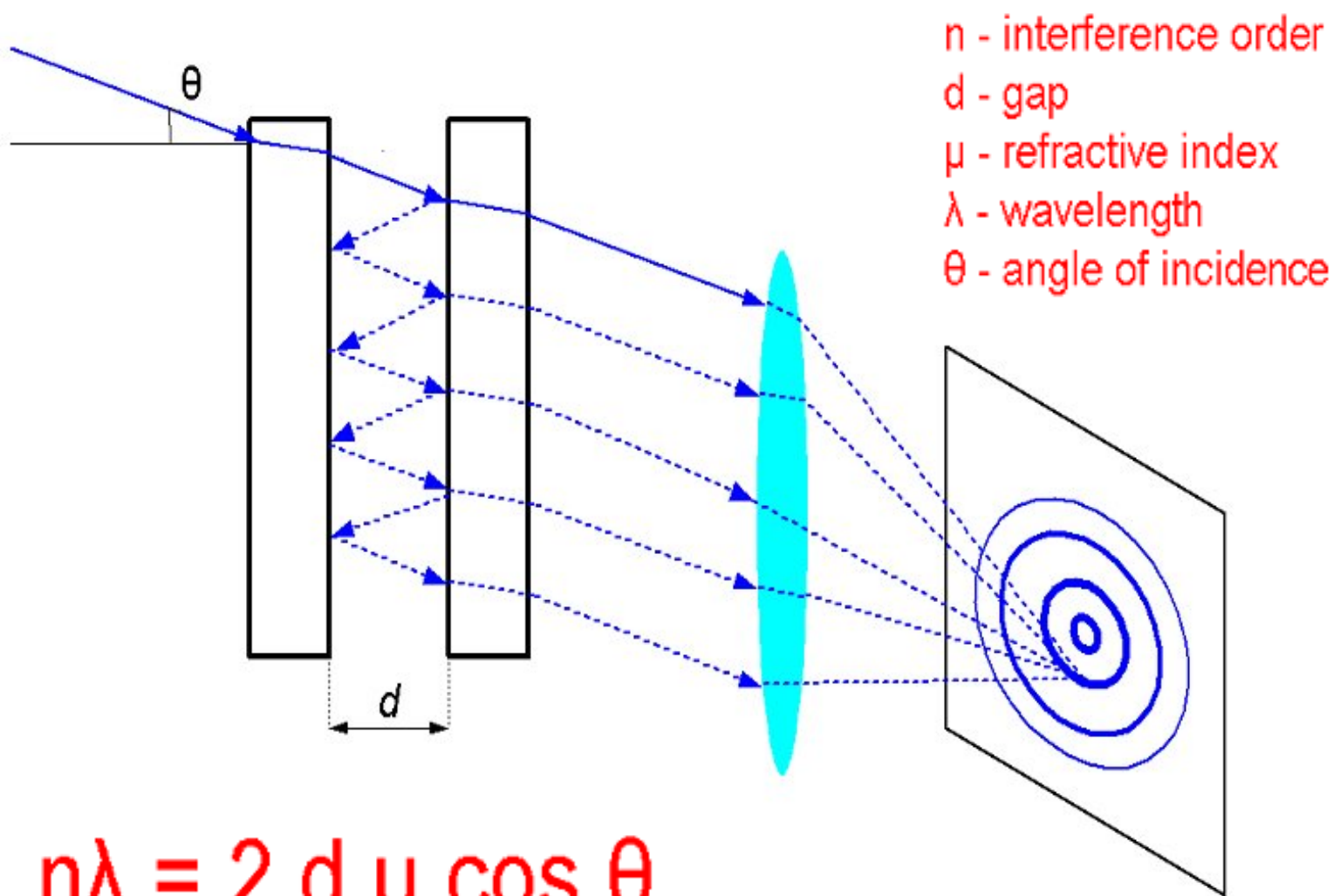


Многорезжимный фокальный редуктор телескопа БТА

Лекция V.

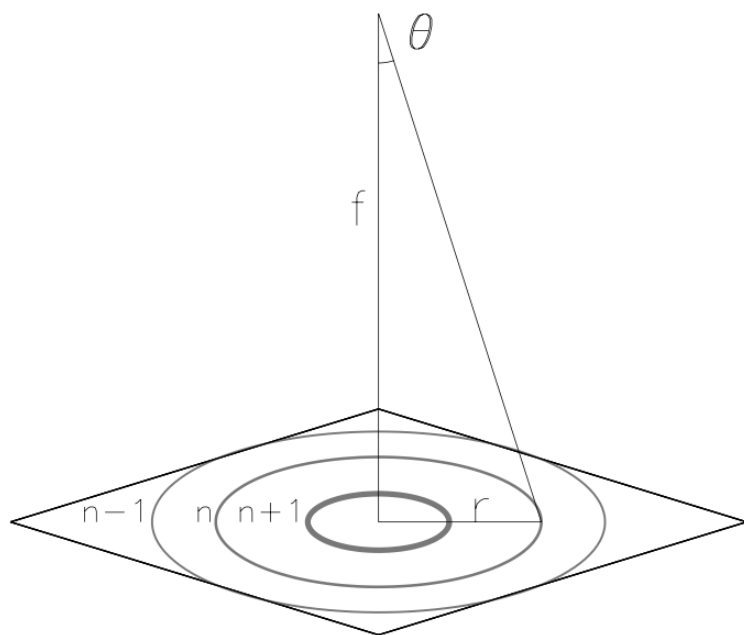
Сканирующий интерферометр Фабри-Перо.

Интерферометр Фабри-Перо



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

Основные соотношения



$$n\lambda = 2l\mu \cos \vartheta = \frac{2l\mu}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{f}\right)^2}}.$$

$$\frac{d\lambda}{d\vartheta} = -\frac{2l\mu}{n} \sin \vartheta = -\frac{2l\mu}{n} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{r}\right)^2}}$$

При приближении к центру:

- растет длина волны
- увеличивается ширина колец

Легко показать, что угловая дисперсия
Не зависит от порядка интерференции:

$$\frac{d\lambda}{d\vartheta} = -\lambda \operatorname{tg} \vartheta.$$

На одном кадре смешаны пространственные и спектральные координаты!

(Моисеев, 2002)



Buisson, Fabry, & Bourget (1914).

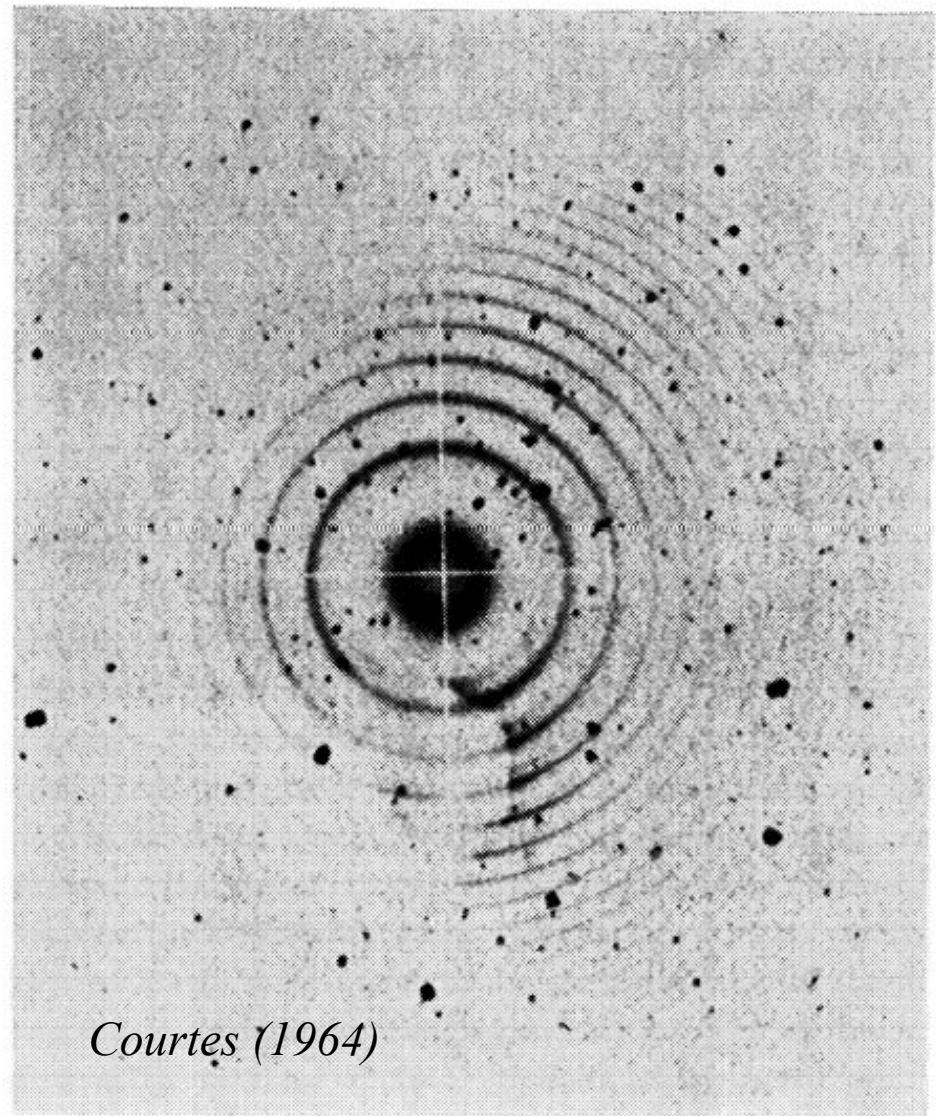
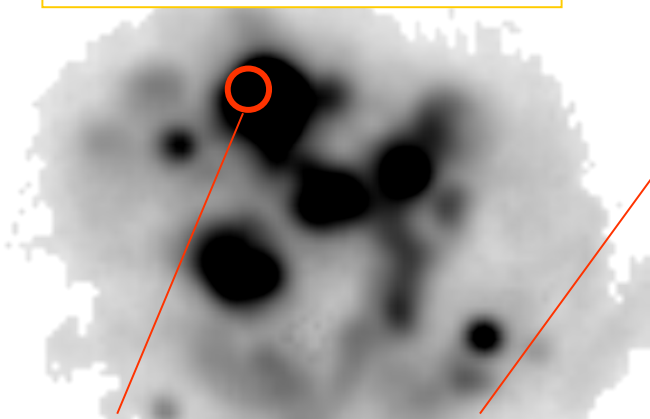


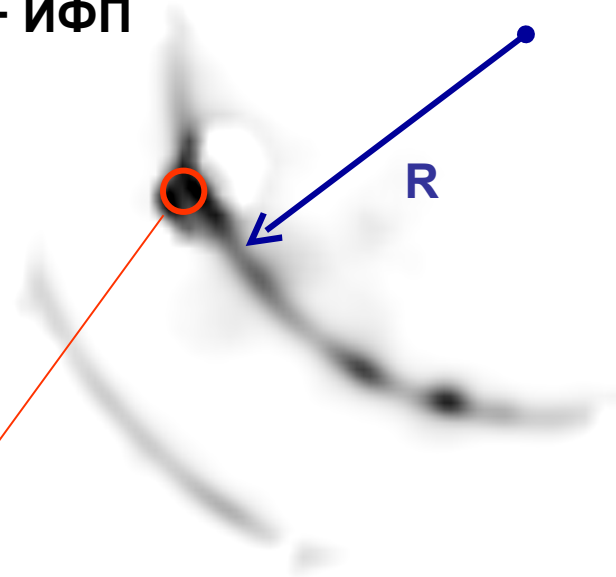
FIG. 12. Perot-Fabry interference rings on the $H\ II$ regions IC 1393. The brightest rings are given by the H_{α} radiations. The faint ones by $[N\ II] 6584$. One notices the enhancement of that line along the bright ring of the absorbing cloud. Plate by S. Pottasch.

+ ИФП

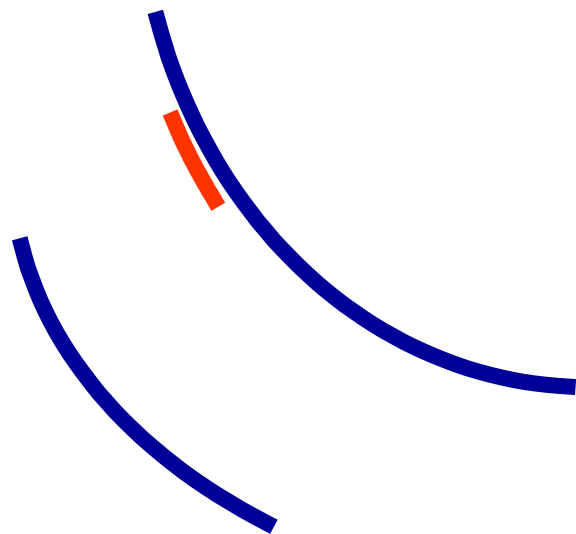
Изображение в
эмиссионной линии



Кинематически
выделенная область

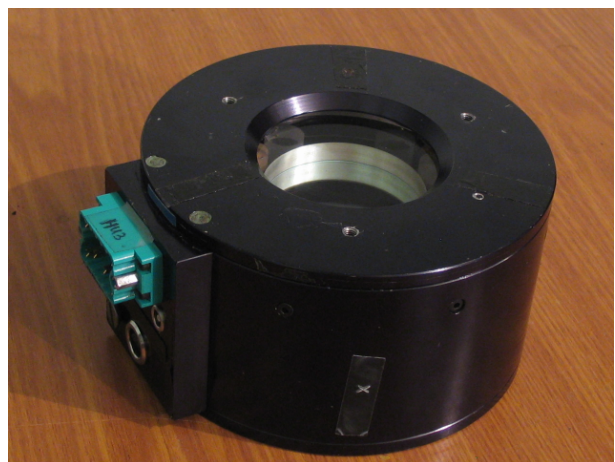
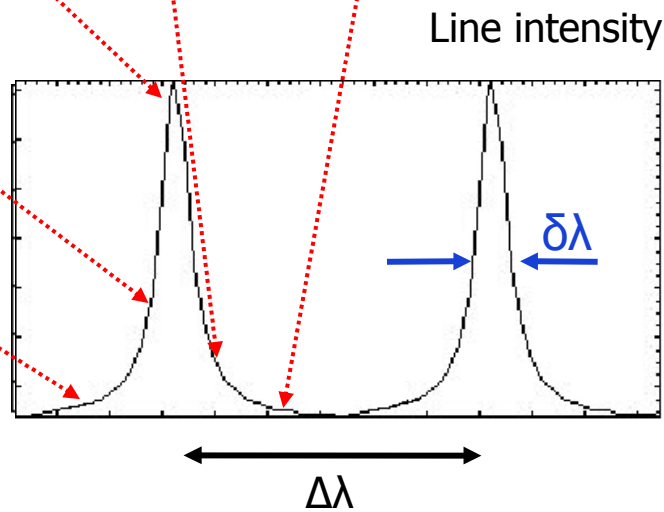
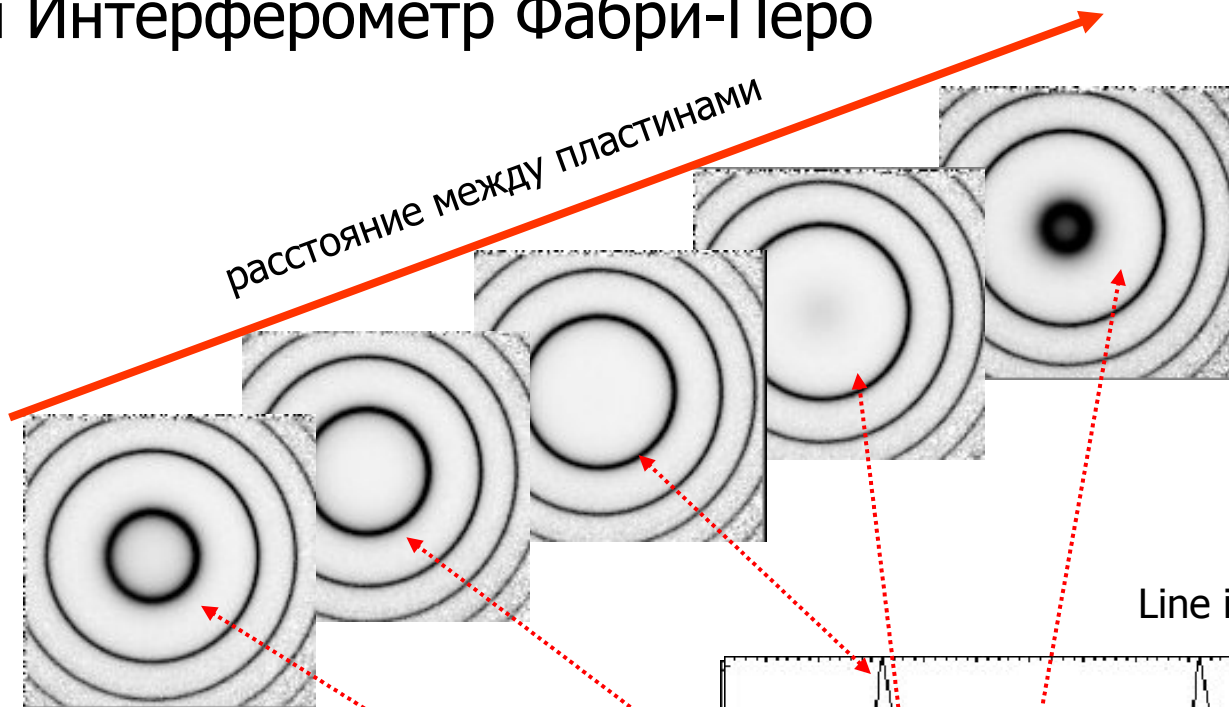
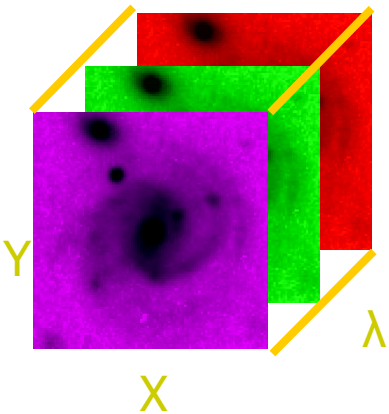


