Многорежимный фокальный редуктор телескопа БТА

Лекция I.

Введение. Основные понятия.
Редуктор светосилы на большом телескопе.
Семейство многорежимных «камер слабых объектов».
Спектроскопия низкого разрешения на 6-м телескопе.
SCORPIO (SCORPIO-1) и SCORPIO-2.

О чем этот курс?

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

SCORPIO(-1)

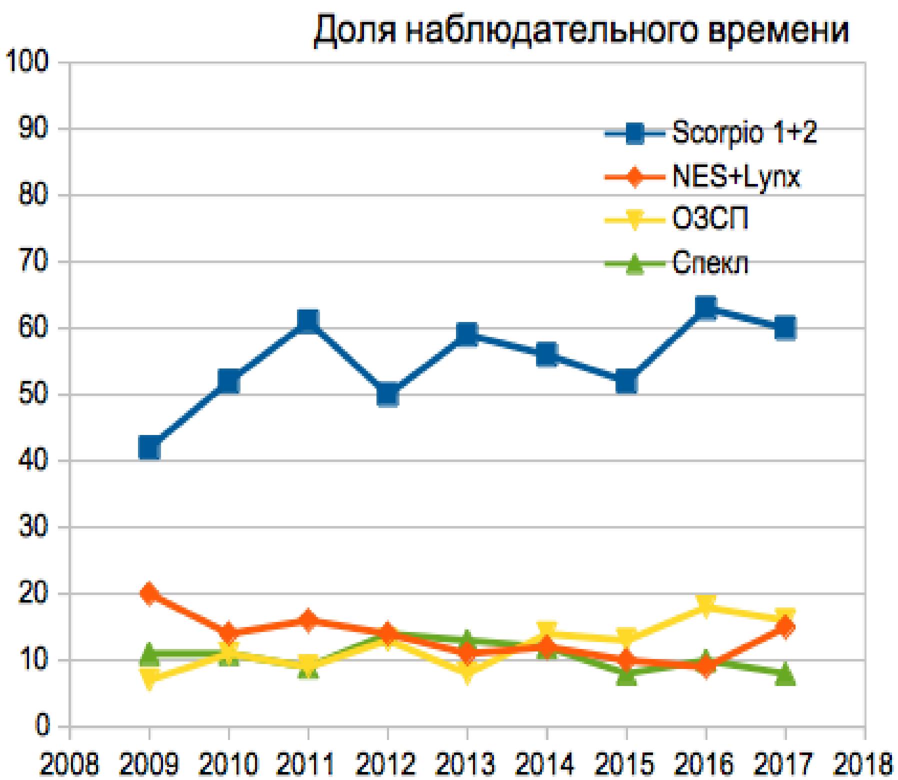
SCORPIO-2

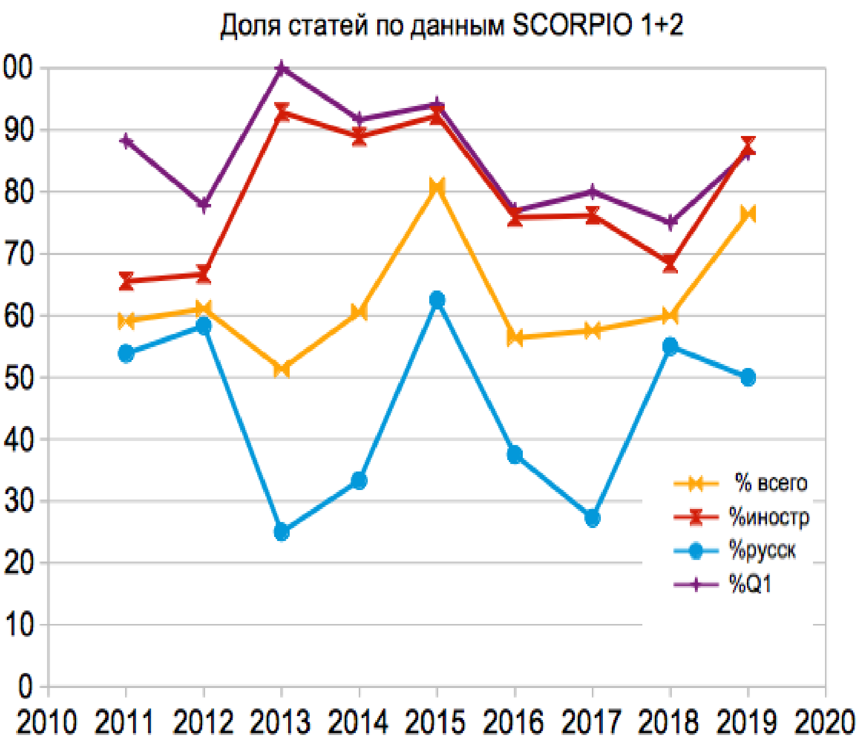
Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations

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

Почему SCOPRIO?

“основной прибор на БТА”





(На основе годовых отчетов САО РАН, доклад А. Моисеева на НКТРТ в октябре 2019 г.)

Базовые понятия: спектроскопия и фотометрия

Википедия:

Фотометрия — общая для всех разделов прикладной оптики научная дисциплина, на основании которой производятся количественные измерения энергетических характеристик поля излучения.

Спектроскопия — раздел физики, посвящённый изучению спектров электромагнитного излучения.

Мартынов Д.Я. “Курс практической астрофизики”:

Фотометрия — наука о световых измерениях

Спектроскопия — разложение света по длинам волн на его монохроматические составляющие

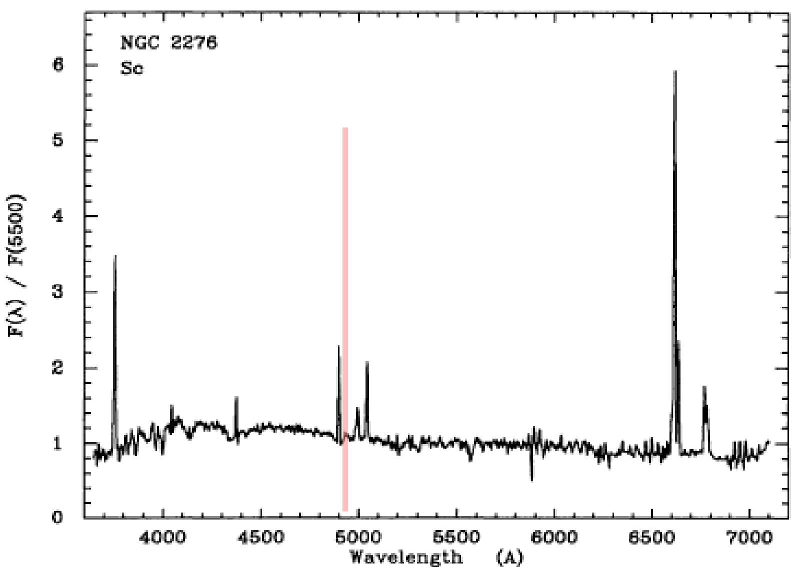
Спектроскопия и фотометрия: “практическое” определение

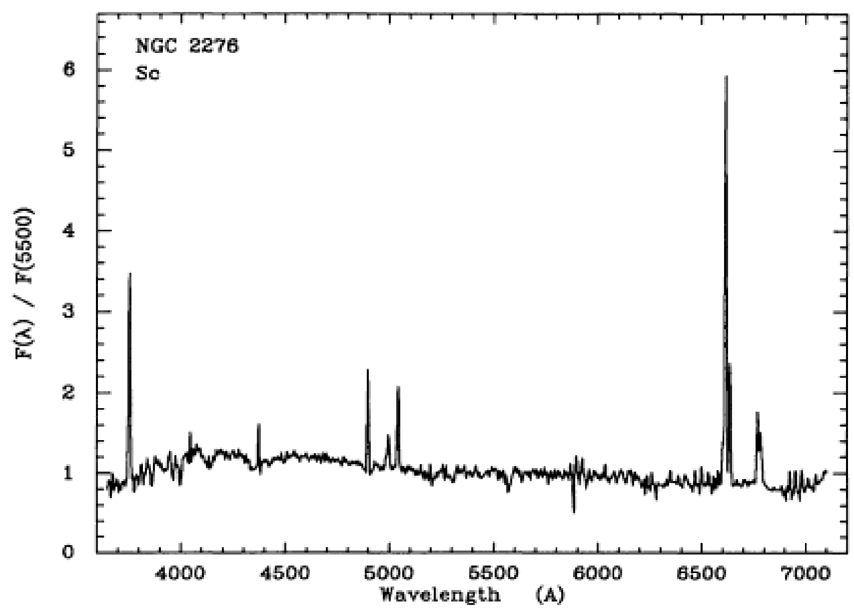
Наивное:

Фотометрист работает с картинкой, а спектроскопист — со спектром.

Но бывает апертурная фотометрия и панорамная спектроскопия

Мы всегда наблюдаем   распределением энергии и в картинной плоскости и вдоль длины волны. Но если наше энергетическое разрешение (“ширина фильтра”) позволяет разделять характерные детали в спектре – это спектроскопия. А если наоборот – фотометрия :)





Базовые понятия: спектроскопия низкого разрешения

$R=\lambda/d\lambda=300\text{-}3000$

В оптическом диапазоне это от ~2 до 30 Å

Достаточно для:

- Измерения красного смещения
- Определения типа объекта
- Изучения кинематики газа в туманностях и галактиках
- Измерения химсостава газа и условий его ионизации, оценок T_e и n_e (разделения основных дублетов: 10-20 Å)
- Изучения кинематики звездных подсистем

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

Поляриметрию обсуждать не будем — это тема отдельного курса

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;
β – угловой размер звезды (рад);
s – фон неба (квант см$^{-2}$ с$^{-1}$ стер$^{-1}$)
n_* – поток от звезды (квант см$^{-2}$ с$^{-1}$)
$N_* = D^2 n_* t$, $N_s = D^2 \beta^2 st$
отношение сигнал-шум:

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

Кто дает основной вклад в статистику шумов?

