

# Контроль оптики 2.5 метрового телескопа ГАИШ МГУ

Потанин С.А. Белинский А.А. , Возякова О.В.,  
Горбунов И.А. , Додин А.В., Корнилов В.Г.,  
Корнилов М.В., Ламзин С.А., Маланчев К.Л.,  
Саввин А.Д., Сафонов Б.С., Черепашук А.М.,  
Черясов Д.В., Шатский Н.И.

ГАИШ МГУ, Москва  
2015

# 2006 год

- Формирование Технического Задания на телескоп.

## Основные характеристики

Диаметр: 2.5 метра

Опт. схема: Ричи-Кретьен

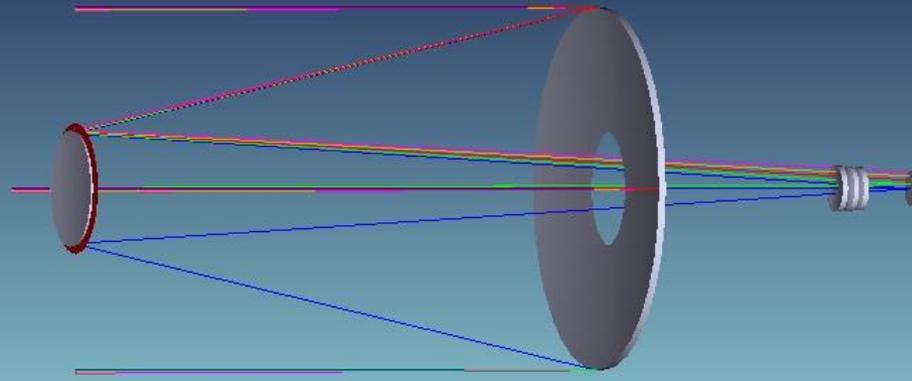
Экв. фокус: 20 метров

Поле зрения: 10' без корректора

40' с корректором (WFC)



# Оптическая схема телескопа



# Параметры зеркал М1/М2

- М1

Материал: Zerodur  
Диаметр: 2550 мм  
Радиус: 11000 мм  
Конич. пост.: -1.066

- М2

Материал: Fused Silica (кварц)  
Диаметр: 875 мм  
Радиус: 4581.5 мм  
Конич. пост.: -3.664

- М3 – Зеркало Несмита

Материал: ситалл  
Радиус: Плоскость

- Оптический корректор

Материал: кварц  
Конструкция: Винн (3 линзы)  
Спектральный диапазон: 300-1000 нм.



# Требования к качеству оптики

- Без корректора: концентрация энергии 80% в круге диаметром 0.3'' в поле зрения 10' во всех рабочих положениях телескопа в фокусах кассегрена (C1) и несмита (N1/2)
- С корректором: концентрация энергии 80% в круге диаметром 0.4'' в поле зрения 40' во всех рабочих положениях телескопа в тех же фокальных станциях.



**Изготовитель оптических деталей  
фирма - REOSC (Париж)**



# Главное зеркало на REOSC



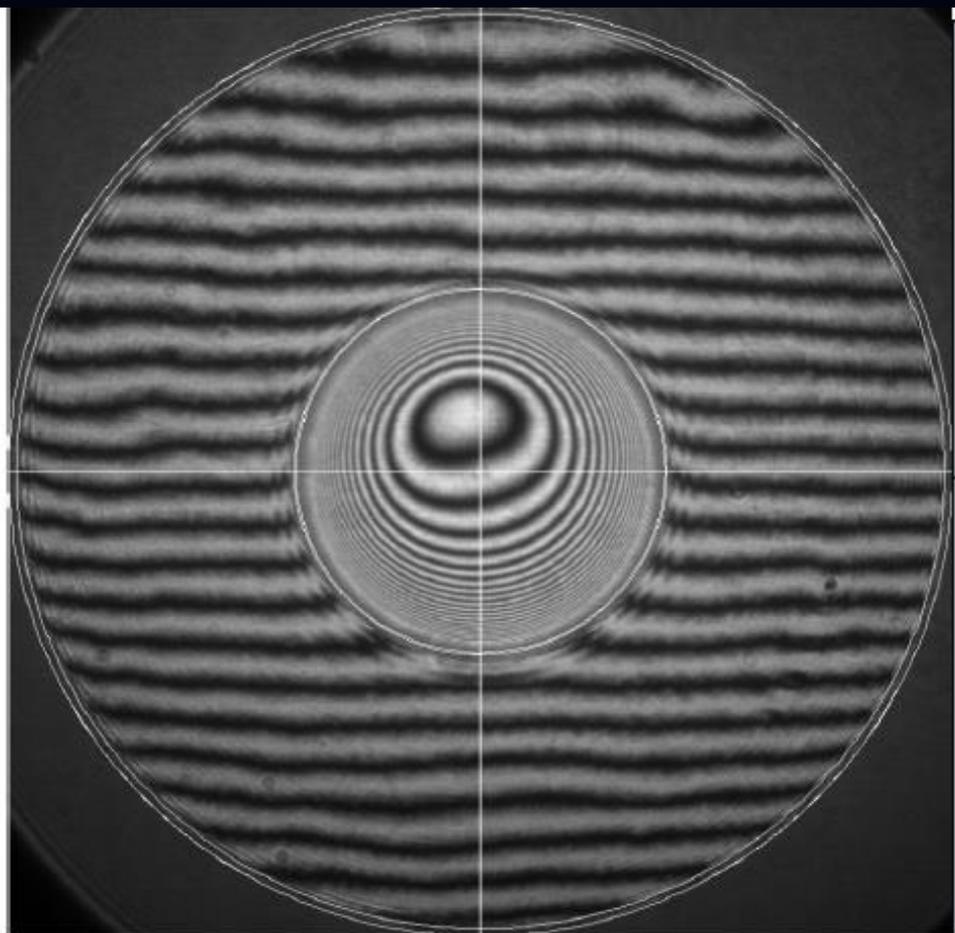
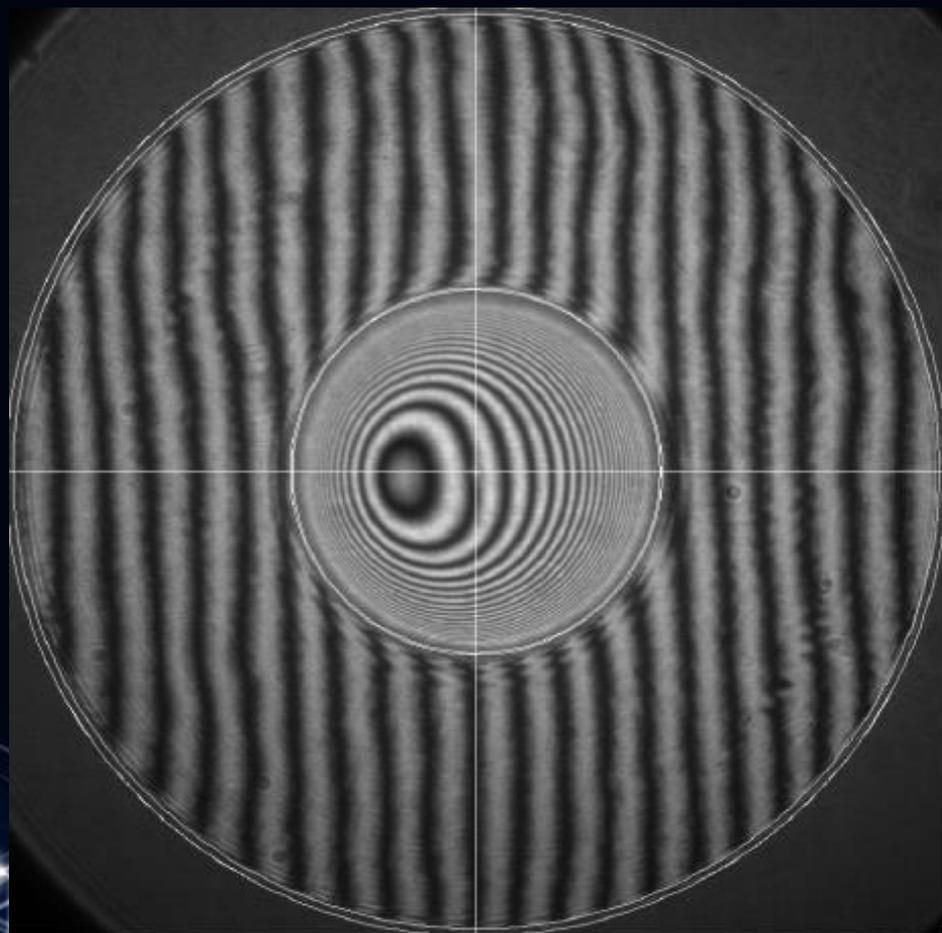
# Проблемы тестирования оптической схемы

- REOSC гарантировал совпадение параметров зеркал (радиус/коническая постоянная) с расчетными по отдельности, но не мог произвести контроль всей схемы в сборе.
- Было принято решение принимать оптическую систему после установки телескопа. Для тестирования использовать свет от звезд.



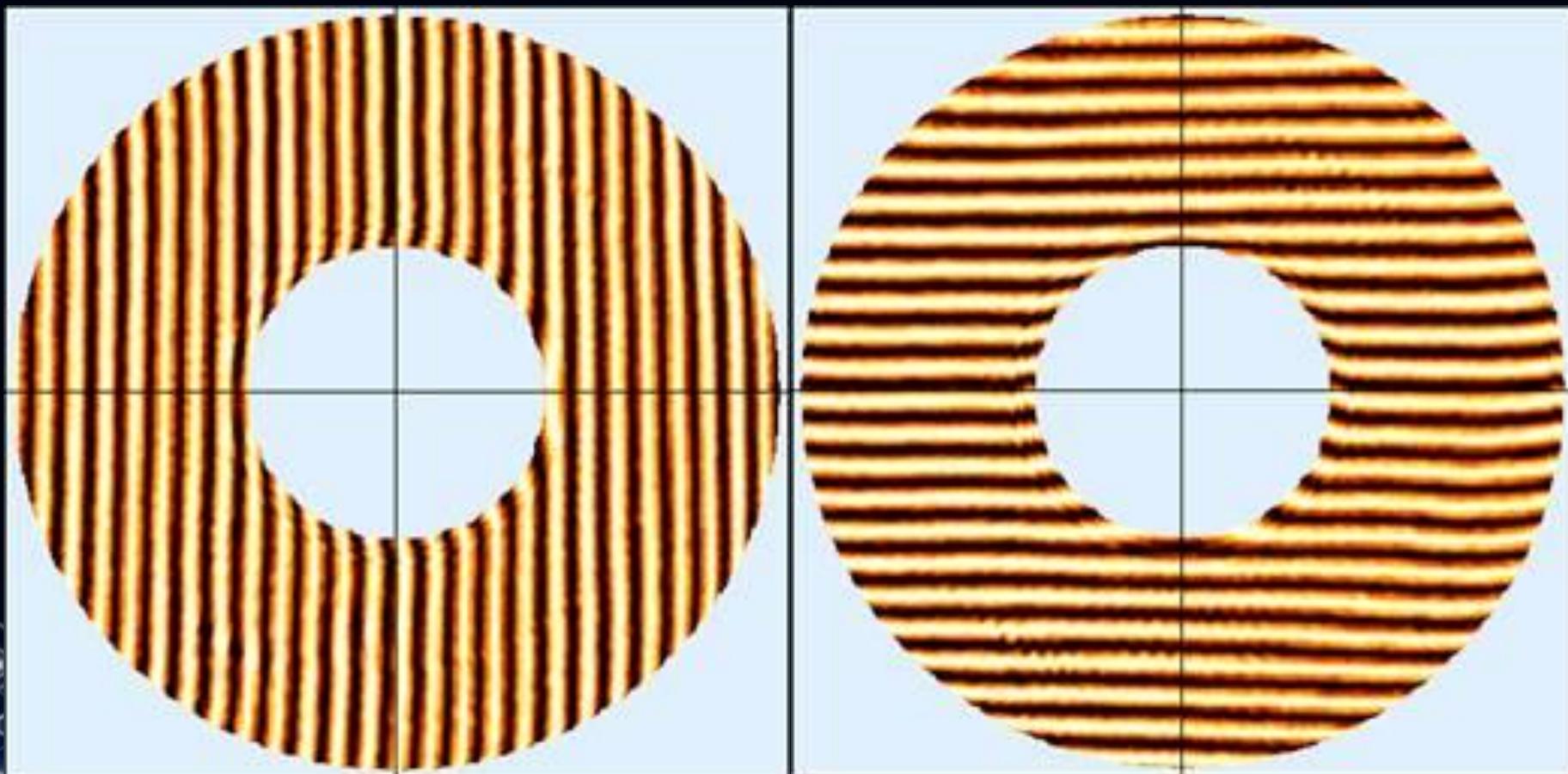
# Предварительные тесты на REOSC 2011 год