радиус =>
длина волны
=> скорость



Карта скоростей

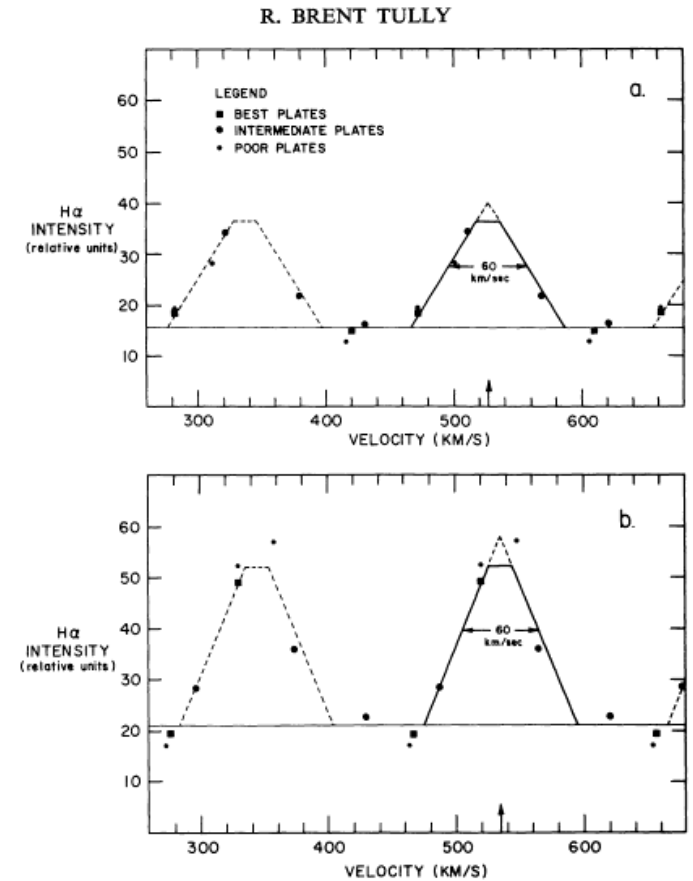
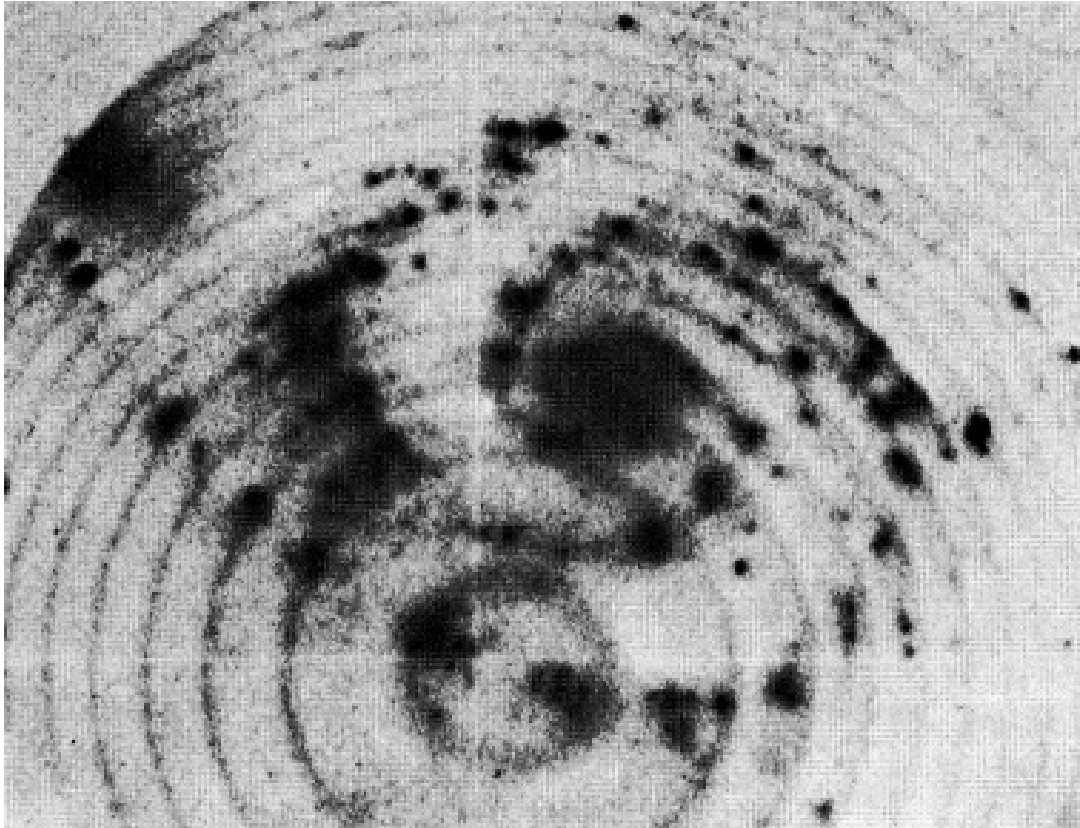
Сканирующий Интерферометр Фабри-Перо



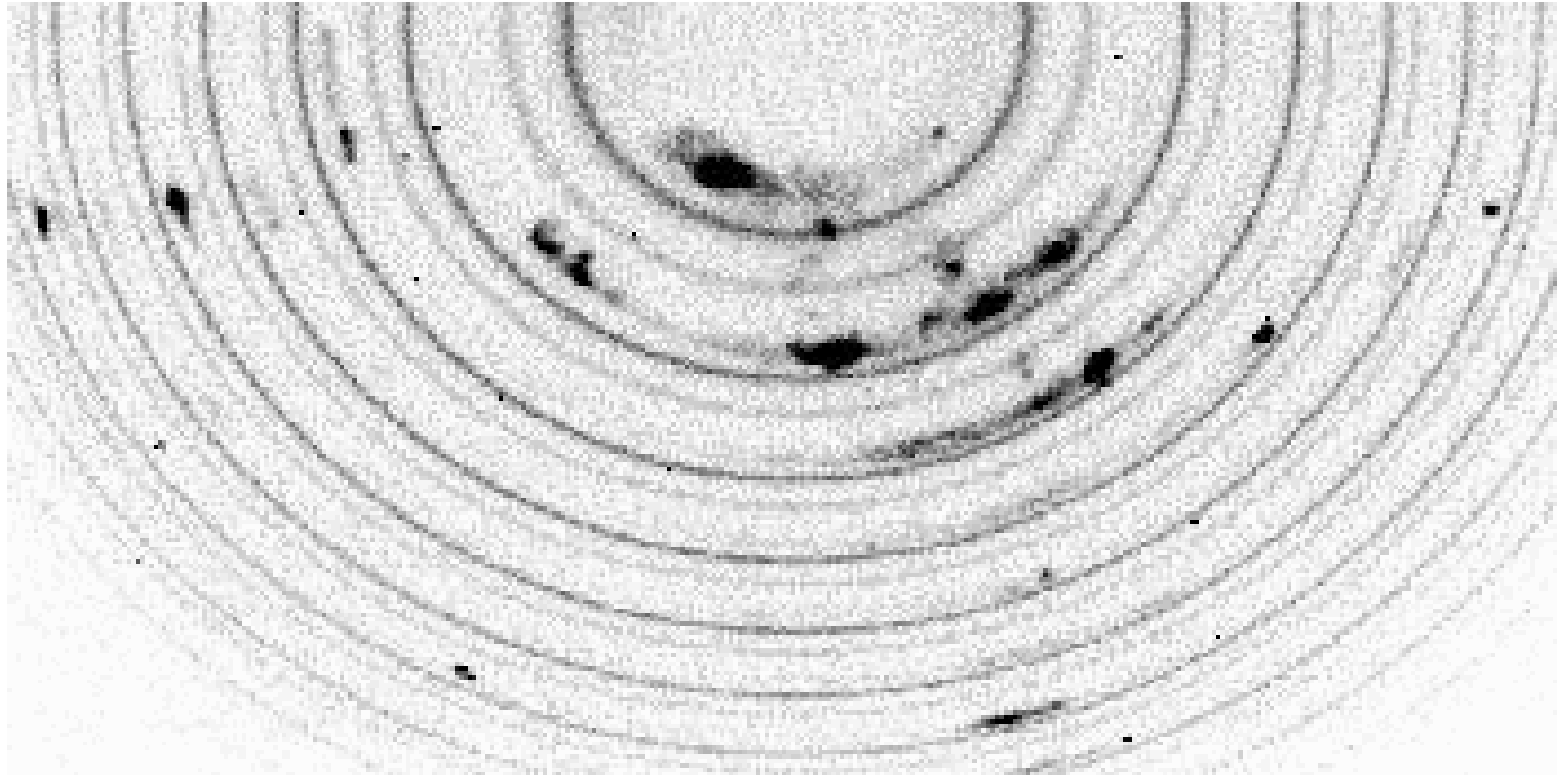
Пьезоэлектрический ИФП ET-50
Queensgate Inc. (IC Optical System Inc.)

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

Первый куб данных с ИФП — M51 (Tully, 1974)



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 HII областей

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

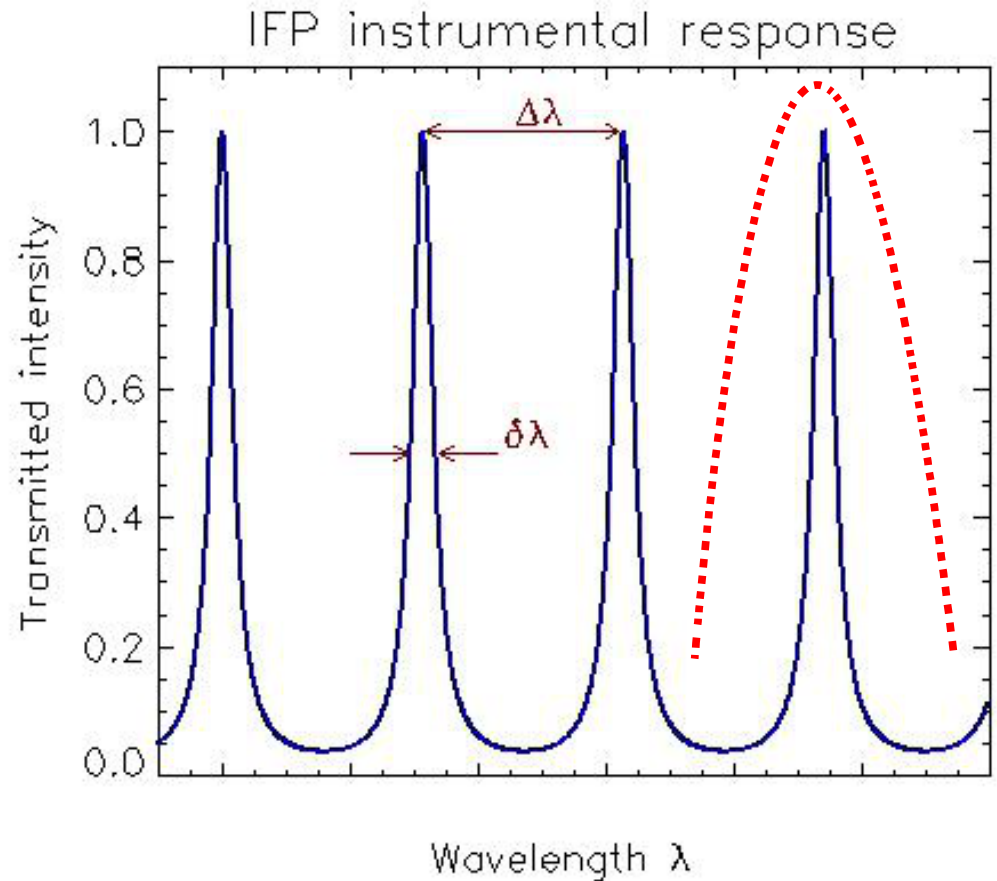
Свободный спектральный диапазон:

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

dl - ширина профиля

$$n = 100 \dots 1000$$

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



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

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

Спектральное разрешение прибора, основанного на принципах интерференции света:

$$R = \lambda / \delta\lambda = n N$$

Область свободная от перекрытия порядков:

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

n – порядок интерференции

N – число интерферирующих лучей

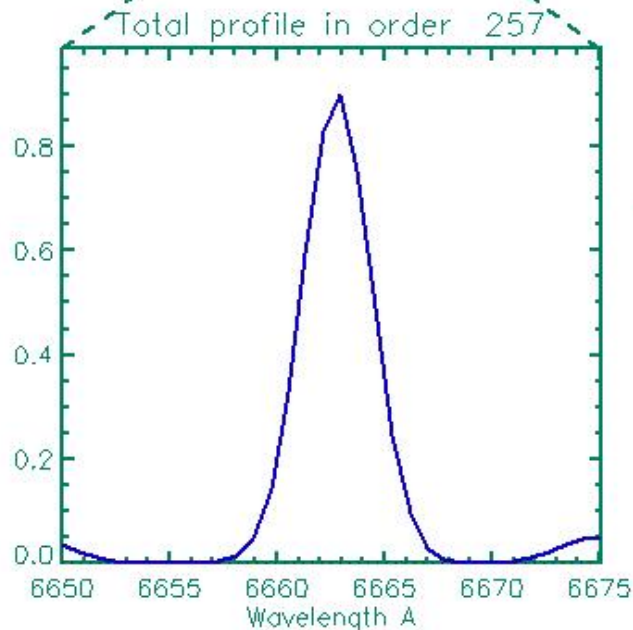
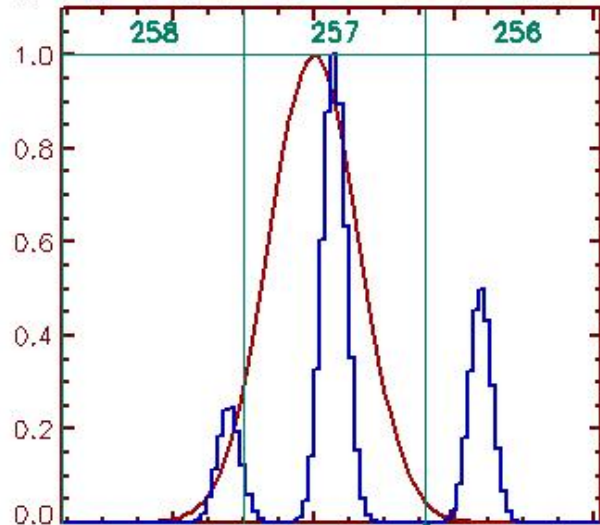
Решетка классического спектрографа: $n=1..3, N>1000$

