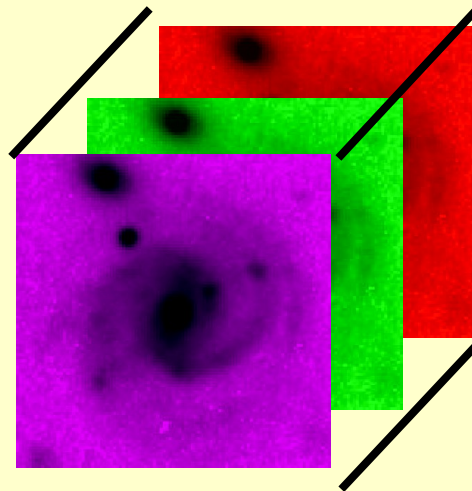
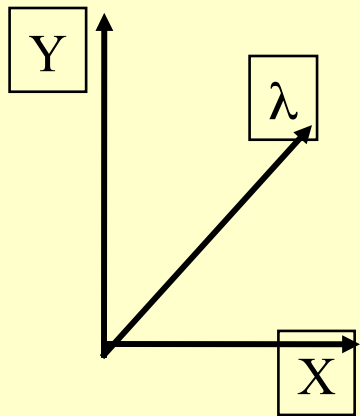


Методы панорамной спектроскопии

Лекция 5.

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо. Методы визуализации кубов данных. Перенастраиваемый фильтр.
Приборы: CIGALE, SCORPIO/IFP, TTF.

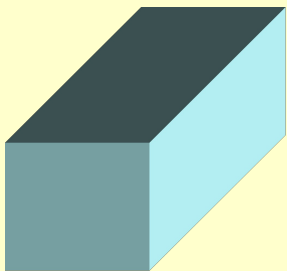
Куб данных



Длинная щель



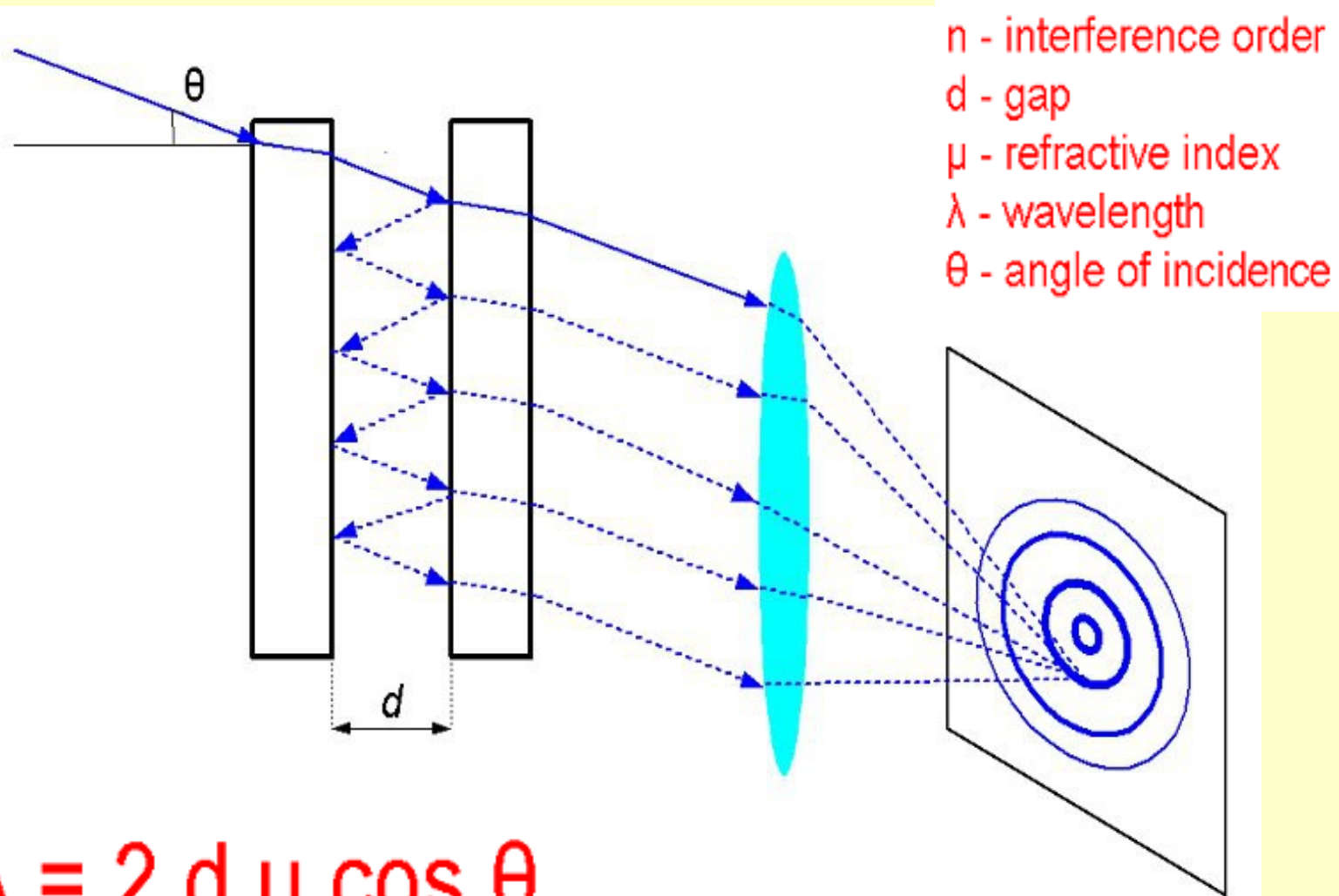
Спектрографы
Интегрального
поля



Интерферометр Фабри-Перо

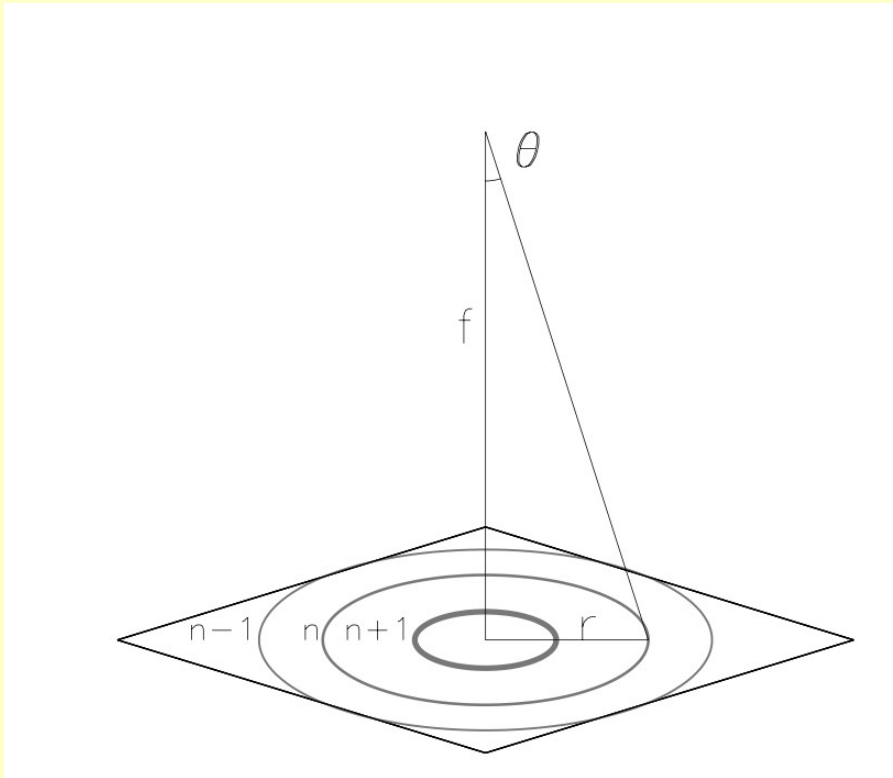


Интерферометр Фабри-Перо



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

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:

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

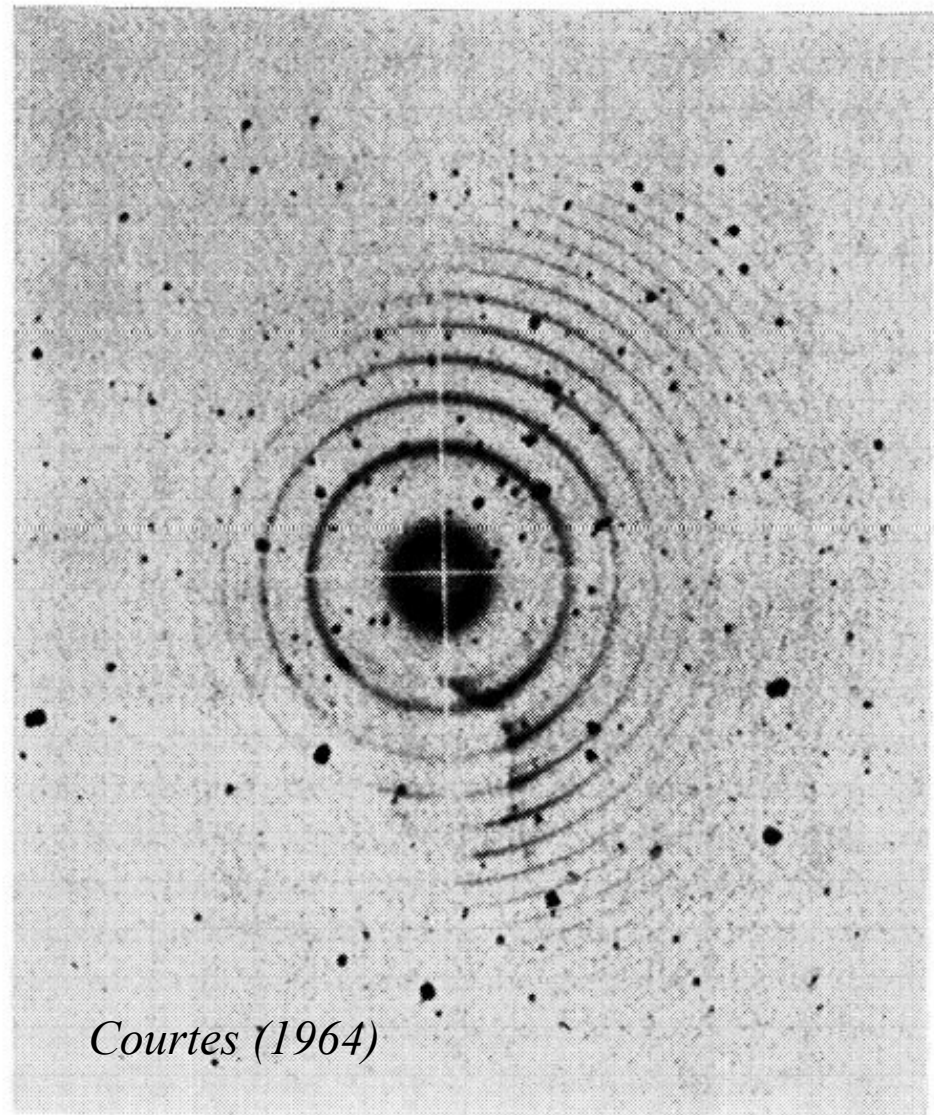
На одном кадре смешаны пространственные и спектральные координаты!

Первые наблюдения



λ_{3728}

Buisson, Fabry, & Bourget (1914).

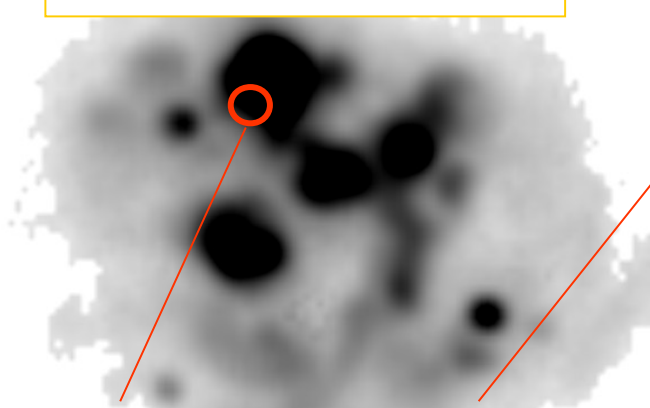


Courtes (1964)

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.

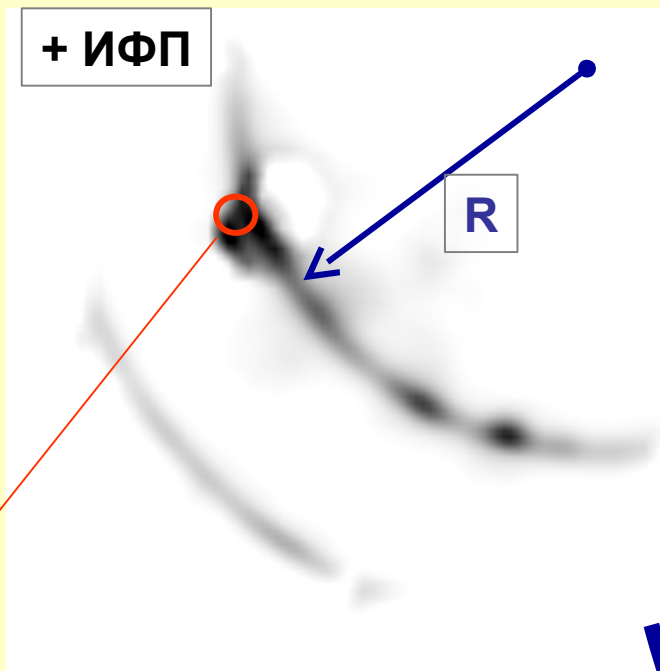
Одиночная интерферограмма

Изображение в
эмиссионной линии

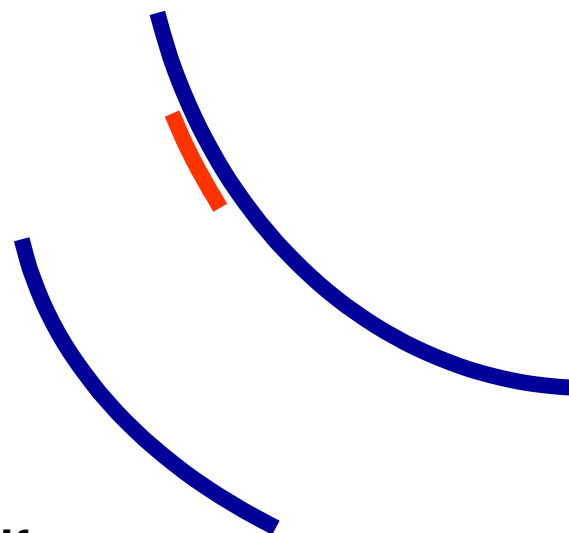


Кинематически
выделенная область

+ ИФП

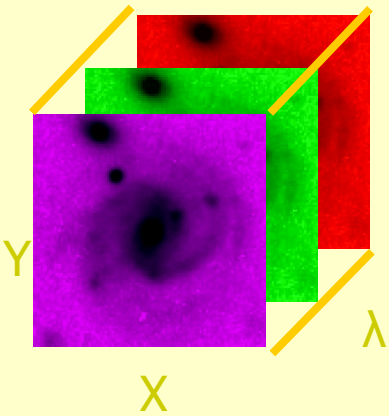


радиус =>
длина волны
=> скорость

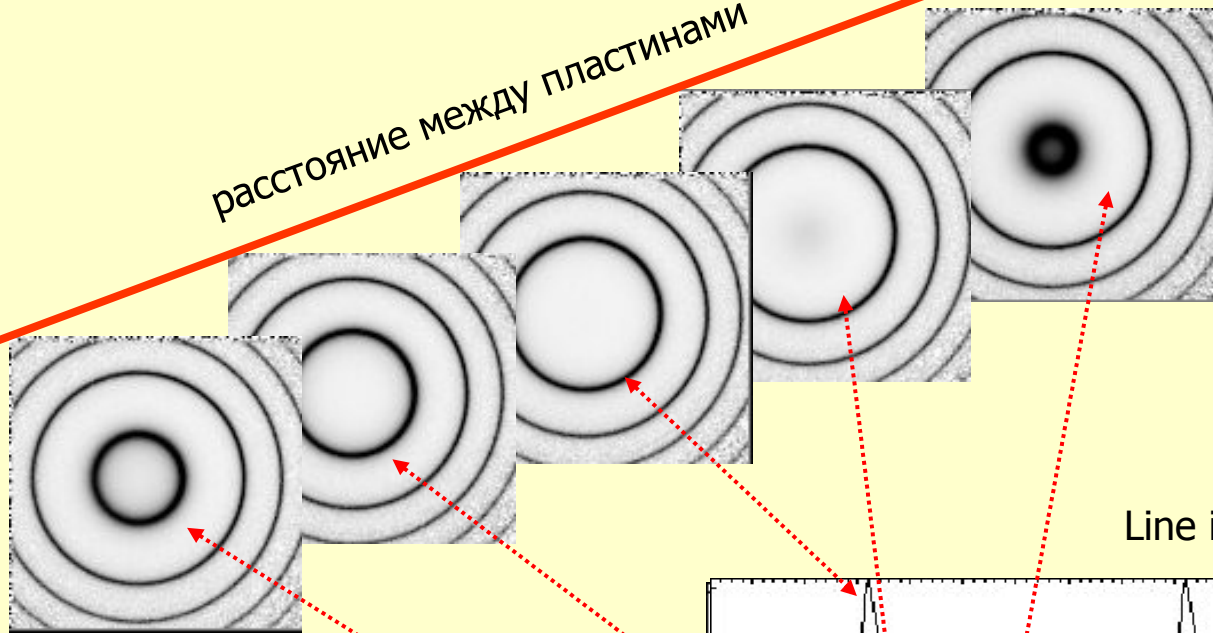


Карта лучевых скоростей

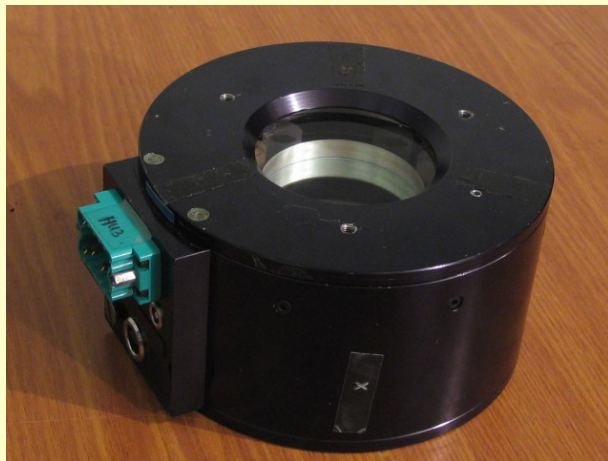
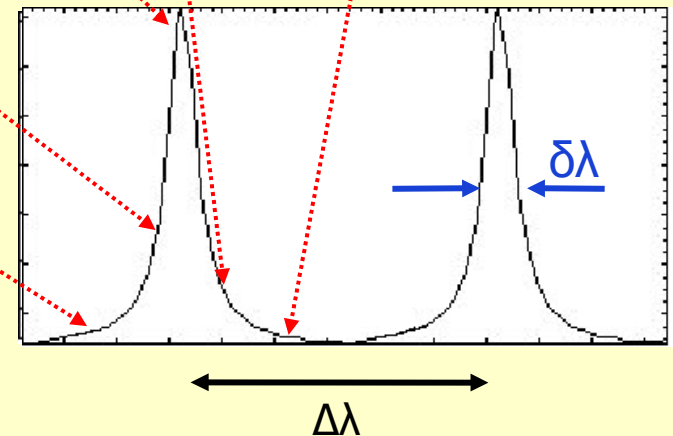
Сканирующий Интерферометр Фабри-Перо



