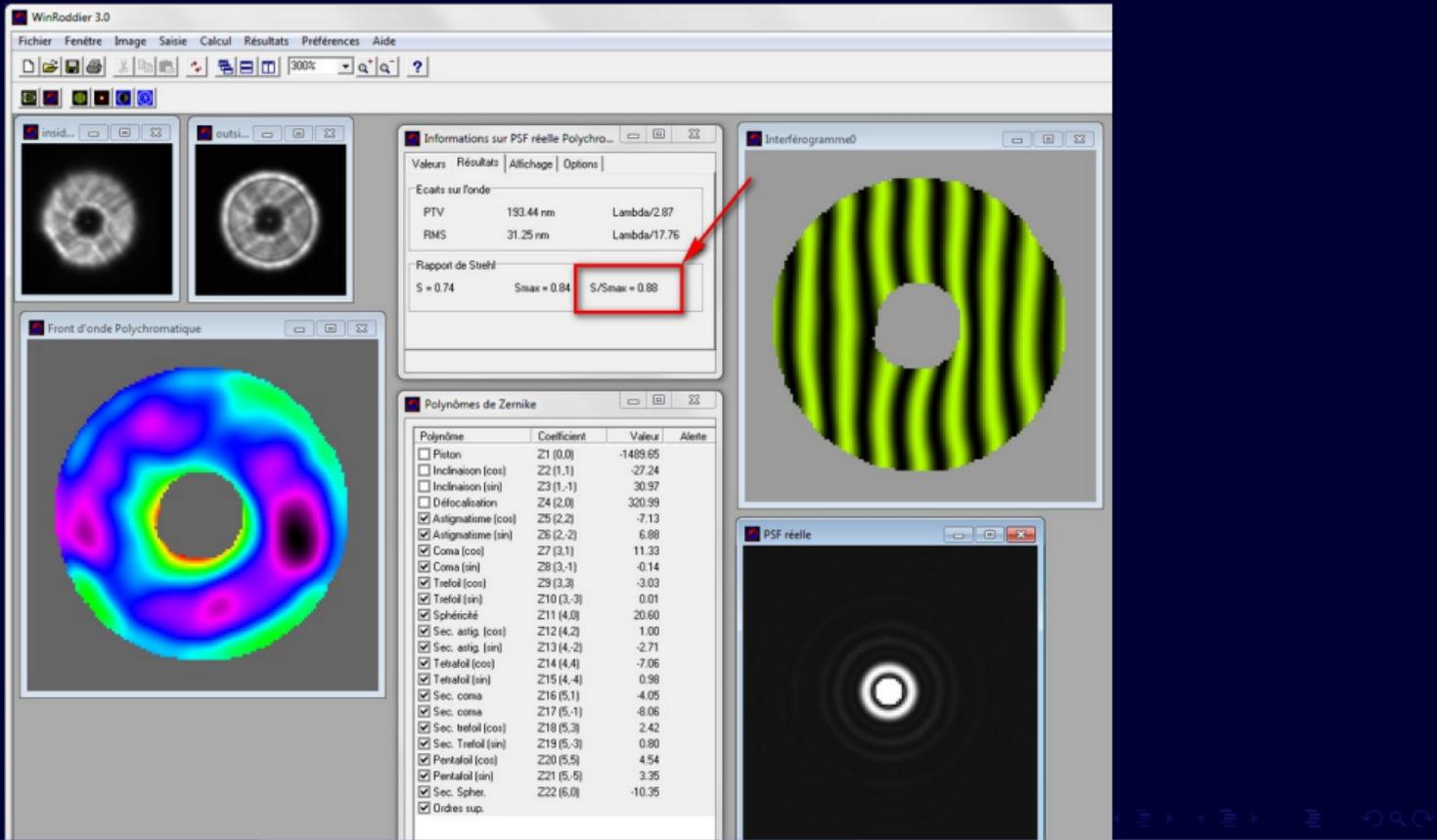
Имеет более высокое разрешение.

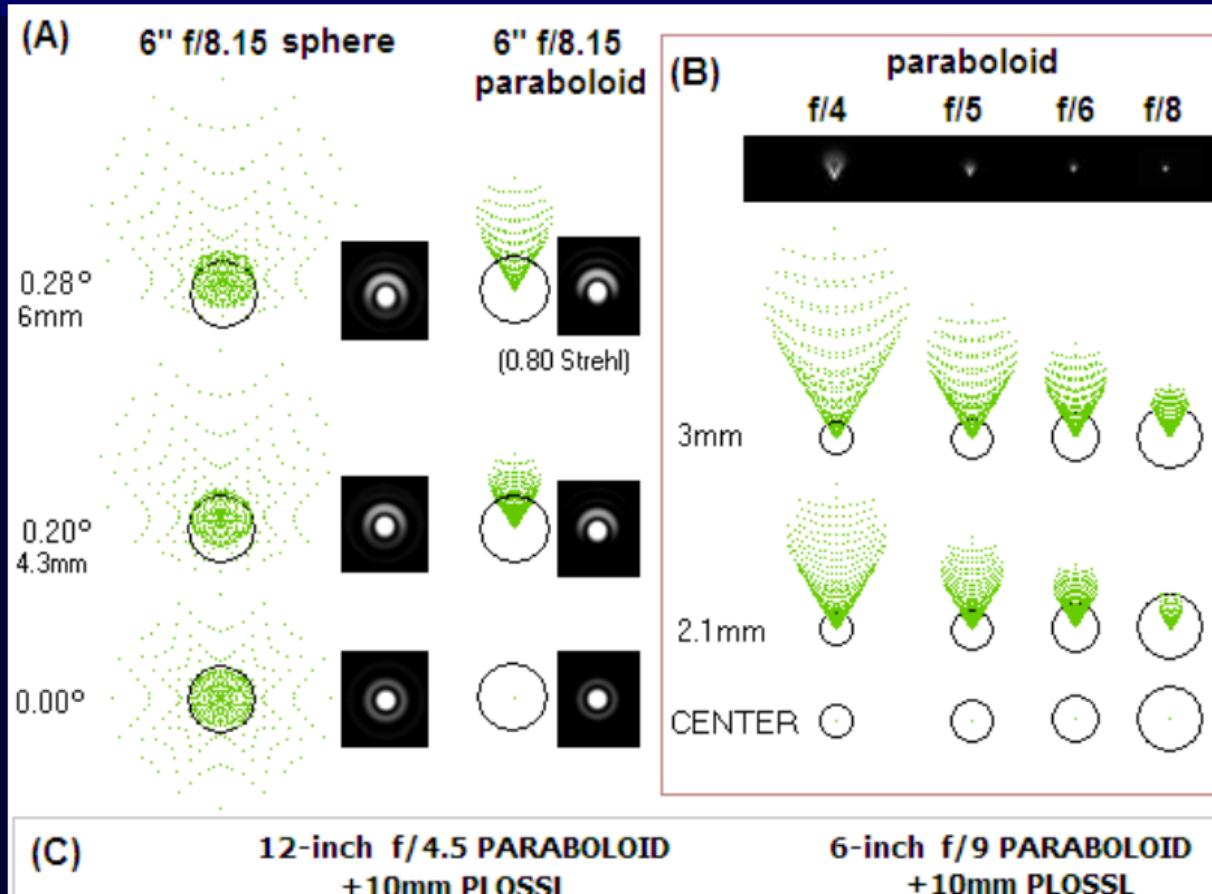
Единственный доступный для БТА метод.

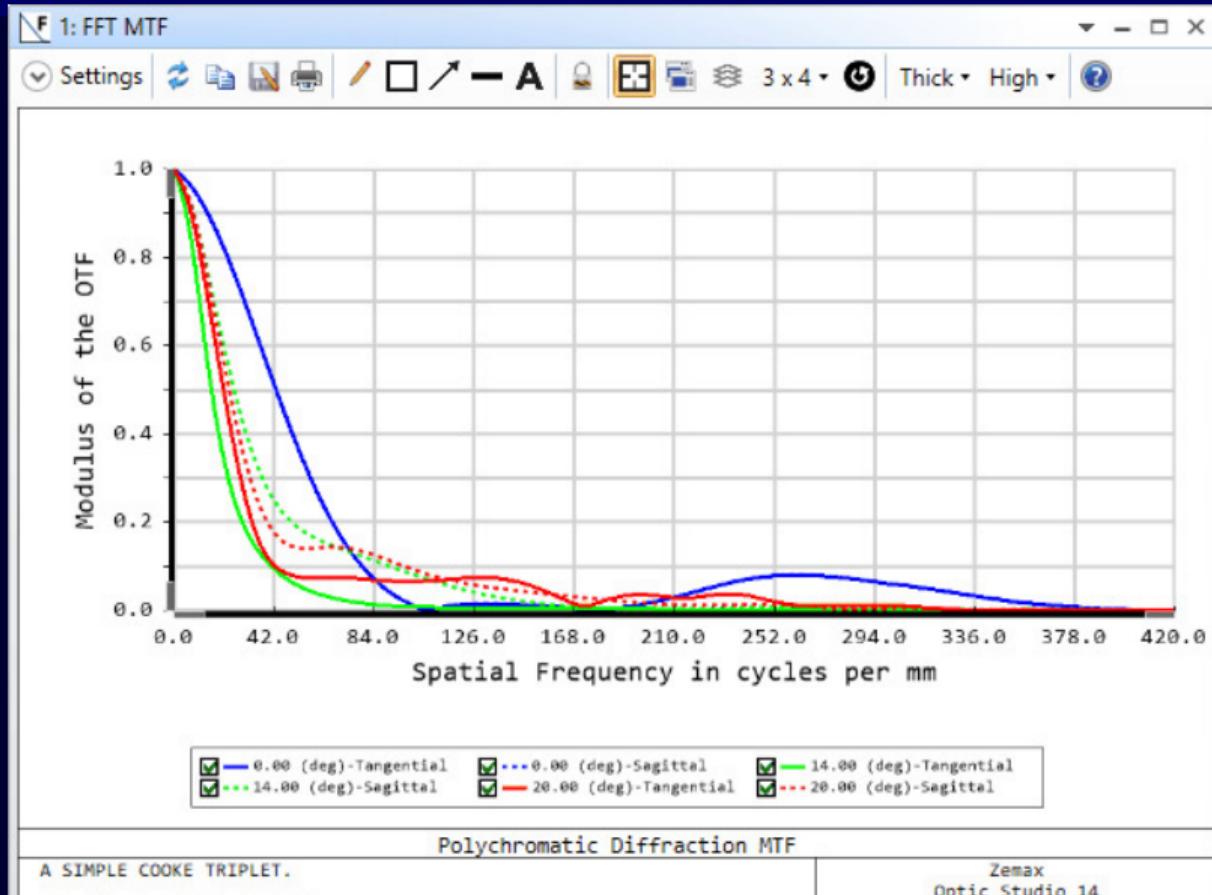
Растр  $60 \times 60$  APO-Q-P1000-F40 (61 × 61 мм).