Яркий объект ($N_* \gg N_s$):

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

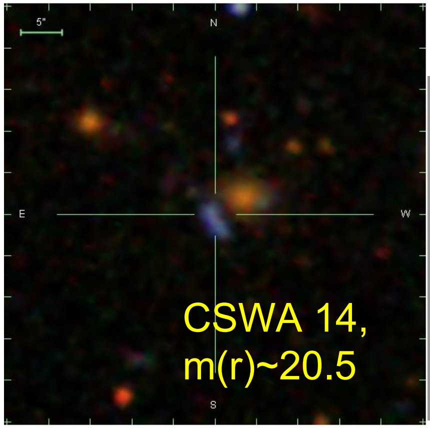
← при условии, что регистрируем ВЕСЬ свет звезды (идеальная широкощельность)

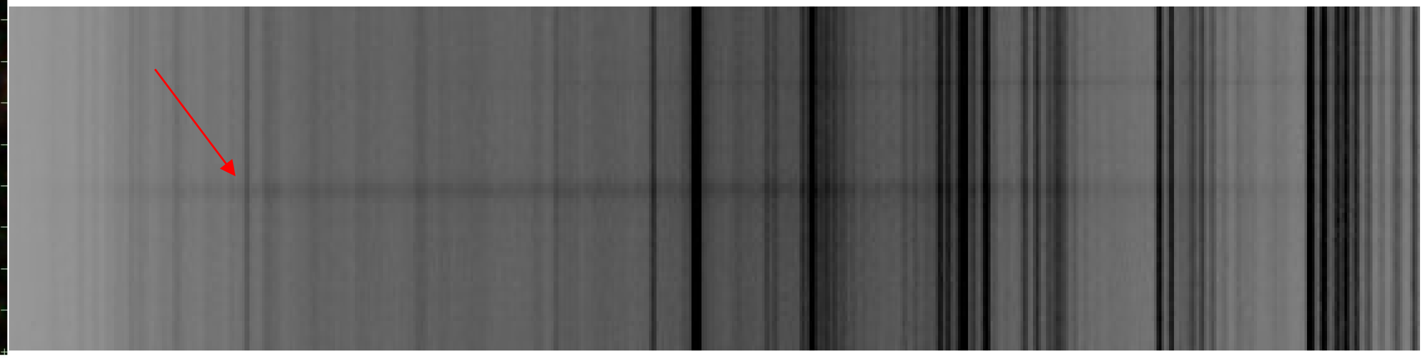
Слабый объект ($N_* \ll N_s$):

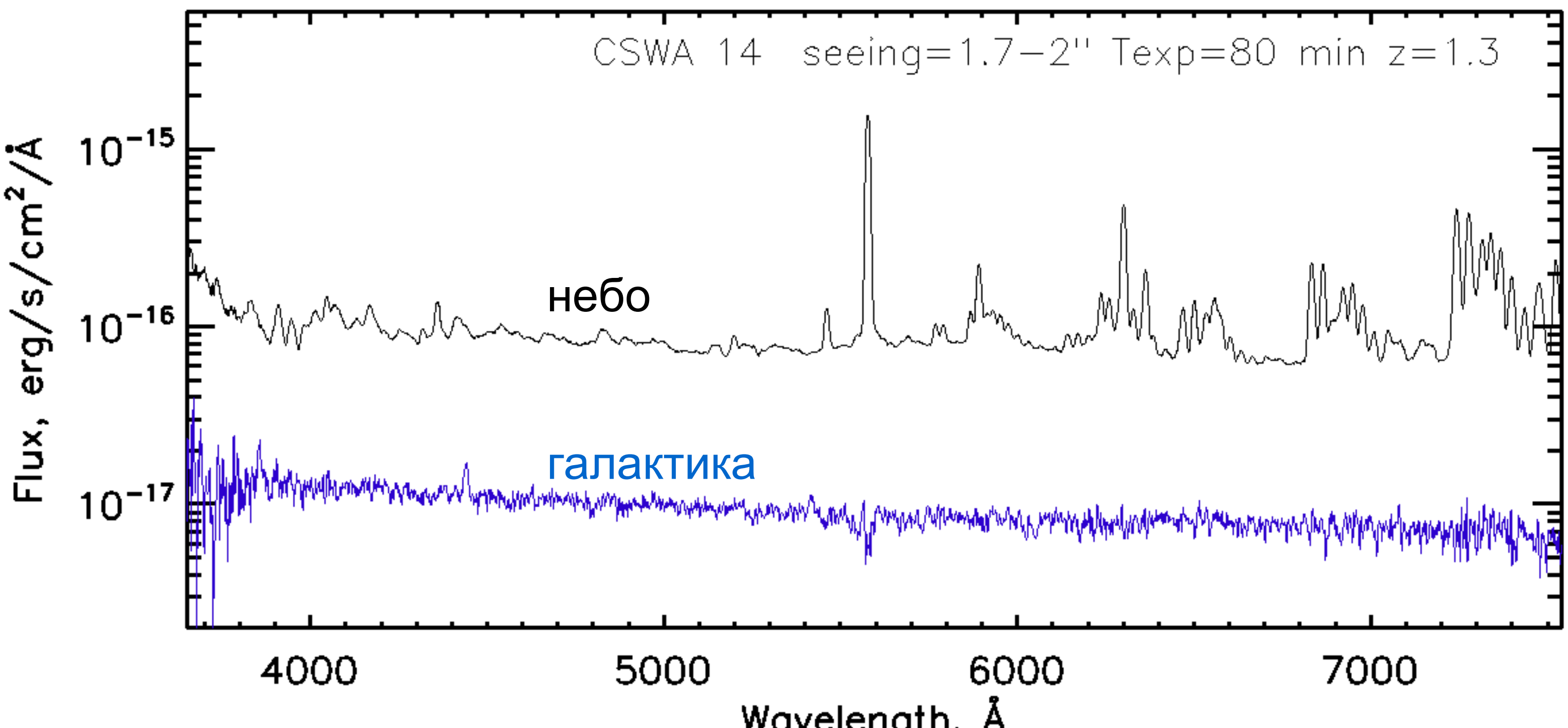
$$(S/N) = \frac{N_*}{\sqrt{N_s}} = \frac{D^2 n_* t}{D\beta\sqrt{st}} = \frac{D}{\beta} n_* \sqrt{\frac{t}{s}}$$

<u>Условная</u> граница ~20 зв. величина

Спектроскопия слабого объекта







Базовые понятия: протяженные объекты

Для слабого звездообразного объекта фактор диаметра телескопа эквивалентен изменению качества изображений (β):

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

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

s_* – поверхностная яркость объекта (квант см$^{-2}$ с$^{-1}$ 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 β!)

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 дескретизацией изображения в нем, при том, что современные детекторы имеют ограниченные размеры… (Courtes, 1994)

БТА: масштаб=24 м/206265"=116 μm/"
p=13.5 μm => 0.12 "/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) => F/2.6 (БТА+SCORPIO)

Фокальный редуктор Куртеса на БТА

G. Courtès et al.: Hα survey of M33 with the six-meter telescope

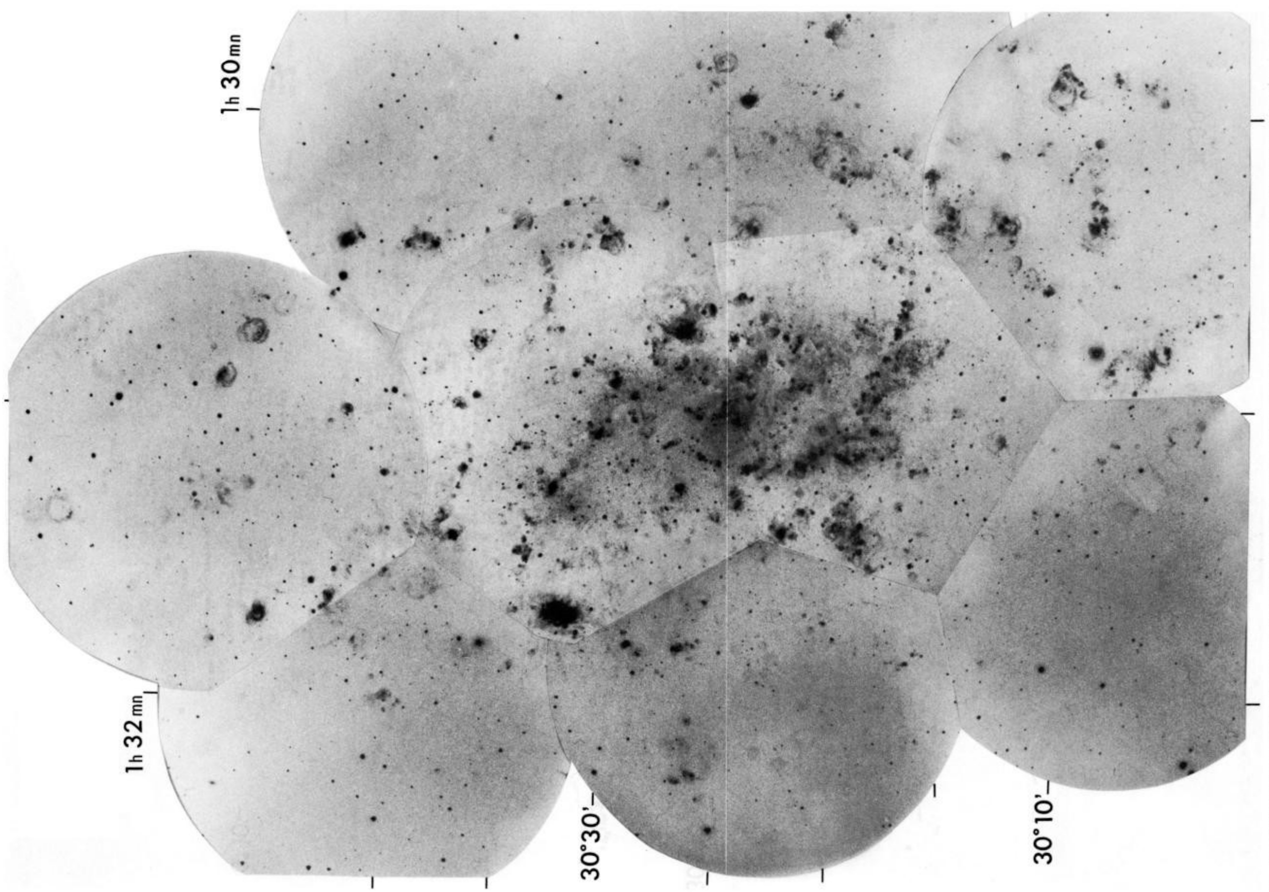


Fig. 1a. Overall view of the Hα photographic survey of M33 conducted at the 6-m telescope. The mosaic is constructed with all the photographs listed in Table 1, except frame n° 11. On the rims of the mosaic are indicated approximate 1950 equatorial coordinates

Astron. Astrophys. 174 (1987)
Springer International

F/1(!) observations 1979-1985

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

Фокальный редуктор Куртеса на БТА

Фото 4. Наблюдательная команда, выполнявшая на БТА обзор очаговзвездообразования в галактиках М31 и М33. Справа налево: "папаша" Ж. Куртес, С.Н. Додонов, П. Сиван, В.Л. Афанасьев, В.Е. Караченцева, А. Пети, И.Д. Караченцев и Ж. Булестекс.

