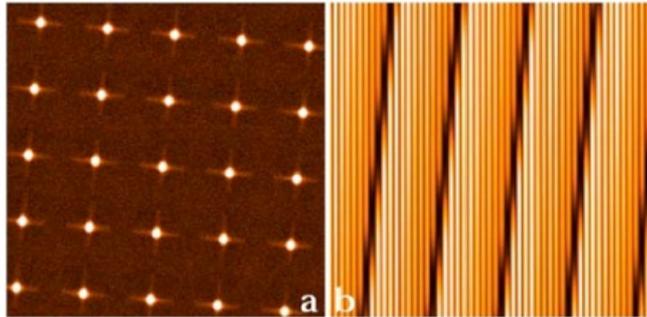
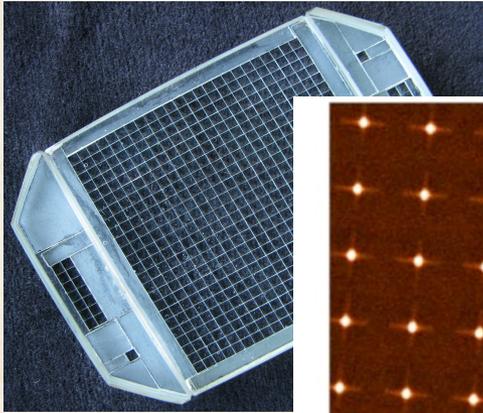


# Методы панорамной спектроскопии

## Лекция 3.

Преимущества и недостатки спектрографов с волоконным блоком. Гексагональное расположение элементов. Карты параметров ионизованного газа. Спектрографы и проекты: INTEGRAL, GMOS, CALIFA, VIRUS-P. Многообъектная панорамная спектроскопия: MaNGA, SAMI

# Линзовый растр vs волоконный блок



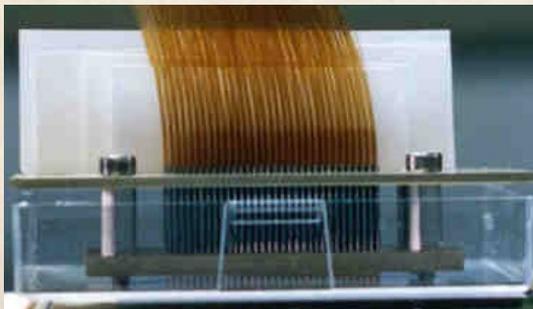
- + 100% покрытие поля зрения
- + экономия на оптике переброса
- + можно сделать квадратный spaxel
- + большое поле (но за счет спектрального диапазона)

- неэффективное использование ПЗС
- ограничение спектрального д-на

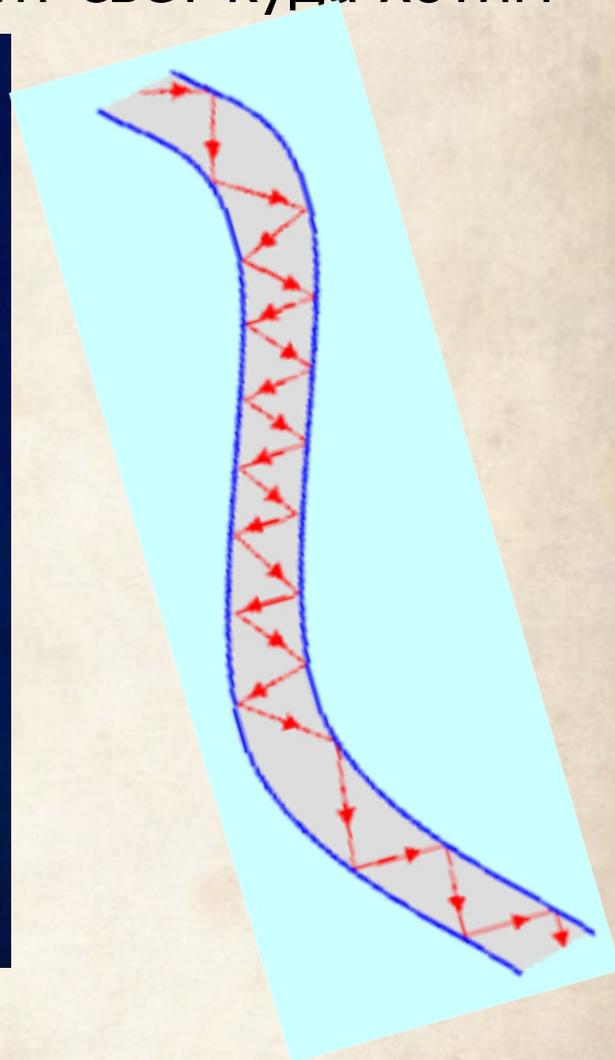
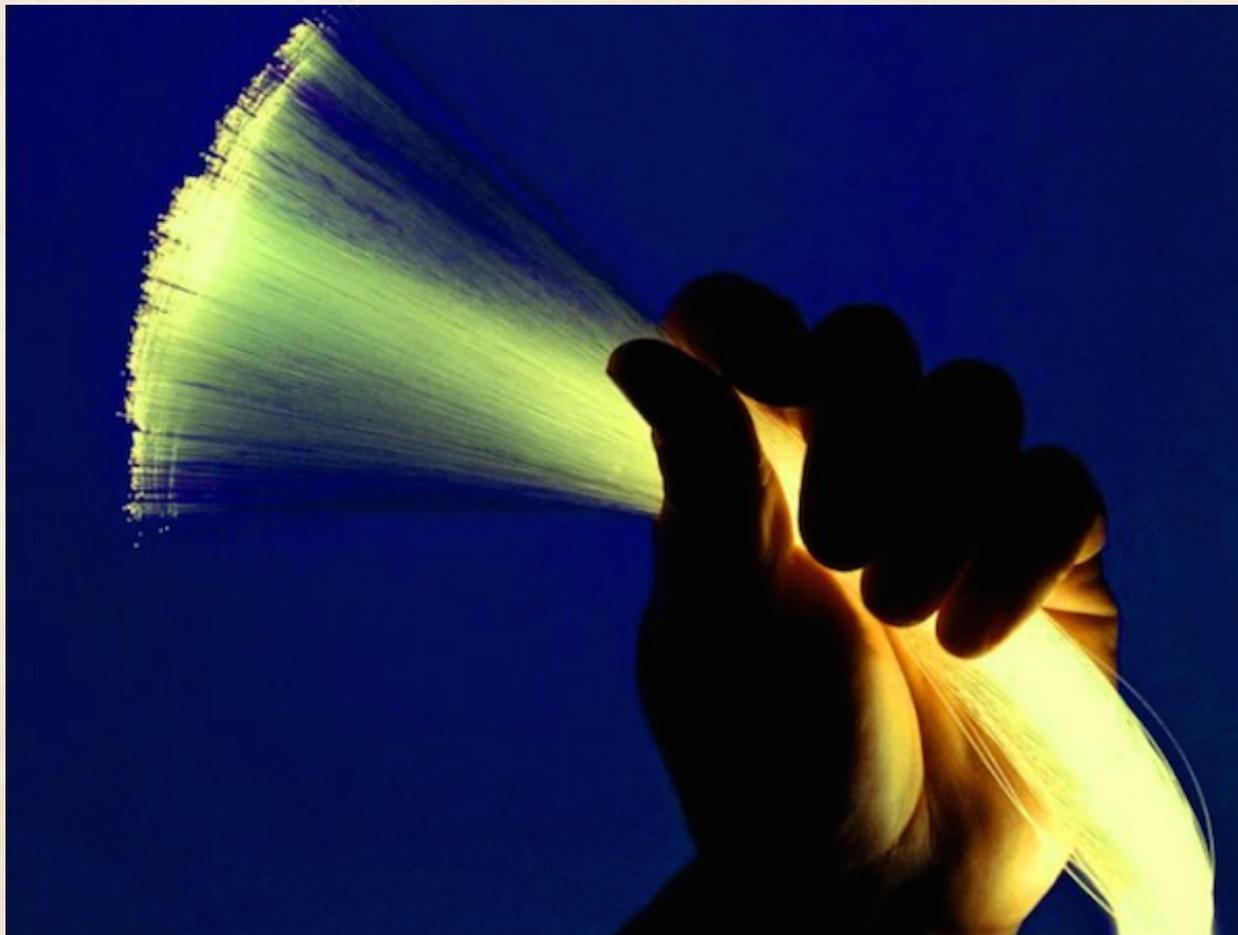


- + эффективное использование ПЗС (плотная упаковка спектров)
- + можно легко развести свет на несколько спектрографов
- + удобно заводить спектр ночного неба
- + отказ от оптики увеличителей
- + многообъектная спектроскопия

- потери света между волокнами
- все проблемы волоконной оптики

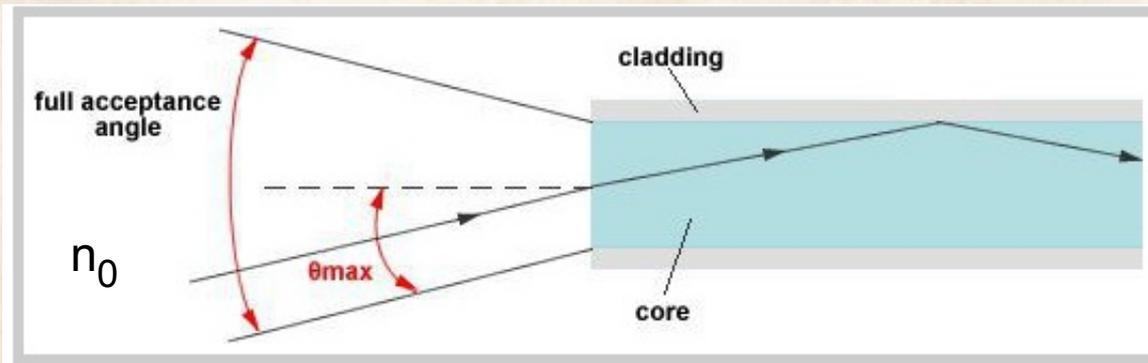


“Наивный” взгляд на световоды: “проводит свет куда хотим”



Но реальность сложнее...

# Немного теории: числовая апертура волокна



Полное внутренне отражение только в пределах определенного угла к оптической оси (ограничение на светосилу)

Числовая апертура = синус максимального входного угла ( $n_0 \approx 1$ ):

$$NA = \sin \theta_m = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_{cl}^2 - n_{co}^2}$$

Что дает для светосилы:

$$\left(\frac{F}{D}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \theta_m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{NA^2} - 1} \approx \frac{1}{2NA}$$

Типичные величины  
NA=0.1-0.3

При NA=0.22 получаем ограничение на максимальную входную светосилу F/2.3, что выполнимо.

Но проблема с “деградацией” выходной светосилы

# Деграция фокального отношения

## Focal Ratio Degradation (FRD)

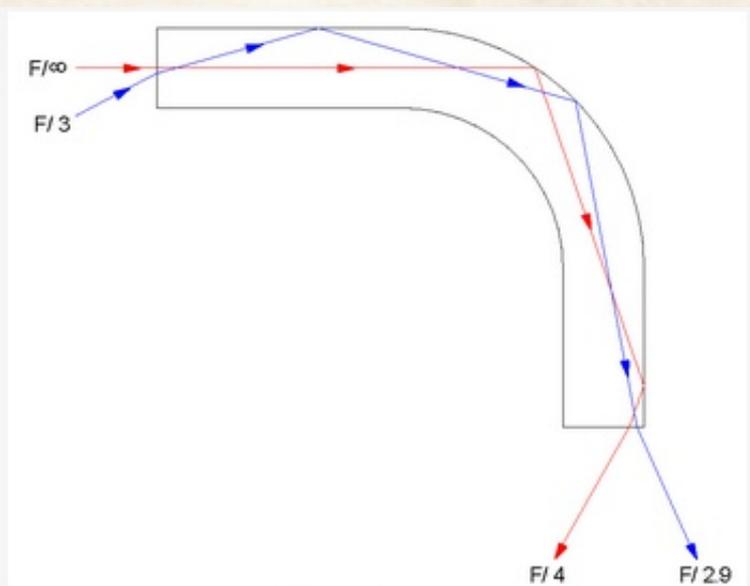


Figure 9. Origin of the FRD in optical fibres

На выходе угол разхождения лучей становится больше. Длина и изгибы волокна оказываются важными для “перемешивания” пучков, зашедшими под разными углами.

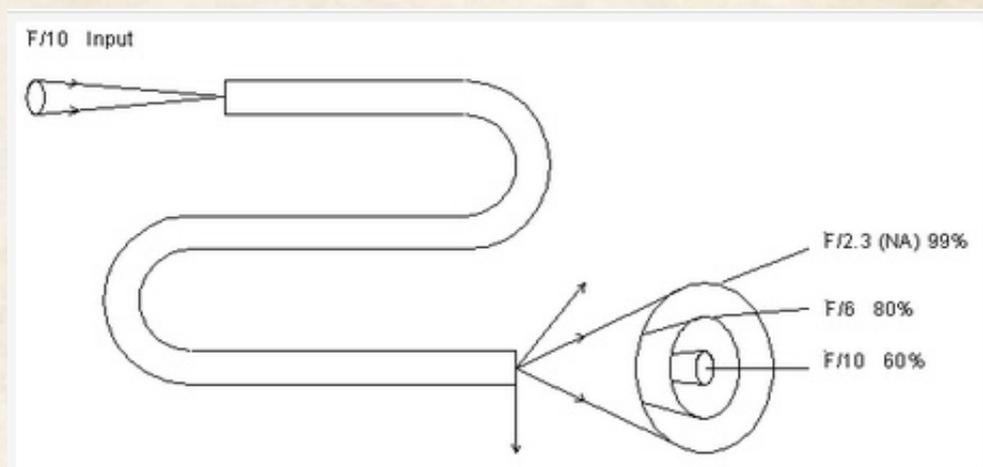
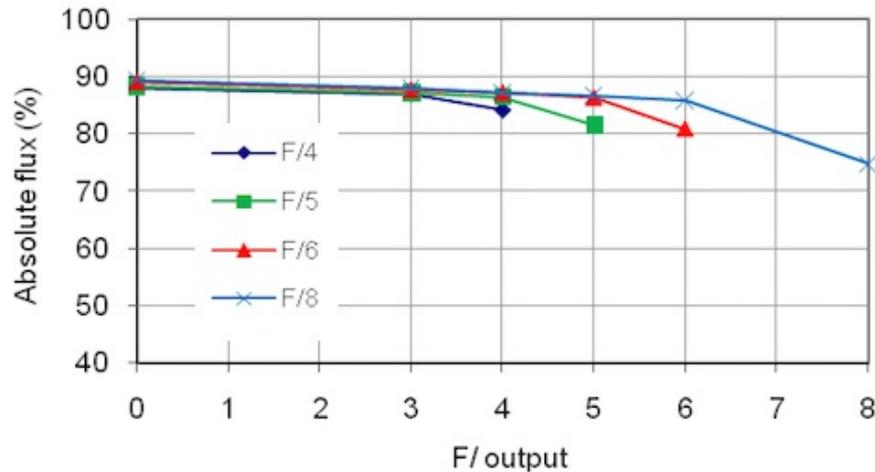


Figure 10. Loss of efficiency by FRD

scrambling fiber - “хорошее перемешивание света”:  
теряется информация о распределении яркости на  
входе в волокно

# Влияние изгиба на FRD

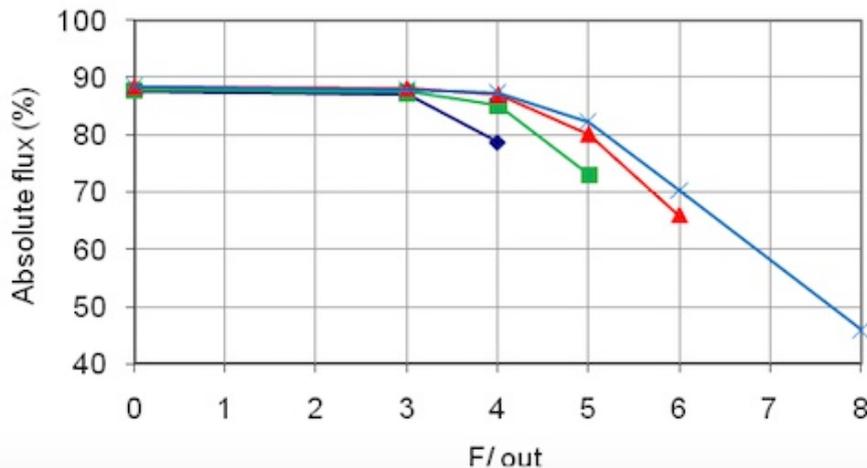
Polymicro STU 200 um 10m FREE



Изгибы, рассеяние на неоднородностях среды, деформации кручения – все приводит к деградации выходного фокального отношения!

Относительная деградация сильнее для менее светосильных входных пучков.

Polymicro STU 200um 10m Bend R15mm

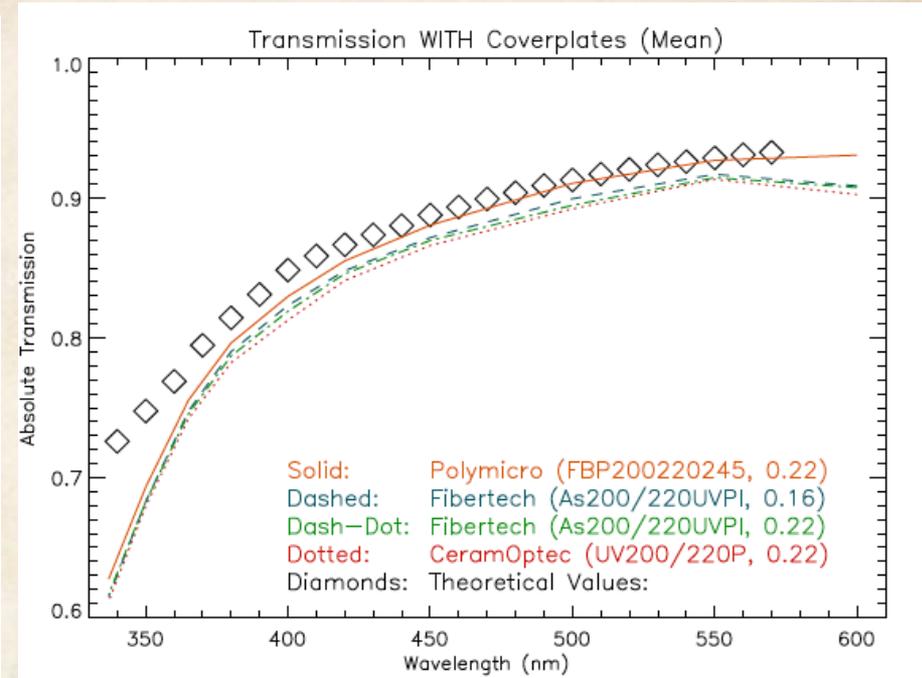
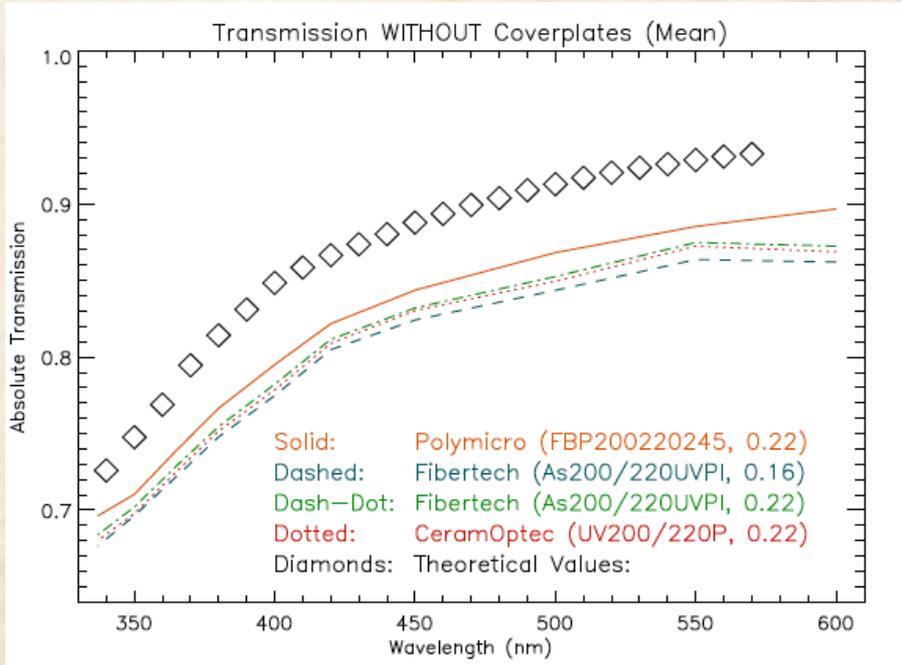


В сравнении с классическим спектрографом, более жесткие требования на светосилу коллиматора и камеры спектрографа (сложнее и дороже)

<https://spectroscopy.wordpress.com>

# Потери на пропускание волокна

Реальный пример с IFS VIRUS (Murphy +08)



Наиболее критично в синей части спектра.

Есть еще и френелевские потери на торцах (можно убрать просветлением)

# Диаметр волокна

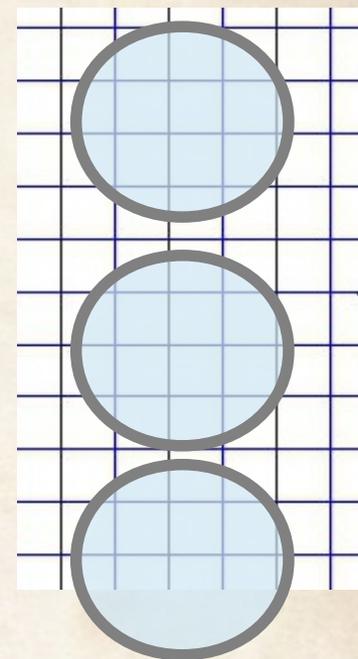
Основная область применения - НЕастрономия

Типичные размеры: 120-250  $\mu\text{m}$

=> на БТА это 1-2" в фокальной плоскости, можно работать без увеличителя.