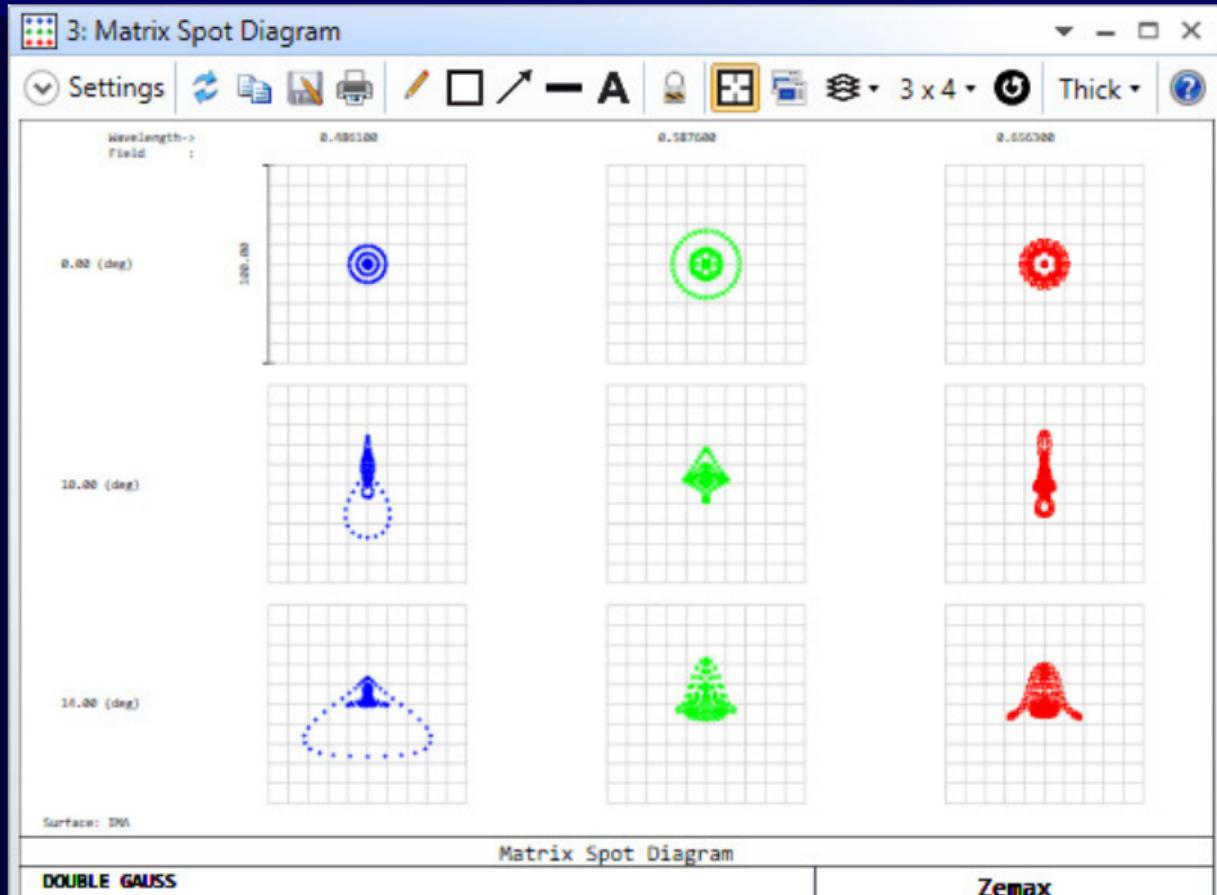


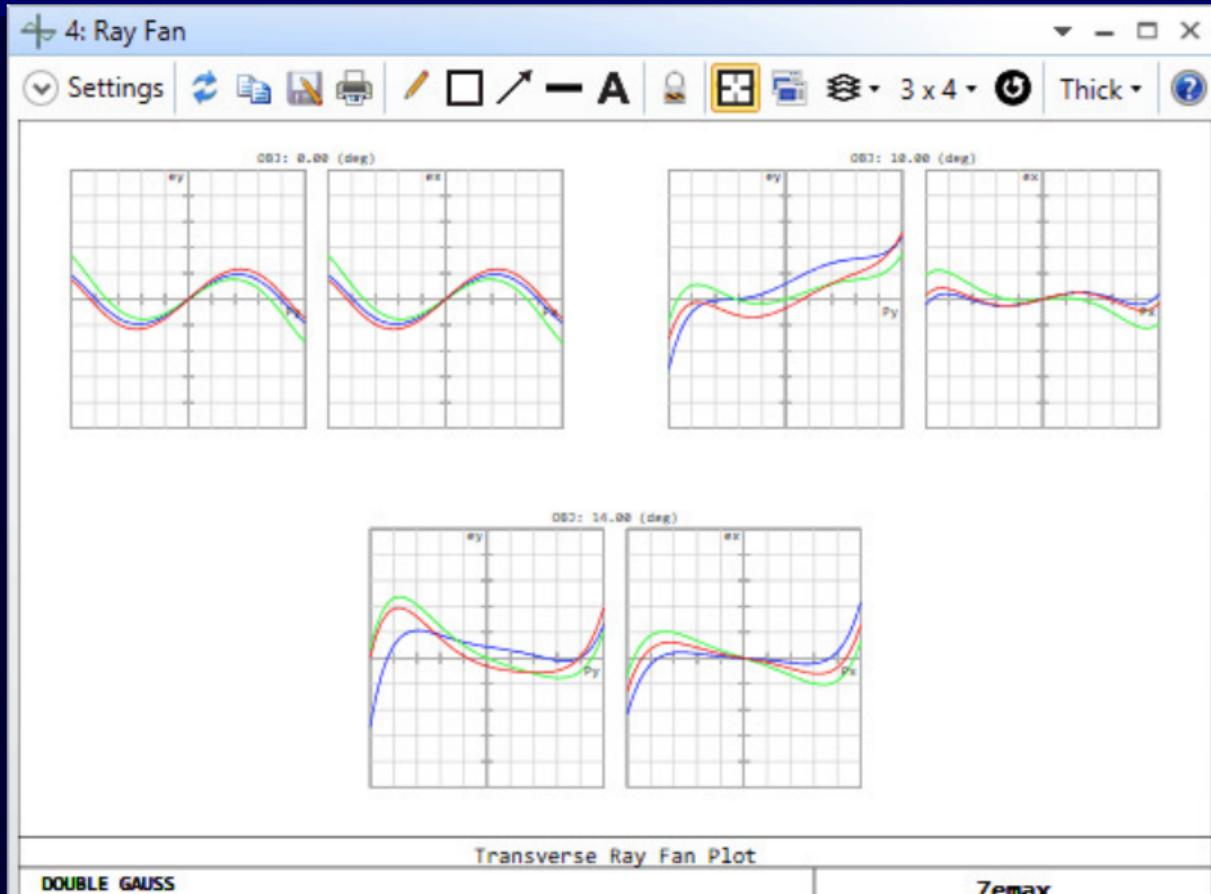
# Метод Роддье





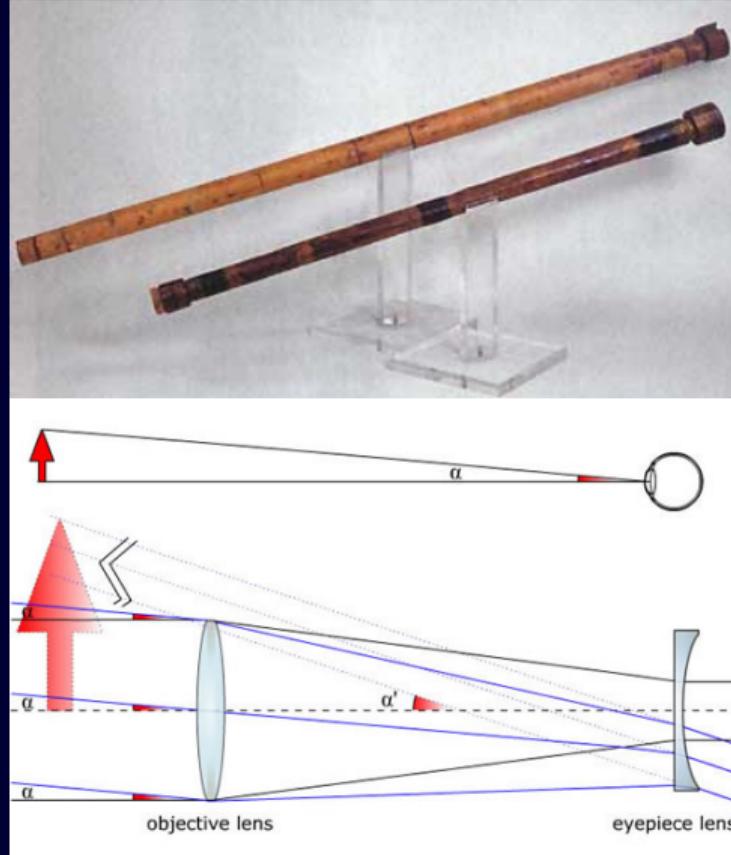






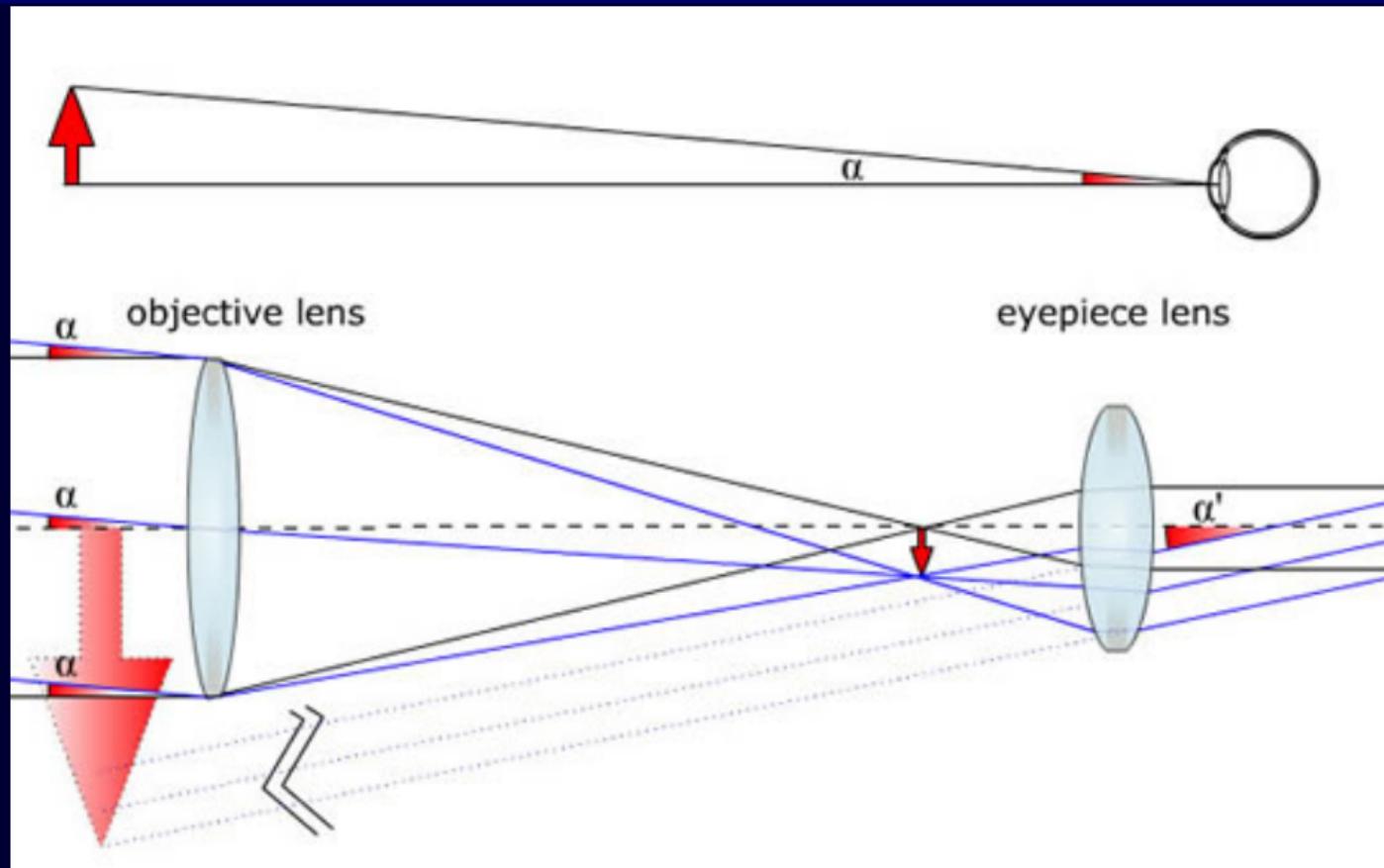
# Рефракторы

Галилея



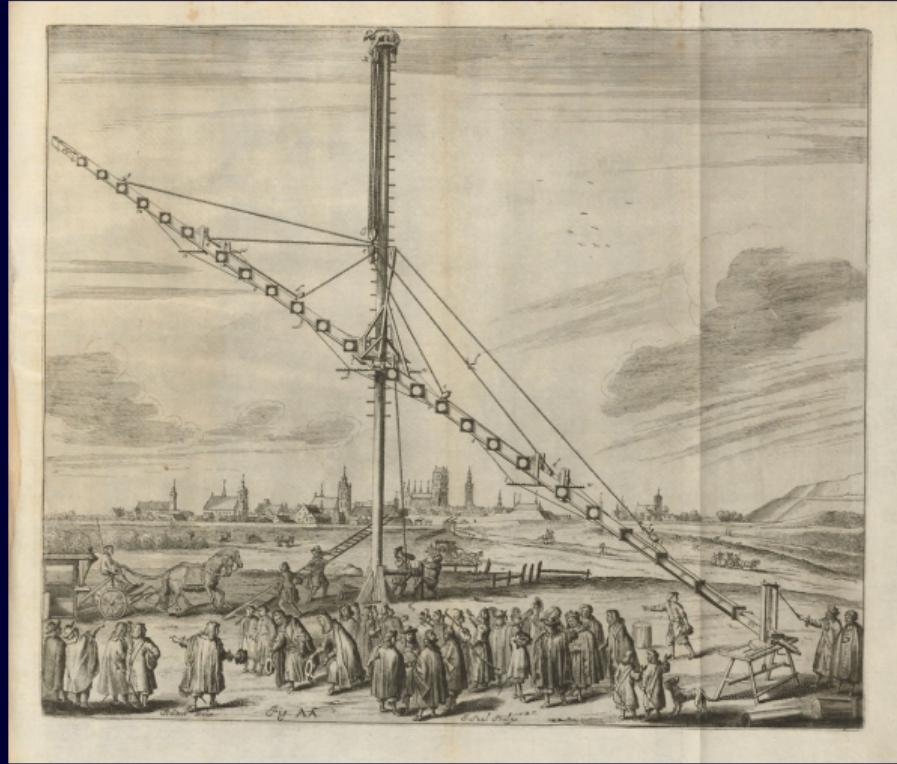
# Рефракторы

Кеплера

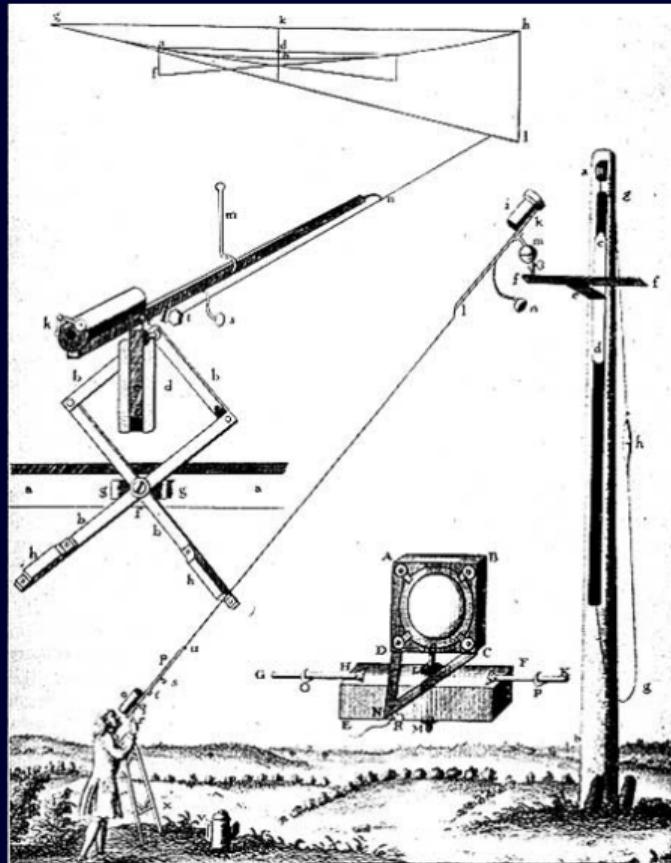


# Рефракторы

Яна Гевелия (1641, 46м фокус)



# Рефракторы



Гюйгенса (вторая половина XVII века, 37м)

1655 — кольца Сатурна, Титан;

1657 — маятниковые часы;

1659 — туманность Ориона;

1675 — часовая спираль.

# Рефракторы

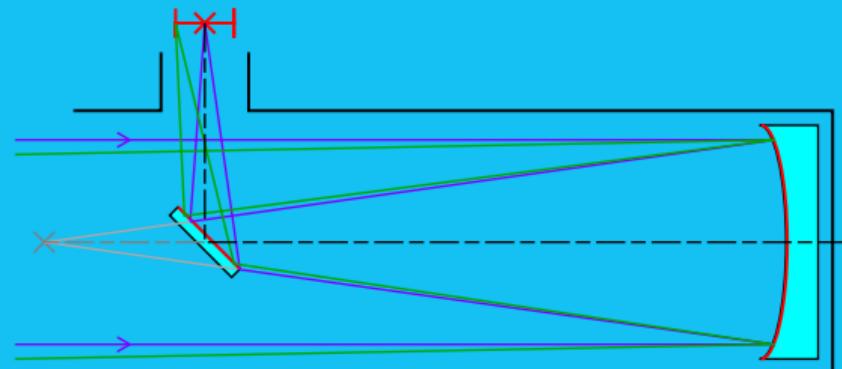
Francois Deloncle, 1.25м — парижская выставка 1900 г,  $F = 57$  м.



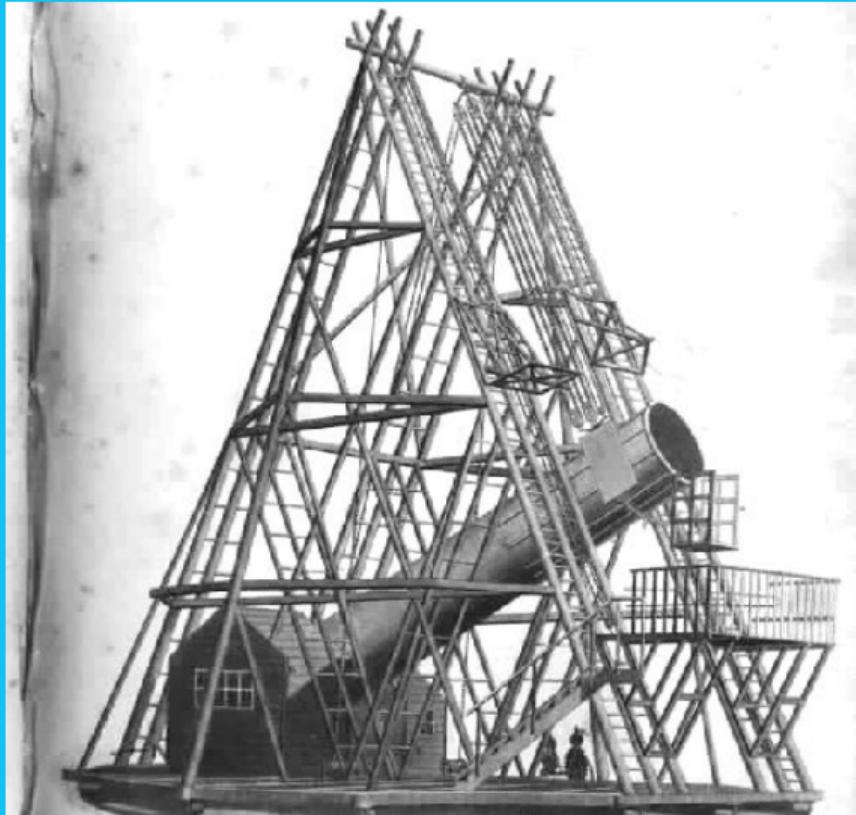
# Рефлекторы



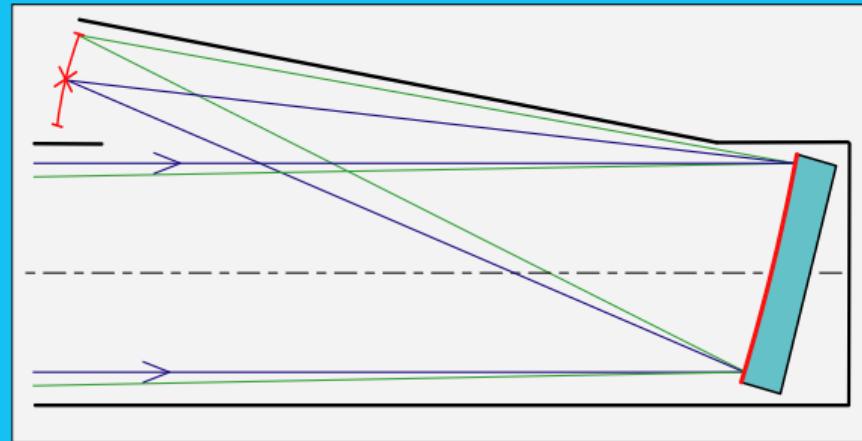
Ньютона (1668)



# Рефлекторы



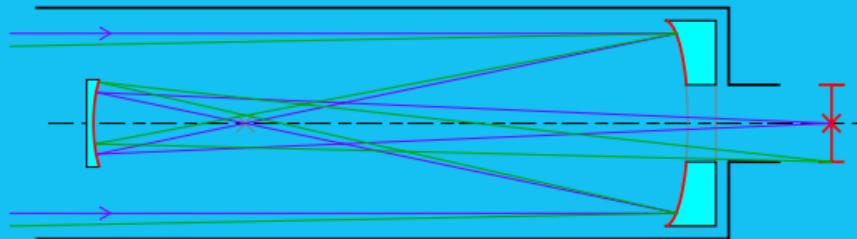
Гершеля–Ломоносова (1772/1762)