Эшеле спектрограф: $n=10..50, N>1000$

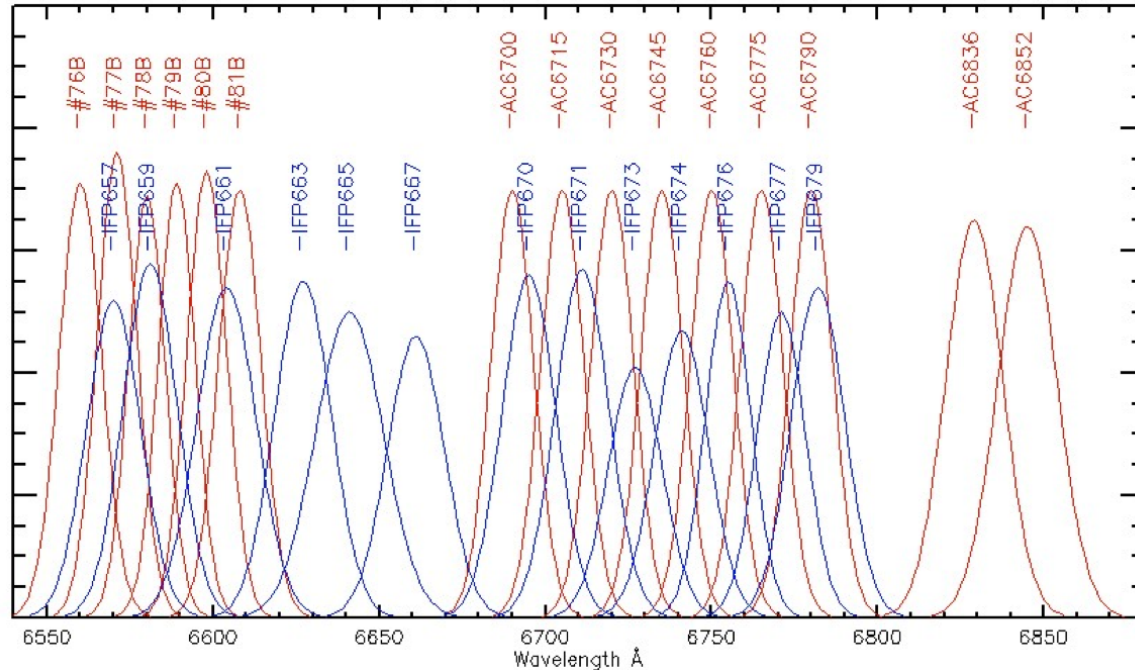
Интерферометр Фабри-Перо: $n=100..10000, N=10..100$

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

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
$\Delta\lambda, \text{\AA}$	34.9	20.3	8.7	13.1
$\Delta\lambda, \text{км с}^{-1}$	1696	1216	399	598
$\delta\lambda, \text{\AA}$	1.7	2.0	0.44	0.80
$\delta\lambda, \text{км с}^{-1}$	78	120	20	36
F	21	10	20	16
n_z	40	30	40	36

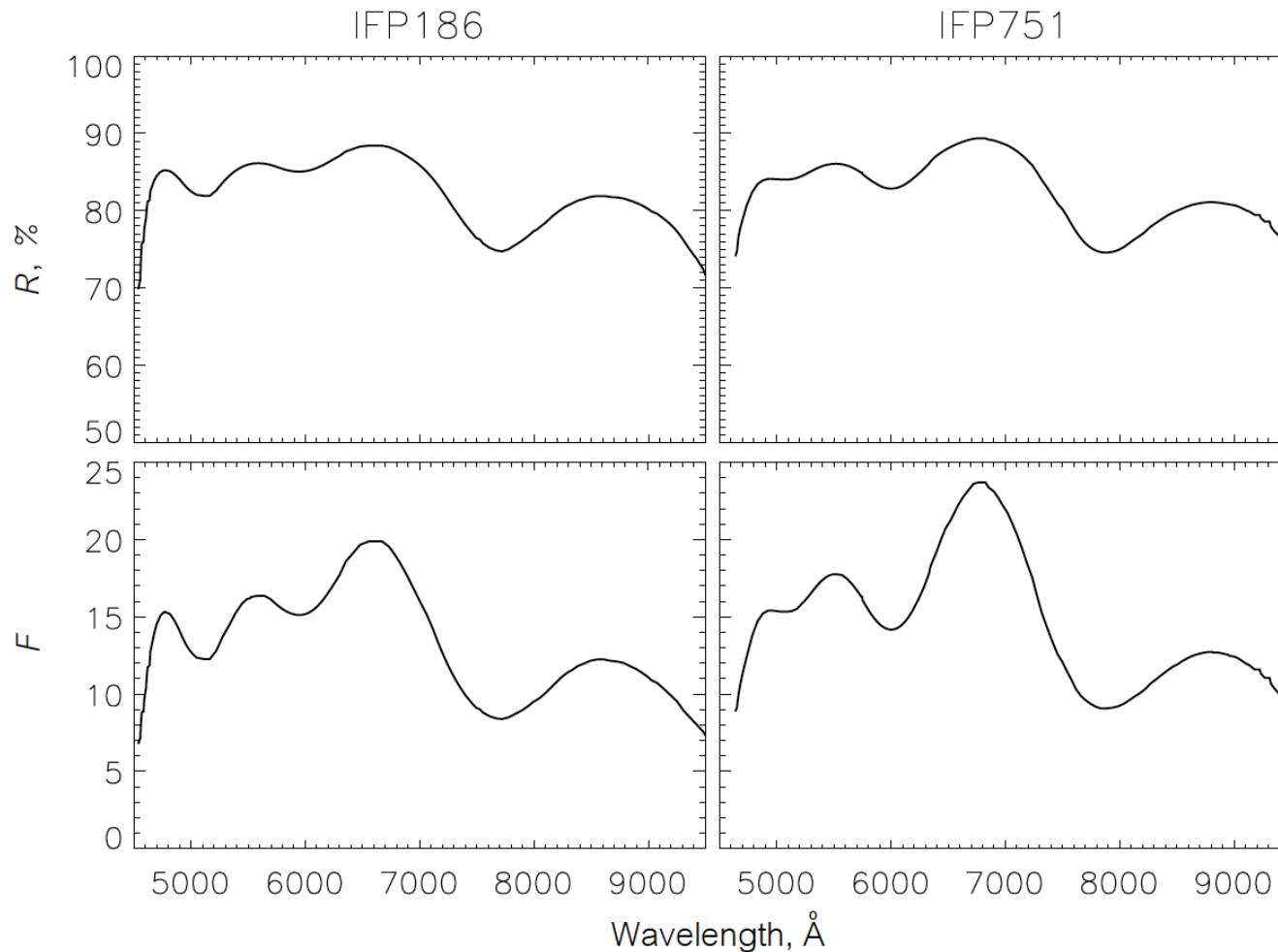
← Выигрываем в разрешении —
проигрываем в диапазоне (и потоке)

← число каналов

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

→ экономим на шумах и времени считывания

ИФП на SCORPIO-2: набор интерферометров



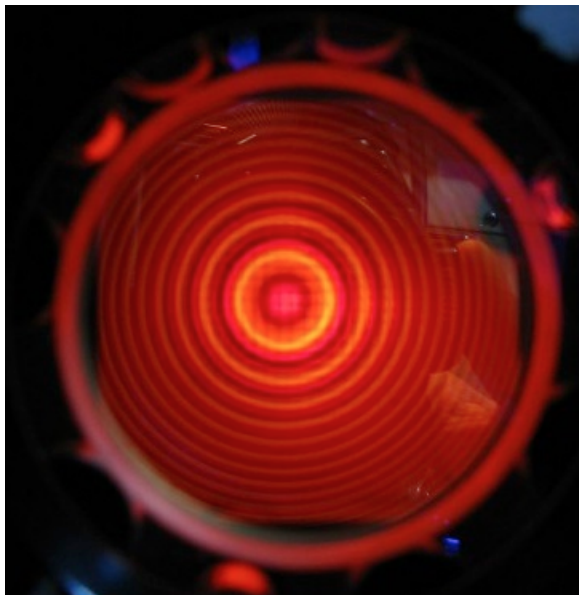
Здесь $F_0(\lambda)$ — контраст «идеального» интерферометра (отсутствие дефектов, абсолютно плоские пластины), рассчитанный по широко известной из теории ИФП формуле

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

ИФП на SCORPIO-2: установка и настройка

SCORPIO: только IFP+grism, IFP+images

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



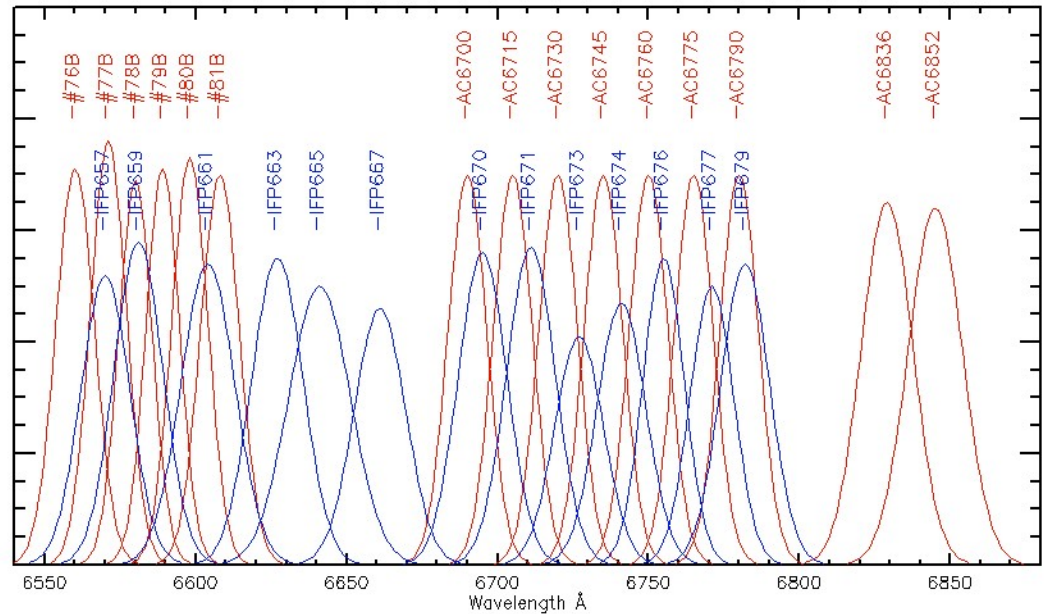
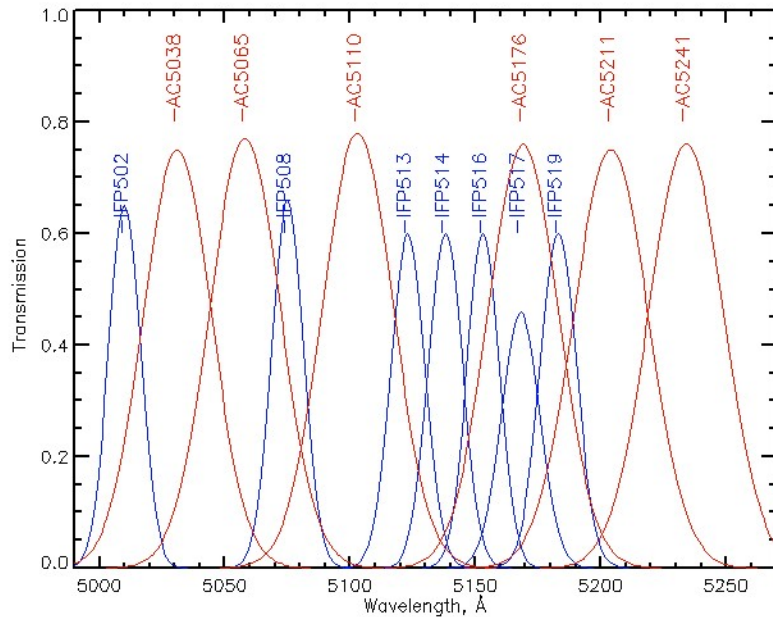
Настройка — глазом по неонке



