

# Наблюдения с высоким контрастом (звездная коронография)

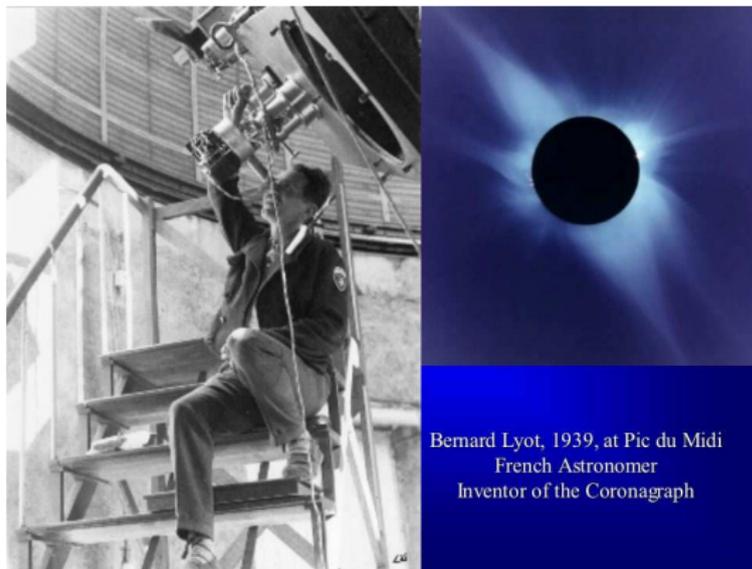
Сафонов Б.С.

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

ГАИШ МГУ, Апрель 2020

# Звездные коронографы

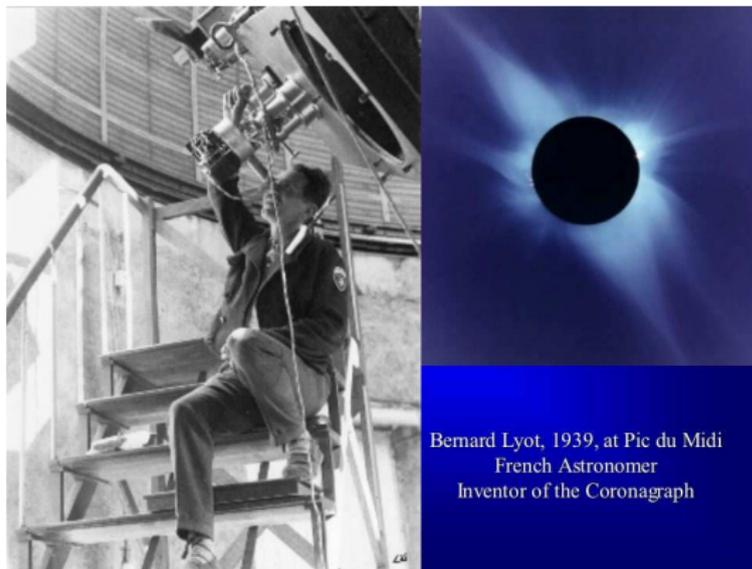
**Коронограф** значительно ослабляет излучение объекта находящегося на оптической оси системы и пропускает излучение объектов находящихся в других точках поля зрения.



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  $\epsilon$  и разделение  $d$ :

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



# Контраст

Для коронографов ключевым понятием является контраст  $\epsilon$  и разделение  $d$ :

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



Немного терминологии

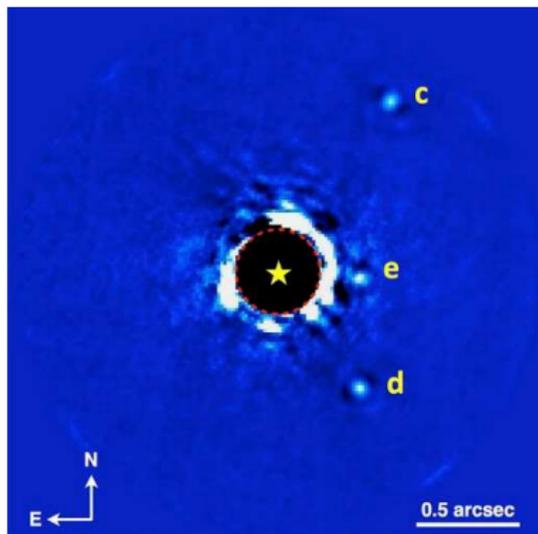
$\epsilon$	$10^{-2}$	$10^{-6}$
контраст	ниже	выше

## 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	$\lambda, \mu\text{m}$	$\epsilon$	$d, ''$
HR8799 d	1-5	$2 \times 10^{-5}$	0.95
Юпитер@10 пк	10	$10^{-8}$	0.5
	0.5	$2 \times 10^{-9}$	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	$\lambda, \mu\text{m}$	$\epsilon$	$d, ''$
HR8799 d	1-5	$2 \times 10^{-5}$	0.95
Юпитер@10 пк	10	$10^{-8}$	0.5
	0.5	$2 \times 10^{-9}$	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

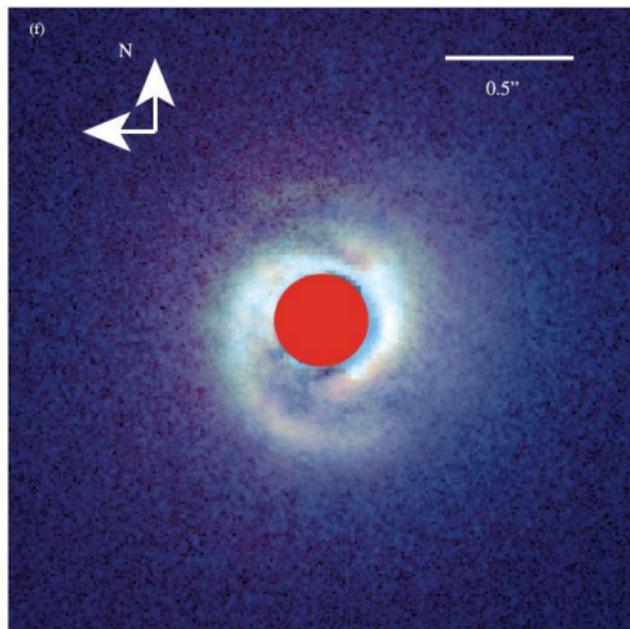
при прямом обнаружении

планета	$\lambda, \mu\text{m}$	$\epsilon$	$d, ''$
HR8799 d	1-5	$2 \times 10^{-5}$	0.95
Юпитер@10 пк	10	$10^{-8}$	0.5
	0.5	$2 \times 10^{-9}$	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

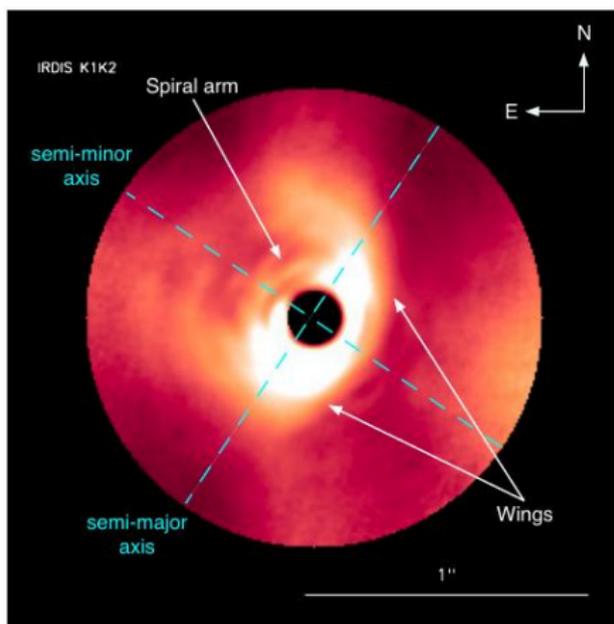
- На данных момент прямым методом (коронография+АО) обнаружено 15 экзопланет, во всех случаях обнаружено **тепловое излучение** в ближнем ИК-диапазоне.
- В рассеянном свете ни одна экзопланета не наблюдалась

# Протопланетные диски

MWC758, Grady et al, 2013



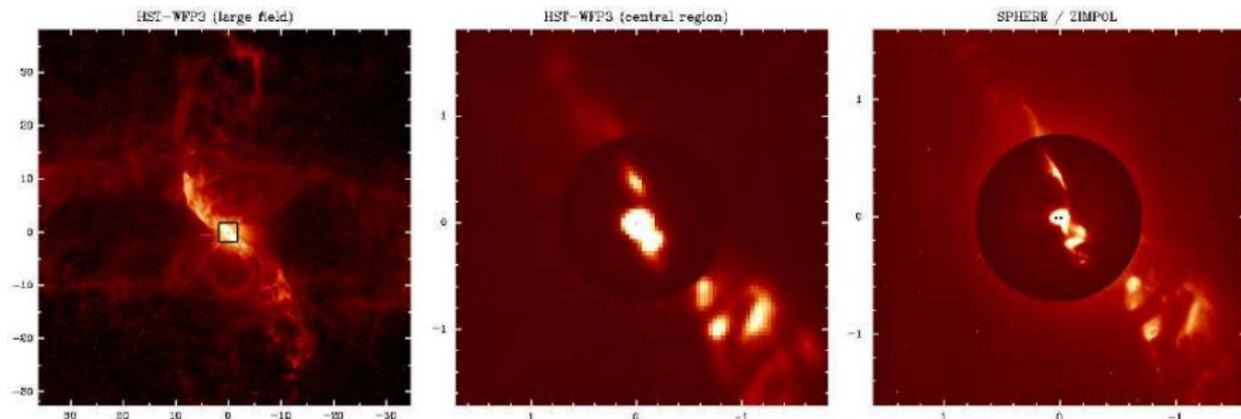
HD100546, Sissa et al, 2018



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

# Звезды на поздних стадиях эволюции

R Aqr, Schmid et al 2017



**Fig. 1.** H $\alpha$  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



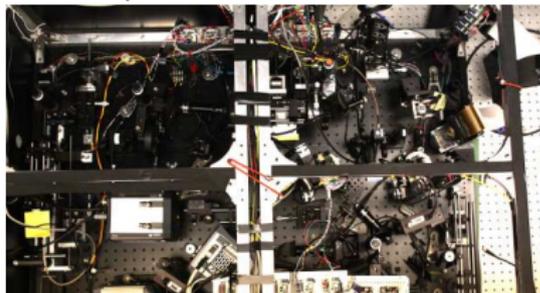
## Science-driven requirements

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

### VLT/SPHERE



### Subaru/SCeXAO



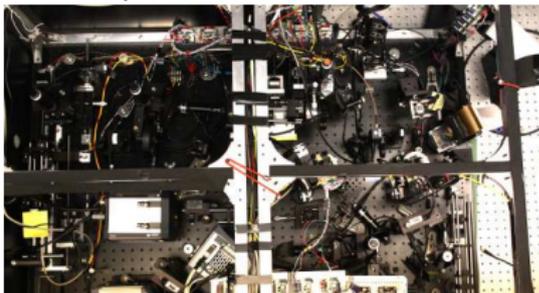
## Science-driven requirements

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

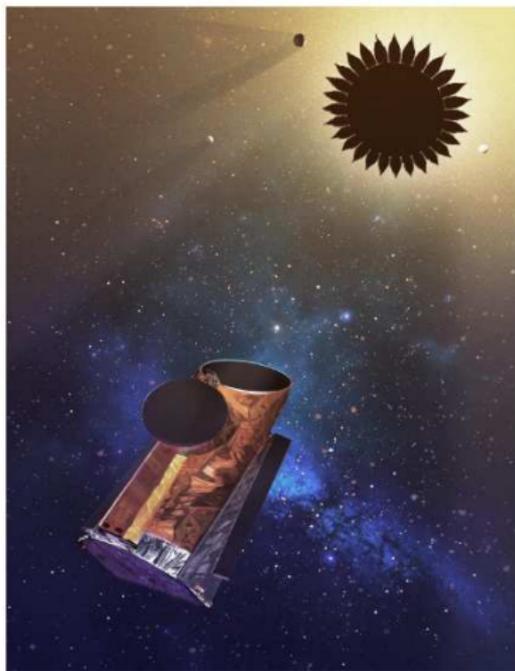
VLT/SPHERE



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.

