

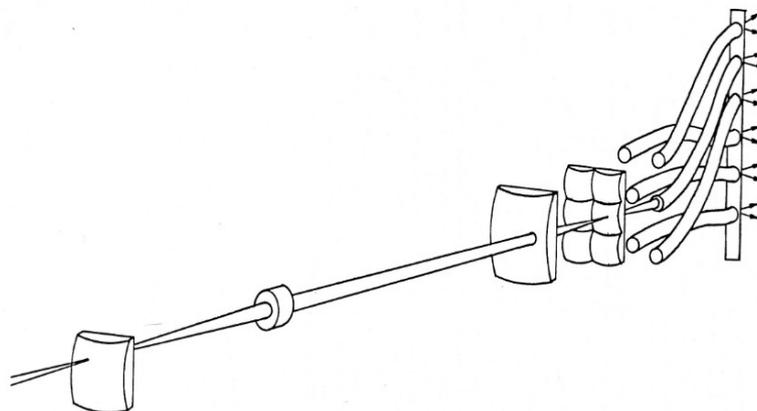
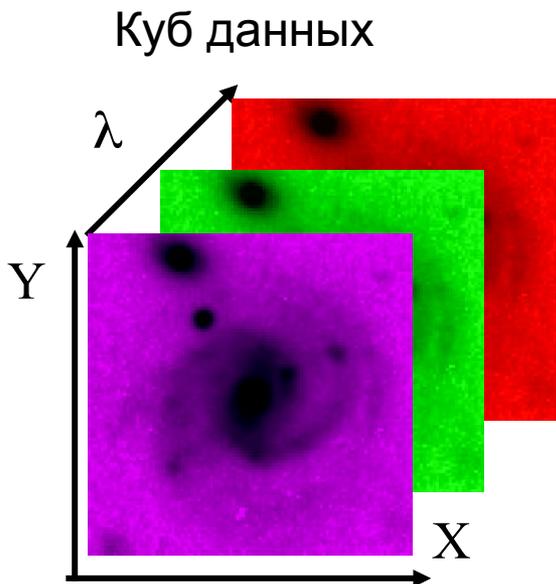
Многорезжимный фокальный редуктор телескопа БТА

Лекция VI.

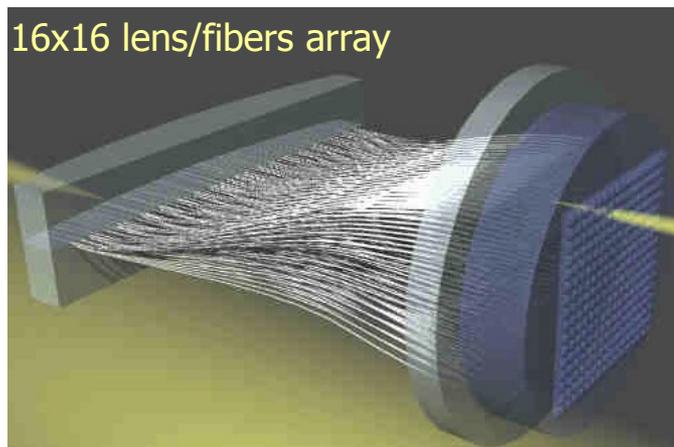
3D-спектроскопия на SCORPIO-2. Блок IFU.
Сканирующий интерферометр Фабри-Перо.

2D/3D/панорамная - спектроскопия

“An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes”
Georges Courtès 1982
(Proceedings of IAU Colloq. 67, held in Zelenchukskaya, USSR)



Multi Pupil Fiber Spectrograph (MPFS)



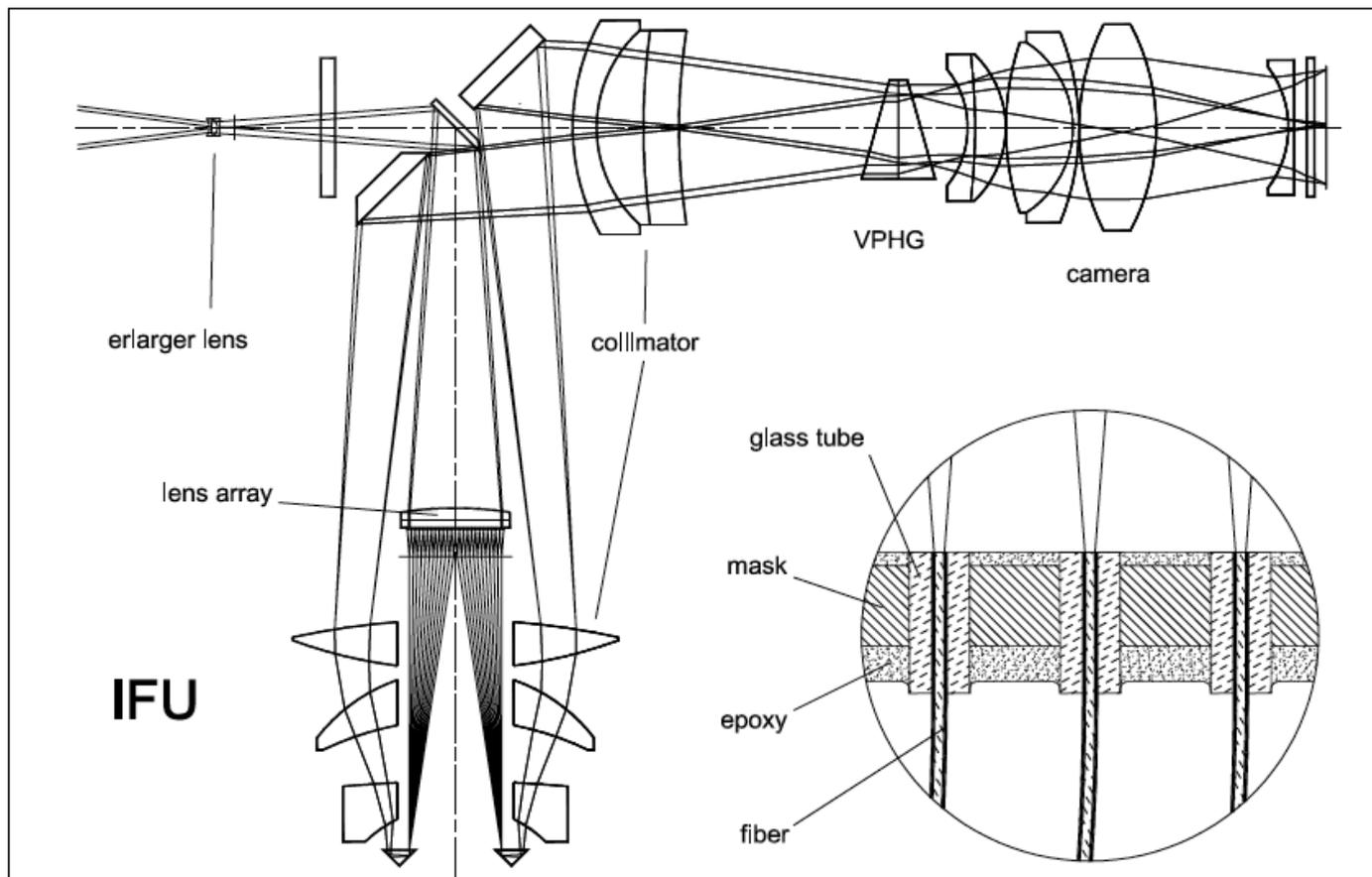
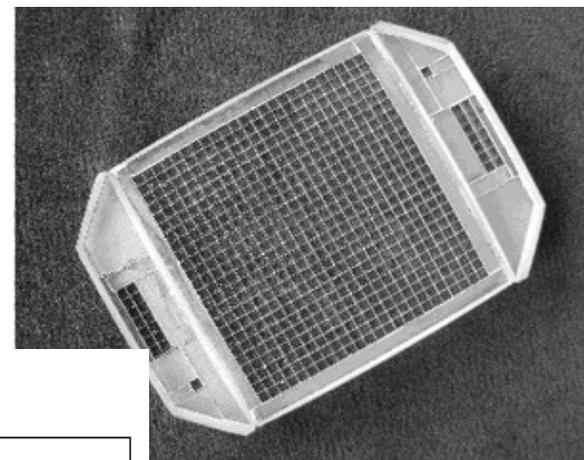
Афанасьев и др. (1990, 2001)

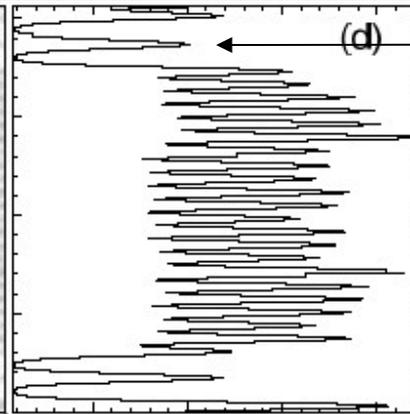
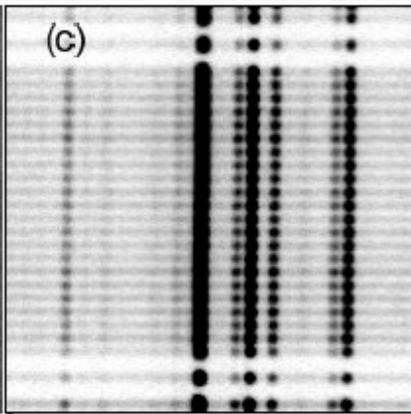
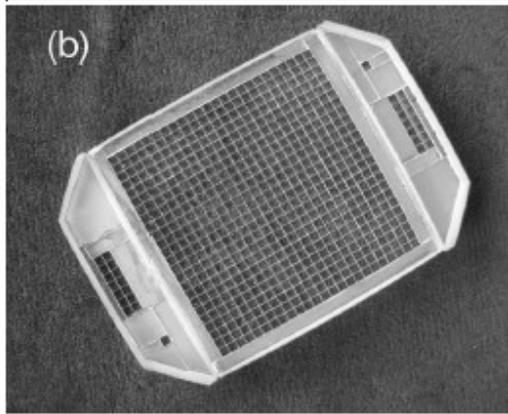
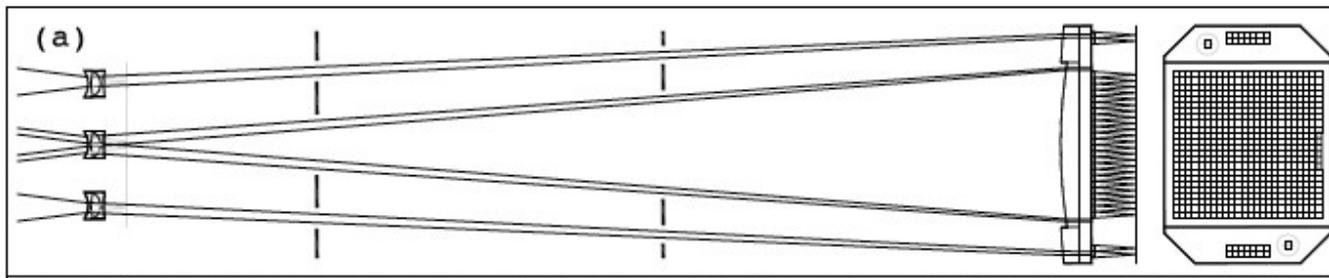
Массив линз 16 x 16 + 15 волокон для фона
Масштаб : 0.5, 0.75, 1 "/линзу
Три поколения приборов (а 4e – на SCORPIO-2)

IFU (Integral-Field Unit) SCORPIO-2

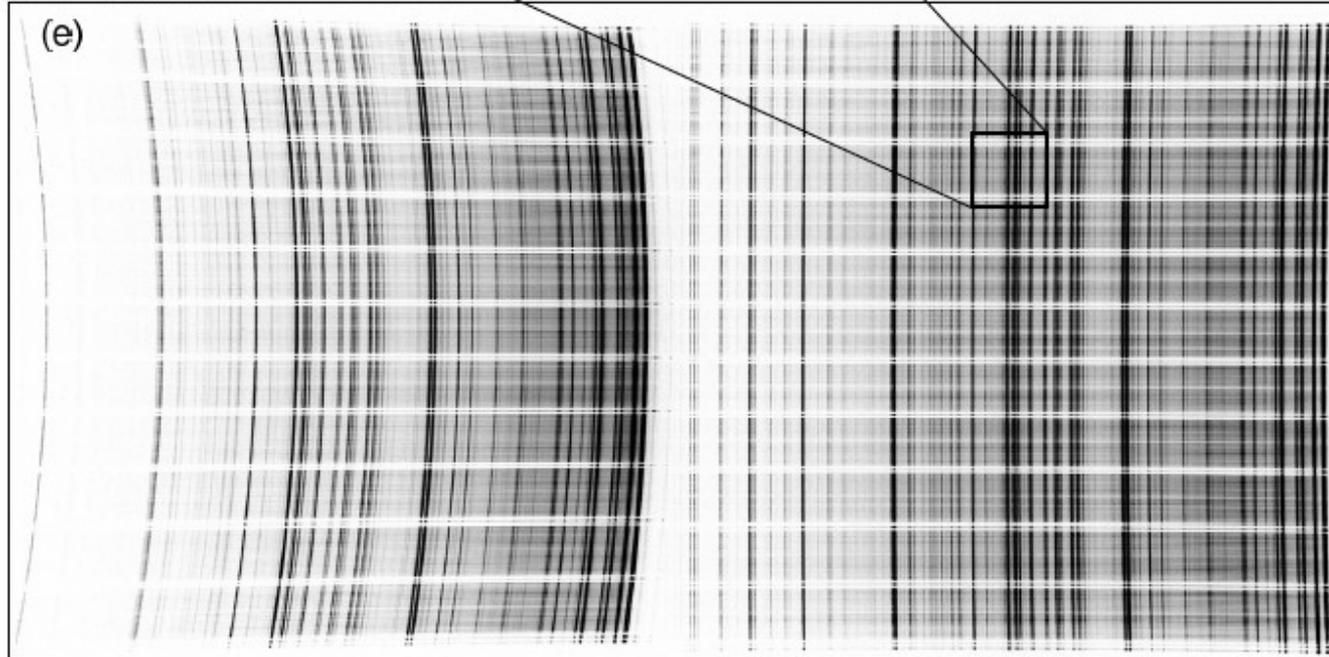
Используется отдельный коллиматор
Две “псевдощели”

АФАНАСЬЕВ и др.





