

# Многорезжимный фокальный редуктор телескопа БТА

## Лекция I.

Введение. Основные понятия.

Редуктор светосилы на большом телескопе.

Семейство многорезжимных «камер слабых объектов».

Спектроскопия низкого разрешения на 6-м телескопе.

SCORPIO и SCORPIO-2.

# О чем этот курс?

- Фокальные редукторы БТА: характеристики, особенности наблюдений, обработка данных.

## Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations

SCORPIO



SCORPIO-2



- Обсуждение общих вопросов и проблем, связанных со спектроскопией низкого разрешения, наблюдением слабых и/или протяженных объектов

# Базовые понятия: спектроскопия низкого разрешения

$$R = \lambda/d\lambda = 300-3000$$

В оптическом диапазоне это от  $\sim 2$  до  $30\text{\AA}$

Достаточно для:

- Измерения красного смещения
- Определения типа объекта
- Кинематики газа в туманностях и галактиках
- Химсостав газа (разделения основных дублетов:  $13-20\text{\AA}$ )
- Кинематика звездных подсистем

Также будем обсуждать наблюдения со сканирующим ИФП,  $R=3000-15000$

# Базовые понятия: слабые/яркие объекты

*«Для данного телескопа одна и та же звезда может оказаться яркой или слабой, в зависимости от качеств изображения и яркости фона ночного неба..» (П.В. Щеглов, «Проблемы оптической астрономии», 1980)*

$D$  – диаметр апертуры;

$\beta$  – угловой размер звезды (рад);

$s$  – фон неба (квант  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ )

$n_*$  – поток от звезды (квант  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ )

$N_* = D^2 n_* t$ ,  $N_s = D^2 \beta^2 s t$

отношение сигнал-шум:

$$(S/N) = \frac{N_*}{\sqrt{N_* + N_s}}$$

Яркий объект ( $N_* \gg N_s$ ):

$$(S/N) = \frac{N_*}{\sqrt{N_*}} = D \sqrt{n_* t}$$

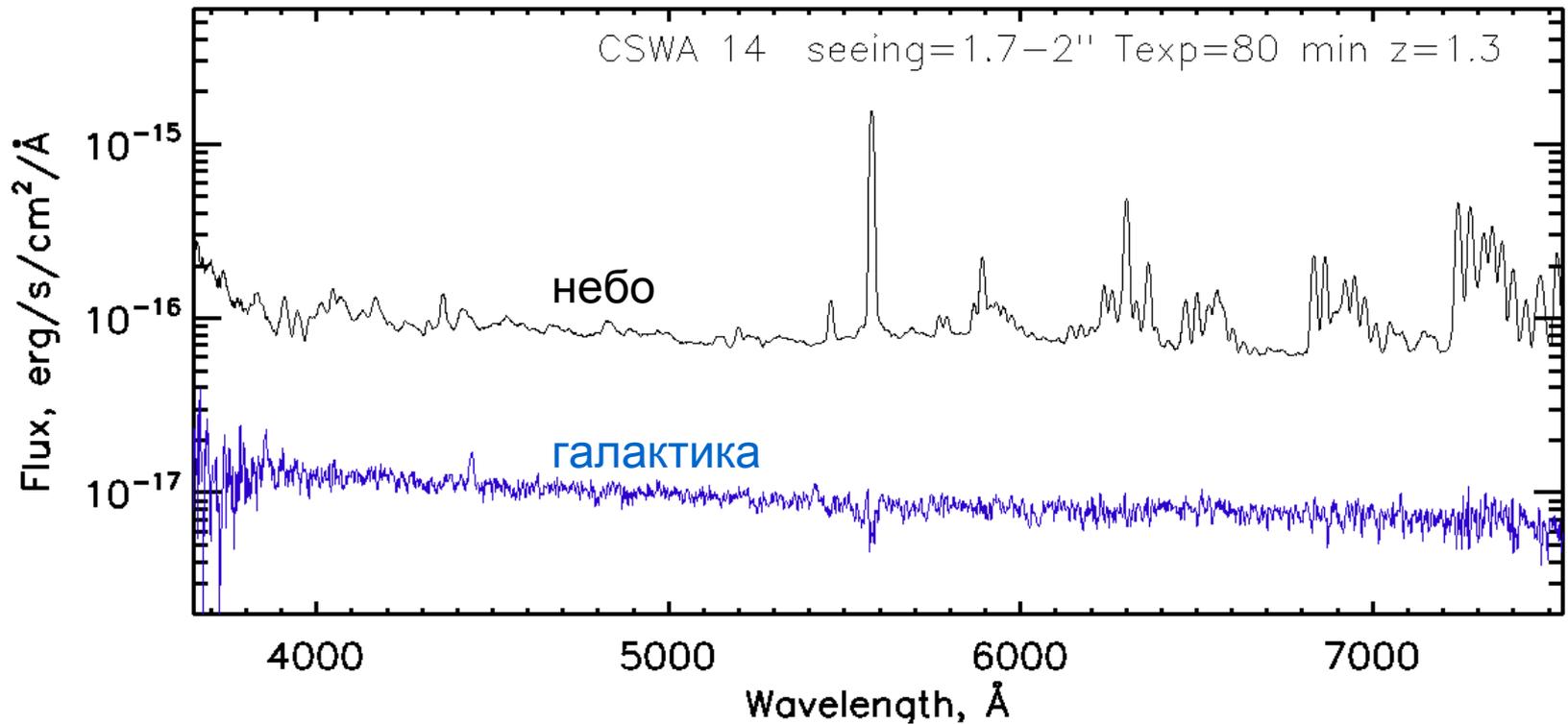
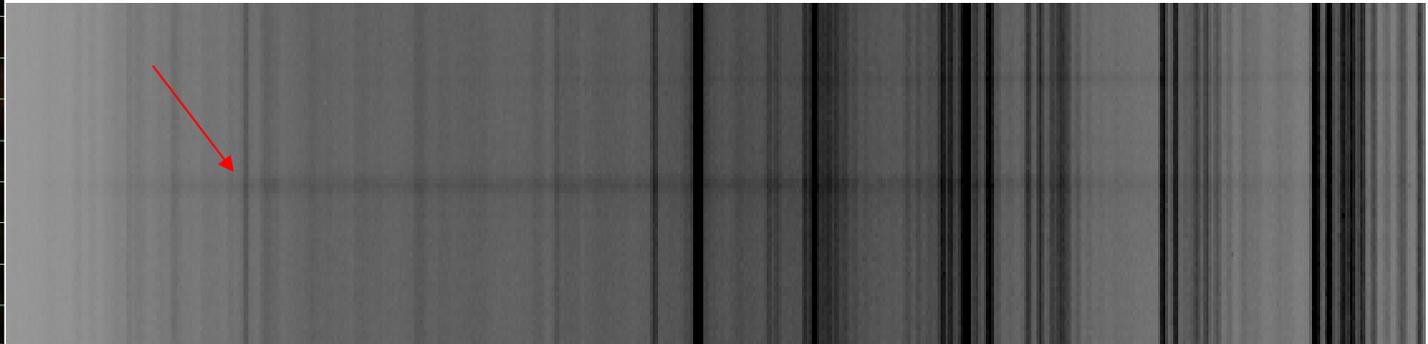
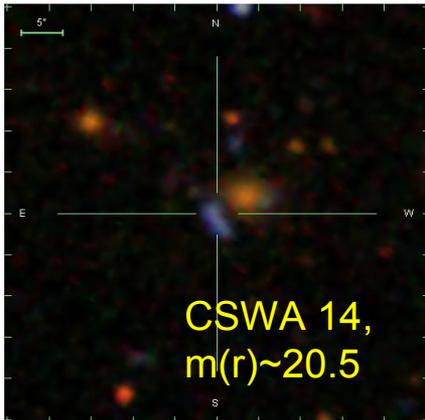
← при условии, что регистрируем ВСЕ свет звезды (идеальная широкощельность)

Слабый объект ( $N_* \ll N_s$ ):

$$(S/N) = \frac{N_*}{\sqrt{N_s}} = \frac{D^2 n_* t}{D \beta \sqrt{s t}} = \left( \frac{D}{\beta} \right) n_* \sqrt{\frac{t}{s}}$$

Условная граница ~20 зв. величина

# Спектроскопия слабого объекта



# Базовые понятия: протяженные объекты

Для слабого звездообразного объекта фактор диаметра телескопа эквивалентен изменению качества изображений ( $\beta$ ):

$$(S/N) = \frac{N_*}{\sqrt{N_s}} = \frac{D^2 n_* t}{D \beta \sqrt{st}} = \frac{D}{\beta} n_* \sqrt{\frac{t}{s}}$$

Для протяженного - светосила ( $D/F$ ) играет роль в той же степени, что линейный размер пикселя ( $p$ ).

$s_*$  - поверхностная яркость объекта (квант  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ )

$p' = p/F$  - размер пикселя в угловой мере

$$(S/N) = \frac{D^2 (p')^2 s_* t}{\sqrt{D^2 (p')^2 s_* t + D^2 (p')^2 st}} = \frac{D (p') s_*}{\sqrt{s + s_*}} = p \frac{D}{F} \frac{s_*}{\sqrt{s + s_*}}$$

Но важны и такие факторы, как:

- рассеянный свет в системе (отражение от оптики и т. п.)
- вычитание фона (включая и звезды — косвенная зависимость от  $\beta$ !)



# Фокальный редуктор

Идея и реализация - Georges Courtes (1952)

*Прямой фокус телескопа не всегда обеспечивает лучшие наблюдательные параметры, особенно в случае крупных телескопов с большим фокусным расстоянием и избыточной дискретизацией изображения в нем, при том, что современные детекторы имеют ограниченные размеры...*

(Courtes, 1994)

БТА: масштаб=24 м/206265"=116  $\mu\text{m}/''$   
 $r=13.5 \mu\text{m} \Rightarrow 0.12 ''/\text{пиксель}$  (излишняя детализация)

