

Инструменты в приближениях геометрической и волновой оптики

Емельянов Эдуард Владимирович

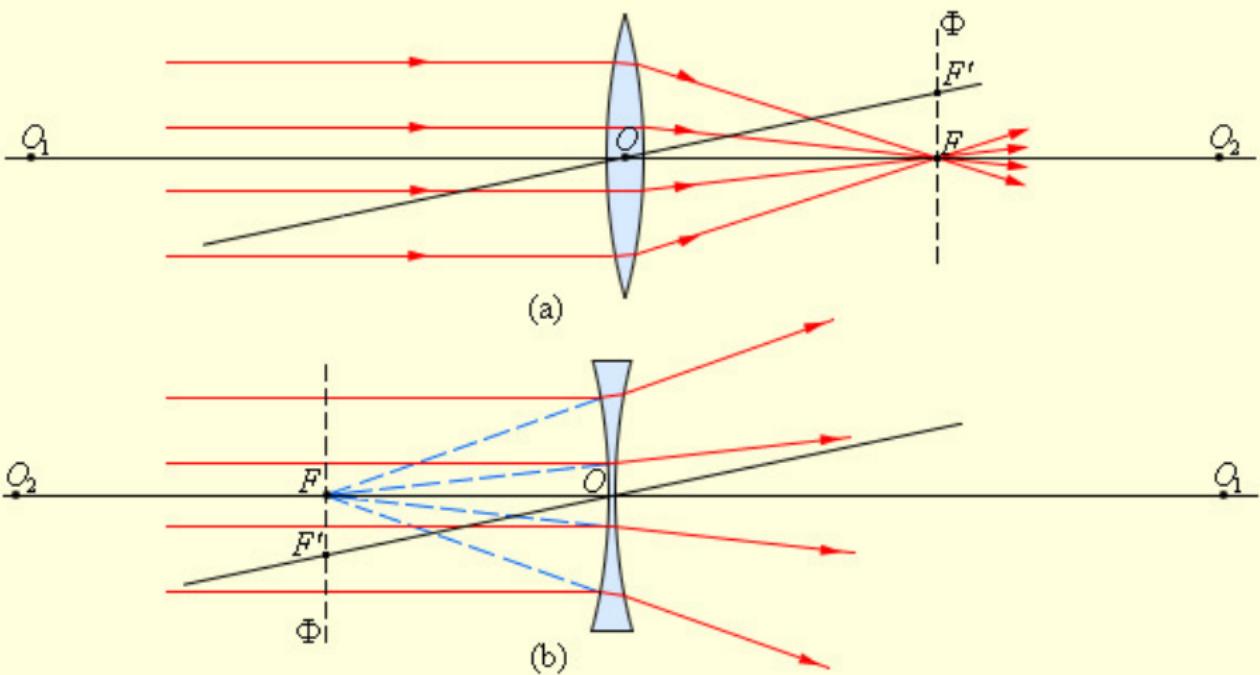
Специальная астрофизическая обсерватория РАН
Лаборатория обеспечения наблюдений

4 марта 2018 года

- 1 Телескоп как концентратор энергии
- 2 Формирование изображений линзами и зеркалами
 - Параксиальная оптика
 - Волновая оптика
- 3 Телескопы
 - Рефракторы
 - Рефлекторы
- 4 Аберрации
 - Измерение аберраций
- 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
- 11 Разное

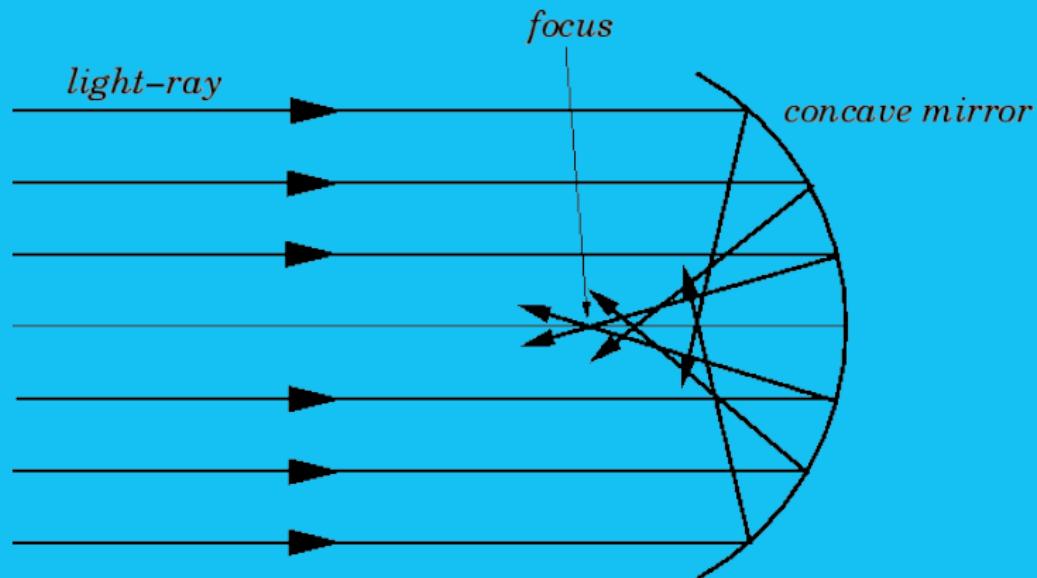
Ход лучей в линзе

Идеальная (тонкая) линза.



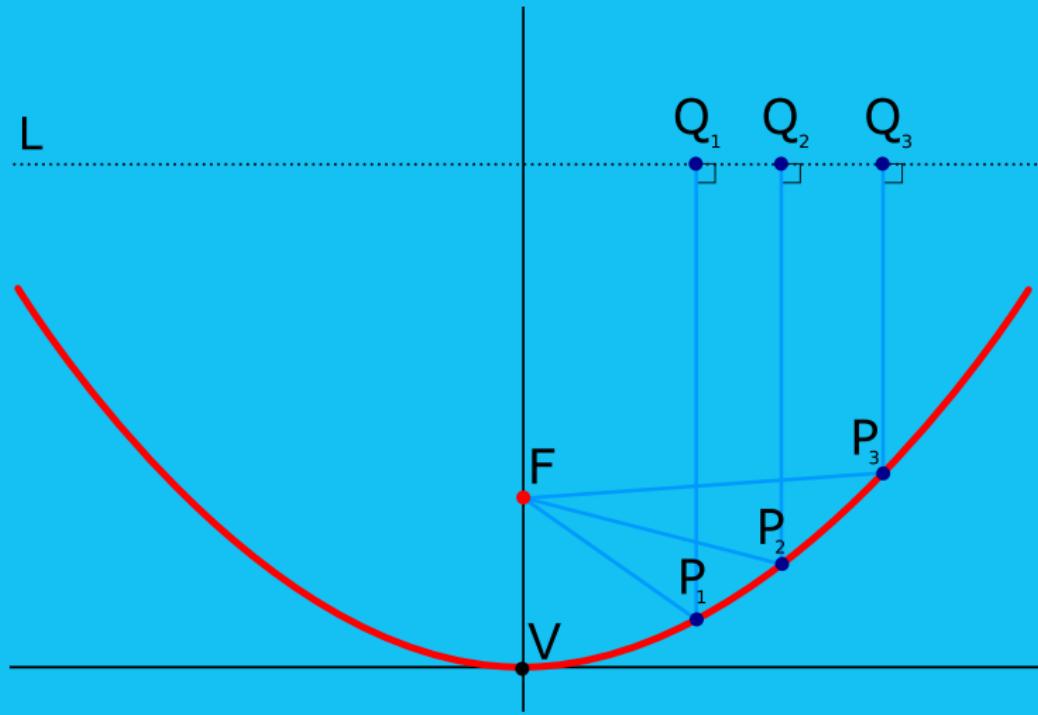
Конические сечения

Сфера. Сферическая aberrация.



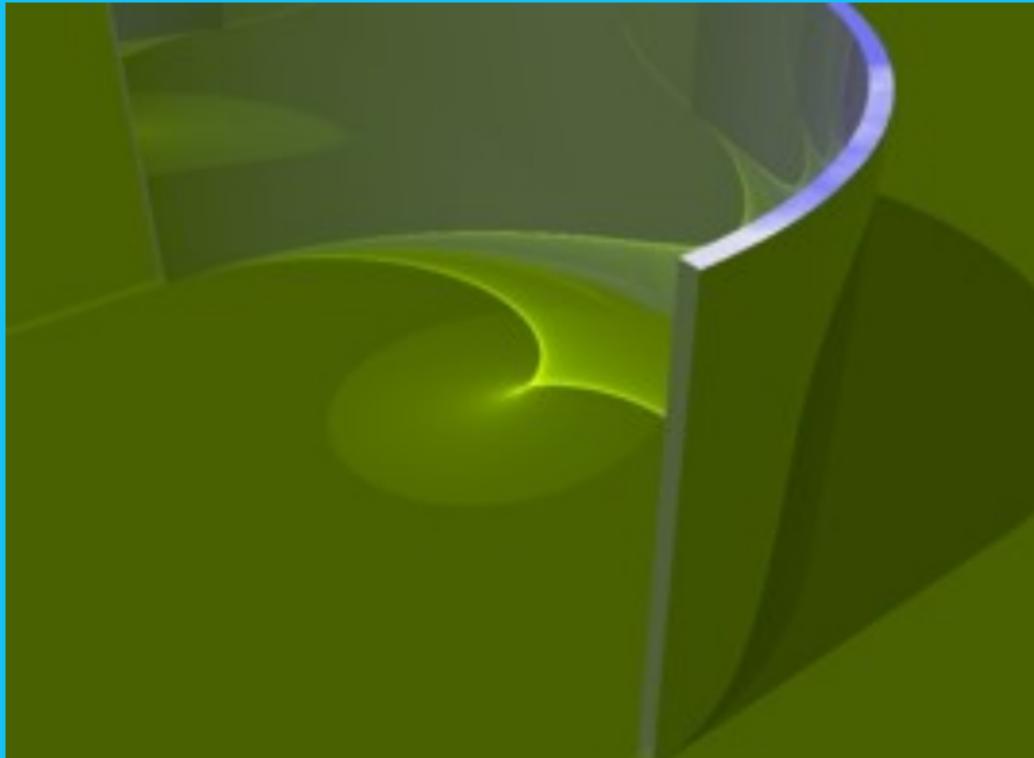
Конические сечения

Парабола.



Конические сечения

Каустика.



Принцип Гюйгенса–Френеля

Гипотеза: 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.

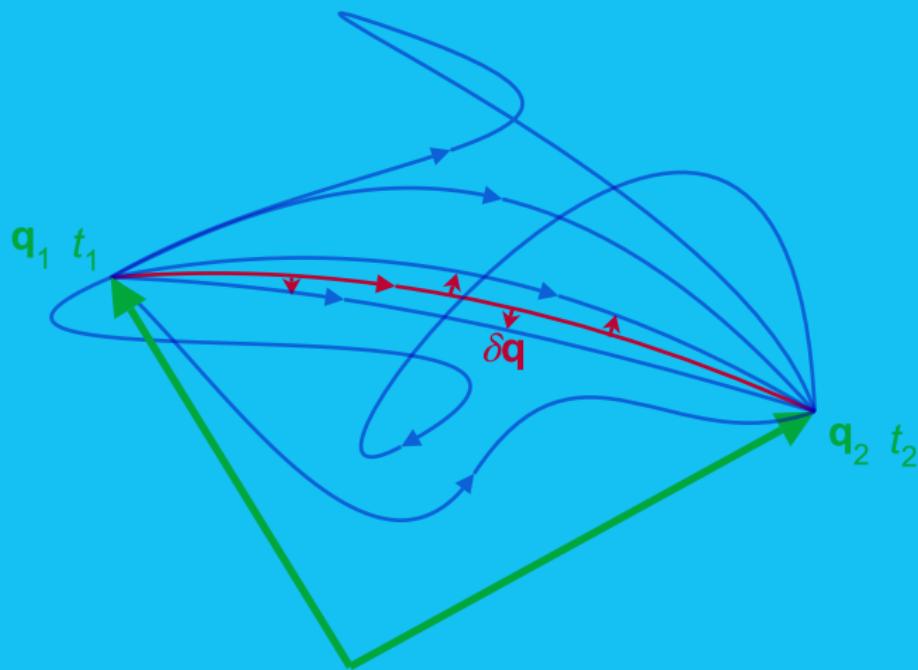
Густав Кирхгоф придал принципу Гюйгенса строгий математический вид, показав, что его можно считать приближенной формой теоремы, называемой интегральной теоремой Кирхгофа.

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.

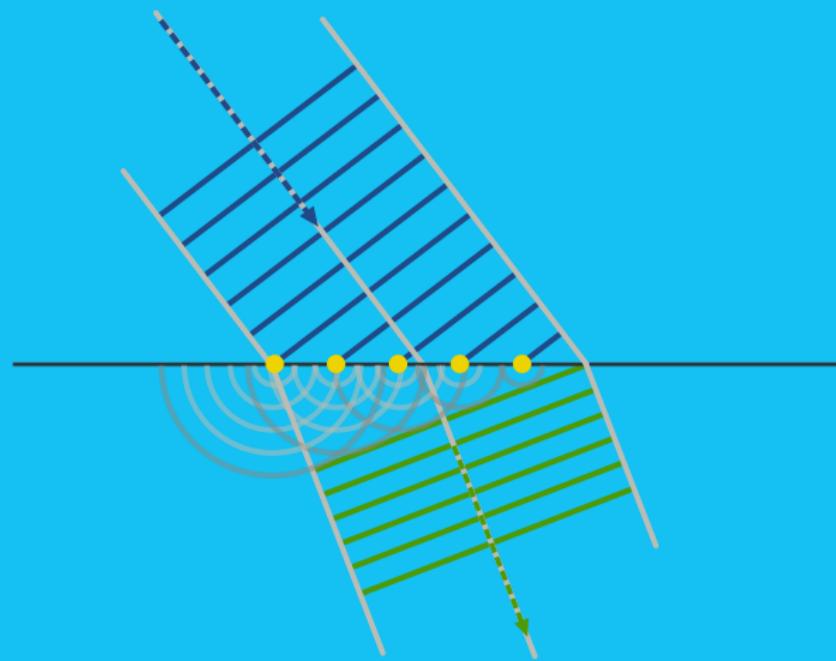
Принцип Гюйгенса–Френеля

Принцип Ферма.



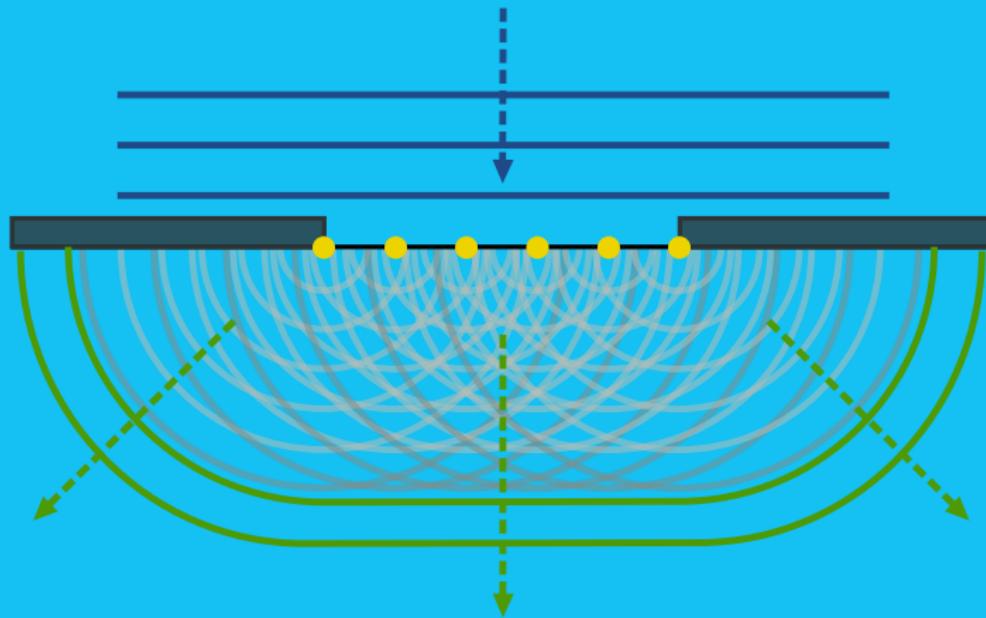
Принцип Гюйгенса–Френеля

Рефракция. (Рота солдат, мяч). Зависимость скорости света от длины волны.



Принцип Гюйгенса–Френеля

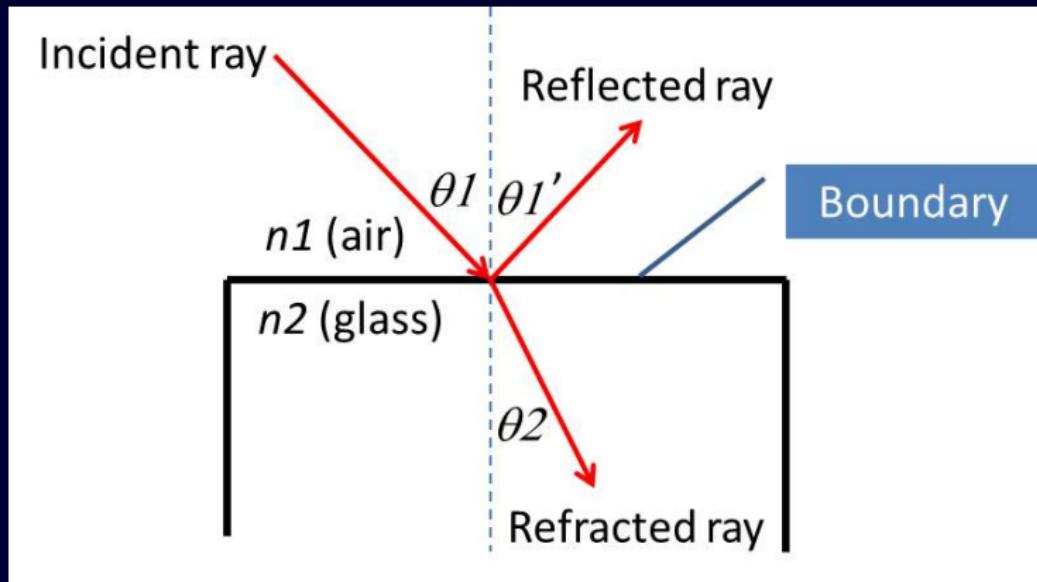
Дифракция на щели.



Закон Снеллиуса

Виллеборд Снелль (голл), начало XVII века:

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



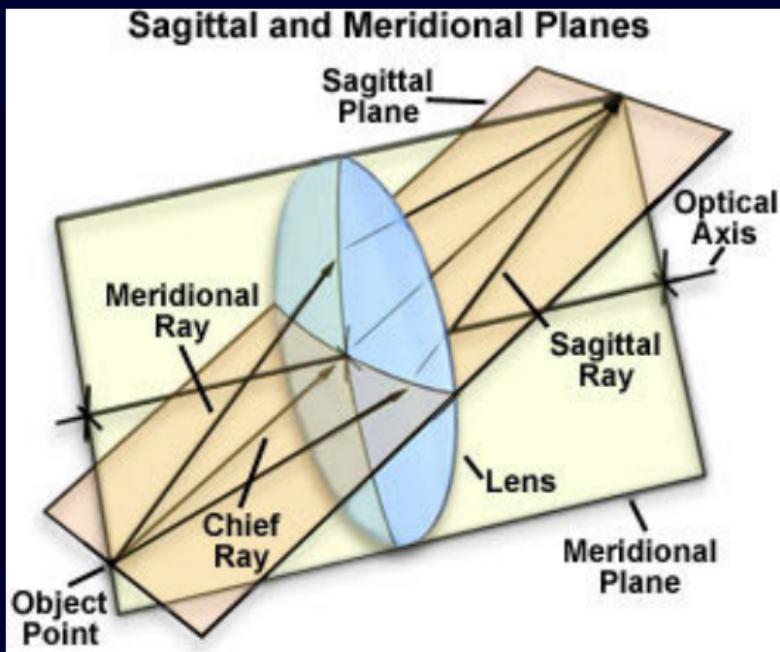
(До Снелля закон описал перс. математик ибн Сахль, который к тому же занимался и асферической оптикой)

Параксиальная (гауссова) оптика

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

$\sin \theta \approx \theta$, $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$ 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 $\theta = 10^\circ$.

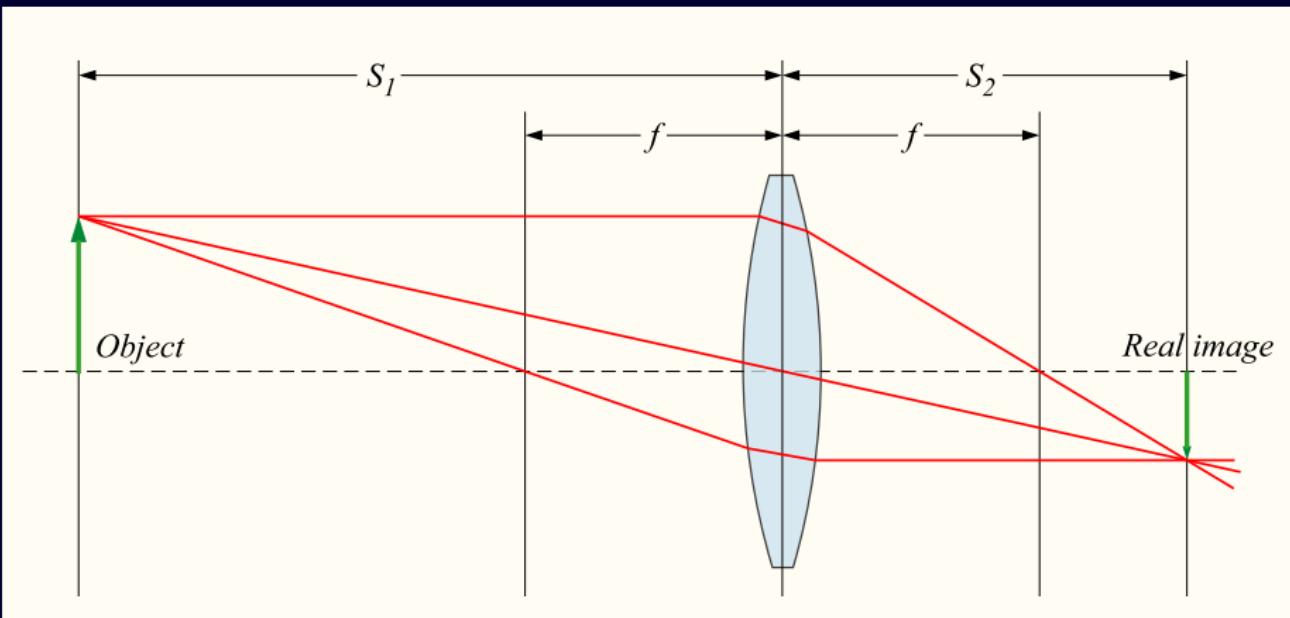
Для больших углов приходится различать меридиональные (плоскость «основной луч+оптическая ось») и сагиттальные лучи.



Формула тонкой линзы

Формула тонкой линзы.

