

Наблюдения с высоким контрастом (звездная коронография)

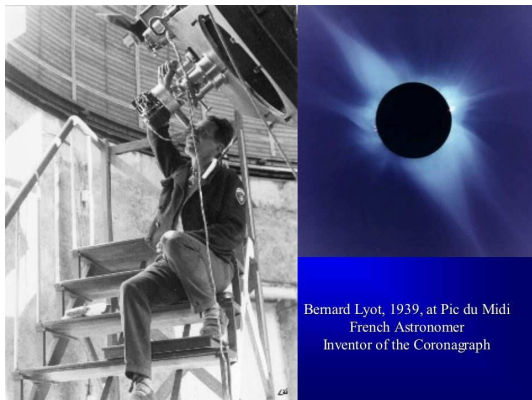
Сафонов Б.С.

Государственный Астрономический Институт им. П.К.Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова

ГАИШ МГУ, Апрель 2020

Звездные коронографы

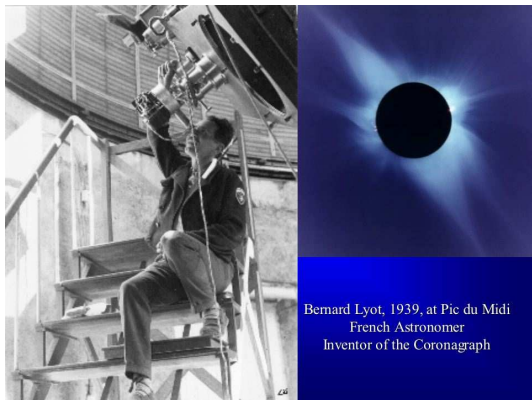
Коронограф значительно ослабляет излучение объекта находящегося на оптической оси системы и пропускает излучение объектов находящихся в других точках поля зрения.



Бернар Лио, 1939.

Звездные коронографы

Коронограф значительно ослабляет излучение объекта находящегося на оптической оси системы и пропускает излучение объектов находящихся в других точках поля зрения.



Бернар Лио, 1939.

План лекции

- 1 Зачем нужна коронография
- 2 Виды коронографов
- 3 Приемы повышения контраста
- 4 Коронография в космосе

Контраст

Для коронографов ключевым понятием является контраст ϵ и разделение d :

- Яркий источник (условно звезда) — поток F .
- Слабый источник (условно планета) — поток ϵF на расстоянии d от яркого.



Контраст

Для коронографов ключевым понятием является контраст ϵ и разделение d :

- Яркий источник (условно звезда) — поток F .
- Слабый источник (условно планета) — поток ϵF на расстоянии d от яркого.



Немного терминологии

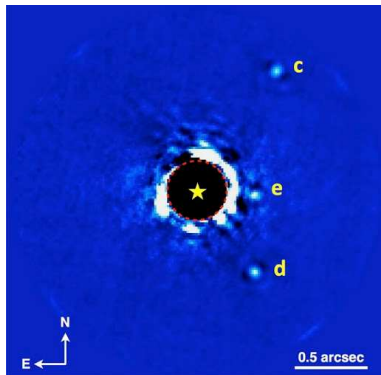
ϵ	10^{-2}	10^{-6}
контраст	ниже	выше

Косвенные методы

- 1 Лучевые скорости → масса, орбита.
- 2 Транзиты → орбитальный период, радиус, состав атмосферы.
- 3 Астрометрия → масса, орбита.
- 4 Микролинзирование → масса, орбита.

Косвенные методы

- 1 Лучевые скорости → масса, орбита.
- 2 Транзиты → орбитальный период, радиус, состав атмосферы.
- 3 Астрометрия → масса, орбита.
- 4 Микролинзирование → масса, орбита.



Коронаграфия позволяет применять методы прямой астрометрии, фотометрии и спектроскопии:

- 1 Орбита
- 2 Состав атмосферы
- 3 Радиус
- 4 Свойства и состав поверхности (отраженный свет, в будущем)

Ожидаемые наблюдаемые параметры экзопланет

при прямом обнаружении

планета	$\lambda, \mu\text{m}$	ϵ	$d, ''$
HR8799 d	1-5	2×10^{-5}	0.95
Юпитер@10 пк	10	10^{-8}	0.5
	0.5	2×10^{-9}	0.5
Земля@10 пк	10	10^{-7}	0.1
	0.5	10^{-10}	0.1
Proxima Cen b	0.5	10^{-7}	0.038

Ожидаемые наблюдаемые параметры экзопланет

при прямом обнаружении

планета	$\lambda, \mu\text{m}$	ϵ	$d, ''$
HR8799 d	1-5	2×10^{-5}	0.95
Юпитер@10 пк	10	10^{-8}	0.5
	0.5	2×10^{-9}	0.5
Земля@10 пк	10	10^{-7}	0.1
	0.5	10^{-10}	0.1
Proxima Cen b	0.5	10^{-7}	0.038

- На данных момент прямым методом (коронография+АО) обнаружено 15 экзопланет, во всех случаях обнаружено **тепловое излучение** в ближнем ИК-диапазоне.

Ожидаемые наблюдаемые параметры экзопланет

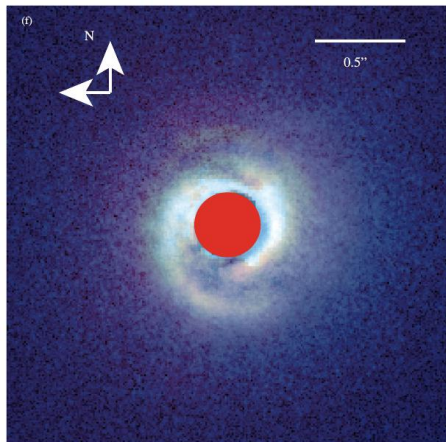
при прямом обнаружении

планета	$\lambda, \mu\text{m}$	ϵ	$d, ''$
HR8799 d	1-5	2×10^{-5}	0.95
Юпитер@10 пк	10	10^{-8}	0.5
	0.5	2×10^{-9}	0.5
Земля@10 пк	10	10^{-7}	0.1
	0.5	10^{-10}	0.1
Proxima Cen b	0.5	10^{-7}	0.038

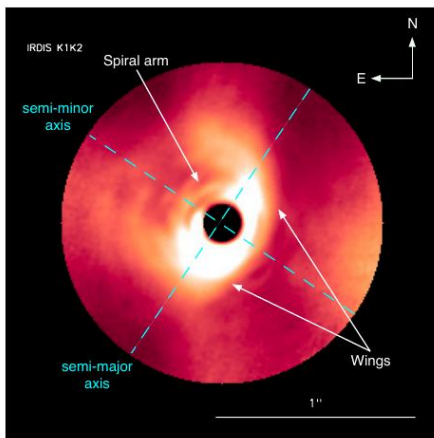
- На данных момент прямым методом (коронография+АО) обнаружено 15 экзопланет, во всех случаях обнаружено **тепловое излучение** в ближнем ИК-диапазоне.
- В рассеянном свете ни одна экзопланета не наблюдалась

Протопланетные диски

MWC758, Grady et al, 2013



HD100546, Sissa et al, 2018



- Как образуются планеты?
- Косвенное обнаружение по структурам в диске.

Звезды на поздних стадиях эволюции

R Aqr, Schmid et al 2017

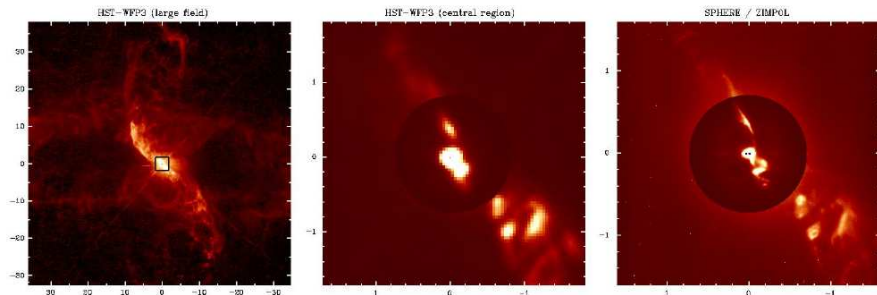


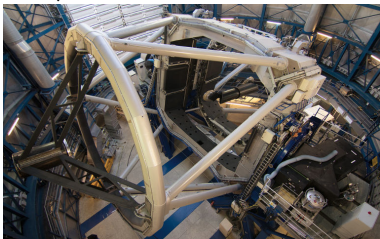
Fig. 1. H α images of R Aqr from HST-WFC3 and VLT-SPHERE/ZIMPOL taken in October 2014. The *left panel* shows a $70'' \times 70''$ cutout of the WFC3 image of the strongly structured extended nebula. The *middle panel* is the $3.5'' \times 3.5''$ region of the WFC3 image of the central star indicated with the square in the left panel. The *right panel* is the central $3.2'' \times 3.2''$ area imaged with higher spatial resolution using SPHERE/ZIMPOL where also the two stars are marked with black dots. The color scale is 10 times enhanced for the central $r < 0.7''$ region in the middle and the right panel. North is up and East to the left.

