

# Методы панорамной спектроскопии

## Лекция I.

О чём этот курс? Введение:  
проблемы классической щелевой спектроскопии, понятие куба данных. История метода, основные типы спектрографов.

# О чем этот курс?

- Рассмотрим разные реализации метода 3D спектроскопии («все классические спектрографы похожи друг на друга, а вот панорамные...»)
- И то, что делается (и делалось) на БТА в этом направлении
- Основные идеи обработки, анализа и **визуализации** данных
- Примеры применения (больше упор на внегалактические исследования и массовые обзоры).
- Принципы измерения физических параметров галактик и туманностей (кинематика, химсостав, параметры ионизации, звездное население)

Связь с курсом «Многорежимный фокальный редуктор БТА» :

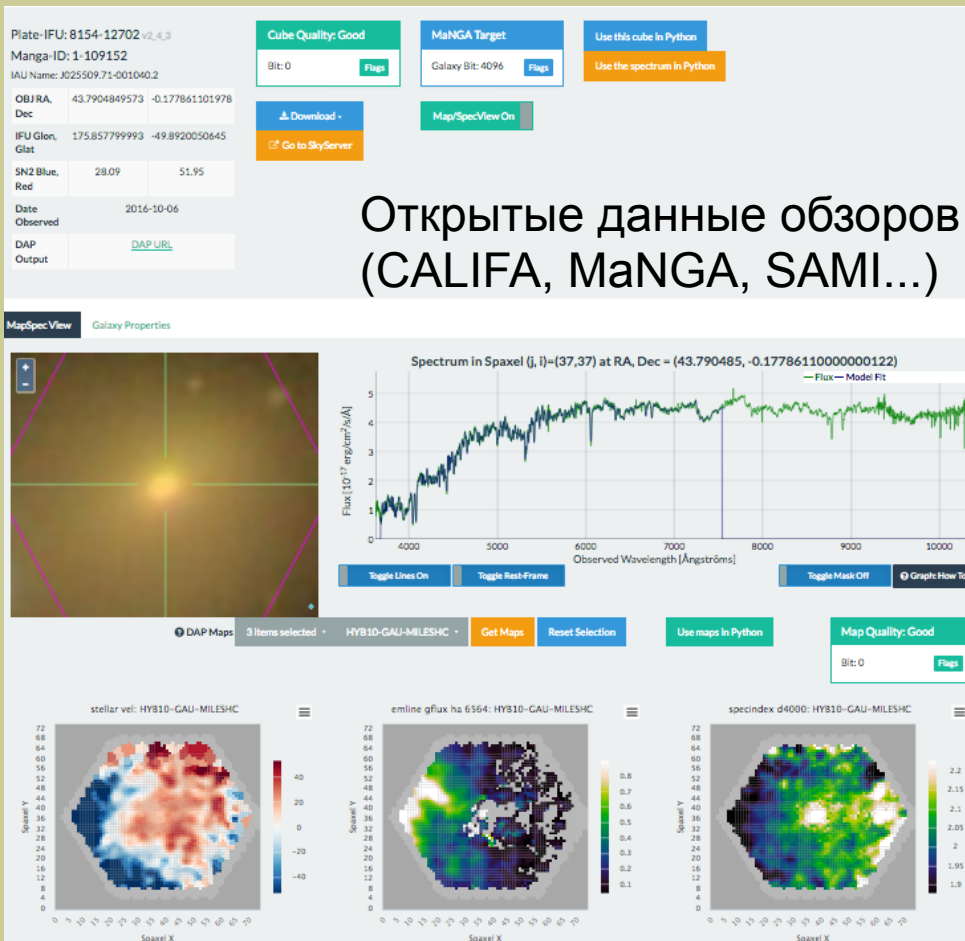
- Напомним базовые понятия (спектрограф, широкощельность)
- Сканирующий интерферометр Фабри-Перо

# Зачем этот курс?

Сейчас 3D-спектрографы – на многих средних и больших телескопах

(На 6-м телескопе БТА: SCORPIO-2/IFU & FPI)

В ближайшем (надеемся) будущем:  
NIRSpec и MIRI на борту JWST




# Записи и материалы – ссылки на моей страничке

<https://www.sao.ru/hq/moisav>

(там же и курс по редуктору светосилы)

**Алексей Моисеев**

[Switch to English](#) 

Основная

CV

Публикации

Конференции

Лекции

Студенты

Семья



Здравствуйте! Это личная страничка Алексея Моисеева, д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника нашей [Лаборатории](#). Я - ответственный за метод наблюдений [SCORPIO-2](#) на [6-м телескопе CAO РАН](#). Также я руковожу [астрофизическим семинаром CAO РАН](#), являюсь членом редколлегии журналов "[Астрофизический бюллетень](#)" и "[Galaxies](#)", вхожу в [диссертационный совет Д 002.203.01 CAO РАН](#).

Мои научные интересы лежат в области внегалактической астрономии с особым вниманием на технику наблюдений:

- Морфология и кинематика галактик различных типов: пекулярные, взаимодействующие, галактики с полярными кольцами и т.д.
- Процессы обратной связи в галактиках: воздействие областей звездообразования на межзвездную среду, галактический ветер.
- Галактики с активными ядрами и их окружение: конуса ионизации, воздействие джетов на газовую среду.
- Методы 3D-спектроскопии: интегрально-полевые спектрографы, сканирующие интерферометры Фабри-Перо, перестраиваемые фильтры.

Постоянно используемые ссылки:

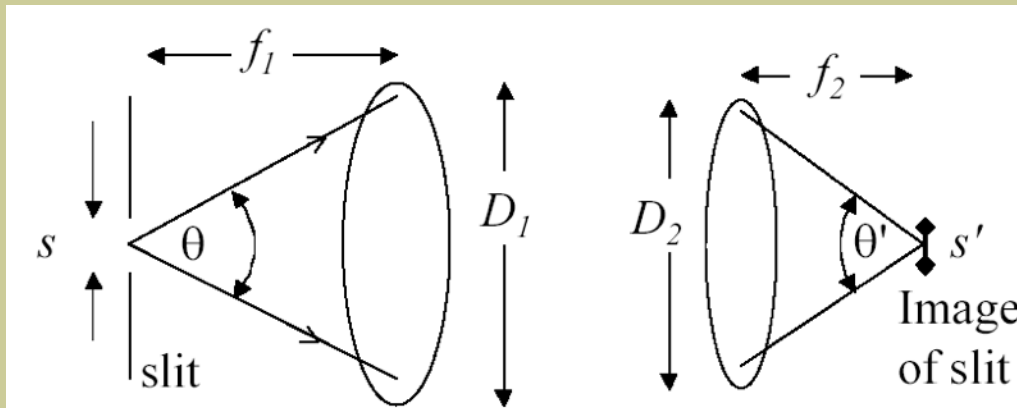


Мои блоги и библиометрия





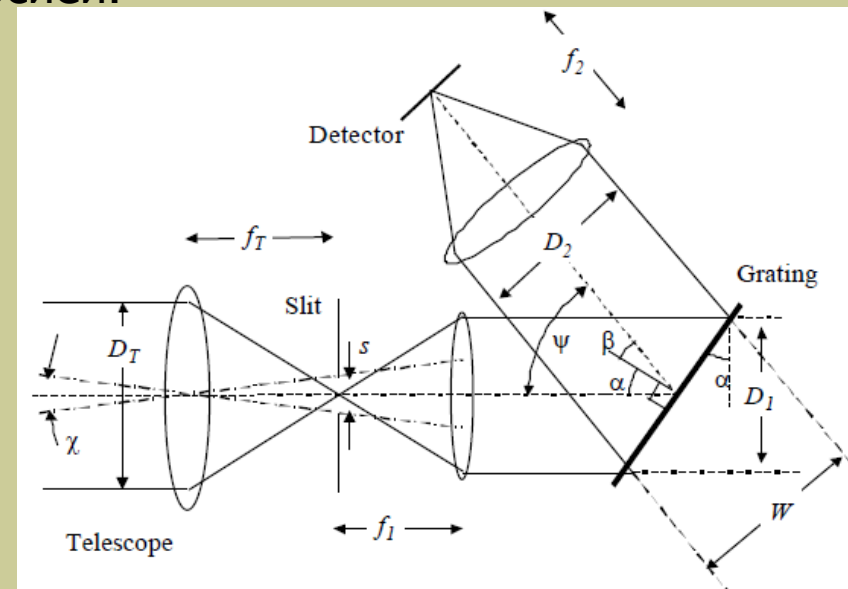
# Щель: спектрограф как телескопическая система



$$s' = s \frac{(f_2/D_2)}{(f_1/D_1)}$$

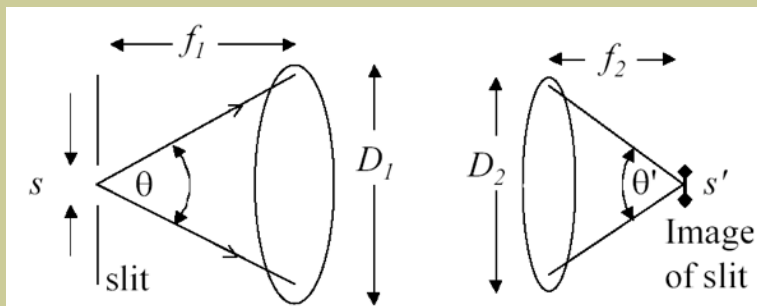
Спектрограф строит серию монохроматических изображений входной щели, поэтому для нас важно только то, что решетка разводит лучи с разными длинами волн, т.е. обладает дисперсией.

См. Лекцию 2  
 "Многорезимный фокальный редуктор.."



## Щель: выбор ширины

На практике, “нормальная щель” – это щель, FWHM которой (в проекции на детектор) равняется 2.5-3 пикселя



$$s = s' \frac{(D_2/f_2)}{(D_1/f_1)} = (2.5 \div 3) \frac{(D_2/f_2)}{(D_T/f_T)} [px]$$

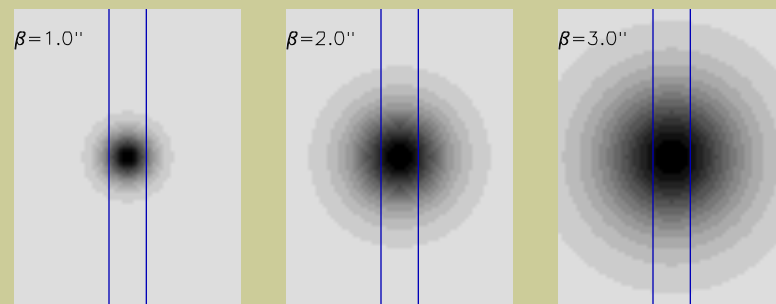
Ширина “нормальной щели” – пропорциональна светосиле камеры, а чем светосильнее камера – тем больше с ней проблем.

С другой стороны, чем шире щель (в угловой мере), тем лучше у **спектрографа широкощельность**.

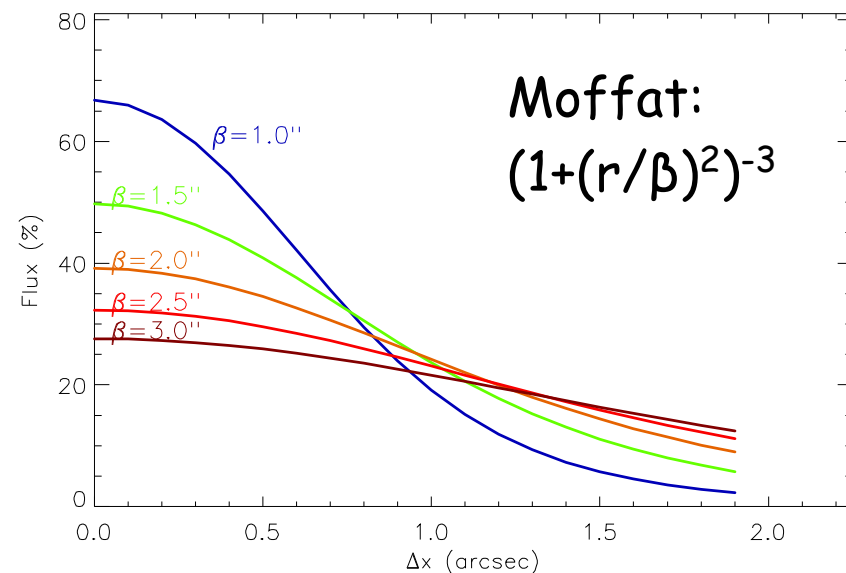
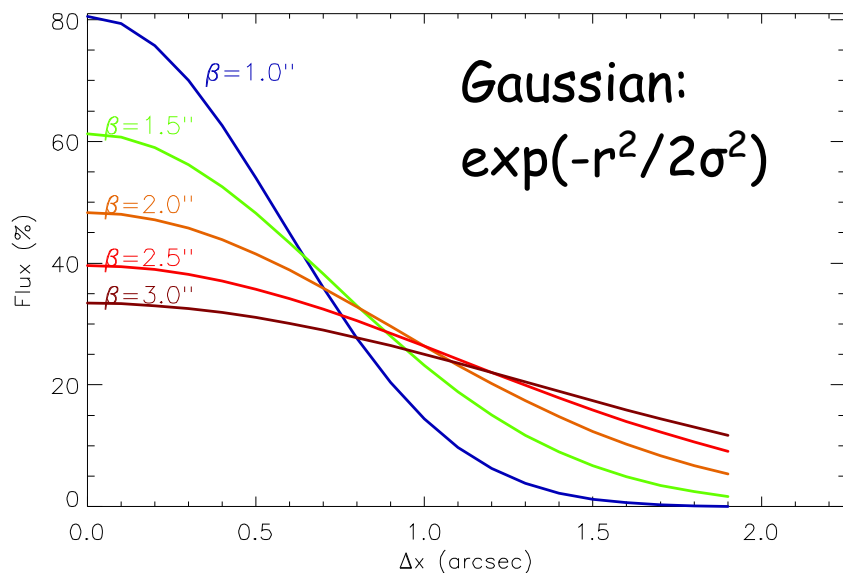
Оптимальная широкощельность – когда ширина нормальной щели равняется пространственному разрешению на телескопе (в наших условиях это размер звездных изображений – seeing)