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



Дисперсия



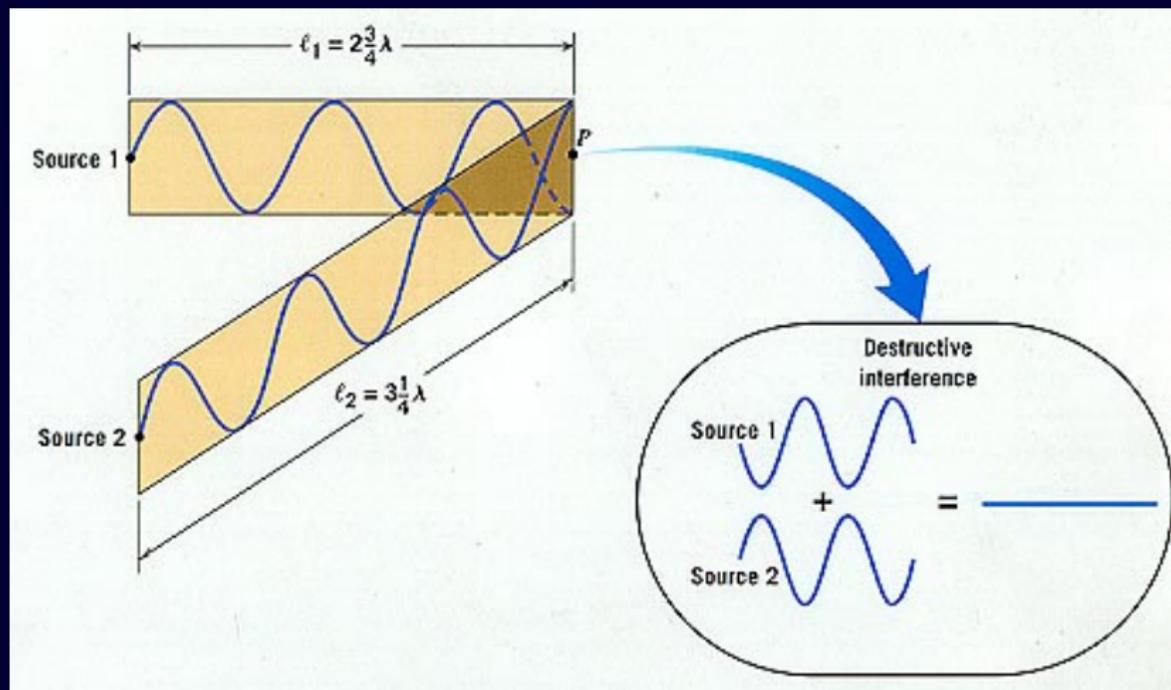
crown ($n = 1.55, V_d = 70$)



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

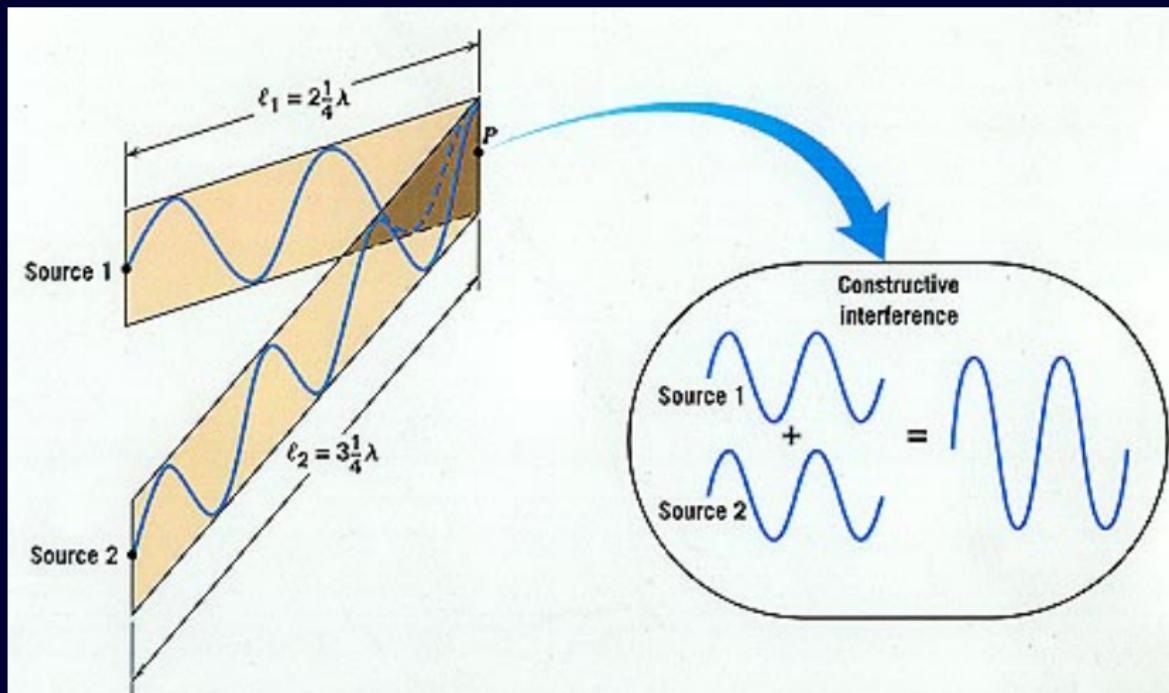
Интерференция

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.

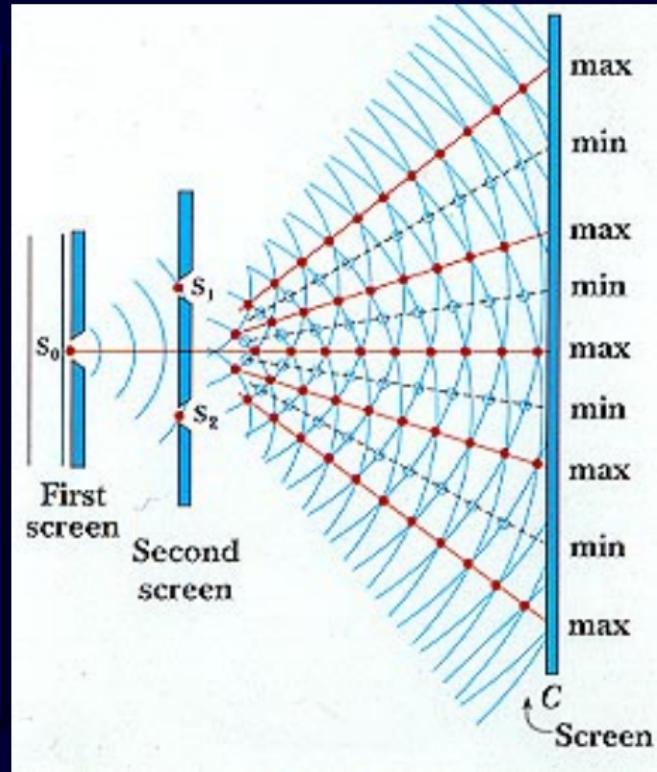


Интерференция

Опыт Юнга

Томас Юнг, 1803. Ширина щелей приблизительно равна длине волны излучаемого света. Доказательство волновой природы света.

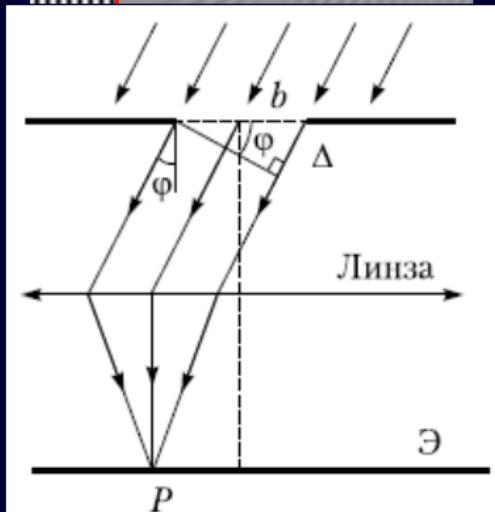
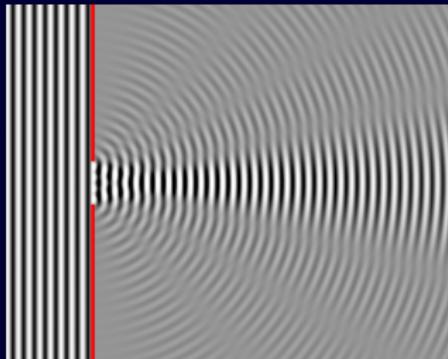
Интерференционная картина возникает на экране, когда ширина прорезей близка к длине волны излучаемого монохроматического света. Если ширину прорезей увеличивать, то освещённость экрана будет возрастать, но контраст интерференционной картины будет падать вплоть до полного её исчезновения.



Дифракция

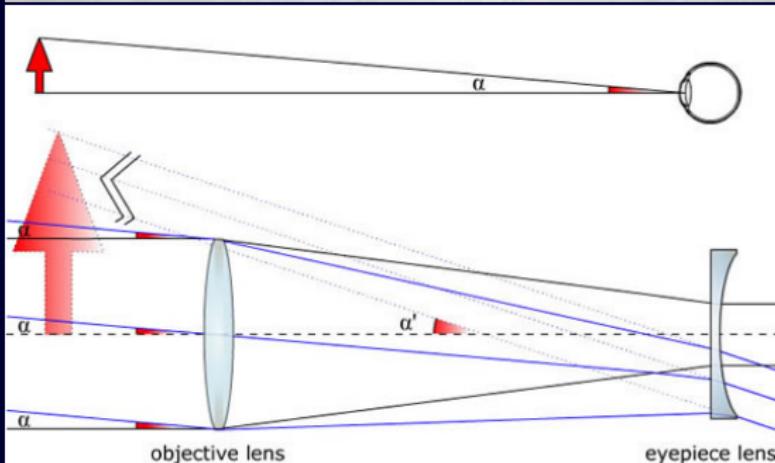
Дифракция — явление отклонения волн от прямолинейного при взаимодействии с препятствием.

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



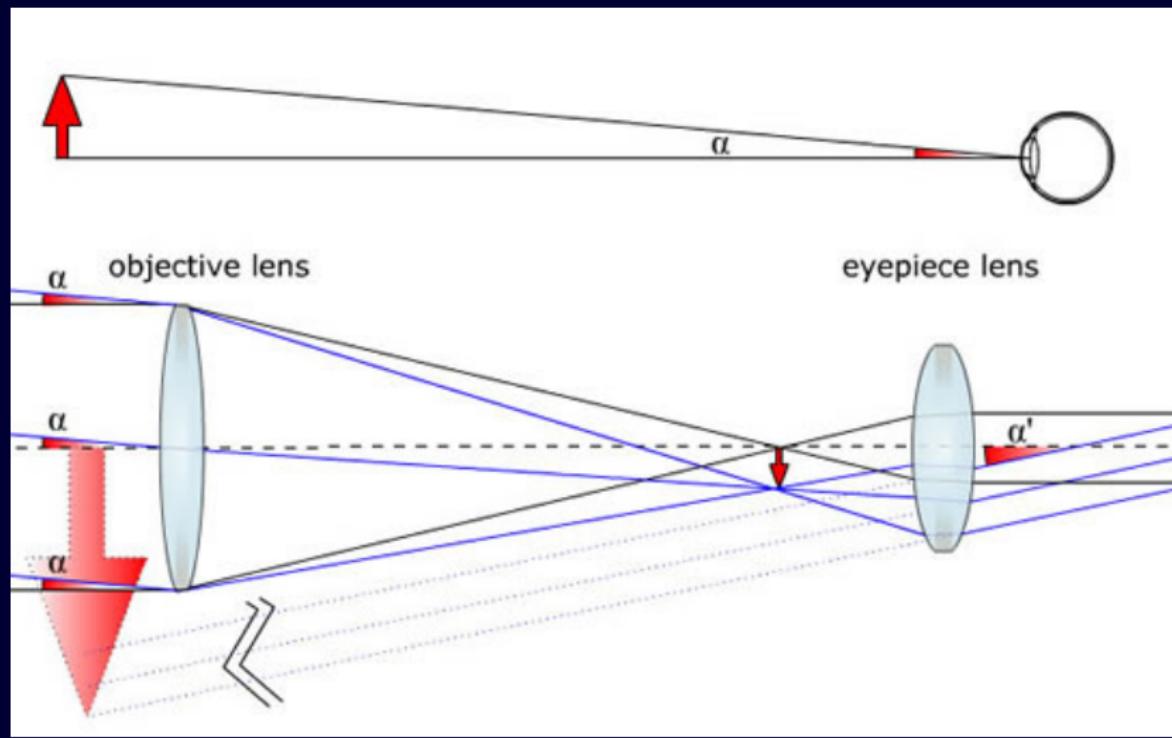
Рефракторы

Галилея



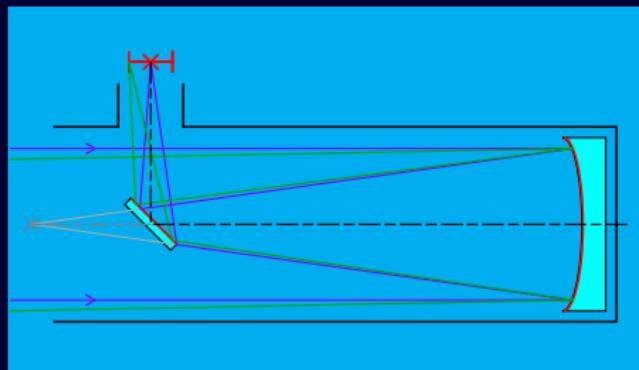
Рефракторы

Кеплера

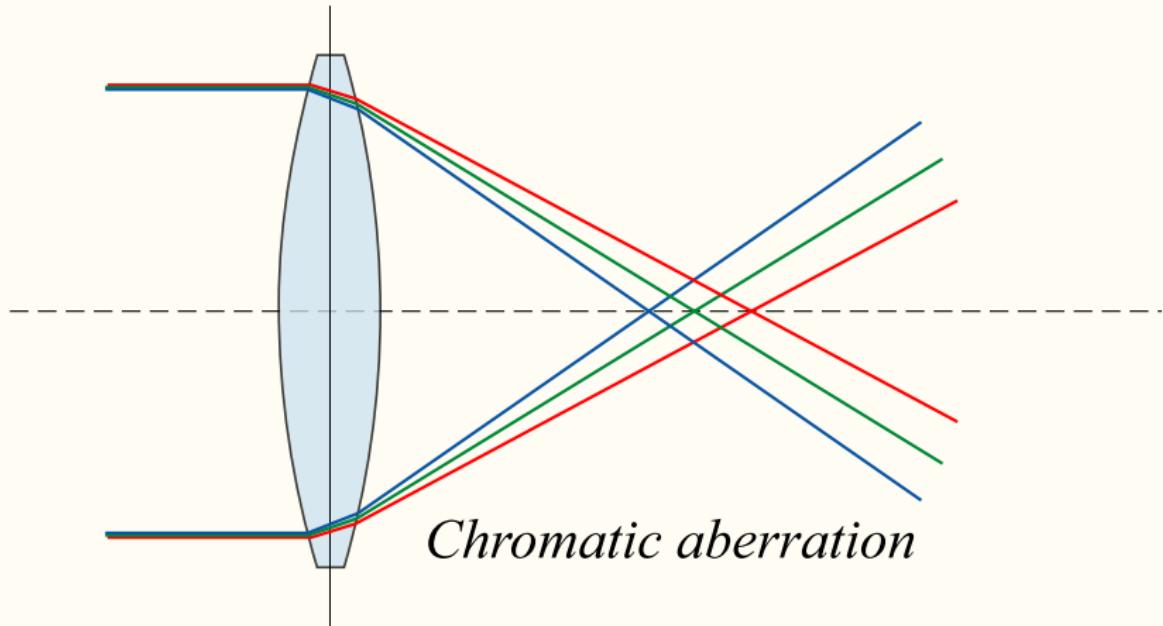


Рефлекто́ры

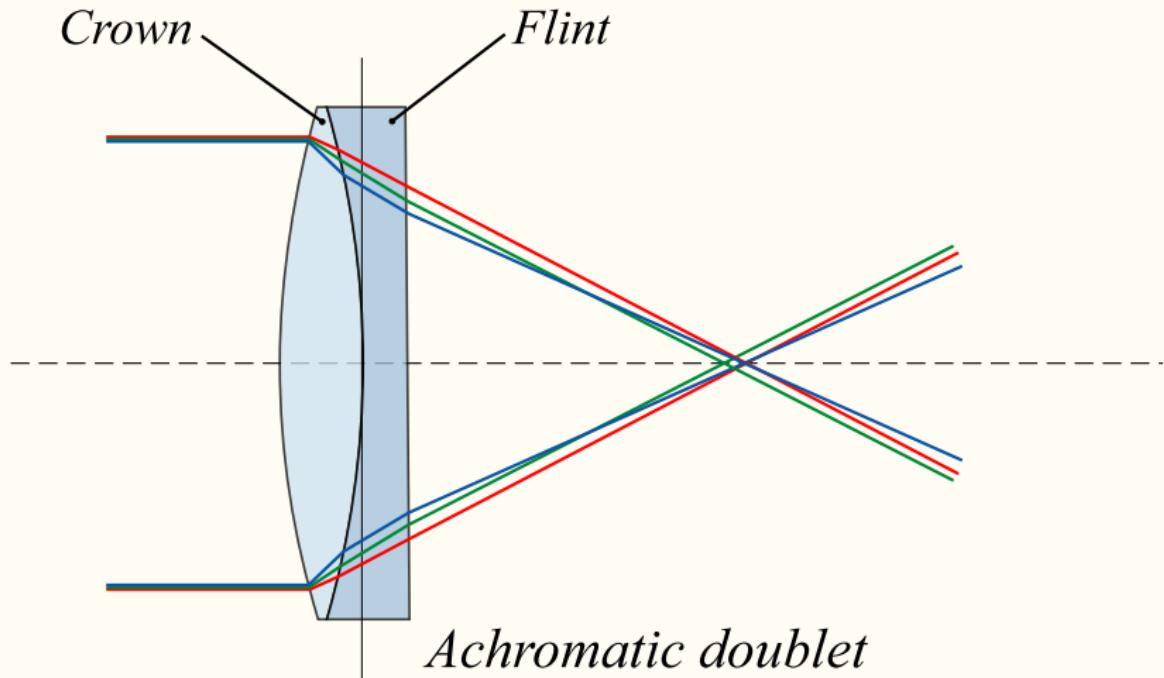
Ньютона (1668)



Хроматическая аберрация

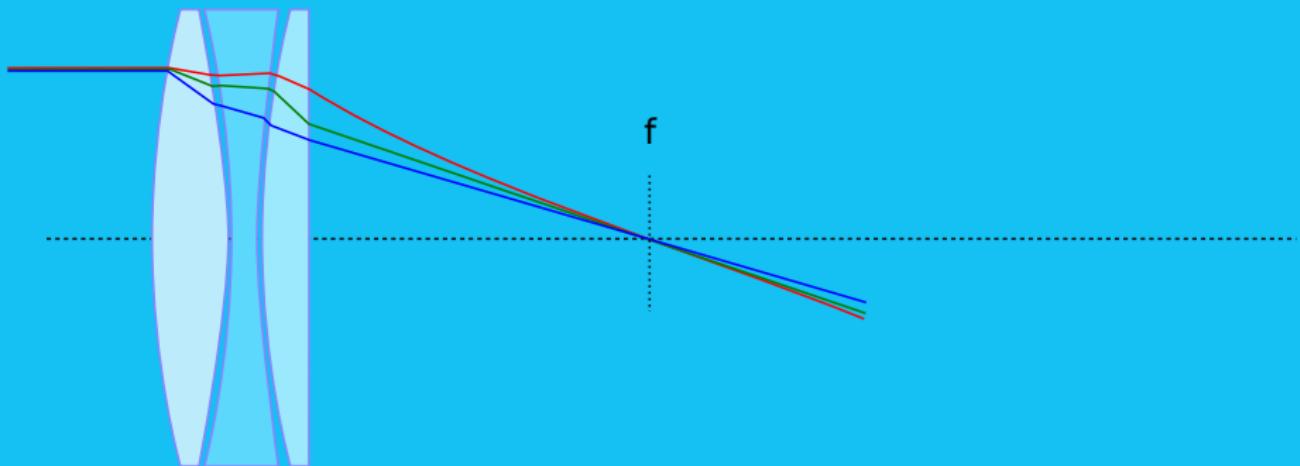


Хроматическая aberrация



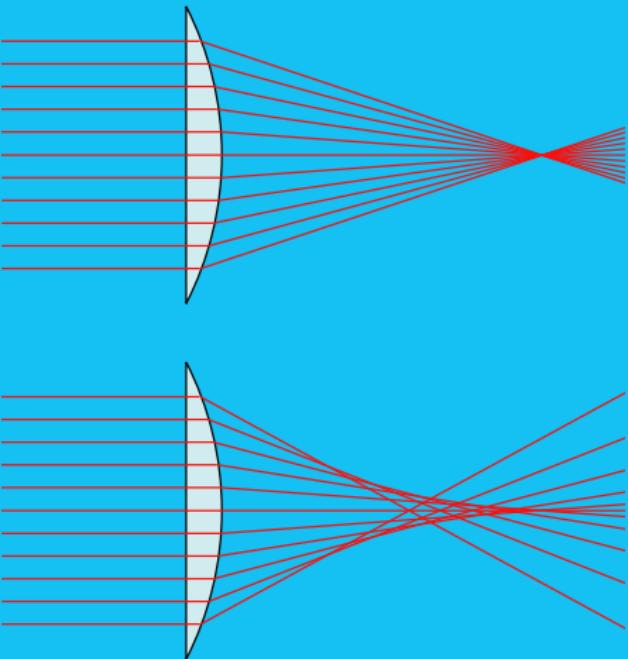
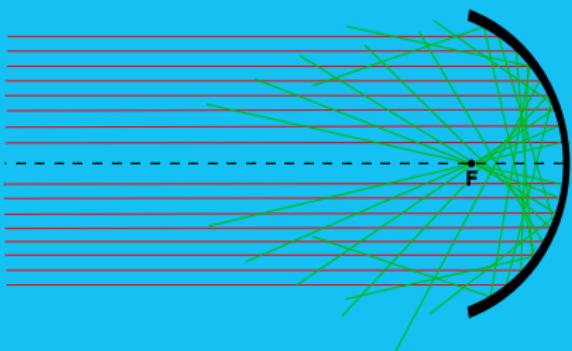
Хроматическая аберрация

Апохромат



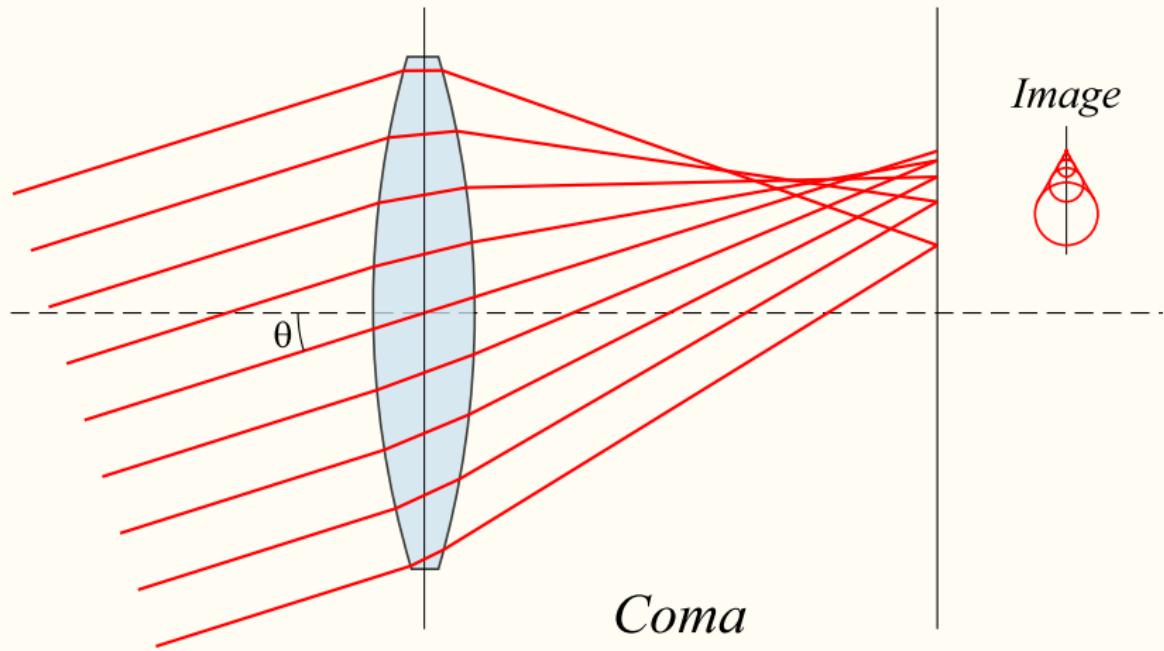
Монохроматические аберрации

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



Монохроматические аберрации

Кома, $\propto (D/F)^2$

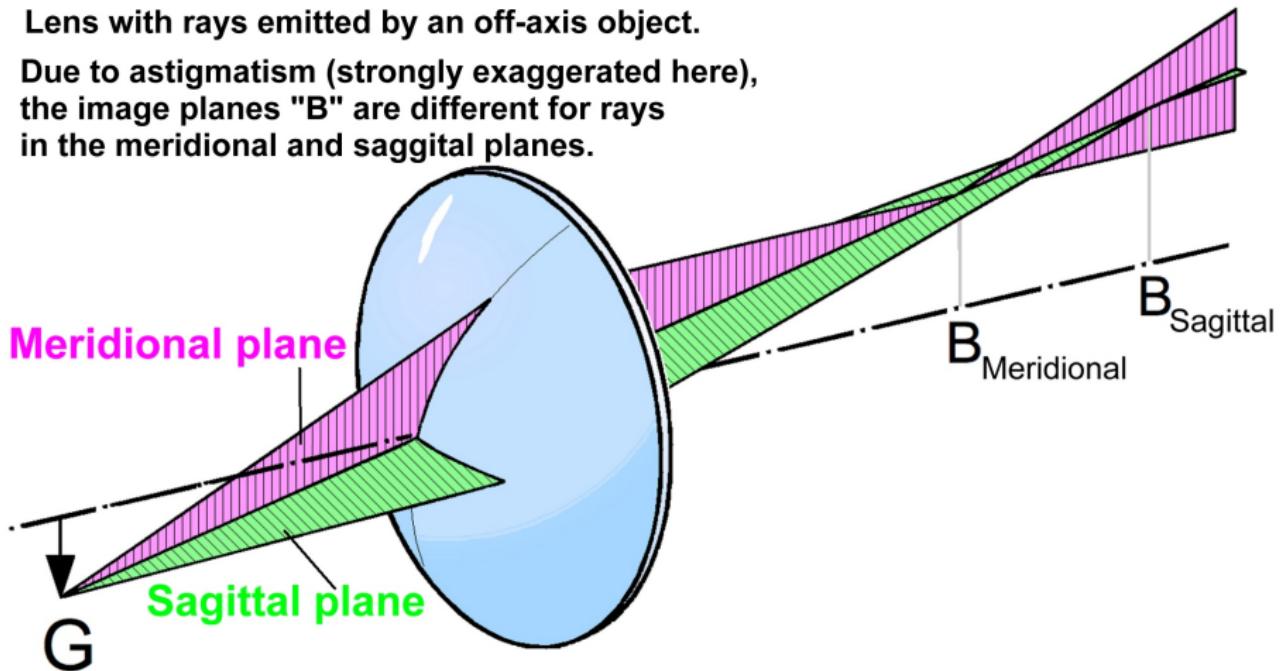


Монохроматические aberrации

Астигматизм, $\propto (D/F)$

Lens with rays emitted by an off-axis object.

