

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Лаборатория новых фотометрических методов

# **Многорежимная быстрая камера для 2.5 м телескопа: методы и задачи**

Борис Сафонов

Москва, 2013

# План доклада

- 1) Введение
- 2) Спекл-интерферометрия.
- 3) Селекция изображений.
- 4) Дифференциальная спекл-поляриметрия.
- 5) SCIDAR.
- 6) Формулировка концепции.
- 7) Предполагаемая конструкция.

# Спекл-интерферометрия

Уравнение изображения:  В пространстве Фурье-образов:

$$G(\boldsymbol{\alpha}) = O(\boldsymbol{\alpha}) \otimes T(\boldsymbol{\alpha})$$

$$\tilde{G}(\mathbf{f}) = \tilde{O}(\mathbf{f}) \tilde{T}(\mathbf{f})$$

Фурье-образ изображения  
в фокальной плоскости

Функция видности объекта

Оптическая передаточная функция

$$\langle |\tilde{G}(\mathbf{f})|^2 \rangle = |\tilde{O}(\mathbf{f})|^2 \langle |\tilde{T}(\mathbf{f})|^2 \rangle$$

Усредненный спектр  
мощности изображения

Модуль функции видности

Спекловая оптическая передаточная функция

По измерениям  $\langle |\tilde{G}(\mathbf{f})|^2 \rangle$  можно восстановить  $|\tilde{O}(\mathbf{f})|^2$   
(Labeurie, 1970).

Фаза  $\tilde{O}(\mathbf{f})$  также может быть восстановлена (Lohmann, 1983).

# Спекл-интерферометрия: примеры задач

Двойные звезды: СИ доступны звезды, промежуточные между спектроскопическими и визуально двойными с разделением более 1". Всего было наблюдено 19000 двойных.

I. Проверка двойственности отдельных интересных объектов.

1) Kraus et al. 2009. Восстановление орбиты Theta1C Ori.

II. Статистика двойственности различных подвыборок звезд.

1) Mason et al, 2011; Roberts et al, 2011. Двойственность у звезд с экзопланетами.

Влияние двойственности на образование планет.

Влияние двойственности на обнаружение экзопланет.

2) Tokovinin et al, 2009; Поиск двойственности у компонент широких пар. Статистика кратности.

3) Tokovinin et al, 2012; Подтверждение двойственности, заподозренной по астрометрическим ускорениям в каталоге Hipparcos

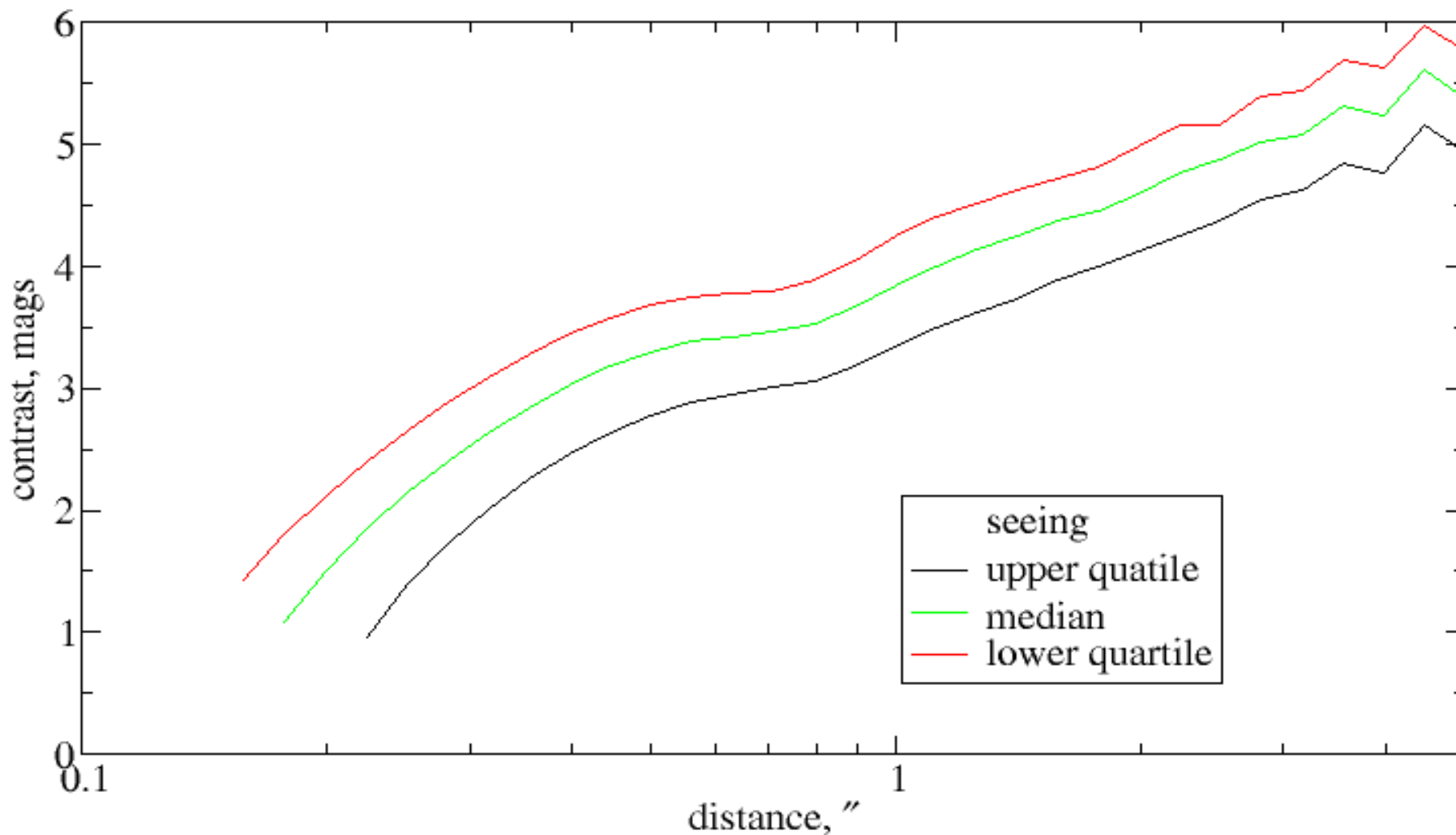
4) Проверка кандидатов, найденных по вариациям времен затмений Kepler; Conroy et al, 2013

5) Marchetti et al, 2001, Rastegaev et al, 2008. Звезды малой металличности

6) Valega et al 2012. Звезды с сильными магнитными полями.