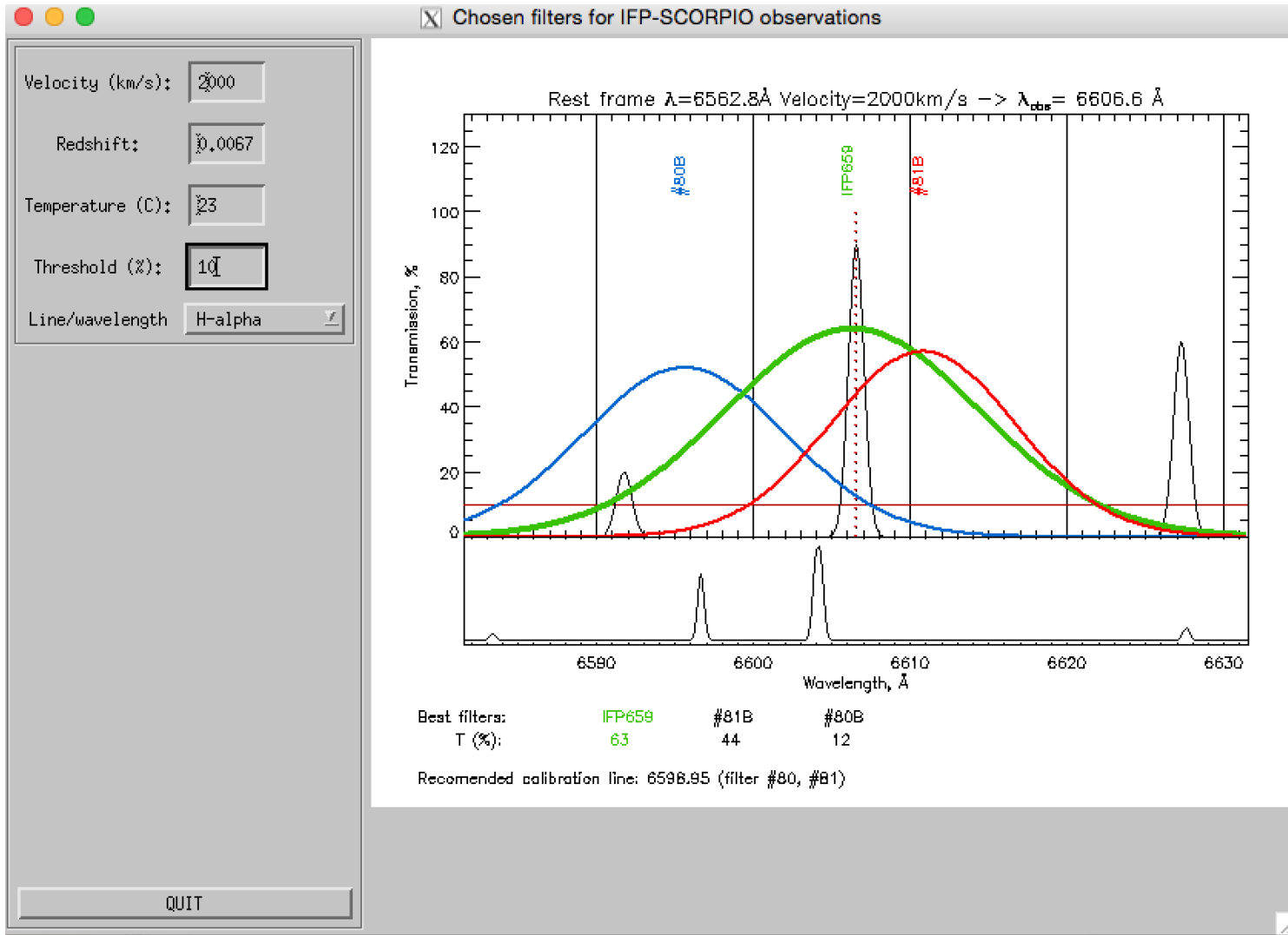
ИФП на SCORPIO-2: набор фильтров

H α , [OIII]5007: -300...+13 000 км/с

Соответственно — [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

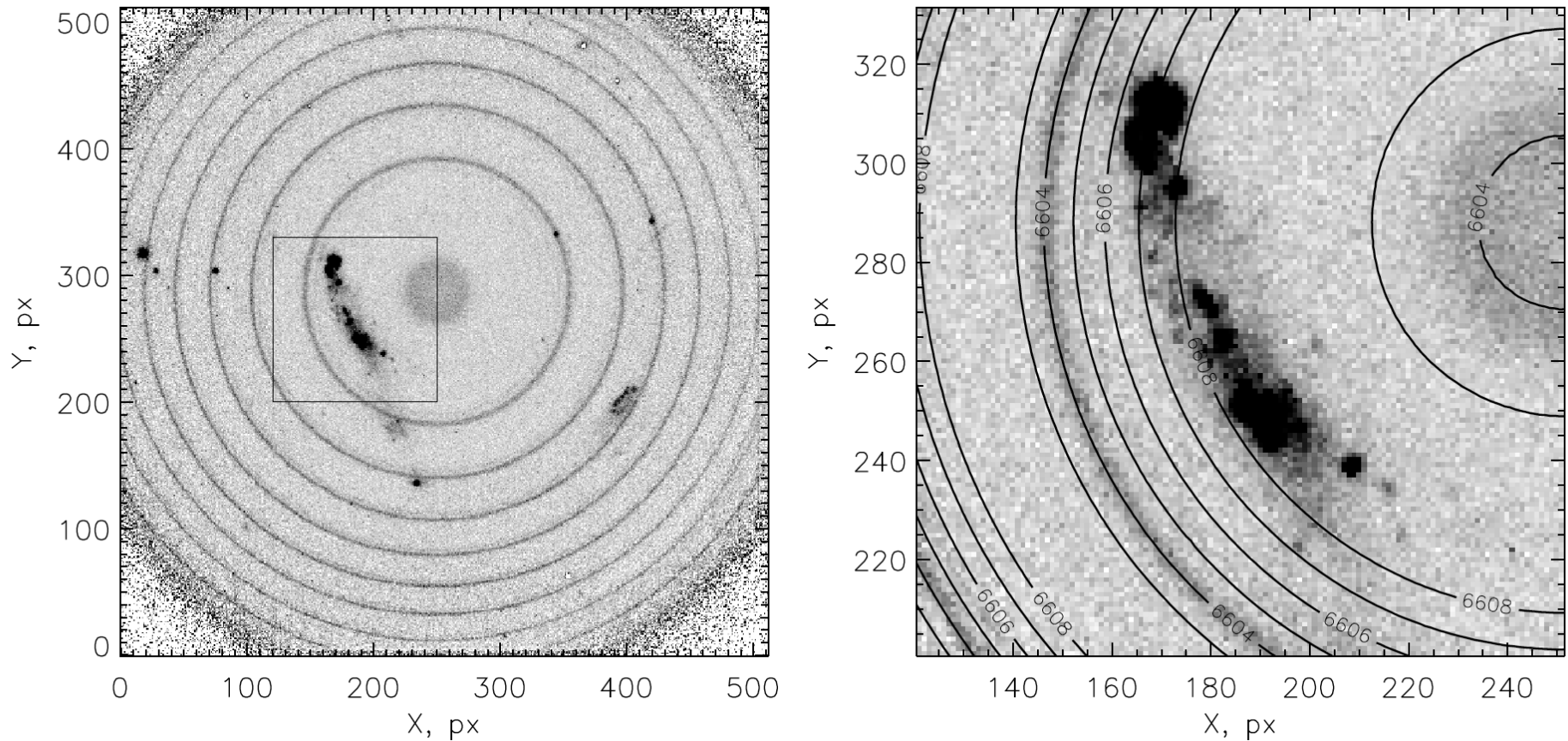
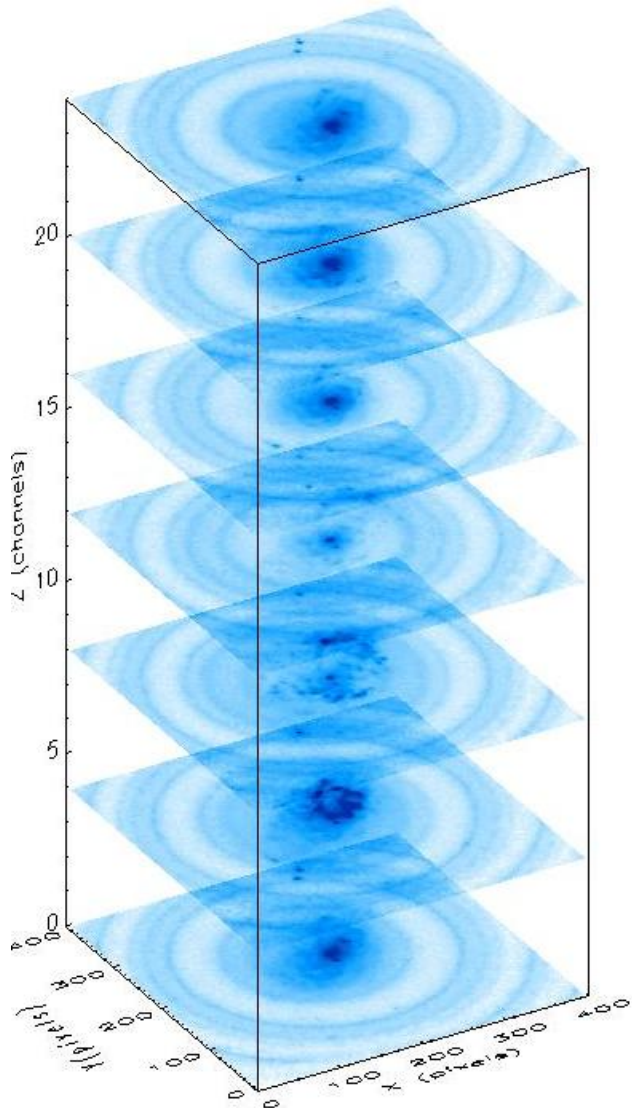


Рис. 4. Наблюдения галактики UGC 260 с помощью IFP751 на SCORPIO-2 в линии $H\alpha$. Слева: пример кадра, хорошо видны как эмиссия от галактики, так и кольца от линии ночного неба $\lambda 6604$. Квадратом выделена область, показанная на рисунке справа; контурами отмечена шкала длин волн. Шаг контуров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

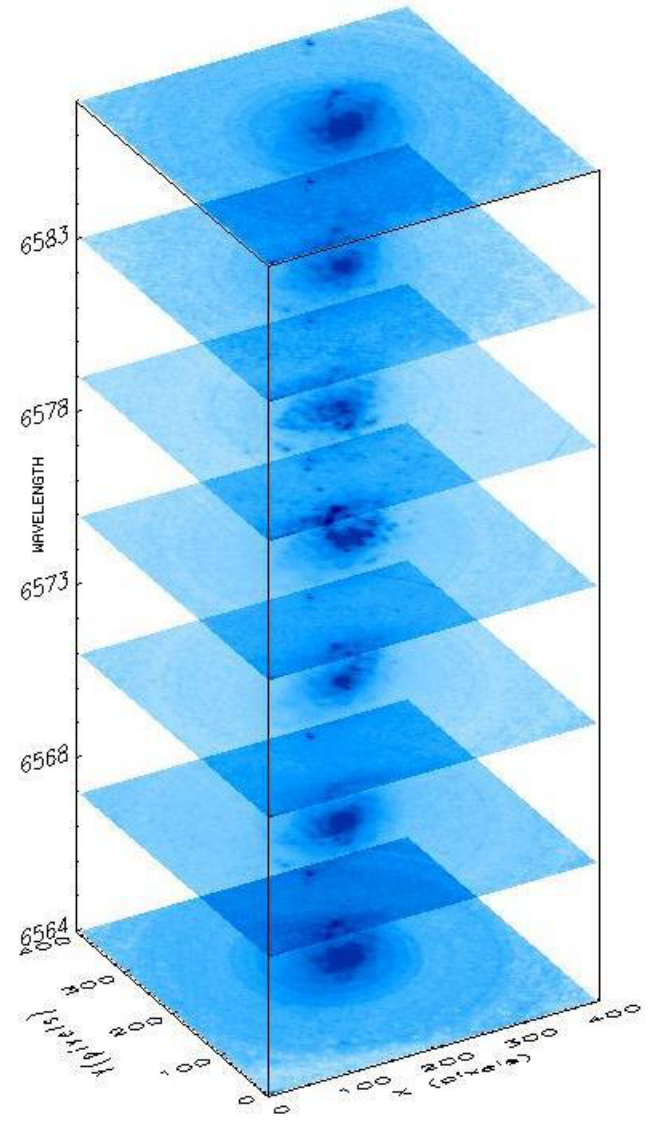
(Моисеев, 2015)

Куб данных, полученный с ИФП

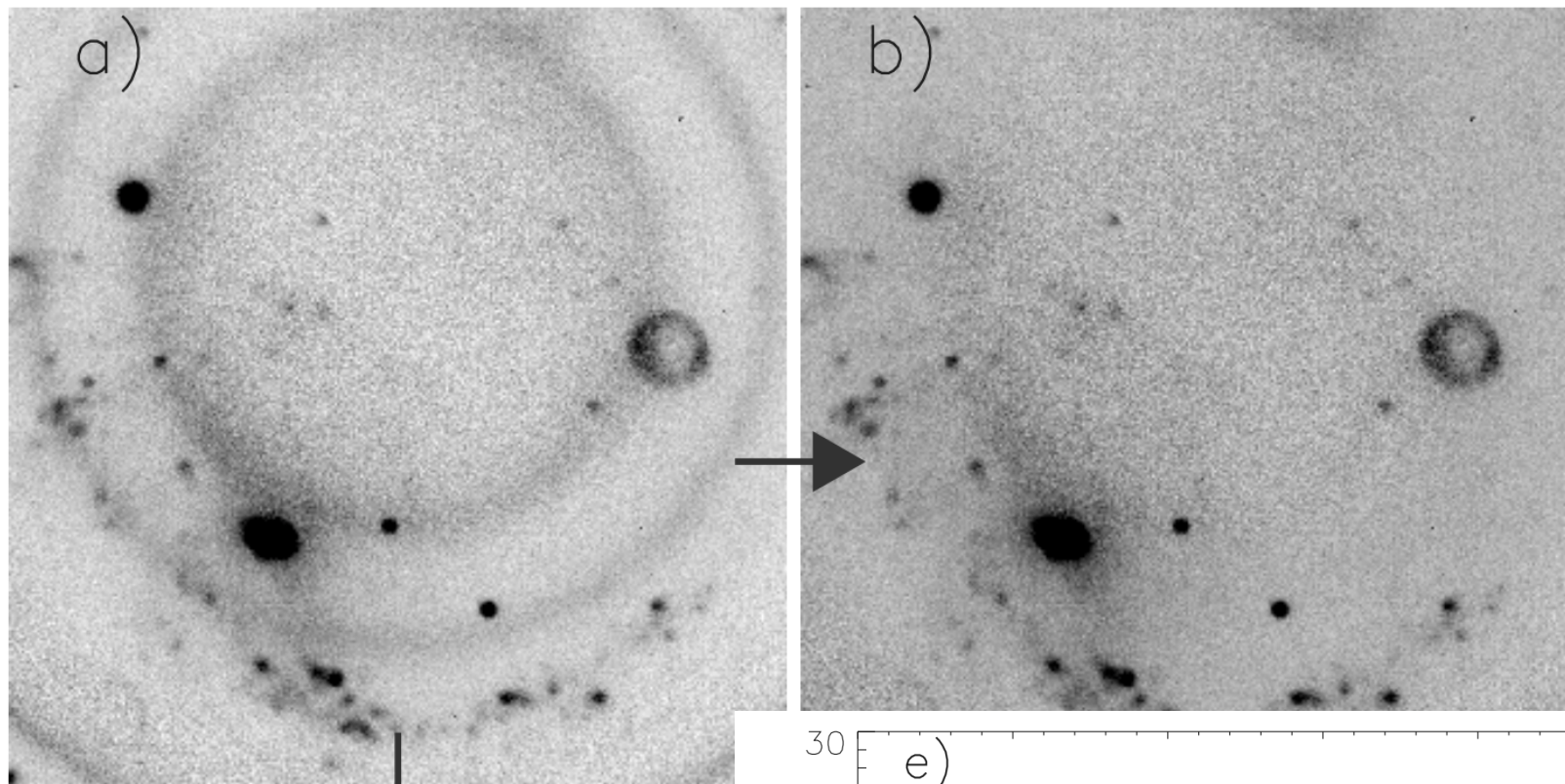
Z=channels



Z=Wavelength

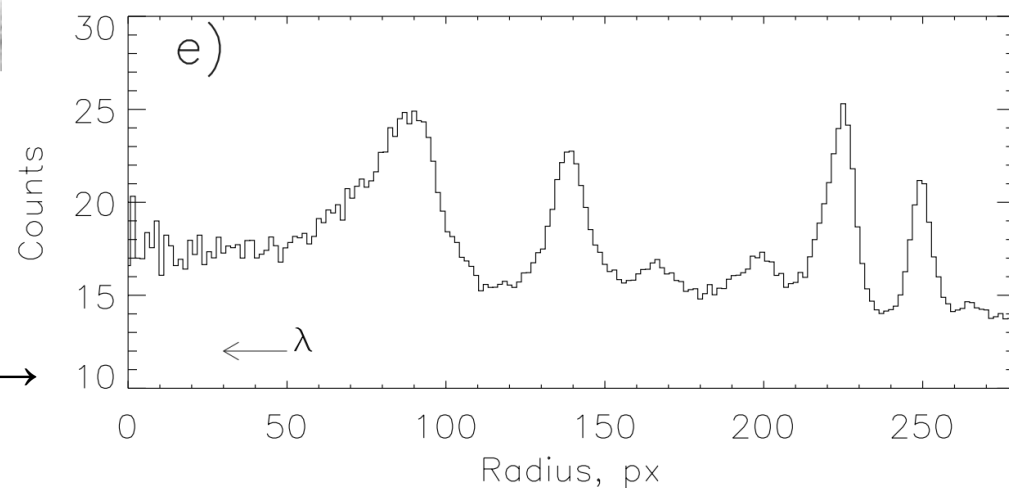


Обработка данных: вычитание фона неба

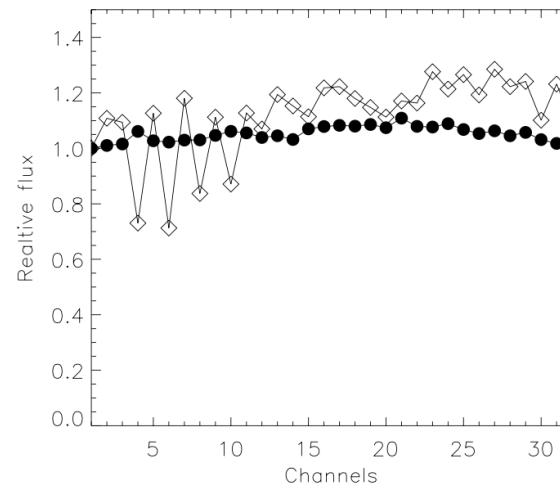
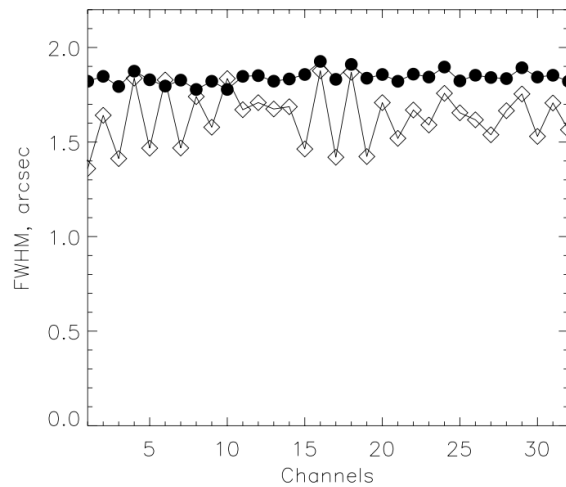
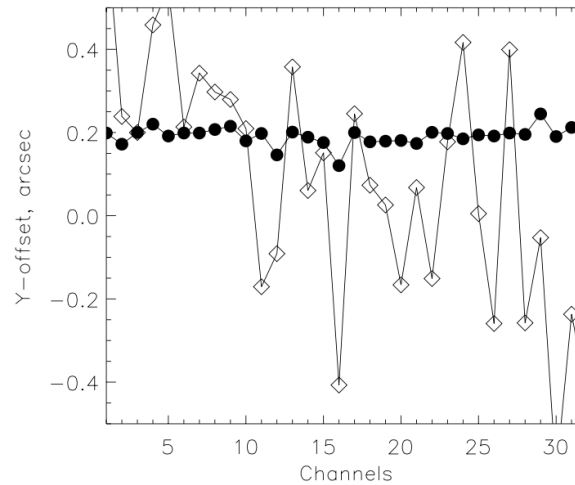
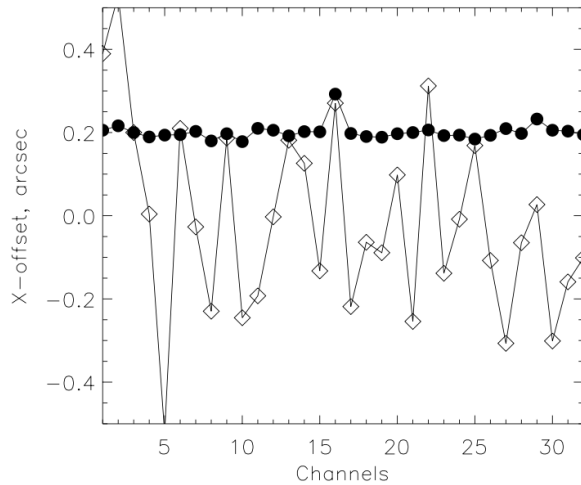