- Реальные интерферограммы M1; F/2.2



# Предварительные тесты на REOSC 2011 год

- Синтетические интерферограммы M1



# Карта поверхности M1

**REOSC**  
**SAGEM**

WaRPP v 3.30

SAI M1 moy1 - astigs

Date : 13/08/11

Heure : 13:55:32

Surface Mécanique

L = 632.80 nm

R = 1275.000 nm

Résol. : 350x350

Echelle Lin. :

-81.430 nm à

104.527 nm

78464 points

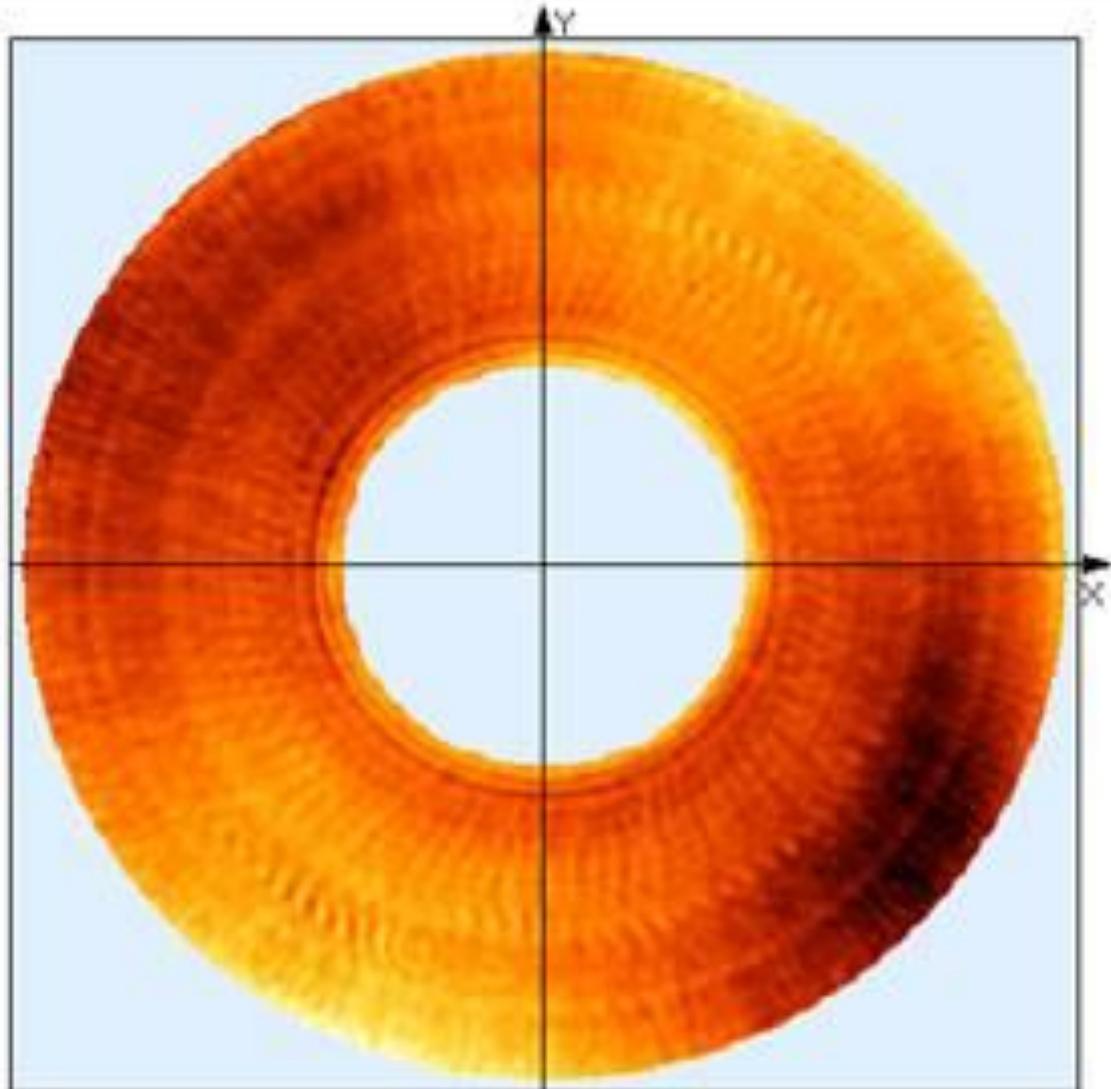
Min = -81.430 nm

Max = 104.527 nm

Moy = -3.002 nm

P-V = 185.958 nm

RMS = 28.909 nm

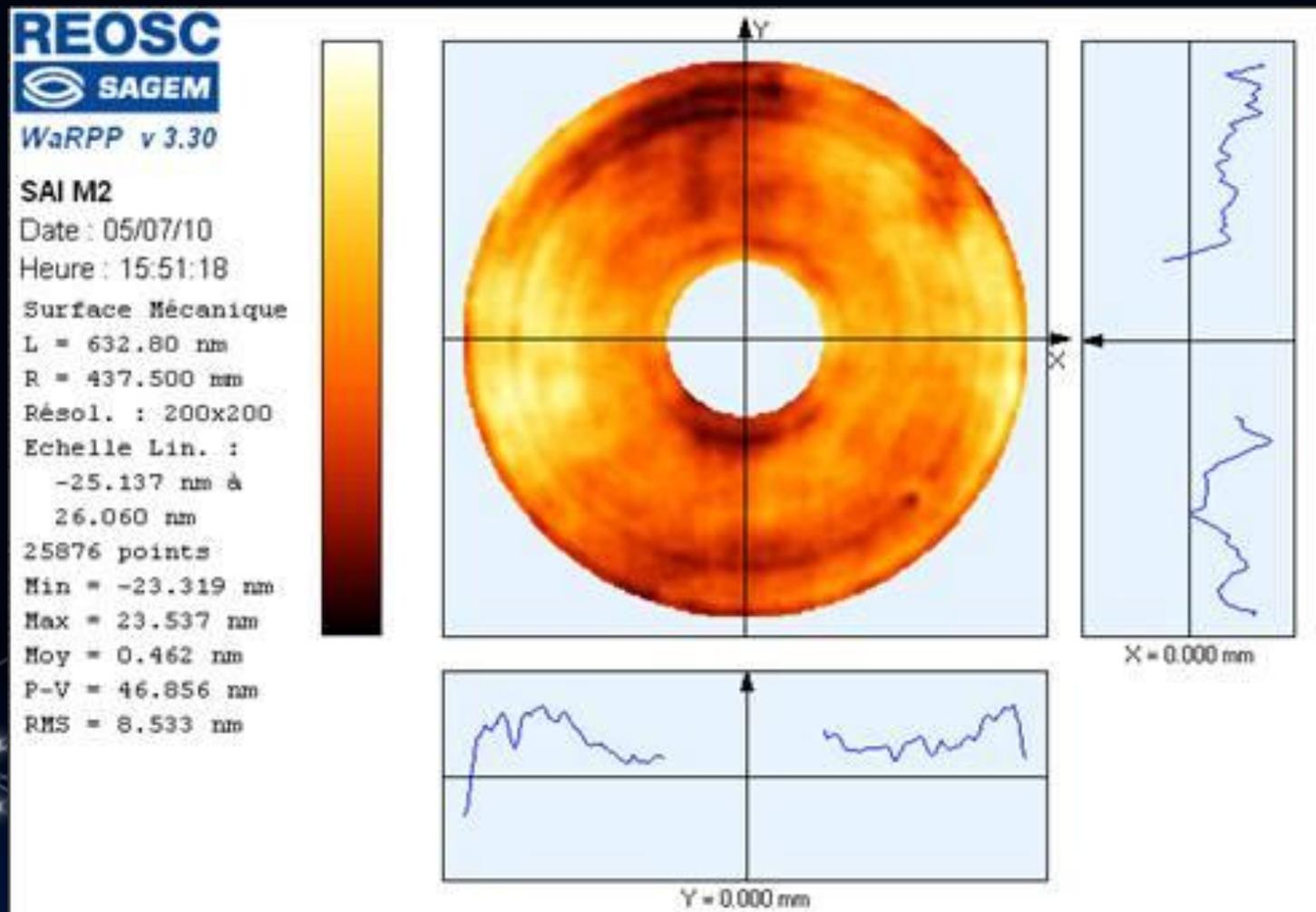


Commentaires :

MSE. Hors astigs banc théoriques

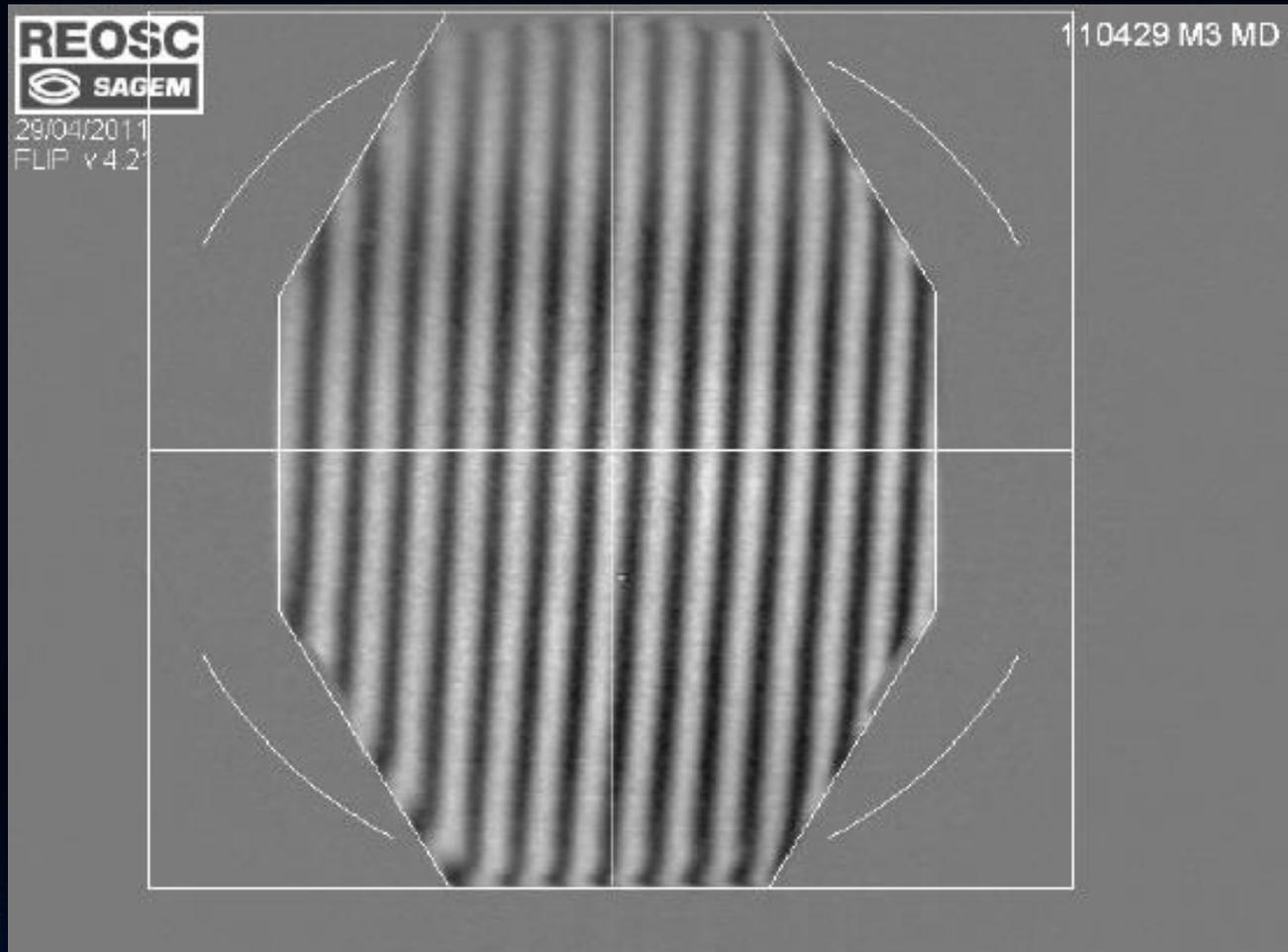
# Предварительные тесты на REOSC 2011 год