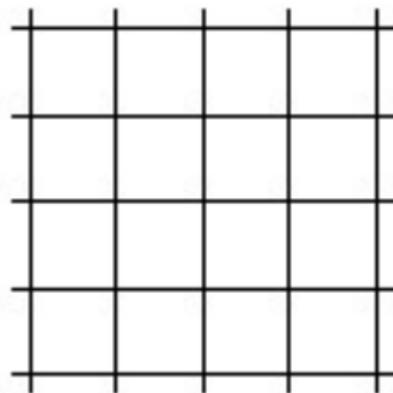
Due to astigmatism (strongly exaggerated here),
the image planes "B" are different for rays
in the meridional and saggital planes.



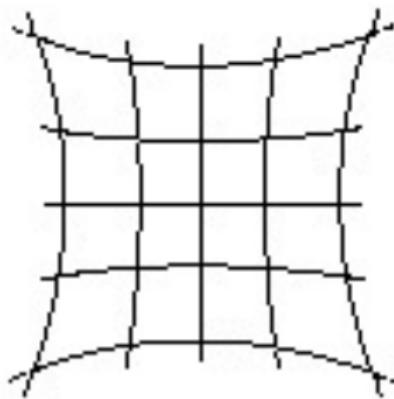
Монохроматические аберрации

Дисторсия

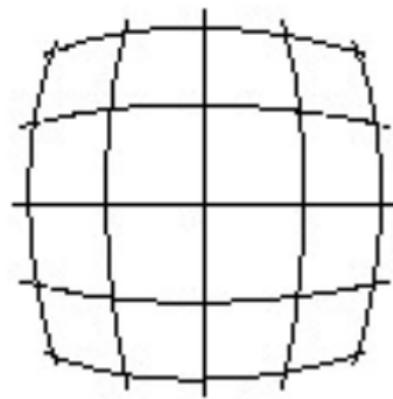
OBJECT



PINCUSHION
DISTORTION

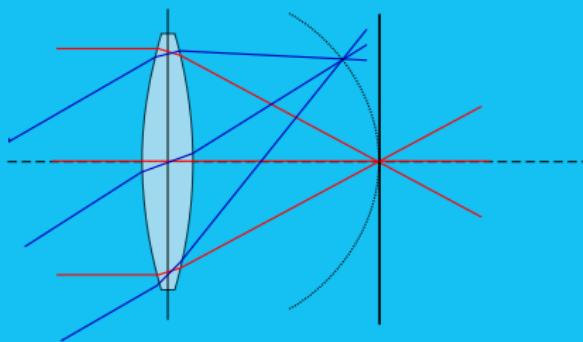


BARREL
DISTORTION



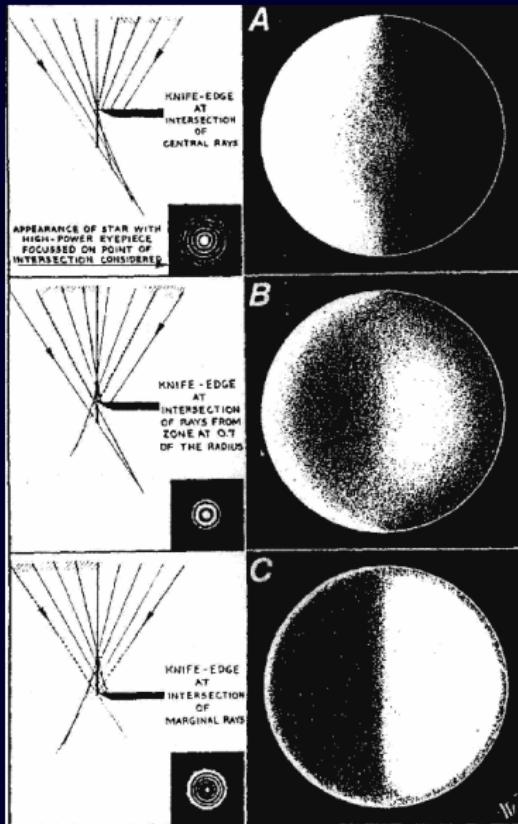
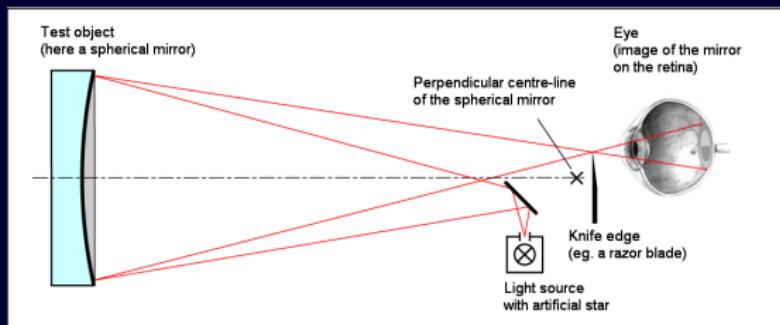
Монохроматические aberrации

Кривизна поля — фокальная плоскость «Кеплера»

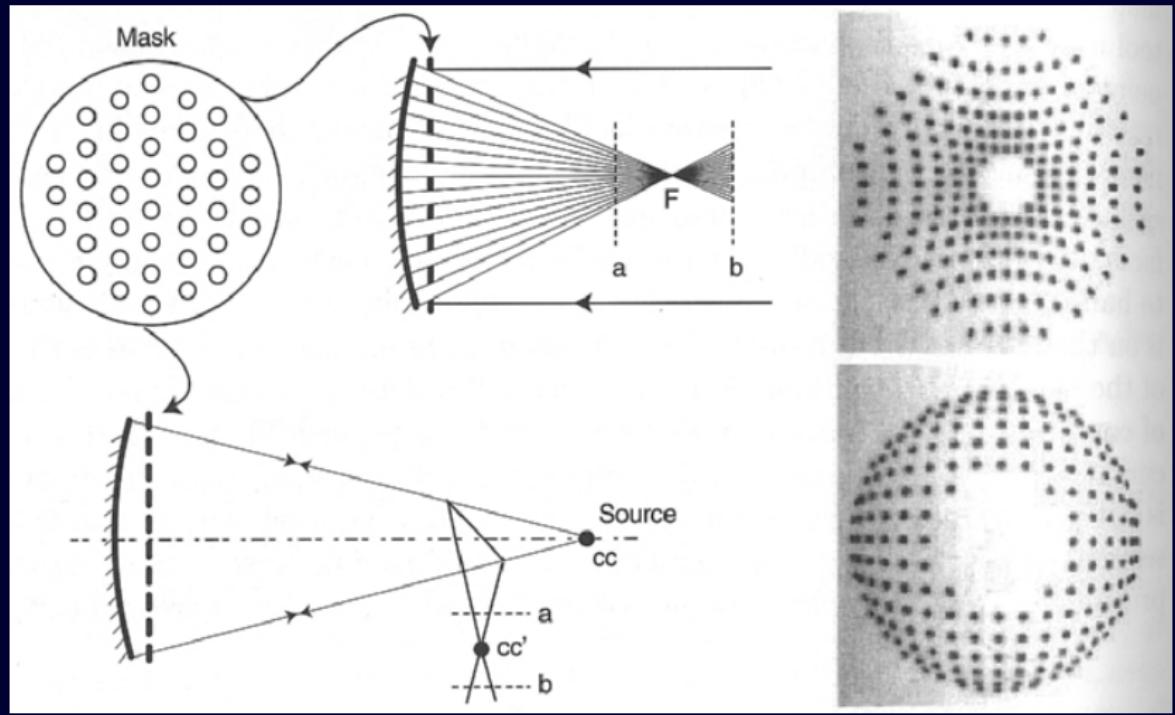


Тест Фуко

1858, Léon Foucault. Изначально — из центра кривизны зеркала при его шлифовании.

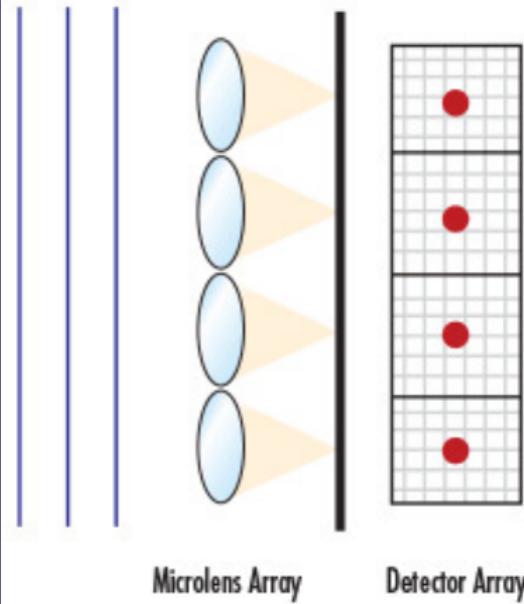


Метод Гартманна

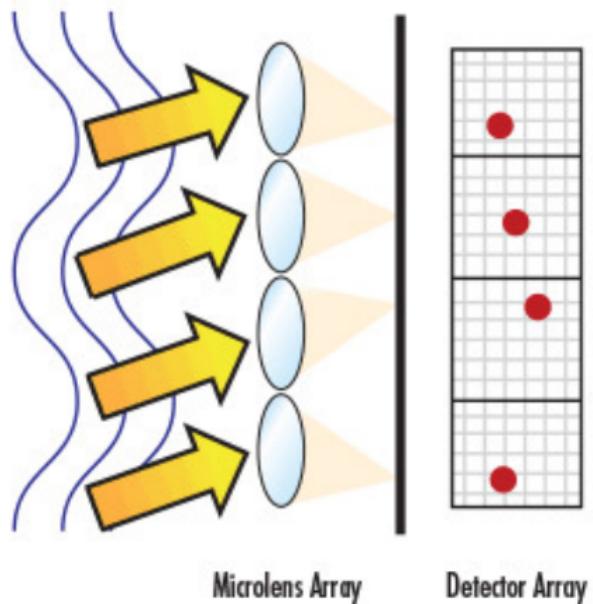


Метод Шака-Гартманна

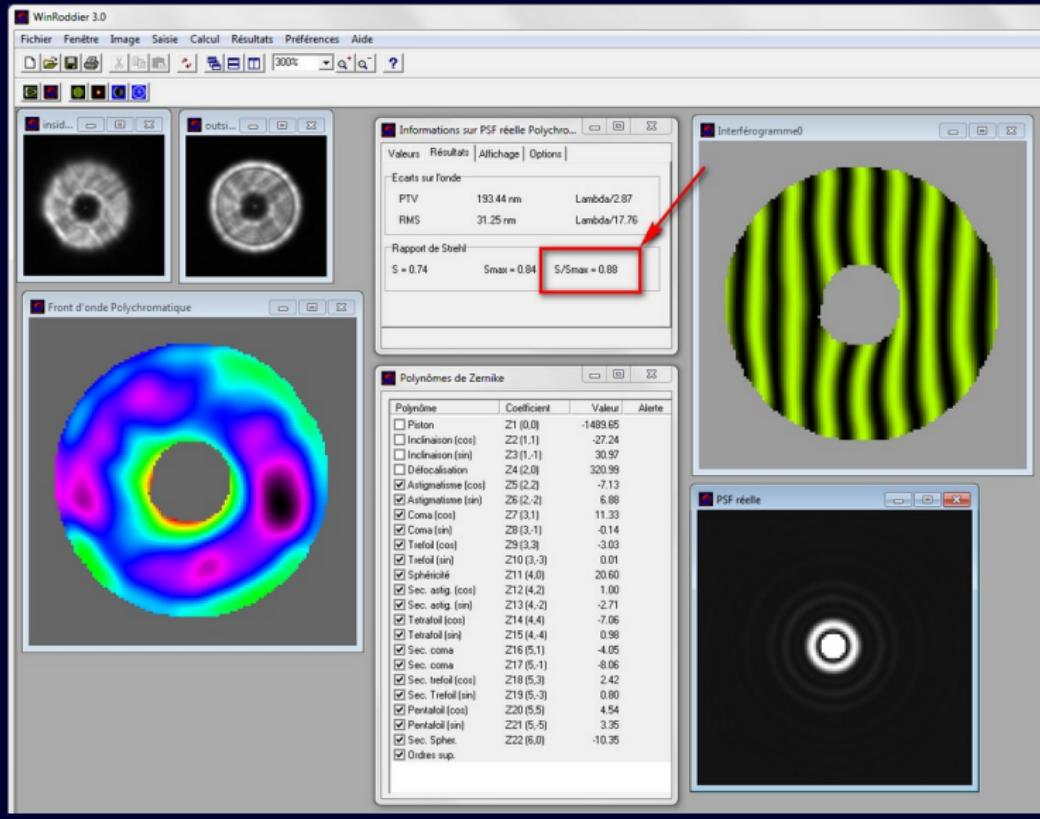
Plane Wavefront



Distorted Wavefront



Метод Роддье



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

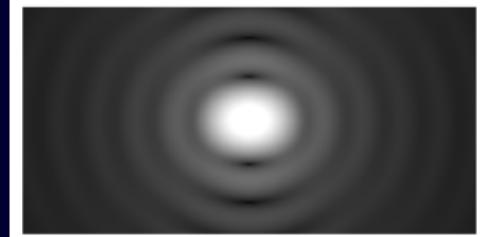
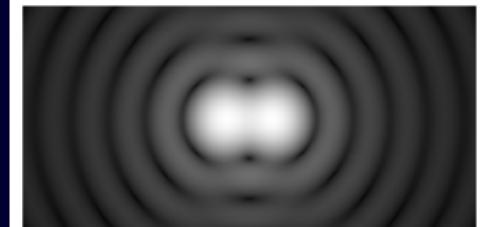
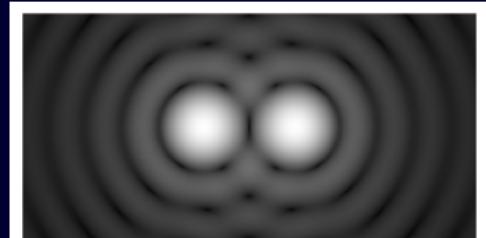
Светосила $A = \frac{D}{F}$, определяет освещенность в фокальной плоскости.

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.



6 inch Achromatic refractor
vs
6 inch Newtonian reflector

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 Донаван Стронг, калтех, 1932 г.).

Альт-азимутальная монтировка



Timur Agirov, timag12.livejournal.com, agirov.com



Baker–Nunn camera

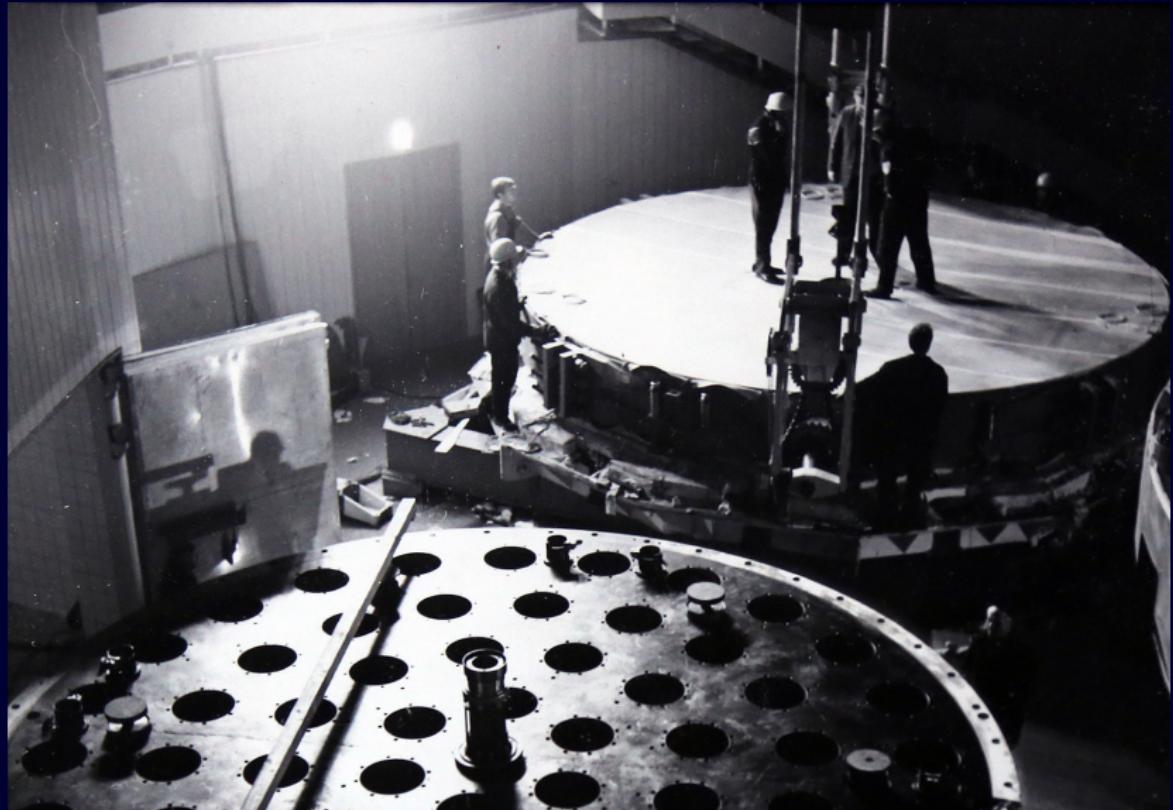
Отсутствует «слепая зона»
около зенита. Часто
включает азимутальную ось.

Экваториальная —
невозможно 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.

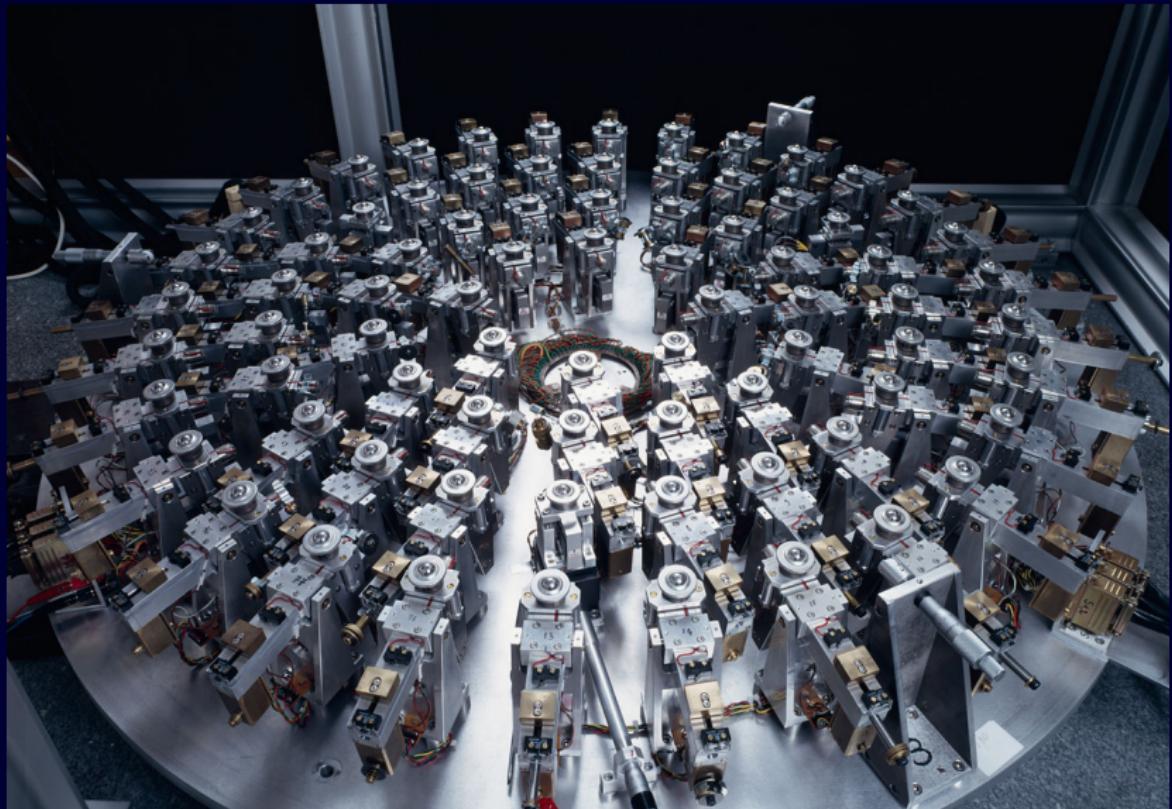
Одно- и многоэлементные инструменты

Пассивные разгрузки БТА.