Радиальный профиль линий неба →

(Моисеев, 2002)

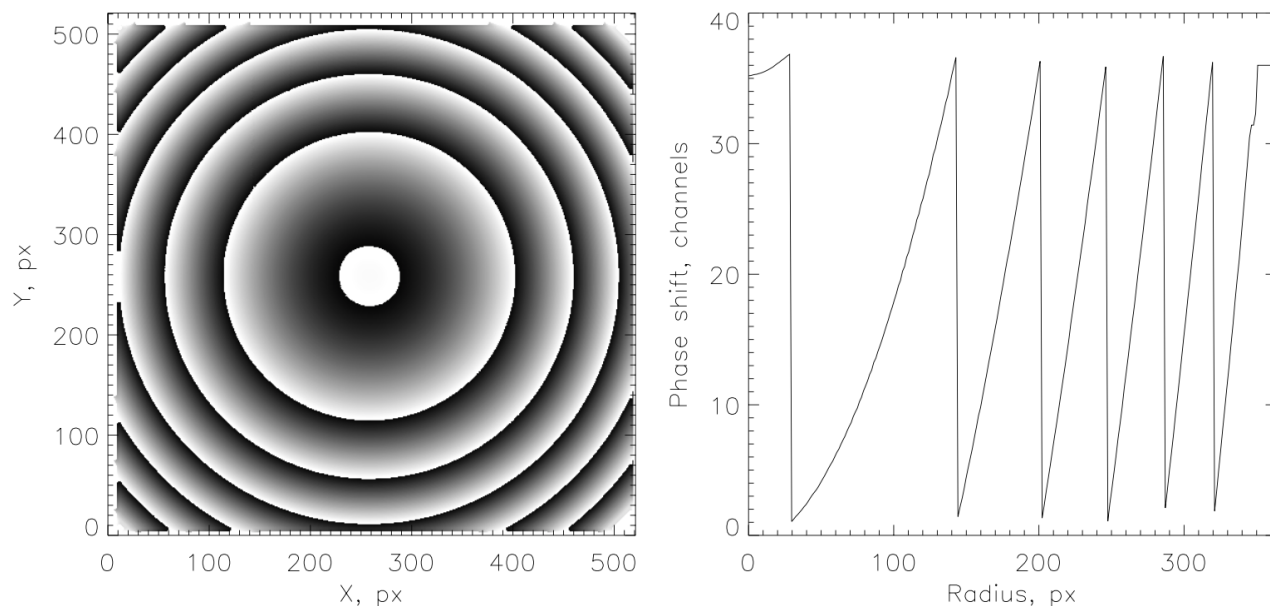


Обработка данных: фотометрическая коррекция



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

Обработка данных: шкала длин волн — фазовая карта



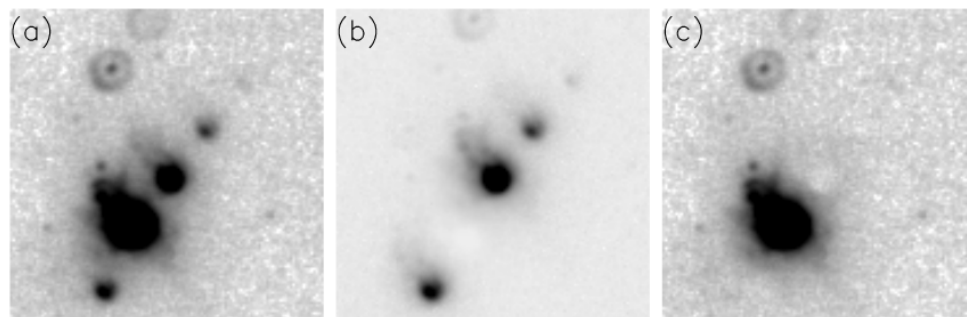
Для сканирующего интерферометра $2\mu l = A + Bz$, где z -номер спектрального канала, а A и B — некоторые константы (Гордон и др., 2000). Легко получить, что

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

(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:

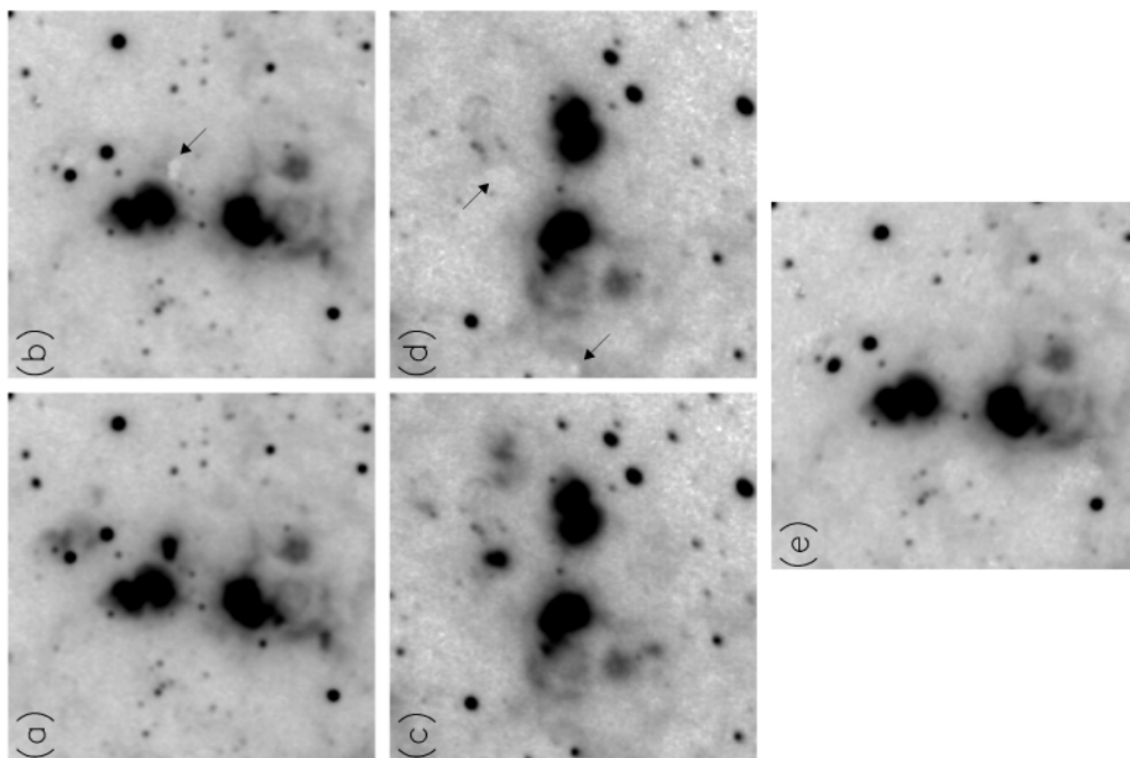
$$z(r) \cong \frac{n}{B} \lambda + \frac{A}{2Bf^2} r^2 - \frac{A}{B} \quad \leftarrow \text{квадратичное изменение радиуса колец}$$

Обработка данных: учет бликов



Итеративная процедура
вычитания + наблюдения
в двух РА

Рис. 2. Вычитание бликов, показана сумма всех каналов куба данных для галактики II Zw 70. (a) Исходное изображение, (b) модель распределения яркости в бликах, (c) результат вычитания модели из исходного куба.



(Моисеев, Егоров 2008)

Обработка данных: аппаратный контур

Функция Эйри

Лучшая аппроксимация (из простых функций) — профиль Лоренца

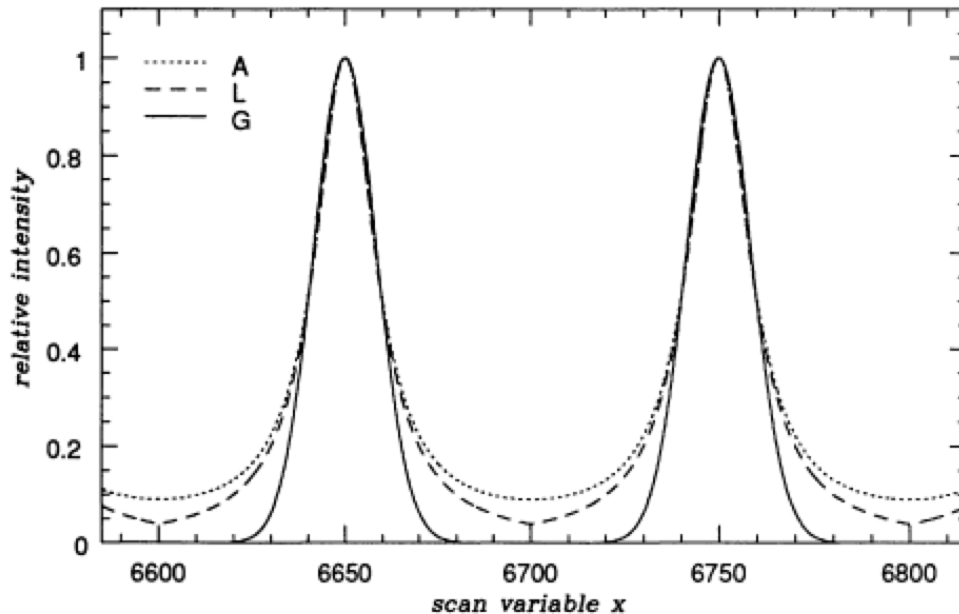


Figure 2. Three cyclic functions listed in Table 1 (column 2) shown at low finesse to emphasize their differences.

	$f(x)$
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, будем наблюдать профиль Фойгта

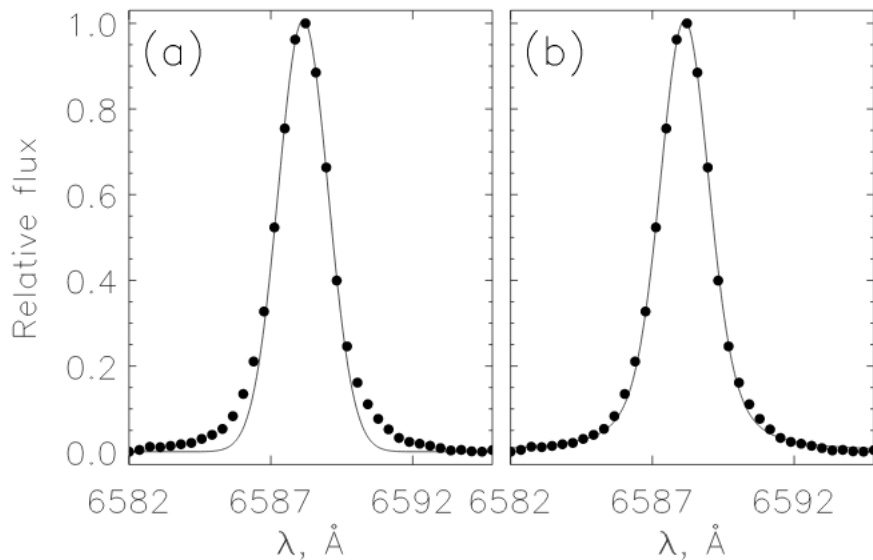


Рис. 4. Пример профиля спектральной линии $H\alpha$ в галактике II Zw 70 по наблюдениям с IFP501 (точки). Линией показана аппроксимация функцией Гаусса (a) и профилем Фойгта (b).

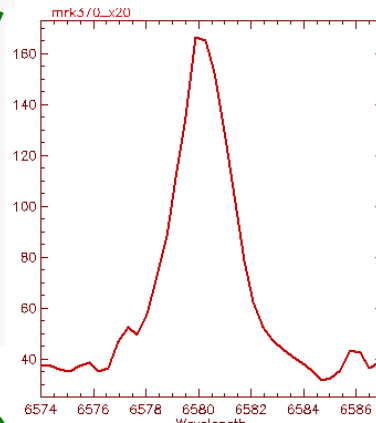
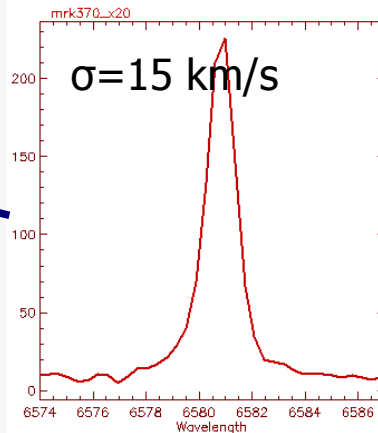
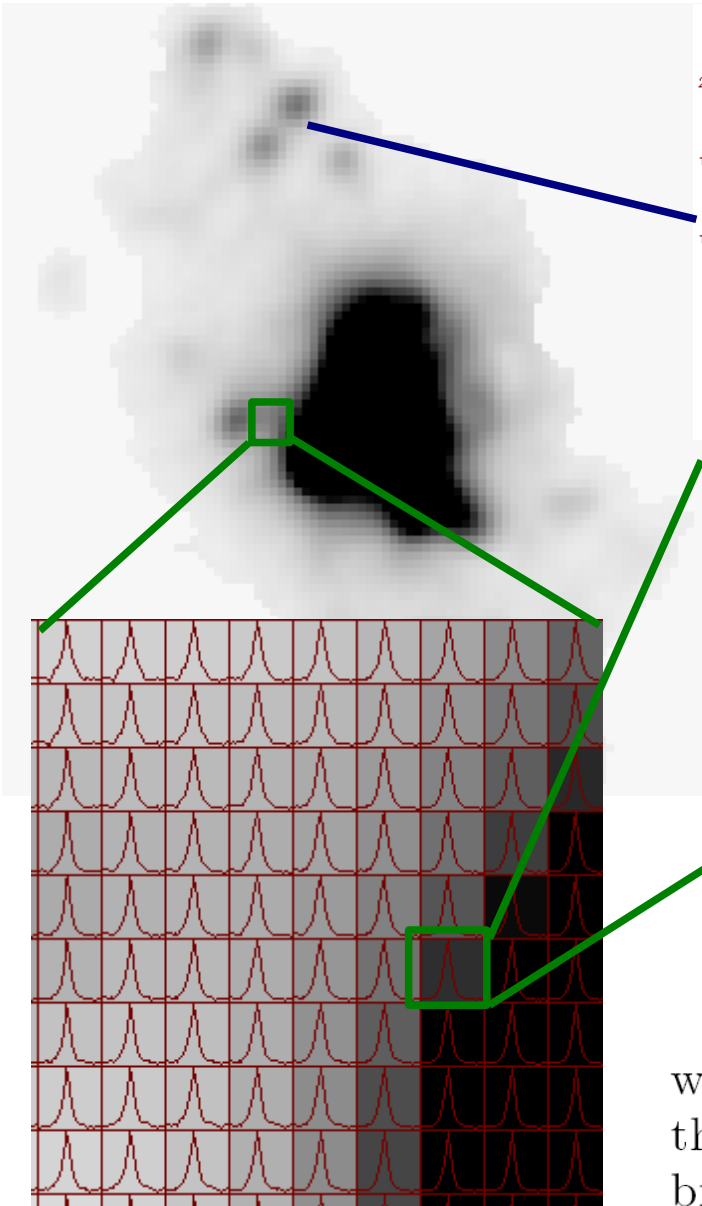
шением (4), то наблюдаемый профиль является сверткой профилей Гаусса и Лоренца, т. е. задается функцией Фойгта (Voigt):