- Карта поверхности M2



# Предварительные тесты на REOSC 2011 год

- Реальная интерферограмма МЗ

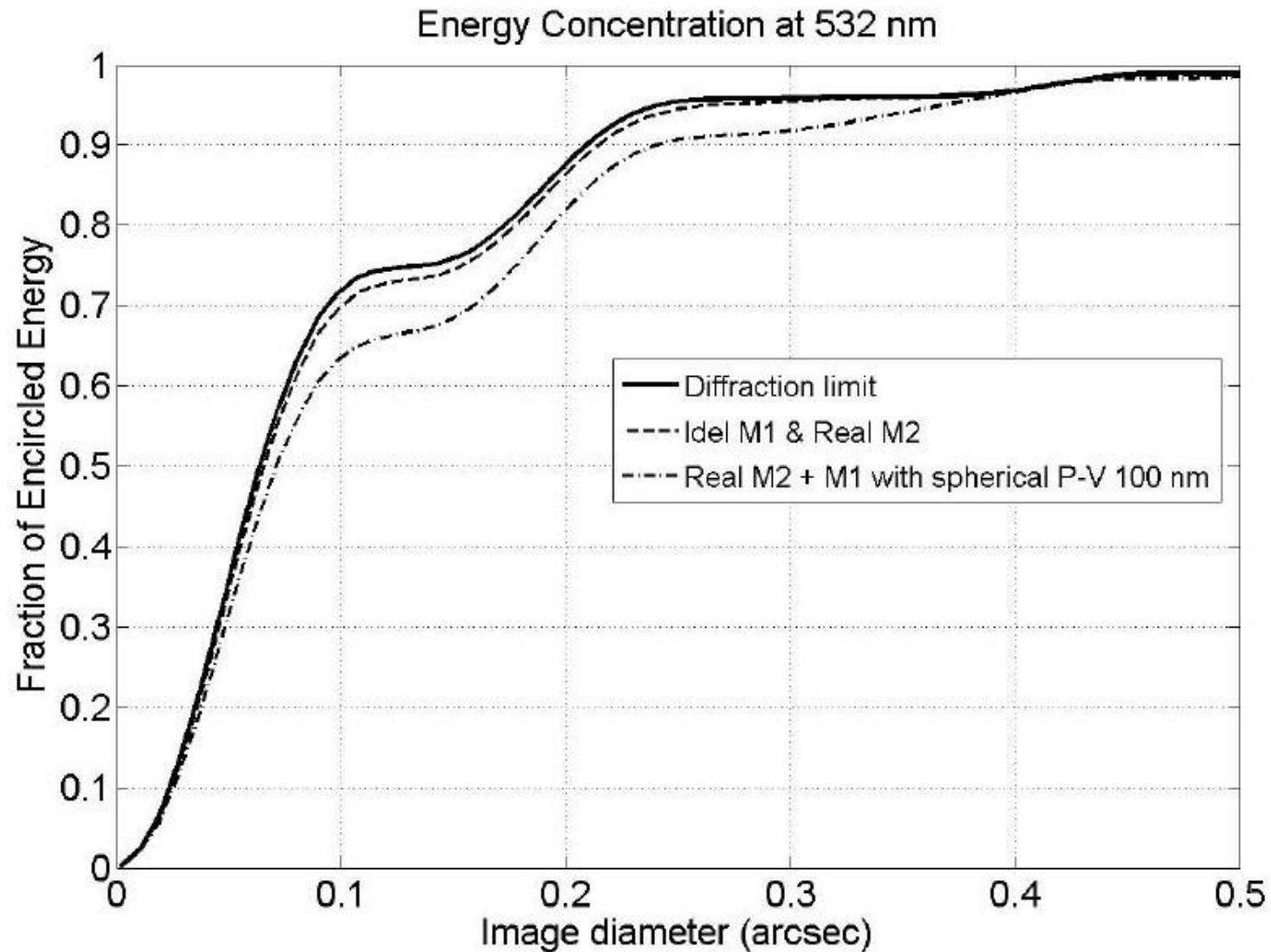


# Итог тестов на REOSC

- На главном зеркале присутствует остаточный астигматизм ( $\sim 150$  нм). По мнению REOSC он продуцируется в системе контроля.
- Учет отклонений волнового фронта всех зеркал за вычетом астигматизма M1 дает концентрацию энергии заведомо лучшую, чем 80% в 0.3”.



# ИТОГ ТЕСТОВ НА REOSC

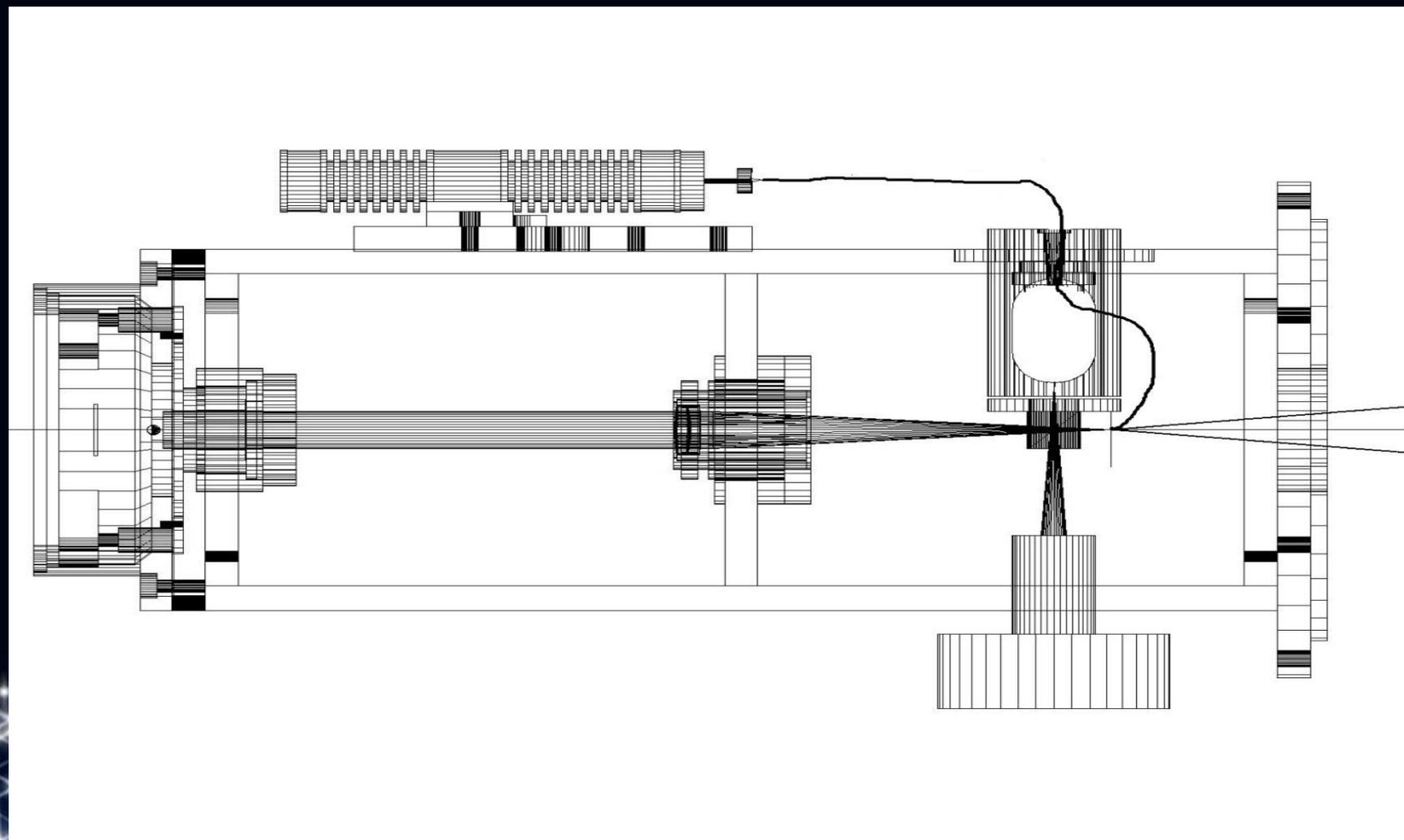


# Датчик Шака-Гартмана для теста оптики (WFS)

- Диапазон относительных отверстий  $1/20 - 1/5$
- Пространственное разрешение (при F/8) 39 точек/диаметр.
- Рабочая длина волны 532 нм.
- Абсолютная точность восстановления волнового фронта  $\sim \lambda/50$  (RMS).
- Средняя точность в режиме измерений на телескопе  $\sim \lambda/10$  (PTV). достигается при усреднении большого числа (50-100) измерений.



