

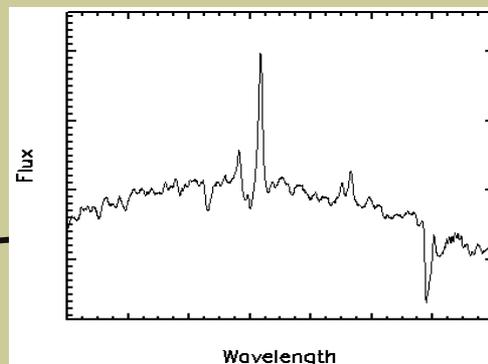
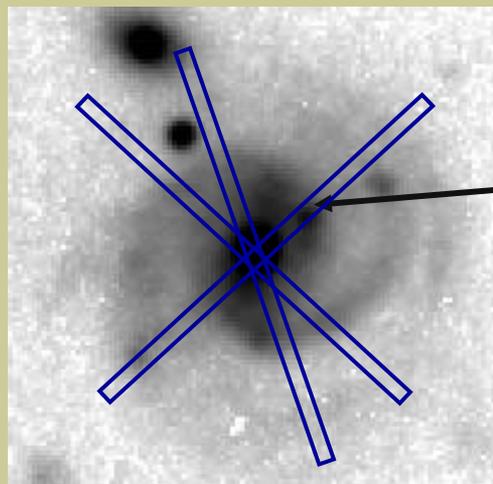
Методы панорамной спектроскопии

Лекция 2.

Мультизрачковые спектрографы, комбинация линза-волокно. Методы изучения параметров звездного населения галактик (кросс-корреляционная техника, ликские индексы, LOSVD, подгонка спектров). Спектрографы TIGER, SAURON, MPFS, PMAS, VIMOS, SCORPIO-2/IFU.

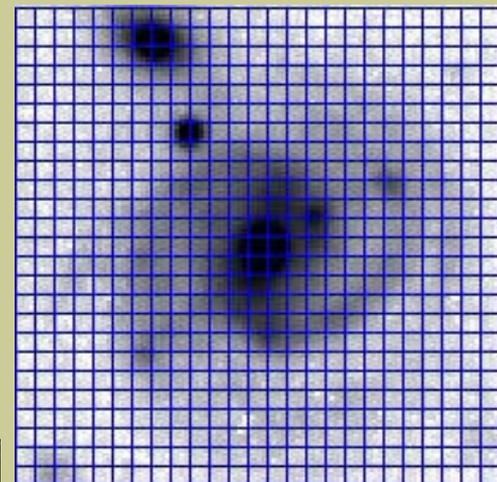
Сравнение щелевой и панорамной спектроскопии

(длинная щель)

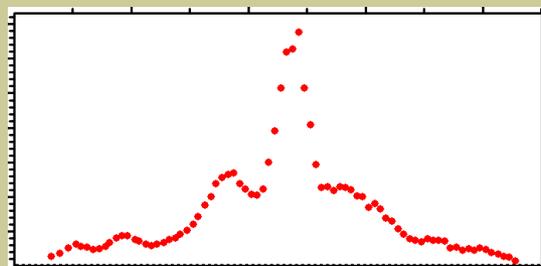


Монохроматическое изображение

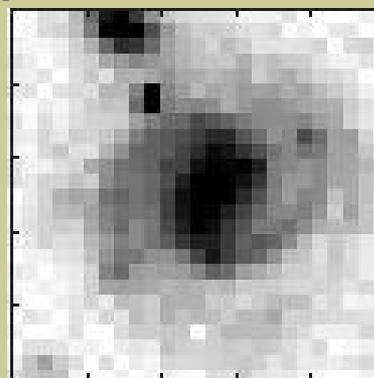
3D



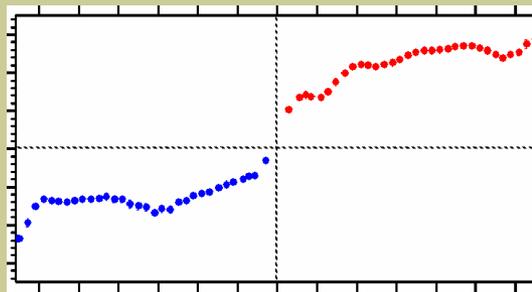
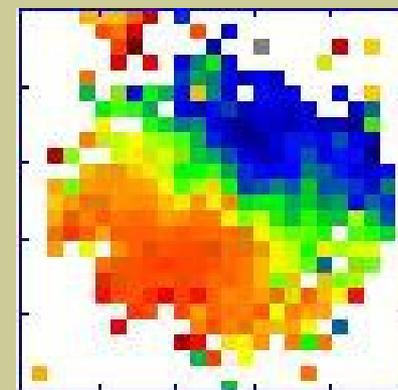
Потоки в линиях



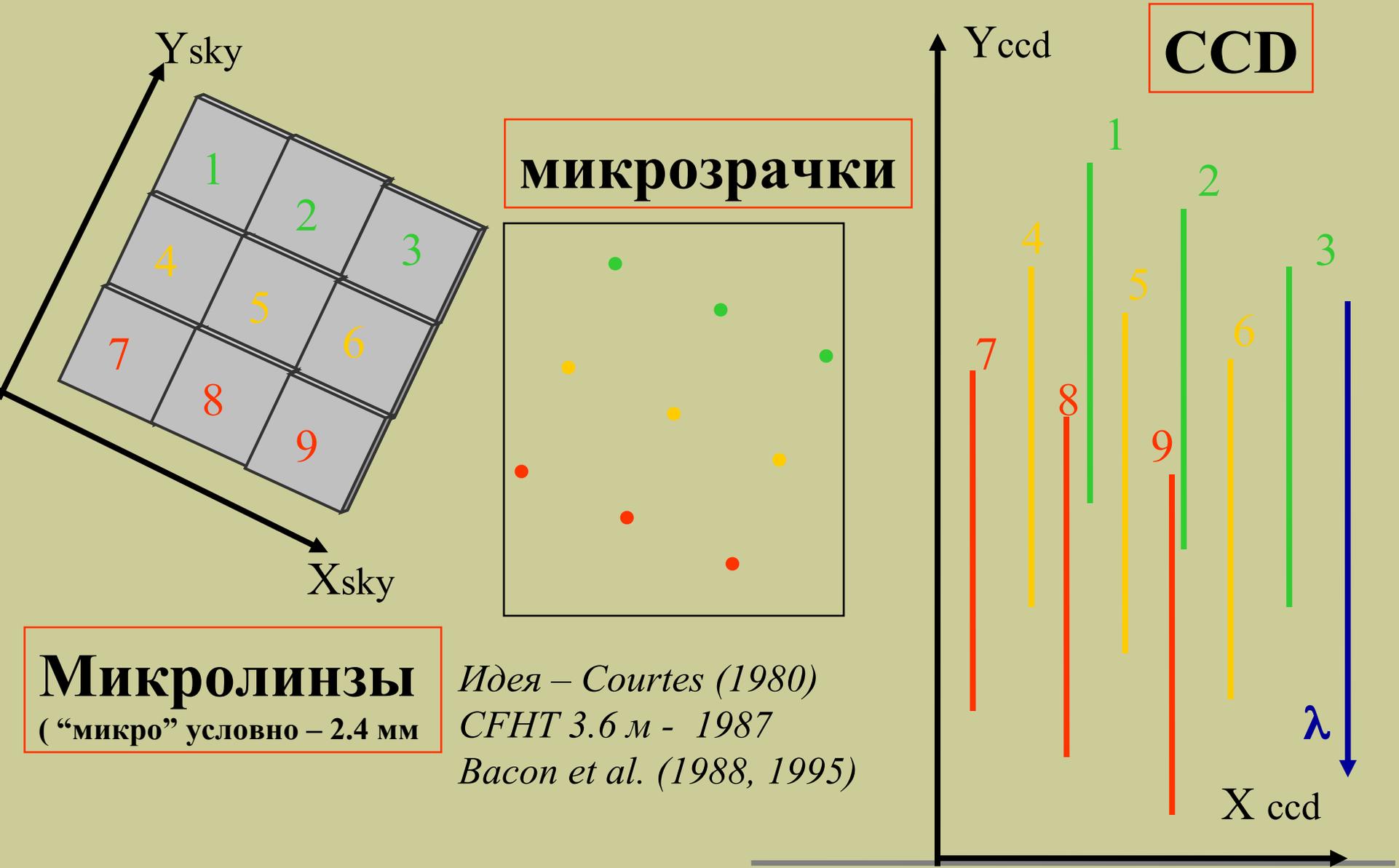
Лучевые скорости



Поле скоростей



TIGER: Traitement Intégral des Galaxies par l'Etude de leurs Raies



Микролинзы
(“микро” условно – 2.4 мм)

микрочапки

CCD

*Идея – Courtes (1980)
CFHT 3.6 м - 1987
Vacon et al. (1988, 1995)*

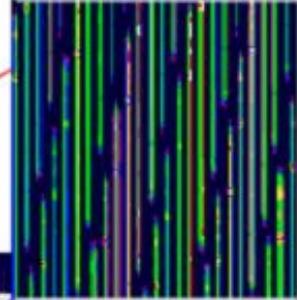
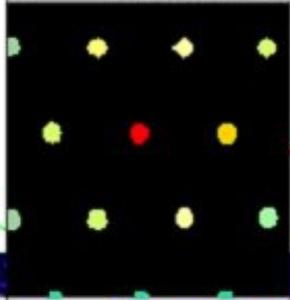
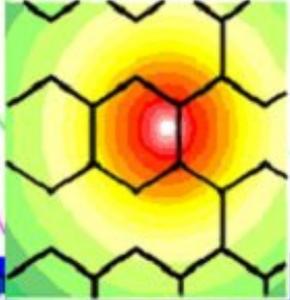
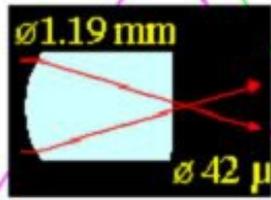
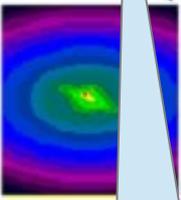
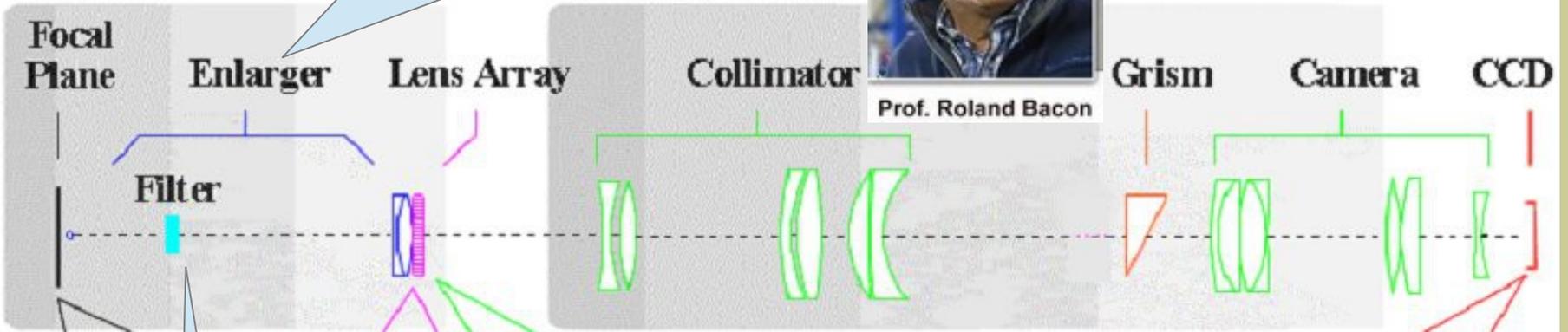


TIGER MODE OPERATIONAL LAYOUT



Prof. Roland Bacon

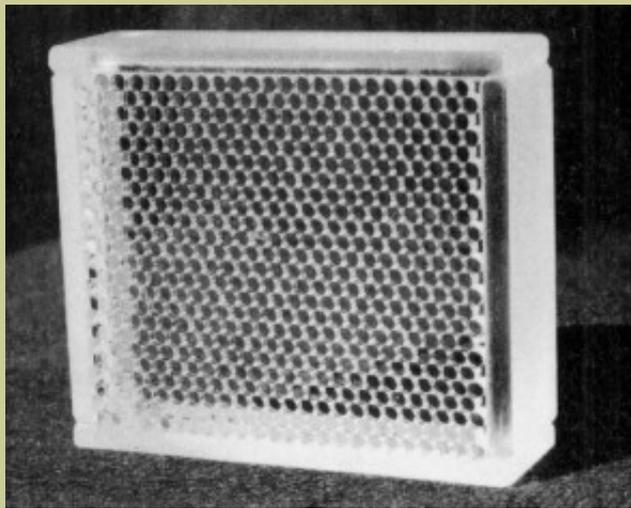
x10-x20, размер линзы 1-2 мм



сп. диапазон

Bacon et al. (1995)

TIGER at CFHT (Bacon + 1995) – описание и результаты



Mode	Spatial sampling	Field of view
Imaging	0.16 arcsec	40 × 40 arcsec ²
Spectrographic	0.39 arcsec	7 × 7 arcsec ²
Spectrographic	0.61 arcsec	10 × 10 arcsec ²
Spectral resolution	Central wavelength	Wavelength range
1300	5010 Å	540 Å
1400	5330 Å	540 Å
1800	6850 Å	540 Å
370	6320 Å	2400 Å
540	7575 Å	2400 Å

Черная дыра в Андромеде (seeing~0.9")

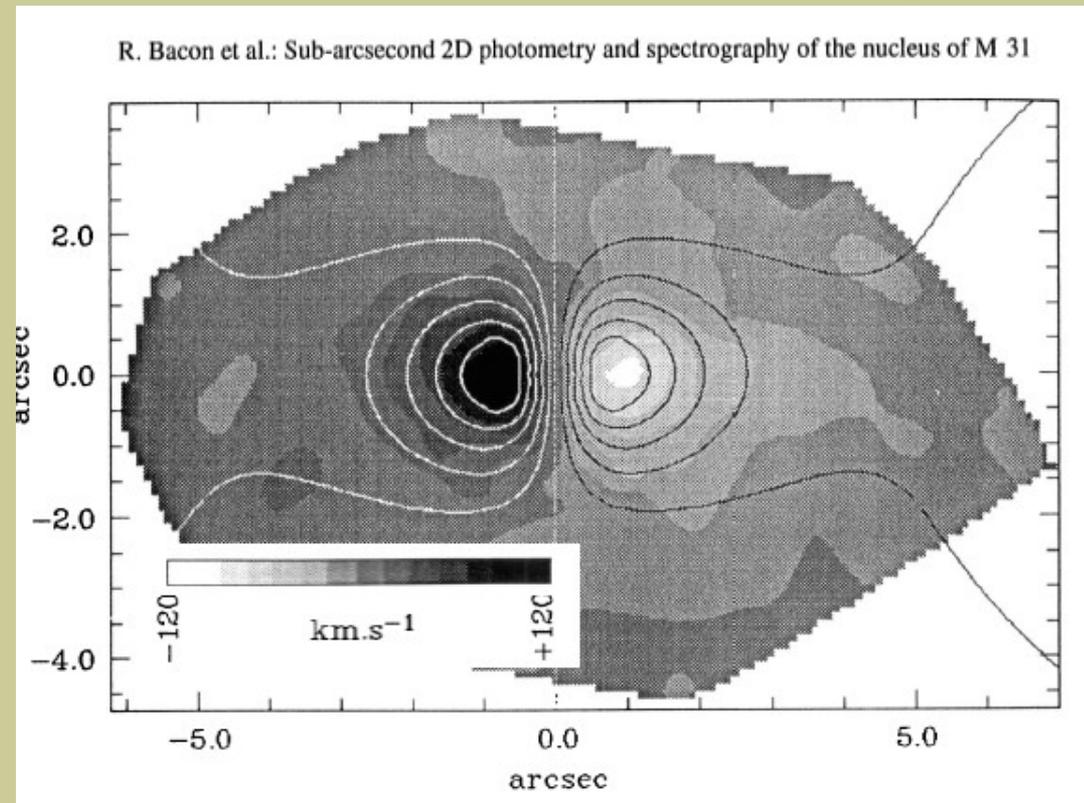


Fig. 24. Stellar velocity field of the anisotropic model with a $7.2 \cdot 10^7 M_{\odot}$ supermassive black hole (isove-locities) compared to the observed one (grey level). Isovelocity step is 20 km.s^{-1}

Геология Марса (!)
Динамика галактик
Сейферта, QSO, радиогалактики..

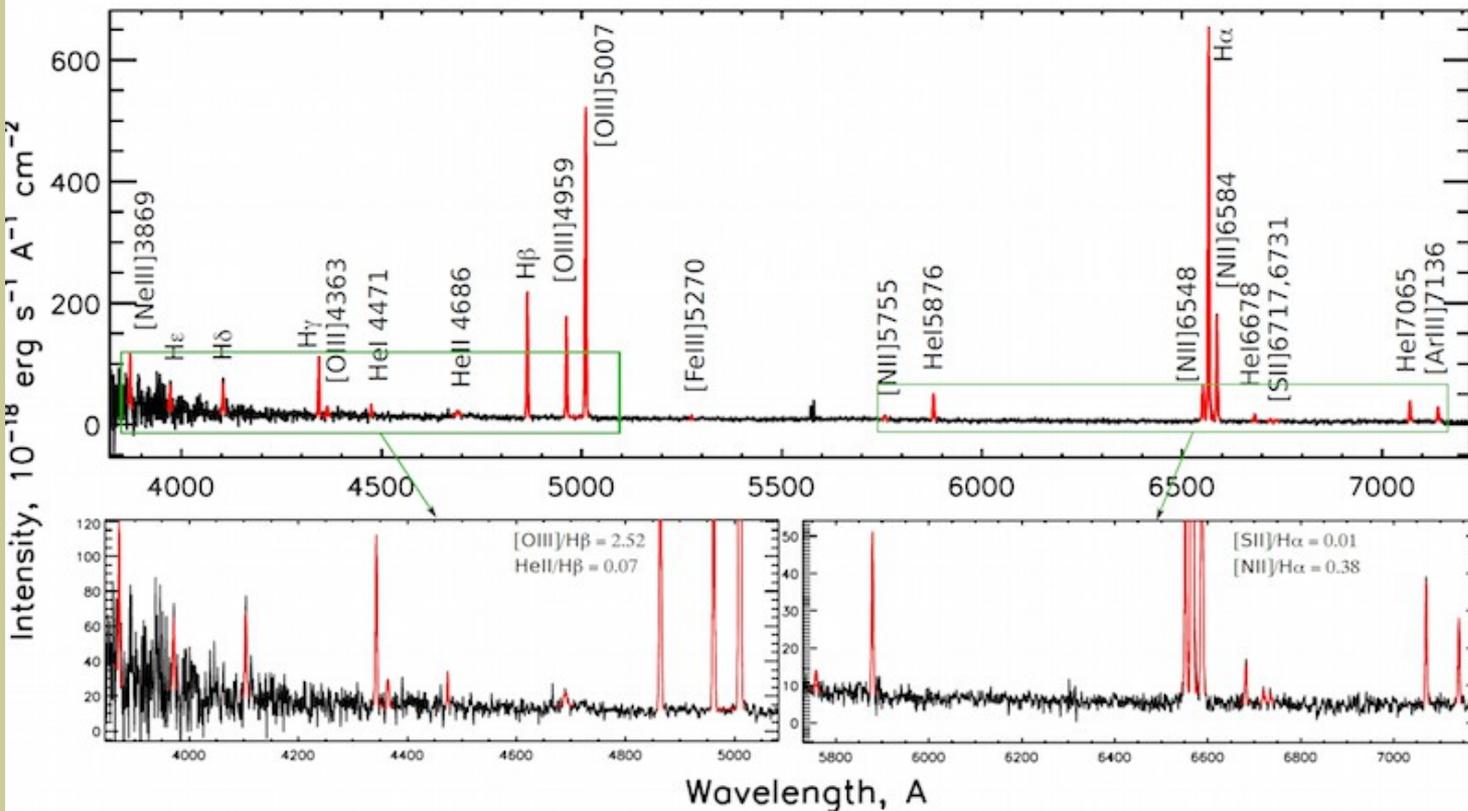
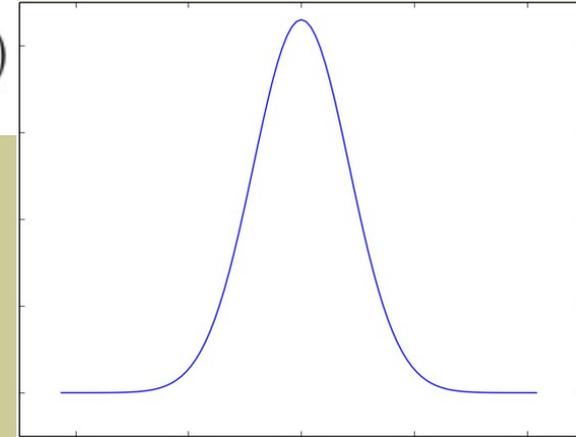
Bacon et al.
(1994)

Кинематика газа

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Гауссиана – хорошо работает в очень многих случаях:

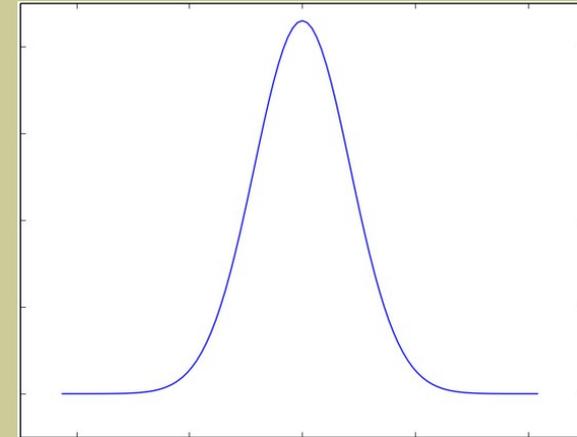
- хорошо приближение инструментального профиля
- тепловое уширение линий
- уширение случайными движениями газовых облаков



Об отличиях от Гаусса – на следующей лекции

Дисперсия скоростей

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$



$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \approx 2.3548\sigma$$

Если **все профили гауссовские**, то легко учитывается уширение инструментального профиля (определяем по линиям неба или лампы спектра сравнения):

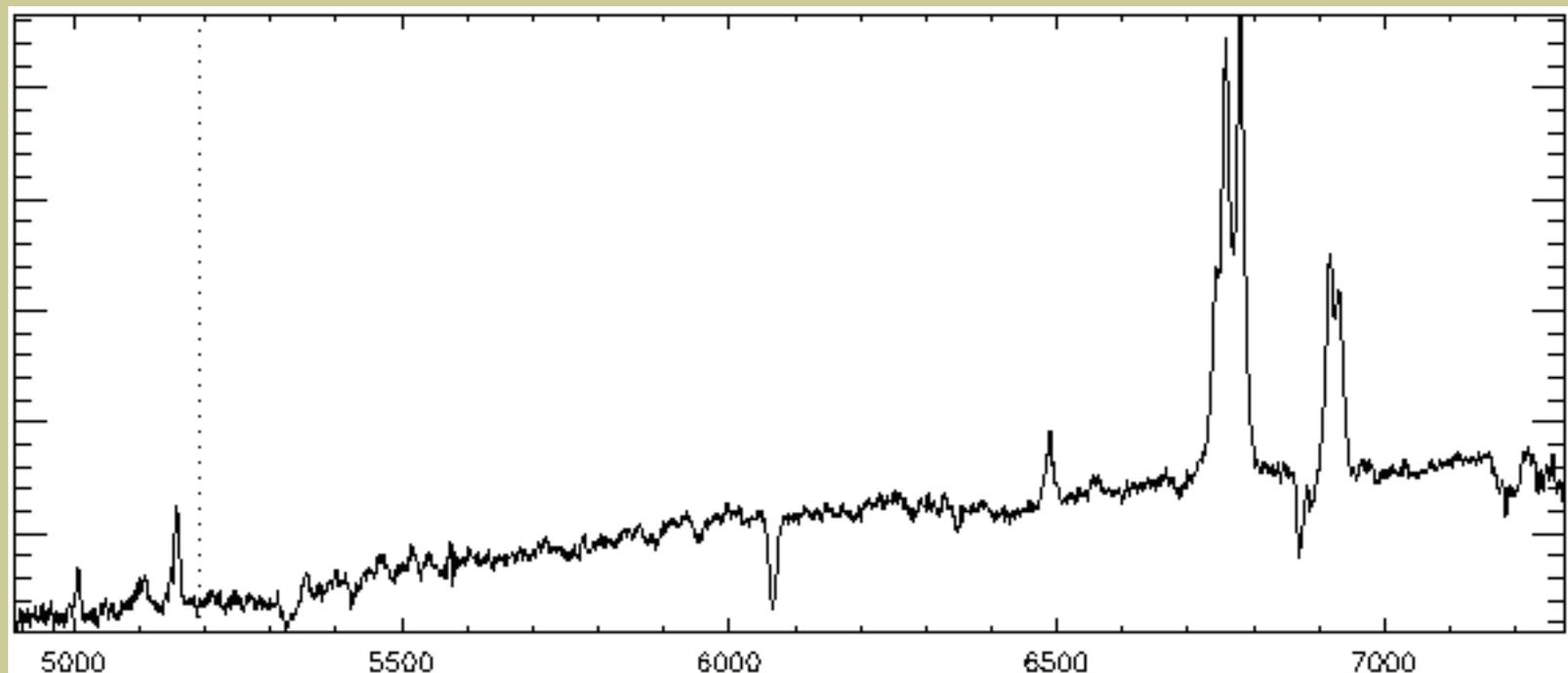
$$\sigma_{real} = \sqrt{\sigma_{obs}^2 - \sigma_{instr}^2}$$

Калибровочный спектр подходит, только в случае телецентрической засветки (ход лучей тот же, что и для объекта!)

