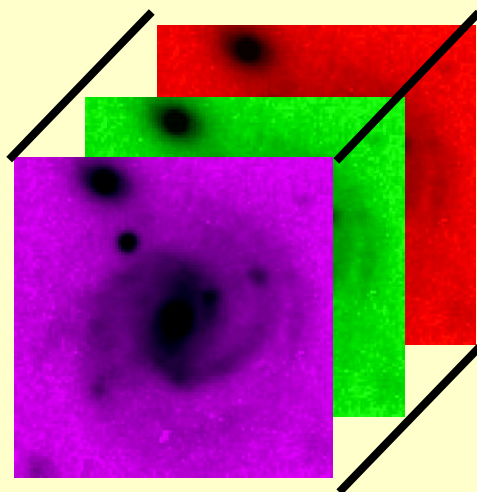
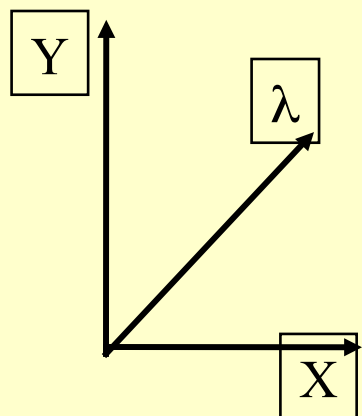


Методы панорамной спектроскопии

Лекция 3.

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

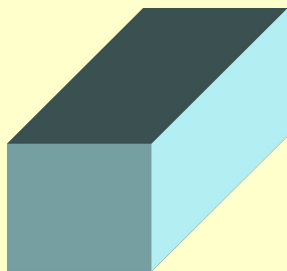
Куб данных



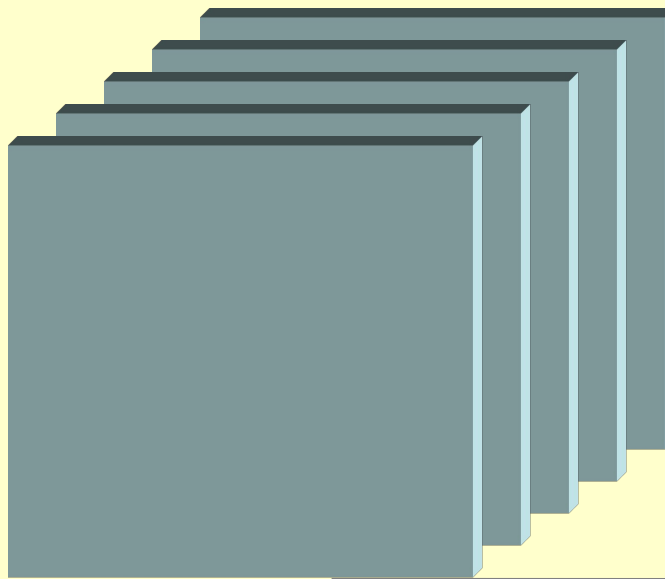
Длинная щель



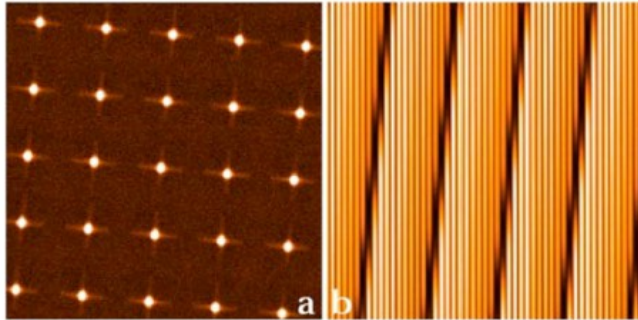
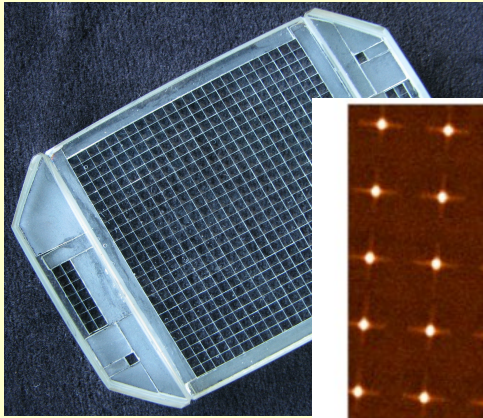
Спектрографы Интегрального поля



Интерферометр Фабри-Перо

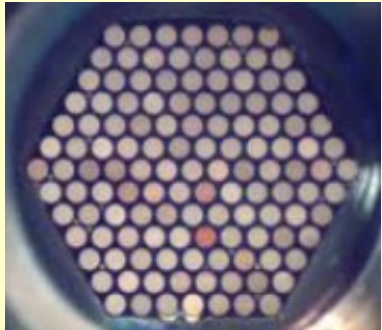


Линзовый растр vs волоконный блок



- + 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

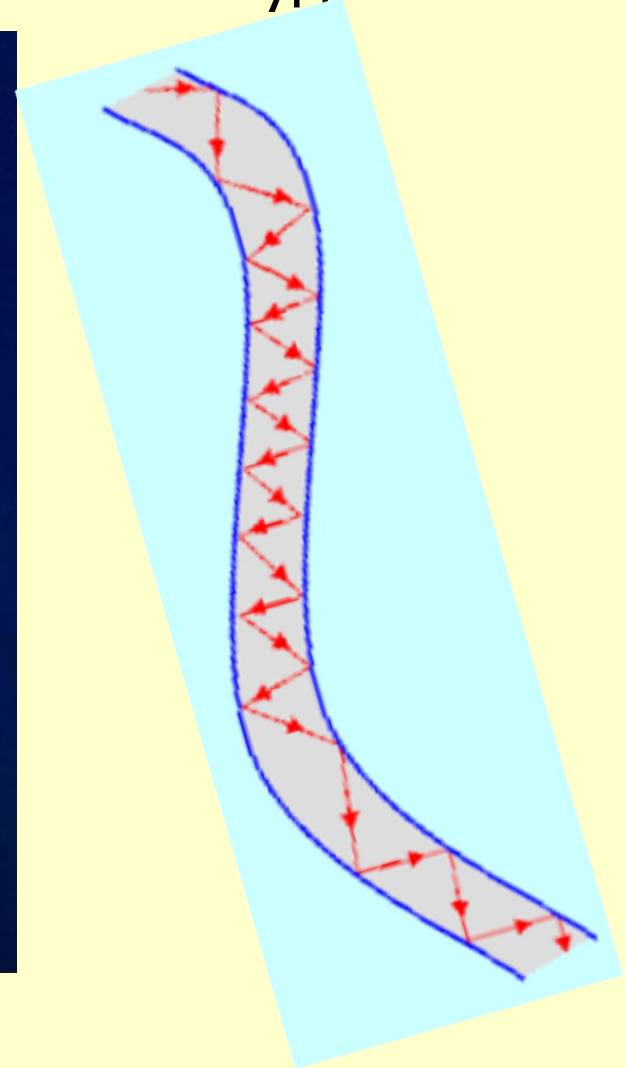
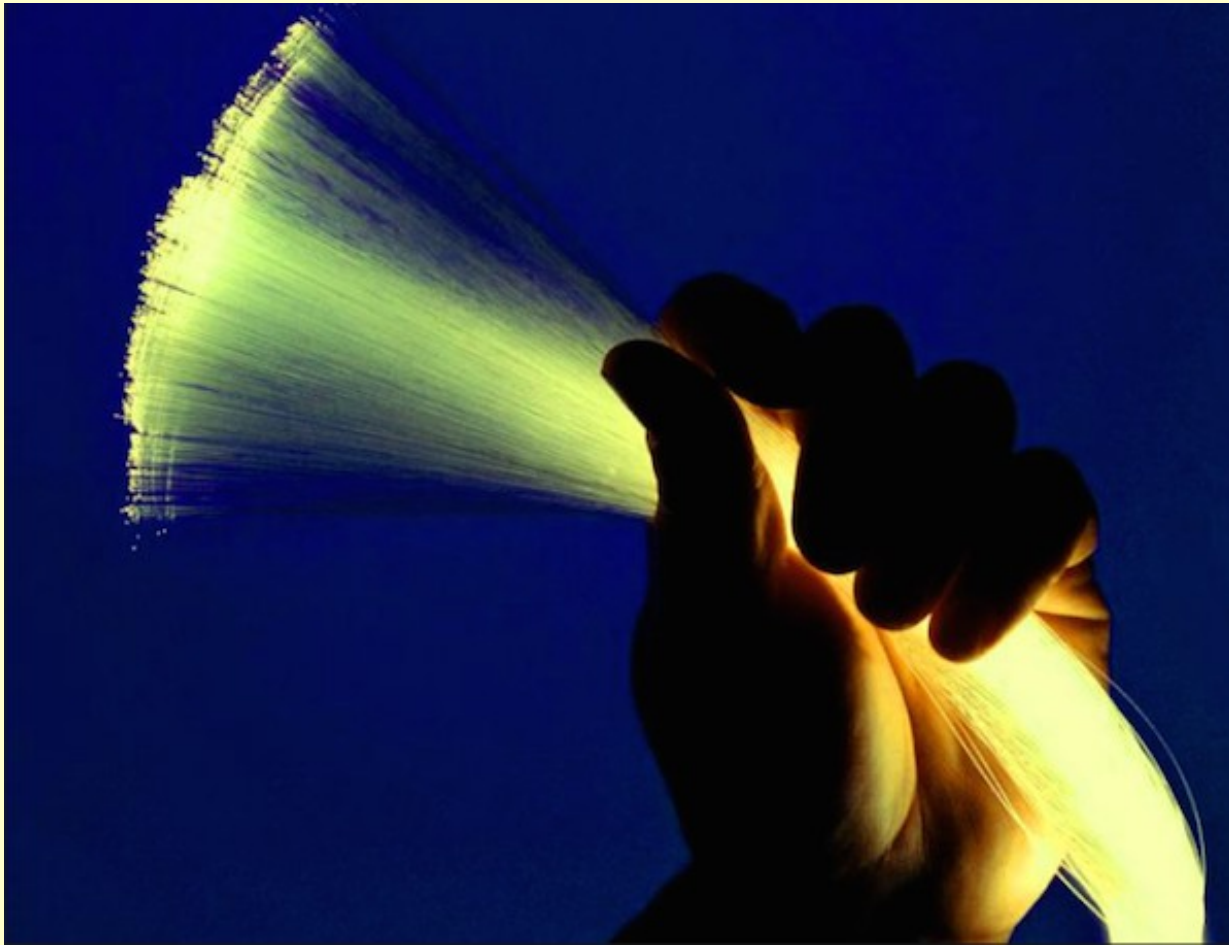


- + эффективное использование ПЗС (плотная упаковка спектров)
- + можно легко развести свет на несколько спектрографов
- + удобно заводить спектр ночного неба
- + отказ от оптики увеличителей
- + многообъектная спектроскопия

- потери света между волокнами
- все проблемы волоконной оптики

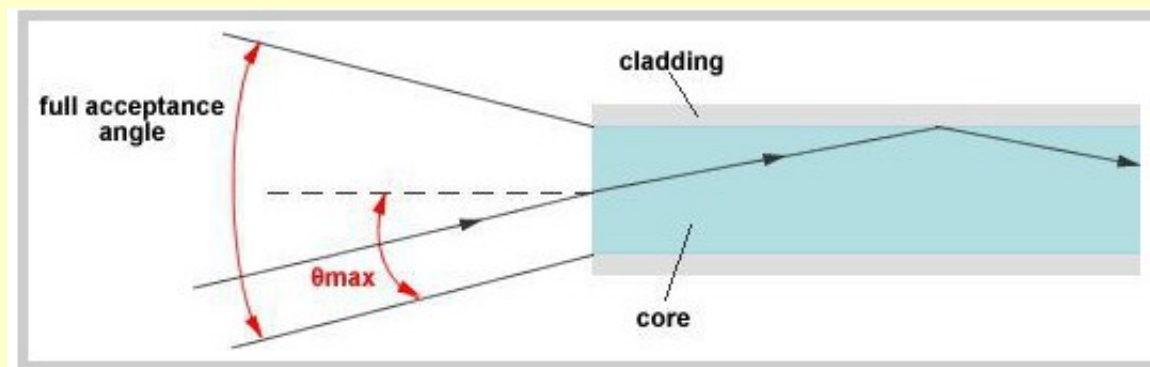


“Наивный” взгляд на световоды: “проводит свет куда хотим”



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:

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

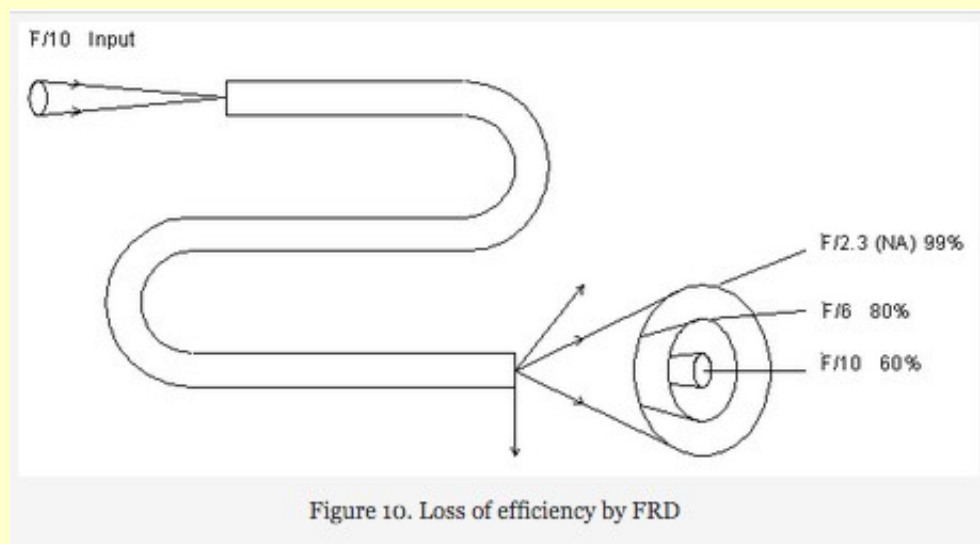
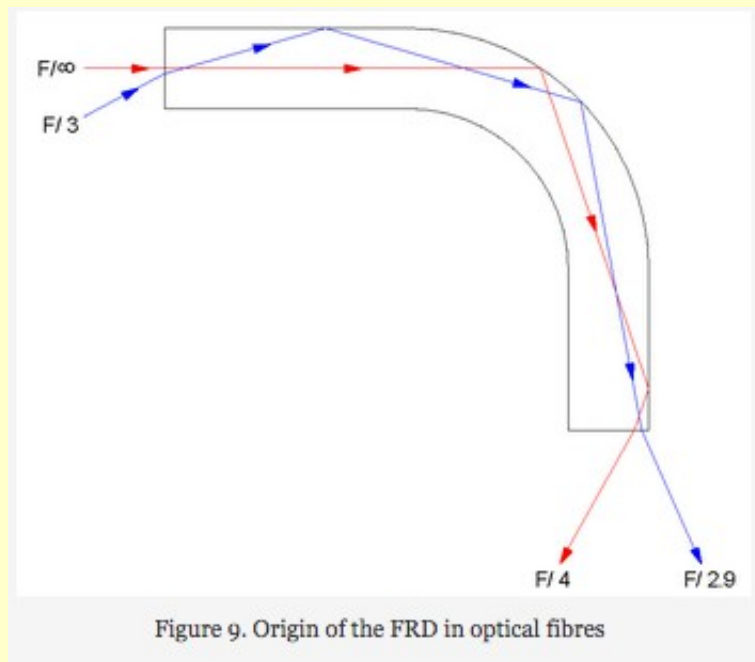
Что дает для светосилы:

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

При $NA=0.22$ получаем ограничение на максимальную входную светосилу $F/2.3$, что выполнимо. Но проблема с выходной светосилой!