Спектр от “неба”



Спектр сравнения
(He-Ne-Ar)

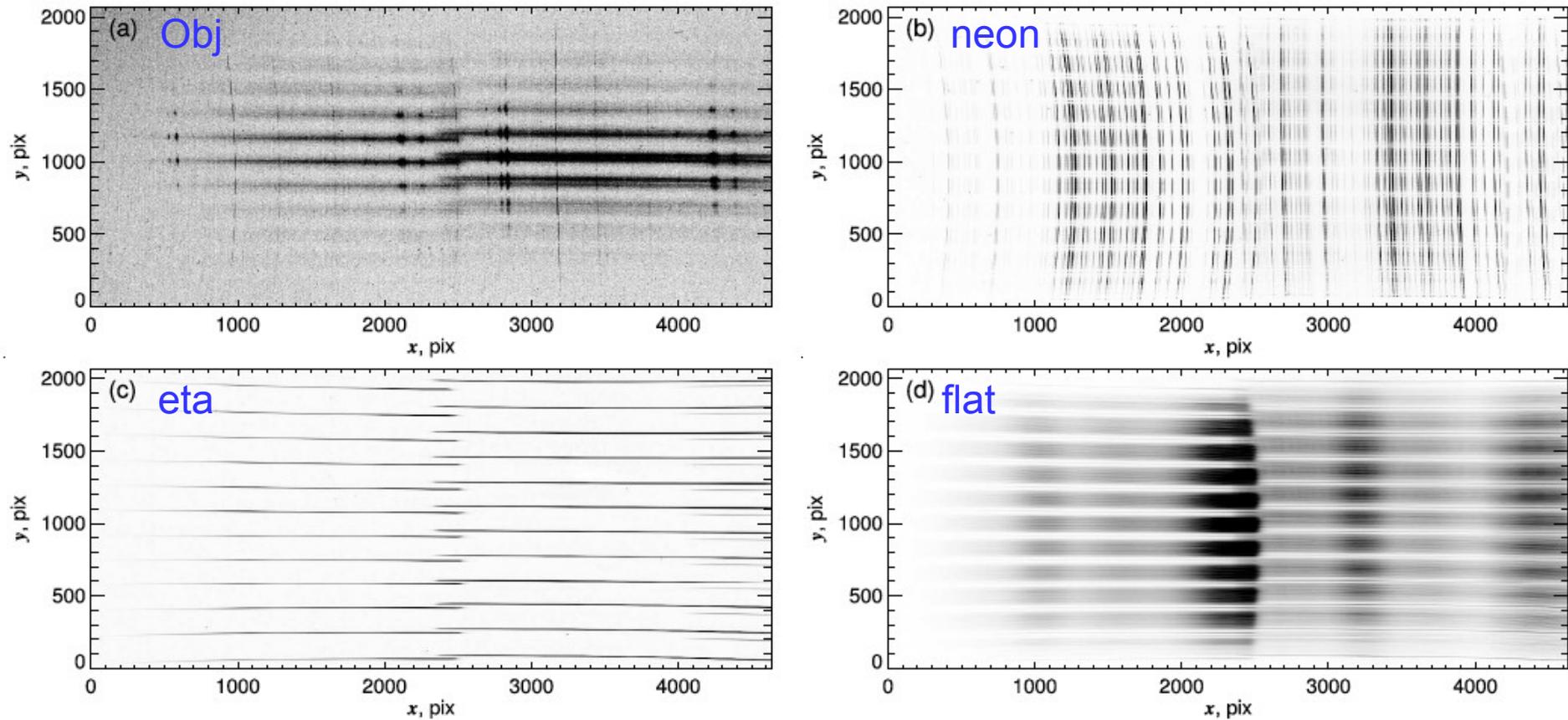


Рис. 7. Пример необработанных кадров из набора данных, полученных с решеткой VPHG940@600: (a) OBJ — спектр объекта Mrk 78; (b) NEON — калибровочный спектр He-Ne-Ag лампы ; (c) ETA — эталонный спектр, снятый с маской 12dots; (d) FLAT — спектр плоского поля.

Экстракция спектров

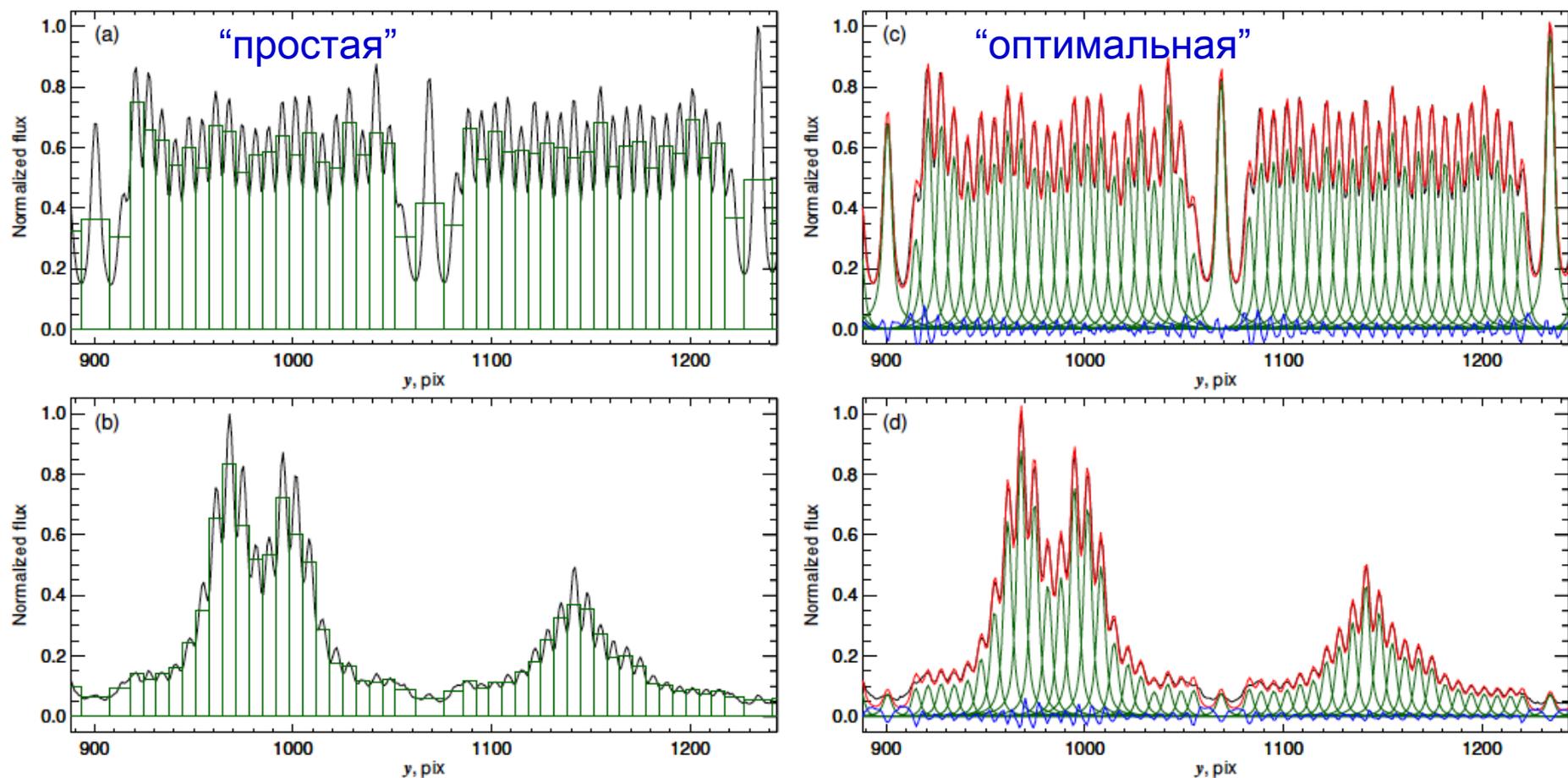
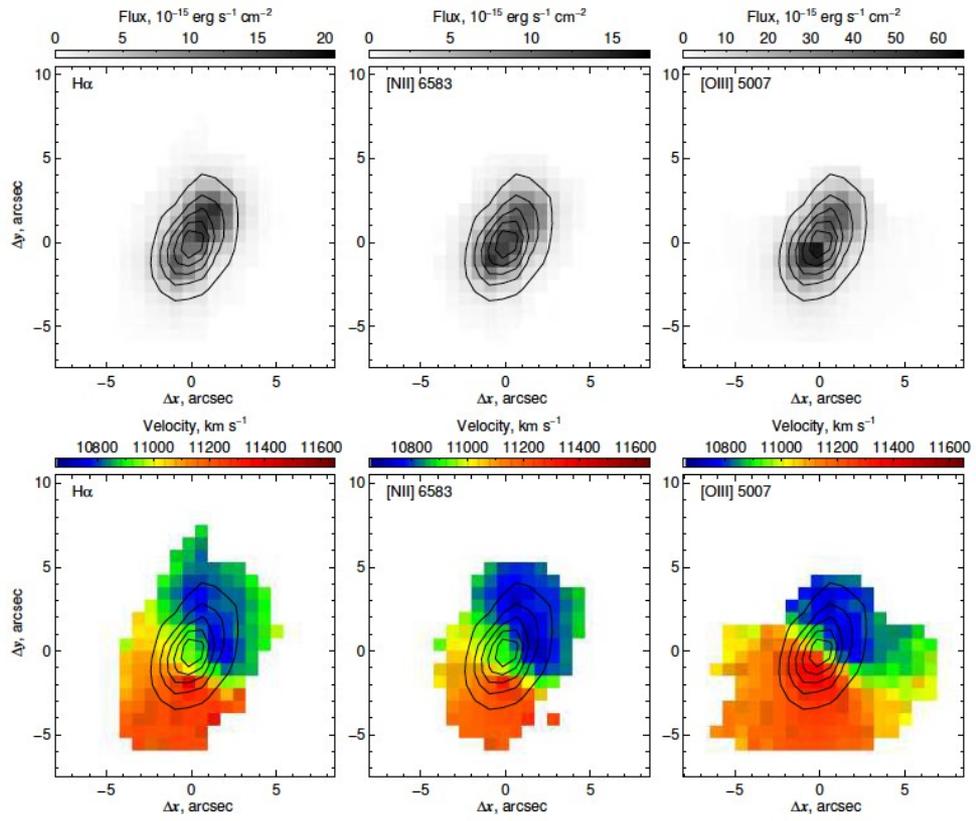
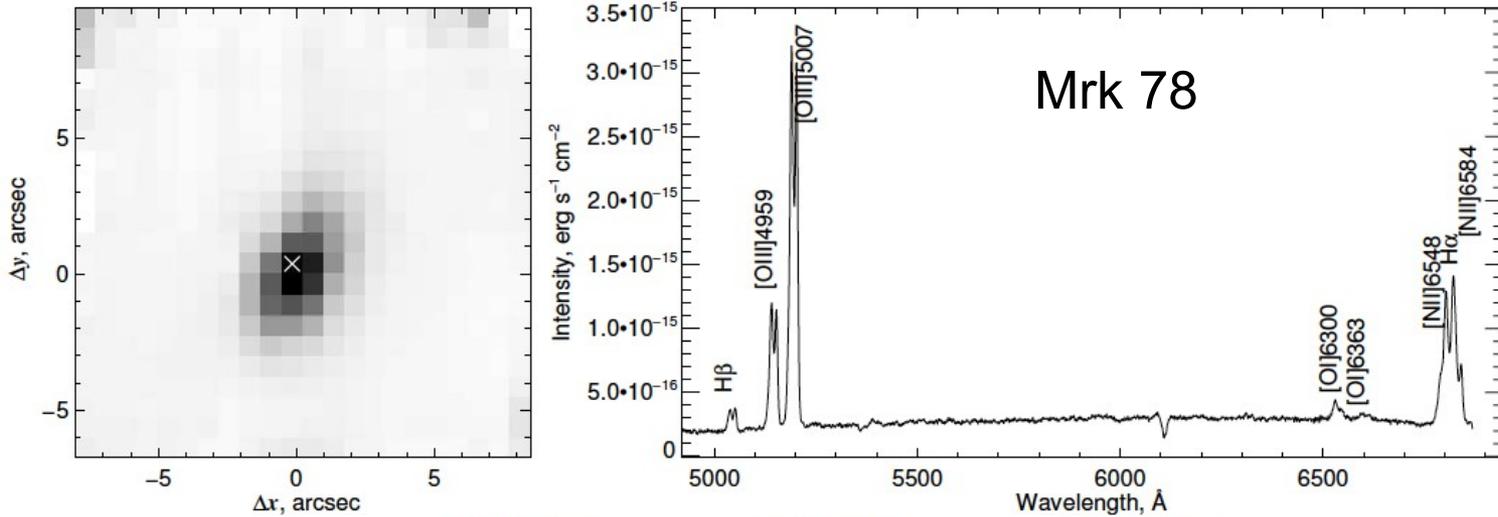
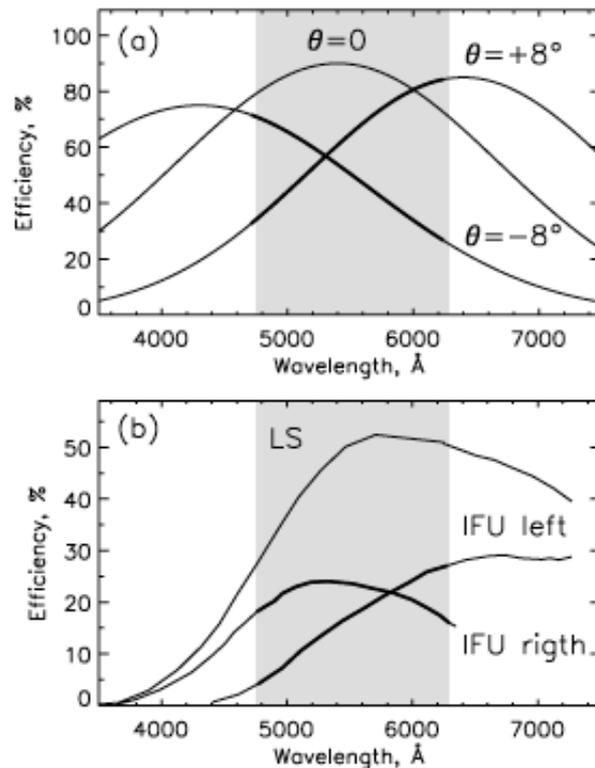


Рис. 10. Распределение нормированной интенсивности поперек дисперсии в спектрах FLAT (а, с) и OBJ (b, d) от правой щели. Ширина и площадь прямоугольников на панелях (а, b) соответствуют размеру области интегрирования и потоку от каждого световода при простой экстракции спектров. На панелях (с, d) зеленым 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