"История САО РАН в фотографиях 1965-2010"

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)

$$f_{coll}>f_{cam}$$

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

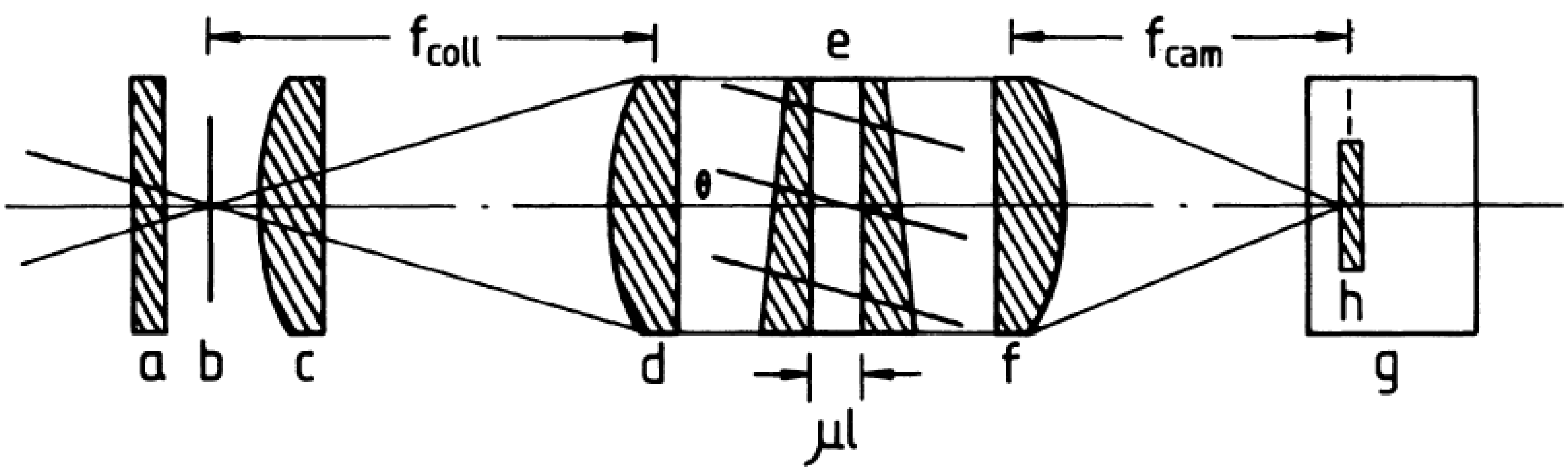


FIG. 1. Schematic drawing of an imaging Fabry–Perot interferometer comprising (a) interference filter, (b) focal plane, (c) field lens, (d) collimator lens, (e) Fabry–Perot etalon, (f) camera lens, (g) Dewar housing, (h) CCD.

Семейство многорежимных «камер слабых объектов»

- Массовое применение система Ричи-Кретьена – много преимуществ (компактность, широкое поле), но не очень высокая 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

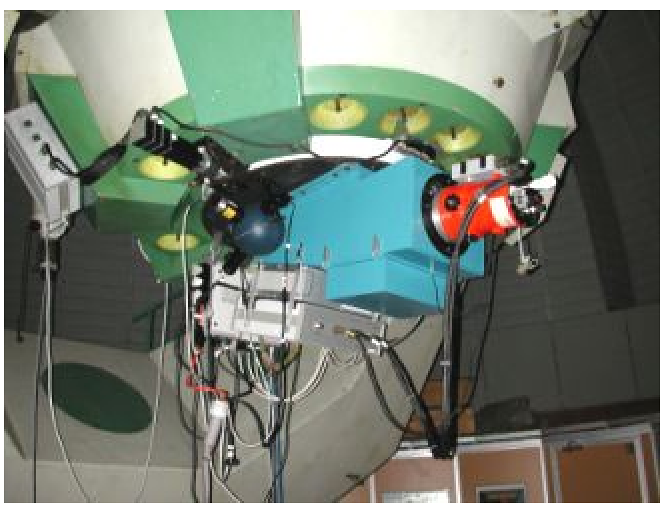
- Даже для ярких, но протяженных объектов – важно точно знать положение щели.

Семейство многорежимных «камер слабых объектов»

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

EFOSC2: 8 (!) режимов наблюдений (1997):

direct imaging,	imaging polarimetry,
long-slit,	spectropolarimetry,
slitless,	coronography,
echelle,	Multiple Object Spectroscopy



Современные приборы 2-10 м телескопов:

AFOSC (Asiago, 1.92m)

DFOSC (Danish 1.54 m)

TFOSC (RTT, 1.5m)

FORS-2 (VLT 8.2m)

DOLLORES (TNG 3.6 m).

VLT/FORS2: **FO**cal **R**educer and low dispersion **S**pectrograph

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

Spectroscopy:
13 grisms
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.

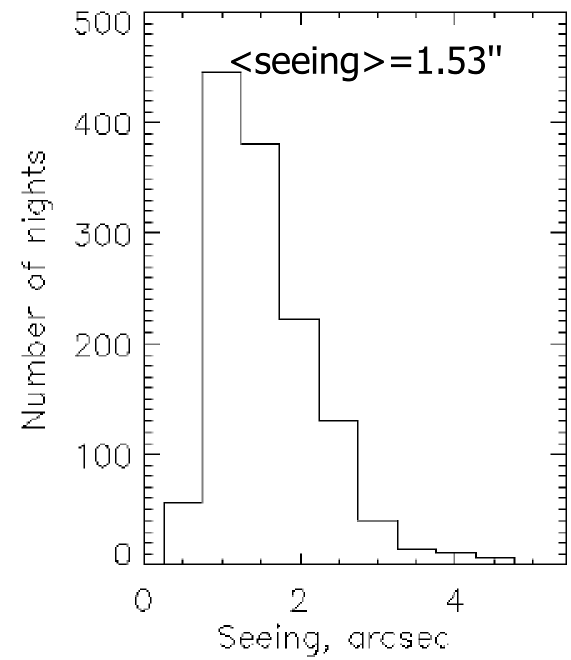
Scale: 0.25''/pixel and 0.125''/pixel
FOV: 6.8' x 6.8' and 4.25' x 4.25

Проблемы организационно-технические:

- На одну программу КТБТ НКТРТ 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"

(Панчук, Афанасьев, 2011, АБюлл, 66, 253

"Астроклимат Северного Кавказа - мифы и реальность")

А что же мы имели в САО к 2000 году?

1) ПЗС – фотометр: изображения в поле 3.5x3.5´

2) Мультиобъектный спектрограф MOFS: одновременная спектроскопия 75 объектов в поле 15´

3) Мультизрачковый спектрограф MPFS: спектры поля 16″x16″

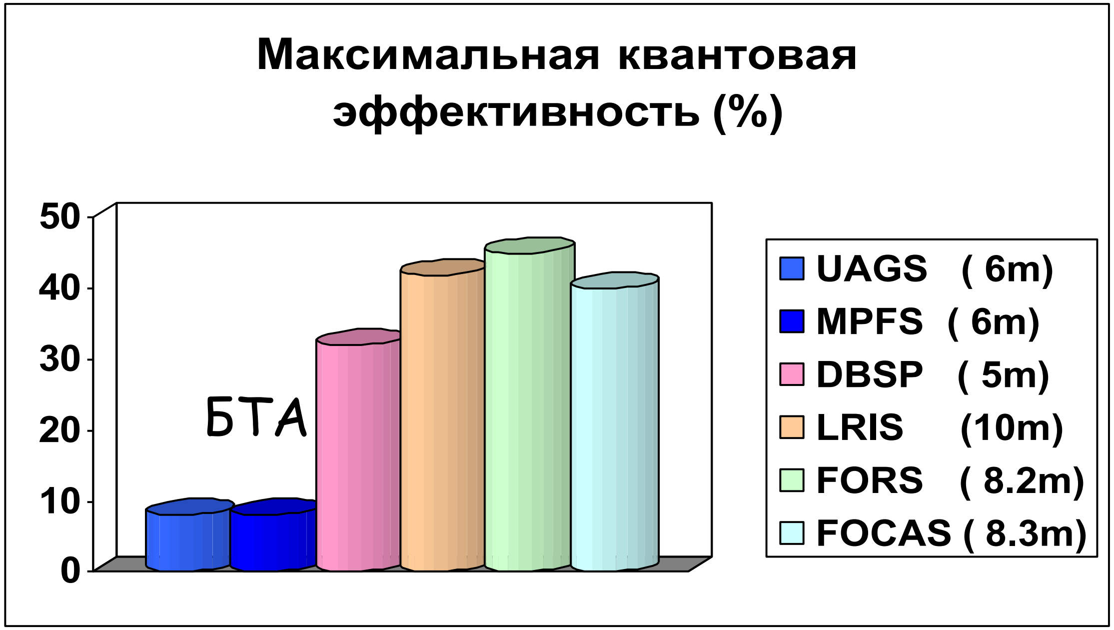
4) Спектрограф UAGS: спектры со щелью длиной 2´

5) Спектрограф умеренного разрешения в Несмит-1:
СП-124, позже перестроенный в «Краб»

6) Сканирующий Интерферометр Фабри-Перо: панорамная спектроскопия в узком спектральном интервале

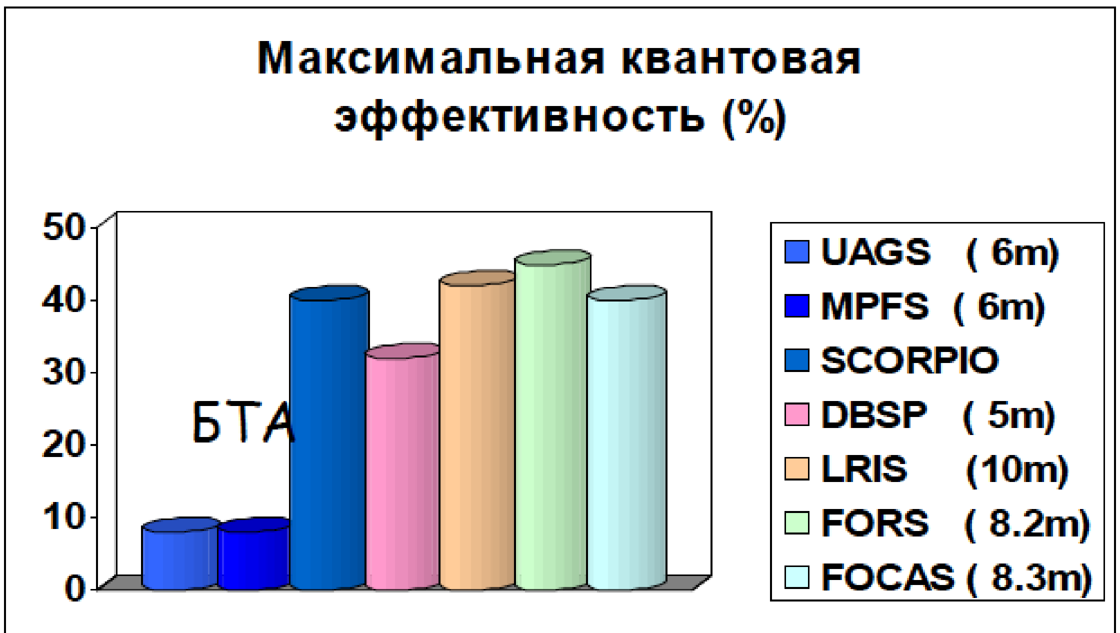
Недостатки прежних спектрографов низкого разрешения