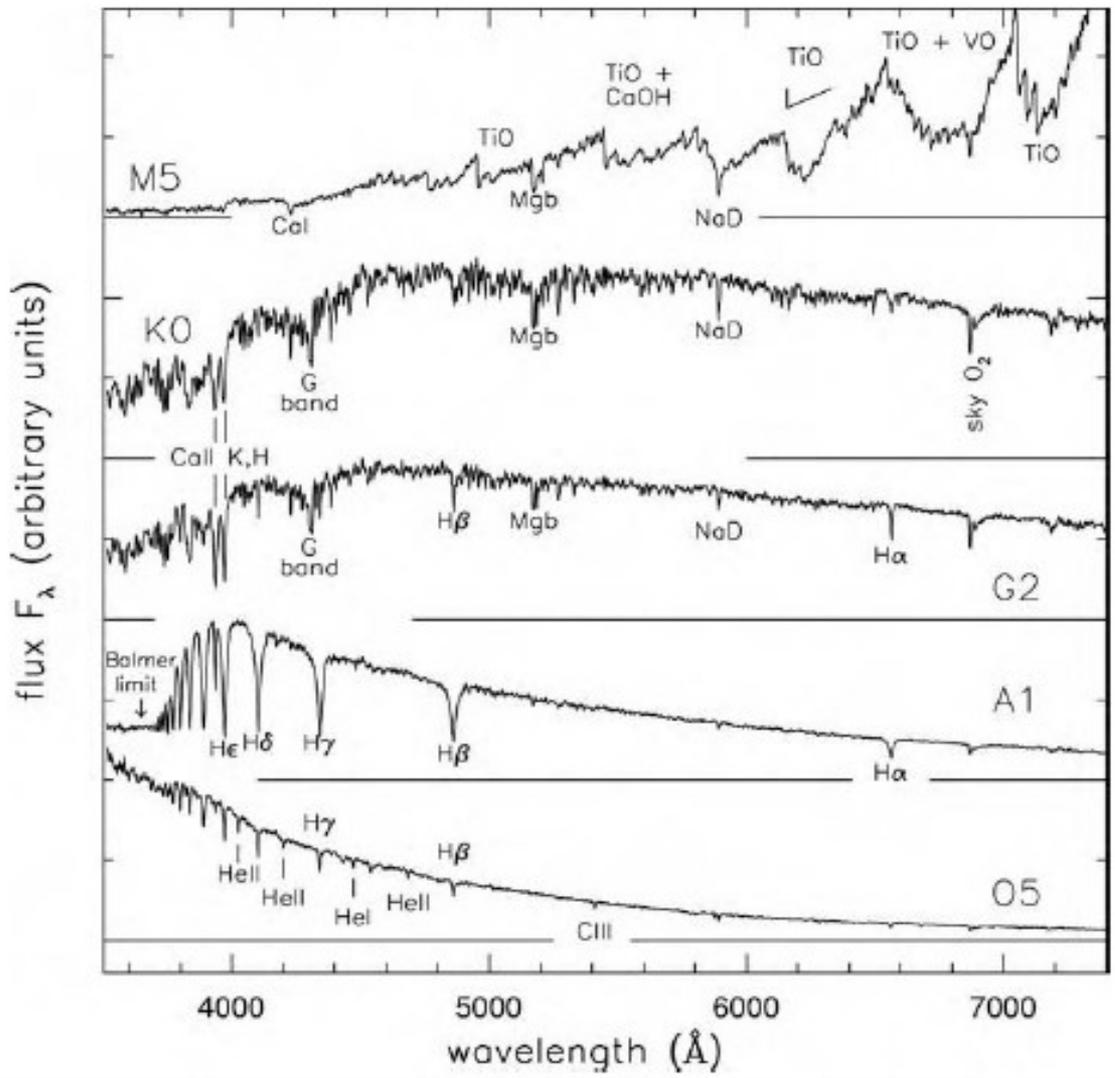
Проблемы со звездами при низком ($R = \lambda/\delta\lambda < 1000-5000$) разрешении в оптическом диапазоне

Эмиссии газа: линий не очень много, бленды ($\text{H}\alpha + [\text{NII}]$, $[\text{SII}]$) легко разделяются, ширины за пределами ядра не очень велики ($\sigma < 50$ км/с)

Звездные абсорбции: много сливающихся линий, бленды даже на высоком разрешении, которое и не очень помогает, так как заметное уширение (луч зрения проходит через толстый диск, балдж), $\sigma > 100$ км/с



Прямая подгонка: популяционный синтез



Суммарный спектр без учета кинематики:

$$S_{\lambda}(t, Z) = \int_{M_{\text{low}}}^{M_{\text{up}}} S_{\lambda}(M, t, Z) \Phi(t, M) dM$$

SED of a star
(spectral energy distribution)

IMF
(mass function)

Методы определения параметров звездного населения

1) **Раздельно**, используя разные техники:

Кинематика (v , σ) – кросс-корреляция с шаблоном

Возраст (T), металличность (Z) – по моделям ликских индексов

2) **Прямая подгонка** наблюдаемого спектра моделью звездного населения с учетом line-of-sight-velocity-distribution (LOSVD):

Кинематика: v , σ , h_3 , h_4 , шварцшильдовские динамические модели

T , Z : в рамках SSP (single stellar population)

или даже подробной SFH (star formation history)

(1) – просто, надежно, работа с несолнечным химсоставом, но возможна систематика с σ

(2) – больше важных параметров, но возможна систематическая ошибка, вырождение возраст-металличность

Кинематика звезд: кросс-корреляция

Для “внегалактического” спектрального разрешения ($R= 1000-2000$) звездные линии блендируются + реальная дисперсия скоростей

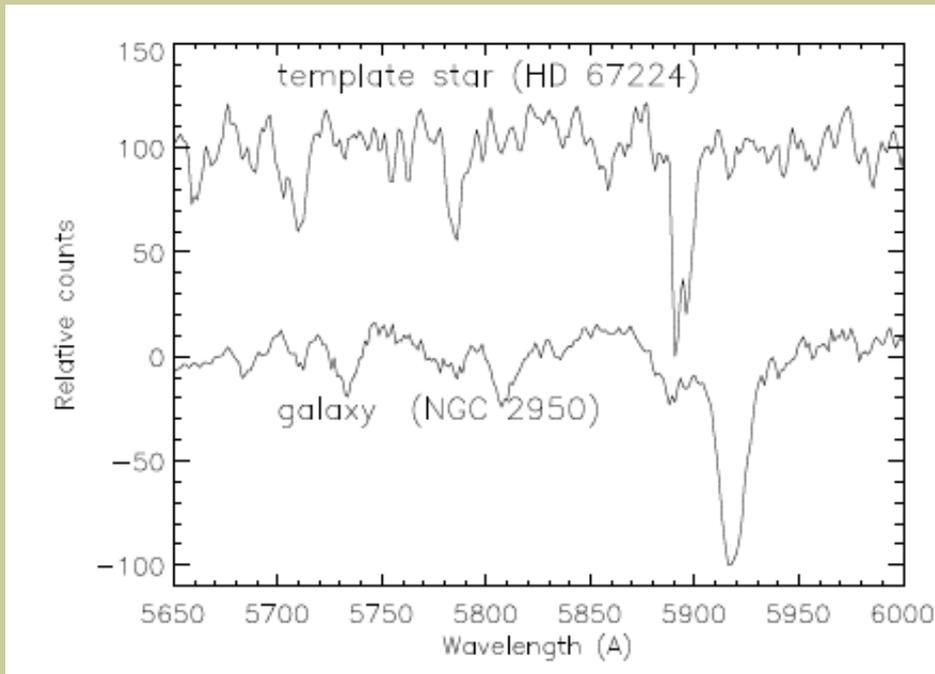
Доплеровское смещение спектров - зависит от длины волны:

$$\Delta\lambda(\lambda) = \lambda \frac{v}{c}$$

Но линейно в логарифмическом масштабе (по n):

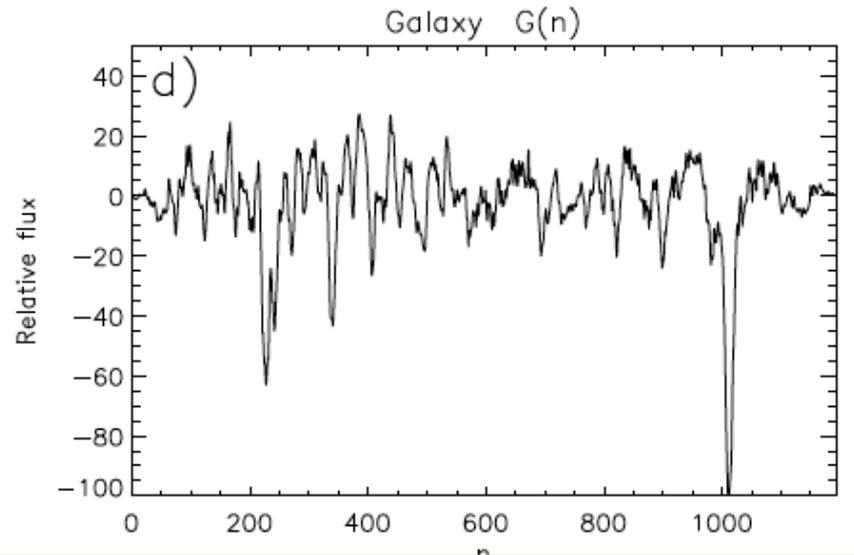
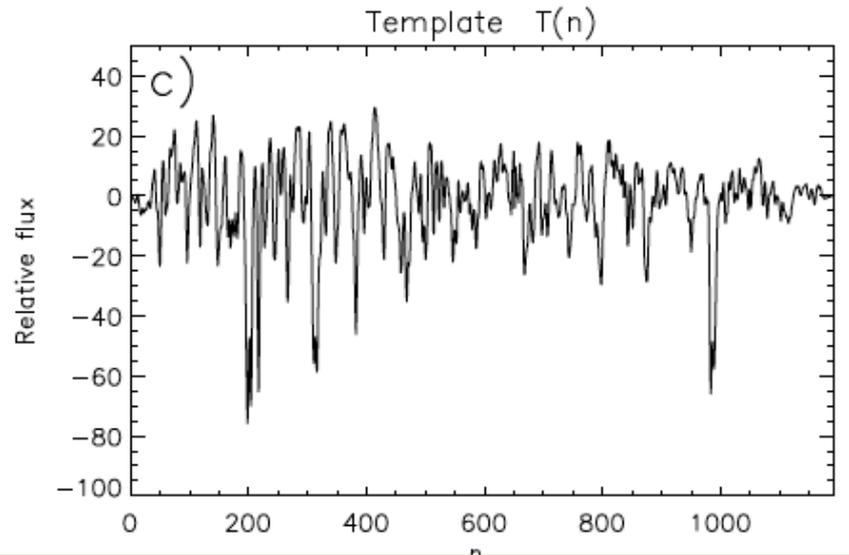
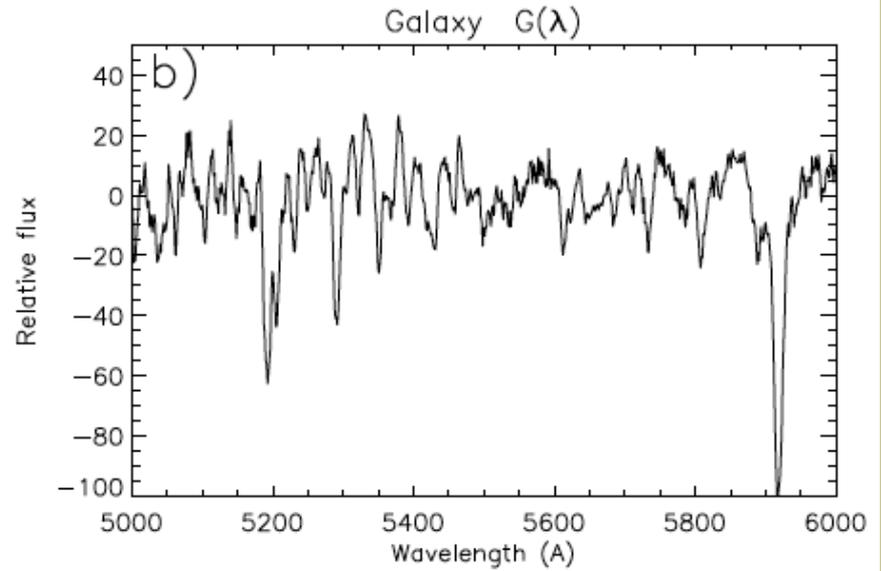
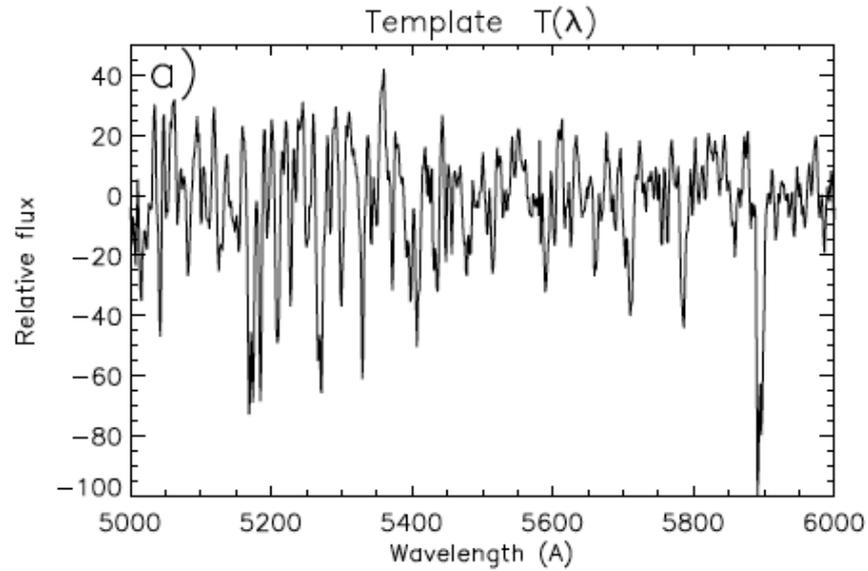
$$n = a \lg(\lambda_n) + b.$$

$$a = \lg^{-1}(1 + \Delta v/c), \quad b = -a \lg(\lambda_0)$$



Moiseev (2001, Bull SAO)

лог-шкала



Кросс-корреляционная техника

Спектр галактики может быть представлен как смещенный по скорости спектр шаблона, свернутый с некоторой функцией уширения, обусловленной внутренними движениями звезд в галактике вдоль луча зрения:

$$G(n) = \alpha T(n) \odot B(n - v)$$

$$B(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right) \quad - \text{ функция уширения}$$

здесь v и σ – искомые скорость и дисперсия скоростей вдоль луча зрения

Метод базируется на классической статье Tonry & Davis (1979) и основан на вычислении нормализованной кросс-корреляционной функции:

$$C(n) = G(n) \otimes T(n) = \frac{1}{N\sigma_g\sigma_t} \sum_m G(m)T(m - n)$$

$$C(n) = (T(n) \otimes T(n)) \odot B(n - v)$$

Кросс-корреляционная функция спектра галактики и звезды является сверткой автокорреляционной функции спектра звезды-шаблона $T(n)$, которая несет информацию об аппаратном контуре спектрографа, с функцией уширения $B(n)$

Кросс-корреляционная техника

Можно показать, что если центральный пик кросс-корреляционной функции представляется гауссианой с дисперсией μ :

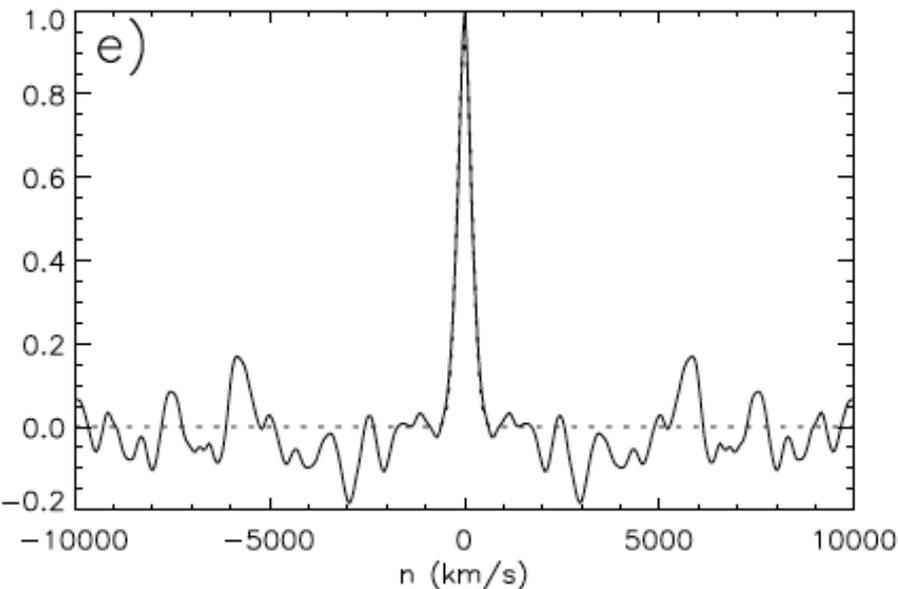
$$C(n) = c_0 \exp\left(-\frac{(n - v)^2}{2\mu^2}\right), \quad (1.17)$$

а пик автокорреляционной функции спектра звезды-шаблона – гауссианой с дисперсией τ , то квадрат дисперсии скоростей вычисляется как:

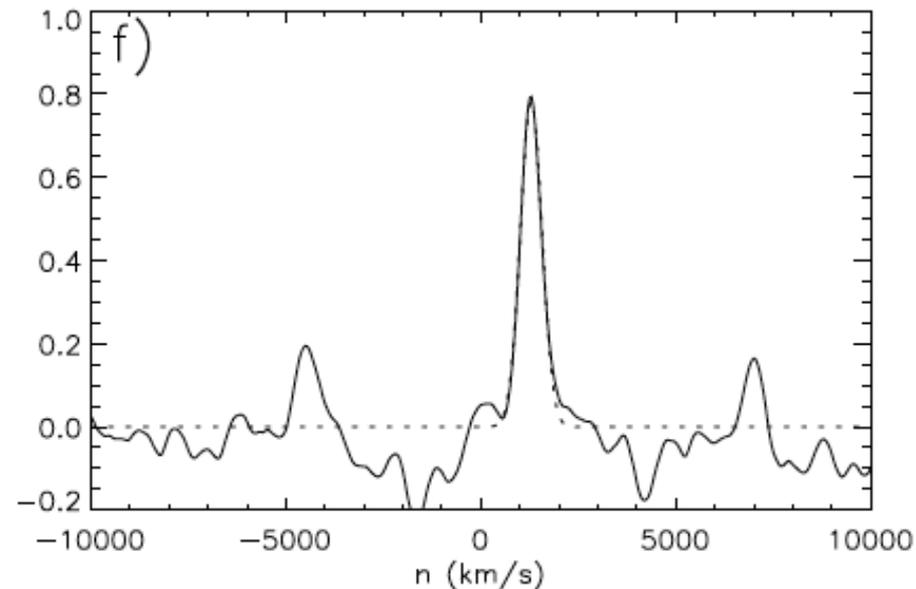
$$\sigma^2 = \mu^2 - \tau^2 \quad (1.18)$$

При этом $\tau/\sqrt{2}$ является дисперсией гауссианы, описывающей аппаратный контур спектрографа. На практике, из-за отличия формы пика от гауссовского, вклада низко-

Auto-correlation: T×T



Cross-correlation: G×T



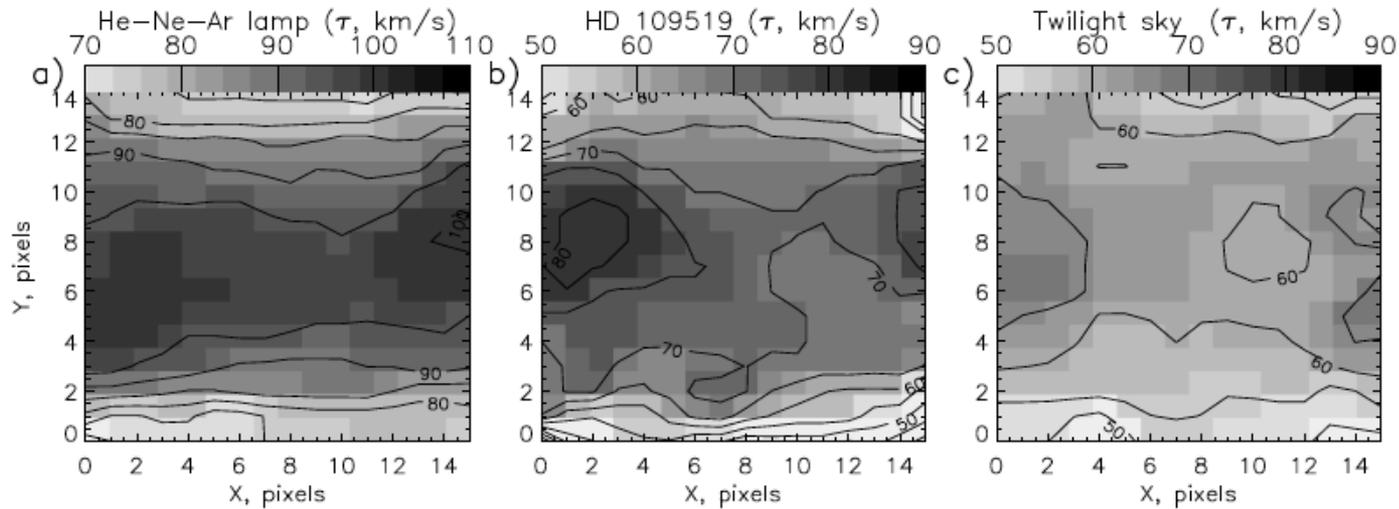
Проблемы этой техники

- отличия функции уширения $V(n)$ от гауссианы, зависимость дисперсии скоростей от шаблона
- Проблема учета вариация аппаратного профиля по полю: рассветное небо, спектры калибровочной лампы (не точное соответствие!), расфокусированная звезда оптимального спектрального класса (или двигать звезду по растру микрозрачков)

Спектр галактики E-S0 в целом похож на звезду K0-K5!

Тем не менее, очень устойчивая техника измерений лучевых скоростей!

Вариации контура по полю: MPFS



“размазываем” звезду расфокусировкой телескопа и двигаем ее по полю!

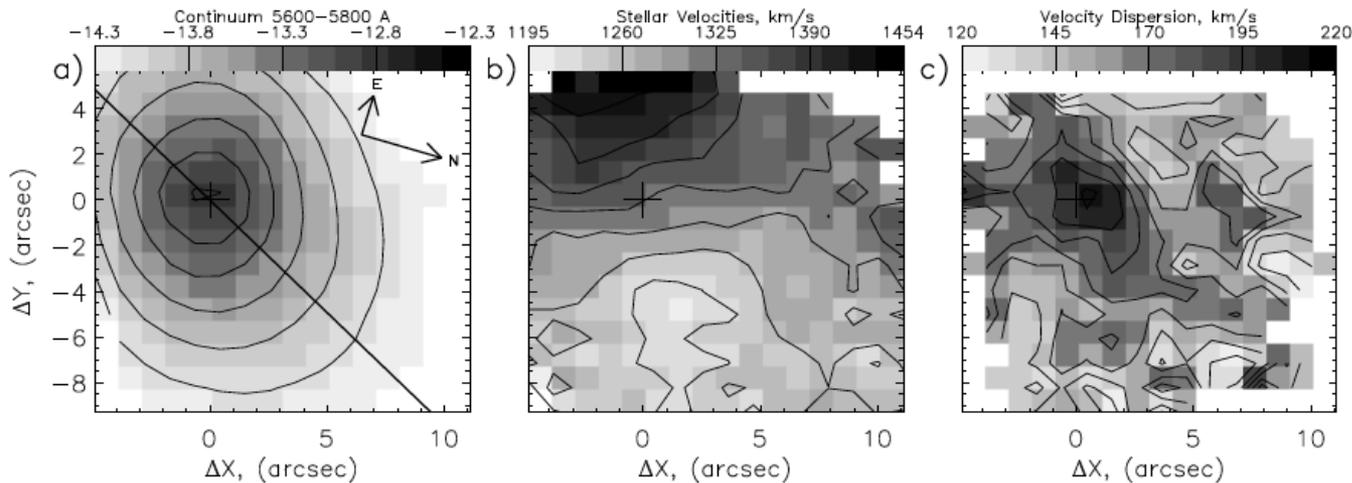


Figure 9: MPFS maps for the galaxy NGC 2950. a — the continuum image (the surface brightness logarithm

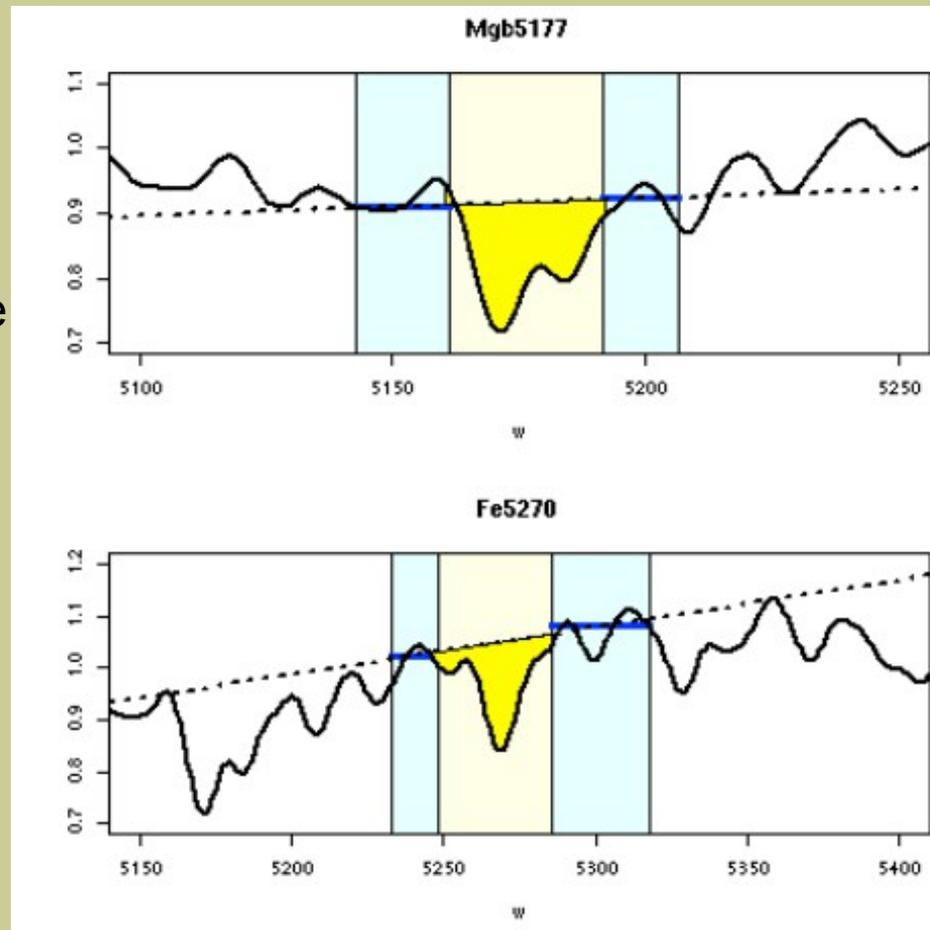
Ликские индексы: определение

Lick Observatory Stellar Library
(Worthey et al. 1994)