- Каким образом происходит потеря массы (пульсации, конвекция)?
- Происхождение межзвездной пыли.

Science-driven requirements

- Нужен большой телескоп ($\lambda/D \approx 20 - 50 \text{ mas}$).

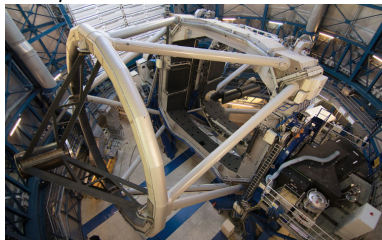
VLT/SPHERE



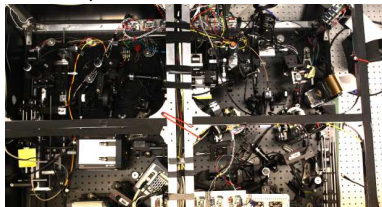
Science-driven requirements

- Нужен большой телескоп ($\lambda/D \approx 20 - 50 \text{ mas}$).
- Наземный: адаптивная оптика.

VLT/SPHERE



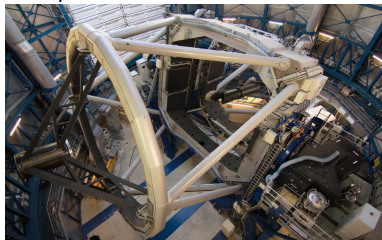
Subaru/SCeXAO



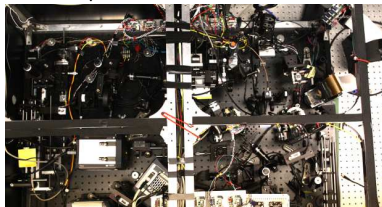
Science-driven requirements

- Нужен большой телескоп ($\lambda/D \approx 20 - 50 \text{ mas}$).
- Наземный: адаптивная оптика.
- Размещение над атмосферой.

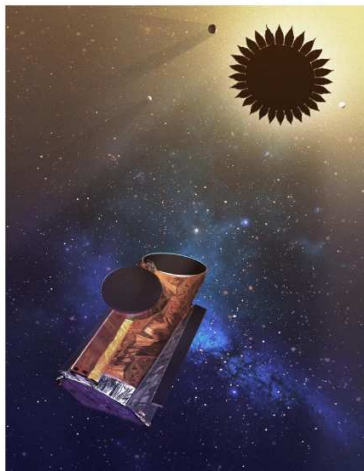
VLT/SPHERE



Subaru/SCeXAO



HabEx ($\gtrsim 2030$)



Телескоп без коронографа

Уравнение формирования изображения I некоторого объекта O в фокальной плоскости телескопа:

$$I(\vec{x}) = T(\vec{x}) \otimes O(\vec{x}). \quad (1)$$

$T(\vec{x})$ — функция рассеяния точки, \vec{x} — вектор двумерной угловой координаты, \otimes — свертка.

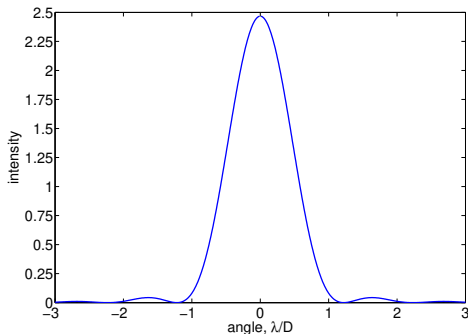
Телескоп без коронографа

Уравнение формирования изображения I некоторого объекта O в фокальной плоскости телескопа:

$$I(\vec{x}) = T(\vec{x}) \otimes O(\vec{x}). \quad (1)$$

$T(\vec{x})$ — функция рассеяния точки, \vec{x} — вектор двумерной угловой координаты, \otimes — свертка.

Круглая апертура, плоский волновой фронт \rightarrow ФРТ T — функция Эйри.



Телескоп без коронографа

Уравнение формирования изображения I некоторого объекта O в фокальной плоскости телескопа:

$$I(\vec{x}) = T(\vec{x}) \otimes O(\vec{x}). \quad (1)$$

$T(\vec{x})$ — функция рассеяния точки, \vec{x} — вектор двумерной угловой координаты, \otimes — свертка.

Предположим, что объект представляет собой двойной источник:

$$O(\vec{x}) = \delta(\vec{x}) + \epsilon \delta(\vec{x} - \vec{d}). \quad (2)$$

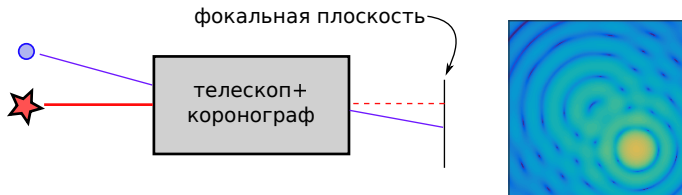
ϵ — контраст, \vec{d} — вектор разделения.



Телескоп с коронографом

В случае коронографа ФРТ зависит от положения в фокальной плоскости $T(\vec{x}_{\text{sky}}, \vec{x})$.

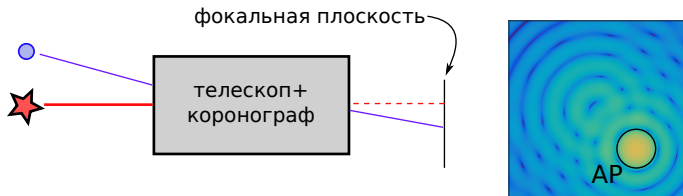
- $T(0, \vec{x})$ — ФРТ на оси (по возможности ослаблено).
- $T(\vec{d}, \vec{x})$ — ФРТ не на оси (по возможности не ослаблено).



Телескоп с коронографом

В случае коронографа ФРТ зависит от положения в фокальной плоскости $T(\vec{x}_{\text{sky}}, \vec{x})$.

- $T(0, \vec{x})$ — ФРТ на оси (по возможности ослаблено).
- $T(\vec{d}, \vec{x})$ — ФРТ не на оси (по возможности не ослаблено).



Допустим, измеряем поток в апертуре AP:

Звезда:

$$\xi_s(\vec{d}) = \int_{\text{AP}(\vec{d})} T(0, \vec{x}) d\vec{x} \quad (3)$$

Планета:

$$\xi_p(\vec{d}) = \int_{\text{AP}(\vec{d})} T(\vec{d}, \vec{x}) d\vec{x} \quad (4)$$

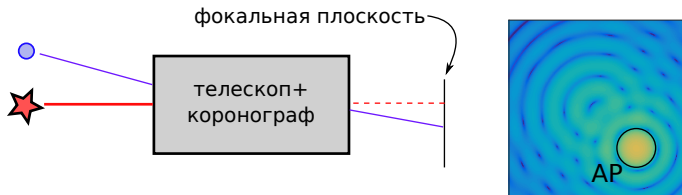
Raw contrast & throughput



Исходный контраст C :

$$C(\vec{d}) = \frac{\xi_s(\vec{d})}{\xi_p(\vec{d})}. \quad (5)$$

Raw contrast & throughput



Исходный контраст C :

$$C(\vec{d}) = \frac{\xi_s(\vec{d})}{\xi_p(\vec{d})}. \quad (5)$$

Пропускание E :