Средняя

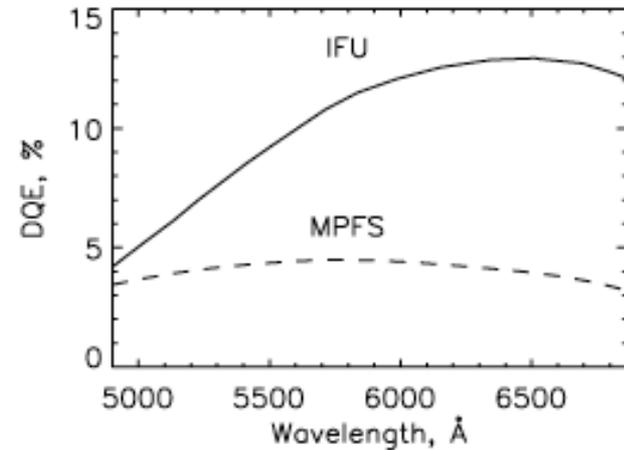
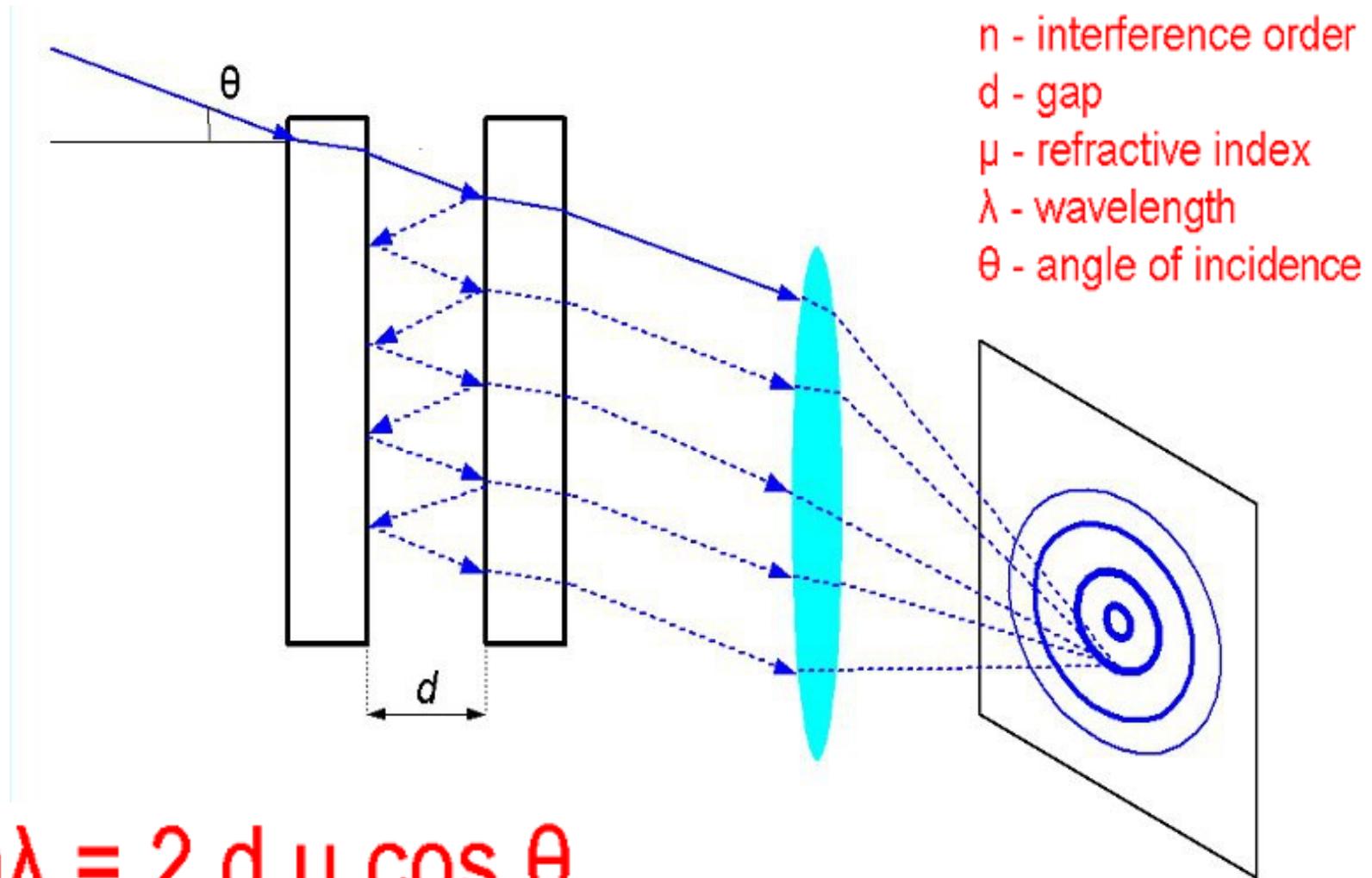


Рис. 12. Измеренная квантовая эффективность IFU SCORPIO-2 с решеткой VPHG940@600. Для сравнения штриховой линией показана квантовая эффективность спектрографа MPFS с отражательной дифракционной решеткой с числом штрихов 600 мм^{-1} .

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

Интерферометр Фабри-Перо



$$n\lambda = 2 d \mu \cos \theta$$



Buisson, Fabry, & Bourget (1914).

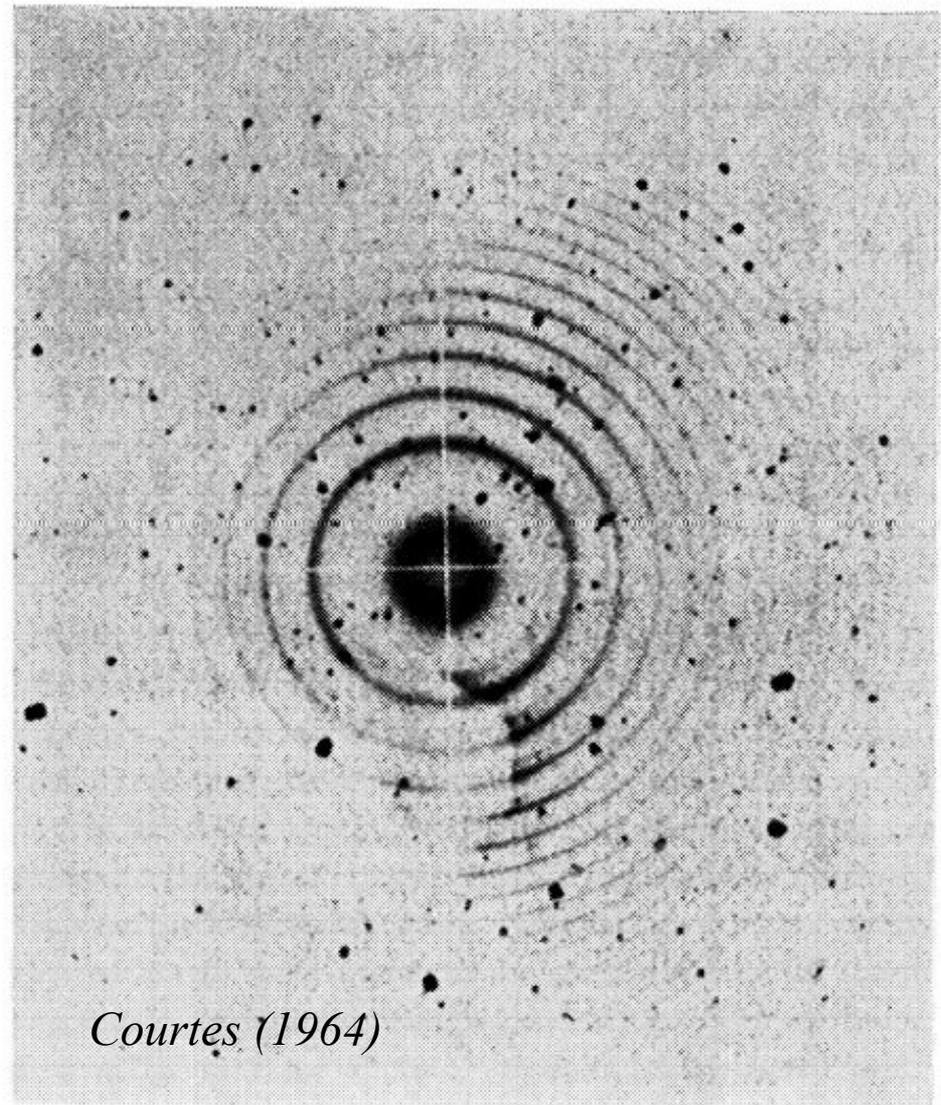
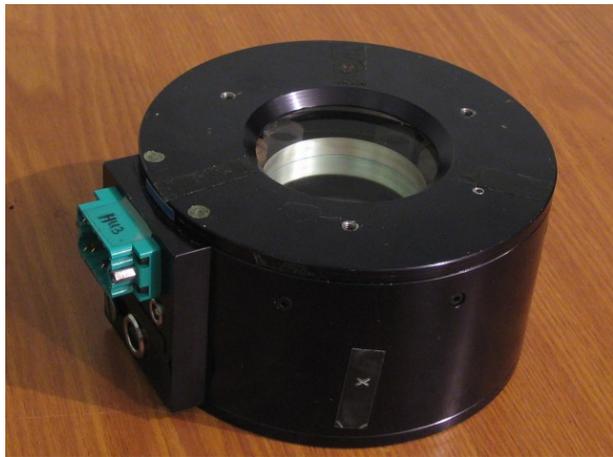
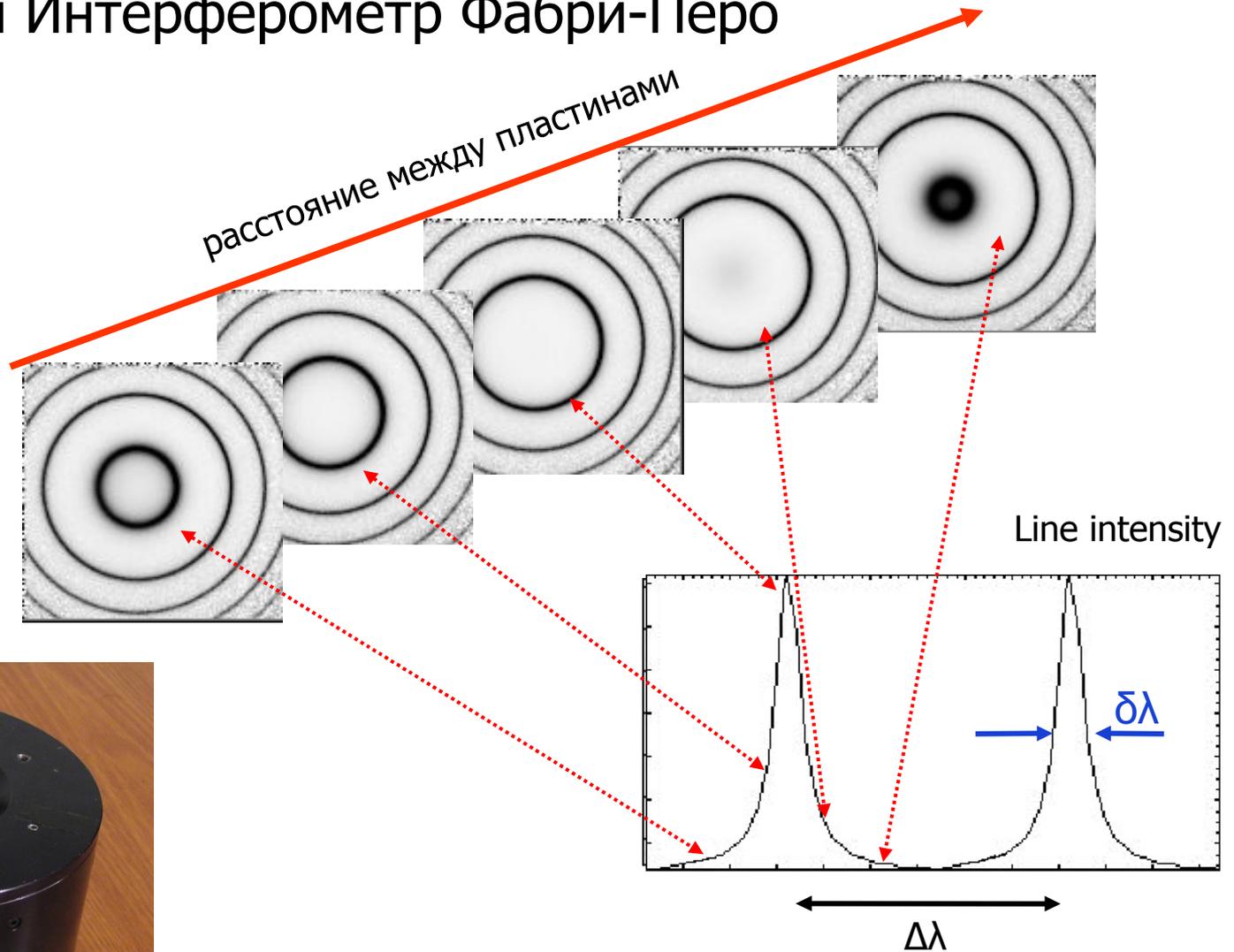


FIG. 12. Perot-Fabry interference rings on the $H\ II$ regions IC 1393. The brightest rings are given by the H_{α} radiations. The faint ones by $[N\ II] 6584$. One notices the enhancement of that line along the bright ring of the absorbing cloud. Plate by S. Pottasch.