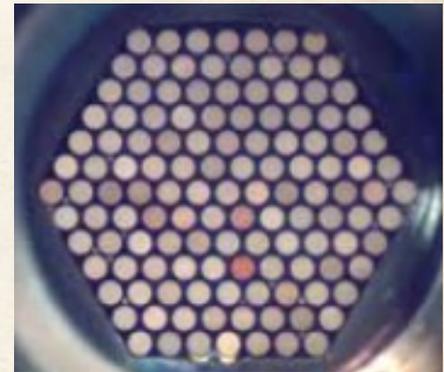
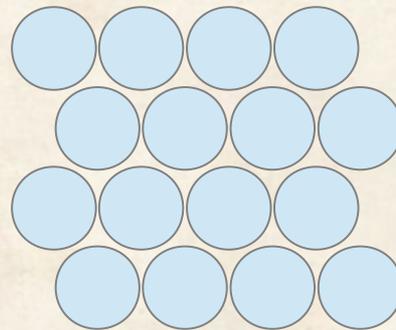
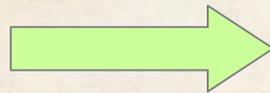
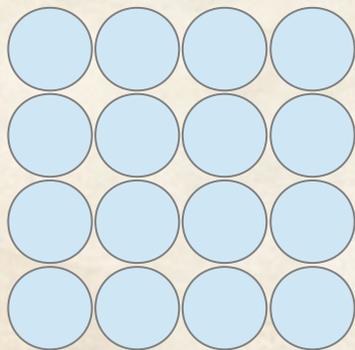
Но тот же диаметр оказывается критичным, когда стараемся заполнить щель плотнее:

Достаточно, чтобы изображение волокна в щели проецировалось в изображение диаметром 4-5  $\mu\text{m}$  (\*13.5)=54-68  $\mu\text{m}$ , что требует хорошей широкощельности спектрографа, т.е. светосильной камеры (см. Лекция 2 "Фокальный редуктор")



# Проблема фактора заполнения входного поля

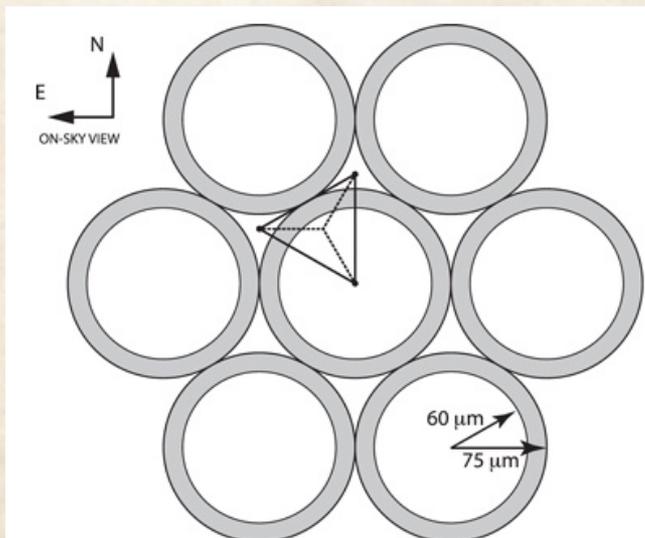
Так как наличие оболочки – принципиально, то эффективнее упаковать волокна в жгуте гексагонально (“соты”)



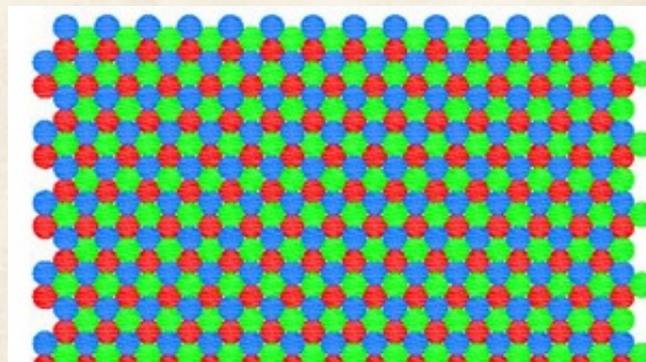
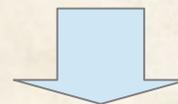
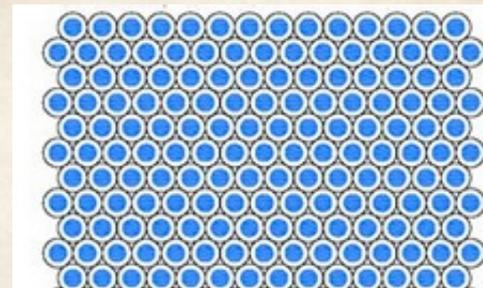
(IFU MaNGA)

# Технология мелких смещений (dithering)

Съемка в трех положениях при гексагональной упаковке волокон позволяет значительно улучшить построенное PSF в итоговом кубе



Law+15



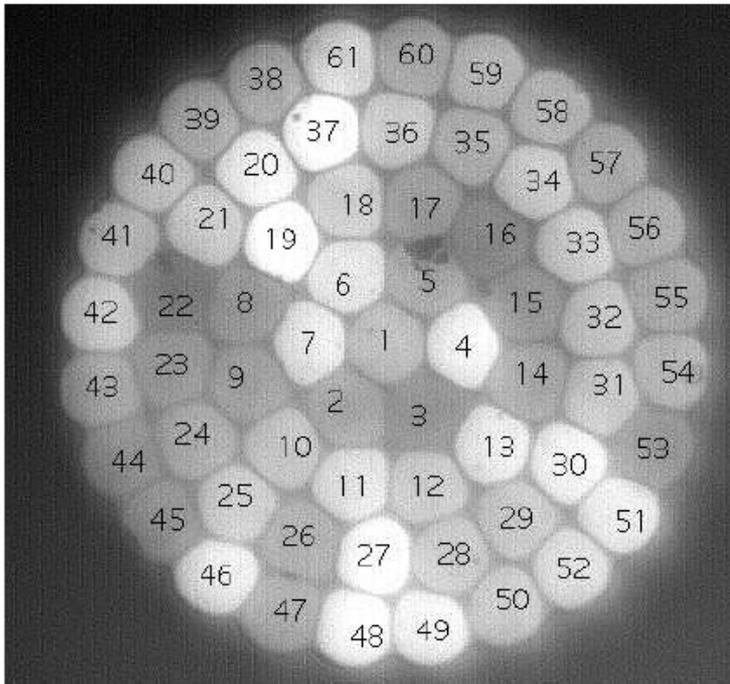
(Kelz +: VIRUS-IFU)

# Интересное решение - "сплавленные световоды"

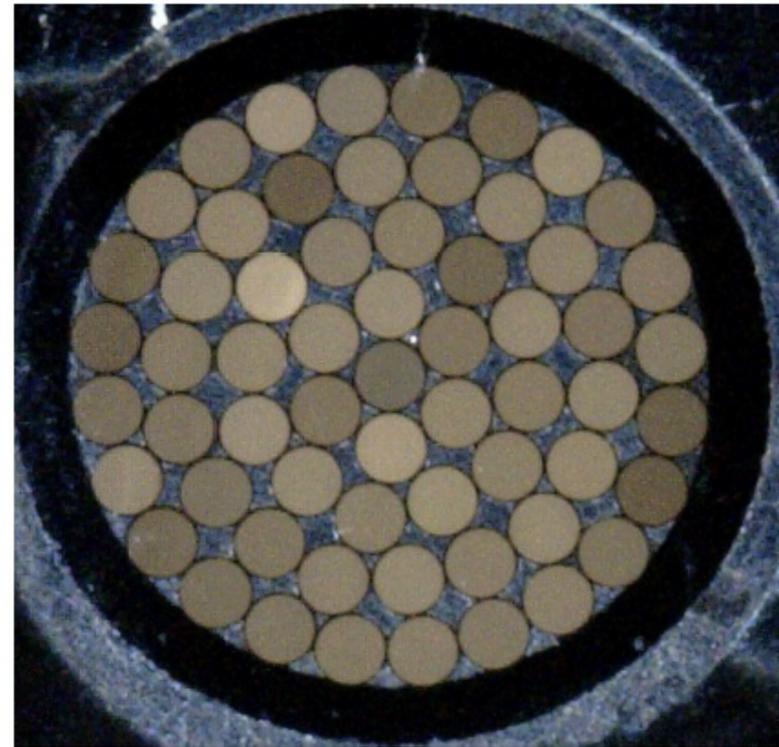
HEXABUNDLES (Bland-Hawthorn et al. 2011).

Strongly-fused (Bryant+11)  
*Filling factor >90%*

Lightly-fused (Bryant+14)  
*Filling factor <87%*



**Figure 1.** An image of the 61-core fully-fused hexabundle taken with non-uniform illumination to show the shape and position of the cores. Cores 1 – 16, 17 – 31, 32 – 46 and 47 – 61 were grouped together at output on four glass plates. Each of the cores are  $100\mu\text{m}$  in diameter. The cores are distorted from circular in order to increase the fill-fraction.

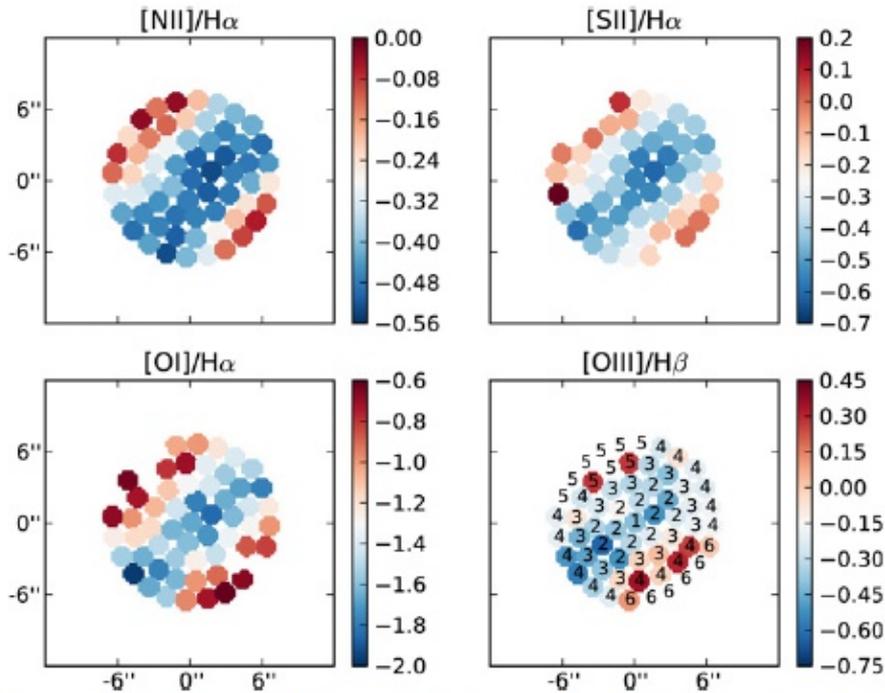


**Figure 1.** One of the 61-core lightly-fused hexabundles. The interstitial holes are filled with soft, low refractive index glue. The cores are  $105\mu\text{m}$  in diameter and  $115\mu\text{m}$  with cladding.

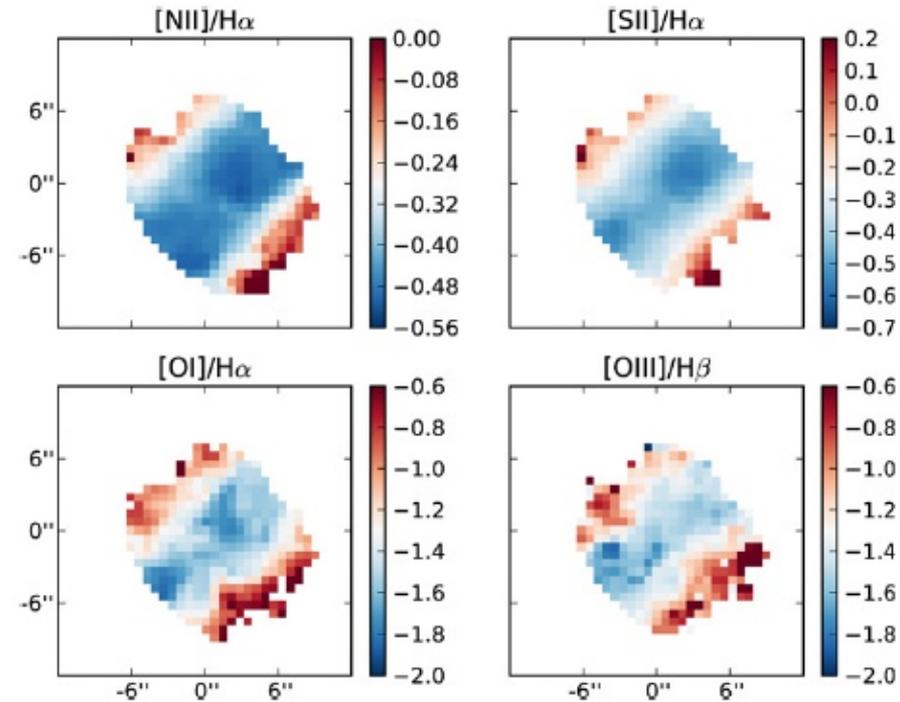
# Наблюдения со смещением в 3х положениях

Single point

Dithered data



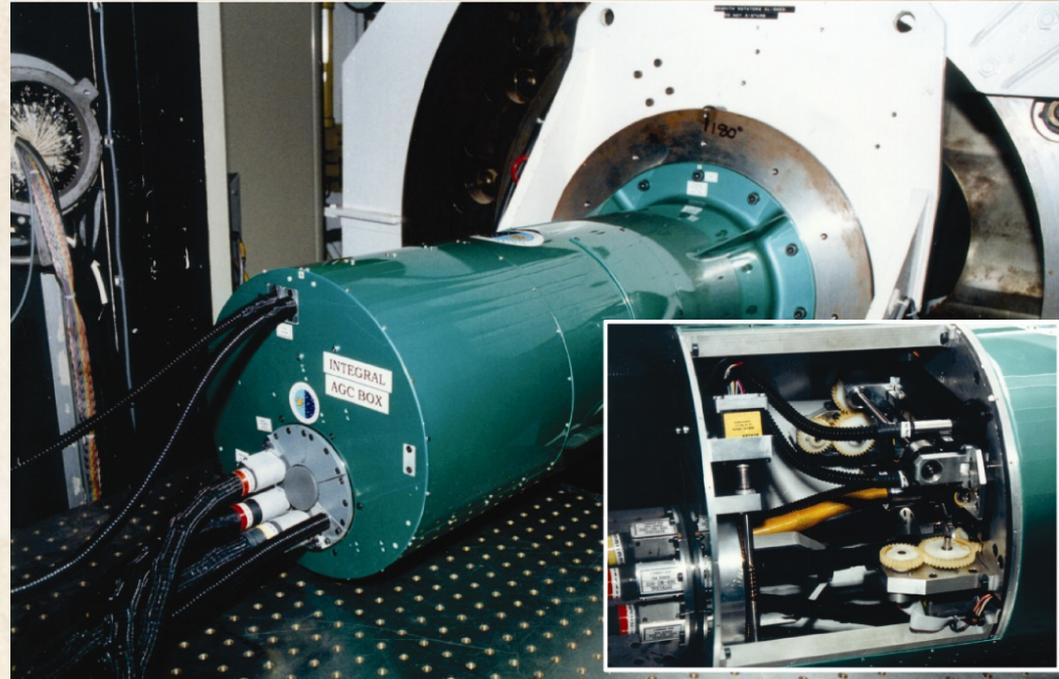
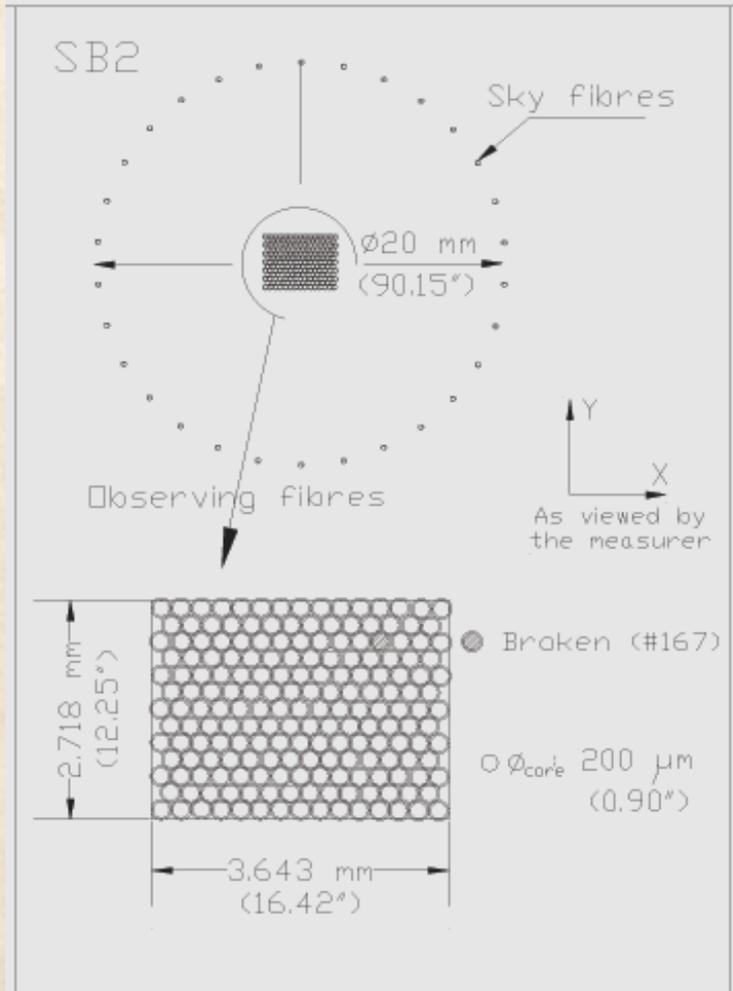
**Figure 4.** Spatial maps of the emission line ratios derived from the pointed data. Blank spaxels correspond to spectra where the S/N in the emission lines in question was not high enough to obtain a good fit. These maps are used to construct the IDD in Figure 7. Since the  $[OIII]/H\beta$  ratio (6" resolution) is used



**Figure 5.** Spatial maps of the emission line ratios derived from the dithered data. Again, the blank spaxels are those without spatial coverage or sufficient S/N to fit the necessary lines. These are used to construct the IDD in Figure 8.

# INTEGRAL on 4.2-m WHT

Arribas et al. 1998



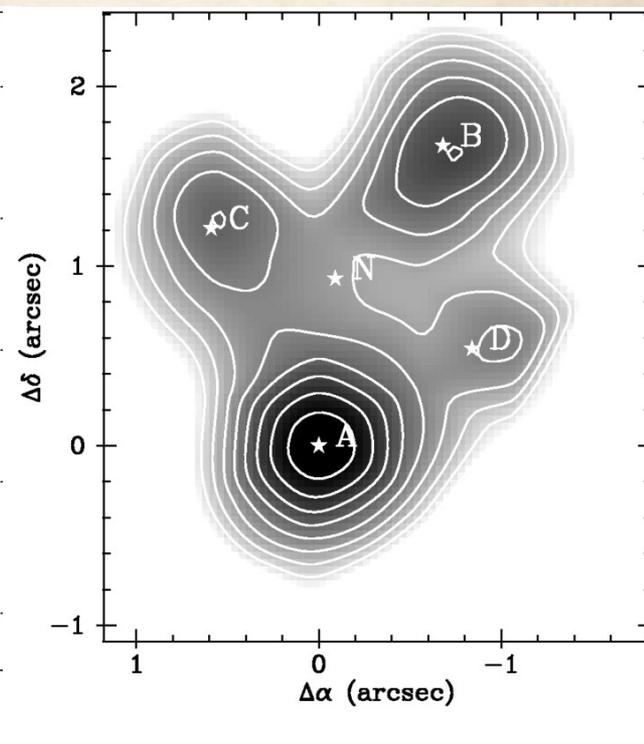
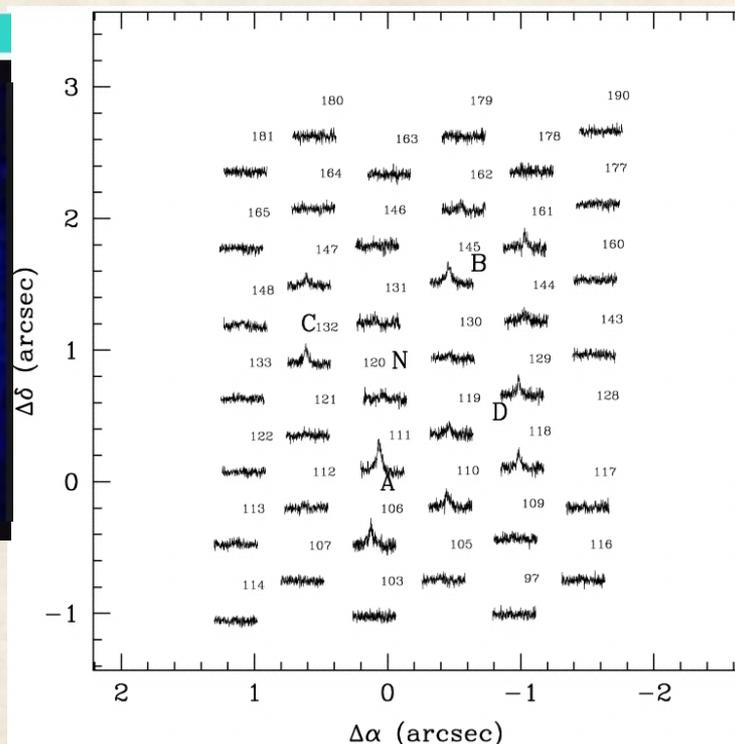
3 fiber bundles:

Mode	FoV ("x")	$\varnothing$ (")
SB1	7.80x6.40	0.45
<b>SB2</b>	<b>16.0x12.3</b>	<b>0.90</b>
SB3	33.6x29.4	2.70

# INTEGRAL: Einstein Cross

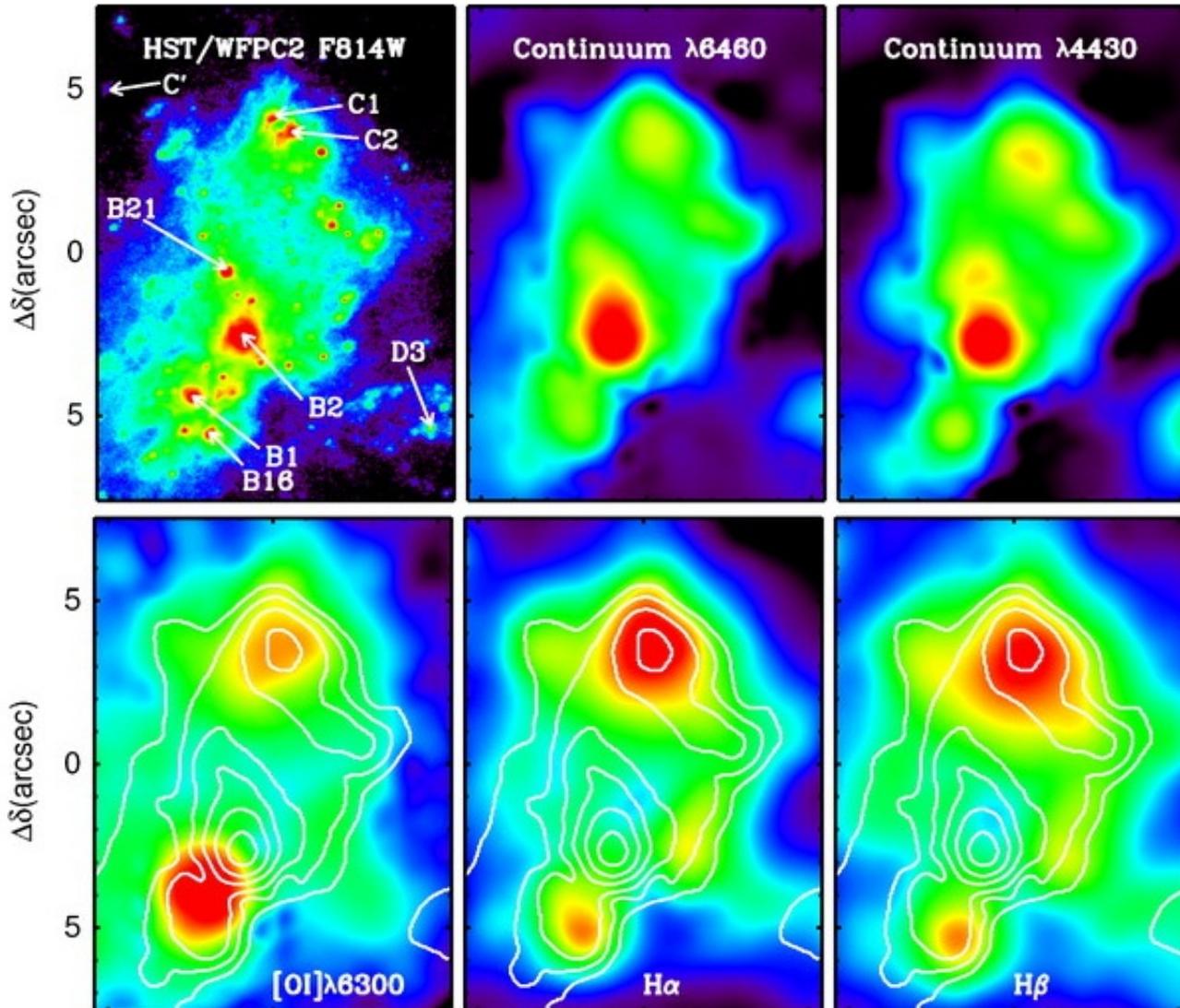
*Mediavilla et al. (1998)*

Система обработки и визуализации основана на гексагональном расположении спектров:



# Картирование в гексогональных координатах.

INTEGRAL: Arp 299 (García-Marín+2006)