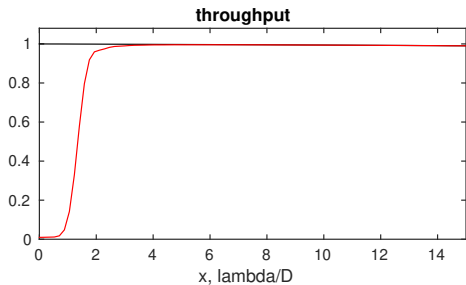
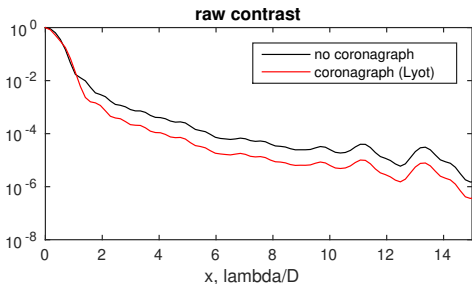
$$E(\vec{d}) = \xi_p(\vec{d}) / \xi_{\text{tel}}(\vec{d}), \quad (6)$$

где

$$\xi_{\text{tel}}(\vec{d}) = \int_{\text{AP}(\vec{d})} T_0(\vec{x}) d\vec{x}, \quad (7)$$

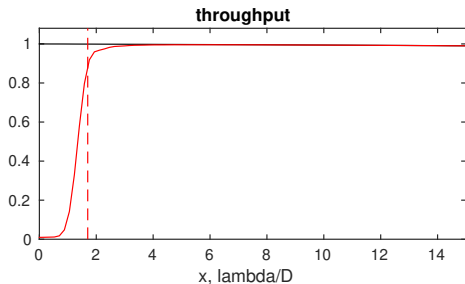
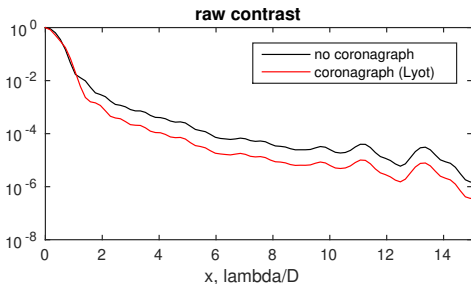
а T_0 — ФРТ телескопа без коронографа.

Raw contrast & throughput



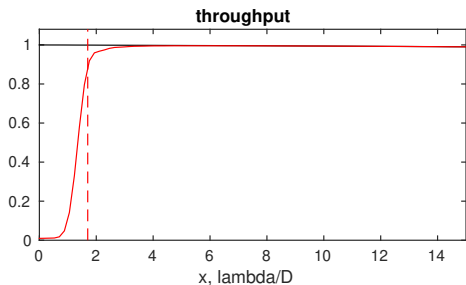
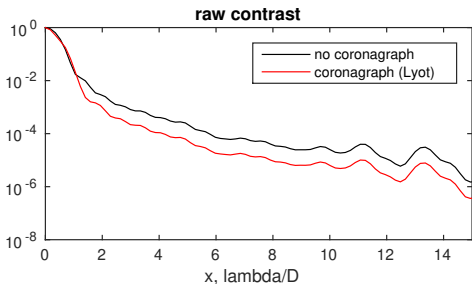
- Зависят только от свойств оптики телескопа и коронографа.

Raw contrast & throughput



- Зависят только от свойств оптики телескопа и коронографа.
- **Inner working angle** — внутренний рабочий радиус.

Raw contrast & throughput



- Зависят только от свойств оптики телескопа и коронографа.
- **Inner working angle** — внутренний рабочий радиус.
- Более эффективный коронограф может иметь больший внутренний рабочий радиус → оптимизация!

Фотонный шум

Количество фотонов, регистрируемых от звезды S_s и планеты S_p :

$$S_s = (\xi_s / \xi_{\text{stel}}) N_*$$

$$S_p = (\xi_p / \xi_{\text{stel}}) \epsilon N_*$$

Здесь N_* — количество фотонов, регистрируемых в апертуре AP без коронографа.

Соотношение сигнал–шум:

Фотонный шум

Количество фотонов, регистрируемых от звезды S_s и планеты S_p :

$$S_s = (\xi_s/\xi_{\text{tel}})N_*$$

$$S_p = (\xi_p/\xi_{\text{tel}})\epsilon N_*$$

Здесь N_* — количество фотонов, регистрируемых в апертуре AP без коронографа.

Соотношение сигнал–шум:

$$\text{SNR} = S_p/\sqrt{S_s}$$

Фотонный шум

Количество фотонов, регистрируемых от звезды S_s и планеты S_p :

$$S_s = (\xi_s/\xi_{\text{tel}})N_*$$

$$S_p = (\xi_p/\xi_{\text{tel}})\epsilon N_*$$

Здесь N_* — количество фотонов, регистрируемых в апертуре AP без коронографа.

Соотношение сигнал–шум:

$$\text{SNR} = S_p/\sqrt{S_s} = \epsilon\sqrt{\frac{N_*E}{C}}.$$

Фотонный шум

Количество фотонов, регистрируемых от звезды S_s и планеты S_p :

$$S_s = (\xi_s/\xi_{\text{tel}})N_*, \quad S_p = (\xi_p/\xi_{\text{tel}})\epsilon N_*.$$

Здесь N_* — количество фотонов, регистрируемых в апертуре AP без коронографа.

Соотношение сигнал–шум:

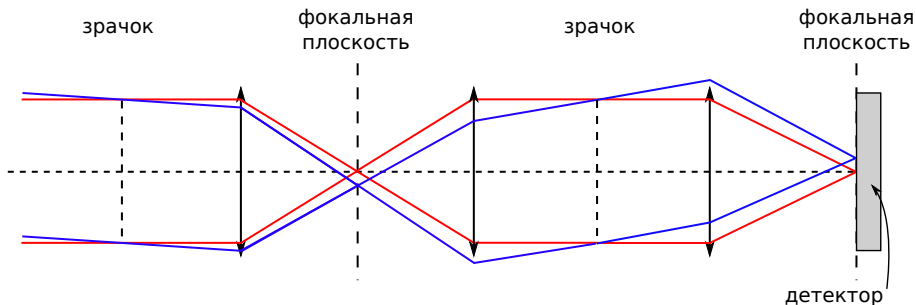
$$\text{SNR} = S_p/\sqrt{S_s} = \epsilon\sqrt{\frac{N_*E}{C}}.$$

Контраст, достижимый в присутствии фотонного шума ($\text{SNR}=1$):

$$\epsilon = \sqrt{\frac{C}{N_*E}}.$$

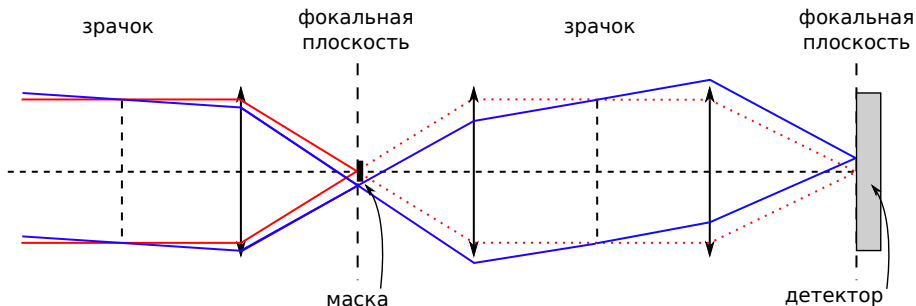
Солнце на расстоянии 10 пк, телескоп 5 м, накопление 1 час, $E = 0.1$:
 $\epsilon = 10^{-10}$ достигается при $C = 10^{-10}$.

Коронаграф Лио (классический)



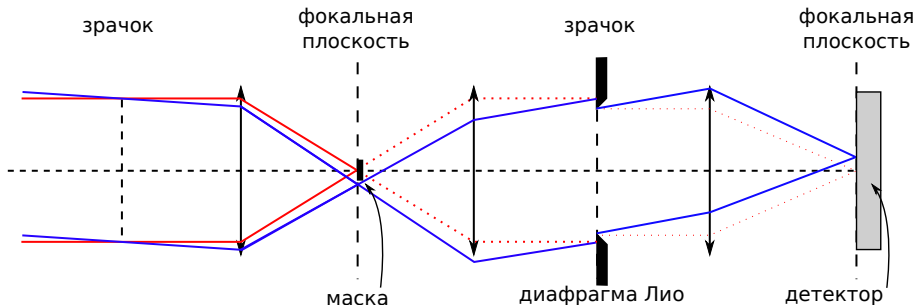
- Выходной зрaчок — изображение входного зрaчка (апертуры) в оптической схеме.