Эквивалентные ширины, рассчитанные
В фиксированных границах

Низкое разрешение FWHM=9Å

Для точного определения EW
Калибровка по стандартам



Возможность работы с несолнечным отношением альфа-элементов (O, Mg..) к Fe

Mg – SN Ibc, SN II, $t < 10$ Myr

Fe – SN Ia, $t > 100$ Myr

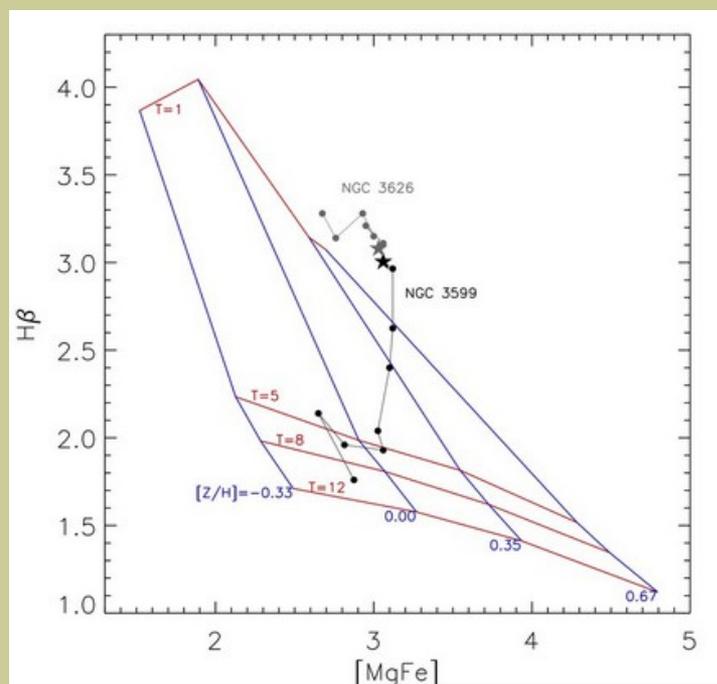
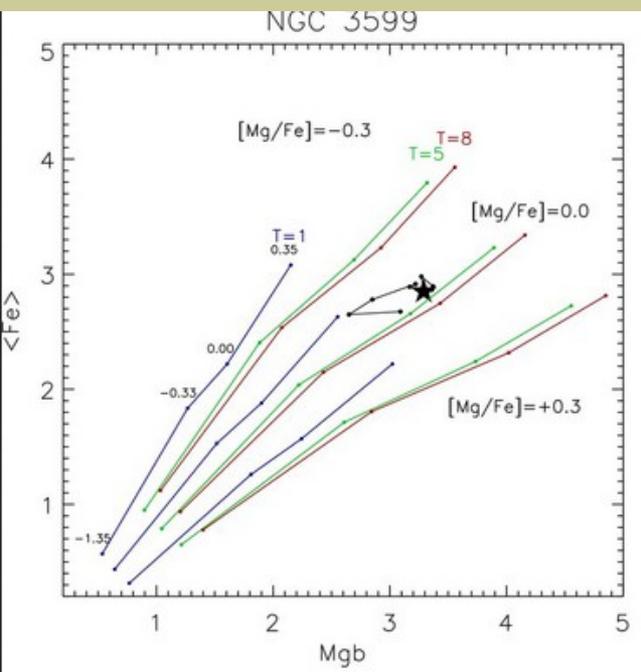
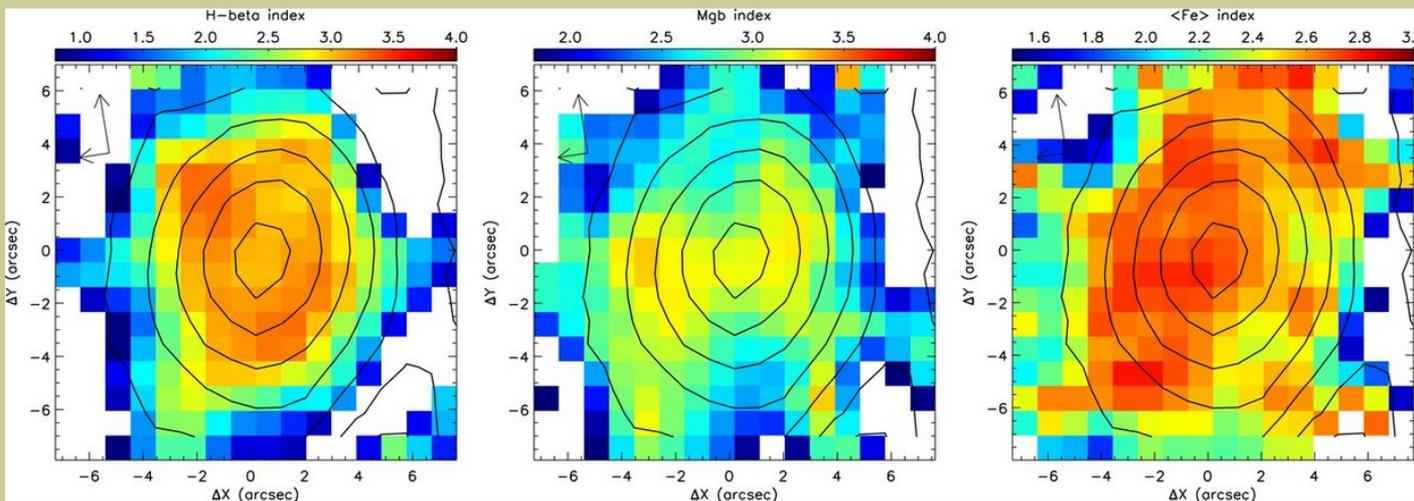
Высокий $\langle \text{Mg} \rangle / \langle \text{Fe} \rangle$ - свидетельство короткой вспышки ЗО (< 1 Gyr)

Ликские индексы: T & Z

MPFS
Sil'chenko et al 2010



О. К. Сильченко



Сравнение с
моделями звездной
эволюции

Сложная форма LOSVD

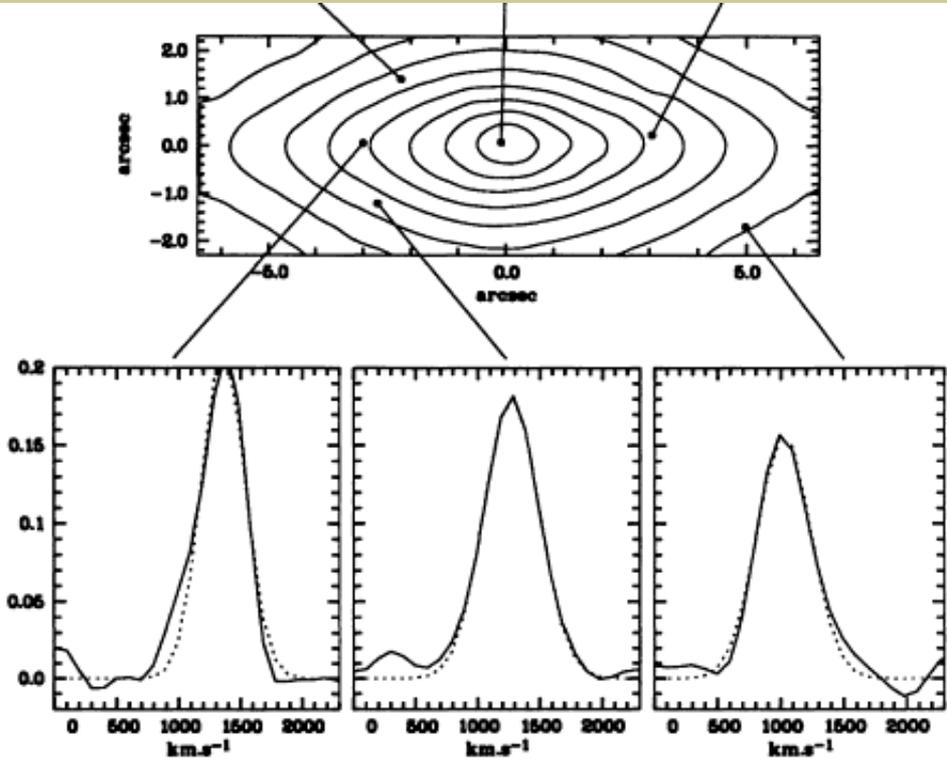
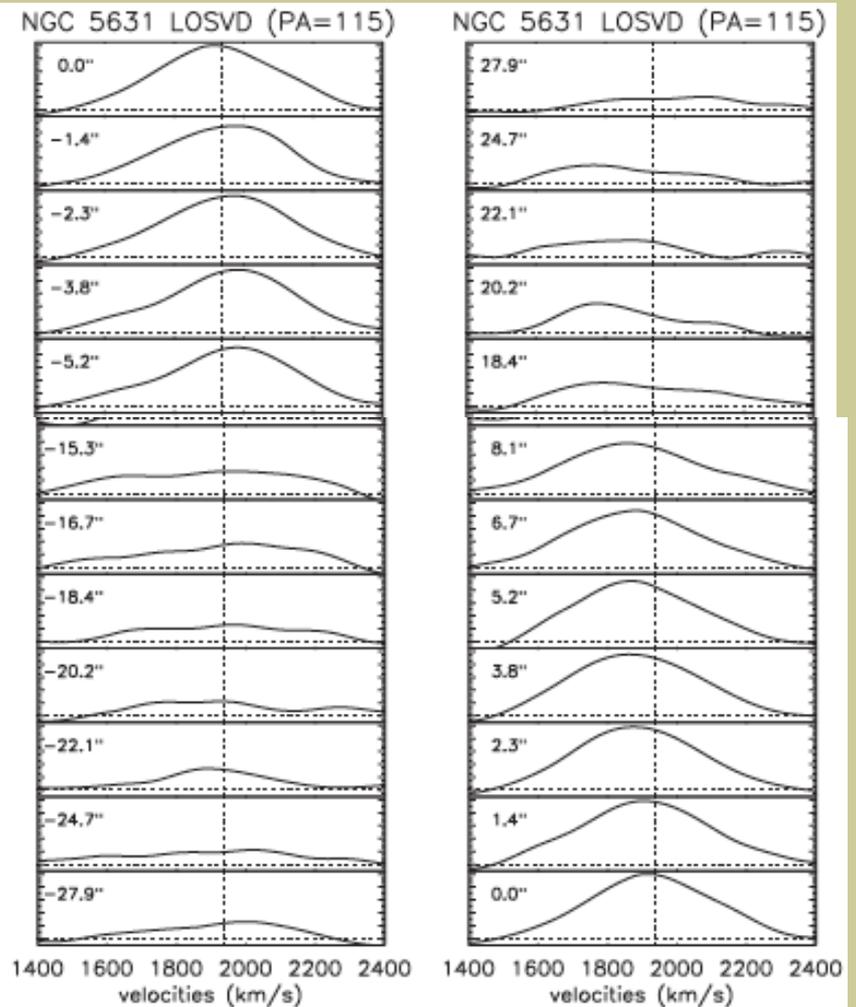


Figure 1. LOSVDs of M 104 at different points of the TIGER field, and the corresponding best gaussian fits (pointed lines): note the asymmetries of the profiles close to the major axis. The central panel shows the reconstructed TIGER image.

Emsellem et al 1994



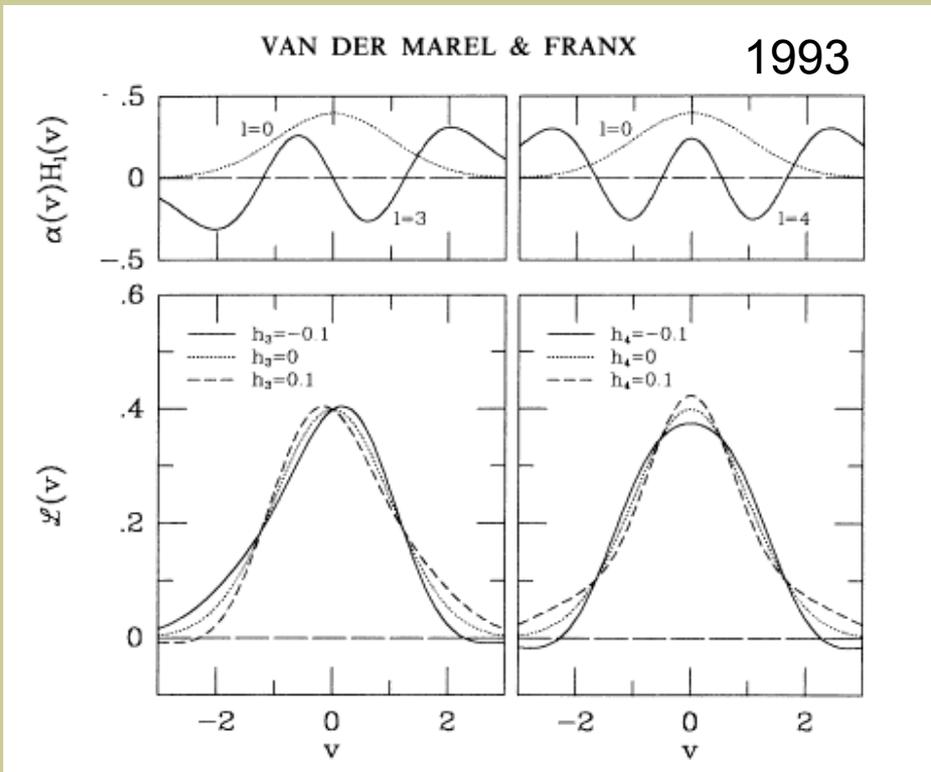
Sil'chenko et al 2009

Функция Гаусса-Эрмита

and quite good parametrization of the velocity distribution profile is the truncated Gauss-Hermite (GH) expansion (Gerhard, 1993; van der Marel & Franx, 1993):

$$GH(v; \gamma, V, \sigma, h_m) = \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{v-V}{\sigma} \right)^2 \sum_{m=0}^{N_{GH}} h_m H_m \left(\frac{v-V}{\sigma} \right) \right], \quad (2.10)$$

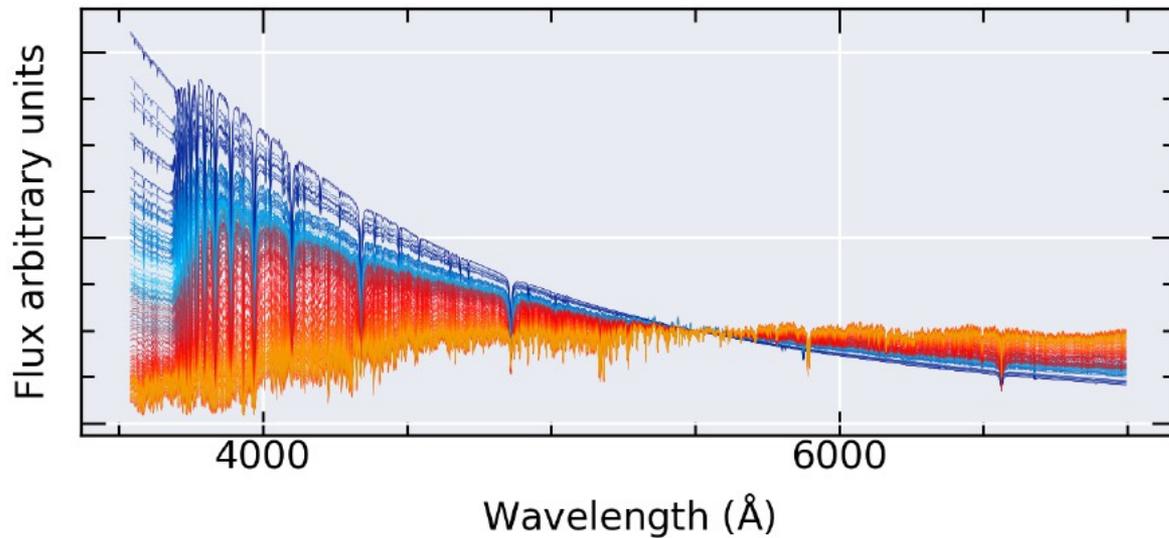
where H_m are the physicists Hermite polynomials, h_m are the Hermite coefficients and N_{GH} is the order of the truncation corresponding to the total number of mo-



Обычно ограничиваются $N=4$,
при этом $h_0=1$, $h_1=0$, $h_2=0$

h_3 - асимметрия

h_4 - негауссовость



1: GSD156 template library. This library includes 156 templates with 39 stellar ages (1 Myr to 13 Gyr) and 4 different metallicities ($Z/Z_{\odot} = 0.2, 0.4, 1$ and 1.5).

Для подгонки – библиотеки спектров (реальных звезд или синтетических)

$$S_{\lambda} = \sum_{j=1}^N w_j F_{j\lambda}(\lambda) 10^{-0.4A_{\lambda}} \otimes G(v_{\star}, \sigma_{\star})$$

where F_j is the flux at wavelength λ of the j^{th} template; A_{λ} is the extinction in magnitudes at λ (parameterized by the value at the V-band); w_j is the coefficient of the j^{th} template in the final modeled spectrum; N is the total number of templates; the term $G(v_{\star}, \sigma_{\star})$ describes the line-of-sight velocity distribution of the SSP assuming

Разные коды и наборы библиотек звезд

SSP:

UlySS (Koleva et al 2009): <http://ulyss.univ-lyon1.fr/>

STARSLIGHT (Cid Fernandes et al 2007): <http://www.starlight.ufsc.br/>

pPXF (Cappellari 2017): <http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~mxc/software/>

NBurst (Chilingarian et al. 2007)

Возвращает полное LOSVD (v , σ , h_3 , h_4)

Но требуется знание LSF (line spread function) по полю – возможно подгонкой сумеречного неба (спектр Соолнца знаем хорошо и с очень высоким разрешением)

Penalized Pixel-Fitting (pPXF)

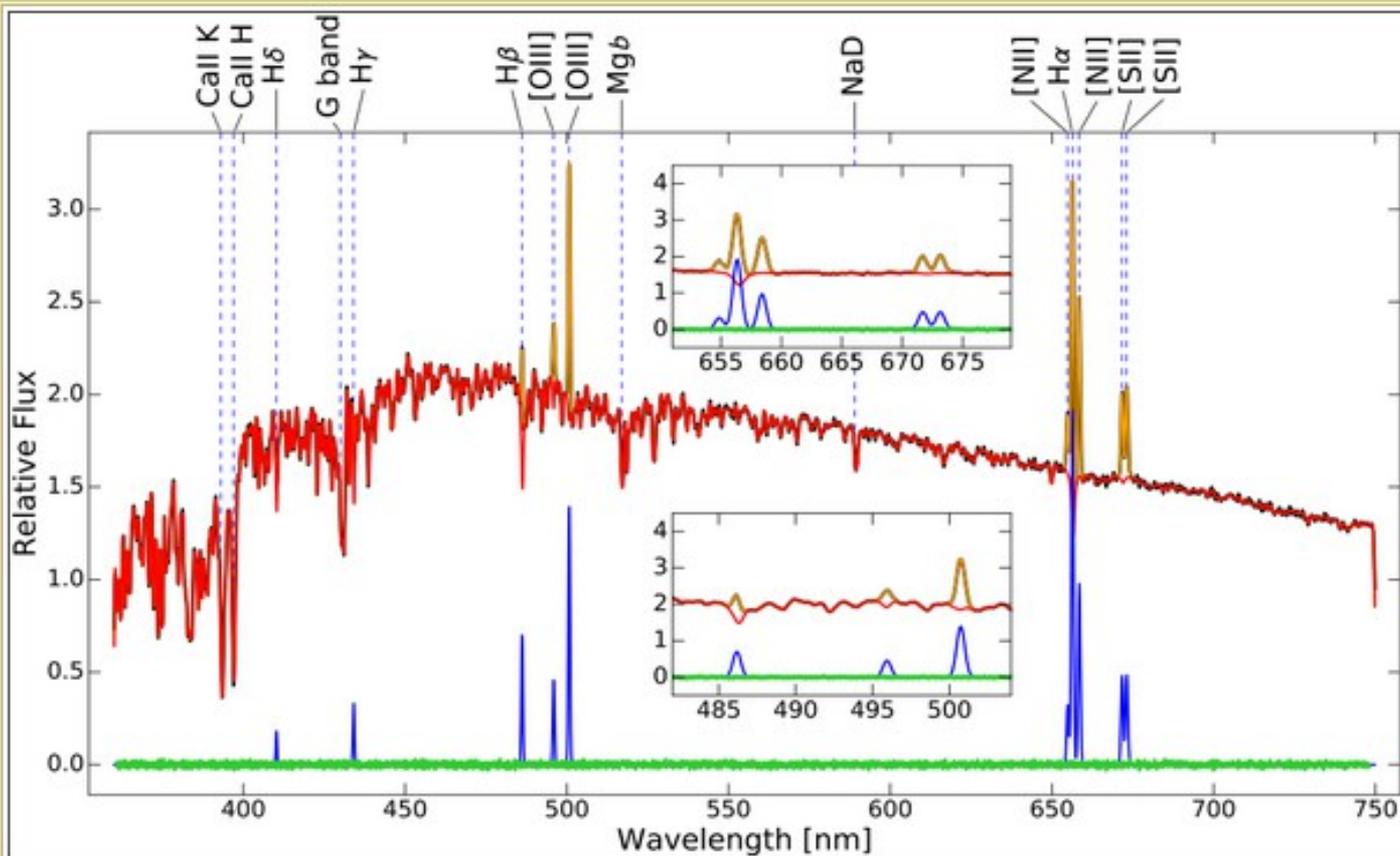


Figure 1: Stellar and gas kinematics fit with pPXF. The black line (mostly hidden by the fit) is the relative flux of the observed spectrum. The red line is the pPXF fit for the stellar component, while the orange line is a fit to the gas emission lines. The green symbols at the bottom are the fit residuals, while the blue lines is the gas-only best-fitting spectrum. The main absorption and emission features are indicated at the top of the plot (taken from [Cappellari 2017](#)).

SAURON: Spectroscopic Areal Unit for Research on Optical Nebulae

44x35 квадратных линз, 0.94"

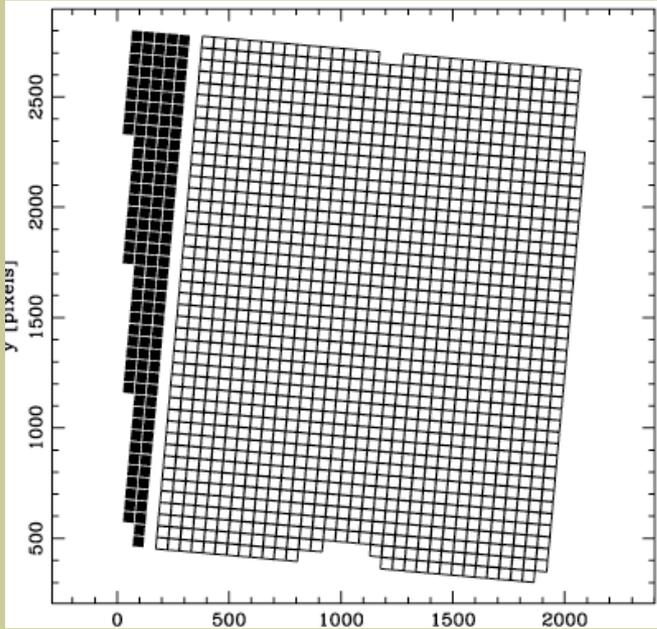
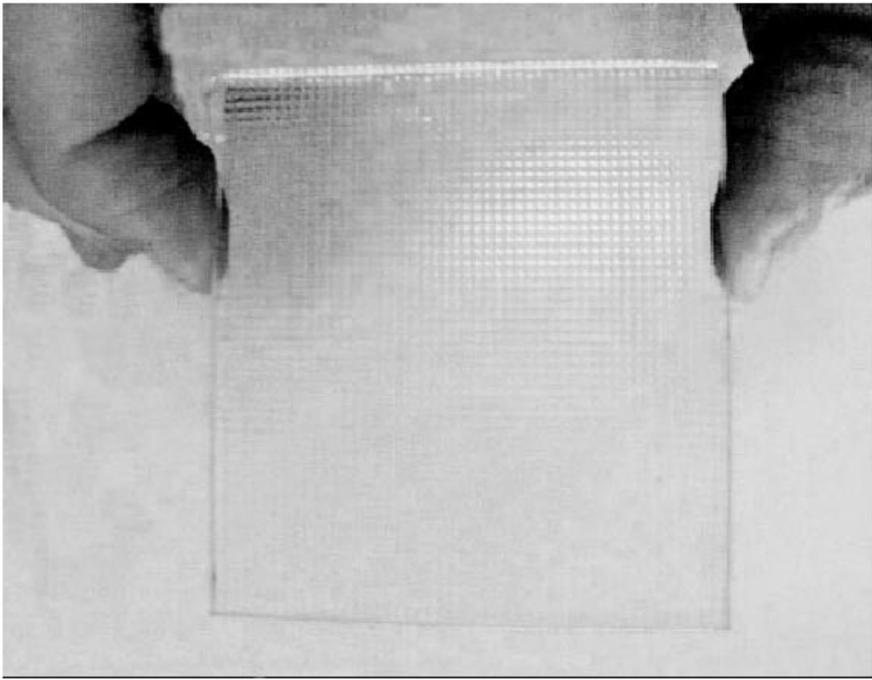


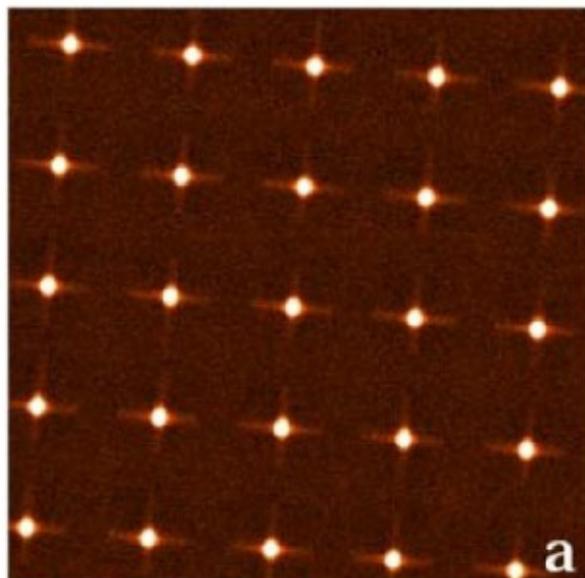
Table 1. Current specification of SAURON on the WHT.