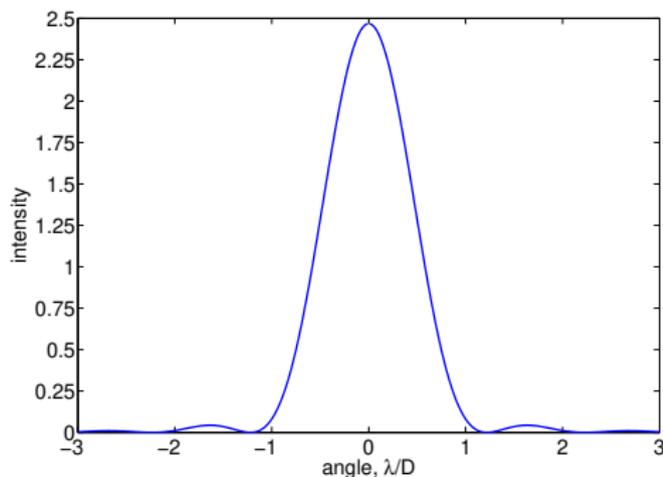
# Телескоп без коронографа

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:

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

$\epsilon$  — контраст,  $\vec{d}$  — вектор разделения.



# Телескоп с коронографом

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

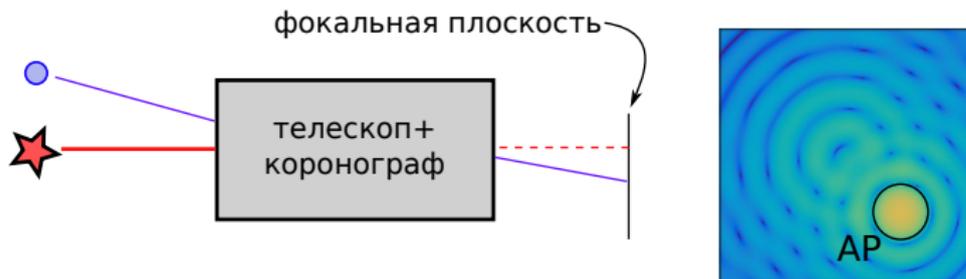
- $T(0, \vec{x})$  — ФРТ на оси (по возможности ослаблено).
- $T(\vec{d}, \vec{x})$  — ФРТ не на оси (по возможности не ослаблено).



# 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  $E$ :

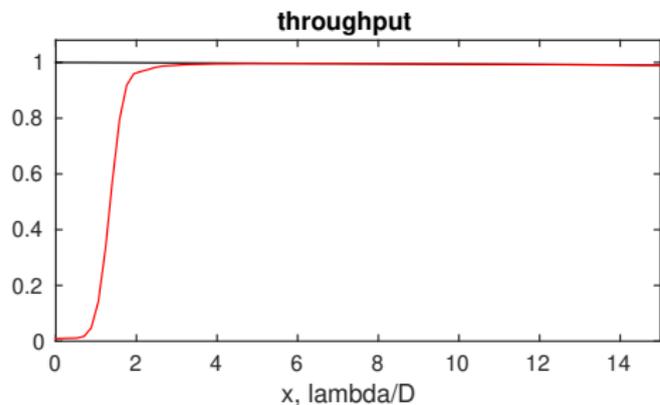
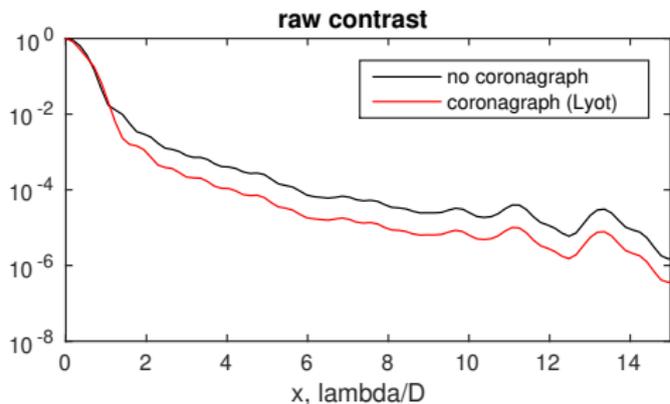
$$E(\vec{d}) = \xi_p(\vec{d})/\xi_{\text{tel}}(\vec{d}), \quad (6)$$

где

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

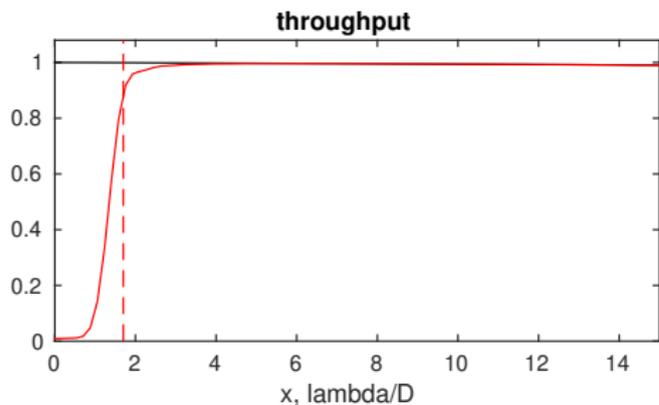
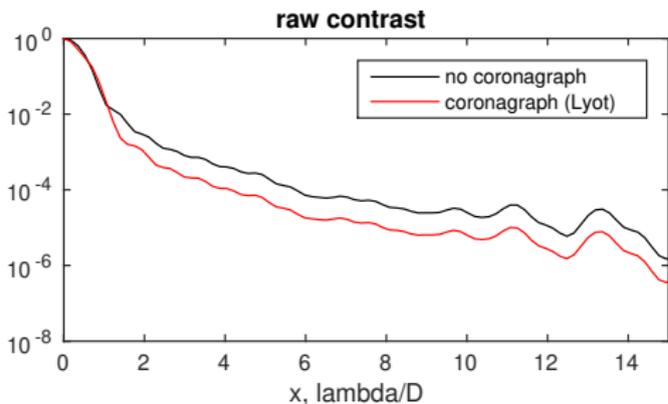
а  $T_0$  — ФРТ телескопа без коронографа.

# Raw contrast & throughput



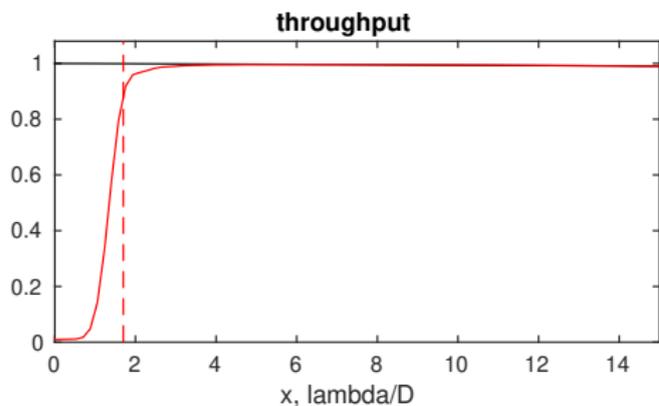
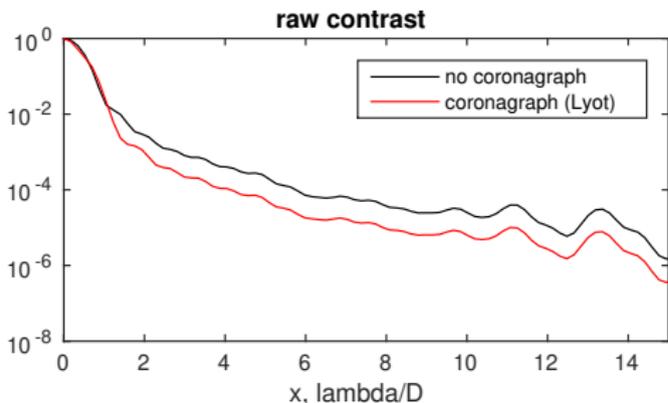
- Зависят только от свойств оптики телескопа и коронографа.

# 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 АР 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:

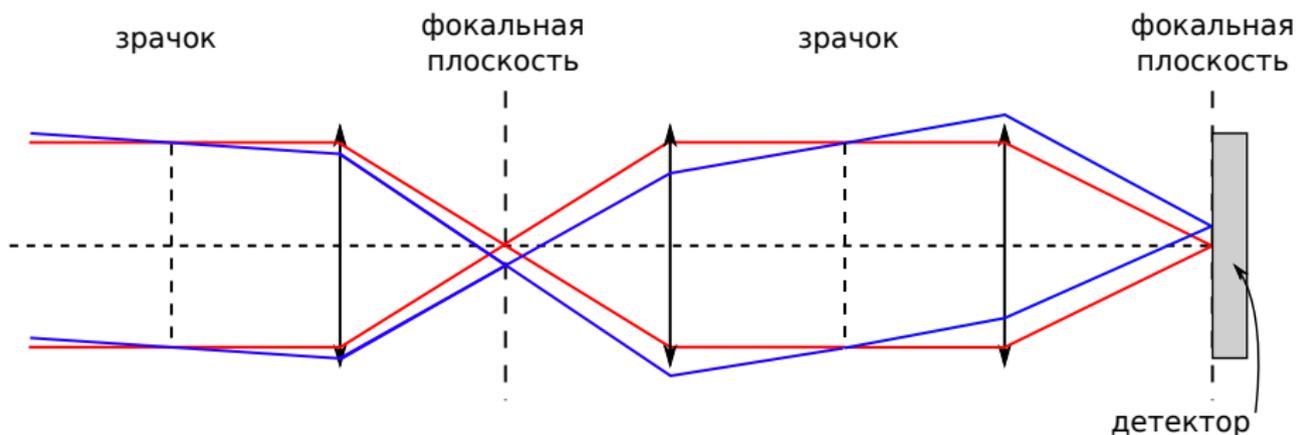
$$\text{SNR} = S_p/\sqrt{S_s} = \epsilon\sqrt{\frac{N_*E}{C}}.$$

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

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

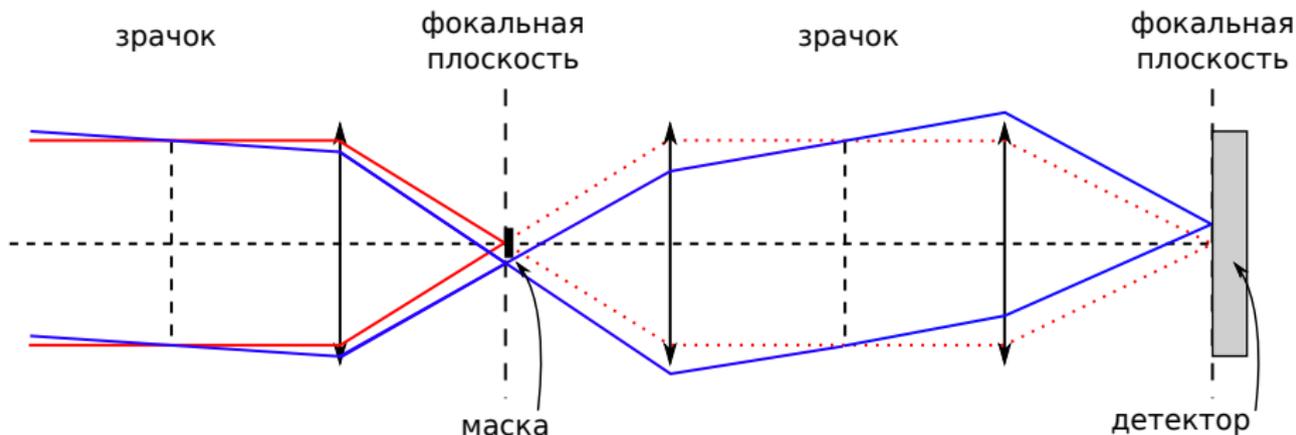
Солнце на расстоянии 10 пк, телескоп 5 м, накопление 1 час,  $E = 0.1$ :  
 $\epsilon = 10^{-10}$  достигается при  $C = 10^{-10}$ .