Коронаграф Лио (классический)



- Выходной зрачок — изображение входного зрачка (апертуры) в оптической схеме.
- В фокальную плоскость помещается непрозрачная маска.

Коронаграф Лио (классический)

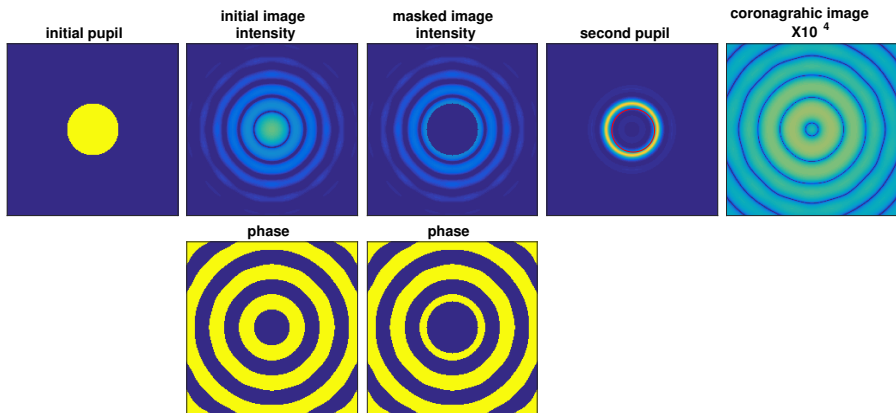


- Выходной зрачок — изображение входного зрачка (апертуры) в оптической схеме.
- В фокальную плоскость помещается непрозрачная маска.
- В последующий зрачок помещается диафрагма, пропускающая лишь часть пучка — диафрагма.

Коронаграф Лио (классический)

Непрозрачная круглая маска в фокальной плоскости, диафрагма во второй плоскости зрачка (диафрагма Лио).

Источник на оси:



Коронаграф Лио (классический)

Непрозрачная круглая маска в фокальной плоскости, диафрагма во второй плоскости зрачка (диафрагма Лио).

Источник смещен на $2\lambda/D$:

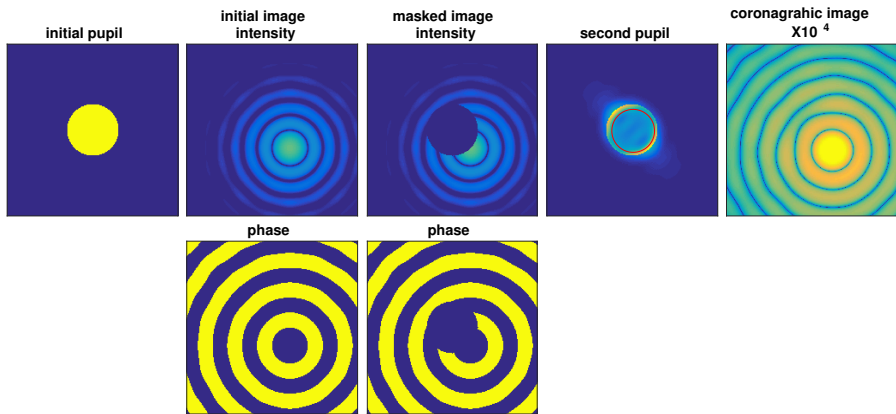


Схема “четыре квадранта”

Фазовая маска: $+\pi$ к фазе в двух из четырех квадрантов, диафрагма во второй плоскости зрочка (диафрагма Лео). Rouan D. et al, 2000.

Источник на оси:

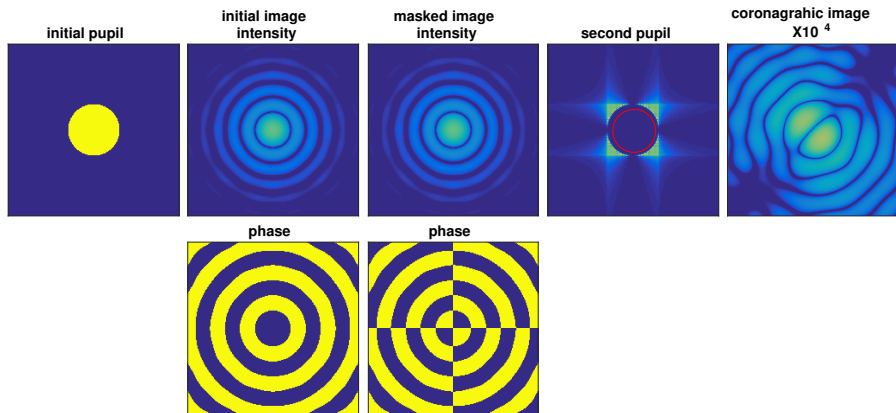


Схема “четыре квадранта”

Фазовая маска: $+\pi$ к фазе в двух из четырех квадрантов, диафрагма во второй плоскости зрачка (диафрагма Лео). Rouan D. et al, 2000.
Источник смещен на $2\lambda/D$:

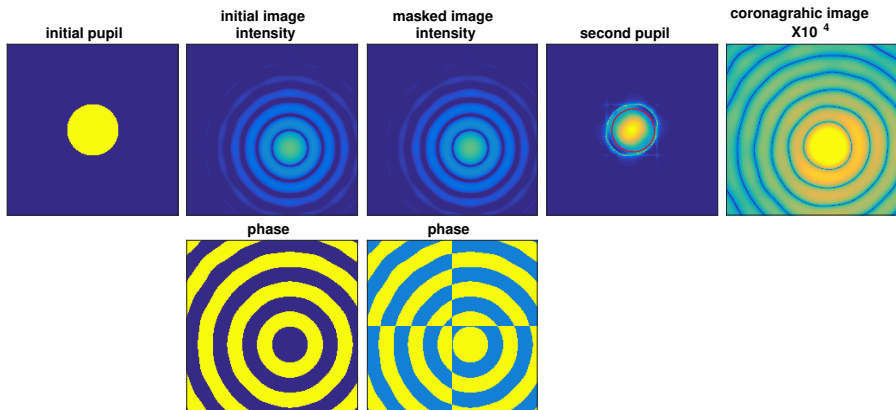


Схема “оптический вихрь”

Фазовая маска: $+l\theta$ к фазе, где θ — позиционный угол в фокальной плоскости, l — четное число (т.н. топологический заряд), диафрагма во второй плоскости зрачка (**диафрагма Лео**) (Mawet D. et al 2005).

Источник на оси:

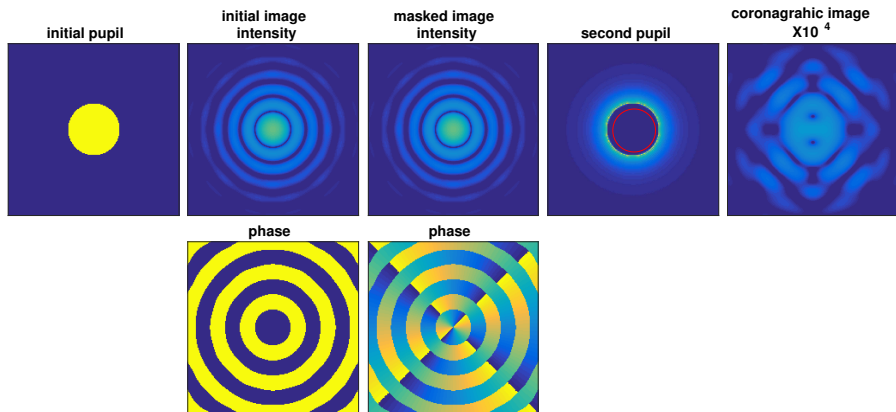
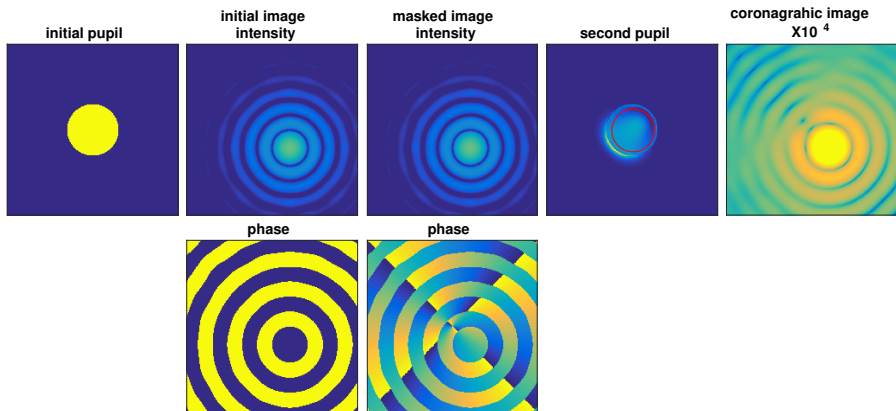