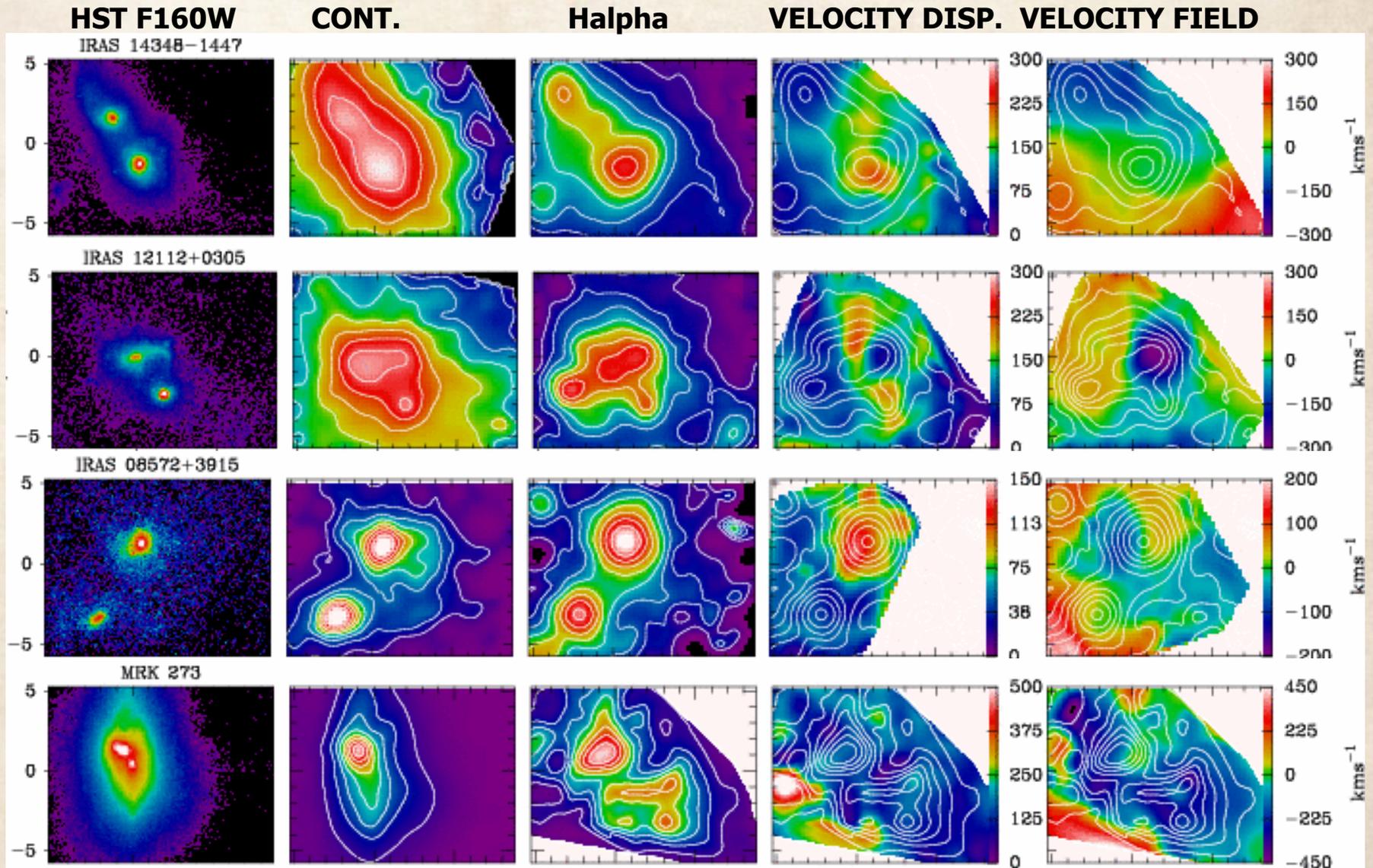


Карты рисуем контурами (заполненными или нет), опираясь на оригинальную сетку.

Сравнение разных карт – тоже этим методом.

Но чаще экстраполируют на более мелкую квадратную сетку

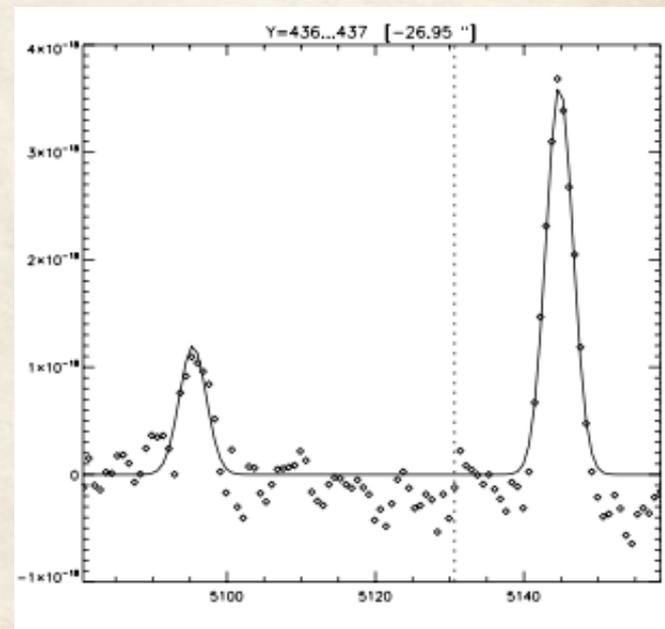
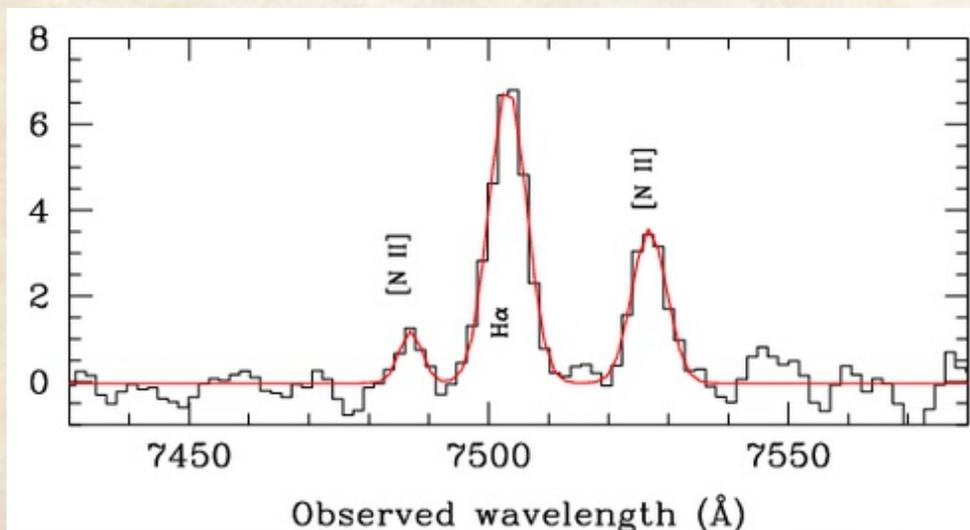
# Картирование ультраярких ИК-галактик



# Кинематика газа: гауссовский фитинг

Методы повышения точности измерений  
(больше линий, относительно меньше параметров):

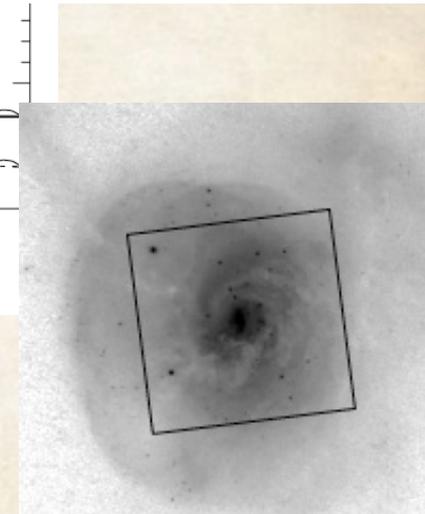
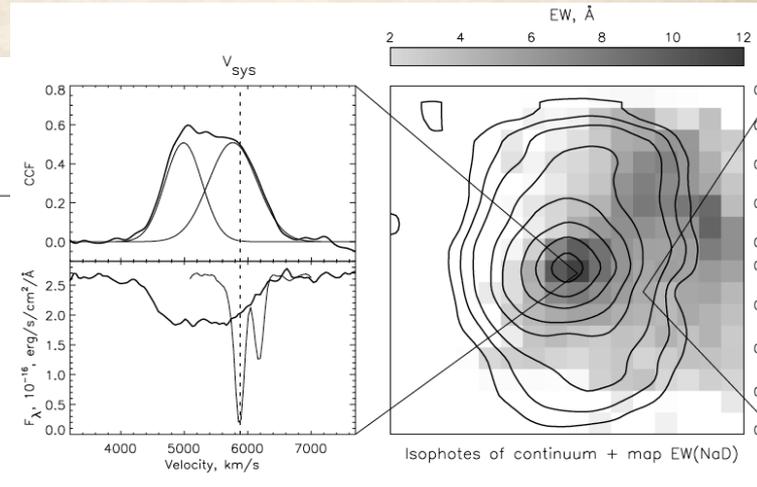
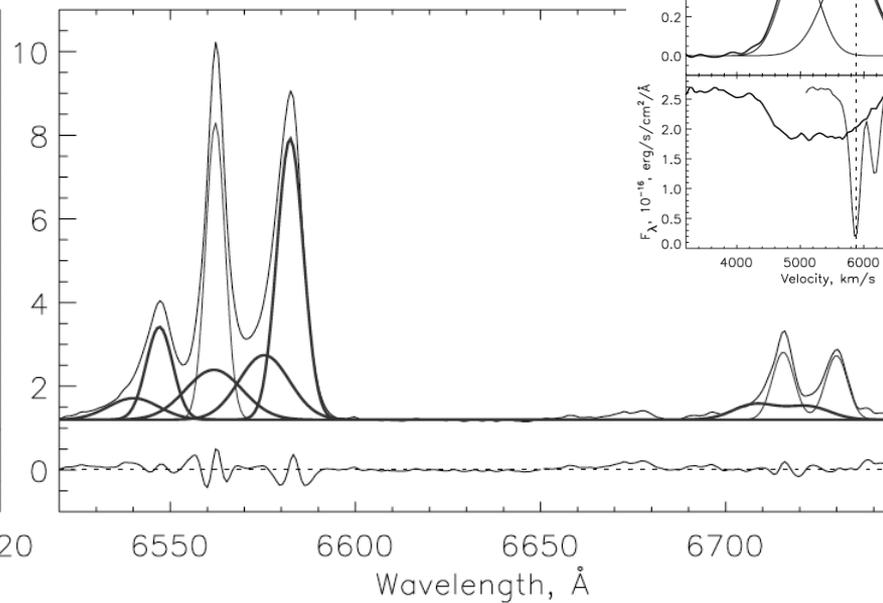
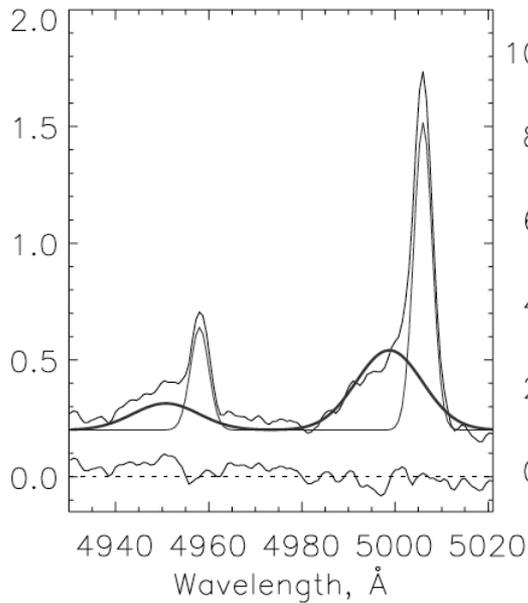
- Для дублетов – фиксируем полуширину, расстояние (в шкале  $v$ !)
- Дублеты с известным отношением амплитуд:  
[O III] $\lambda$ 4959,5007, [N II] $\lambda$ 6548,6583
- Можно, вообще, все наблюдаемые линии фитировать в предположении одинаковой скорости и дисперсии  
(или отдельно запрещенные и бальмеровские)



# Неоднозначность сложного гауссирования

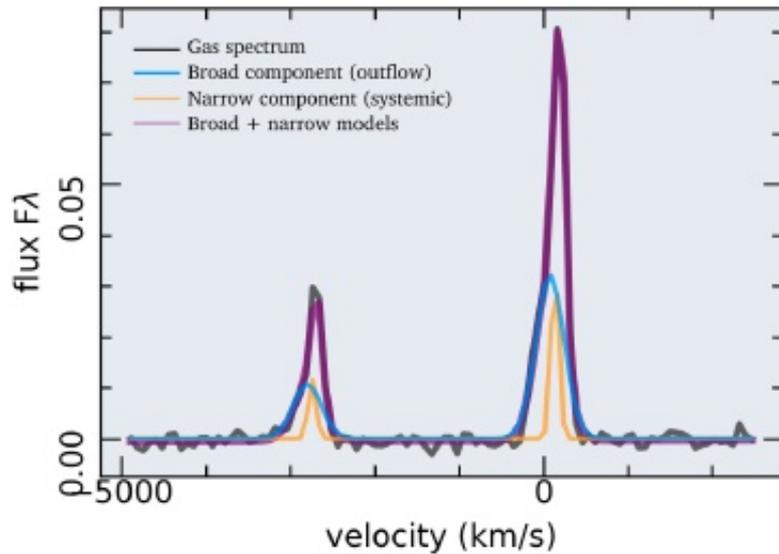
Разложение на компоненты – в рамках заданной модели, согласующейся с другой информацией об объекте

АФАНАСЬЕВ и др.

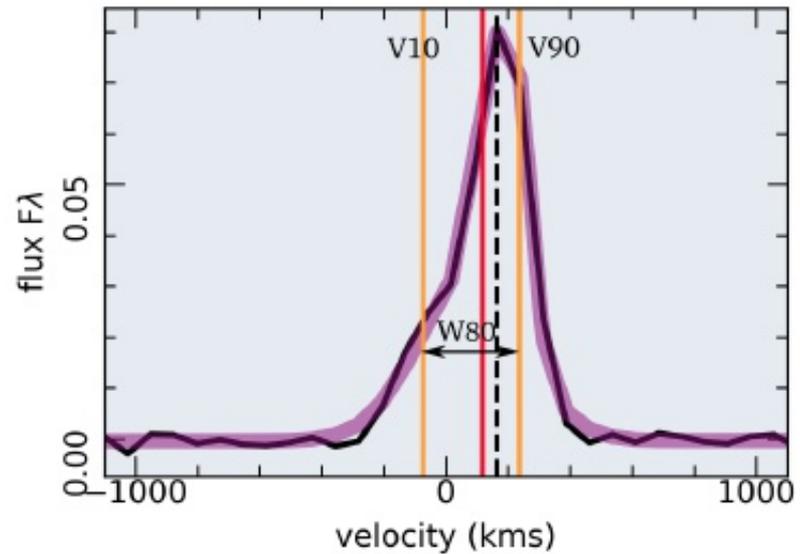


Mrk 938 – ветер из активного ядра  
И в эмиссии, и в абсорбции

# Непараметрические методы



$$v_{\text{out}} = v_{\text{max}} + 0.5\sigma_{\text{broad}},$$



$$w_{80} = v_{90} - v_{10}$$

$$v_{\text{out}} = w_{80}/1.3.$$

$V_{10}$  – содержится 10% потока в линии...

# Ионизованный газ в галактиках

Определение физических параметров ионизованного газа по отношению потоков в линиях с разными условиями возбуждения

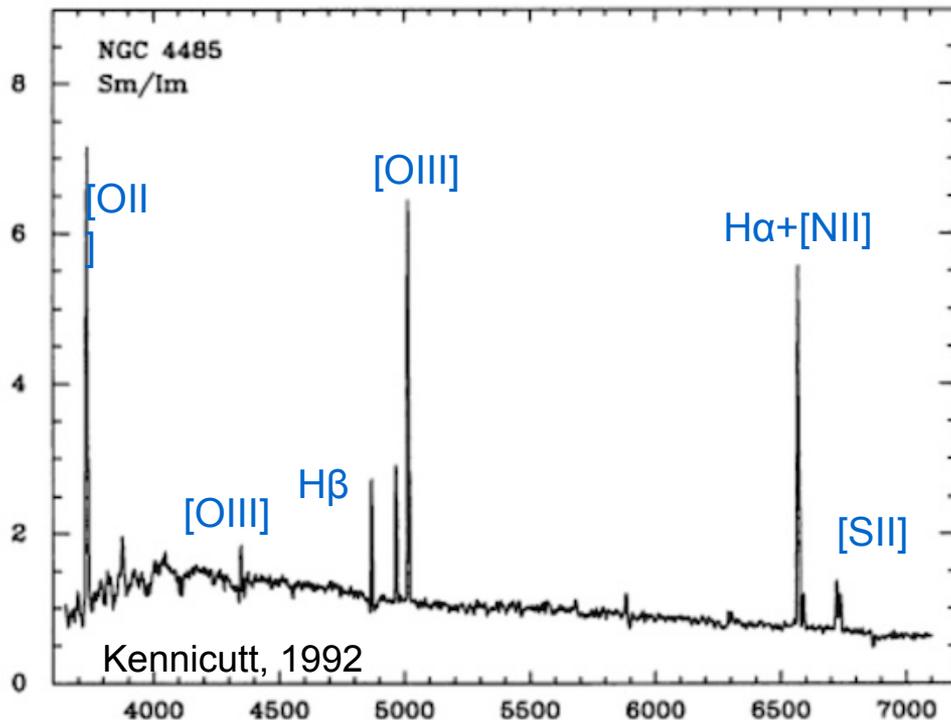
Электронная температура:  
 $T_e: [\text{O III}] (\lambda 4959 + \lambda 5007) / \lambda 4363$   
 $[\text{O II}] (\lambda 3727 + 3729) / (\lambda 7320 + 7330)$

Электронная плотность:  
 $n_e: [\text{S II}] \lambda 6717 / \lambda 6731$

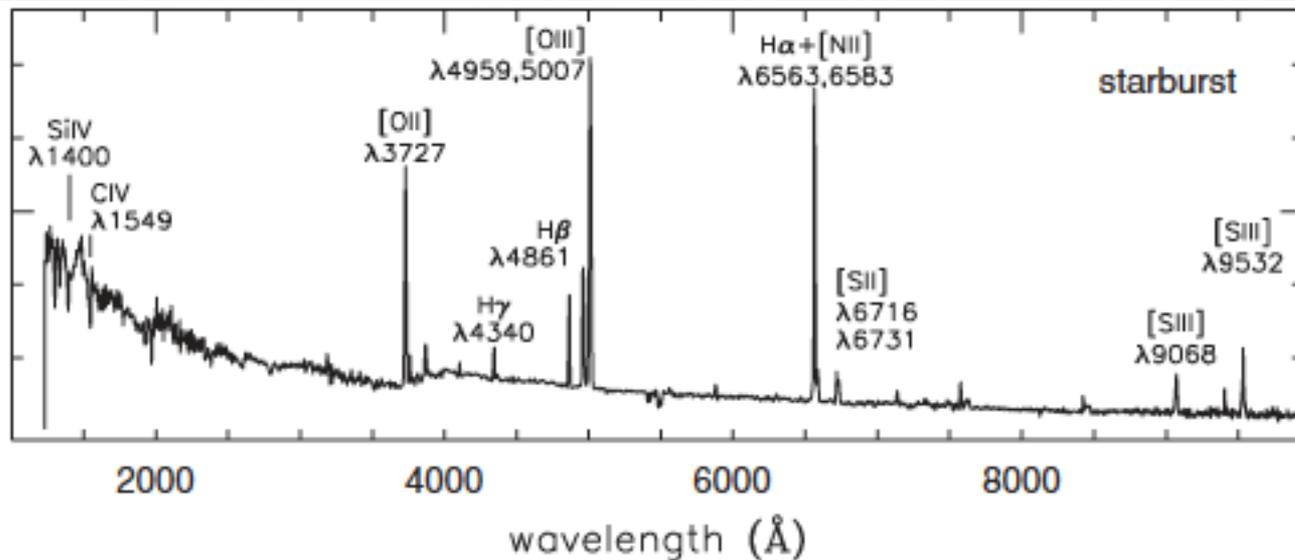
Обилие тяжелых элементов  $Z$ :  
 $(\lambda 3727 + 3729) / \text{H}\beta$ ,  $[\text{N II}] \lambda 6583 / \text{H}\alpha \dots$

Источники ионизации газа:  
 $[\text{N II}] \lambda 6583 / \text{H}\alpha$   
 $[\text{S II}] \lambda 6717, 6731 / \text{H}\alpha$   
 $[\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta$

Межзвездное поглощение:  
 $\text{H}\alpha / \text{H}\beta \dots$



# Ионизованный газ: диагностика

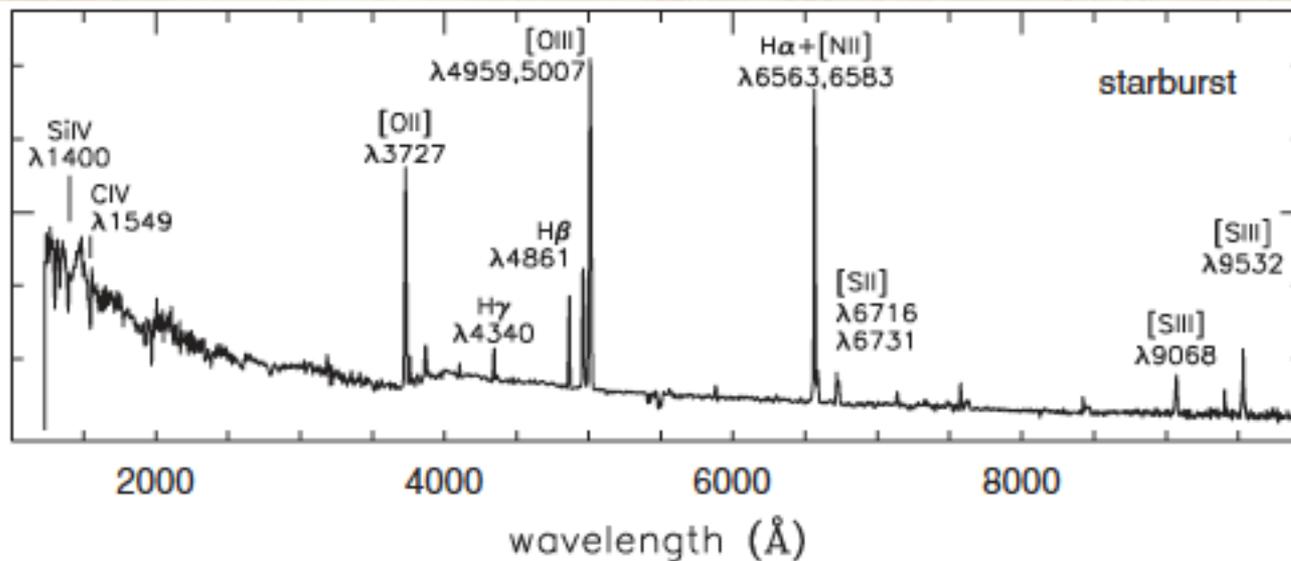


Рекомбинационные линии водорода:  $H\alpha$ ,  $H\beta$

Запрещенные линии ионов: [O I], [O II], [O III], [S II], [N II]