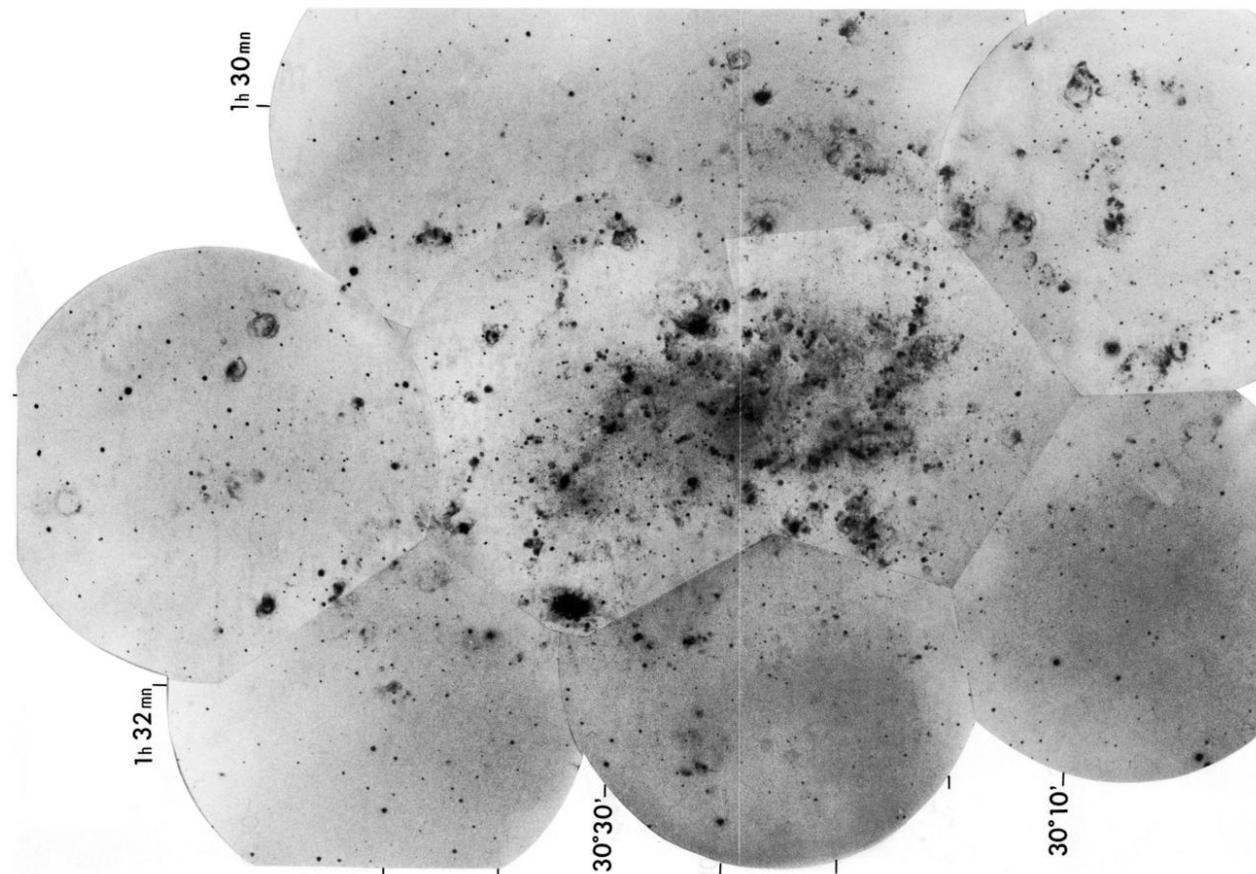
**Вопрос:** Почему «редуктор» светосилы, ведь светосила, наоборот, увеличивается?

**Ответ:** редуктор уменьшает эквивалентное фокусное расстояние, а о светосиле системы судят по отношению  $F/D$ .

$F/4$  (БТА)  $\Rightarrow$   $F/2.6$  (БТА+SCORPIO)

# Фокальный редуктор Куртеса на БТА

G. Courtés et al.: Hz survey of M33 with the six-meter telescope



Astron. Astrophys. 174 (1987)  
Springer International

Fig. 1a. Overall view of the Hz photographic survey of M33 conducted at the 6-m telescope. The mosaic is constructed with all the photographs listed in Table 1, except frame n° 11. On the rims of the mosaic are indicated approximate 1950 equatorial coordinates

© European Southern Observatory • Provided by the NASA Astrophysics Data System

F/1(!) observations 1979-1985

Courtes, G.; Petit, H.; Petit, M.; Sivan, J.-P.; Dodonov, S. (1987, A&A, 174, 28)

# Фокальный редуктор: задачи

1. Увеличение светосилы для наблюдения слабых протяженных объектов (от  $F/20..F/4$  до  $F/2..F/1$ )
2. Диспергирующие элементы необходимо устанавливать в параллельный пучок
3. Возможность использования нескольких режимов (прямые снимки, длинная щель, ИФП)

J. BLAND AND R. B. TULLY: THE HIFI

$$f_{\text{coll}} > f_{\text{cam}}$$

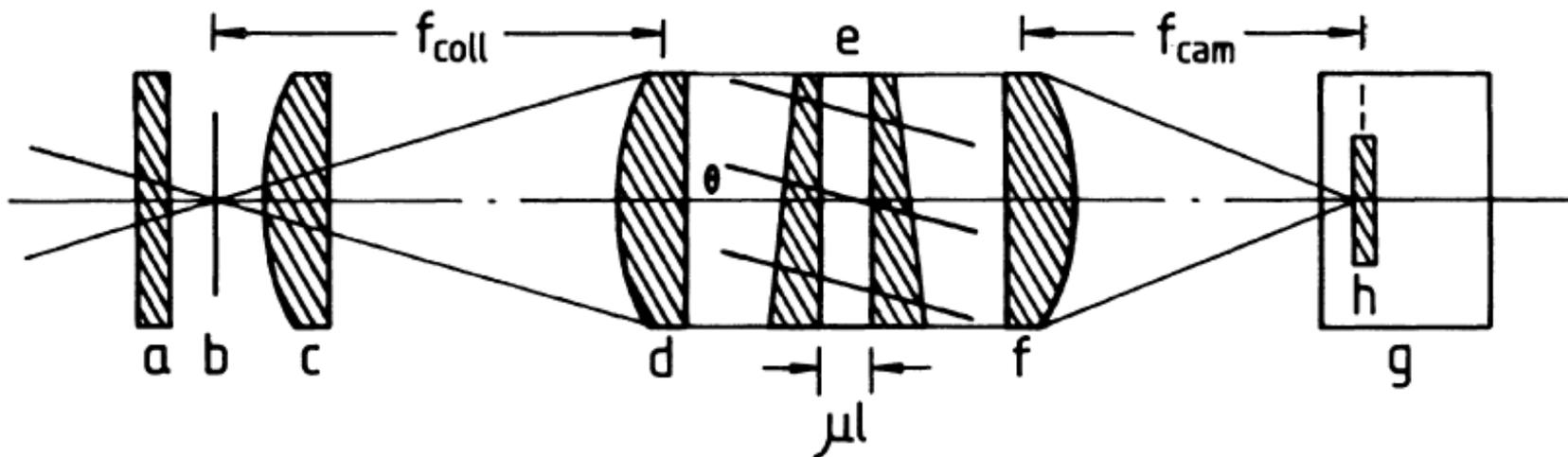


FIG. 1. Schematic drawing of an imaging Fabry-Perot interferometer comprising (a) interference filter, (b) focal plane, (c) field lens, (d) collimator lens, (e) Fabry-Perot etalon, (f) camera lens, (g) Dewar housing, (h) CCD.

# Семейство многорежимных «камер слабых объектов»

## Основания:

- Массовое применение система Ричи-Кретьена – много преимуществ (компактность, широкое поле), но невысокая светосила в фокусах Кассегрена и Несмита.
- Переход в спектрографах низкого разрешения на прозрачные решетки, в том числе и голографические (VPHG)
- Проблема наведения щели спектрографа на предельно слабые объекты
- Даже для ярких, но протяженных объектов – важно точно знать положение щели.

# Семейство многорежимных «камер слабых объектов»

ESO 3.6 м телескоп EFOCS (Buzoni et al., 1984)  
(ESO Faint Object Spectrograph and Camera)

EFOOSC2: 8 (!) режимов наблюдений (1997):

direct imaging,  
long-slit,  
slitless,  
echelle,

imaging polarimetry,  
spectropolarimetry,  
coronagraphy,  
Multiple Object Spectroscopy



Современные приборы 2-10 м телескопов:

AFOCS (Asiago, 1.92m)

DFOSC (Danish 1.54 m)

TFOSC (RTT, 1.5m)

FORS (VLT 8.2m)

DOLLORES (TNG 3.6 m).

# FORS2: **F**Ocal **R**educer and low dispersion **S**pectrograph



Scale: 0.25"/pixel and 0.125"/pixel  
FOV: 6.8' x 6.8' and 4.25' x 4.25

**Imaging:** 9 filters  
( narrow-band filters are exchangeable)

**Spectroscopy:**  
13 gratings  
9 long-slits: 0.3" — 2.5"

**Moveable Slitlets (MOS) mode**  
a set of 19 pairs of arms

**Spectroscopic Mask (MXU) mode**  
Mask of 470 slits

**Polarimetry**  
using a remotely controlled rotatable  
 $\lambda/2$ - or  $\lambda/4$ -plate + Wollaston prism.

## А что же мы имели в САО к 2000 году?

1. ПЗС – фотометр: изображения в поле  $3.5 \times 3.5'$
1. Мультиобъектный спектрограф MOFS: одновременная спектроскопия 75 объектов в поле  $15'$
1. Спектрограф UAGS: спектры со щелью длиной  $2'$
1. Спектрограф умеренного разрешения в Несмит-1: СП-124, позже перестроенный в «Краб»
1. Сканирующий Интерферометр Фабри-Перо: панорамная спектроскопия в узком спектральном интервале

## Проблемы организационно-технические:

- На одну программу КТБТ выделяет только 3-7 ночей в полугодие
- Узкая специализация приборов в прямом фокусе  
(в 1999 г – 9 навесных приборов!)

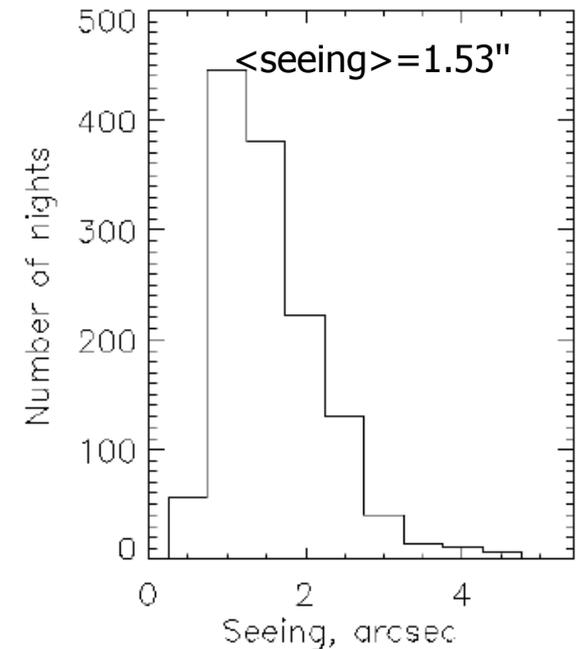
## Наши метеоусловия:

40-45% ясных ночей

Средний размер звездных изображений 1.5-1.6"