# Щель: потери света

Поправка за щель зависит не только от качества изображений, но и от точности наведения.



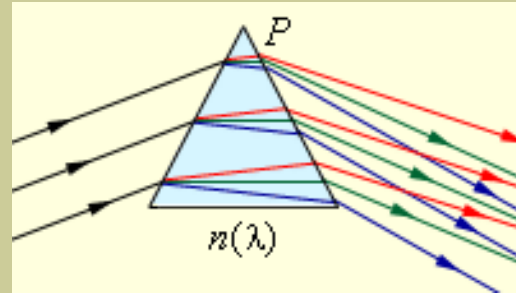
Расчет потерь света на 1'' щели для двух вариантов функций распределения:



См. Лекцию 2

"Многорезимный фокальный редуктор.."  
и статью Моисеев (2008AstBu..63...70)

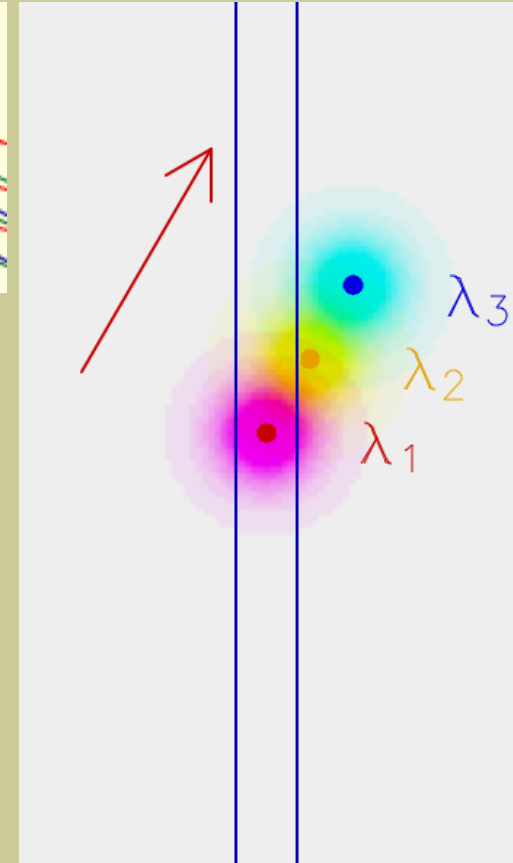
# Атмосферная дисперсия



Она же дифференциальная рефракция атмосферы: изменение угла рефракции светового луча от его длины волны.

Атмосферная дисперсия и САО:

Спекл-интерферометр БТА имеет компенсатор атмосферной дисперсии

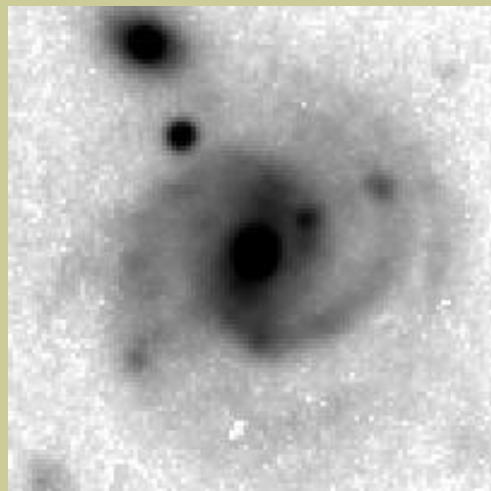


Надо стараться, чтобы щель спектрографа совпадала с направлением атмосферной дисперсии, т.е. была вертикальна.

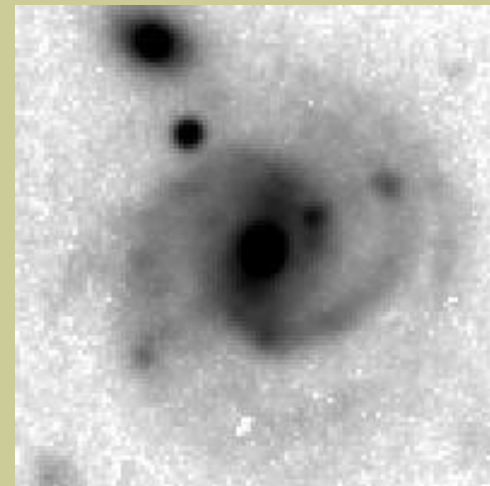
Для SCORPIO/SCORPIO-2 это означает, что  $PA(\text{table})=132^\circ$

# Сравнение щелевой и панорамной спектроскопии

**(длинная щель)**



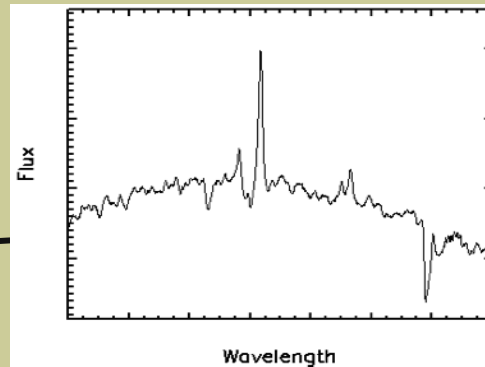
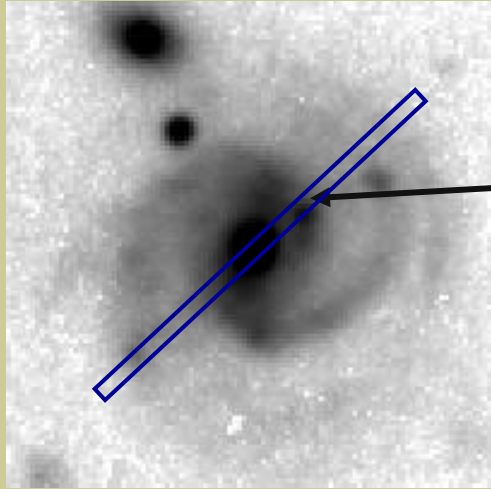
**3D**