# Датчик Шака-Гартмана для теста ОПТИКИ



# Основные характеристики WFS

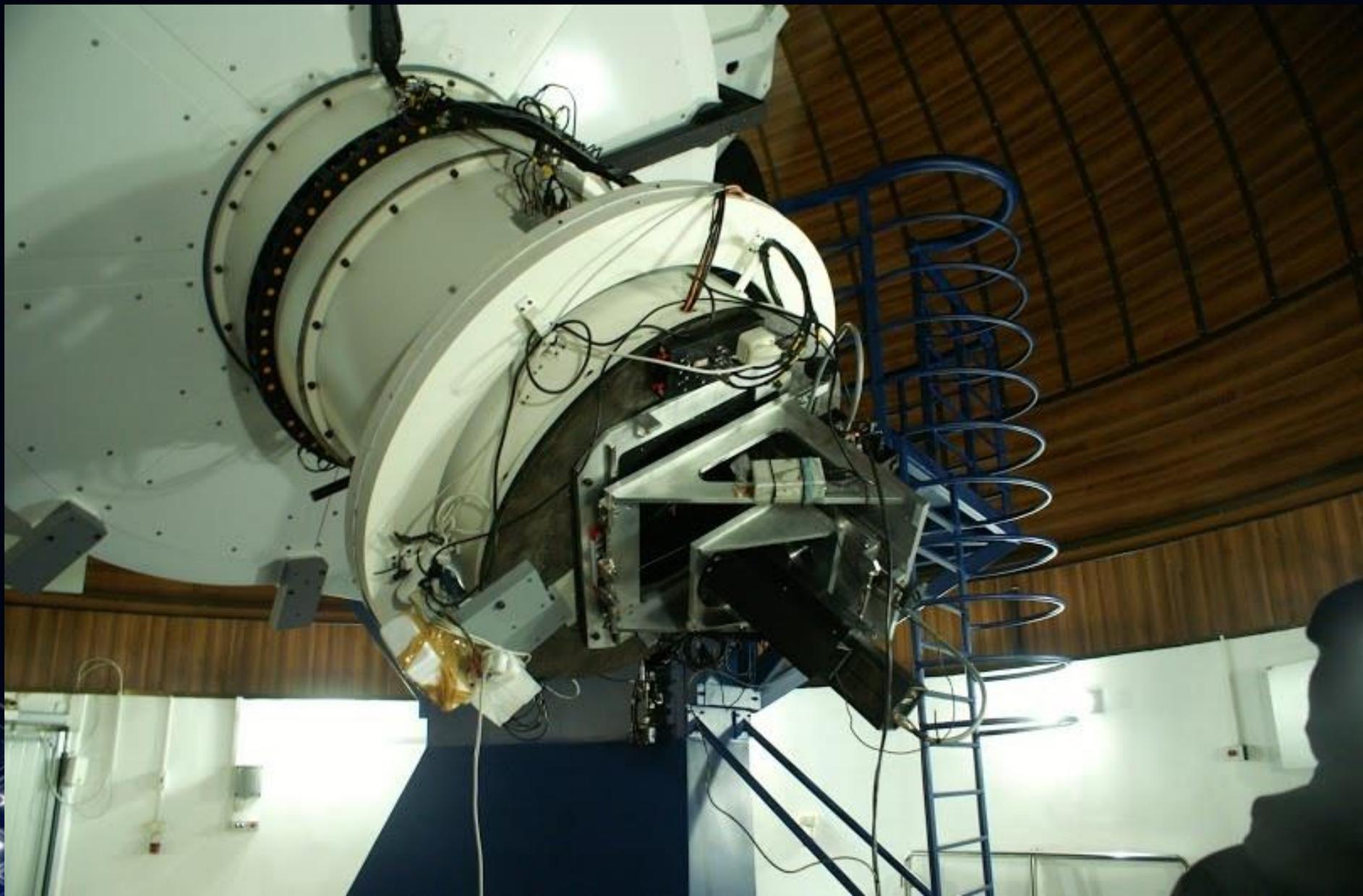
- Фокусное расстояние коллиматора 125 мм
- Период микролинзового раstra 400  $\mu$
- Фокусное расстояние микролинз 45 мм
- Рабочее поле зрения 5''
- Размер пикселя ПЗС 20x20  $\mu$
- Тип ПЗС – EEV 1300 с обратной засветкой



# WFS в оптической лаборатории ГАИШ



WFS в касегреновском фокусе 2.5 м телескопа.

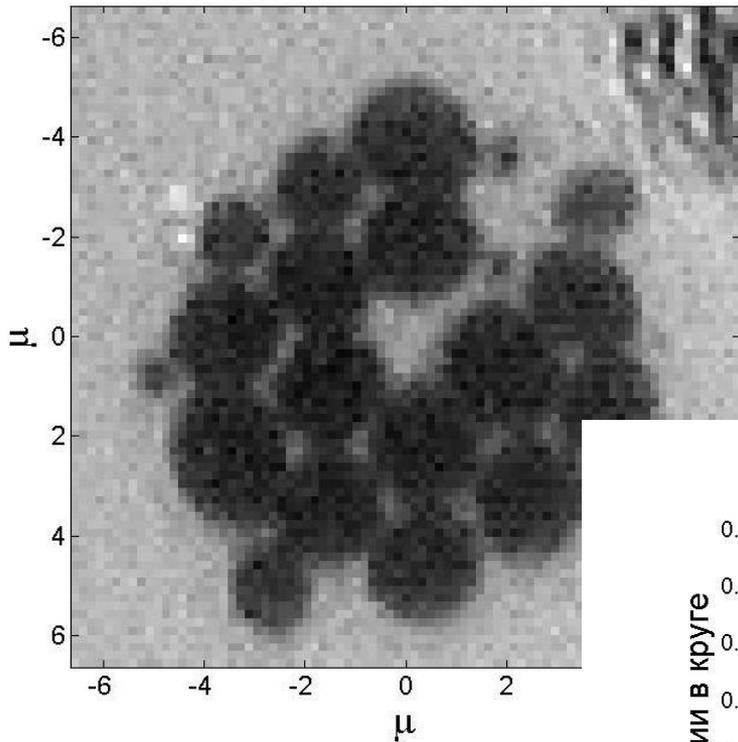


# Методика измерений с датчиком

- Калибровка (получение опорных кадров от лазерного источника)
- Серия измерений волнового фронта от звезды
- Усреднение волновых фронтов в серии
- Вычисление ФРТ с помощью Фурье-преобразования
- Вычисление интегральной концентрации энергии в круге.

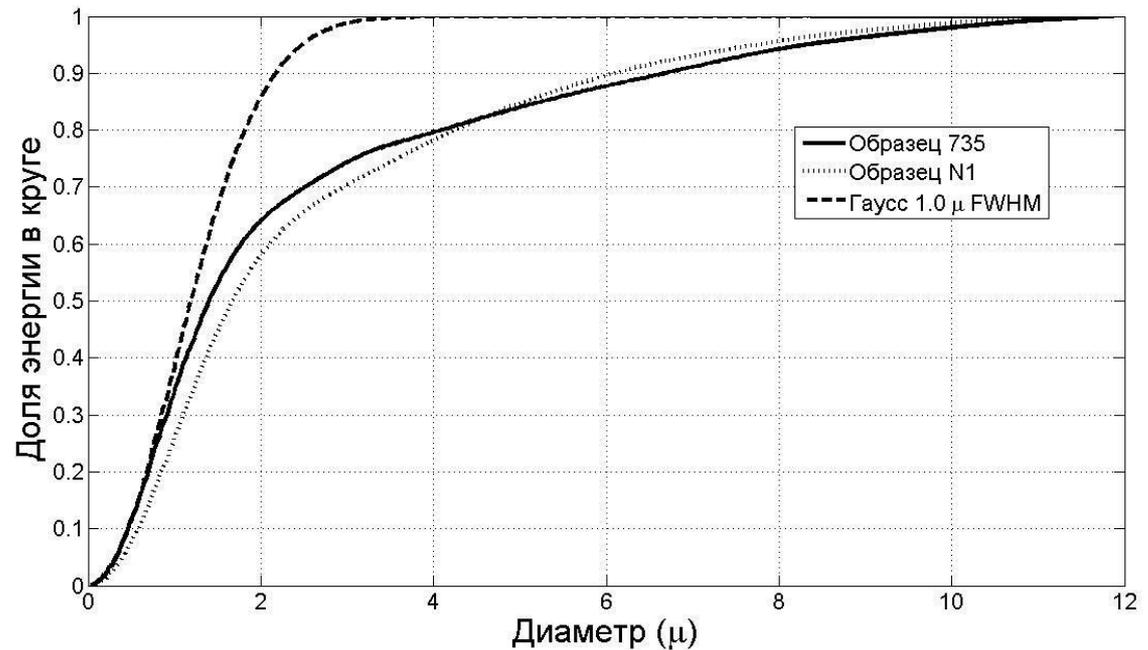


# Калибровка с помощью одномодового микроструктурированного оптоволокна

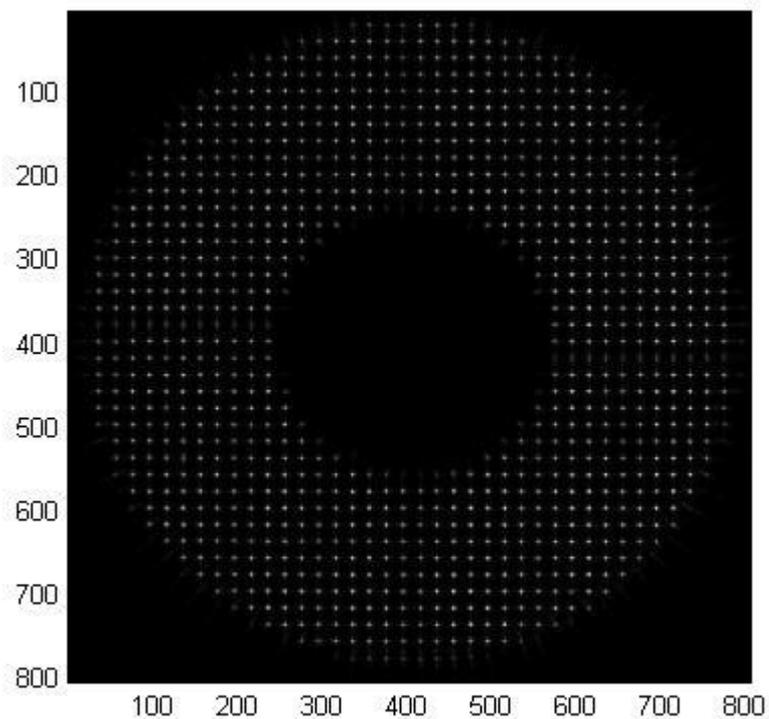
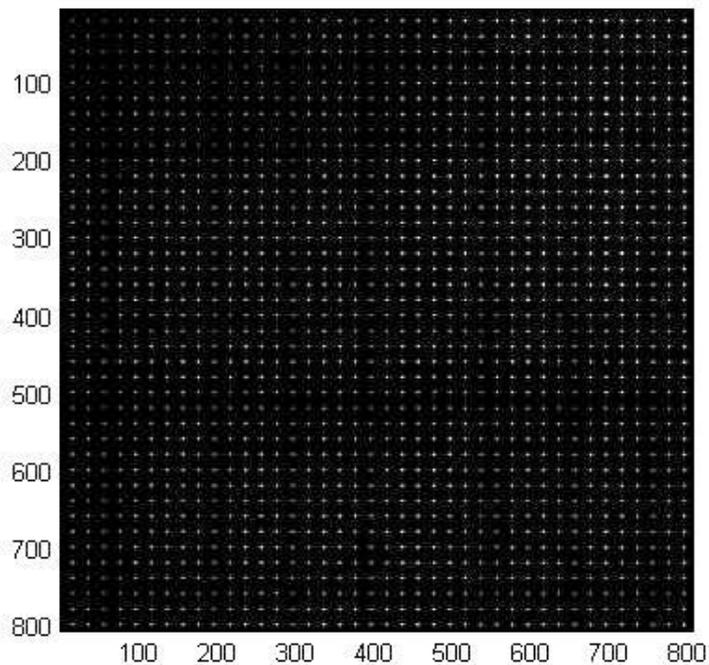