# Рефлекторы

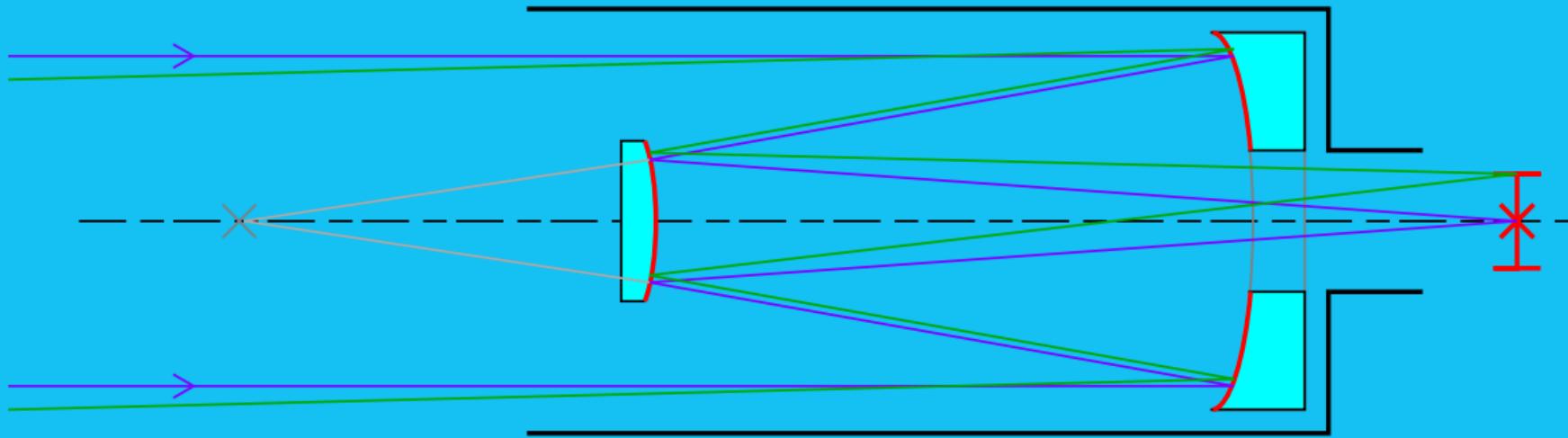


Грегори (предложена, но не построена в 1663:  
парабола + эллипс)



# Рефлекторы

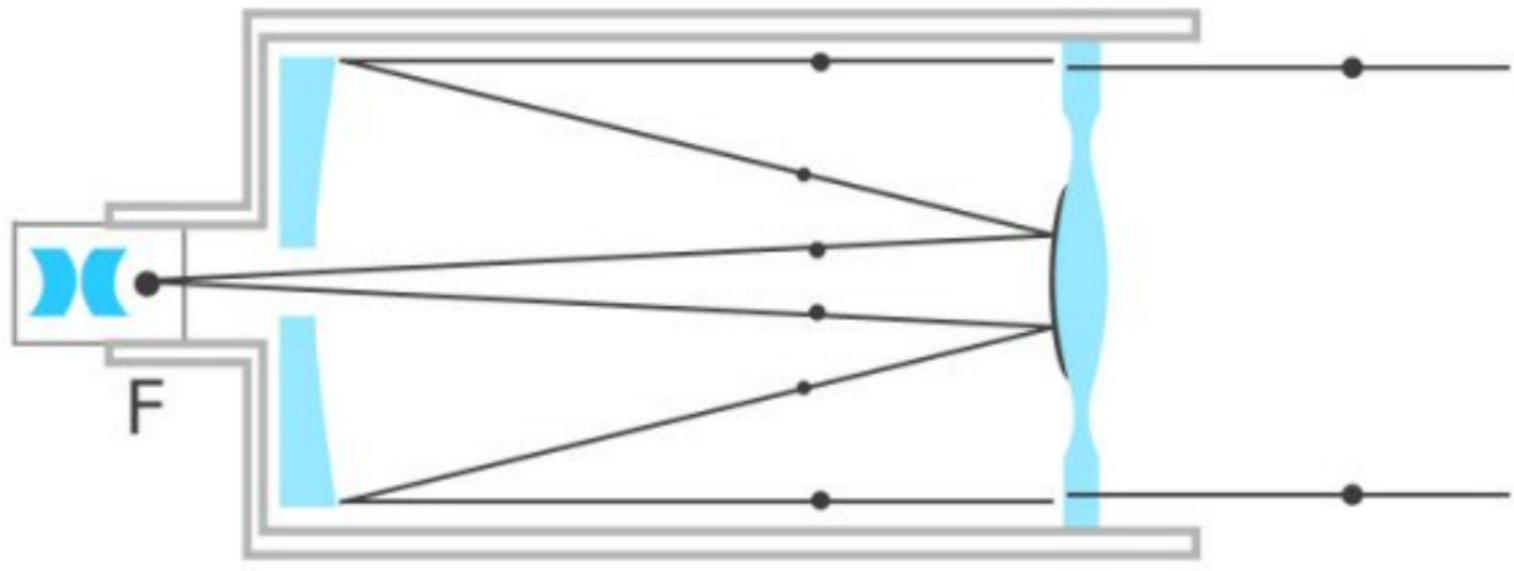
Кассегрена (1672, вариация — Ритчи–кретьен, 1910, 2 гиперболы)



# Рефлекторы

Шмидт–Кассегрен (1950-е — гигантские размеры поля)

## Schmidt Cassegrain



# Основные характеристики телескопов

**Разрешение**  $\theta = 1.220 \frac{\lambda}{D} = \frac{16.4}{D} \text{ ''/см}$  для 650 нм.

**Угловое увеличение**  $\Gamma = \frac{F}{f}$ , минимальное:  $\Gamma = \frac{D}{D_{ep}}$ .

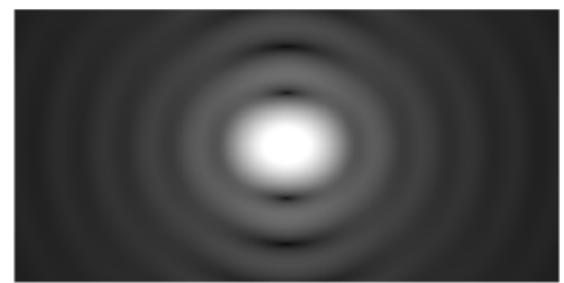
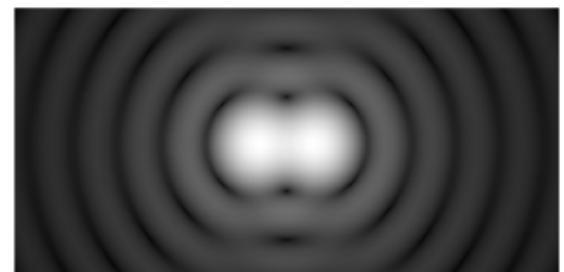
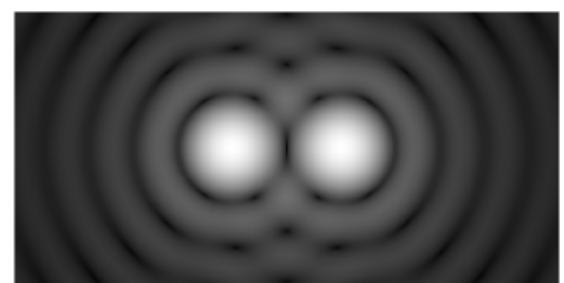
**Поле зрения**  $\omega = \frac{\Omega}{\Gamma}$  ( $\Omega$  – поле зрения окуляра).

**Светосила**  $A = \frac{D}{F}$ , определяет освещенность в фокальной плоскости.

**Относительное отверстие**  $F\# = 1/A = F/D$ .

**Проницающая сила**  $m$  – наиболее слабые звезды (в зените) над фоном.

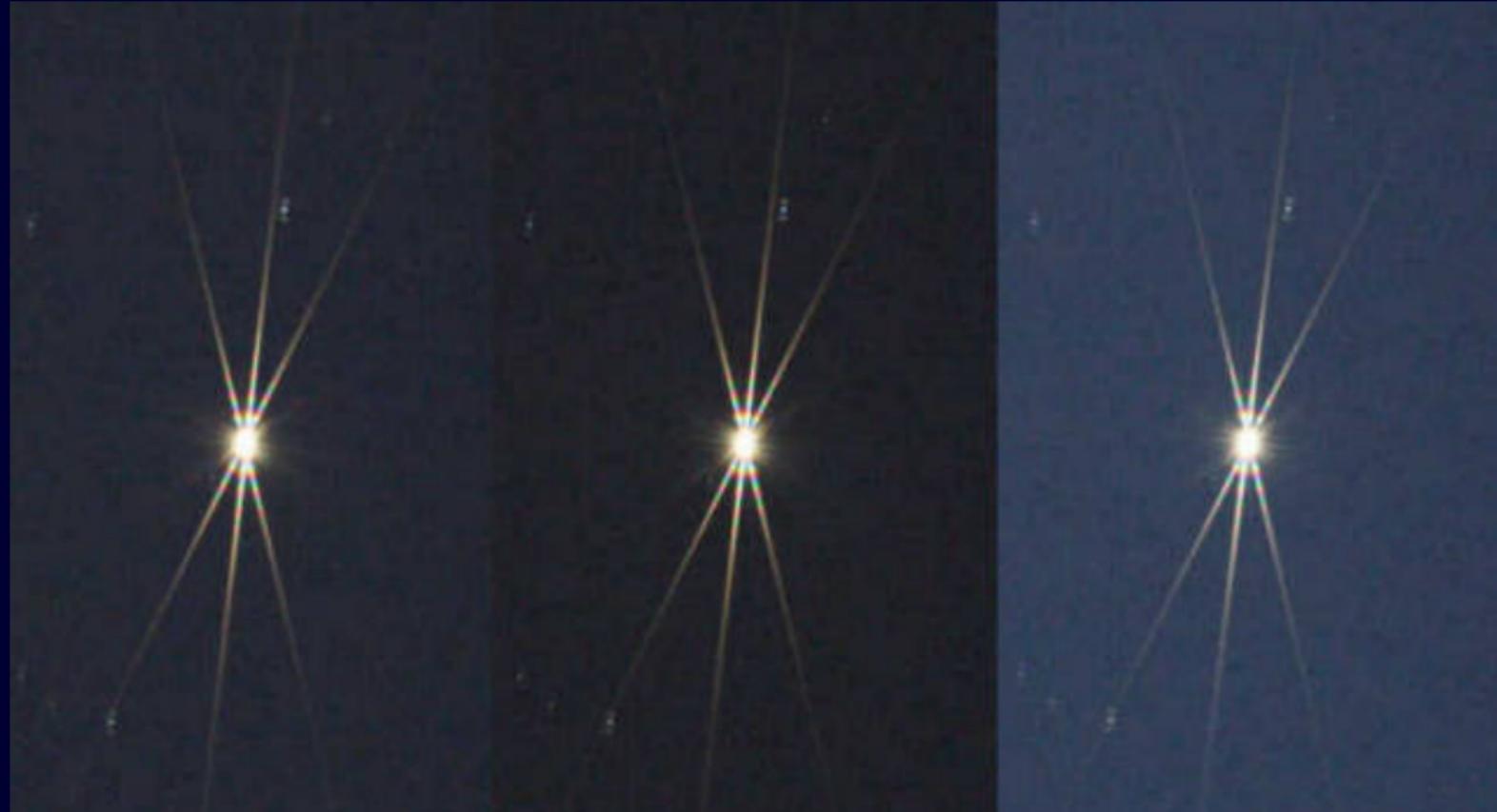
**Масштаб**  $u = \frac{206265''}{F} / \text{мм.}$



# Маска Бахтинова



# Маска Бахтинова



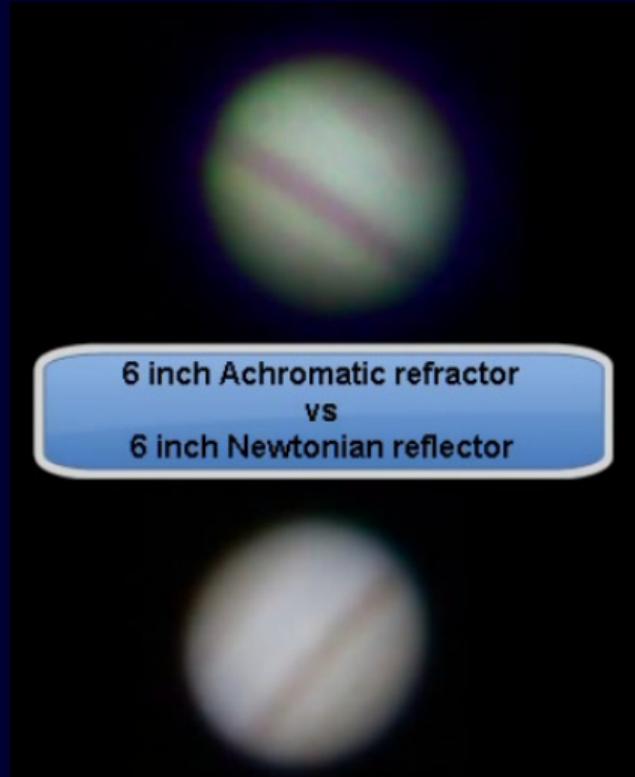
# Преимущества рефлекторов над рефракторами

## Рефлектор

Нет хроматической аберрации.  
Стоимость ниже.  
Труба компактней.  
Полировать только одну поверхность.  
Посадка по всей площади зеркала.  
Основная масса внизу трубы.

## Рефрактор

Нет дифракционного креста от растяжек.  
Не надо переалюминировать.  
Не нужна коллимация элементов.  
Закрытая труба — меньше грязи.



# Экваториальная монтировка



**1824, Йозеф фон Фраунгофер**

Телескоп обсерватории Тарту.

Германская монтировка.

В 1853 г. Юстус фон Либих предложил метод выделения металлического серебра из раствора нитрата серебра для серебрения стекла. В 1856-57 гг. Карл Август фон Штайнхейль и Леон Фуко (независимо) впервые использовали этот метод.

# Экваториальная монтировка



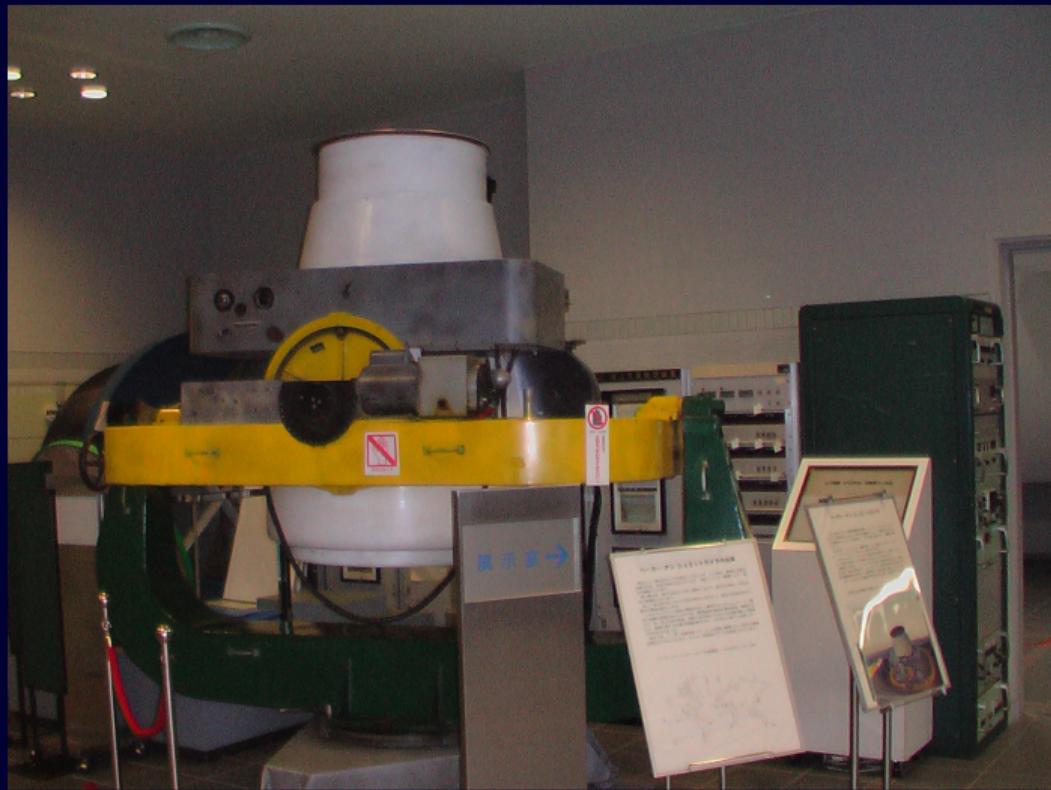
## Телескоп Хукера

100 дюймов, 1917 г. Английская монтировка «с ярмом». Обсерватория Маунт Вилсон. Крупнейший до 1949 г. В 1935 г. серебряное покрытие сменено алюминиевым (Джон Донаован Стронг, калтех, 1932 г.).