# Коронаграф Лио (классический)



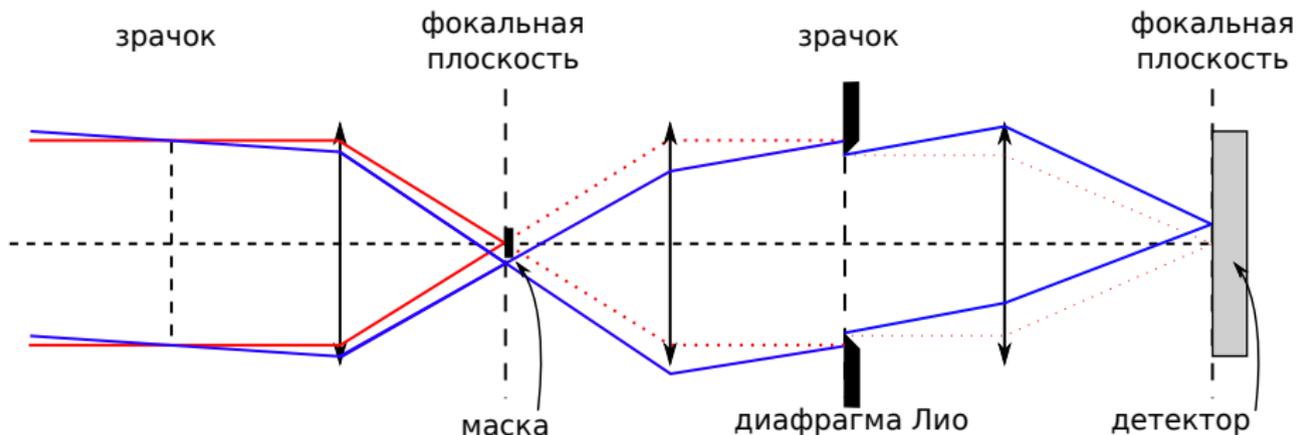
- Выходной зрачок — изображение входного зрачка (апертуры) в оптической схеме.

# Коронаграф Лио (классический)



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

# Коронаграф Лио (классический)

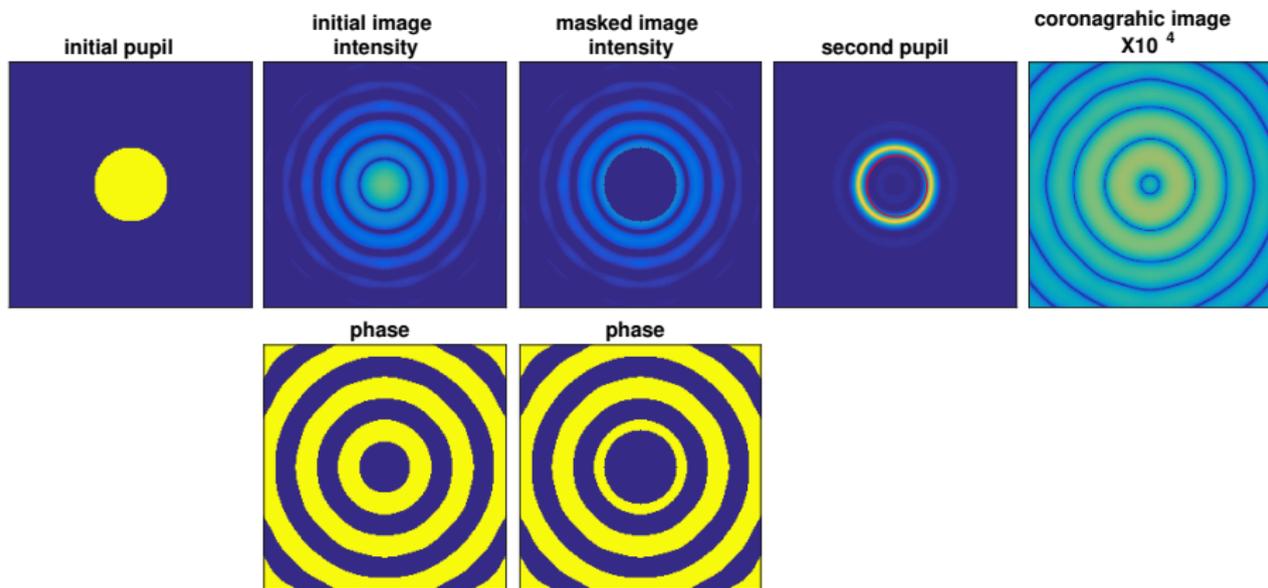


- Выходной зрочок — изображение входного зрачка (апертуры) в оптической схеме.
- В фокальную плоскость помещается непрозрачная маска.
- В последующий зрочок помещается диафрагма, пропускающая лишь часть пучка — диафрагма.

# Коронаграф Лио (классический)

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

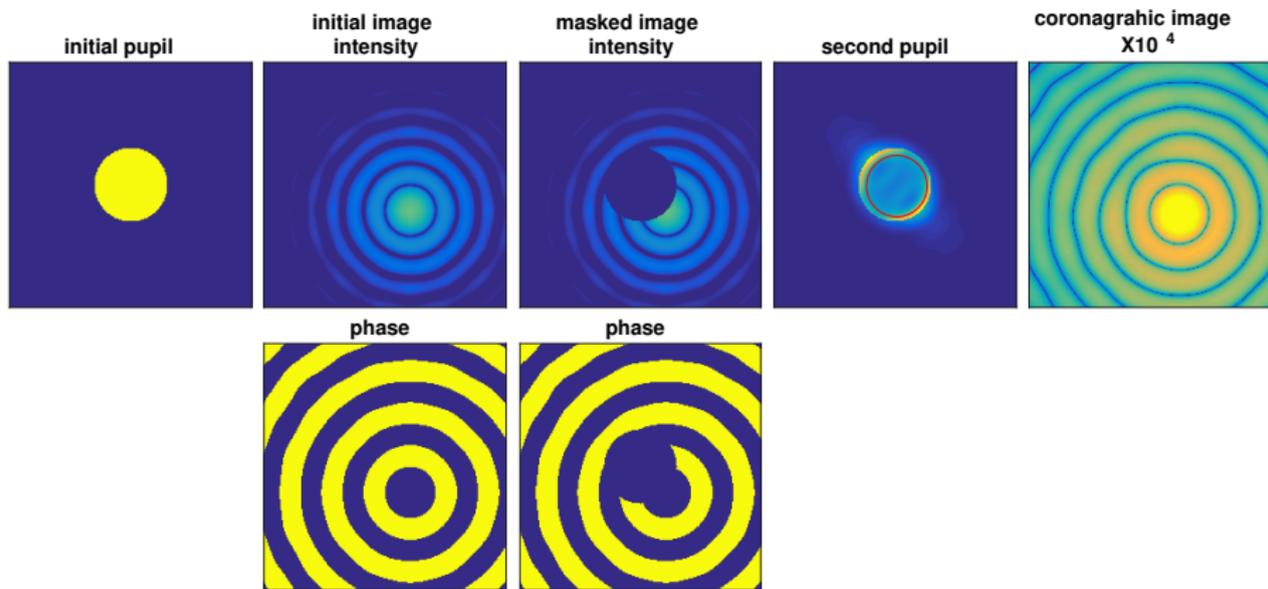
Источник на оси:



# Коронаграф Лио (классический)

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

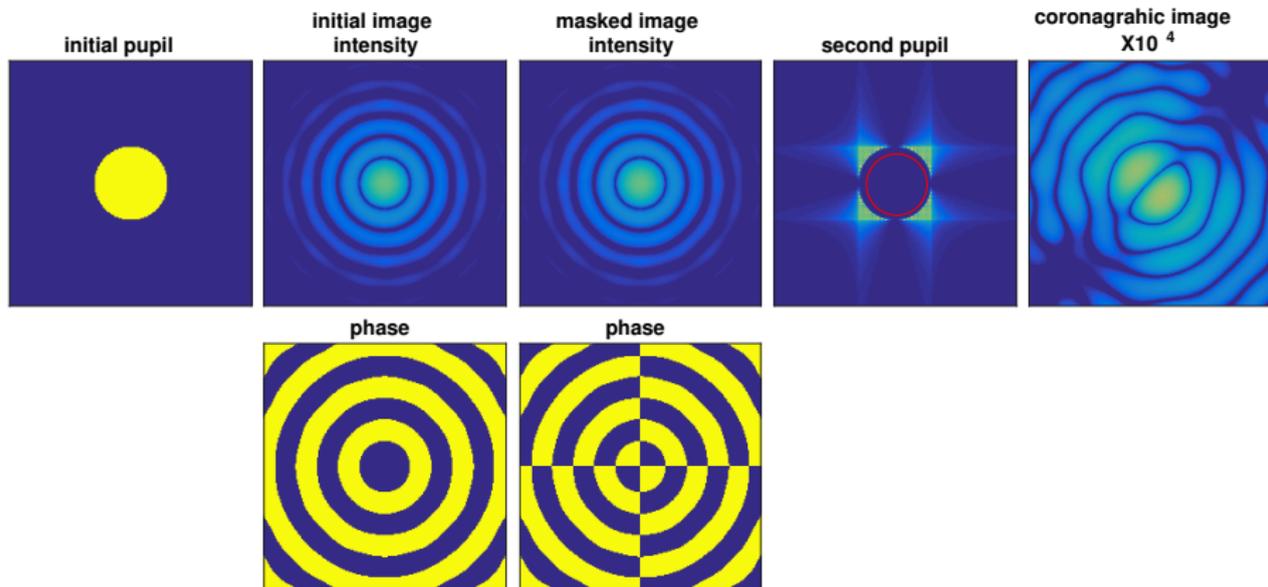
Источник смещен на  $2\lambda/D$ :



# Схема “четыре квадранта”

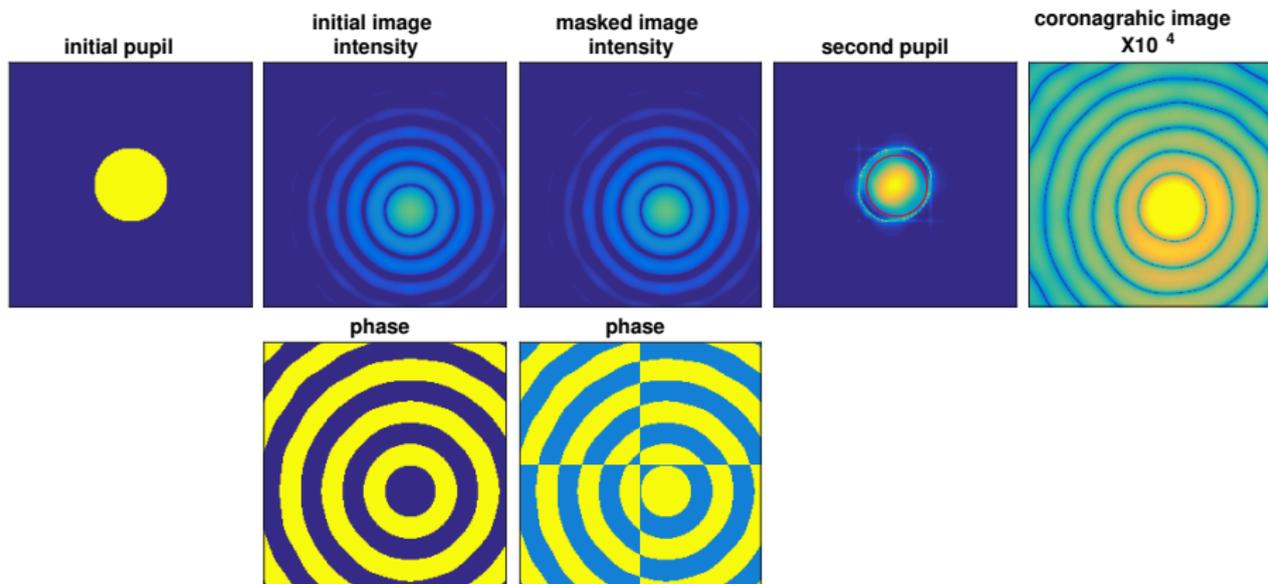
Фазовая маска:  $+\pi$  к фазе в двух из четырех квадрантов, диафрагма во второй плоскости зрочка (диафрагма Лео). Rouan D. et al, 2000.