	HR mode	LR mode
Spatial sampling	0".27	0".94
Field of view	9" × 11"	33" × 41"
Spectral resolution (FWHM)	2.8 Å	3.6 Å
Instrumental dispersion (σ_{inst})	90 km s ⁻¹	105 km s ⁻¹
Spectral sampling	1.1 Å pix ⁻¹	
Wavelength range	4500–7000 Å	
Initial spectral window	4760–5400 Å	
Calibration lamps	Ne, Ar, W	
Detector	EEV 12 2148 × 4200	
Pixel size	13.5 μm	
Instrument Efficiency	35 per cent	
Total Efficiency	14.7 per cent	

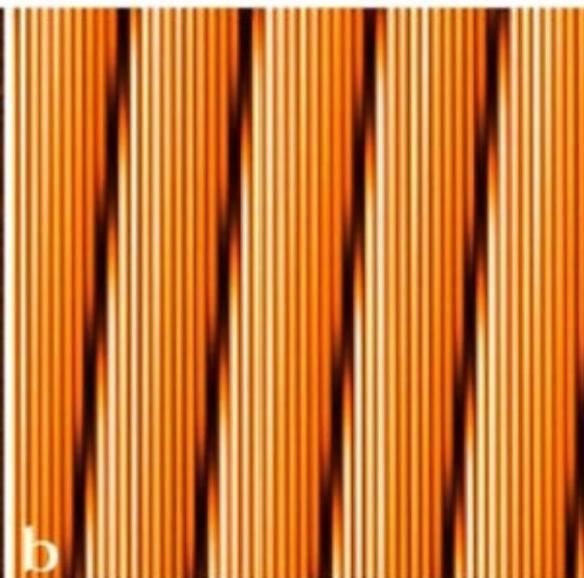
WHT 4.2-m
Bacon et al (2001)

Lens Array - Raw Data

Micro pupil

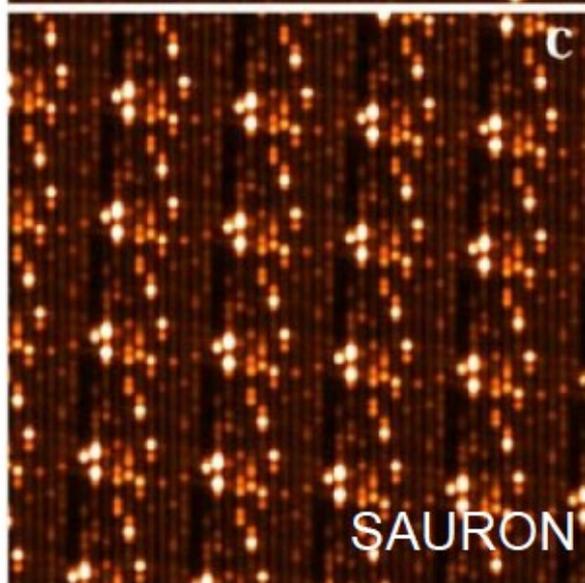


Continuum



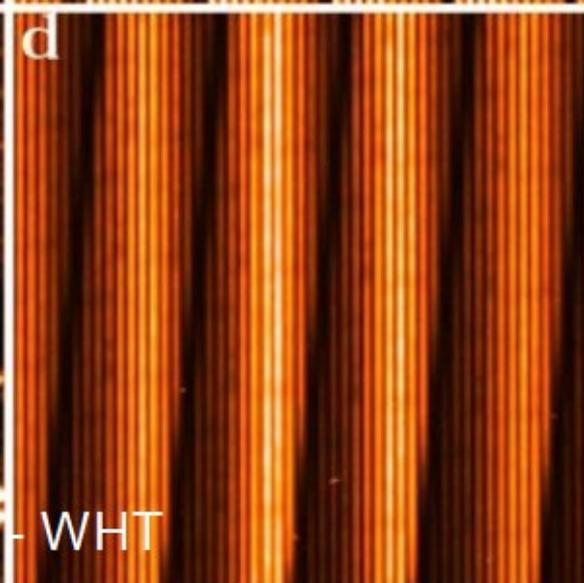
a b

Arc



c d

Galaxy

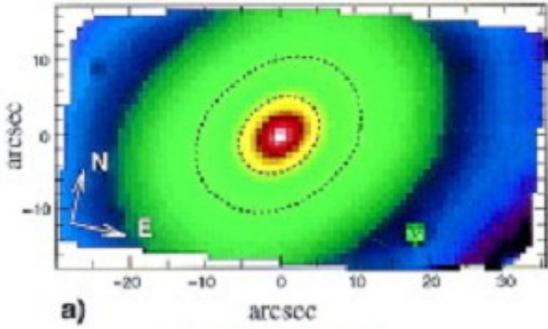
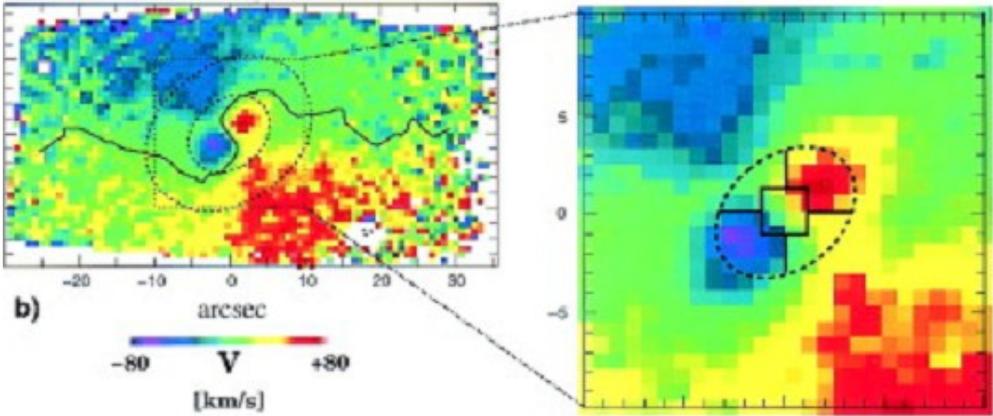
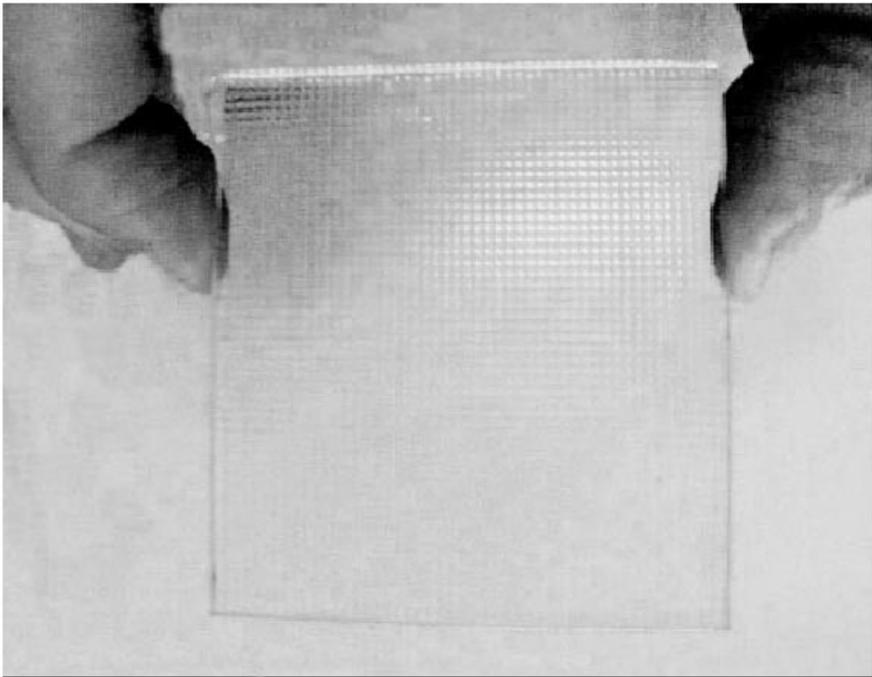


SAURON - WHT



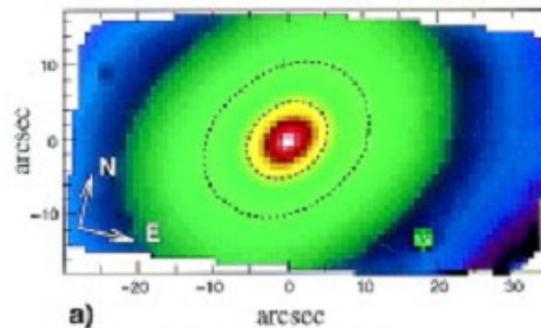
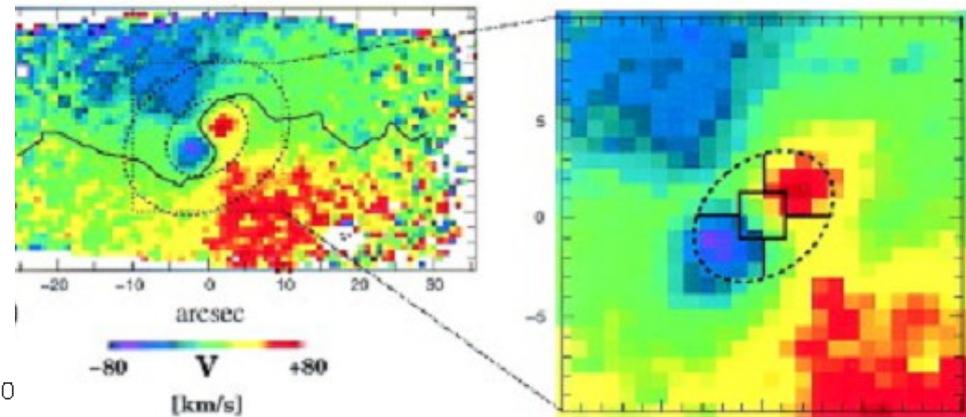
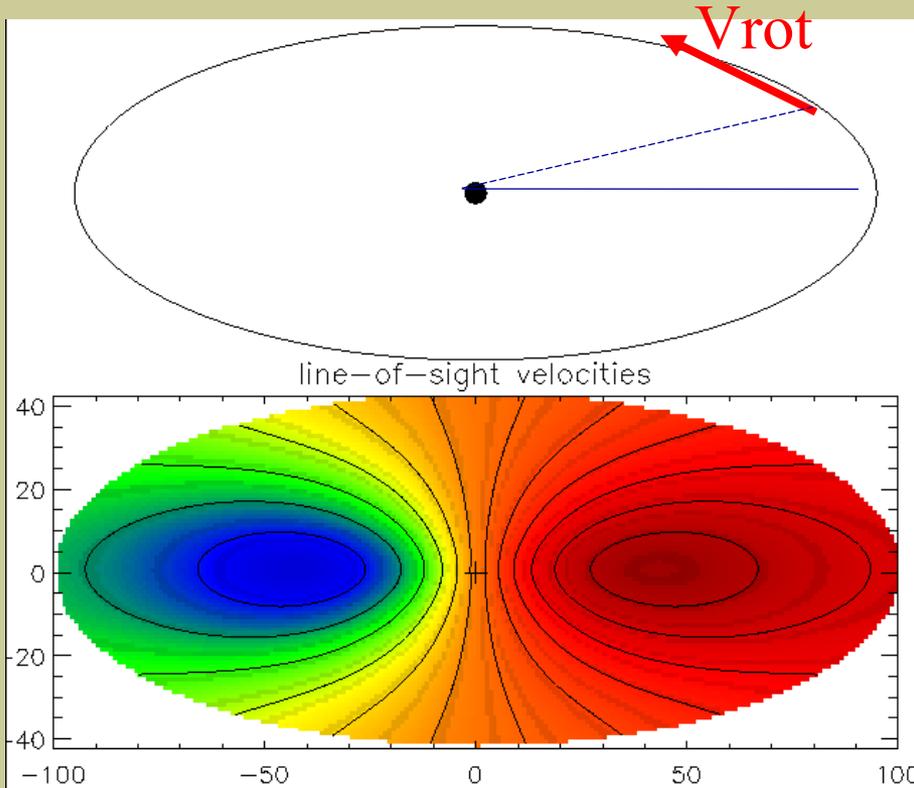
SAURON: Spectroscopic Areal Unit for Research on Optical Nebulae

44x35 квадратных линз, 0.94"



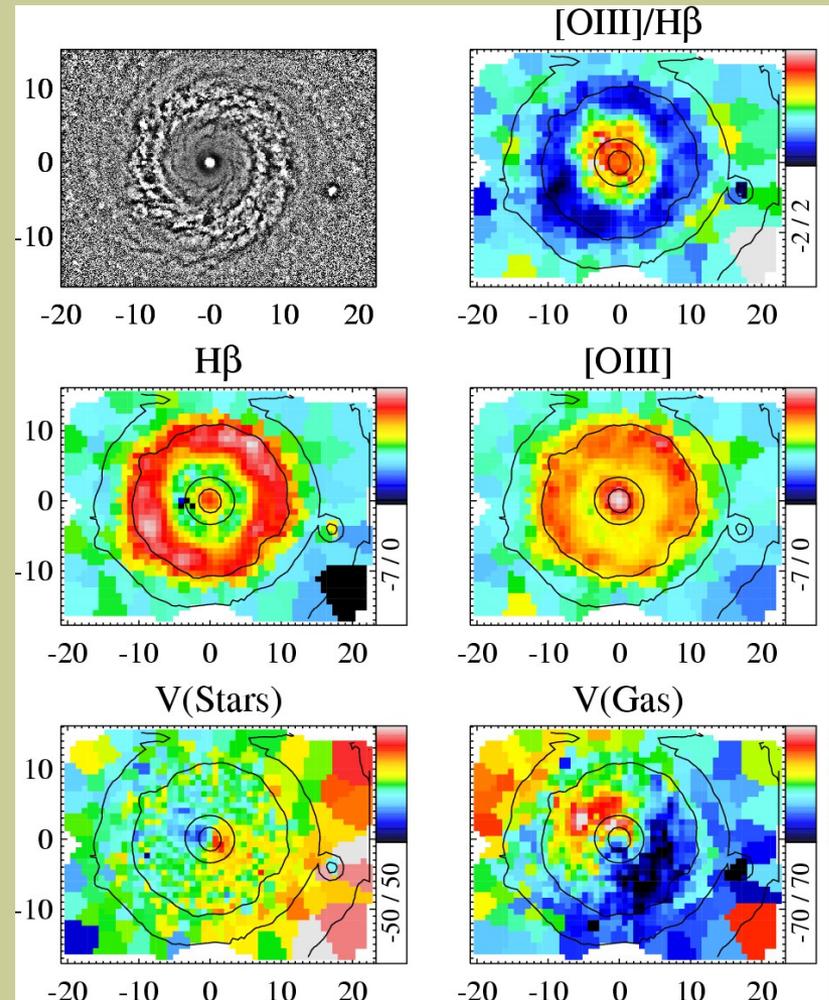
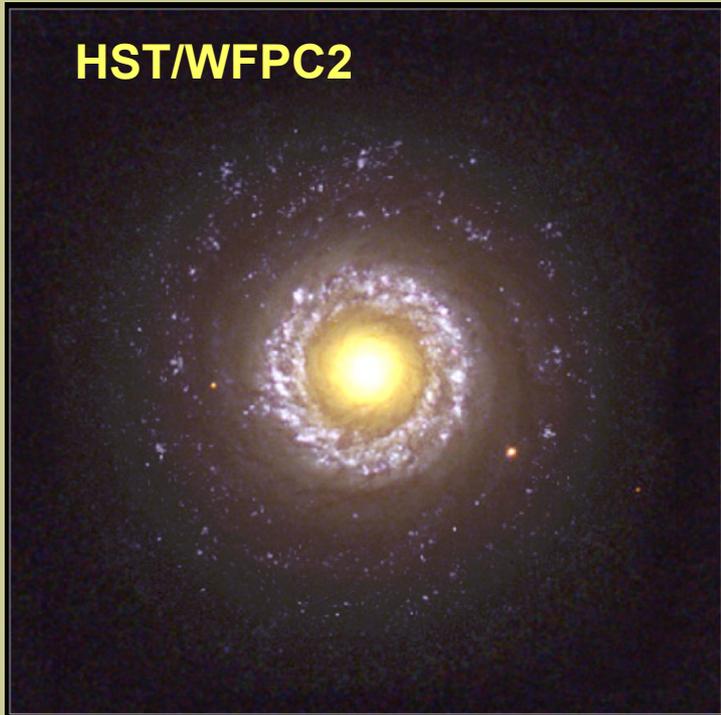
NGC 4365
Davies et al 2001

Поле скоростей вращающегося диска



NGC 4365
Davies et al 2001

NGC7742: the galaxy with a counter-rotation gaseous disk

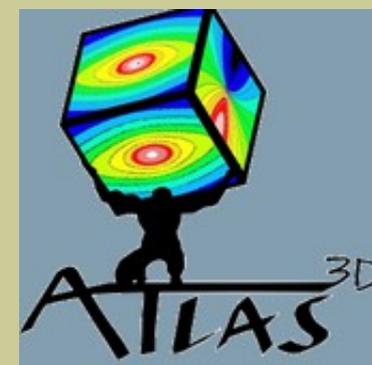
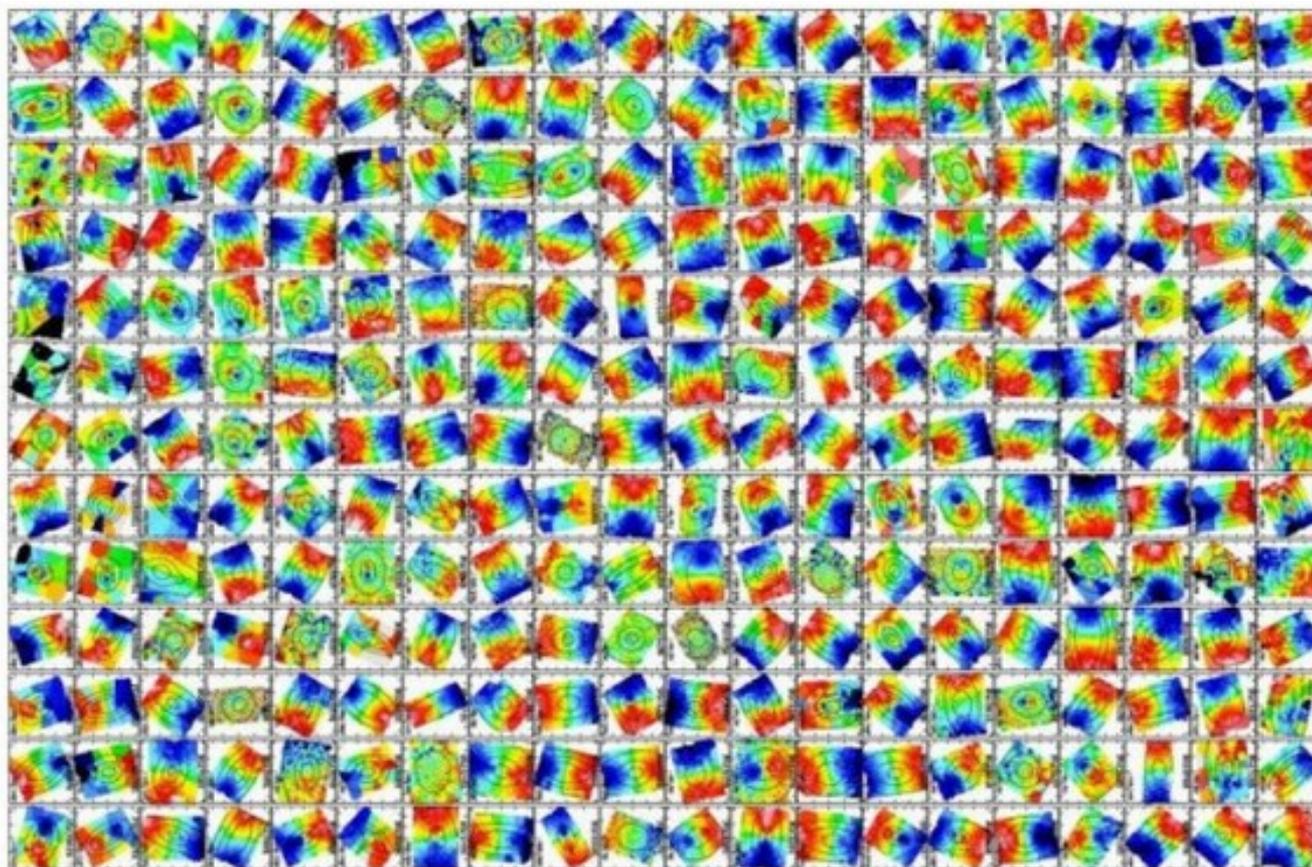


de Zeeuw et al. 2002

SAURON, ATLAS-3D

Изучение близких галактик ранних типов с IFS (SAURON, MPFS) принципиально изменило наши представления о кинематически выделенных подсистемах в них.

<https://www-astro.physics.ox.ac.uk/atlas3d/>

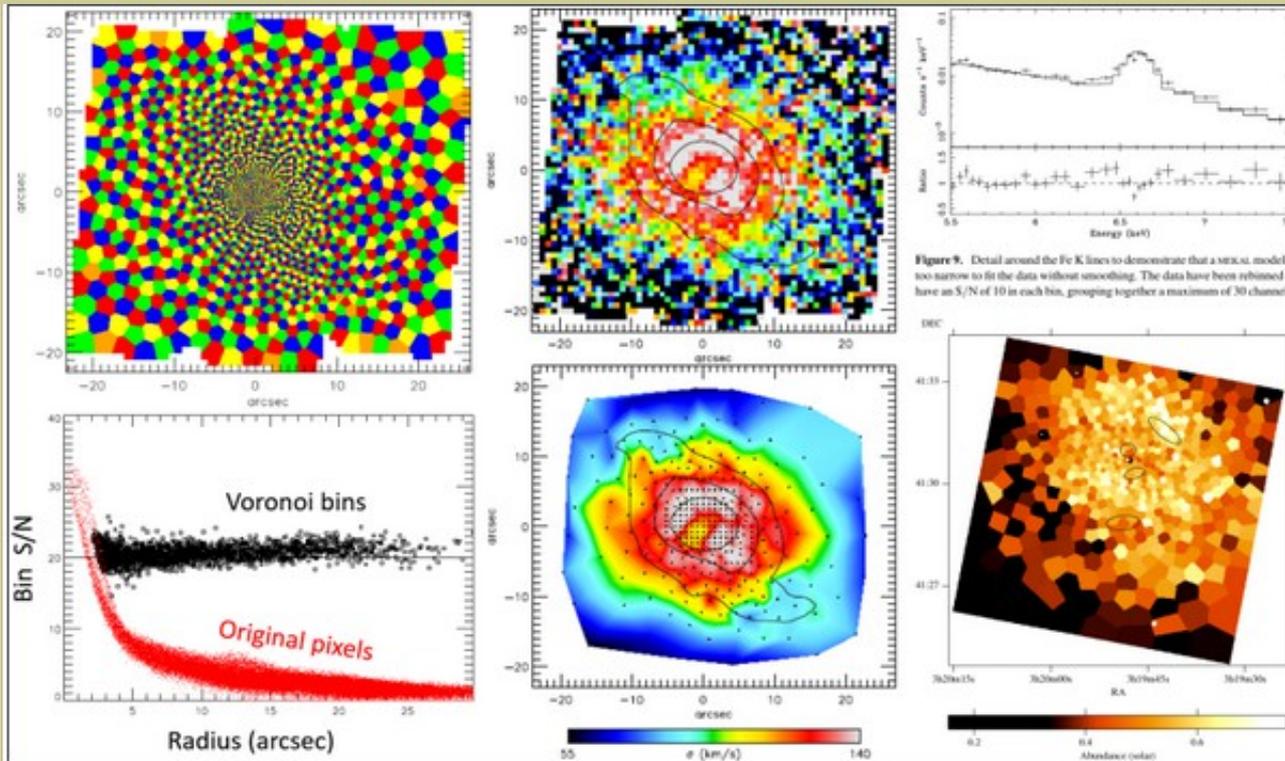


260 галактик
Все данные
доступны

Maps of the observed velocity of the stars in the volume-limited sample of 260 early-type galaxies of the ATLAS3D survey. Red/blue colours indicate stars

Ячейки Вороного (Voronoi binning)

Cappellari & Copin (2003)



Left: *Four-coloring* of Voronoi binning; **Middle:** Unbinned versus Voronoi binned stellar kinematics from Integral-Field Spectroscopy (Cappellari & Copin 2003); **Right:** Voronoi binning of abundance from X-ray data (Sanders et al. 2004).

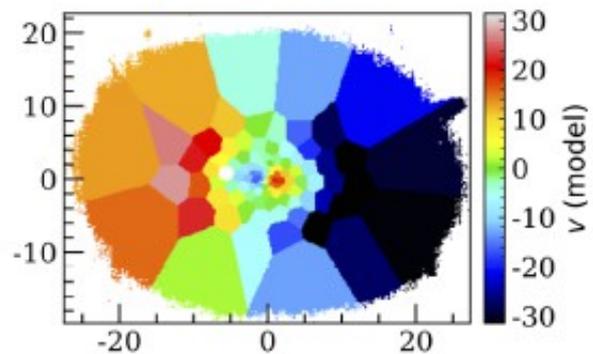
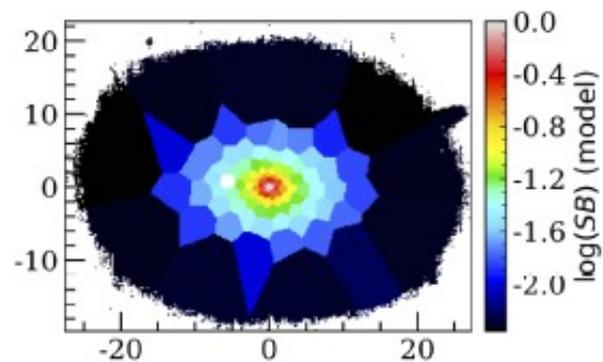
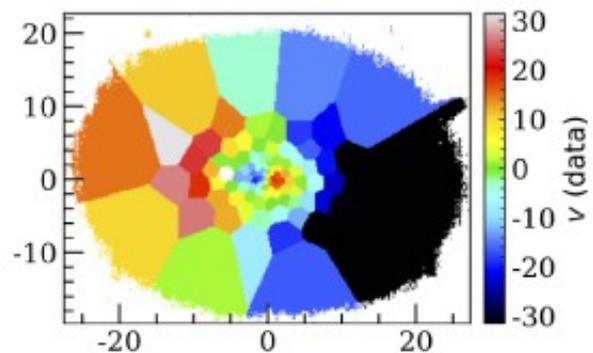
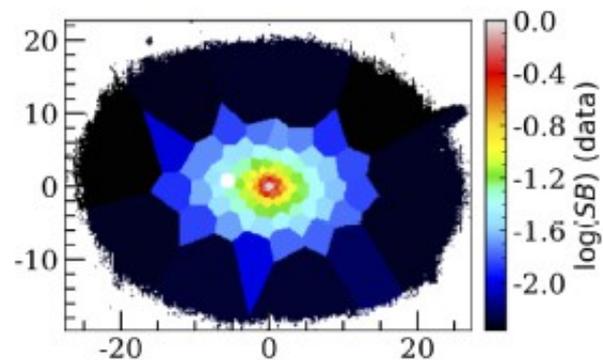
Георгий Феодосьевич Вороной



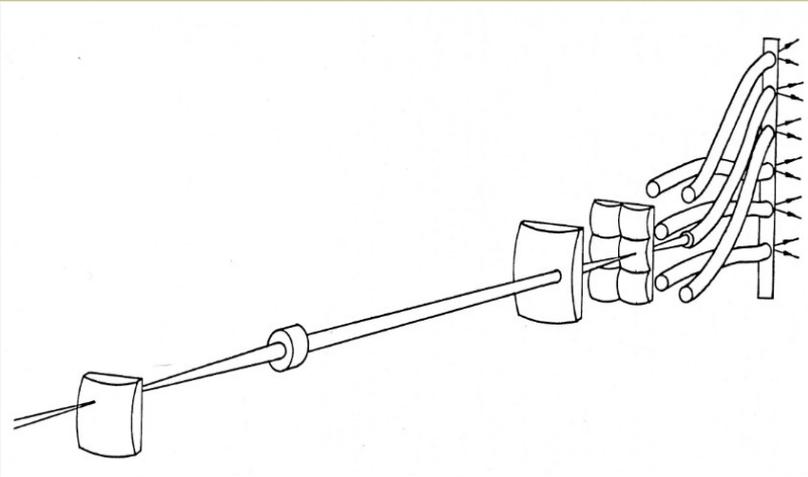
Имя при рождении	Георгий Феодосьевич Вороной
Дата рождения	16 (28) апреля 1868
Место рождения	дер. Журавка, Прилуцкий уезд, Полтавская губерния, Российская империя
Дата смерти	7 (20) ноября 1908 (40 лет)

И карты выглядят вот так

Cappellari & Emsellem (2004)



80th: Integral-field spectroscopy is coming...