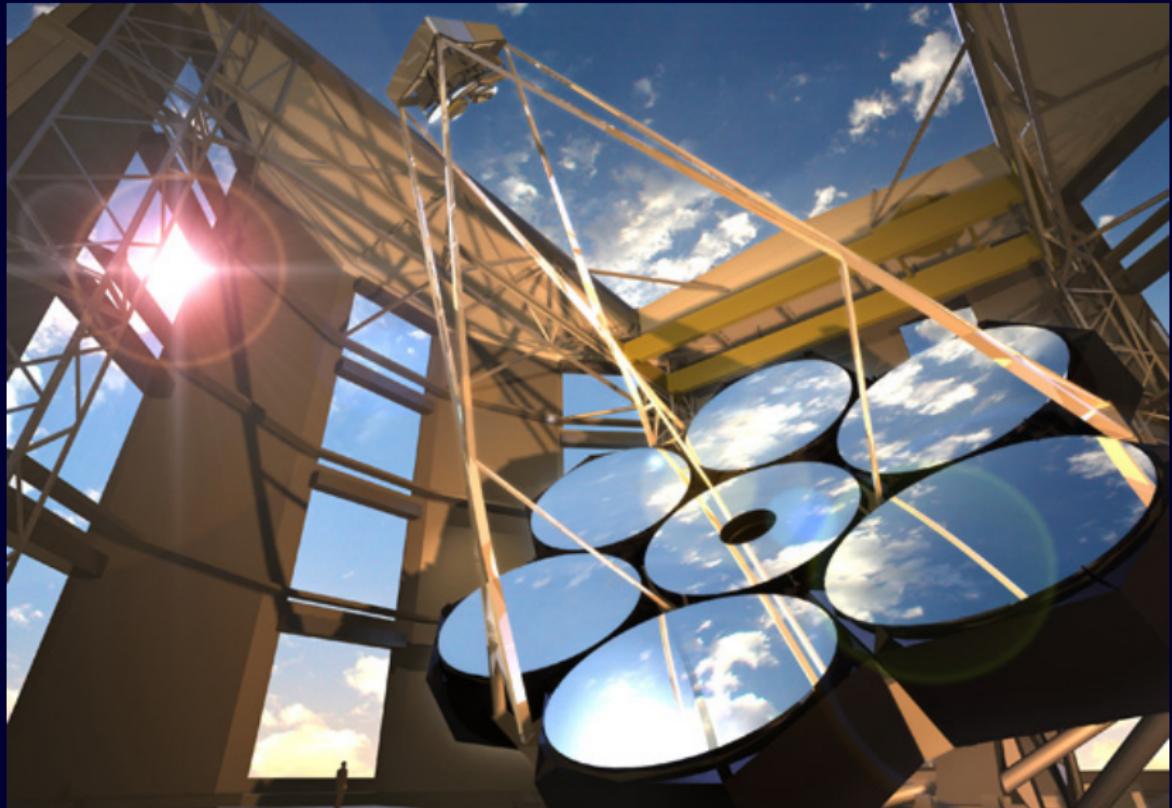
Одно- и многоэлементные инструменты

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



Одно- и многоэлементные инструменты

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

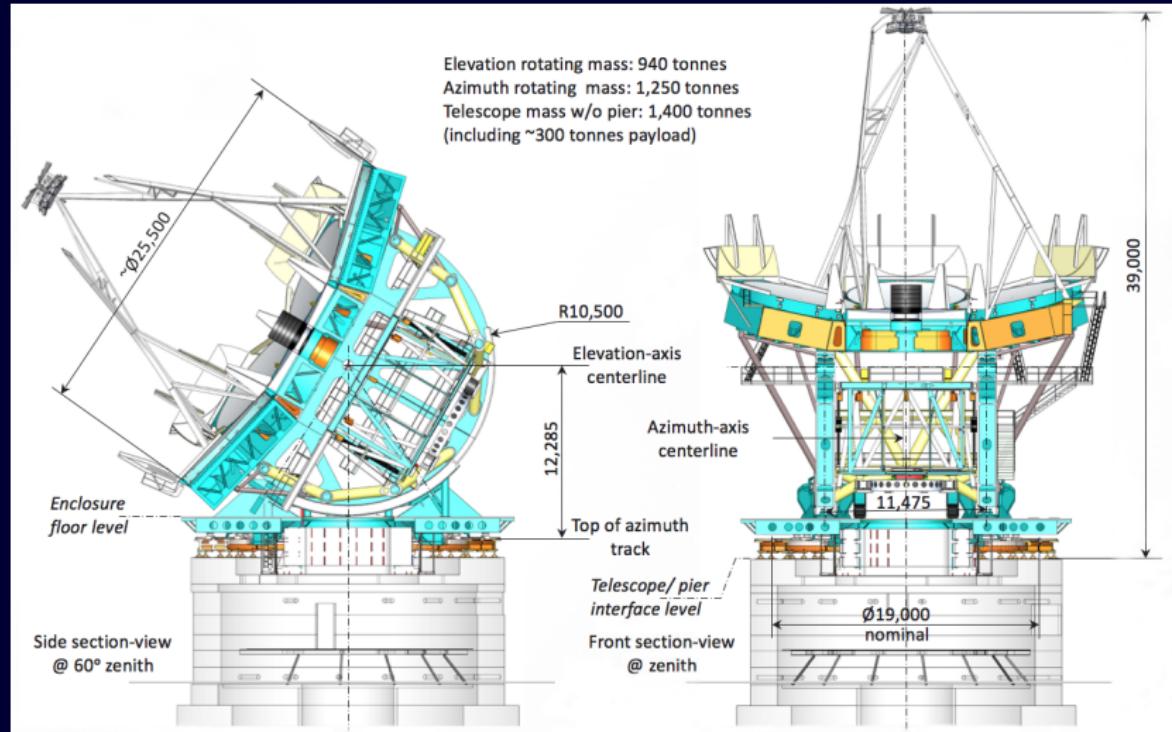


Одно- и многоэлементные инструменты

Центральное зеркало GMT.

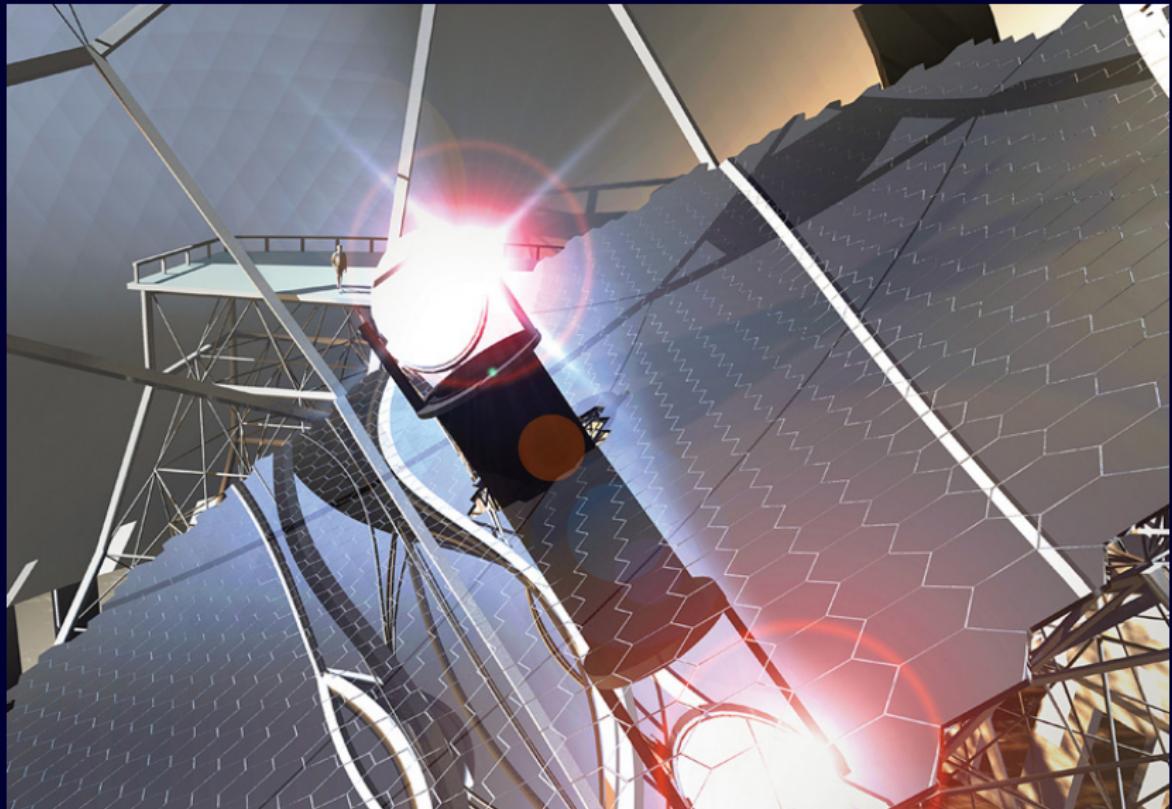


Одно- и многоэлементные инструменты



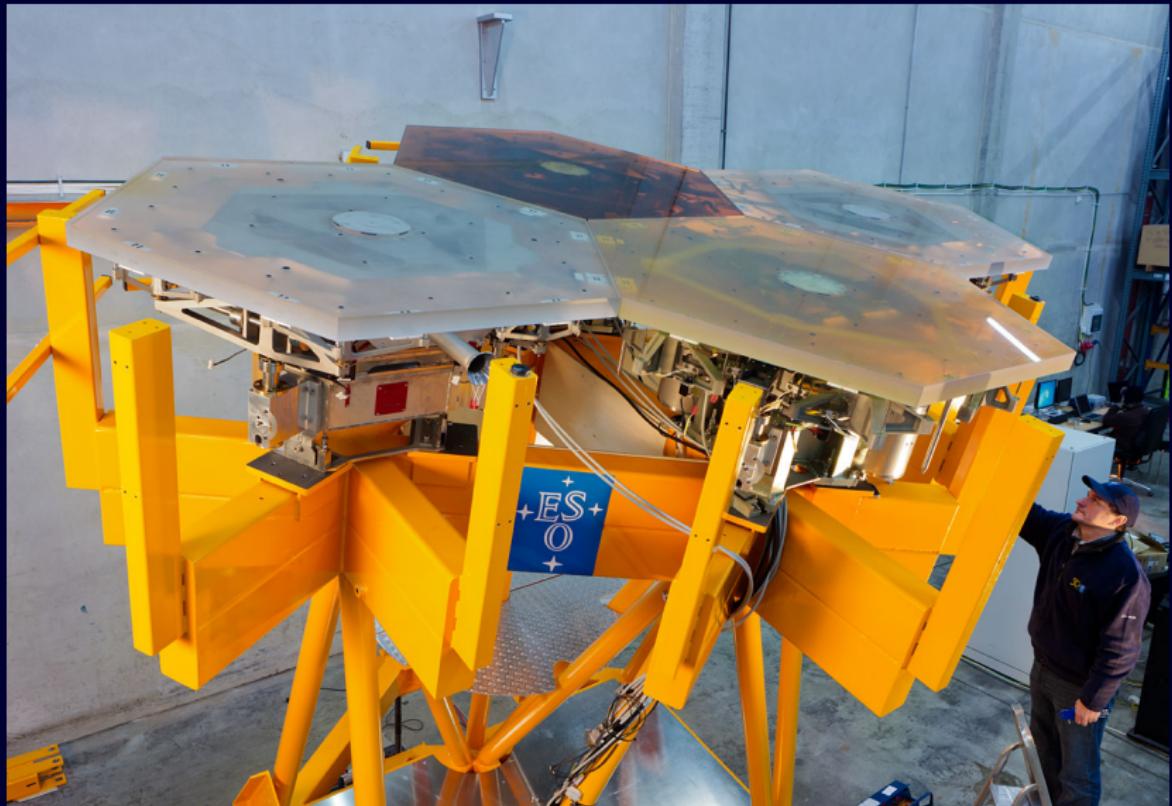
Одно- и многоэлементные инструменты

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



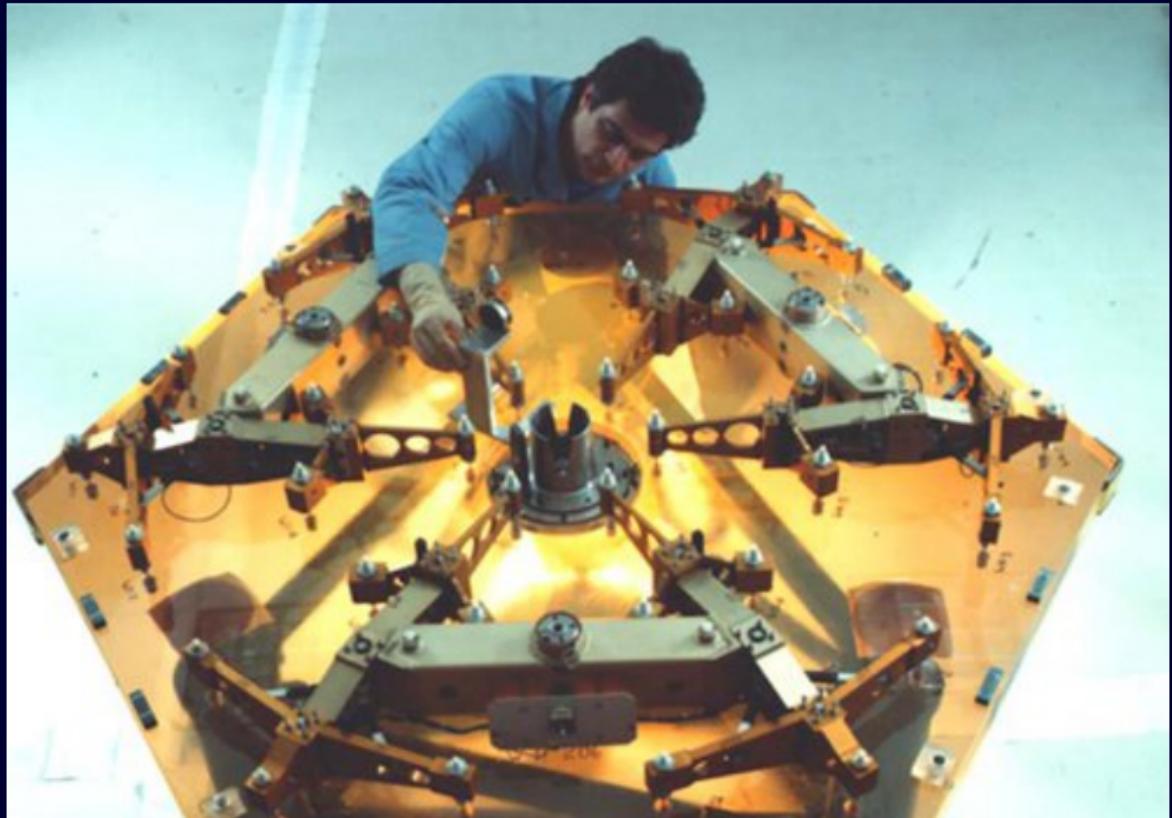
Одно- и многоэлементные инструменты

Сегменты E-ELT (798 сегментов по 1.45 м)



Одно- и многоэлементные инструменты

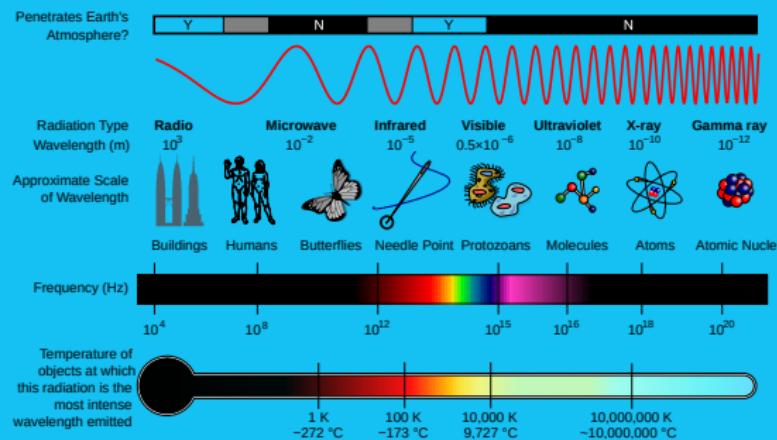
Сегменты Keck



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).



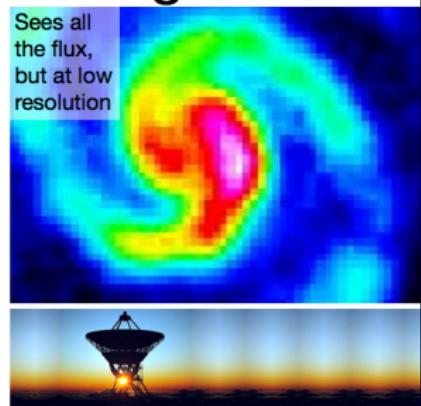
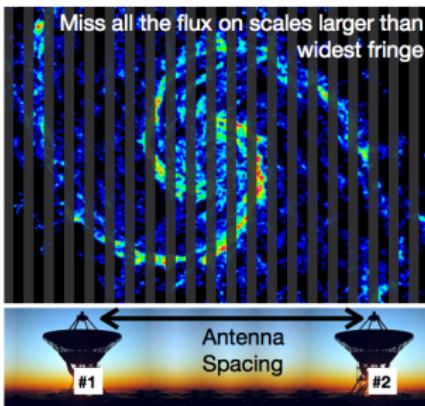
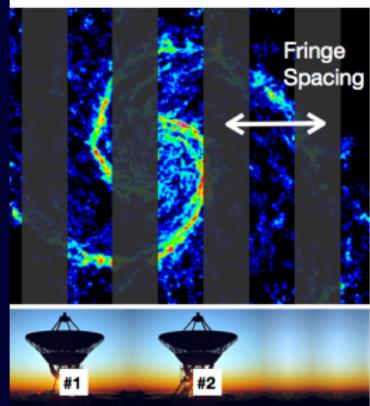
Интерферометрия

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

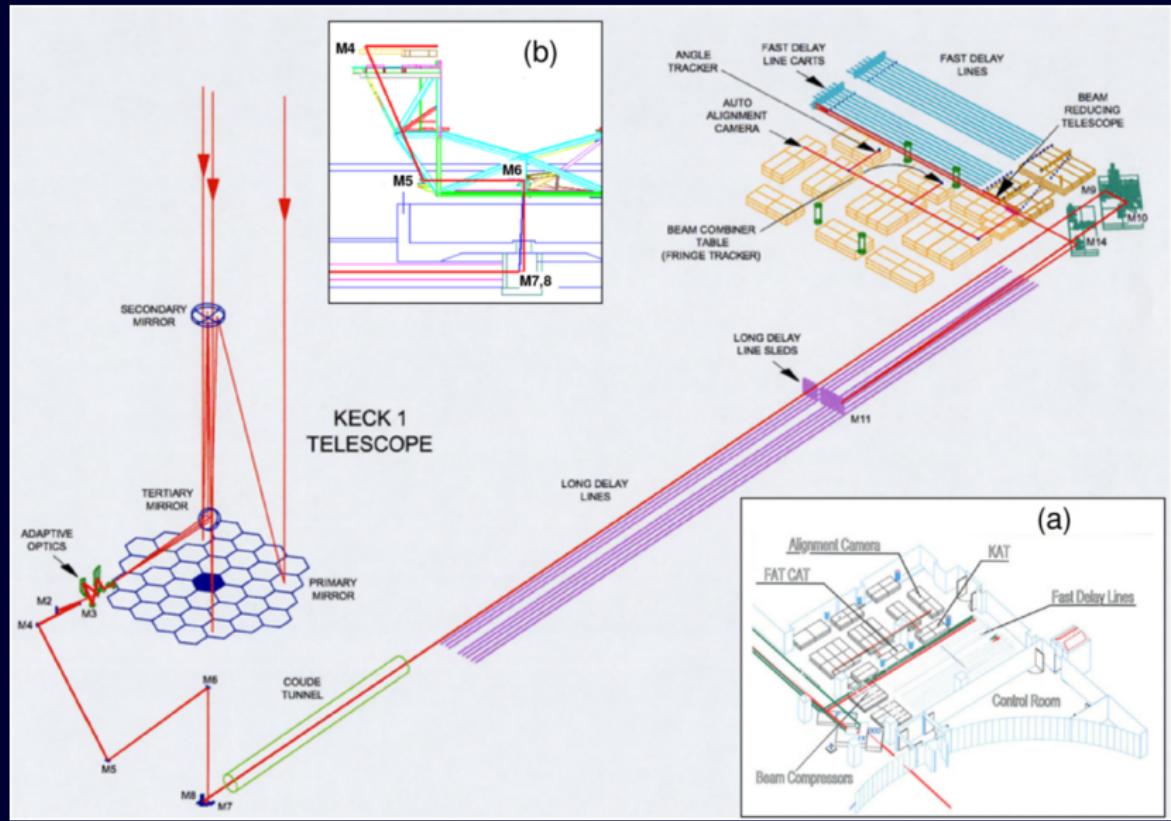
Interferometers

+

Single Dish



Интерферометрия

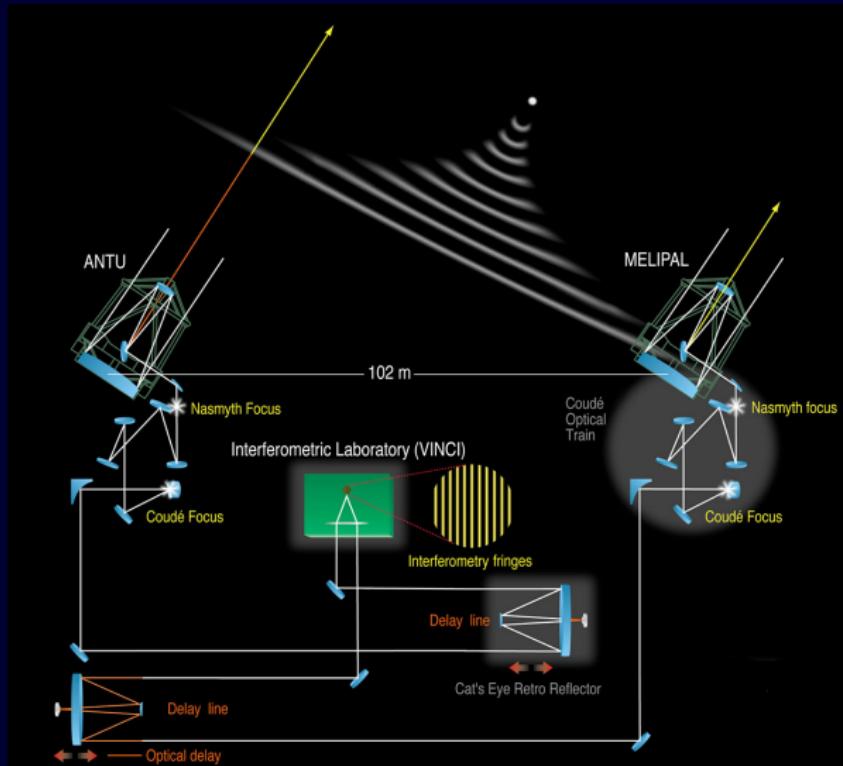


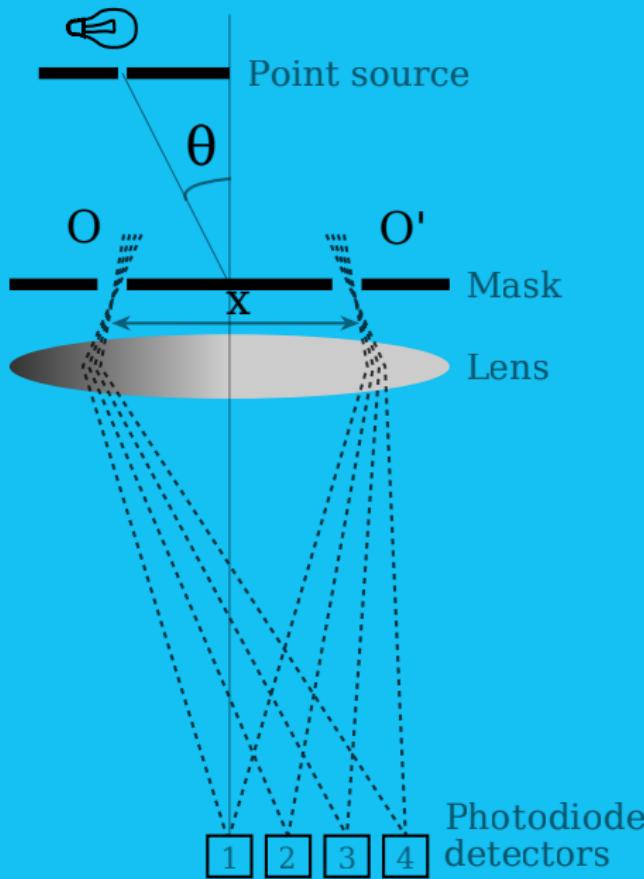
Интерферометрия



Интерферометрия

VLT.