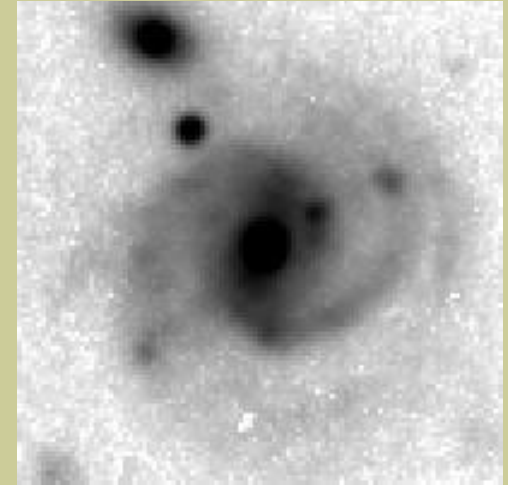


# Сравнение щелевой и панорамной спектроскопии

(длинная щель)

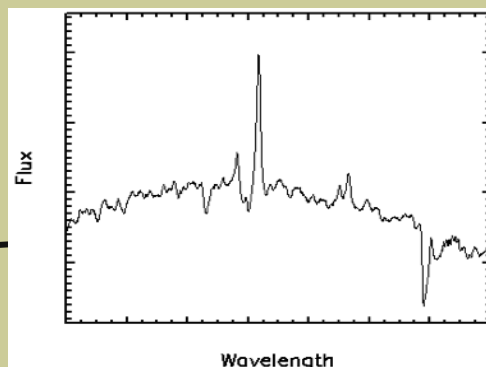
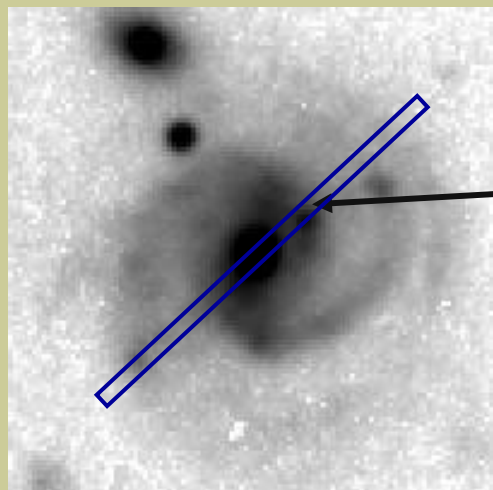


3D

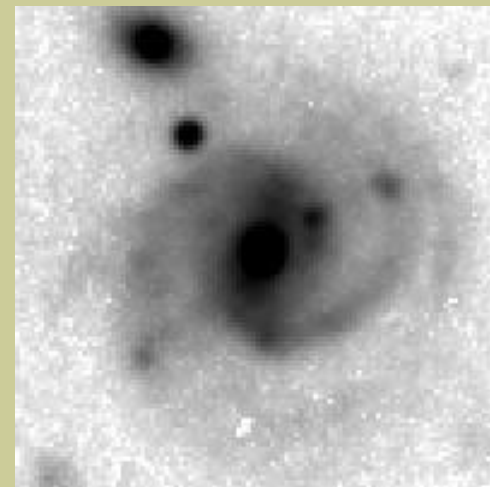


# Сравнение щелевой и панорамной спектроскопии

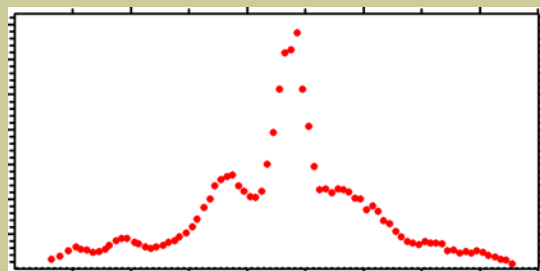
(длинная щель)



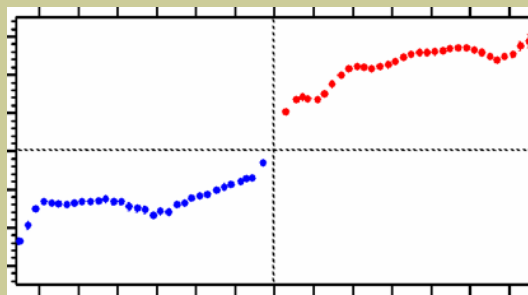
3D



*Потоки в линиях*

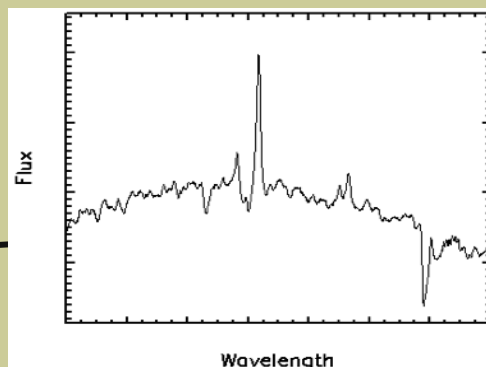
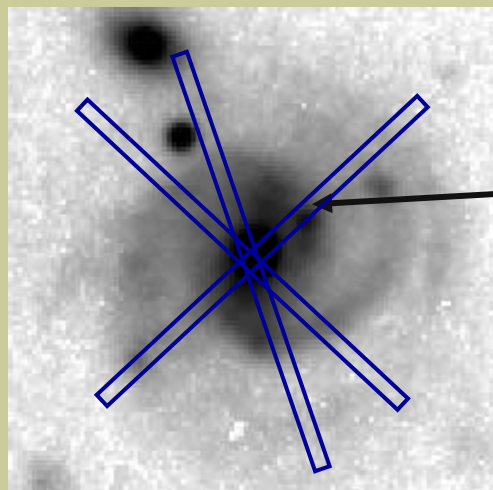