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



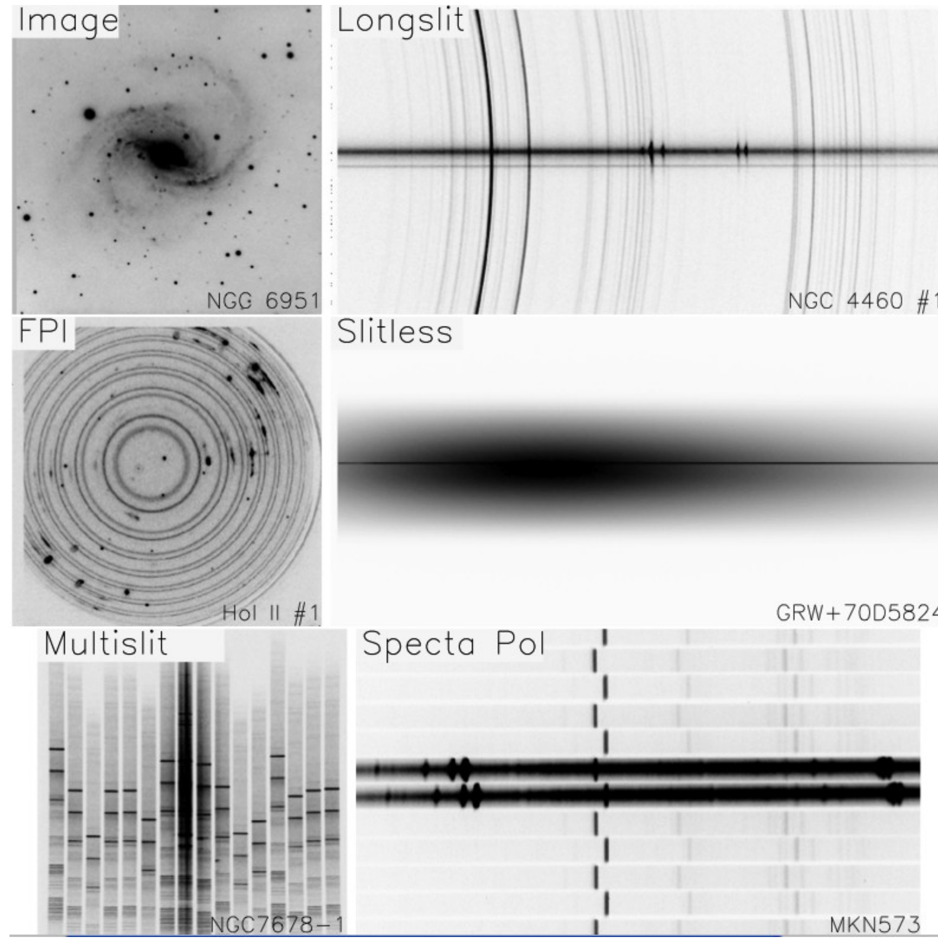
Недостатки прежних спектрографов низкого разрешения

- потери света на входной щели (колебания монтировки, 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



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

Афанасьев, Моисеев (2005),
Афанасьев и др. (2005)

SCORPIO: оптическая схема

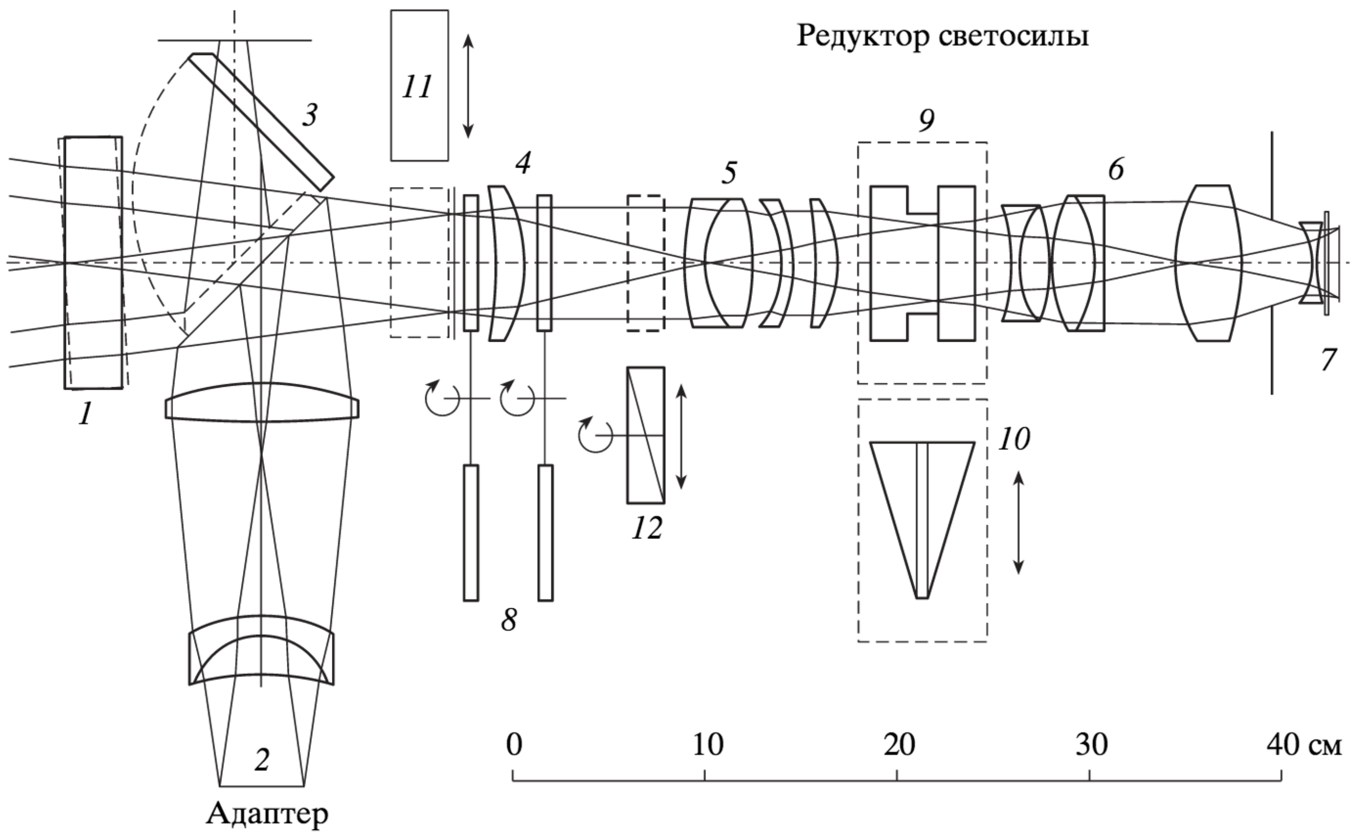
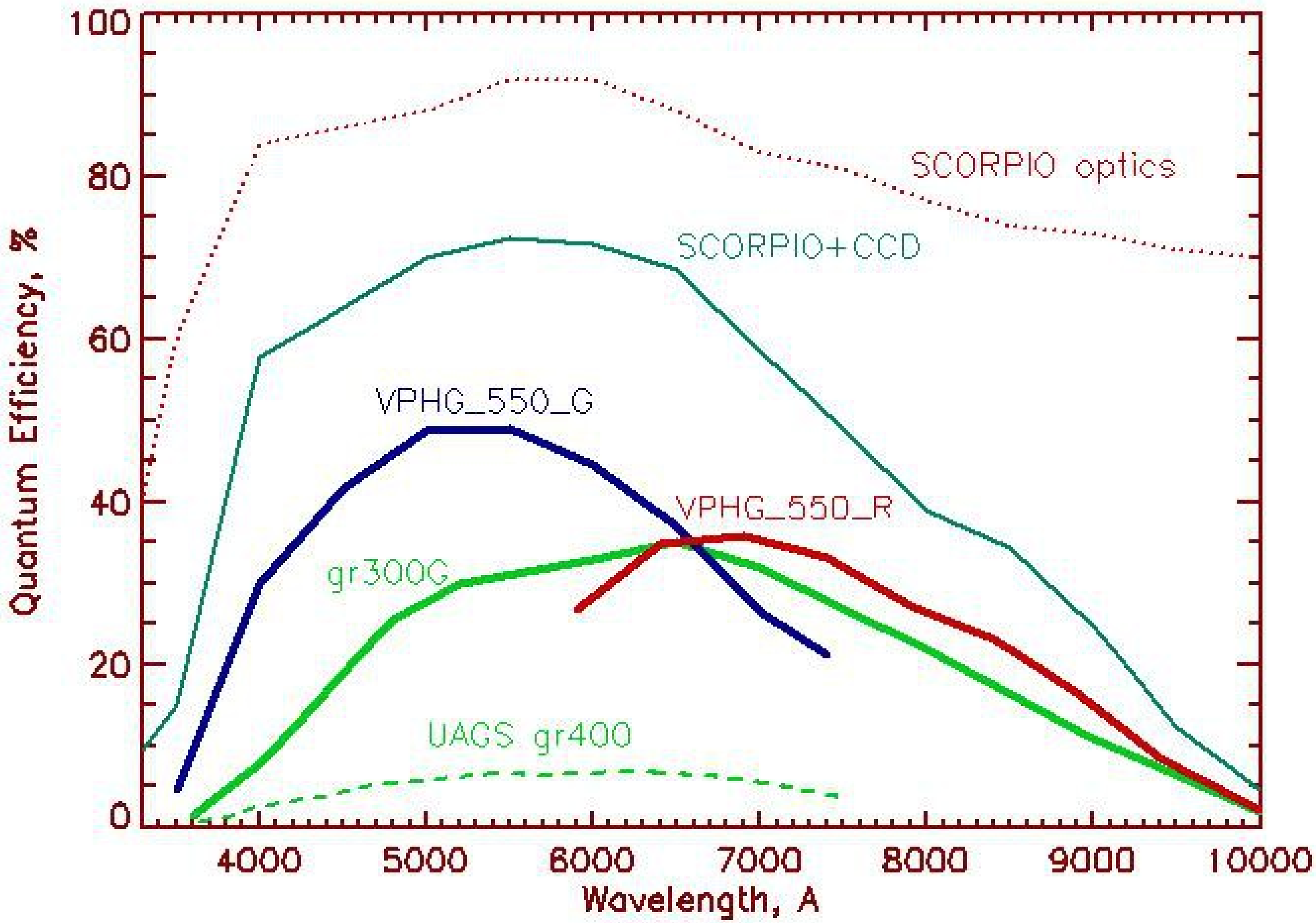


Рис. 1. Оптическая схема SCORPIO: *1* — наклоняемая пластина, *2* — оптика калибровки, *3* — плоское зеркало, *4* — полевая линза, *5* — коллиматор, *6* — камера, *7* — ПЗС, *8* — турели светофильтров, *9* — ИФП, *10* — гризма прямого зрения, *11* — многощелевой блок, *12* — анализатор поляризации.