# Альт-азимутальная монтировка



# Альт-альт



## Baker–Nunn camera

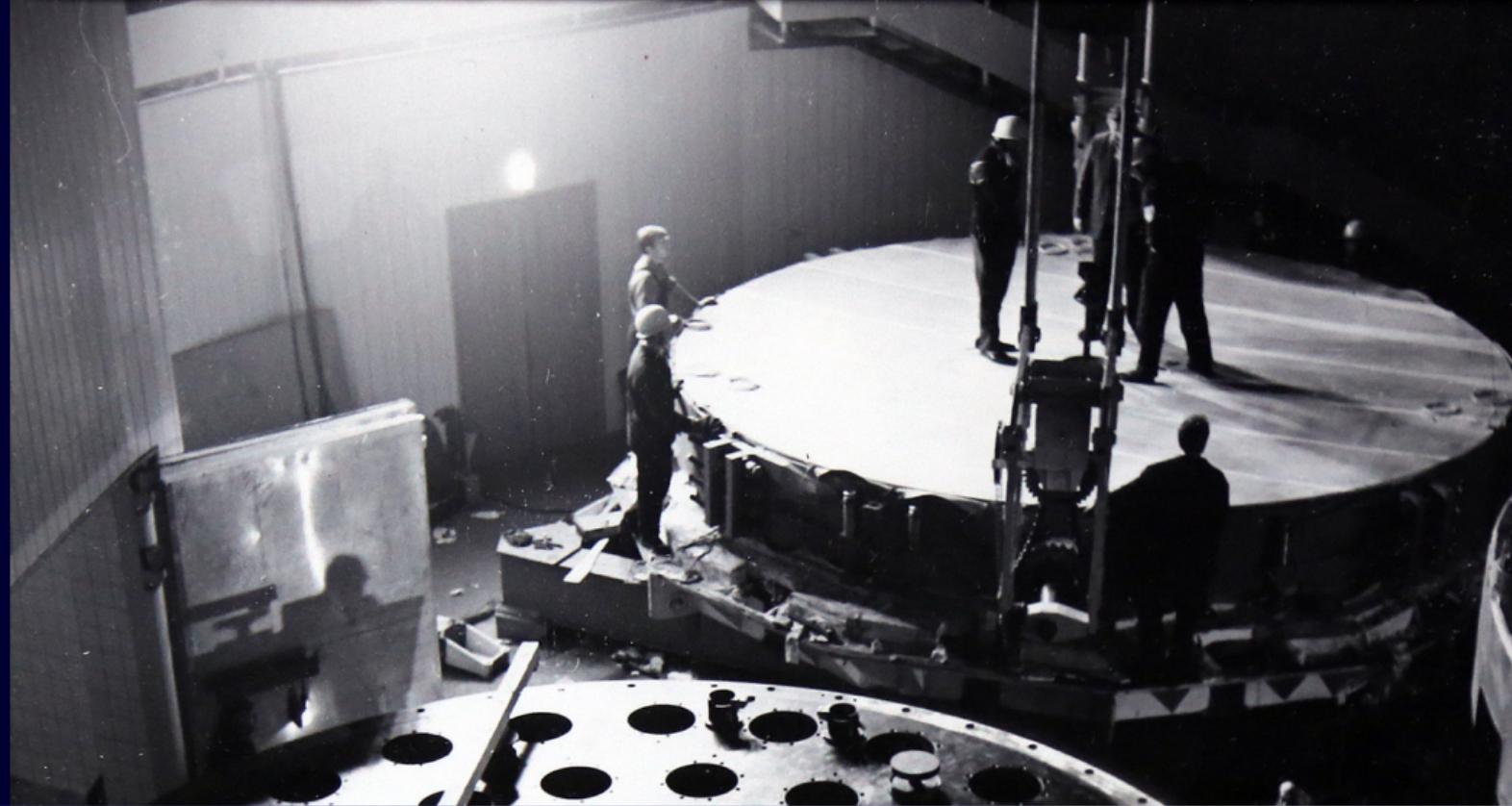
Отсутствует «слепая зона» около зенита. Часто включает азимутальную ось.

Экваториальная — невозможна разгрузить большое зеркало, очень массивная конструкция, у некоторых типов есть «слепая зона» у полюса.

Альт-азимутальная — вращение поля, «слепая зона», сложное управление, но простая механика.

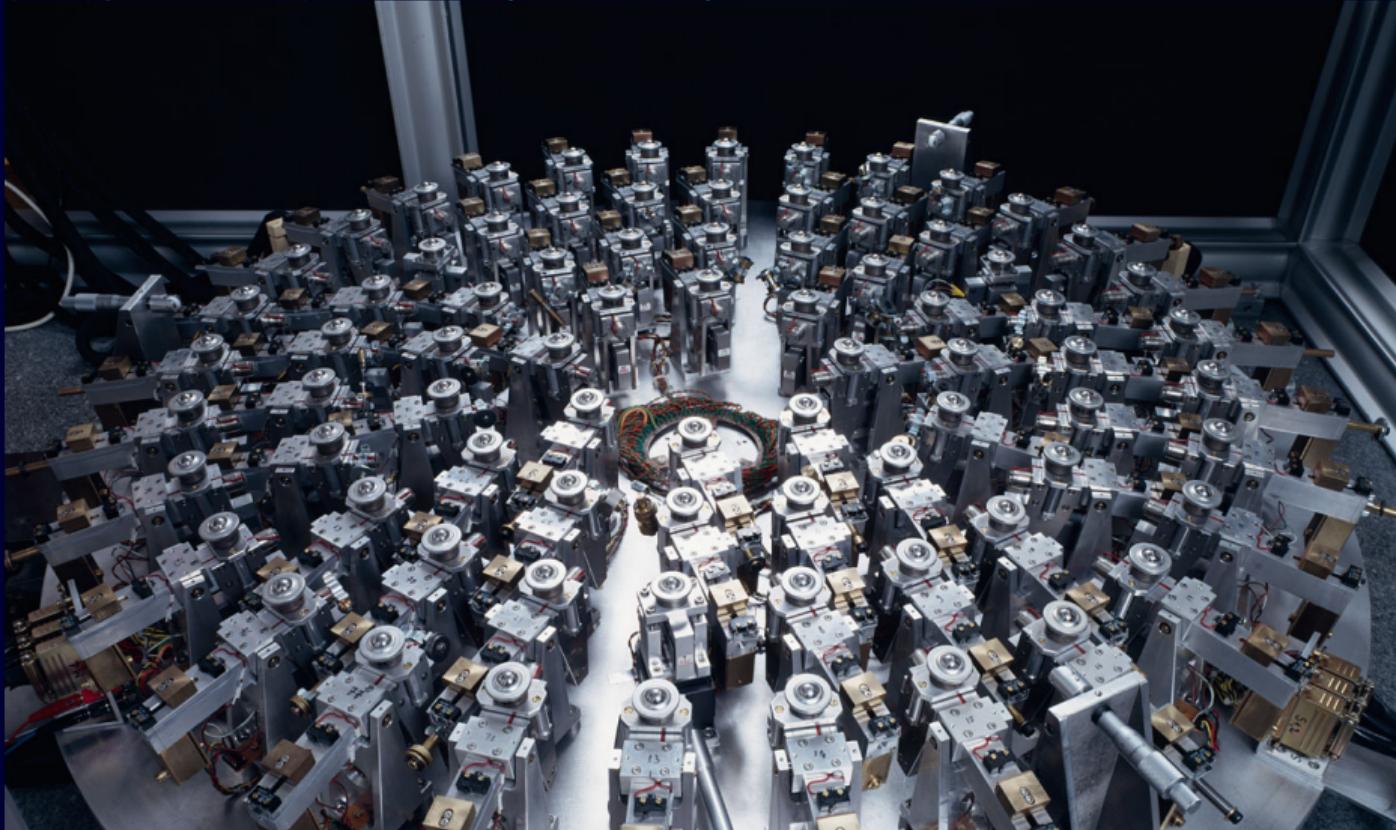
# Одно- и многоэлементные инструменты

Пассивные разгрузки БТА.



# Одно- и многоэлементные инструменты

Активная разгрузка 1-м зеркала ESO (1987, NTT)



# Одно- и многоэлементные инструменты

Большой Магелланов Телескоп (GMT, Лас-Кампанас, Чили).

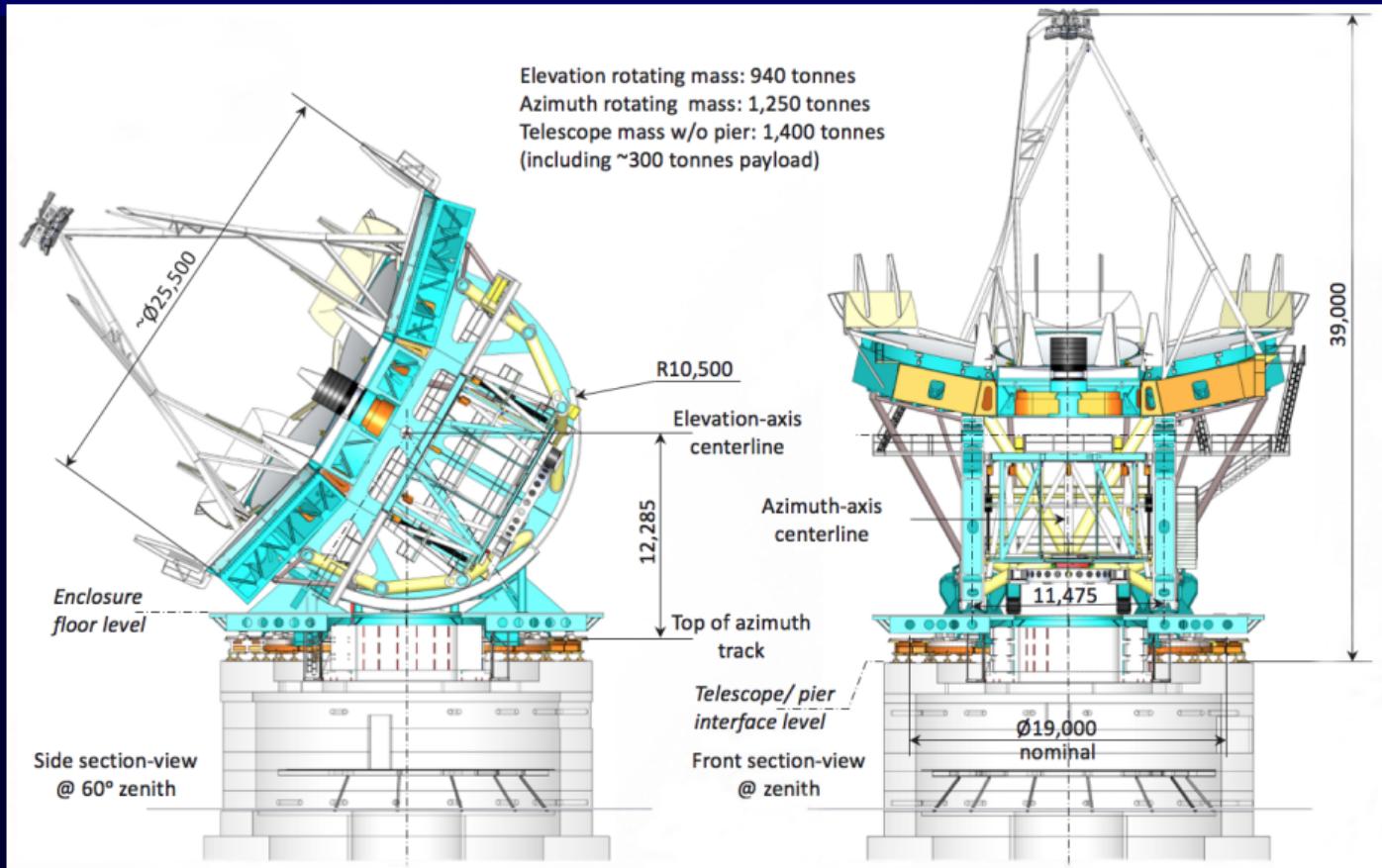


# Одно- и многоэлементные инструменты

Центральное зеркало GMT.

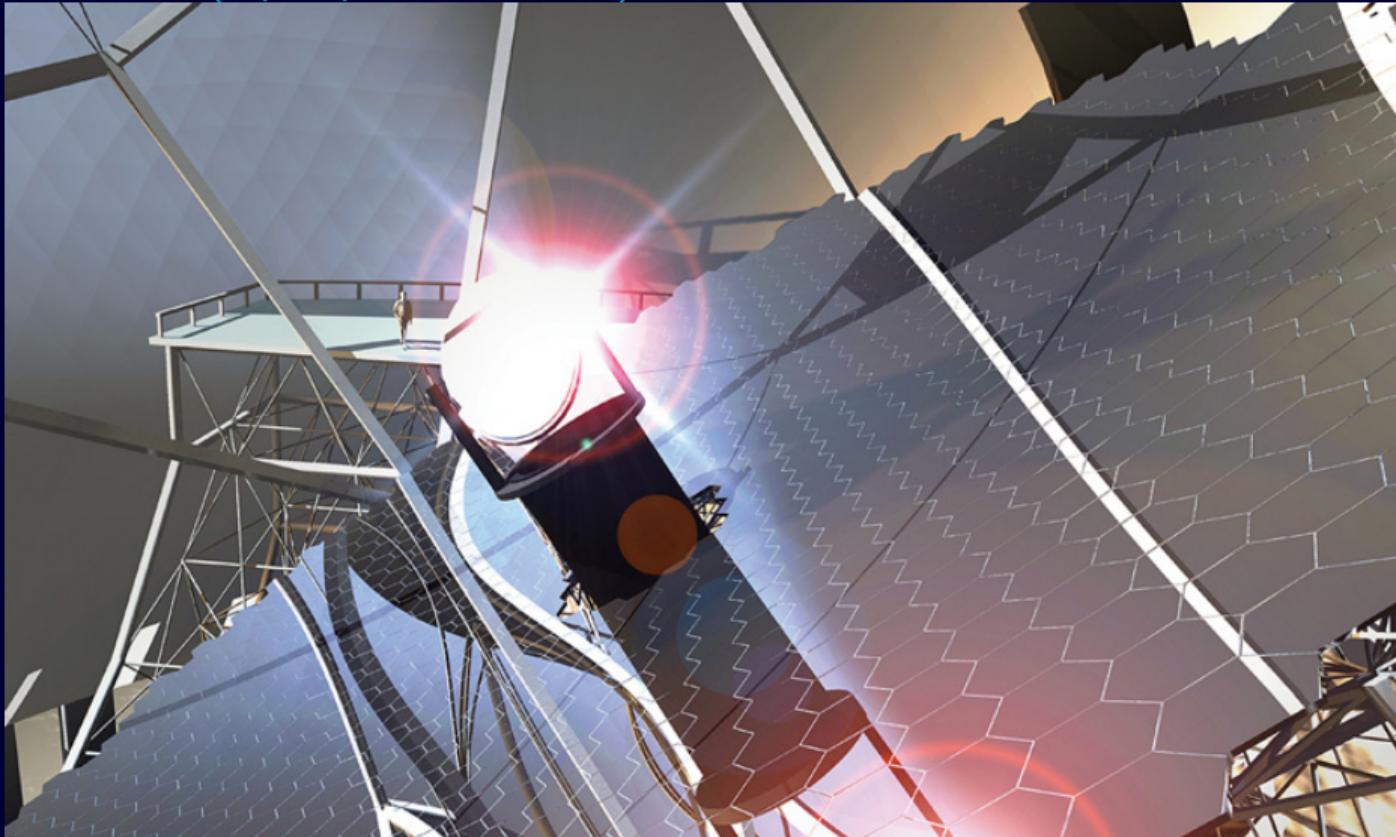


# Одно- и многоэлементные инструменты



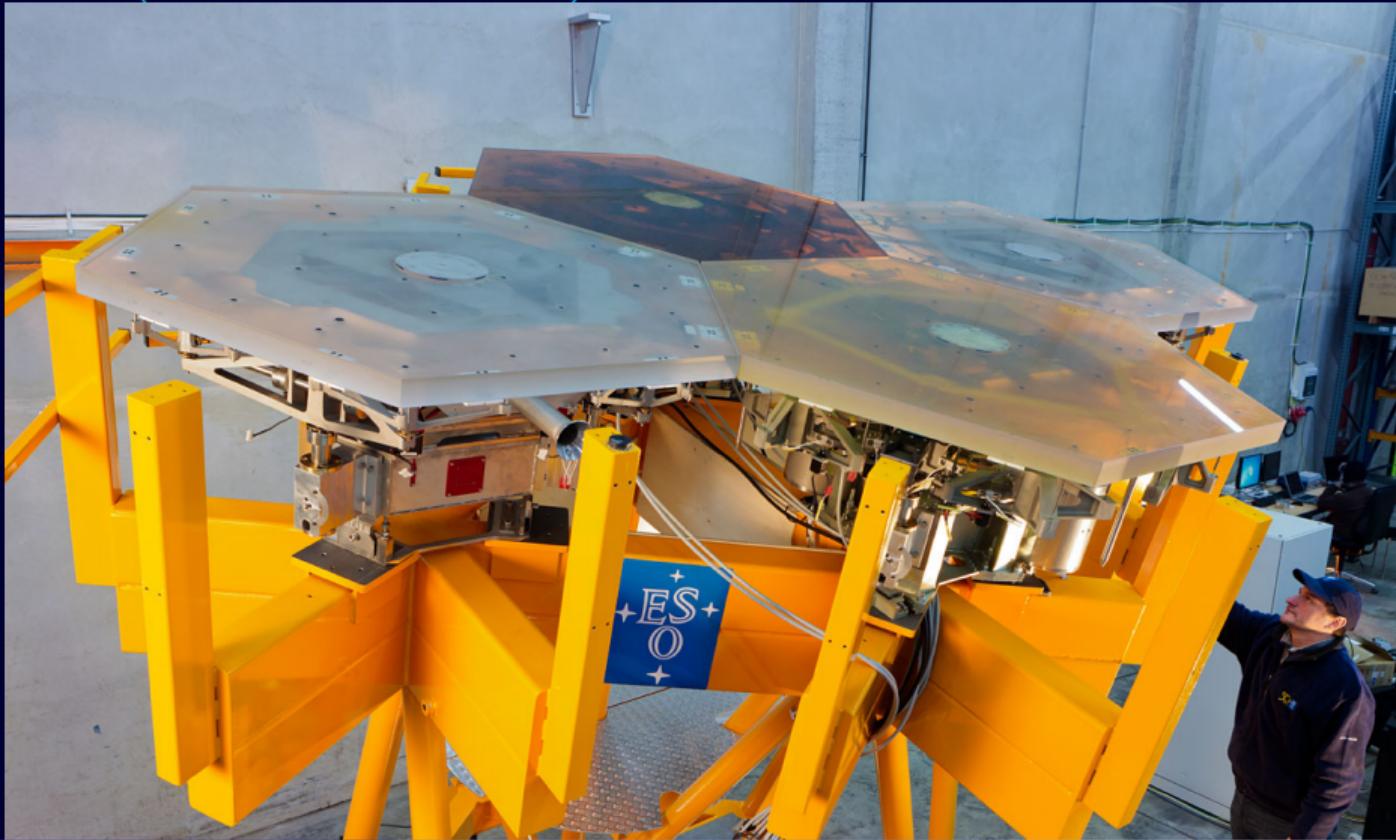
# Одно- и многоэлементные инструменты

39-м телескоп E-ELT (гора Армасонес, Чили).