Источник на оси:



# Схема “четыре квадранта”

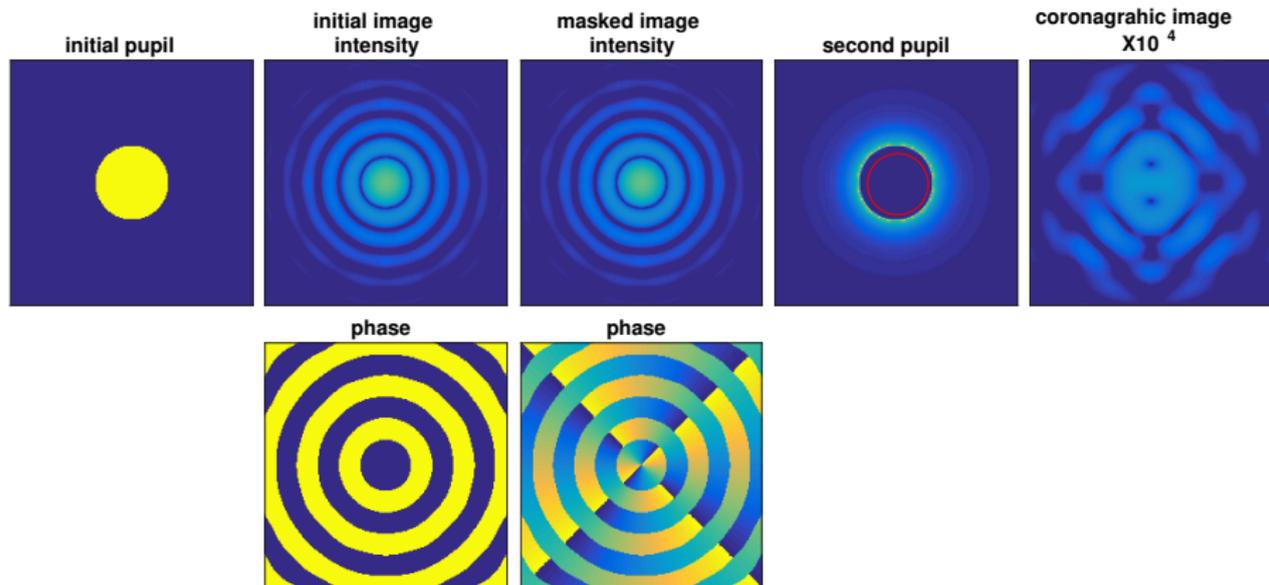
Фазовая маска:  $+\pi$  к фазе в двух из четырех квадрантов, диафрагма во второй плоскости зрочка (диафрагма Лео). Rouan D. et al, 2000.  
Источник смещен на  $2\lambda/D$ :



# Схема “оптический вихрь”

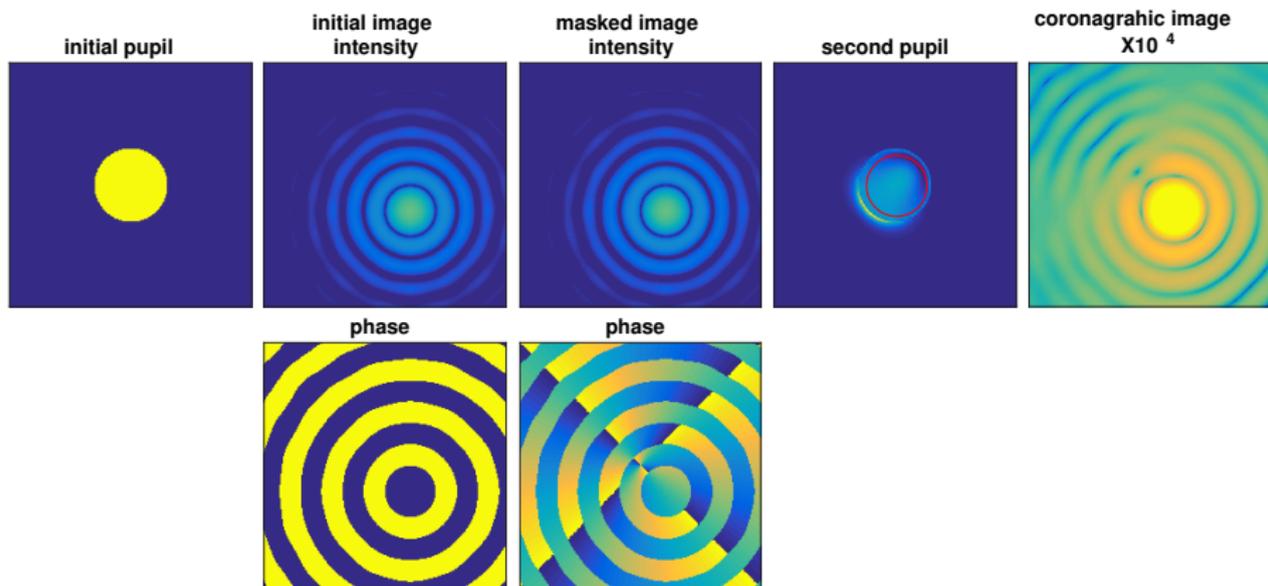
Фазовая маска:  $+l\theta$  к фазе, где  $\theta$  — позиционный угол в фокальной плоскости,  $l$  — четное число (т.н. топологический заряд), диафрагма во второй плоскости зрачка (диафрагма Лео) (Mawet D. et al 2005).

Источник на оси:



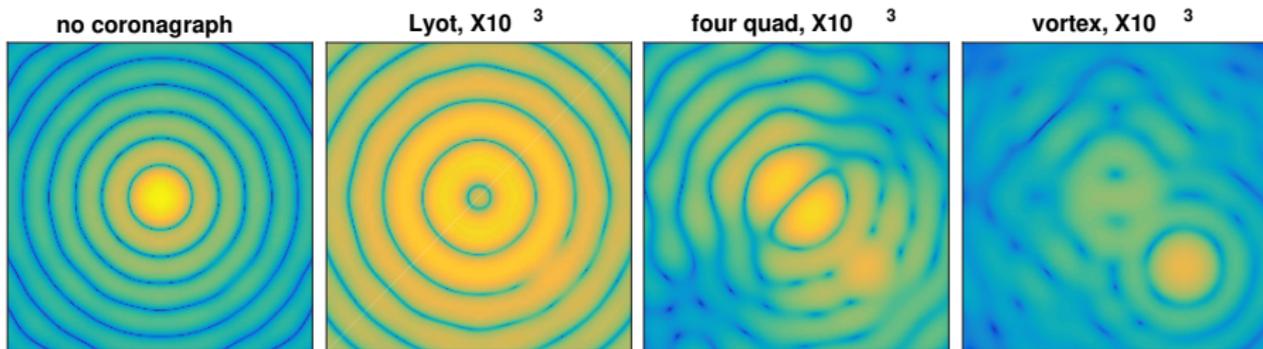
# Схема “оптический вихрь”

Фазовая маска:  $+l\theta$  к фазе, где  $\theta$  — 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  $2\lambda/D$ :



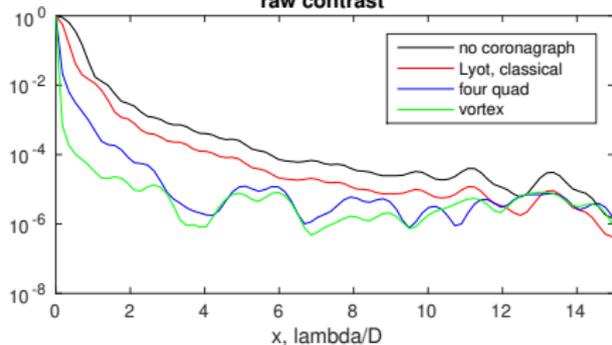
# Сравнение масок в фокальной плоскости

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

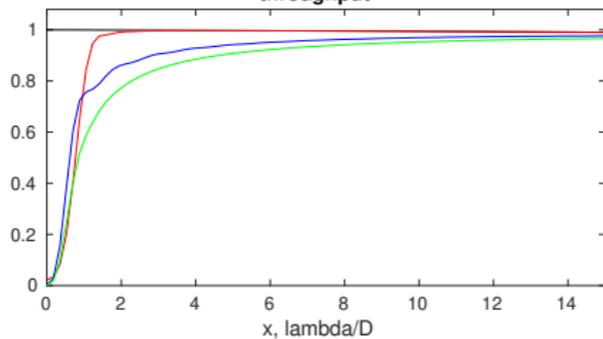


# Сравнение масок в фокальной плоскости

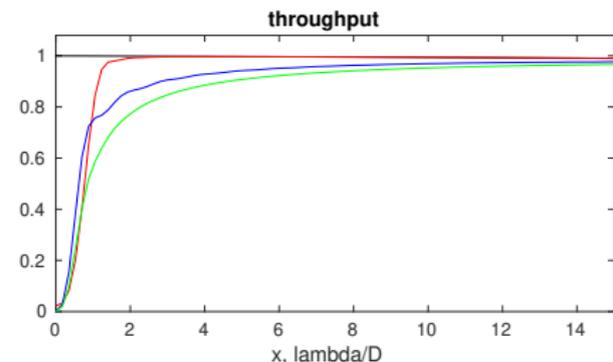
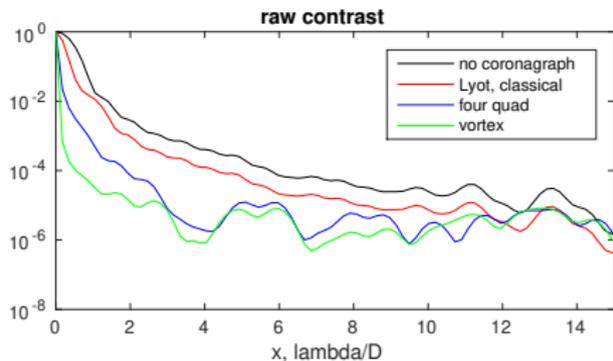
raw contrast



throughput

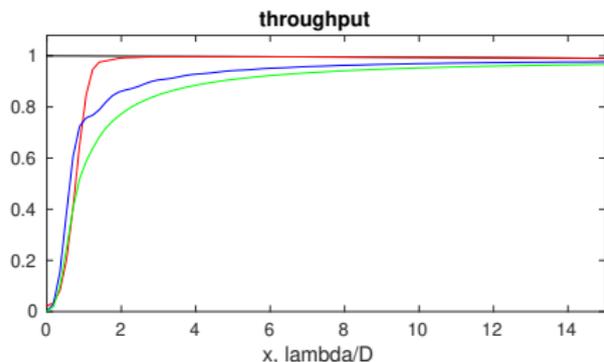
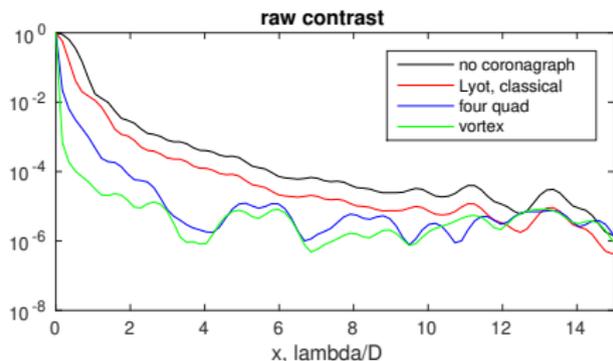