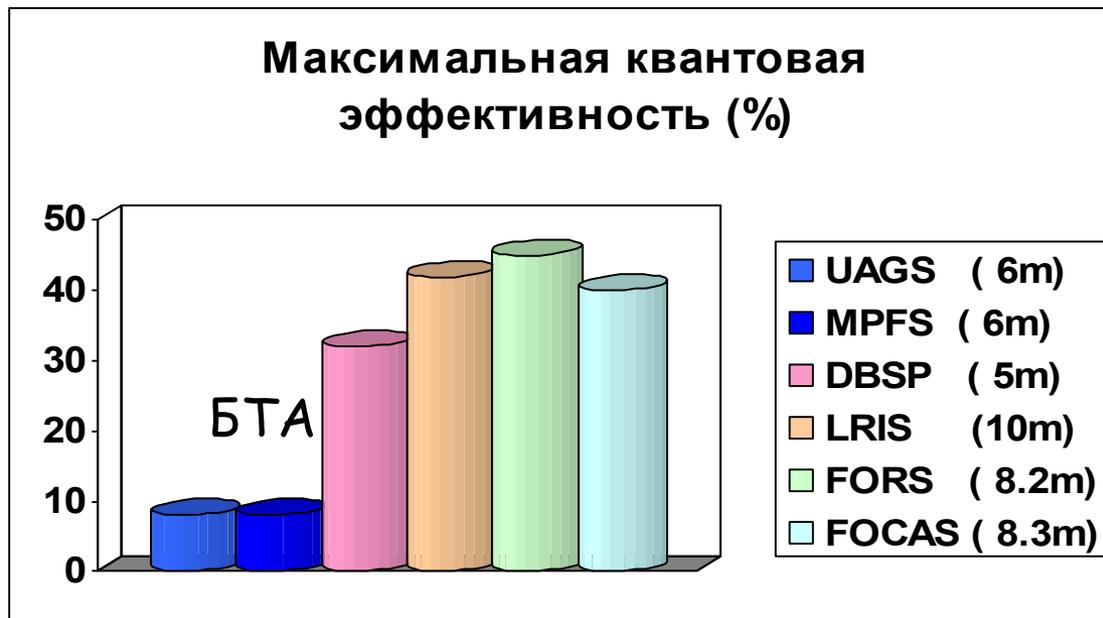
(Танчук, Афанасьев, 2011, АБюлл, 66, 253

"Астроклимат Северного Кавказа - мифы и реальность")



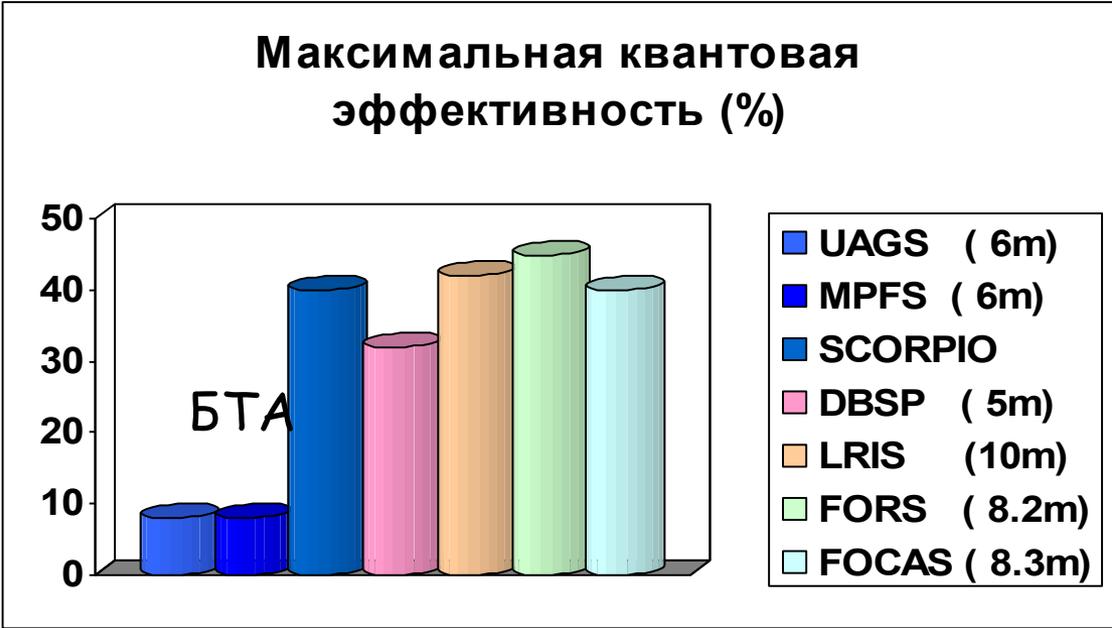
# Недостатки прежних спектрографов низкого разрешения

- потери света на входной щели (колебания монтажки, малая светосила камер)
- потери на пропускании оптики спектрографа (отсутствие AR-покрытий, центральное виньетирование зеркально-линзовых камер)
- потери на чувствительности детектора
- отсутствие современных VPH-решеток



# Недостатки прежних спектрографов низкого разрешения

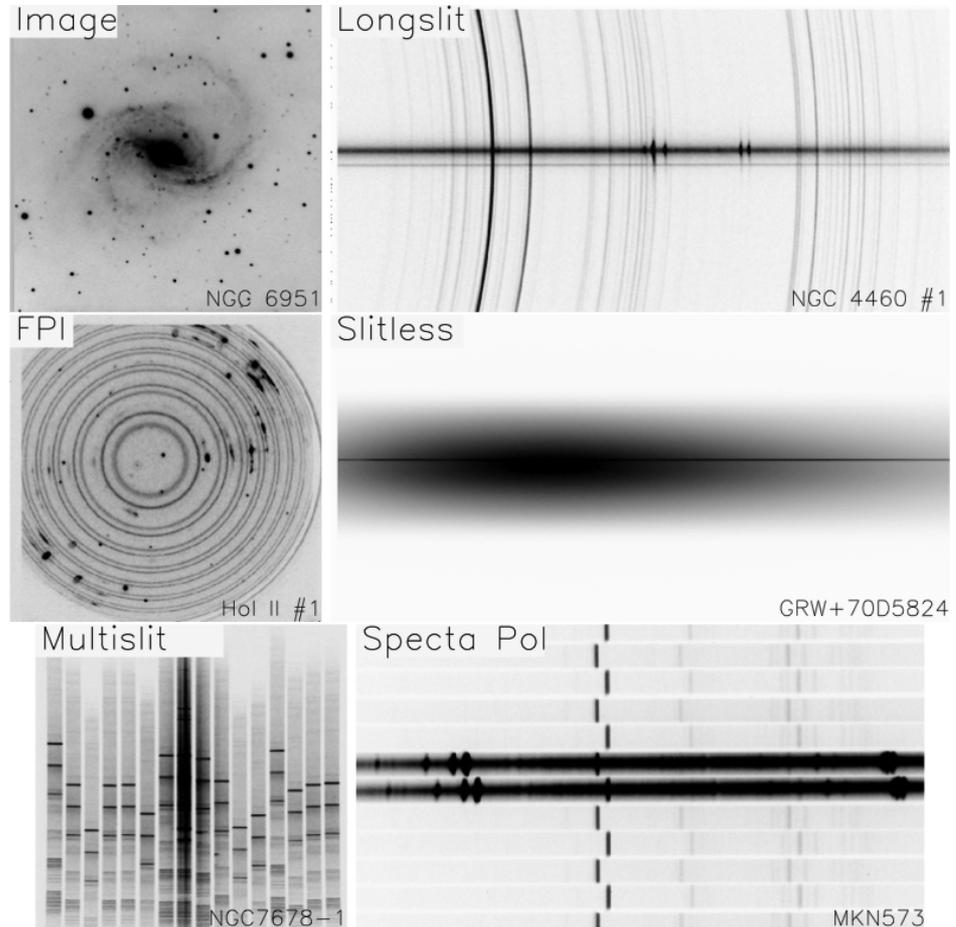
- потери света на входной щели (колебания монтажки, малая светосила камер)
- потери на пропускании оптики спектрографа (отсутствие AR-покрытий, центральное виньетирование зеркально-линзовых камер)
- потери на чувствительности детектора
- отсутствие современных VPH-решеток



# SCORPIO

В поле зрения 6'x6':

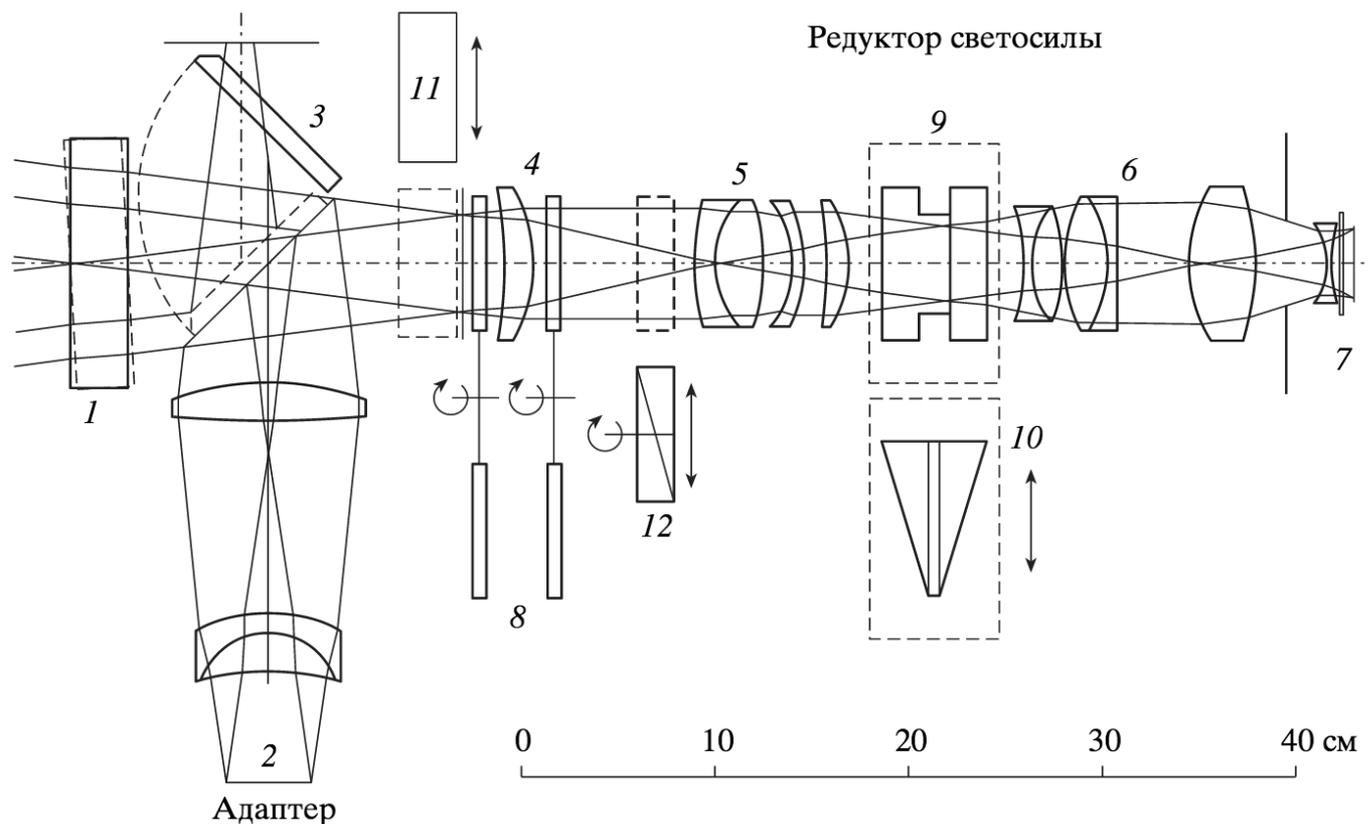
- Изображения в фильтрах
- длиннощелевая спектроскопия (R=500-2900)
- бесщелевая спектроскопия
- 3D спектроскопия с ИФП
- Многообъектная спектроскопия (16 щелей в поле 6'x3' )
- спектрополяриметрия