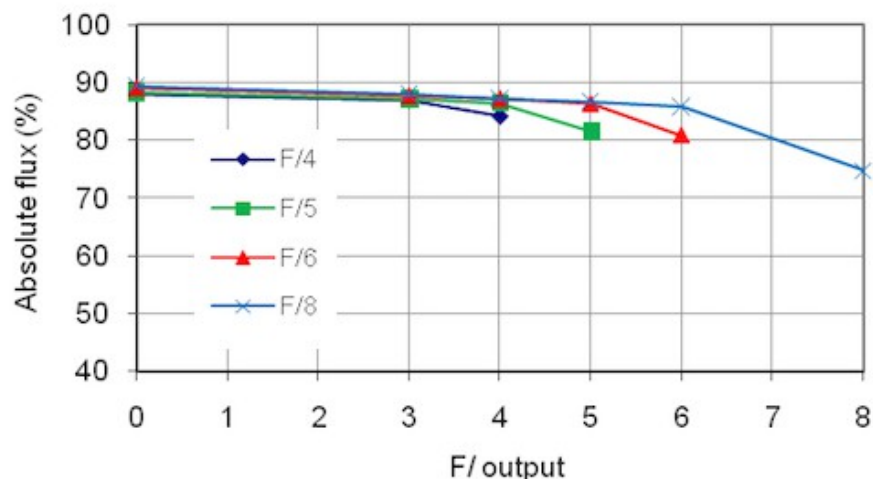
Деградация фокального отношения

Focal Ratio Degradation (FRD)



Влияние изгиба на FRD

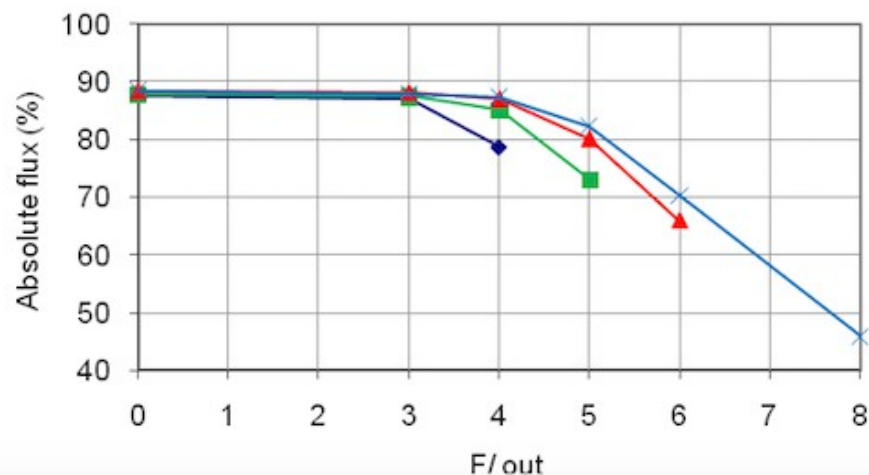
Polymicro STU 200 um 10m FREE



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

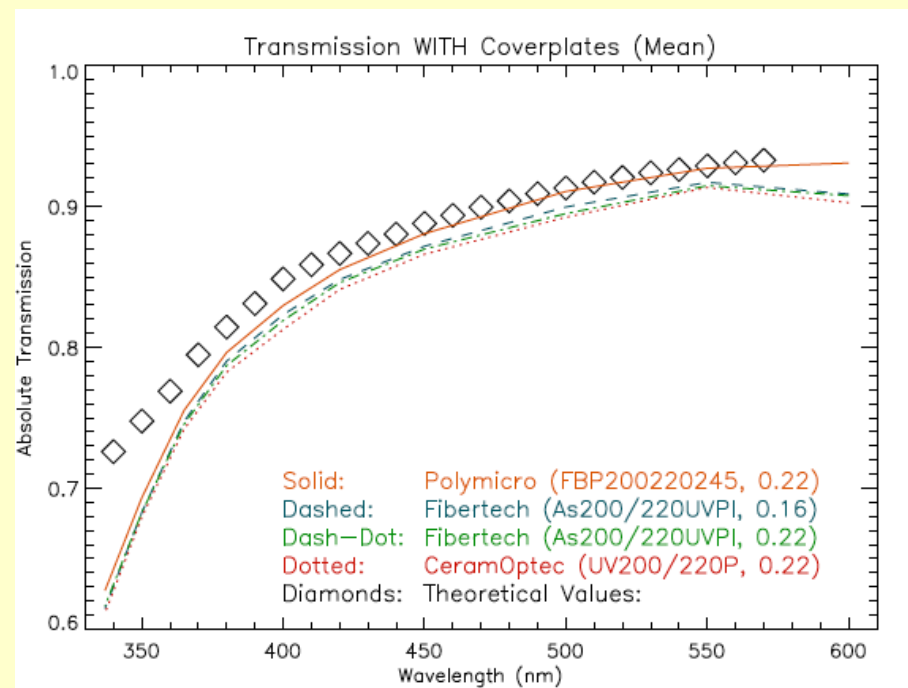
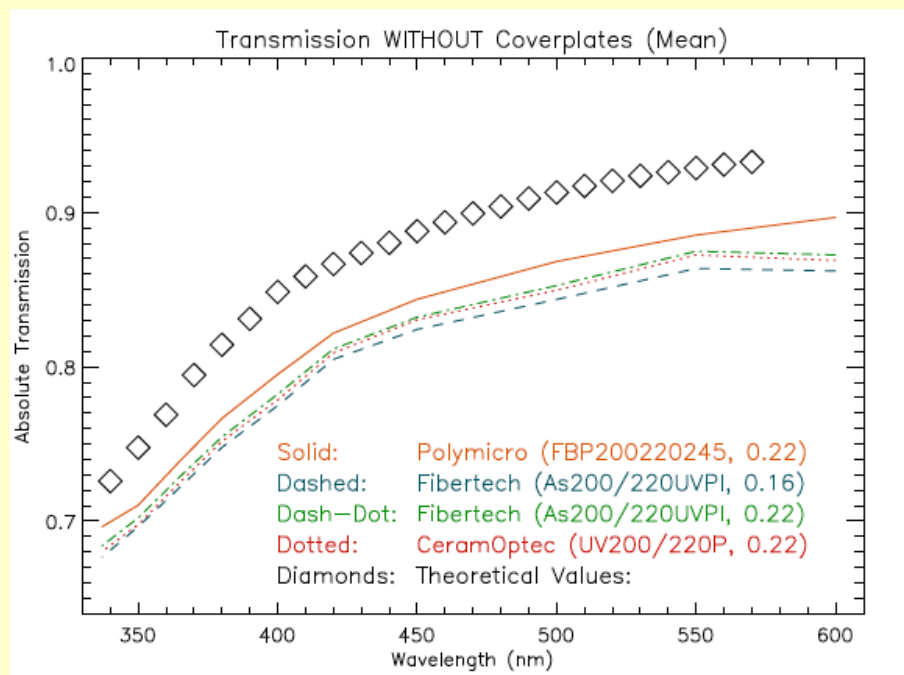


В сравнении с классическим спектрографом, более жесткие требования на светосилу коллиматора и камеры спектрографа (сложнее и дороже)

<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

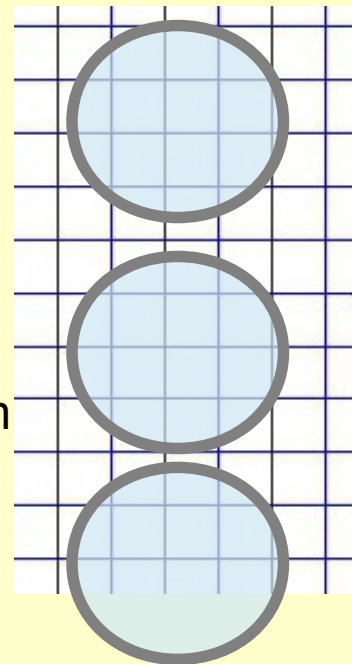
Основная область применения - НЕастрономия

Типичные размеры: 120-250 μm

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

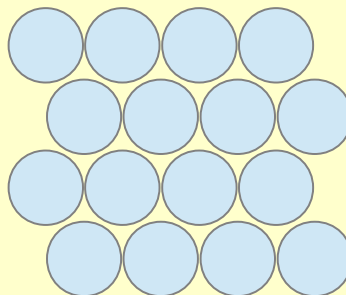
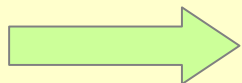
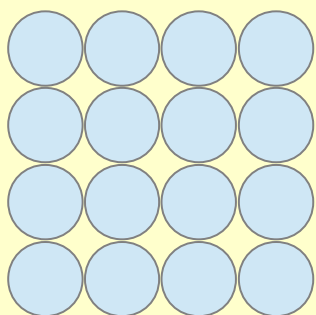
Но тот же диаметр оказывается критичным, когда стараемся заполнить щель плотнее:

Достаточно, чтобы изображение волокна в щели проецировалось диаметром 4-5 px ($\times 13.5$) = 54-68 μm что требует хорошей широкощельности спектрографа (см. Лекция 2 “Фокальный редуктор”)



Проблема фактора заполнения входного поля

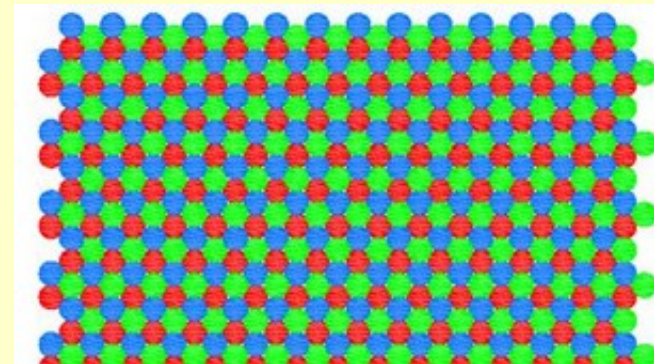
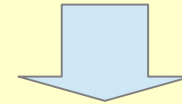
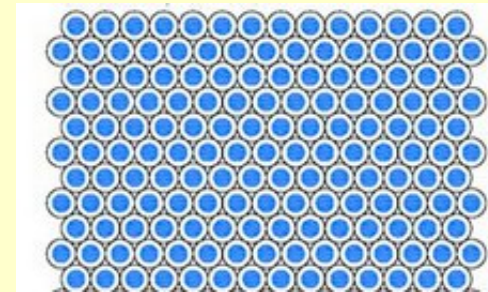
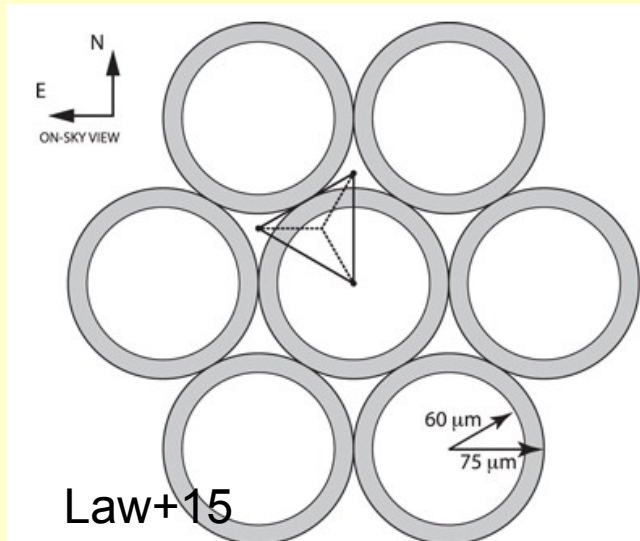
Так как наличие оболочки – принципиально, то эффективнее упаковать волокна в жгуте гексагонально (“соты”)



(IFU MaNGA)

Технология мелких смещений (dithering)

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



(Kelz +: VIRUS-IFU)

Интересное решение - "сплавленные световоды"

HEXABUNDLES (Bland-Hawthorn et al. 2011).

Strongly-fused (Bryant+11)

Filling factor >90%

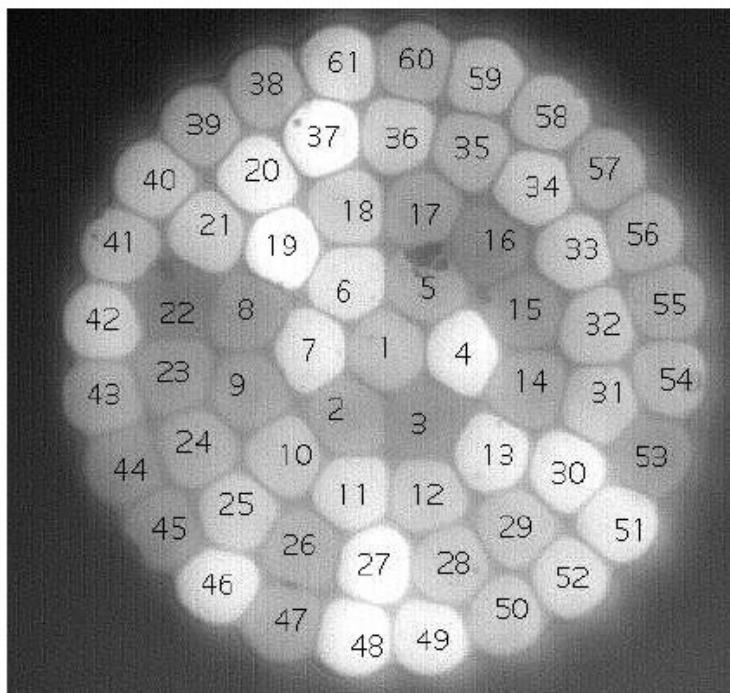


Figure 1. An image of the 61-core fully-fused hexabundle taken with non-uniform illumination to show the shape and position of the cores. Cores 1 – 16, 17 – 31, 32 – 46 and 47 – 61 were grouped together at output on four glass plates. Each of the cores are $100\mu\text{m}$ in diameter. The cores are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

Lightly-fused (Bryant+14)

Filling factor <87%

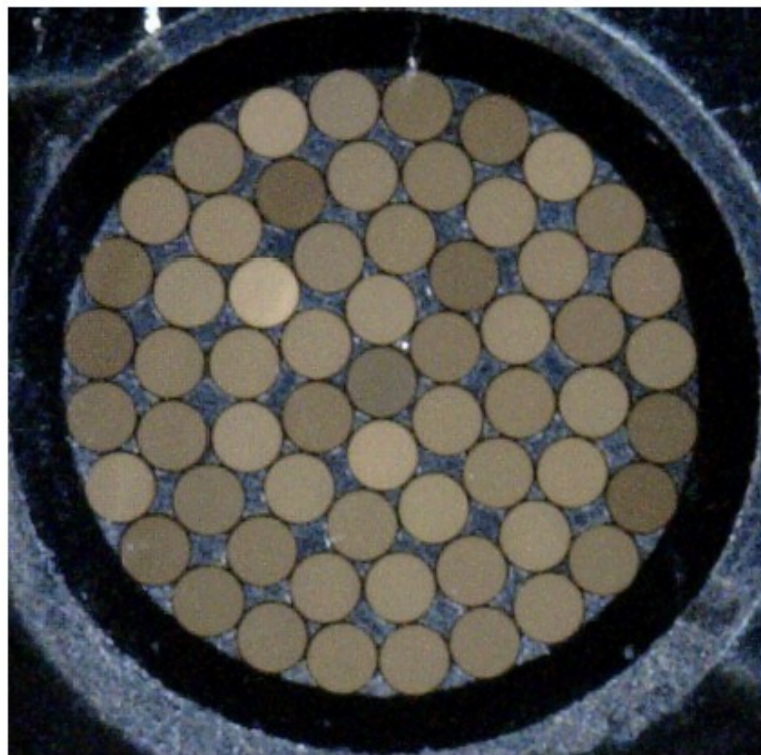


Figure 1. One of the 61-core lightly-fused hexabundles. The interstitial holes are filled with soft, low refractive index glue. The cores are $105\mu\text{m}$ in diameter and $115\mu\text{m}$ with cladding.