Вид торца волокна  
в микроскоп

Концентрация энергии на выходе

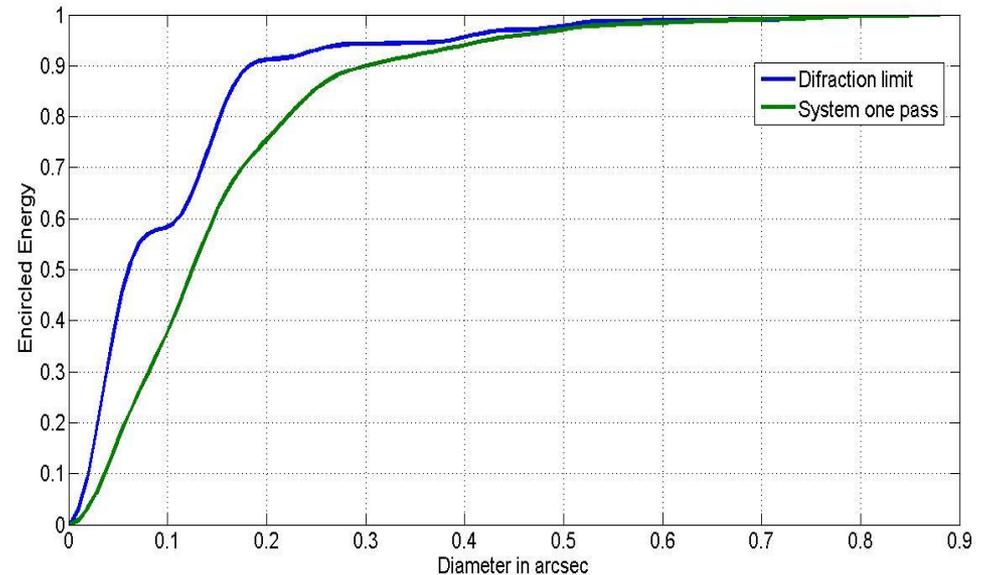
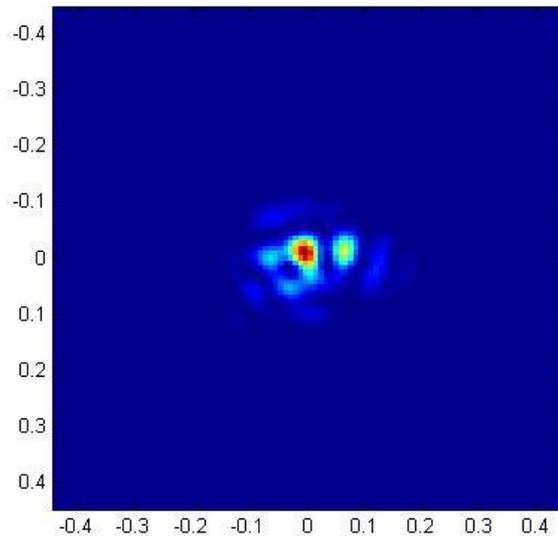
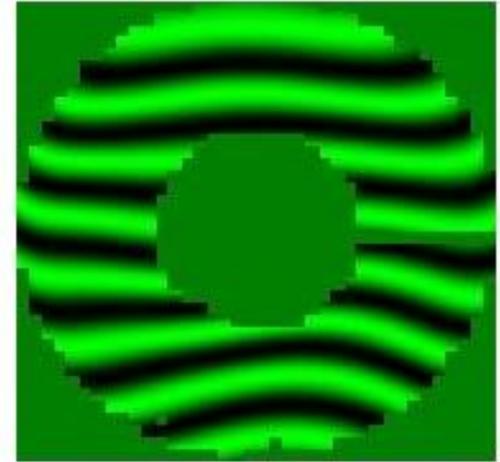
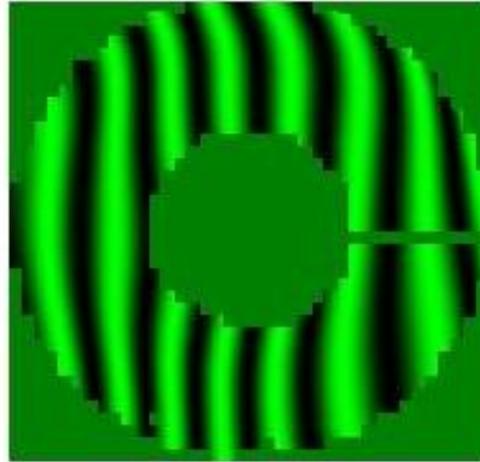
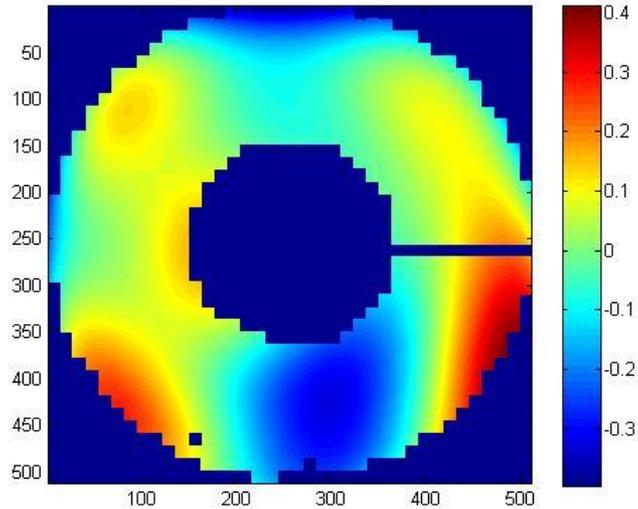


# Калибровочная и реальная гартмановграммы



# Цикл измерений

Средний волновой фронт -> синтетические  
интерферограммы -> ФРТ -> график концентрации энергии

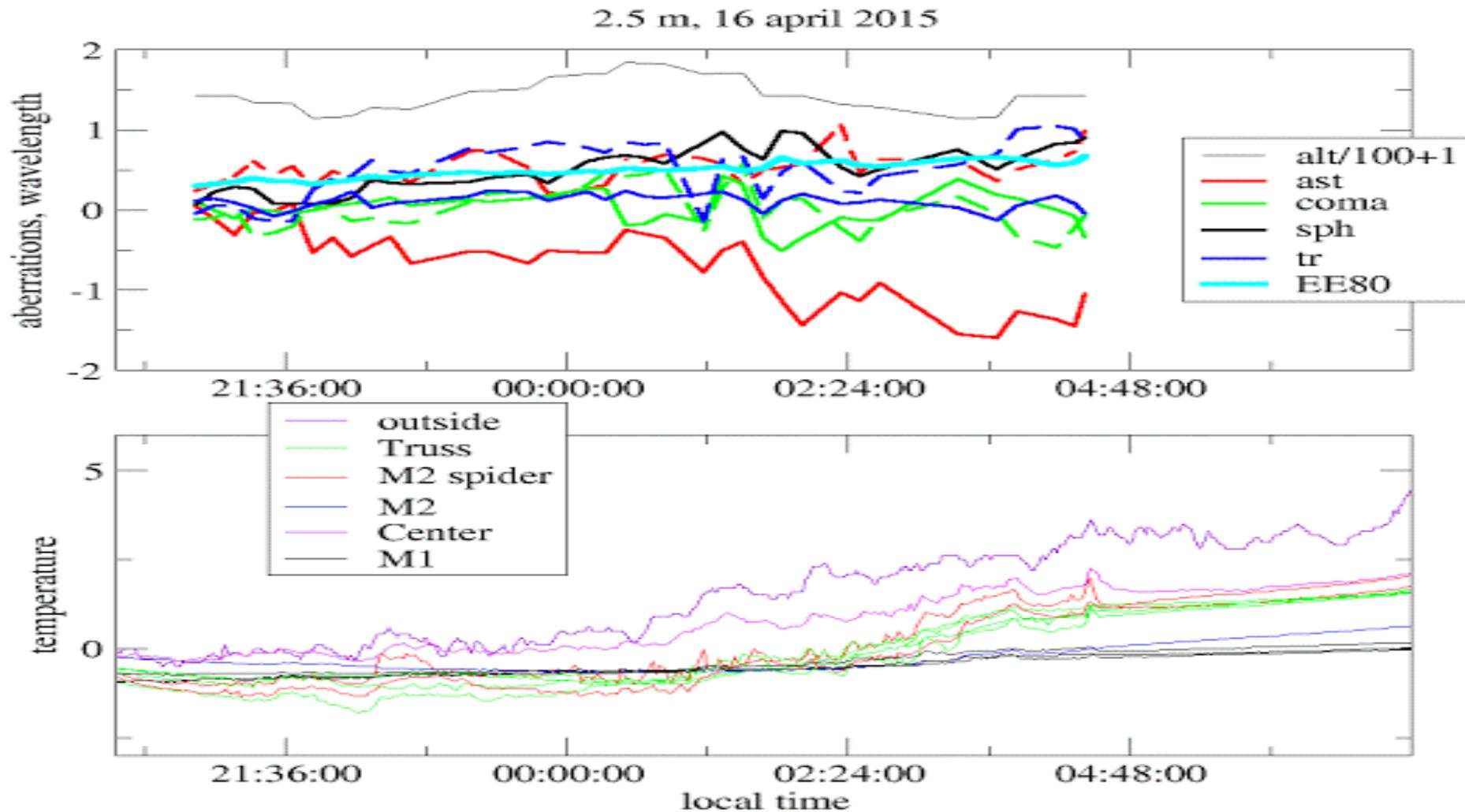


# Основные проблемы при наблюдениях с датчиком

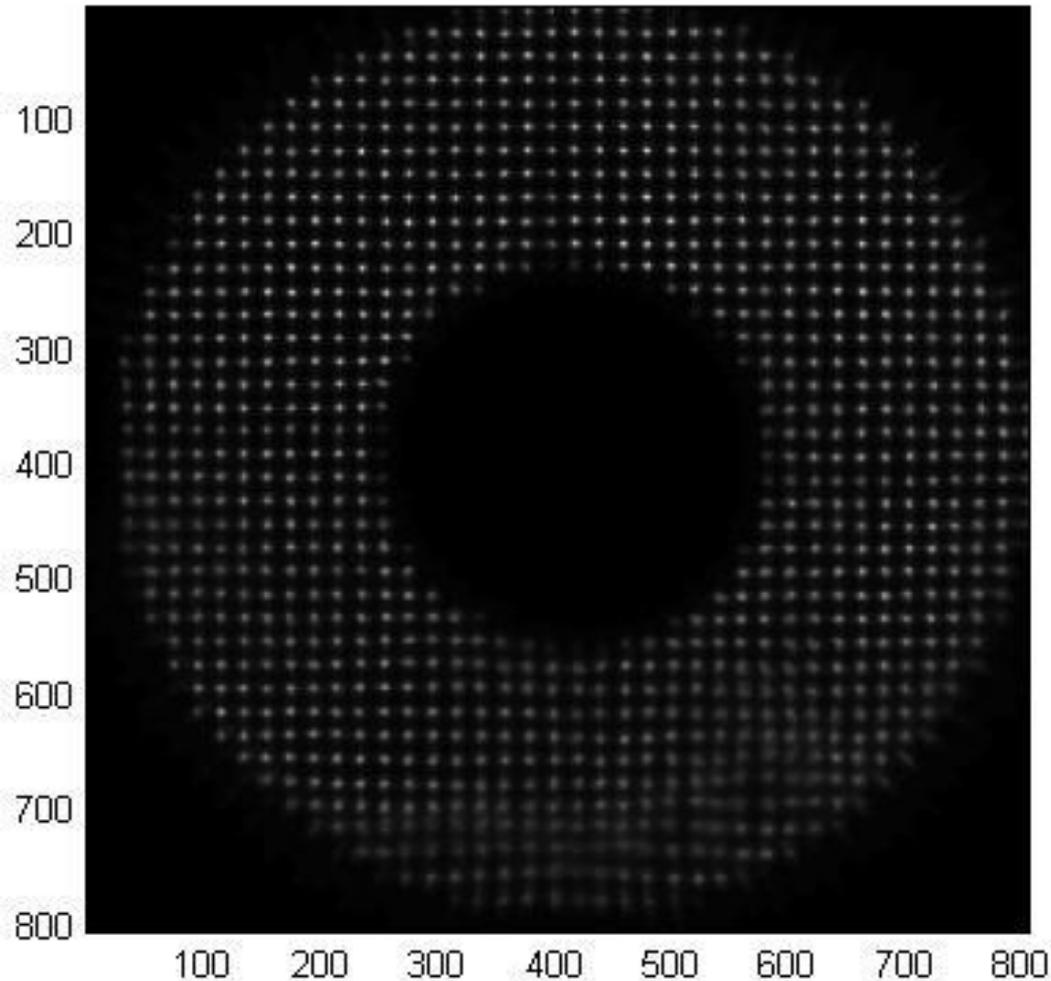
- Термическое состояние телескопа.  
(Разность температур главного зеркала и воздуха не должна превышать 2 градуса Цельсия).
- Состояние атмосферы. Плохие изображения. (изображения должны быть лучше 1.5”)