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-1/2

- 1999. Армяно-Российско-Китайский проект – редуктор фокуса для среднеполосной фотометрии на 2.6 м телескопе, идея «клона» для САО
- В.Л. Афанасьев: «Проект SCORPIO” (техсовет, осень 1999 г.)
- Первые наблюдения в сентябре 2000 г.: хорошее качество звезд по полю, но спектры хорошо снимать только в центре поле зрения (проблема первоначального расчета оптики).
- 2003 г. Изготовление многощелевой приставки (мультислит).

Замена оптики – проблема остаточного астигматизма изображений, но значительно лучше спектральный режим

- 2004 г. Изготовление и испытание поляризационного блока
- 2007 г. – первые научные наблюдения со SCORPIO в удаленном режиме (гравлинза «Космическая подкова»)
- 2010 г. - первый свет SCORPIO-2
- 2019 г. - восстановление и модернизация старого SCORPIO (теперь это SCORPIO-1)

<u>Рабочая группа SCORPIO (-1):</u>

Афанасьев В.Л. - научный руководитель, расчет оптики

Веретенов 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 (maxQE=30%)

Ручная смена фильтров

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

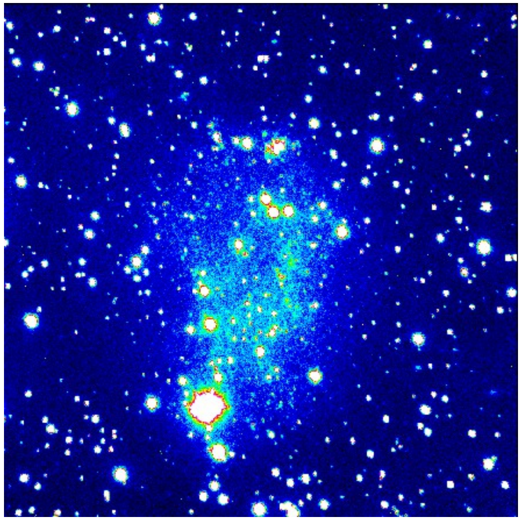
СТАЛО со SCORPIO:

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+Hα фильтры

СТАЛО со SCORPIO:

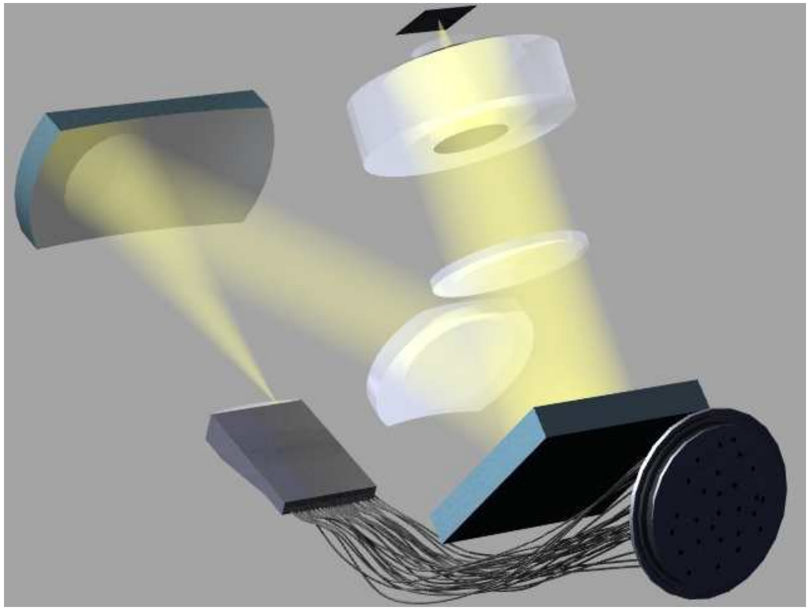
С той же ПЗС поле зрения больше в 1.5 раза

Больше оптики – больше бликов на очень ярких звездах

Сложнее «плоское поле»

Требования на фокусировку по полю

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



Мультиобъектный волоконный спектрограф MOFS

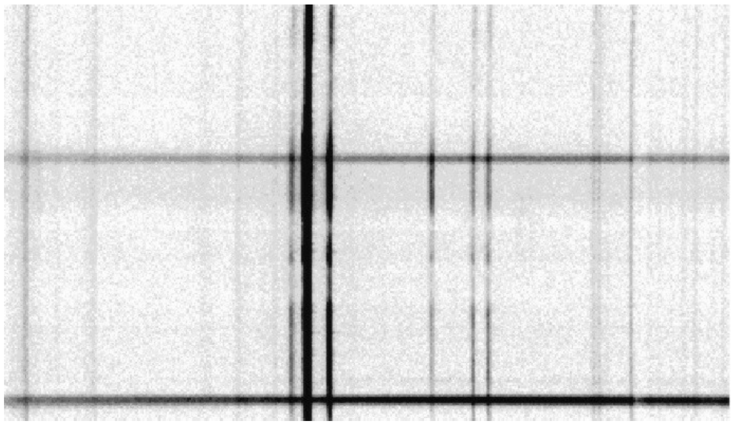
БЫЛО:

- 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

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 3х6′
- Оперативная расстановка щелей, вычитание фона

Светосильный спектрограф прямого фокуса (UAGS)



БЫЛО:

- maxQE=5-8%
- Нормальная ширина щели 2″ + возможность изменения
- Легко менять спектральный диапазон на одной решетке
- Сильное виньетирования 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 гризм (надо ехать на АП)
- Почти нет виньетирования, меньше рассеянный свет
- Анализатор – за щелью (что 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 гризм (надо ехать на АП)

Почти нет виньетирования, меньше рассеянный свет

Анализатор поляризации

Точная локализация щели

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
- не оптимальная широкощельность

Первопричины основных проблем SCORPIO-(1)

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 безаберрационную 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 22x22 элемента
- Повышенная «красная» чувствительность ПЗС

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

	SCORPIO	SCOPIO-2
Detector	EEV 42-40, $2K \times 2K$	E2V 42-90, $2K \times 4.6K$
Direct imaging: Max. filters positions Field-of-view	 10 (in two wheels) 6.1 arcmin	 27 (in three wheels) 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
Polarymetry	Savar plates, rotated in two positions	Single and double Wollaston prisms; apochromatic phase plates $\lambda/2$, $\lambda/4$; rotated analyser

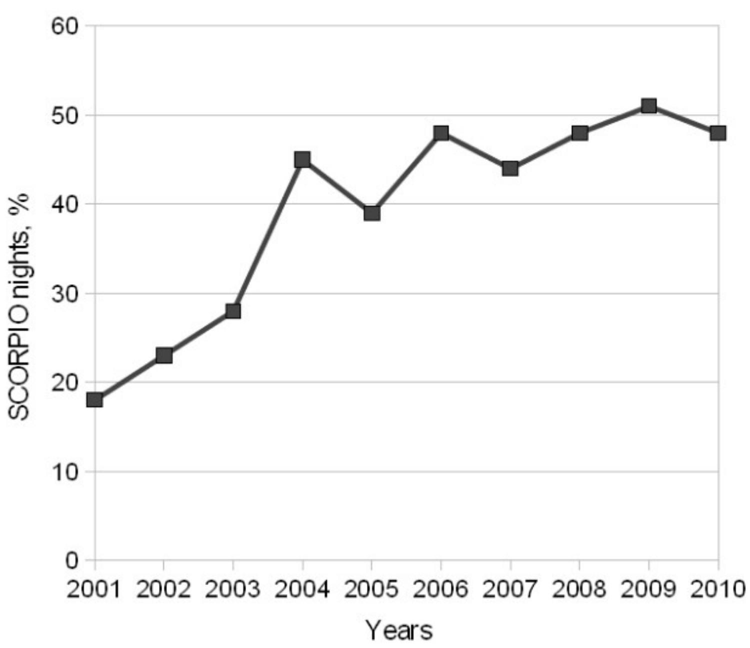
2010 г. – «первый свет»
2013 г. – начало официальной пробной эксплуатации на БТА
2020 г. - включение в циркулярное письмо НКТРТ

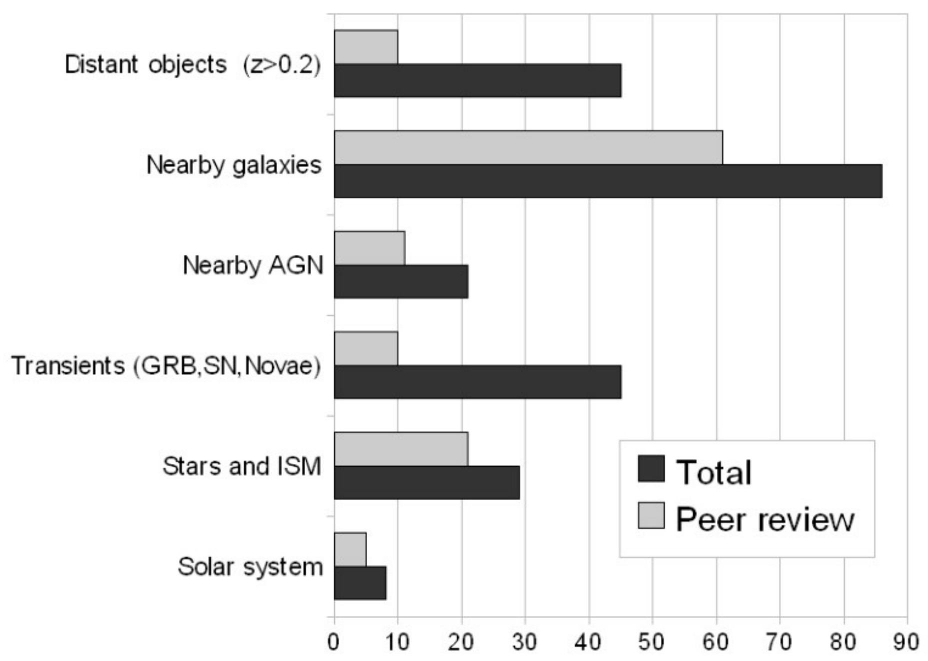
SCORPIO/SCORPIO-2 на БТА

- гибкое использование наблюдательного времени, выбор оптимального для текущей погоды режима
- Многократно выросла эффективность спектральных наблюдений (низкое разрешение)

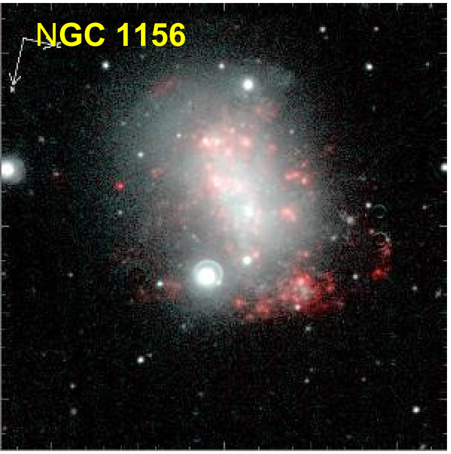
→ до 50-60 % всего наблюдательного времени БТА (солнечная система, звезды, галактики)