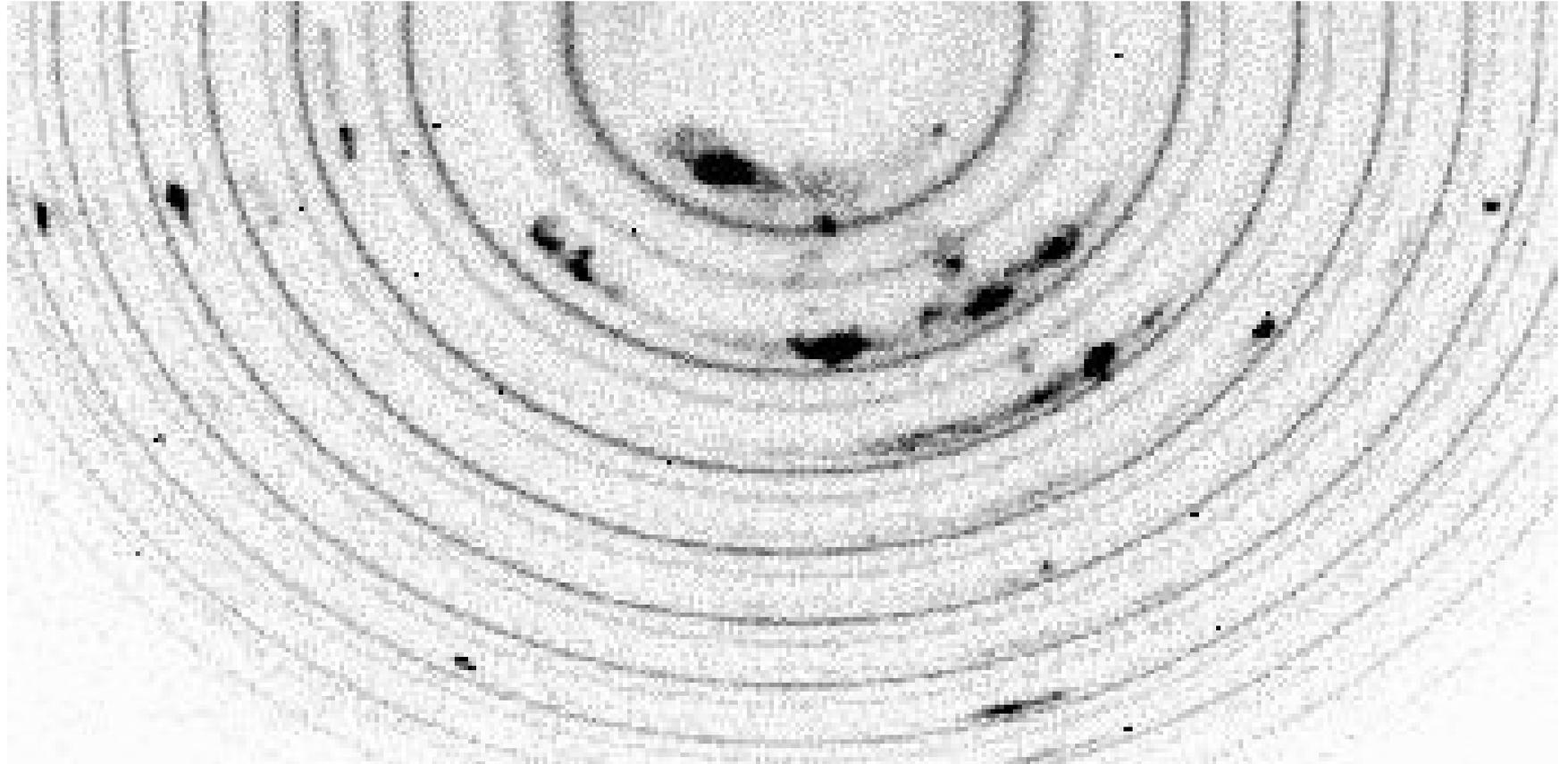
Сканирующий Интерферометр Фабри-Перо



Пьезоэлектрический ИФП ET-50
Queensgate Inc. (IC Optical System Inc.)

large field of view: 5-20 arcmin
high spectral resolution: $\delta\lambda = 0.2 \dots 2 \text{ \AA}$
small spectral range: $\Delta\lambda = \lambda/n = 5 \dots 50 \text{ \AA}$

IC2976: SCORPIO-2



История вопроса

1901 Fabry Ch. & Perot A. "On a New Form of Interferometer" (ApJ, 13, 265)

1914 Buisson H., Fabry Ch. & Bourget H. Наблюдения туманности Ориона с ИФП

1950-60 Courtes G. Вновь начал наблюдения НII областей
В СССР — П.В. Щеглов, Т.А. Лозинская (Крым, ГАИШ)

1974 Tully R. B. Первый спектрофотометрический куб данных (M 51)

1980s комбинация пьезоэлектрического ИФП с новыми 2D детекторами (счетчики фотонов и ПЗС): TAURUS (Taylor K. & Atherthon P., 1980), CIGALE (Boulesteix et al, 1983)

1990s TAURUS-2 (WHT 4.2m, AAO 3.6m), PUMA (OAN 2.1m), CIGALE (ESO 3.6m), SCORPIO (BTA 6m)

2000s Инструменты нового поколения (ИФП и перенастраиваемые фильтры) для крупных телескопов: KTS (SUBARU 8.2m), RSS (SALT 10m)

Современные счетчики фотонов: GHaFaS (WHT 4.2-m)

Аппаратный контур ИФП

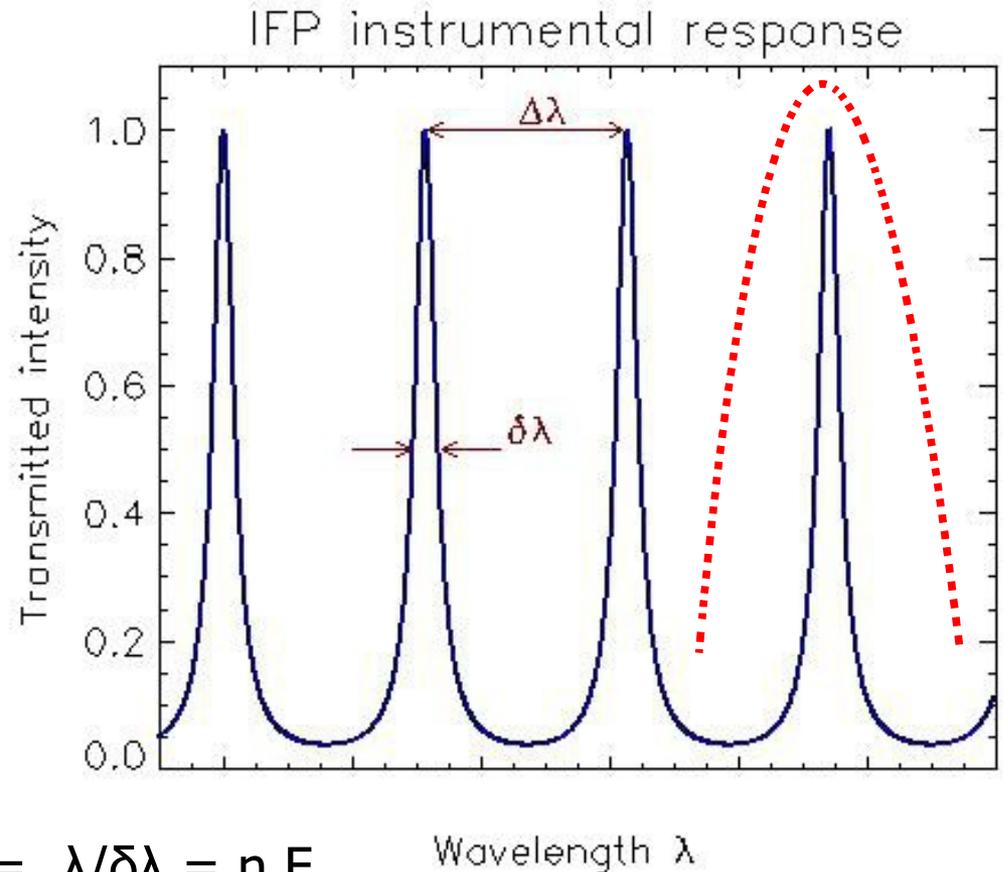
Свободный спектральный диапазон:

$$\Delta\lambda = \lambda/n$$

$\delta\lambda$ - ширина профиля

$$n = 100 \dots 1000$$

$$\Delta\lambda = 5 \dots 50 \text{ \AA}$$



Спектральное разрешение: $R = \lambda/\delta\lambda = n F$

$F = \Delta\lambda / \delta\lambda$ - Effective Finesse (добротность, контраст, эффективное число интерферирующих лучей)

ИФП на SCORPIO-2: набор интерферометров

Параметры сканирующих ИФП на SCORPIO-2

Параметр	IFP186		IFP751	IFP501
	λ 6563	λ 5007	λ 6563	λ 6563
n	188	246	751	501
$\Delta\lambda$, Å	34.9	20.3	8.7	13.1
$\Delta\lambda$, км с ⁻¹	1696	1216	399	598
$\delta\lambda$, Å	1.7	2.0	0.44	0.80
$\delta\lambda$, км с ⁻¹	78	120	20	36
F	21	10	20	16
n_z	40	30	40	36

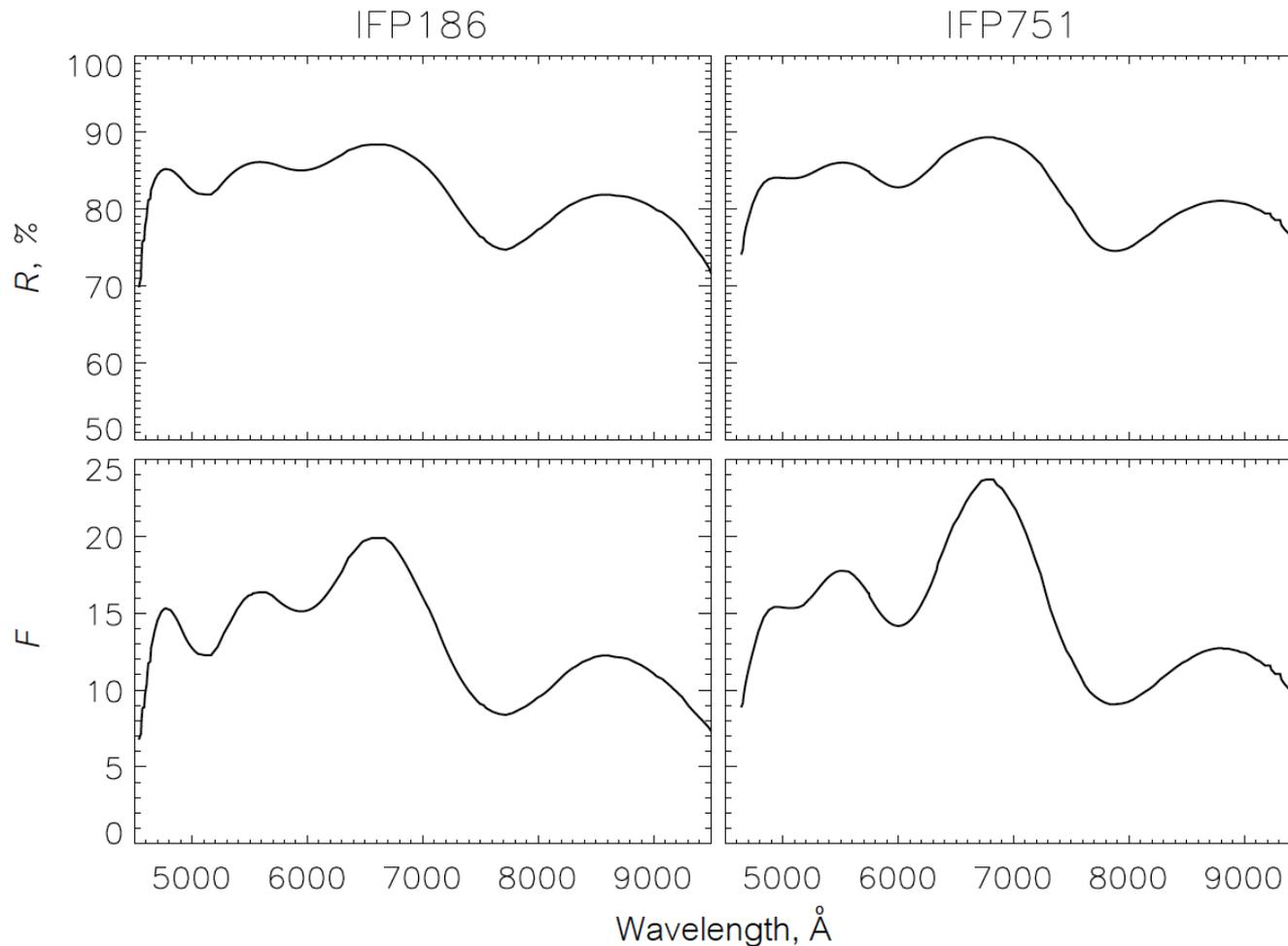
← Выигрываем в разрешении —
проигрываем в диапазоне

← число каналов

Наблюдаем обычно в режиме bin 4x4 ($p_x=0.71''$)

→ экономим на шумах и времени считывания

ИФП на SCORPIO-2: набор интерферометров



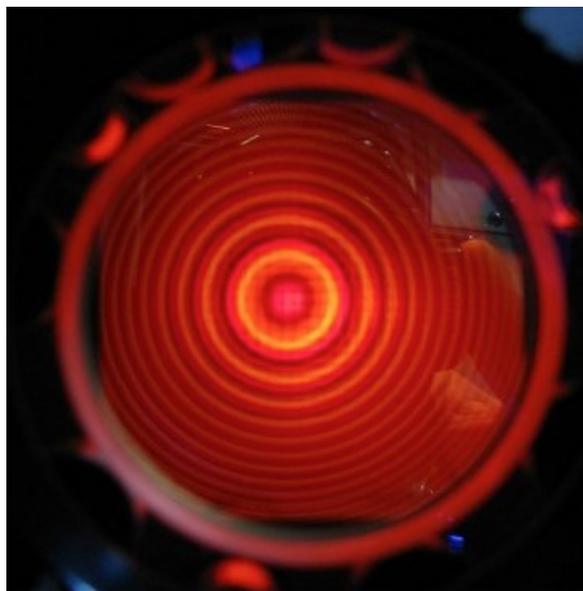
Здесь $F_0(\lambda)$ — контраст «идеального» интерферометра (отсутствие дефектов, абсолютно плоские пластины), рассчитанный по широко известной из теории ИФП формуле

$$F_0(\lambda) \approx \frac{\pi \sqrt{R(\lambda)}}{1 - R(\lambda)}$$

ИФП на SCORPIO-2: установка и настройка

SCORPIO: было до 2013 г.