расстояние между пластинами



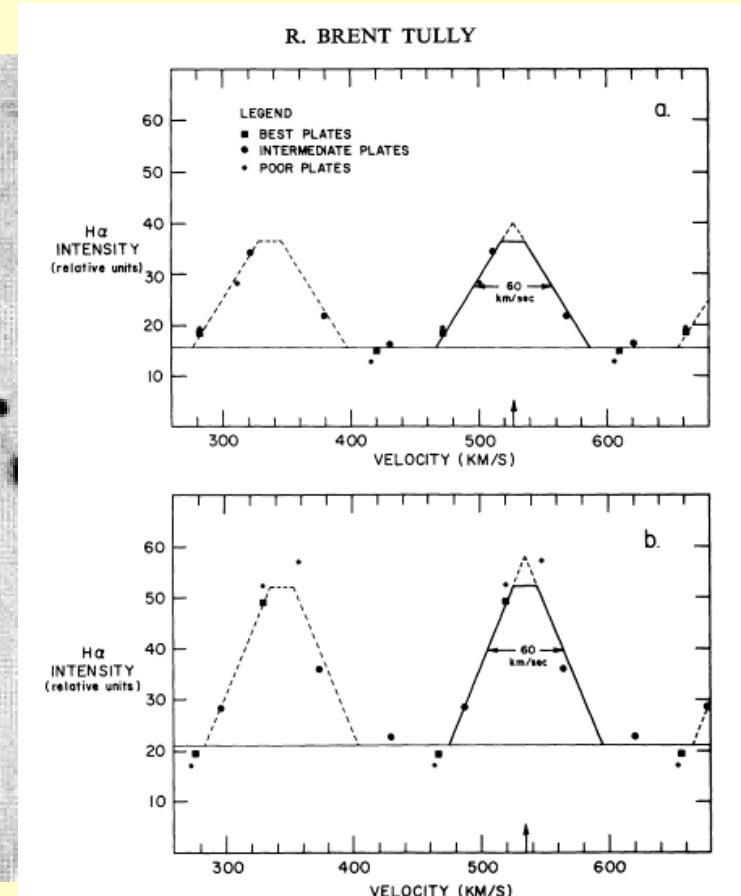
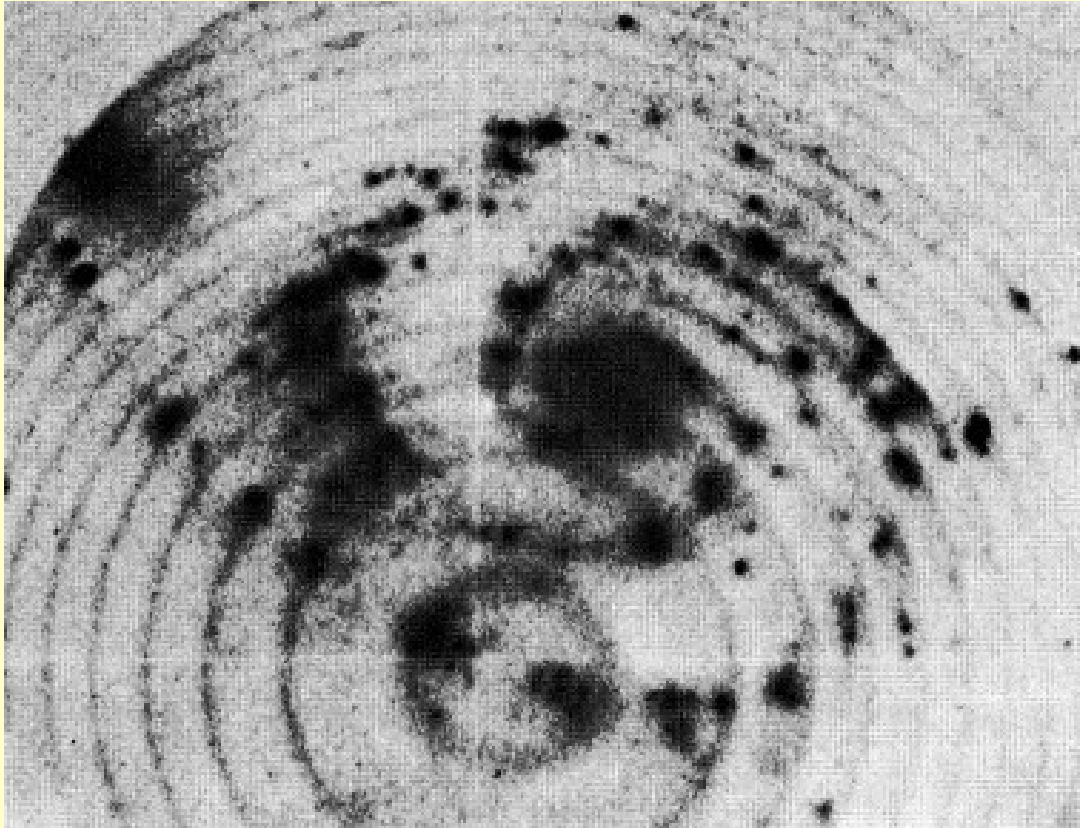
Line intensity



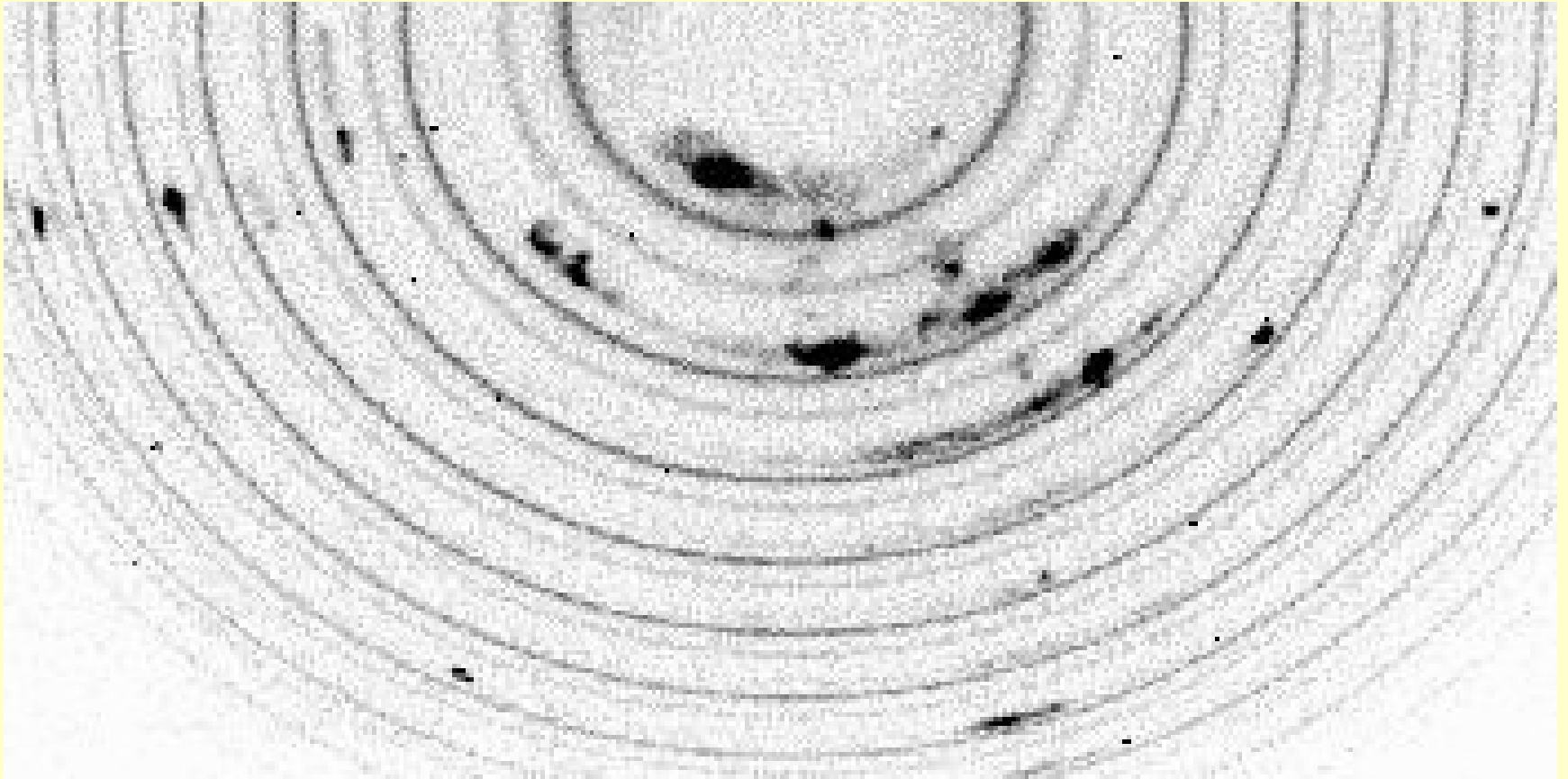
Пьезоэлектрический ИФП ET-50
Queensgate Inc. (IC Optical System Inc.)

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

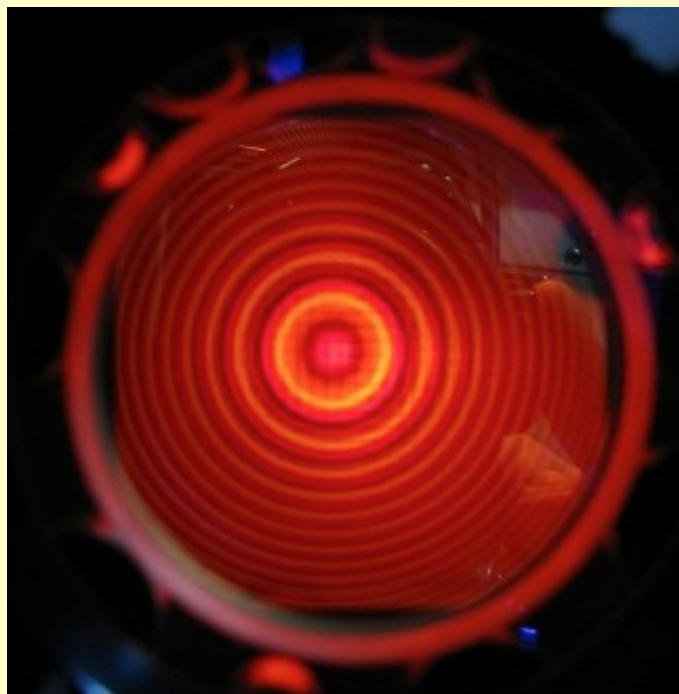
Первый куб данных с ИФП — M51 (Tully, 1974)



IC2976: SCORPIO-2



ИФП на SCORPIO-2: установка и настройка



Настройка — глазом по неонке



Аппаратный контур интерферометра

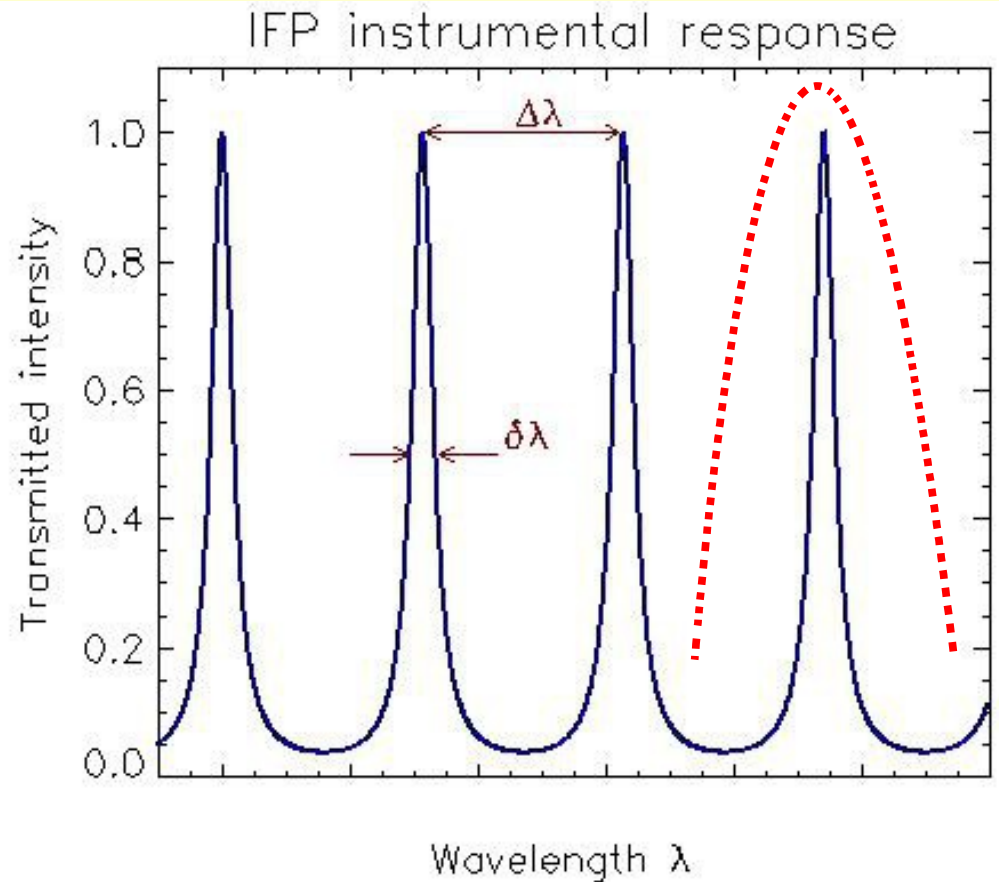
Свободный спектральный диапазон:

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

$d\lambda$ - 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)

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

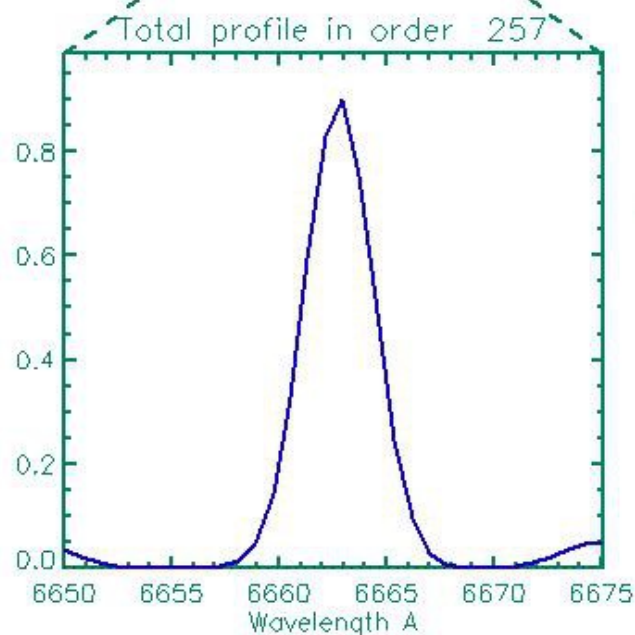
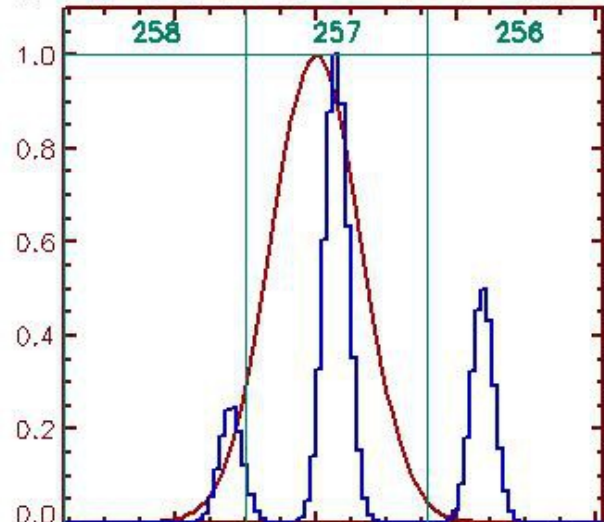
Решетка классического спектрографа: $n=1..3$, $N>1000$

Эшеле спектрограф: $n=10...50$, $N>1000$

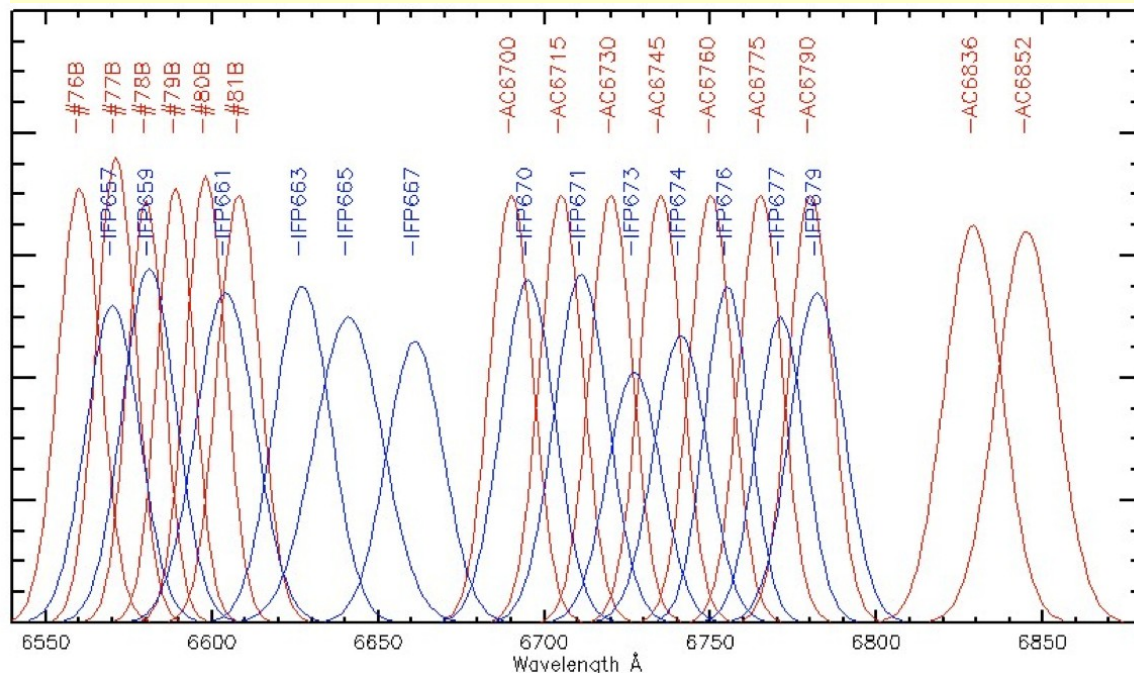
Интерферометр Фабри-Перо: $n=100...10000$, $N=10...100$