Наблюдения со смещением в 3х положениях

Single point

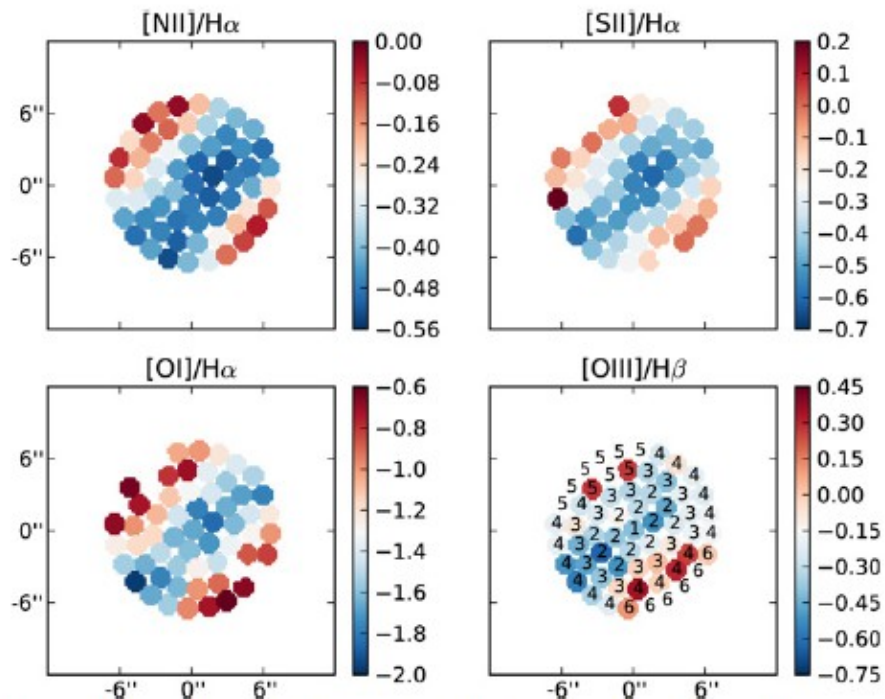


Figure 4. Spatial maps of the emission line ratios derived from the pointed data. Blank spaxels correspond to spectra where the S/N in the emission lines in question was not high enough to obtain a good fit. These maps are used to construct the IDD in Figure 7. Since the [OIII]/H β ratio (bottom row)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

Dithered data

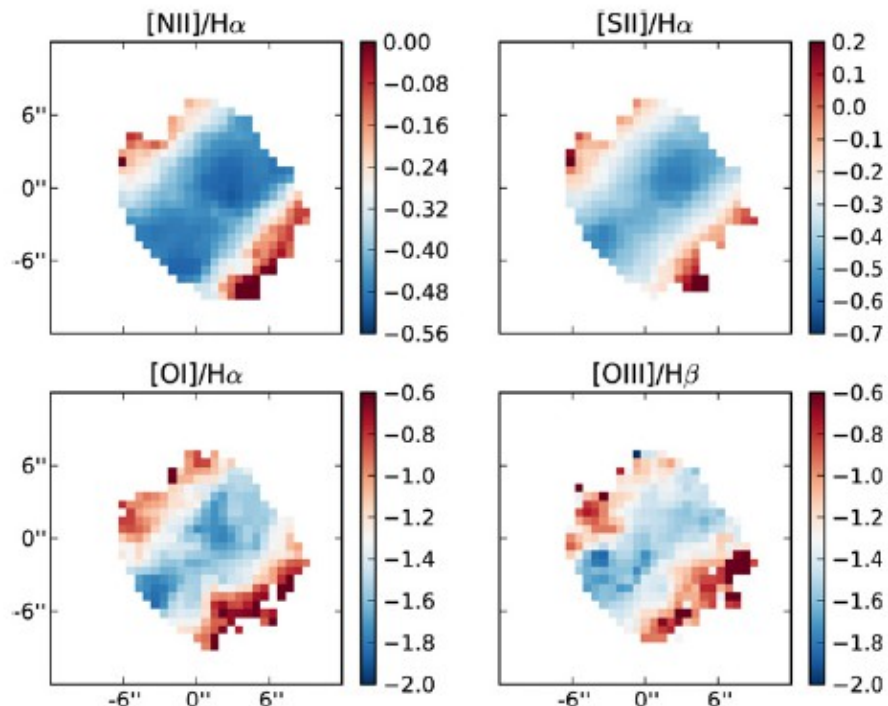
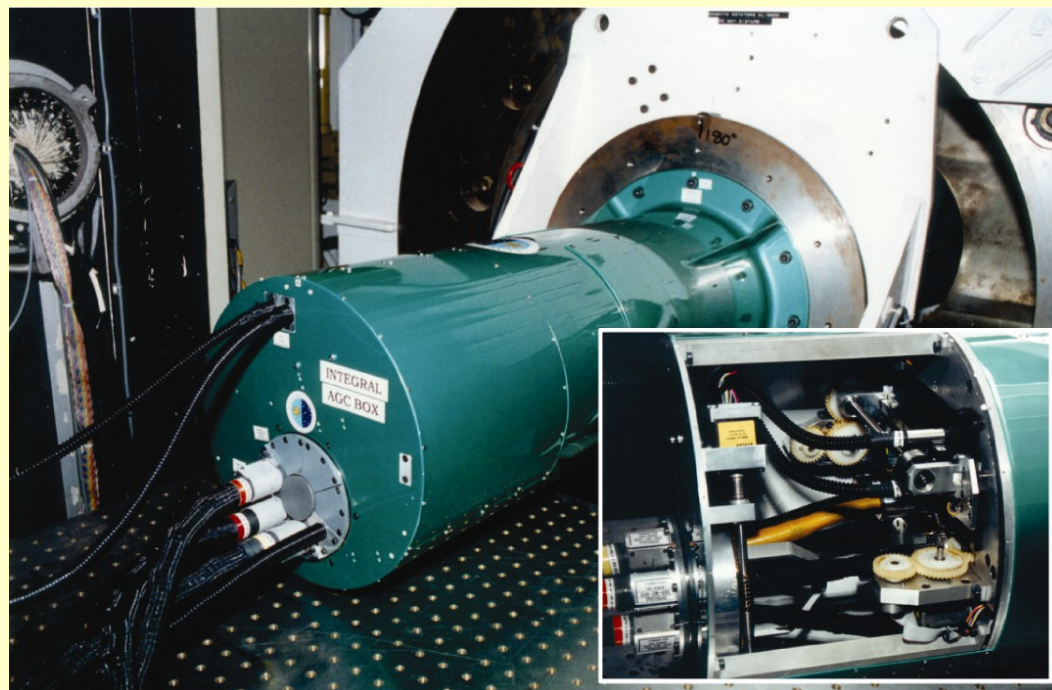
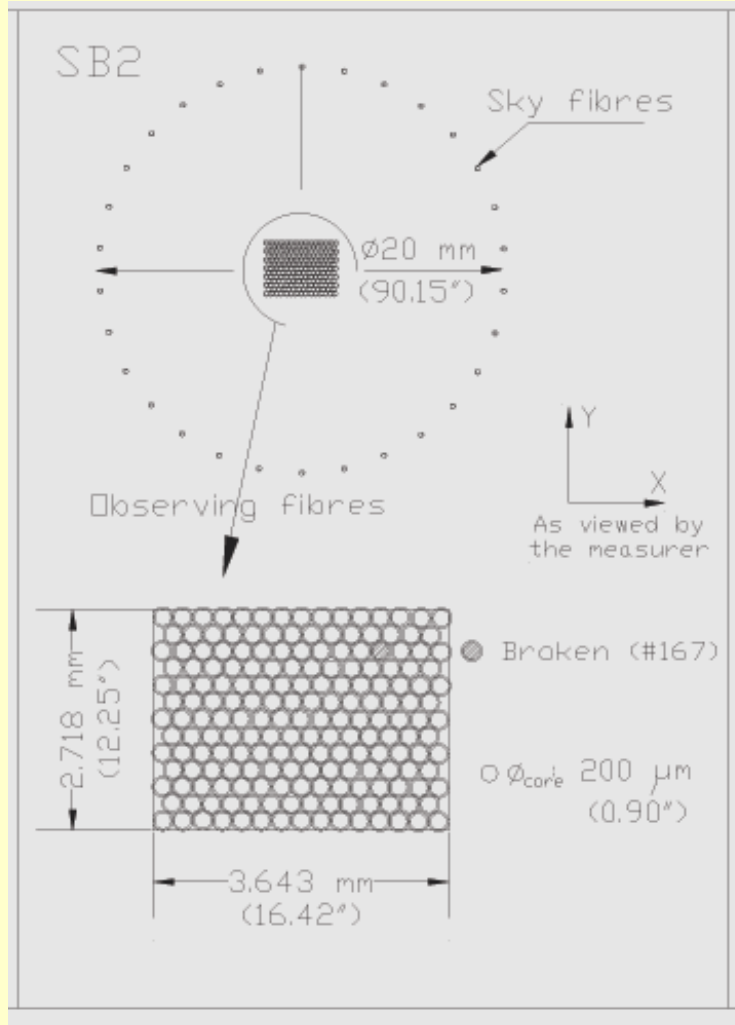


Figure 5. Spatial maps of the emission line ratios derived from the dithered data. Again, the blank spaxels are those without spatial coverage or sufficient S/N to fit the necessary lines. These are used to construct the IDD in Figure 8.

Fogarty + 12

INTEGRAL on 4.2-m WHT

Arribas et al. 1998



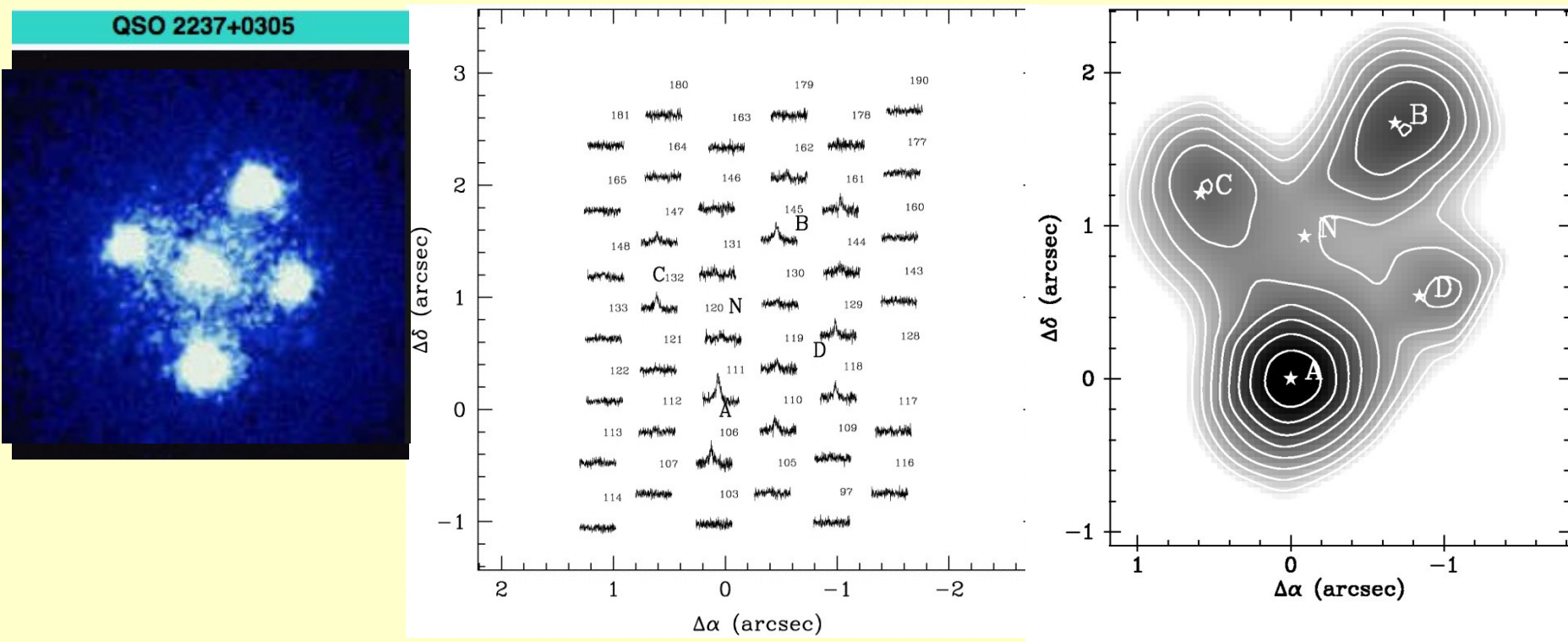
3 fiber bundles:

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

INTEGRAL: Einstein Cross

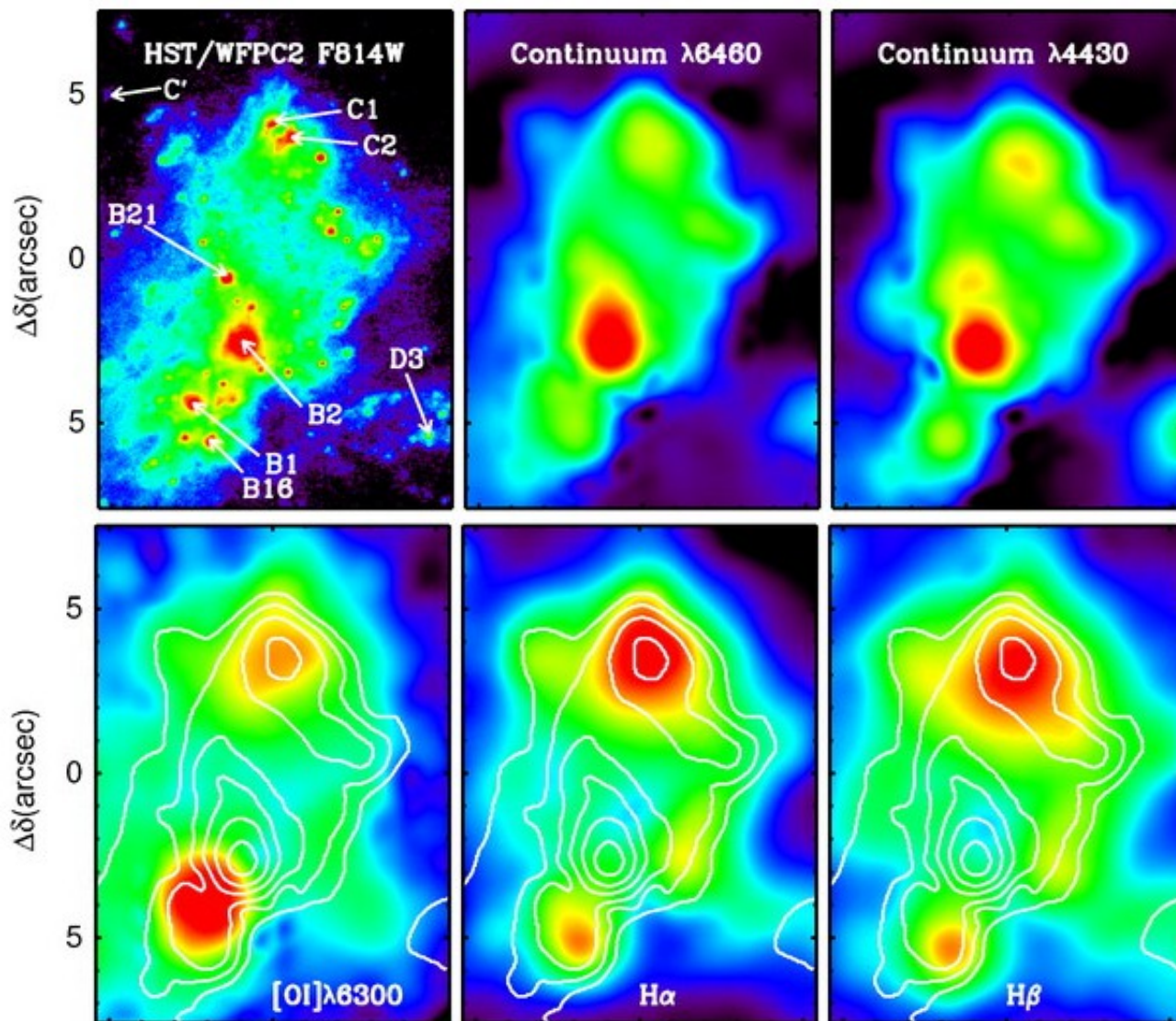
Mediavilla et al. (1998)

Система обработки и визуализации основана на гексагональном расположении спектров:



Картирование в гексогональных координатах. I

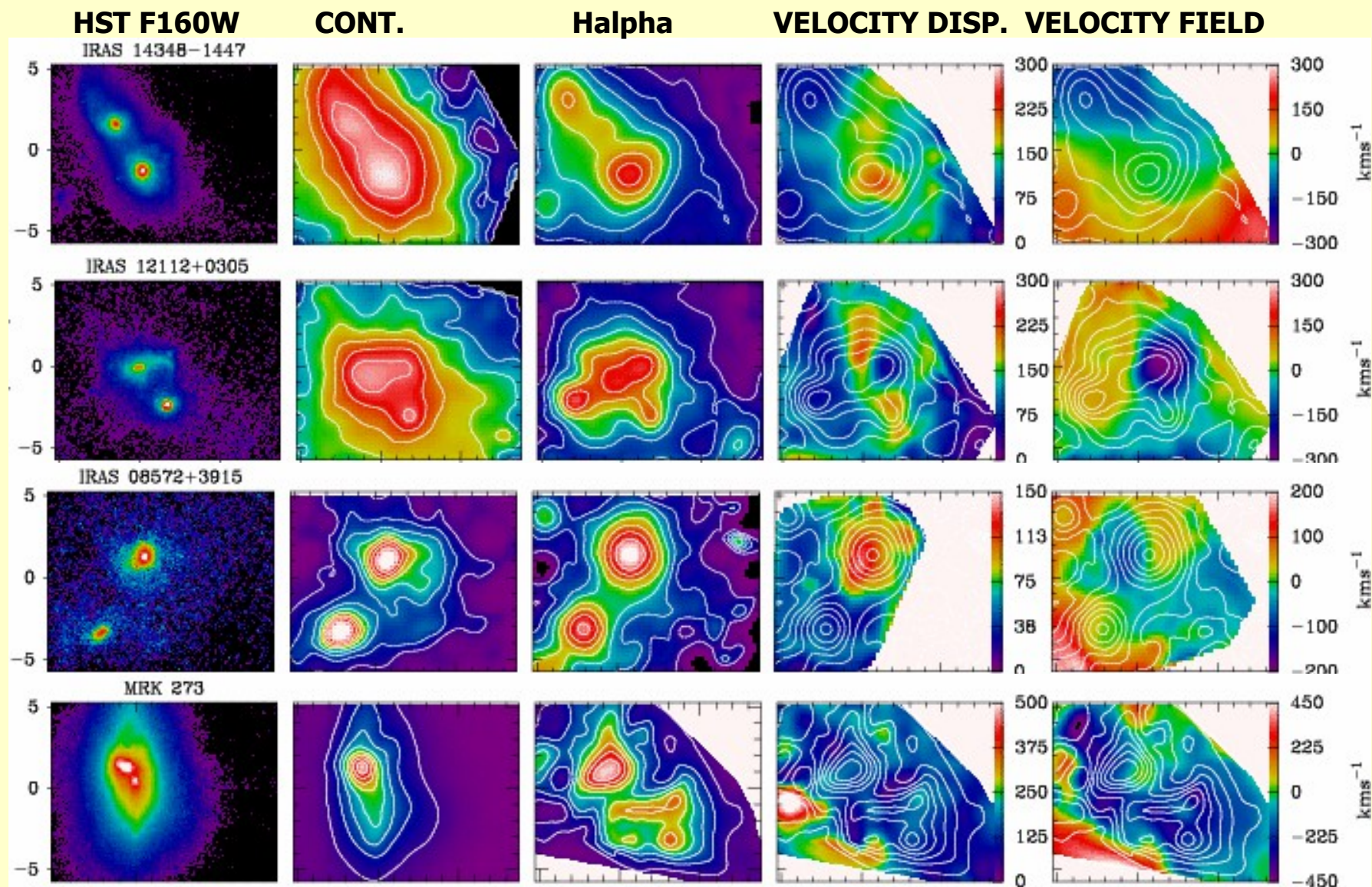
INTEGRAL: Arp 299 (García-Marín+2006)



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

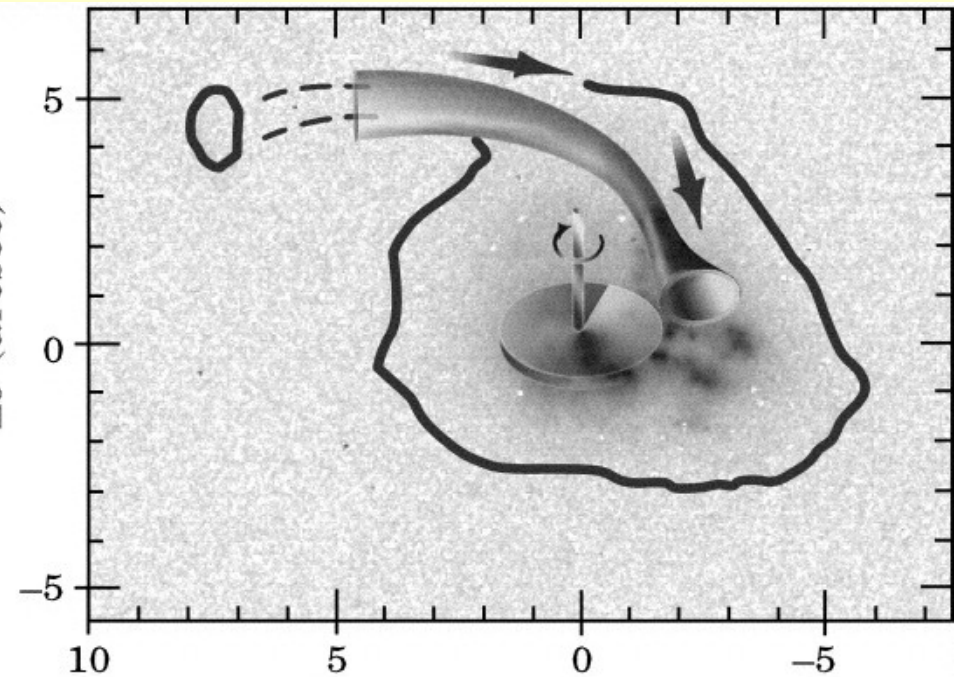
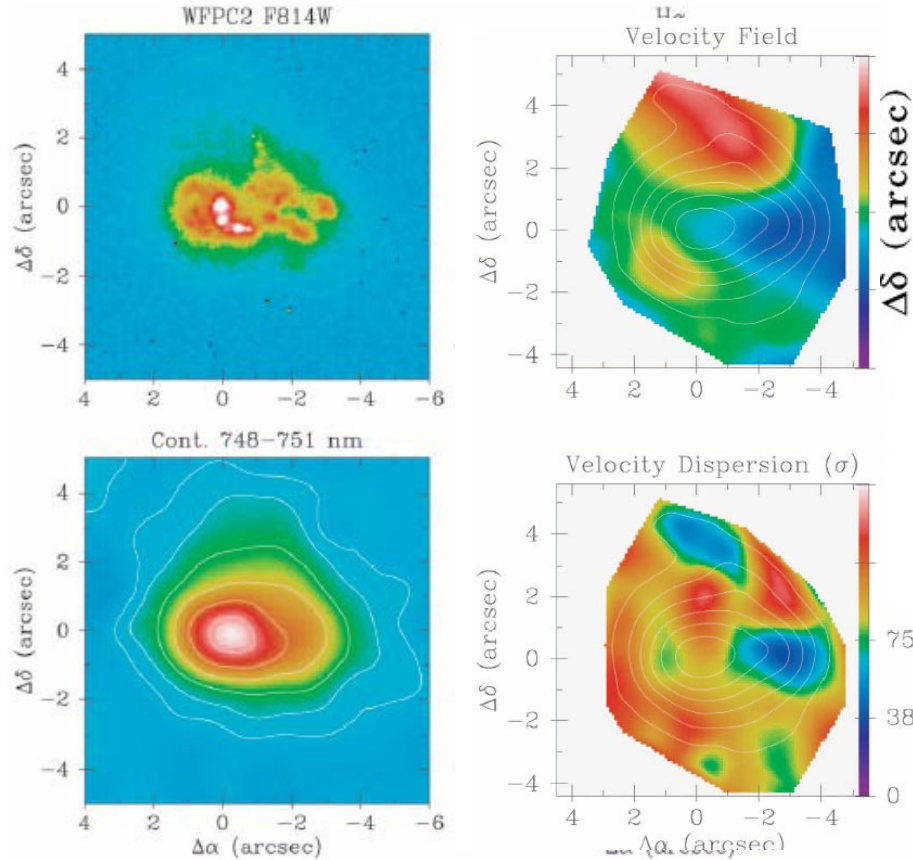
Сравнение разных
карт – тоже этим
методом.

Картирование ультраярких ИК-галактик



IRAS 15206+3342: starburst in merger

Arribas & Collina (2002)



A bent tidal tail of about 15-20 kpc in projected length connects the inner arc-shaped chain of star-forming knots with a remnant stellar system located at about 20 kpc from the nucleus. The gas in the tidal tail is flowing inward the inner disk.

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 :
 $(\lambda 3727 + 3729) / \text{H}\beta$, $[\text{N II}] \lambda 6583 / \text{H}\alpha$...

Источники ионизации газа:

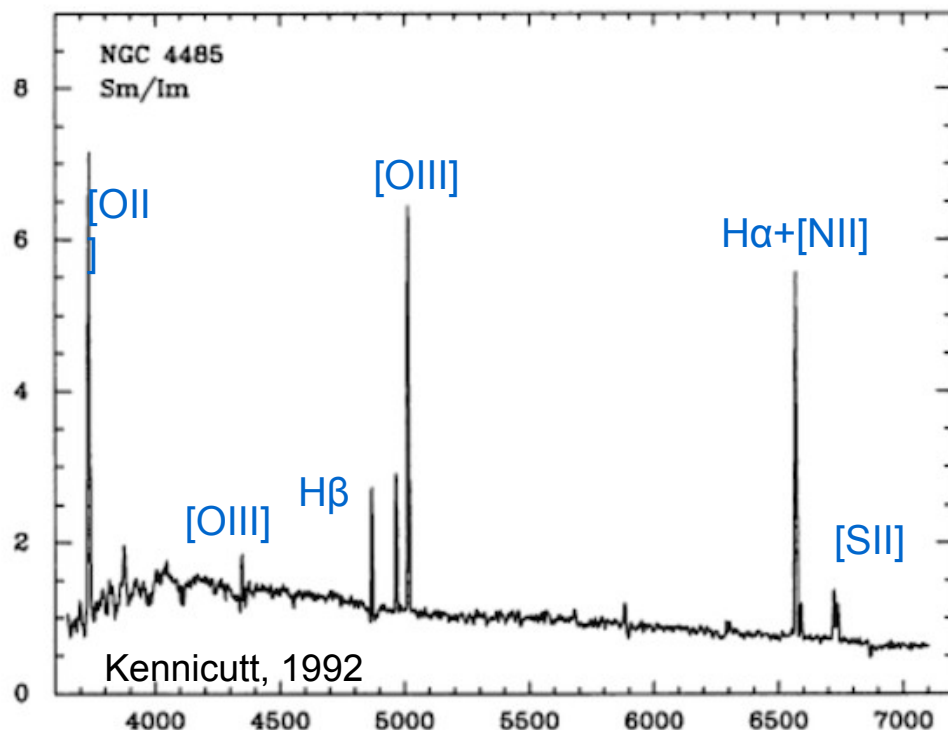
$[\text{N II}] \lambda 6583 / \text{H}\alpha$

$[\text{S II}] \lambda 6717, 6731 / \text{H}\alpha$

$[\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta$

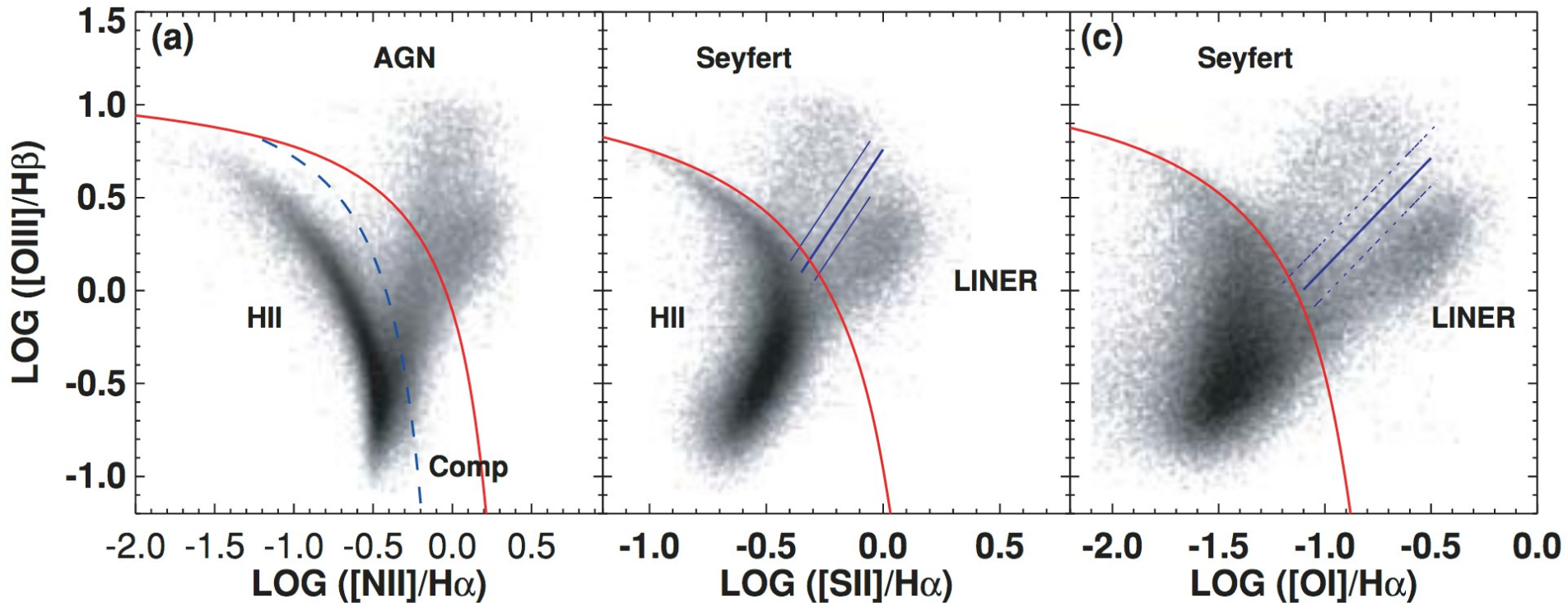
Межзвездное поглощение:

$\text{H}\alpha / \text{H}\beta$



BPT=(Baldwin, Phillips & Terlevich 1981) диаграммы

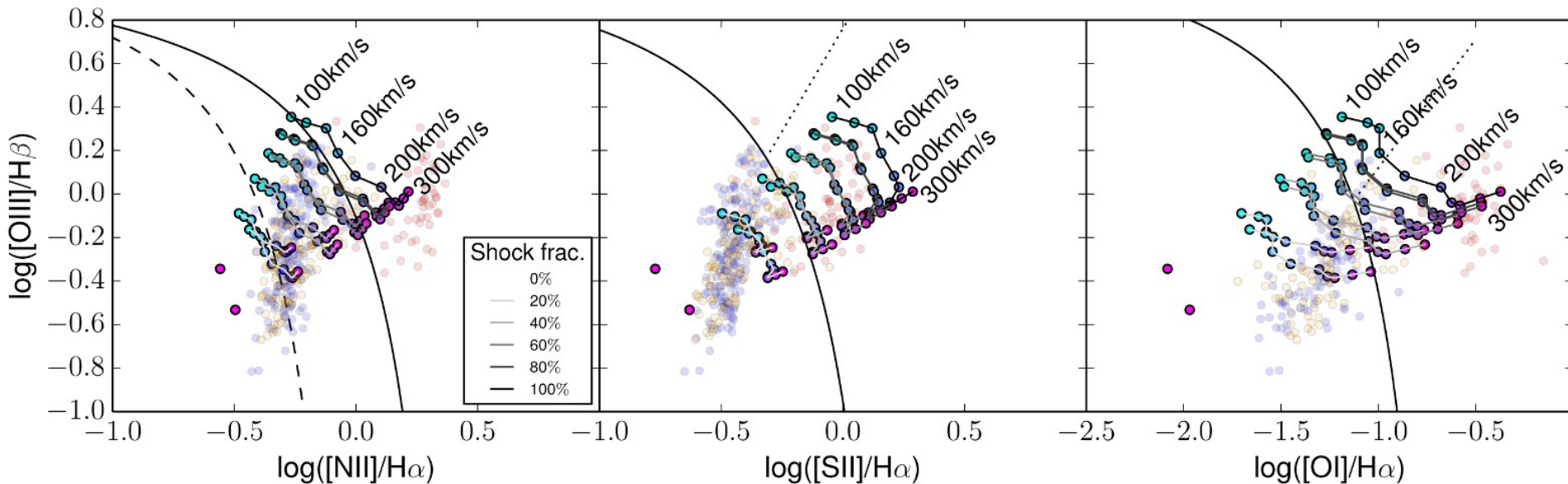
Kewley+06



Seagull-diagramm :)