SCORPIO-2 — независимый ввод в пучок на «4-м этаже»

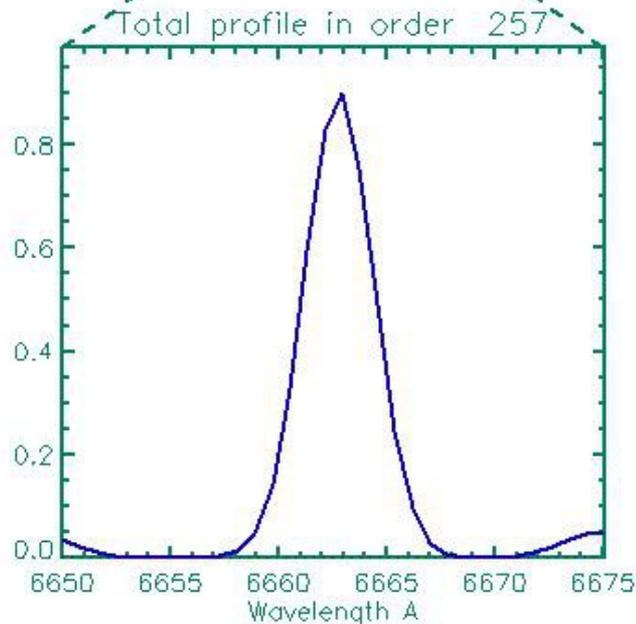
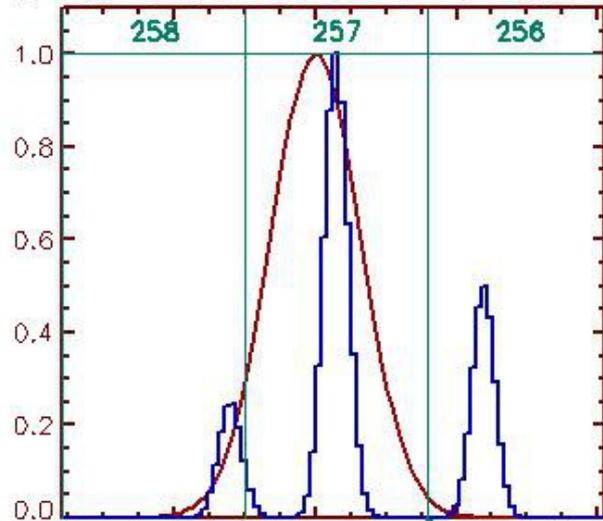


Настройка — глазом по неонке

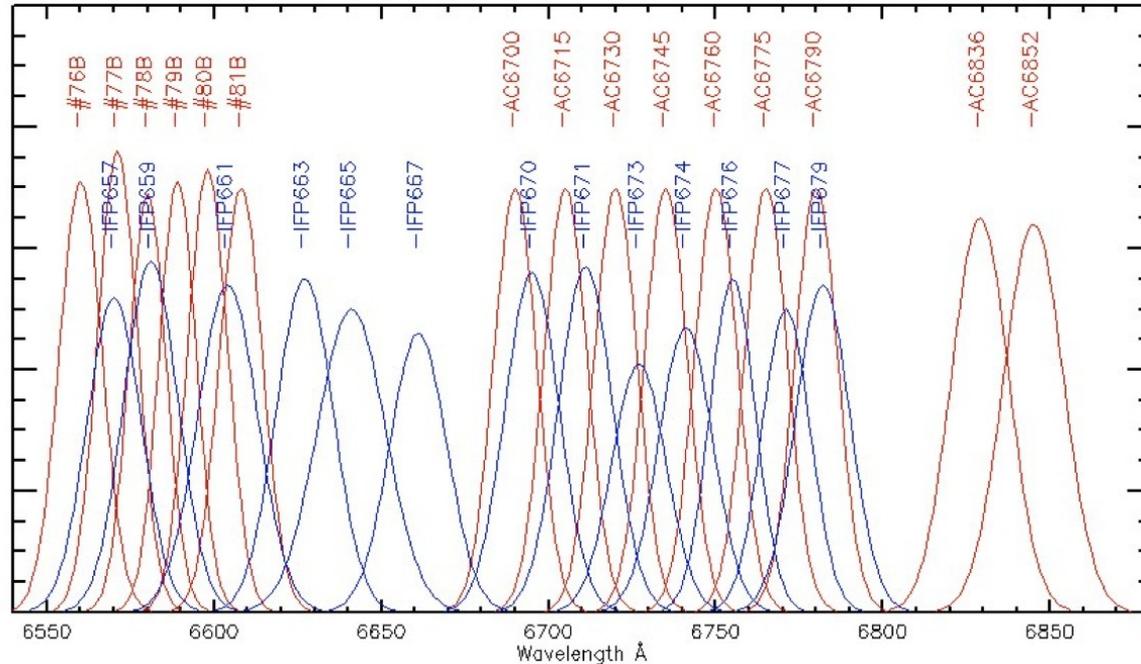


Фильтры для наблюдений с ИФП

Filter: $L_c=6660$ $\Delta\lambda=15$ $V=4580$ km



Выделение области вокруг эмиссионной линии на разных красных смещениях



Метод хорош для изучения слабых эмиссий, но плохо работает на фоне яркого континуума (звездные абсорбции из соседних порядков)

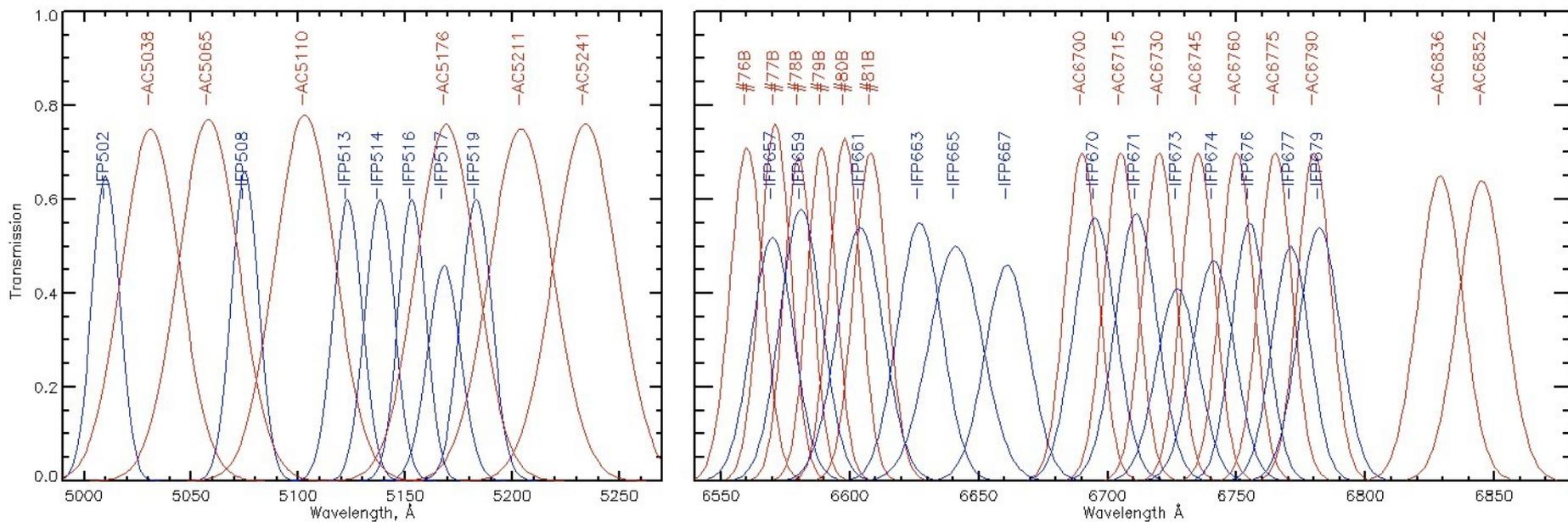
ИФП на SCORPIO-2: набор фильтров

Диапазон скоростей

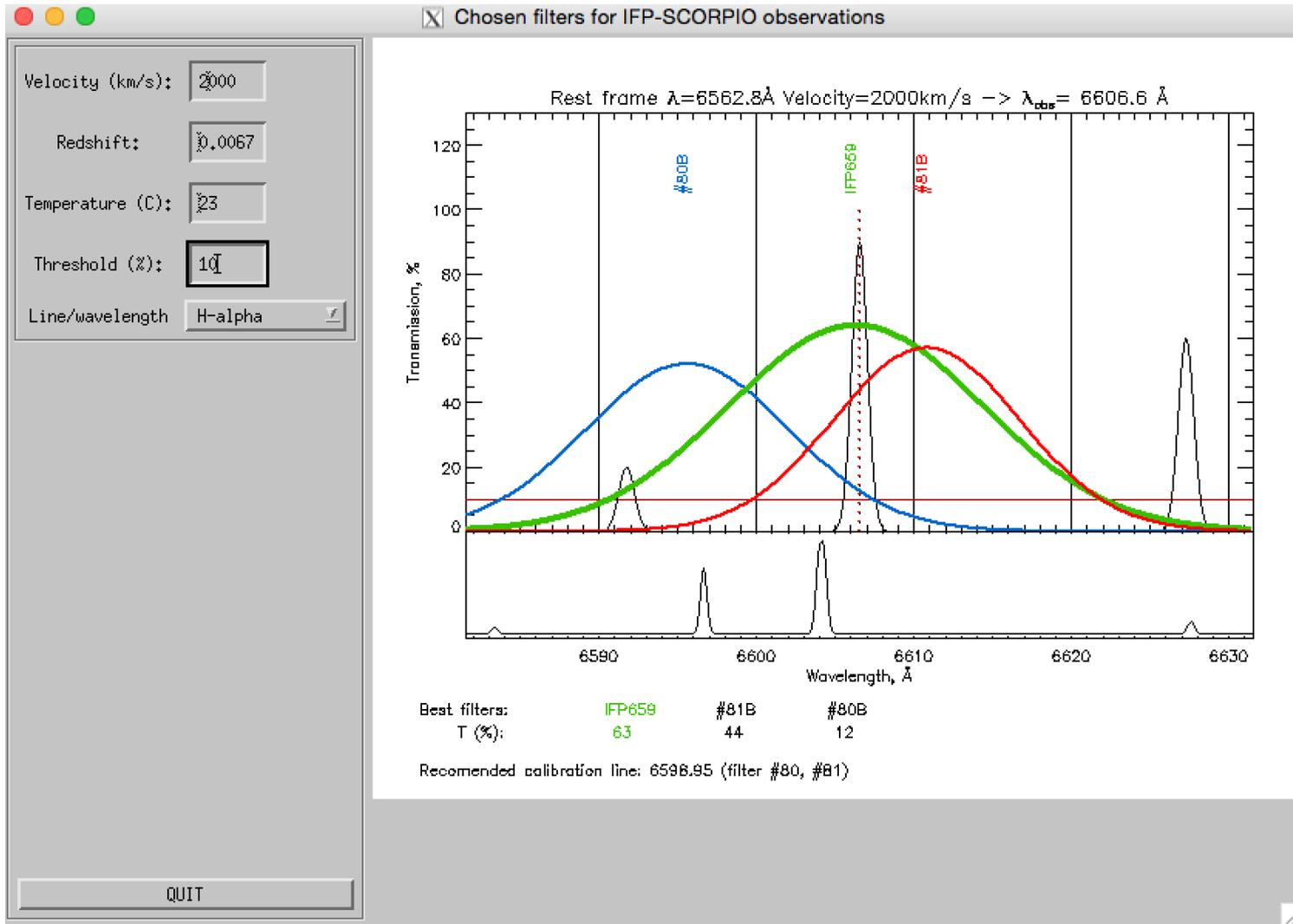
H α : -300...+13 000 км/с

[OIII]5007: -100...+16000 км/с

+ возможность с этими же фильтрами в H β , [SII]6717,6731, [NII] 6548,6583



ИФП на SCORPIO-2: подбор фильтров



Зависимость от температуры: 10 градусов - смещение CWL на $\sim 1.5\text{\AA}$

ИФП на SCORPIO-2: пример накоплений

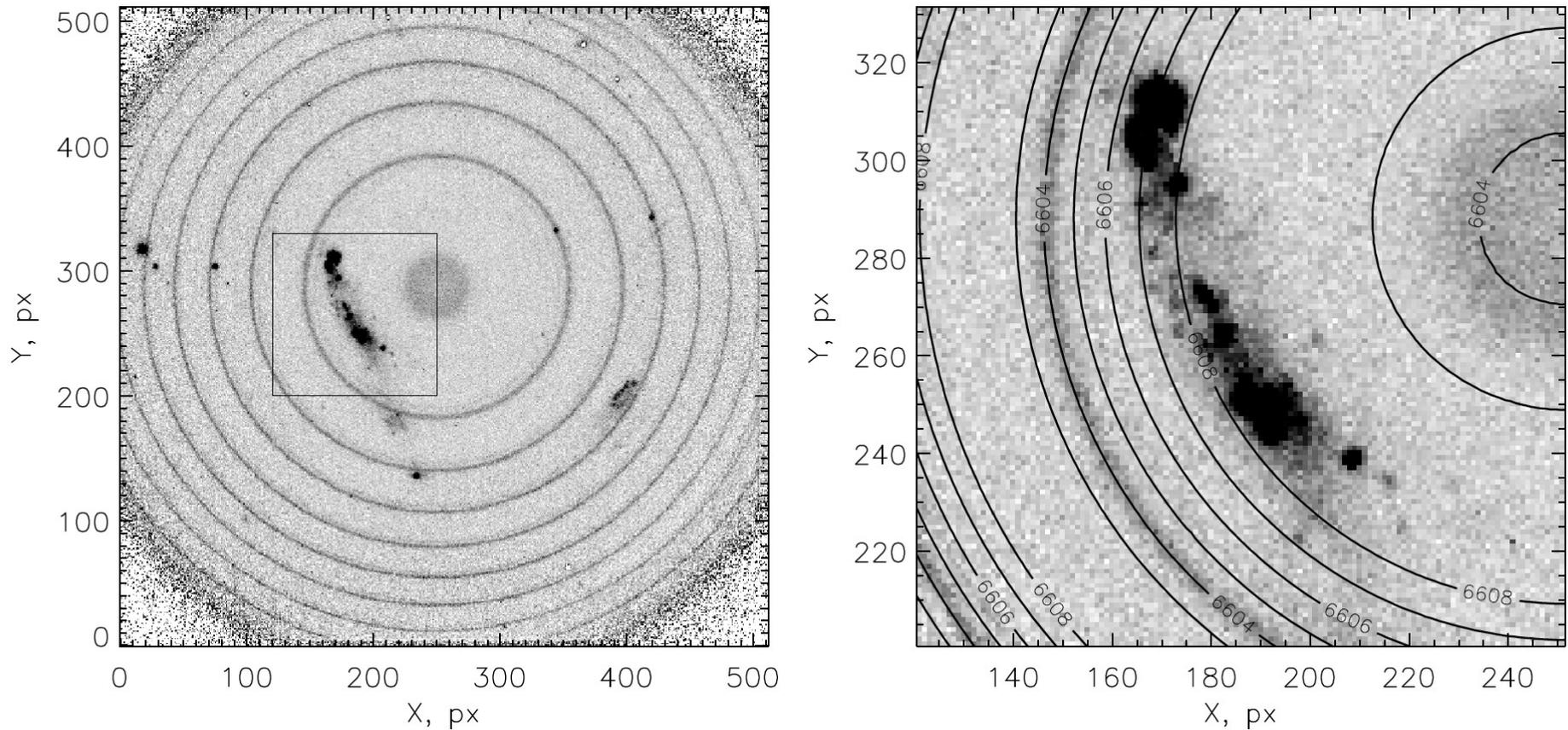
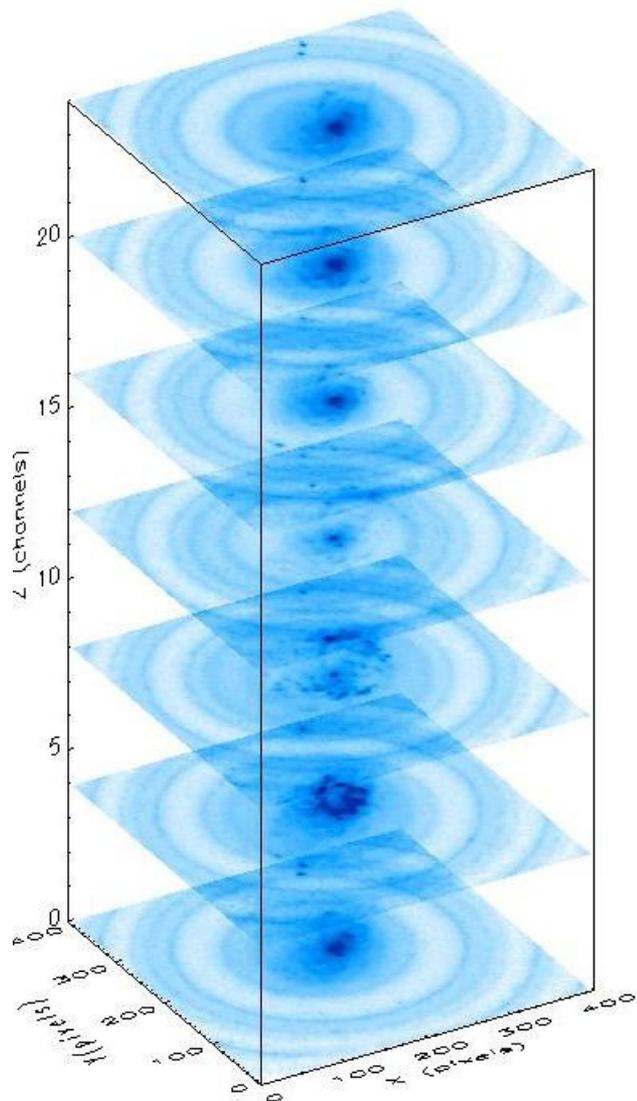


Рис. 4. Наблюдения галактики UGC 260 с помощью IFP751 на SCORPIO-2 в линии $H\alpha$. Слева: пример кадра, хорошо видны как эмиссия от галактики, так и кольца от линии ночного неба $\lambda 6604$. Квадратом выделена область, показанная на рисунке справа; контурами отмечена шкала длин волн. Шаг контуров — 1 \AA .