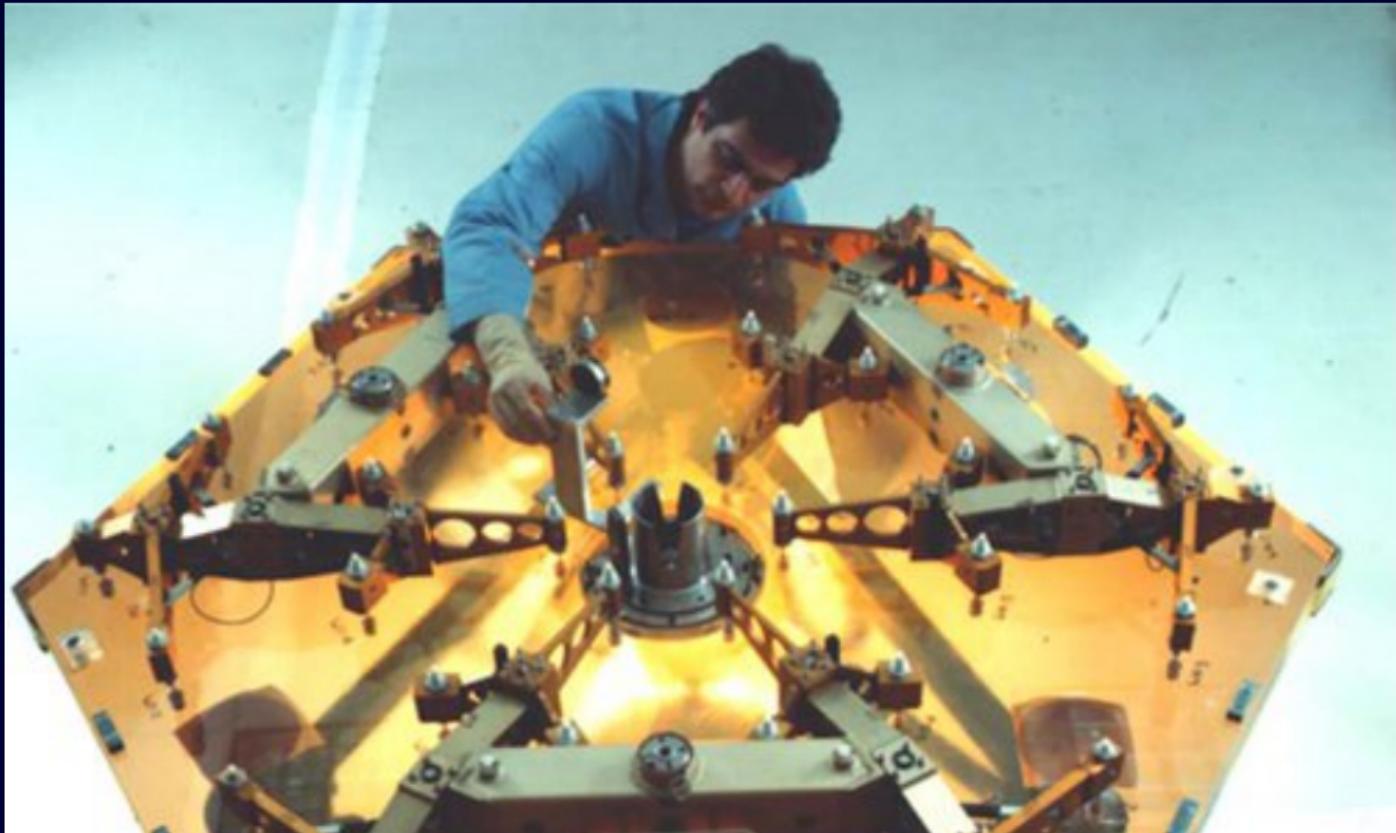
# Одно- и многоэлементные инструменты

Сегменты E-ELT (798 сегментов по 1.45 м)



# Одно- и многоэлементные инструменты

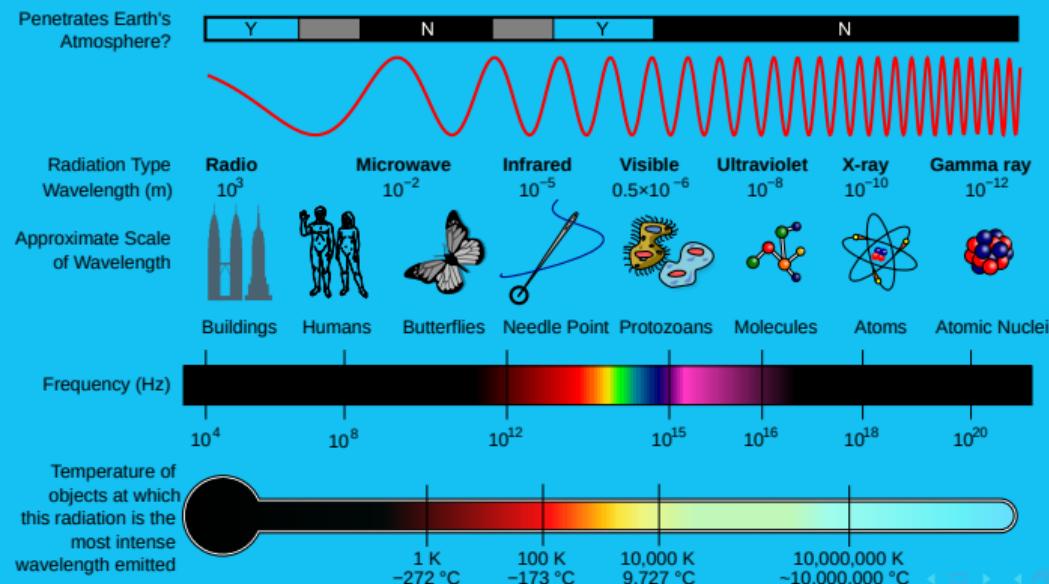
Сегменты Keck



# Сходства и различия оптических и радиотелескопов

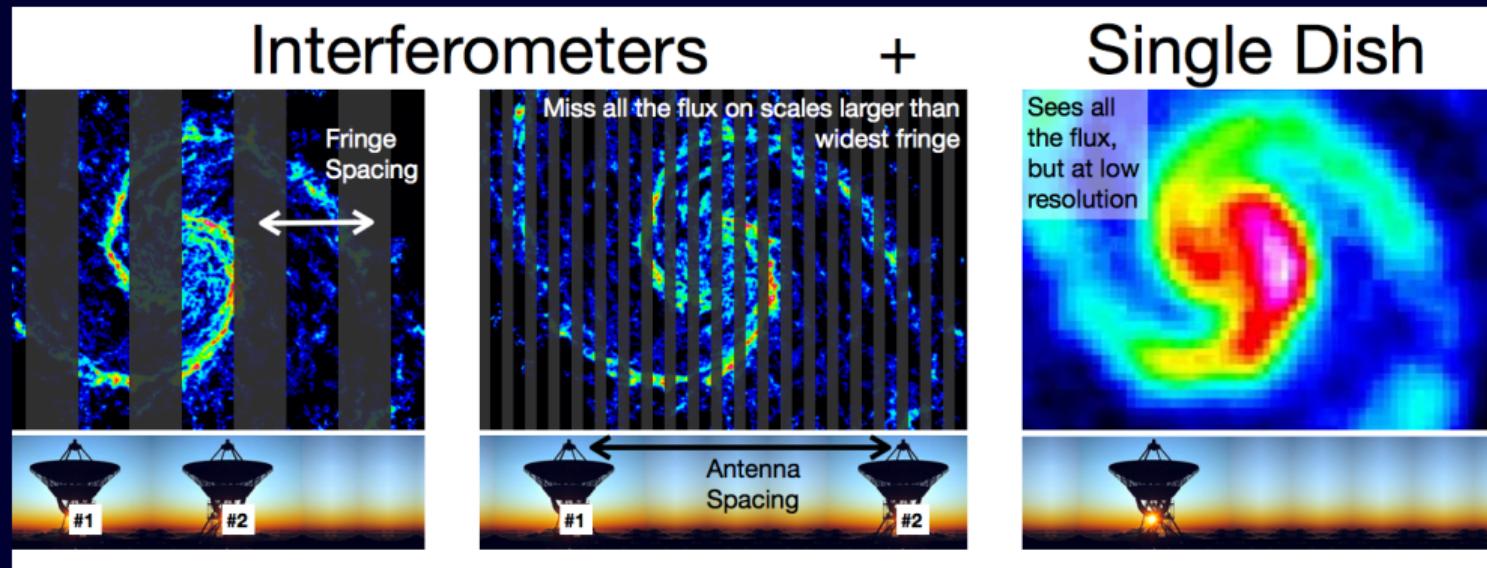
**Общие черты:** концентрация падающего излучения в фокальной плоскости.

**Разное:** длина волны  $\Rightarrow$  материал и качество поверхности; разные условия наблюдений (радиоволны проходят сквозь облака); разные задачи (физические условия, вызвавшие излучение; поглощение межзвездной средой и т.п.; различие методов интерферометрии).

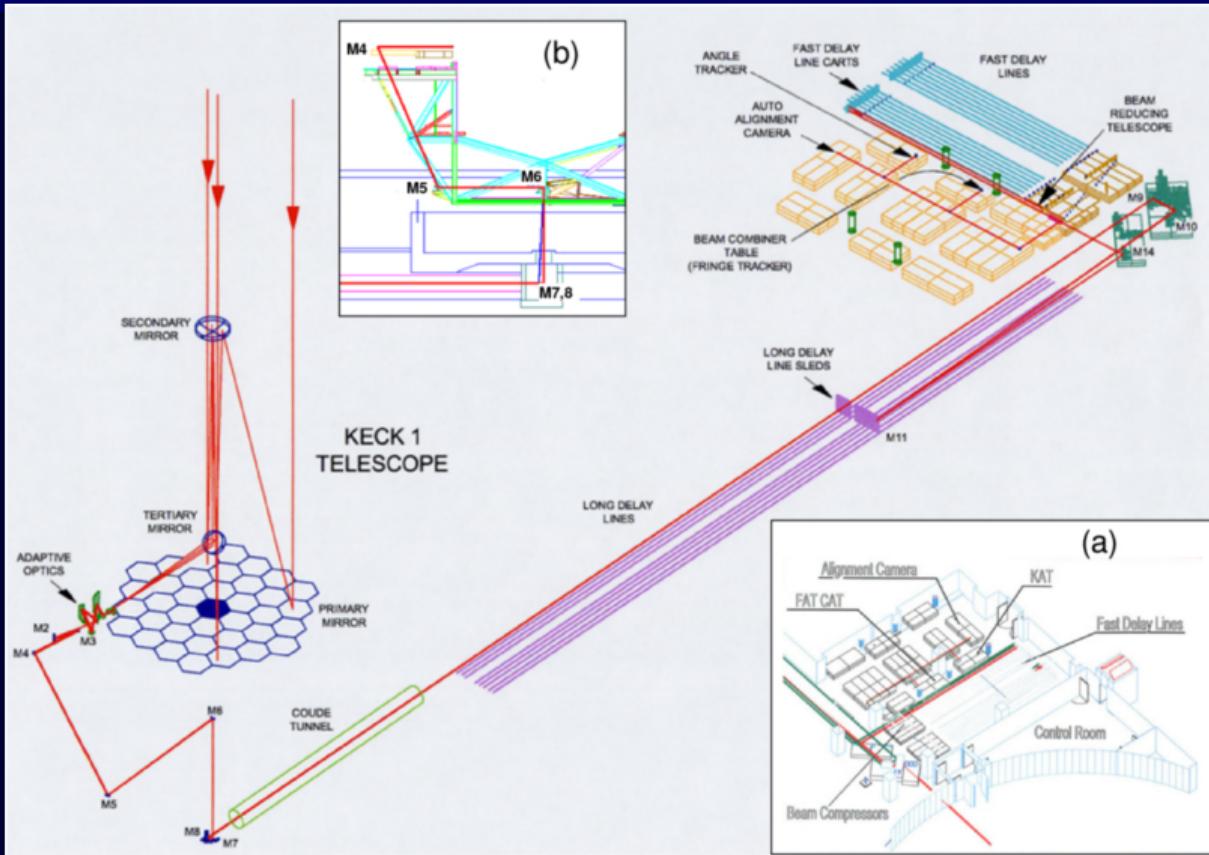


# Интерферометрия

**Астрономический интерферометр** — совокупность отдельных телескопов, сегментов зеркал или антенн, формирующих единое целое для повышения углового разрешения. Получение высоких разрешений на малых телескопах.