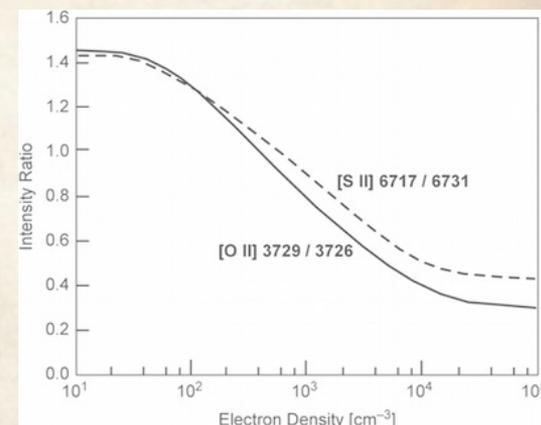
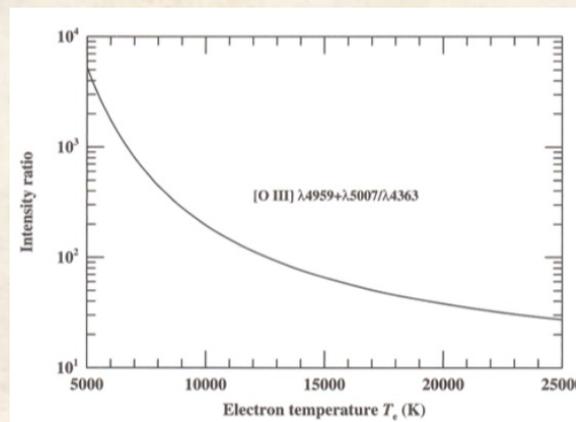
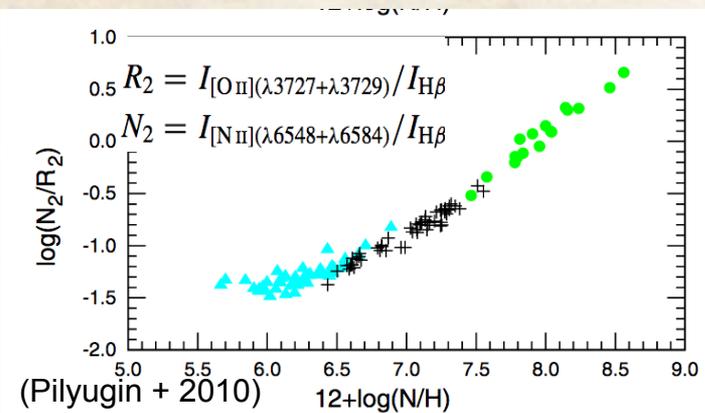
Разрешенные линии ионов: CIV, Si IV,

# Ионизованный газ: диагностика



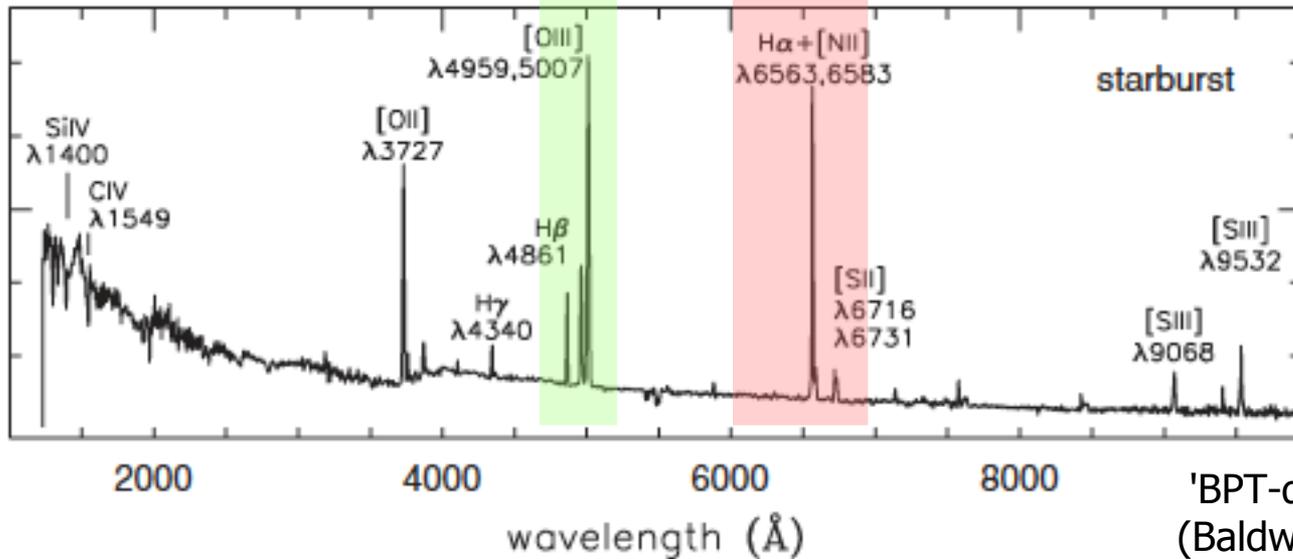
- $A_V$
- $n_e$
- $T_e$
- $[Z/H]$
- excitation mechanisms

$$E(B - V) = \frac{2.5}{k(\lambda_{H\beta}) - k(\lambda_{H\alpha})} \log_{10} \left[ \frac{(H\alpha/H\beta)_{\text{obs}}}{(H\alpha/H\beta)_{\text{int}}} \right]$$

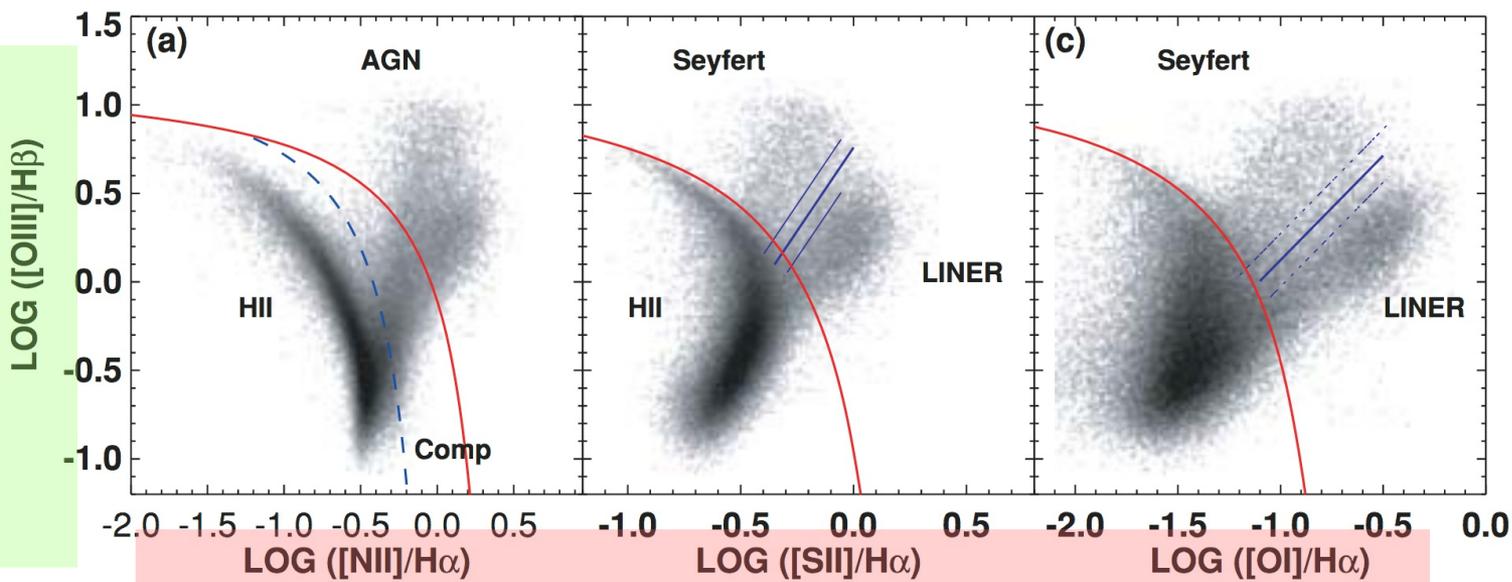


(Osterbrock 1989)

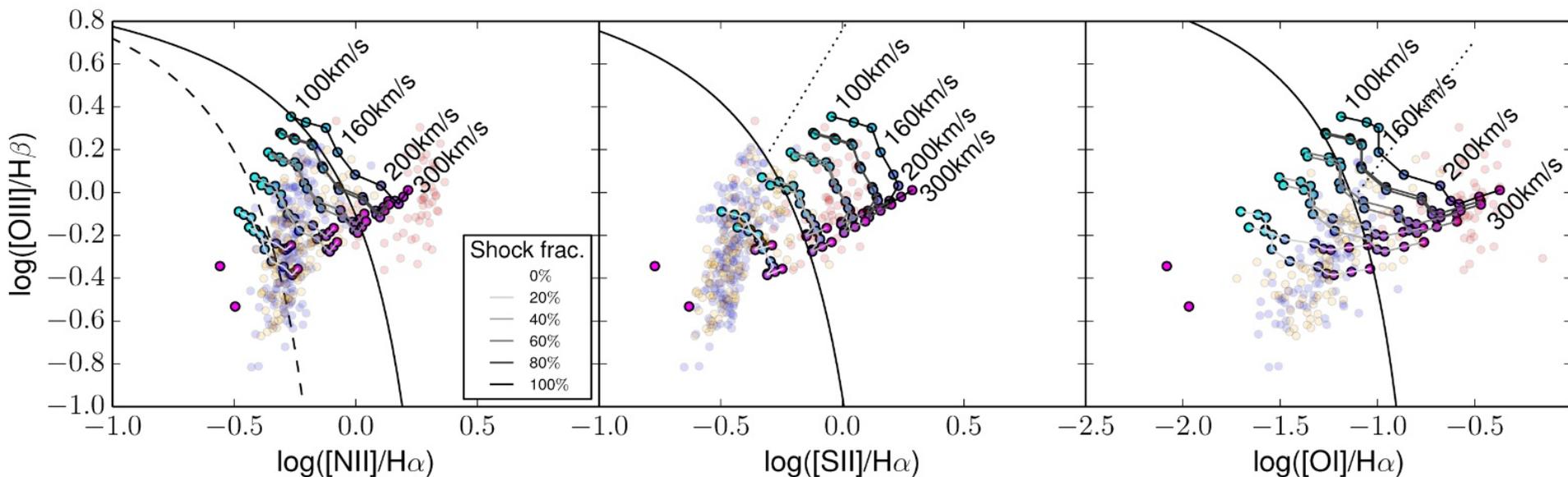
# Ионизованный газ: BPT-диаграммы



'BPT-diagrams'  
(Baldwin, Phillips & Telervich, 1981)



# То же, но с моделями ударной ионизации

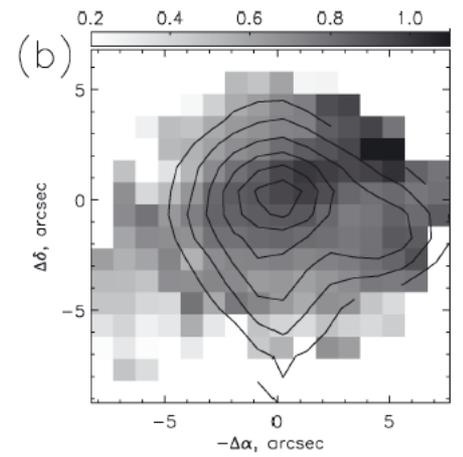
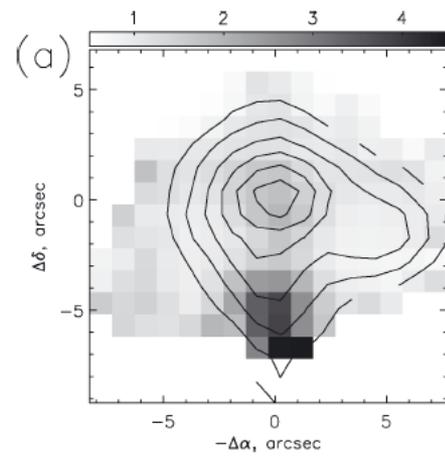
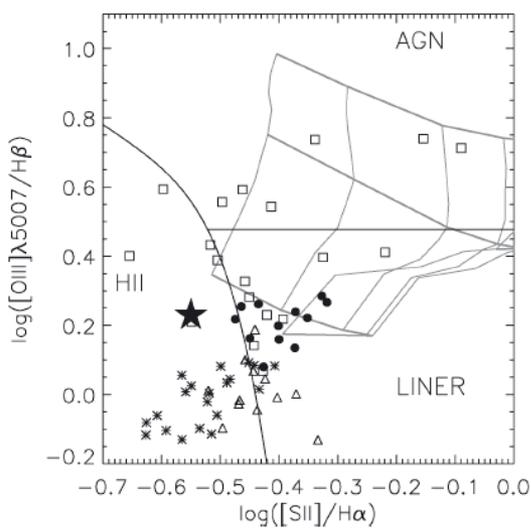
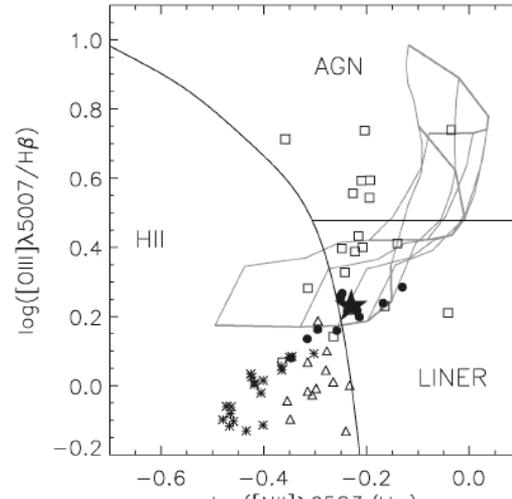
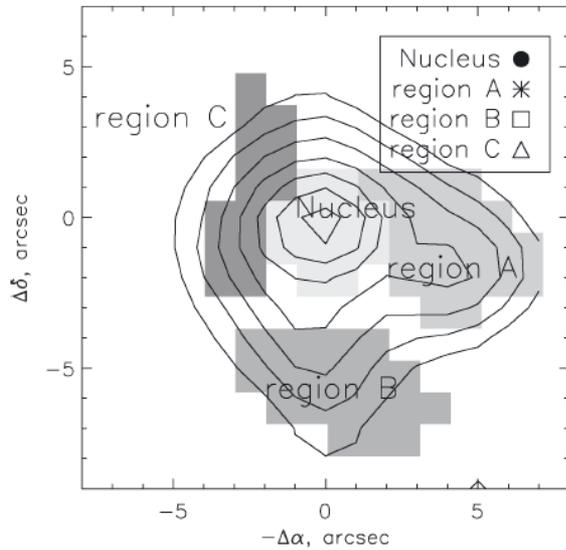


Т.е. карта отношений линий позволяет определить тип источника ионизации газа в разных областях наблюдаемого поля:

- звездообразование
- ударные волны
- УФ-континуум от активного галактического ядра

# Карты областей с разным возбуждением

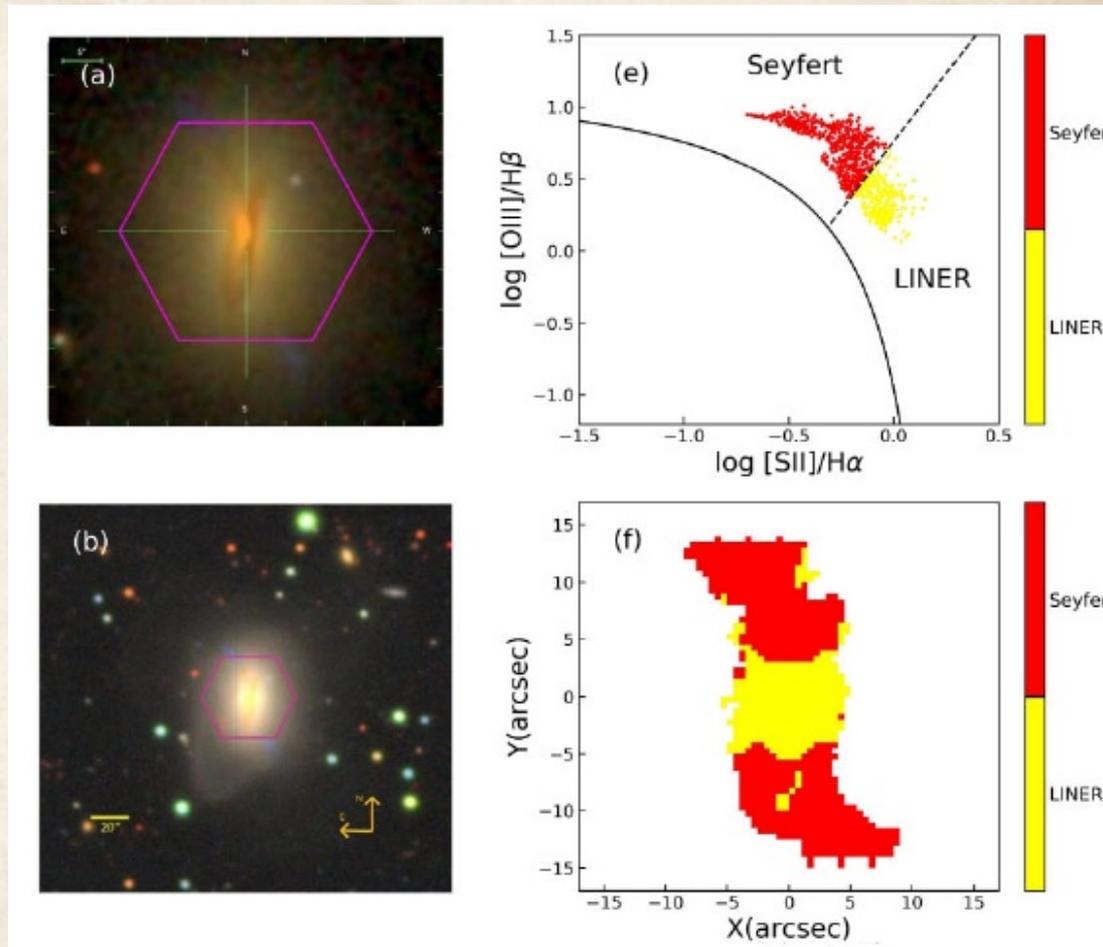
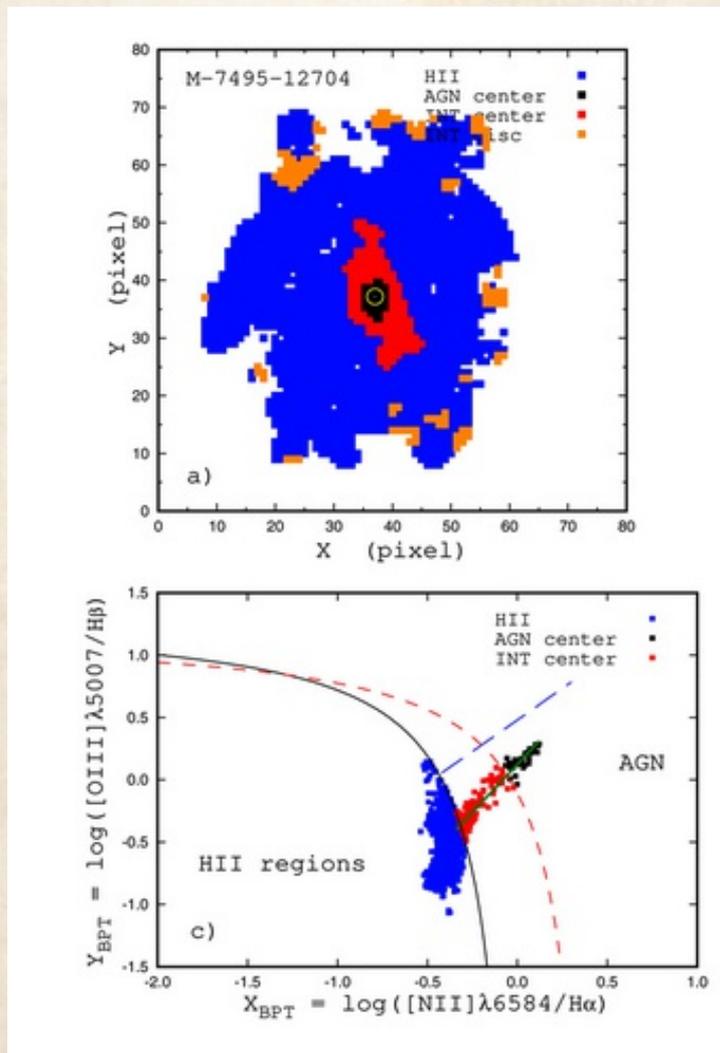
*A. Smirnova and A. Moiseev*



**Figure 8.** Map of the  $[O\text{ III}]\lambda 5007/H\beta$  (a) and  $[S\text{ II}]\lambda 6731/6717$  (b) line ratios. The  $[O\text{ III}]\lambda 5007$  isophotes are overlapped. In the case of sulphur

# Карты областей с разным возбуждением

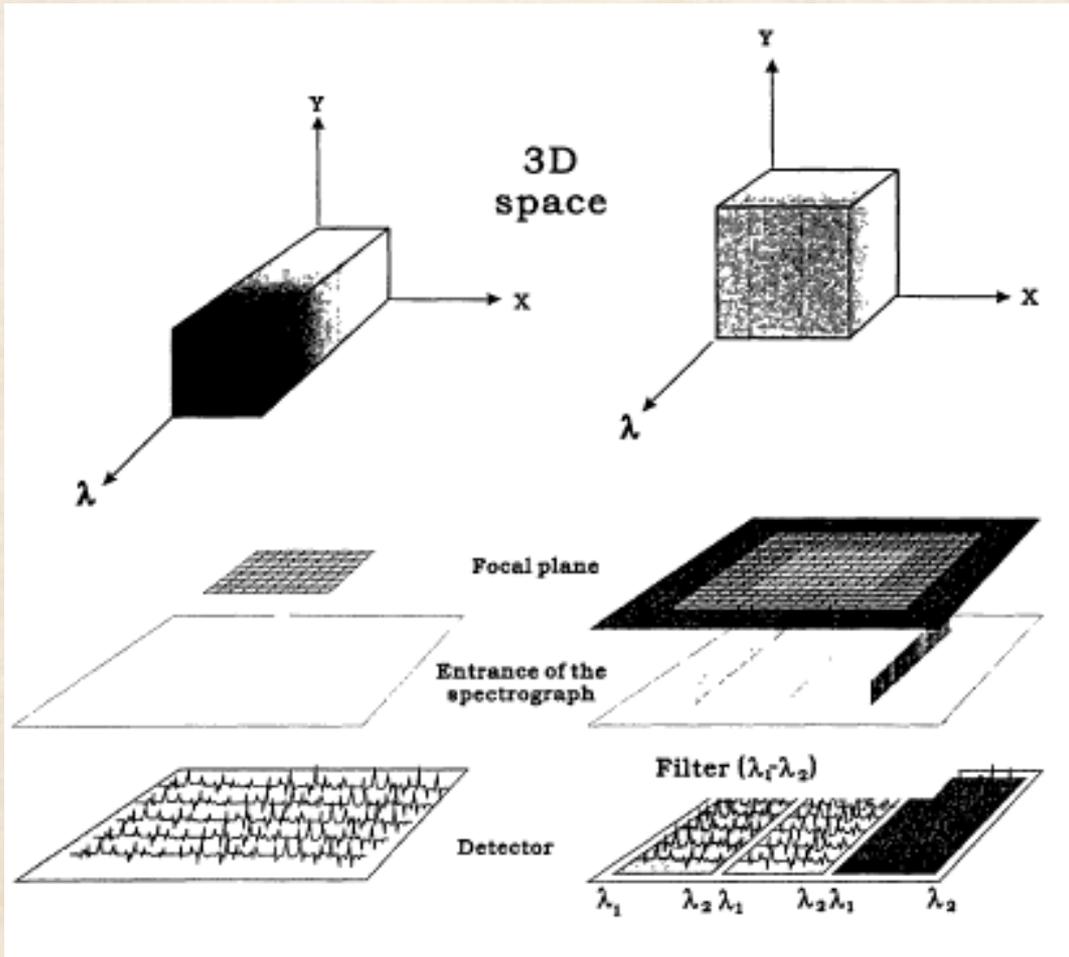
spatially resolved BPT diagram / excitation map