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

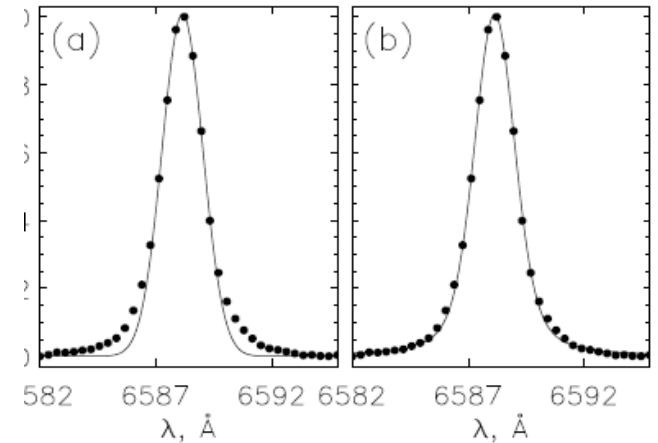
где

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

Ionized gas velocity dispersion: measurements



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

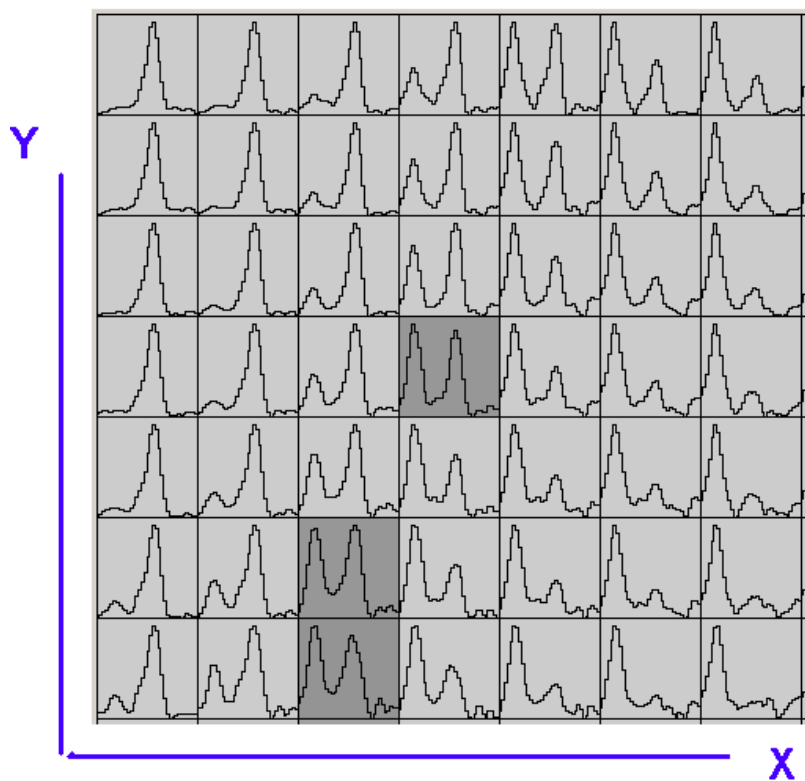


$$\sigma_{real}^2 = \sigma_{gas}^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{tr}^2$$

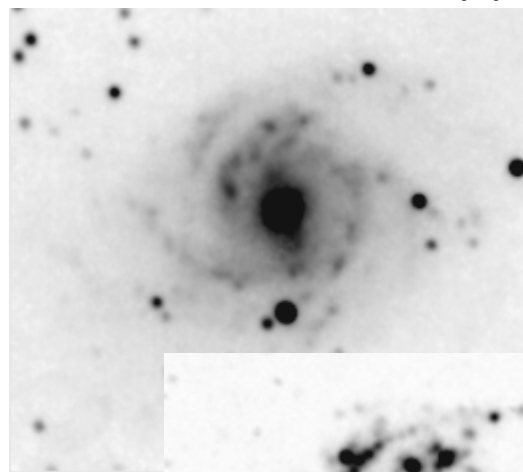
where $\sigma_N \approx 3$ km/s and $\sigma_{tr} \approx 9.1$ km/s correspond to the natural width of the emission line and its thermal broadening at 10^4 K, respectively.

Применение куба данных

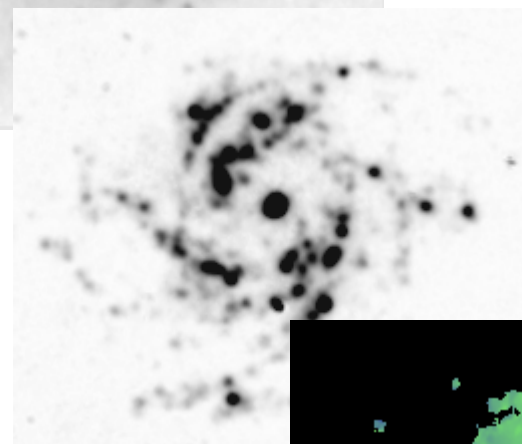
Анализ профиля линий



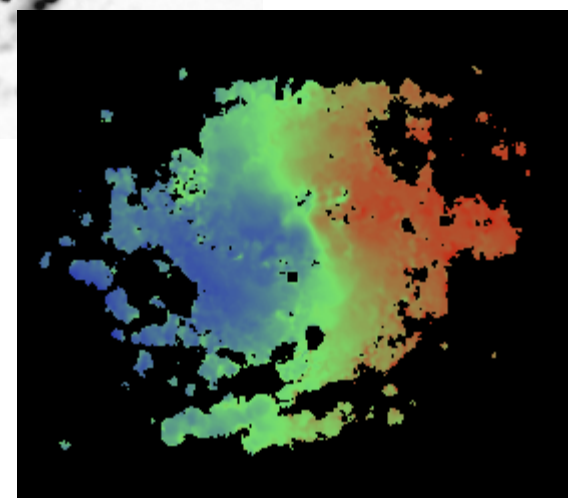
КОНТИНУУМ



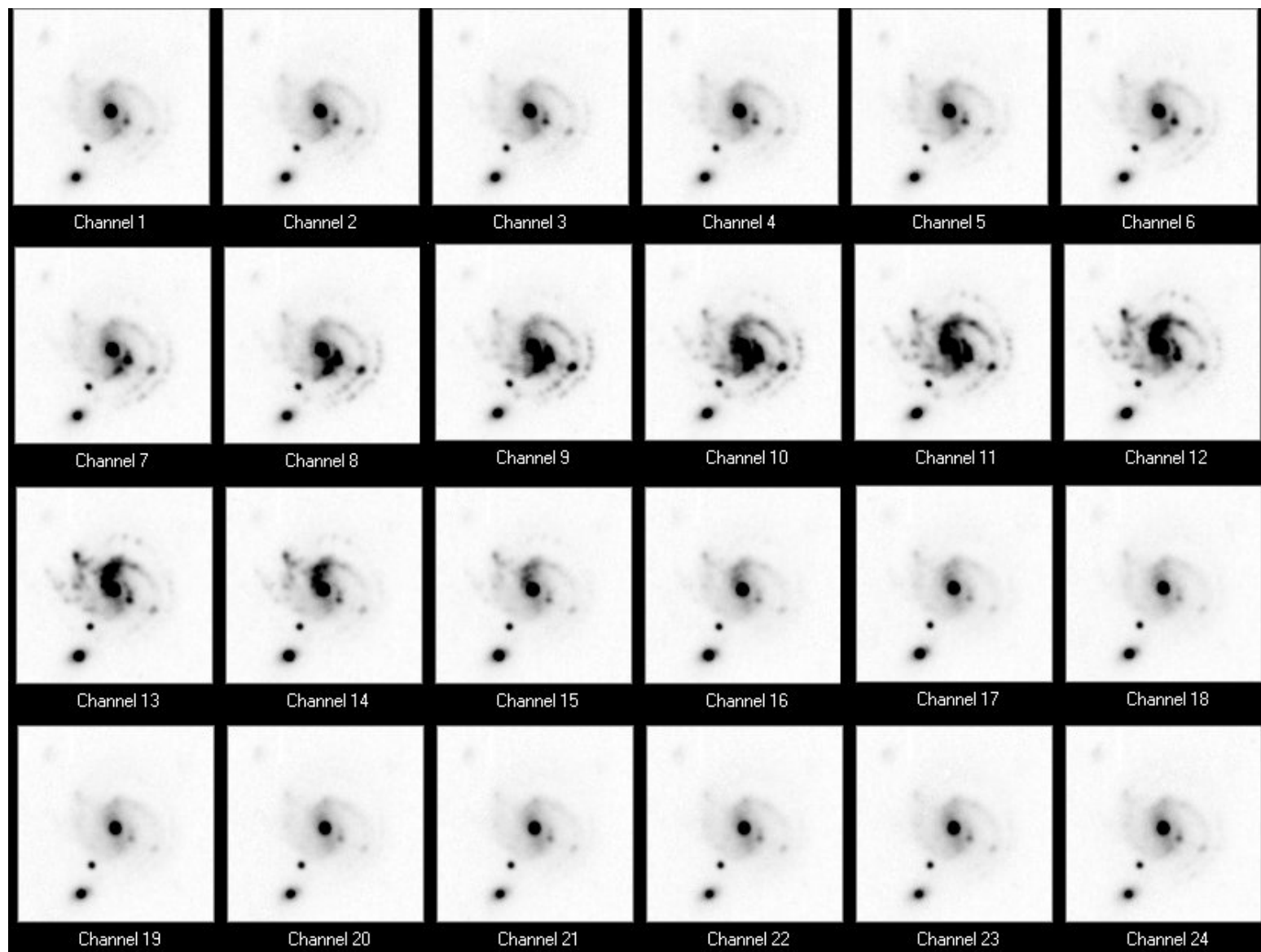
ЭМИССИОННАЯ
ЛИНИЯ



скорости

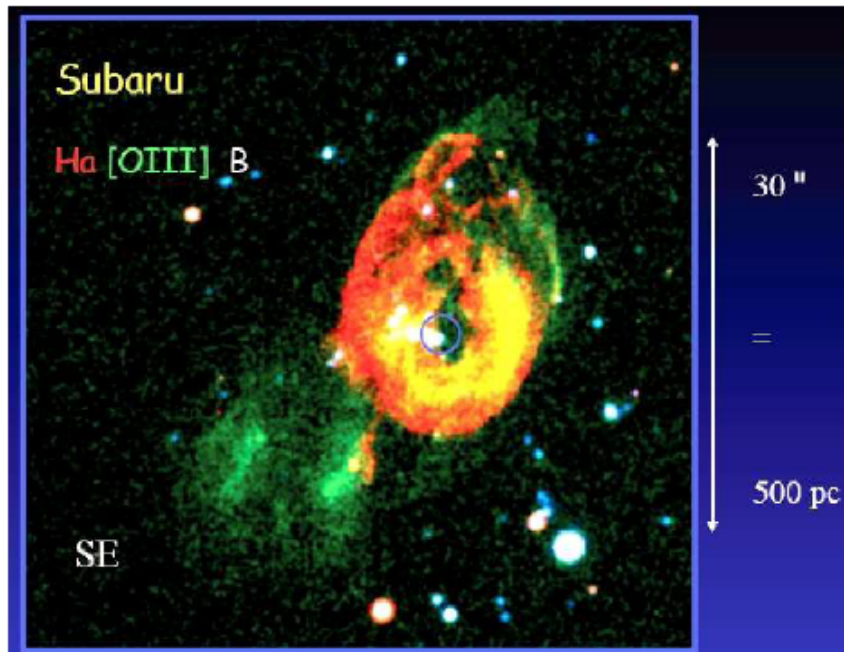


Куб данных Мкп 533 (в линии H α)



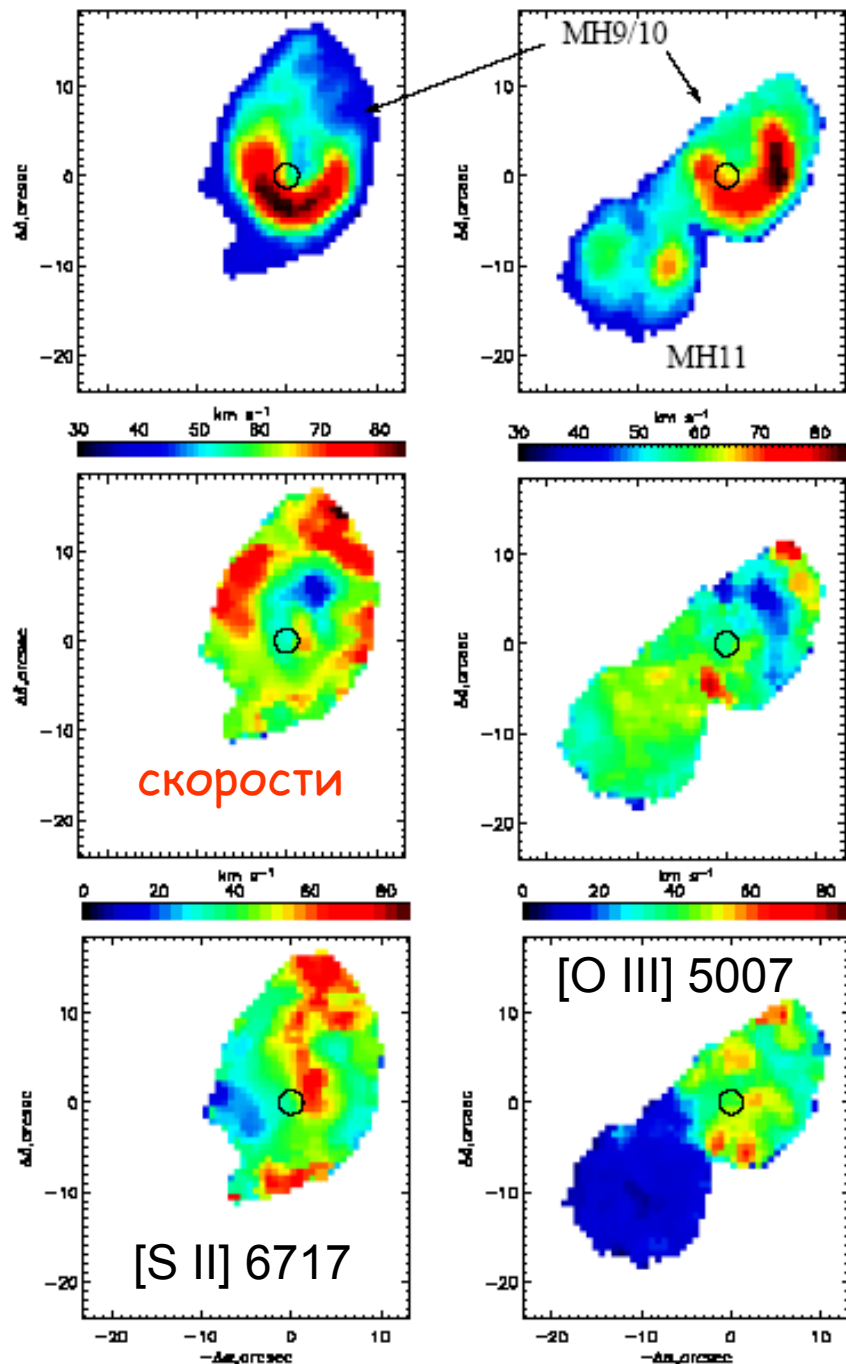
Ультраяркий источник X-1 Holmber IX,

Изображение



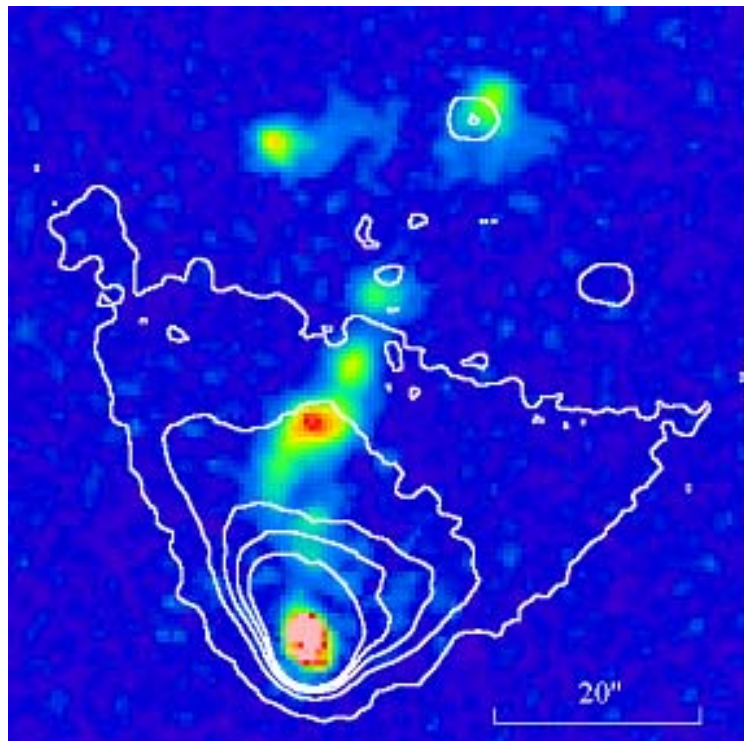
дисперсия
скоростей

Abolmasov & Moiseev (2008)