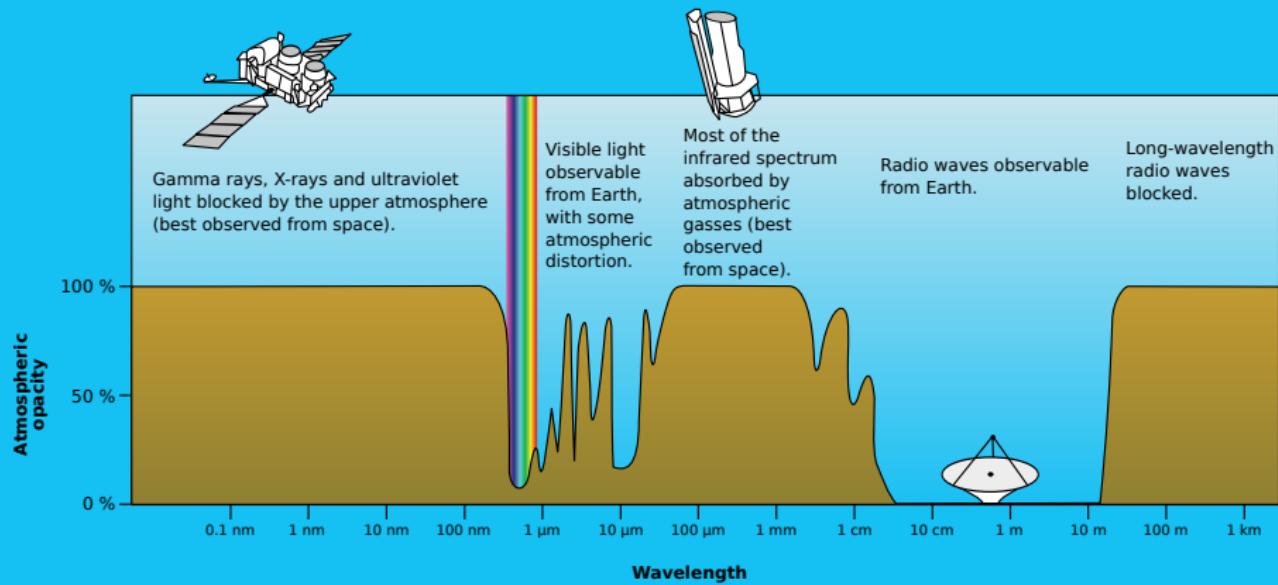


Разрешение (до $0.001''$) компонент двойных звезд, поиск экзопланет. Измерение движения звезд (сдвиги полос) или непосредственно планет («обнуляющая» интерферометрия, Keck).

Земная атмосфера

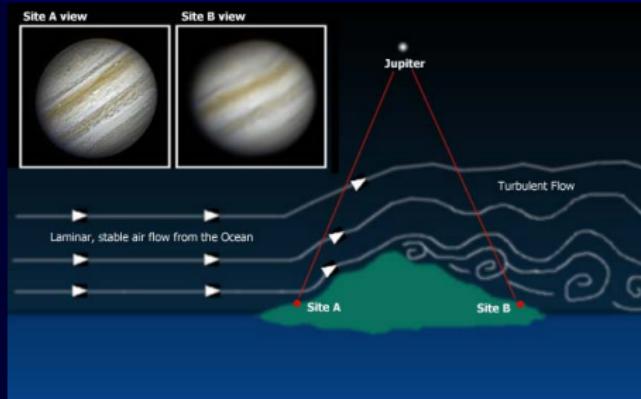
Земная атмосфера

Наземная астрофизика сильно сжата в спектральном диапазоне земной атмосферой.



Качество изображения (seeing)

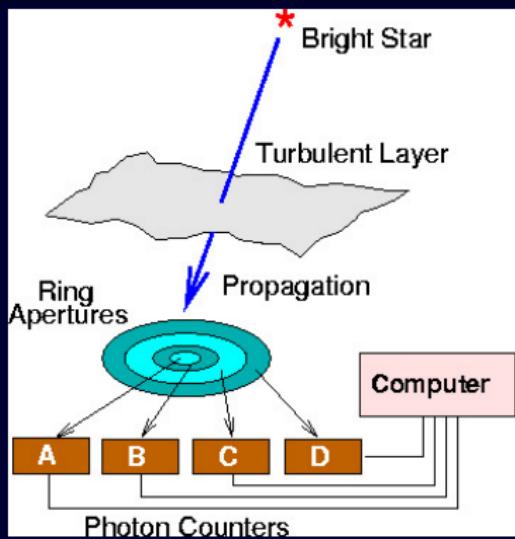
- Полуширина (FWHM) изображения звезды.
- r_0 (типичный размер неоднородности — параметр Фрида) и t_0 («время заморозки»).
- Профиль C_{N^2} (может измеряться напрямую, напр. MASS).



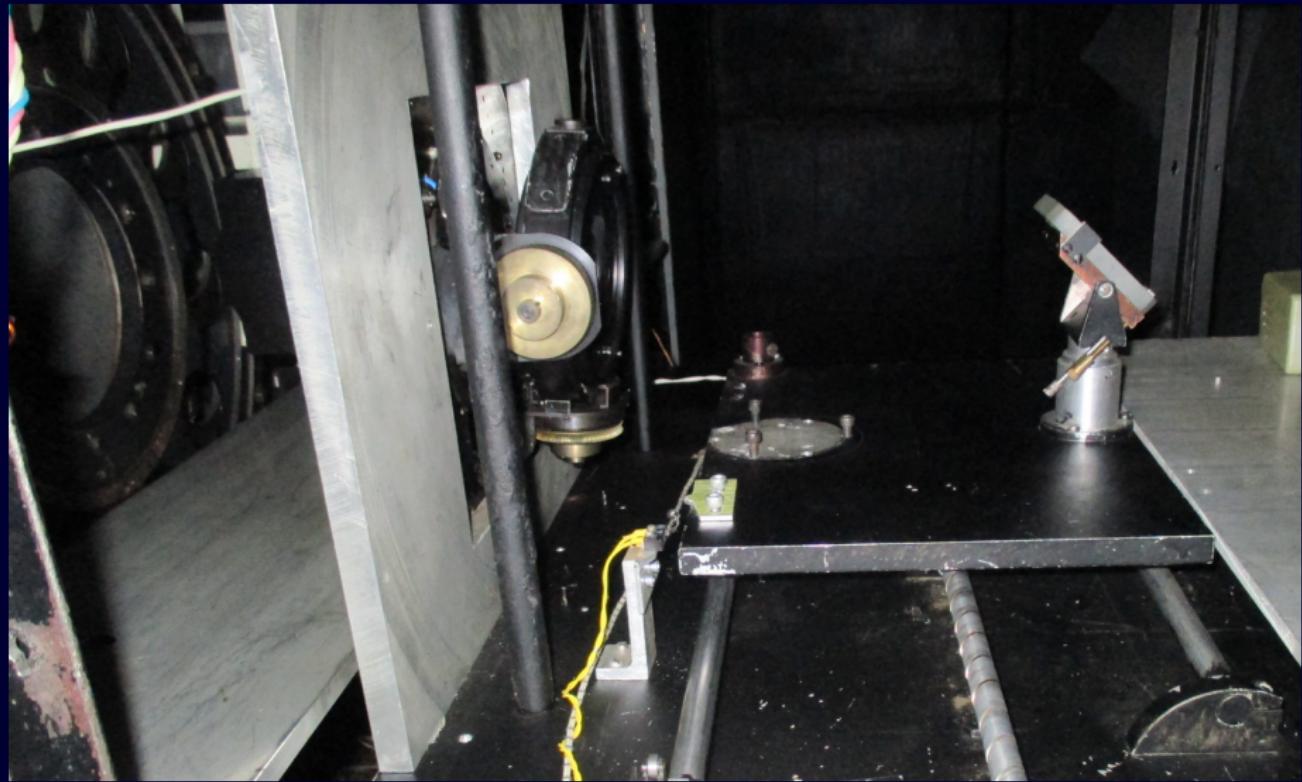
Наилучшее место — горы посреди океана.

Вариация фазы ВФ на входной апертуре: $\sigma^2 = 1.0299 \left(\frac{d}{r_0}\right)^{5/3}$.

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



Tip-tilt коррекция



Спектр-интерферометрия

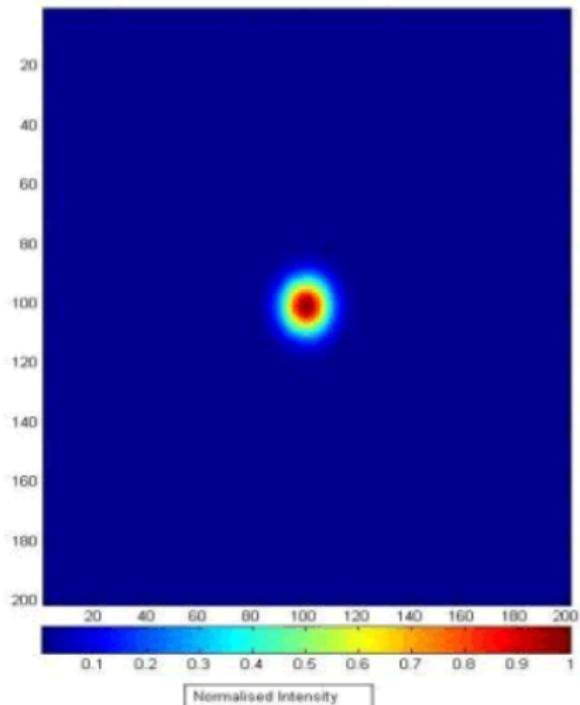


Fig.2.A: No Turbulence

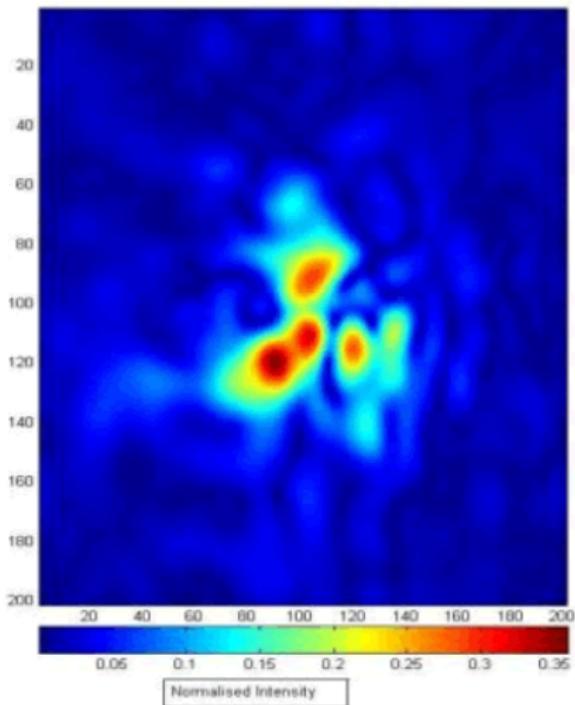


Fig.2. B: Strong Turbulence

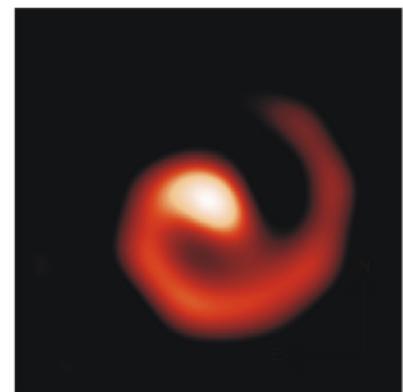
Спекл-интерферометрия

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
 $B(f_1, f_2) = \mathcal{F}^*(f_1 + f_2) \cdot \mathcal{F}(f_1) \cdot \mathcal{F}(f_2)$.

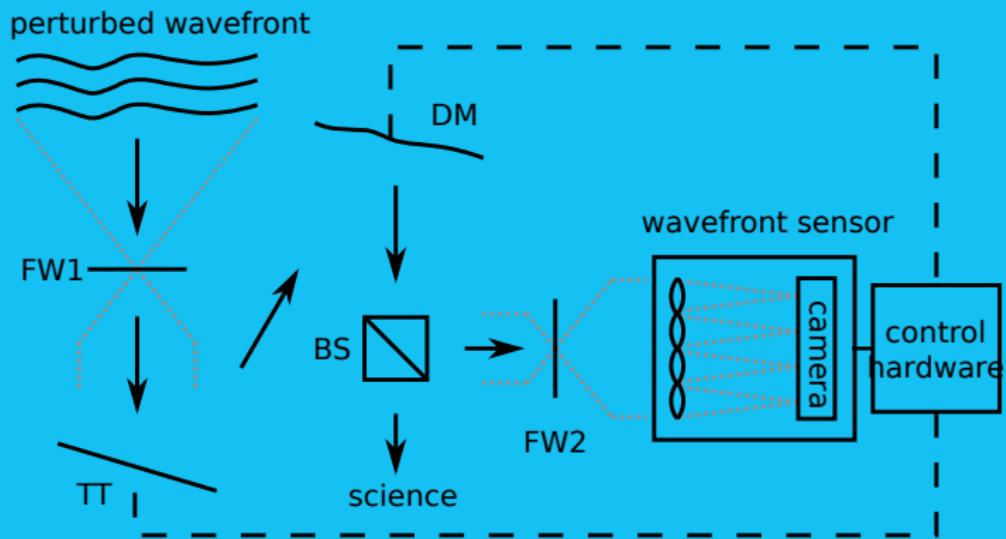
WR 104 at 2.27 Microns

April 98



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



Адаптивная оптика

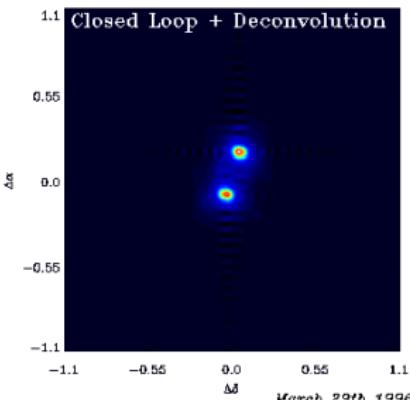
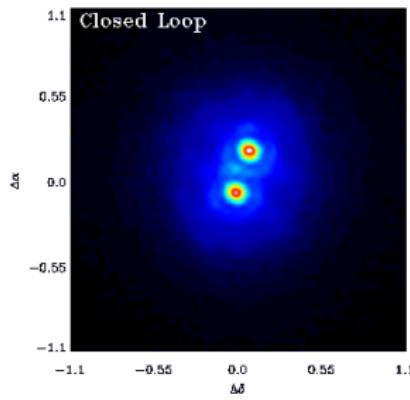
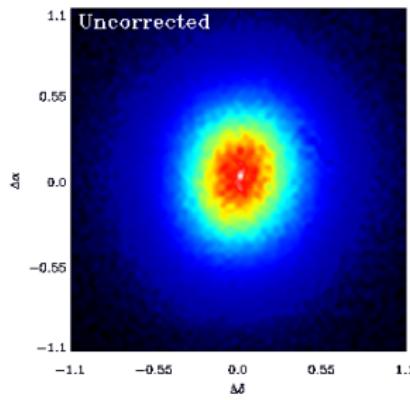
30 \div 60 mas. Искусственные звезды: звезды Рэлея (ближний ИК, 15 \div 25 км) и натриевые (80 \div 100 км, 589 нм).

CFHT Adaptive Optics Bonnette & Monica

Double star, separation=0.276"
Seeing=0.7" @ 0.5mic

Magnitude=10.7
Strehl Ratio=30%

H band, Integration=40 sec
Maximum likelihood

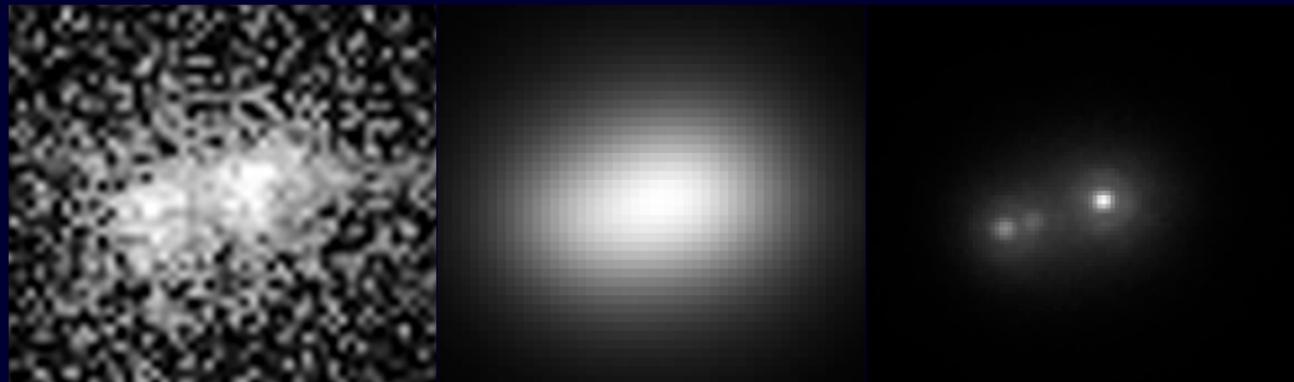


Только для ярких объектов!

Адаптивная оптика



Lucky-imaging, Superresolution



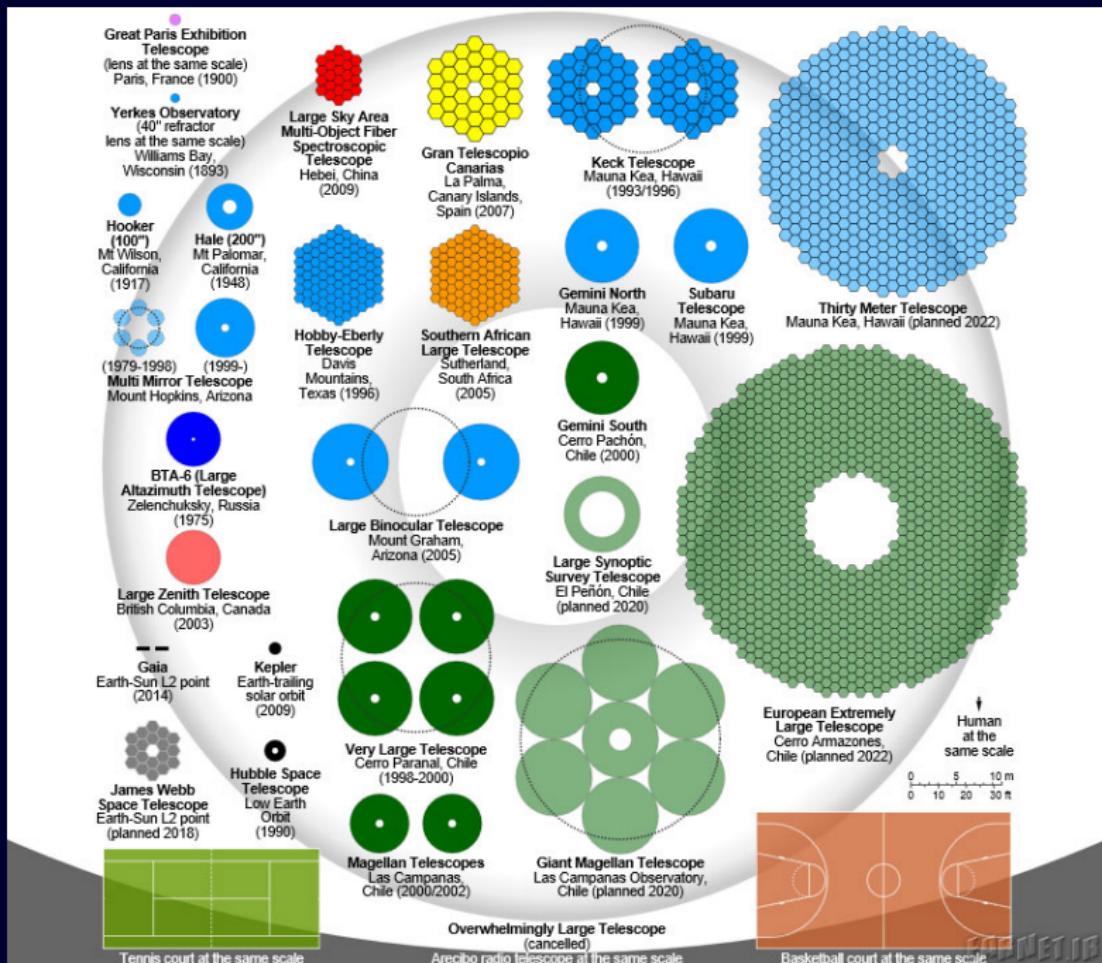
Куб данных с экспозициями $10 \div 50$ мс.

Совмещение снимков с наименьшим числом Штреля.

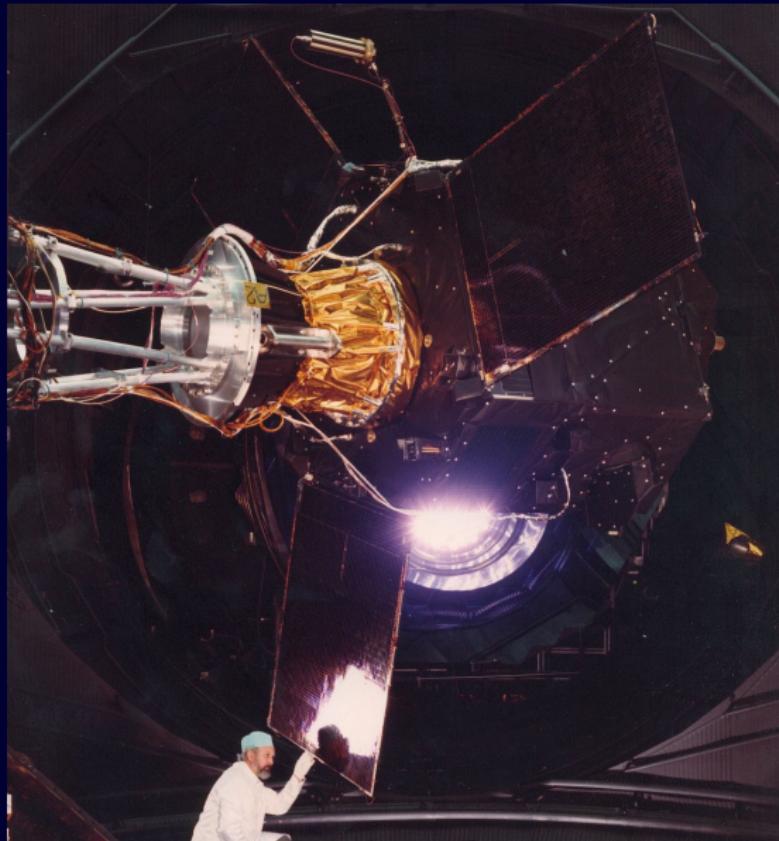
Усреднение.

Итог: было 900 mas, стало 40!

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



Космические телескопы



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, 1.45×0.5 м).s



Телескоп им. Хаббла

2.4 м зеркало.

1978 — стартовое финансирование, 36 млн.др.