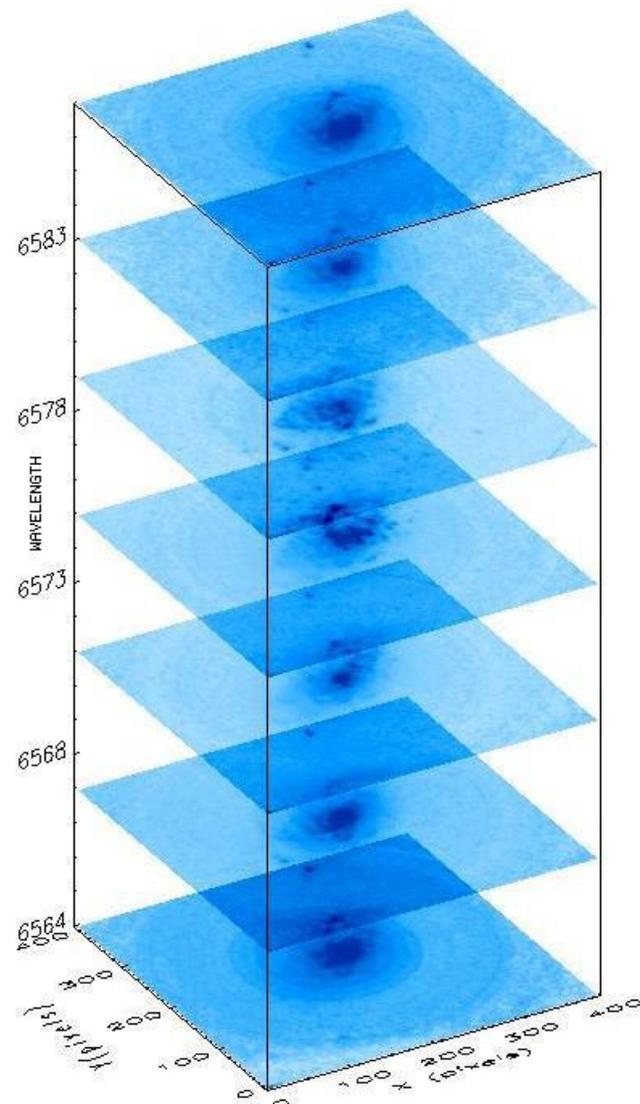
(Моисеев, 2015)

Куб данных, полученный с ИФП

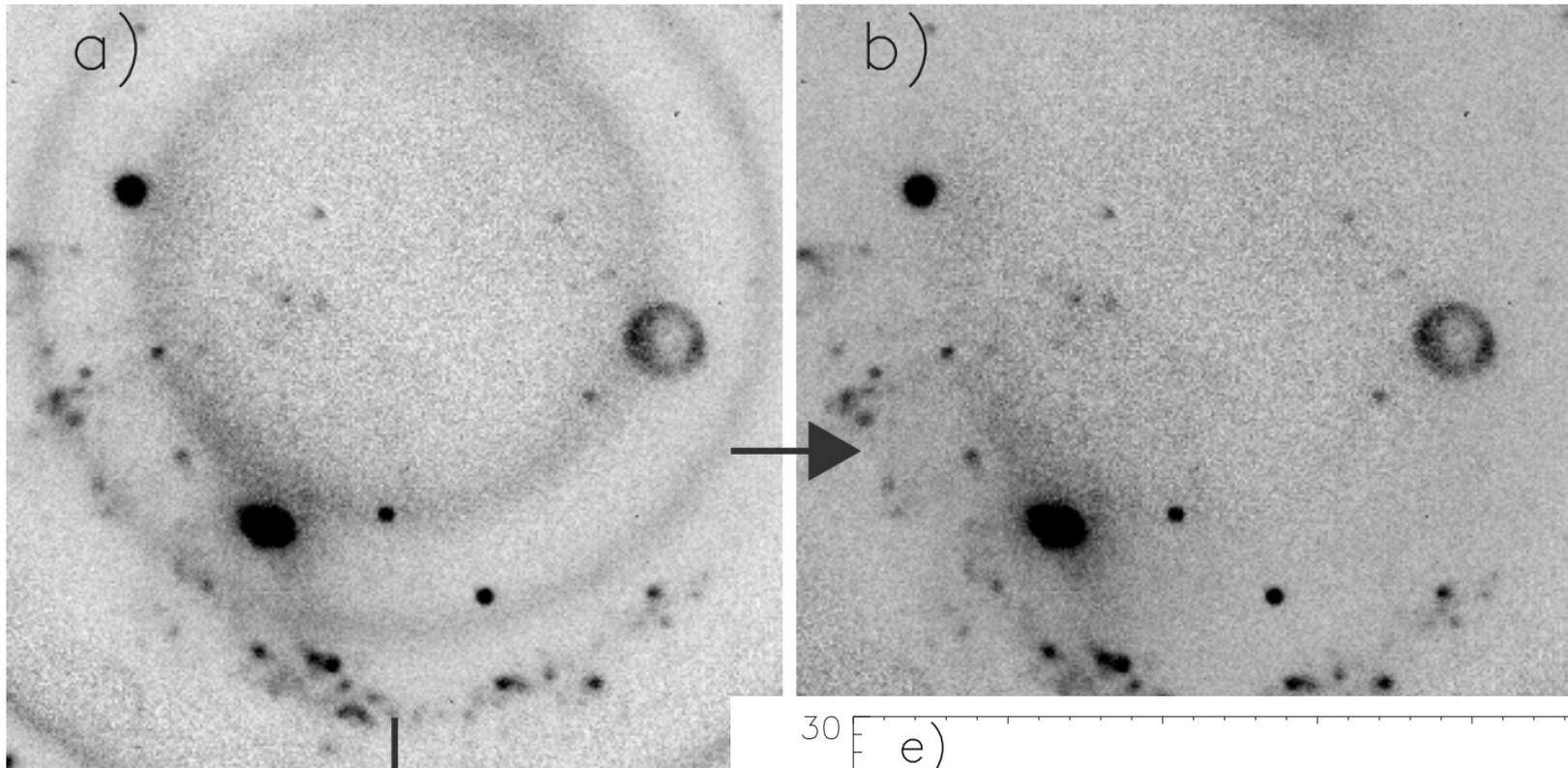
Z=channels



Z=Wavelength

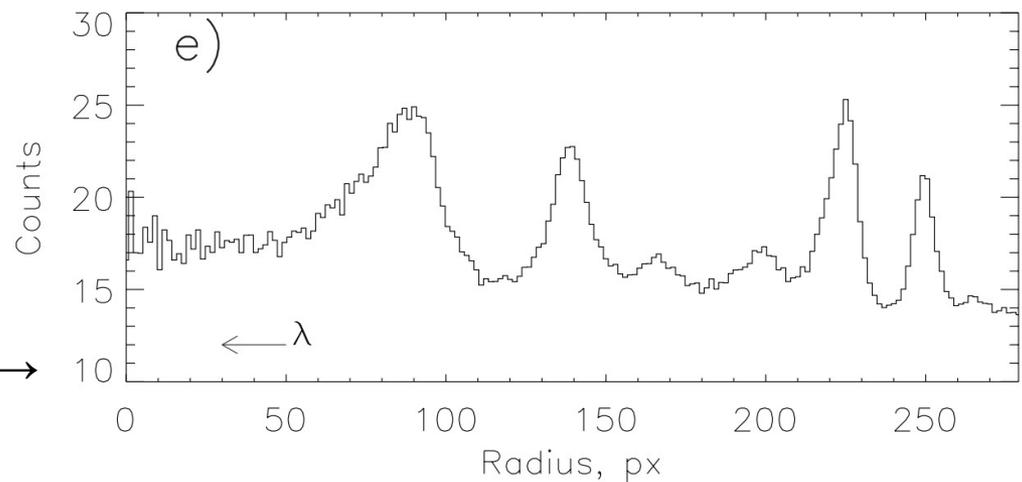


Обработка данных: вычитание фона неба

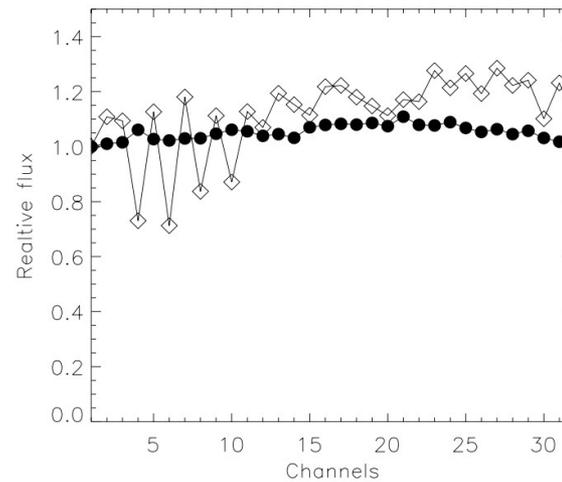
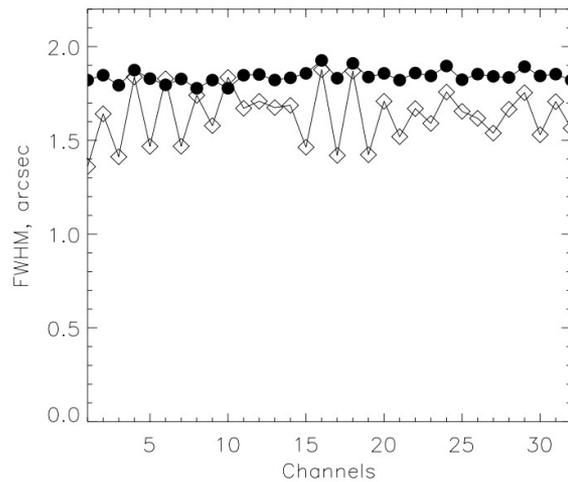
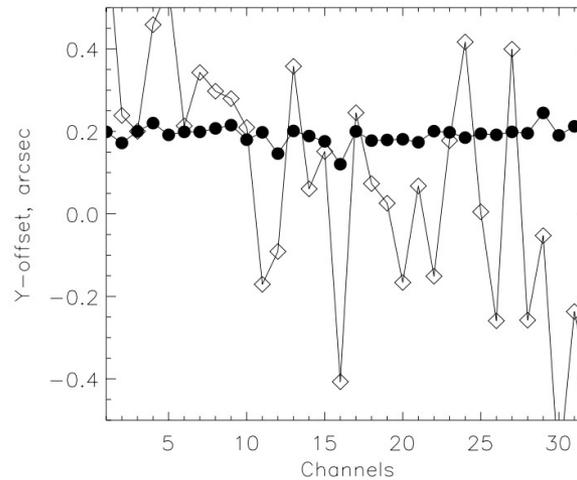
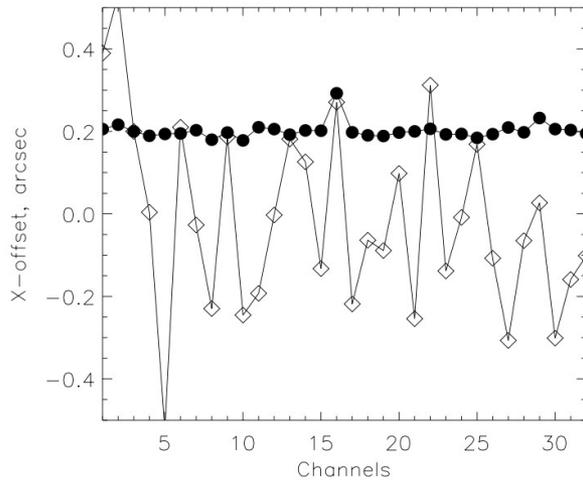


Радиальный профиль линий неба →

(Моисеев, 2002)