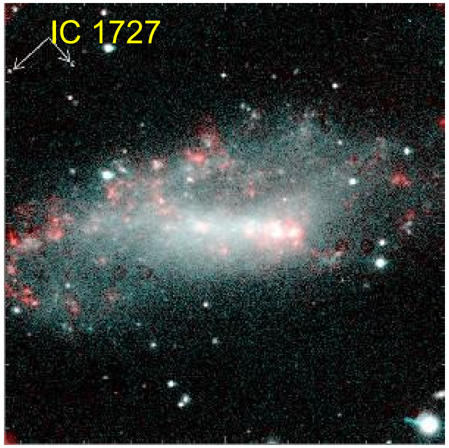
Afanasiev & Moiseev 2011

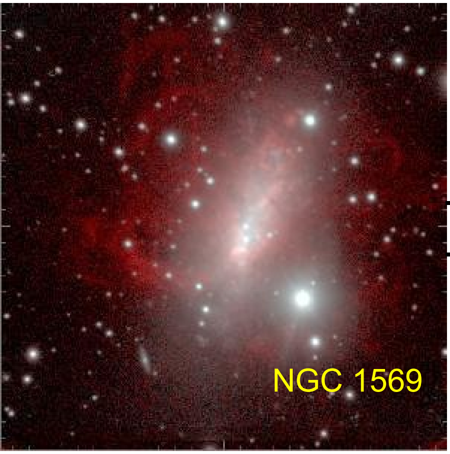




H-альфа обзор близких галактик

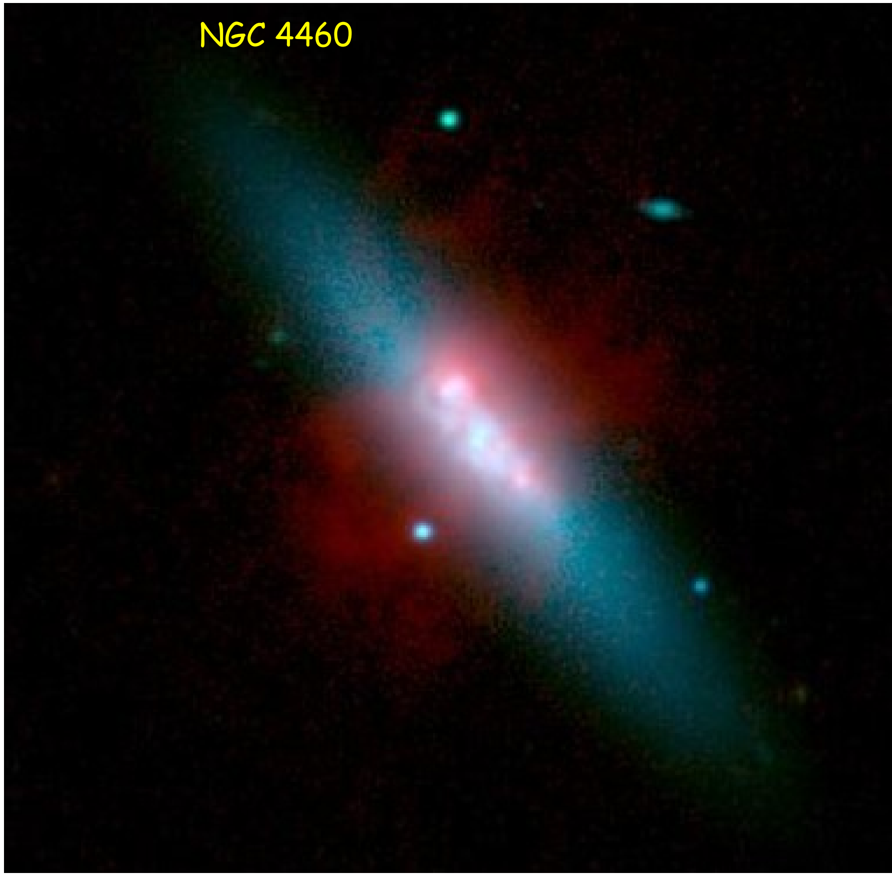






Hα изображения 161 галактики (37% всех данных для локального объема D<10 Мрс):

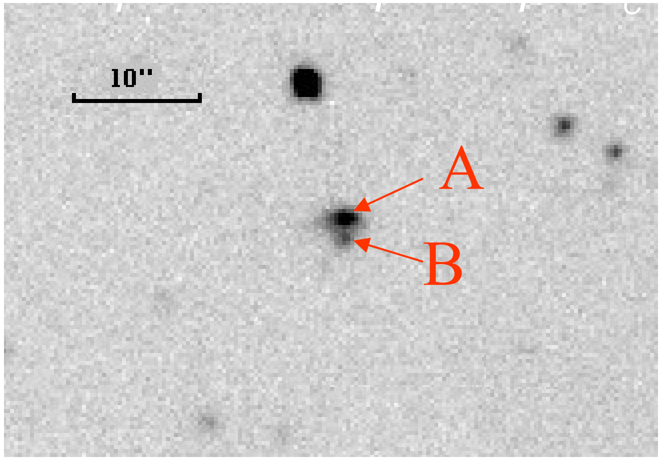
- Темп звездообразования
- Время исчерпания газа



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

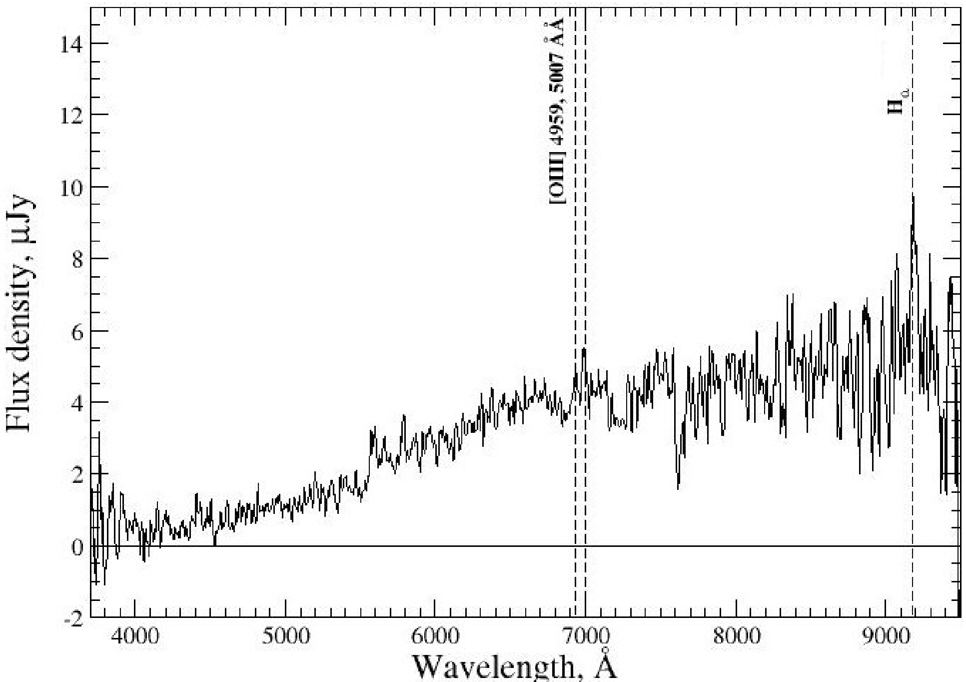
Superwind in NGC 4460: whereas gas in the circumnuclear disc is photoionized by radiation of young stars, the external regions of the Hα nebulosity are ionized by shocks. V≥ 130 km/s, SFR~0.3 Mo/yr (Moiseev et al., 2010)

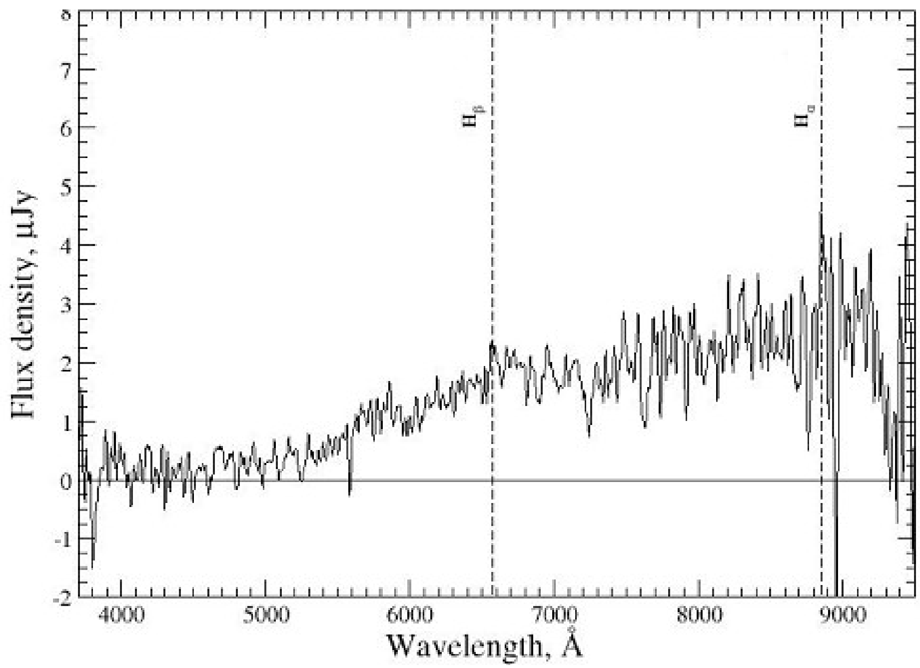
Спектроскопия слабых объектов



Спектроскопия вероятной родительской галактики «темного» гамма-всплеска GRB001109: T_{exp}=7200 s

(Фатхуллин, 2003)