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

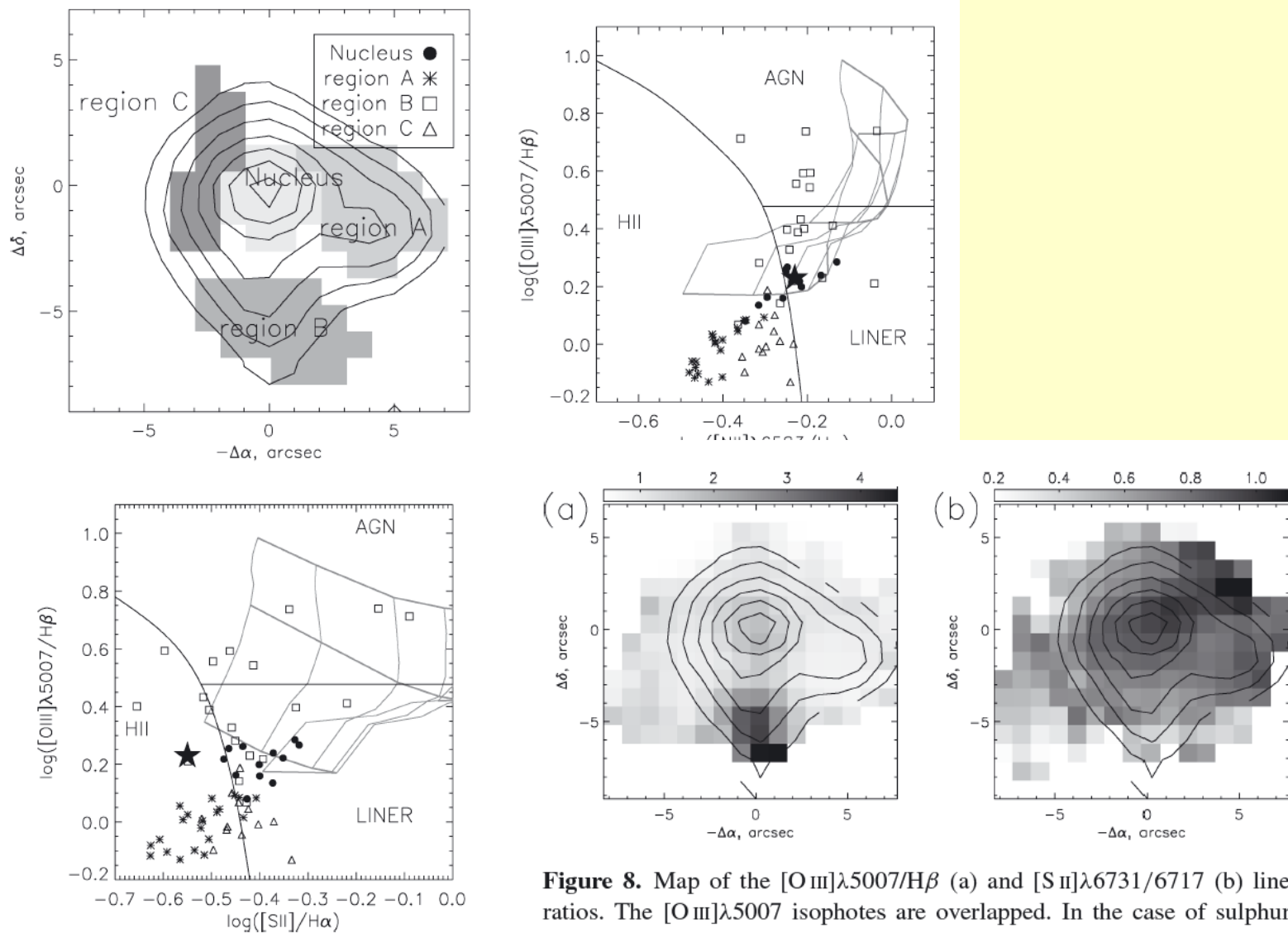
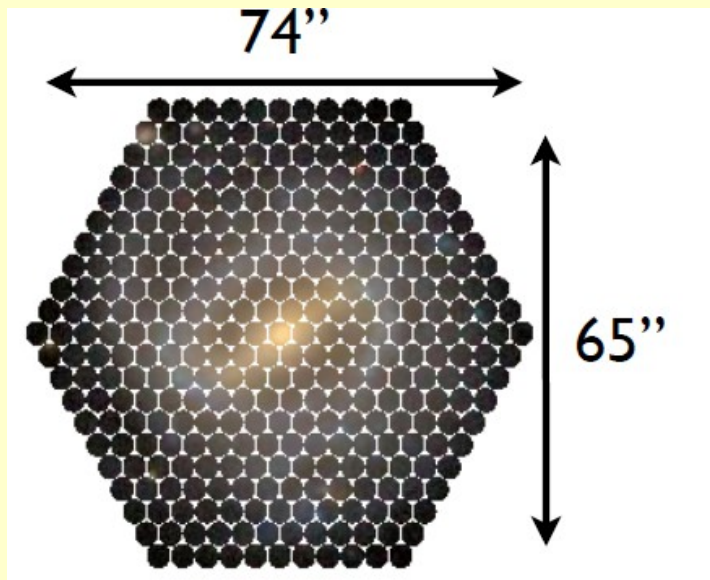


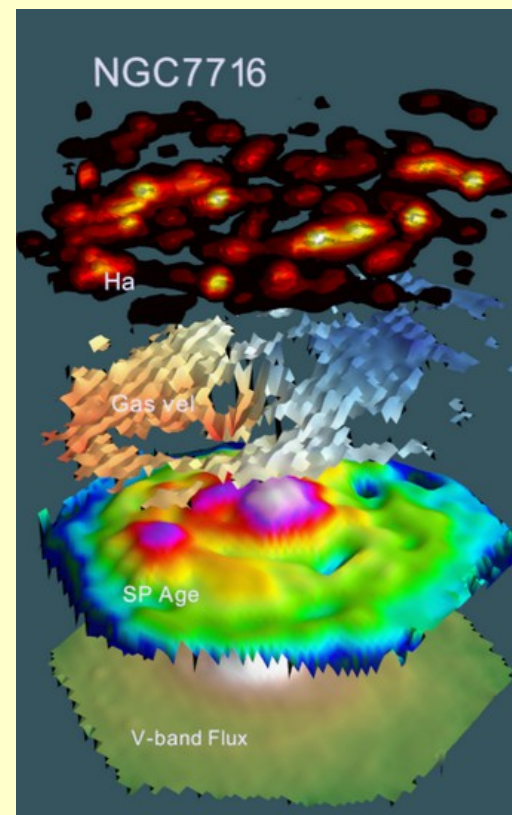
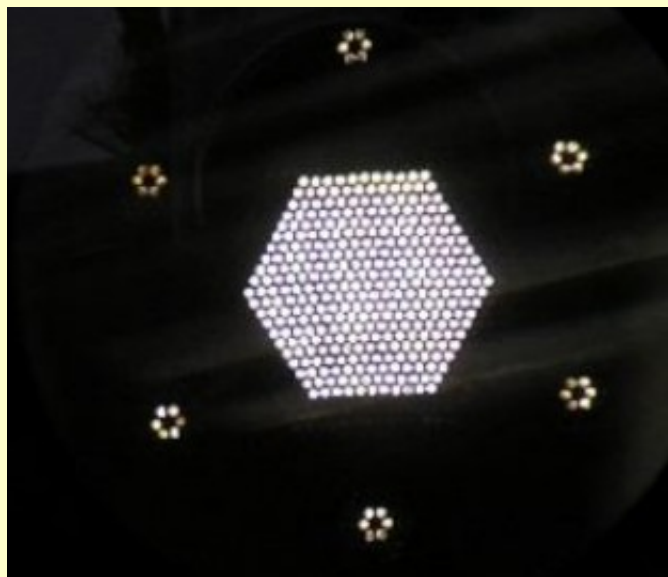
Figure 8. Map of the [O III]λ5007/Hβ (a) and [S II]λ6731/6717 (b) line ratios. The [O III]λ5007 isophotes are overlapped. In the case of sulphur

Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area survey

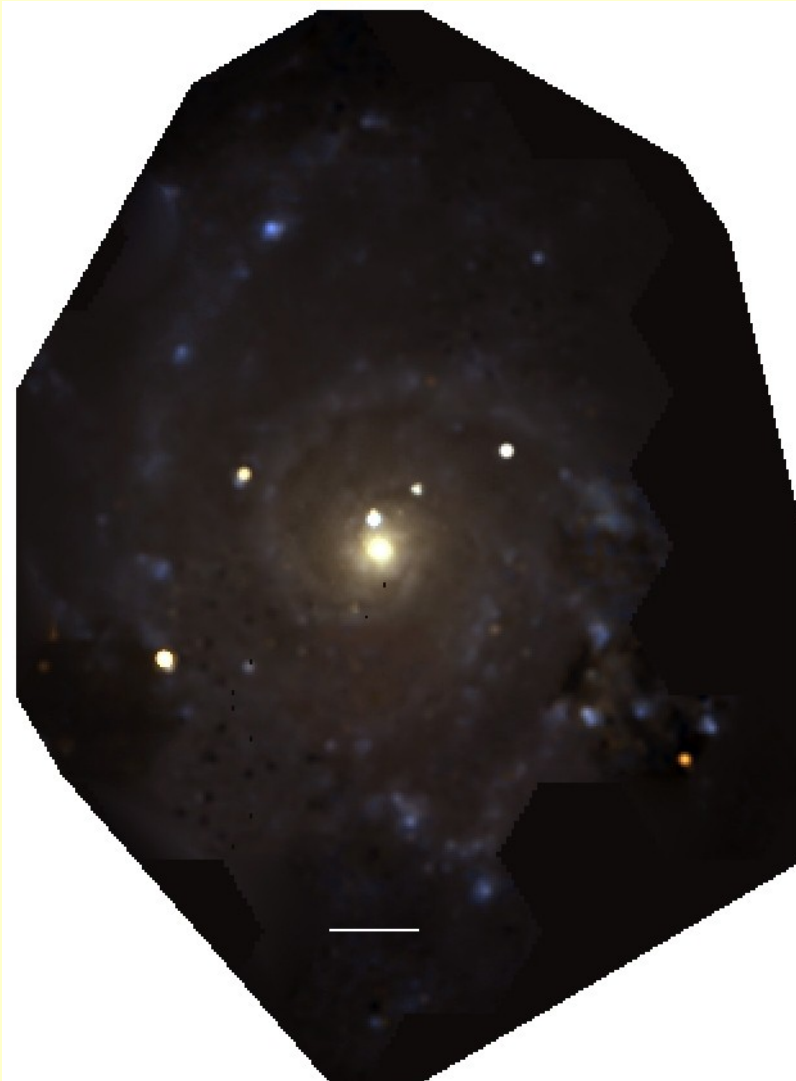
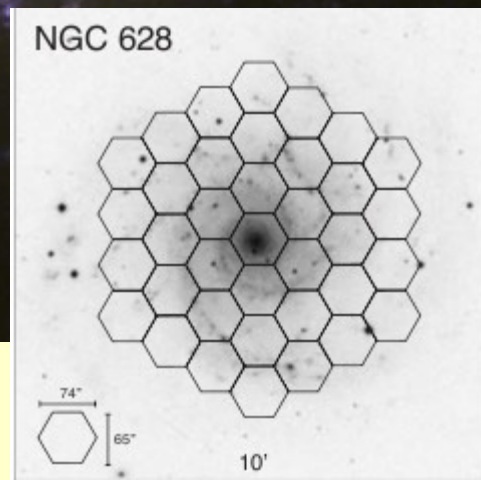
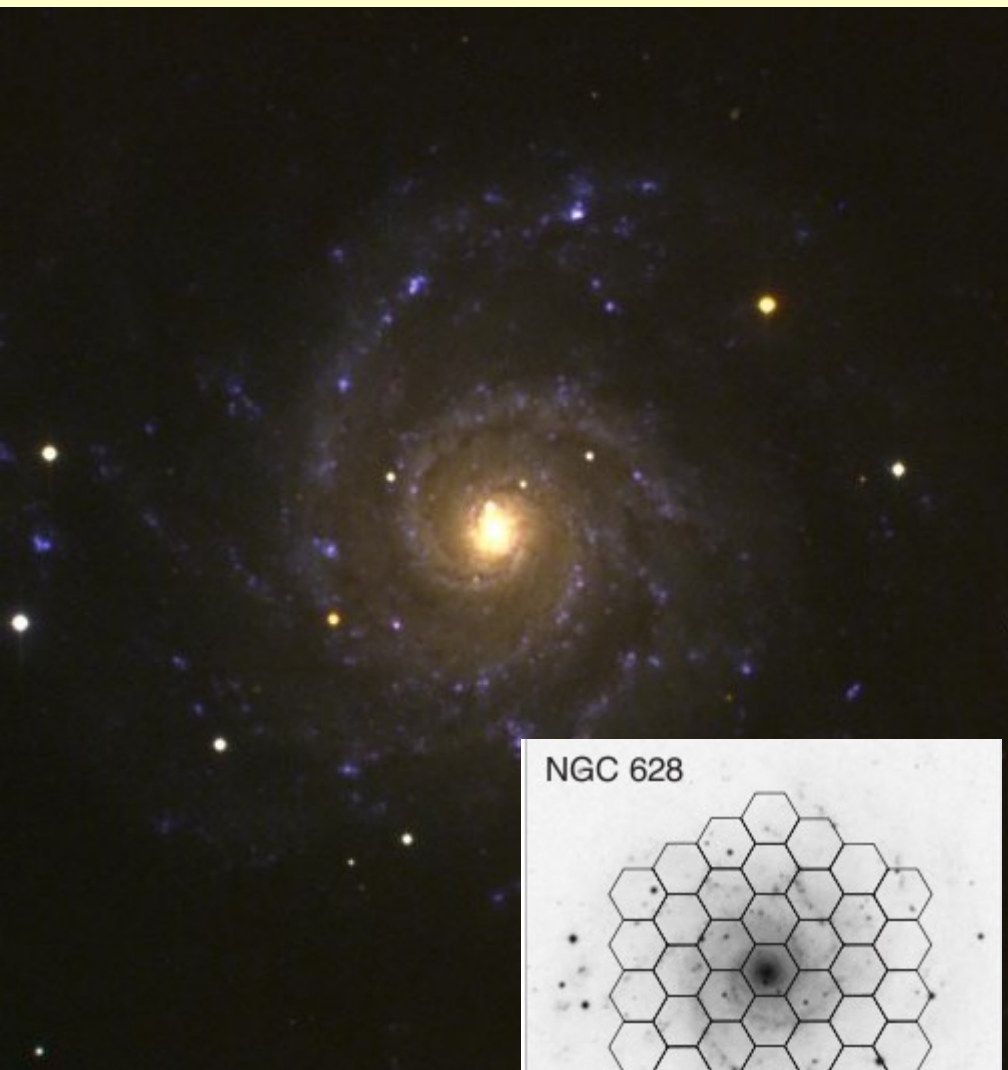


CALIFA:
PMAS/PPAK 3.5 m Calar Alto
331 spaxels (2.7 arcsec)