Mo + 2024

Pilyugin + 2020

# Несколько псевдощелей

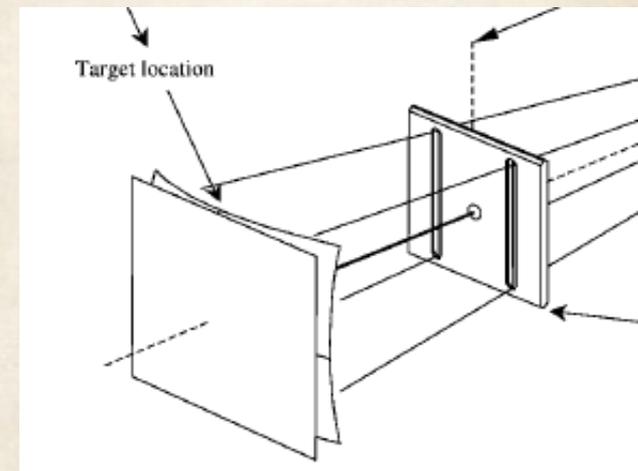


Каждая щель – свой спектрограф (VIMOS – лекция 2)

IFU с двумя псевдощелями:

SCORPIO-2 (Afanasiev et al 2018)

GMOS (Allington-Smith et al 2002)



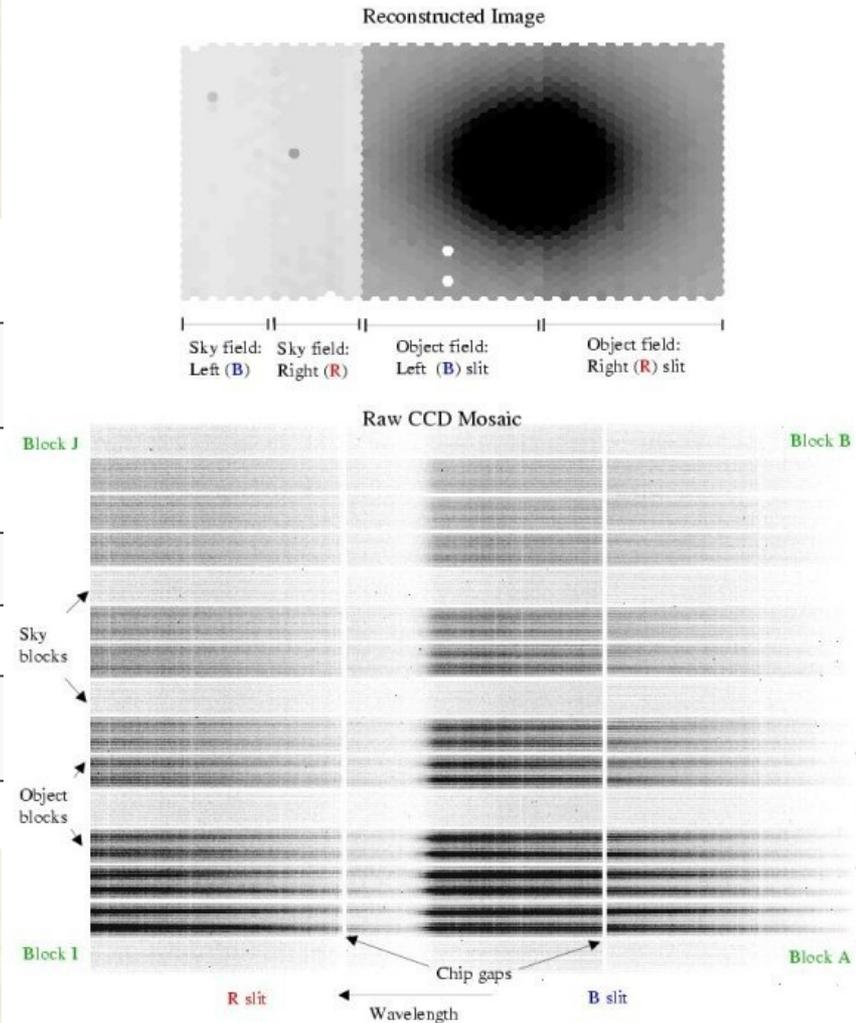
Arribas & Mediavilla (2000):  
Переход от 3 щелям к одной:  
Проигрыш в FOV – выигрыш в  $\Delta\lambda$

# Gemini Multiobject Spectrograph

Первый 3D спектрограф на 8м телескопе  
ЛИНЗЫ+ВОЛОКНА

Projected diameter of individual lenses	0.2"	
Two-slit mode	all fibers used (half in each field) for maximum FOV, but with limited spectral coverage	
One-slit mode	half the number of fibers and FOV for extended wavelength coverage	
<b>Fields of View (FOV):</b>	<b>two-slit mode:</b>	<b>one-slit mode:</b>
"Object" FOV	5" x 7" (1000 lenslets)	5" x 3.5" (500 lenslets)
Nod & Shuffle FOV (GMOS-S only)	5" x 5" (700 lenslets)	5" x 2.5" (350 lenslets)
"Sky" FOV	5" x 3.5" (500 lenslets)	5" x 1.75" (250 lenslets)

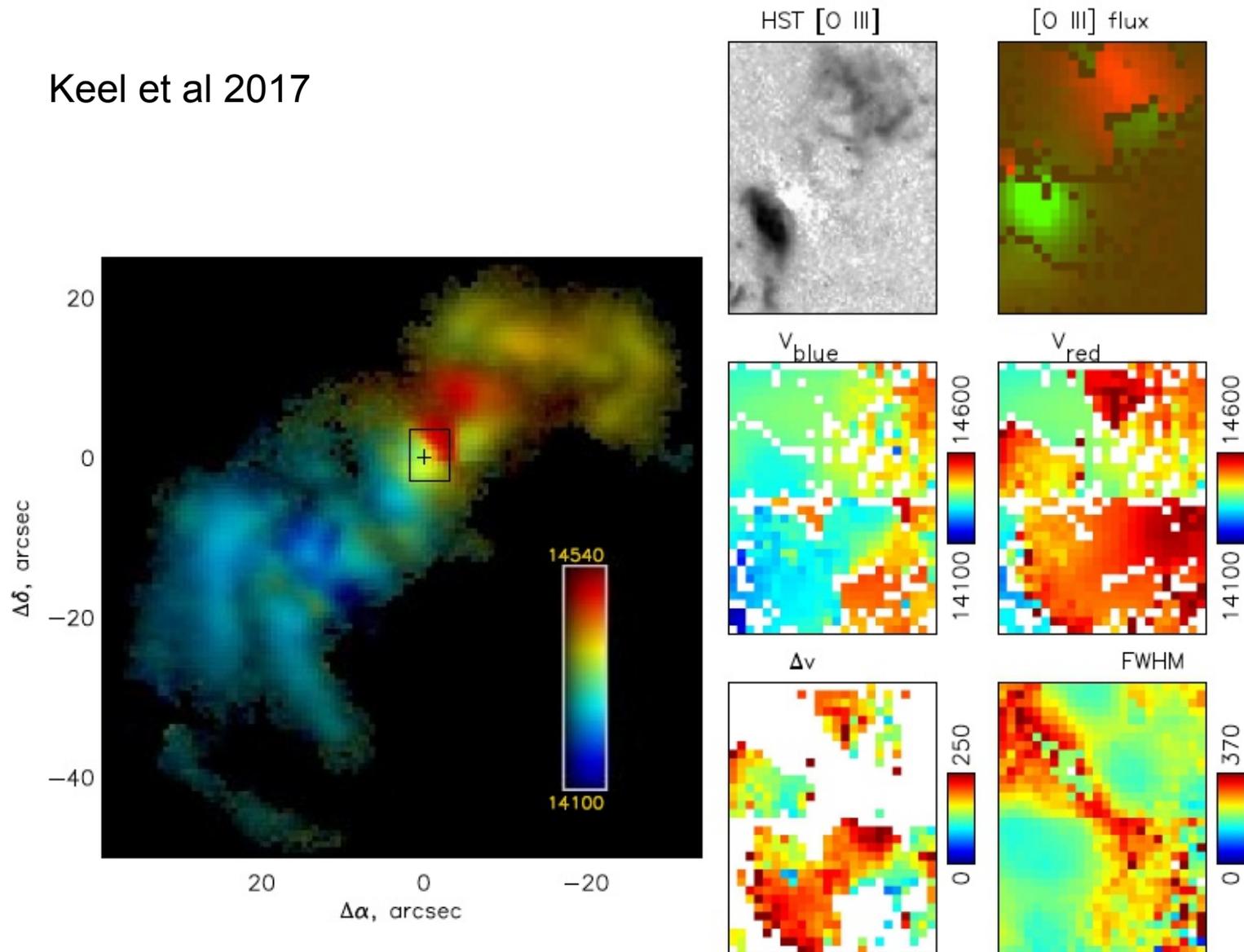
GMOS IFU Example Data: NGC 221



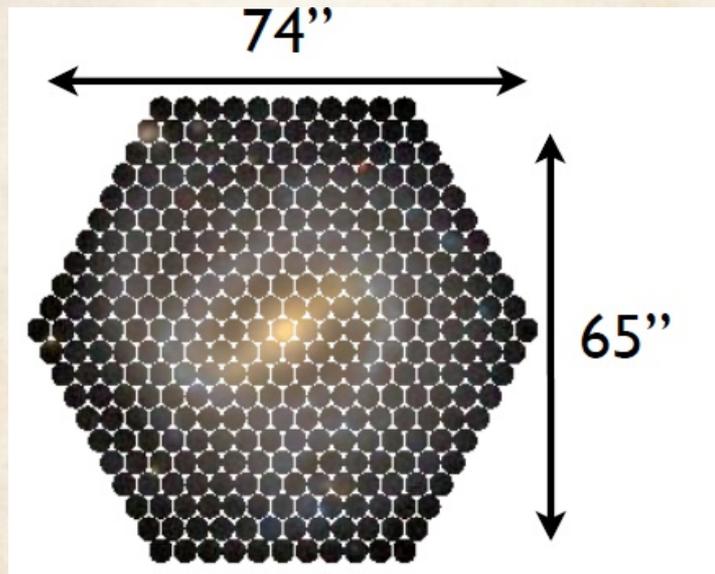
Вычитание неба части переключениями между объектом и небом, с одновременным смещением заряда на ПЗС

# Активные ядра галактик: БТА (ИФП)+ GMOS

Keel et al 2017

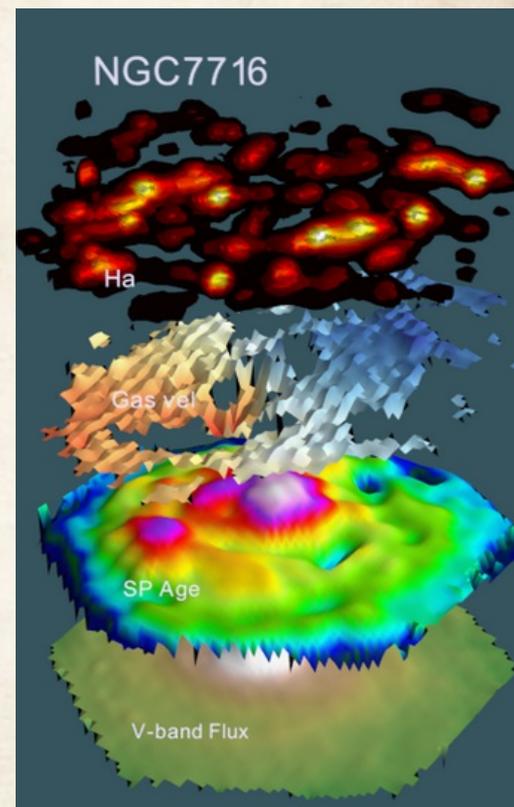
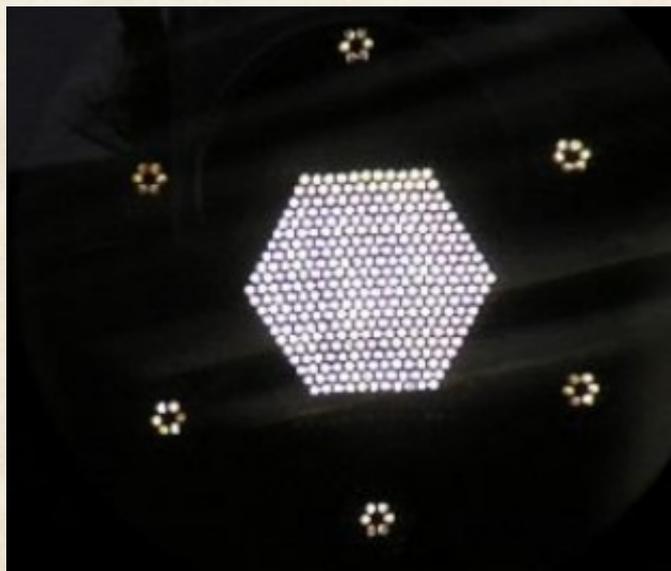


# Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area survey

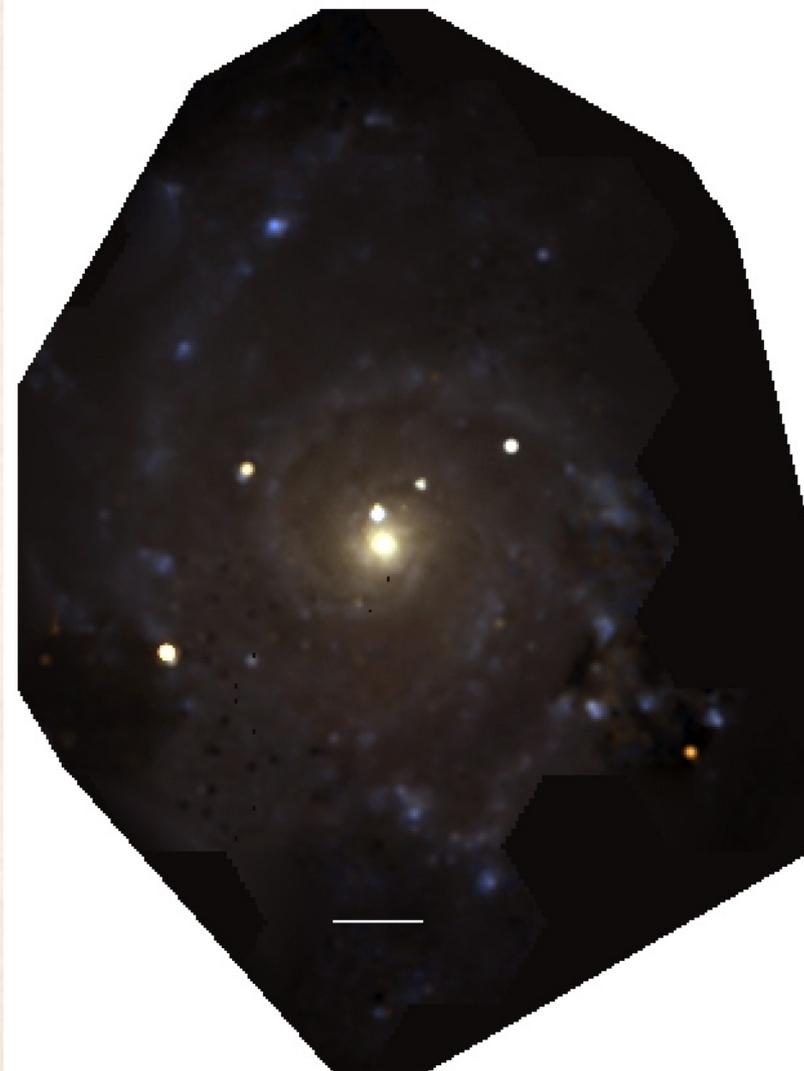
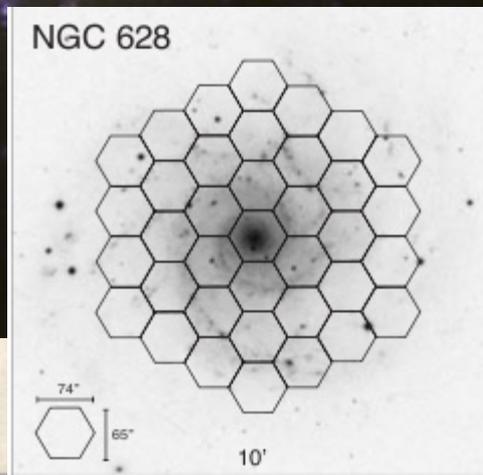
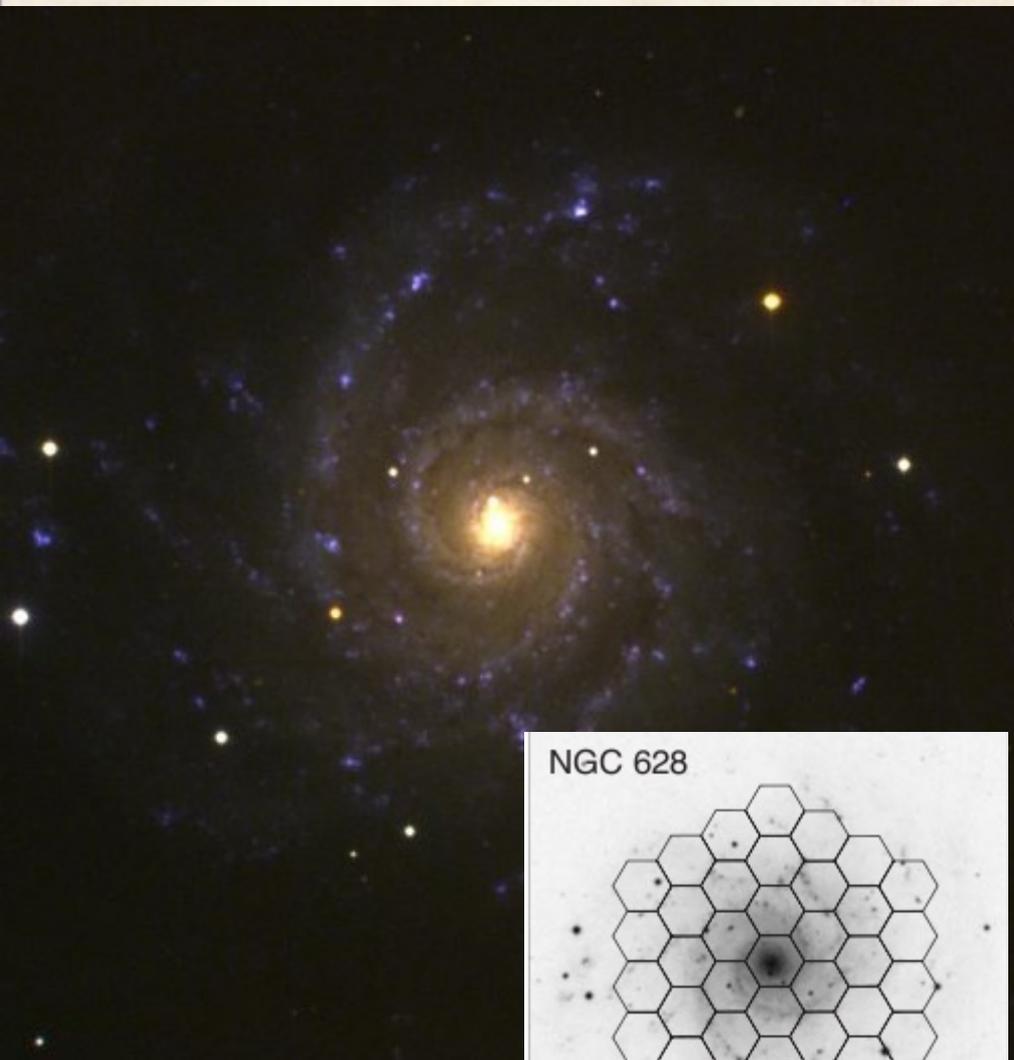


CALIFA:  
PMAS/PPAK 3.5 m Calar Alto  
331 spaxels (2.7 arcsec)

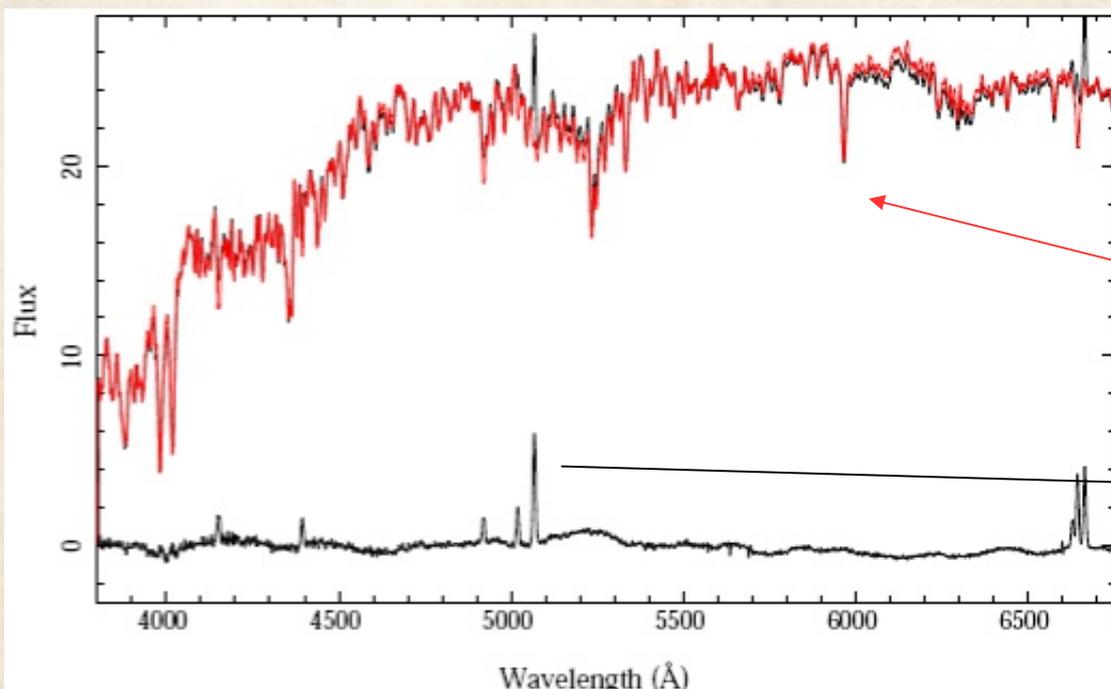
Два диапазона:  
4300-7000 AA R=850  
3700-5000 AA at R=1650