“An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes”

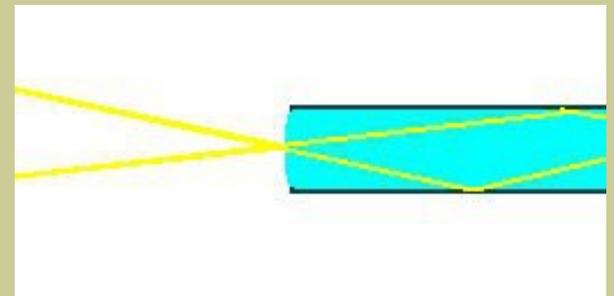
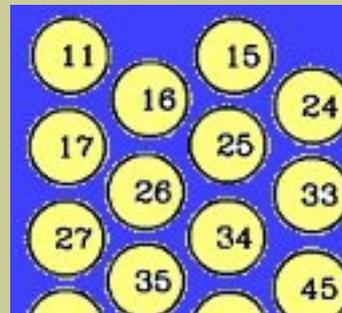
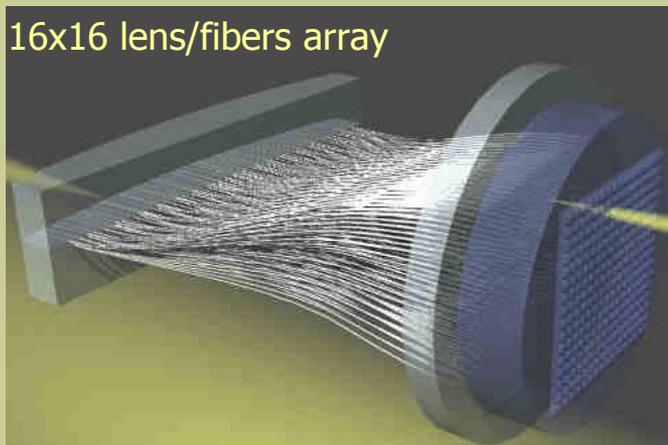
Georges Courtès 1982 (Proceedings of IAU Colloq. 67, held in Zelenchukskaya, USSR)

Проблемы пучков световолокон:

Multi Pupil Fiber Spectrograph (MPFS):
Afanasiev et al. (1990, 2001)

1. Фактор заполнения:

2. Согласование апертур



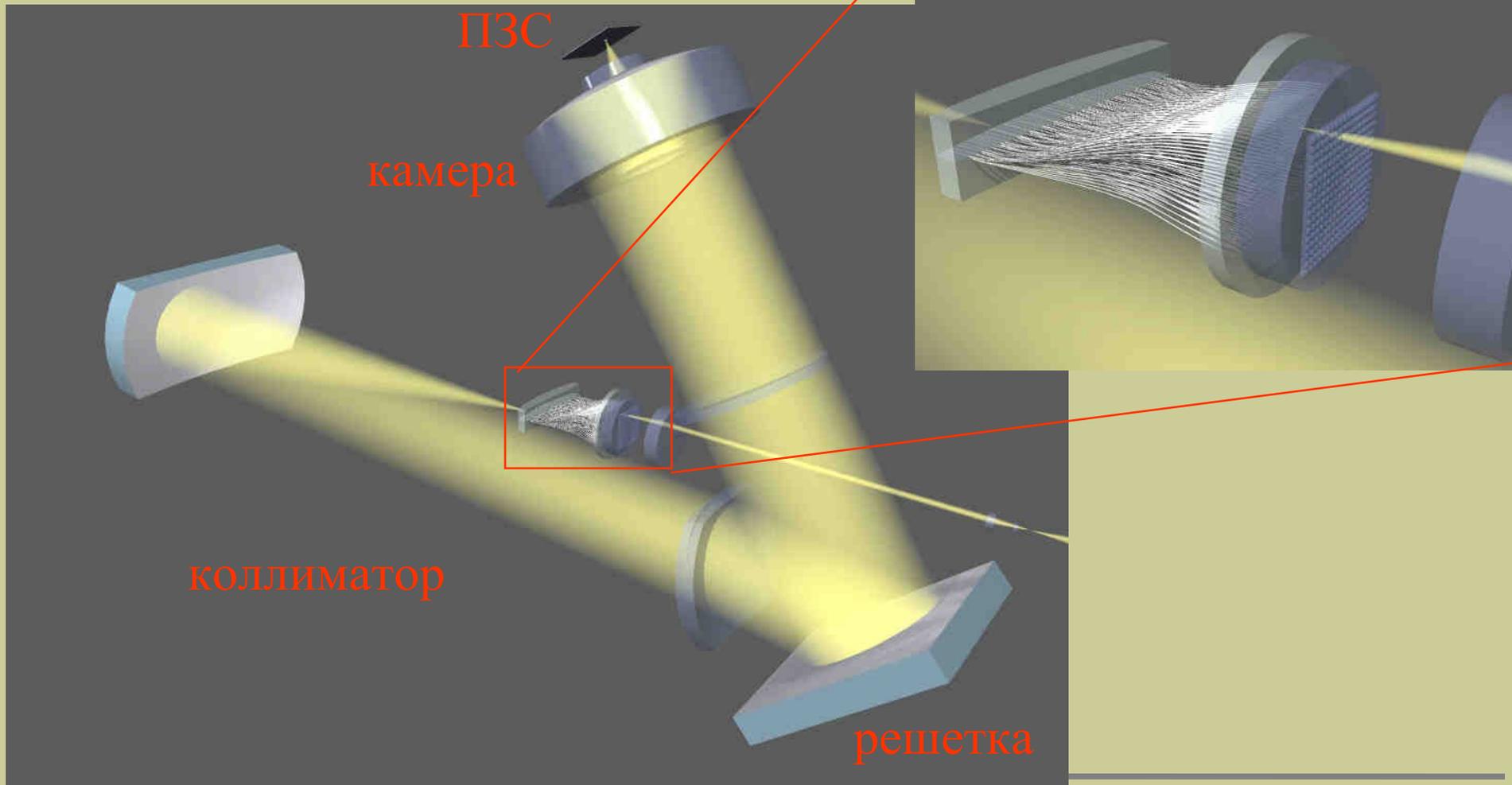
MPFS=Multi Pupil Fiber Spectrograph

Афанасьев и др. (1990, 2001) :

Массив линз 16 x 16 + 15 волокон для фона

Масштаб : 0.5, 0.75, 1 "/линзу

мультизрачковый блок

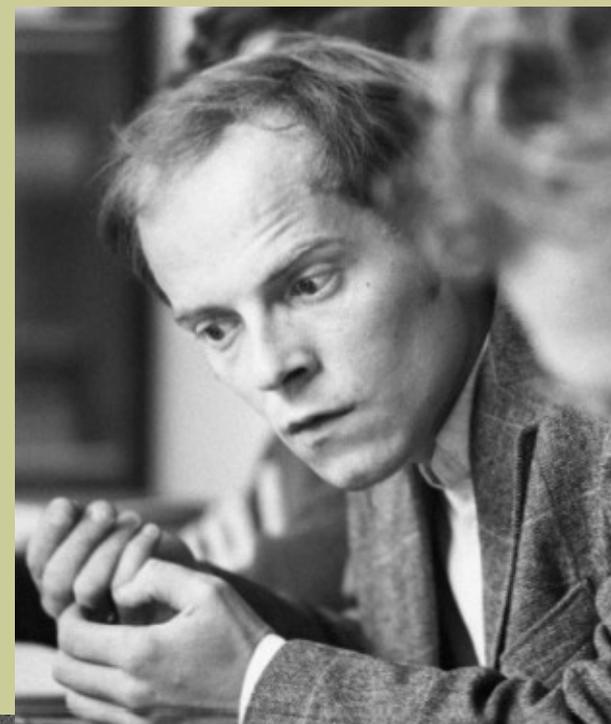


Несколько поколений MPFS/IFU в CAO РАН

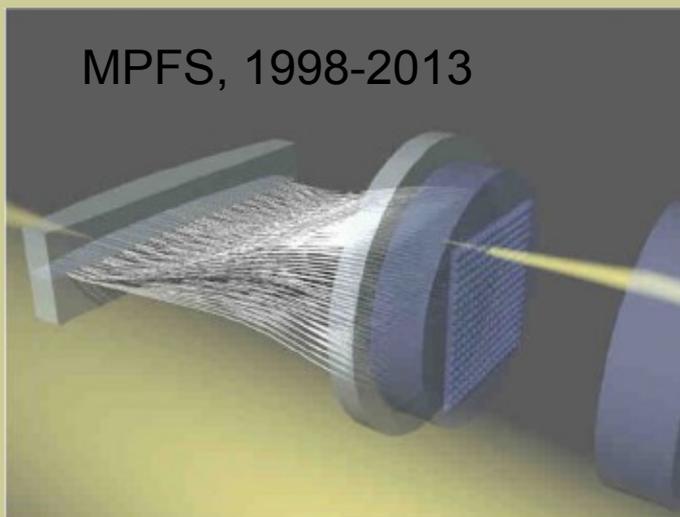
~1990-94



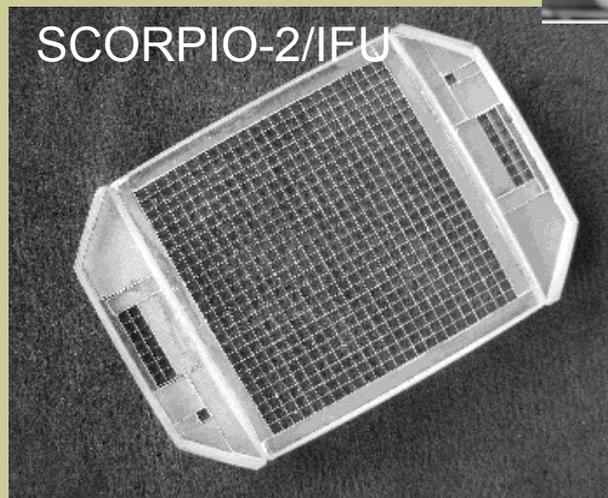
1998-



MPFS, 1998-2013



SCORPIO-2/IFU



В.Л. Афанасьев (70e)

MPFS (version 2) = Multi Pupil **Field** Spectrograph

Афанасьев и др. 1994-1996

10x16 линз, ПЗС 530x580

Увеличитель – 1.3, 0.65, 0.45"

Преимущества “ТИГРИНОЙ” схемы:

- простота реализации
(есть технологии штамповки растров, хотя у нас в САО – наборные)
- относительно высокое пропускание

Проблемы:

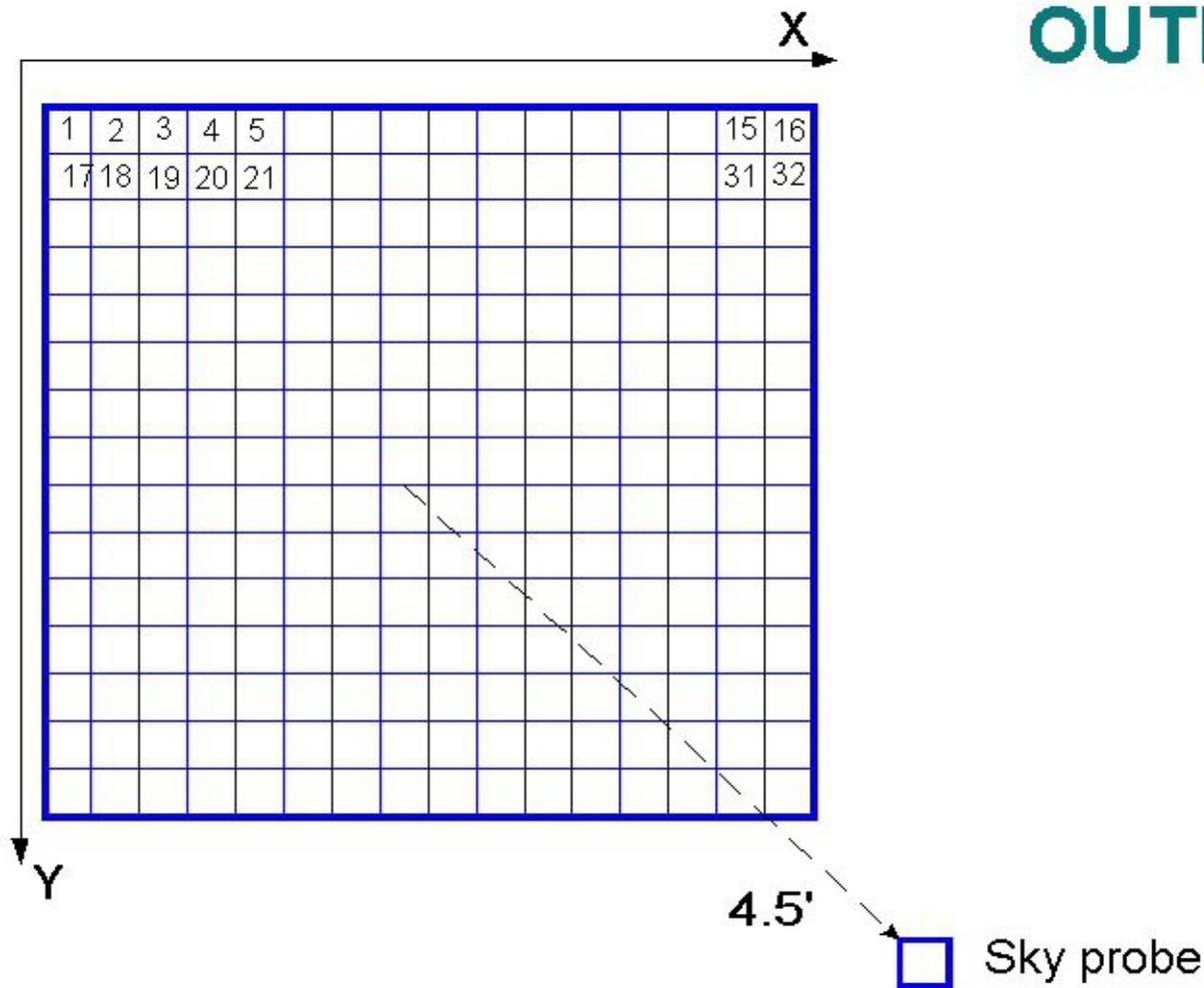
- надо как-то заводить сюда фон неба
- ограниченный спектральный диапазон (спектры перекрываются)
- неэффективное использование площади детектора (много свободного места)

=> специализированные приборы,
преимущественно для изучения **кинематики**

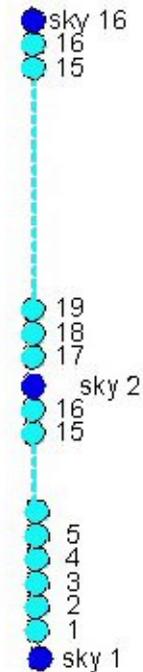


MPFS: fibers locations

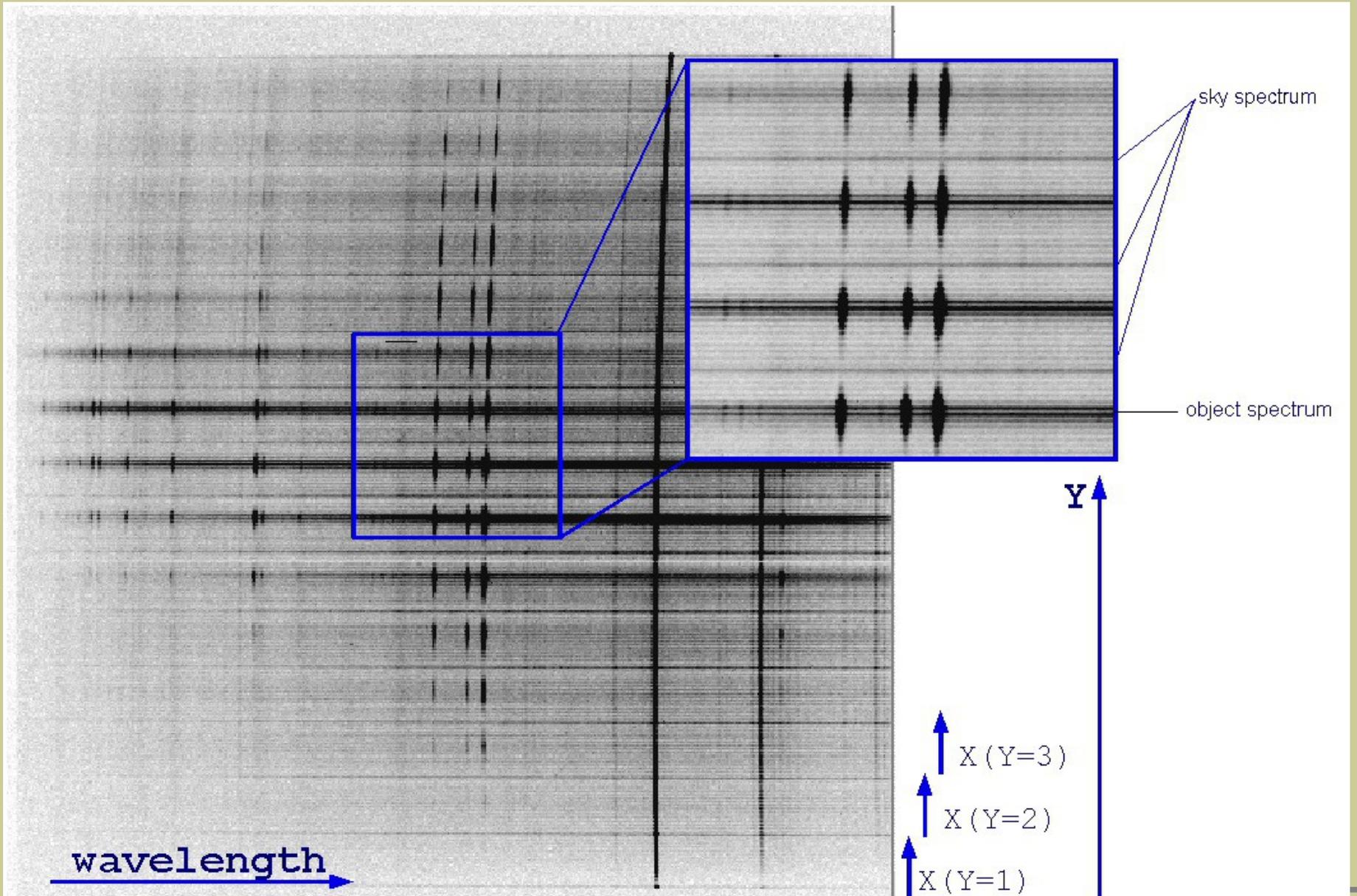
INPUT (SKY-PLANE)



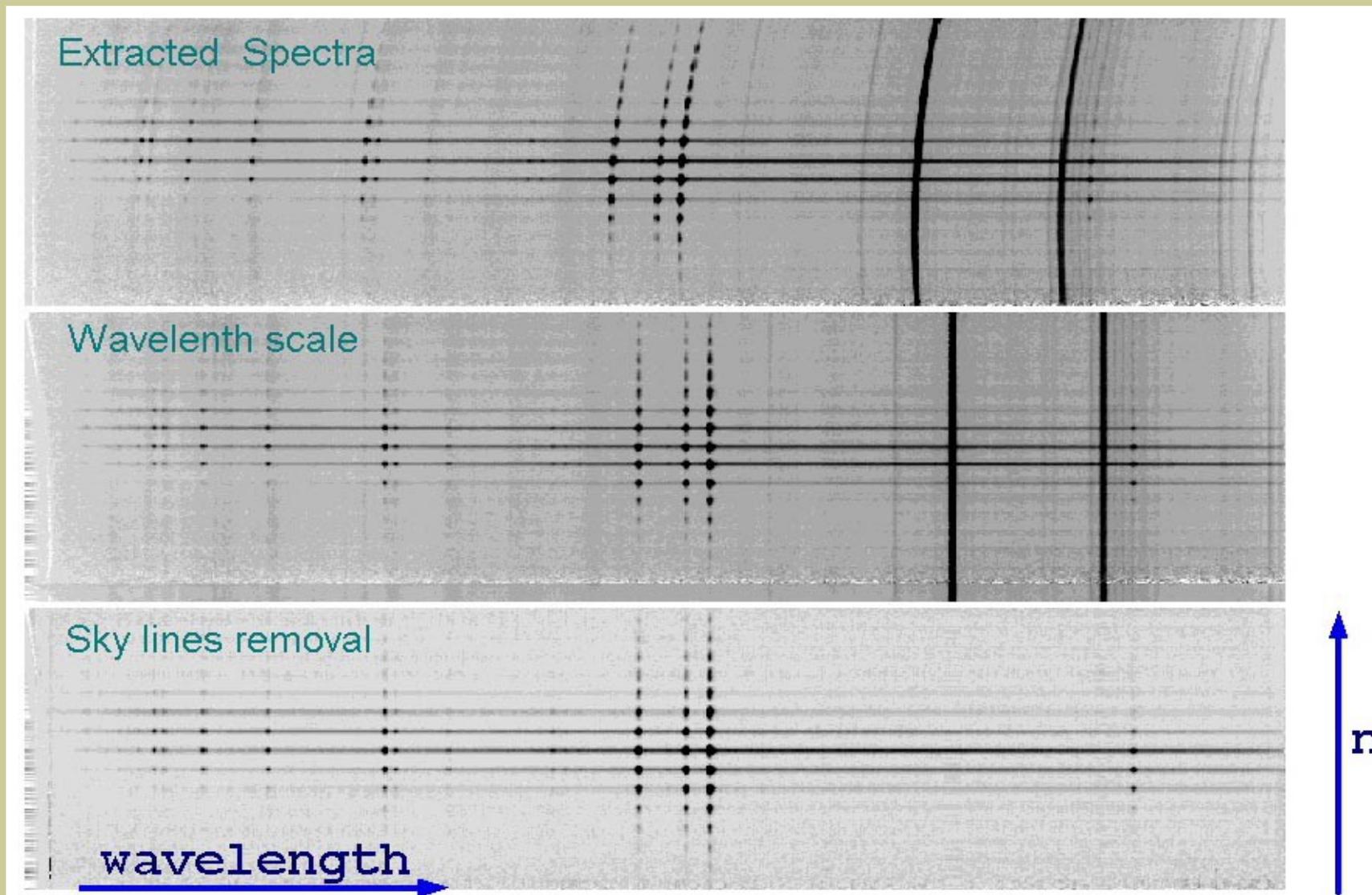
OUTPUT (pseudo-slit)



MPFS: вид спектров

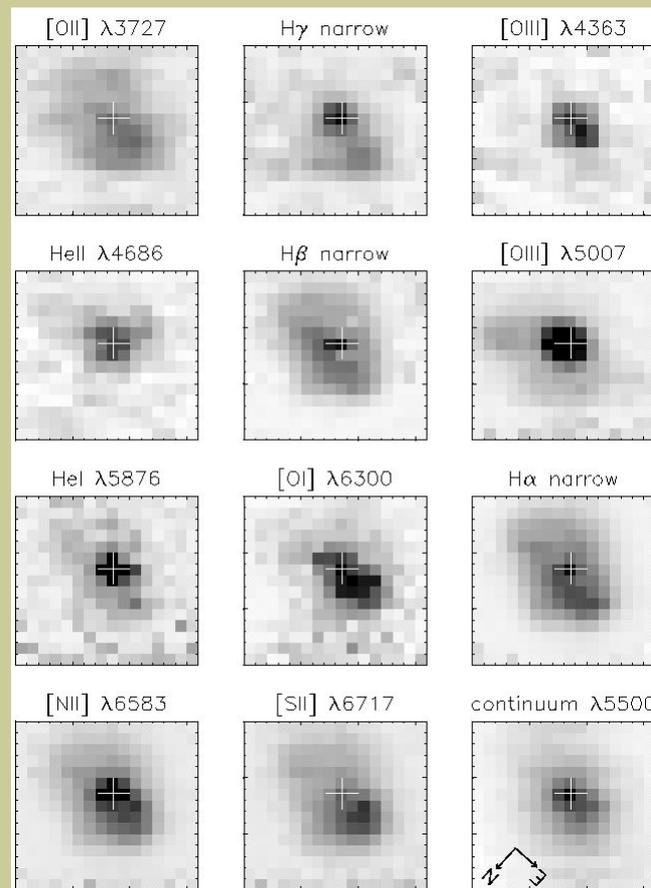
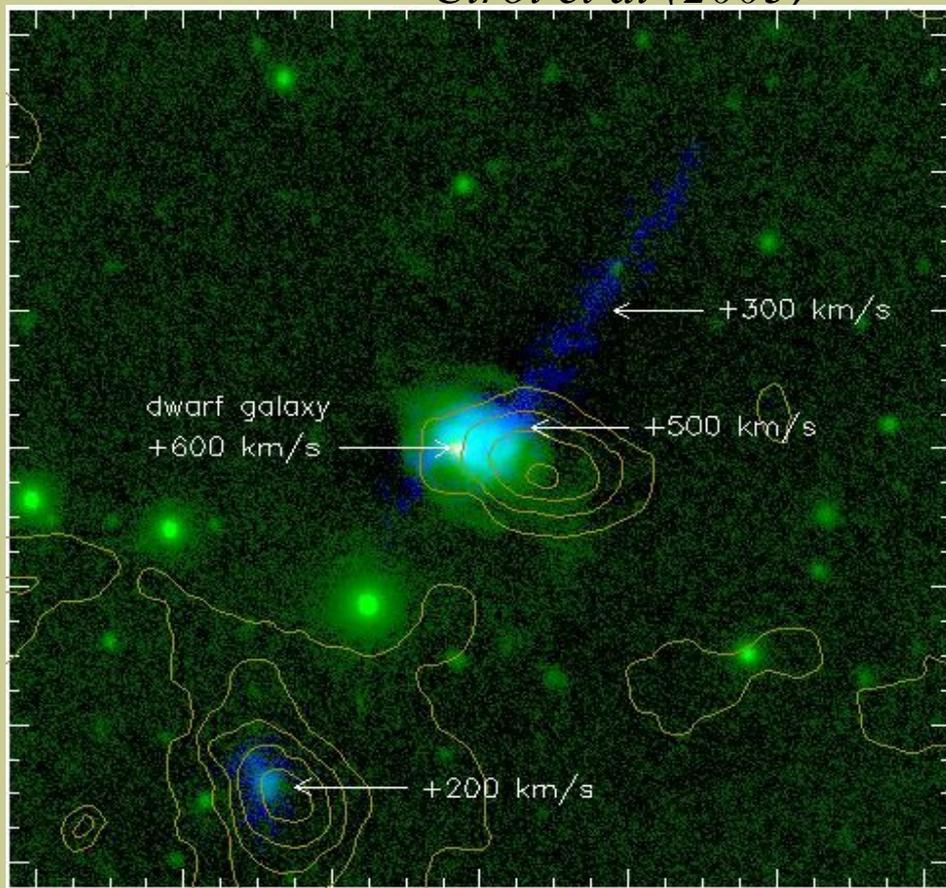