# Сравнение масок в фокальной плоскости



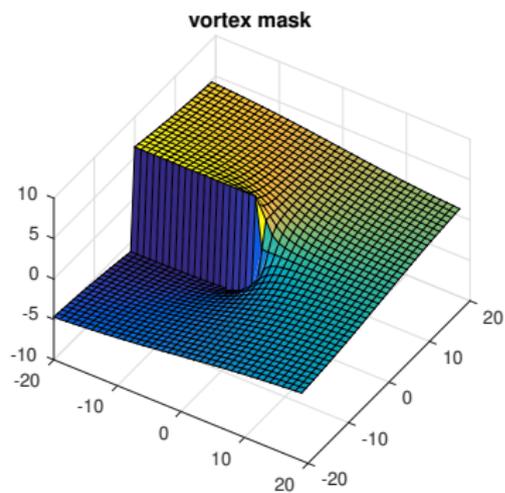
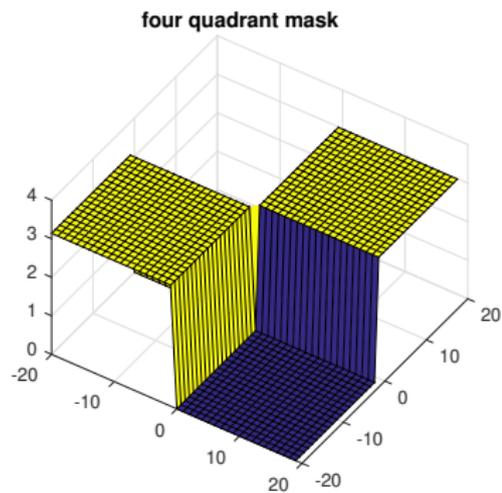
- Работать с фазой в фокальной плоскости эффективнее чем с амплитудой.
- Вихревая фазовая маска представляется наиболее эффективной.

# Сравнение масок в фокальной плоскости

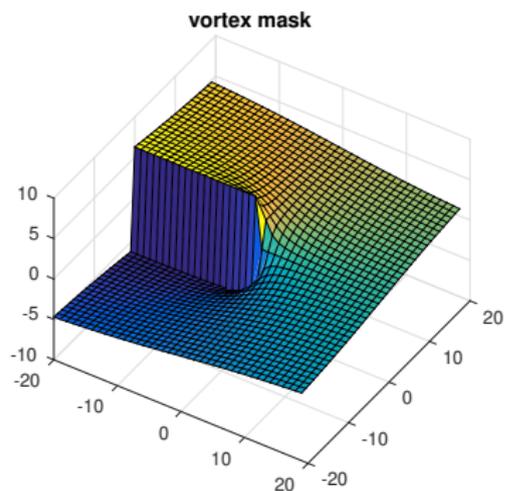
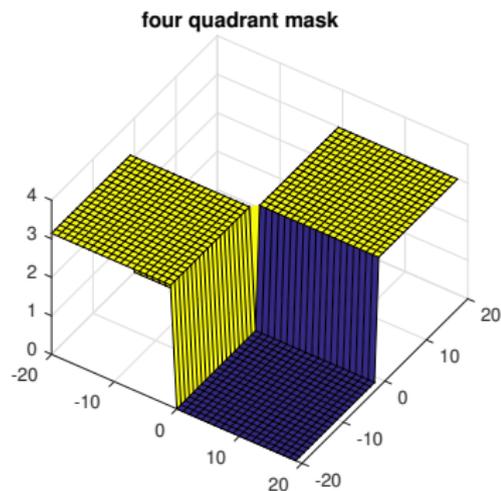


- Работать с фазой в фокальной плоскости эффективнее чем с амплитудой.
- Вихревая фазовая маска представляется наиболее эффективной.
- Маску с квадрантами сложнее сделать хорошо из-за краевых эффектов.

# Фазовые маски



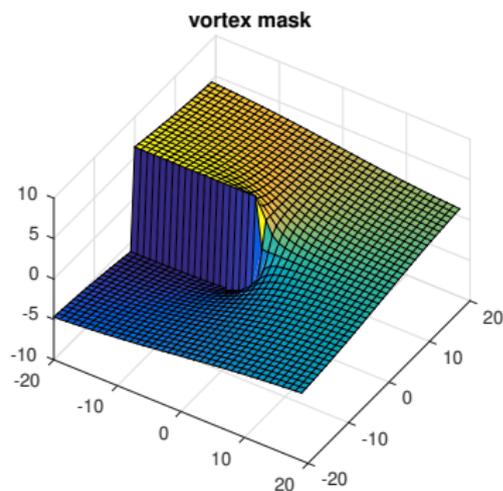
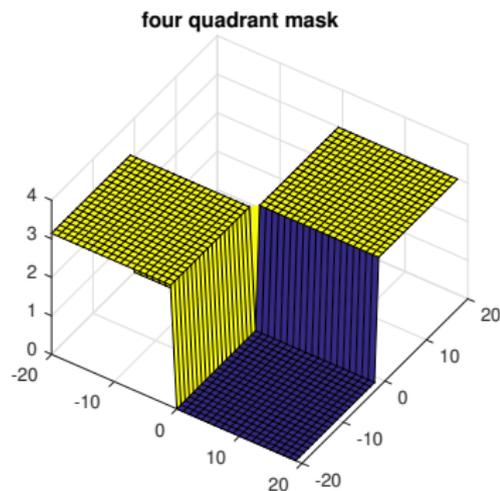
# Фазовые маски



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  $\theta$ :

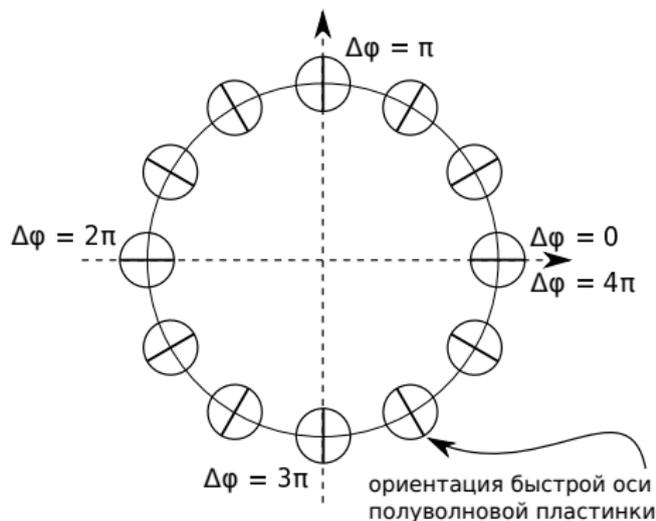
- Плоскость поляризации линейно поляризованного света поворачивается на угол  $2\theta$ .
- Фаза света, поляризованного по кругу, испытывает задержку  $2\theta$ .

## Векторная фазовая маска

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

Пучок падает на полуволновую пластинку, с ориентацией быстрой оси  $\theta$ :

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

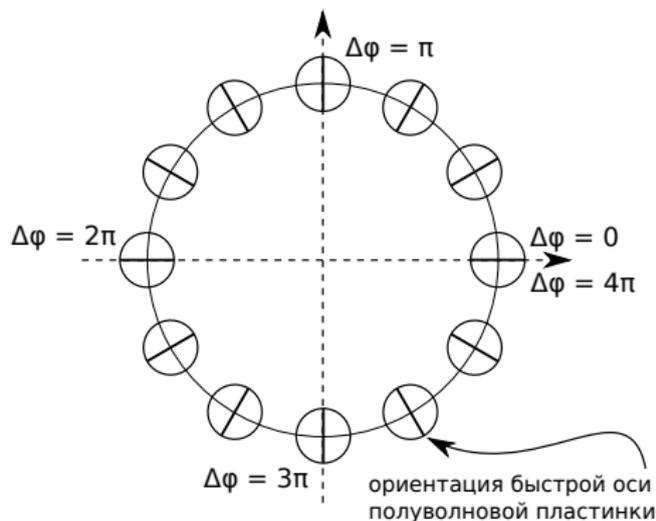


# Векторная фазовая маска

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

Преимущества векторной маски:

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

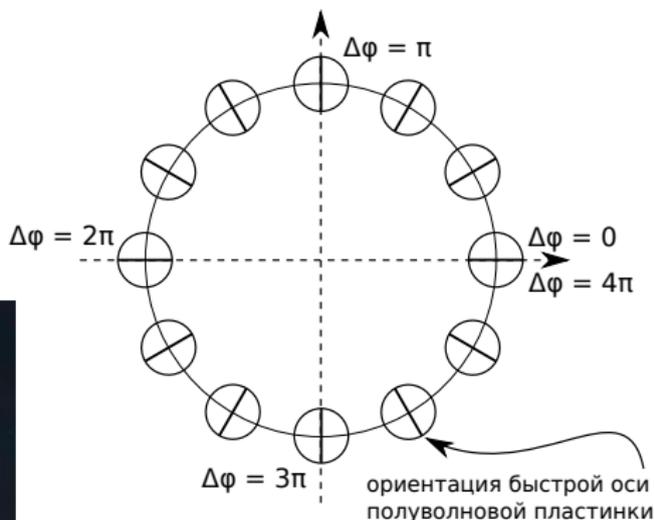
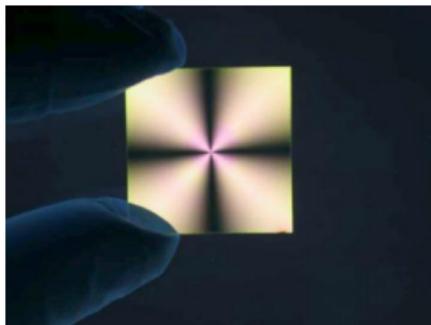


# Векторная фазовая маска

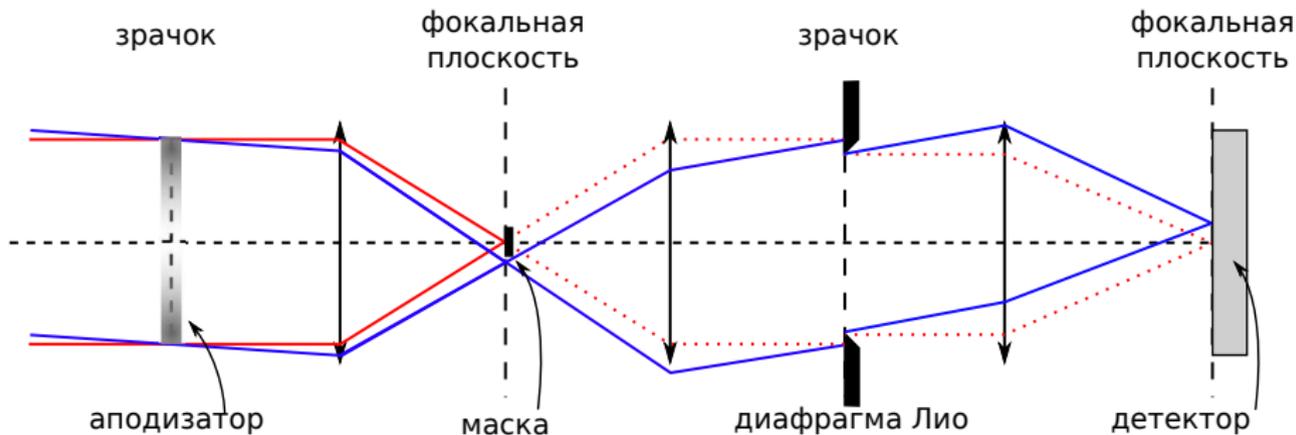
Пучок представляем как сумму левополяризованного по кругу и правополяризованного по кругу.