# Спекл-интерферометрия: потенциальные возможности 2.5 м телескопа

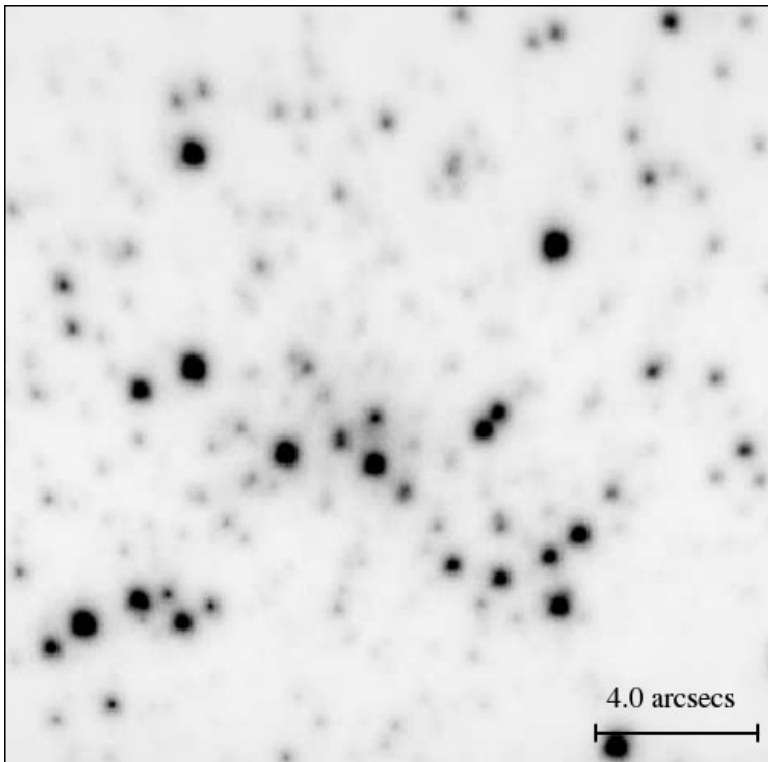
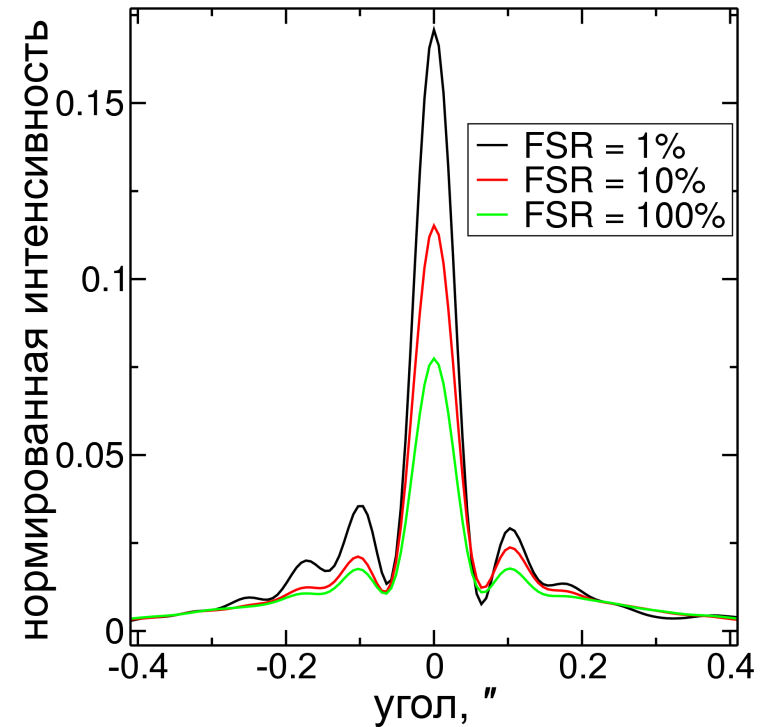
Порог обнаружения двойственности по усредненному спектру мощности (измерение разделения с точностью 20%). Полное время накопления 3 минуты, экспозиция 30 мс, полоса I, звездная величина  $V=15$  (метод – Кузьменков, 1986).



# Селекция изображений

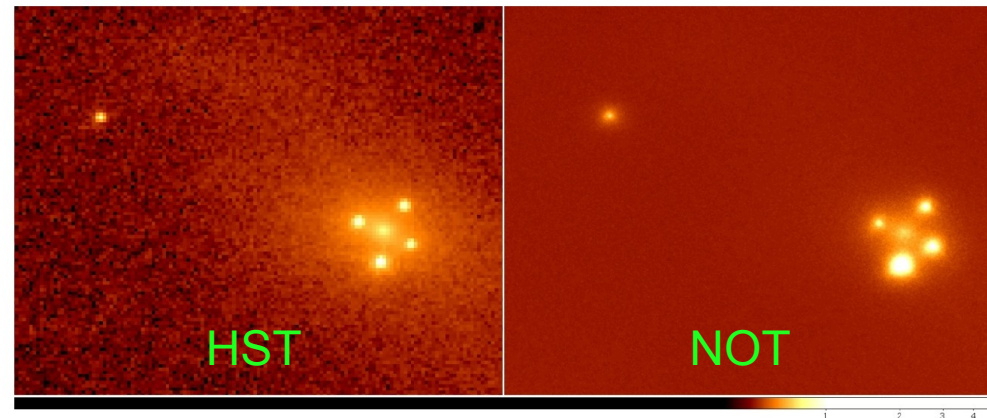
## Алгоритм:

- Получить серию короткоэкспозиционных изображений;
- Выбрать опорную звезду;
- Отобрать некоторую долю лучших изображений;
- Сложить их методом shift-and-add.

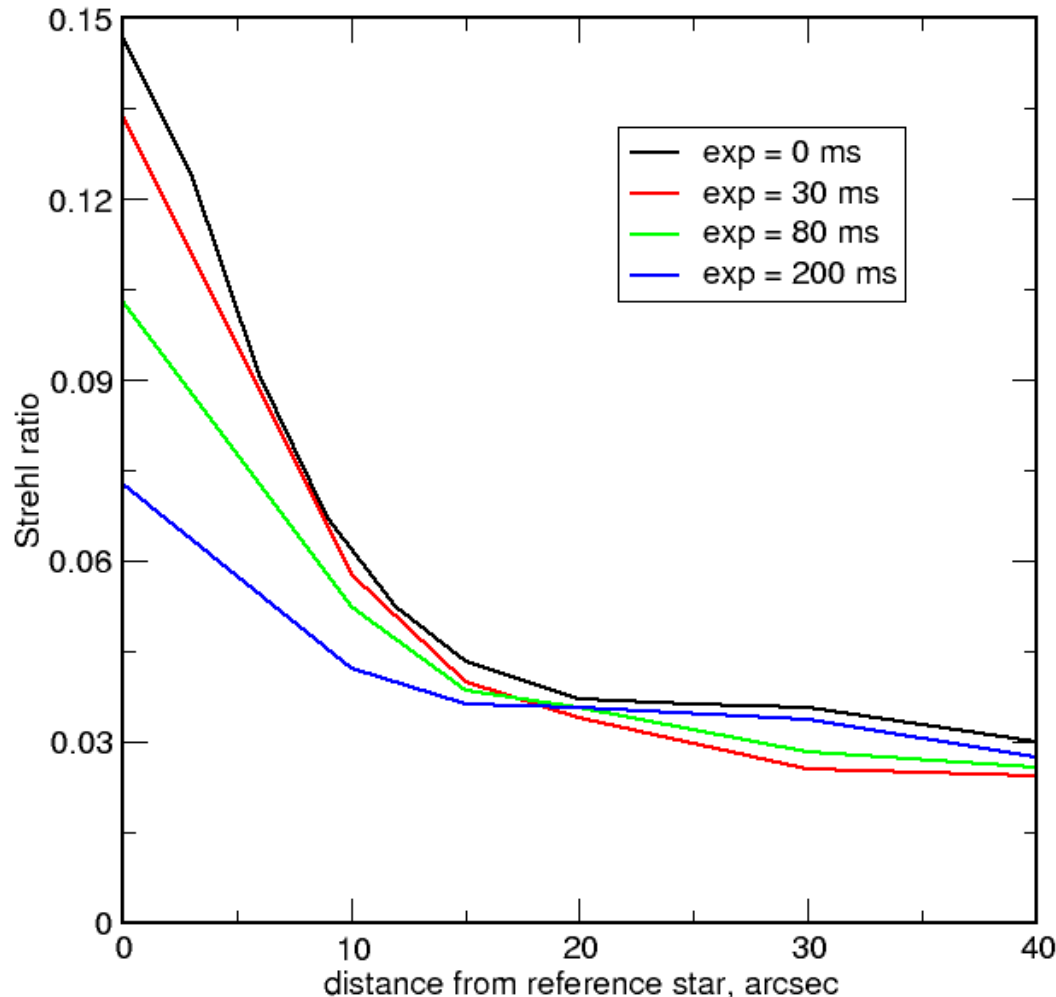


Примеры изображений, получаемых на 2.5-м телескопе NOT.