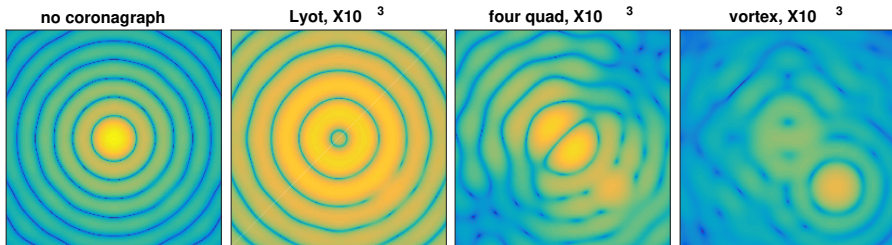
Схема “оптический вихрь”

Фазовая маска: $+l\theta$ к фазе, где θ — позиционный угол в фокальной плоскости, l — четное число (т.н. топологический заряд), диафрагма во второй плоскости зрачка (**диафрагма Лео**) (Mawet D. et al 2005).
Источник смещен на $2\lambda/D$:



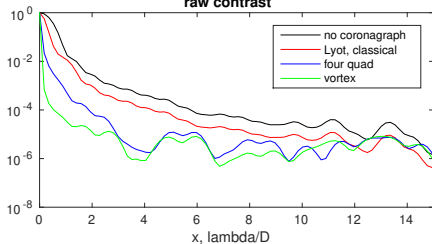
Сравнение масок в фокальной плоскости

Наблюдение слабого компонента, контраст 10^{-4} на расстоянии $3.8\lambda/D$.

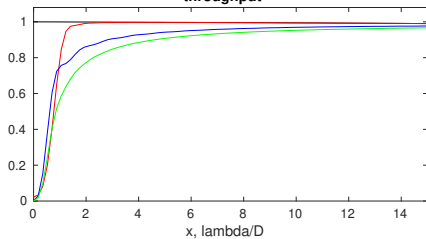


Сравнение масок в фокальной плоскости

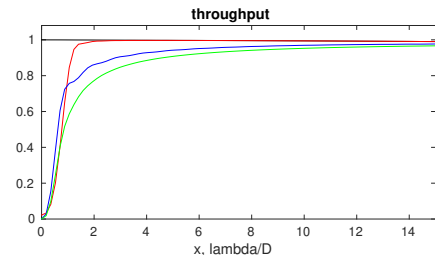
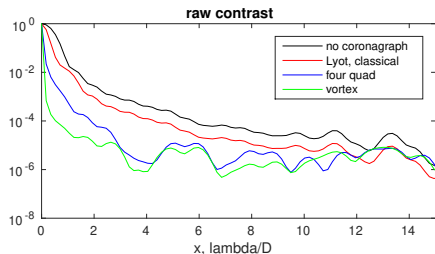
raw contrast



throughput

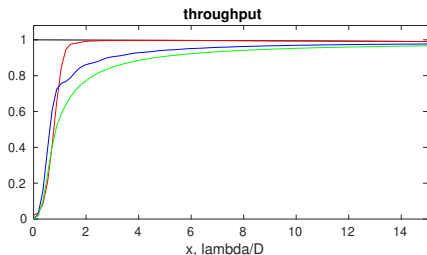
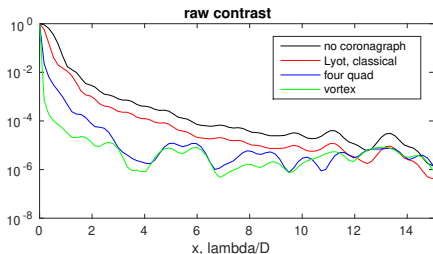


Сравнение масок в фокальной плоскости



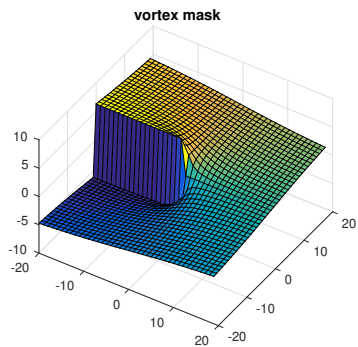
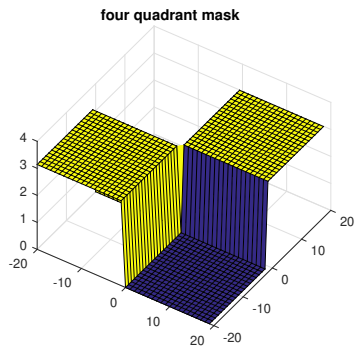
- Работать с фазой в фокальной плоскости эффективнее чем с амплитудой.
- Вихревая фазовая маска представляется наиболее эффективной.

Сравнение масок в фокальной плоскости

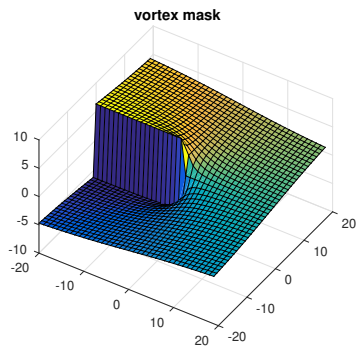
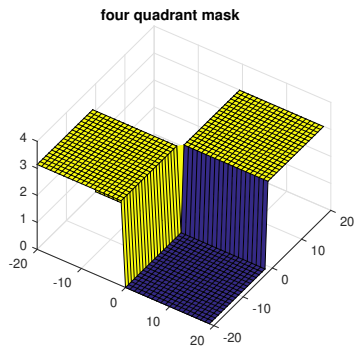


- Работать с фазой в фокальной плоскости эффективнее чем с амплитудой.
- Вихревая фазовая маска представляется наиболее эффективной.
- Маску с квадрантами сложнее сделать хорошо из-за краевых эффектов.

Фазовые маски



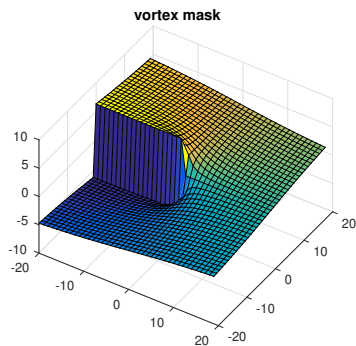
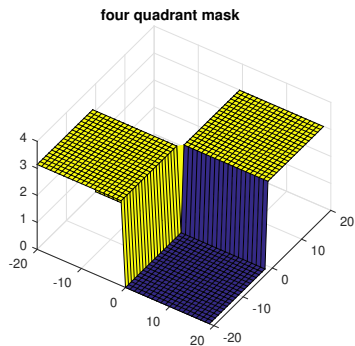
Фазовые маски



Проблемы:

- Дисперсия материала маски → хроматизм!

Фазовые маски



Проблемы:

- Дисперсия материала маски → хроматизм!
- Краевые эффекты.

Решение:
Векторная фазовая маска

Векторная фазовая маска

Пучок представляем как сумму левополяризованного по кругу и правополяризованного по кругу.

Векторная фазовая маска

Пучок представляем как сумму левополяризованного по кругу и правополяризованного по кругу.