Преимущества векторной маски:

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

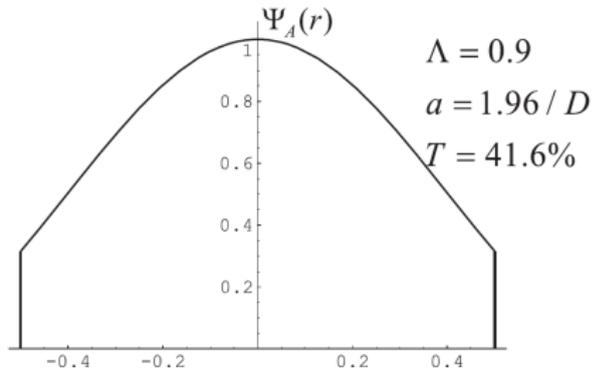


# Апертурная аподизация

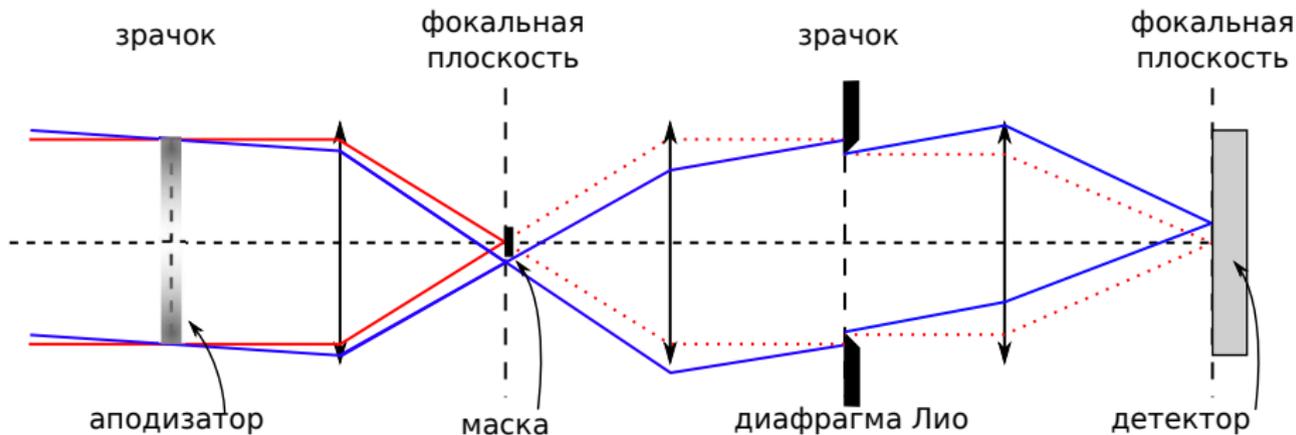


Soummer et al, 2003:

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

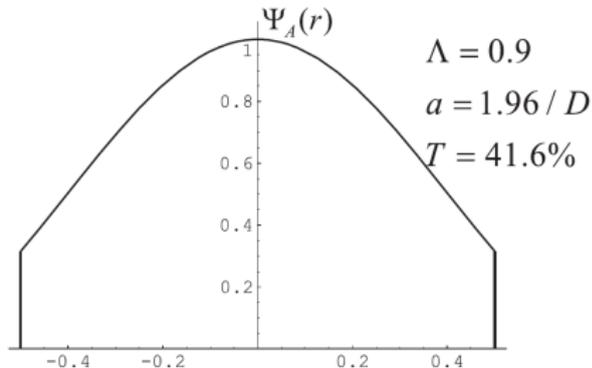


# Апертурная аподизация



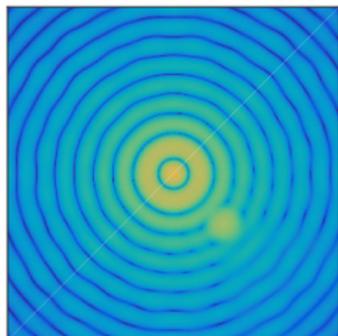
Soummer et al, 2003:

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

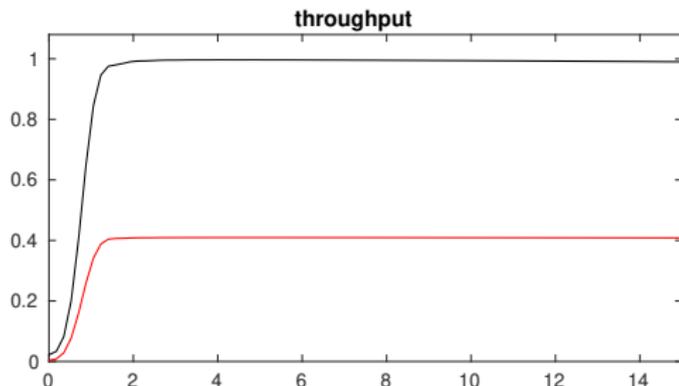
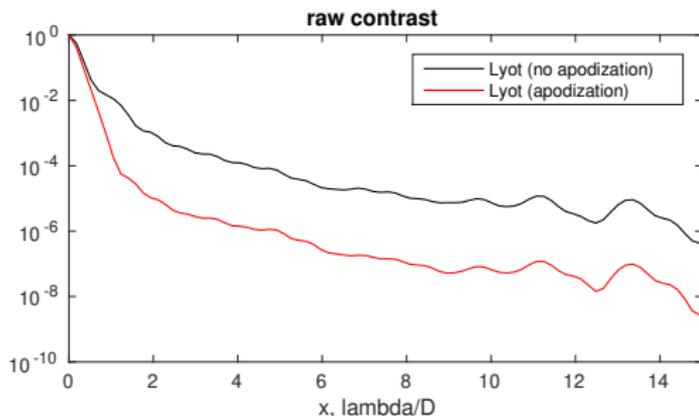
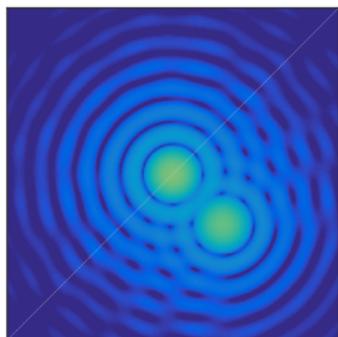


# Апертурная аподизация: коронограф Лيو

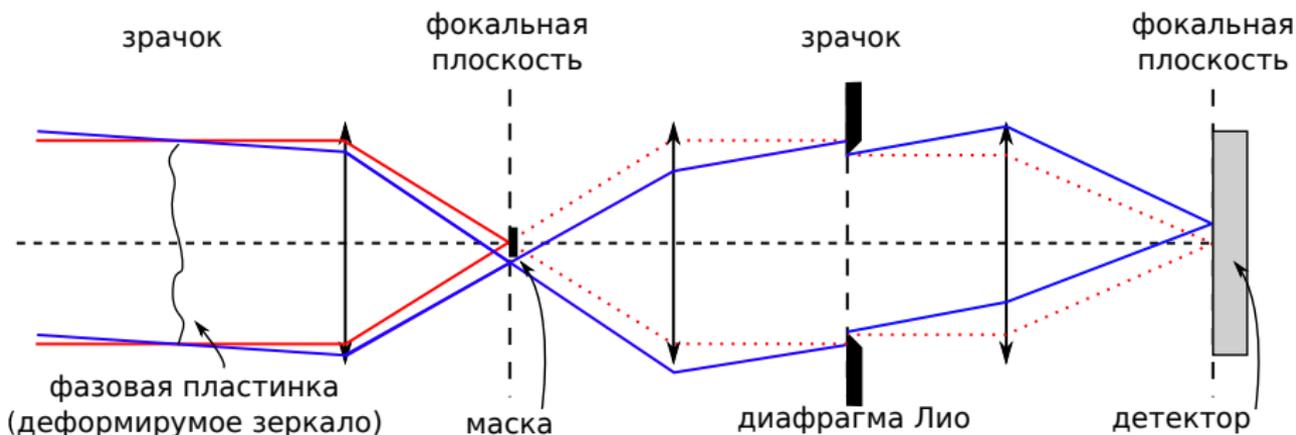
Без аподизации



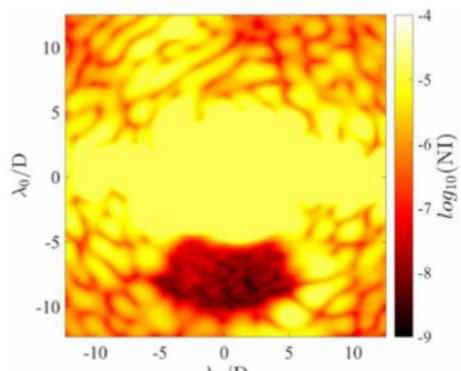
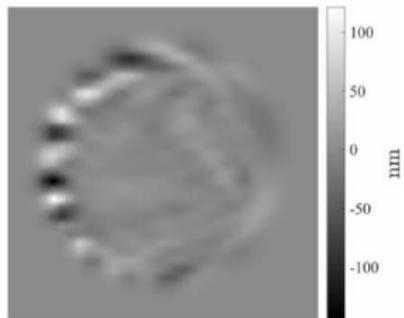
С аподизацией



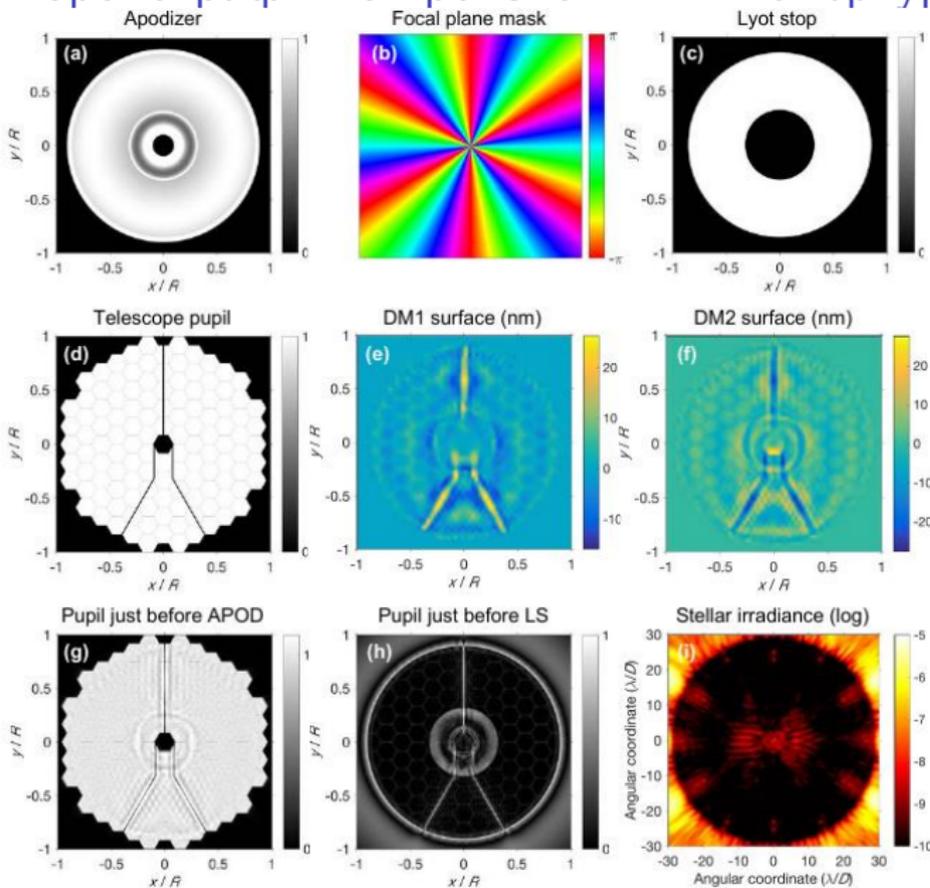
# Фазовая апертурная аподизация



Dark hole



# Коронаграфия с произвольными апертурами



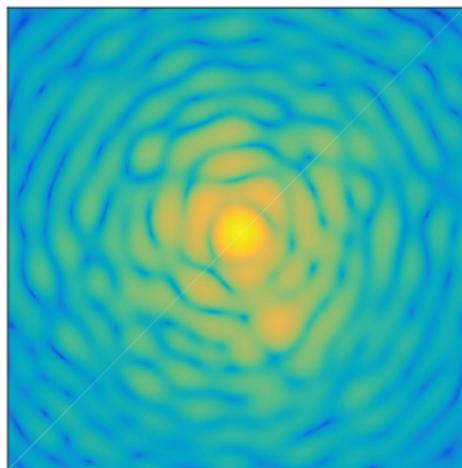
Ruane et al, 2018  
Fast Linearized  
Coronagraph  
Optimizer (FALCO)  
IV. Coronagraph  
design survey for  
obstructed and  
segmented  
apertures  
LUVUOIR design A