FWHM = 0.26". Law et al, 2006



# Селекция изображений: потенциальные возможности 2.5-м телескопа



Моделирование методом Монте-Карло для медианных условий на г. Шатджатмаз, 2.5 м телескопа, полосы I, доля отбираемых кадров 5%. Safonov, 2010

Полуширина дифракционная до расстояний 15" от опорной звезды.

Целесообразно использование масштаба 0.066"/пкс, достижимое число Штреля при этом уменьшится на 15-20%, однако доступное поле зрения будет 33".

# Селекция изображений: Примеры задач

Все тоже самое, что и для спекл-интерферометрии.

Преимущество – большое поле 33", для спекл-инт - около 5".

- 1) Esther et al, 2013. Проверка на двойственность 451 К-М звезд, из них 70 двойных, 28 – ранее неизвестных. Телескопы: 2.2-m of САНА, 1.5-m CST.
- 2) Bergfors et al, 2012; Lillo-Box et al, 2012; Ginski et al 2012. Проверка на двойственность звезд с экзопланетами. Телескоп: 2.2-m of САНА.
- 3) Skottfelt et al, 2013. Поиск переменных в плотном поле. В шаровом скоплении NGC6981 нашли 2 звезды типа RR Lyr. 1.54-м датский телескоп.

Развитие метода:

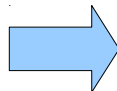
- 1) Schodel et al, 2011. Адаптивная оптика для бедных: спекл-голография. Тоже, но в большем поле, с использованием многих опорных звезд, распределенных по полю.
- 2) Garrel et al, 2012. Отбор в пространстве фурье-образов изображения.
- 3) Law et al, 2009; Tokovinin et al, 2010. Адаптивная оптика + селекция изображений



# Дифференциальная спекл-поляриметрия: модель формирования изображения

Уравнение изображения:

$$G(\alpha) = O(\alpha) \otimes T(\alpha)$$



В пространстве Фурье-образов:

$$\tilde{G}(\mathbf{f}) = \tilde{O}(\mathbf{f}) \tilde{T}(\mathbf{f})$$

Фурье-образ распределения  
интенсивности в фокальной плоскости

Функция видности объекта

Оптическая передаточная функция

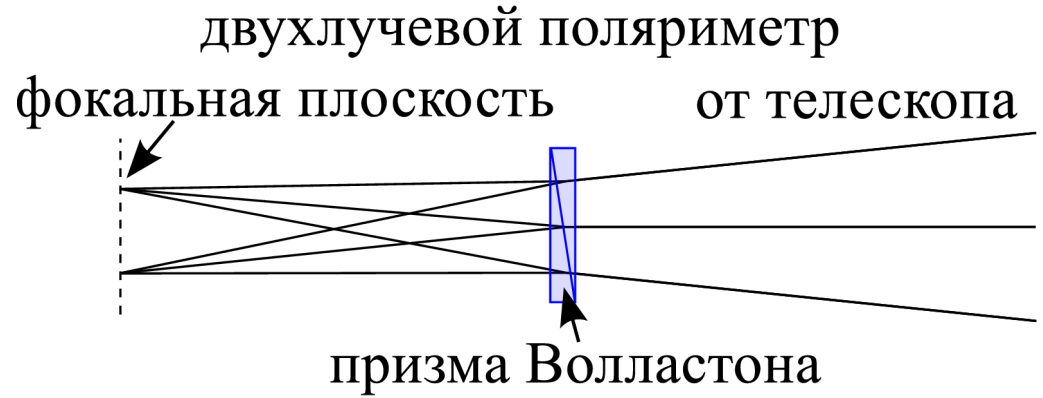
Детектор регистрирует распределение не интенсивности, а *фотонов*, падающих на фокальную плоскость (Petrov et al, 1986):

$$\tilde{F}(\mathbf{f}) = \tilde{G}(\mathbf{f}) + \eta(\mathbf{f})$$

где  $\eta(\mathbf{f})$  – спектр пуассоновского шума, круговая гауссовская комплексная величина с дисперсией, равной единице, деленной на количество фотонов в изображении.

# Дифференциальная спекл-поляриметрия: модель формирования изображения

Добавим в систему оптический элемент, отклоняющий пучки на разные углы в зависимости от их поляризации:



$$\tilde{F}_h(\mathbf{f}) = \tilde{O}_h(\mathbf{f})\tilde{T}_h(\mathbf{f}) + \eta_h(\mathbf{f}), \quad \tilde{F}_v(\mathbf{f}) = \tilde{O}_v(\mathbf{f})\tilde{T}_v(\mathbf{f}) + \eta_v(\mathbf{f}).$$

Рассмотрим величину:

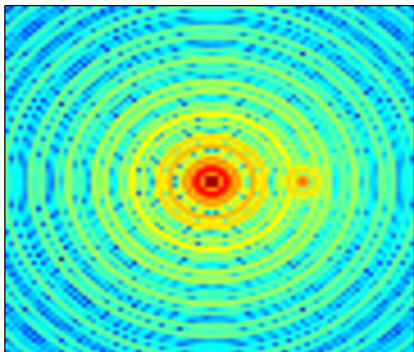
$$\mathcal{R}(\mathbf{f}) = \frac{\langle \tilde{F}_h(\mathbf{f})\tilde{F}_v^*(\mathbf{f}) \rangle_M}{\langle \tilde{F}_v(\mathbf{f})\tilde{F}_v^*(\mathbf{f}) \rangle_M - K_v^{-1}}$$

Если пренебречь инструментальной поляризацией, то можно записать:

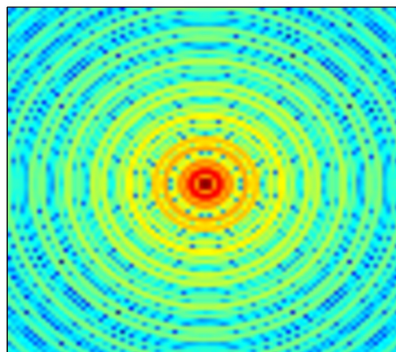
$$\mathcal{R}(\mathbf{f}) \approx \frac{\tilde{O}_h(\mathbf{f})}{\tilde{O}_v(\mathbf{f})} = \frac{\tilde{I}(\mathbf{f}) + \tilde{Q}(\mathbf{f})}{\tilde{I}(\mathbf{f}) - \tilde{Q}(\mathbf{f})} = \mathcal{R}_0(\mathbf{f})$$

# Дифференциальная спекл-поляриметрия: пояснение

vertical

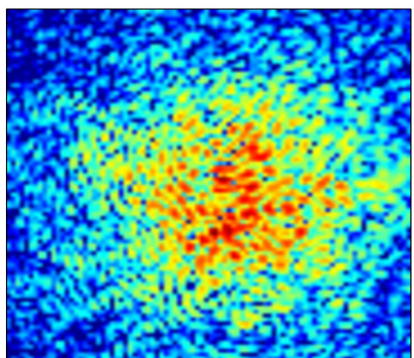


horizontal

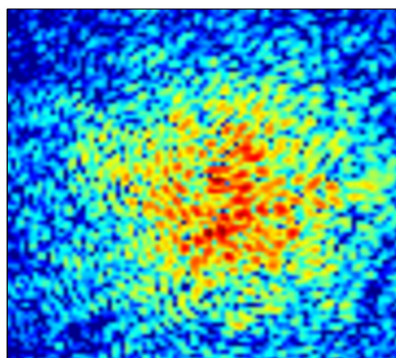


Дифракционное изображение объекта звезда + слабый поляризованный источник в двух направлениях поляризации