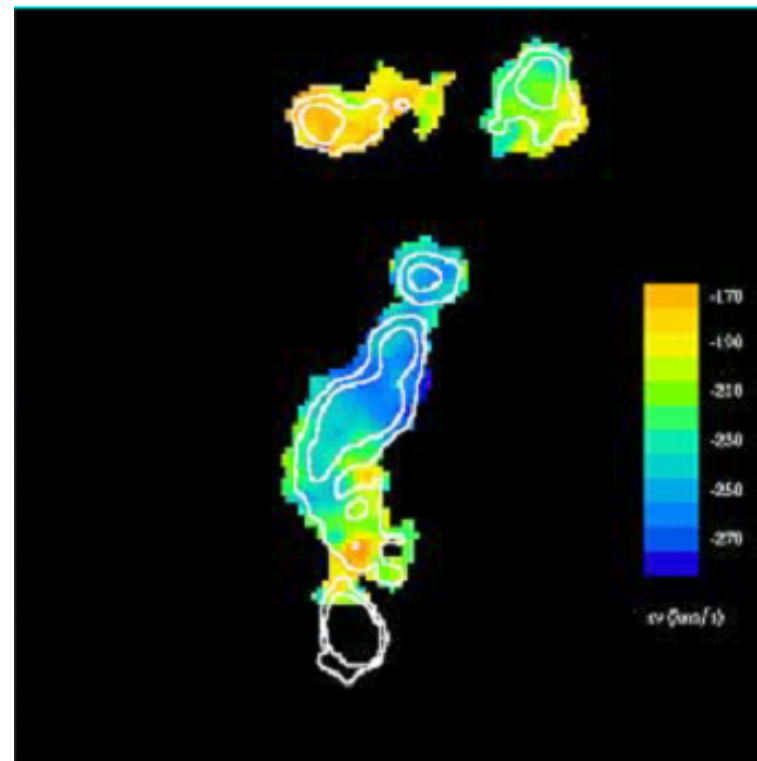


Истечения из молодых звездных объектов: PV Cep (наблюдения по программе Т. Мовсисяна)

Отражательная туманность вокруг PV Cep:

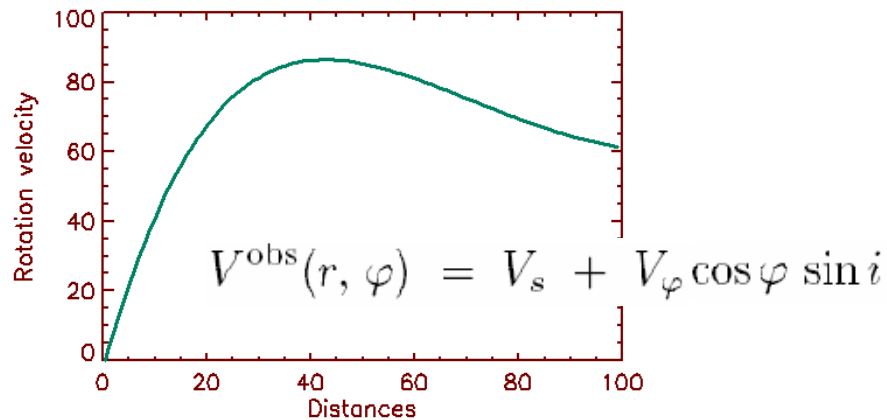
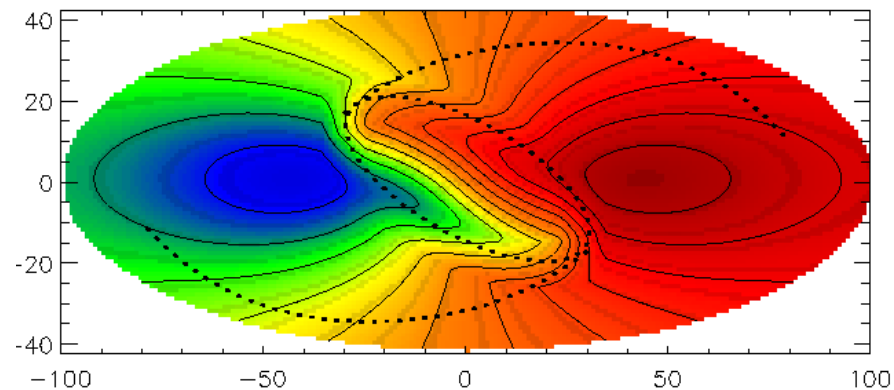
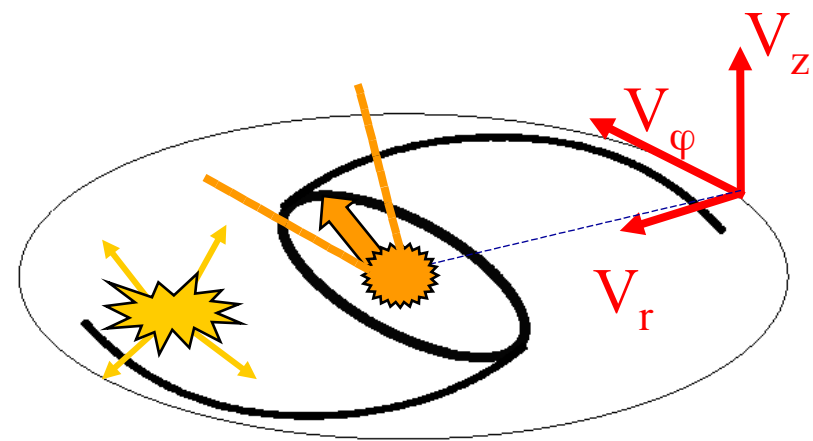
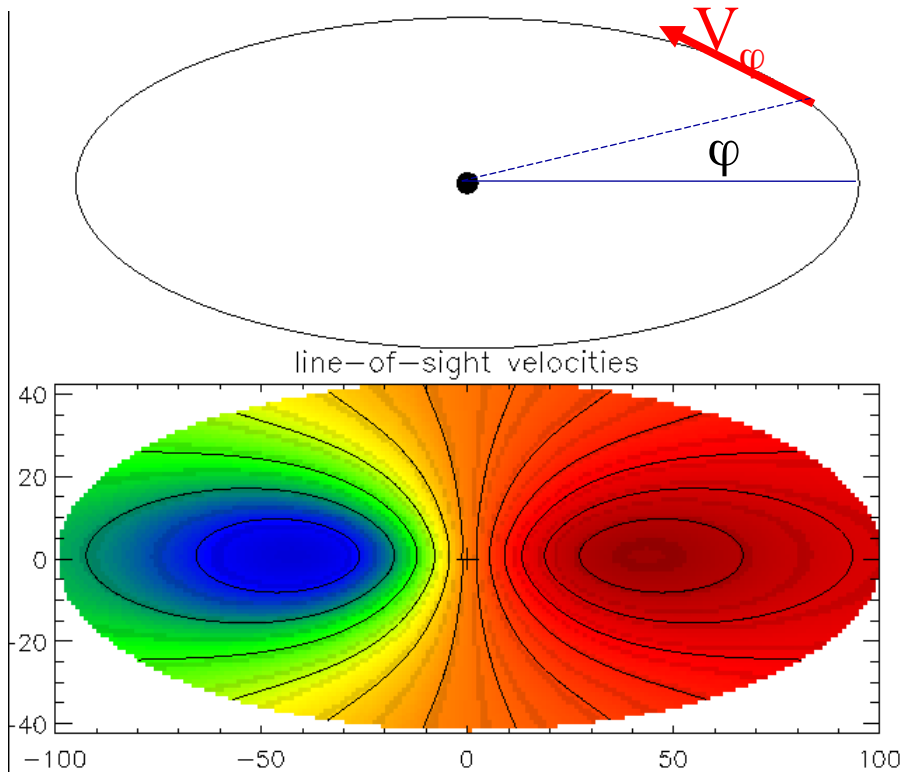


Поле скоростей ионизованного газа в
линии [SII]6717



Изображение в эмиссионной линии [SII]6717
наложены изофоты континнума

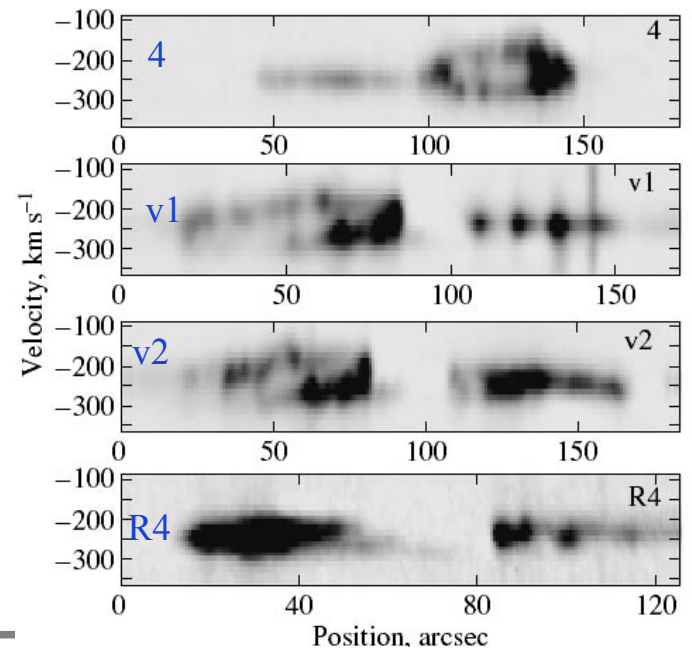
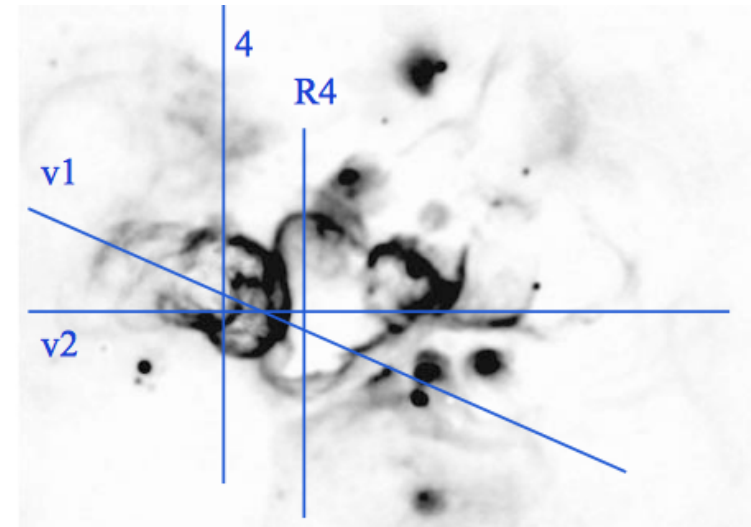
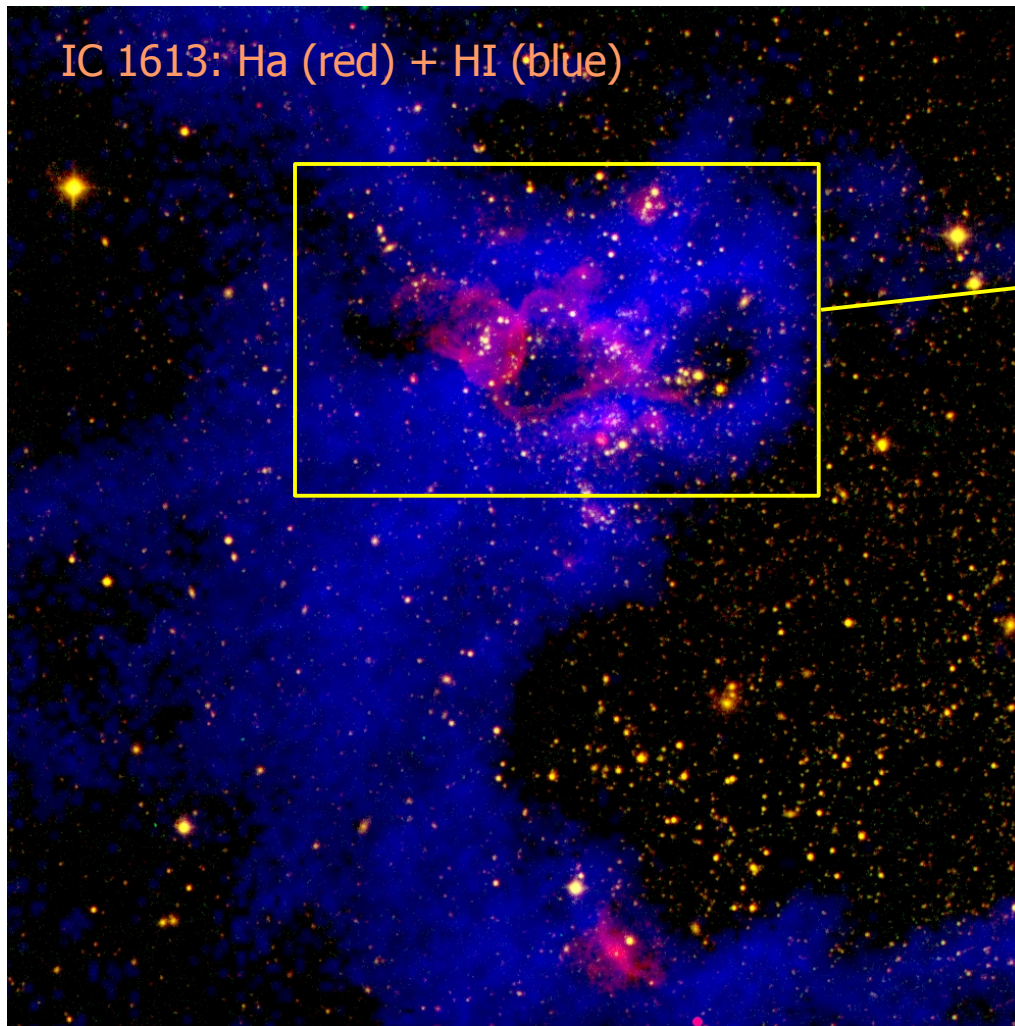
Зачем нужны поля скоростей ?



Некруговые движения газа

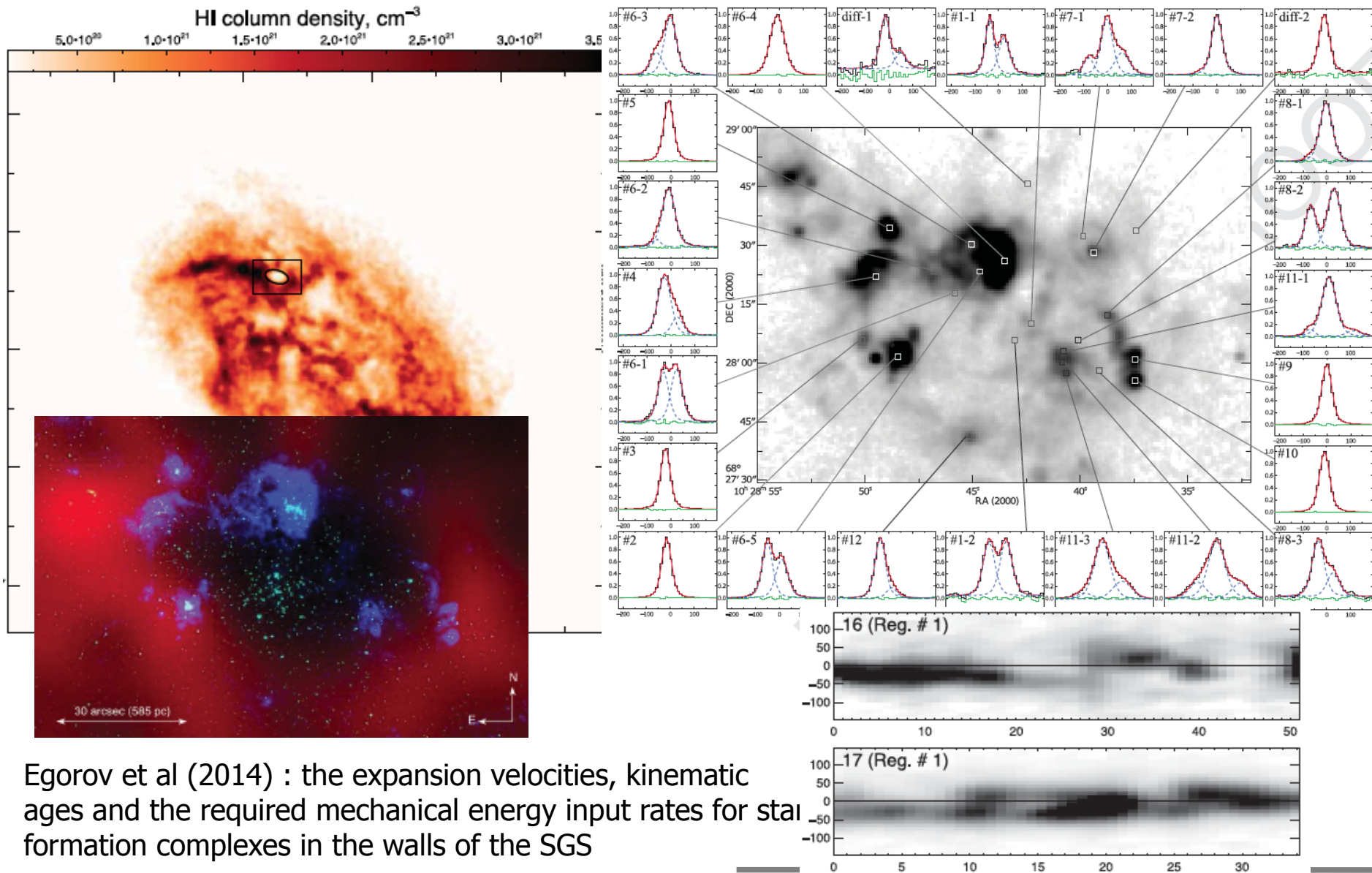
- спиральные волны, бар
- активное галактическое ядро
- воздействие звездообразования
- взаимодействующие системы