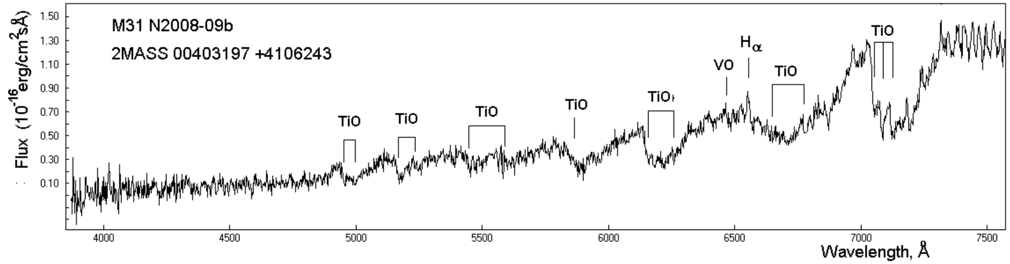


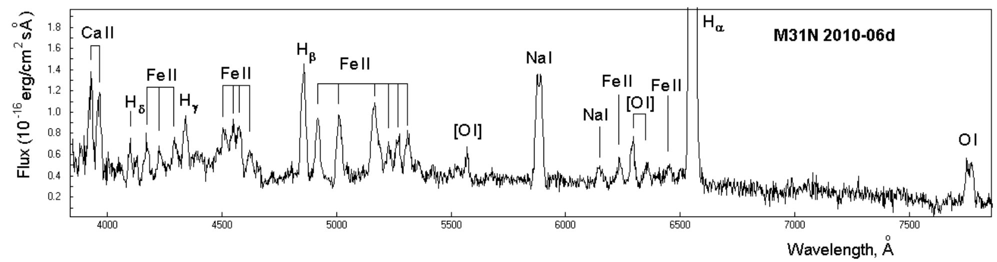


Спектроскопия транзиентных объектов

Novae in M31

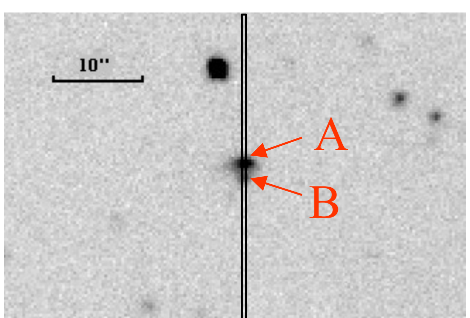
(Pietsch et al., Barsukova et al . 2007-2011)

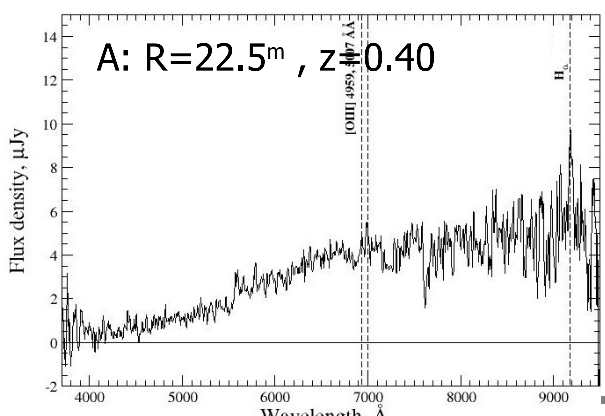


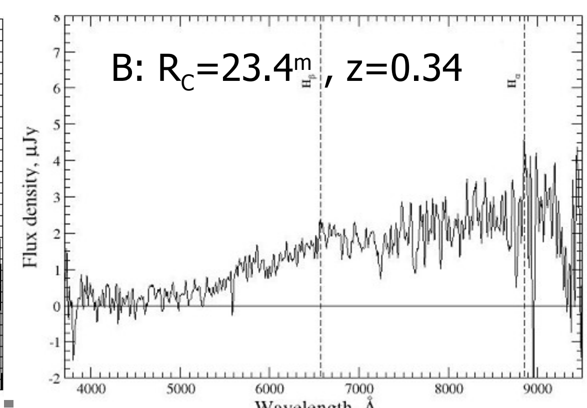


Distant supernovae associated with gamma-ray bursts, GRB host galaxies:
Moskvitin et al. (2010)
Roy et al. (2011)
Castro-Terado (2008)

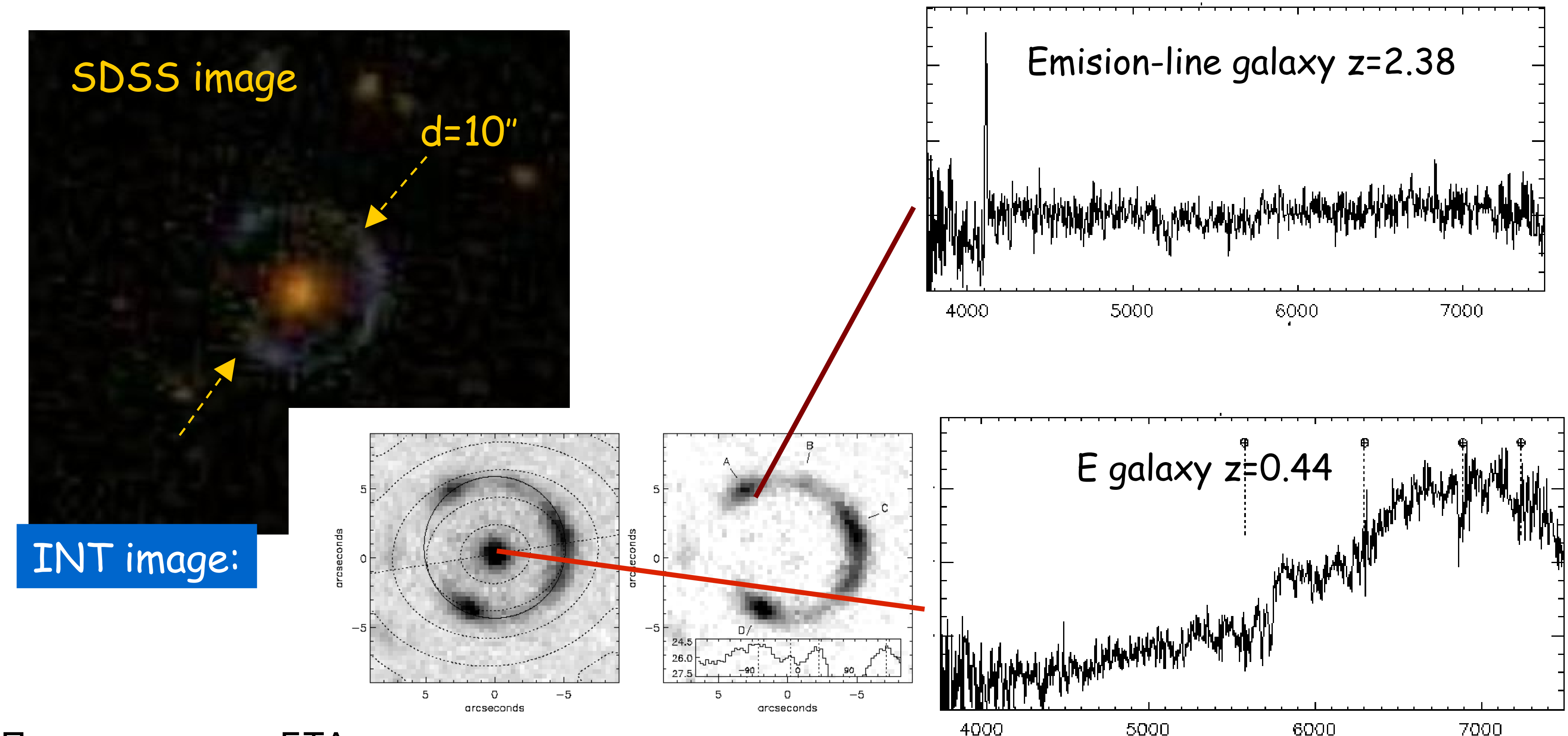
Host galaxy of the 'dark' GRB001109: (T_{exp}=2h, *Fatkhullin, 2003)*







Гравлинза «Космическая подкова»

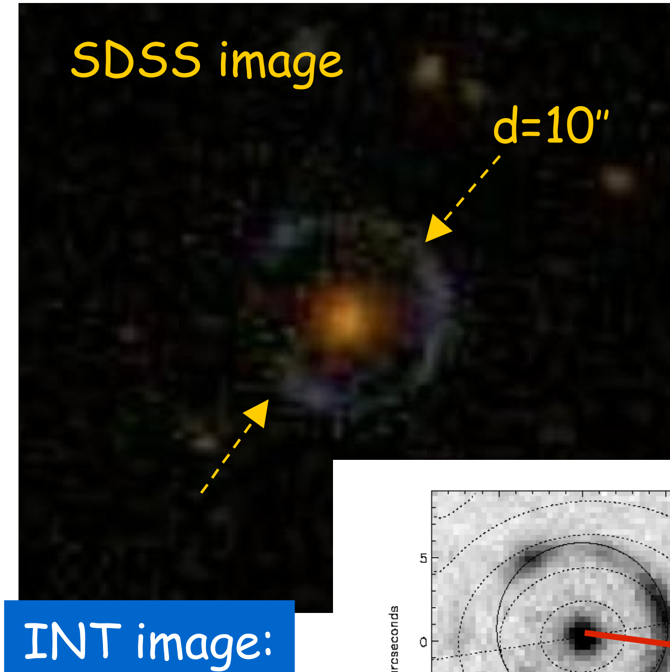


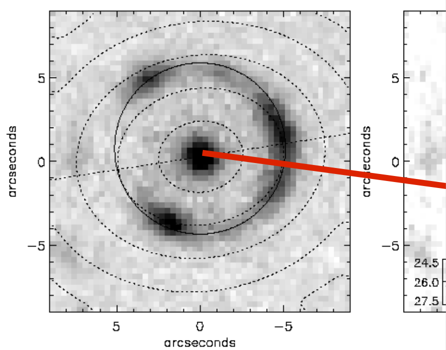
Проведенная на БТА спектроскопия показала, что обнаруженный в обзоре SDSS гравитационная линза обладает уникальными характеристиками:

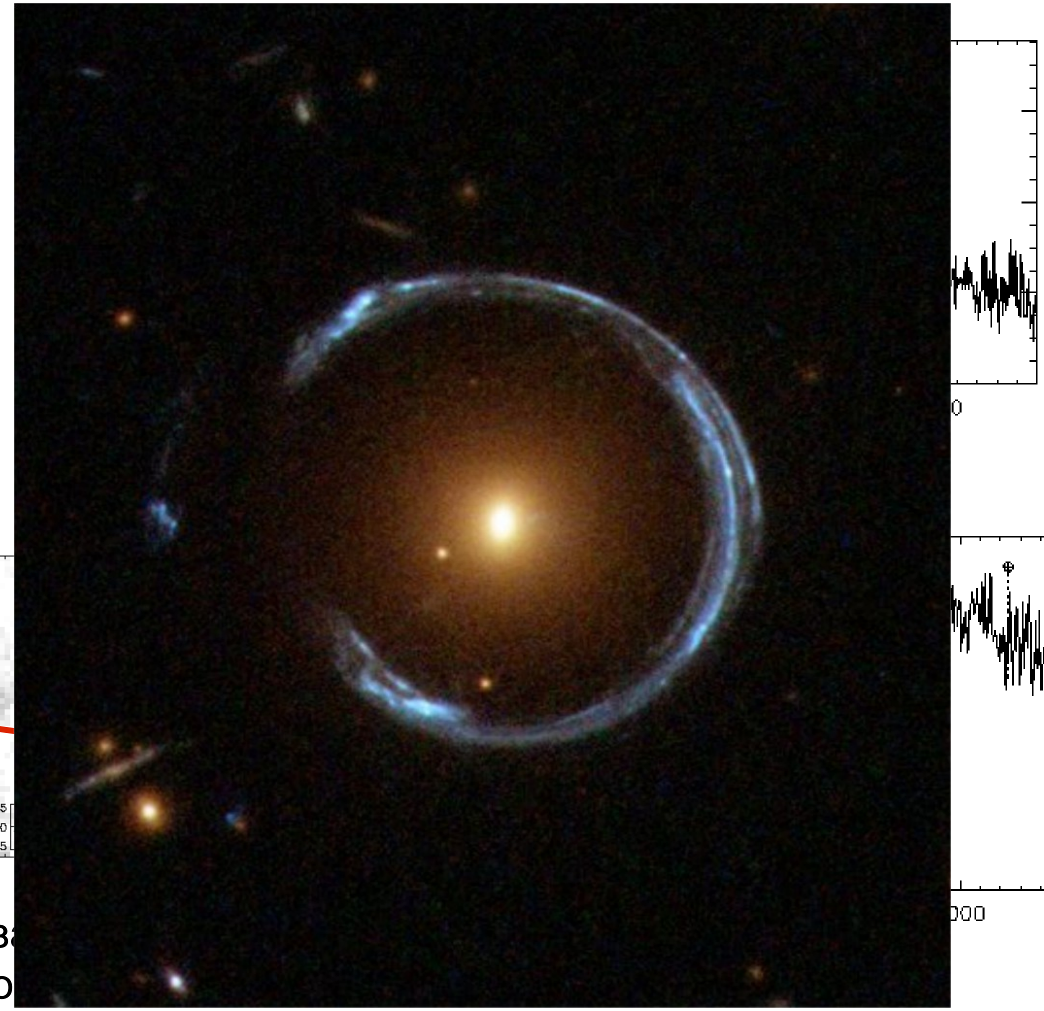
диаметр кольца Эйнштейна: 10”
фактор усиления: 35-50 раз