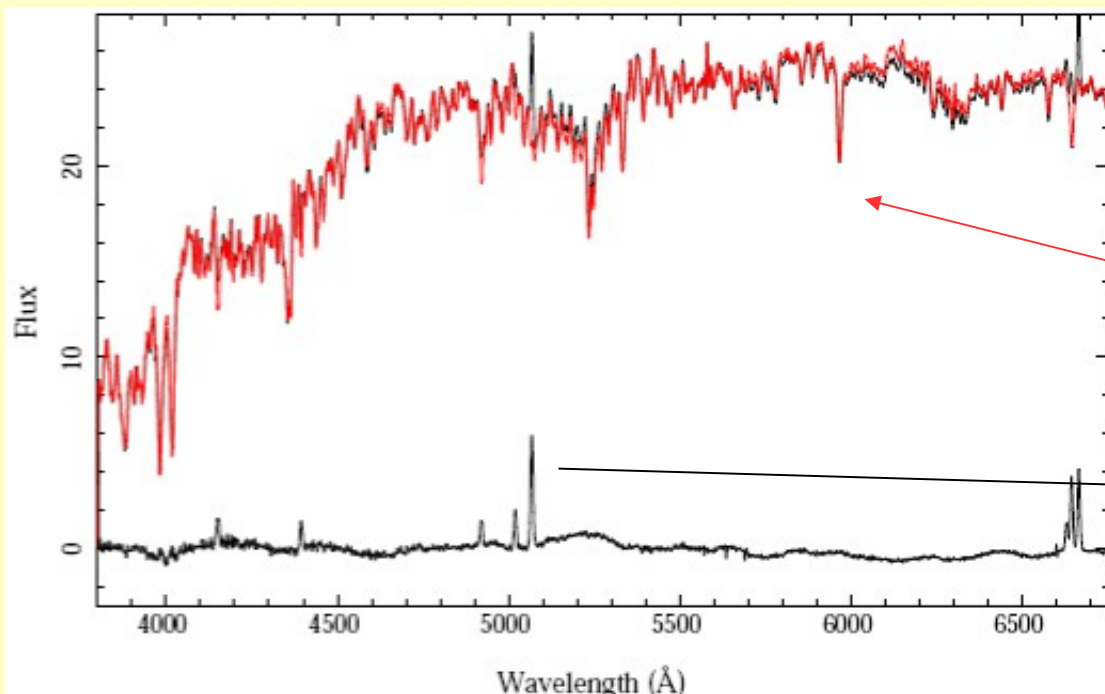
Два диапазона:
4300-7000 AA R=850
3700-5000 AA at R=1650



РРАК – мозаика спектров в галактике NGC 628



CALIFA: декомпозиция спектров



SSP (single stellar population):

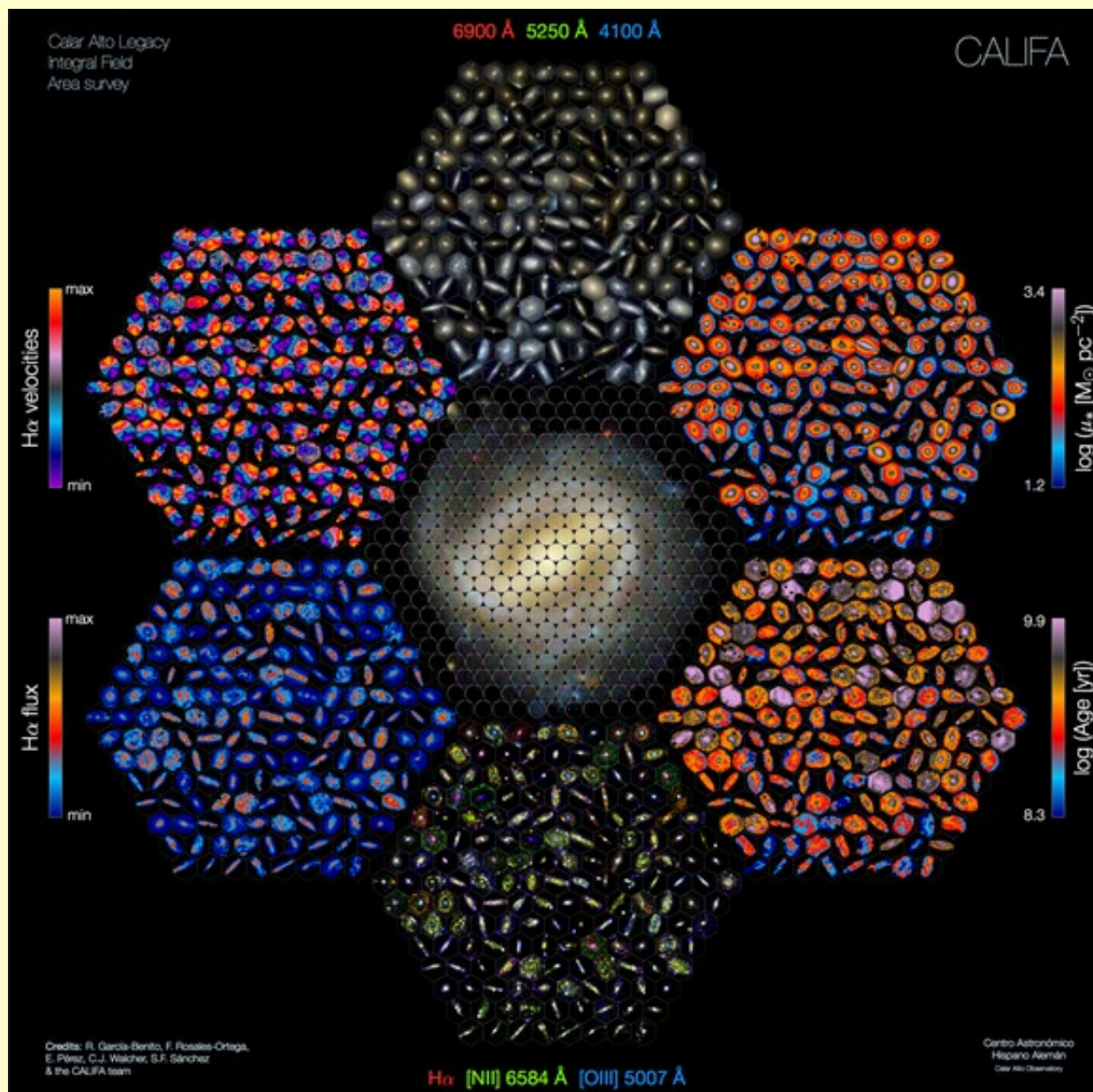
- кинематика звезд (velocity, σ)
- возраст (T), металличность (Z)

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 $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$
1	ERROR	32-bit float	1σ 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)

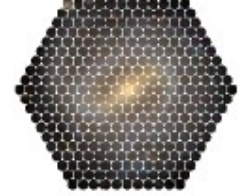
CALIFA: данные для 600 галактик в свободном доступе