Мгновенные изображения, искаженные атмосферой

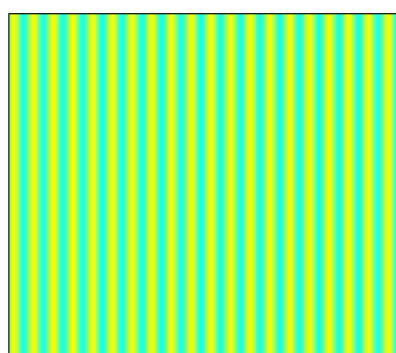
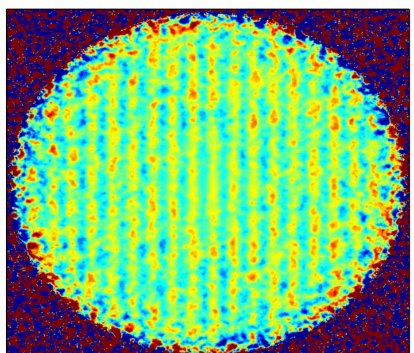


measured R



$O_h/O_v$

Величина R, “измеренная” по 100 кадрам и отношение спектров, соответствующих вертикальной и горизонтальной поляризации



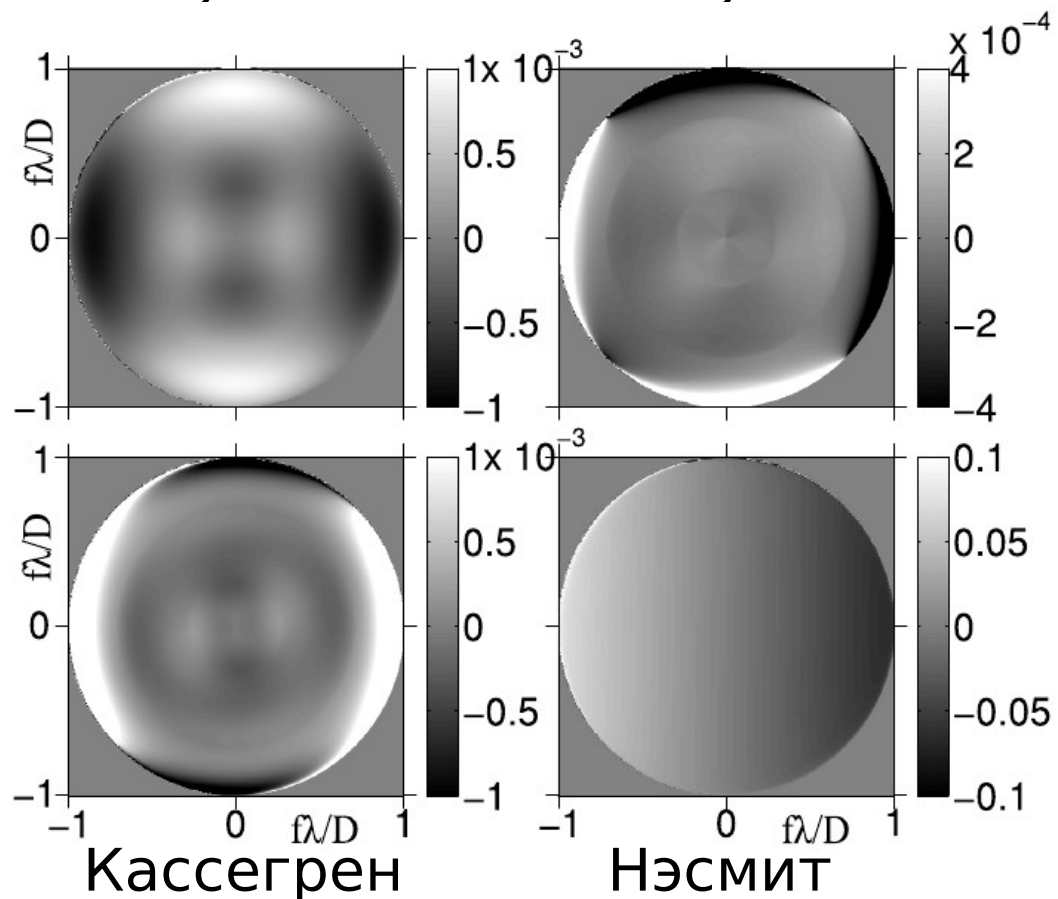
# Дифференциальная спекл-поляриметрия: величина $R$ как оценка $R_0$

Главные свойства этой оценки – **смещение** и **дисперсия** – были изучены в предположении наличия инструментальной поляризации, атмосферного шума и пуассоновского шума.

Для среднего  $R$  справедливо:

$$\overline{R}(f) = R_0(f)(1 + \Delta R(f))$$

Здесь  $\Delta R(f)$  зависит только от инструментальной поляризации телескопа. Пример расчета этой величины для 2.5 м телескопа – на рисунке справа.



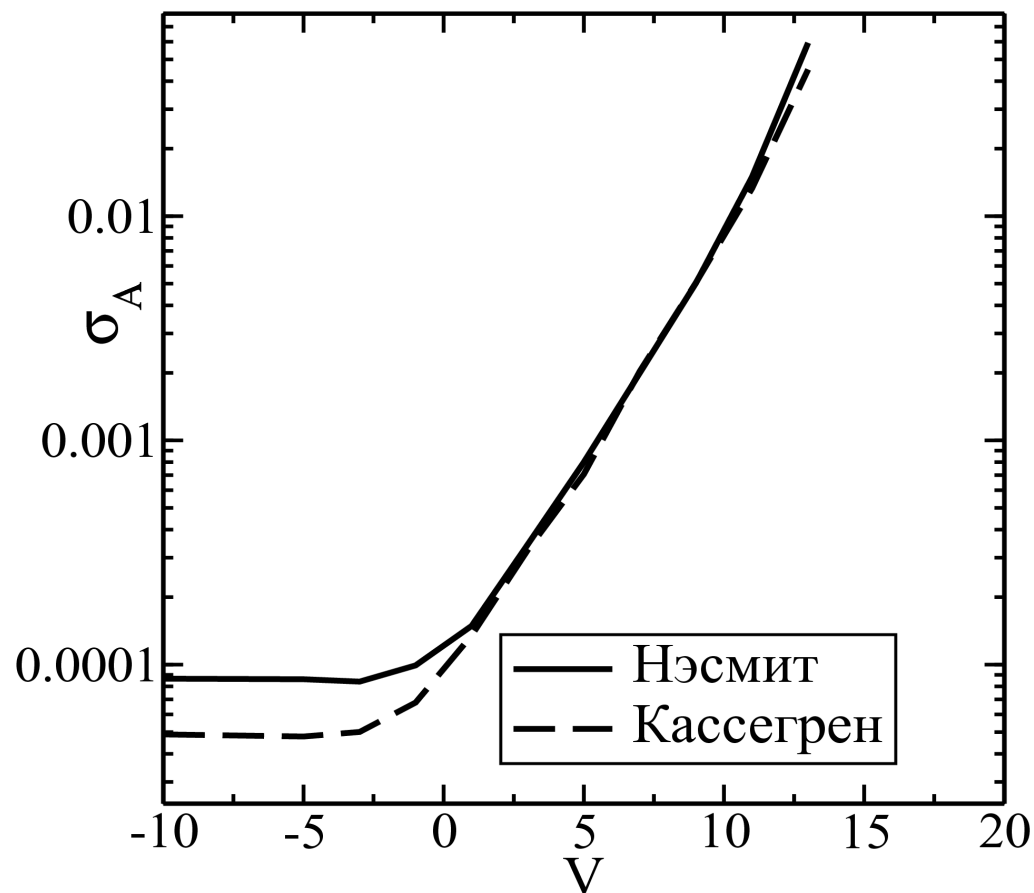
**Вывод:** смещение  $\Delta R(f)$  может быть измерено по яркой звезде малых угловых размеров, вид которой заведомо не зависит от направления пропускаемой поляризации.