# Интерферометрия

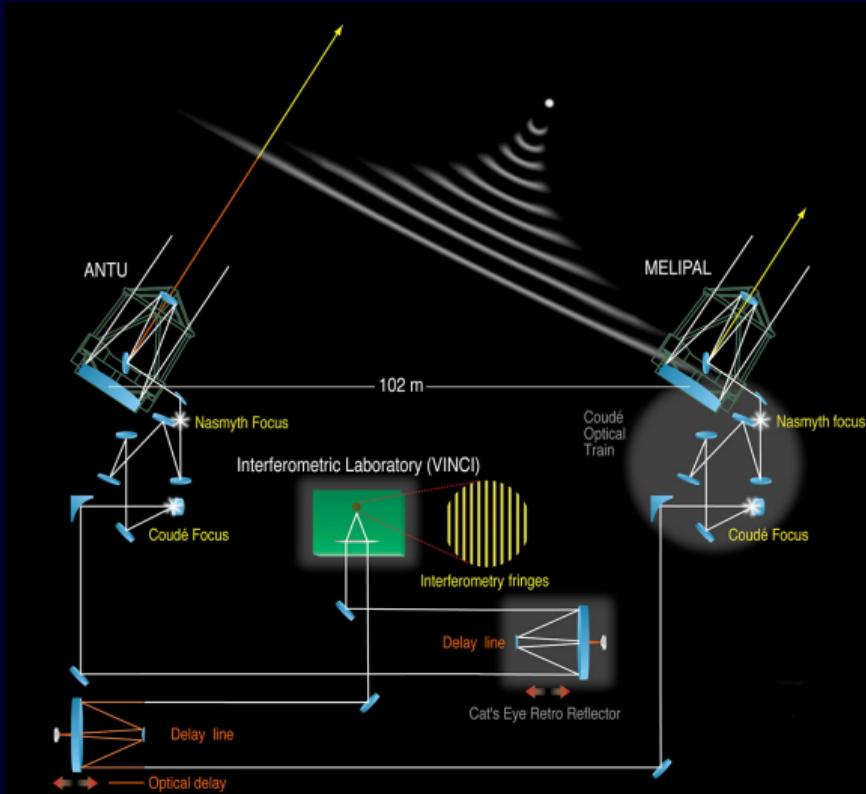


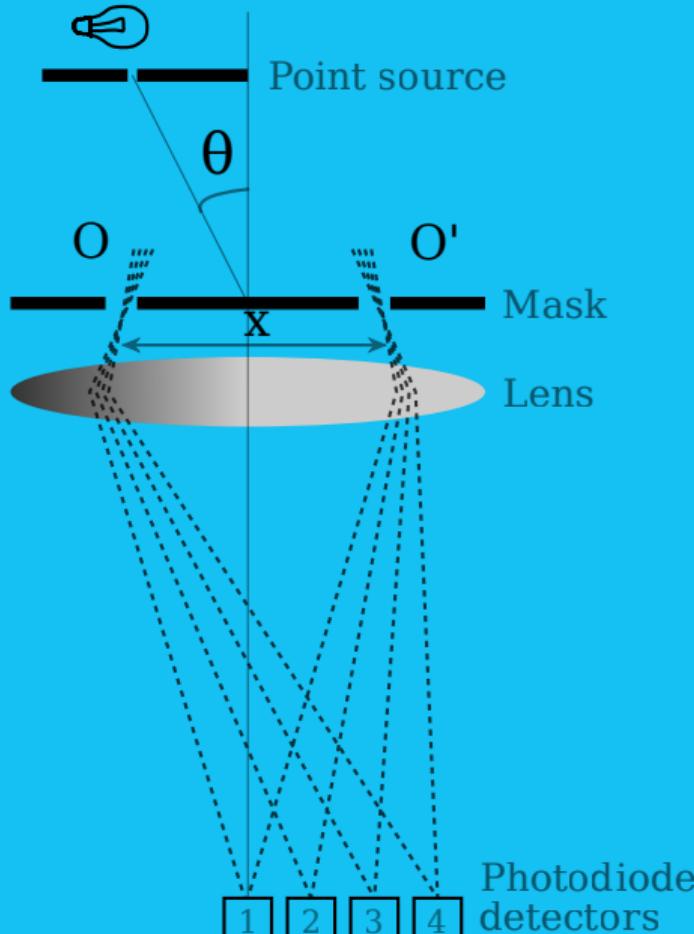
# Интерферометрия



# Интерферометрия

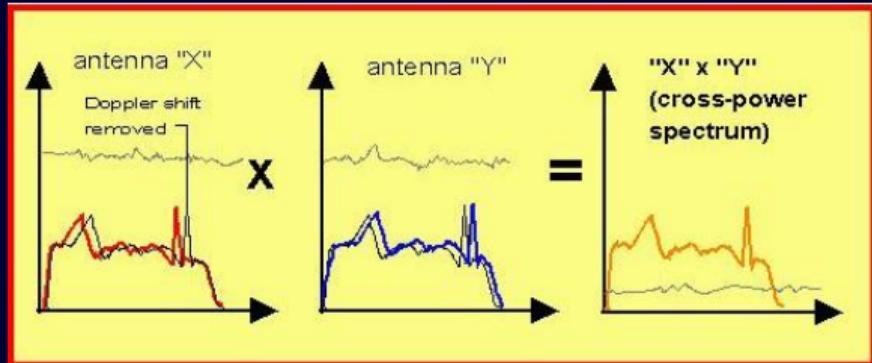
VLT.





Разрешение (до  $0.001''$ ) компонент двойных звезд, поиск экзопланет. Измерение движения звезд (сдвиги полос) или непосредственно планет («обнуляющая» интерферометрия, Keck).

# Радиоинтерферометрия



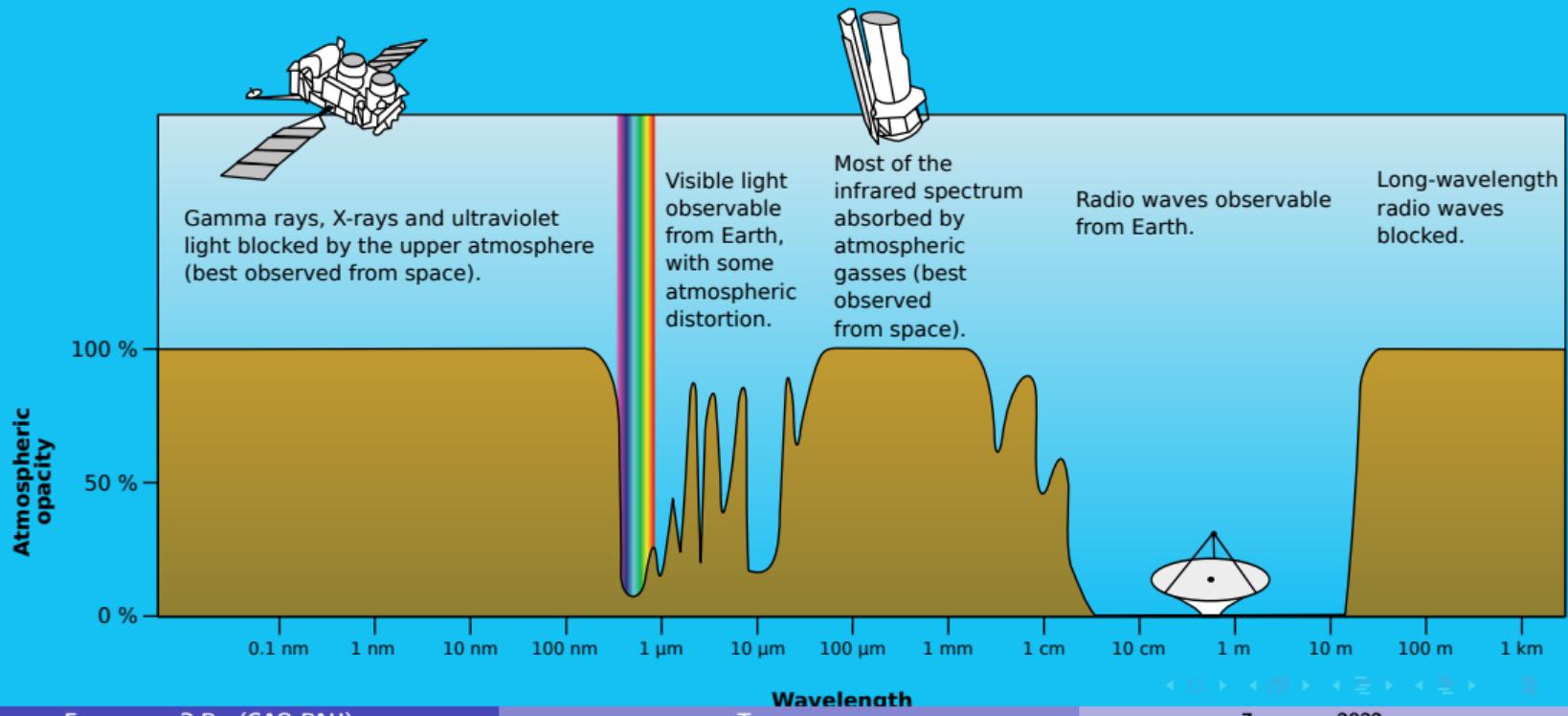
## Сверхдлинная база

РСДБ-интерферометр. Данные собираются независимо. Далее осуществляется корреляционная обработка. Квазар-КВО (координатно-временное обеспечение).



# Земная атмосфера

Наземная астрофизика сильно сжата в спектральном диапазоне земной атмосферой.



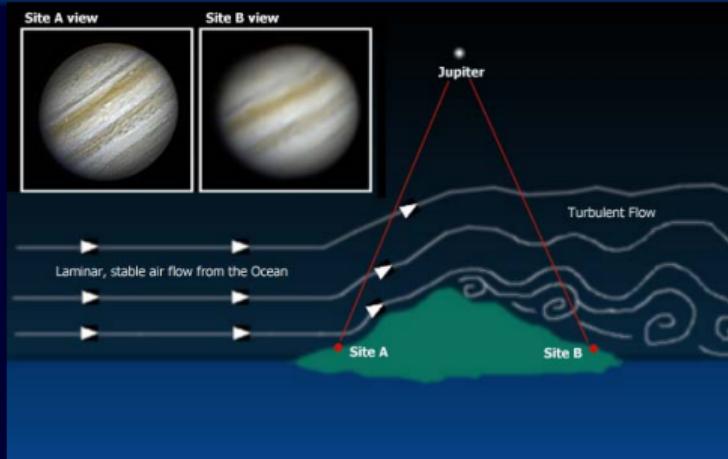
# Качество изображения (seeing)

- Полуширина (FWHM) изображения звезды.
- $r_0$  (типичный размер неоднородности — параметр Фрида) и  $t_0$  («время заморозки»).
- Профиль  $C_{N^2}$  (может измеряться напрямую, напр. MASS –Multi Aperture Scintillation Sensor).

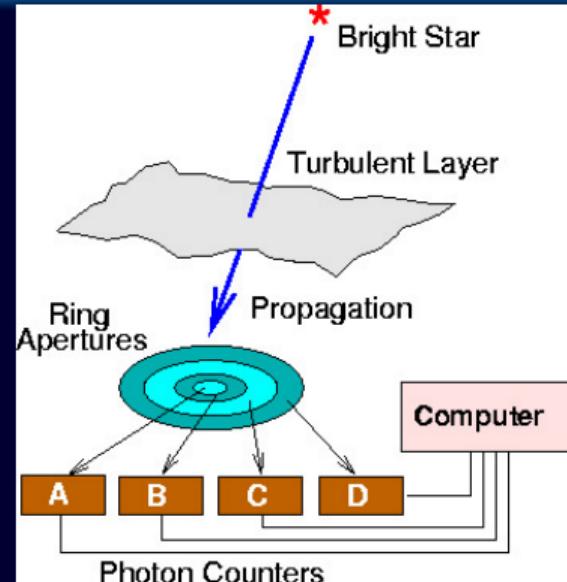
Вариация фазы ВФ на входной апертуре:

$$\sigma^2 = 1.0299 \left( \frac{d}{r_0} \right)^{5/3}.$$

$$r_0 = \left( \frac{16.7 \lambda^{-2}}{\cos Z} \int_0^\infty C_N^2(h) dh \right)^{-3/5}$$



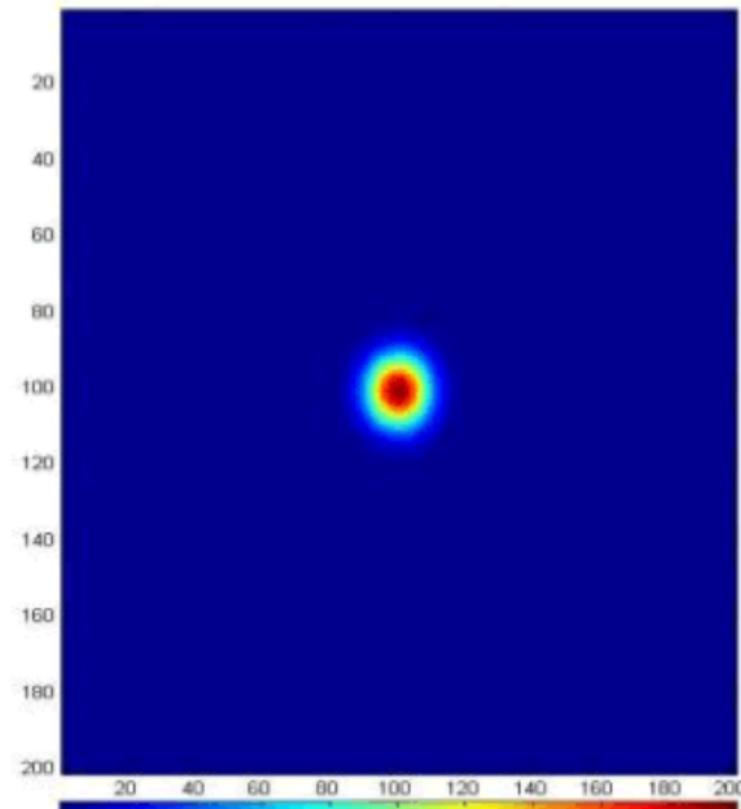
Наилучшее место — горы посреди океана.



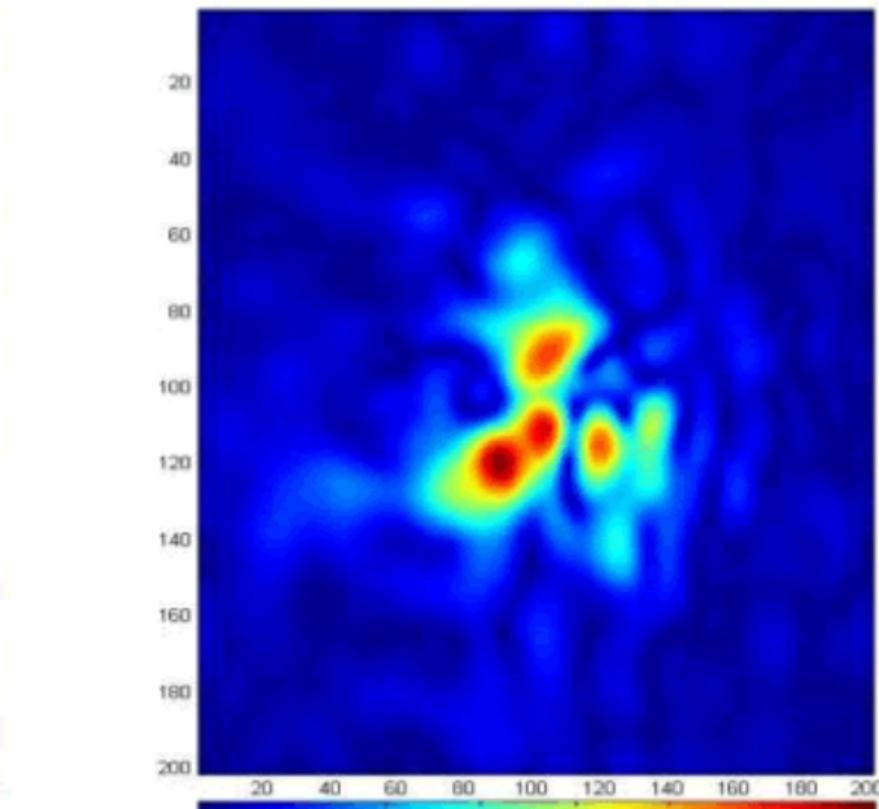
# Tip-tilt коррекция



# Спектр-интерферометрия



Емельянов Э.В. (САО РАН)



Телескопы

7 апреля 2022 года



39 / 49

# Спектр-интерферометрия

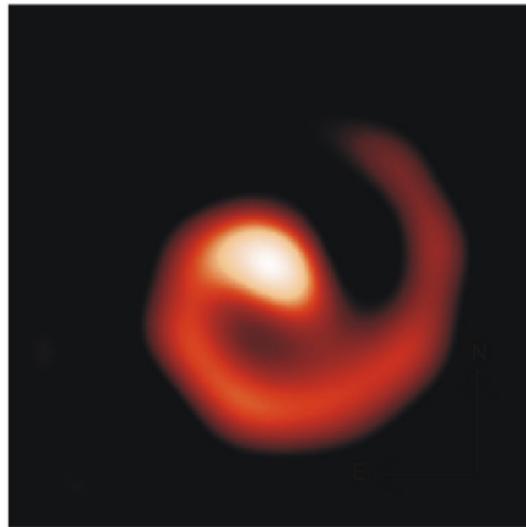
1970, Antoine Labeyrie — математические основы СИ (методы Фурье-анализа).

**Спектр мощности** — БПФ полуинварианта 2 порядка (напр. автокорреляции). **Биспектр** — БПФ полуинварианта 3 порядка. Теорема свертки:  $\mathcal{F}(f * g) = \mathcal{F}(f) \cdot \mathcal{F}(g)$   $\Rightarrow$  биспектр  $B(f_1, f_2) = \mathcal{F}^*(f_1 + f_2) \cdot \mathcal{F}(f_1) \cdot \mathcal{F}(f_2)$ .