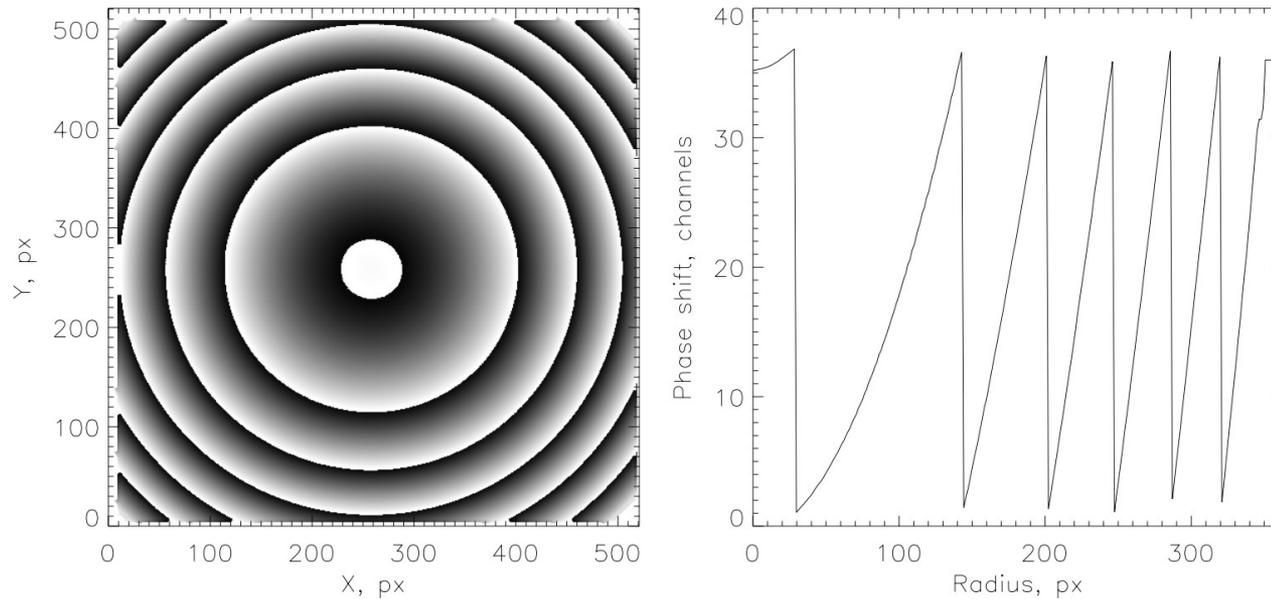


Обработка данных: фотометрическая коррекция



До и после коррекции. Сперва наблюдаем нечетные каналы, потом - четные

Обработка данных: шкала длин волн — фазовая карта



Для сканирующего интерферометра $2\mu l = A + Bz$, где z -номер спектрального канала, а A и B — некоторые константы (Гордон и др., 2000). Легко получить, что

$$B = \frac{A}{n n_z}, \quad \text{где } n_z \text{ — количество каналов в цикле сканирования.}$$

(1) с учетом того, что $r \ll f$ и, согласно (5) $A \gg B$, получаем выражение для номера канала, в котором на данном радиусе наблюдается интерференционный максимум:

$$z(r) \cong \frac{n}{B} \lambda + \frac{A}{2Bf^2} r^2 - \frac{A}{B} \quad \leftarrow \text{квадратичное изменение радиуса колец}$$

Обработка данных: аппаратный контур

Функция Эри

Лучшая аппроксимация (из простых функций) — профиль Лоренца

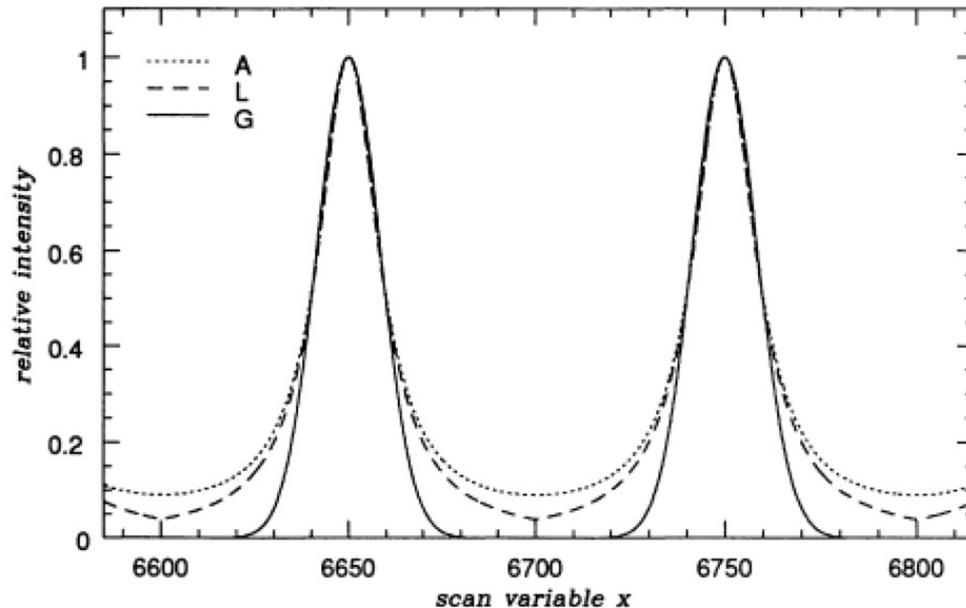


Figure 2. Three cyclic functions listed in Table 1 (column 2) shown at low finesse to emphasize their differences.

	$f(x)$
G	$\exp[-\ln 16 \operatorname{mod}[x, \Delta x]^2 / (\delta x)^2]$
L	$(1 + (\frac{2}{\delta x})^2 \operatorname{mod}[x, \Delta x]^2)^{-1}$
A	$(1 + \alpha \sin^2(\frac{\pi x}{\Delta x}))^{-1}$

Table 1: Cyclic functions which are periodic over Δx with FWHM δx . The (G)aussian, (L)orentzian and (A)iry functions are illustrated in Fig. 2. The *mod* function is the modulo function and $\alpha = (\frac{2}{\pi} \frac{\Delta x}{\delta x})^2$. Note that for large α , $(\frac{\Delta x}{\pi \sqrt{1+\alpha}}) \approx (\frac{\delta x}{2})$. The gap scanning variable x is offset by $\frac{\Delta x}{2}$ in practice.

Bland-Hawthorn (1995)

Обработка данных: аппаратный контур

В объектах с гауссовским уширением - наблюдаем профиль Фойгта

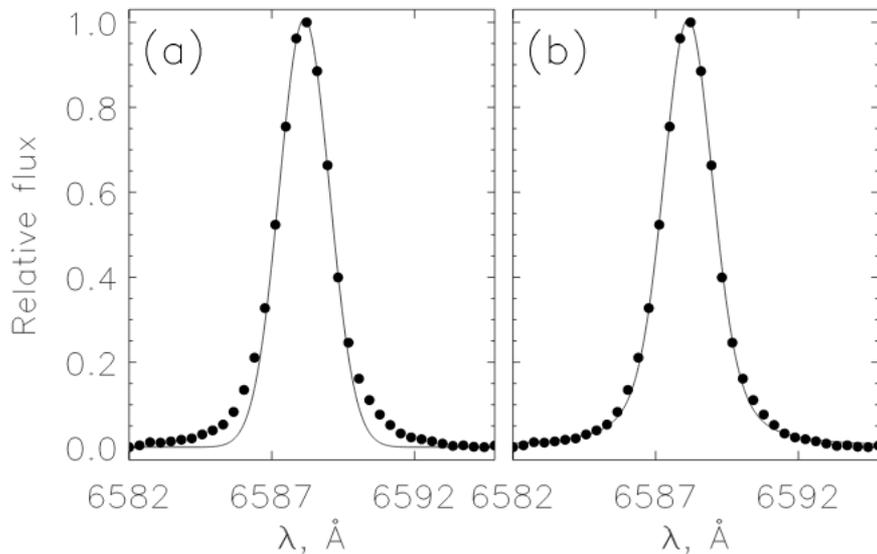


Рис. 4. Пример профиля спектральной линии $H\alpha$ в галактике II Zw 70 по наблюдениям с IFP501 (точки). Линией показана аппроксимация функцией Гаусса (a) и профилем Фойгта (b).

шением (4), то наблюдаемый профиль является сверткой профилей Гаусса и Лоренца, т. е. задается функцией Фойгта (Voigt):

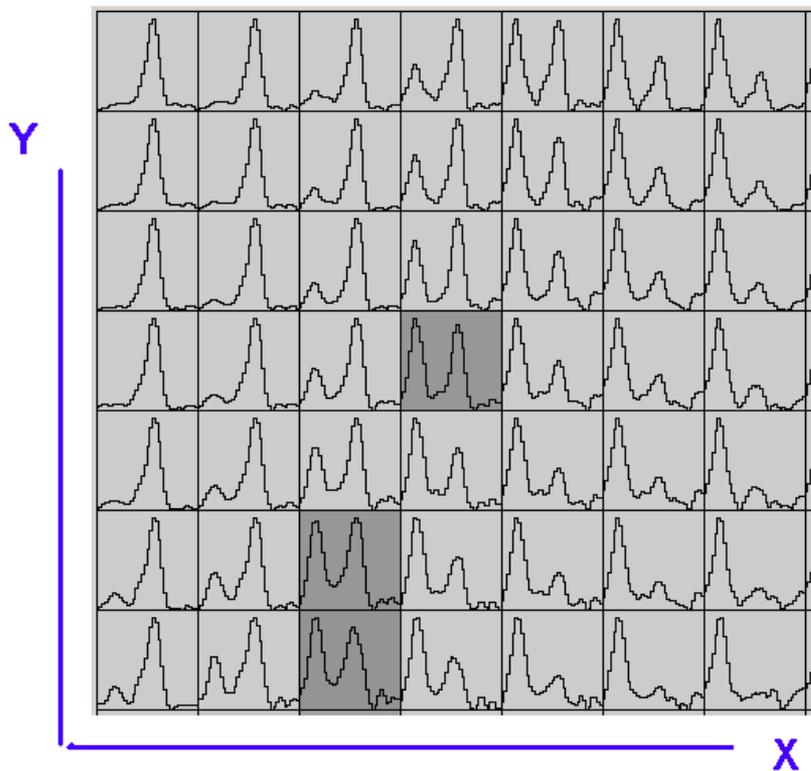
$$V(\lambda, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{real}} \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-x^2} dx}{y^2 + (a - x)^2}, \quad (5)$$

где

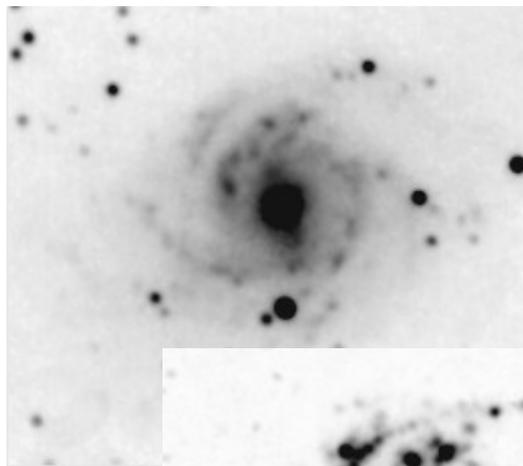
$$a = \frac{\lambda - \lambda_0}{\sqrt{2}\sigma_{real}}, \quad y = \frac{w_{ins}}{\sqrt{2}\sigma_{real}}.$$