# Дифференциальная спекл-поляриметрия: дисперсия R

Дисперсия R характеризует шум, а значит, определяет возможности интерпретации измерений R, т.е. возможности метода. Дисперсия оценивалась по измерениям, смоделированным методом Монте-Карло. При этом учитывались инструментальная поляризация, атмосферный шум и пуассоновский шум.

Справа – зависимость дисперсии от звездной величины для двух фокусов.

**Вывод:** пуассоновский шум доминирует над атмосферным практически для всех астрономических объектов

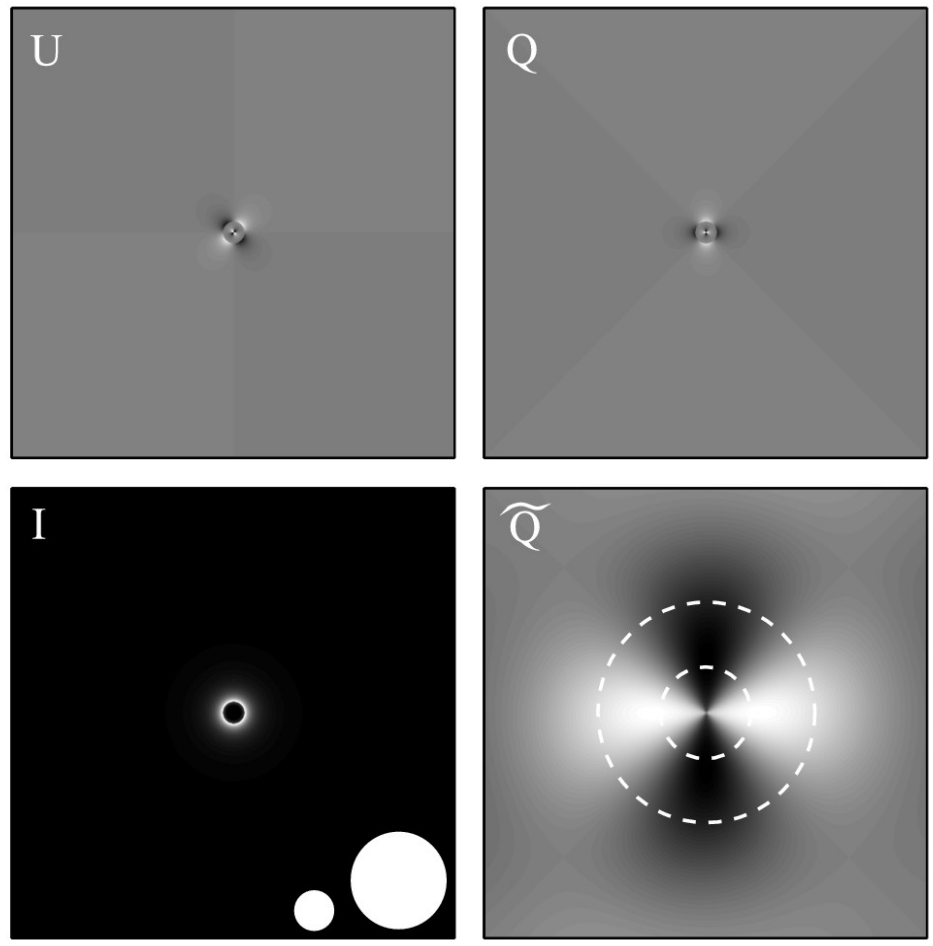
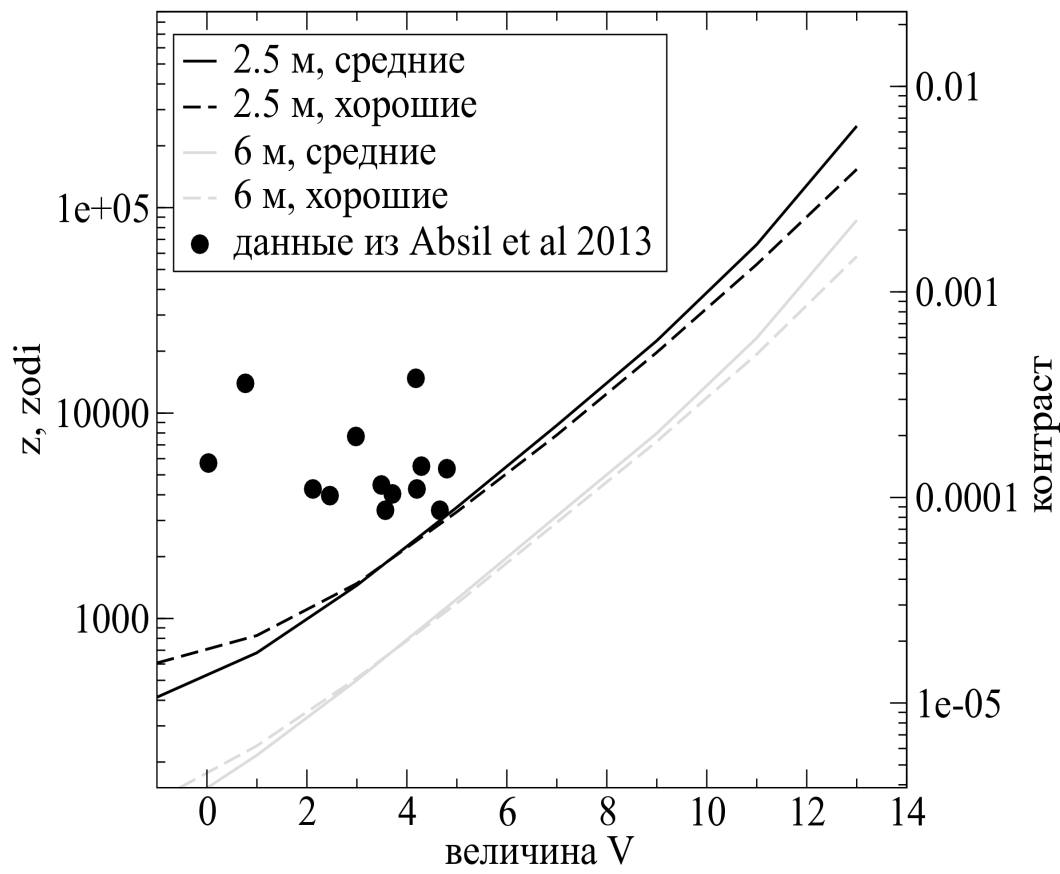


# Дифференциальная спекл-поляриметрия: пример задачи №1: экзозодиакальный диск

Для объекта, представляющего собой яркую звезду и слабое поляризованное окружение

$$\mathcal{R}(f) = 1 + 2z\tilde{Q}(f),$$

где  $z$  – контраст между диском и звездой



# Дифференциальная спекл-поляриметрия: пример задачи №2: пыль около рAGB-звезд

Norris et al 2012

Наблюдали с VLT/NACO пылевые оболочки post-AGB звезд W Hya, R Dor, R Leo.