Расширяющиеся газовые оболочки в комплексе звездообразования IC 1613



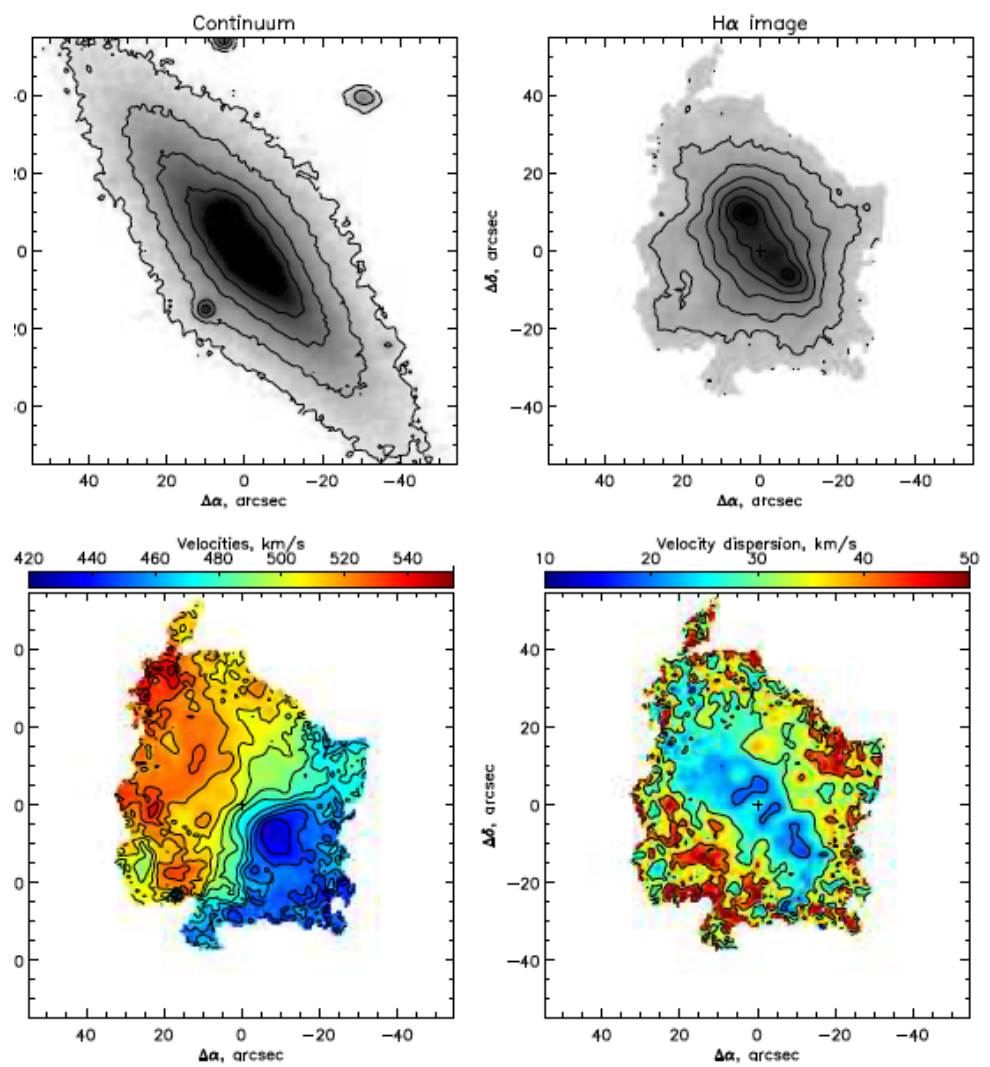
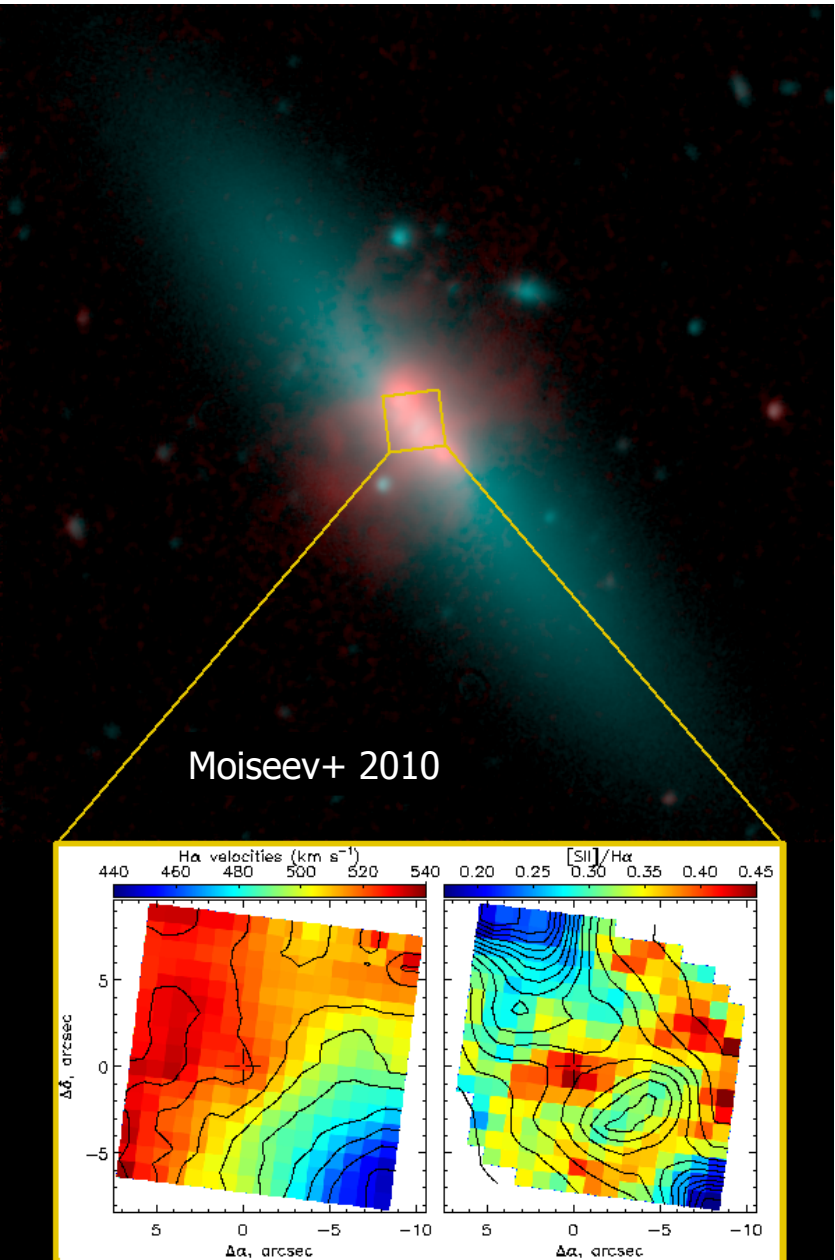
HI (VLA) and H II (Ha, FPI) :
re-estimation ages of the bubbles (HI: 5.3-5.6 H II: 0.6-2.2 Myr)
comparison with SF models
(Lozinskaya+ 03 05; Silich+06)

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

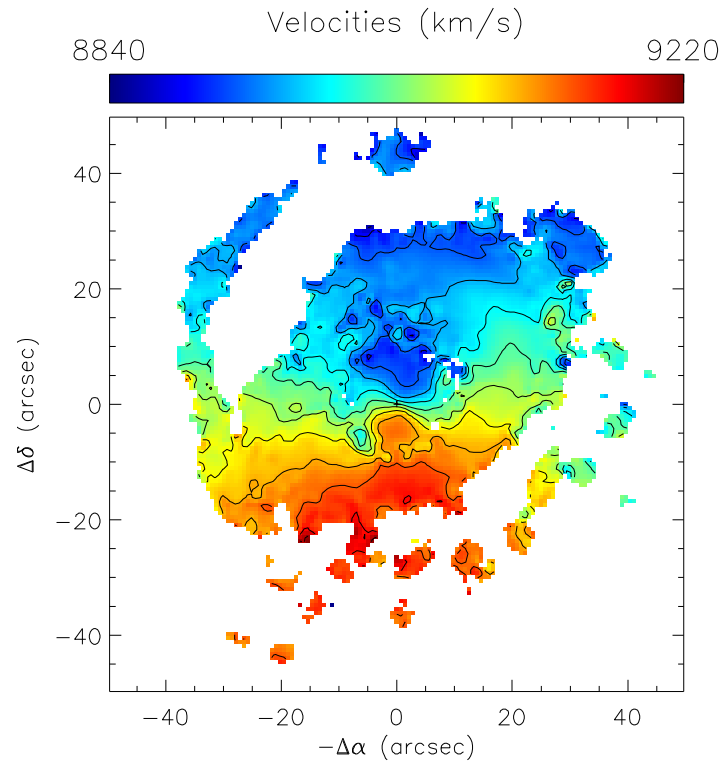
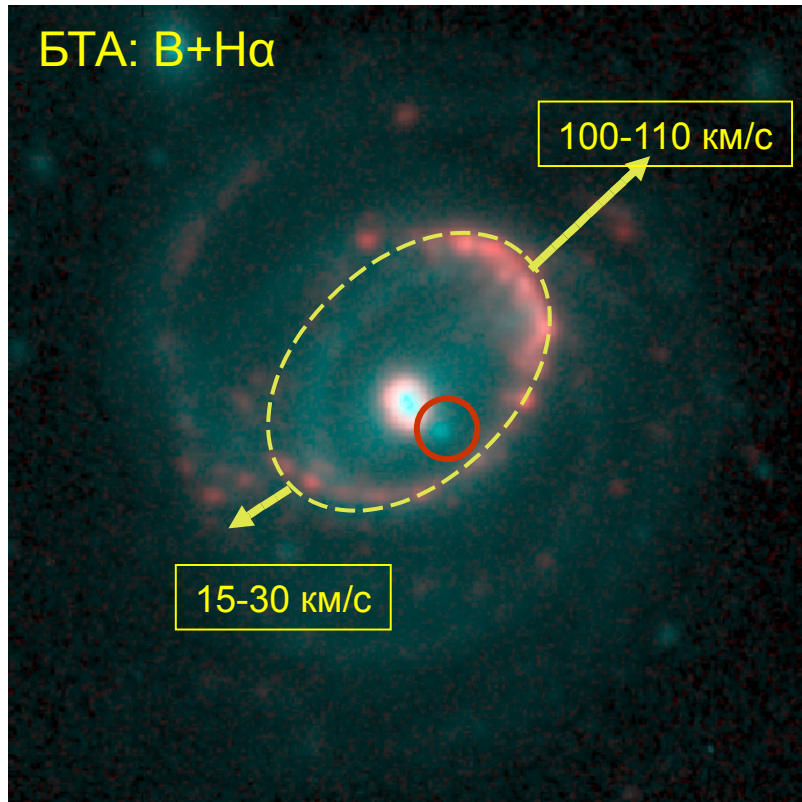
Galactic wind in NGC 4460



SFR=0.3 Mo/yr
 V(outflow)~30-80 km/s

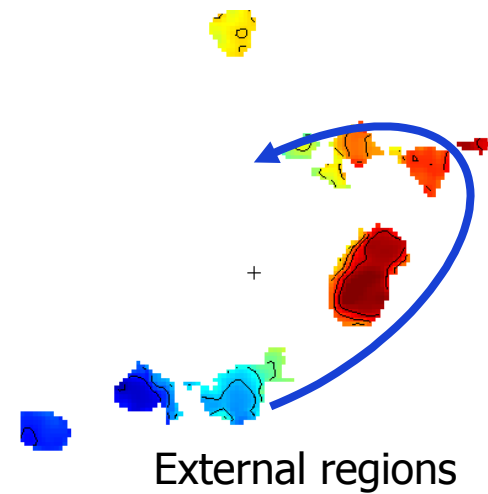
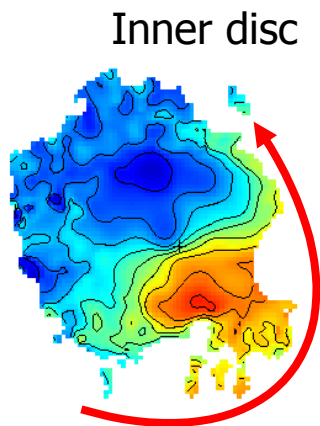
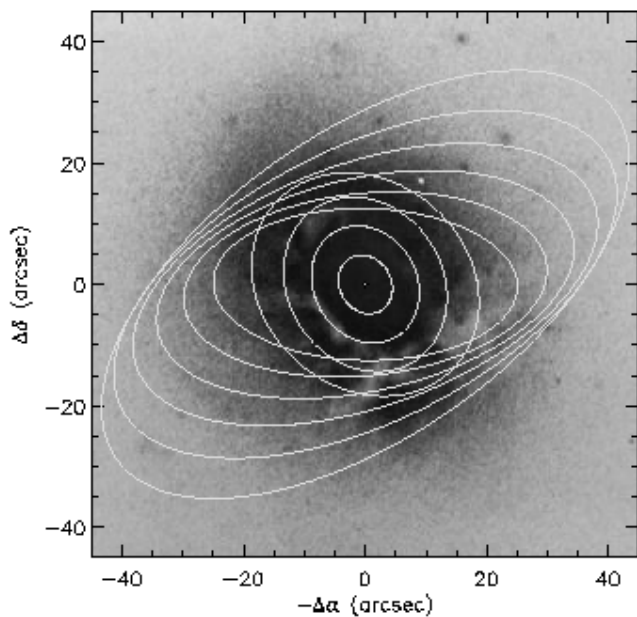
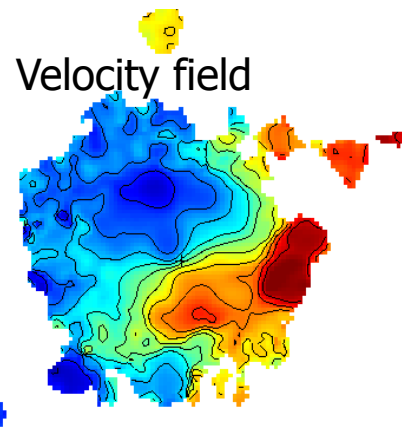
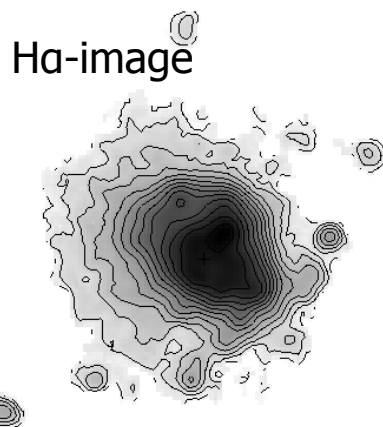
Опарин, Моисеев (2015)

Галактика Arp 10



Размеры колец, скорость расширения внешнего кольца и радиальный профиль распределения круговых скоростей воспроизводятся в модели столкновения со спутником, произошедшим около 85 млн. лет назад. (Bizyaev, Moiseev, Vorobyov, 2007)

Arp 212: disc- polar ring interaction



Moiseev (2008)

Литература

- 1) Моисеев А.В. «Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо», 2001, Bull SAO, 54, p. 74
- 2) Моисеев А.В., Егоров О.В. «Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. II Дополнительные процедуры», 2008, Астро. Бюлл., 63, 193
- 3) Моисеев А.В. «Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. III Уточнение шкалы длин волн», 2015, Астро. Бюлл, 70, 524