# Иллюстрация тепловых проблем



# Иллюстрация воздушных потоков в куполе



# Основные причины снижения качества оптической системы

- Прогиб конструкций. Смещение и наклон узла вторичного зеркала при изменении высоты. Как следствие – появление зависимости aberrации Комы от высоты.
- Несовершенство системы боковых разгрузок главного зеркала. Следствия – появление трилистника и астигматизма, а так же некоторый гистерезис (неоднозначность aberrаций при движении телескопа вверх и вниз)

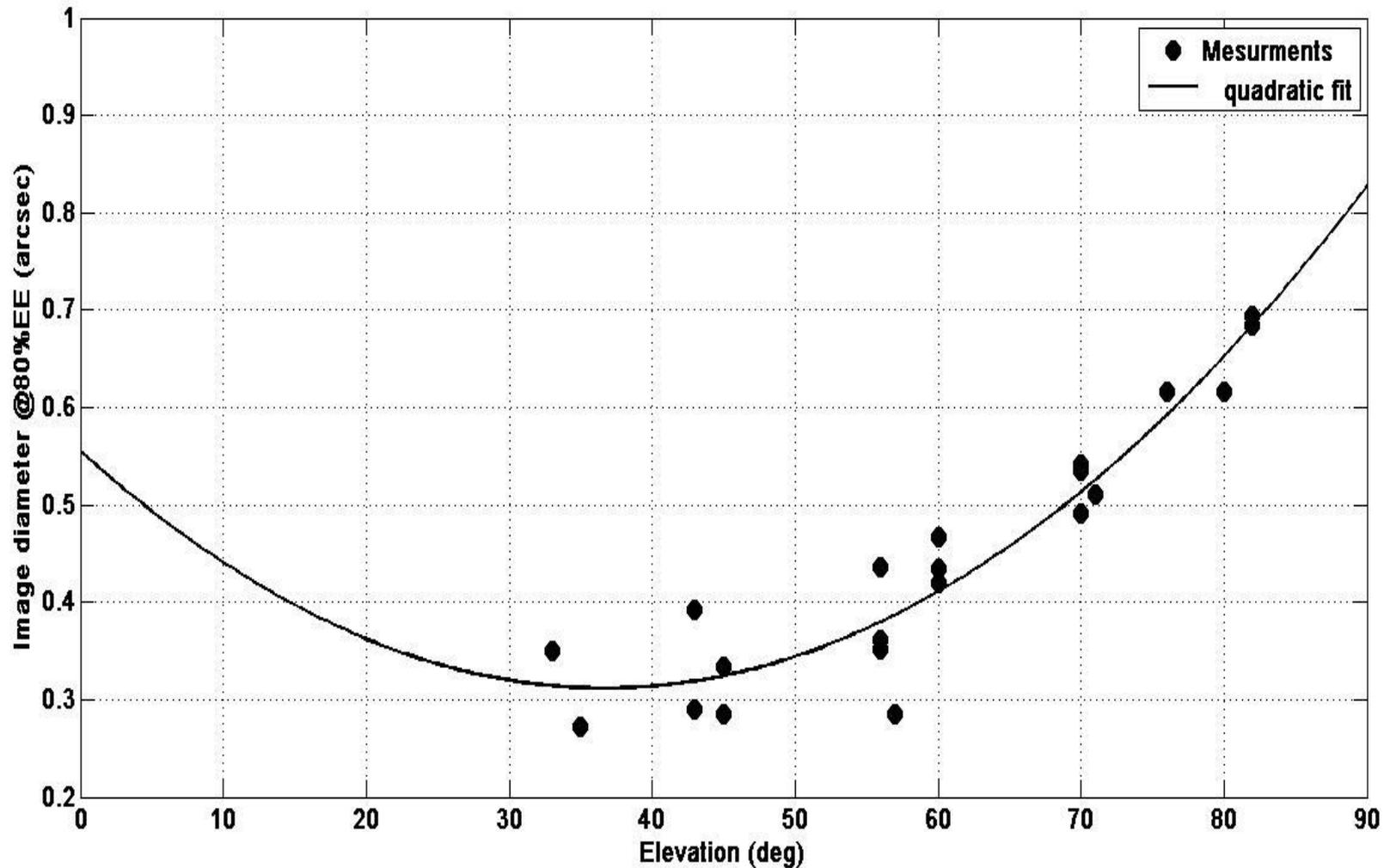


# Результаты первых тестов (2013)

- Кома зависит от высоты
- Трилистник зависит от высоты
- Концентрация энергии для изображений не укладывается в спецификацию



# Первые результаты для концентрации энергии по уровню 80% (EE80). 2013г.

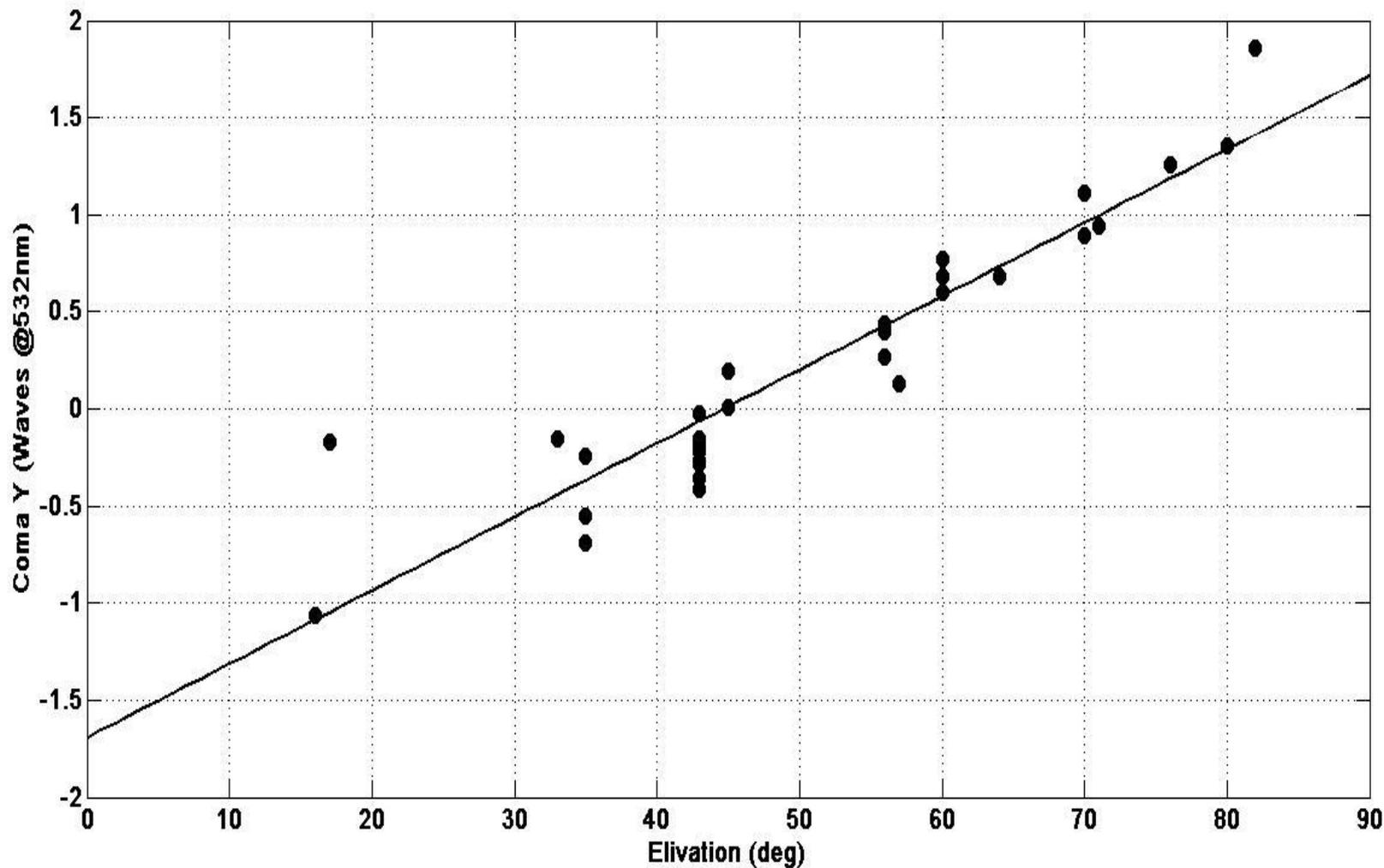


# Коррекция прогибов вторичного зеркала

- В системе управления телескопом имеется возможность в реальном времени корректировать положение вторичного зеркала в зависимости от высоты.
- Зависимость аберрации Комы от высоты для вычисления сигналов коррекции были получены по измерениям с датчиком Шака-Гартмана.
- Автоматическая коррекция Комы от высоты была успешно продемонстрирована в реальных измерениях.



# Зависимость абберации Комы от высоты (2014)

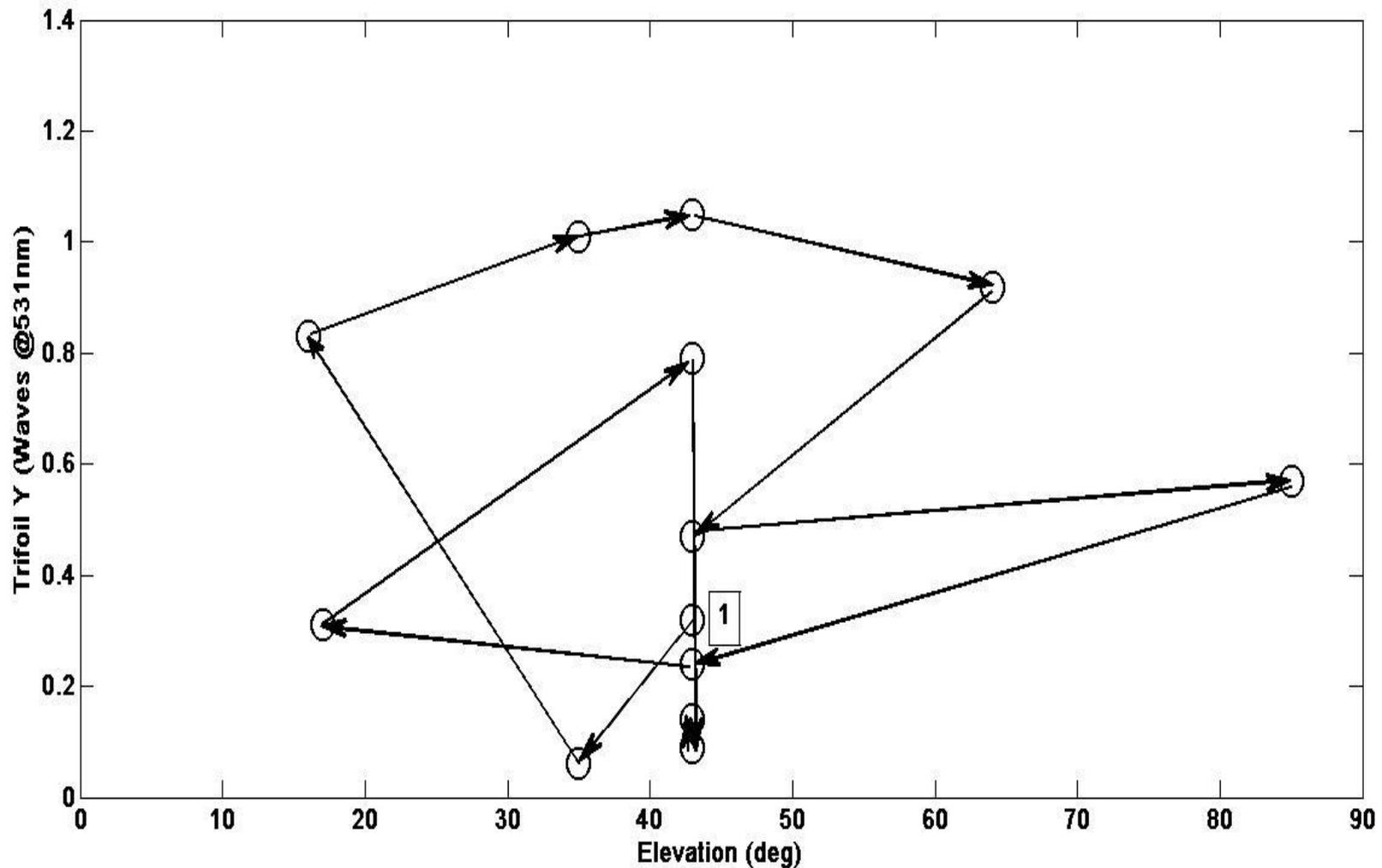


# Настройка разгрузок главного зеркала

- С помощью статических разгрузок M1 возможно убрать «трилистник» и устранить его зависимость от высоты (в линейном приближении)
- Разгрузками можно скомпенсировать любую статическую абберрацию 3-го порядка, однако, часть абберраций не являются однозначными функциями высоты из-за гистерезиса.