Многорезжимность:

- выбор наблюдений, адекватных атмосферным условиям
- много времени на телескопе (до 50-55% всех ночей)

# SCORPIO: оптическая схема



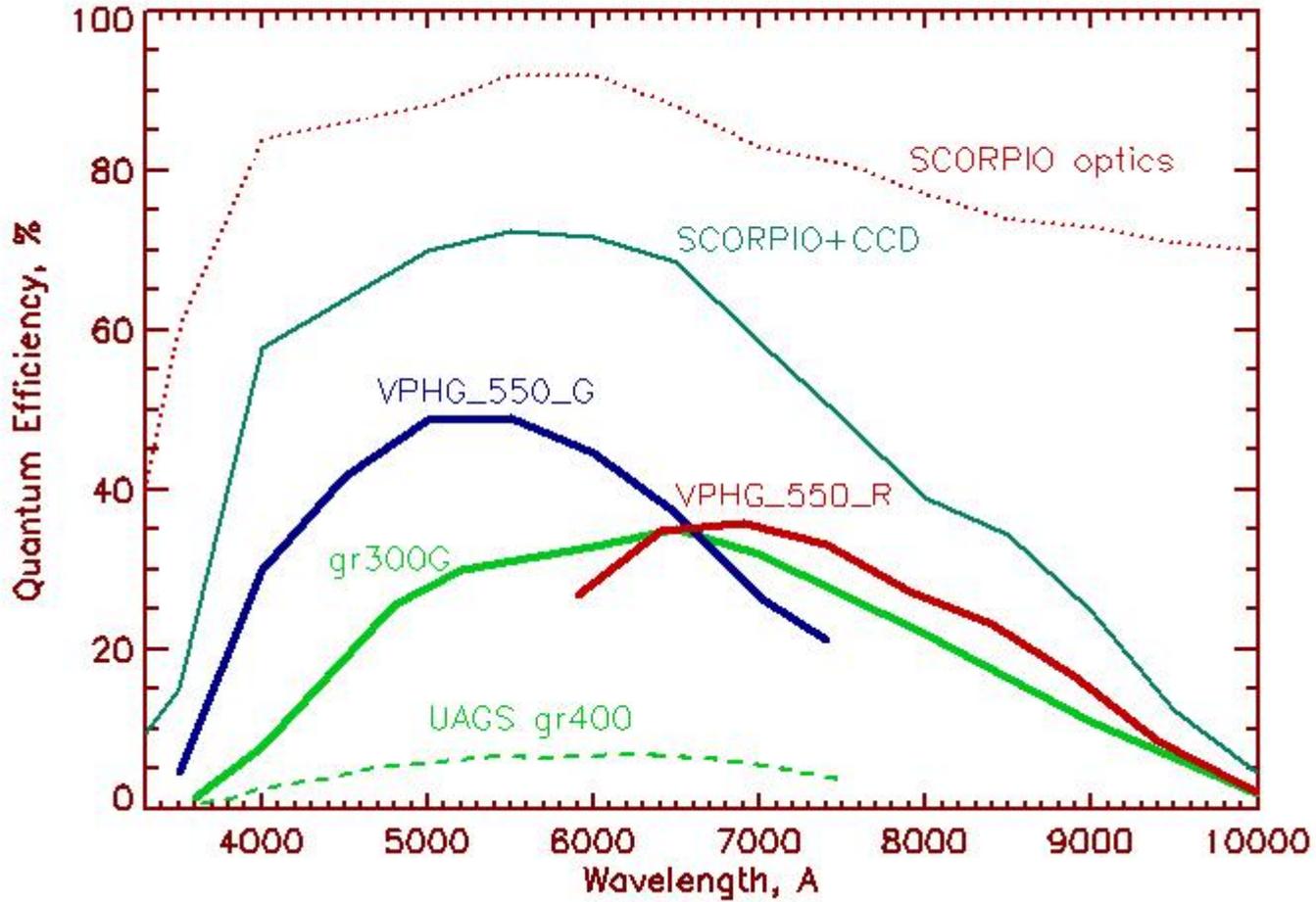
**Рис. 1.** Оптическая схема SCORPIO: 1 – наклоняемая пластина, 2 – оптика калибровки, 3 – плоское зеркало, 4 – полевая линза, 5 – коллиматор, 6 – камера, 7 – ПЗС, 8 – турели светофильтров, 9 – ИФП, 10 – гризма прямого зрения, 11 – многощелевой блок, 12 – анализатор поляризации.

Турели на 6 позиций (реально занимаем 5)

- Турель 1- длинная щель (1" — позиция 3), интерференционные фильтры
- Турель 2: 4 стеклянных фильтра (BVRI) и маска для бесщелевых спектров

# Квантовая эффективность SCORPIO в спектральном режиме

Идеальный случай - бесщелевая спектроскопия



# История создания SCORPIO

- Армяно-Российско-Китайский проект – редуктор фокуса для среднеполосной фотометри на 2.6 м телескопе
- А не сделать ли второй прибор («клон») и для нужд САО?
- Расчет оптики выполнен В.Л. Афанасьевым только для режима фотометра, режим спектроскопии внесен позже. Проект SCORPIO (техсовет, осень 1999 г.)
- Первые наблюдения в сентябре 2000 г.: хорошее качество звезд по полю, но спектры можно снимать только в центре поле зрения.
- Изготовление многоцелевой приставки (мультислит)
- Замена оптики – проблема остаточного астигматизма изображений, но значительно лучше спектральный режим
- Изготовление и испытание поляризационного блока
- Многократные модификация механики
- 2007 г. – первые научные наблюдения со SCORPIO в удаленном режиме (гравлинза «Космическая подкова»)
- 2010 г. - первый свет SCORPIO-2

## Рабочая группа:

Афанасьев В.Л. - научный руководитель, расчет оптики

Веретенев В.В. - сборка механики

**Гажур Э.Б.** - конструирование

Додонов С.Н. - наблюдения в Бюраканской АО, методика

**Желенков С.Р.** - блоки управления на микропроцессорах

Моисеев А.В. - руководитель проекта, программы управления

Перепелицын Е.И. - изготовление оптики

Фатеев В.И. - электро-силовая часть

Сам по себе прибор - это мало, нужно разработать методику наблюдений, и здесь потрудились многие сотрудники САО РАН.

На уровне обработки можно добиться много, но плохой методикой можно испортить вообще все.

# Фокальный редуктор с ИФП

## БЫЛО:

фотообъективы, низкое пропускание оптики ( $\max QE = 30\%$ )

Ручная смена фильтров

Практически невозможно (очень неудобно и сложно) использовать редуктор для прямых снимков

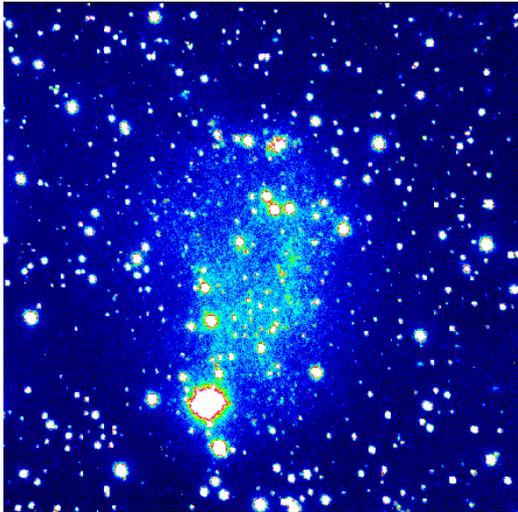
## СТАЛО со SCORPIO:

Пропускание увеличилось более чем в 2 раза

4 позиции для узкополосных интерференционных фильтров.

Стали наблюдать объекты в более слабых, но интересных эмиссионных линиях ([SII])

# ПЗС – фотометр прямого фокуса



## БЫЛО:

Поле зрения до 3.5'

Отсутствие гидирования

BVRI+На фильтры

## СТАЛО со SCORPIO:

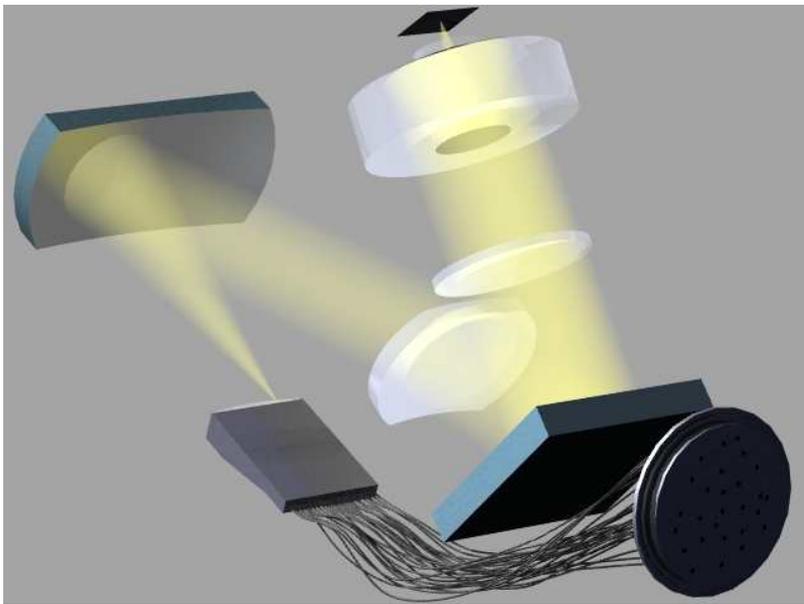
С той же ПЗС поле зрения больше в 1.5 раза (но без астигматизма только для seeing от 2")

Больше оптики – больше бликов на очень ярких звездах

Сложнее «плоское поле»

Жесткие требования на фокусировку по полю

Лучше для узко- и средне-полосной фотометрии (гид+ большой набор фильтров)



## Мультиобъектный волоконный спектрограф MOFS

### СТАЛО со SCORPIO:

Квантовая эффективность возросла в 5-8 раз

Предельная звездная величина та же, что и в режиме длинной щели

Но всего 16 щелей в меньшем поле зрения 3x6'