## WR 104 at 2.27 Microns

April 98

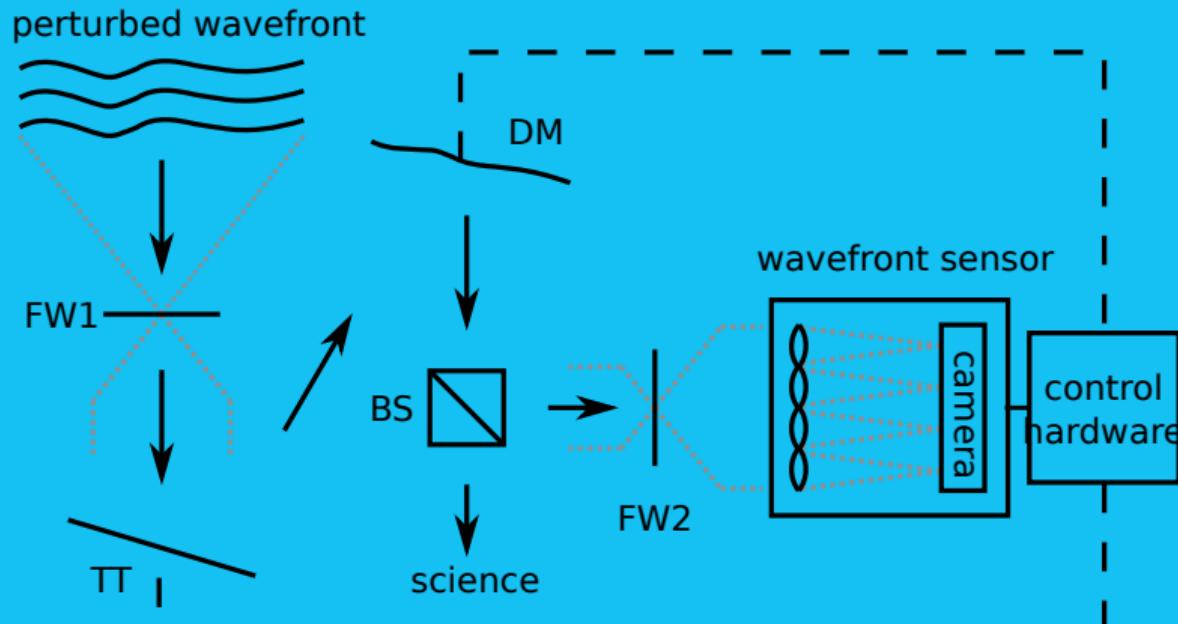
1/10 arcsec



160 AU

# Адаптивная оптика

Horace W. Babcock, 1953 — теория АО. Бурное развитие в 90-х в рамках холодной войны.  
Искусственная звезда, tip-tilt зеркало, деформируемое зеркало, делитель пучка, датчик волнового фронта.



# Адаптивная оптика



Емельянов Э.В. (CAO РАН)

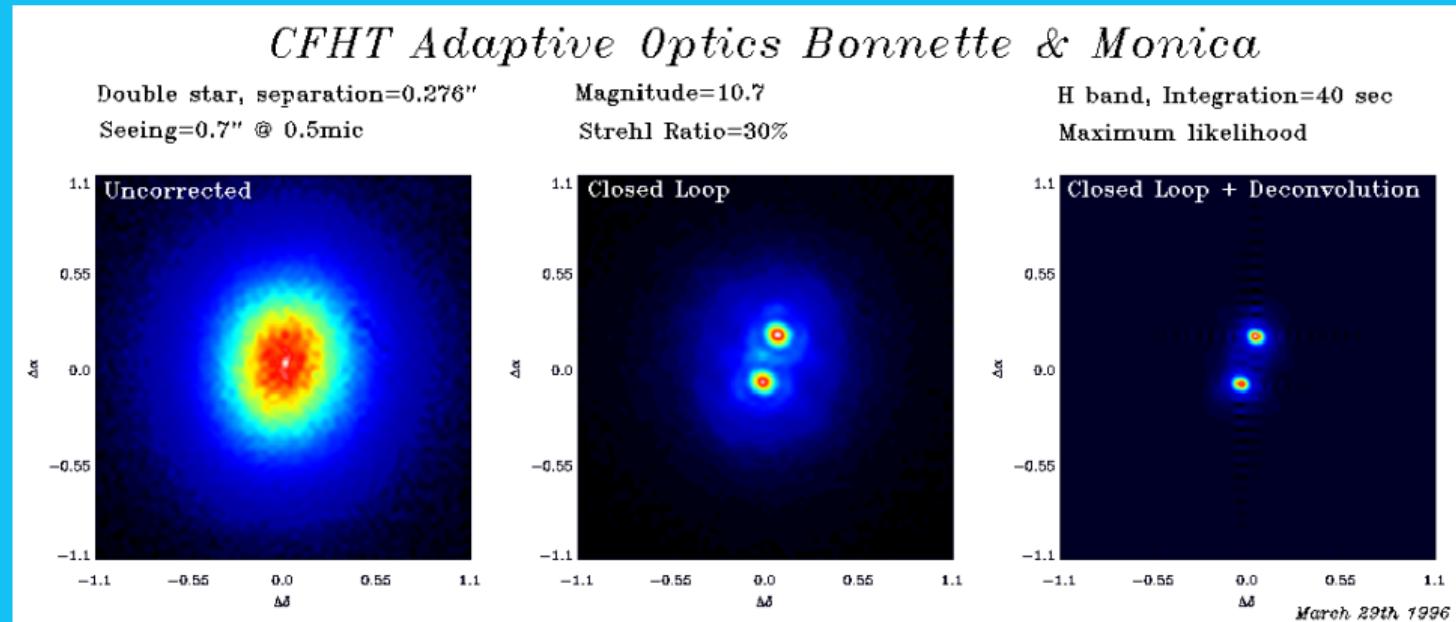
Телескопы



7 апреля 2022 года

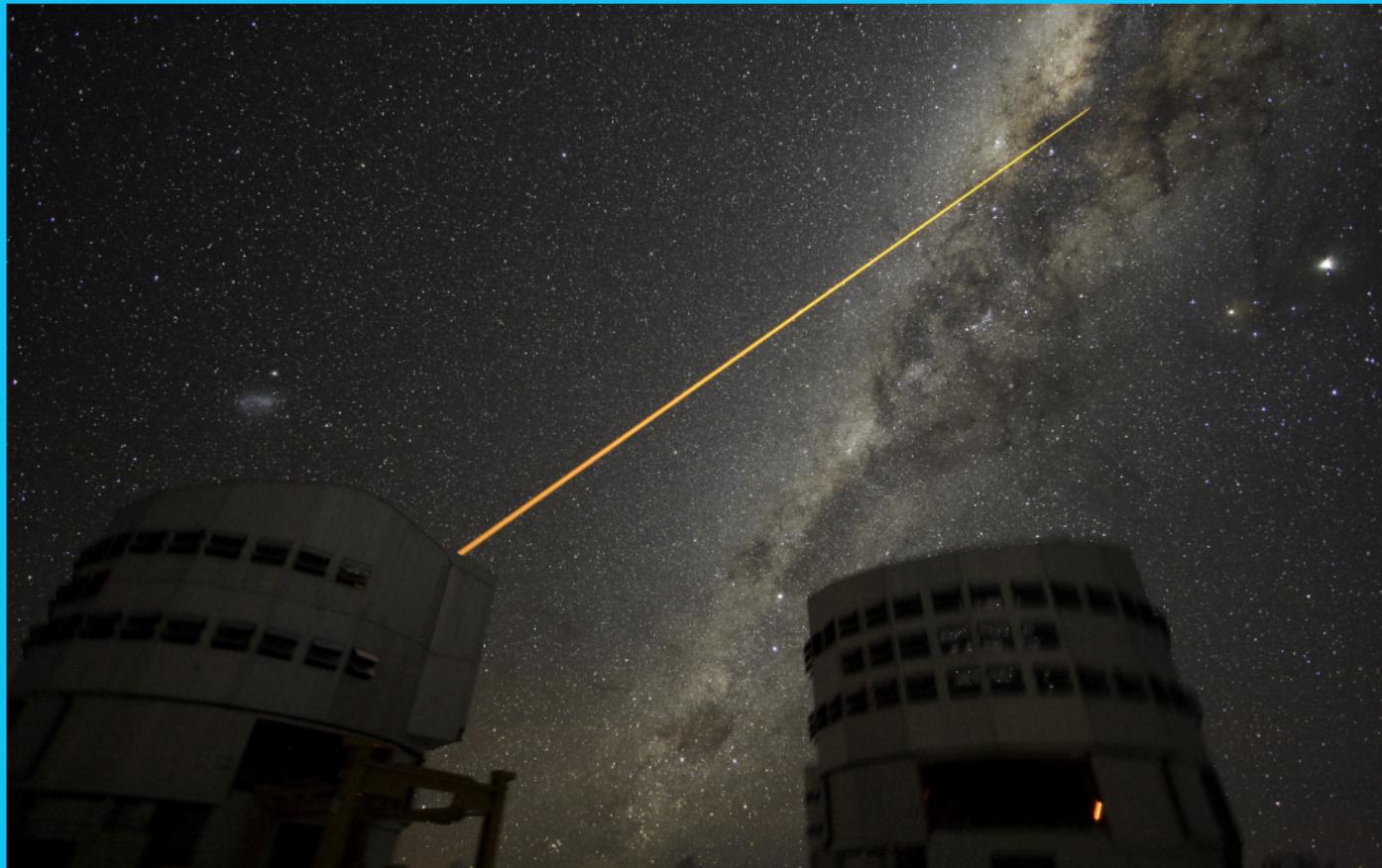
# Адаптивная оптика

30 ÷ 60 mas. Искусственные звезды: звезды Рэлея (ближний ИК, 15 ÷ 25 км) и натриевые (80 ÷ 100 км, 589 нм).

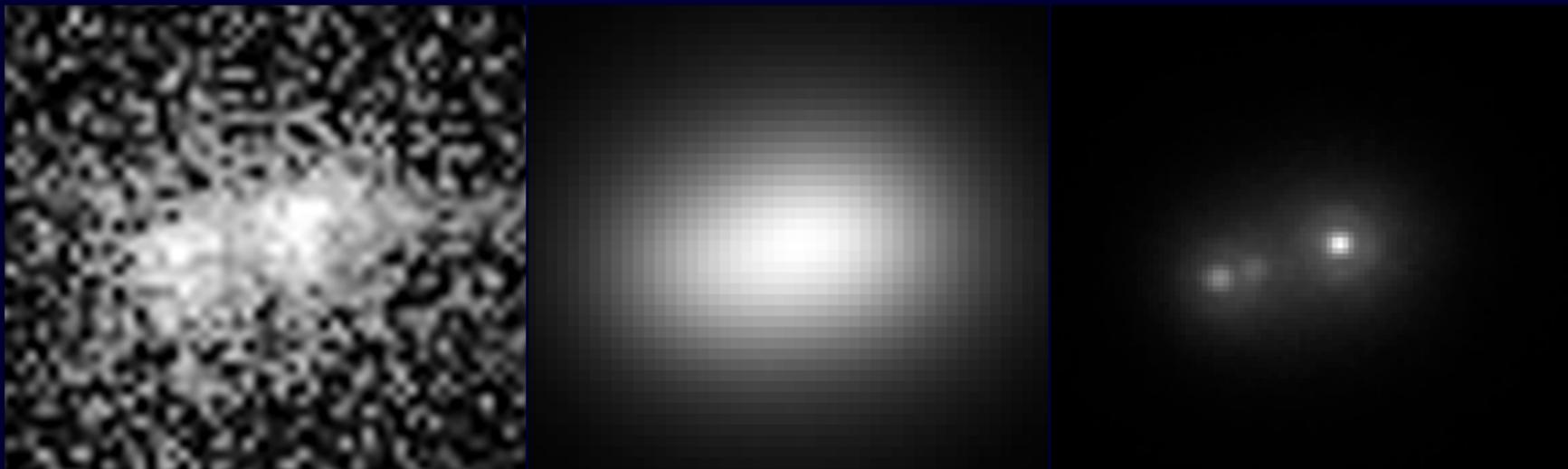


Только для ярких объектов!

# Адаптивная оптика



# Lucky-imaging, Superresolution



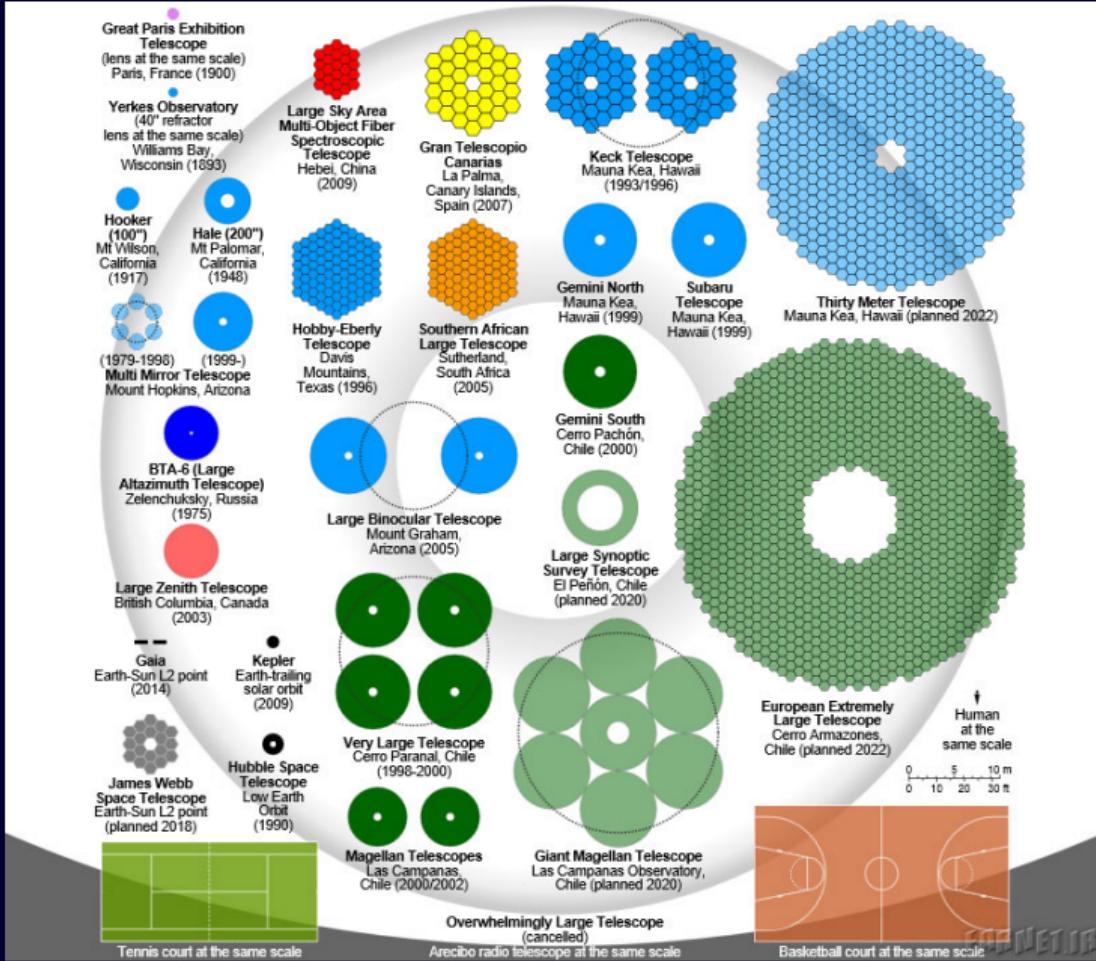
Куб данных с экспозициями  $10 \div 50$  мс.

Совмещение снимков с наименьшим числом Штреля.

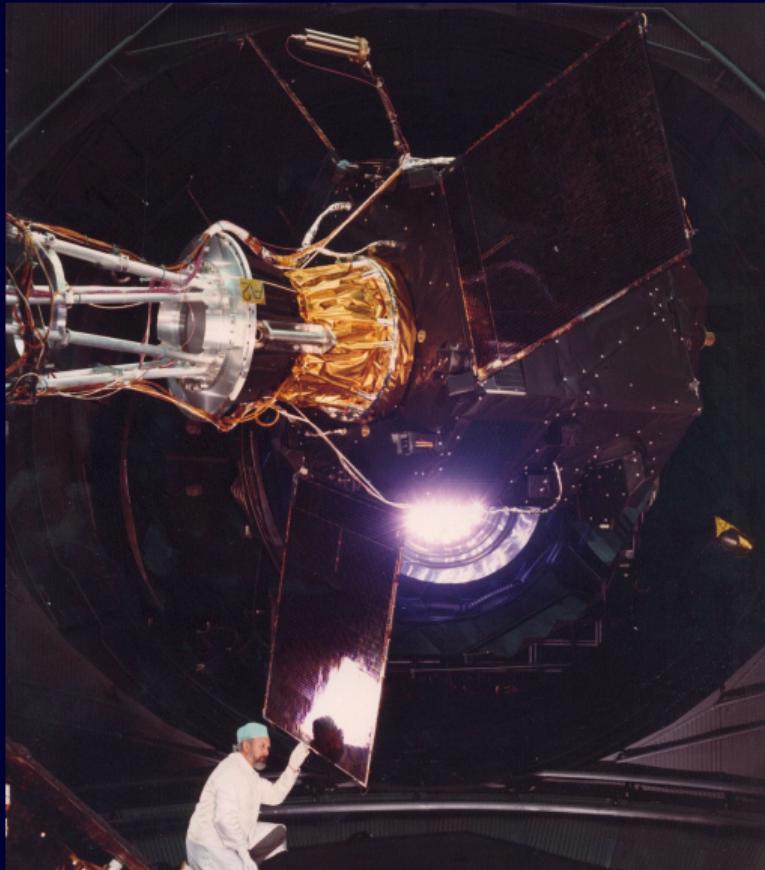
Усреднение.