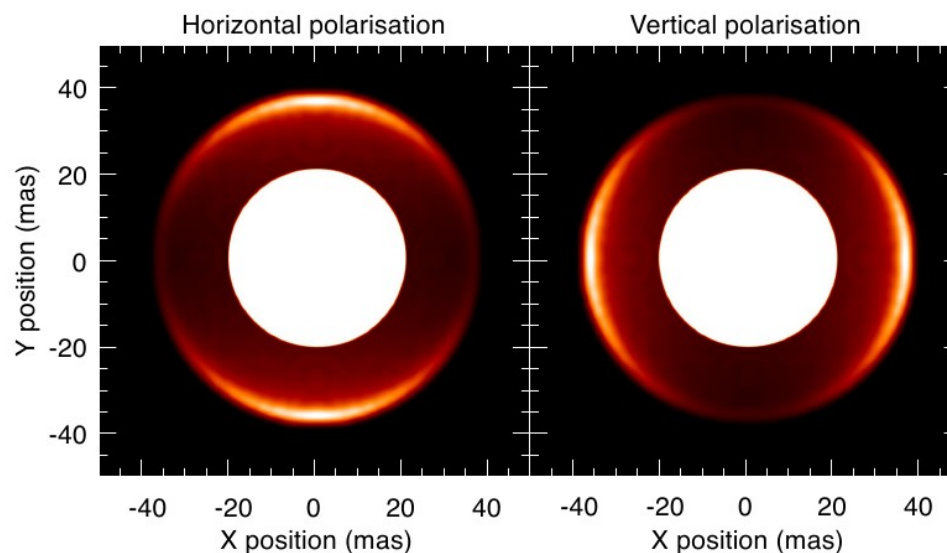
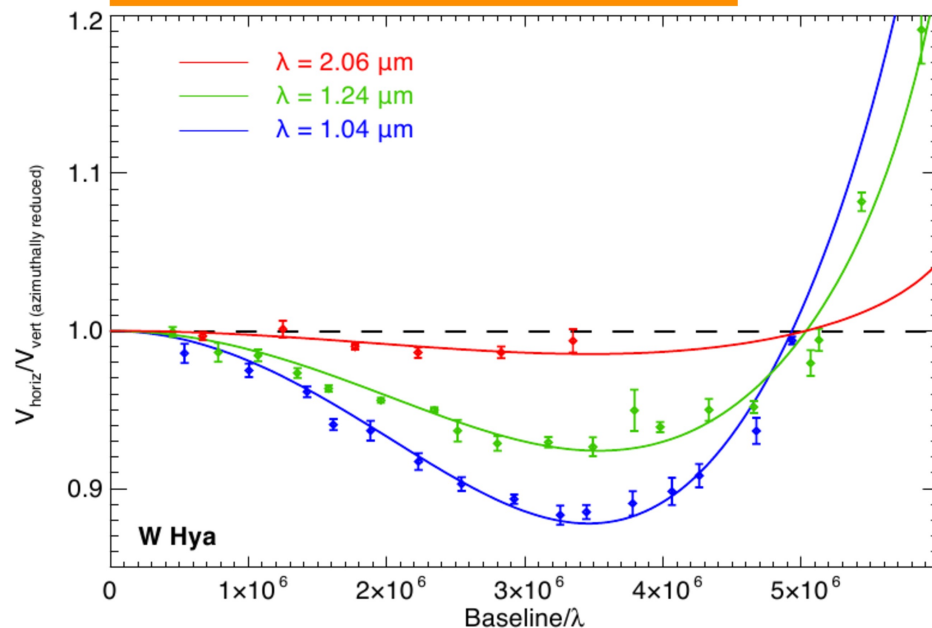
Методы: Апертурное маскирование + адаптивная оптика + дифференциальная поляриметрия.

Основная наблюдаемая величина: отношение модулей видности для горизонтальной и вертикальной поляризаций.

Удалось извлечь:

1. Размер оболочки.
2. Физ. свойства пыли.
3. Размер пылинок.

область, доступная ДСП@2.5-м в полосе V



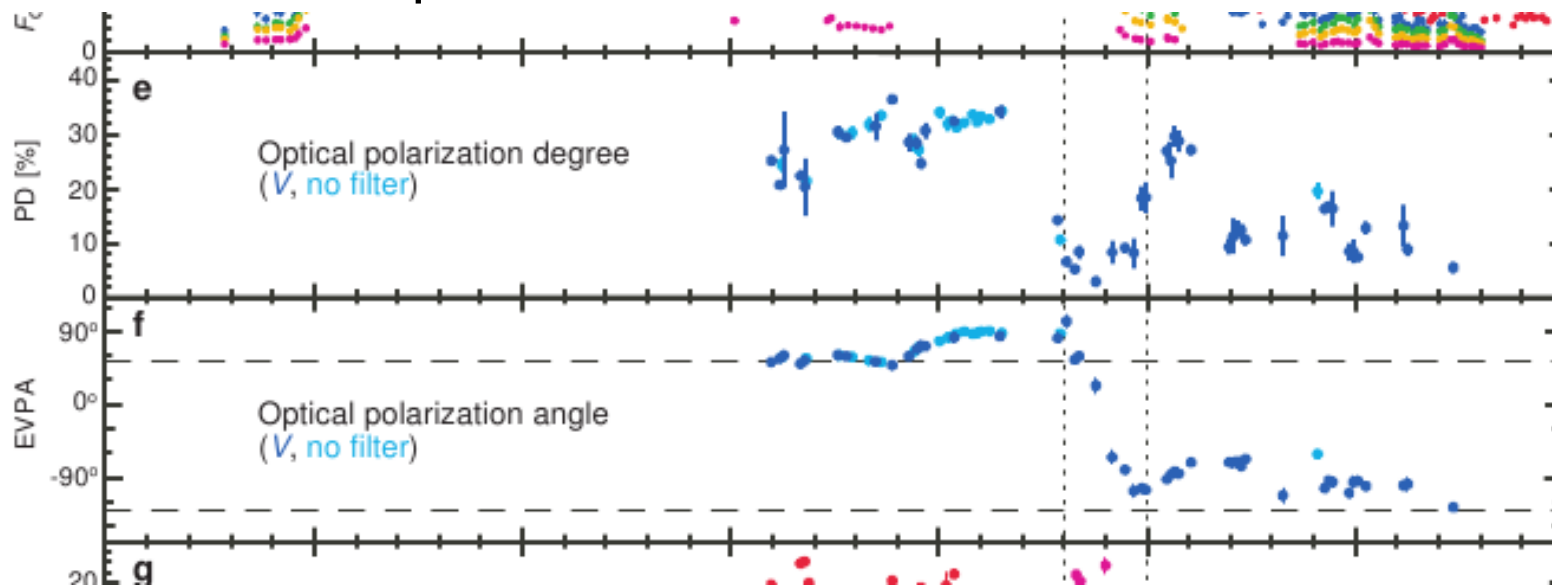




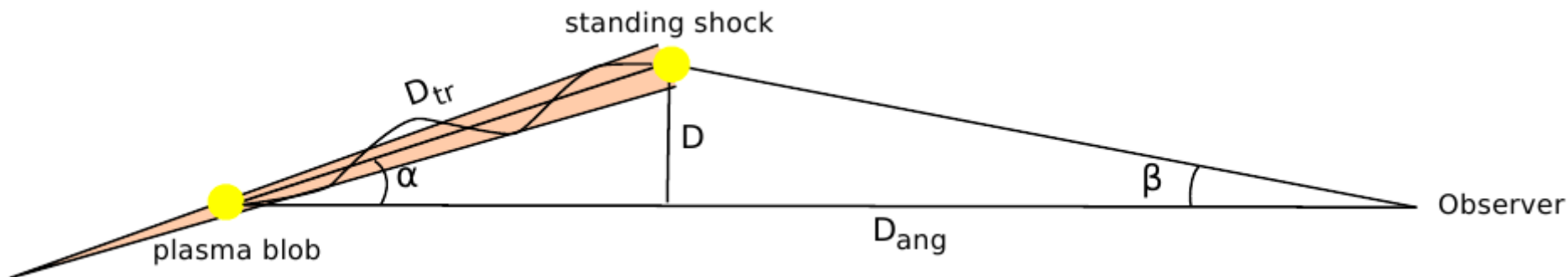
# Дифференциальная спекл-поляриметрия: пример задачи №4: AGN

Положение объекта зависит от направления поляризации,  
пример: активные ядра галактик типа блазар и других

Abdo et al, 2010. Одновременные наблюдения 3C279 в гамма,  
рентгене, оптике и радио.