Применение куба данных

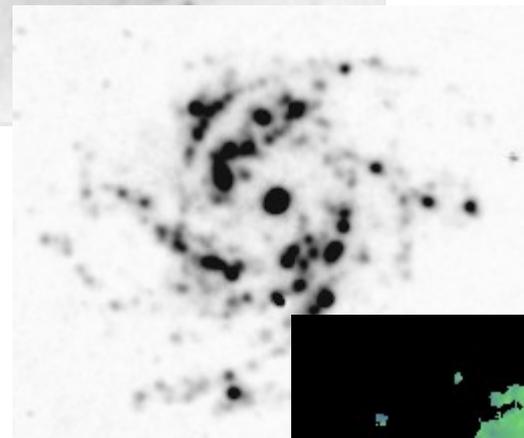
Анализ профиля линий



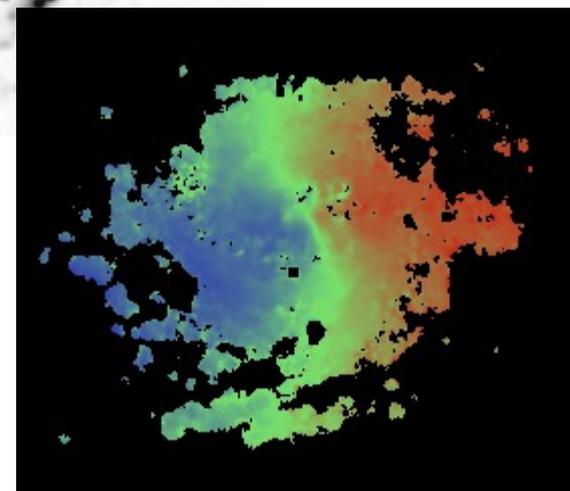
КОНТИНУУМ



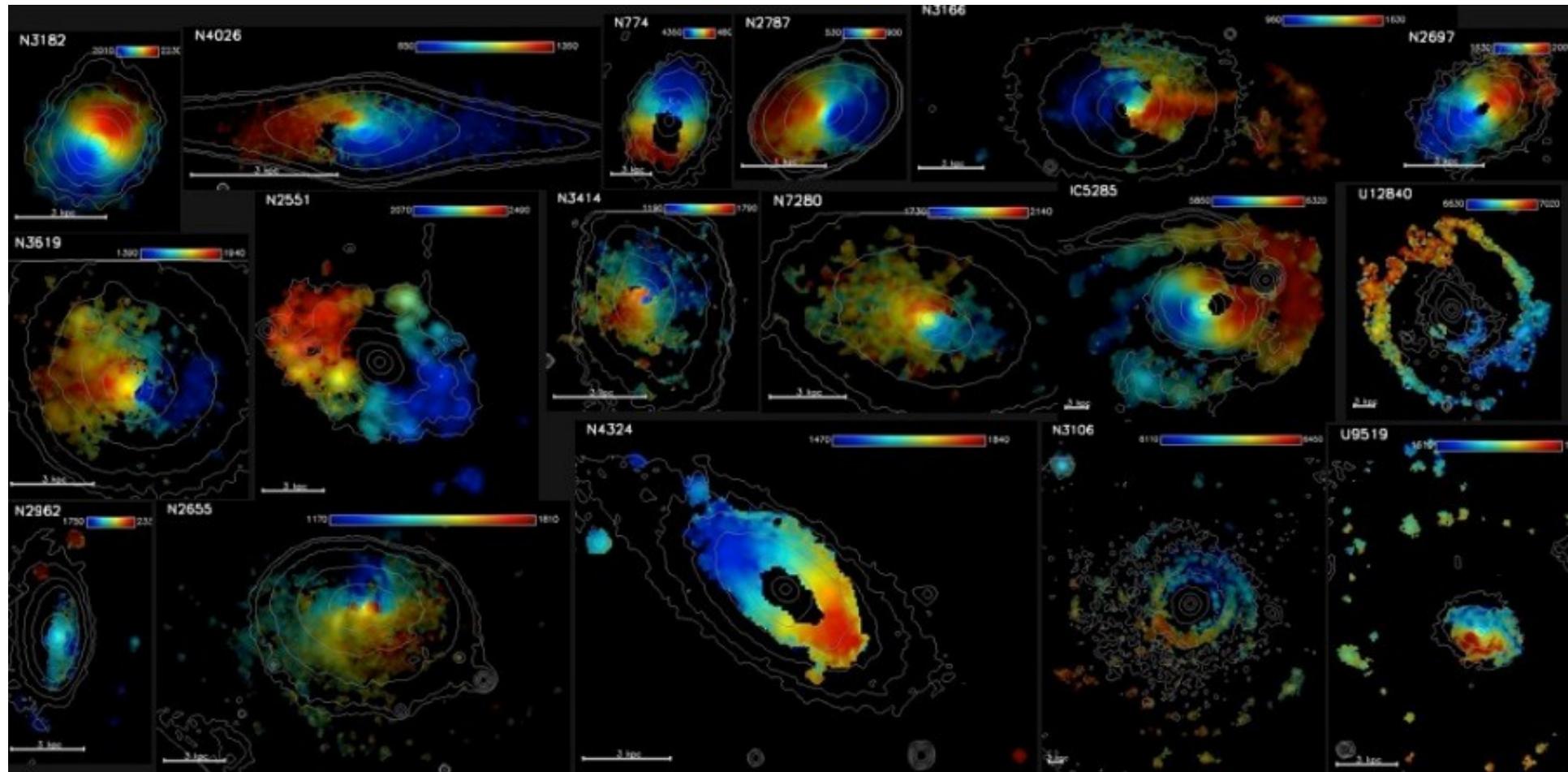
ЭМИССИОННАЯ
ЛИНИЯ



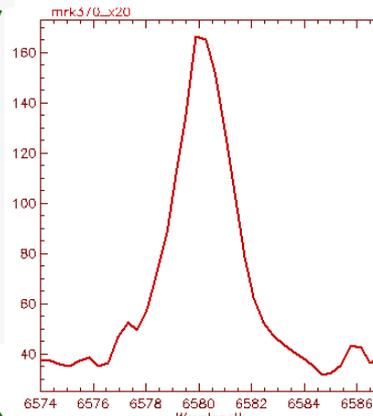
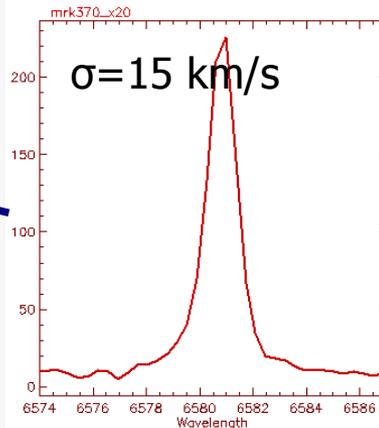
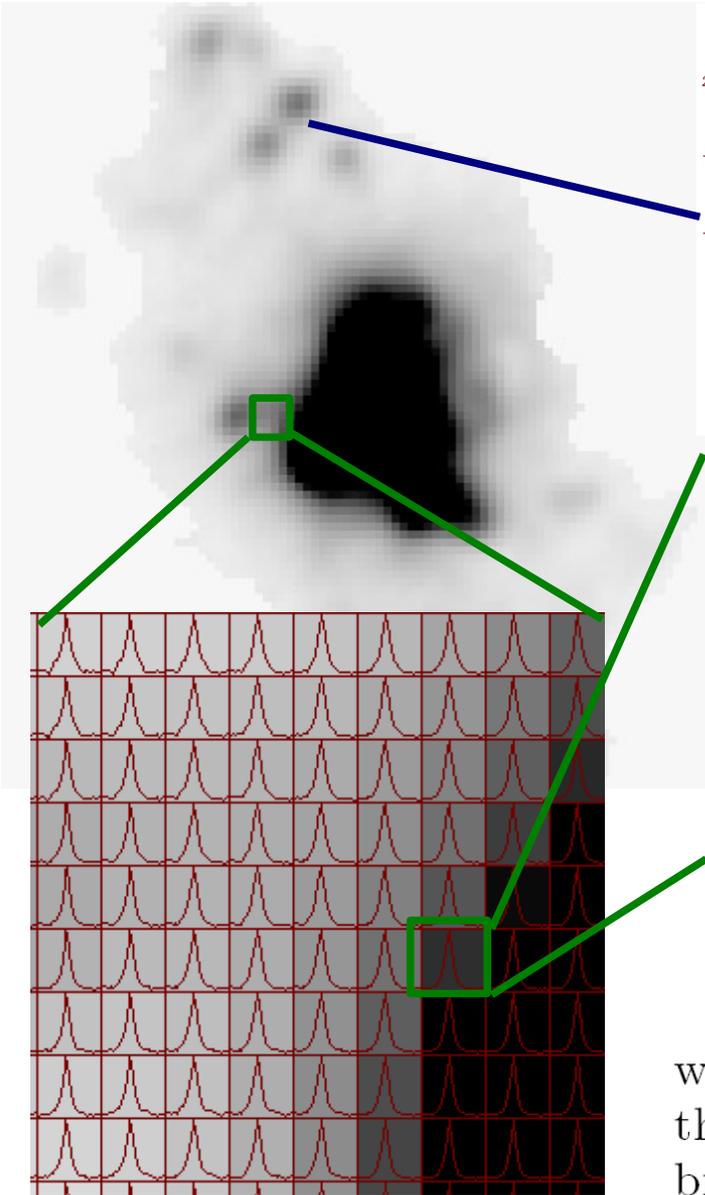
СКОРОСТИ



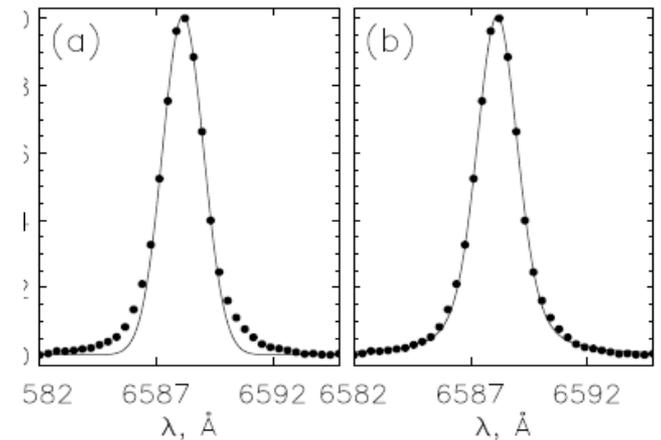
Газ в линзовидных галактиках (Silchenko, Moiseev & Egorov, 2019)



Ionized gas velocity dispersion: measurements



FPI data reduction and
(Moiseev 2002, Moiseev & Egorov 2008)

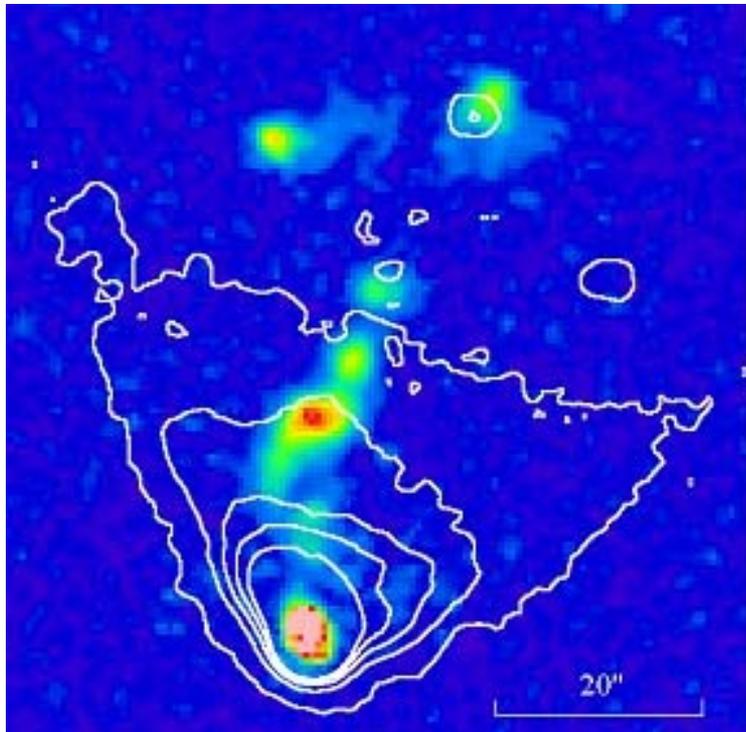


$$\sigma_{real}^2 = \sigma_{gas}^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{tr}^2$$

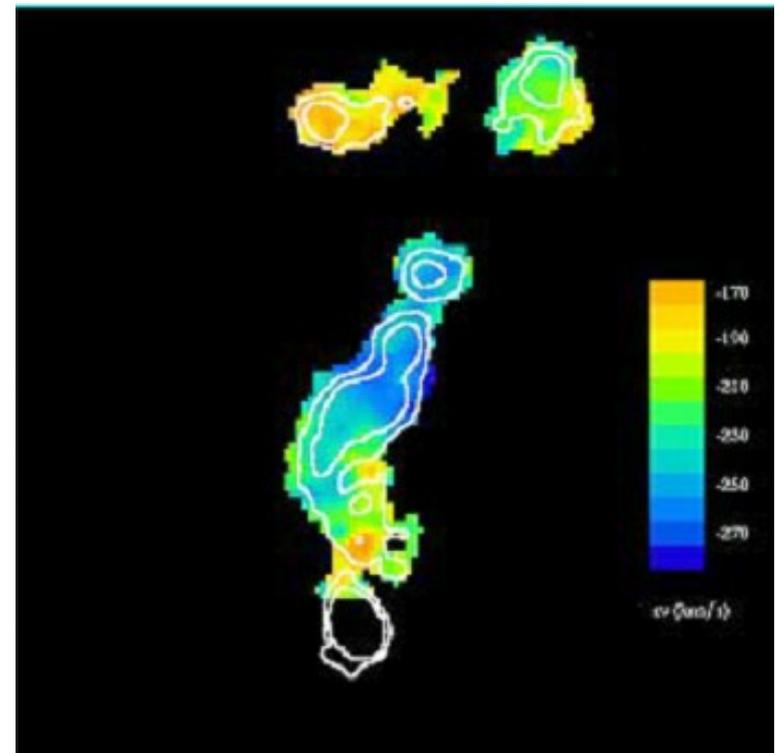
where $\sigma_N \approx 3$ km/s and $\sigma_{tr} \approx 9.1$ km/s correspond to the natural width of the emission line and its thermal broadening at 10^4 K, respectively.

Истечения из молодых звездных объектов: PV Ser (наблюдения по программе Т. Мовсисяна)

Отражательная туманность вокруг PV Ser:

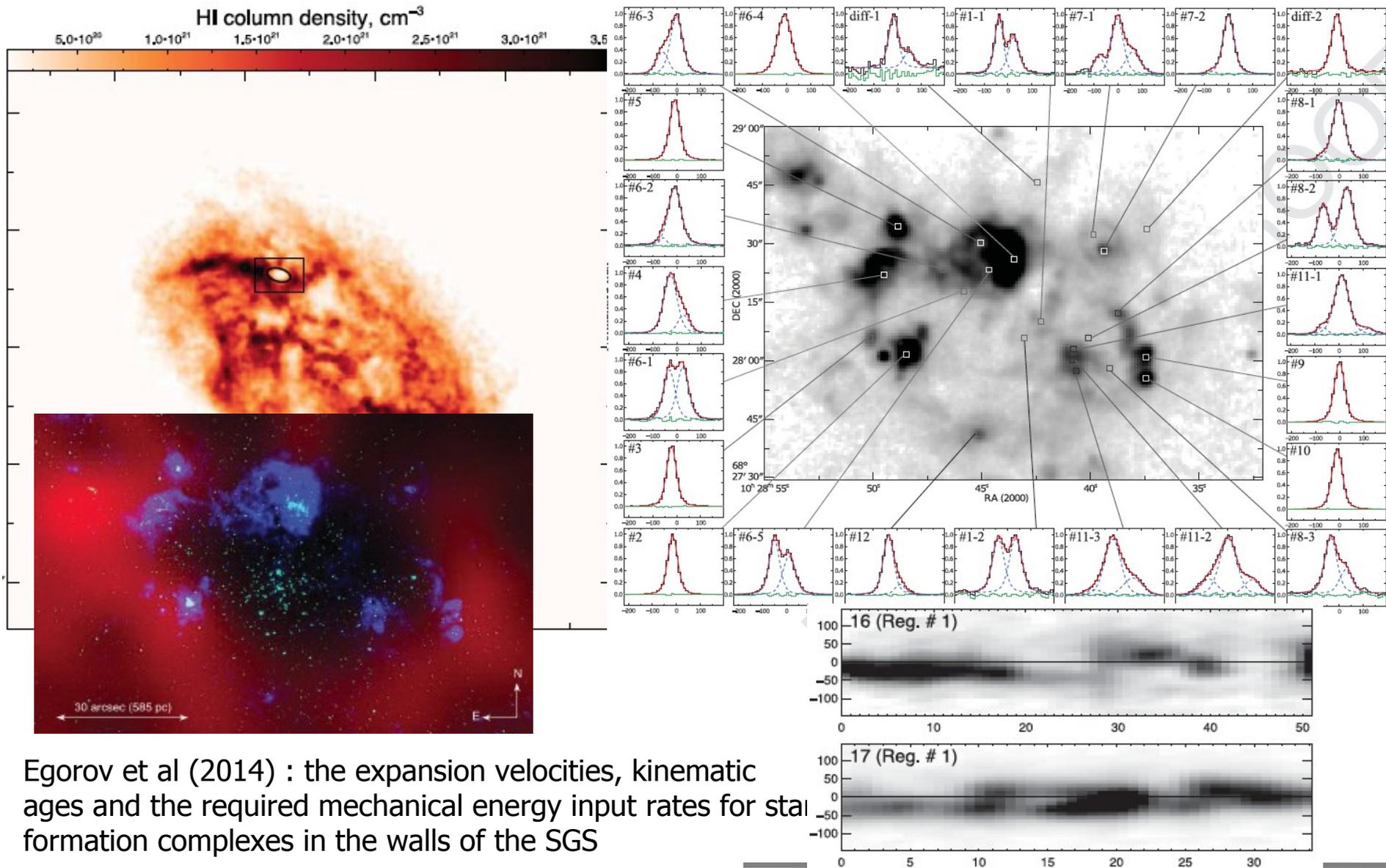


Поле скоростей ионизованного газа в
линии [SII]6717



Изображение в эмиссионной линии [SII]6717
наложены изофоты континнума

The supergiant shell in dIrr galaxy IC 2574



Egorov et al (2014) : the expansion velocities, kinematic ages and the required mechanical energy input rates for star formation complexes in the walls of the SGS

3D-спектроскопия на SCORPIO-2 подробно описана:

- 1) Афанасьев В.Л., Егоров О.В., Перепелицын А.Е., «Блок IFU в фокальном редукторе SCORPIO-2 для интегральной полевой спектроскопии на 6-м телескопе БТА », 2018, Астро. Бюлл., 73, 397
- 2) Моисеев А.В. «Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо», 2001, Bull SAO, 54, p. 74
- 3) Моисеев А.В., Егоров О.В. «Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. II Дополнительные процедуры», 2008, Астро. Бюлл., 63, 193
- 4) Моисеев А.В. «Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. III Уточнение шкалы длин волн», 2015, Астро. Бюлл, 70, 524