*Лучевые скорости*

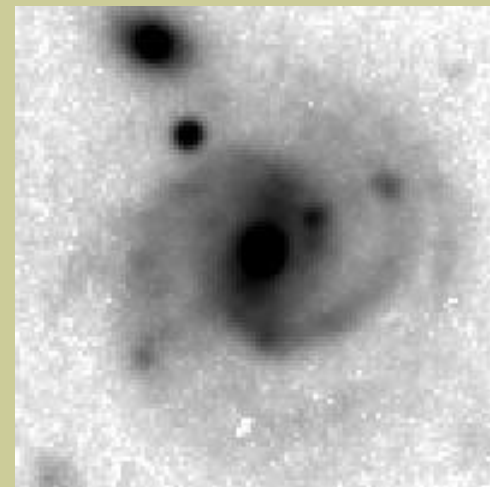


# Сравнение щелевой и панорамной спектроскопии

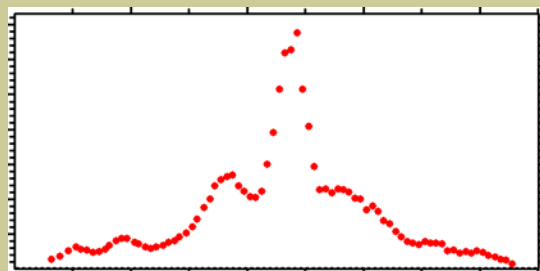
(длинная щель)



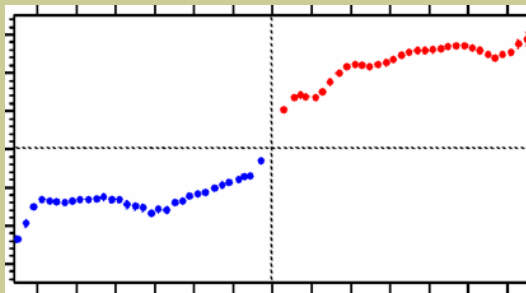
3D



*Потоки в линиях*

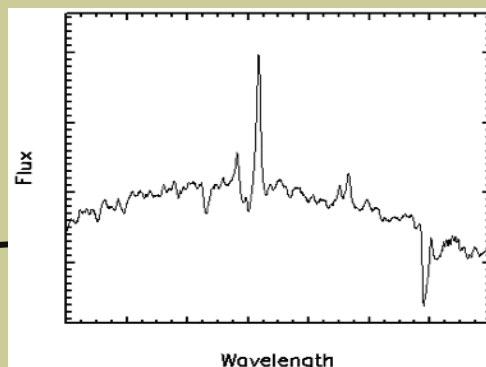
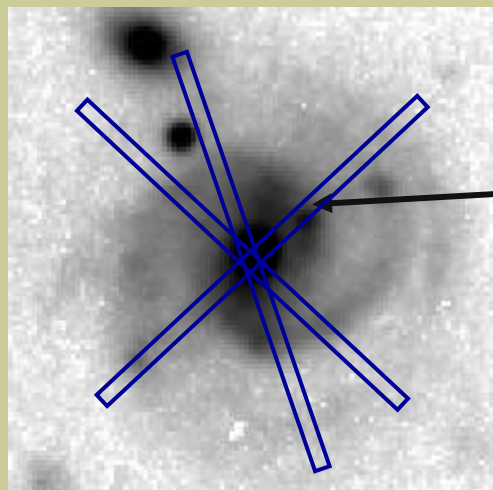


*Лучевые скорости*

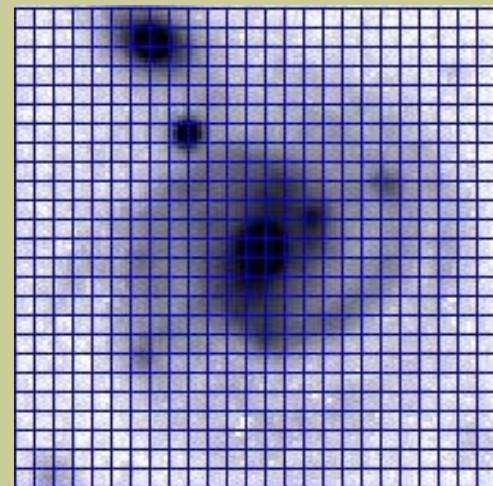


# Сравнение щелевой и панорамной спектроскопии

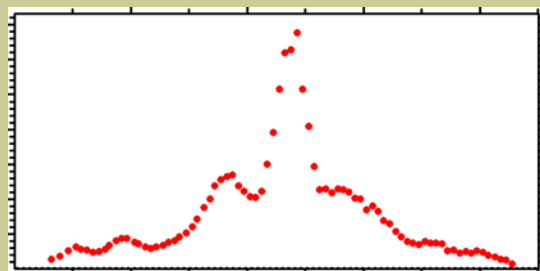
(длинная щель)



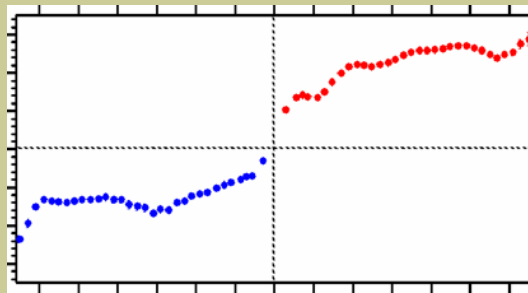
3D



*Потоки в линиях*

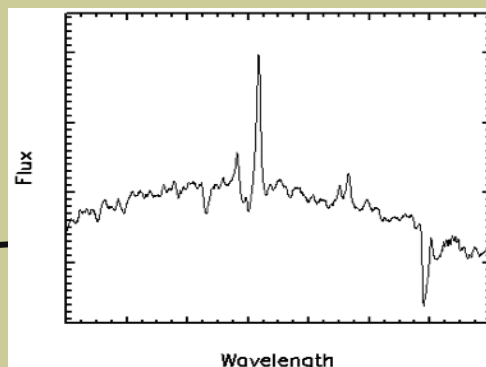
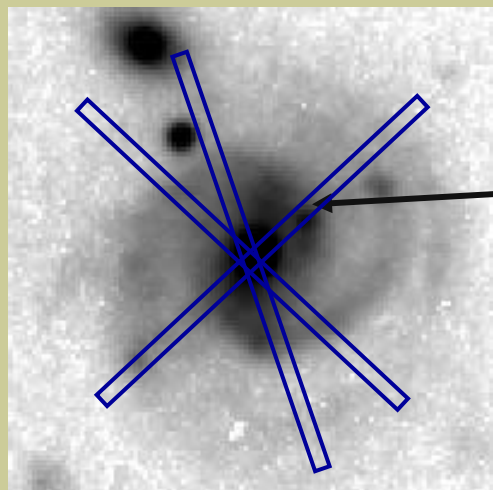