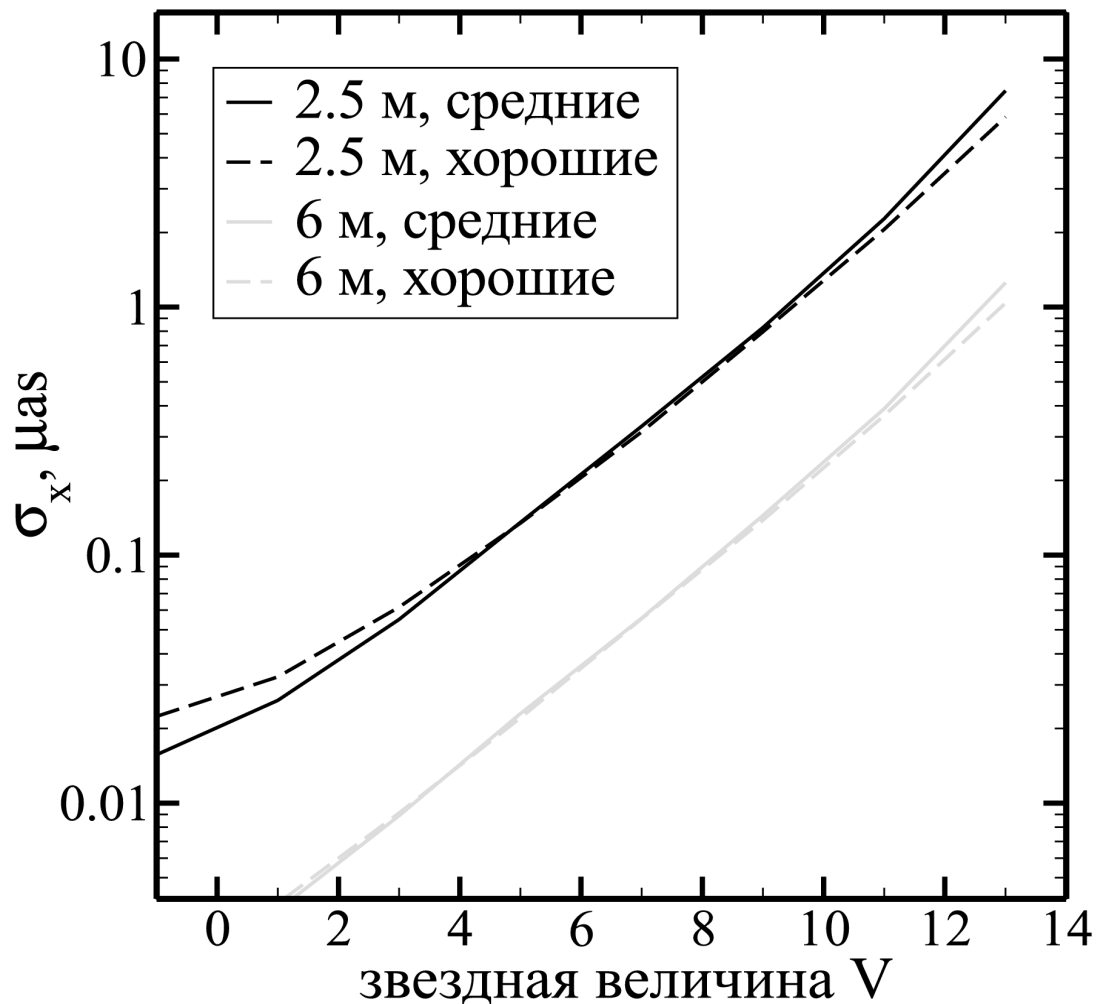
Предполагаемая геометрия джета



# Дифференциальная спекл-поляриметрия: пример задачи №4: AGN

Предполагаемая точность дифф.  
астрометрии методом ДСП

Предполагаемый сигнал  
(личная переписка с  
Д. Блиновым)



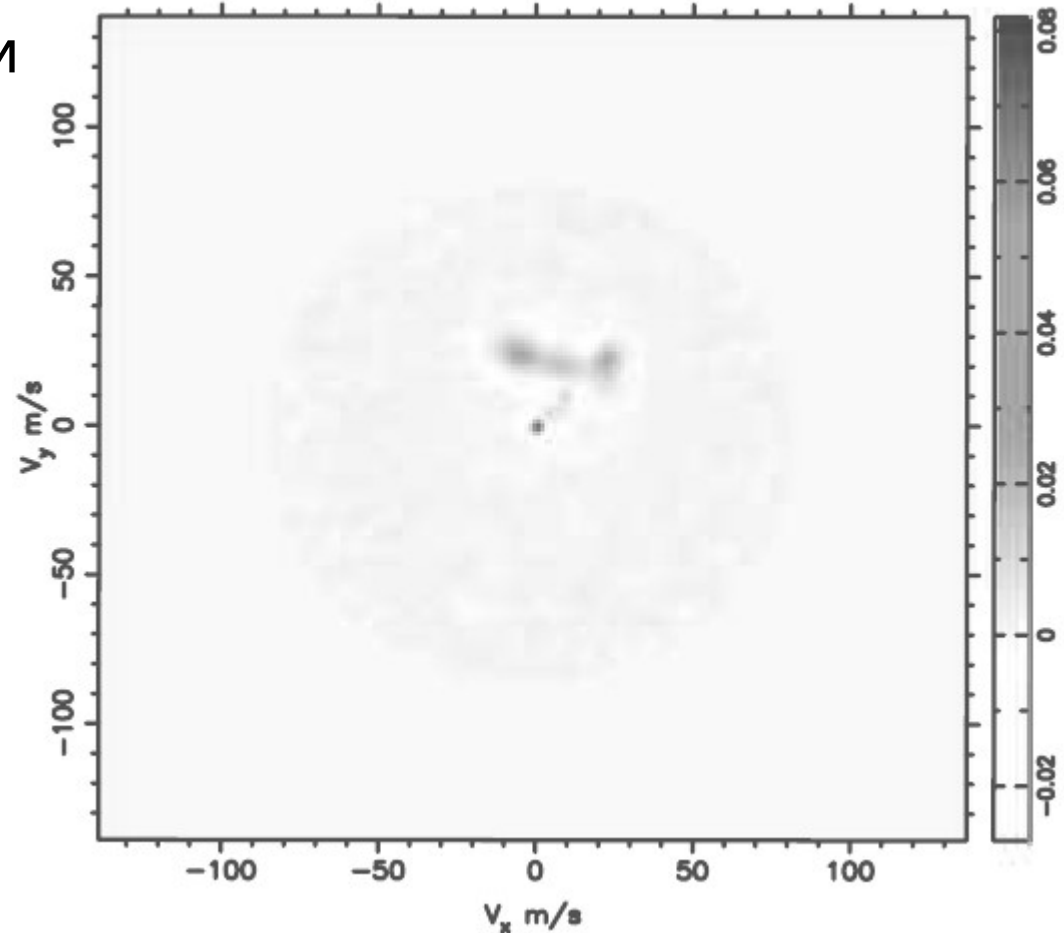
объект	Величина сигнала ( $\mu\text{as}$ )
BL Lac ( $V=14-17$ )	9.3-45.2
S5 0716+71 ( $V=14$ )	7.6-13.4
3C 454.3 ( $R=15$ )	33.5-34.1
PKS 1510-089 ( $R>14.35$ )	438.6-969.2
3C 279 ( $R=15.9$ )	75.8-147.9

# SCIDAR

SCIDAR используется для измерения профиля интенсивности турбулентности и скорости ветра. Klueckers et al, 1998. Кросс-корреляция изображений зрачков от двух звезд. Также возможно использование одной звезды, в этом случае восстановление профиля турбулентности затруднено, однако скорости ветра можно восстановить. Habib et al, 2006.