Пучок падает на полуволновую пластинку, с ориентацией быстрой оси θ :

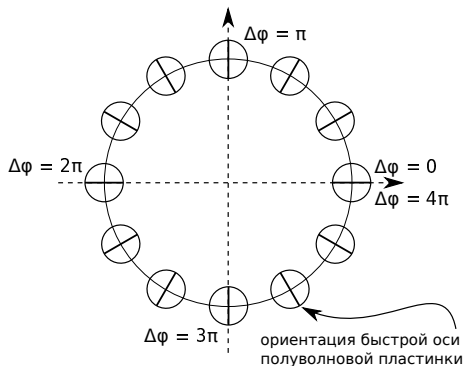
- Плоскость поляризации линейно поляризованного света поворачивается на угол 2θ .
- Фаза света, поляризованного по кругу, испытывает задержку 2θ .

Векторная фазовая маска

Пучок представляем как сумму левополяризованного по кругу и правополяризованного по кругу.

Пучок падает на полуволновую пластинку, с ориентацией быстрой оси θ :

- Плоскость поляризации линейно поляризованного света поворачивается на угол 2θ .
- Фаза света, поляризованного по кругу, испытывает задержку 2θ .

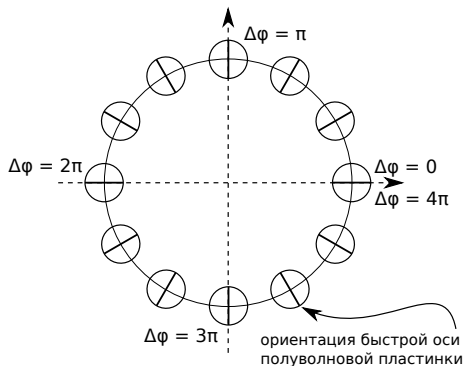


Векторная фазовая маска

Пучок представляем как сумму левополяризованного по кругу и правополяризованного по кругу.

Преимущества векторной маски:

- Её проще сделать ахроматической.
- Изменения угла θ плавные по всей площади, кроме самого центра.

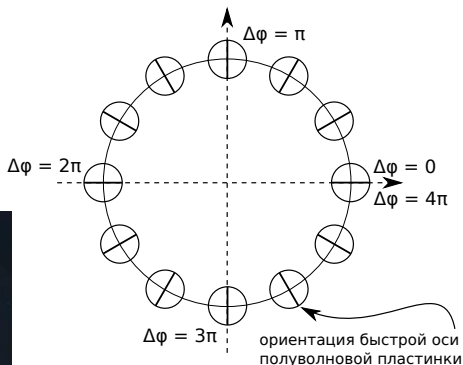
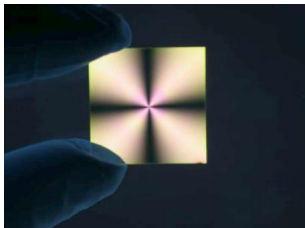


Векторная фазовая маска

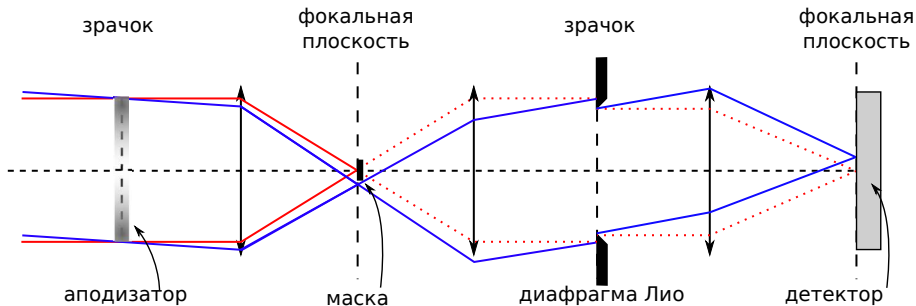
Пучок представляем как сумму левополяризованного по кругу и правополяризованного по кругу.

Преимущества векторной маски:

- Её проще сделать ахроматической.
- Изменения угла θ плавные по всей площади, кроме самого центра.

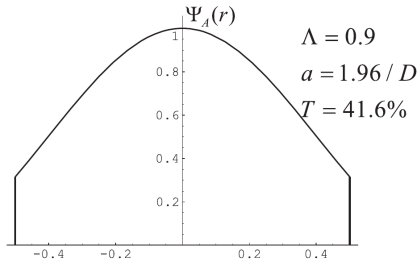


Апертурная аподизация

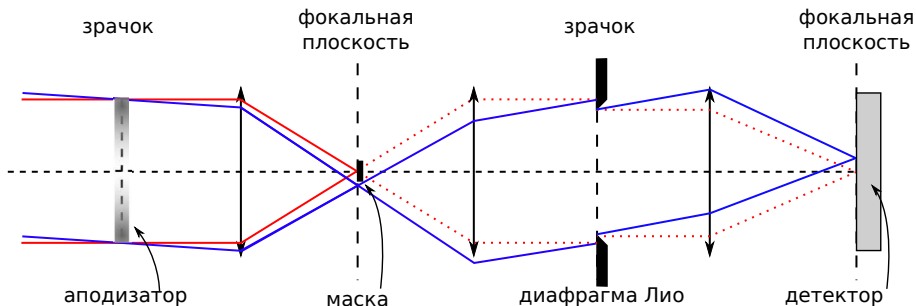


Soummer et al, 2003:

В зрочок до фокальной маски помещается серая маска с переменным пропусканием по зрочку →

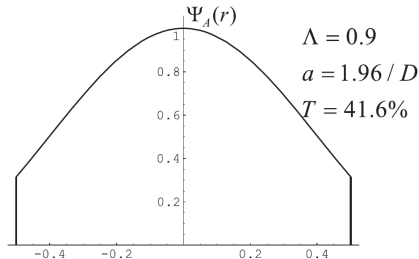


Апертурная аподизация



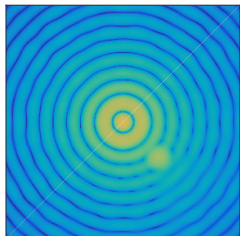
Soummer et al, 2003:

Форма маски определяется аналитической или численной оптимизацией для конкретного коронографа (Лио, 4 квадранта, оптический вихрь и т.д.).

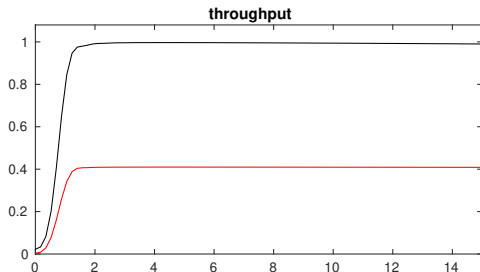
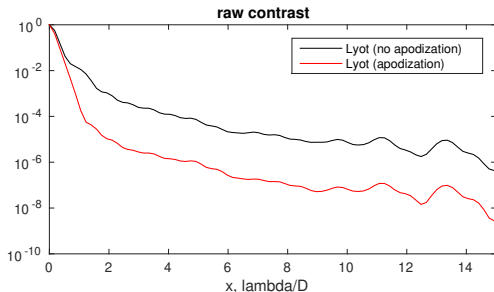
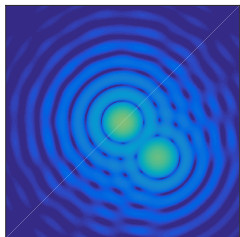


Апертурная аподизация: коронограф Лيو

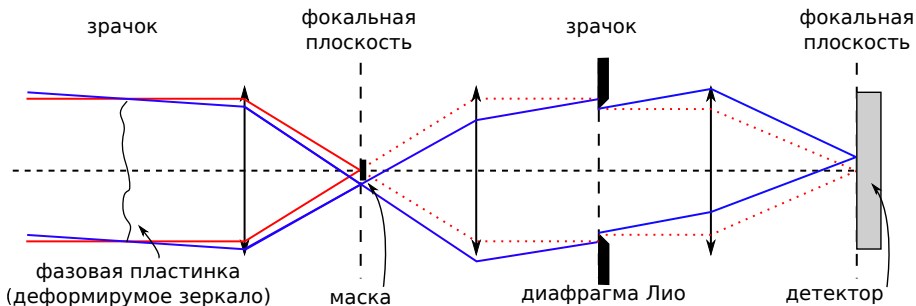
Без аподизации



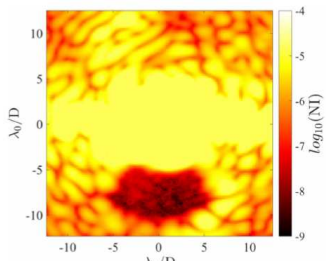
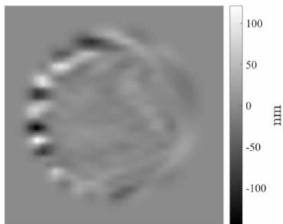
С аподизацией