Оперативная расстановка щелей, вычитание фона

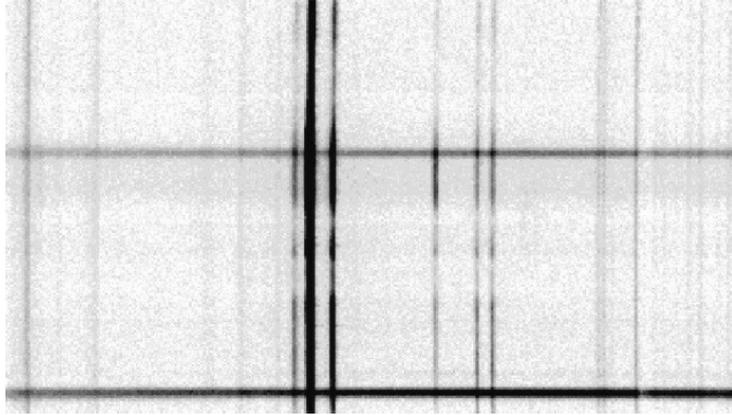
### БЫЛО:

До 75 объектов в поле зрения 15'

21 зв. величина - практический предел (проблема фона неба)

Невозможно оперативно сменить программу наблюдений, большая работа по подготовке масок

## Светосильный спектрограф прямого фокуса (UAGS)



### БЫЛО:

maxQE=5-8%

Нормальная ширина щели 2"  
+ возможность изменения

Легко менять спектральный  
диапазон на одной решетке

Сильное виньетирование на  
вторичном зеркале

Анализатор поляризации -  
перед щелью

### СТАЛО со SCORPIO:

Квантовая эффективность  
возросла в 5-10 раз (для  
бесщелевого режима)

Потери света на более узкой  
нормальной щели (0.7-1.0"),

Смена диапазона - только  
сменой призмы (надо ехать на  
АТ)

Почти нет виньетирования,  
меньше рассеянный свет

Анализатор - за щелью (это  
лучше)

Точная локализация щели

Щель в 3 раза длиннее

# Спектрофотометрический комплекс СП-124

## БЫЛО:

maxQE=1-5% (?)

Короткая щель (40") +  
вращение поля зрения

Легко менять спектральный  
диапазон на трех (!) решетках

Простая и понятная система  
управления

После модернизации в  
спектрограф «Краб» -  
maxQE=18% (?), выросло  
спектральное разрешение, но  
за 6 лет - ни одной  
законченной работы

## СТАЛО со SCORPIO:

Квантовая эффективность  
возросла в 2-10 раз (для  
бесщелевого режима)

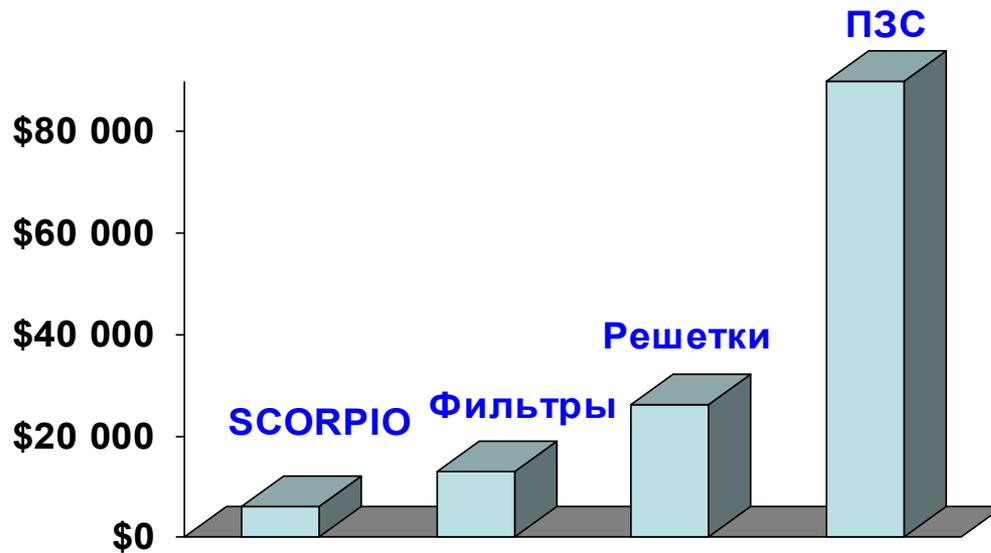
Потери света на более узкой  
нормальной щели (0.7-1.0"),  
Смена диапазона - только  
сменой призмы (надо ехать на  
АТ)

Почти нет виньетирования,  
меньше рассеянный свет

Анализатор поляризации

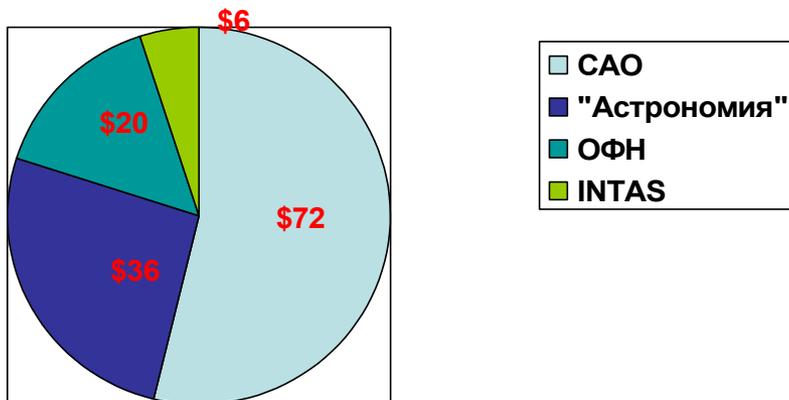
Точная локализация щели

# Финансовые затраты на проект



Суммарные затраты на проект SCORPIO составили \$135,000

При этом сам редуктор как таковой: \$6,000 (<5%)



Эффективность спектроскопии низкого разрешения на 6-м телескопе увеличилась в 6 раз (от 6-8% на UAGS до 40% на SCORPIO+VPHG)

# Плюсы и минусы многорежимности

## + Гибкость в выборе наблюдательных программ

- Несмотря на высокую степень автоматизации, качество получаемого материала зависит от опыта наблюдателя.

Ряд компромиссных решений в оптической схеме:

- ограничение диаметра коллимированного пучка (40 мм) для работы со сканирующим ИФП в выходном зрачке
- плохая широкощельность
- оптика рассчитана прежде всего для получения спектров, на изображениях — остаточный астигматизм до 1.5" к краю поля зрения

# Первопричины основных проблем SCORPIO

## 1. Технические реалии:

Механика – компромисс между тем, что необходимо и тем что можно изготовить в САОвских мастерских (или купить за разумные деньги).

Многие хорошие идеи пришли позже (всего одна позиция для дисперсера, поляризационный блок)

## 2. Проблемы светосильной оптики:

почти нигде в мире на больших телескопах нет пучка F/4 для которого нужны сверхсветосильные камеры. А чем выше светосила – тем сложнее построить безабберационную систему.

# SCORPIO-2: принципиальные изменения

- С тем же разрешением — в 2 раза больше спектральный диапазон (оптика + детектор)
- Больше решеток и фильтров (включая SDSS ugriz)
- IFU, multislit (в процесс изготовления)
- Повышенная «красная» чувствительность ПЗС



**Table 1.** Comparison of the 6-m telescope old and new facilities

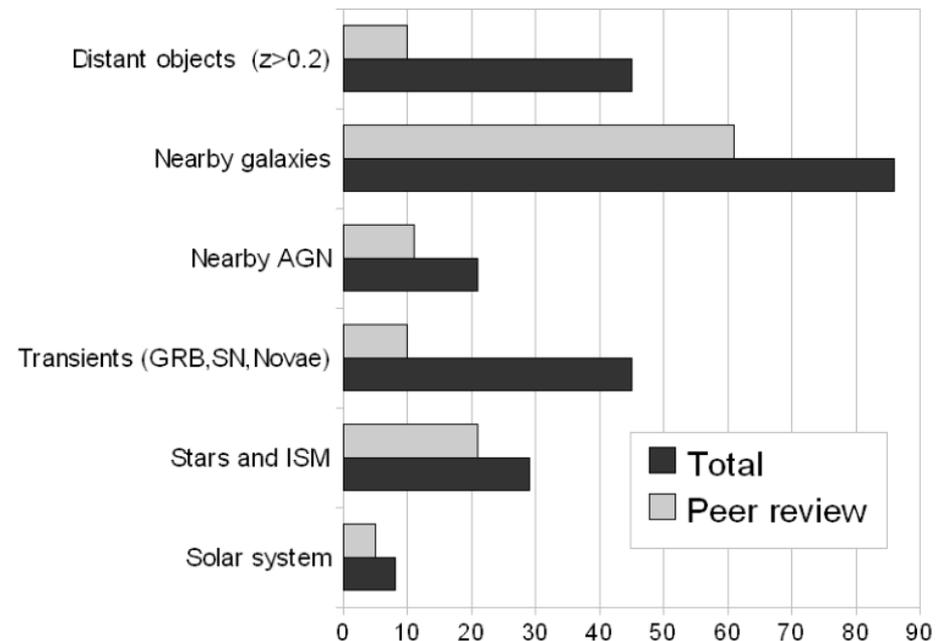
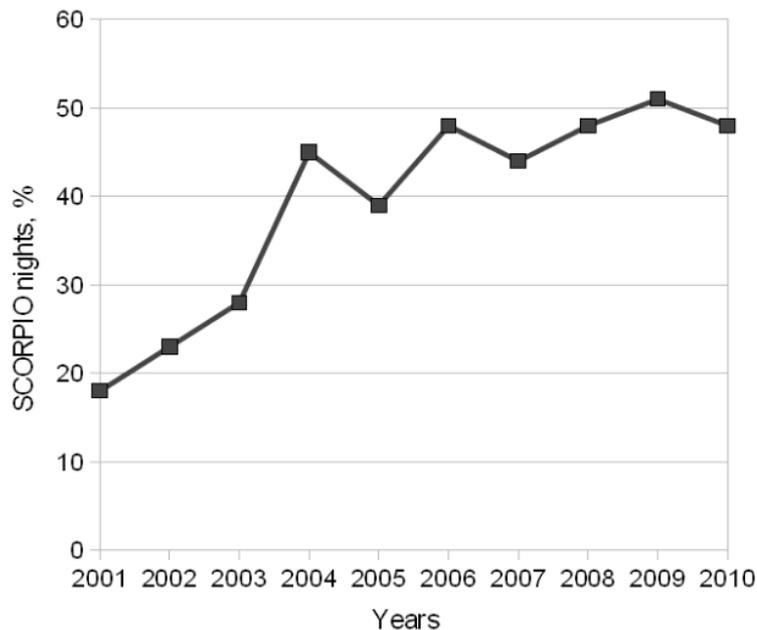
	SCORPIO	SCORPIO-2
Detector	EEV 42-40, 2K × 2K	E2V 42-90, 2K × 4.6K
Direct imaging:		
Max. filters positions	10 (in two wheels)	27 (in three wheels)
Field-of-view	6.1 arcmin	6.1 arcmin
Long-slit spectroscopy	set of slits with fixed width (0.5 – 2''); single VPHG position	variable slit width (0 – 20''); wheel with 9 grating holders
FPI	Common carriage with grating holder	independent holder
Multi-slit unit	16 slits in 6 × 3 arcmin field-of-view	16 slits in 6 × 4 arcmin field-of-view
Integral-field unit	–	24 × 24 lenslet, 0.75''/lens
Polarimetry	Savar plates, rotated in two positions	Single and double Wollaston prisms; apochromatic phase plates $\lambda/2$ , $\lambda/4$ ; rotated analyser