# Демонстрация гистерезиса на примере трилистника



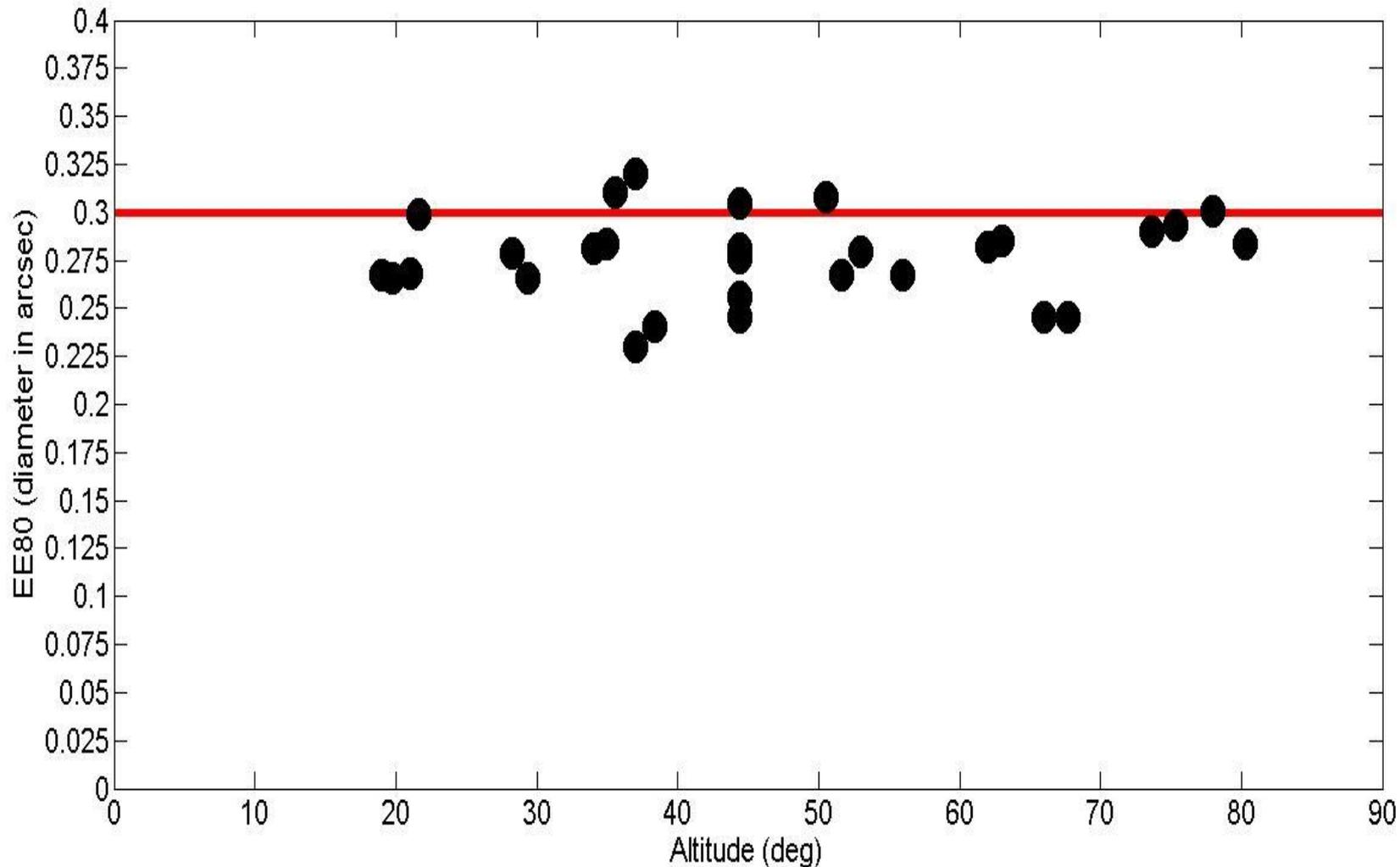


# Итоги измерений

- Измерения на оптической оси без корректора, после настроек оправы и программного обеспечения, показали хорошее соответствие требованиям ГАИШ.



# Результаты измерений на оптической оси (2015)

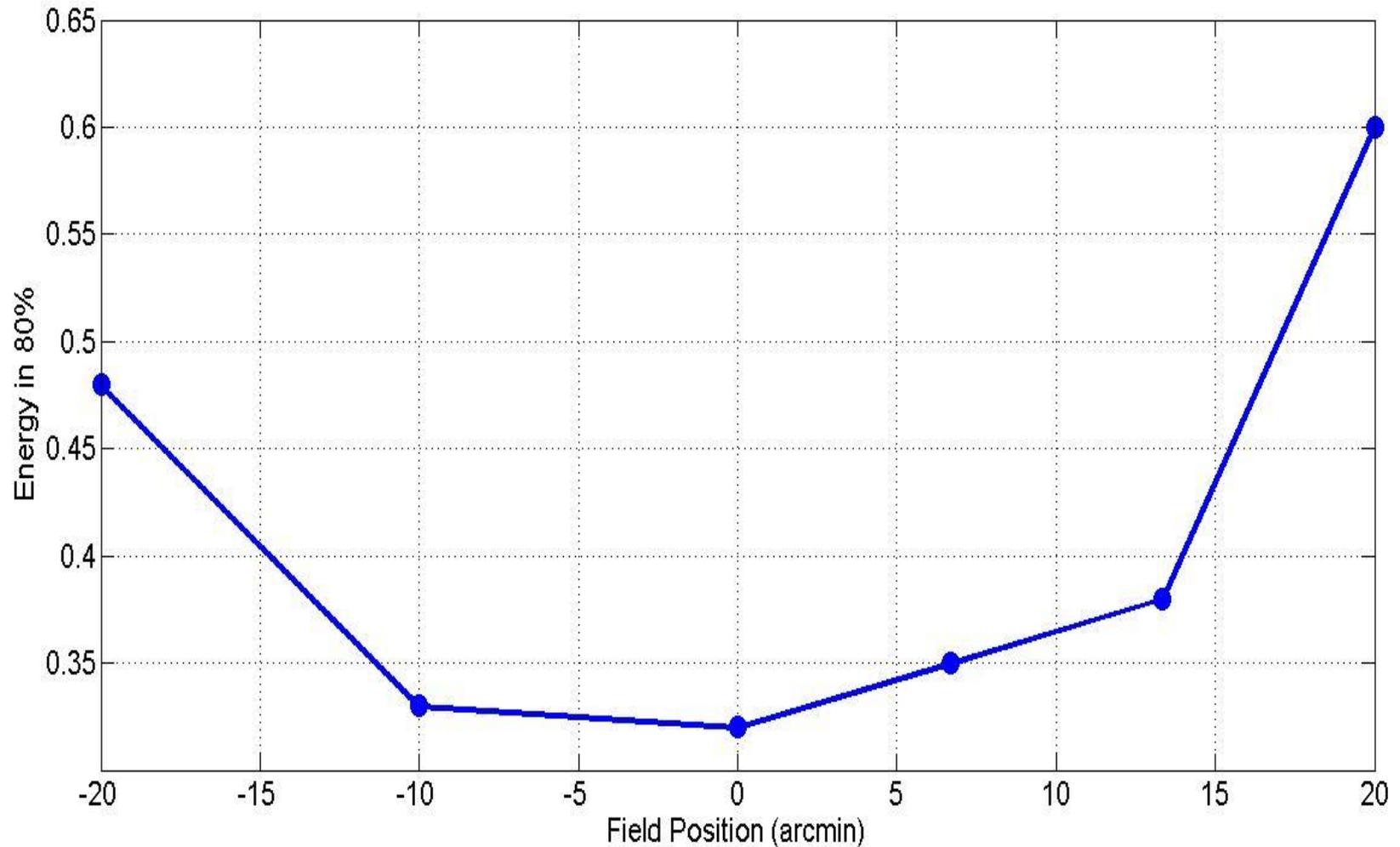


# Измерения внеосевых изображений с корректором

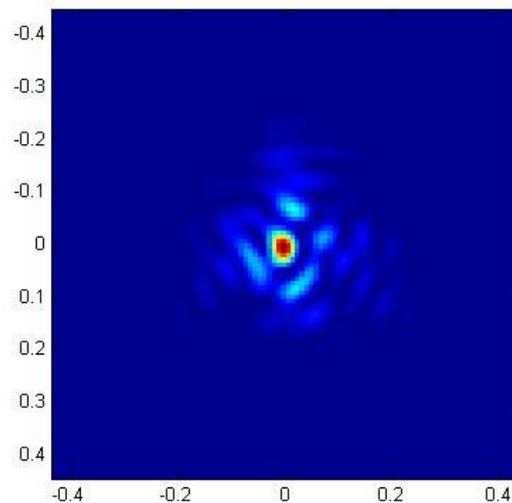
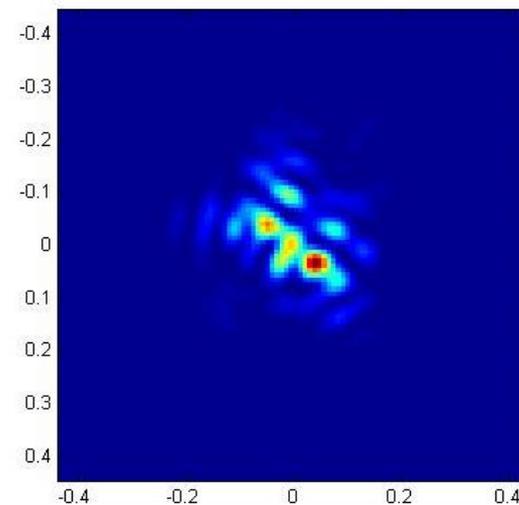
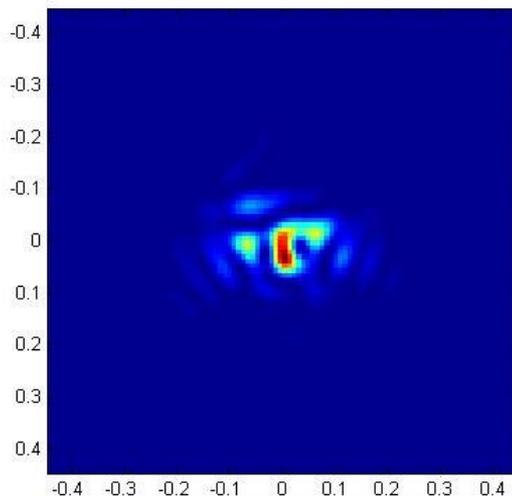
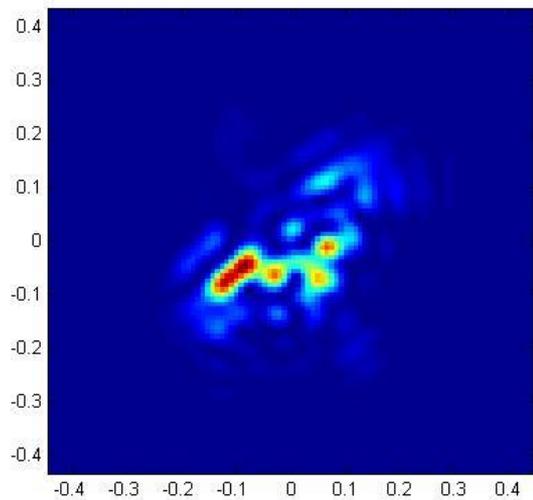
- Первые тесты показали несоответствие спецификации. Позже выяснилось, что корректор установлен не в расчетное положение относительно фокальной плоскости.
- После перефокусировки системы на новую фокальную плоскость эта проблема была решена.