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)

Проблема наблюдений линий в области Н-альфа

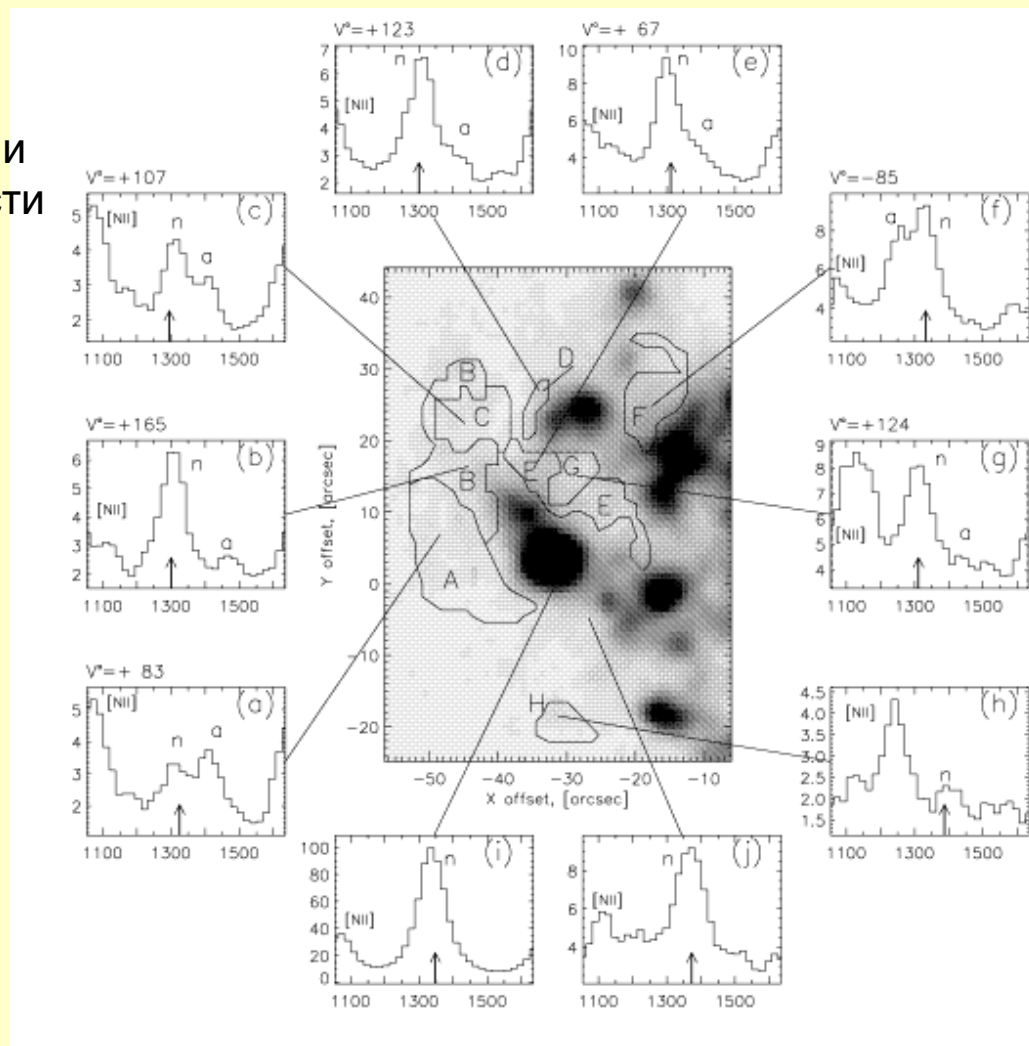
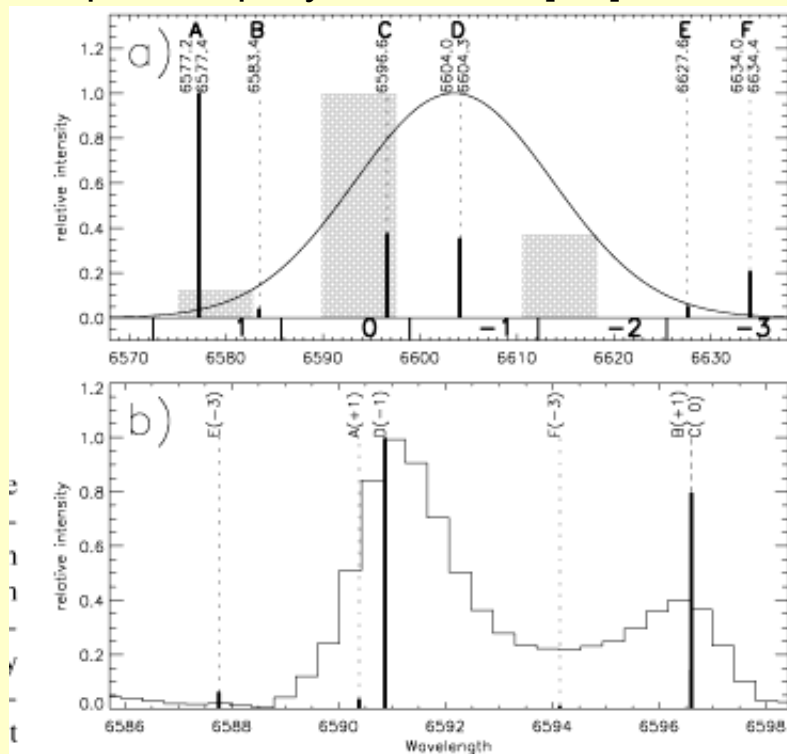
Нет идеального фильтра :(

FWHM < 10-15 Å: дорого, $T < 50\%$

FWHM > 10-15 Å: попадают близкие линии

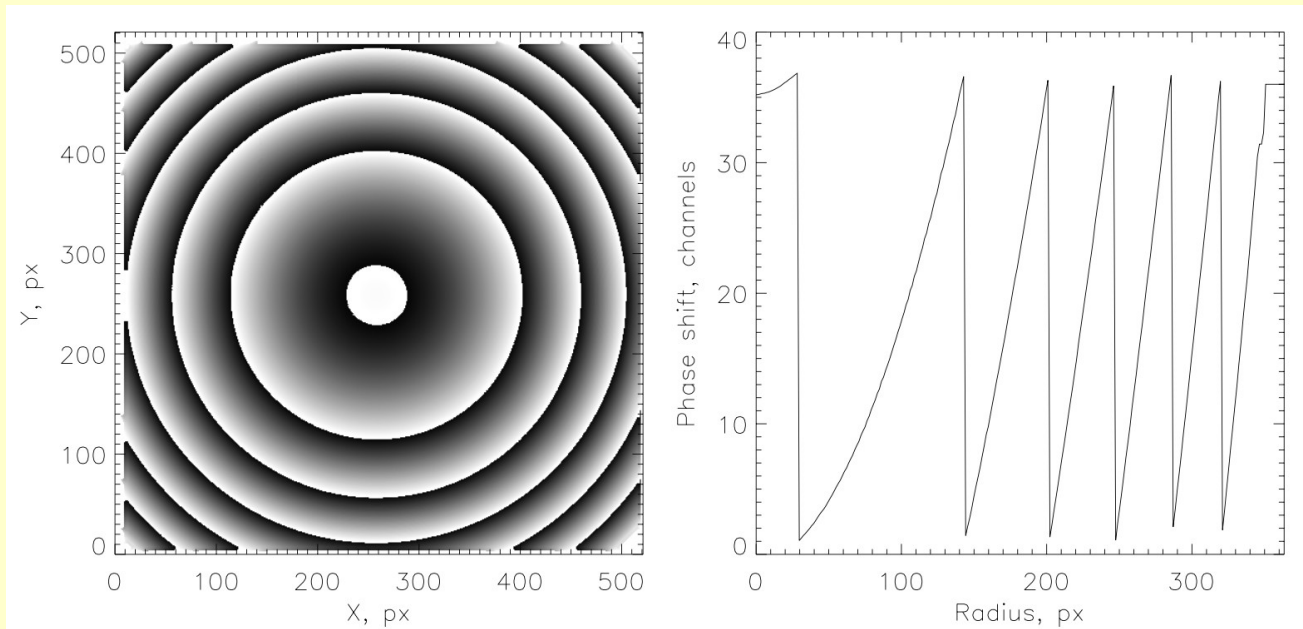
Подбираем n так, чтобы хорошо развести соседние линии $\sim 0.5\Delta\lambda$

Но можно использовать и во благо - измерения сразу и в $H\alpha$ и в $[NII]$!

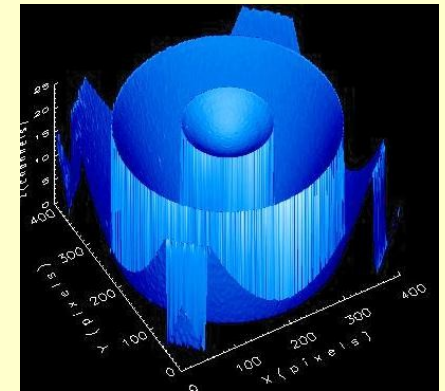


(Moiseev 2000)

Обработка данных: шкала длин волн, фазовая карта



Положение центра калибровочной линии.



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

$$B = \frac{A}{n n_z}$$

где n_z – 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:

$$z(r) \cong \frac{n}{B} \lambda + \frac{A}{2Bf^2} r^2 - \frac{A}{B}$$

← квадратичное изменение радиуса колец

Обработка данных: аппаратный контур

Функция Эйри

Лучшая аппроксимация (из простых функций) — профиль Лоренца

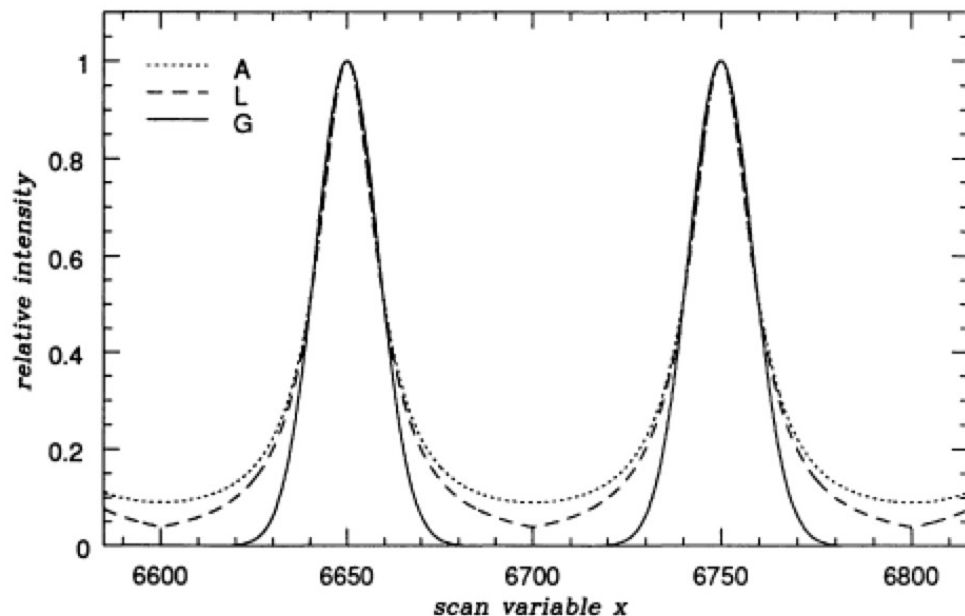


Figure 2. Three cyclic functions listed in Table 1 (column 2) shown at low finesse to emphasize their differences.

	$f(x)$
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 - наблюдаем профиль Фойгта

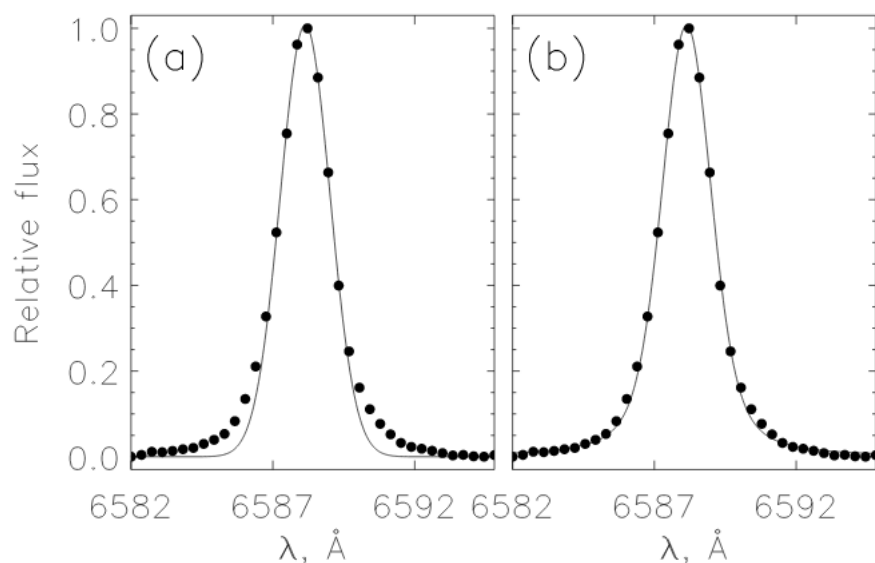


Рис. 4. Пример профиля спектральной линии H α в галактике II Zw 70 по наблюдениям с IFP501 (точки). Линией показана аппроксимация функцией Гаусса (a) и профилем Фойгта (b).

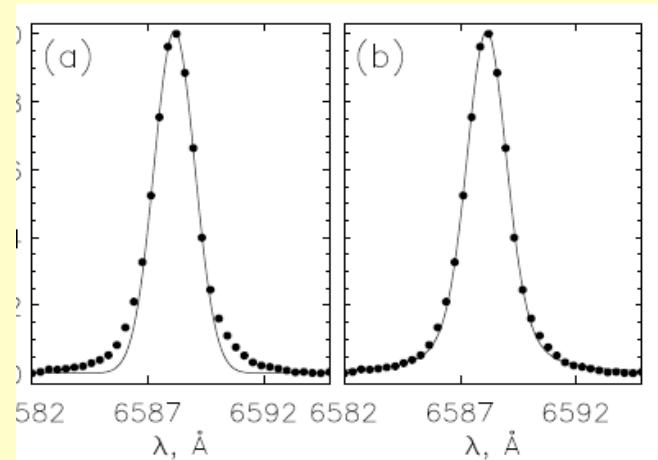
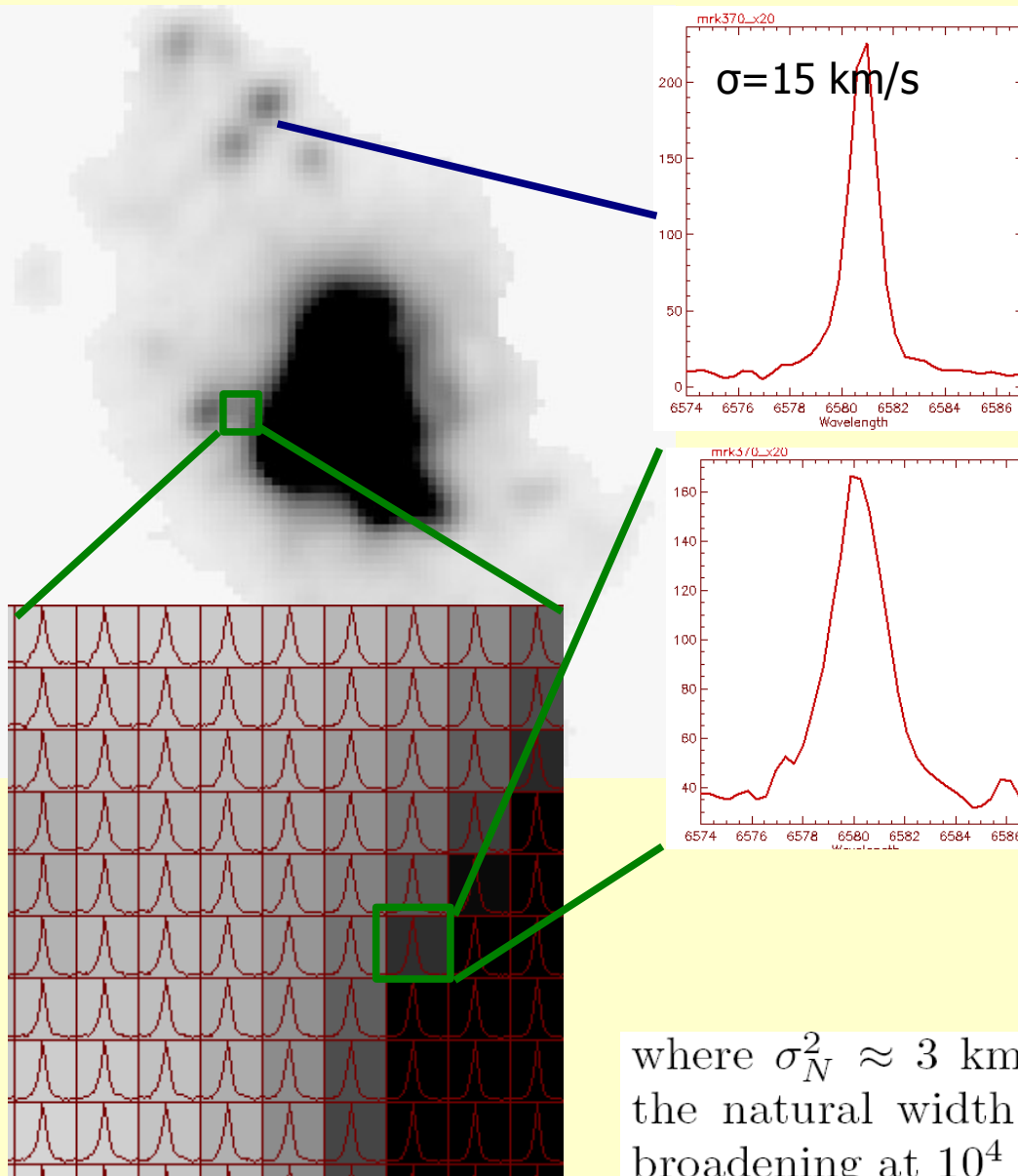
шением (4), то наблюдаемый профиль является сверткой профилей Гаусса и Лоренца, т. е. задается функцией Фойгта (Voigt):