*Лучевые скорости*



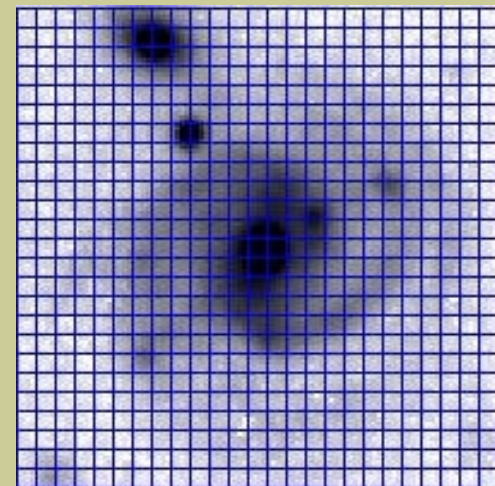
# Сравнение щелевой и панорамной спектроскопии

(длинная щель)

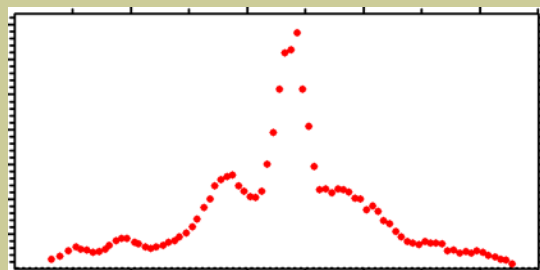


Монохроматическое изображение

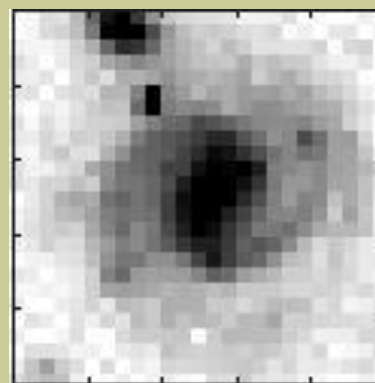
3D



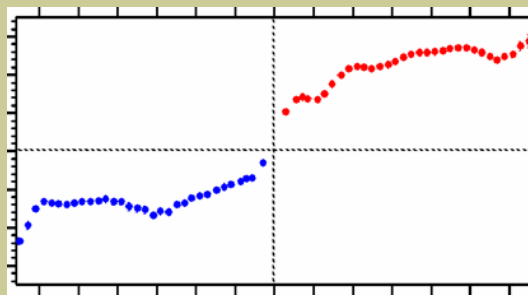
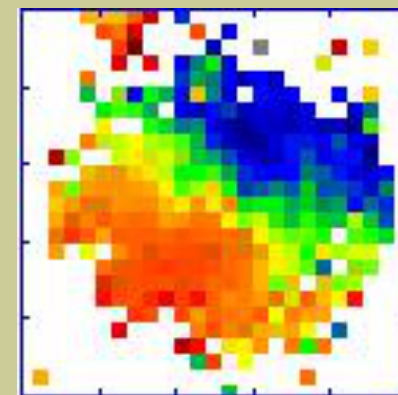
Потоки в линиях



Лучевые скорости

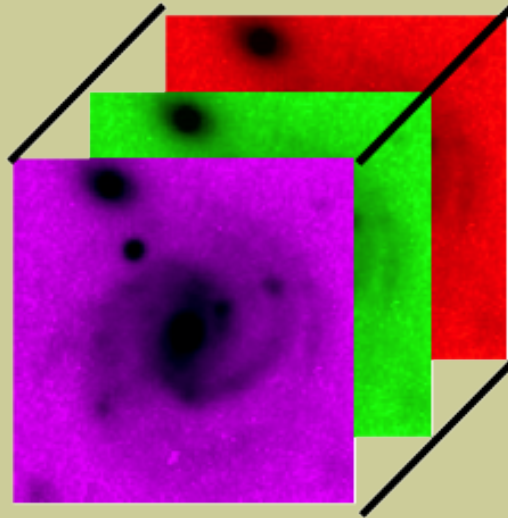
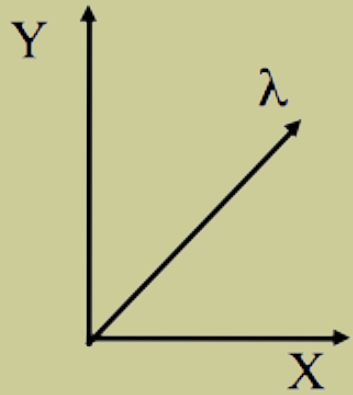