Включая софт для
анализа и
визуализации

Kinematics and morphology

AYKALI



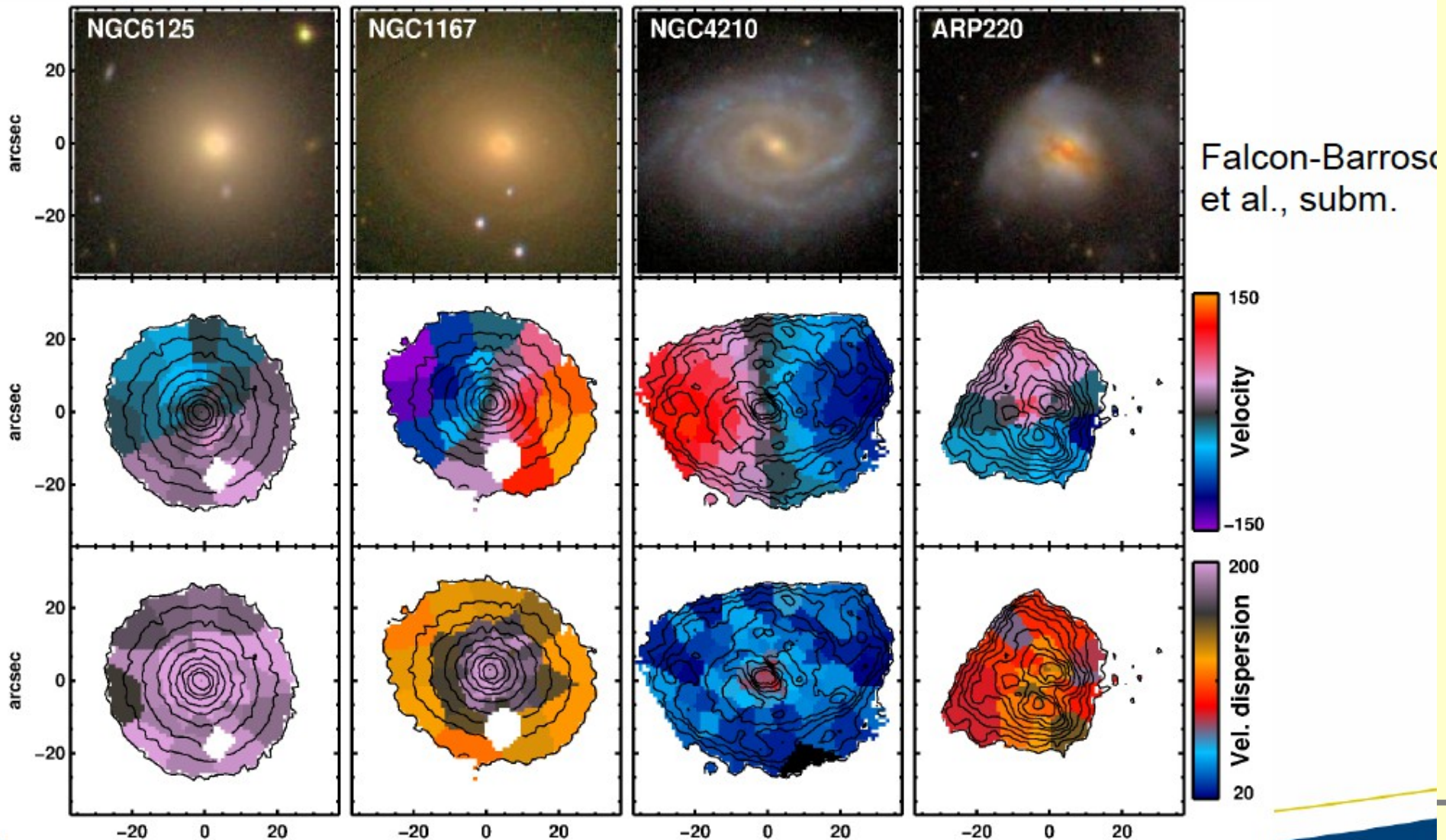
CALIFA Survey

Ellipse

Spiral

Late Spiral

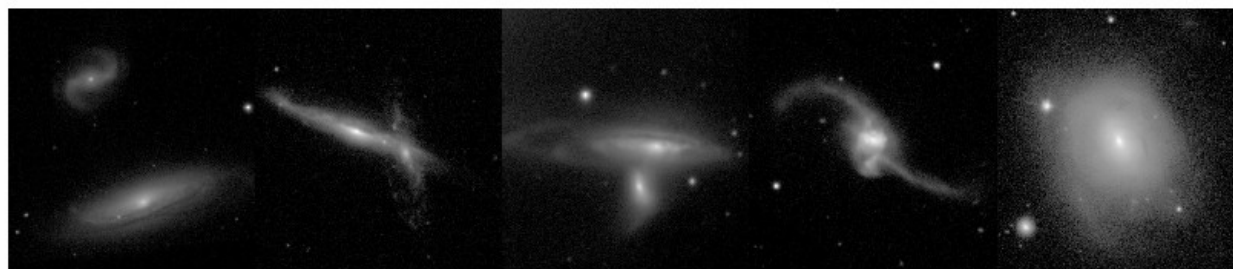
Irregular



Merger stages

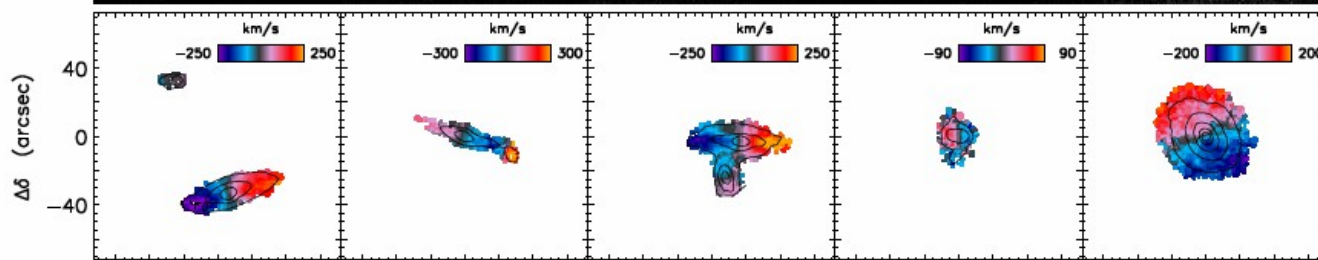
image

r-band



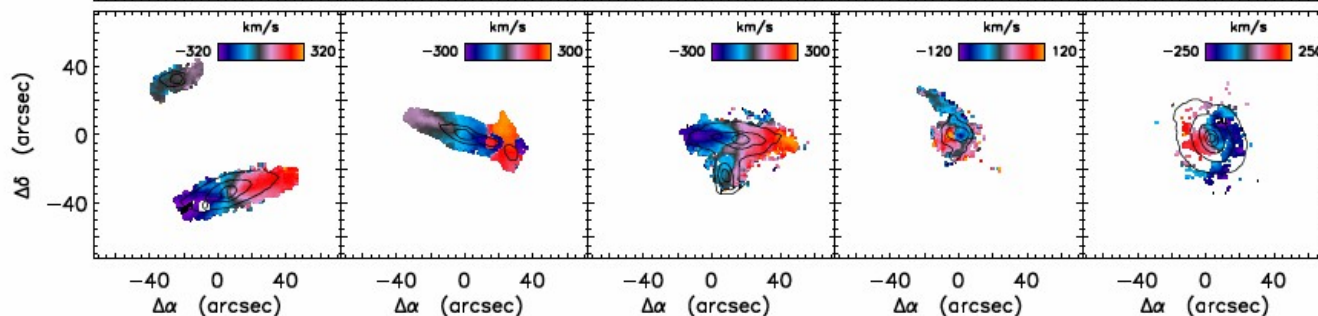
V_{stars}

Stars



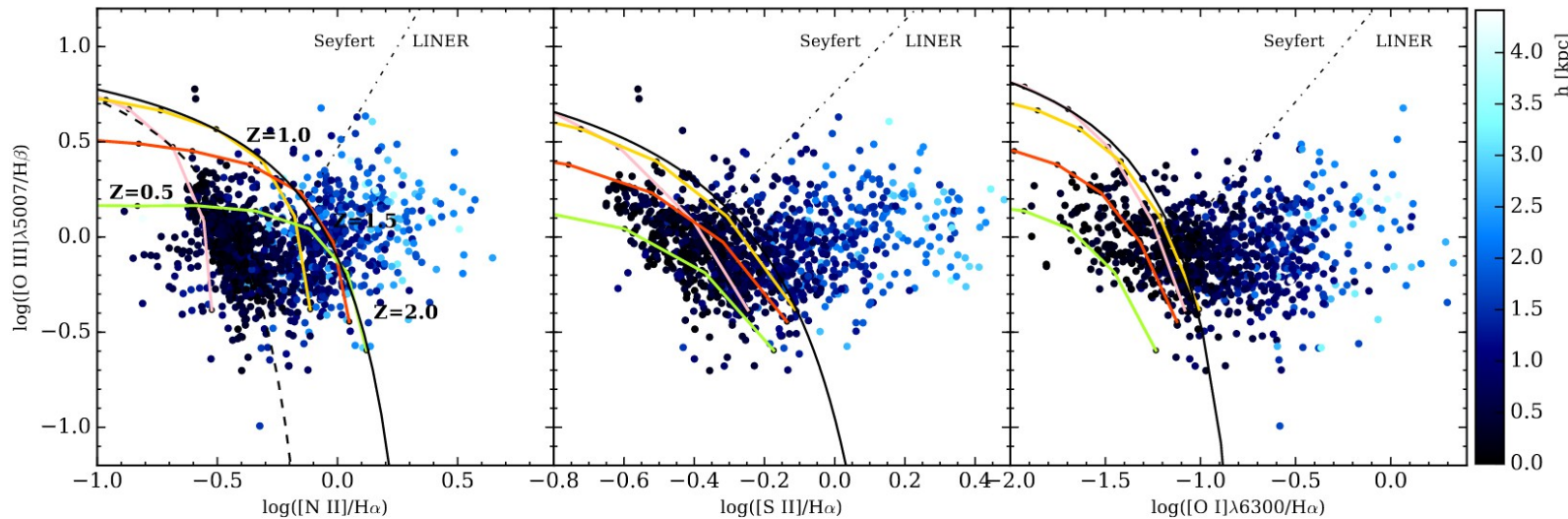
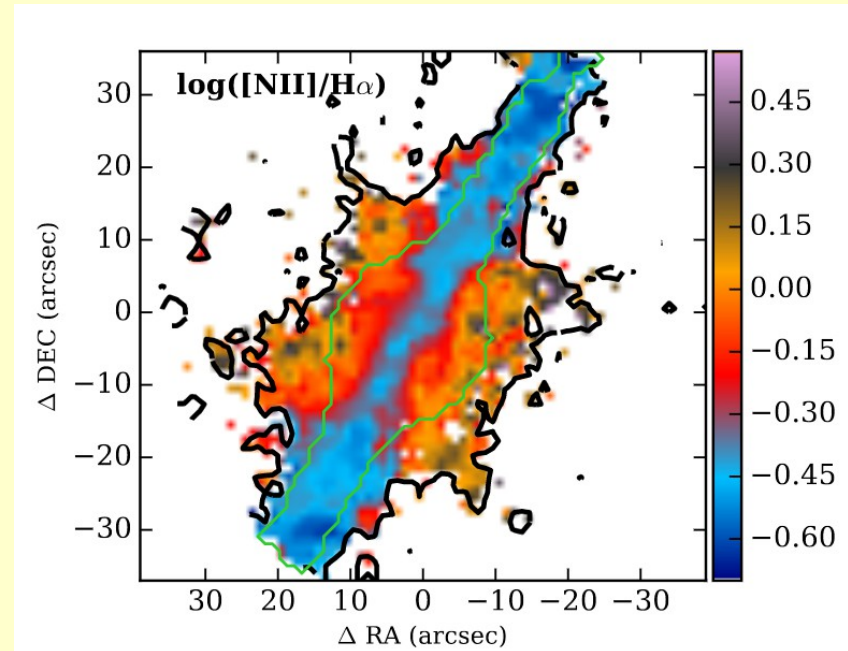
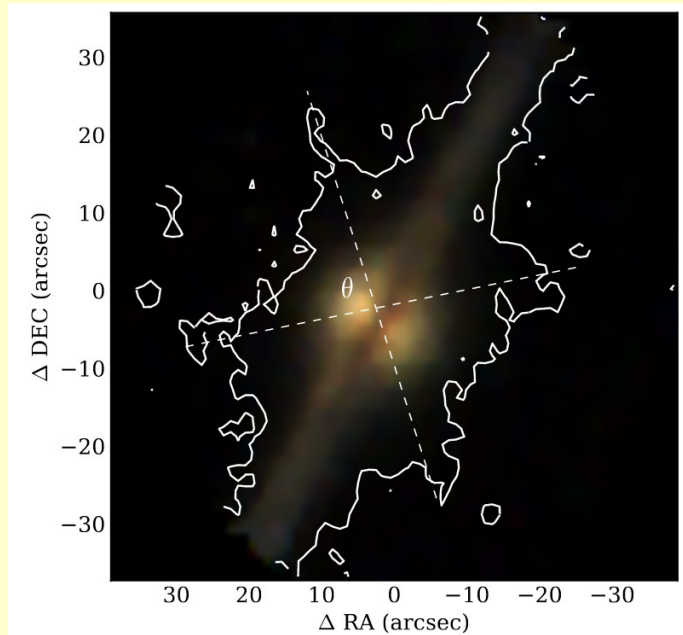
V_{gas}

Ionised gas



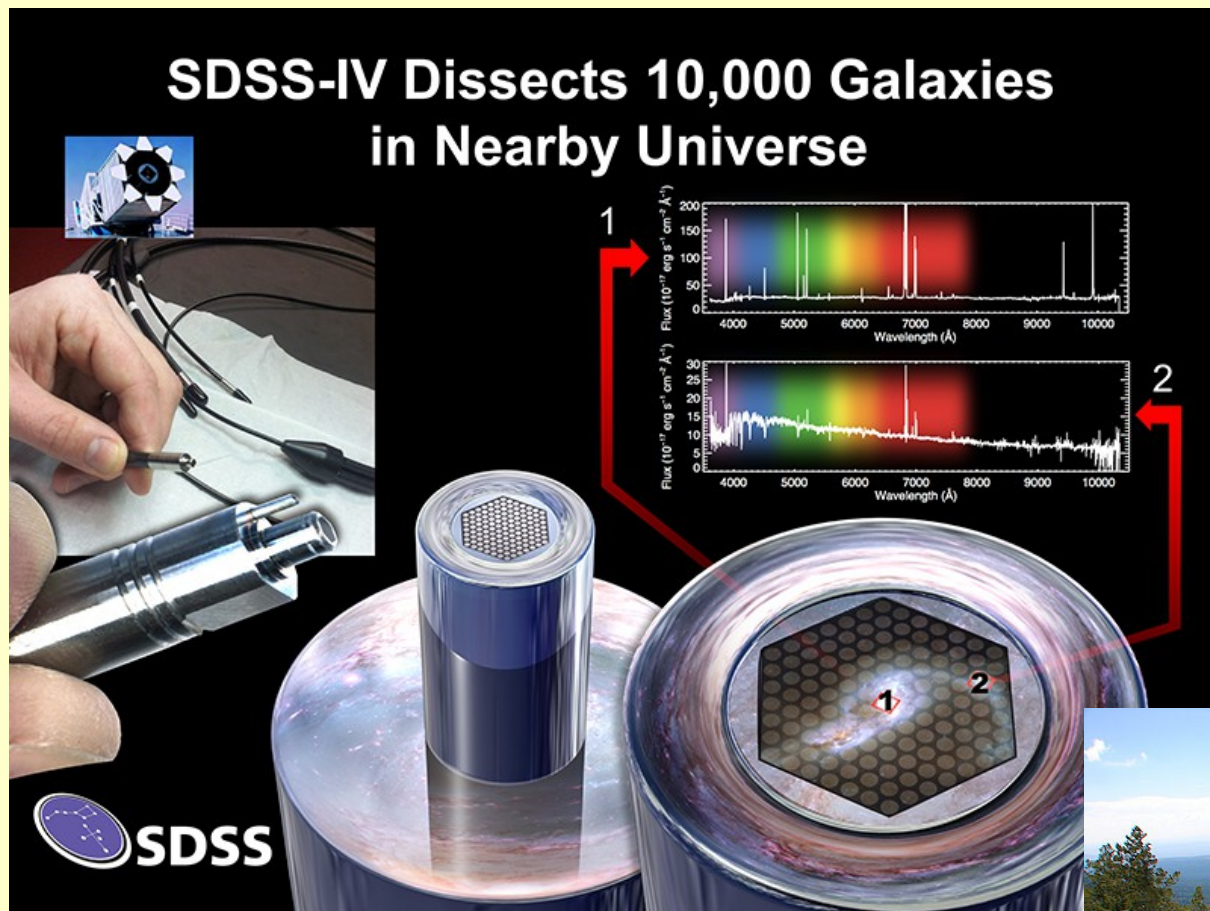
Barreras-Ballesteros et al. (2015)

UGC 100043: галактический ветер

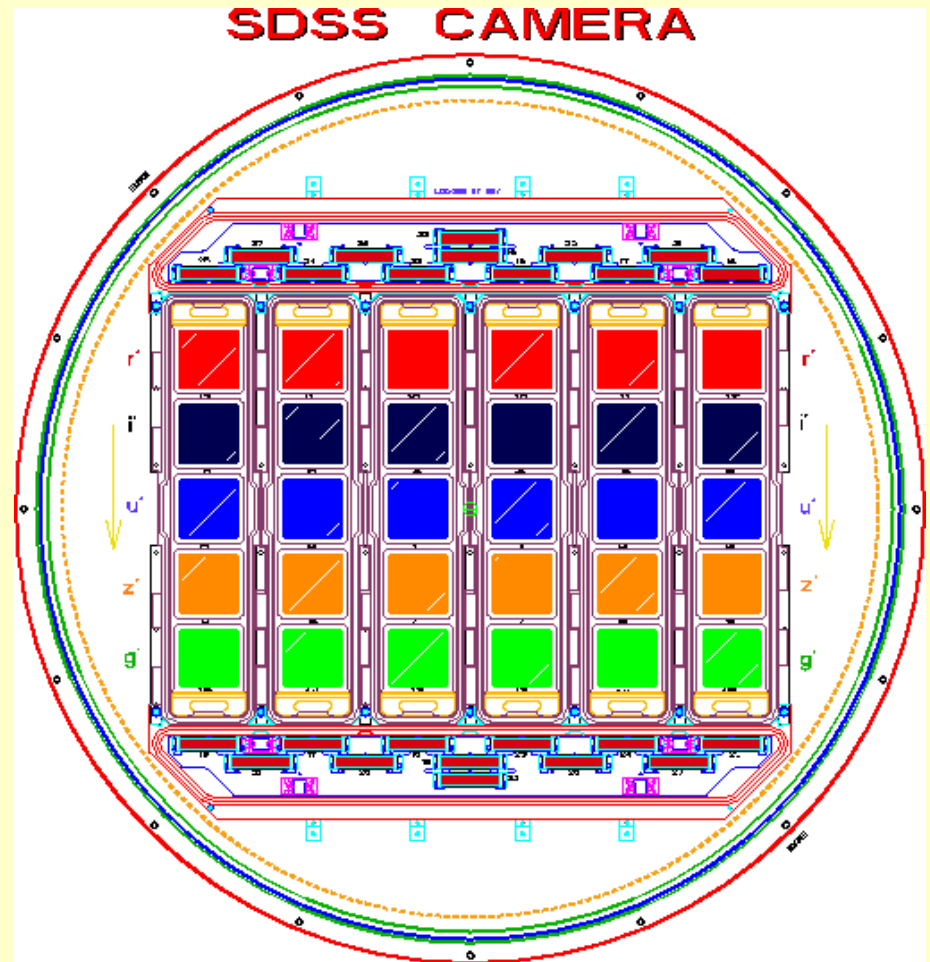
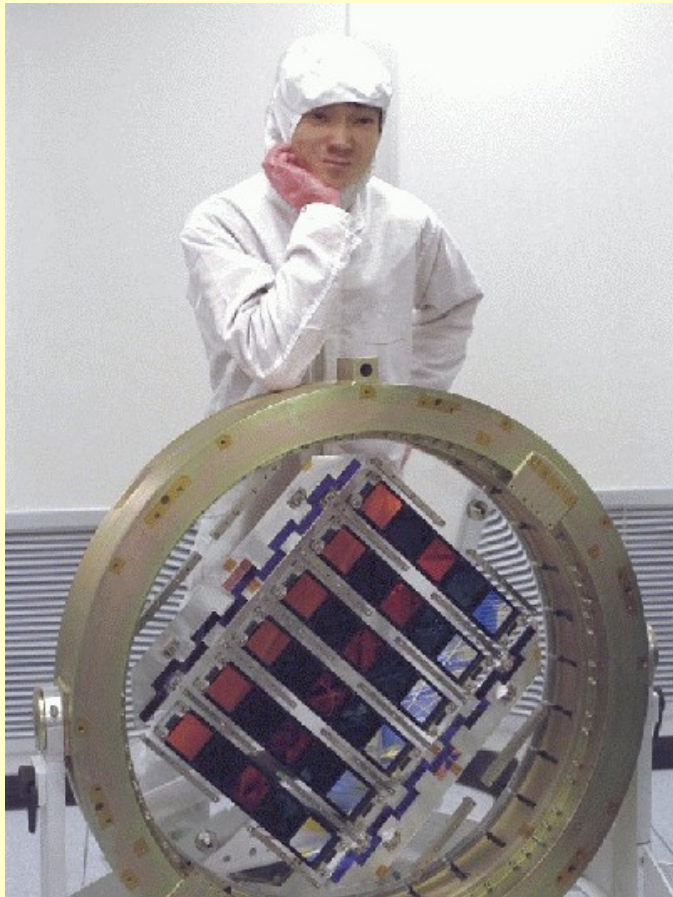


MaNGA: Mapping Nearby Galaxies at APO

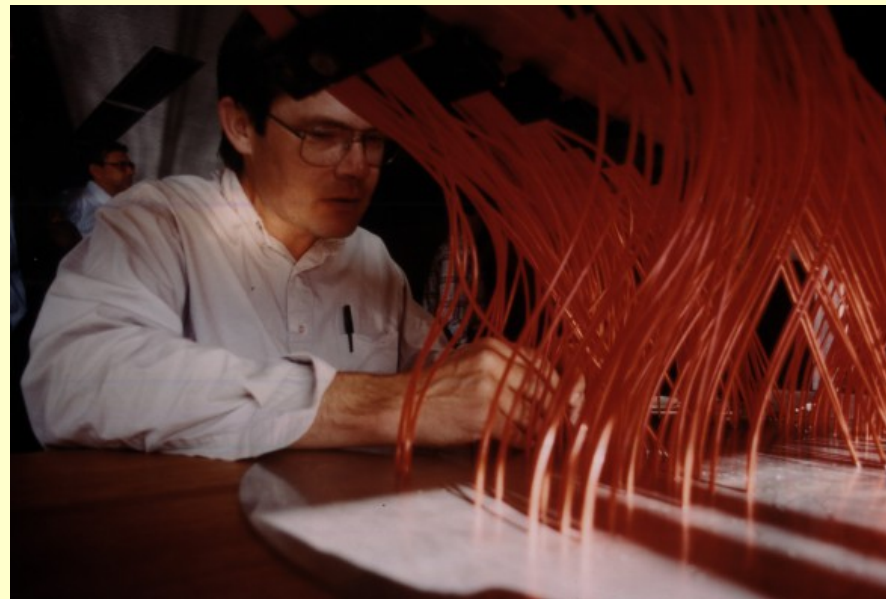
2.5-m APO



SDSS: Изображения – дрейфовое сканирование



Спектры – волоконная маска



1000 световолокон за раз!

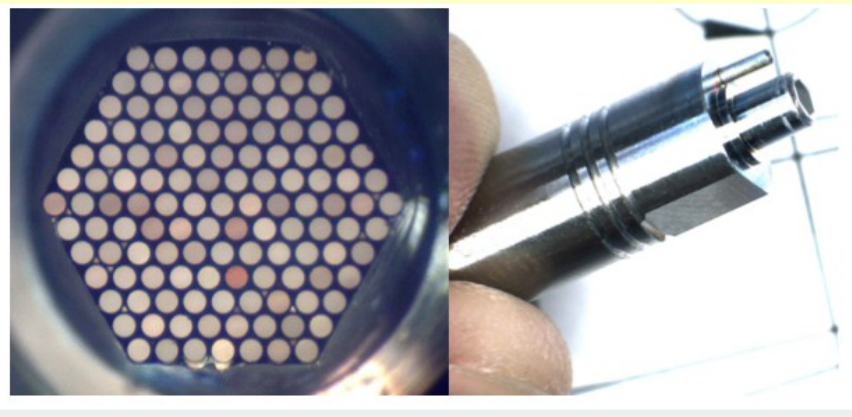
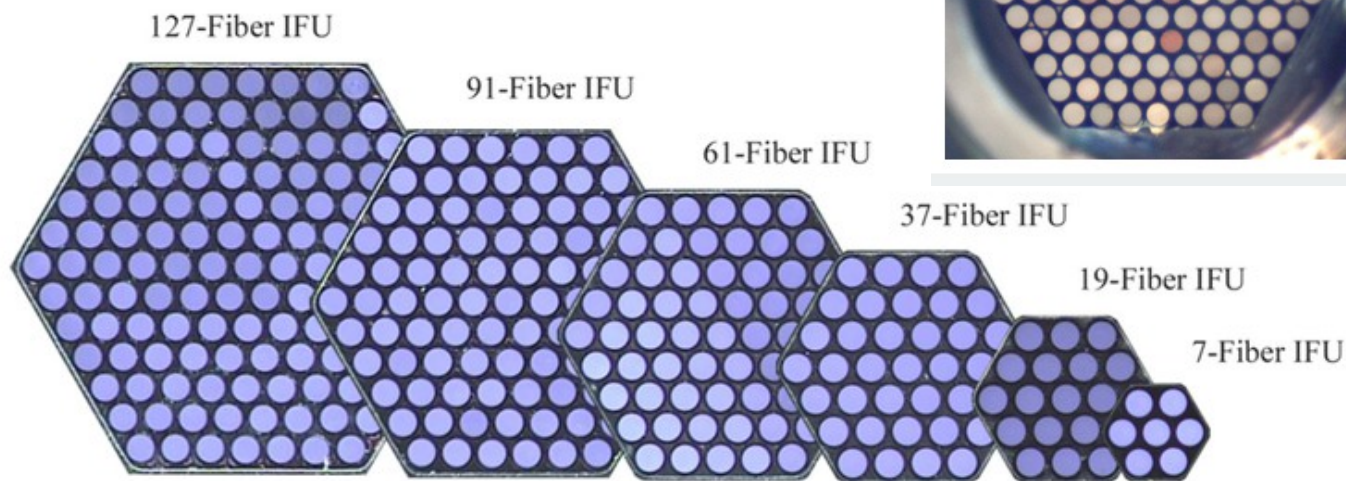