# РРАК – мозаика спектров в галактике NGC 628



# CALIFA: декомпозиция спектров



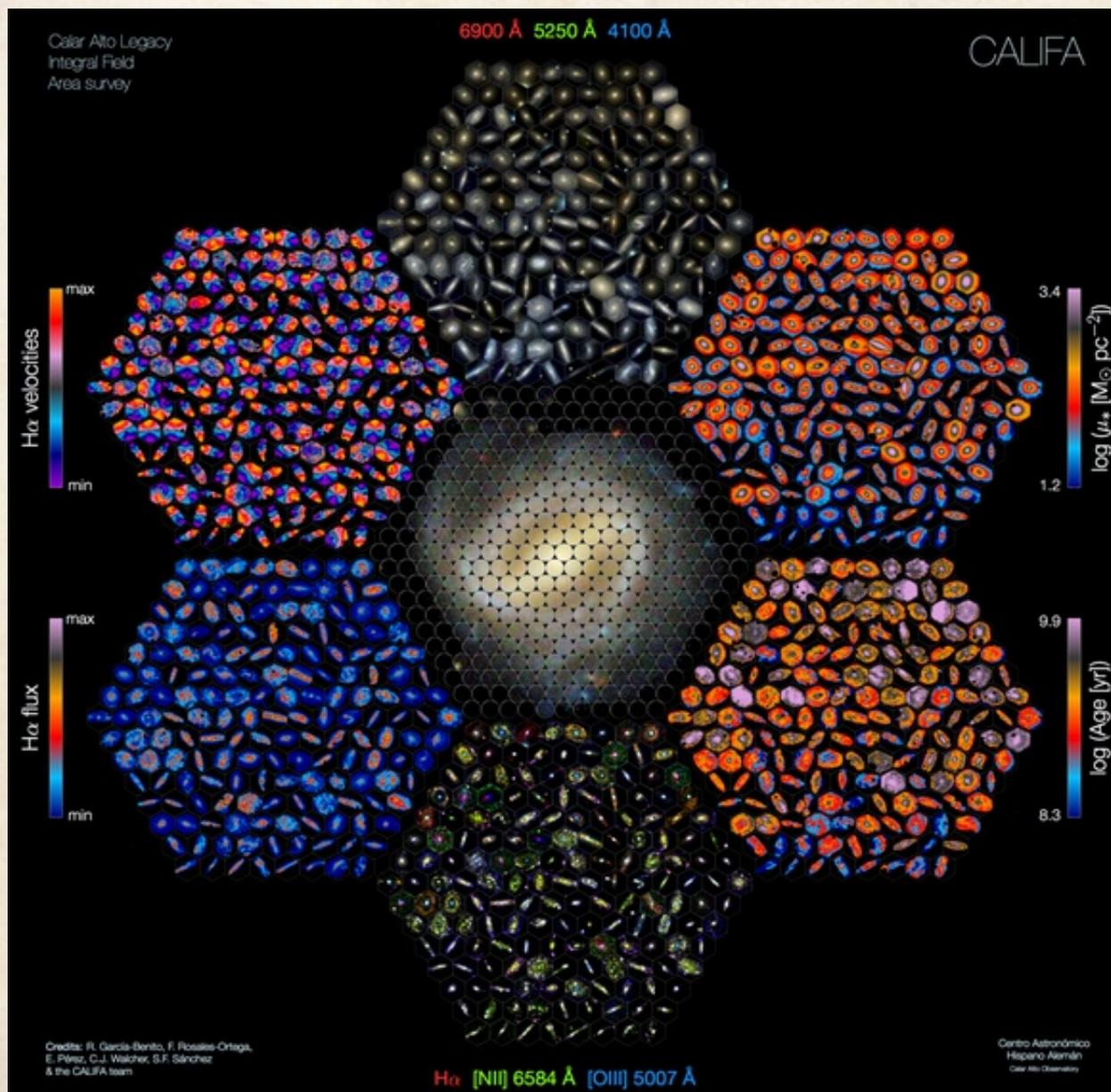
SSP (single stellar population):  
- кинематика звезд (velocity,  $\sigma$ )  
- возраст (T), металличность (Z)

По эмиссионным линиям:  
Te, [O/H], тип ионизации

Спектры сопровождаются “спектрами ошибок” - важно для оценок ошибок модельных параметров

HDU	Extension name	Format	Content
0	Primary	32-bit float	flux density in units of $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$
1	ERROR	32-bit float	$1\sigma$ error on the flux density
2	ERRWEIGHT	32-bit float	error weighting factor
3	BADPIX	8-bit integer	bad pixel flags (1 = bad, 0 = good)

# CALIFA: данные для ~900 галактик в свободном доступе

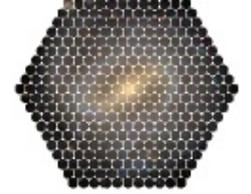


Включая софт для  
анализа и  
визуализации

Кубы, карты  
параметров и их  
ошибок

# Kinematics and morphology

AYKALI



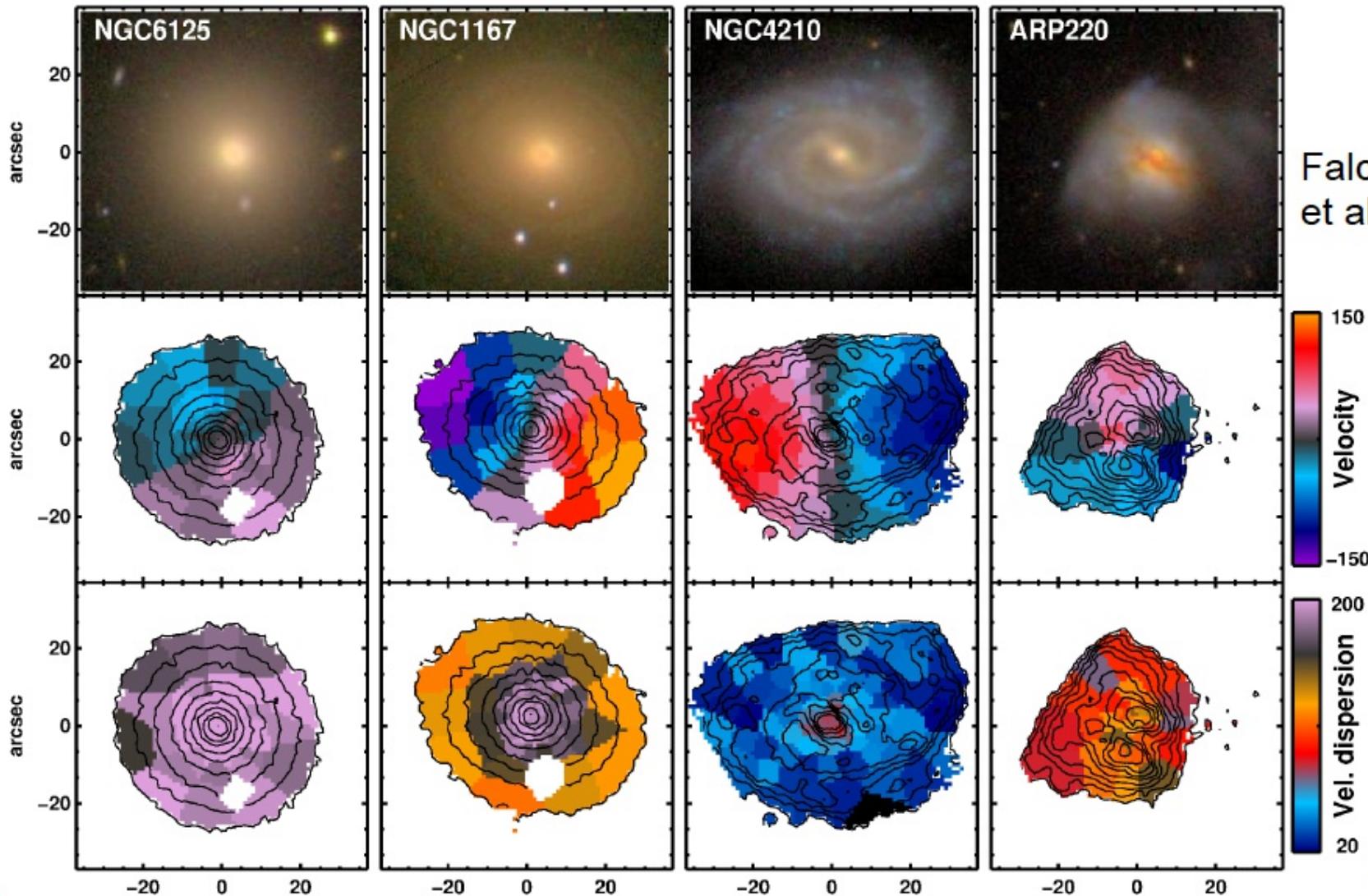
CALIFA Survey

Ellipse

Spiral

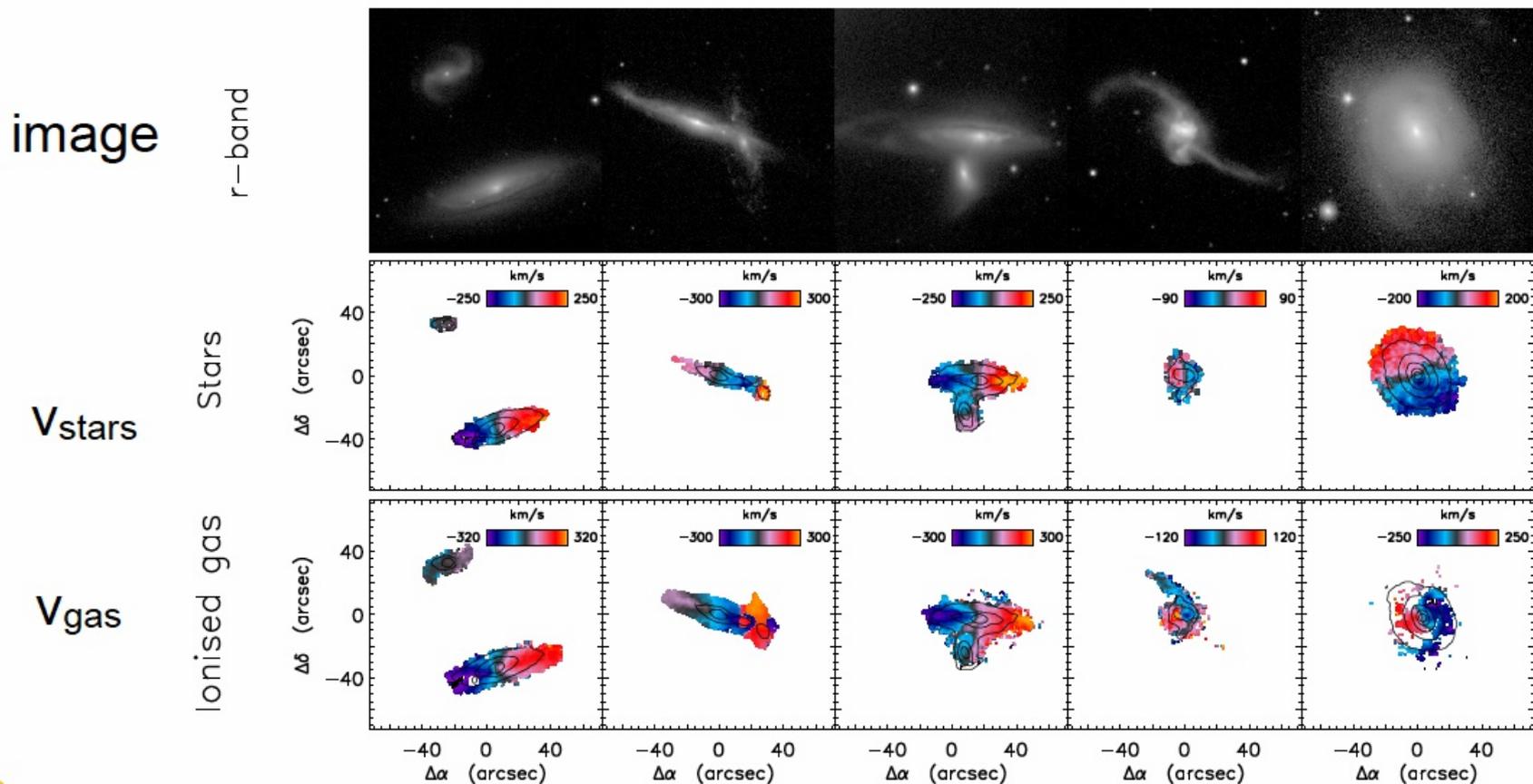
Late Spiral

Irregular



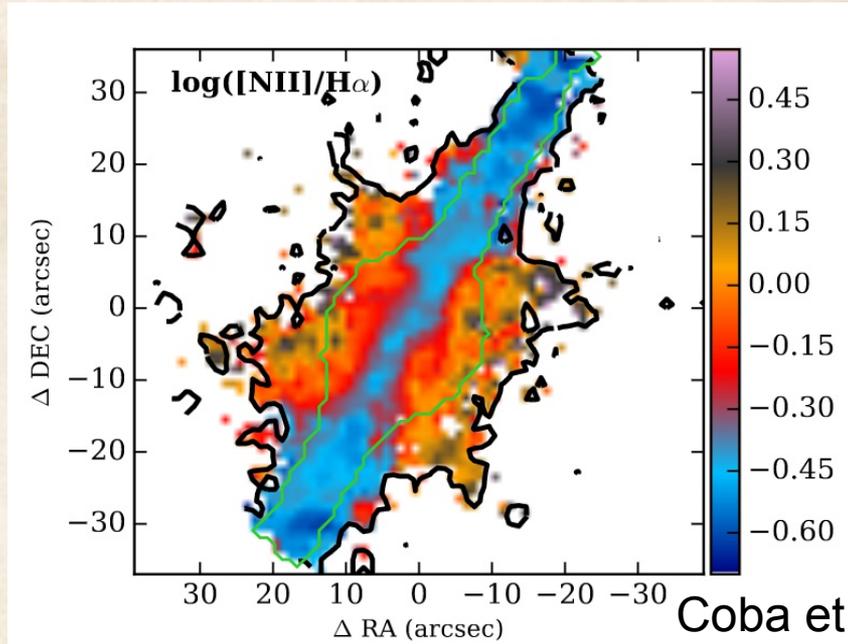
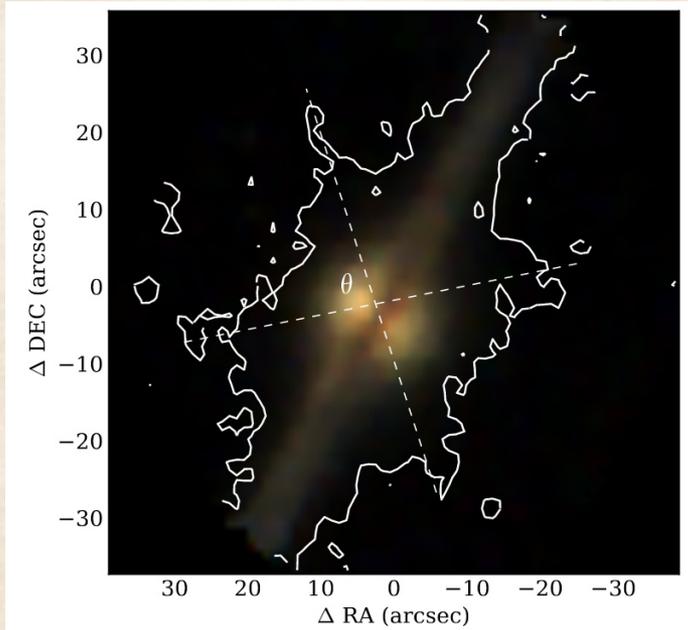
Falcon-Barros  
et al., subm.

# Merger stages

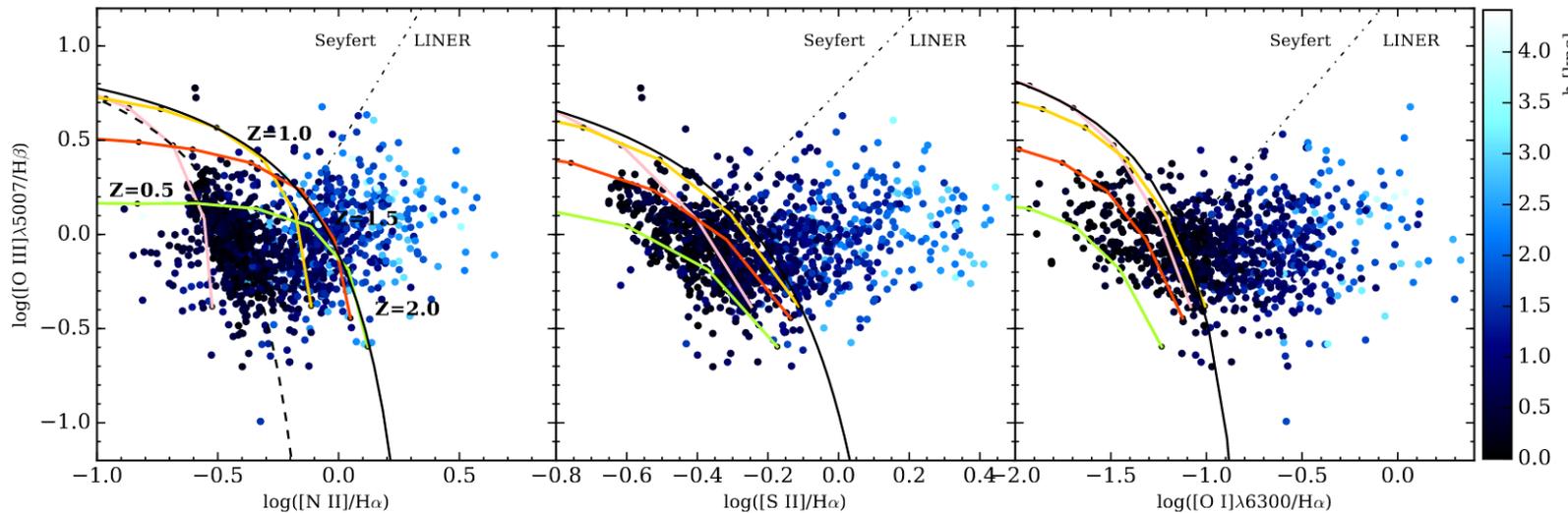


Barreras-Ballesteros et al. (2015)

# UGC 100043: галактический ветер



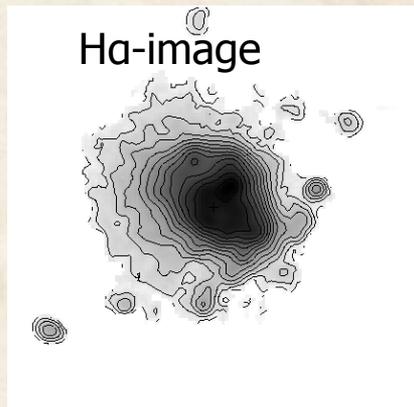
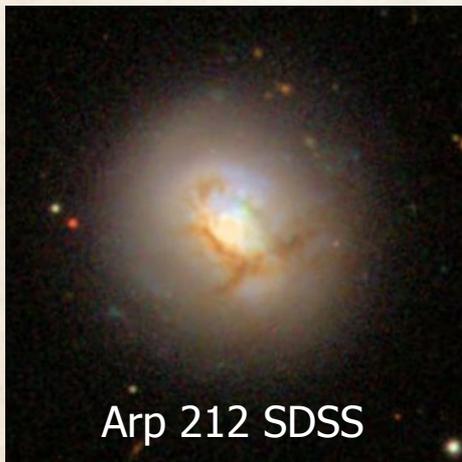
Coba et al 2017



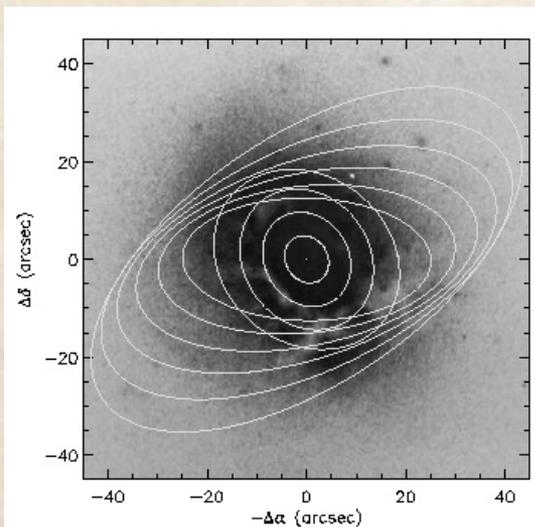
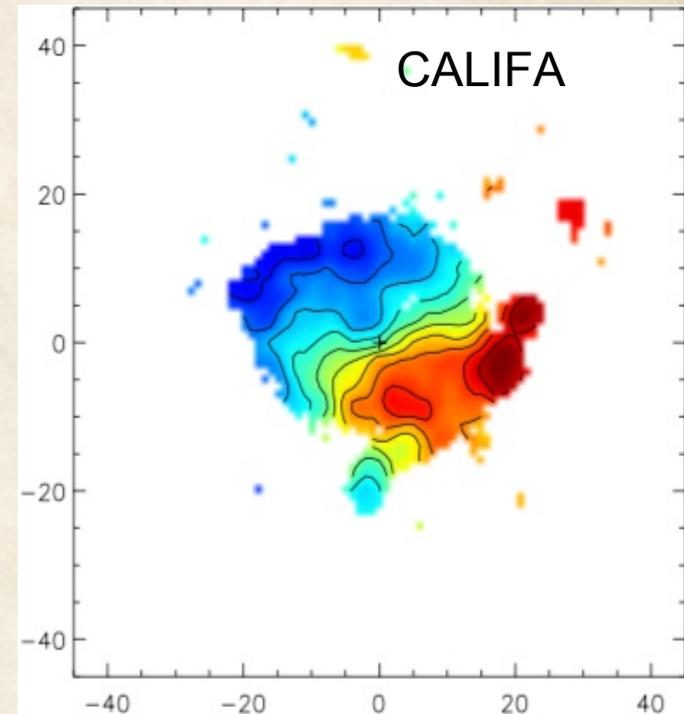
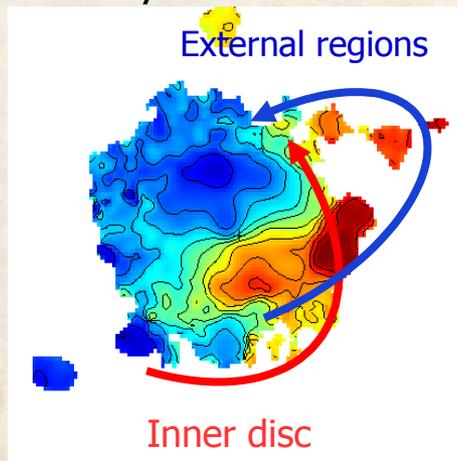
# CALIFA: проблемы (плата за большое поле)

Низкое спектральное и пространственное разрешение - можем пропустить много интересного в поле зрения

БТА - ИФП



Velocity field

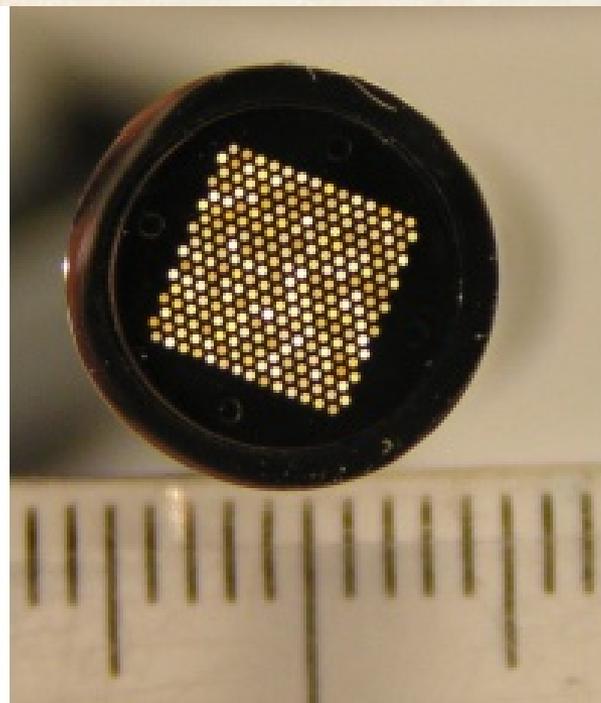


Moiseev (2008)

# VIRUS-P (Visible Integral-field Replicable Unit Spectrograph - Prototype)



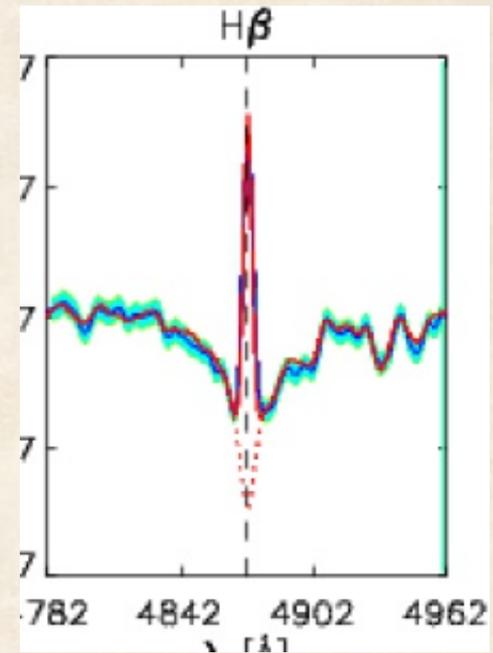
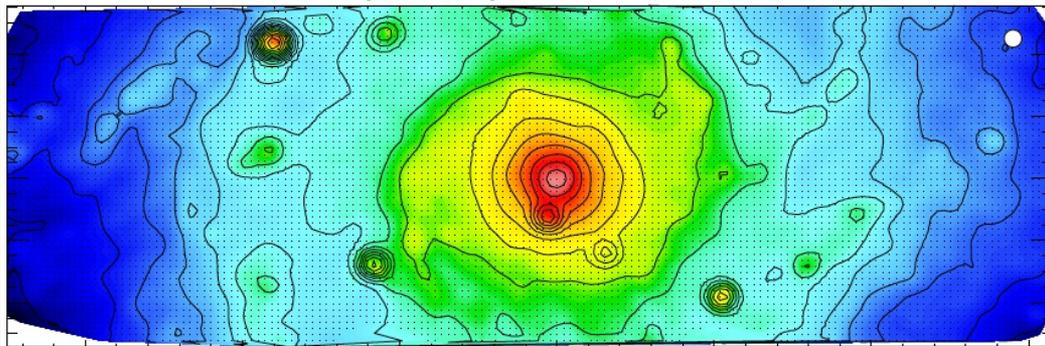
McDonald 2.7 m  
FOV 1.7x1.7 arcmin  
246 fibers, 4.2"