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

где

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

Измерение дисперсии скоростей газа

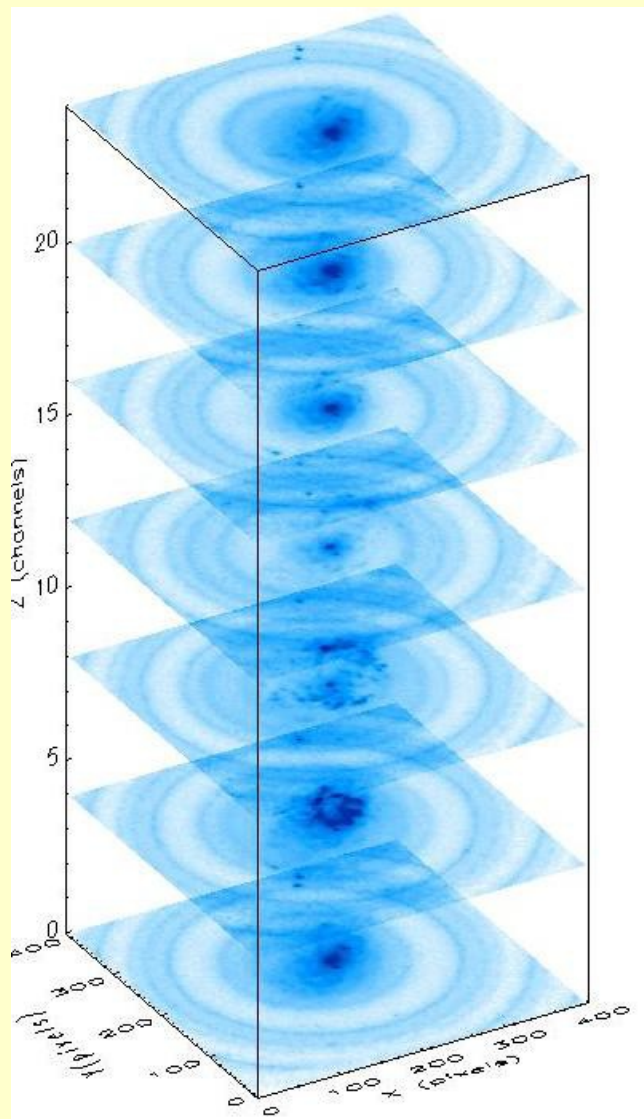


$$\sigma_{real}^2 = \sigma_{gas}^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{tr}^2$$

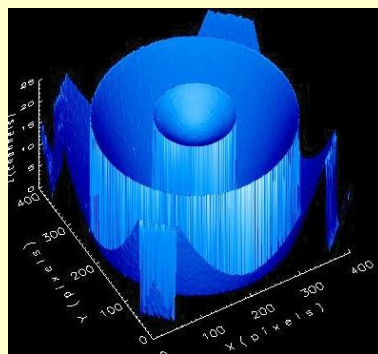
where $\sigma_N^2 \approx 3$ km/s and $\sigma_{tr}^2 \approx 9.1$ km/s correspond to the natural width of the emission line and its thermal broadening at 10^4 K, respectively.

Куб данных, полученный с ИФП

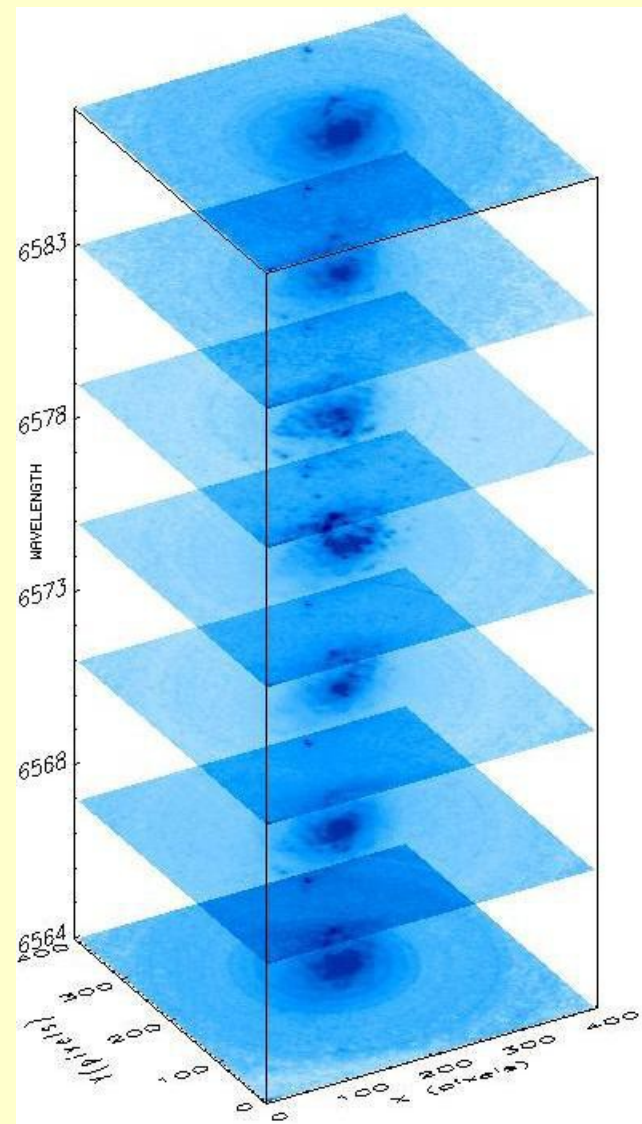
Z=channels



обработка



Z=Wavelength



Методика обработки зависит от типа детектора

Счетчик фотонов (IPCS= Image Photon Counting System)

- QE = 5-20%
- + Время считывания $T \sim 0$
- + нет шума считывания
- + Усреднение вариаций яркости линий неба, seeing и атмосферной прозрачности многократным повторением циклов сканирования (~ 20 с/канал)
- Требуется делать отдельный прибор, так как для других типов наблюдений предпочтительнее ПЗС.

ПЗС-матрица (CCD)

- + QE > 80-90%
- + линейность, динамич. диапазон
- Время считывания: десятки секунд
- шум считывания 2-3 ϵ
- один цикл сканирования, 100-300 с/канал
- сложнее обработка (вычитание неба, фотометрическая коррекция)
- требуется больше площадь для вычитания неба
- + Установка в многорежимном редукторе светосилы

CIGALE = "Cinematique des Galaxies"

J. Boulesteix + 1984

И система зашагала по телескопам:

3.6-m CFHT

1.5-m ESO

6-m BTA +KVANT(!)

TAURUS (Taylor & Atherthon 1980)

TAURUS-2 (WHT 4.2m, AAO 3.6m)

PUMA (OAN 2.1m)

SCORPIO (BTA 6m)

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

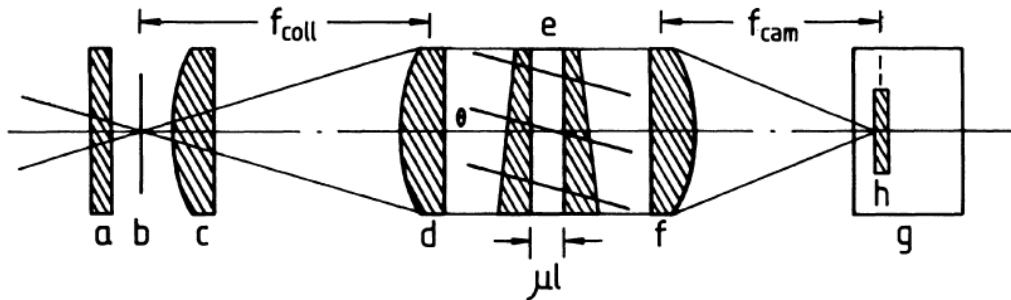
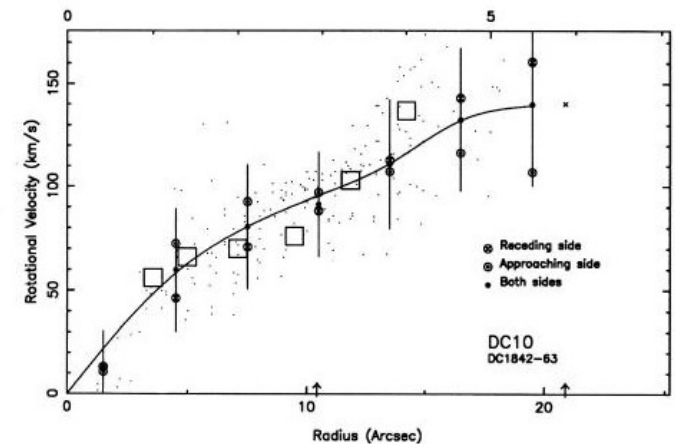
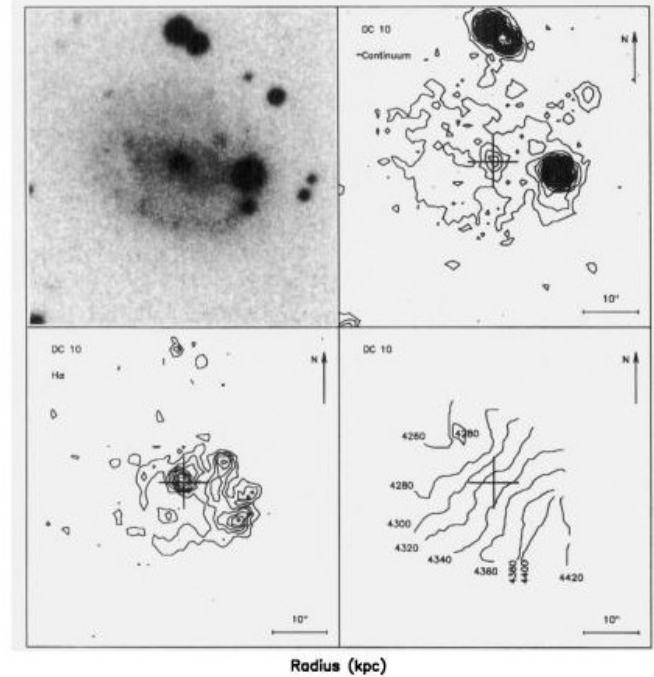


FIG. 1. Schematic drawing of an imaging Fabry-Perot interferometer comprising (a) interference filter, (b) focal plane, (c) field lens, (d) collimator lens, (e) Fabry-Perot etalon, (f) camera lens, (g) Dewar housing, (h) CCD.



GHaFaS: Galaxy Halpha Fabry-Perot Spectrometer

3th-generation (IPCS), QE=23%

GaAs фотокатод + микроканальная пластина

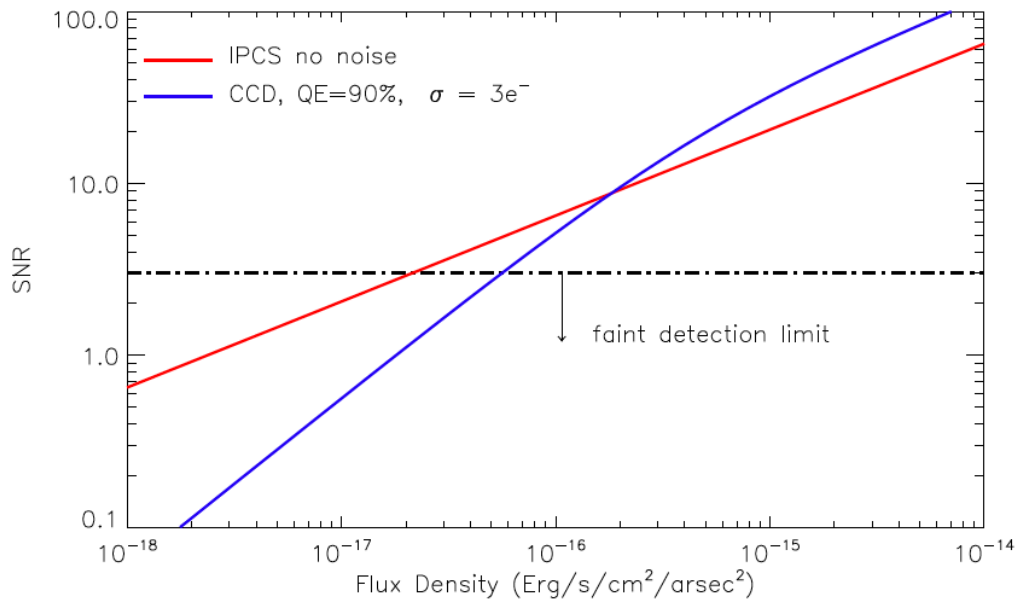
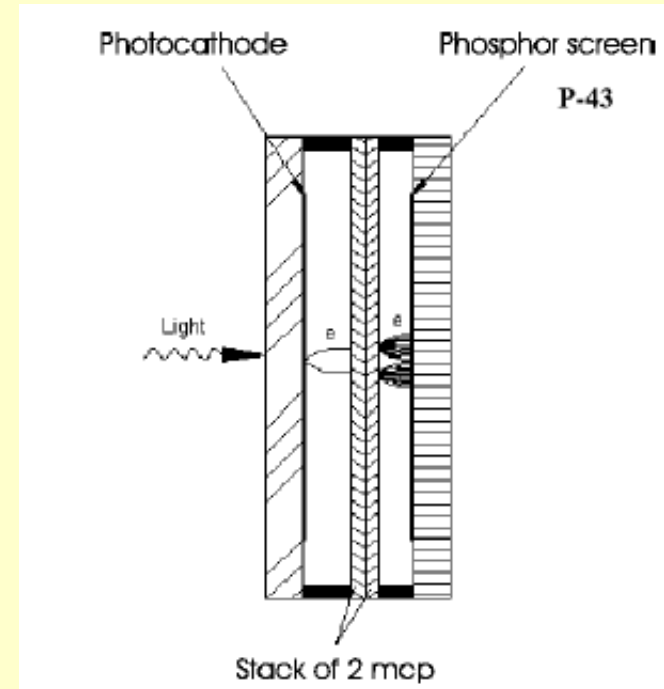


Fig. 5.— Signal to noise ratio comparison: IPCS and CCD at the WHT. The red line shows the SNR for an IPCS, for a 3 hour exposure of 40 cycles with 48 channels, on a 4.2m telescope with a pixel size of 0.5" assuming a trough-put of the telescope of 80%. The blue line shows the SNR of a scientific grade CCD with a QE of 90% and a readout noise (σ) of $3e^-$ in the same exposure conditions. The faint detection limit is



Выигрыш по сравнению с ПЗС, когда $T(\text{exp}) < T(\text{read-out})$

Gach + 2002

Hernandez + 2008

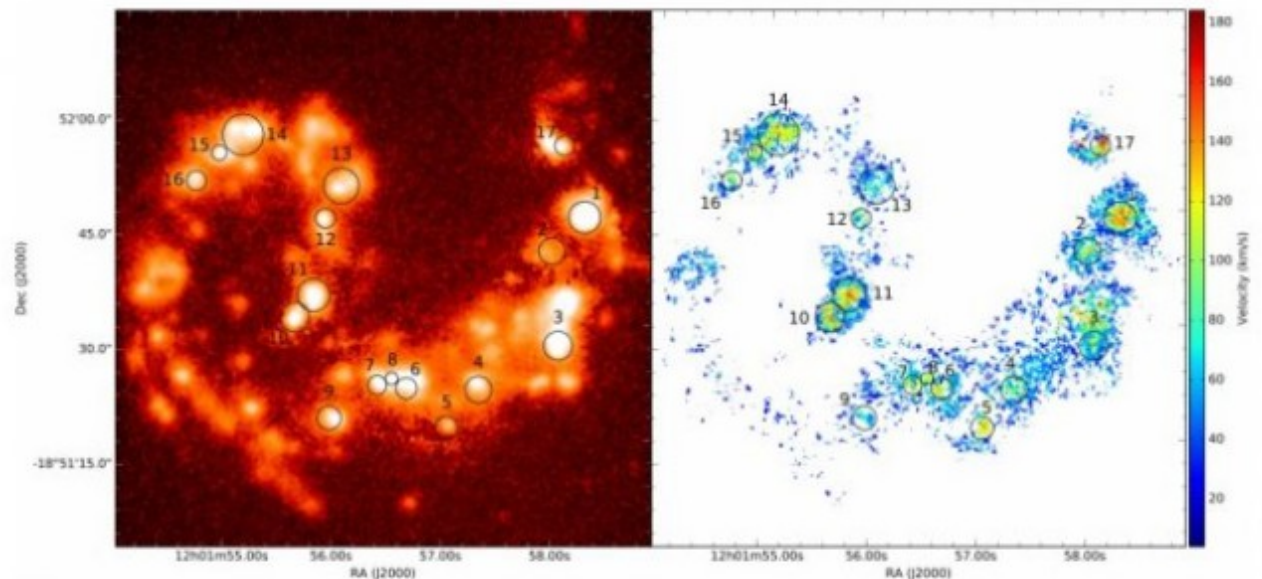
GHaFaS: Galaxy Halpha Fabry-Perot Spectrometer



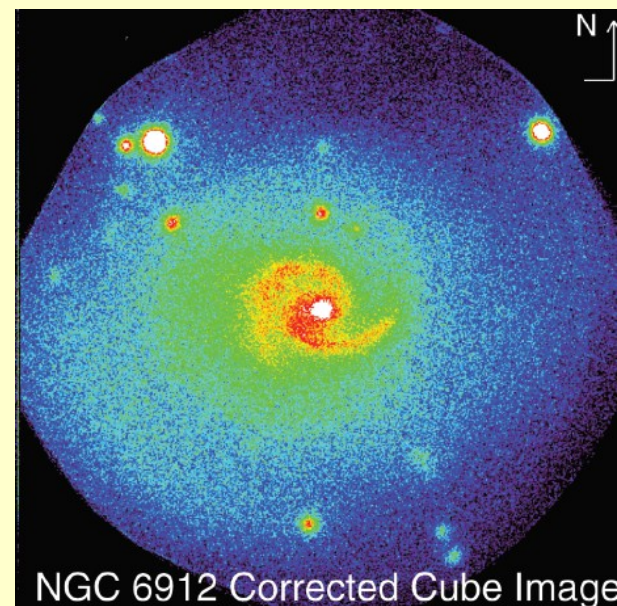
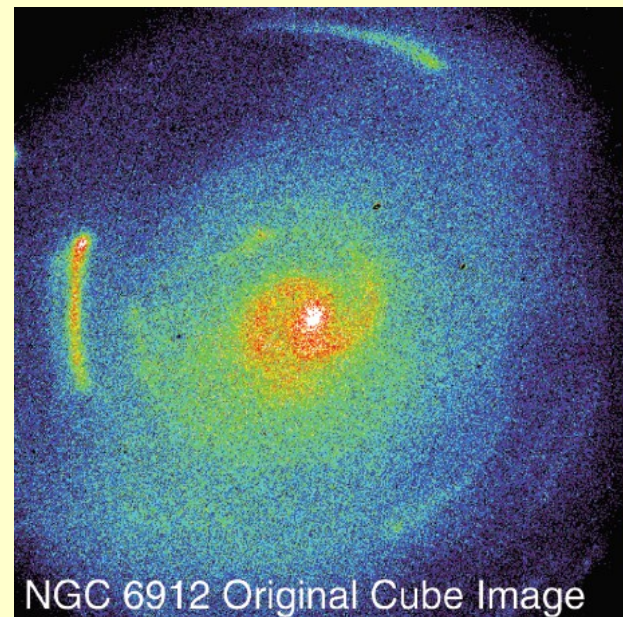
Superbubbles in the interstellar medium

May. 1, 2017

Their detection in the interacting galaxies, the "Antennae", was possible thanks to a new method -BUBBLY- developed by IAC researchers and the GHaFaS instrument installed on the William Herschel Telescope.