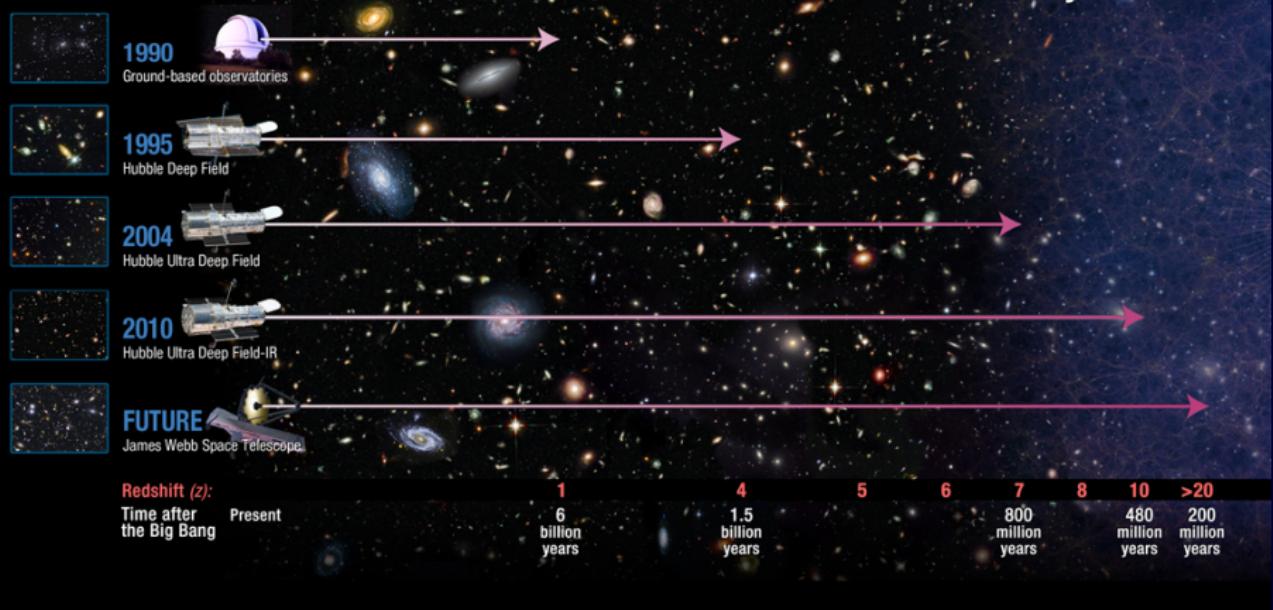
1986 — общий бюджет проекта вырос до 1.175 млрд.др.

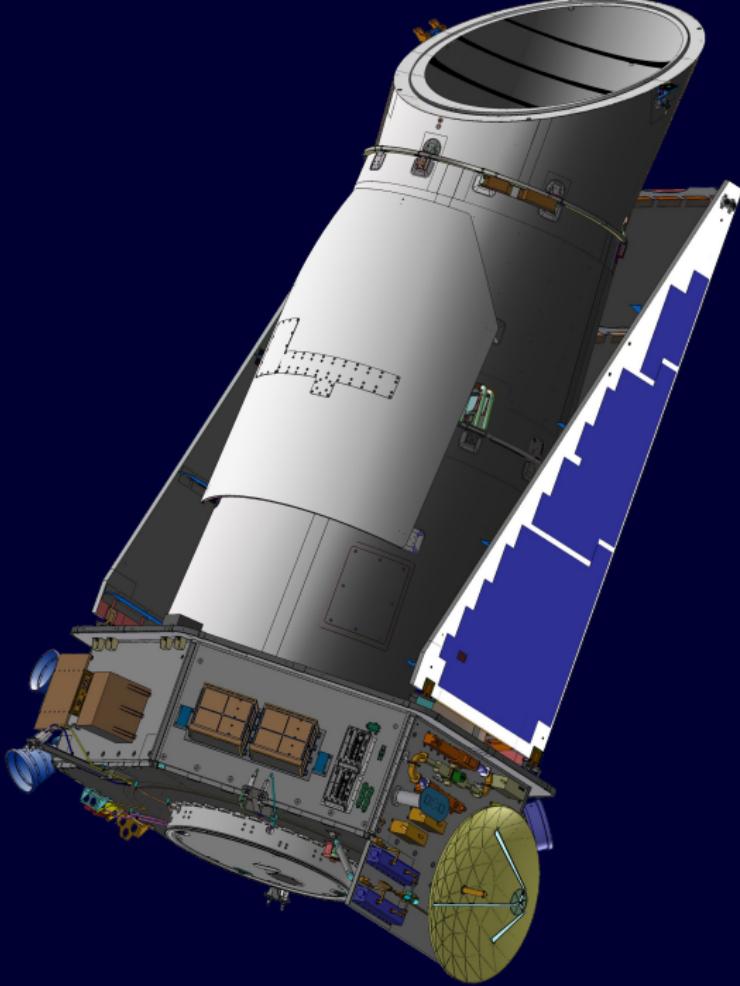
25 апреля 1990 г. — запуск — \sum 2.5 млрд.др.

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

Четыре экспедиции.

Hubble Probes the Early Universe





Телескоп Кеплера

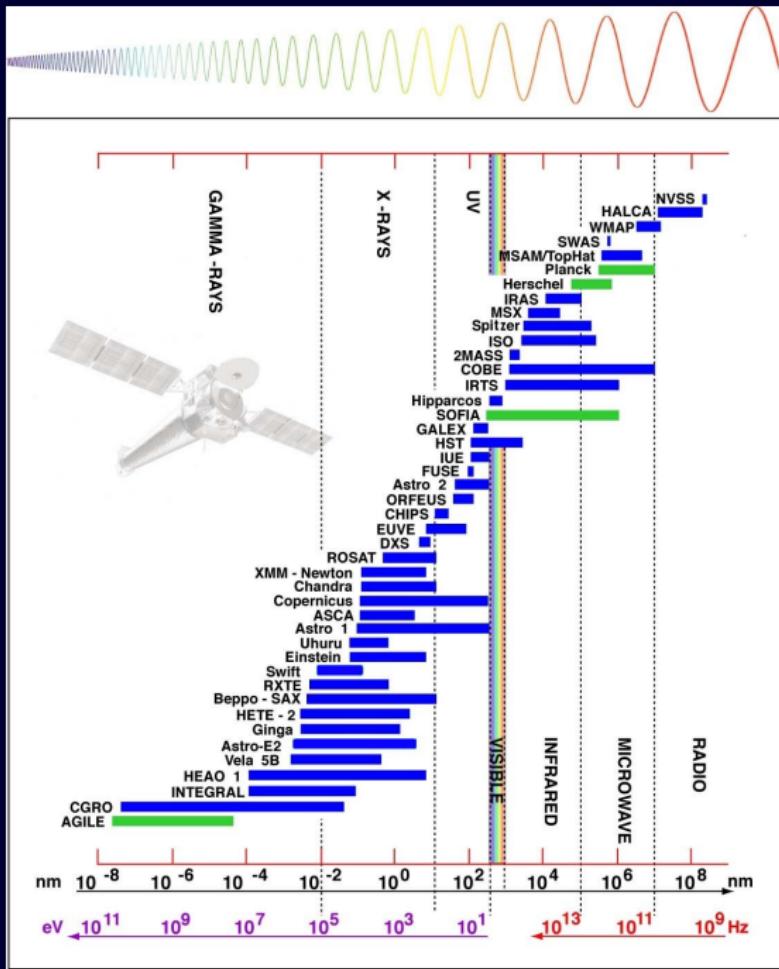
2009–2013, 2013–, поиск экзопланет и переменных звезд. 0.95 м апертура, зеркало 1.4 м (камера Шмидта).

42 ПЗС 2200x1024.

~ 0.5 млрд.др.

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).



Оптические небылицы

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

За большое поле зрения приходится платить малым усилением. Закон Лагранжа–Гельмгольца: $\alpha u n = \alpha' u' n'$.

Необратимые явления: дифракция, рассеяние, поглощение.

Угловое увеличение телескопа. Звезды (Δ – 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 $\times 120$.

Планеты и туманности: при равных увеличениях яркость пропорциональна D^2 .

Для визуальных наблюдений нет смысла использовать телескоп более 0.5 м!!!

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

Спасибо за внимание!

[mailto](mailto:)

eddy@sao.ru

edward.emelianoff@gmail.com

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

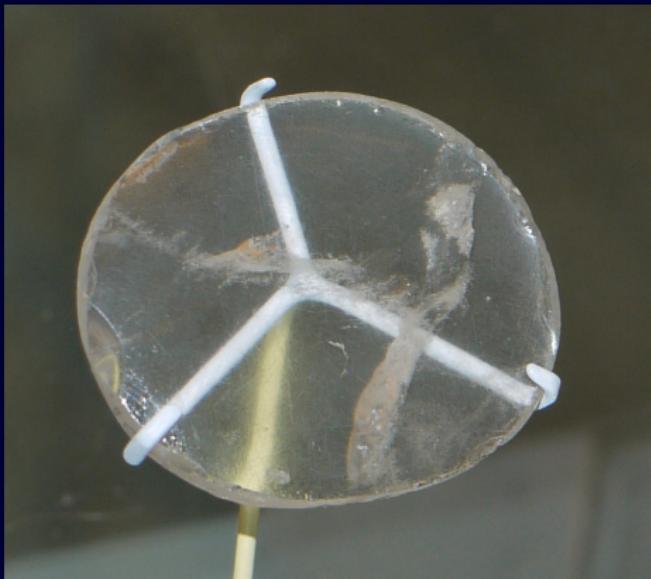
Зажжение олимпийского огня.



Телескоп как концентратор энергии. Линза

Линза — от лат. «lens» — чечевица.

Пьеса Аристофана «Облака» (424 г. до н.э.) — добыча огня.
Древний Рим. Плинт 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 Вт) \Rightarrow АЧТ нагреется не выше 120°C ($0.16 \text{ Вт}/\text{см}^2$). Воспламенение древесины — $500 \div 700^\circ\text{C}$ ($2 \div 5 \text{ Вт}$). **Альбедо!** \Rightarrow $20 \div 40$ раз выше освещенности от Солнца (и десятки минут)! Мгновенное воспламенение — сотни ватт!

Диаметр изображения Солнца $d = F/110 \Rightarrow$ выигрыш в освещенности:

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{110 \cdot D}{F} \right)^2 \Rightarrow \text{светосила } D/F \geq 1/2!$$

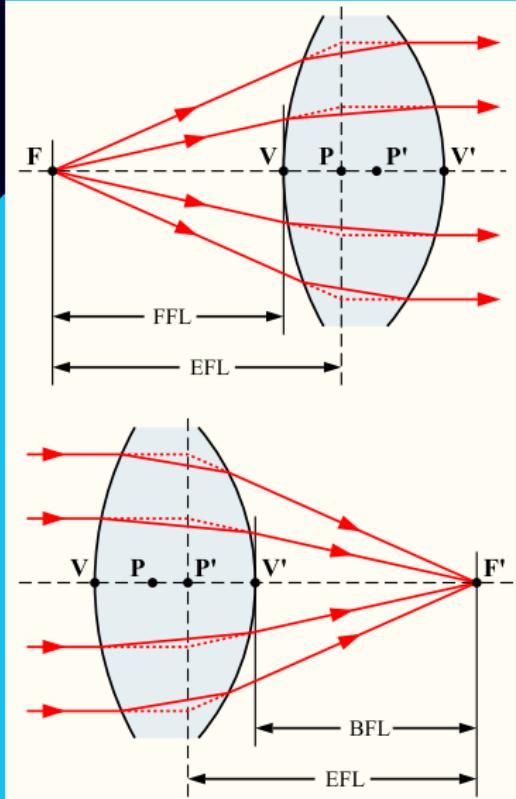
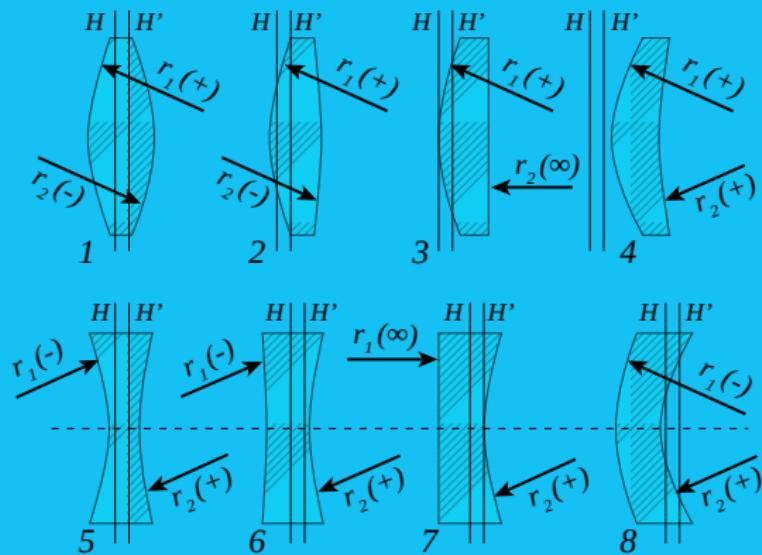
3000 «зайчиков» в одну точку! Но альбедо белой краски до 80%!!!

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.

Главные плоскости и кардиальные точки

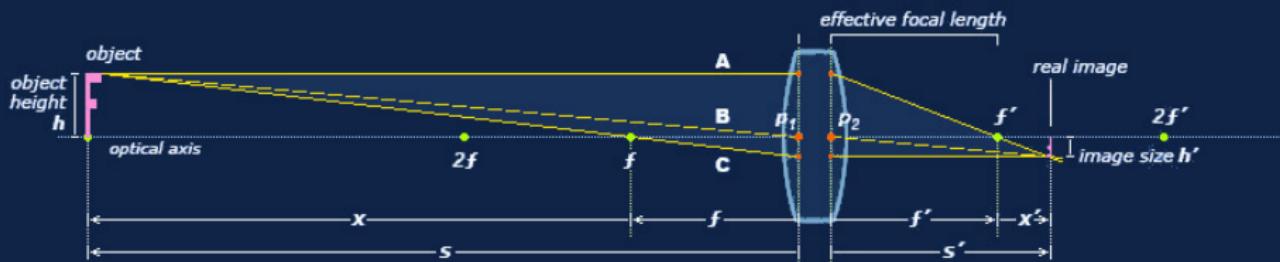
F/F' – передняя и задняя фокальные точки;
 P/P' – передняя и задняя главные точки;
 V/V' – передний и задний края поверхности;
 H/H' – передняя и задняя главные плоскости.



Главные плоскости и кардинальные точки

Построение изображений.

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



Формула тонкой линзы $$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1R_2} \right], \text{ в приближении тонкой линзы:}$$ $$\frac{1}{f} \approx (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right]$$ The diagram illustrates the optical properties of a thin lens. A central vertical line represents the *Axis*. A blue lens is positioned on the axis. Two parallel red light rays enter the lens from the left. The ray that passes through the lens continues straight, while the ray that approaches the lens from the front is refracted as if it originated from a point on the right, labeled *Focal point*. A horizontal dashed line extends from the focal point. The distance from the lens to this line is labeled *f*. The distance between the lens and the focal point is also labeled *f*. The distance from the lens to the point where the refracted rays intersect is labeled *d*. The radius of curvature of the left surface of the lens is labeled *R₂*, and the radius of curvature of the right surface is labeled *R₁*. Емельянов Э.В. (САО РАН) Телескопы 4 марта 2018 года 48

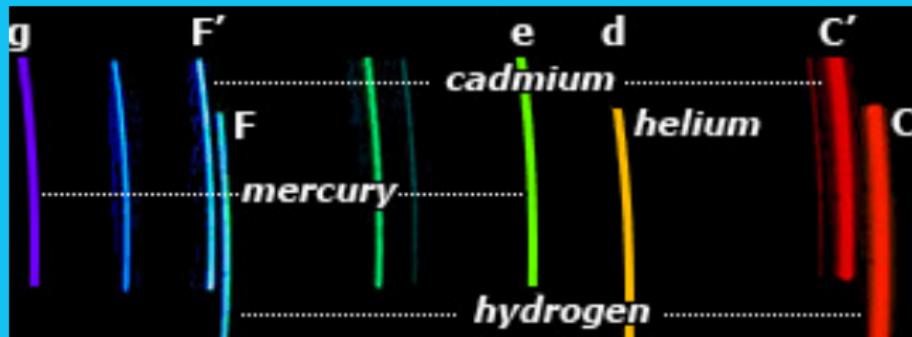
Дисперсия

Числа Аббе (по фраунгоферовым линиям)

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

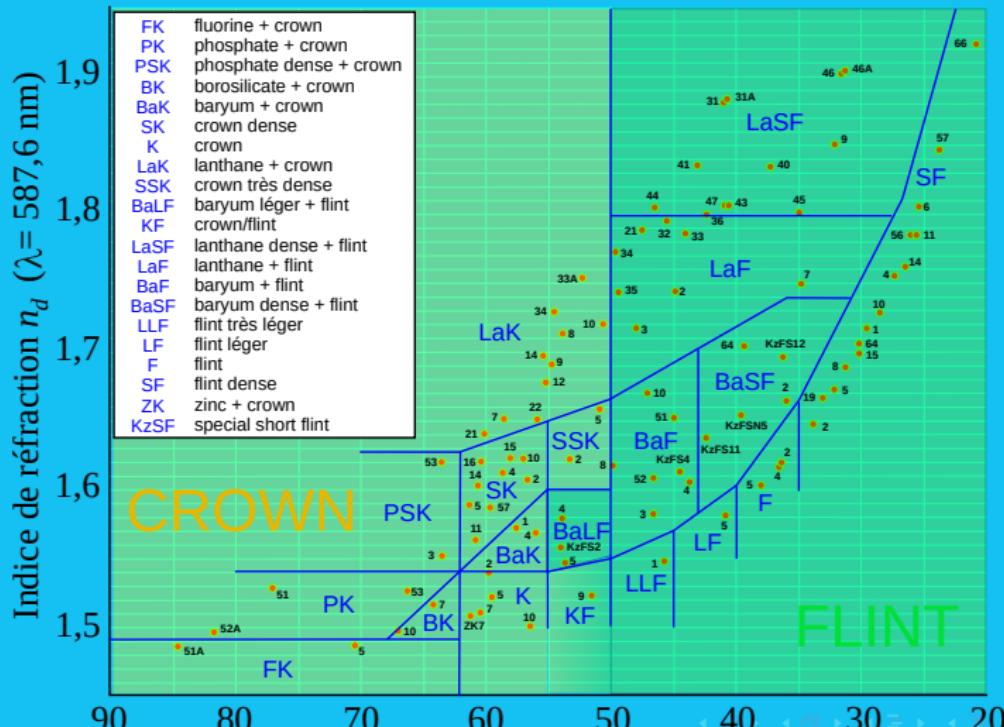
Показатель частной дисперсии (PgF): $PgF = \frac{n_g - n_F}{n_F - n_C}$.

d (He) – 587.6 нм, F (H_β) – 486.1 нм, C (H_α) – 656.3 нм, e (Hg) – 546.1 нм, F' (Cd) – 480.0 нм, C' (Cd) – 643.9 нм, g (Hg) – 435.8 нм.



Дисперсия

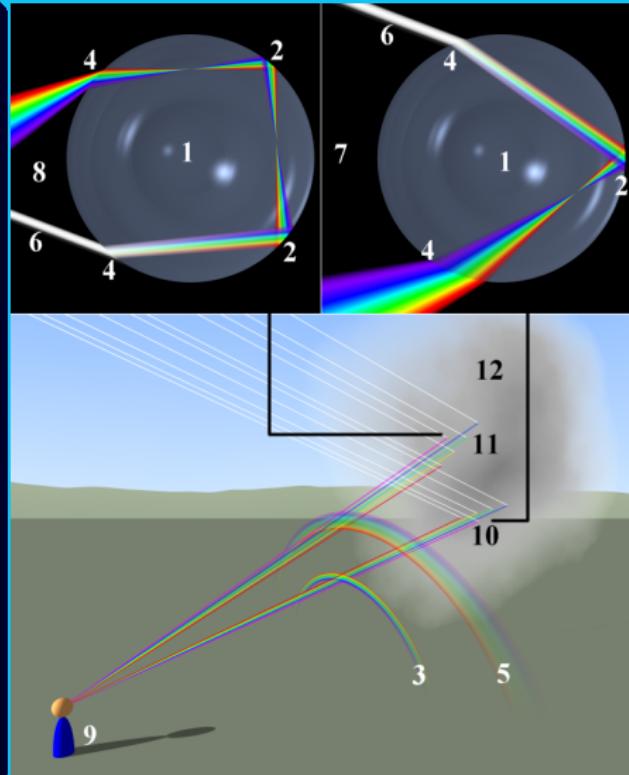
Диаграмма Аббе



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

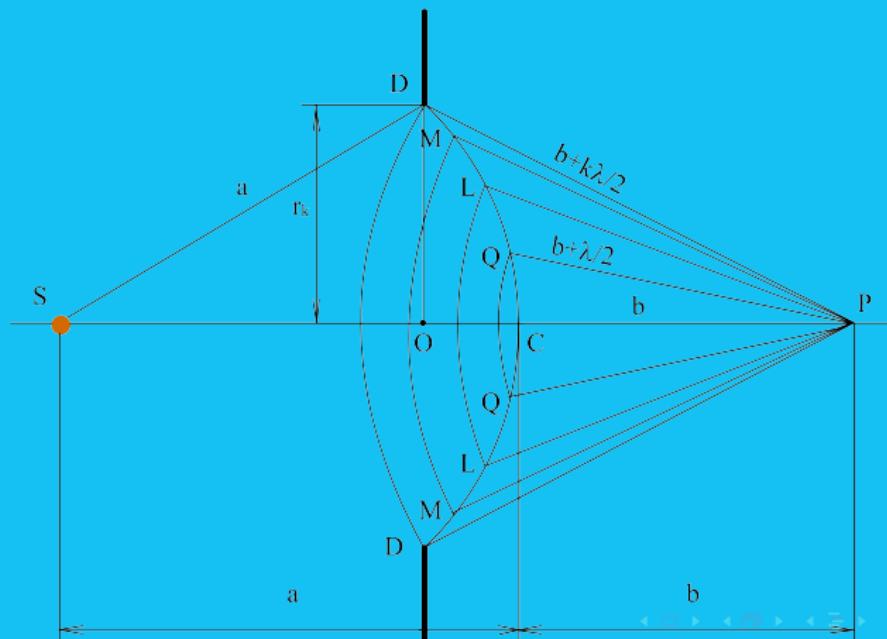


Дифракция

Дифракция Фраунгофера (в дальней зоне):

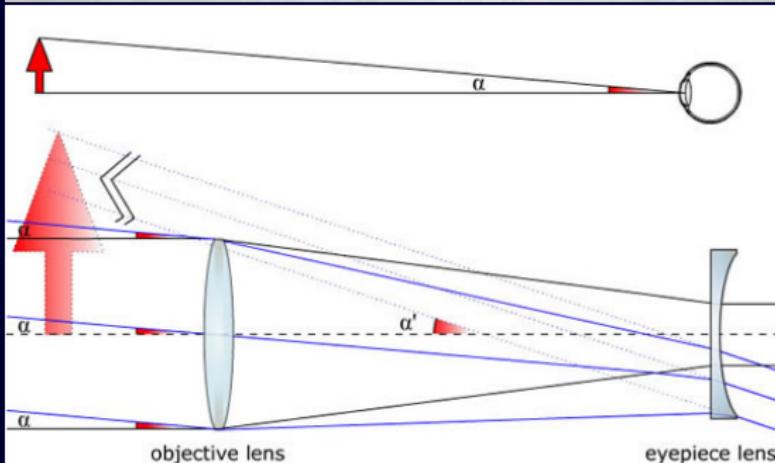
$\frac{W^2}{L\lambda} \ll 1$, W – ширина щели, L – расстояние. $\Phi = \frac{W^2}{L\lambda}$ – число Френеля.

Дифракция Френеля: $\Phi > 1$.