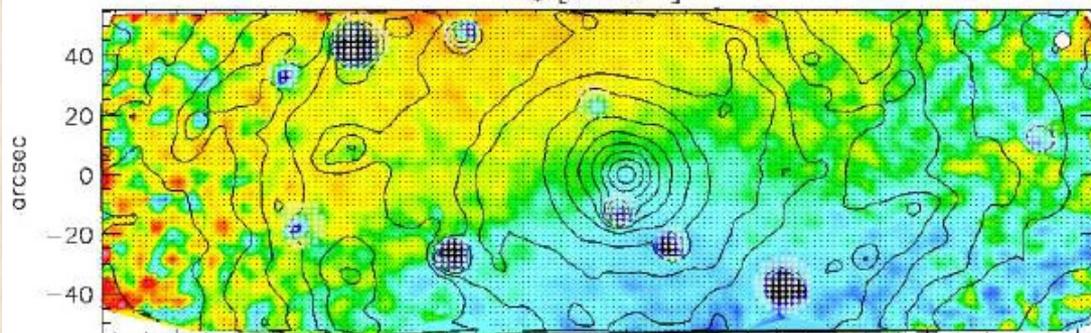
Hill et al 2008

<b>Resolution</b>	<b>Spectral Coverage</b>	<b>Range of coverage</b>
5.3 Å	-2240 Å	3400 - 6850 Å
1.6 Å	-609 Å	-3400 - -6000 Å
1.0 Å	-420 Å	3400 - 4395 Å
1.5 Å	-650 Å	-5500 - 6850 Å

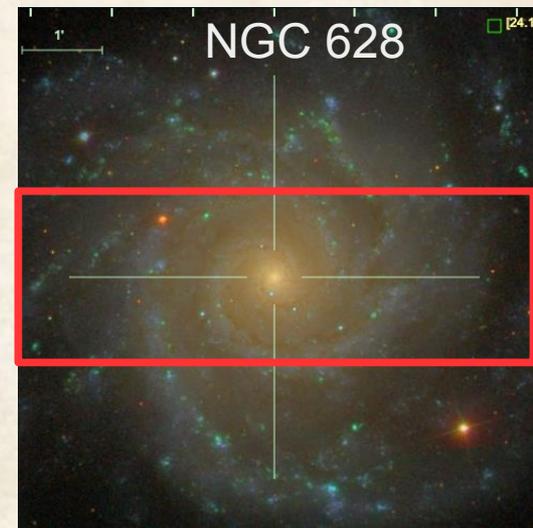
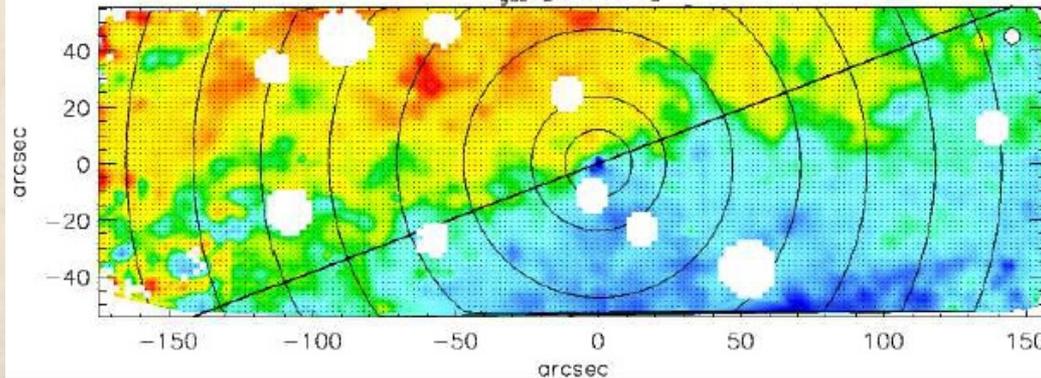
# VIRUS-P: большое поле+ высокое сп. разрешение



$v_*$  [km s $^{-1}$ ] Blanc et al 2013

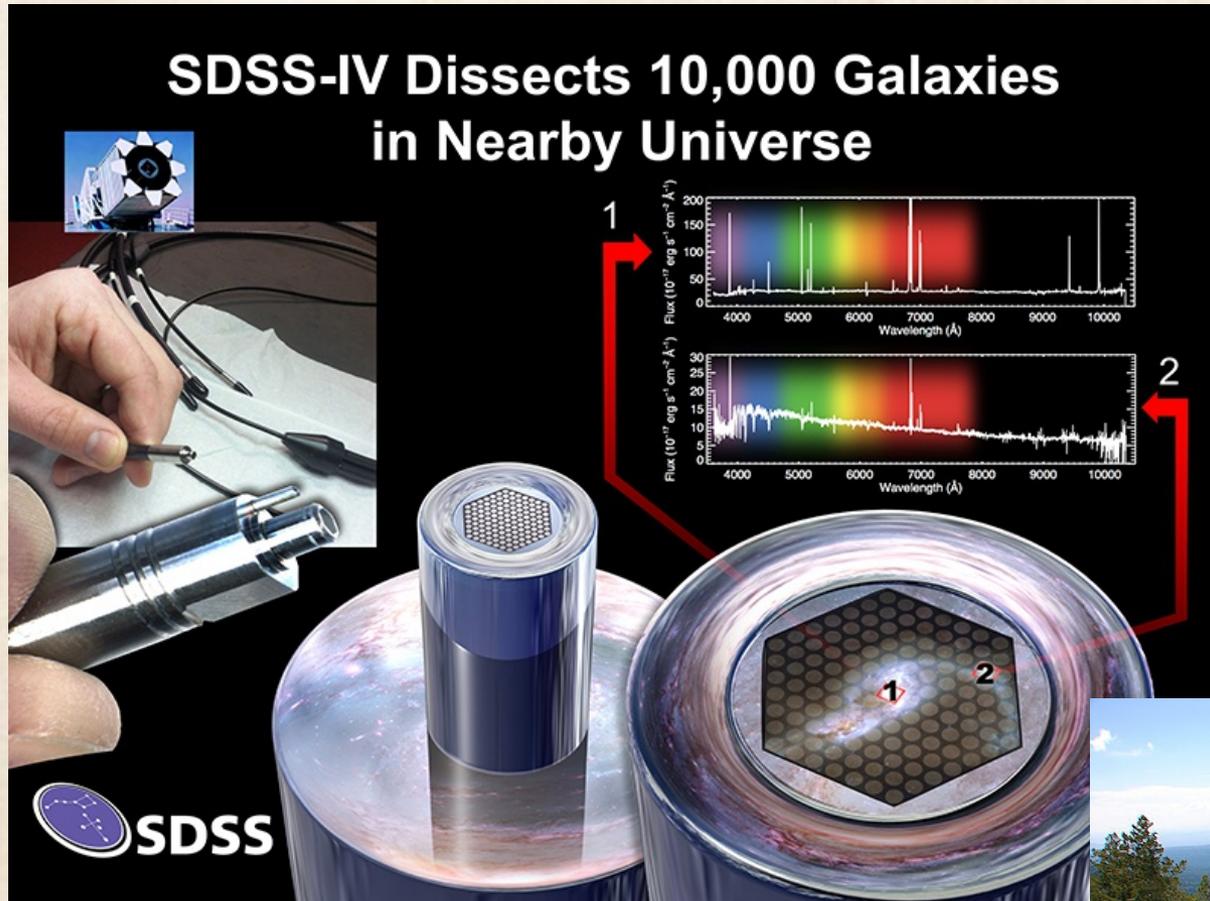


$v_{\text{gas}}$  [km s $^{-1}$ ]

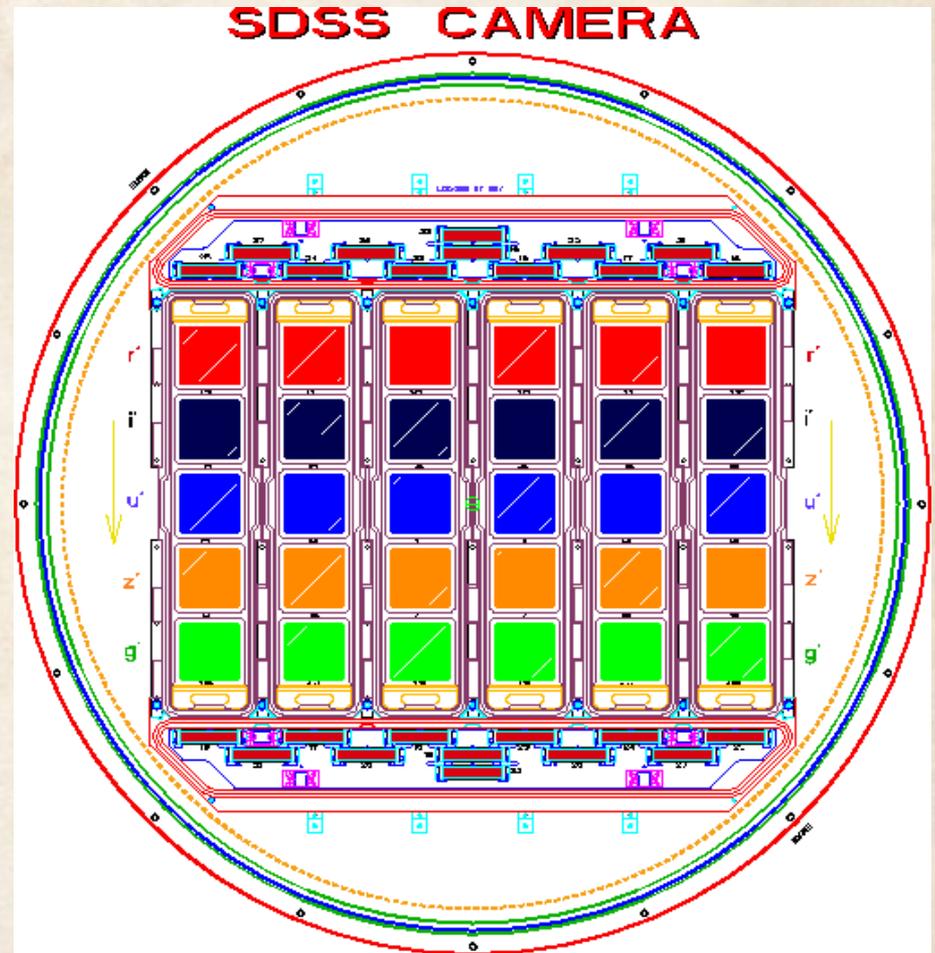
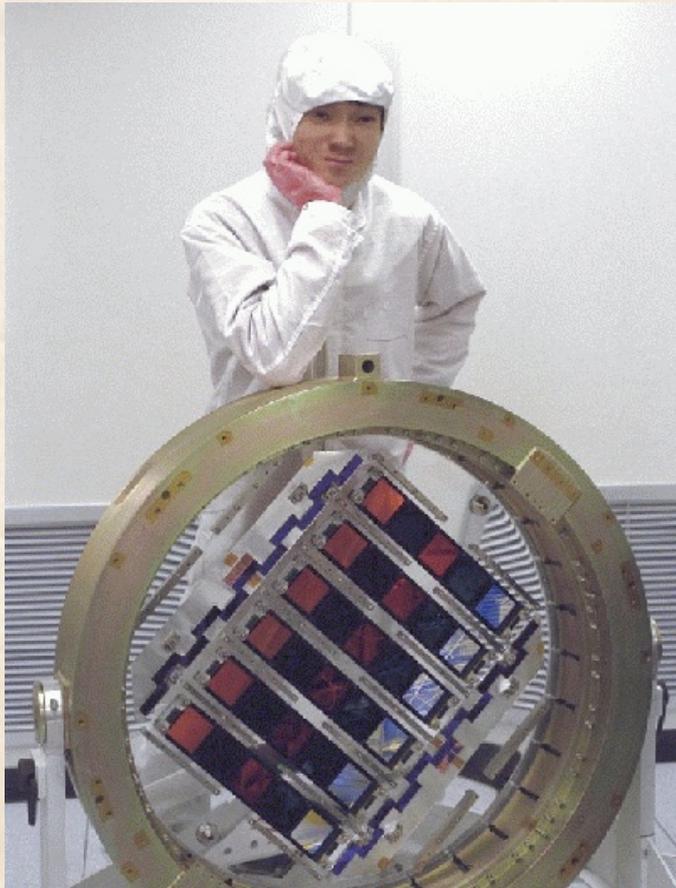


# MaNGA: Mapping Nearby Galaxies at APO

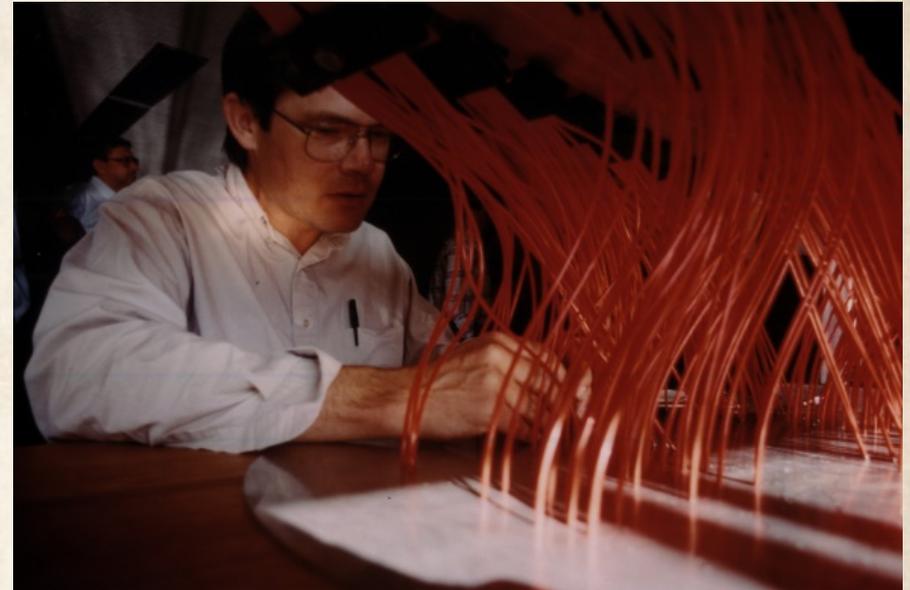
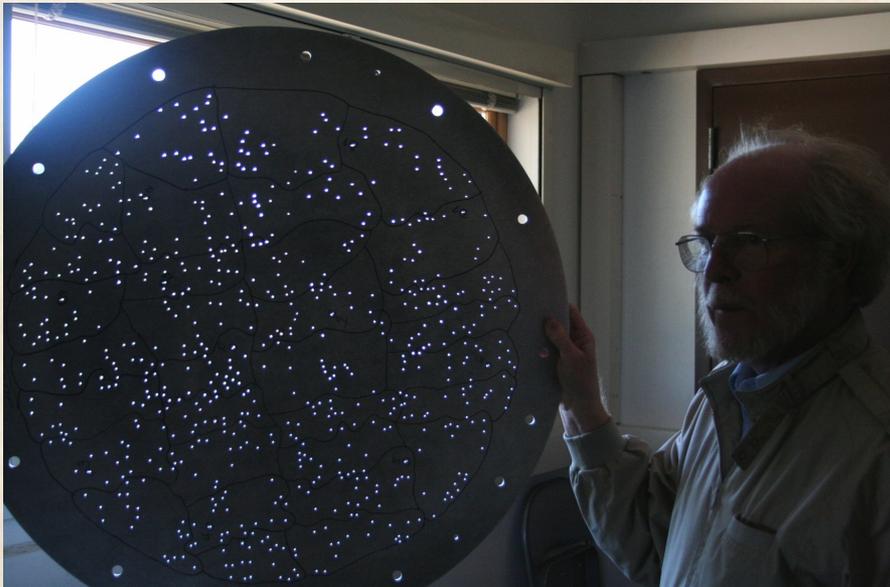
2.5-m APO



# SDSS: Изображения – дрейфовое сканирование



# Спектры – волоконная маска



1000 световолокон за раз

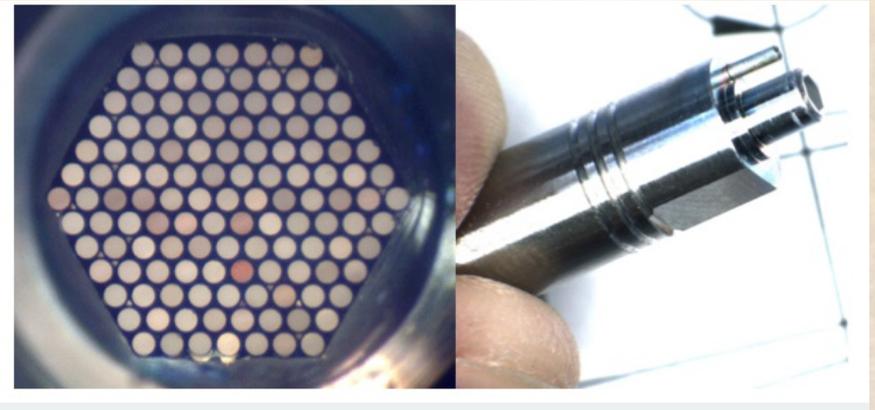
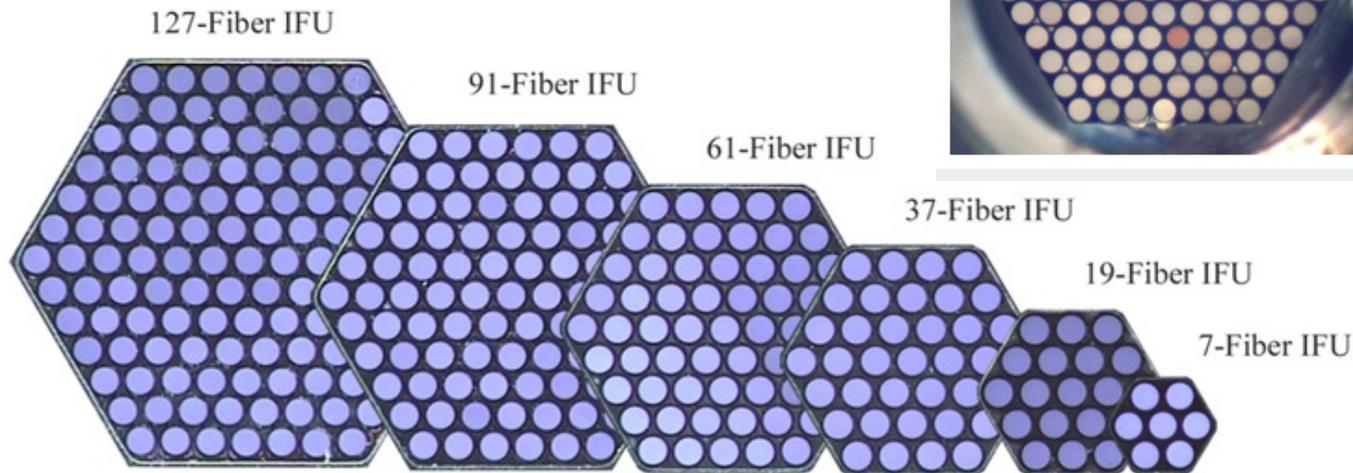


# MaNGA: IFUs

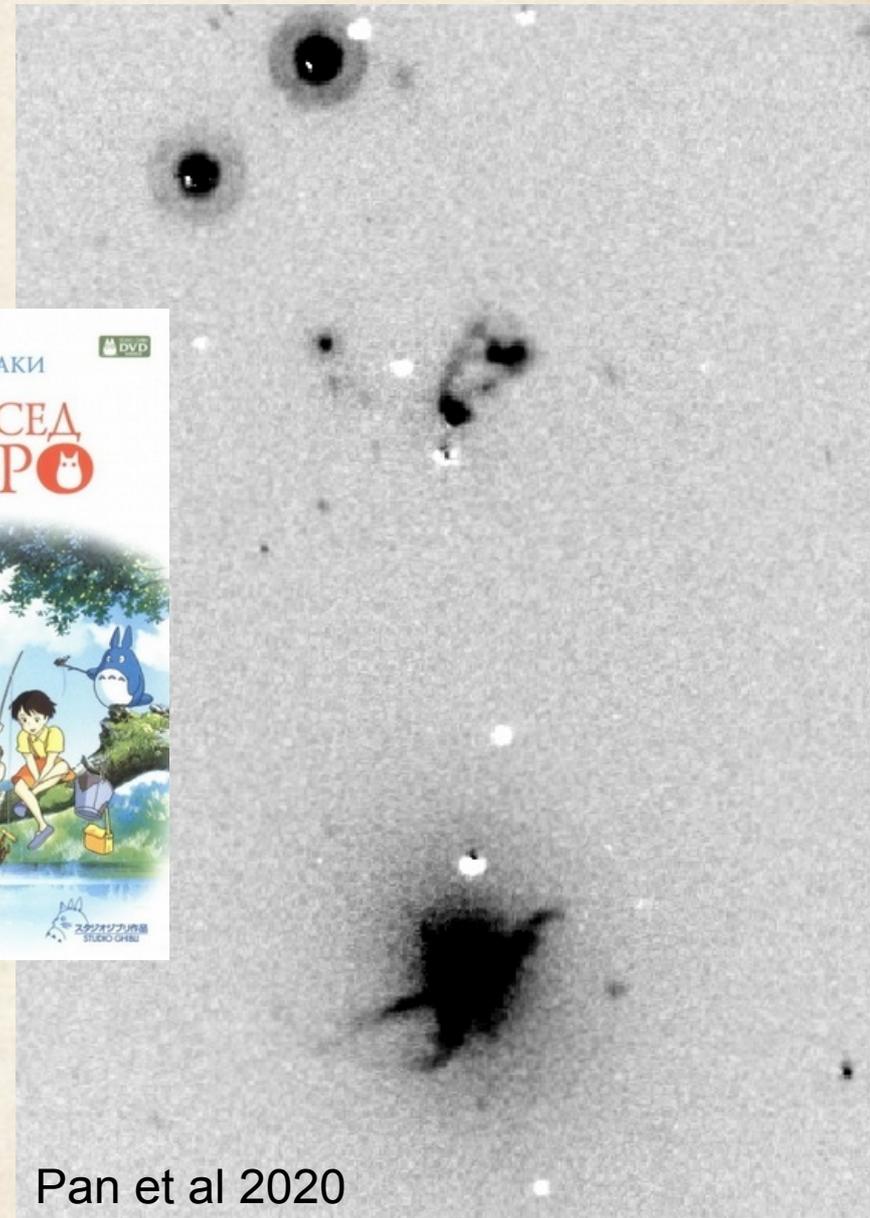
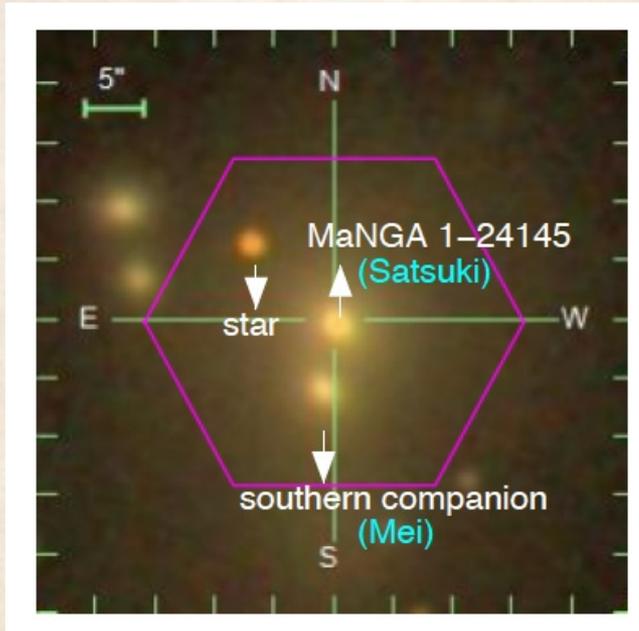
## MaNGA Technical Details