Поле скоростей

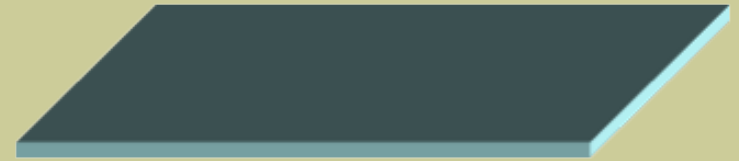




Куб данных



Длинная щель

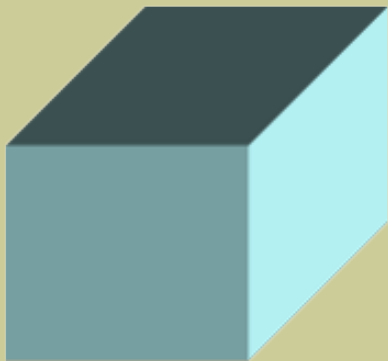


Интерферометр Фабри-Перо

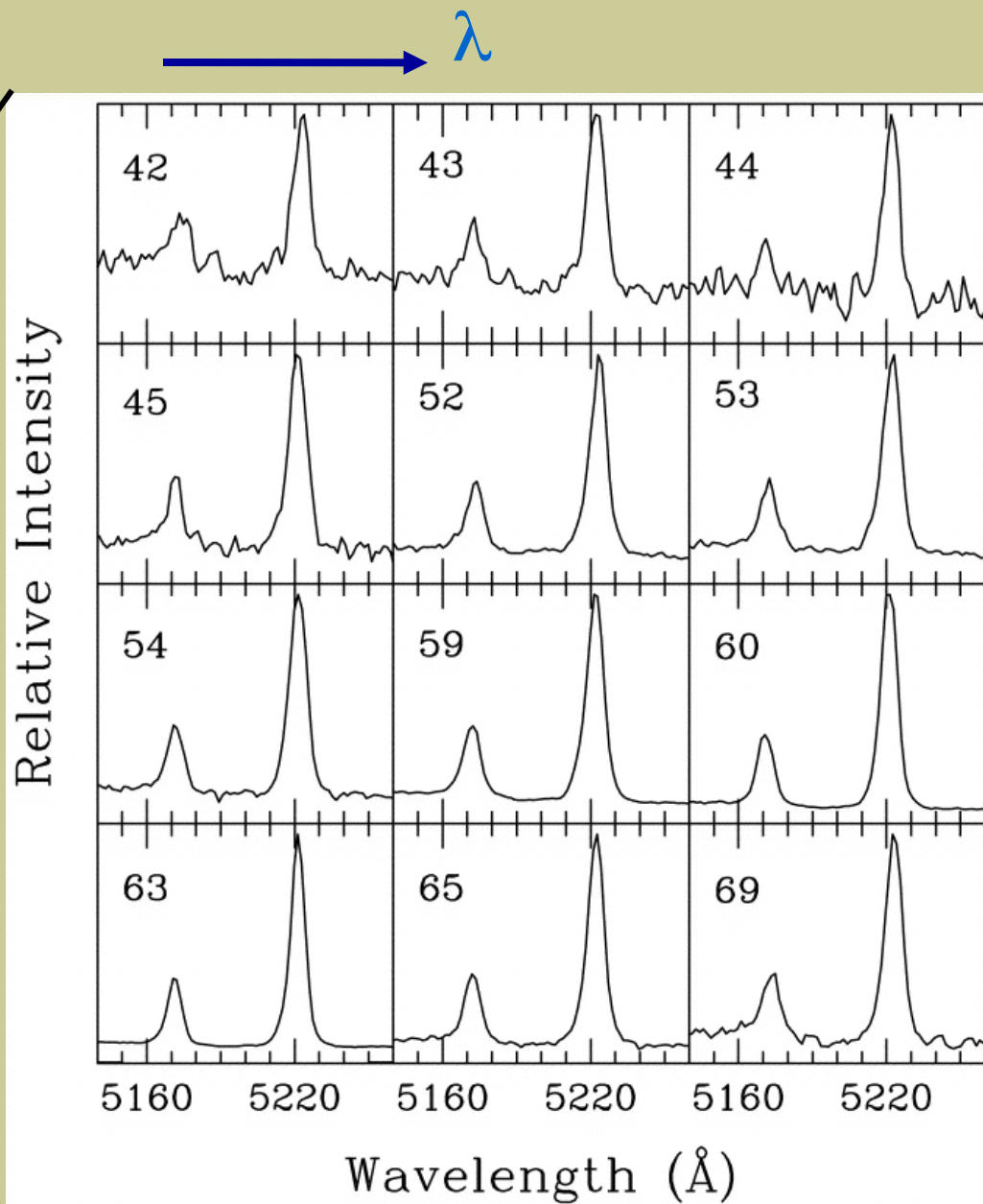
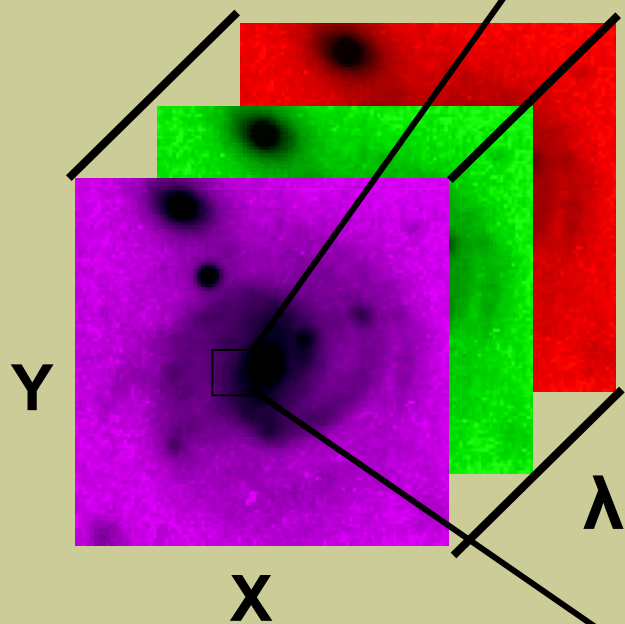


**Первый куб  
данных (в оптике):  
Tully (1974)**

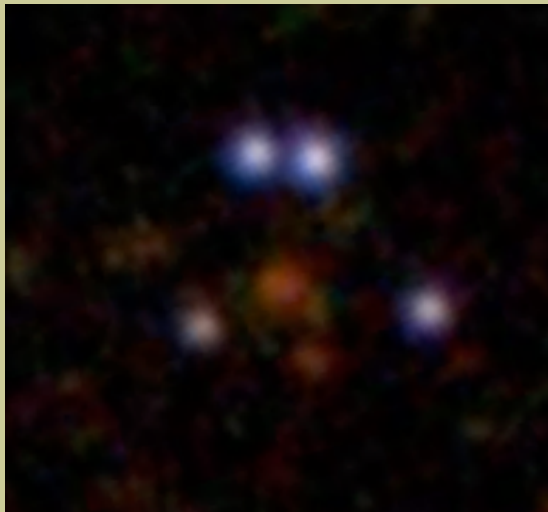
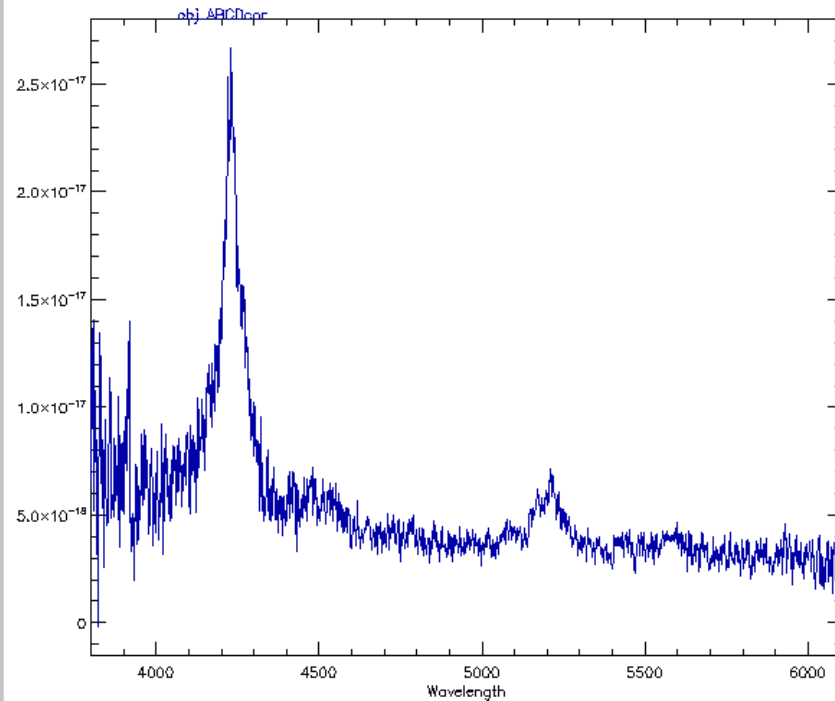
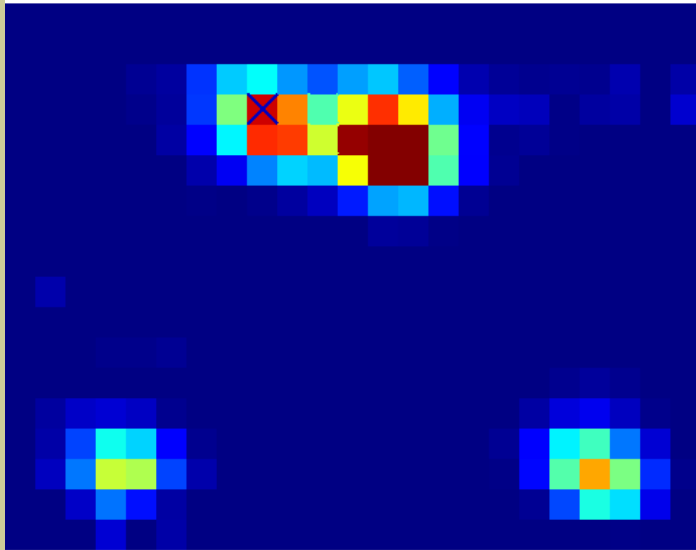
Спектрографы  
Интегрального  
поля