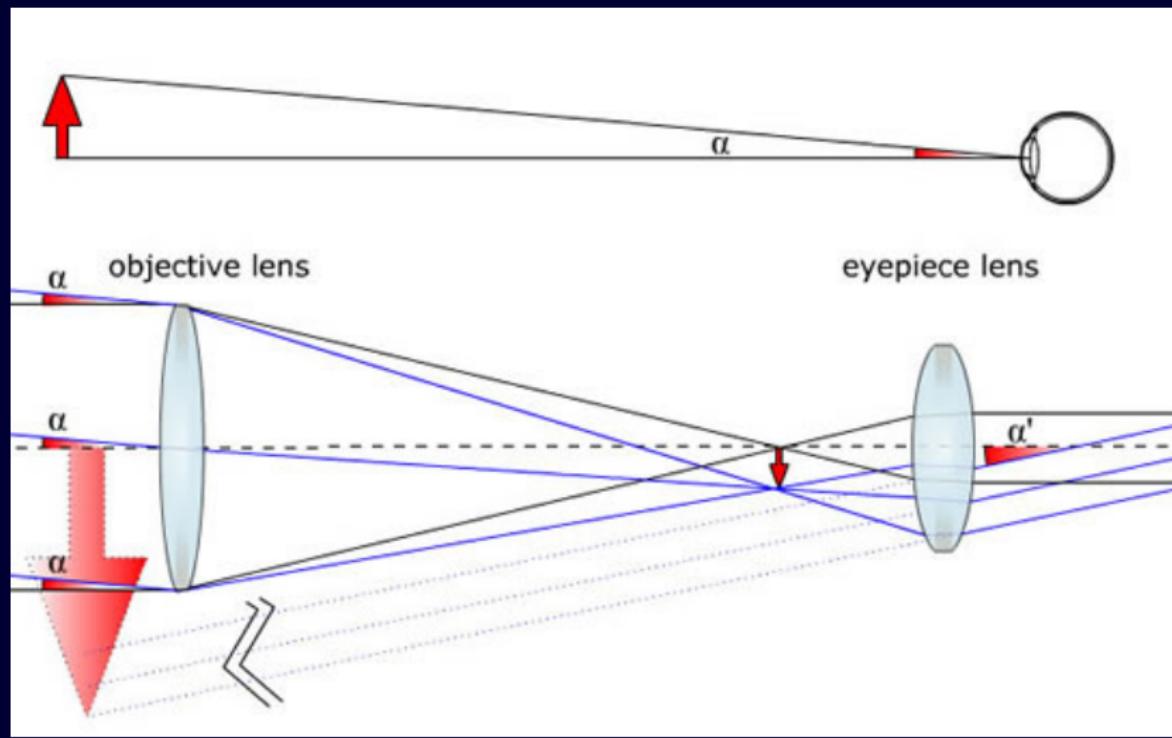
Рефракторы

Галилея



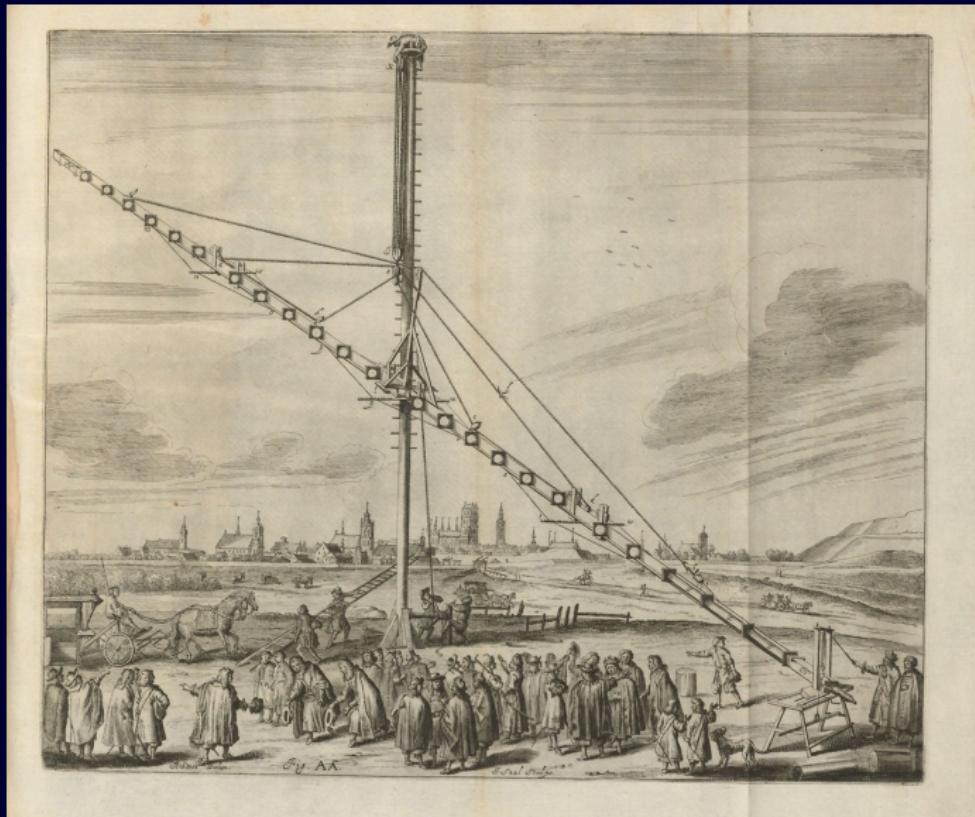
Рефракторы

Кеплера

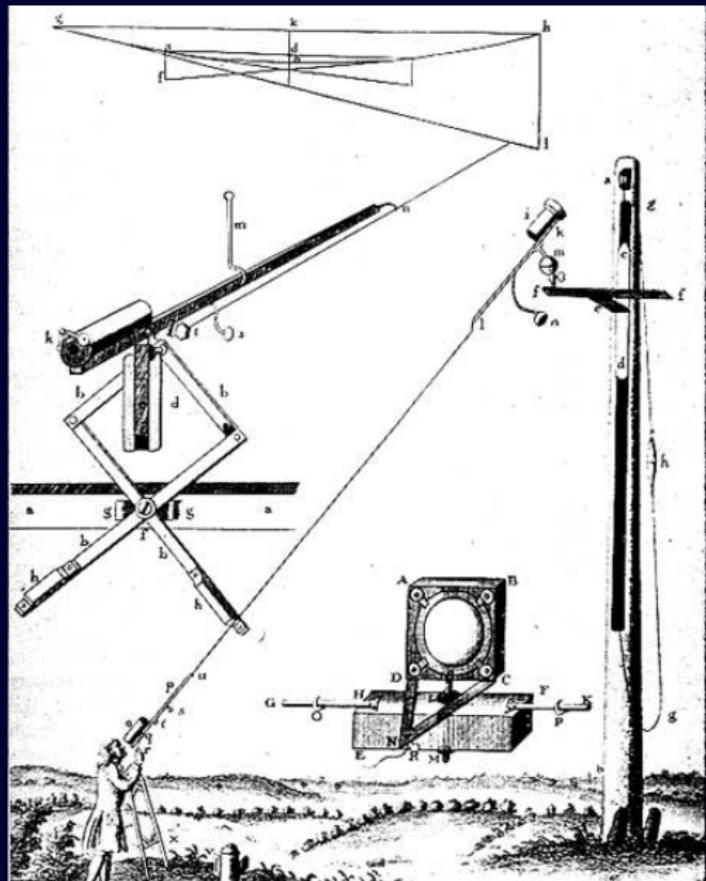


Рефракторы

Яна Гевелия (1641, 46м фокус)



Рефракторы



Емельянов Э.В. (САО РАН)

Телескопы

Гюйгенса (вторая половина XVII века, 37м)
1655 — кольца Сатурна, Титан;
1657 — маятниковые часы;
1659 — туманность Ориона;
1675 — часовая спираль.

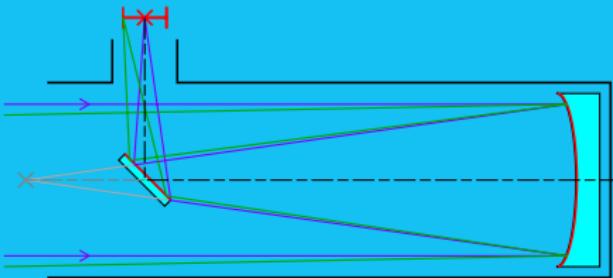
Рефракторы

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



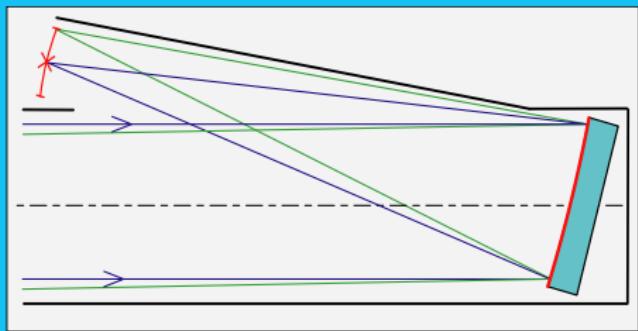
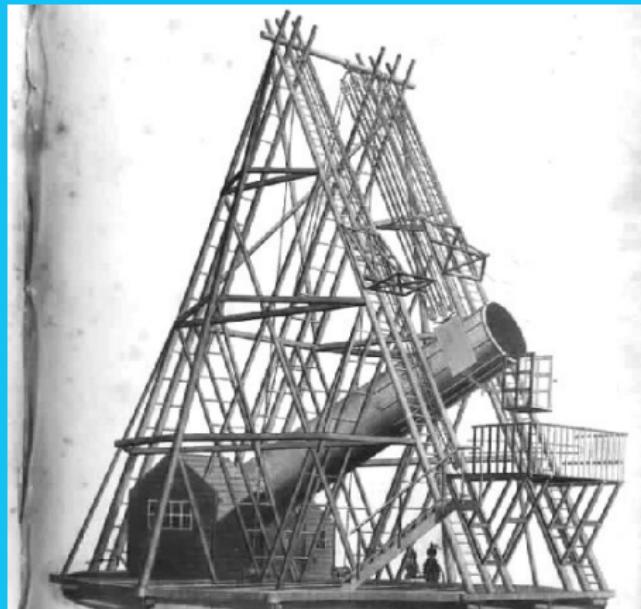
Рефлекто́ры

Ньютона (1668)



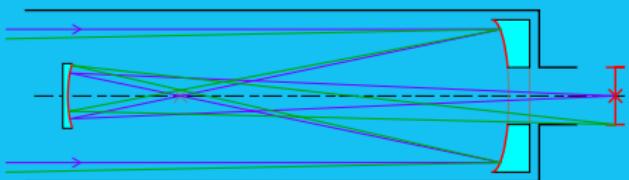
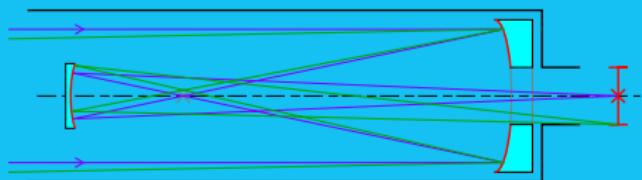
Рефлекторы

Гершеля–Ломоносова (1772/1762)



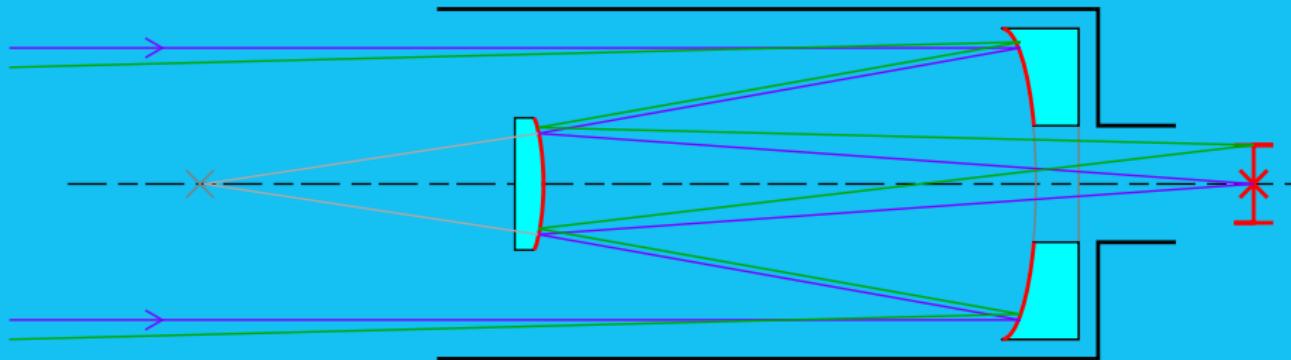
Рефлекторы

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



Рефлекто́ры

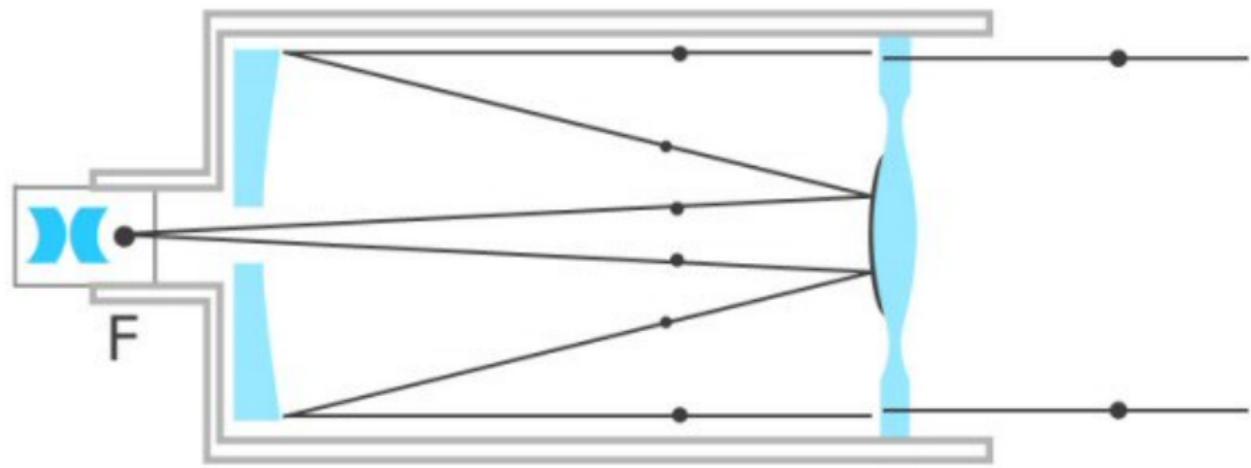
Кассегрена (1672, вариация — Ритчи–кретьен, 1910, 2 гиперболы)



Рефлекторы

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

Schmidt Cassegrain



Полиномы Цернике

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

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

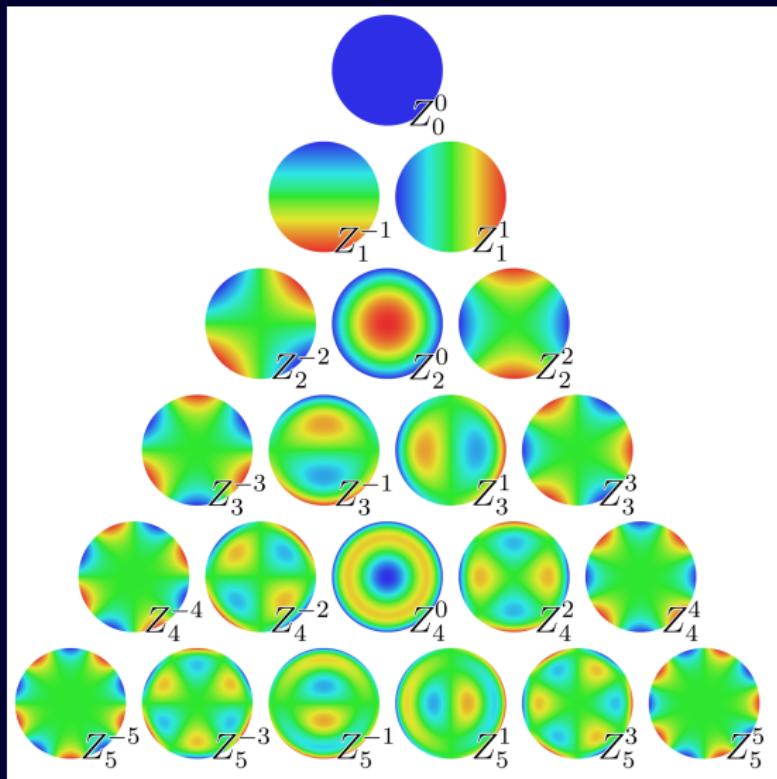
где m и n – положительные целые, $n \geq m$;

φ – угловая координата; ρ – 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

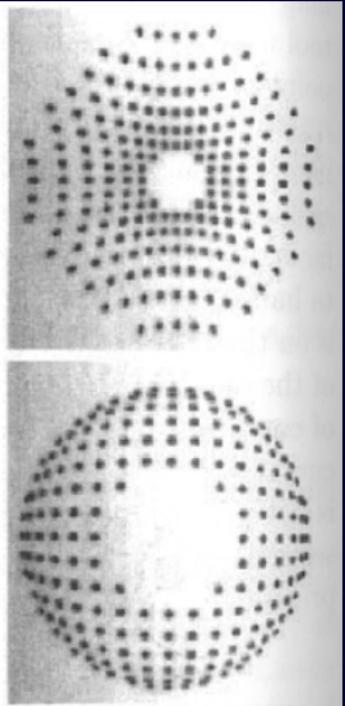
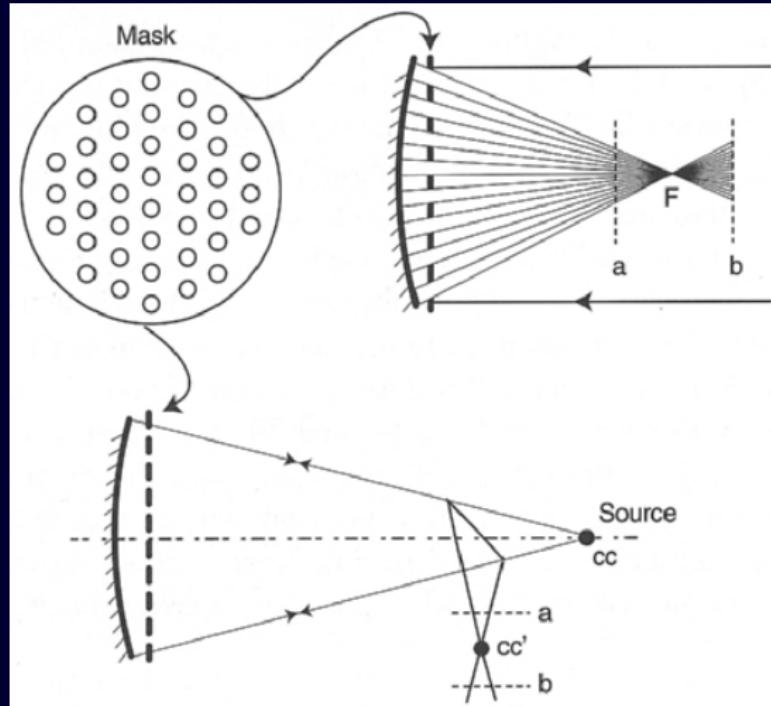