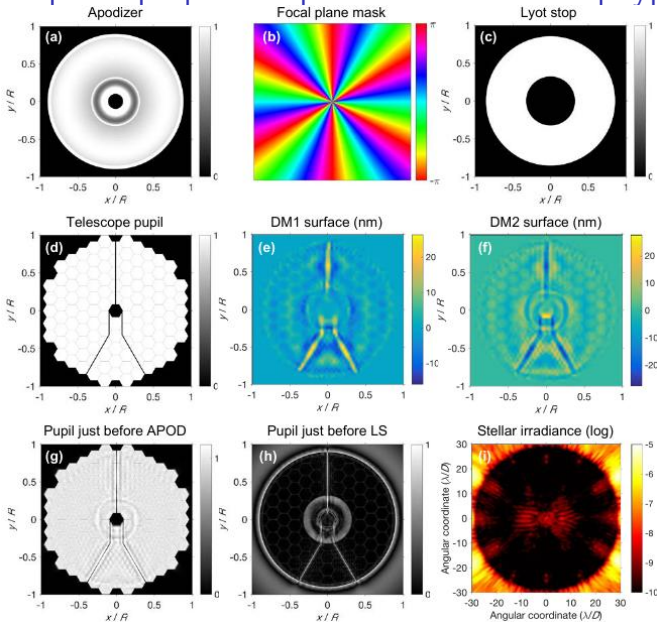
Фазовая апертурная аподизация



Dark hole



Коронаграфия с произвольными апертурами



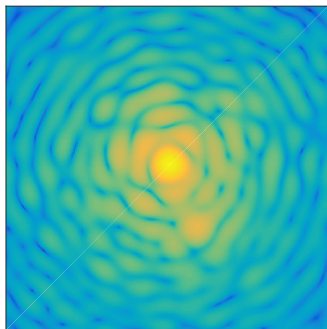
Ruane et al, 2018
Fast Linearized
Coronagraph
Optimizer (FALCO)
IV. Coronagraph
design survey for
obstructed and
segmented
apertures
LUVUOIR design A

Спекл-шум

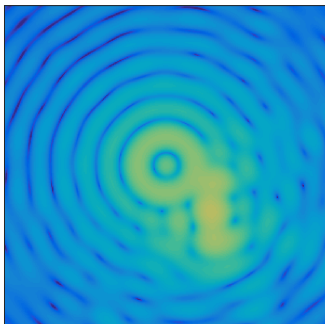
Волновой фронт на входе в коронограф никогда не бывает плоским:

- Наземные телескопы: остаточные флуктуации после адаптивной оптики.
- Космические телескопы: погрешности изготовления оптики + вариации формы зеркал из-за эффектов неравномерного нагрева.

Без коронографа



С коронографом



Спекл-шум

Виды спеклов (по временному масштабу):

- Быстрые (5-100 мс)
- Квазистатические (1-60 мин)
- Статические (1 сут)

Спекл-шум

Виды спеклов (по временному масштабу):

- Быстрые (5-100 мс) → усредняем
- Квазистатические (1-60 мин)
- Статические (1 сут)

Спекл-шум

Виды спеклов (по временному масштабу):

- Быстрые (5-100 мс) → усредняем
- Квазистатические (1-60 мин)
- Статические (1 сут) → измеряем по калибровочным звездам

Спекл-шум

Виды спеклов (по временному масштабу):

- Быстрые (5-100 мс) → усредняем
- Квазистатические (1-60 мин) → спекл-шум!
- Статические (1 сут) → измеряем по калибровочным звездам

Спекл-шум

Виды спеклов (по временному масштабу):

- Быстрые (5-100 мс) → усредняем
- Квазистатические (1-60 мин) → спекл-шум!
- Статические (1 сут) → измеряем по калибровочным звездам

Методы борьбы пост-фактум:

- Spectral Differential Imaging (SDI). Картина спеклов масштабируется с λ . Положение планеты от λ не зависит.

Спекл-шум

Виды спеклов (по временному масштабу):

- Быстрые (5-100 мс) → усредняем
- Квазистатические (1-60 мин) → спекл-шум!
- Статические (1 сут) → измеряем по калибровочным звездам

Методы борьбы пост-фактум:

- Spectral Differential Imaging (SDI). Картина спеклов масштабируется с λ . Положение планеты от λ не зависит.
- Angular Differential Imaging (ADI). Картина спеклов более стабильна относительно горизонтальной системы координат. Положение планеты меняется вследствие вращения поля.

Спекл-шум

Виды спеклов (по временному масштабу):

- Быстрые (5-100 мс) → усредняем
- Квазистатические (1-60 мин) → спекл-шум!
- Статические (1 сут) → измеряем по калибровочным звездам

Методы борьбы пост-фактум:

- Spectral Differential Imaging (SDI). Картина спеклов масштабируется с λ . Положение планеты от λ не зависит.
- Angular Differential Imaging (ADI). Картина спеклов более стабильна относительно горизонтальной системы координат. Положение планеты меняется вследствие вращения поля.
- Polarimetric Differential Imaging (PDI)

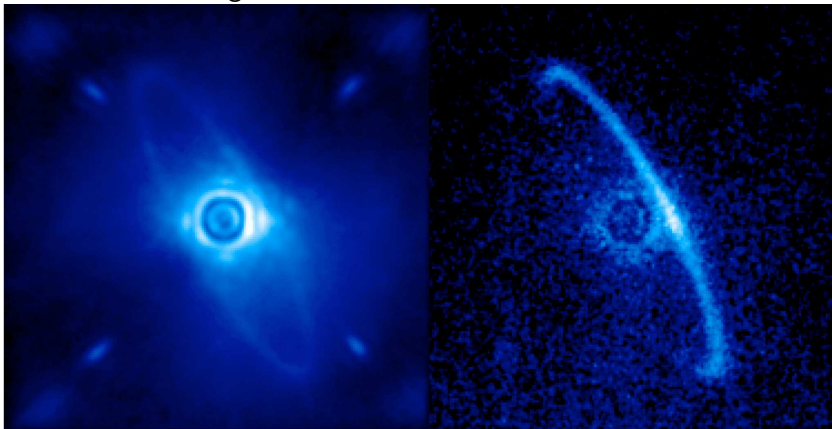
Polarimetric Differential Imaging

- Излучение звезды слабо поляризовано → спеклы слабо поляризованы

Polarimetric Differential Imaging

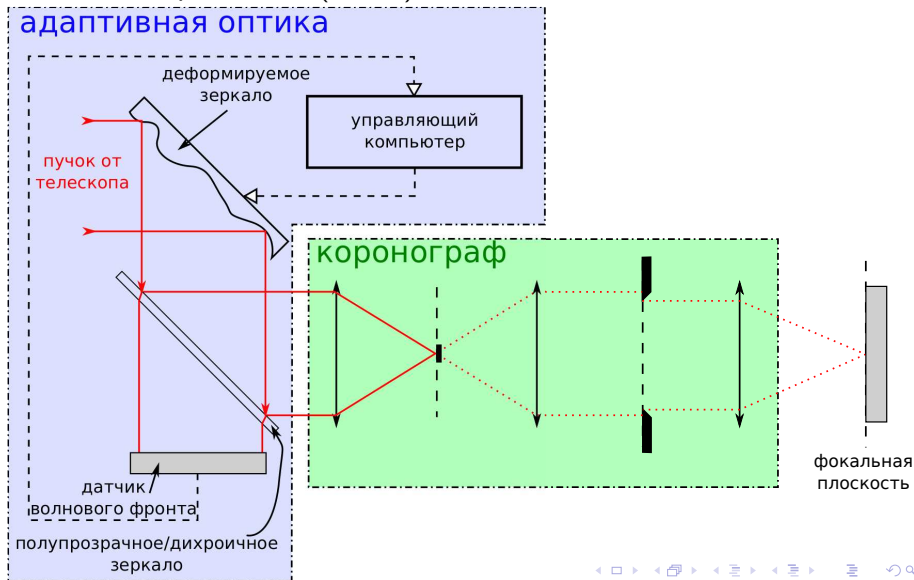
- Излучение звезды слабо поляризовано → спеклы слабо поляризованы
- Рассеянное излучение сильно поляризовано