152-OHP 23-11-2004 ic2

Пример кросс-корреляции распределения интенсивности по зрачку с некоторой задержкой (Habib et al 2006)



# SCIDAR: задачи

- 1) Измерение профиля турбулентности и скорости ветра с высоким высотным разрешением. Одновременные наблюдения с MASS/DIMM. Проверка работоспособности алгоритмов восстановления 13 слоев, скорости ветра.
- 2) Качественная оценка интенсивности подкупольной турбулентности (Tokovinin, 2012)
  - 1) Определение зависимости ее интенсивности от условий внешней среды
  - 2) Настройка системы откачки воздуха

# Общие требования к конструкции

Требуется наличие: компенсатора атмосферной дисперсии, колеса фильтров, “быстрый” детектор.

Для всех перечисленных методов ПЗС с электронным усилением iXon+897 является детектором, близким к идеальному благодаря тому, что

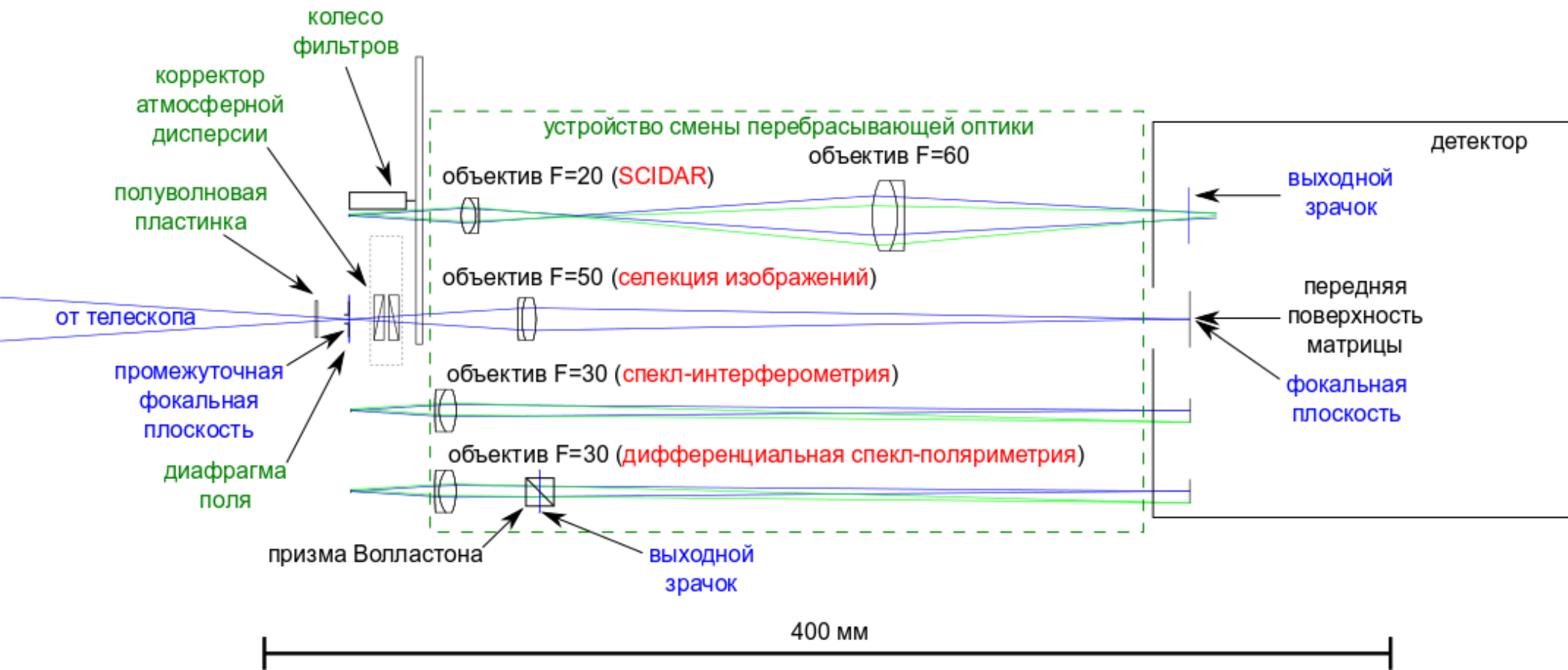
- 1) Частота кадров, достаточная для “заморозки” атмосферных искажений – 35 Гц и более (при считывании в окне).
- 2) Отсутствие шума считывания (ценой 2-х кратного увеличения фотонного шума, что приемлемо).
- 3) Квантовая эффективность  $>80\%$  от 450 нм до 800 нм.
- 4) Режим полнокадрового переноса – отсутствия накладных расходов на считывание.

Различие в реализации методов – только в оптической схеме переброски

# Концепция: принципиальная схема

**Предложение:** камера, реализующая эти методы с одним детектором как **режимы** работы.

## Многорежимная быстрая камера Multimode Fast Camera



# Состояние дел

Этапы проекта “Быстрая камера”



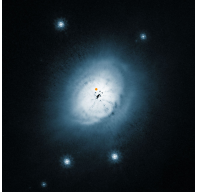
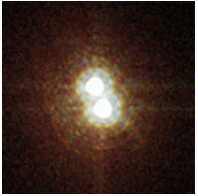
- 1) Исследование детектора без освещения и с равномерным освещением. *Методический. Завершен* 12.2011-01.2012.
- 2) Исследование детектора с точечным источником (имитация спекл-интерферометрии). *Методический. Завершен.* 03-05.2013.
- 3) Испытание макета камеры в режимах спекл-интерферометрия, селекция изображений на АЗТ-2. 08-09.2013.  
**Выполняется.**
- 4) Испытание макета камеры в режиме ДСП на АЗТ-2.  
*Методический, научный. Планируется.*
- 5) Испытание макета камеры в режиме SCIDAR на АЗТ-2.  
*Методический, научный. Возможен.*
- 6) Проектирование и конструирование рабочего экземпляра камеры. *Методический. Планируется* (после выполнения этапов 3 и 4)

**Спасибо за внимание**

[http://Infm1.sai.msu.ru/kgomfc\\_ru.php](http://Infm1.sai.msu.ru/kgomfc_ru.php)



# Получение изображений и поляриметрия с дифракционным разрешением

	тип объекта	разрешение через атмосферу 1"	дифракционное разрешение 0.05"
	кометы, астероиды $d = 1$ а.е.	750 км	40 км
	спутники Юпитера $d = 5$ а.е.	4000 км	200 км
	Молодые звездные объекты Taurus-Auriga assoc. $d = 120$ пк	140 а.е.	7 а.е.
	Двойные $d = 1$ кпк	1000 а.е.	50 а.е.

# Дифференциальная спекл-интерферометрия

Регистрация спекл-серии одновременно в двух полосах или в узкой линии и окружающем континууме Petrov et al, 1986.

DSSI Horch E., 2009, два детектора.

Преимущества:

- 1) Цвета компонент определяются за одно измерение.
- 2) Возрастает сигнал-шум для астрометрии двойных
- 3) Более точный учет атмосферной дисперсии.

При регистрации на одном детекторе возникает дополнительное преимущество, заключающееся в возможности определять смещение фотоцентра в двух полосах с большой точностью.

Задачи: двойные звезды, в т.ч. с газовыми дисками, вращение одиночных звезд.

# Наблюдения на АЗТ-2 (70 см) 12 сентября 2013

HR8631,  $V_1=6.14$ ,  $V_2=7.22$ ,  $sep=0.482''$ .