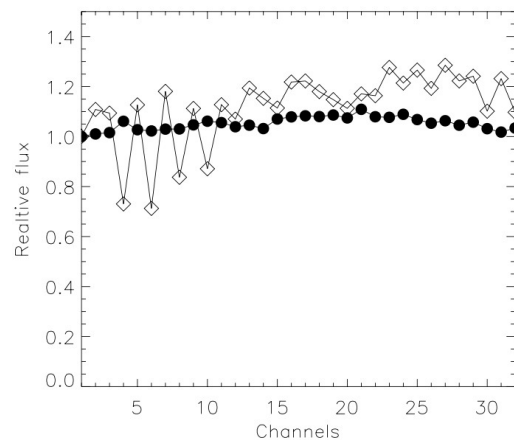
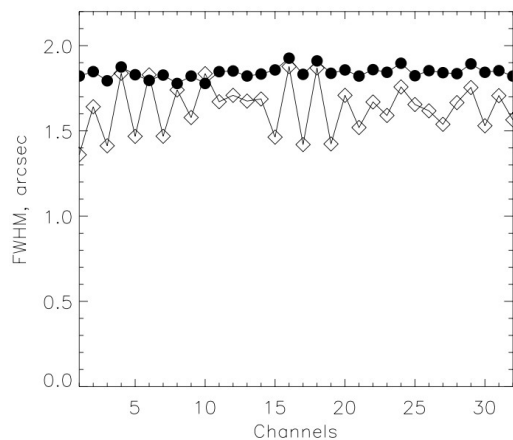
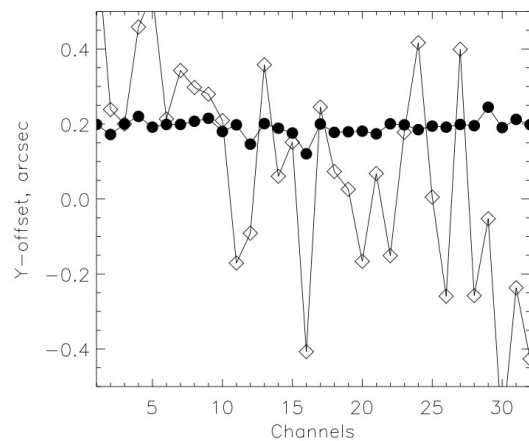
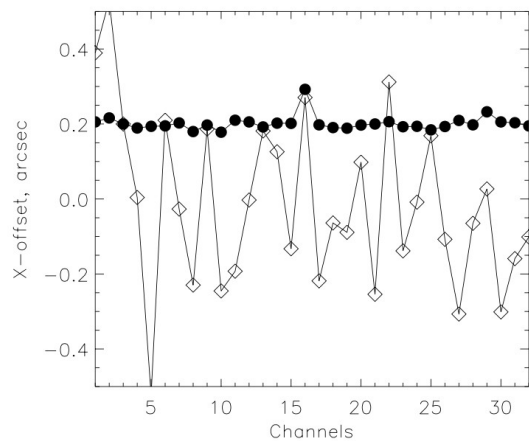


GHaFaS: Galaxy Halpha Fabry-Perot Spectrometer



- Вращение поля:
требуется минимум 2 ярких звезды для “деротации”

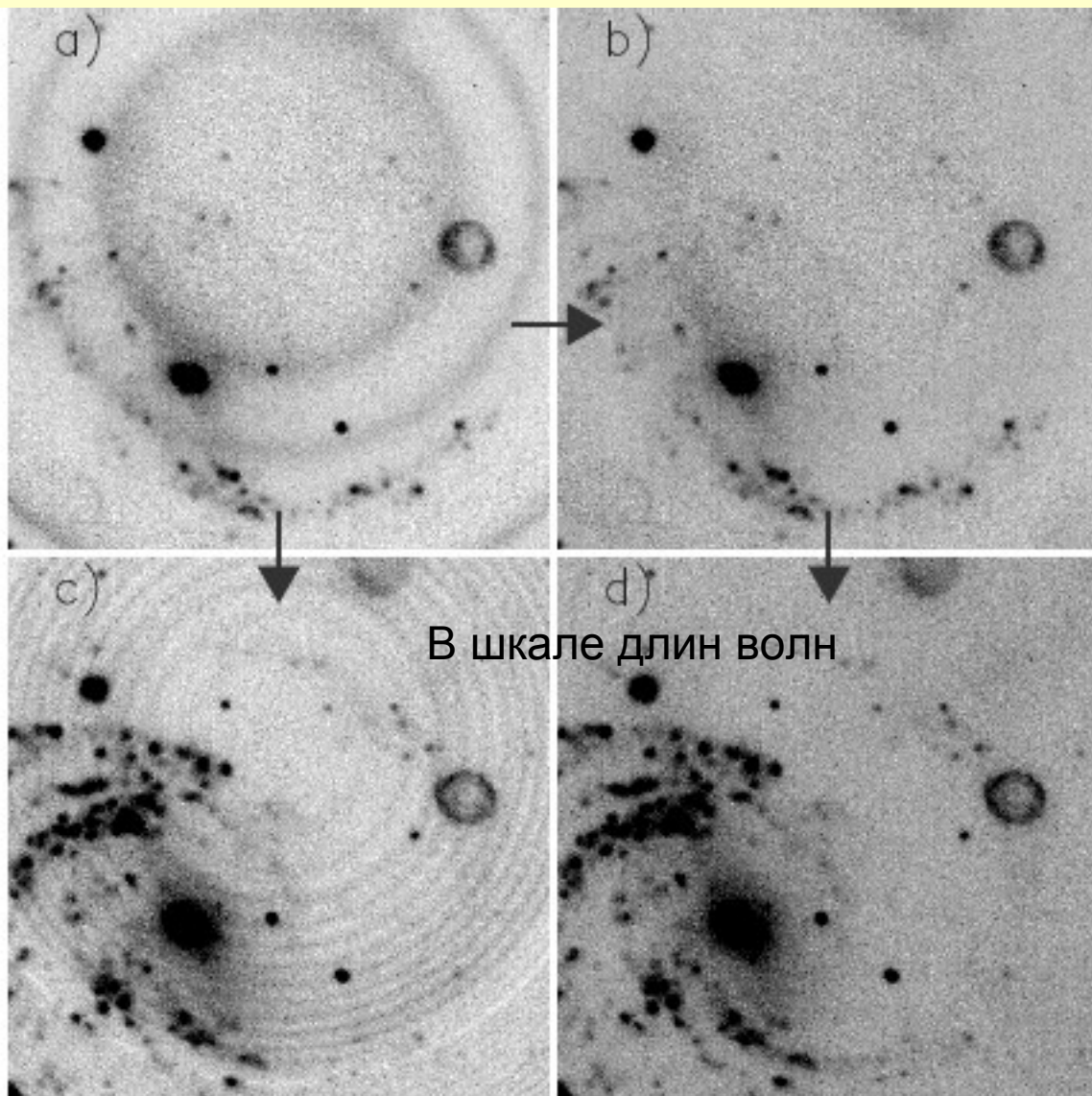
Обработка данных с ПЗС: фотометрическая коррекция



Moiseev (2002)

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

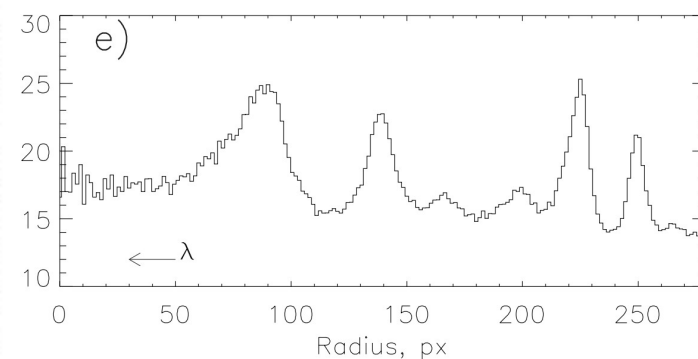
Обработка данных с ПЗС: вычитание фона неба



Вычитание неба в
каждом канале ДО
приведения в шкалу
длин волн

Moiseev (2002)

Радиальный профиль
яркости неба →



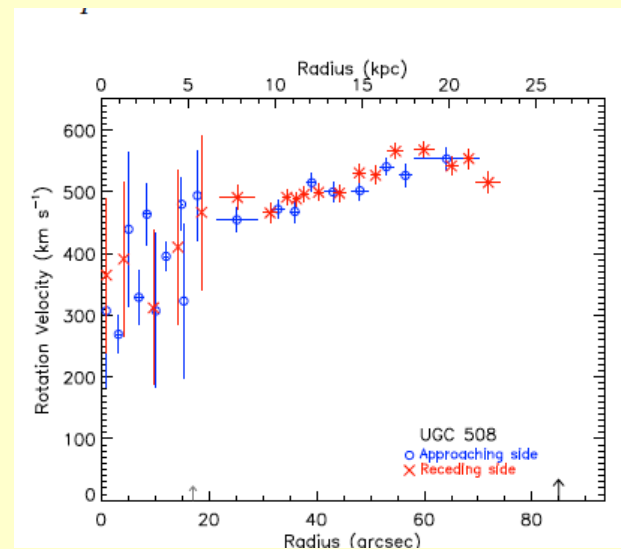
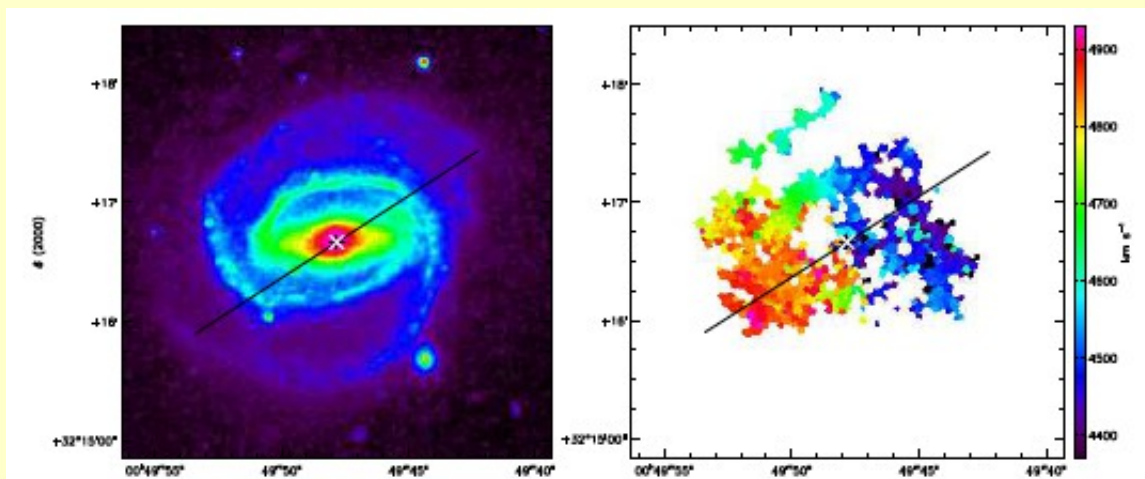
Где это интересно?

Техника считается “сложной”, но обладает рядом преимуществ, в сравнении с другими методами 3D спектроскопии:

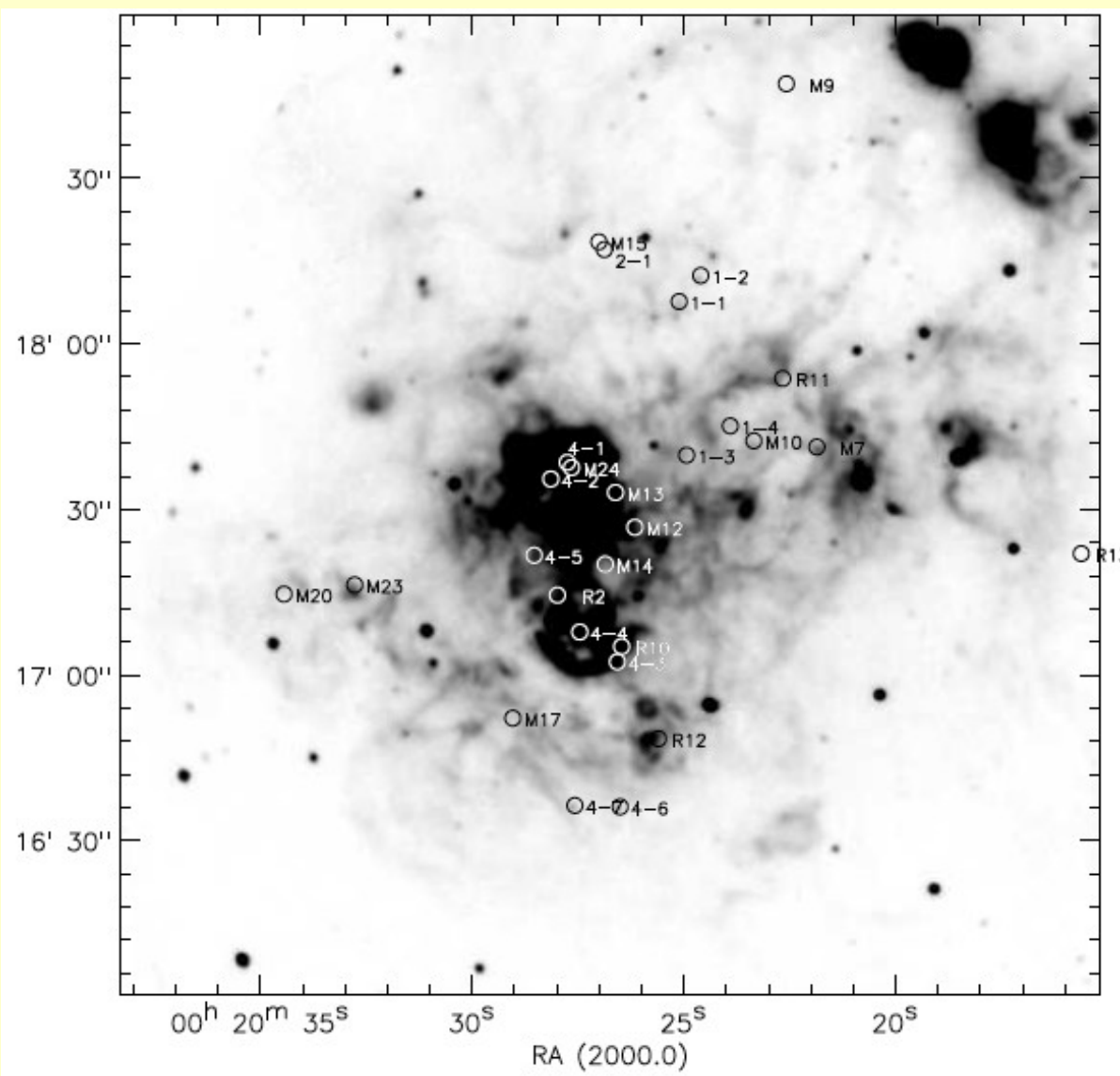
- большое поле зрения: $\text{FOV} > 1 \text{ arcmin}$
- высокое спектральное разрешение: $R > 5000\text{-}10000$
- достаточно измерений в 1-2 эмиссионных линиях