2010 г. – «первый свет»

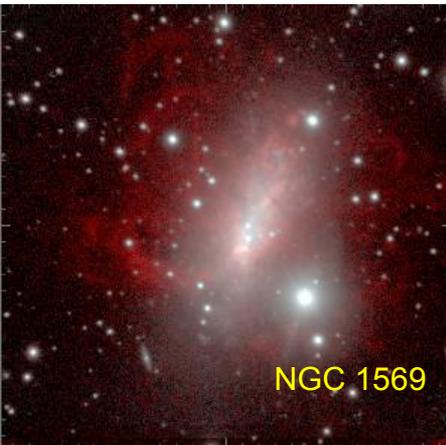
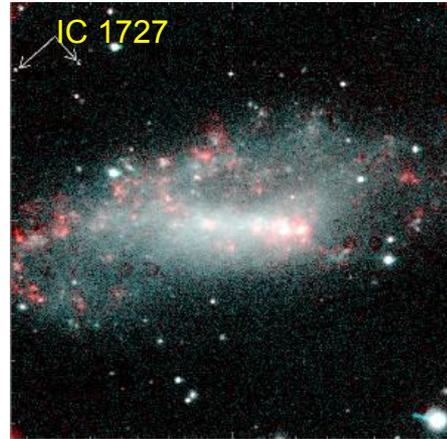
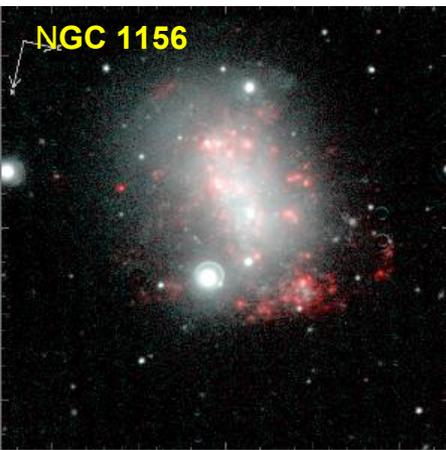
2013 г. – начало официальной пробной эксплуатации на БТА

# SCORPIO/SCORPIO-2 на БТА

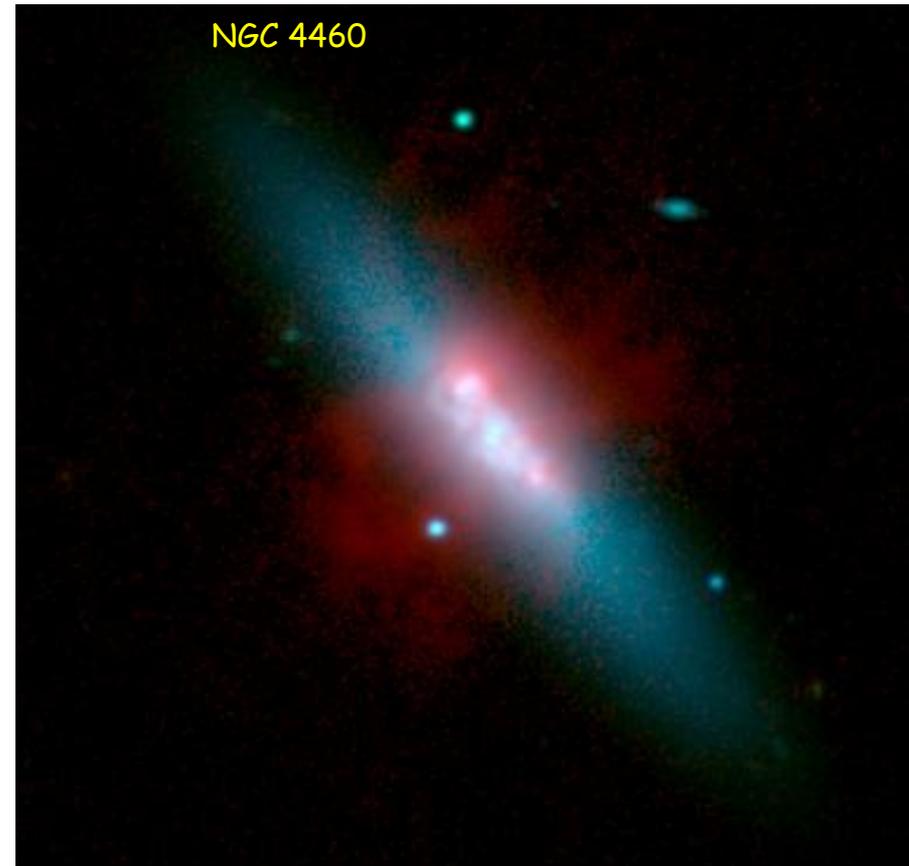
- гибкое использование наблюдательного времени, выбор оптимального для текущей погоды режима
- Многократно выросла эффективность спектральных наблюдений (низкое разрешение)  
→ до 50-60 % всего наблюдательного времени БТА (Солнечная система, звезды, галактики)



# H-альфа обзор близких галактик



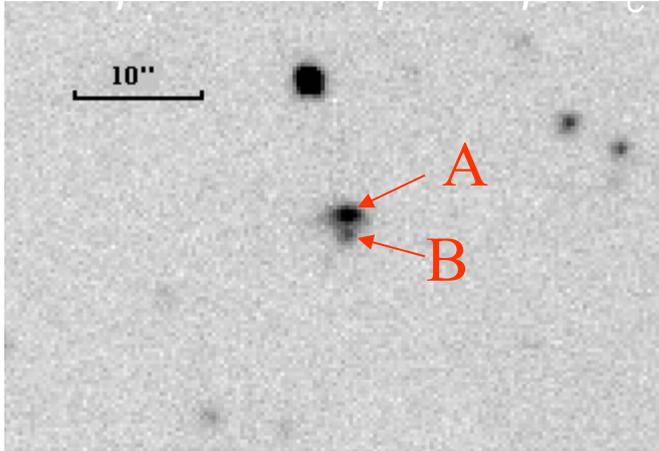
На изображения 161  
галактики (37% всех данных для  
локального объема  $D < 10$  Мpc):  
- Темп звездообразования  
- Время исчерпания газа



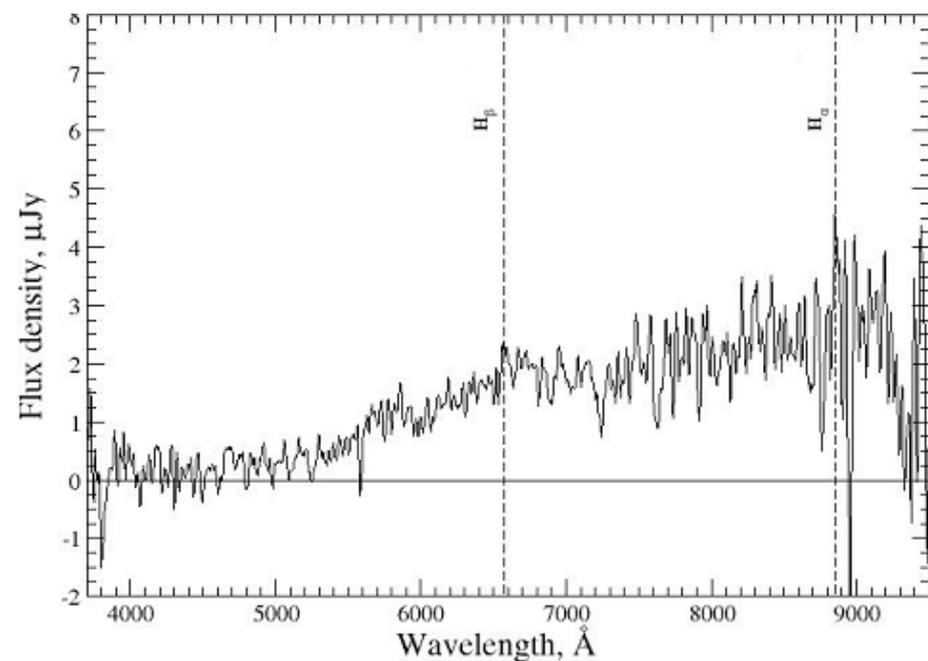
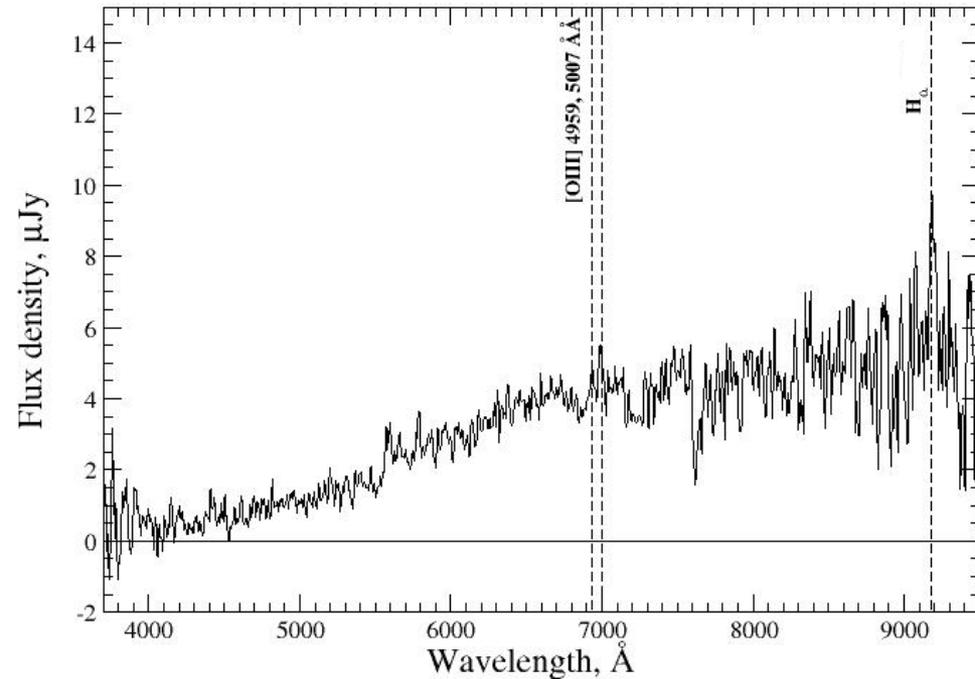
The total SFR density in the Local  
Universe ( $z=0$ ):  
 $(0.019 \pm 0.003) \text{ Mo/yr/Mpc}^3$   
(Karachentsev & Kaisin, 2010, AJ)

Superwind in NGC 4460: whereas gas in the circumnuclear  
disc is photoionized by radiation of young stars, the  
external regions of the H $\alpha$  nebulosity are ionized by  
shocks.  $V \geq 130 \text{ km/s}$ ,  $\text{SFR} \sim 0.3 \text{ Mo/yr}$  (Moiseev et al.,  
2010)