MPFS: обработка данных

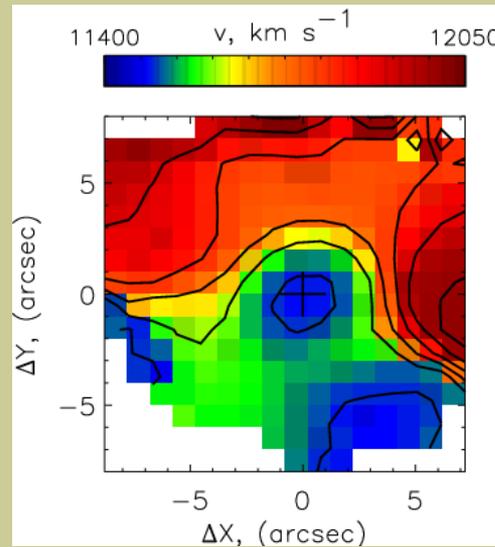
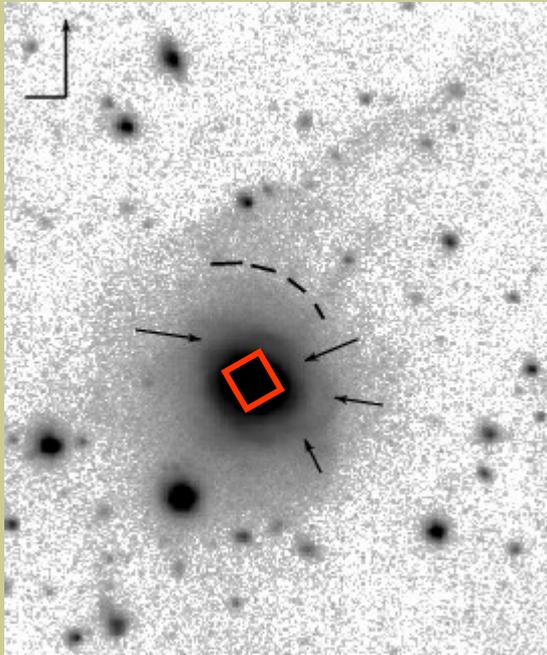


Ionizing gas in Mkn 315

Ciroi et al (2005)

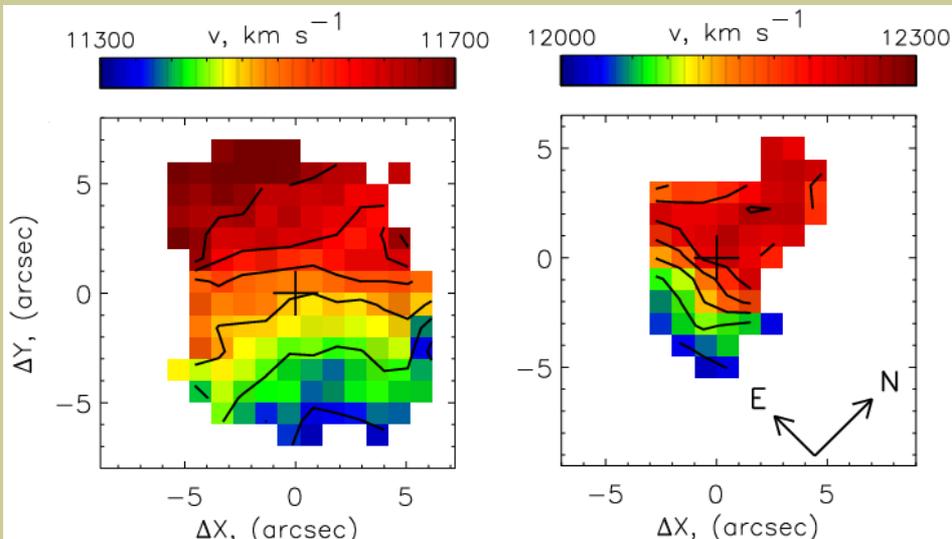


Mrk 315: взаимодействие с карликовым компаньоном



The velocity field of the ionized gas (MPFS):

non-regular rotation
nuclear outflow from AGN



Analysis of the stellar kinematics clearly distinguishes in LOSVD two independently rotating disks separated on systemic velocities on 600 km/s.
(Ciroi et al., 2005)

Противовращение газ-звезды

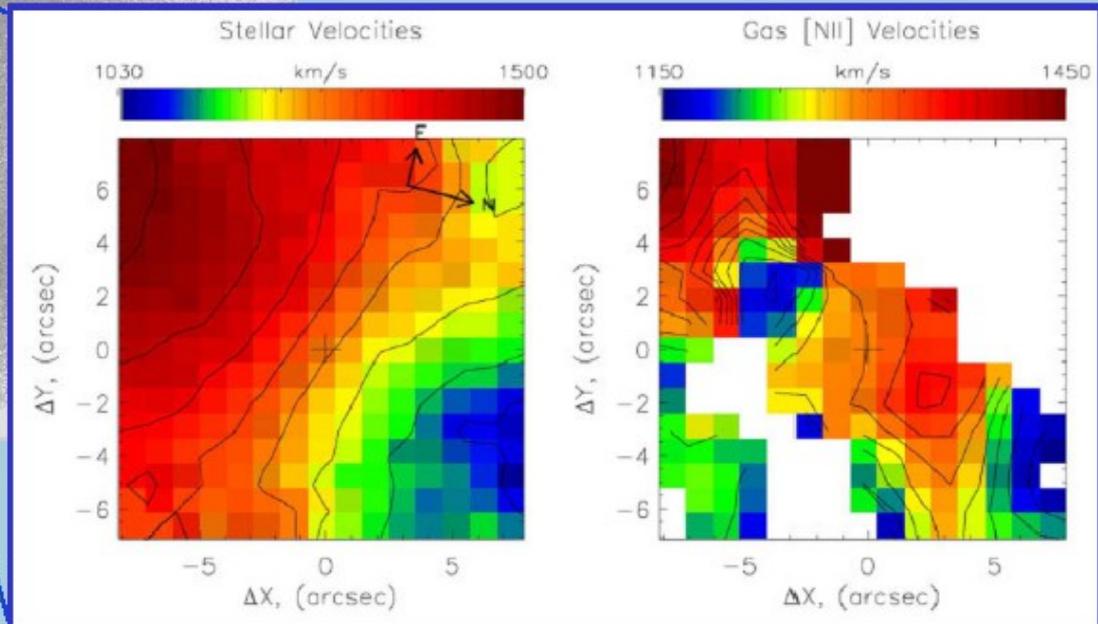
NGC 3945

In the circumnuclear disk stars have a regular rotation, but the ionized gas rotates in the opposite direction.

Velocity fields of stars and gas (MPFS data)

V-band image (SCORPIO)

Moiseev et al. (2004)

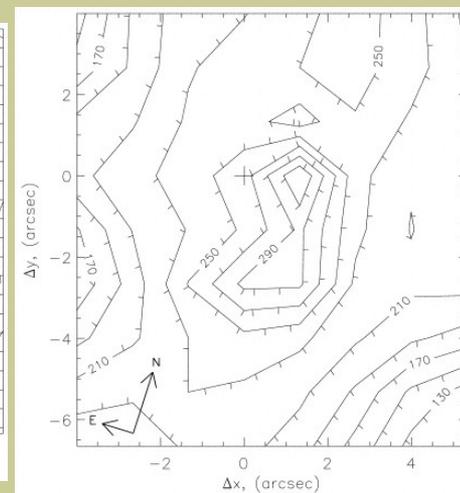
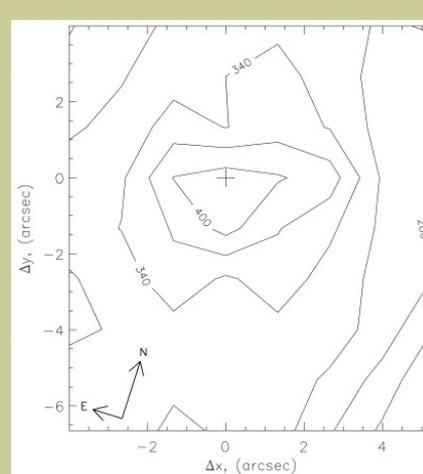
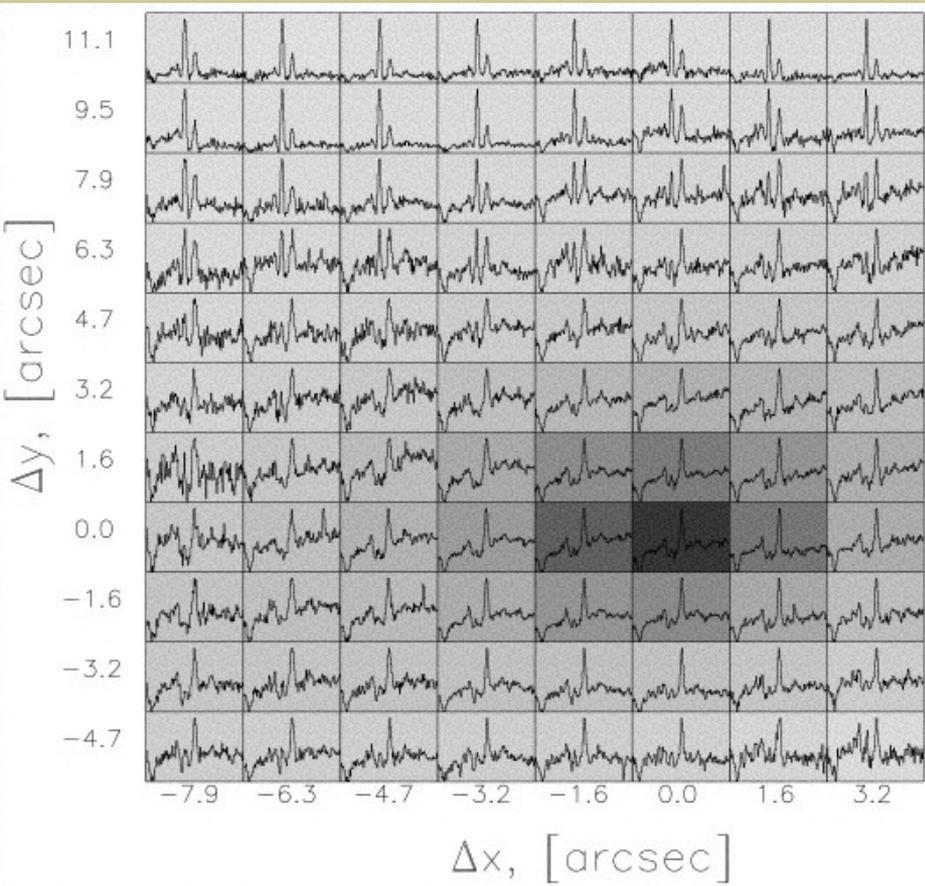


This is probably attributable to a merger of an accreted gaseous cloud with the corresponding direction of angular momentum.

MPFS: NGC 7331

Химически и динамически выделенные ядра

Сильченко. (1999)

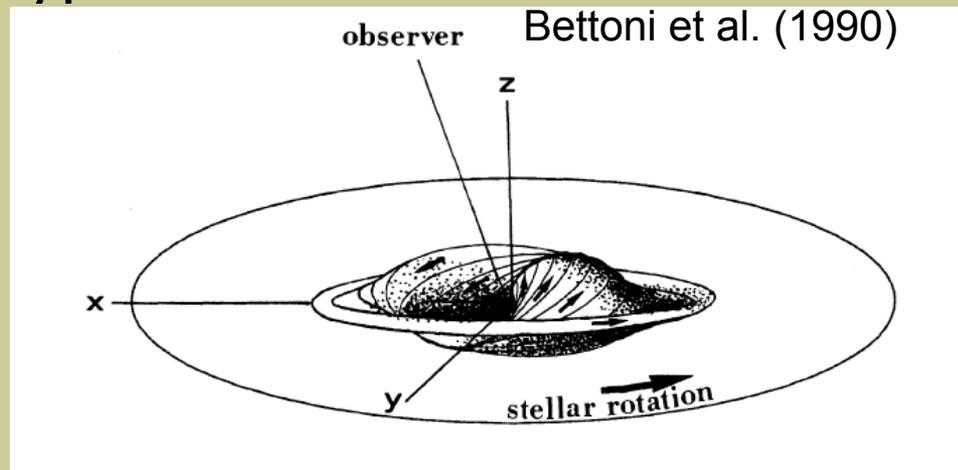
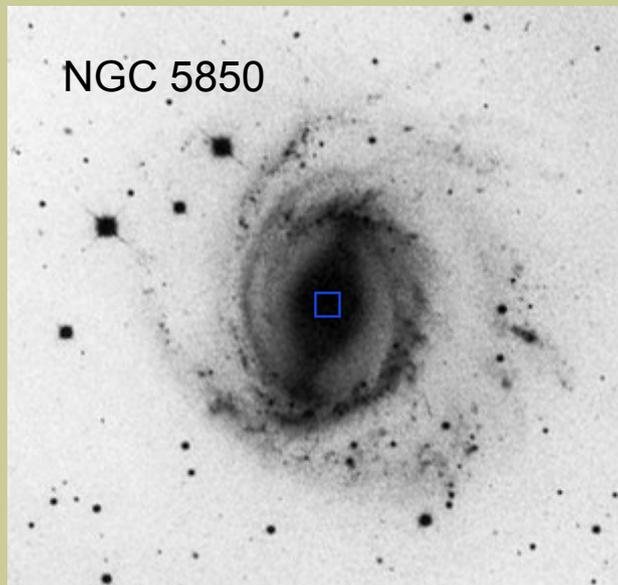


**Карты индексов металличности:
 Mgb и $\langle Fe \rangle$**

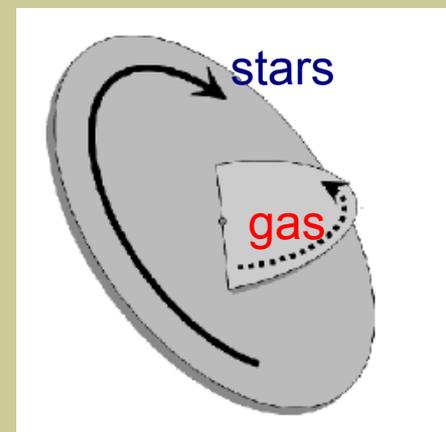
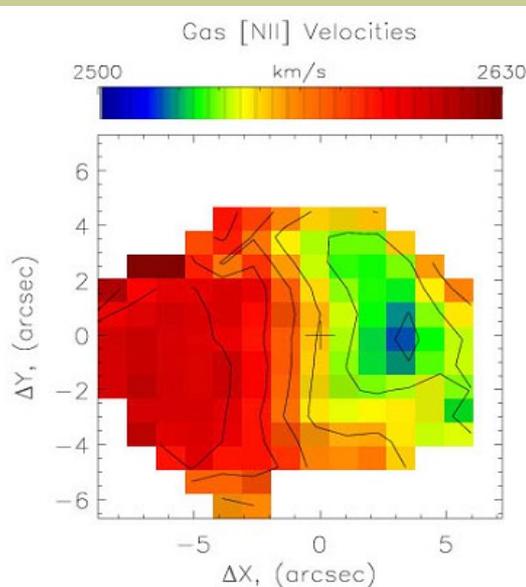
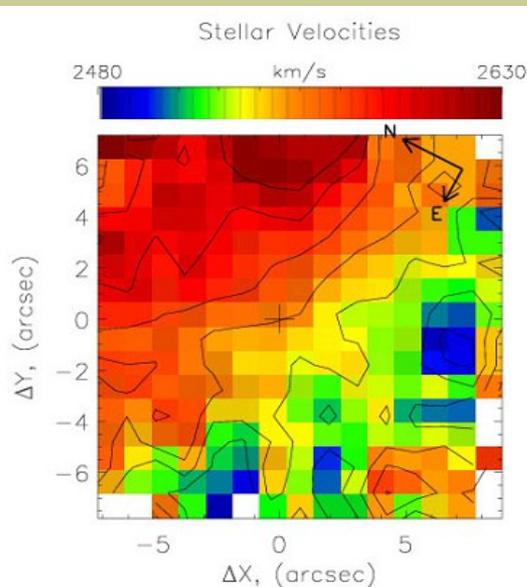
Внутренние полярные структуры

NGC 2217

Bettoni et al. (1990)

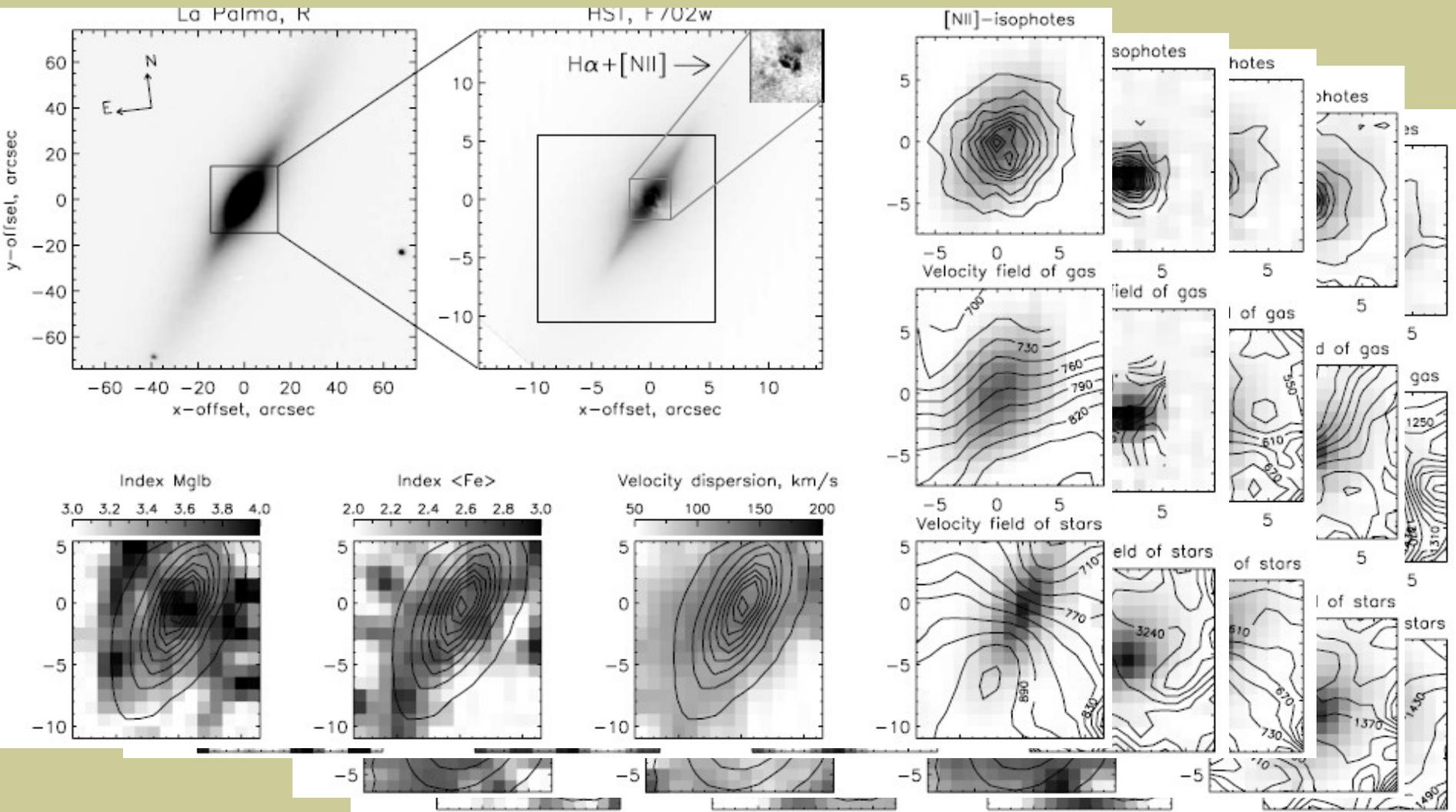


Silchenko et al. 1997: Nuclear polar ring in NGC 2841
Silchenko & Afanasiev 2000: NGC 7217



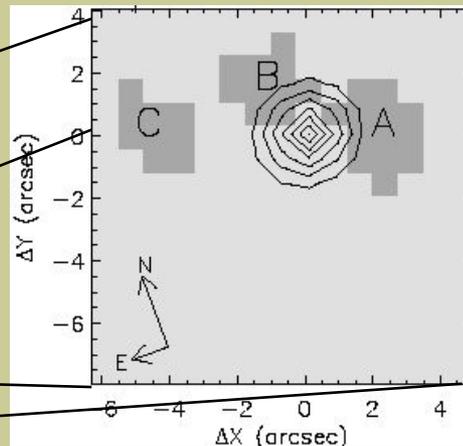
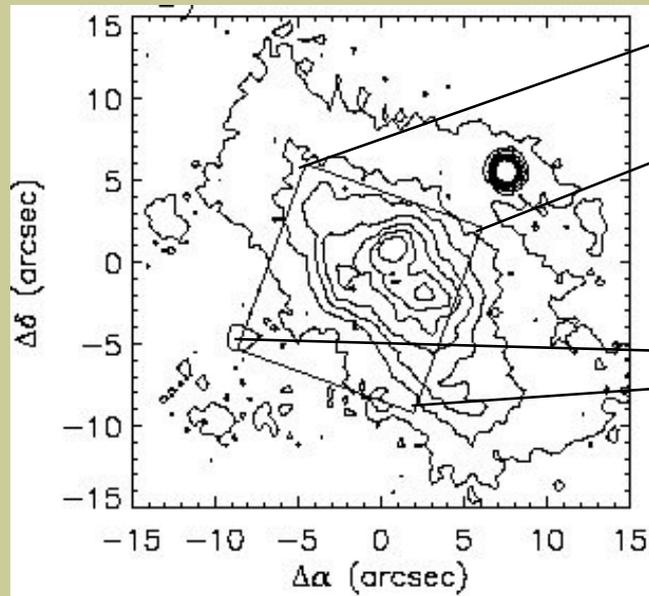
Moiseev et. (2004)

2D kinematics of S0 galaxies with circumnuclear dust lanes



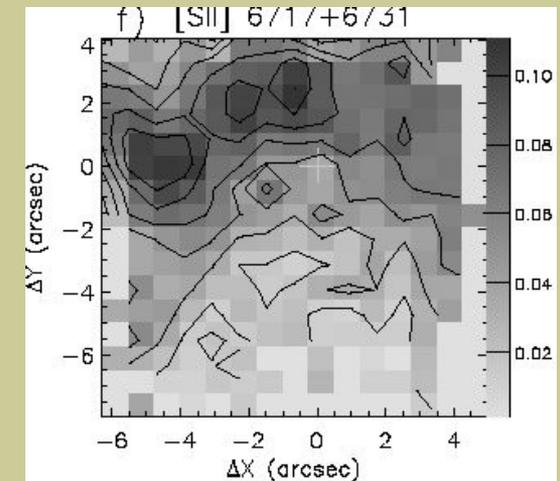
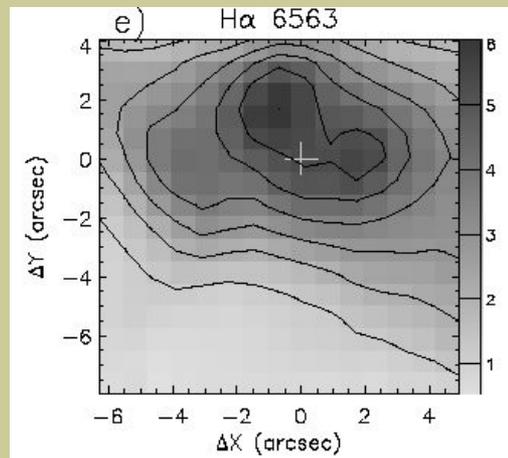
Sil'chenko & Afanasiev (2004): MPFS observations of stars and gas kinematics