## Спекл-шум

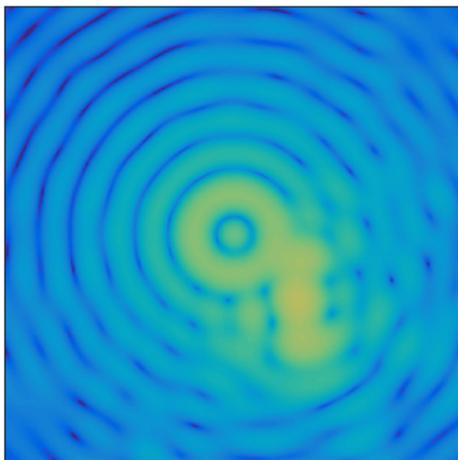
Волновой фронт на входе в коронограф никогда не бывает плоским:

- 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  $\lambda$ . Положение планеты от  $\lambda$  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  $\lambda$ . Положение планеты от  $\lambda$  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  $\lambda$ . Положение планеты от  $\lambda$  не зависит.
- Angular Differential Imaging (ADI). Картина спеклов более стабильна относительно горизонтальной системы координат. Положение планеты меняется вследствие вращения поля.
- Polarimetric Differential Imaging (PDI)

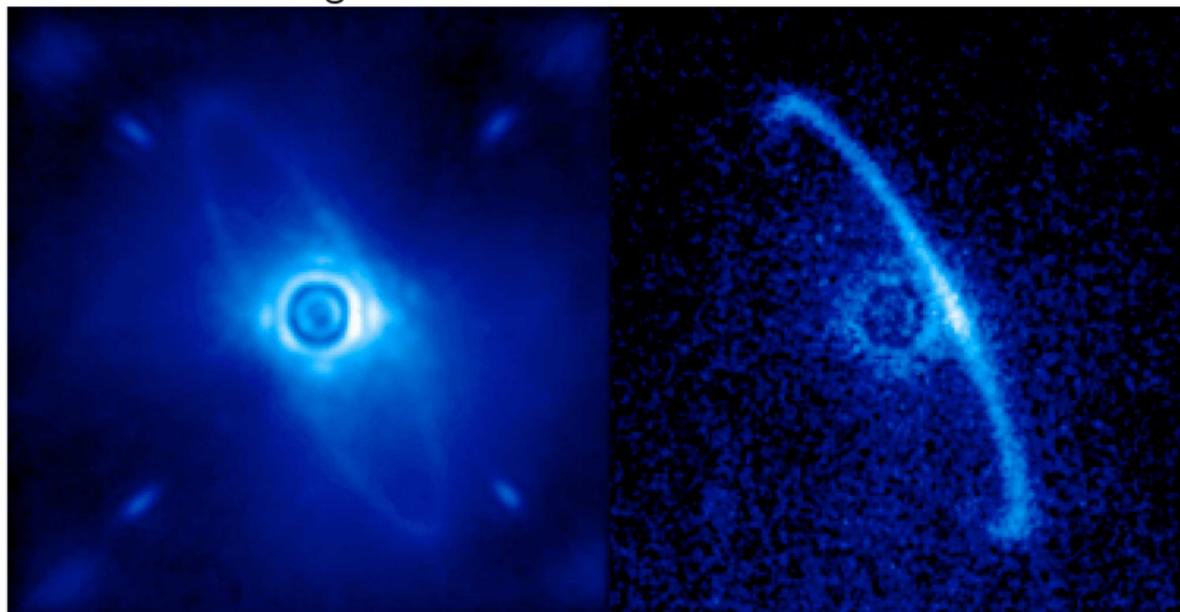
# Polarimetric Differential Imaging

- Излучение звезды слабо поляризовано → спеклы слабо поляризованы

# Polarimetric Differential Imaging

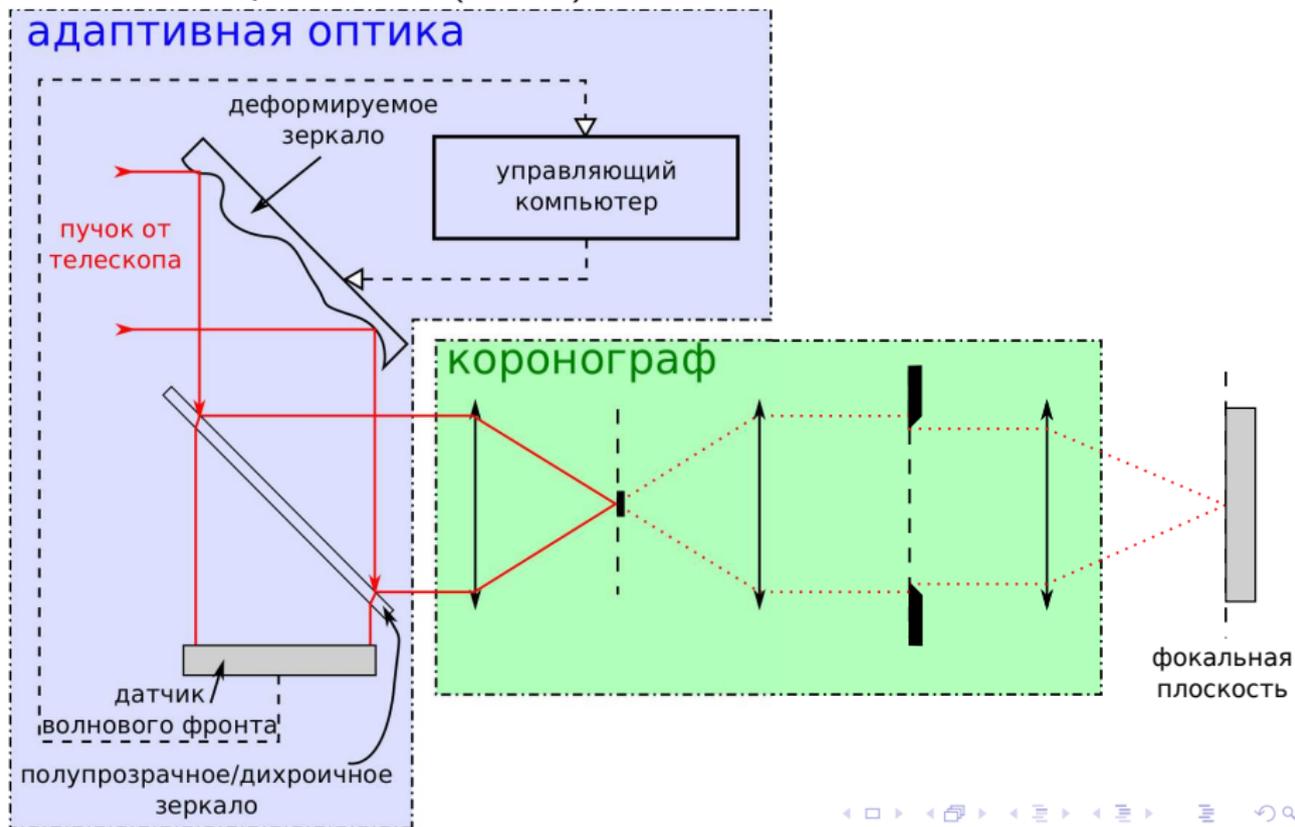
- Излучение звезды слабо поляризовано → спеклы слабо поляризованы
- Рассеянное излучение сильно поляризовано

## Gemini Planet Imager



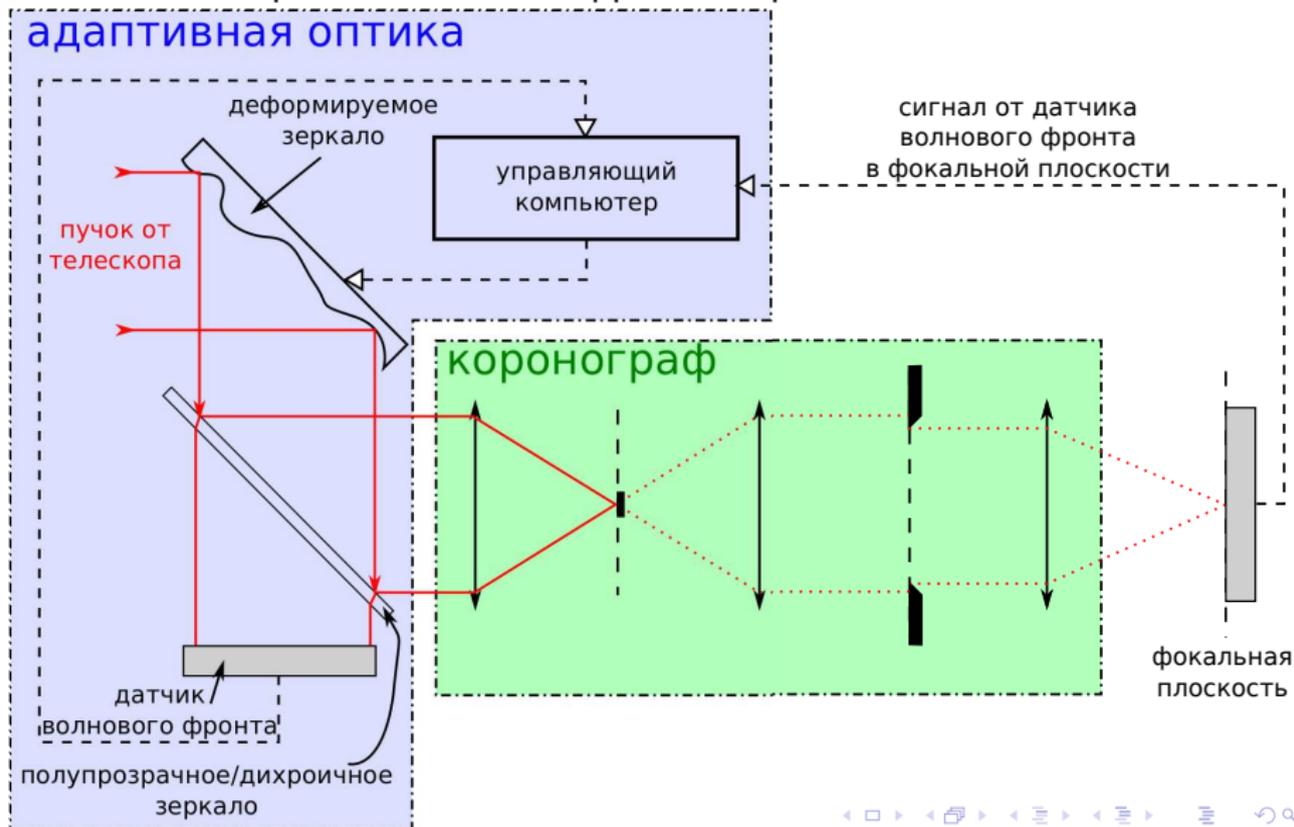
# Причина спекл-шум: ошибки разности пути