# Качество внеосевых изображений с WFC (2014)



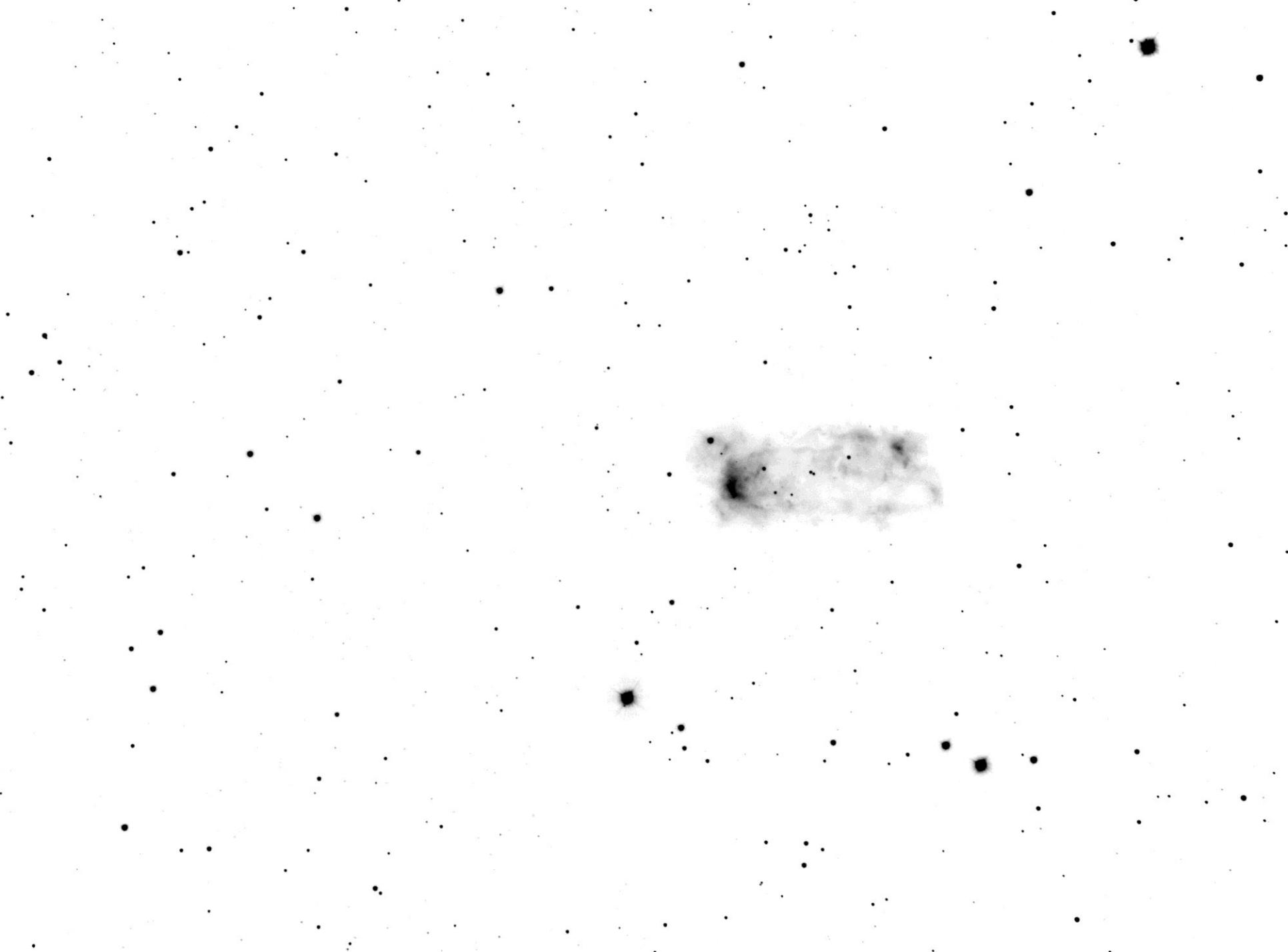
# Внеосевые изображения без корректора



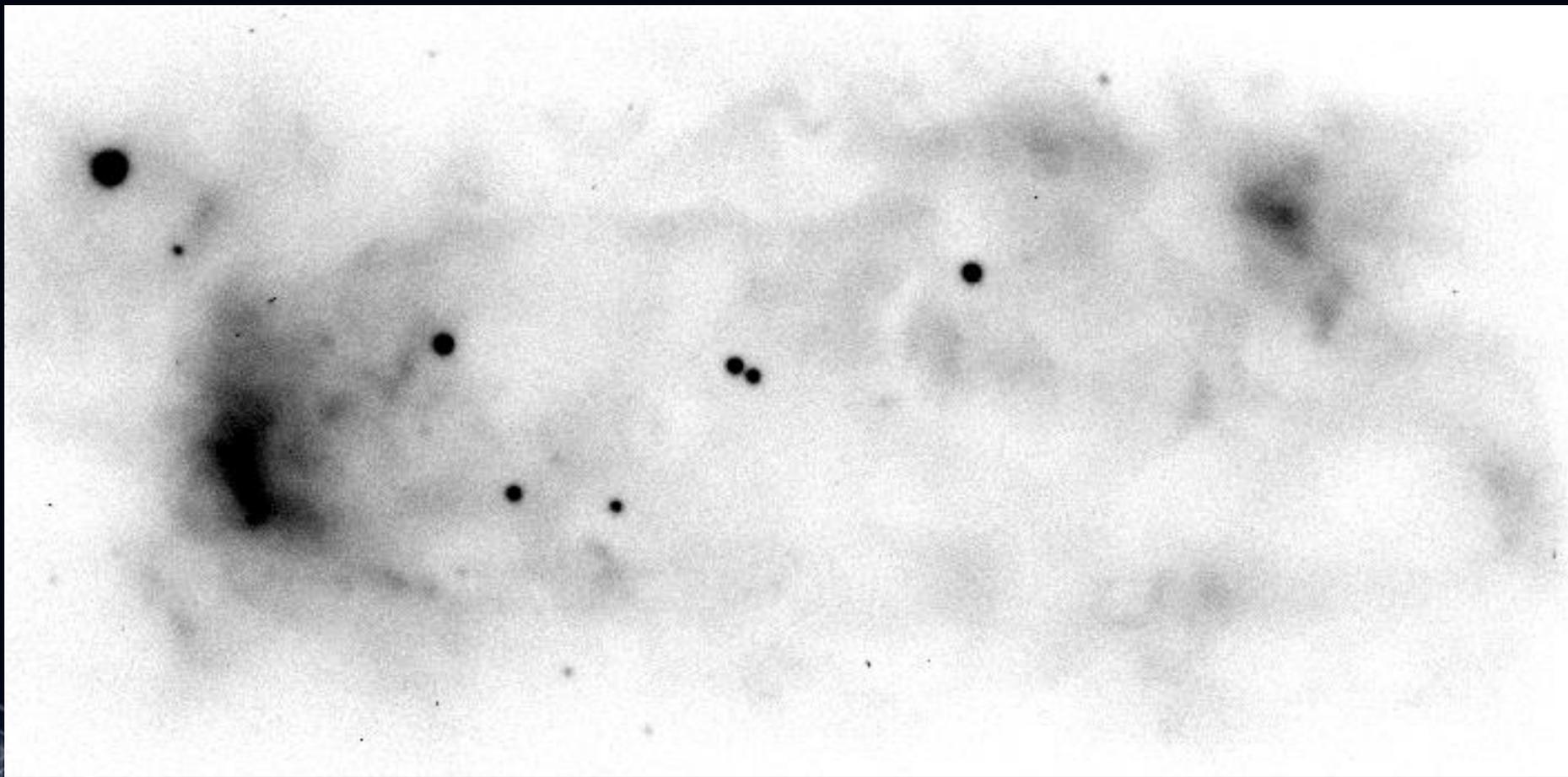
# Пример Реального изображения с длительной экспозицией

- Время экспозиции – 200 секунд
- Поле зрения 8x6 минут
- Объект M76
- Фильтр – R
- Средний размер изображений 0.51”





# Изображение центральной части M76



# Фотометрия двойной звезды RW Aur

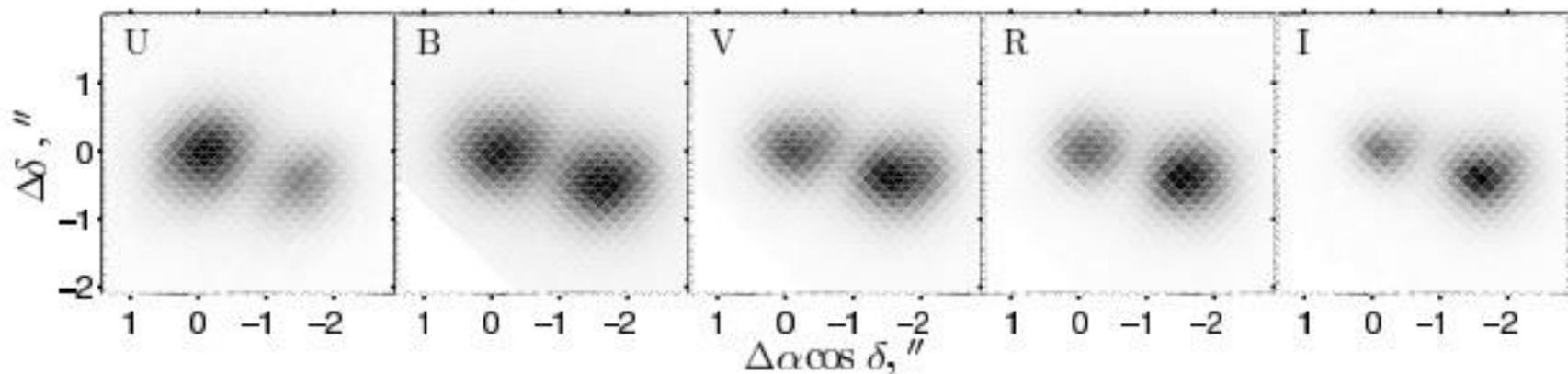


Figure 1. Images of RW Aur binary in UBVRI photometric bands. The primary component RW Aur A is placed in the origin of the coordinate system.

Фрагмент статьи Antipin and al. IBVS 6126 jun 2015  
<http://arxiv.org/pdf/1412.7661v1.pdf>

# Заключение

- По результатам предварительного тестирования показано, что оптомеханика телескопа обеспечивает требуемую концентрацию энергии в поле зрения  $10'$  без корректора и  $40'$  с корректором во всех рабочих положениях телескопа.
- Выявлен ряд проблем с несовпадением оптической оси с осью вращения деротатора. Эти проблемы будут решены в ближайшее время.



Спасибо за внимание