# Спектроскопия слабых объектов



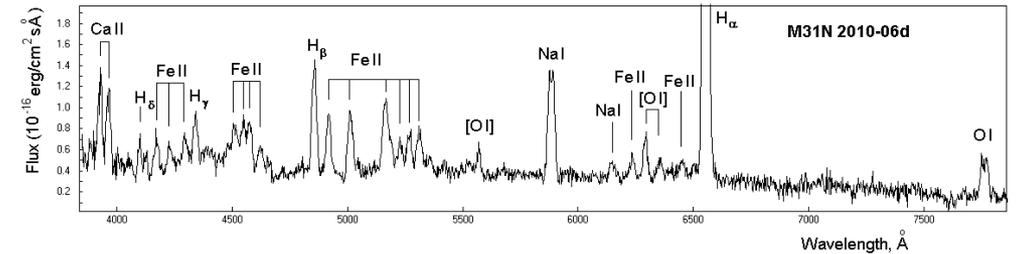
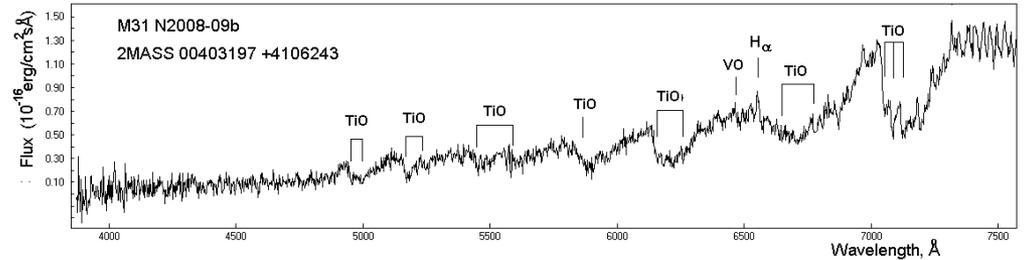
Спектроскопия вероятной родительской галактики «темного» гамма-всплеска GRB001109:  $T_{\text{exp}} = 7200$  s  
(Фатхуллин, 2003, препринт САО, 180)



# Спектроскопия транзientных объектов

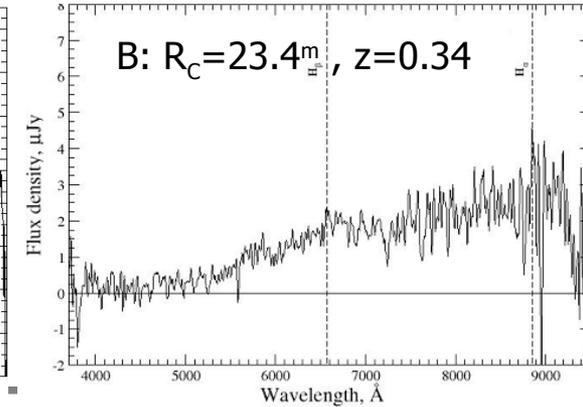
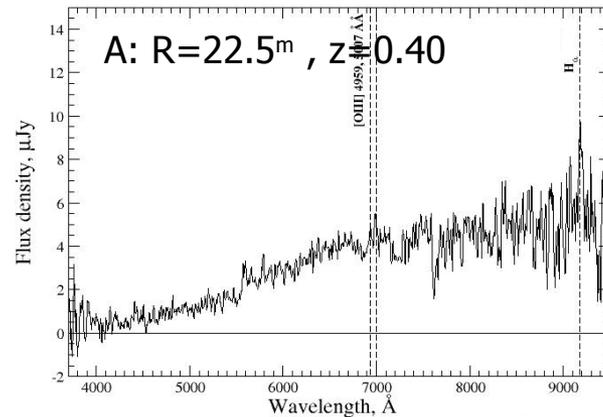
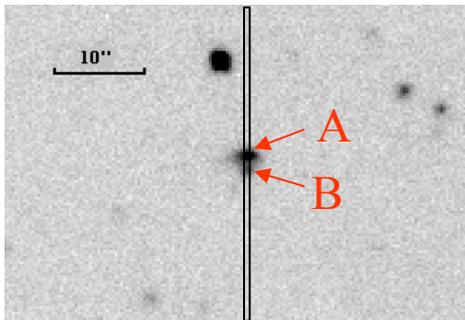
## Novae in M31

(Pietsch et al., Barsukova et al. 2007-2011)

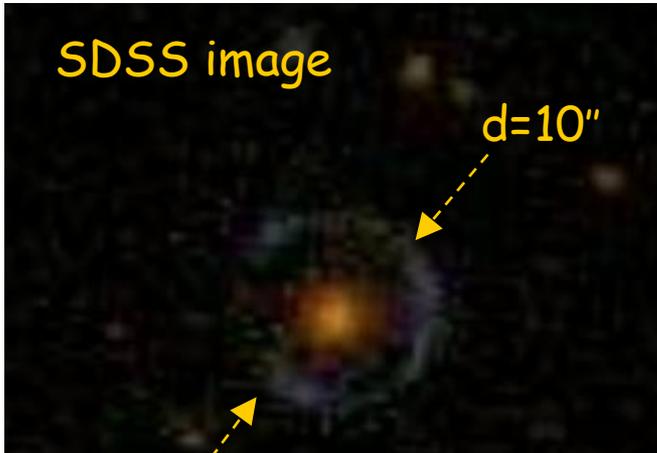


Distant supernovae associated with gamma-ray bursts, GRB host galaxies:  
 Moskvitin et al. (2010)  
 Roy et al. (2011)  
 Castro-Terado (2008)

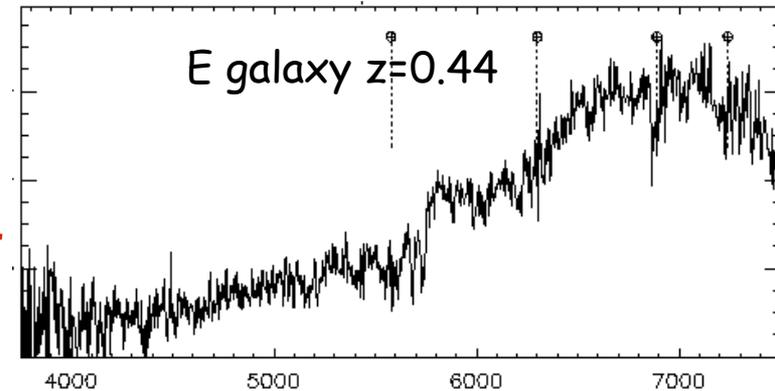
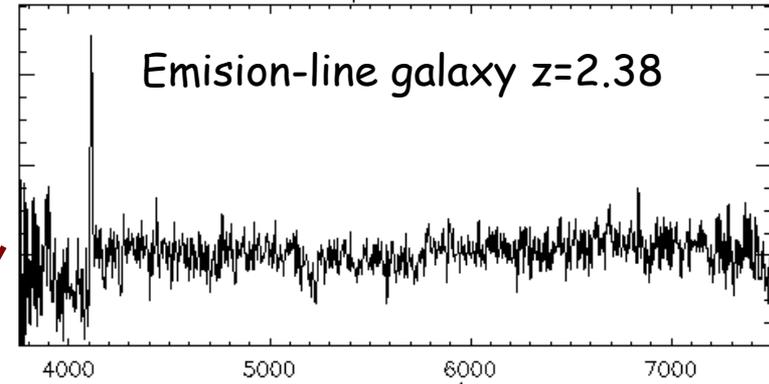
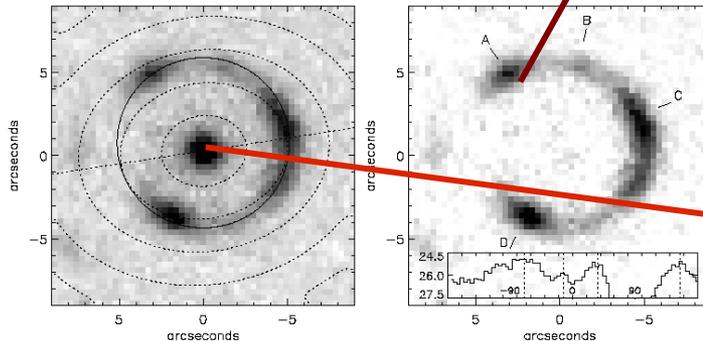
Host galaxy of the 'dark' GRB001109: ( $T_{exp}=2h$ , Fatkhullin, 2003)



# Гравлинза «Космическая подкова»



INT image:

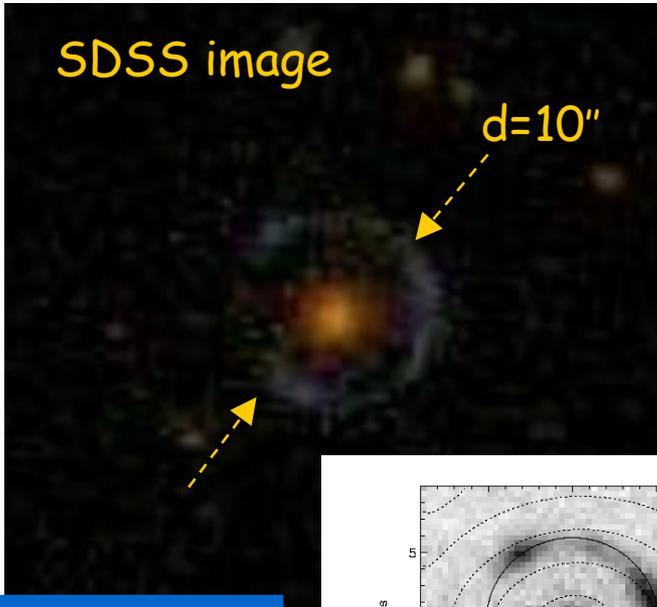


Проведенная на БТА спектроскопия показала, что обнаруженный в обзоре SDSS гравитационная линза обладает уникальными характеристиками:

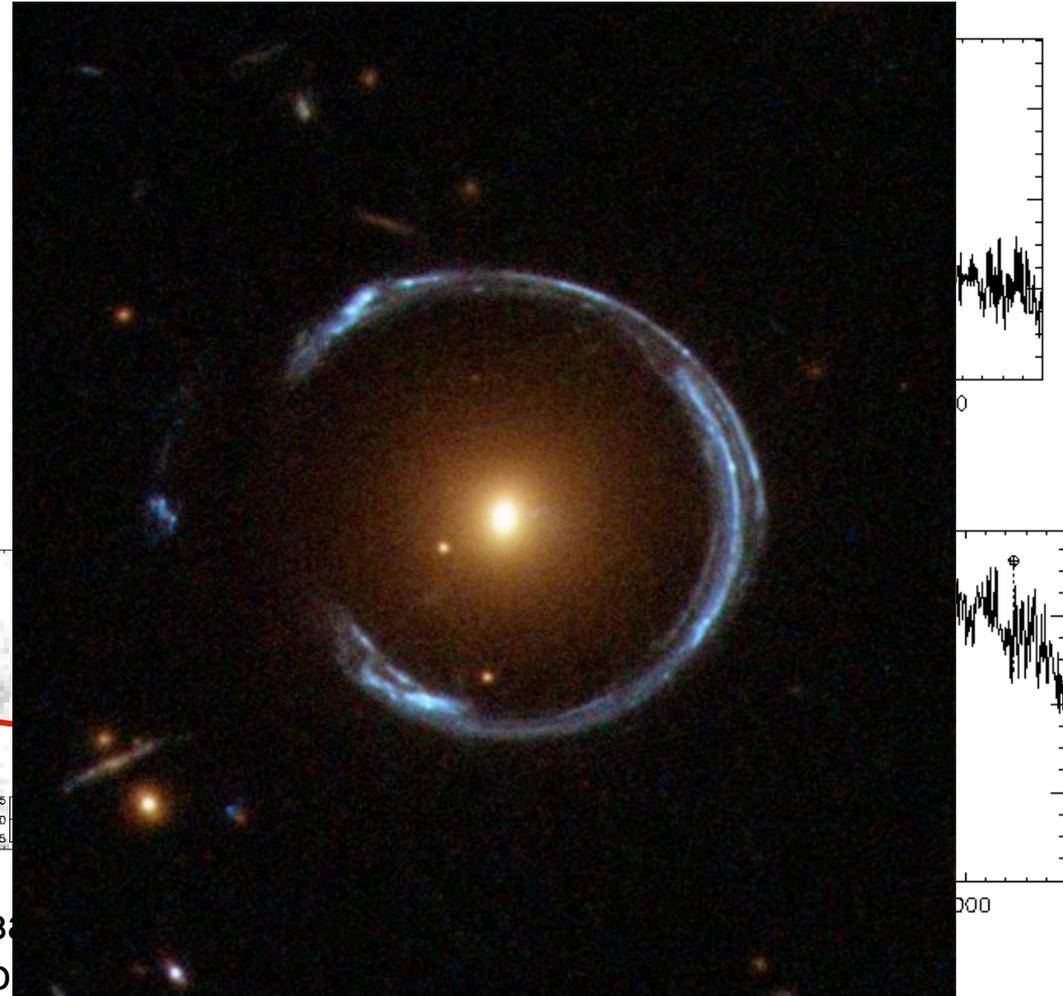
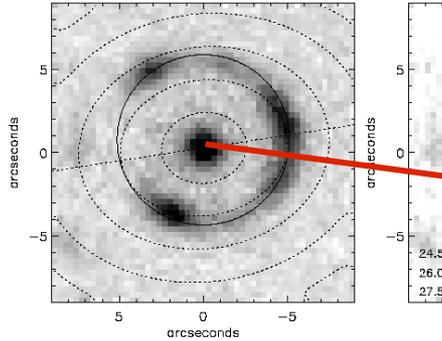
диаметр кольца Эйнштейна:  $10''$   
фактор усиления: 35-50 раз

Belokurov et al (2007, ApJL)

# Гравлинза «Космическая подкова»



INT image:



Проведенная на БТА спектроскопия показала, что обнаруженный в обзоре SDSS гравитационный линзовый объект обладает уникальными характеристиками:

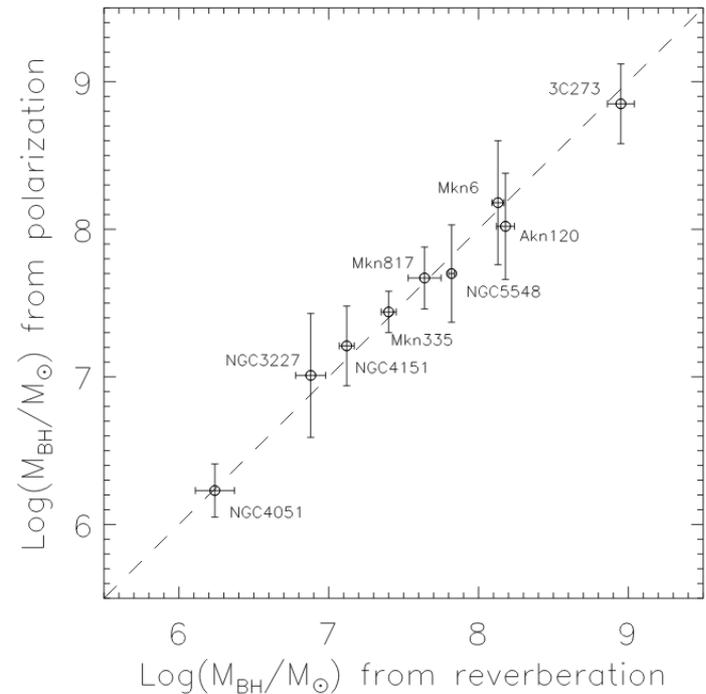
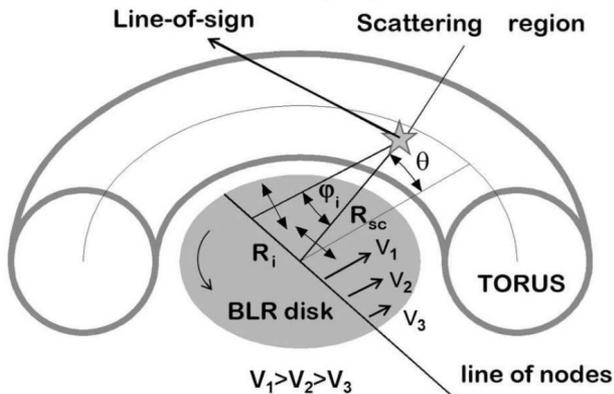
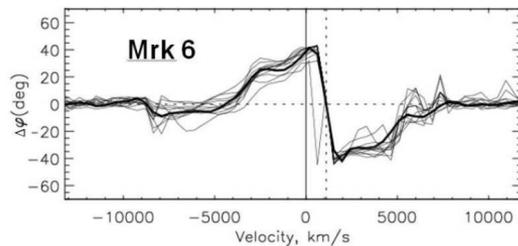
диаметр кольца Эйнштейна:  $10''$   
фактор усиления: 35-50 раз

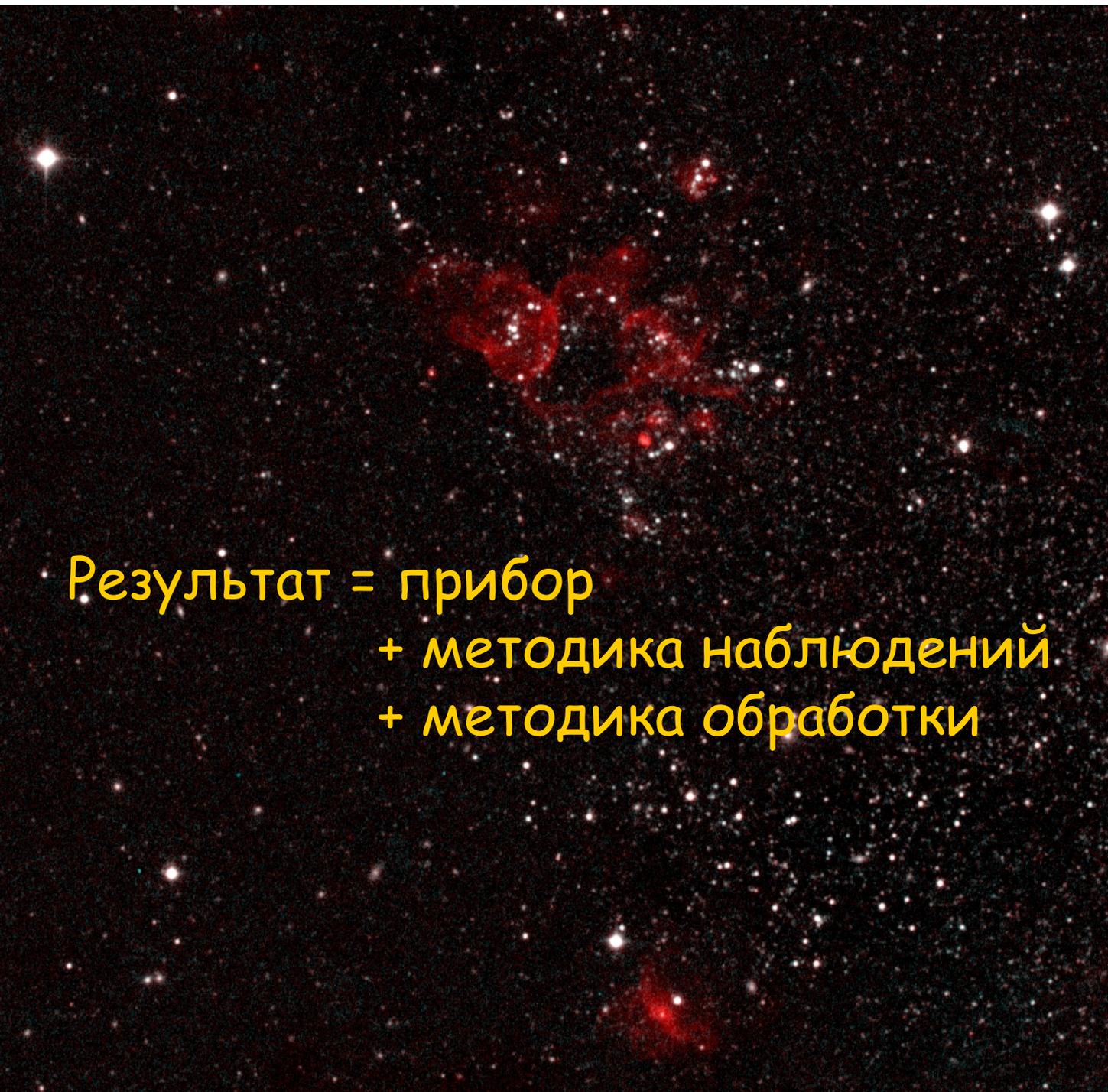
Belokurov et al (2007, ApJL)

# Спектрополяриметрия AGN: измерения масс ЧД



Новый метод измерения масс черных дыр в ядрах галактик:  
 Afanasiev et al 2014  
 Afanasiev & Popovic 2015





Результат = прибор  
+ методика наблюдений  
+ методика обработки

IC 1613  
SCORPIO  
Zeiss-1000

# Литература

- 1) Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., 2005, ПАЖ, т. 31, с. 214
- 2) Afanasiev V.L., Gazhur E.B., Zhelenkov S.R., Moiseev A.V., 2005, Bull.SAO, v. 58, p. 90
- 3) «SCORPIO: руководство пользователя», на его веб-страничке: <http://www.sao.ru/hq/ion/SCORPIO/scorpio.html>  
(там же и статьи)
- 4) Afanasiev V.L., Moiseev A.V., 2011, Baltic Astronomy, 20, 363
- 5) Щеглов П.В. «Проблемы оптической астрономии», Москва, «Наука», 1980

Сами лекции тоже будут выставляться на моей личной странице:

<http://www.sao.ru/hq/moisav/>