=> Кинематика газа в галактиках и туманностях

GHASP: An H α kinematic survey of 203 spiral and irregular galaxies

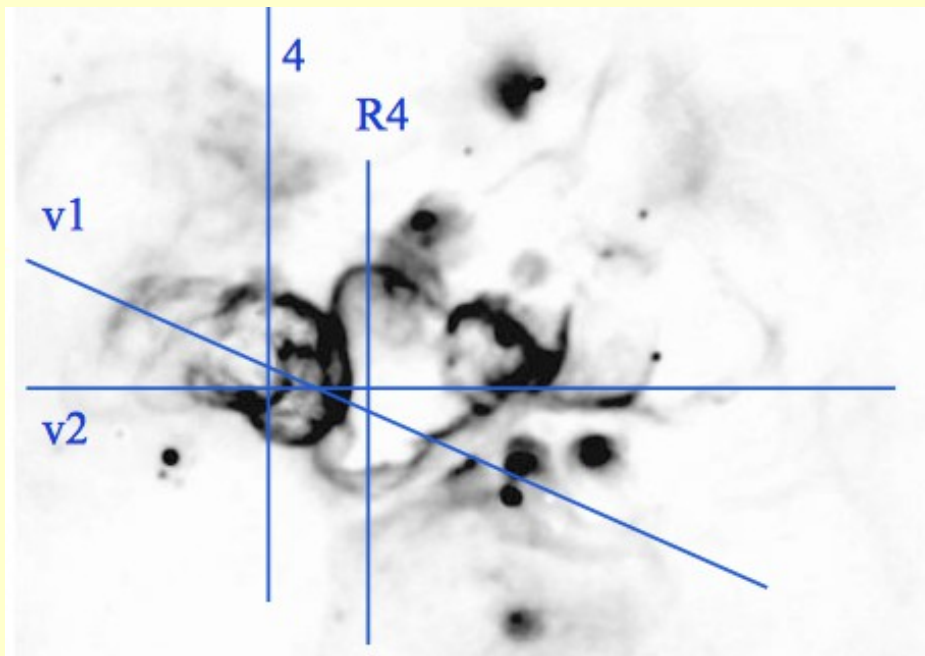


Области звездообразования в IC10

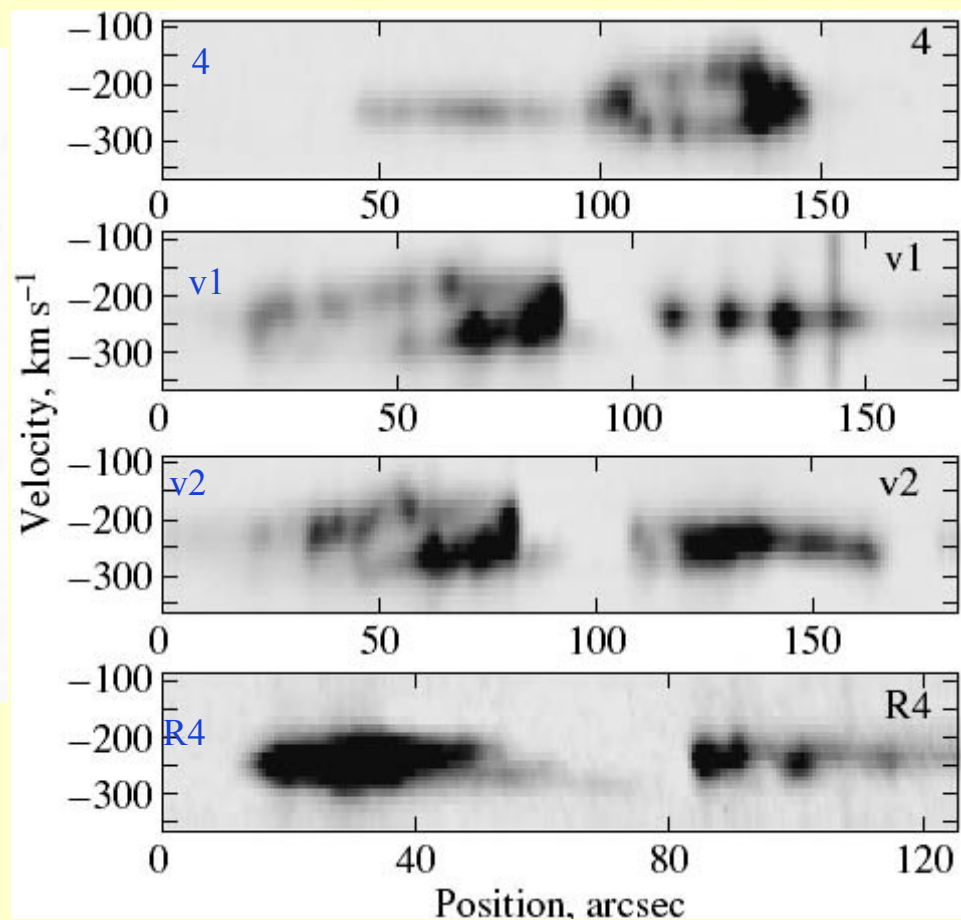


Полный куб:
1024x1024x36
0.35"/px
seeing=1.2"

Способы визуализации куба: PV-диаграммы

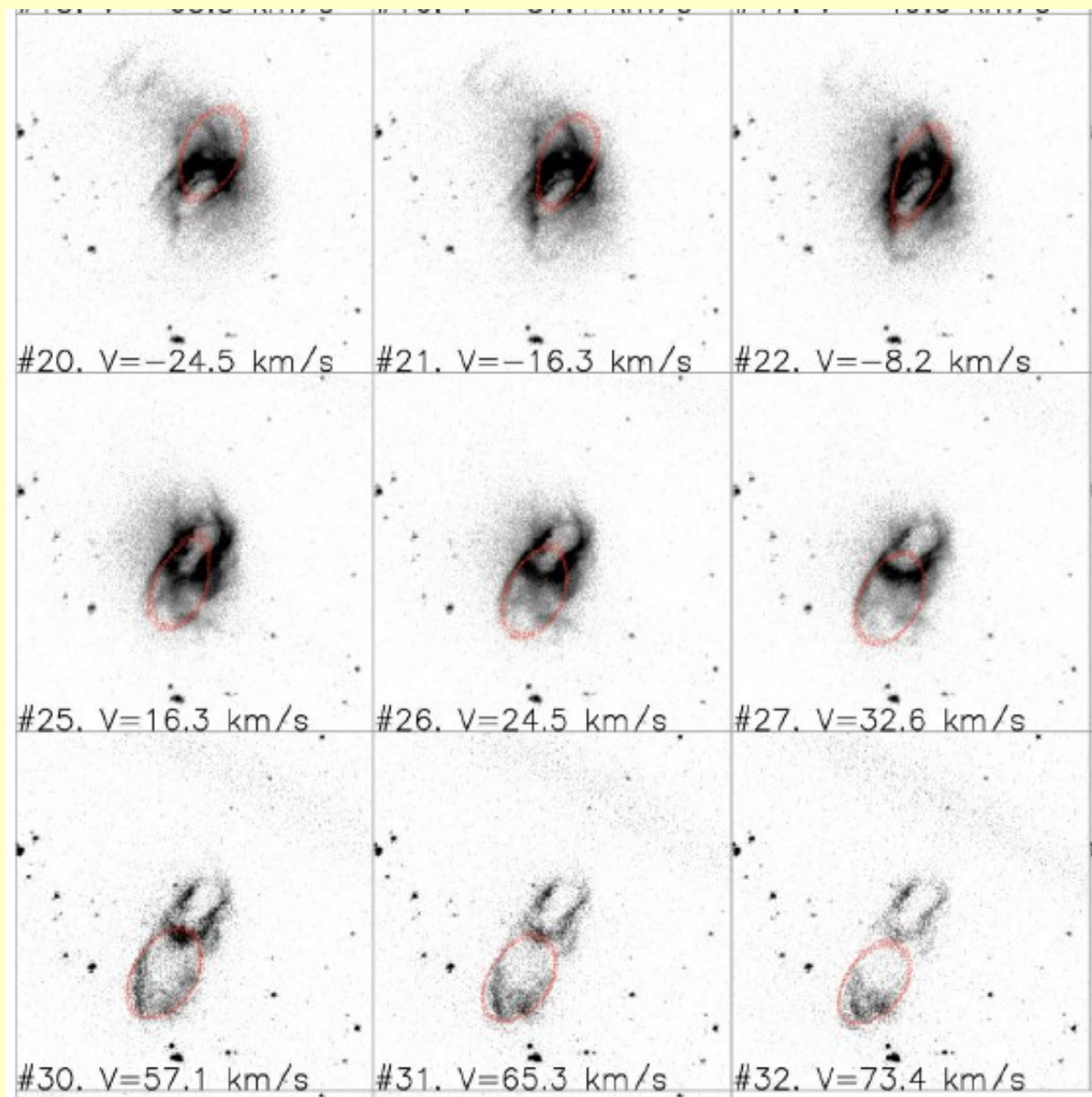
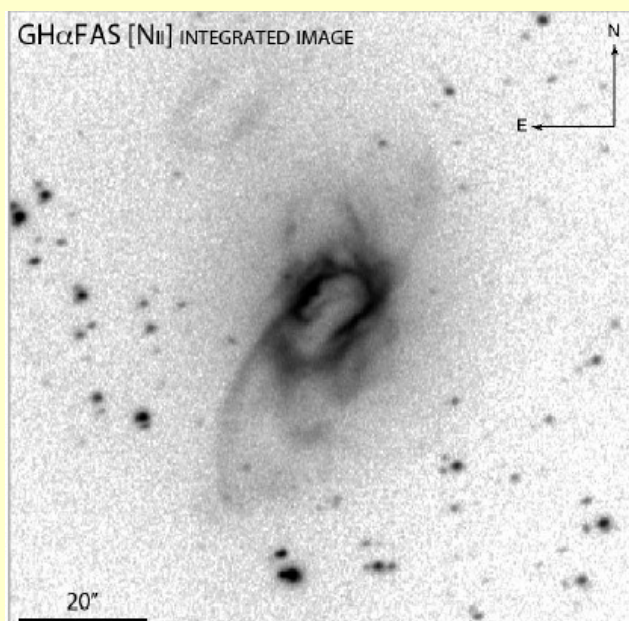


IC1613
Lozinskaya + 2003, 2005

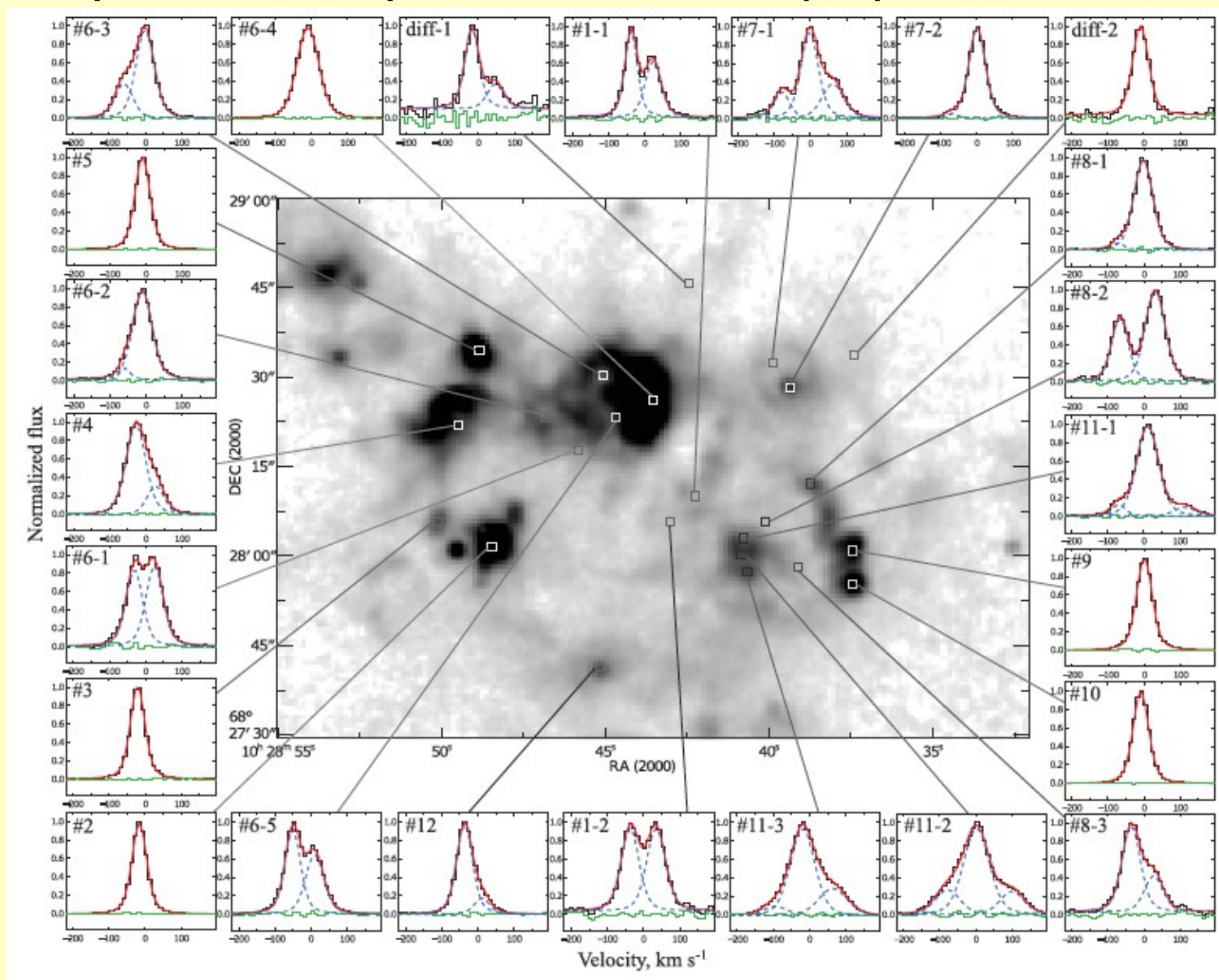


Способы визуализации куба: поканальные карты

Quadrupolar nebula M1-75
(Santander-García + 2010)



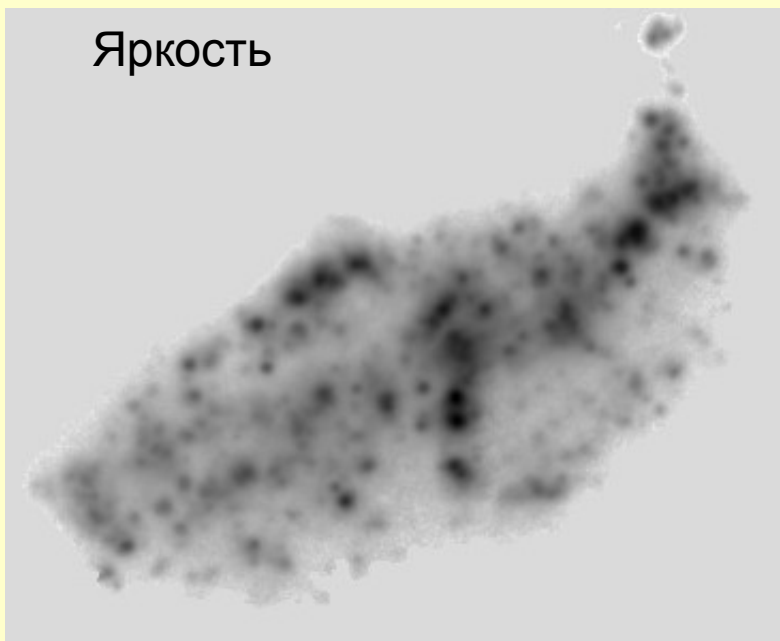
Способы визуализации куба: отдельные профили



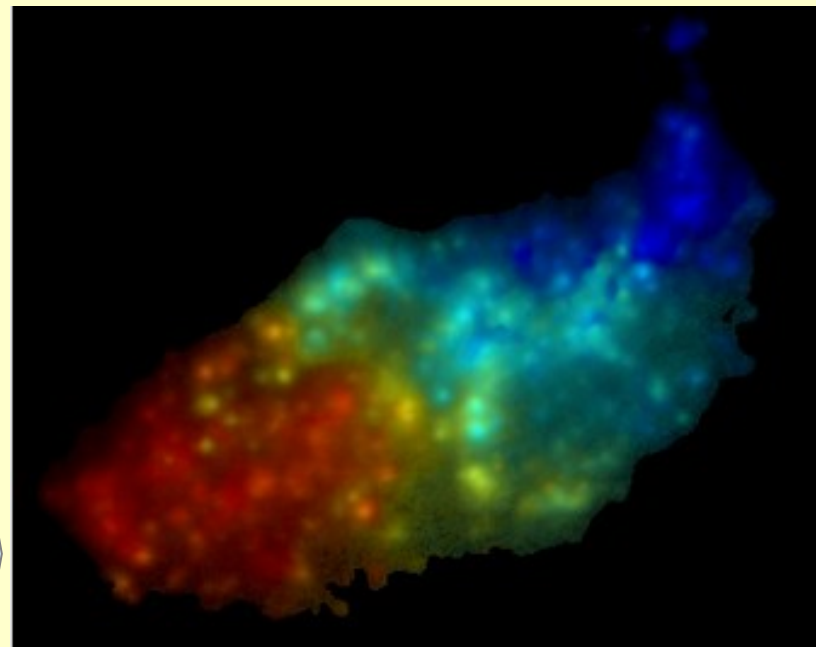
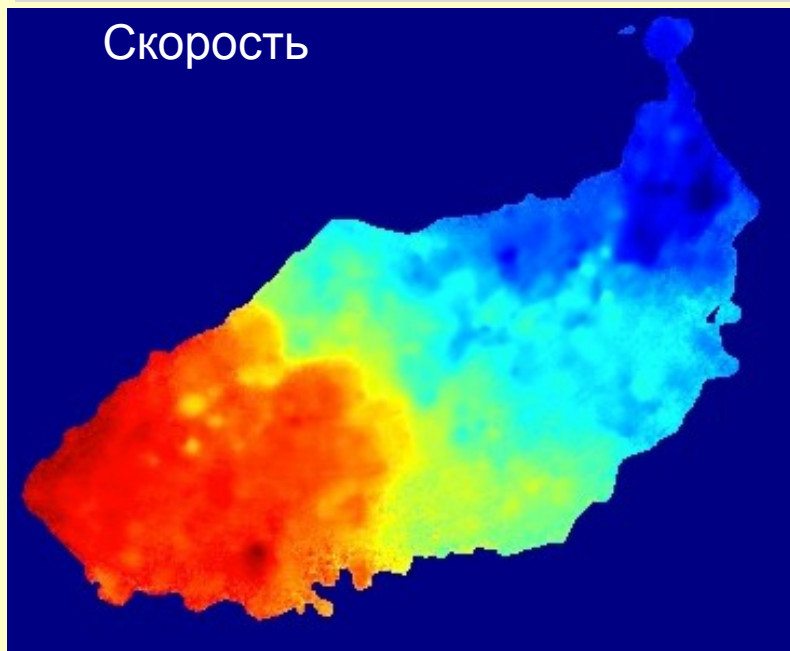
Egorov+2014

Способы визуализации куба: совмещение карт

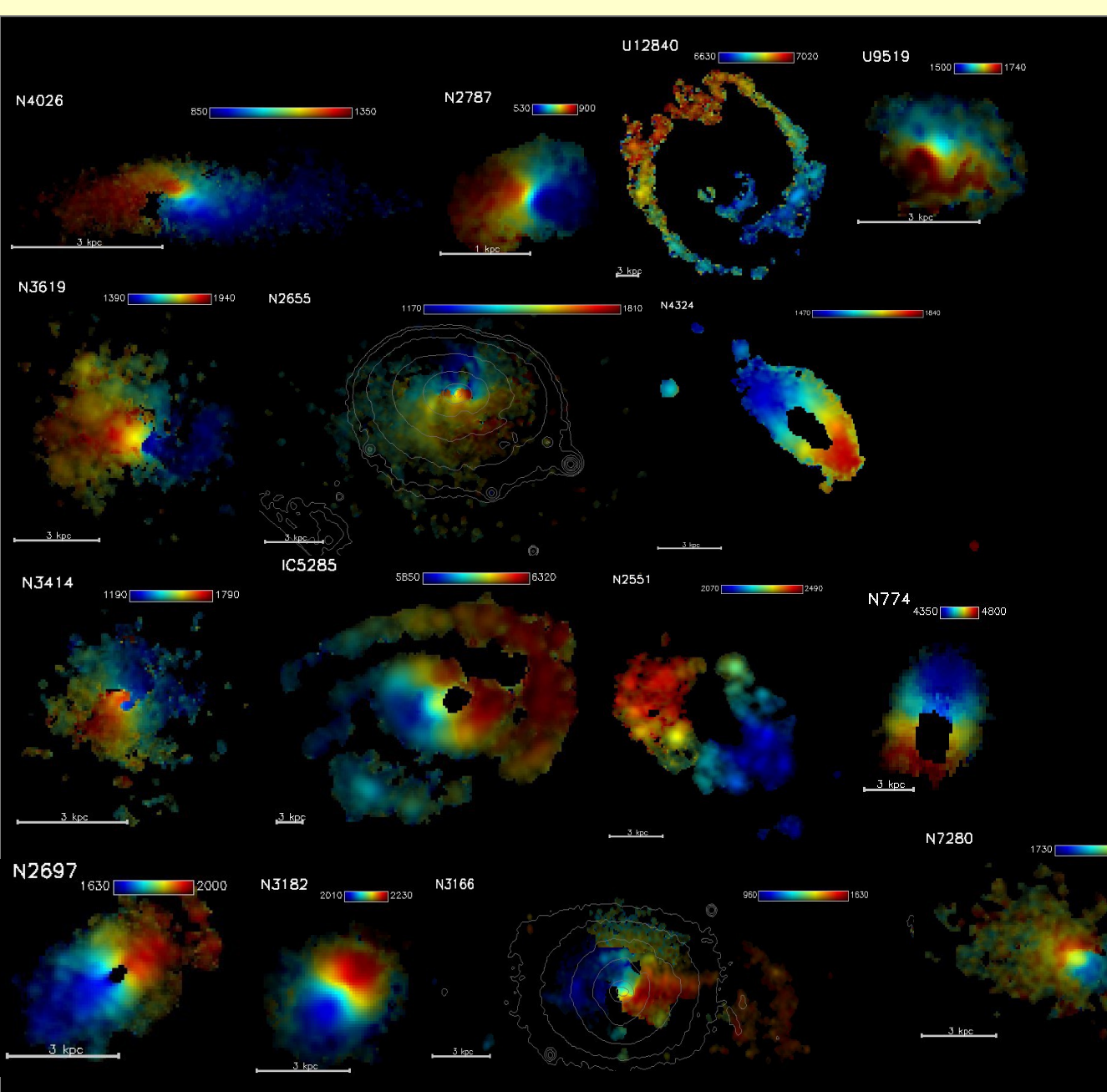
Яркость



Скорость



Ионизованный газ в линзовидных галактиках



А что с абсорбционными линиями?