Belokurov et al (2007)

Гравлинза «Космическая подкова»





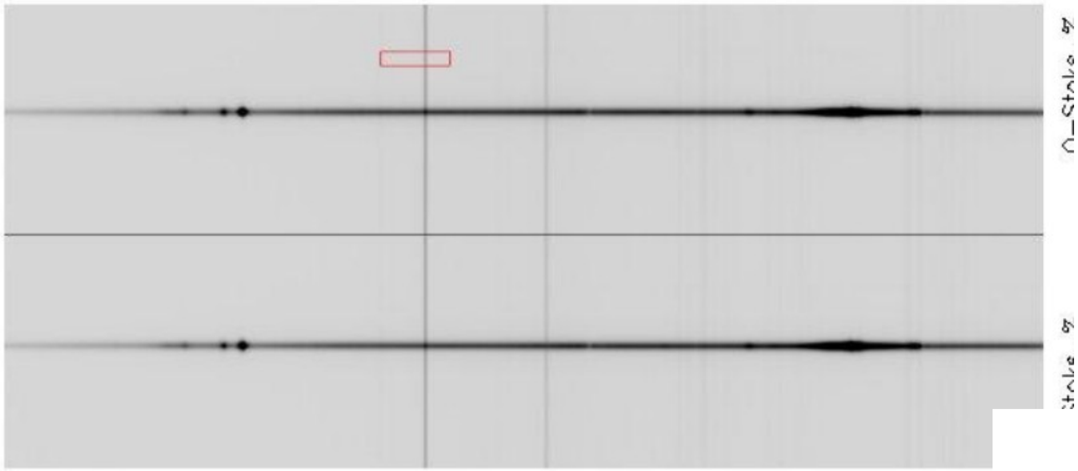


Проведенная на БТА спектроскопия показа
обнаруженный в обзоре SDSS гравитацио
обладает уникальными характеристиками:

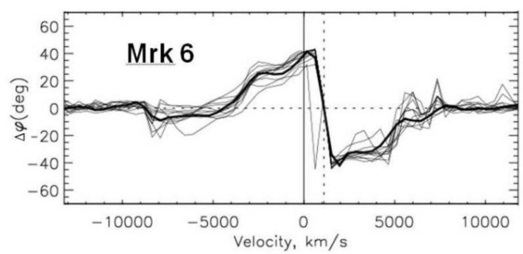
диаметр кольца Эйнштейна: 10"
фактор усиления: 35-50 раз

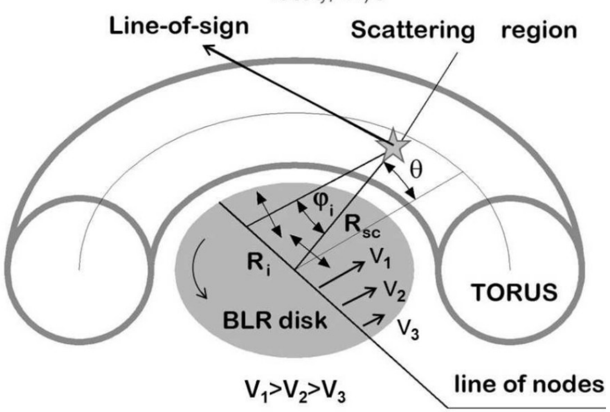
Belokurov et al (2007)

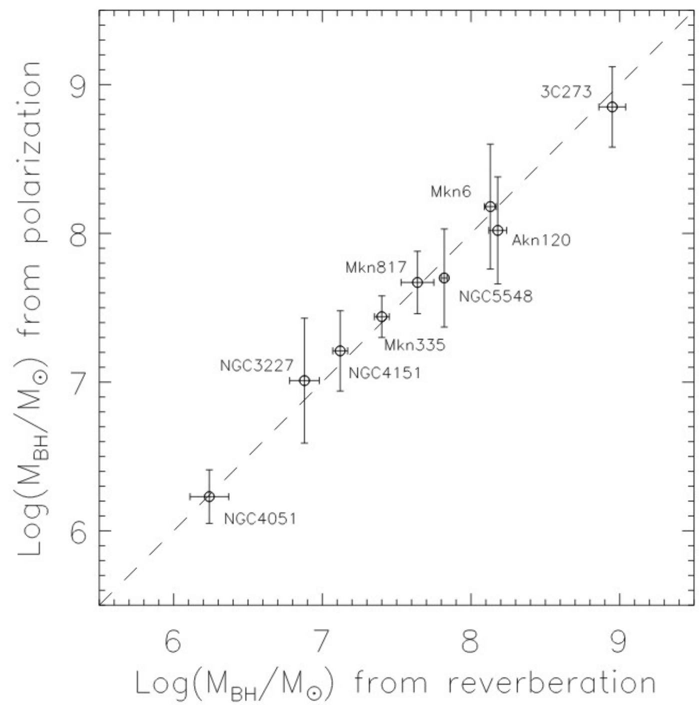
Спектрополяриметрия AGN: измерения масс ЧД

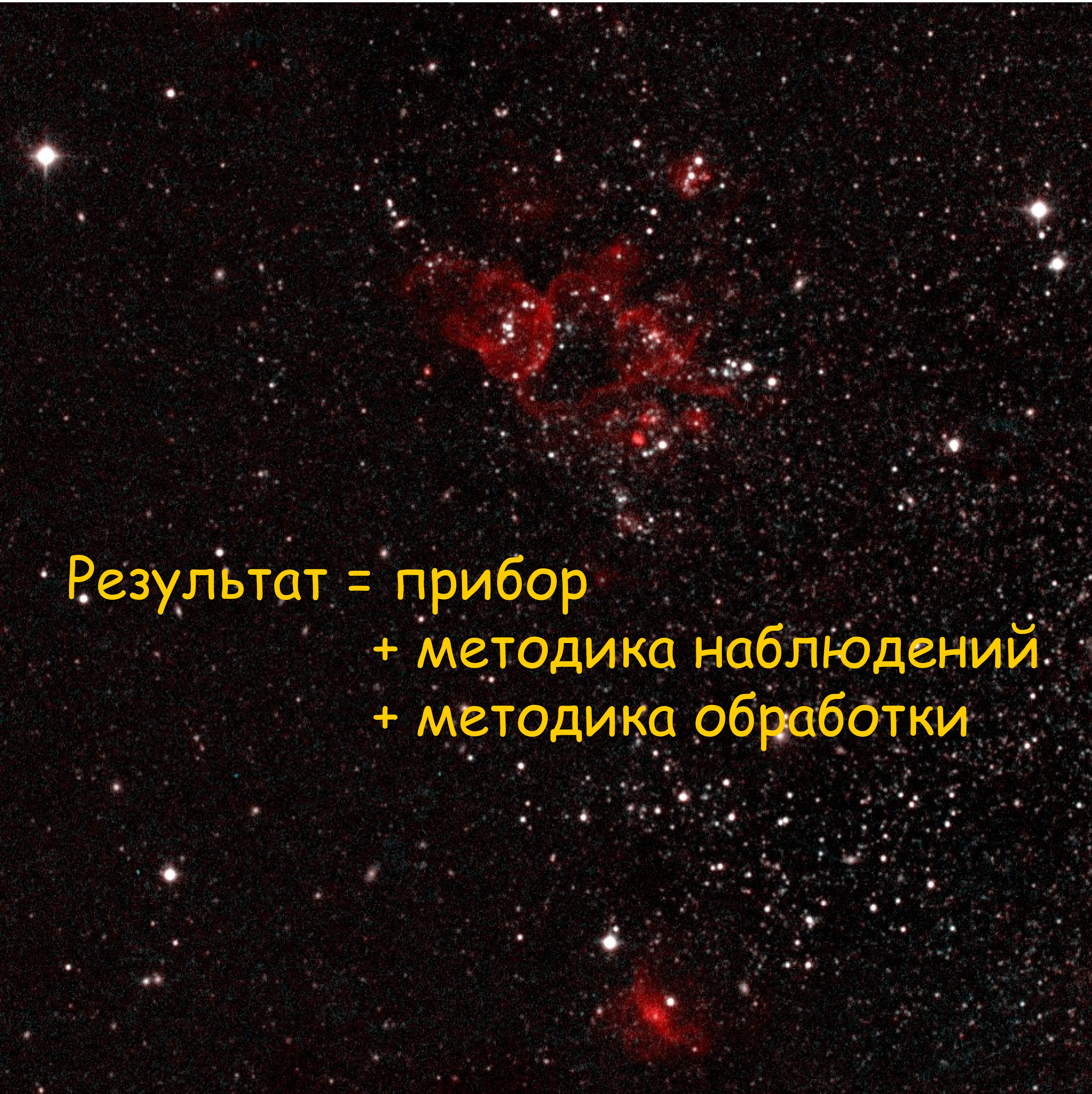


Новый метод измерения масс черных дыр в ядрах галактик:
Afanasiev et al 2014
Afanasive & Popovic 2015









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

«SCORPIO: руководство пользователя», на его веб-страничке (там же и статьи): https://www.sao.ru/hq/lon/SCORPIO/scorpio.html

1) Afanasiev V.L., Moiseev A.V., 2011, Baltic Astronomy, 20, 363
2) Щеглов П.В. «Проблемы оптической астрономии», Москва, «Наука», 1980

Сами лекции тоже будут выставляться на моей личной странице: https://serv.sao.ru/hq/moisav/