MPFS: туманность вокруг звезды WR

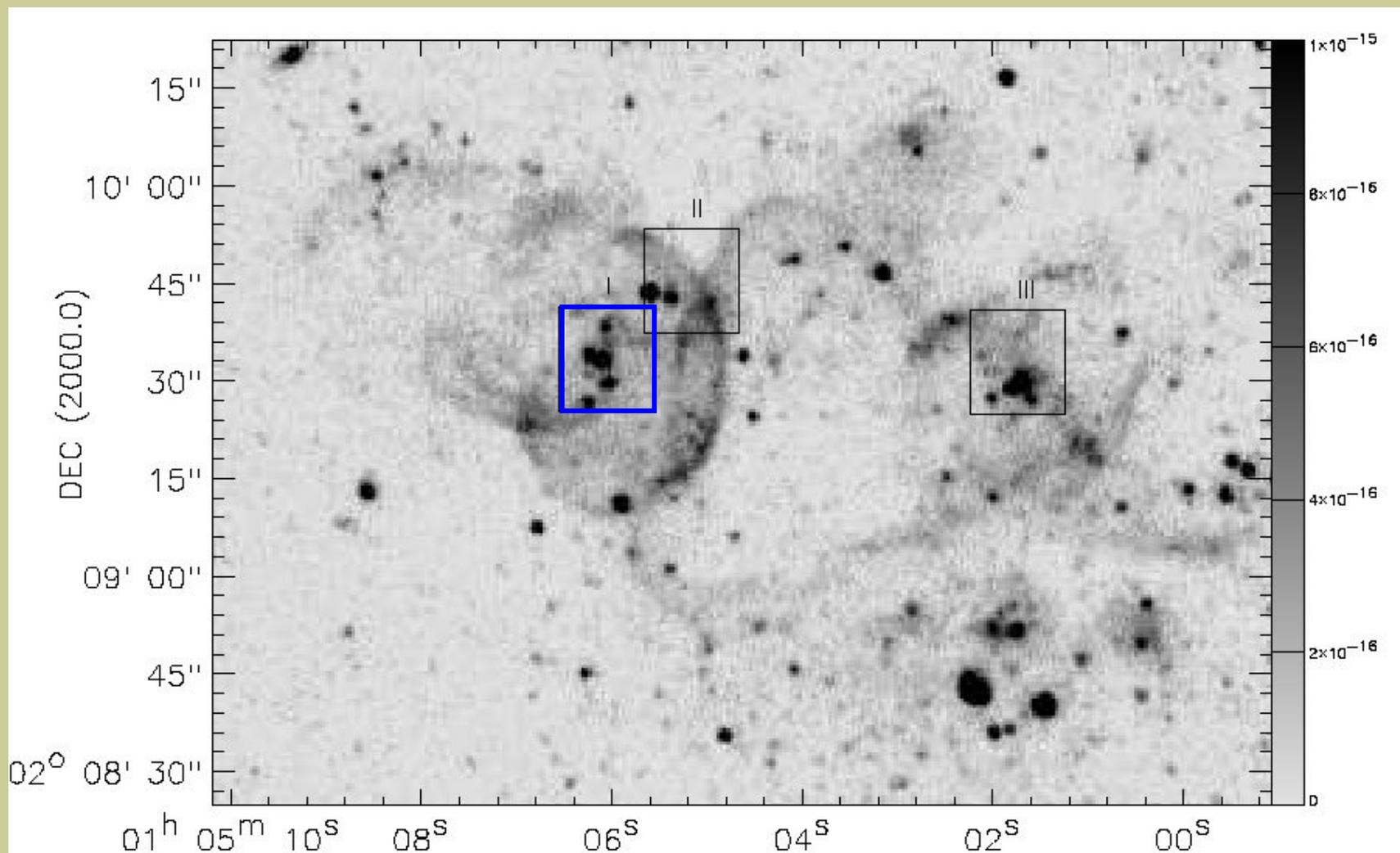


Измерения температуры, плотности и скоростей в отдельных газовых облаках

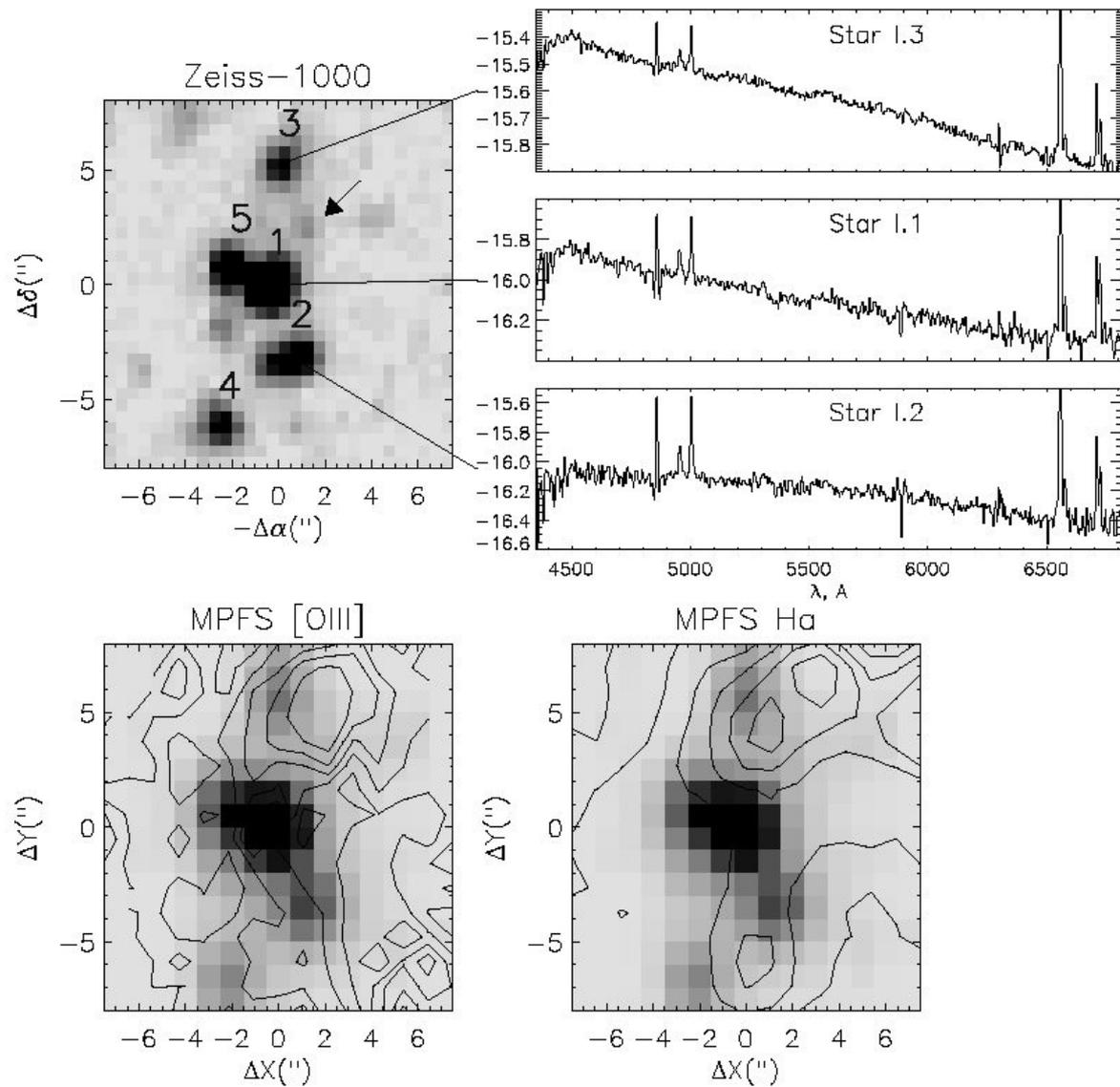
Лозинская и др (2001)



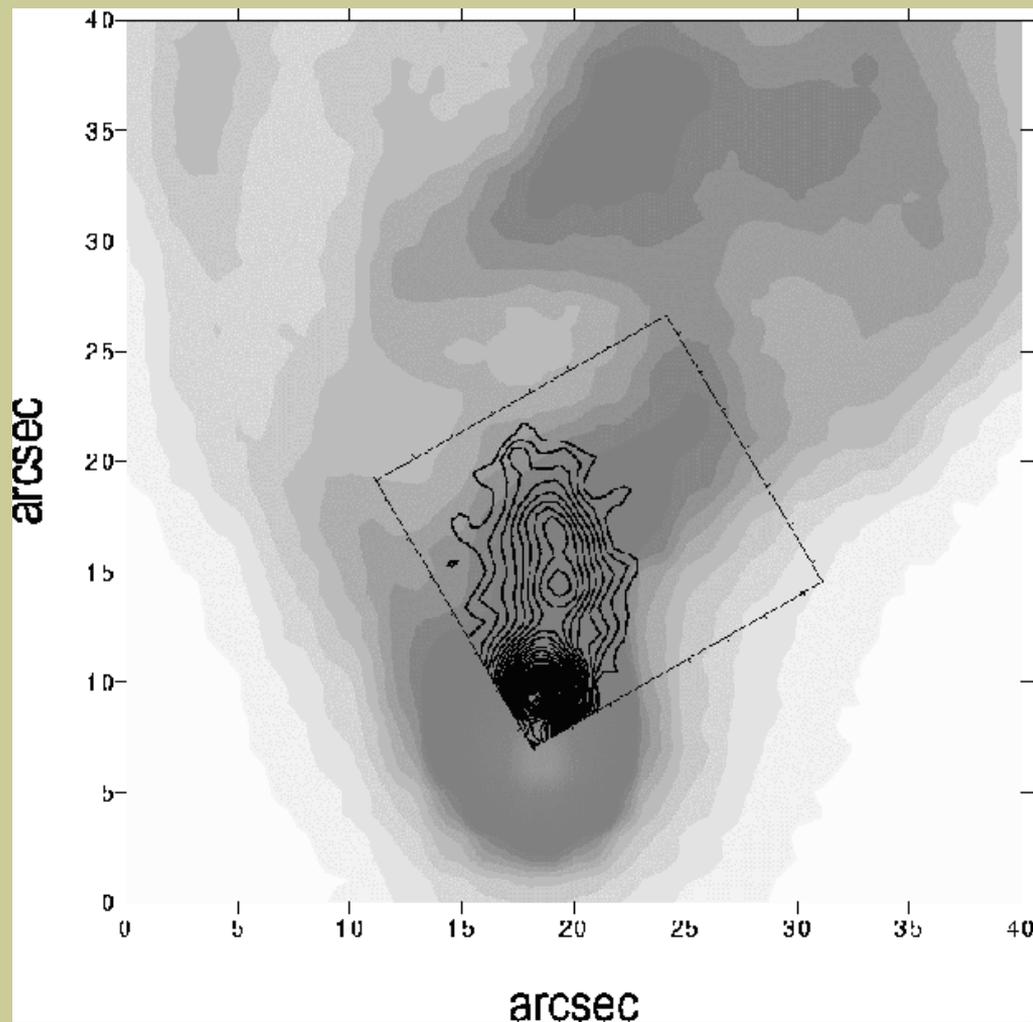
MPFS: ионизованные оболочки в IC1613



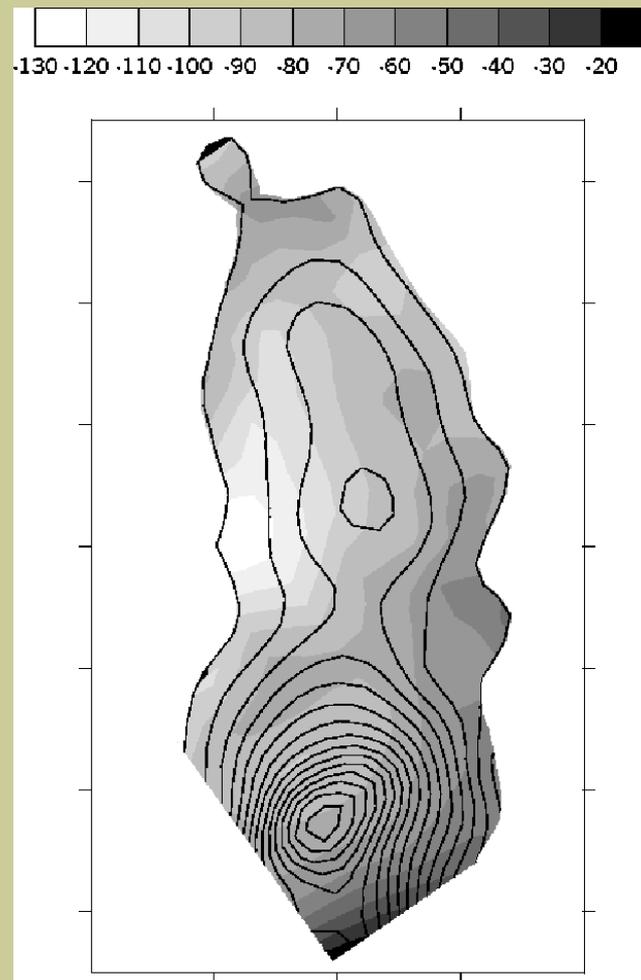
Lozinskaya et al (2002)



MPFS: изогнутый джет из звезды R Mon



Поле скоростей в [SII]



Мовсеян и др (2000)

Holmberg II ULX

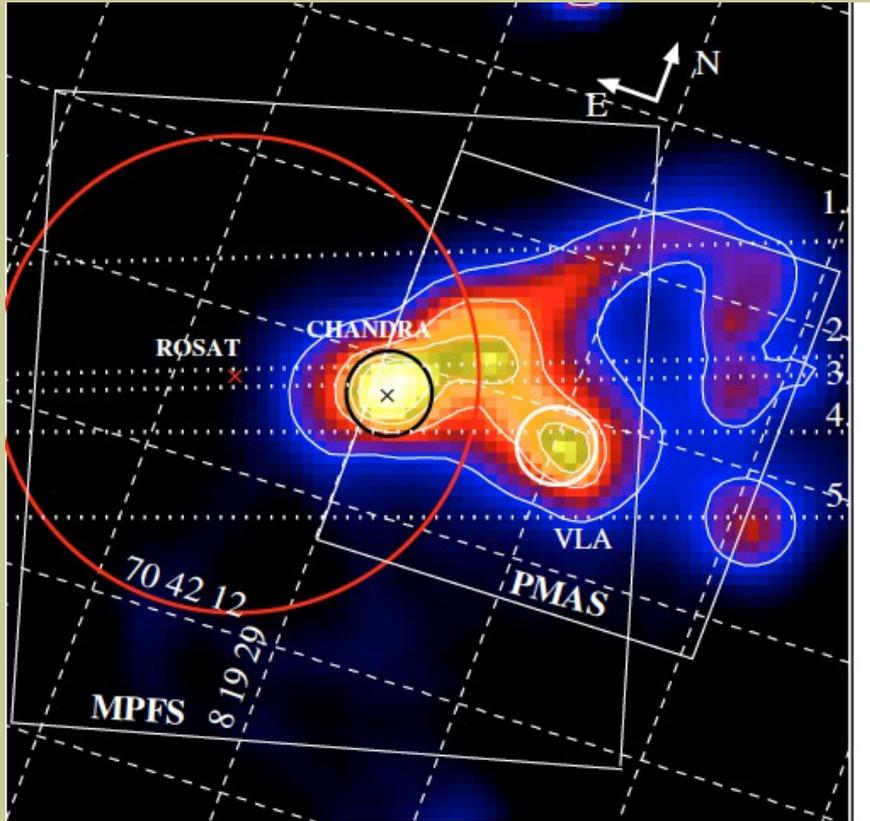
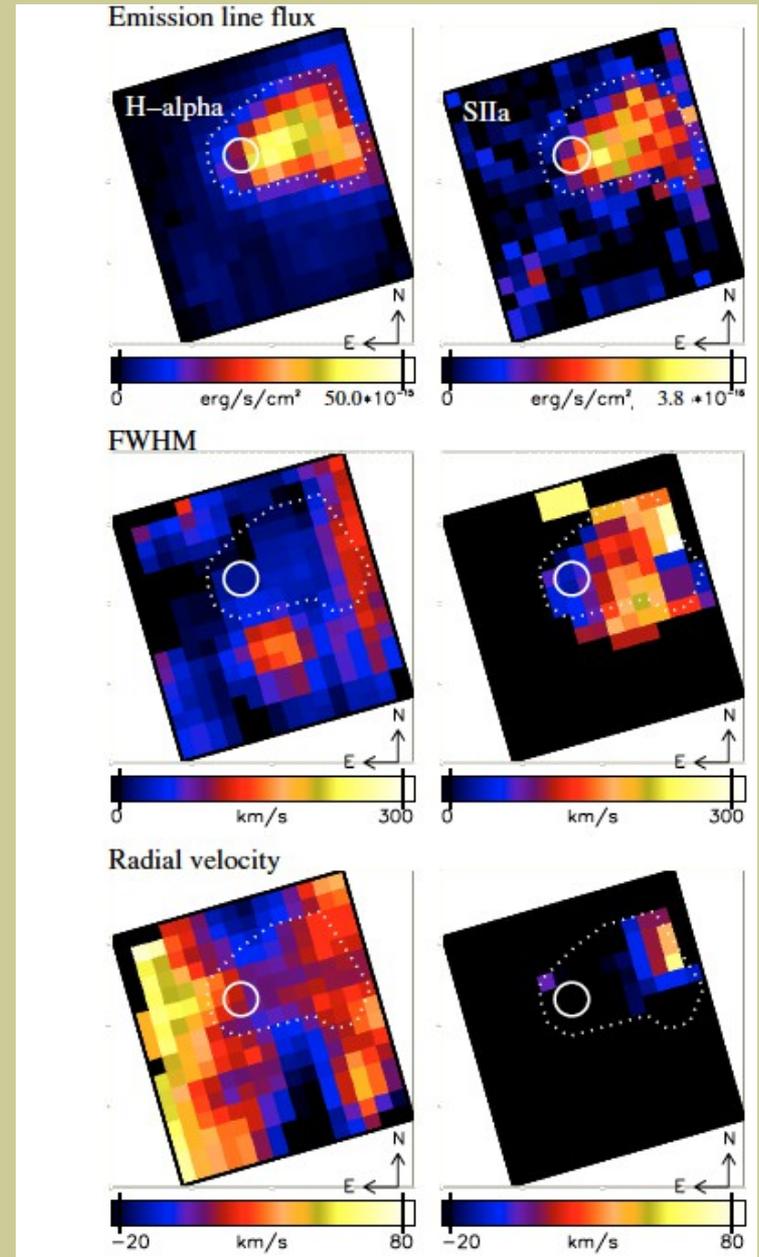
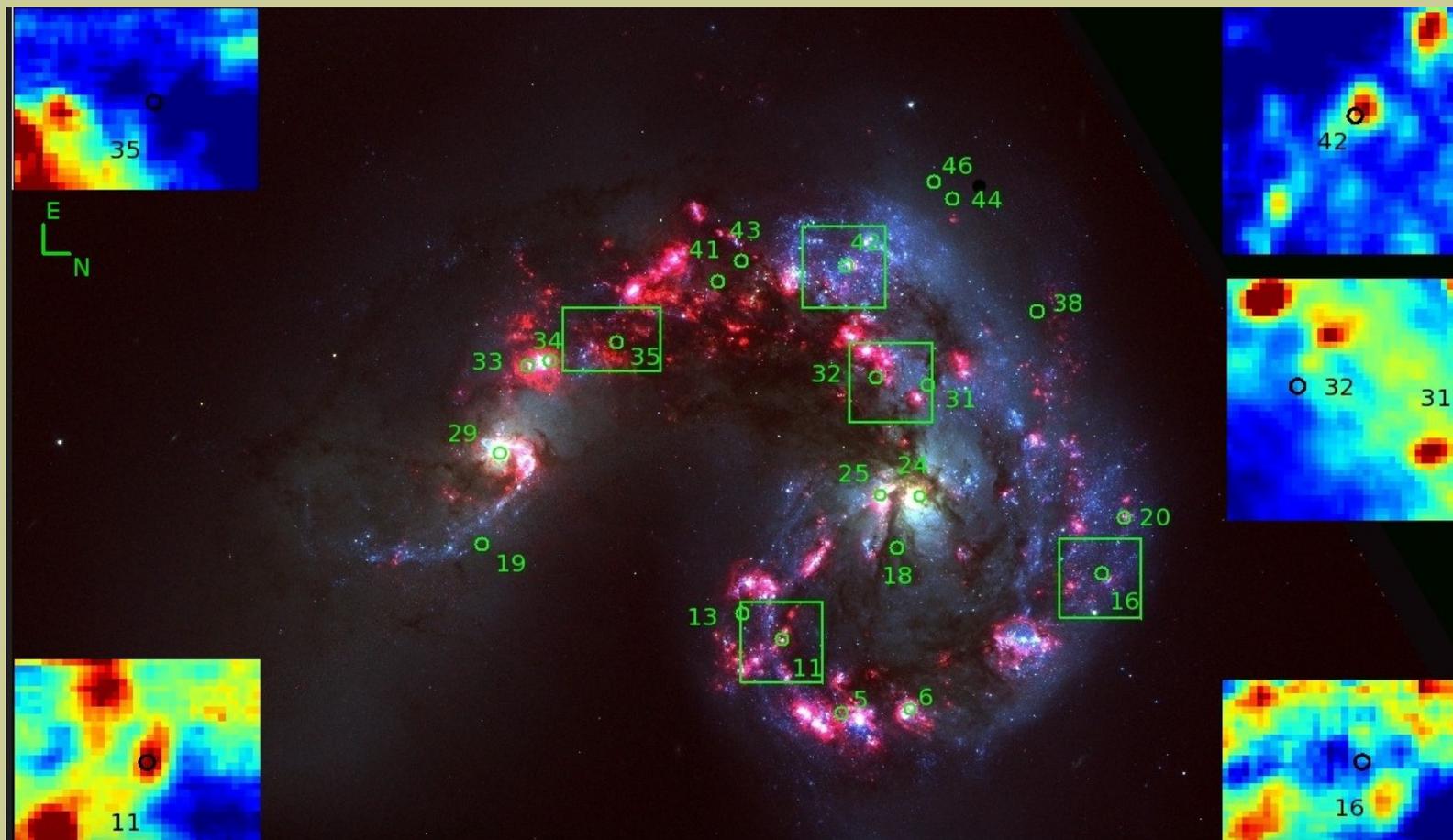


fig. 1. CFHT archival H α image of the HoII X-1 region. The MPFS OV and the PMAS mosaic FOV are superposed. The small black and

Lehmann, Becker, Fabrika et al 2005

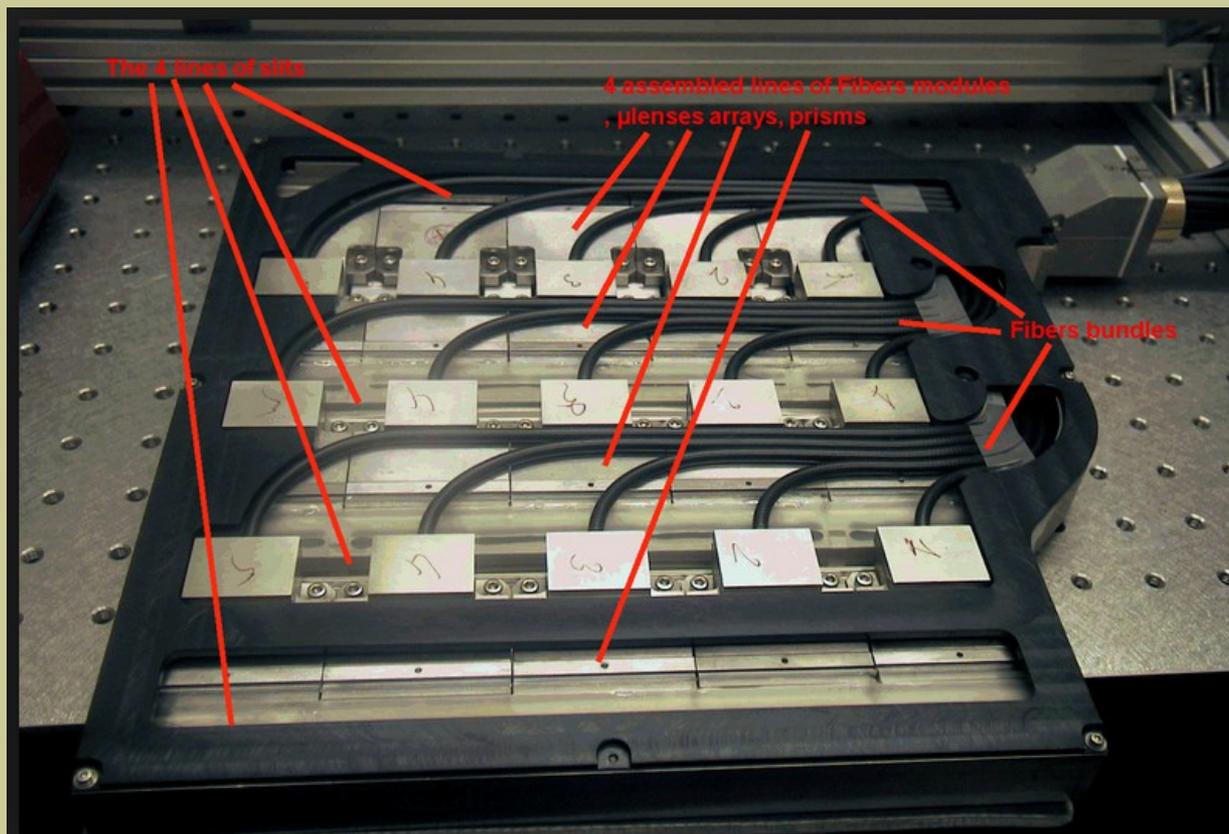


VIMOS: ультраяркие рентгеновские источники



Poutanen, Fabrika, Valeev, Sholukhova, Greiner (2013)

VIMOS/VLT: развод жгутов на 4 ПЗС



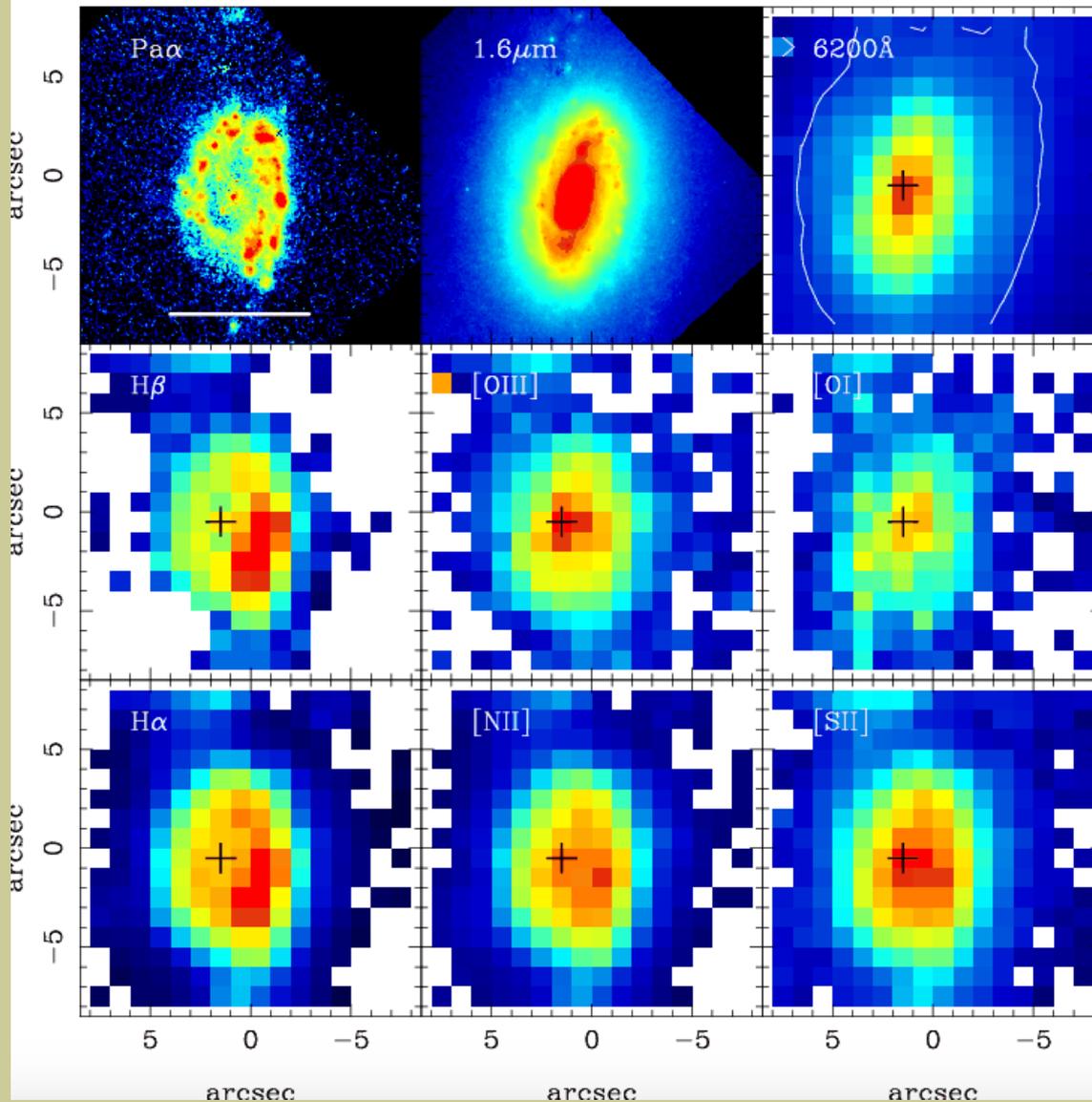
6400 spectra:

54"x54" @ 0.67"/spaxel

27"x27" @ 0.67"/spaxel

PMAS=Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer

NGC23



3.5-m Calar Alto

16x16 square elements, 1mm pitch

0.5 arcsec sampling, 8 x 8 arcsec² FOV

0.75 arcsec sampling, 12 x 12 arcsec² FOV

1.0 arcsec sampling, 16 x 16 arcsec² FOV

256 OH-doped fibers, 150μm core diameter

MPFS – был взят за прототип

IFU/SCORPIO-2

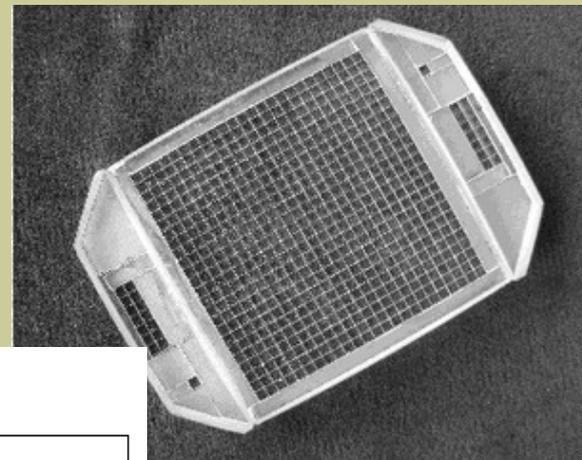


22x22 элемента (0.7"/линзу)
Упаковка волокон в 2 щели
отдельный коллиматор

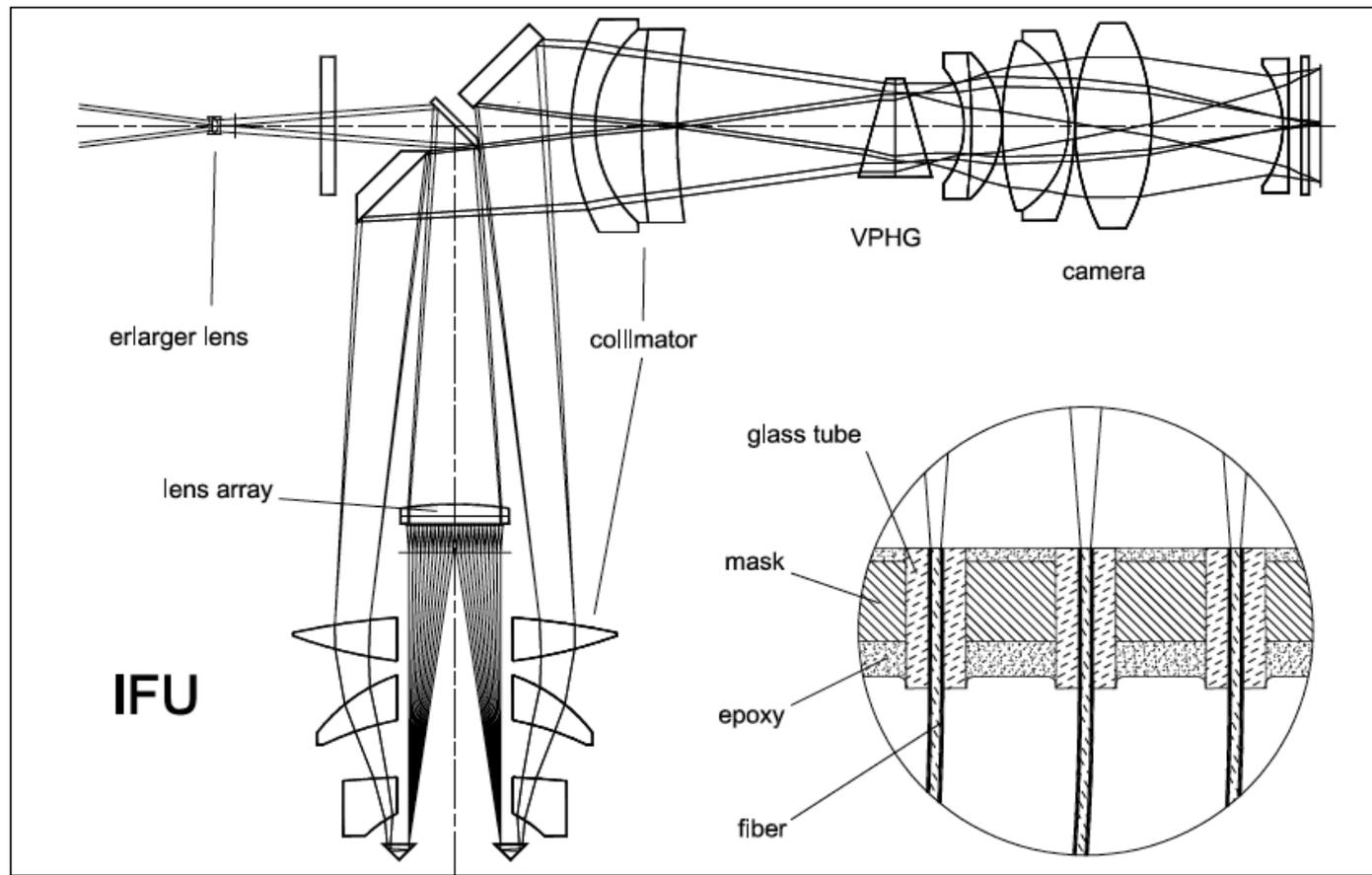


IFU (Integral-Field Unit) SCORPIO-2

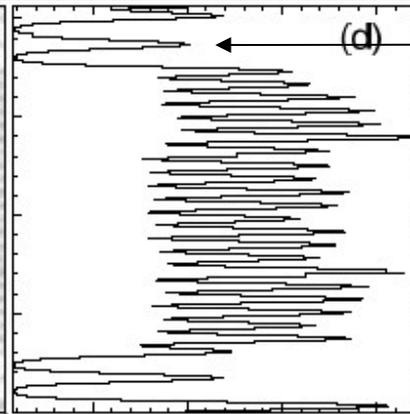
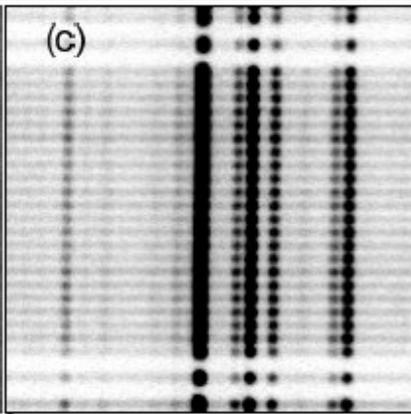
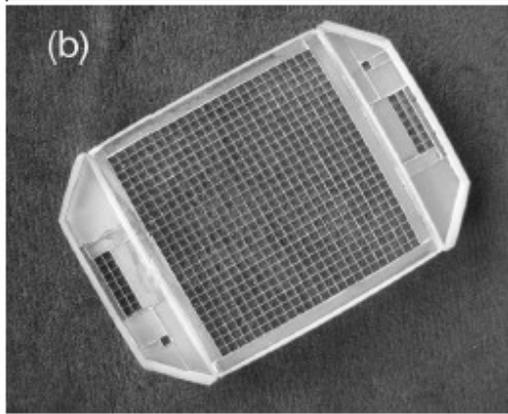
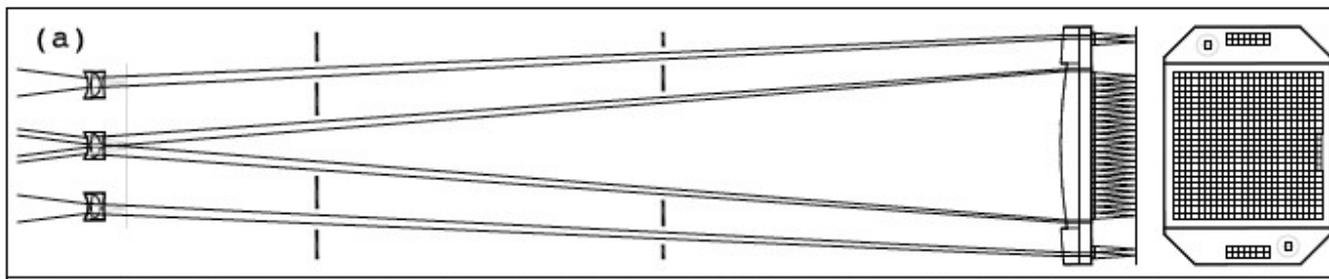
Используется отдельный коллиматор
Две “псевдощели”



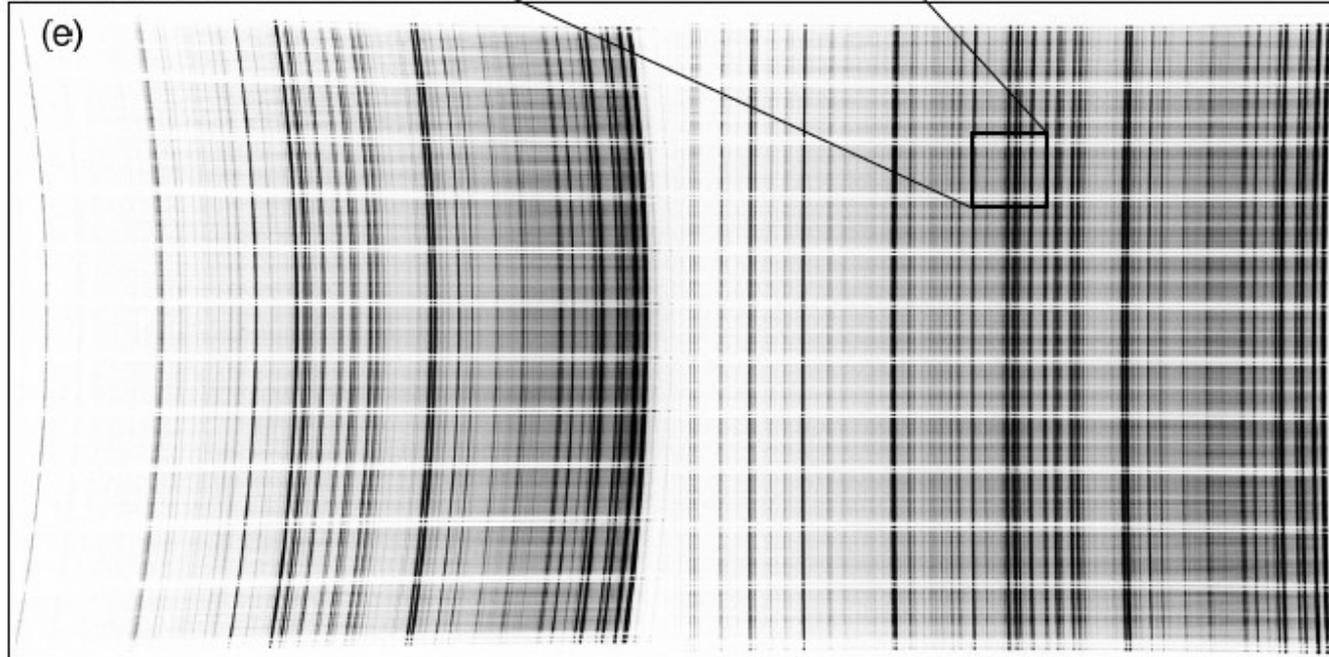
АФАНАСЬЕВ и др.



Афанасьев, Егоров, Перепелицын (2018)



Спектр от "неба"



Спектр сравнения
(He-Ne-Ar)

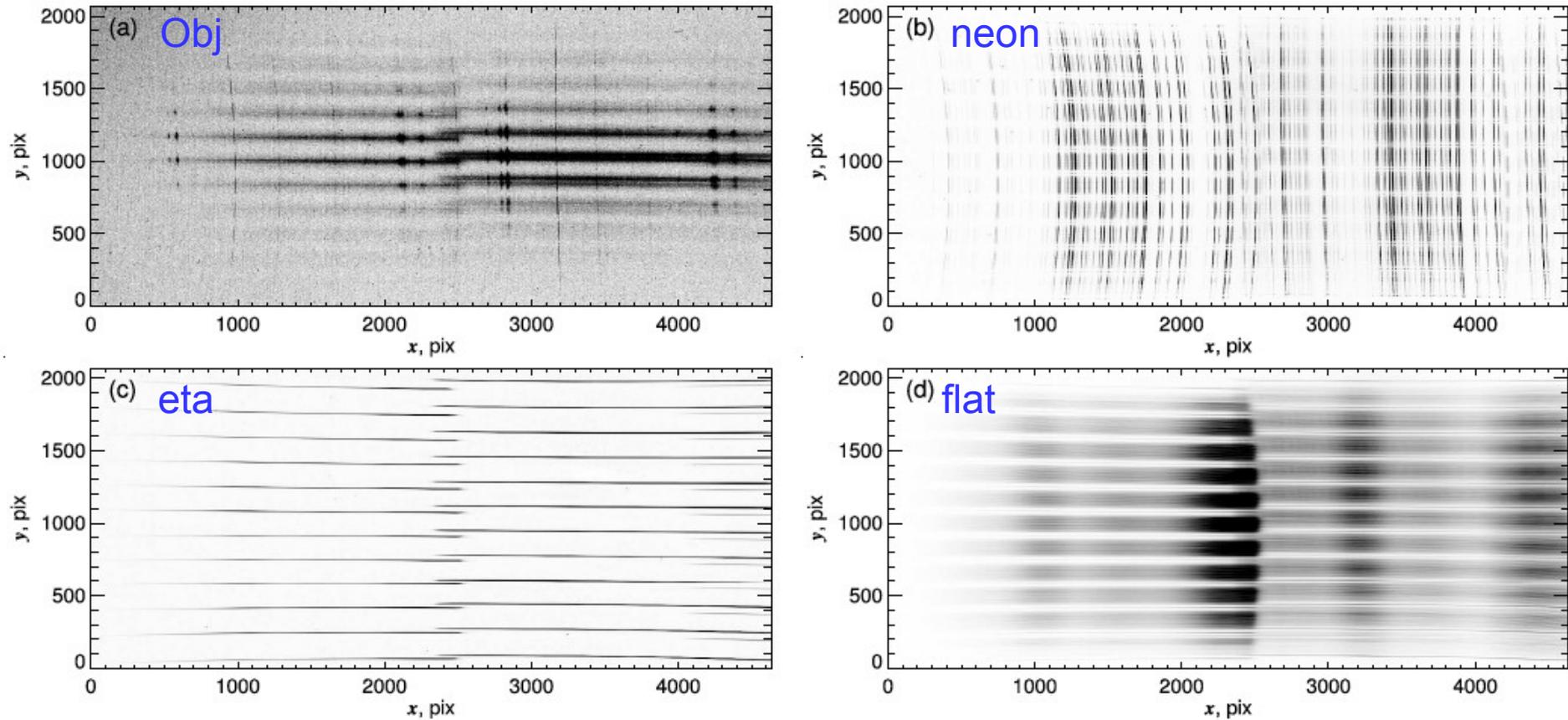


Рис. 7. Пример необработанных кадров из набора данных, полученных с решеткой VPHG940@600: (a) OBJ — спектр объекта Mrk 78; (b) NEON — калибровочный спектр He-Ne-Ag лампы ; (c) ETA — эталонный спектр, снятый с маской 12dots; (d) FLAT — спектр плоского поля.

Экстракция спектров

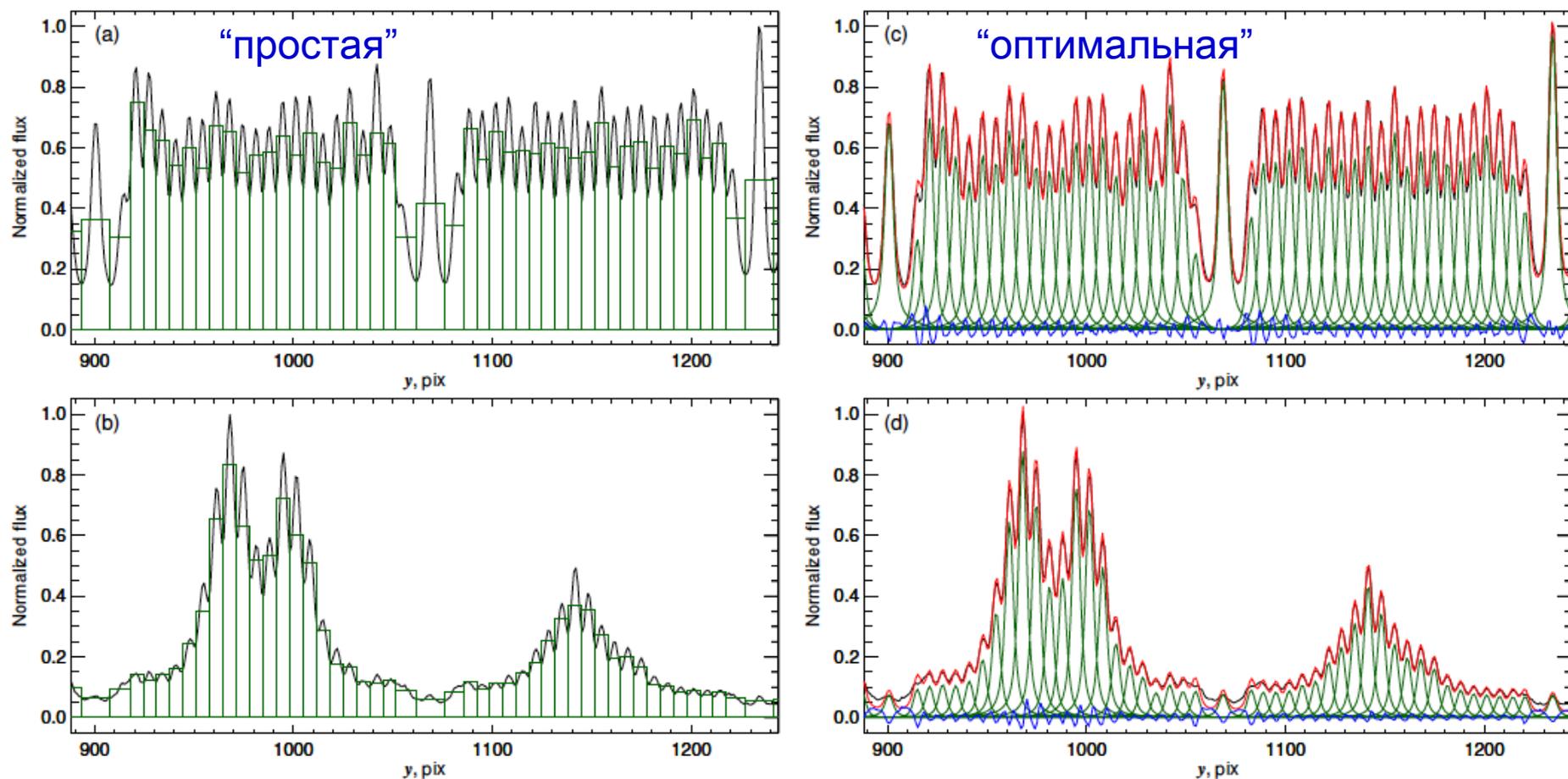
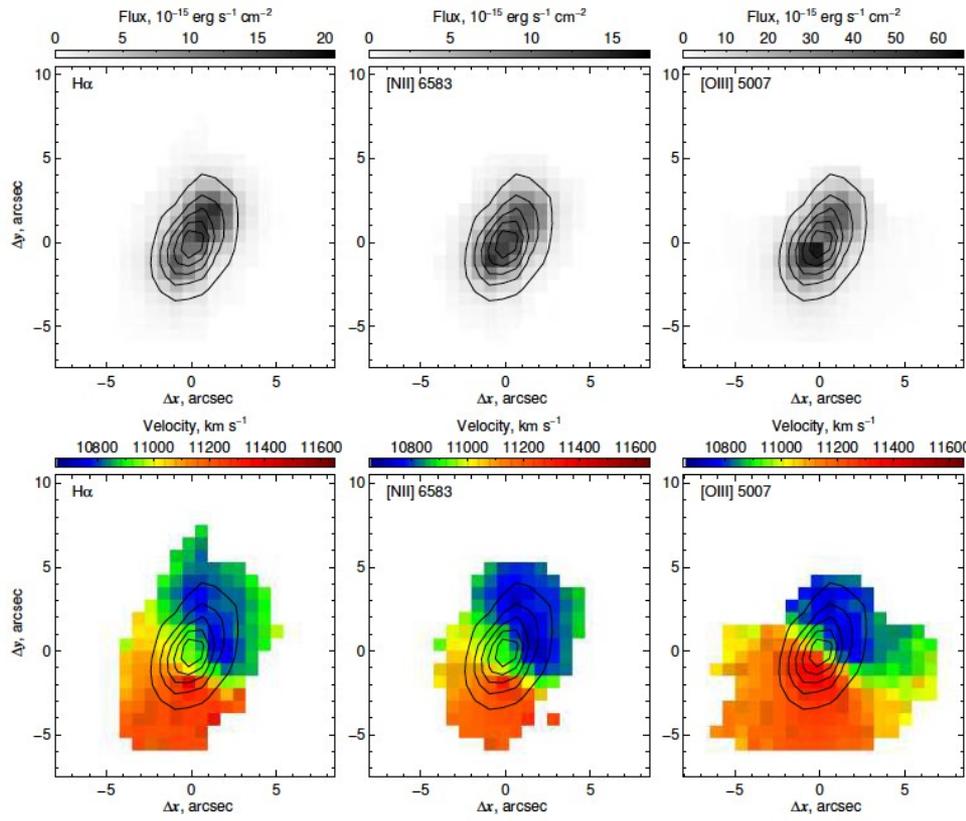
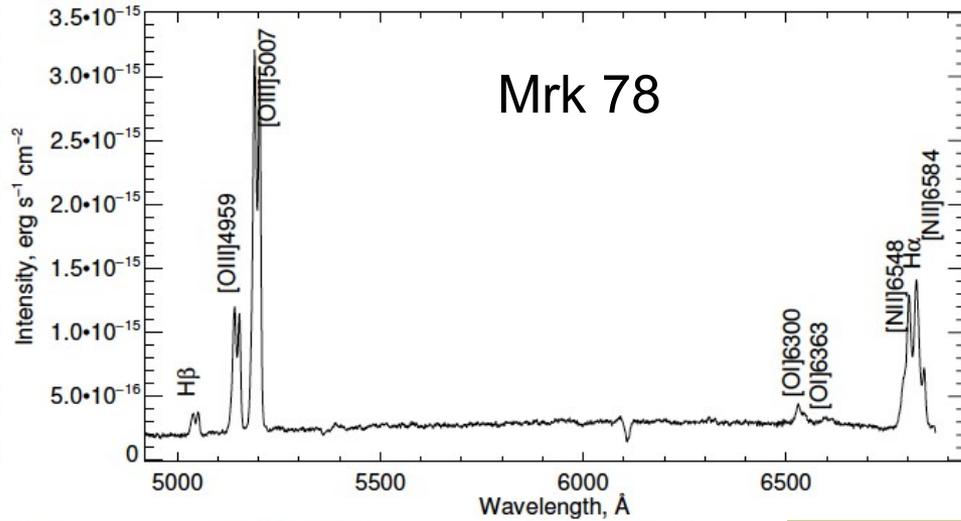
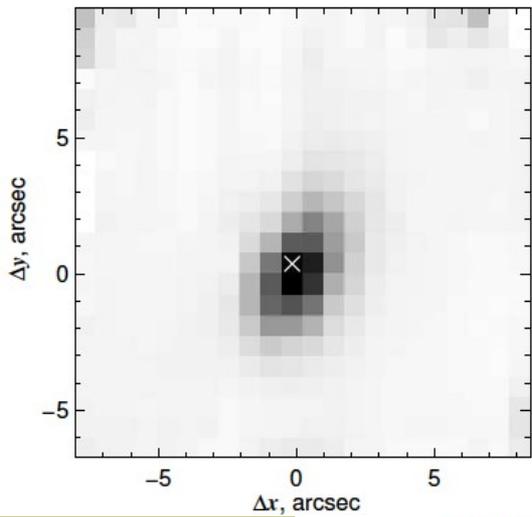


Рис. 10. Распределение нормированной интенсивности поперек дисперсии в спектрах FLAT (а, с) и OBJ (b, d) от правой щели. Ширина и площадь прямоугольников на панелях (а, b) соответствуют размеру области интегрирования и потоку от каждого световода при простой экстракции спектров. На панелях (с, d) зеленым цветом показаны модели распределения интенсивности от каждого световода, красным — интегральный модельный спектр, а синим — разница между наблюдаемым и экстрагированным распределением интенсивностей при оптимальной экстракции.



Квантовая эффективность

Для каждой щели

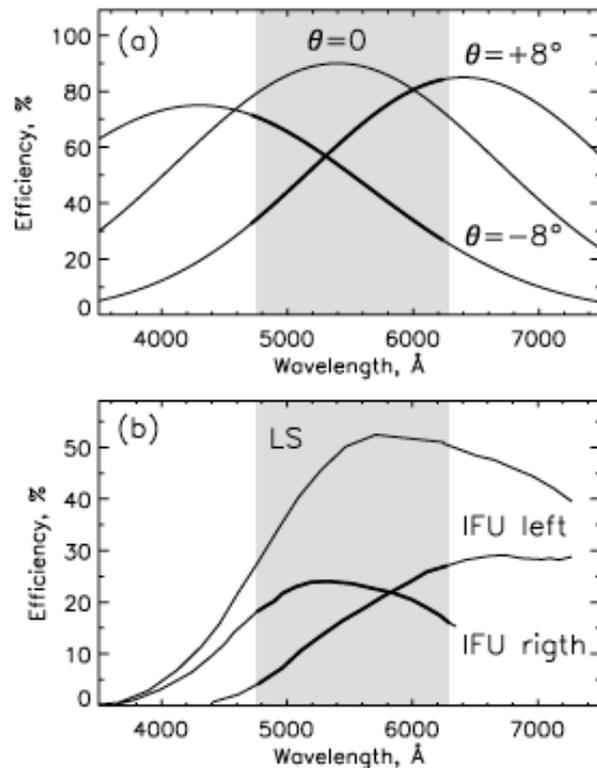


Рис. 4. Расчетные (а) и измеренные (б) эффективности решетки VPHG1200@540 в режиме IFU. Серым цветом показан выделяемый интерференционным фильтром спектральный интервал для этой решетки

Средняя

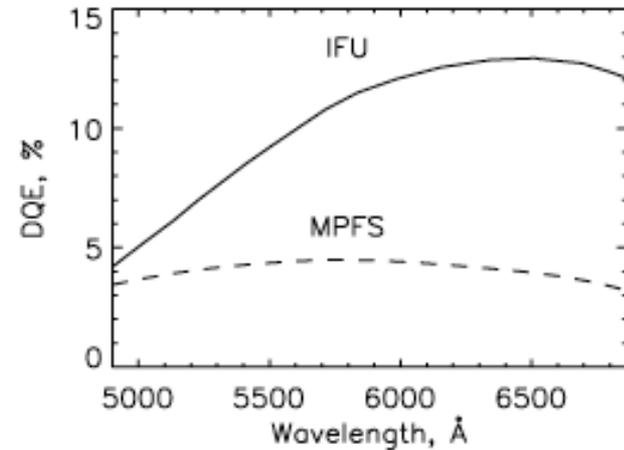


Рис. 12. Измеренная квантовая эффективность IFU SCORPIO-2 с решеткой VPHG940@600. Для сравнения штриховой линией показана квантовая эффективность спектрографа MPFS с отражательной дифракционной решеткой с числом штрихов 600 мм^{-1} .

О многом, здесь недосказанном – в этой книге