- ☆ Dark-time observations
- ☆ Fall 2014 – Spring 2020
- ☆ 17 IFUs per 7 deg<sup>2</sup> plate
- ☆ Wavelength: 360-1000 nm, resolution R~2000
- ☆ 10,000 galaxies across ~2700 deg<sup>2</sup>, redshift z~0.0
- ☆ roughly 3-hour dithered exposures
- ☆ Spatial sampling of 1-2 kpc
- ☆ Per-fiber S/N=4-8 (per angstrom) at 1.5 Re

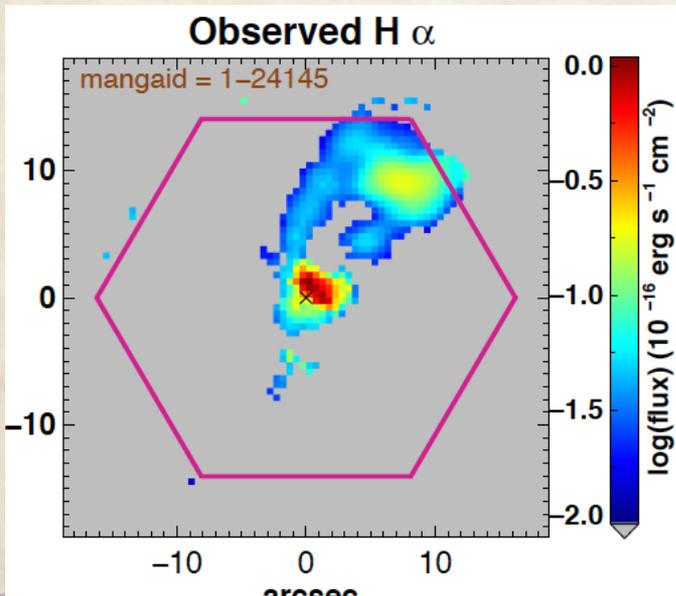
17 IFUs in the field, 19 to 127 fibers (12" to 32")  
2" fibers, full coverage via spatial 3- point dithering  
~ 1400 fibers, R~2000 3600-- 10300AA



# MaNGA+SCORPIO-2= Totoro

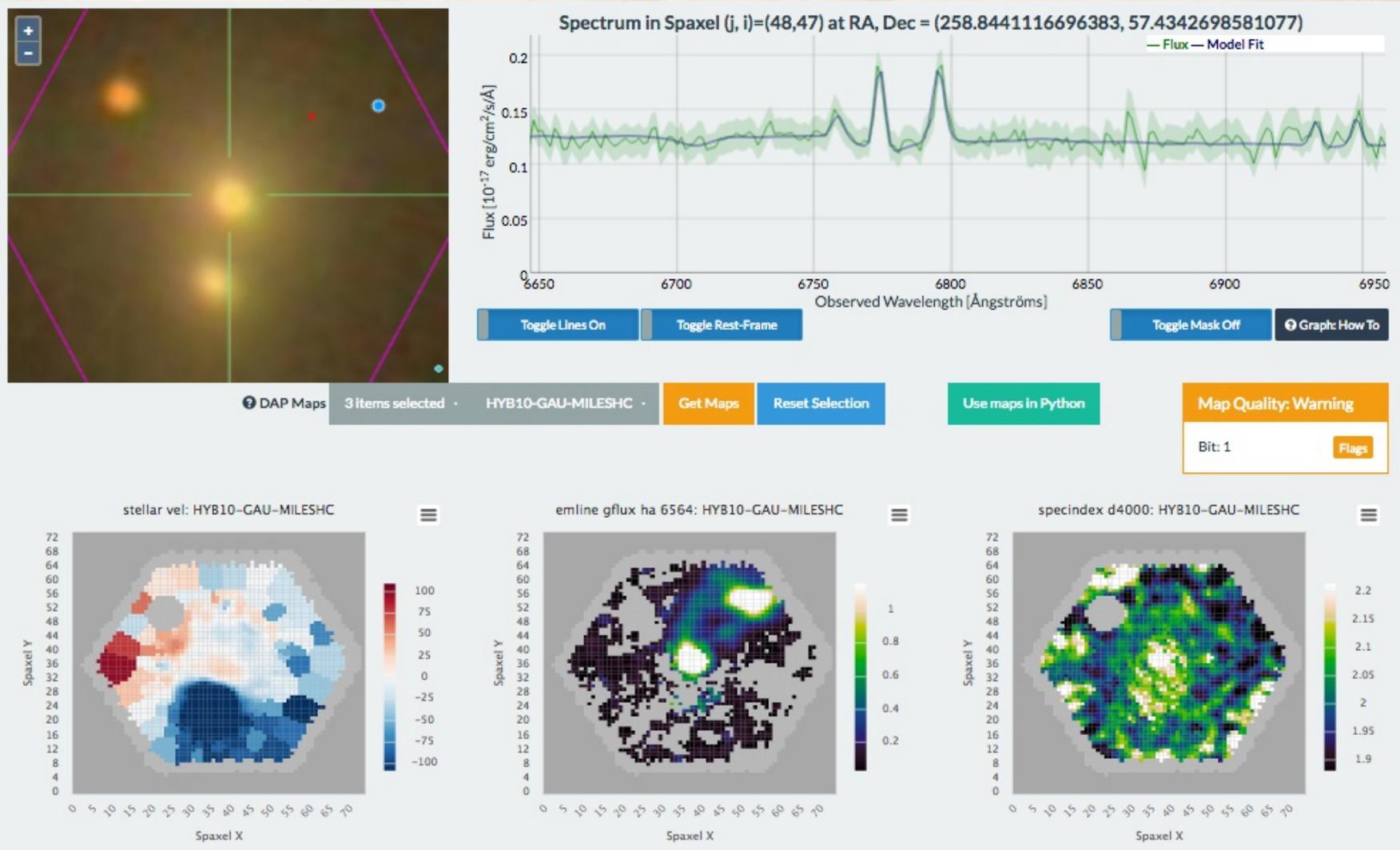


Pan et al 2020

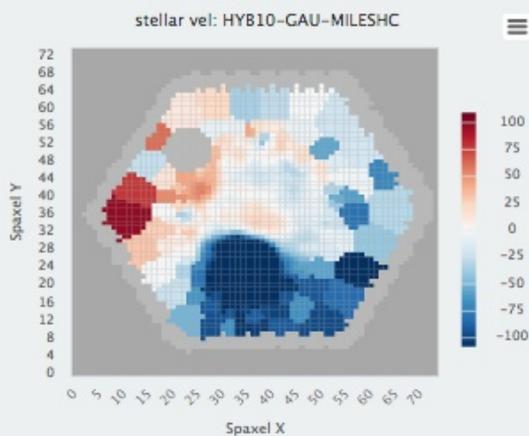
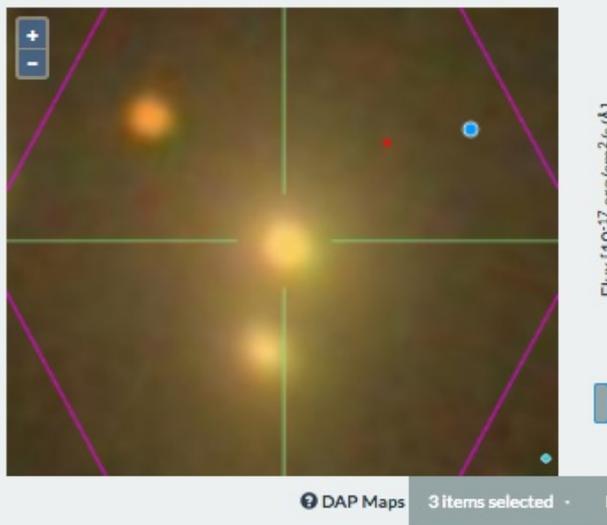


# MaNGA: открытый доступ к данным

Кубы, карты параметров, интерактивный анализ...



MaNGA: открытый до  
Кубы, карты параметров, и



# MARVIN



## What is Marvin?



Marvin is a complete ecosystem designed for overcoming the challenge of searching, accessing, and visualizing the MaNGA data. It consists of three components: a Web App, a Python package of Tools, and an API. Marvin combines these components to provide a seamless experience when using MaNGA Data. A complete description of Marvin is available in the [Marvin overview paper, Cherinka et al. \(submitted\)](#).

# SAMI: Sydney-AAO Multi-object Integral-field spectrograph

SAMI Galaxy Survey: 3400 galaxies, 3.9-m telescope AAO

13 hexabundles (15 " FOV: 61 fibers x 1.6 arcsec)



AAOmega spectrograph  
370-570 nm R=1730  
625-735 nm R=4500



AAT 3.9 m

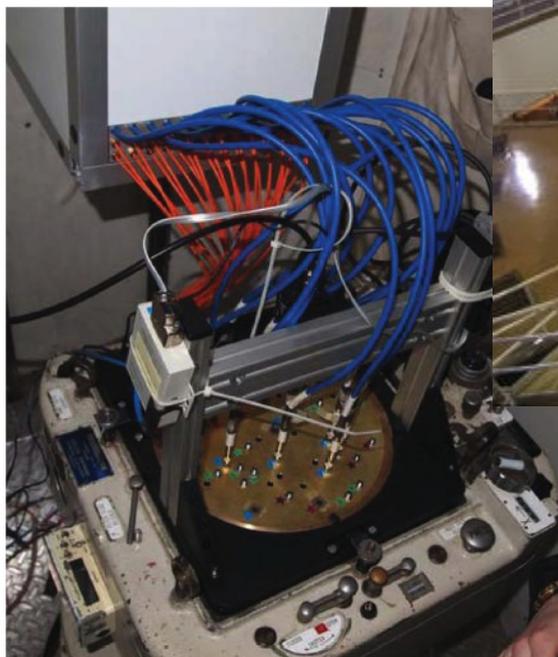
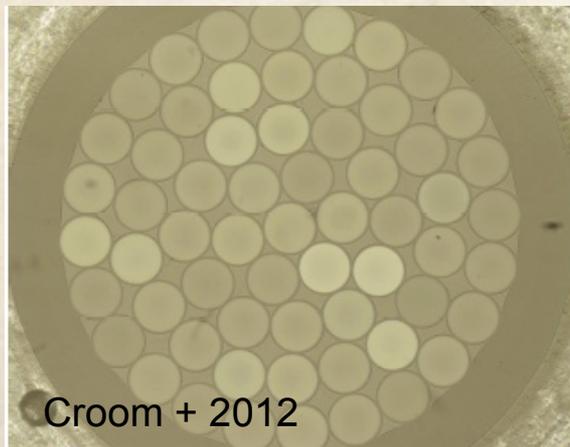
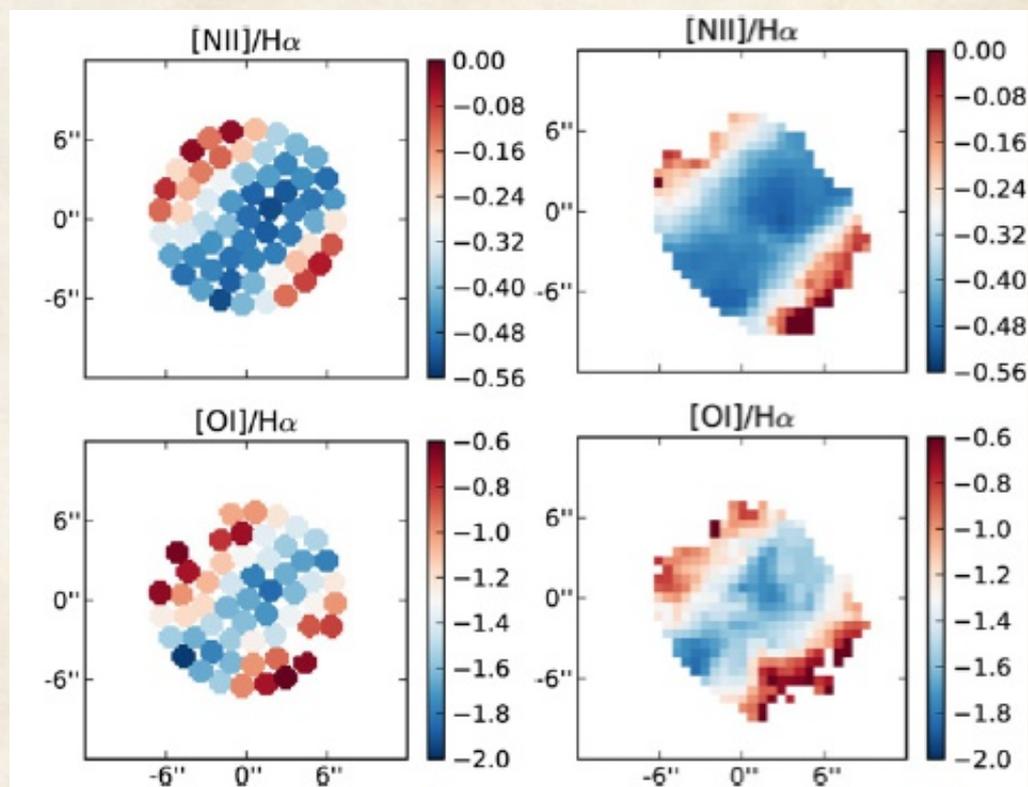
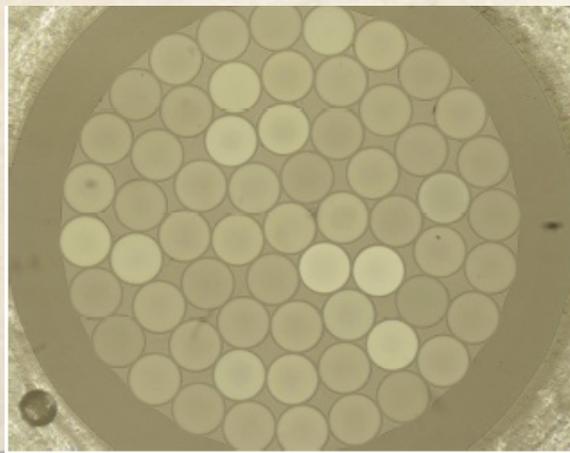
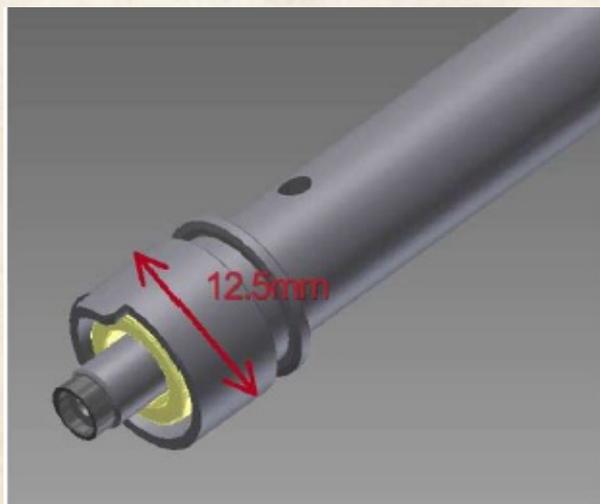


Figure 6. The SAMI plug-plate assembly unit mounted on to the Prime Focus Camera. The white 'splice box' (top) connects the blue hexabundles

# SAMI: Sydney-AAO Multi-object Integral-field spectrograph

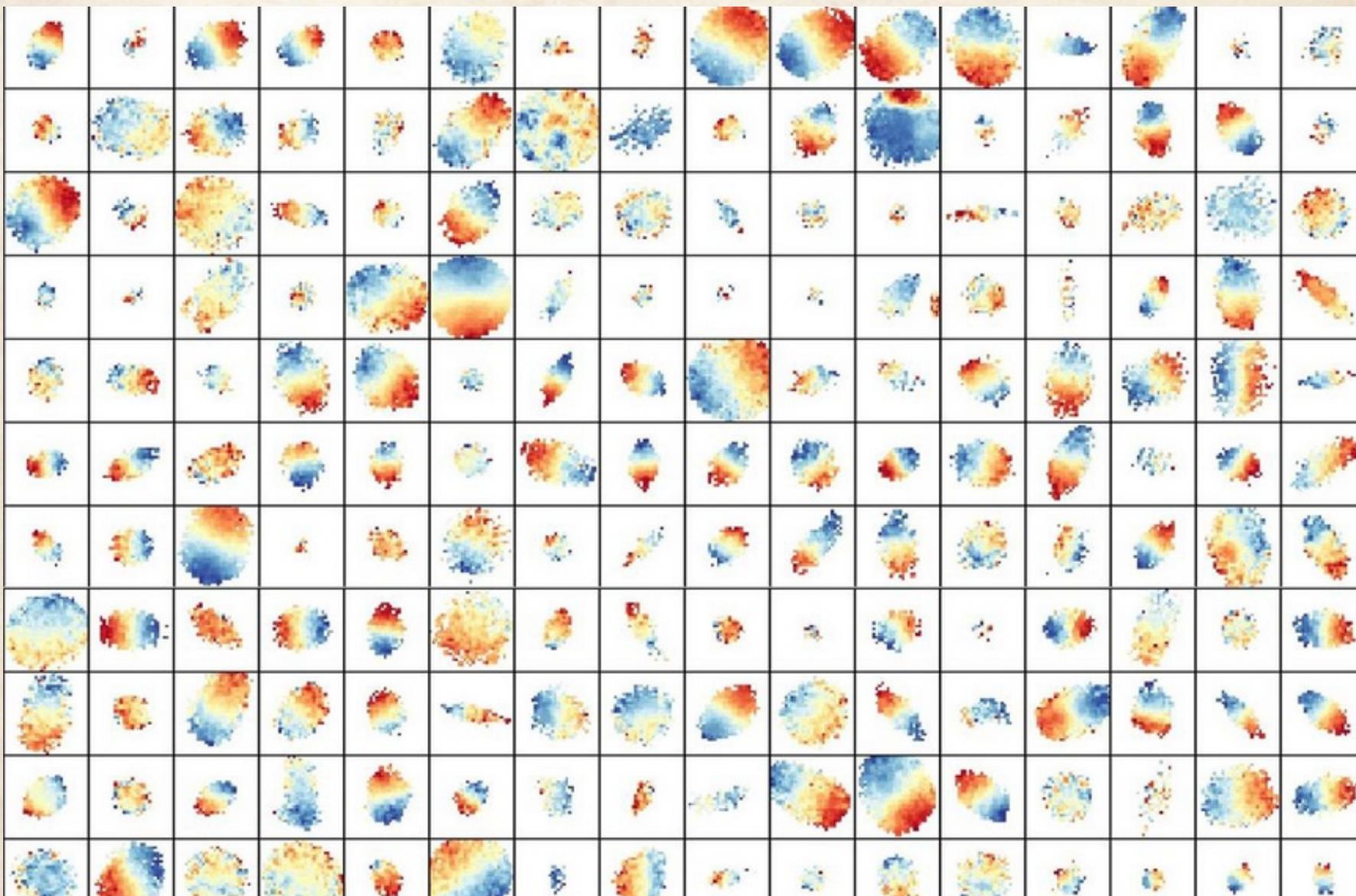
SAMI Galaxy Survey: 3068 galaxies, 3.9-m telescope AAO

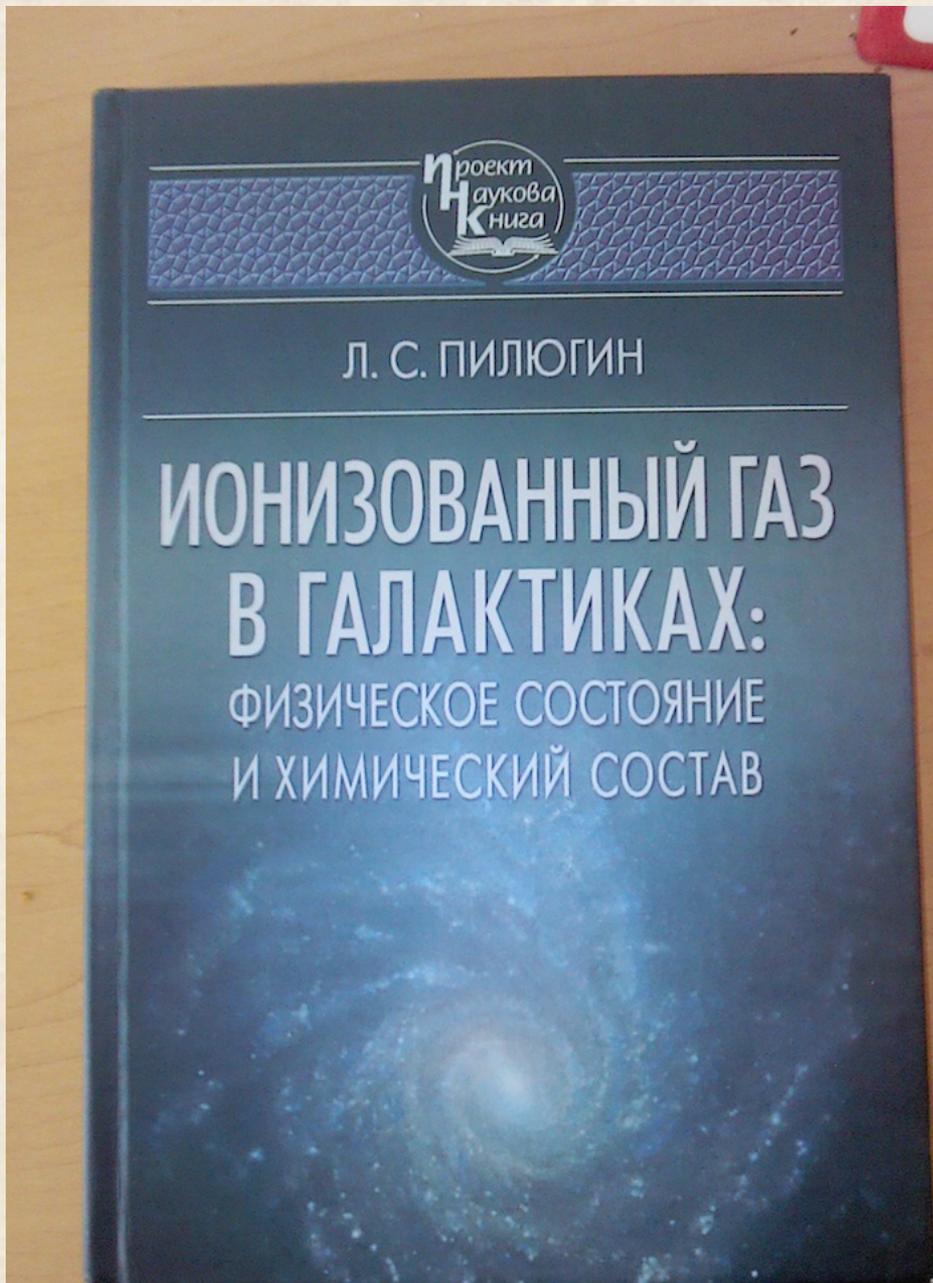
13 hexabundles (15 " FOV: 61 fibers x 1.6 arcsec)



Croom + 2012

# SAMI galaxy survey





Есть в библиотеке САО

Электронная версия – по запросу