Полиномы Цернике

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

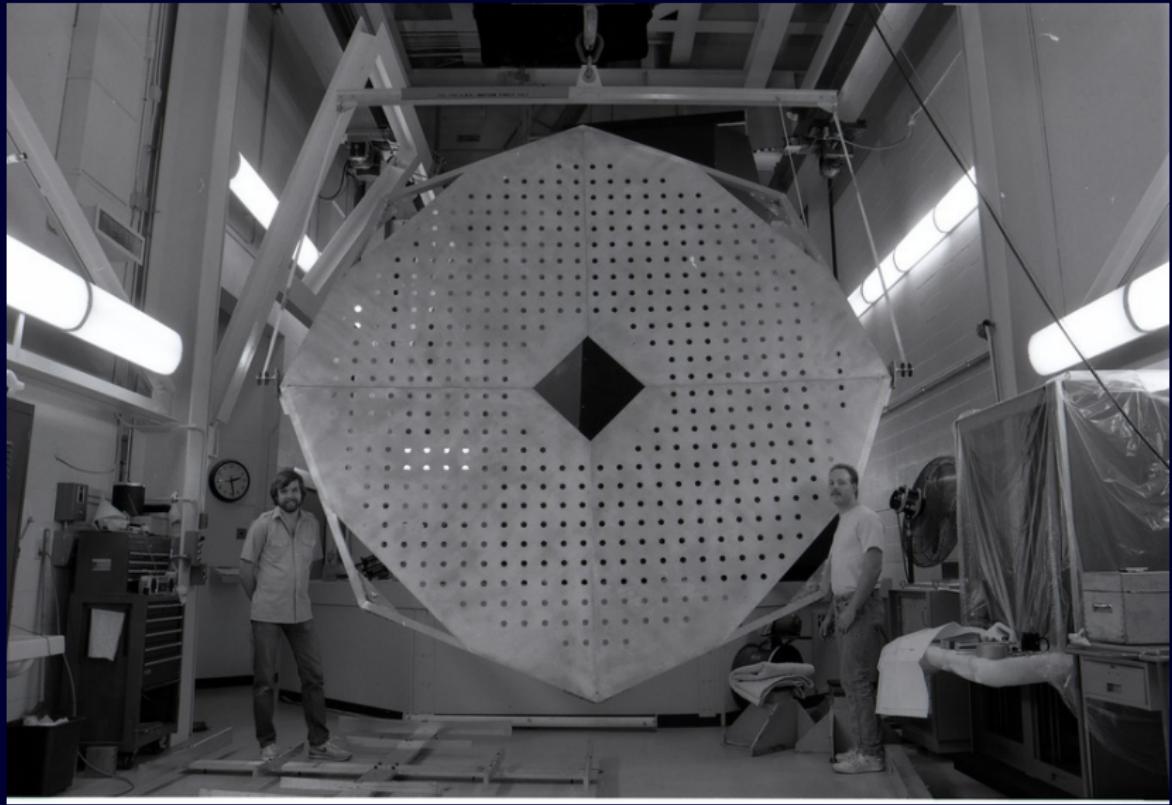
Метод Гартманна

Суть методики



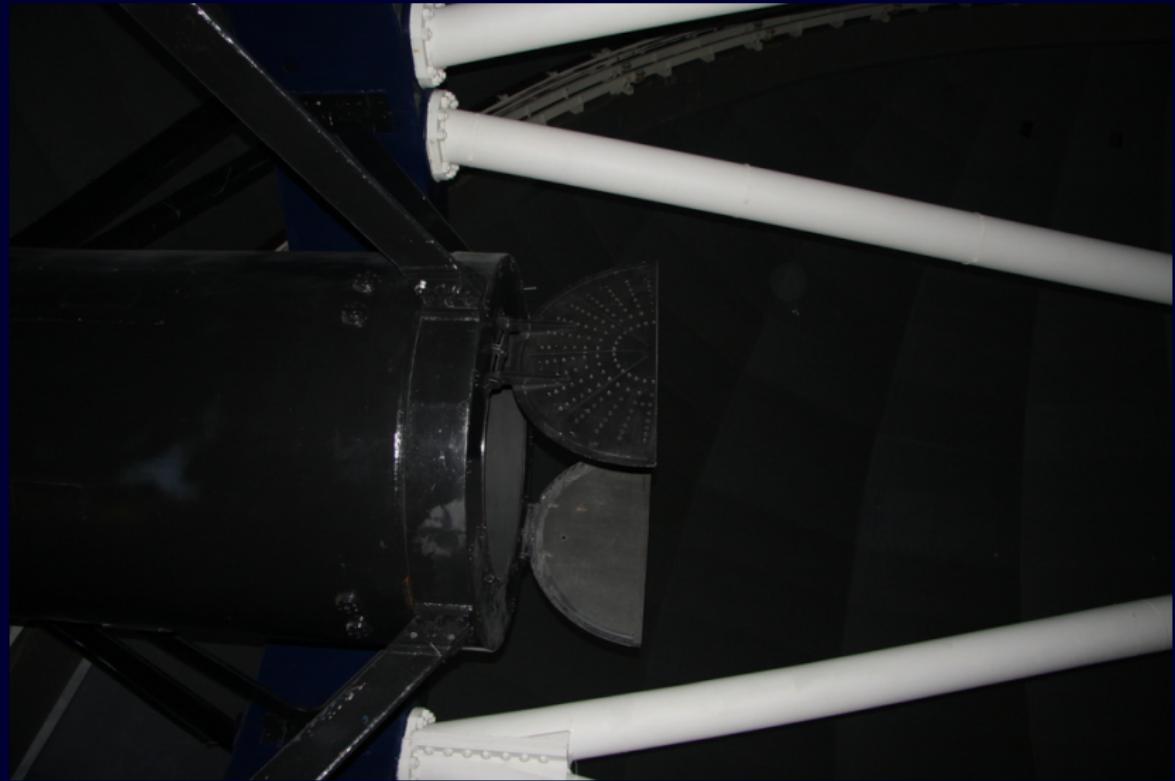
Метод Гартманна

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



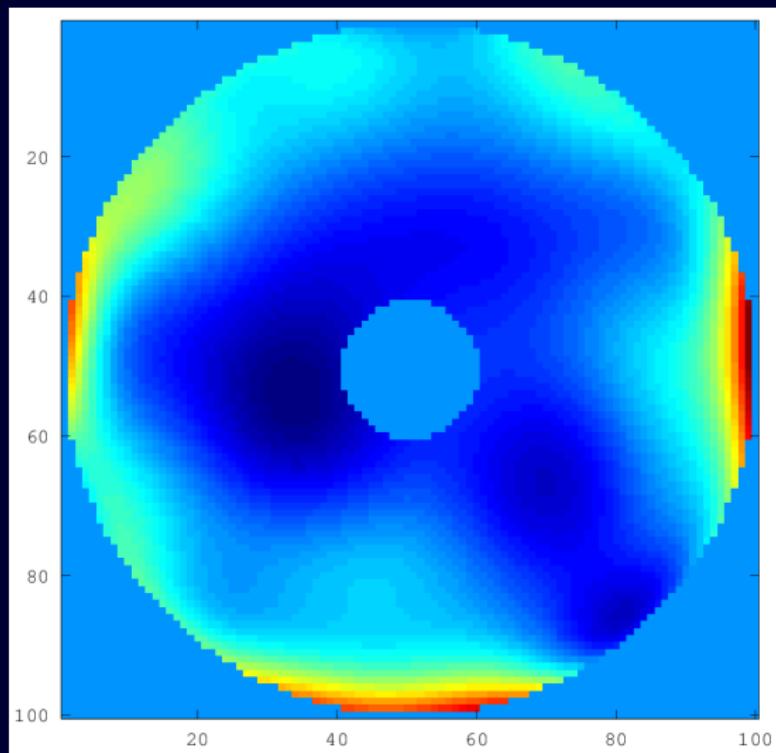
Метод Гартманна

Экран БТА



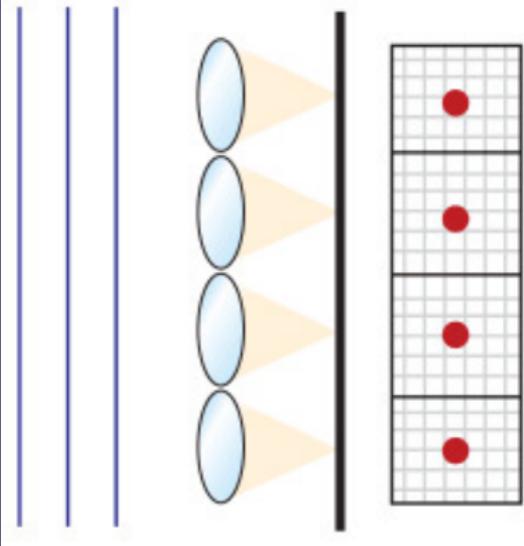
Метод Гартманна

Волновой фронт

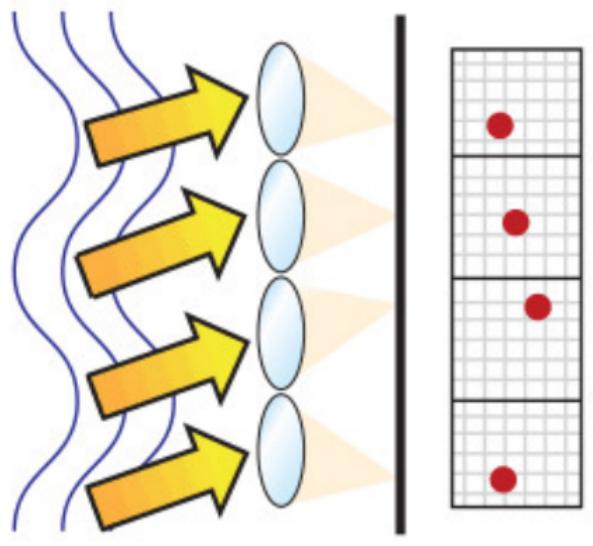


Метод Шака-Гартманна

Plane Wavefront



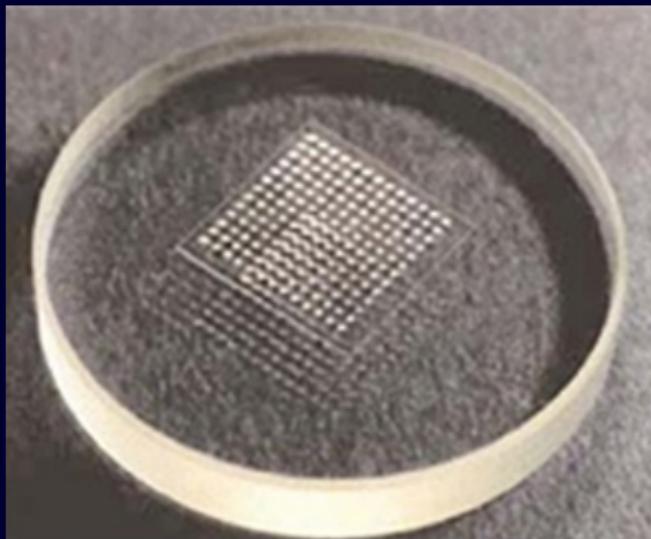
Distorted Wavefront



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 60×60 APO-Q-P1000-F40
(61×61 мм).

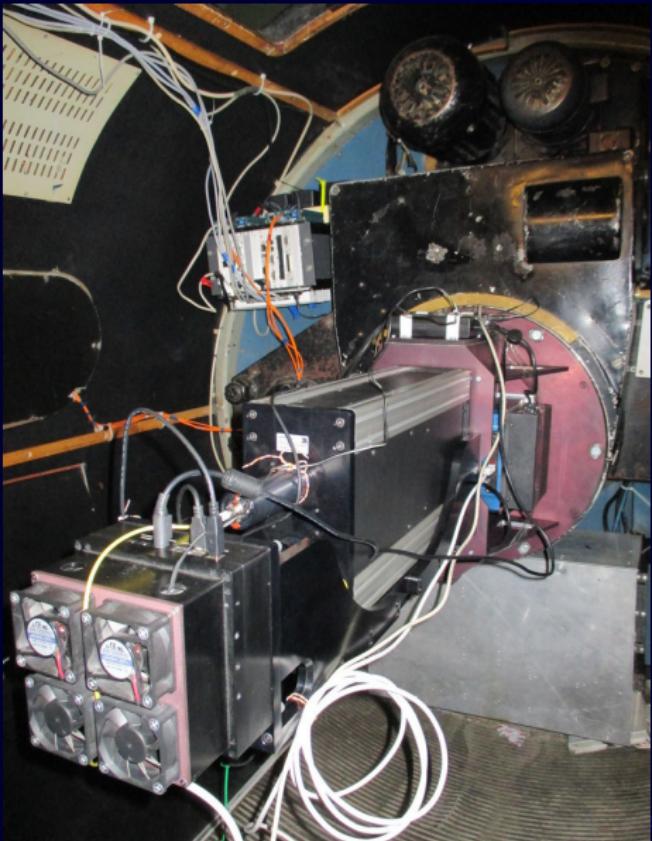


Lenslet array on glass substrate

Метод Шака-Гартманна

Шак-Гартманн на БТА

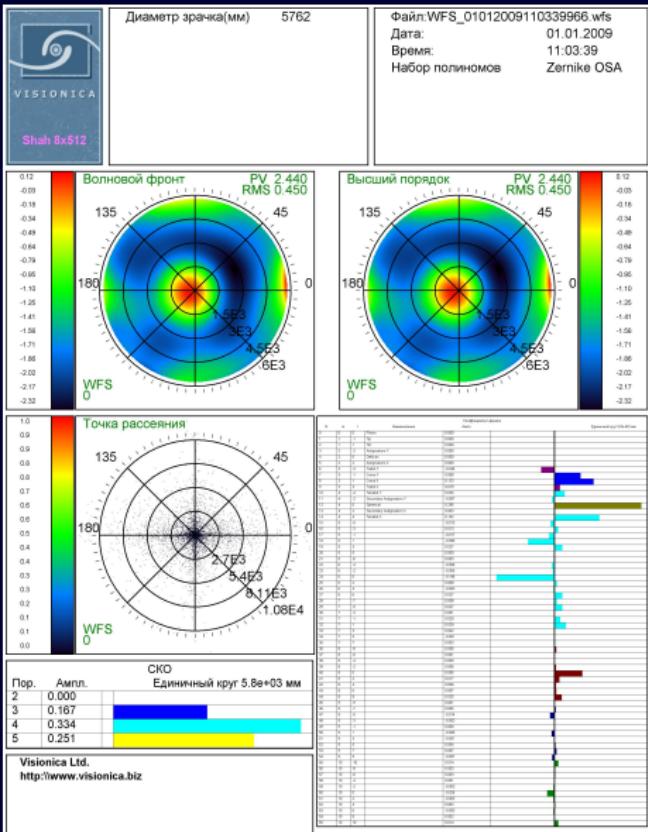
ООО «Визионика», ИПЛИТ РАН.
Применяется с 2015 года.
Имеет более высокое разрешение.
Единственный доступный для БТА
метод.
Растр 60×60 APO-Q-P1000-F40
(61×61 мм).

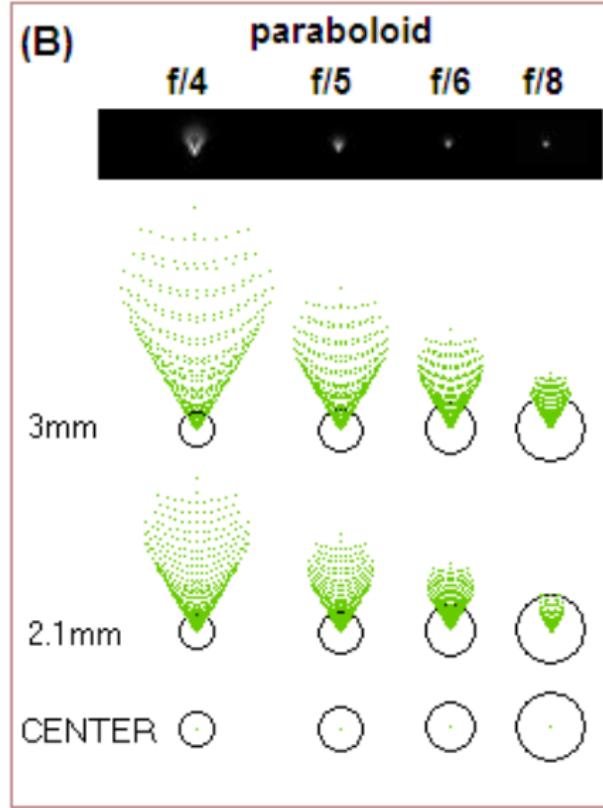
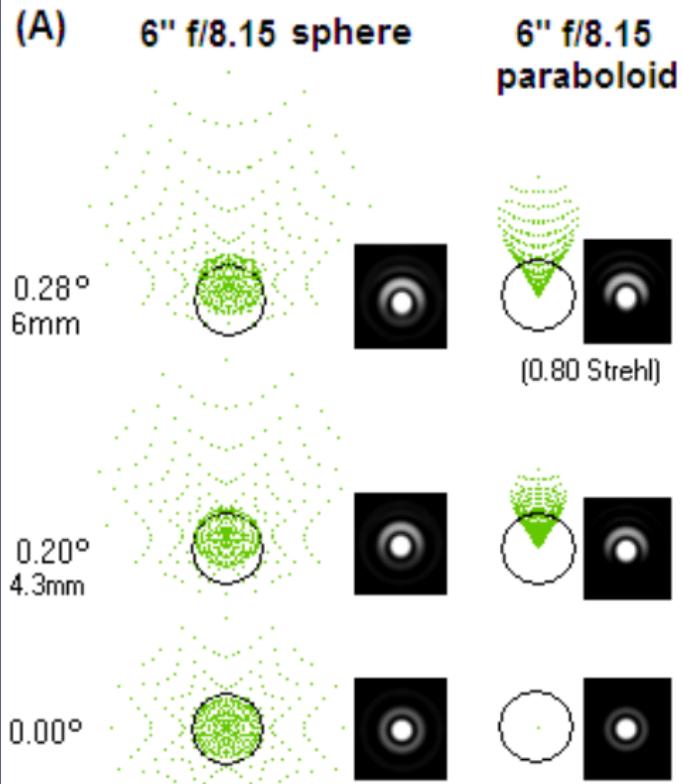


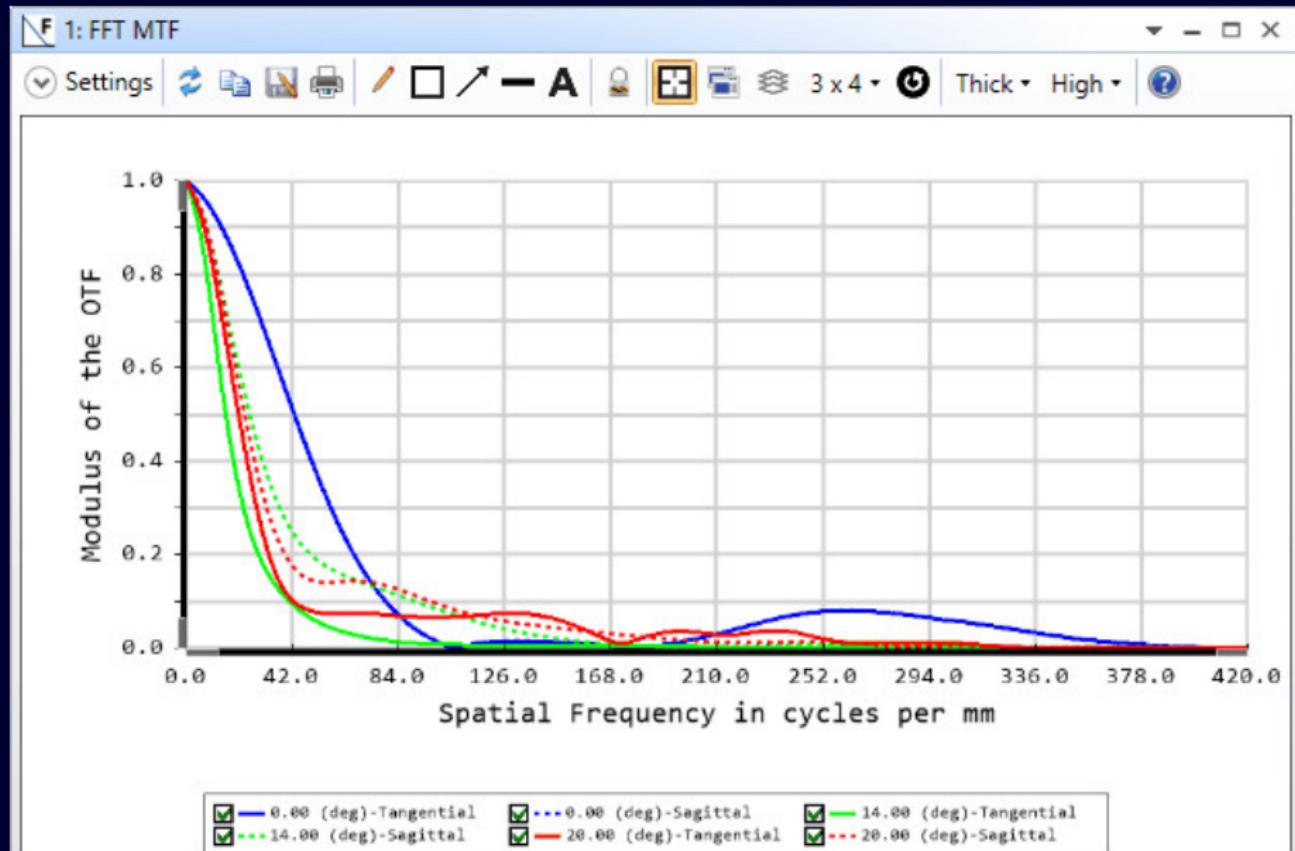
Метод Шака-Гартманна

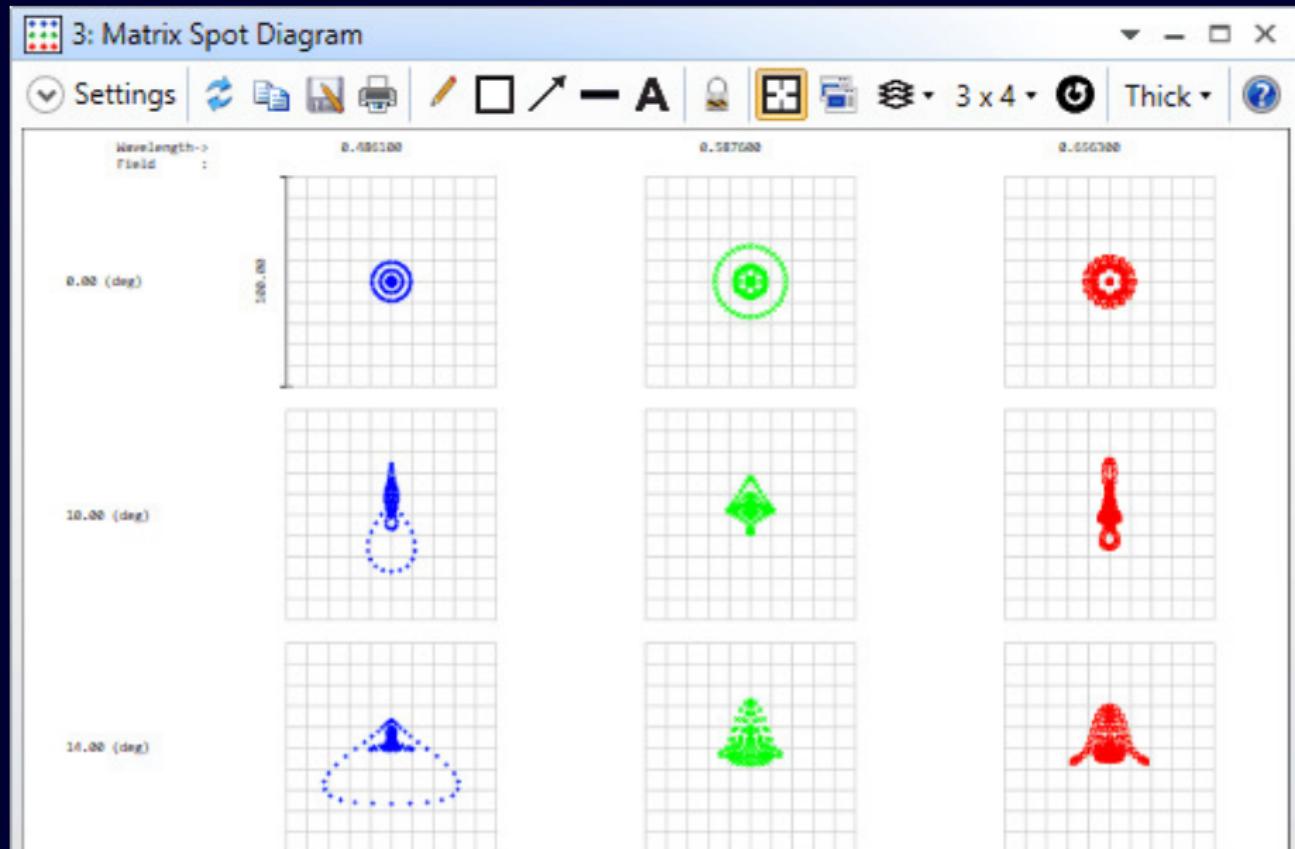
Шак-Гартманн на БТА

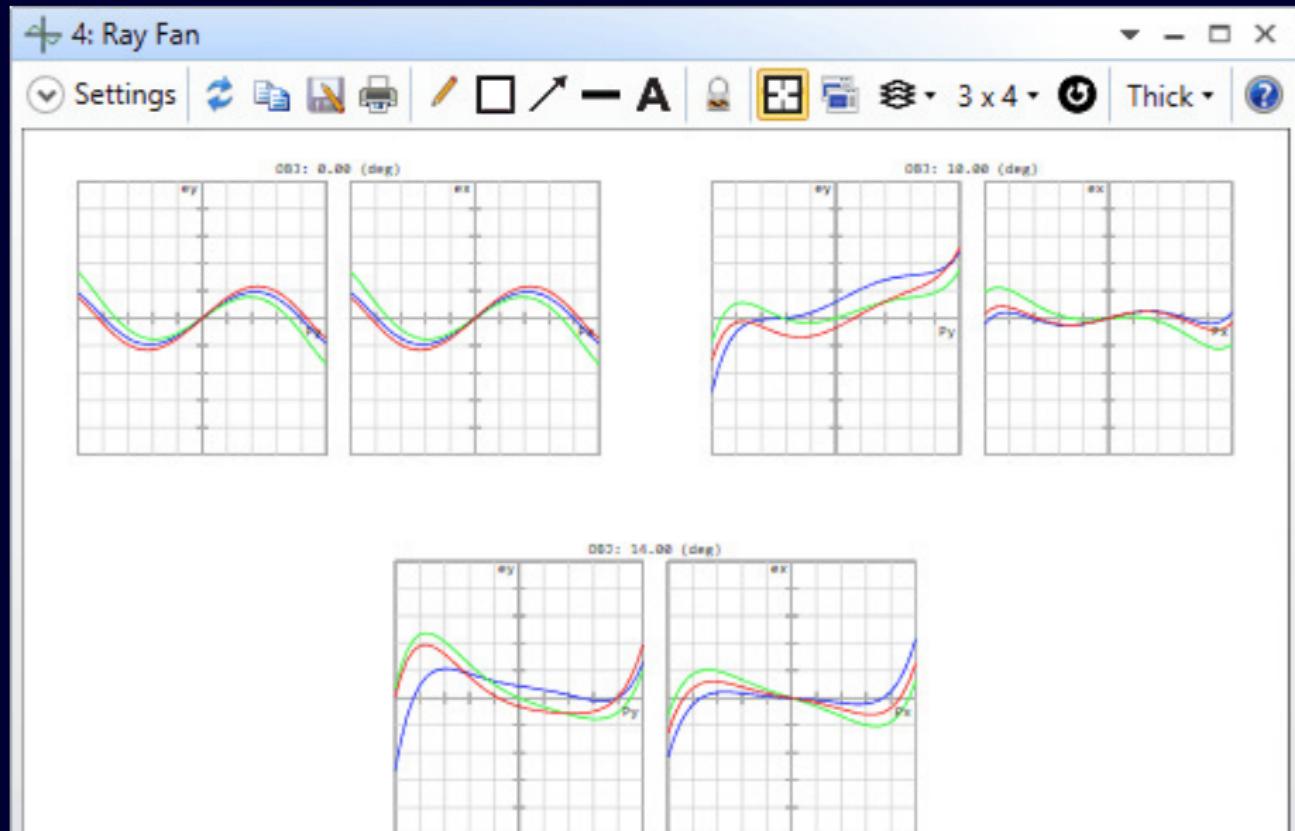
ООО «Визионика», ИПЛИТ РАН.
Применяется с 2015 года.
Имеет более высокое разрешение.
Единственный доступный для БТА
метод.
Растр 60×60 APO-Q-P1000-F40
(61×61 мм).



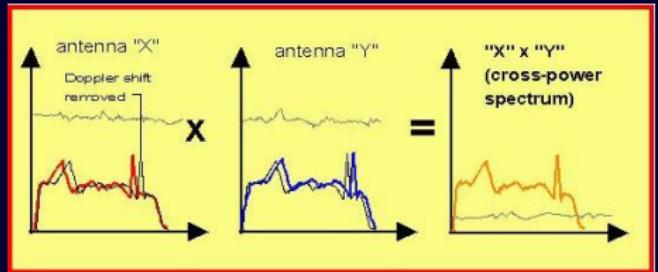








Радиоинтерферометрия



Сверхдлинная база

РСДБ-интерферометр. Данные собираются независимо. Далее осуществляется корреляционная обработка. Квазар-КВО.