Gemini Planet Imager



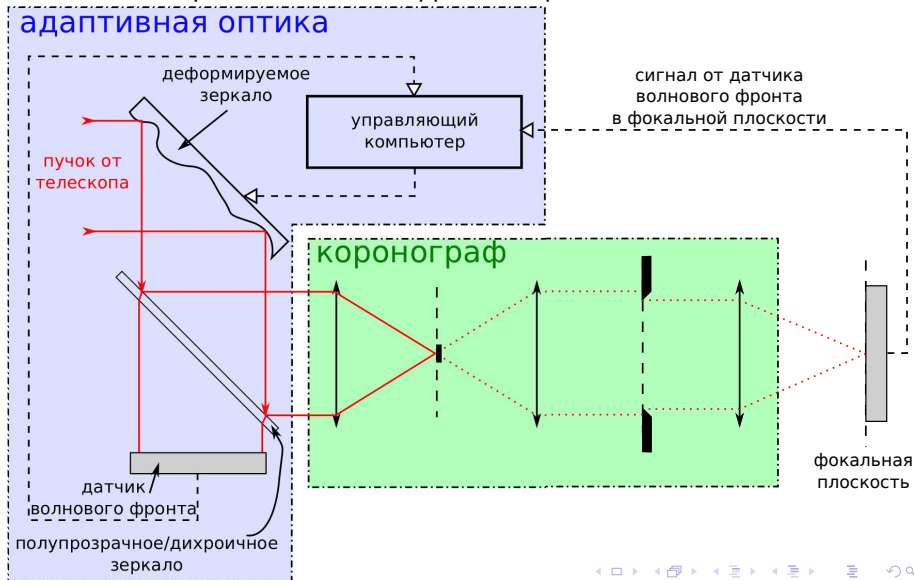
Причина спекл-шум: ошибки разности пути

Non-common path errors (NCPE)



Исправление ошибок разности пути

Решение: измерение волнового фронта в фокальной плоскости



Коронаграфия

Ключевые технологии (направления развития)

- 1 Минимизация дифракции

Коронаграфия

Ключевые технологии (направления развития)

- 1 Минимизация дифракции
- 2 Управление волновым фронтом

Коронаграфия

Ключевые технологии (направления развития)

- 1 Минимизация дифракции
- 2 Управление волновым фронтом
- 3 Аподизация

Коронаграфия

Ключевые технологии (направления развития)

- 1 Минимизация дифракции
- 2 Управление волновым фронтом
- 3 Аподизация
- 4 Фокальная маска

Коронаграфия

Ключевые технологии (направления развития)

- 1 Минимизация дифракции
- 2 Управление волновым фронтом
- 3 Аподизация
- 4 Фокальная маска
- 5 Дифрагма Лио

Коронаграфия

Ключевые технологии (направления развития)

- 1 Минимизация дифракции
- 2 Управление волновым фронтом
- 3 Аподизация
- 4 Фокальная маска
- 5 Дифрагма Лио
- 6 Пост-обработка

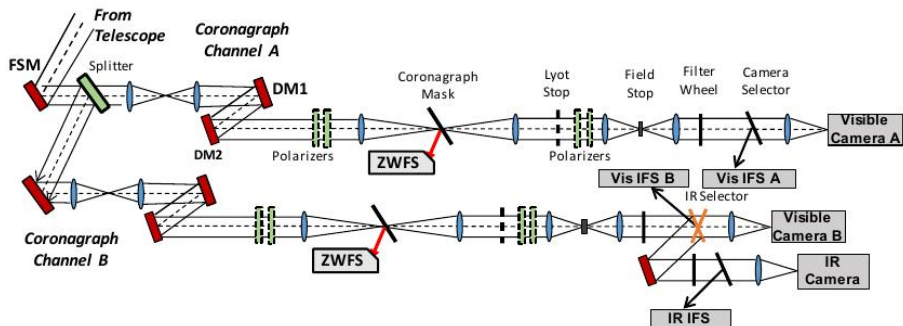
Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx)

Проект Flagship mission на 2030-2040 (один из четырех).

- Расположение: L2, Телескоп + экран
- Диапазон: λ от 0.4 до 1.9 мкм. Диаметр: 4 м
- Трехзеркальный анастигмат. Главное зеркало: монолитное, внеосевое (минимизация дифракции)



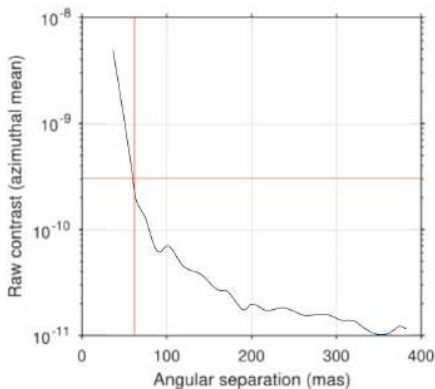
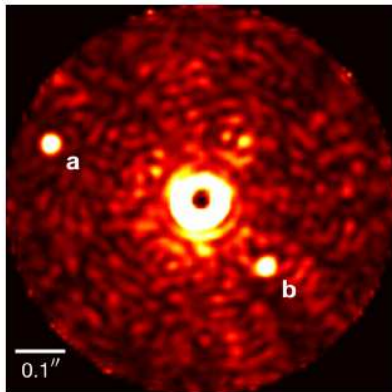
HabEx coronagraph



- 2 канала для двух ортогональных поляризаций (минимизация поляризационных aberrаций)
- 2 деформируемых зеркала для фазово-амплитудной аподизации
- Датчик волнового фронта совмещенный с фокальной вихревой маской заряд=6
- Диафрагма Лио

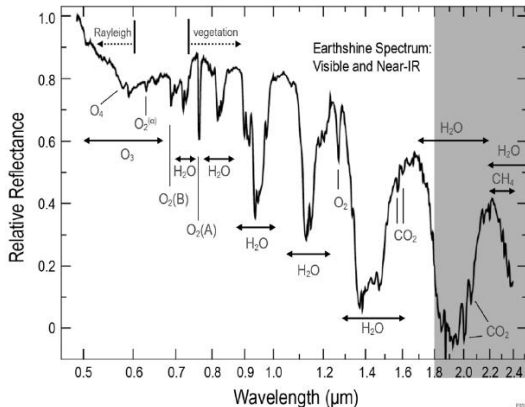
HabEx coronagraph

- Измерение орбит, радиусов для планет земной группы в области обитаемости ближайших звезд FGK.
- Состав атмосферы: H_2O , O_2 , CO_2 , CH_4 (biosignatures).
- Отблеск от океана (можно отличить твердую поверхность от жидкой).



HabEx coronagraph


- Измерение орбит, радиусов для планет земной группы в области обитаемости ближайших звезд FGK.
- Состав атмосферы: H_2O , O_2 , CO_2 , CH_4 (biosignatures).
- Отблеск от океана (можно отличить твердую поверхность от жидкой).



HabEx coronagraph

- Измерение орбит, радиусов для планет земной группы в области обитаемости ближайших звезд FGK.
- Состав атмосферы: H_2O , O_2 , CO_2 , CH_4 (biosignatures).
- Отблеск от океана (можно отличить твердую поверхность от жидкой).





“For the first time in human history, technologies have matured sufficiently to enable an affordable space-based telescope mission capable of discovering and characterizing habitable planets like the Earth orbiting nearby bright sunlike stars.”

Спектроскопия высокого разрешения

И коронография

2017A&A...599A..16L Atmospheric characterization of Proxima b by coupling the SPHERE high-contrast imager to the ESPRESSO spectrograph

K–stacker

Le Coroller et al, 2015; Nowak et al, 2018

Сложение с учетом Кеплеровской орбиты.

LOCI

разложение