MaNGA: IFUs

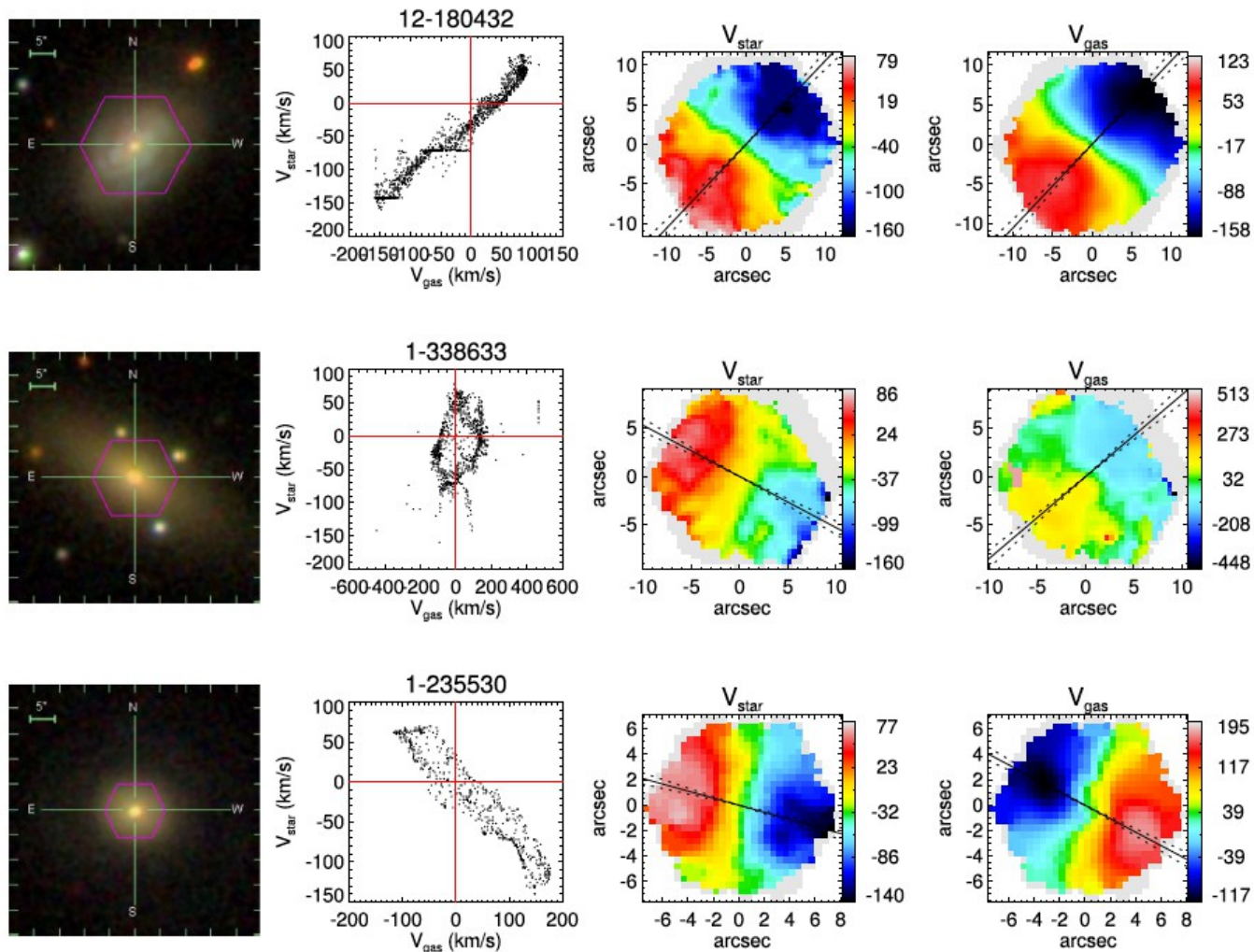
MaNGA Technical Details

- ☆ Dark-time observations
- ☆ Fall 2014 – Spring 2020
- ☆ 17 IFUs per 7 deg² plate
- ☆ Wavelength: 360-1000 nm, resolution R~2000
- ☆ 10,000 galaxies across ~2700 deg², 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 spa7al 3--- point dithering
~ 1400 fibers, R~2000 3600-- 10300AA



MaNGA: первые результаты



Нормальное
Вращение

Полярный газ?

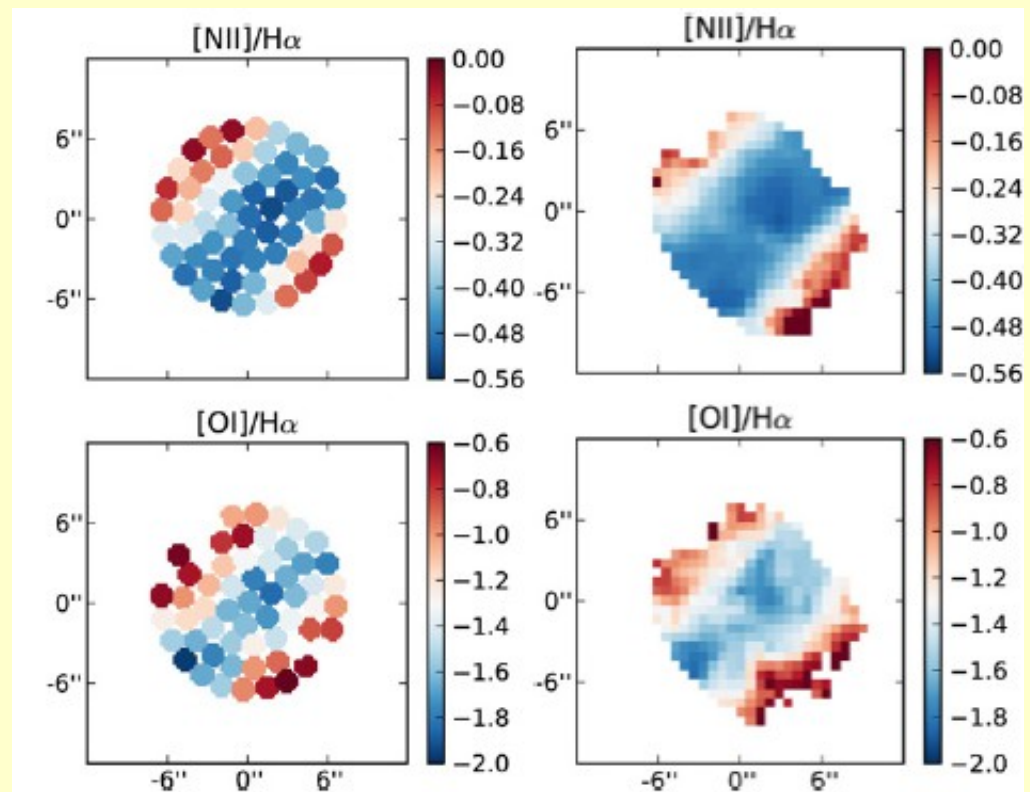
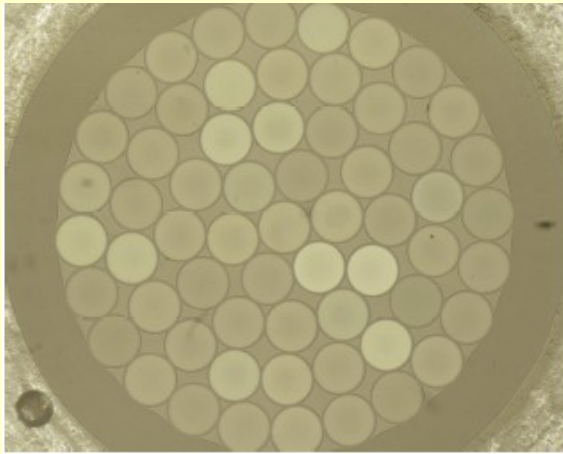
Противовращение

Jin+16

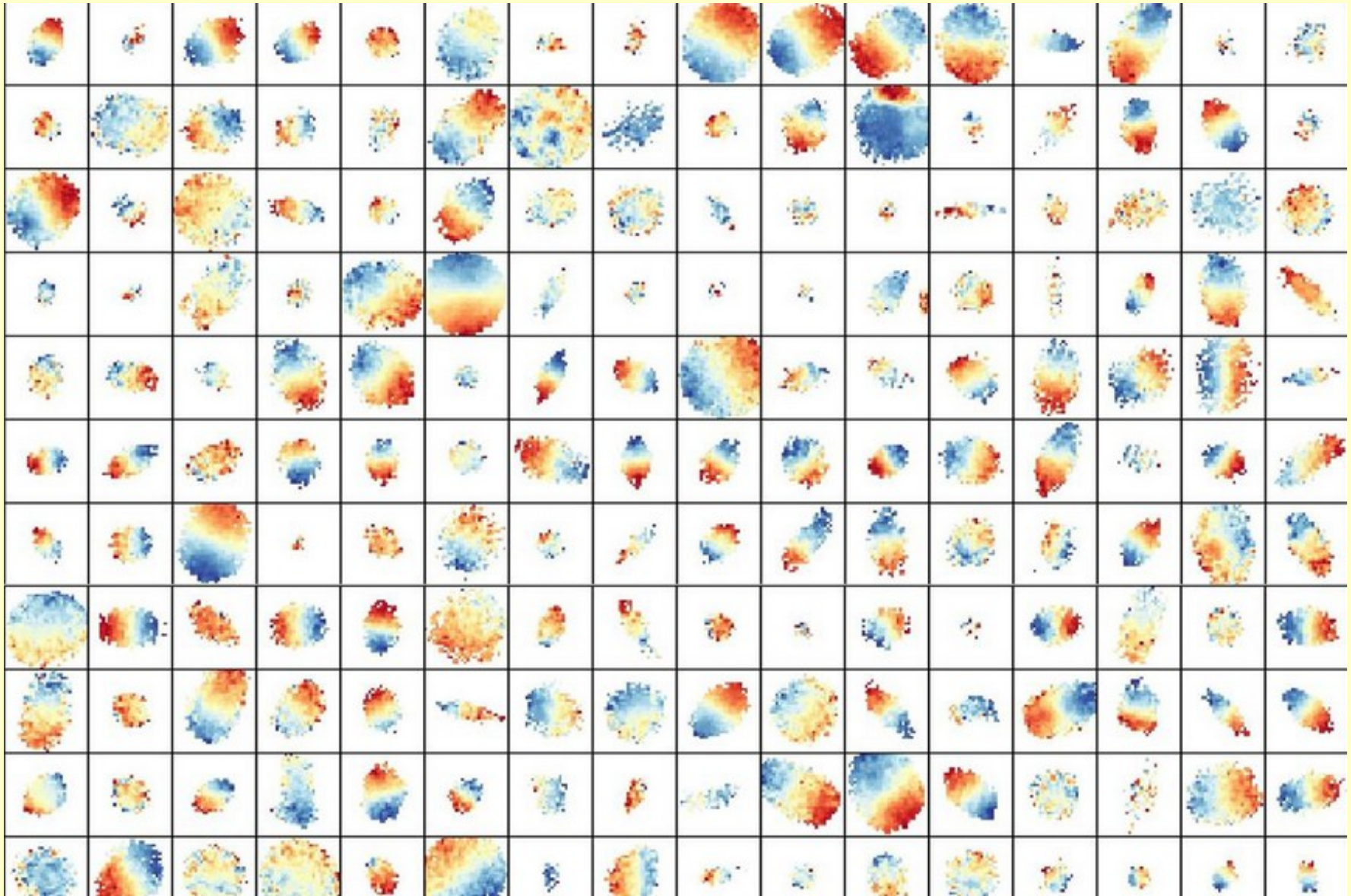
SAMI: Sydney-AAO Multi-object Integral-field spectrograph

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

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



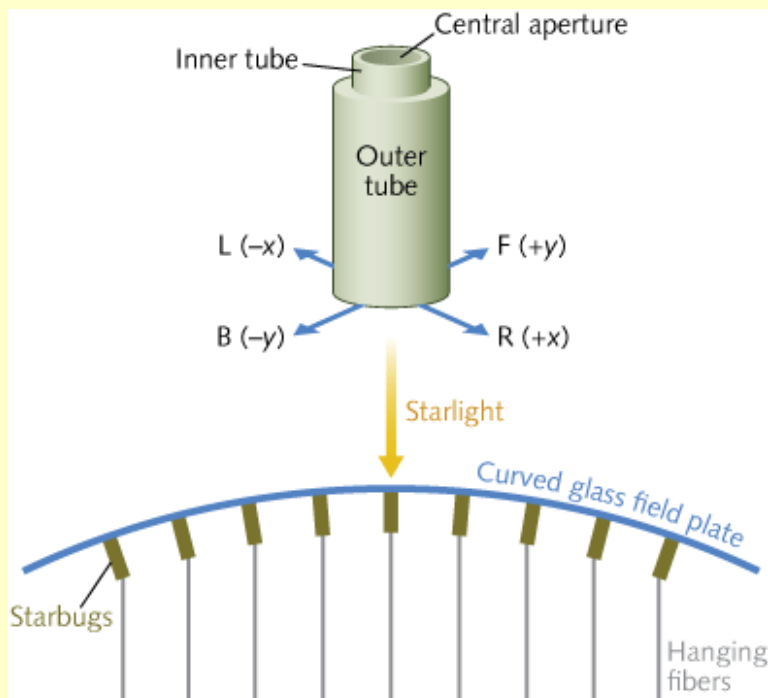
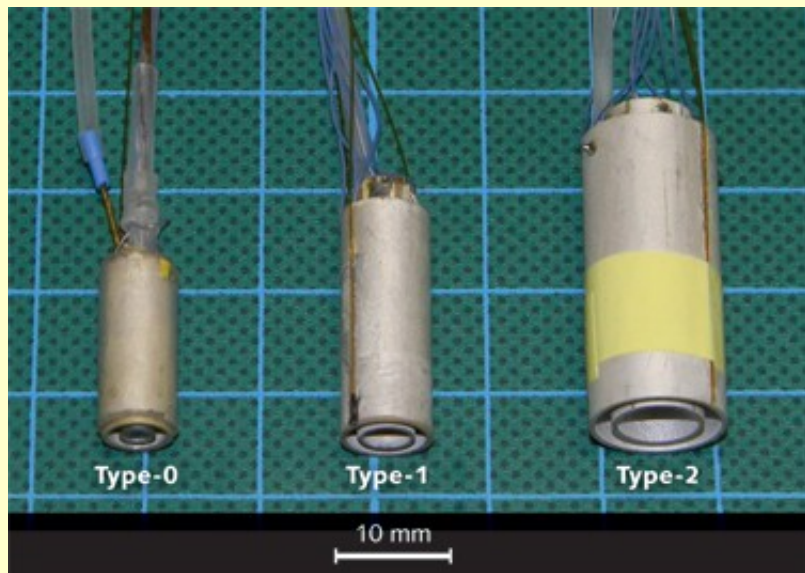
SAMI galaxy survey



Дальнейшие перспективы: Hector

	SAMI	Hector-I	Hector-2	Hector-3dF
Number of hexabundles	13	21	50	~90
Field diameter (degrees)	1	2	2	3
Coverage diameter on each galaxy	15"	15-30"	15-30" ($2R_e$ on 90% of galaxies)	15-30" ($2R_e$ on 90% of galaxies)
Survey size by 2027	13,800	20,600	50,000	80,000
Cost	\$0	\$3M	<\$15M	\$27M

Пьезоэлектрический робот starbugs





Есть в библиотеке САО!