## 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

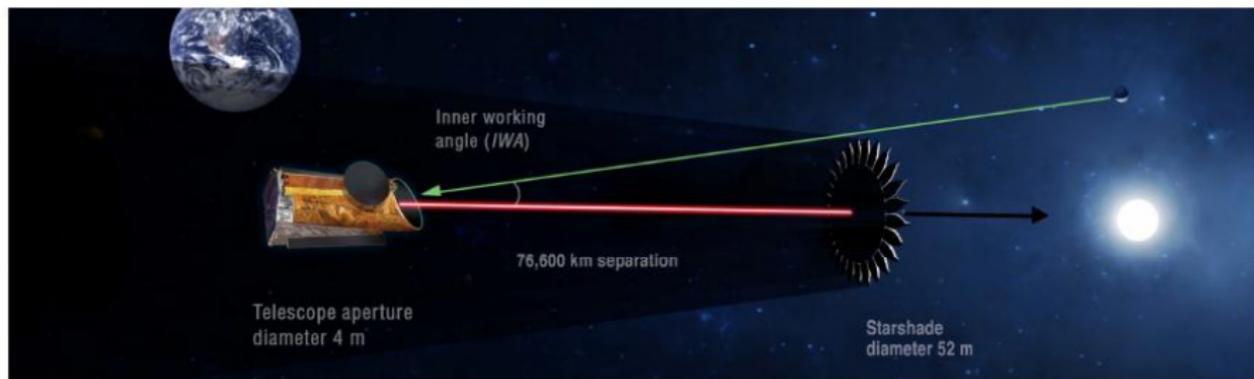
## Ключевые технологии (направления развития)

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

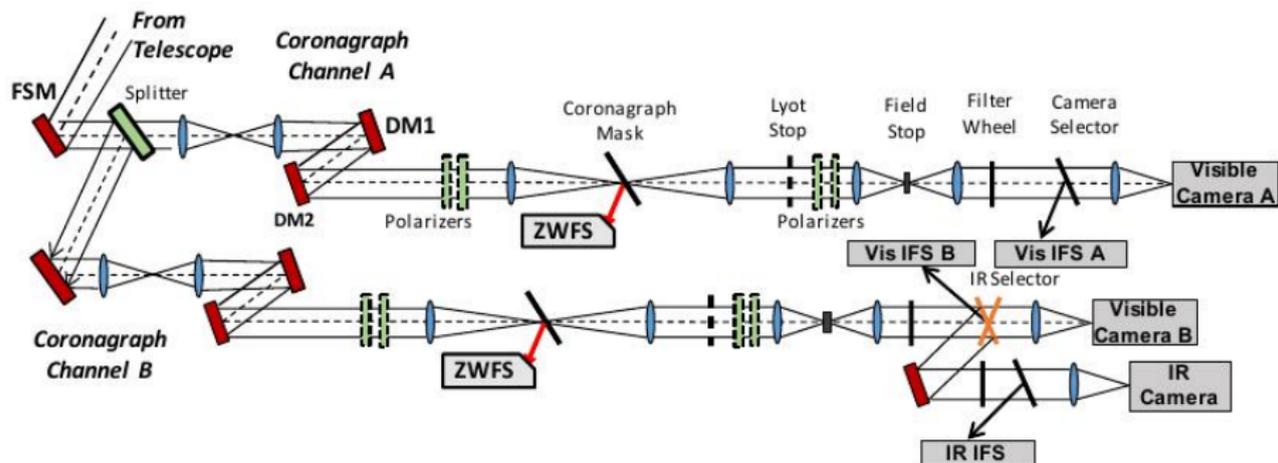
# Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx)

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

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



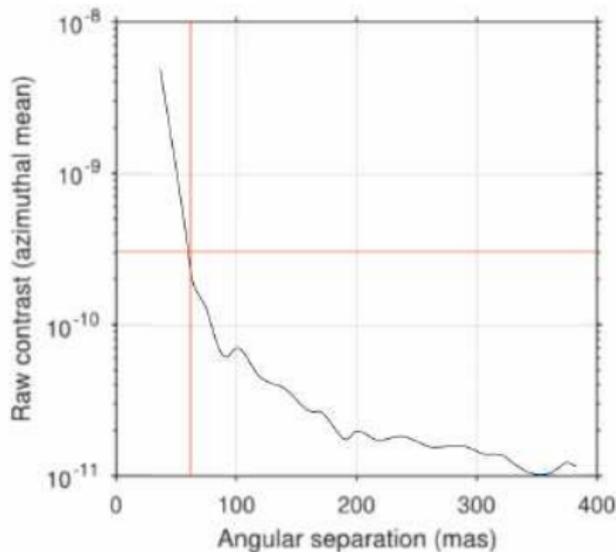
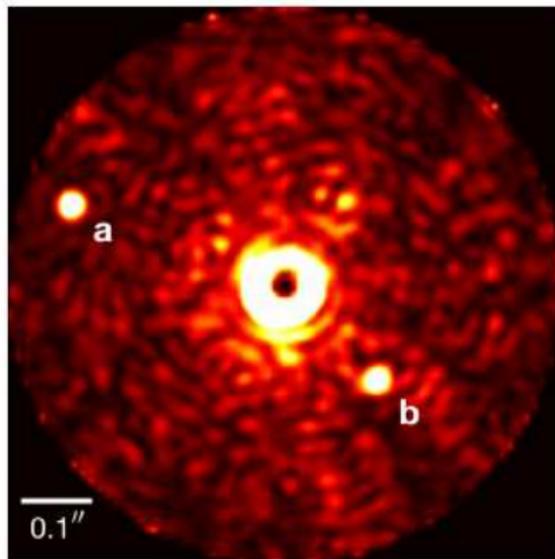
# HabEx coronagraph



- 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

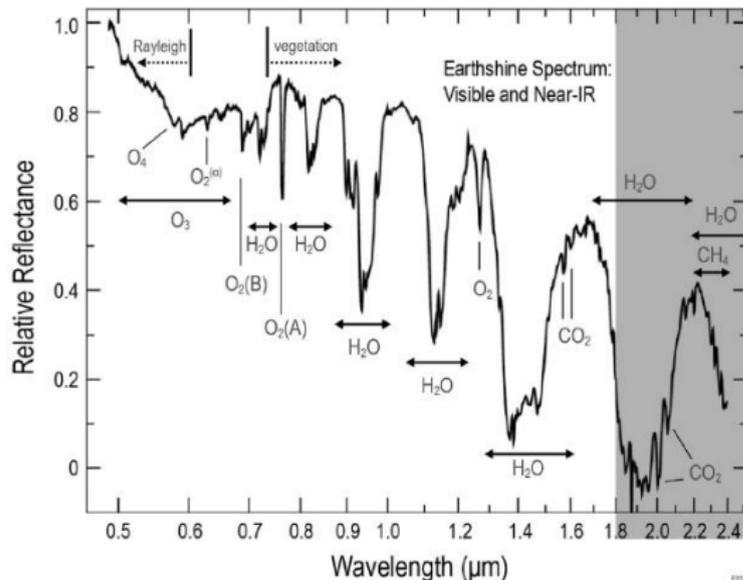
# HabEx coronagraph

- Измерение орбит, радиусов для планет земной группы в области обитаемости ближайших звезд FGK.
- Состав атмосферы:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (biosignatures).
- Отблеск от океана (можно отличить твердую поверхность от жидкой).



# HabEx coronagraph

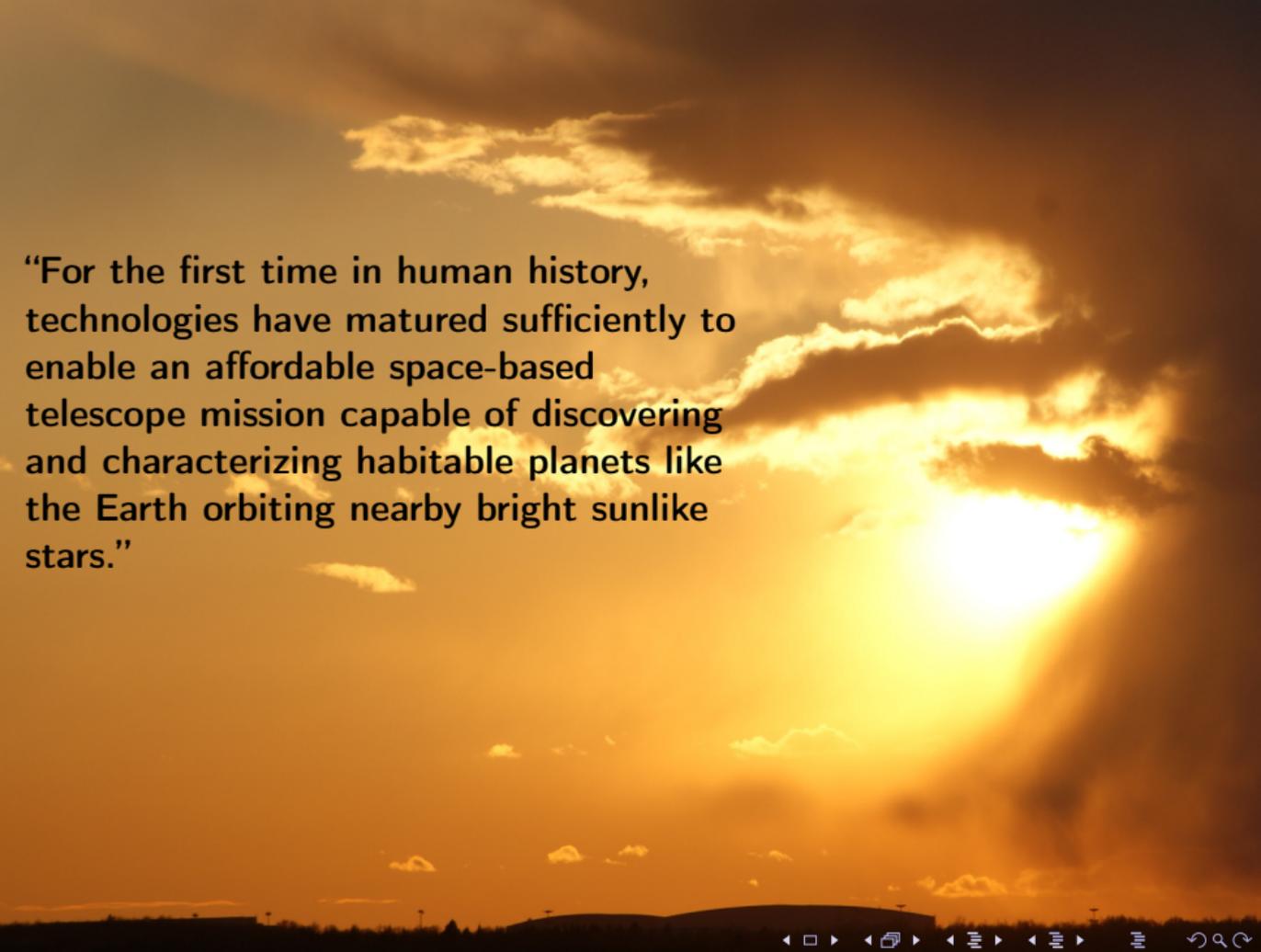
- Измерение орбит, радиусов для планет земной группы в области обитаемости ближайших звезд FGK.
- Состав атмосферы:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (biosignatures).
- Отблеск от океана (можно отличить твердую поверхность от жидкой).



# HabEx coronagraph

- Измерение орбит, радиусов для планет земной группы в области обитаемости ближайших звезд FGK.
- Состав атмосферы:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (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