Итог: было 900 mas, стало 40!

Для малых телескопов ( $D \leq r_0$ ) это Superresolution.



# Космические телескопы



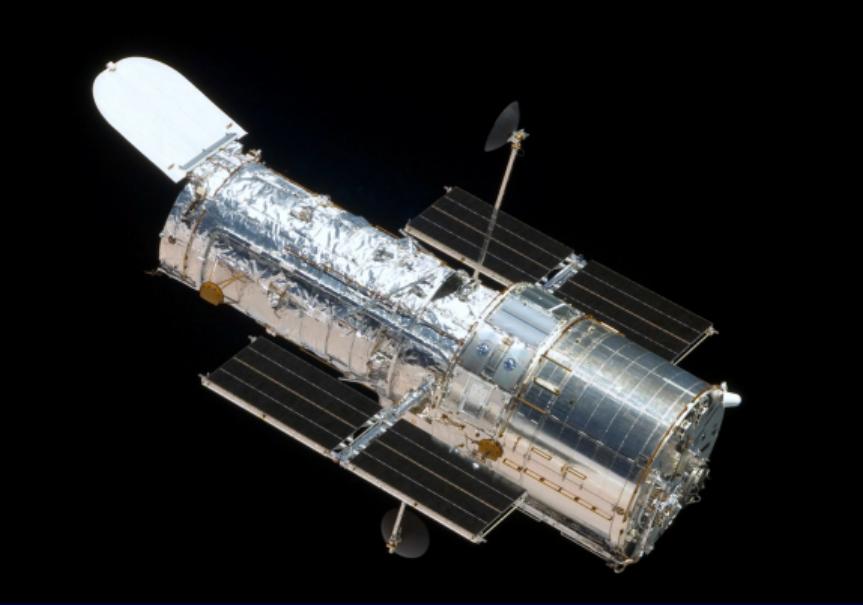
Емельянов Э.В. (САО РАН)

Телескопы

1989–1993, Hipparcos — High Precision Parallax Collecting Satellite. 29-см телескоп!

1mas. Каталоги Hipparcos (>118 тыс, 1997), Tycho (1 млн, 1997) и Tycho-2 (2.5 млн, 2000, более точный).

Следующая — миссия Gaia (2013,  $1.45 \times 0.5$  м).s



## Телескоп им. Хаббла

2.4 м зеркало.

1978 — стартовое финансирование, 36 млн.длр.

1986 — общий бюджет проекта вырос до 1.175 млрд.длр.

25 апреля 1990 г. — запуск —  $\sum$  2.5 млрд.длр.

1999 — около 6 млрд.длр. + 593 млн.евр. от ЕКА.

Четыре экспедиции.

# Hubble Probes the Early Universe



**1990**

Ground-based observatories



**1995**

Hubble Deep Field



**2004**

Hubble Ultra Deep Field



**2010**

Hubble Ultra Deep Field-IR



**FUTURE**

James Webb Space Telescope

Redshift ( $z$ ):

Time after  
the Big Bang Present

**1**

6  
billion  
years

**4**

1.5  
billion  
years

**5**

800  
million  
years

**6**

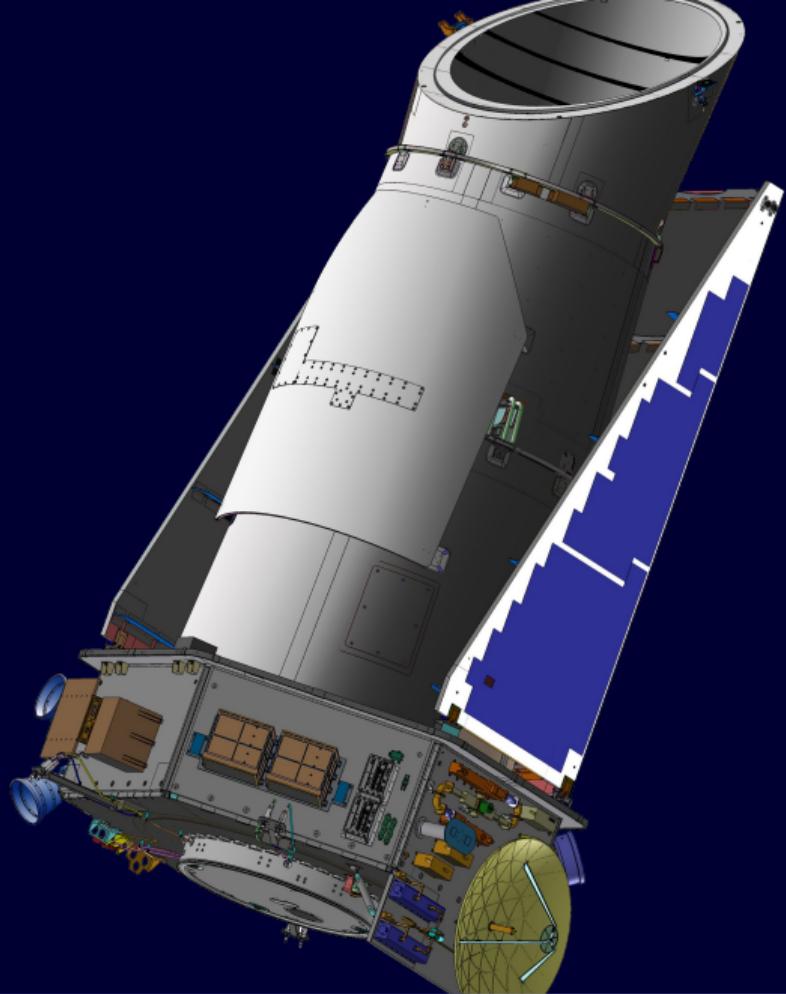
480  
million  
years

**7**

200  
million  
years

**8**

>20



## Телескоп Кеплера

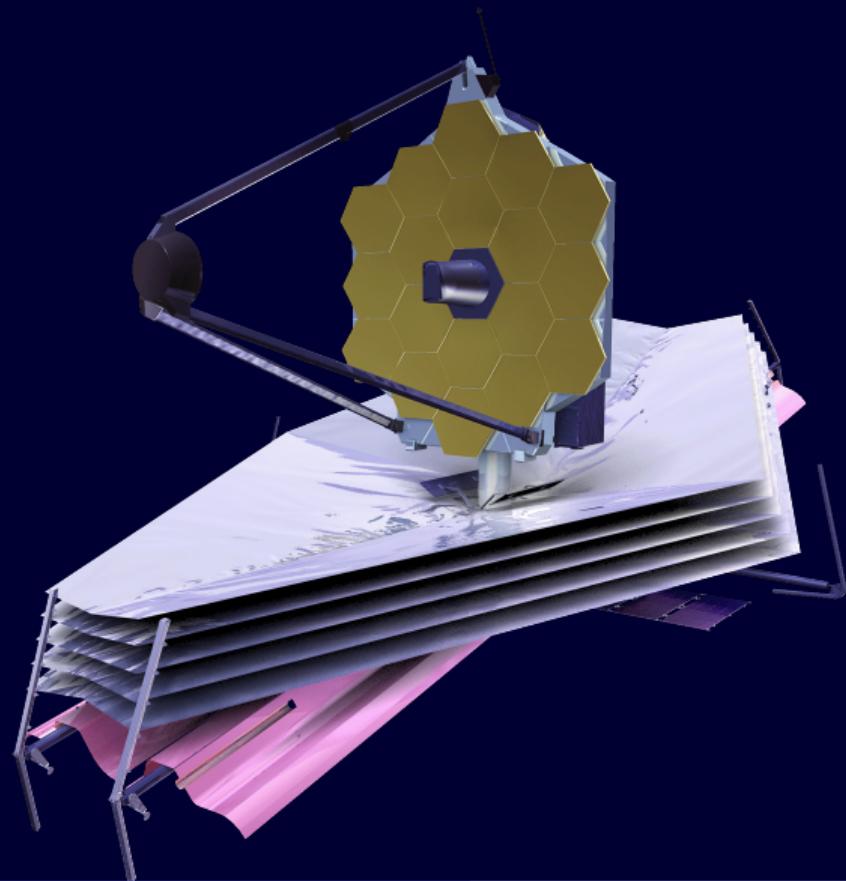
2009–2013, 2013–, поиск экзопланет и переменных звезд. 0.95 м апертура, зеркало 1.4 м (камера Шмидта).  
42 ПЗС 2200x1024.

~ 0.5 млрд.длр.

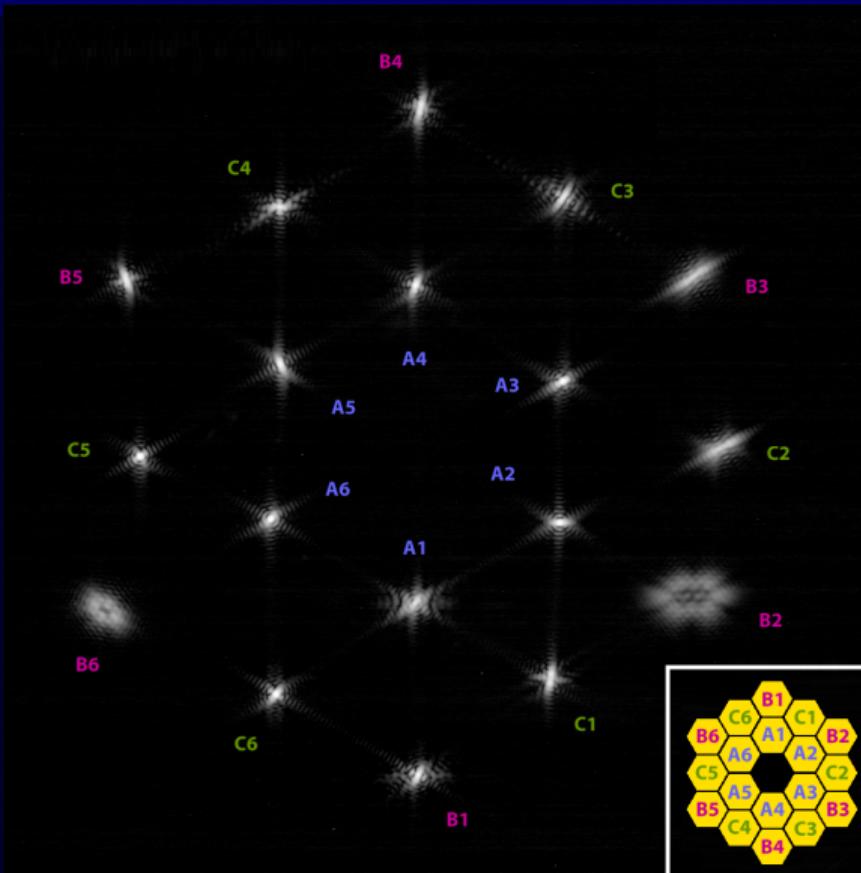
Цель — 13.2 млн. звезд. Только в 2009 г было обнаружено 7500 переменных звезд в списке целей на поиски экзопланет.

К маю 2016 обнаружено 1284 планеты (из них 550 каменных, 9 в обитаемой зоне).

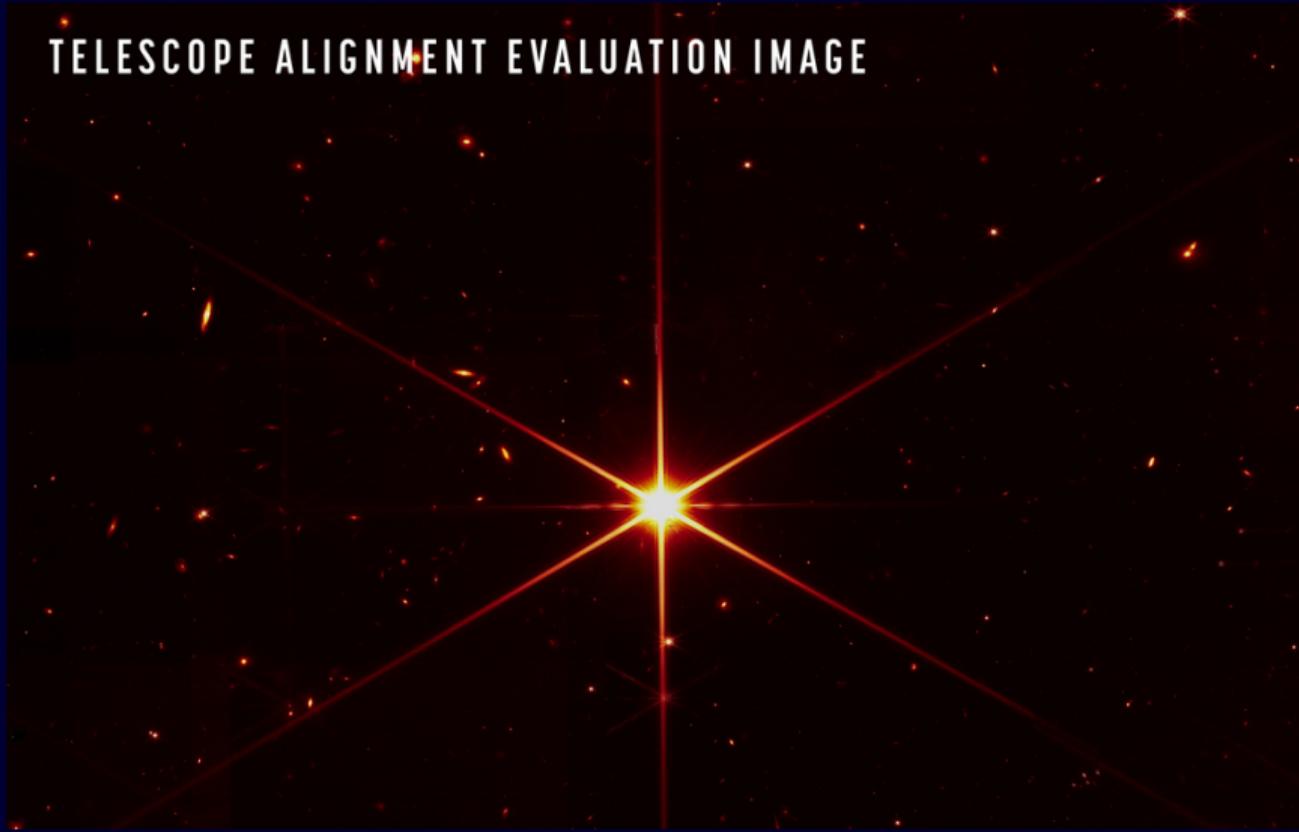
30 октября 2018 г миссия завершена. Отключили в день смерти И. Кеплера: 15 ноября. Изучено 530506 звезд, обнаружено 2662 экзопланеты. На смену пришел TESS.



25 декабря 2021 года.  $D = 6.5$  м,  $F = 131.4$  м. Инструменты: MIRI (камера среднего ИК), NIRCam (камера ближнего ИК), NIRSpec (спектрограф ближнего ИК), FGS /NIRISS (датчик точного наведения с бесщелевым спектрографом ближнего ИК).  
Орбита в  $L_2$  Земля–Солнце (1.5 млн. км. от Земли). Позволяет частично экранировать излучение Солнца.



## TELESCOPE ALIGNMENT EVALUATION IMAGE



# Оптические небылицы

«Гиперболоид инженера Гарина» — сведение потока излучения в сверхтонкий пучок: нулевой размер осветителя, отсутствие aberrаций, отсутствие дифракции.

За большое поле зрения приходится платить малым усилением. Закон Лагранжа–Гельмгольца:  $\alpha y n = \alpha' y' n'$  ( $\alpha$  – угл. размер апертуры из точки объекта,  $y$  – линейный размер объекта,  $n$  – показатель преломления).

Необратимые явления: дифракция, рассеяние, поглощение.

**Угловое увеличение телескопа.** Звезды ( $\Delta$  – зрачок глаза):

$$\frac{L}{L_0} = \left( \frac{D}{D_{out}} \right)^2 \left( \frac{D_{out}}{\Delta} \right)^2 = \left( \frac{D}{\Delta} \right)^2.$$

Однако, качество изображения:  $seeing \sim 1'' \Rightarrow 1'$ . Нет смысла в увеличении больше  $\times 120$ . Для визуальных наблюдений нет смысла использовать телескоп более  $8 \cdot 120 \approx 1 \text{ м}!!!$

Планеты и туманности: освещенность пропорциональна  $(D/F)^2 \Rightarrow$  при равных светосилах освещенность не меняется! У звезд же (при условии согласования масштаба)  $\propto D^2$ .

А можно ли увидеть следы американцев на Луне? 50-метровый телескоп с идеальной оптикой на орбите — запросто!

# Спасибо за внимание!

**mailto**

[eddy@sao.ru](mailto:eddy@sao.ru)

[edward.emelianoff@gmail.com](mailto:edward.emelianoff@gmail.com)