ASTRONOMICAL JOURNAL

VOLUME 107, NUMBER 6

JUNE 1994

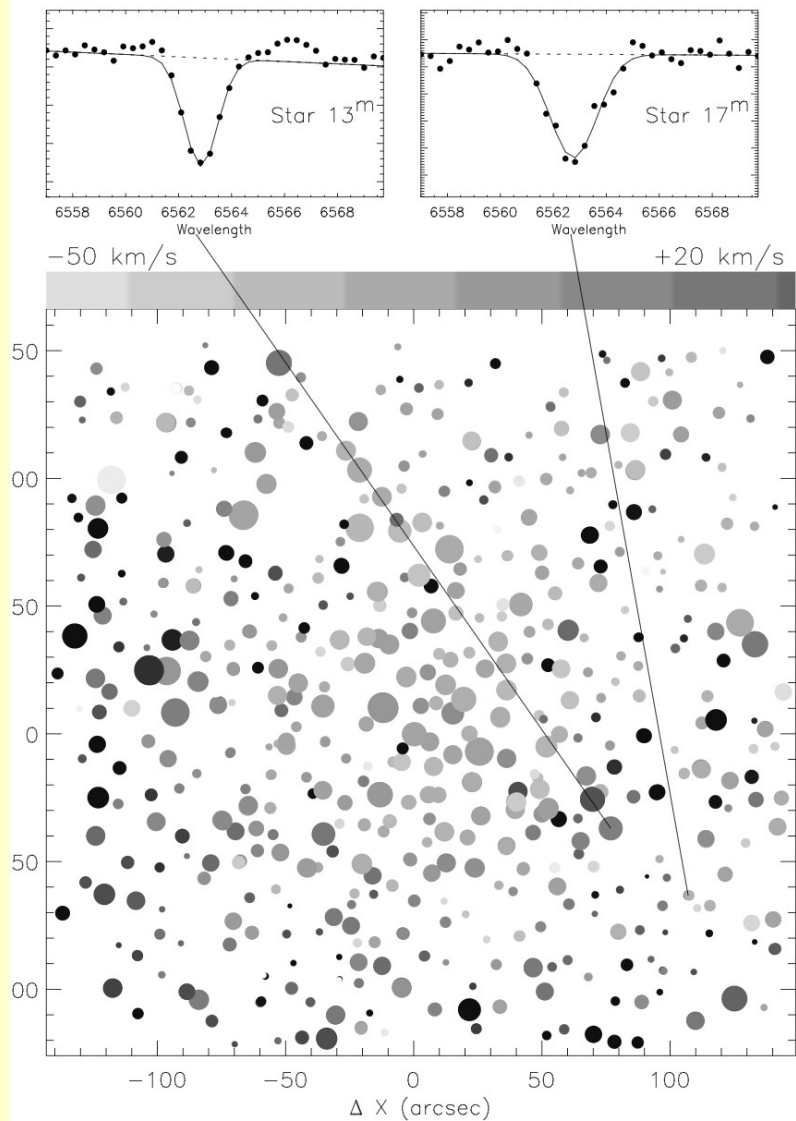
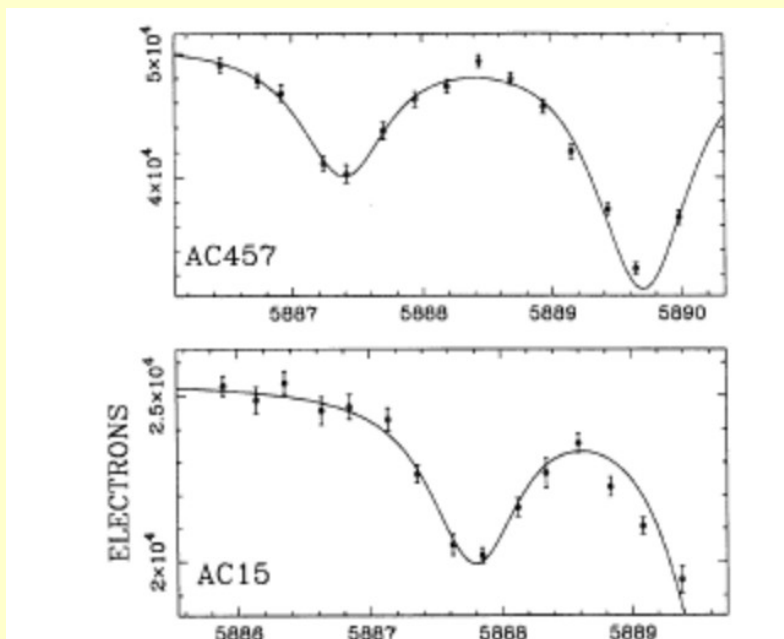
FABRY-PEROT MEASUREMENTS OF THE DYNAMICS OF GLOBULAR CLUSTER CORES: M15 (NGC 7078)

K. GEBHARDT,¹ C. PRYOR,¹ AND T. B. WILLIAMS¹

Department of Physics and Astronomy, Rutgers, The State University, Box 0849, Piscataway, New Jersey 08855-0849

Electronic mail: gebhardt@physics.rutgers.edu, pryor@physics.rutgers.edu, williams@physics.rutgers.edu

JAMES E. HESSER

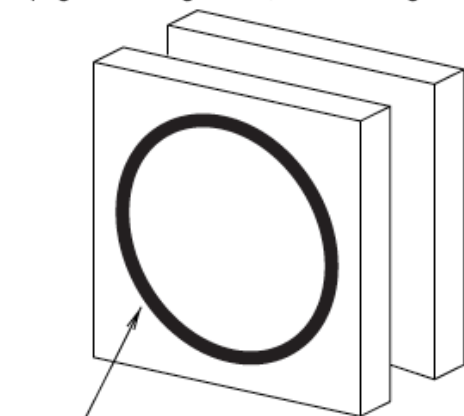


M71, точность $\delta v = 2-4$ км/с (Moiseev 2002)

Перенастраиваемый фильтр (tunable filter)

(a) High Order FabryPerot

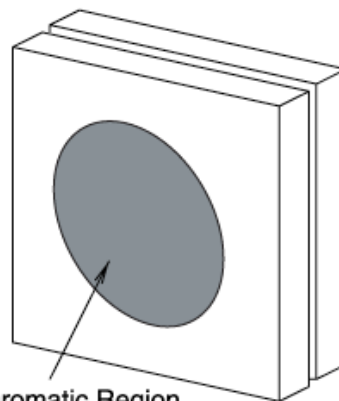
(High Resolving Power; Small Tuning Range)



Monochromatic Ring

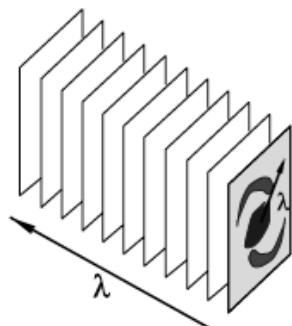
(b) Tunable Filter

(Low Resolving Power; Large Tuning Range)



Central Monochromatic Region
(Jacquinot Spot)

(i) Stack of Images at
High Spectral Resolution

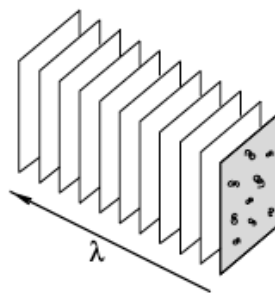


(ii) Single Image of a
Diffuse Source



Single Spectrum Obtained
by Binning Azimuthally
About the Optical Axis

(iii) Stack of Monochromatic Images
at Low Spectral Resolution



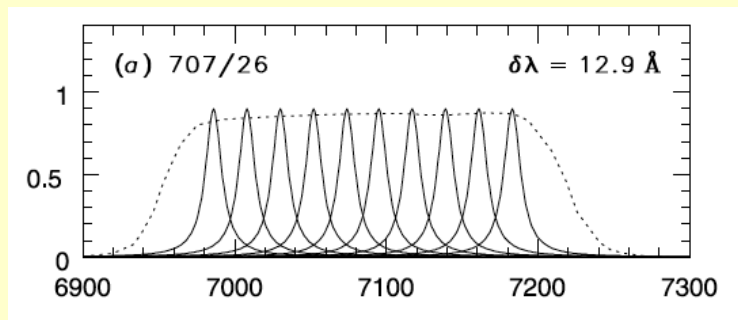
Низкие порядки
интерференции

$N=30-50$

$\Delta\lambda = 150-300 \text{ \AA}$

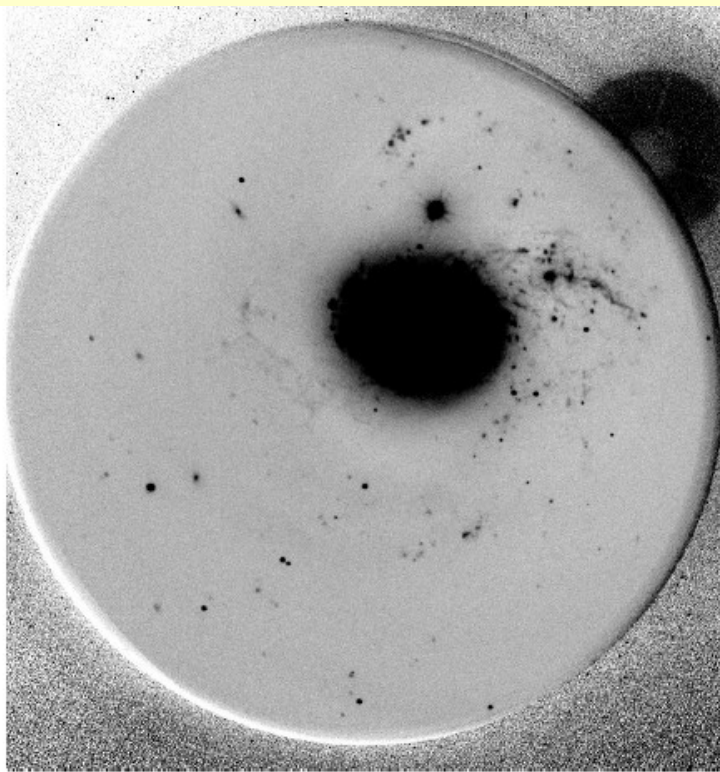
$\delta\lambda = 10-20 \text{ \AA}$

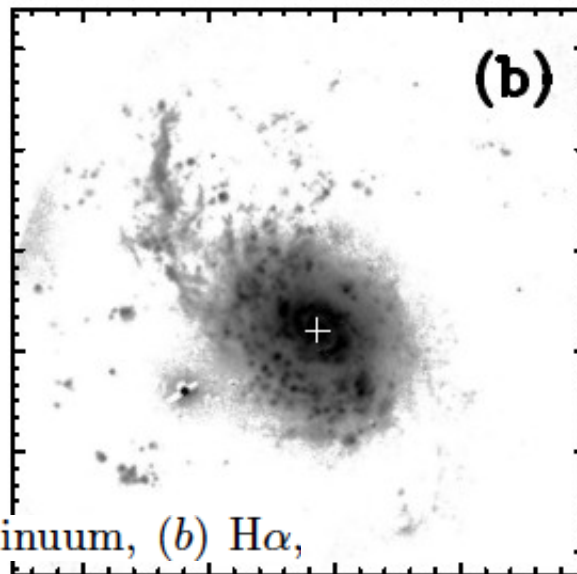
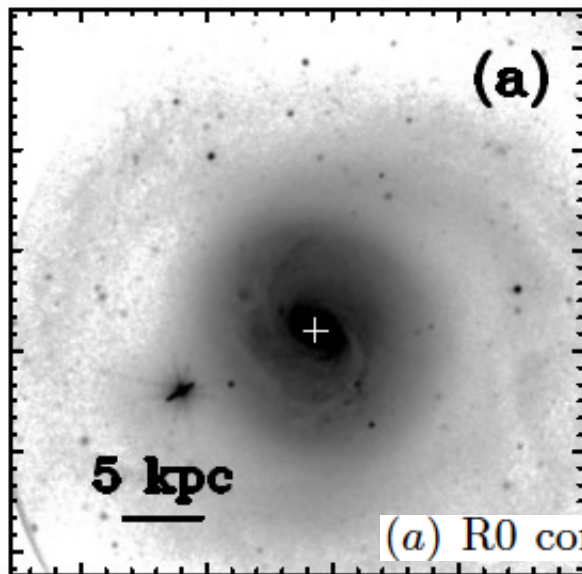
TAURUS Tunable Filter (3.9m AAT, 4.2m WHT)



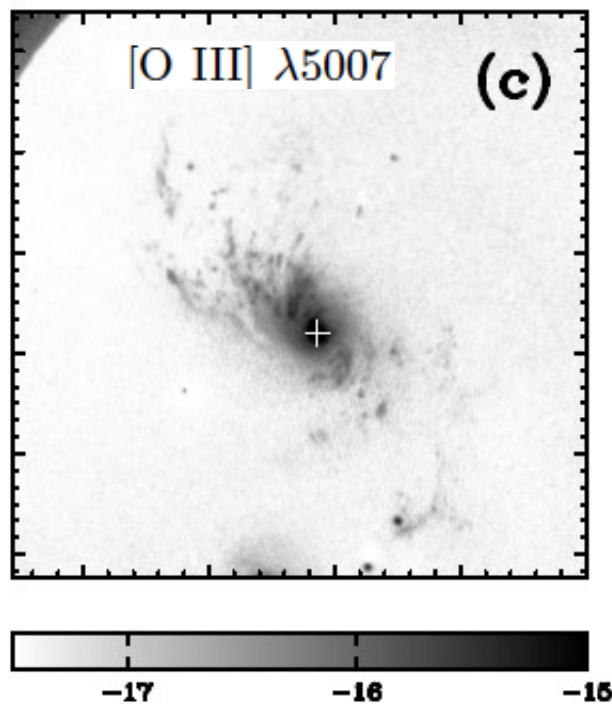
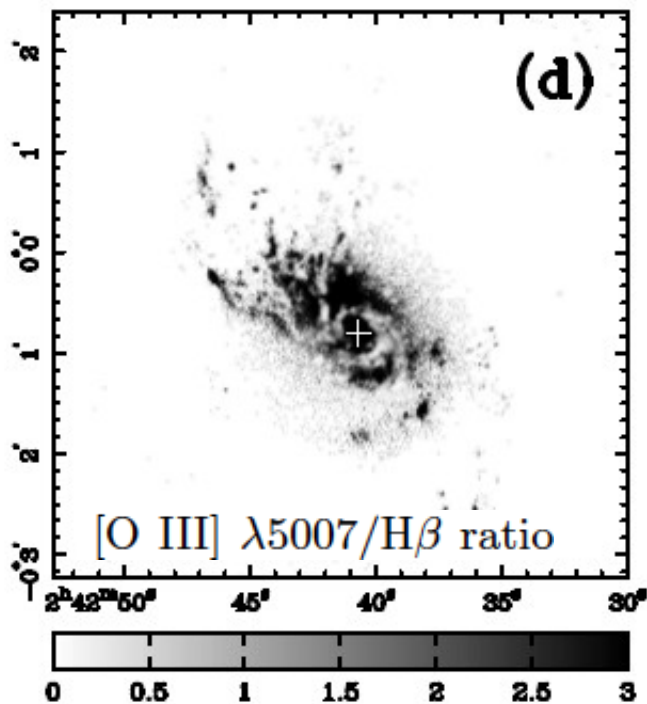
- Возможность аккуратно вычистить континуум
- разрешить линии Нальфа и [NII]6548,6583

Но длины волн меняются с радиусом:



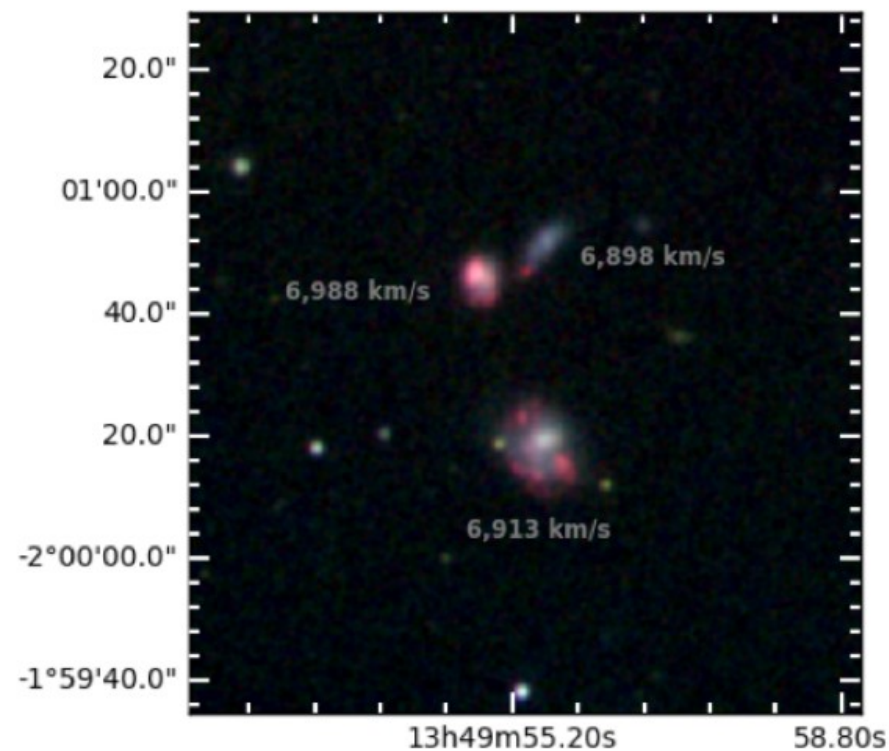
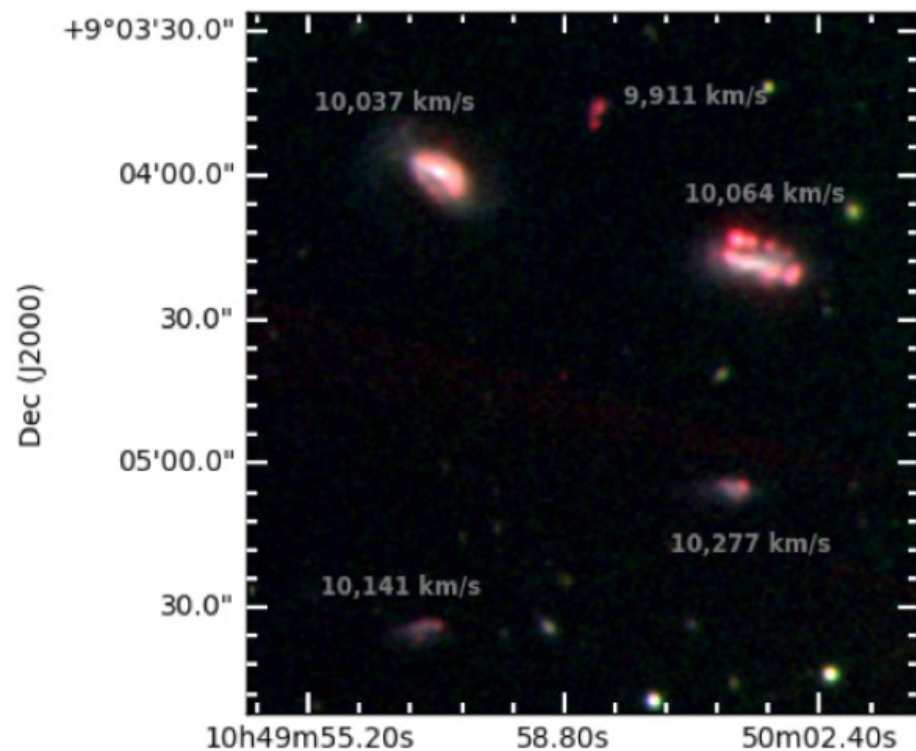


(a) R0 continuum, (b) $H\alpha$,



Veilleux 2005

MMTF: THE MARYLAND-MAGELLAN TUNABLE FILTER

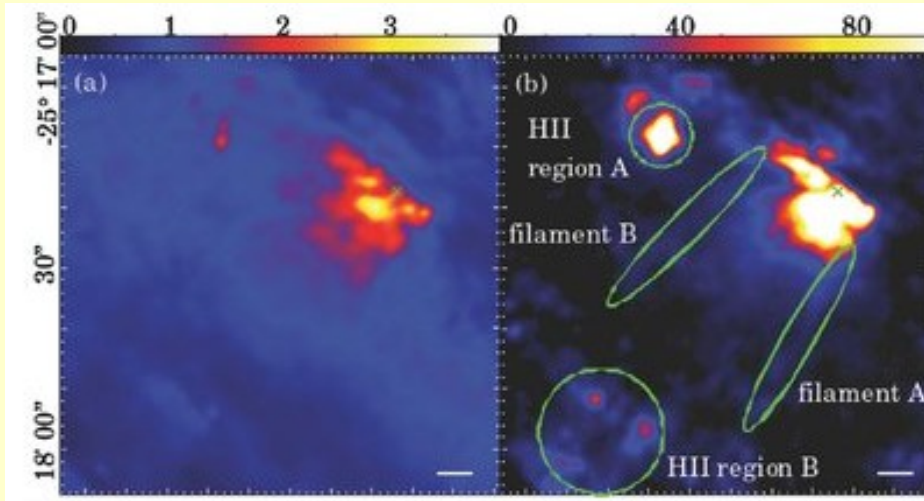


Stierwalt+17, Nature

Veilleux+2010

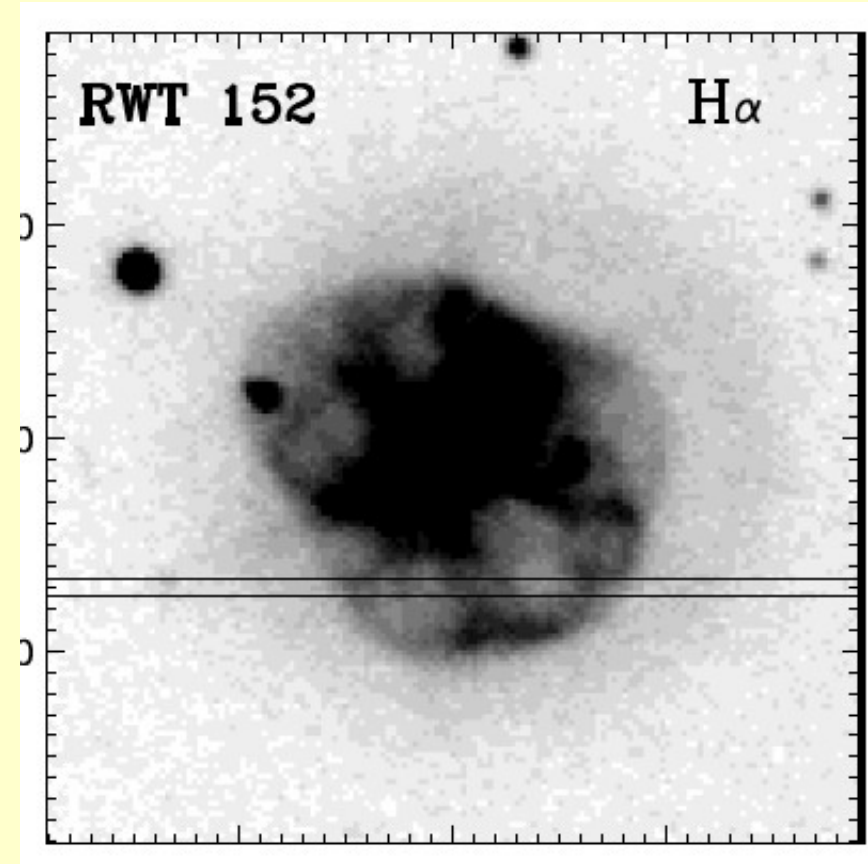
TF на больших телескопах

SUBARU



(Matsubayashi + 09)

GTC/OSIRIS



(Aller + 16)

БТА — готовимся к первому свету!

Немного экзотики: акусто-оптический фильтр

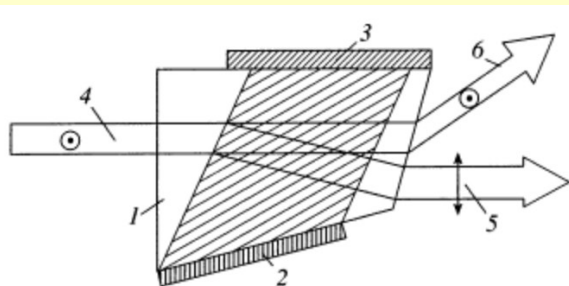


Fig. 1. The ray path in the AOF for linearly polarized incident light (see the text).

Acousto-optical material	Paratellurite
Type of acousto-optical interaction	Noncollinear wide-angle
Optical aperture	15 × 15 mm
Angular filter aperture	7°
Spectral range	6300–11 000 Å
Pass bandwidth (FWHM) at $\lambda 6365$ Å	12 Å
Range of control frequencies	67–133 MHz
Control power at $\lambda 6365$ Å	1.7 W
Efficiency for linear polarization	80%
Input resistance in the range of control frequencies	50 Ω
Spatial resolution	Less than 1"

718

MOLCHANOV *et al.*

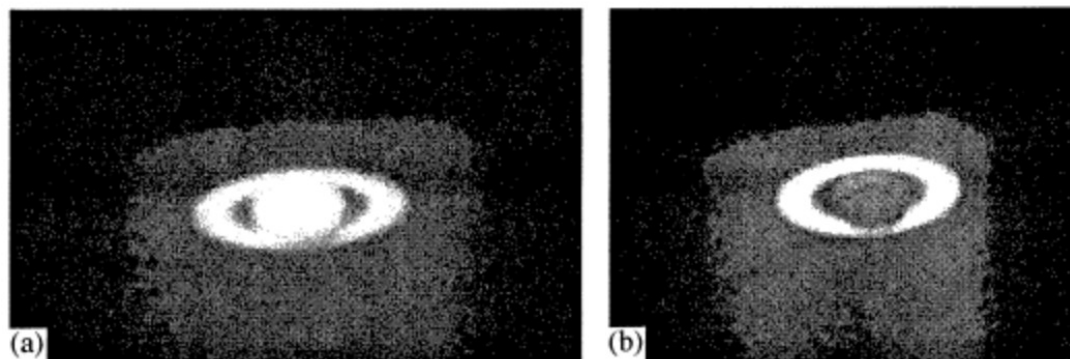
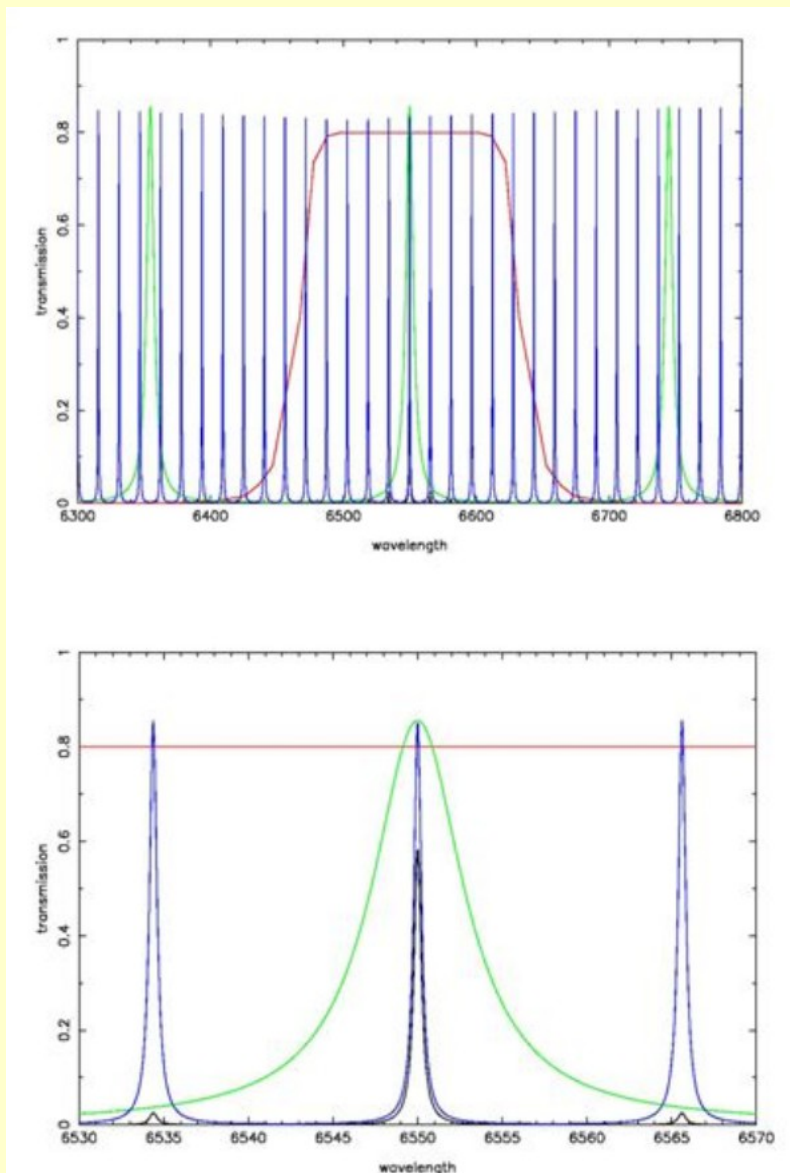


Fig. 6. Saturn's images at (a) $\lambda 8500$ and (b) $\lambda 8870$ Å obtained with the acousto-optical imaging spectrophotometer on September 15, 2001.

Немного экзотики: двойной Фабри-Перо



Комбинация интерферометров
высокого и низкого разрешения
позволяет обойтись без
дополнительных фильтров.

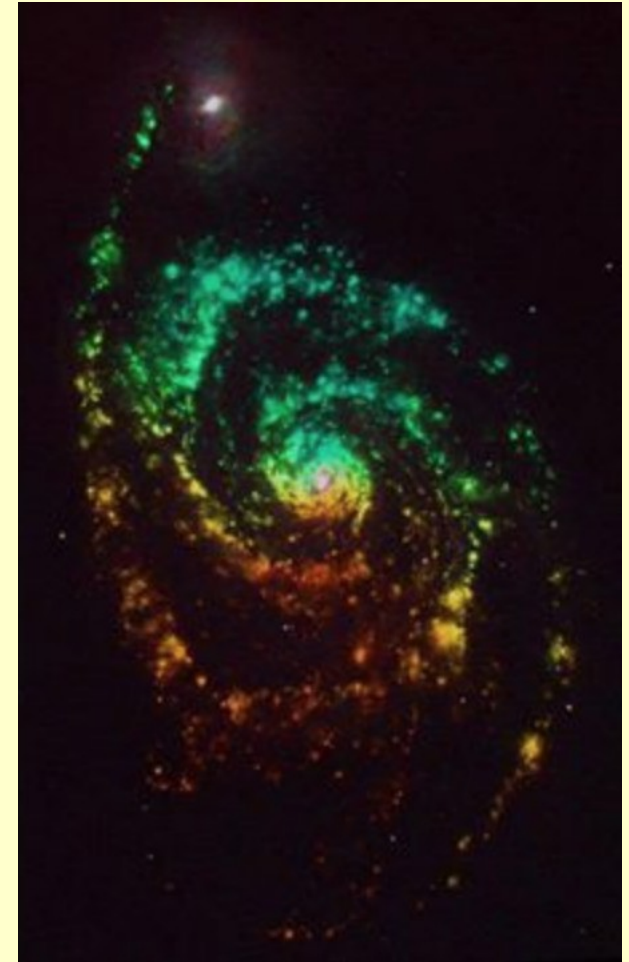
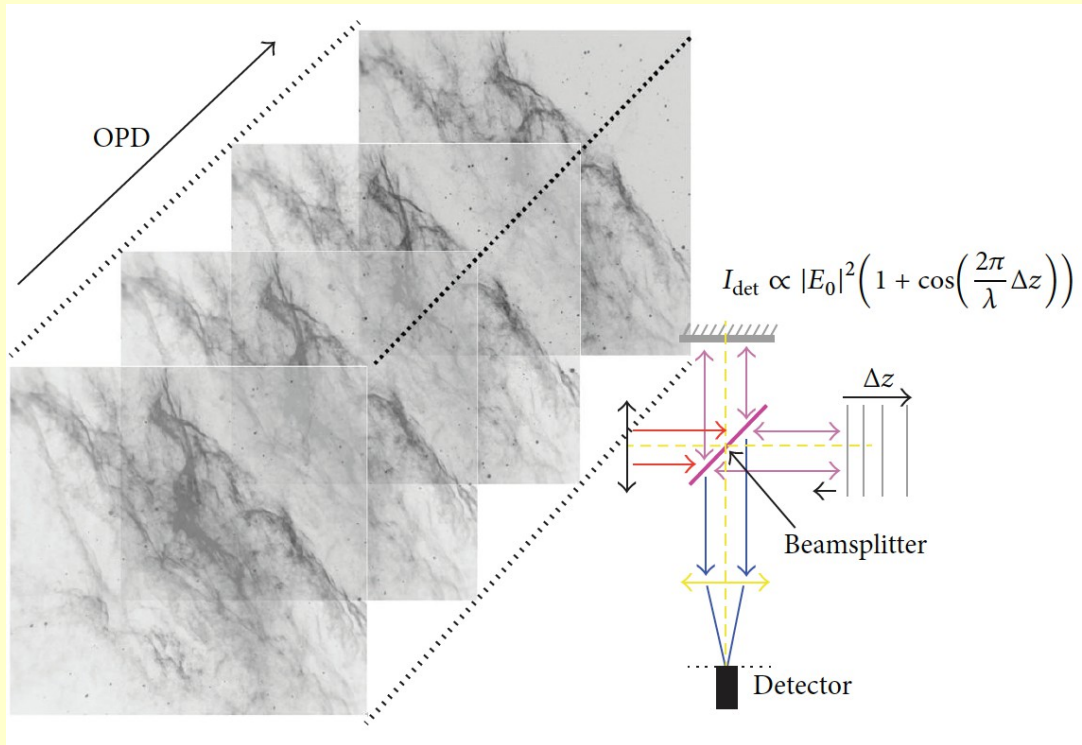
Система работает на ряде солнечных
телескопов,

Но для слабых протяженных
объектов проекты все еще не
завершены:

SALT
3D-NTT

Немного экзотики: фурье-спектрограф

SITELLE = (Spectromètre Imageur à Transformée de Fourier pour l'Etude en Long et en Large de raies d'Emission)



Drissen + 14
Rousseau-Nepton + 17

Зачет по курсу

Презентация 5-10 слайдов, включающая:

- принцип действия прибора, основные параметры, выходные данные
- любой полученный на нём наблюдательный результат (не рассмотренный на лекциях)

- 1) PMAS (Roth M. et al. 2005)
- 2) PMAS/PPAK (Kelz A. et al. 2006)
- 3) SAMI (Croom S. et al. 2012)
- 4) MaNGA (Bundy K. et al. 2015)
- 5) SINFONI (Eisenhauer F. et al. 2015)
- 6) VIMOS/IFU (Bonneville C. et al. 2003)
- 7) MUSE (Bacon R. et al. 2010)