# Фрагмент куба данных

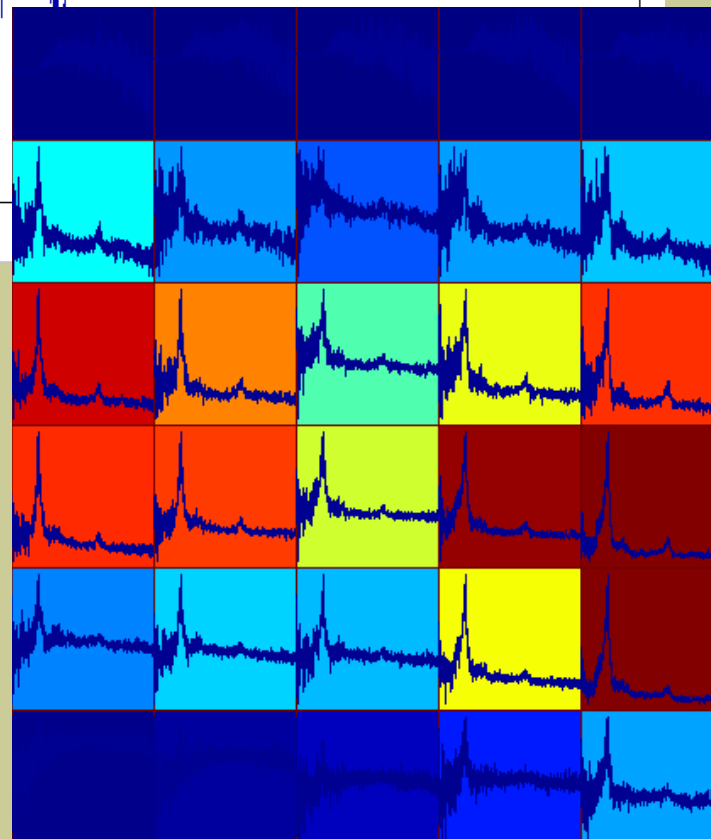
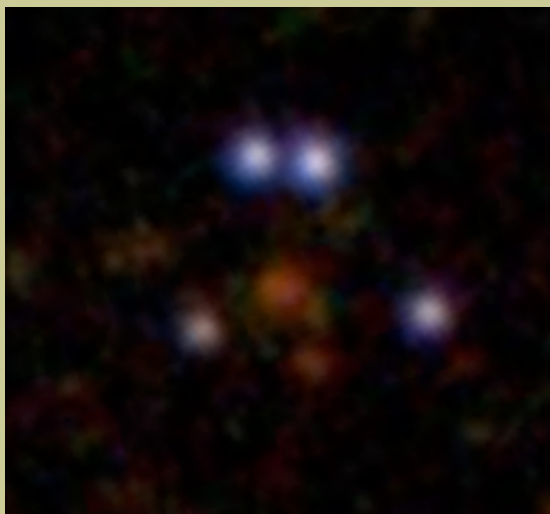
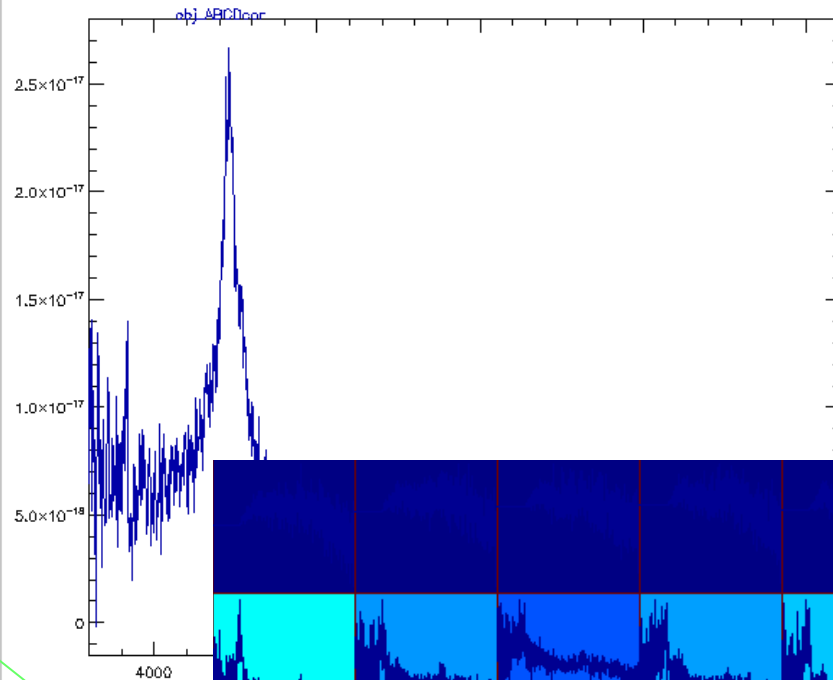
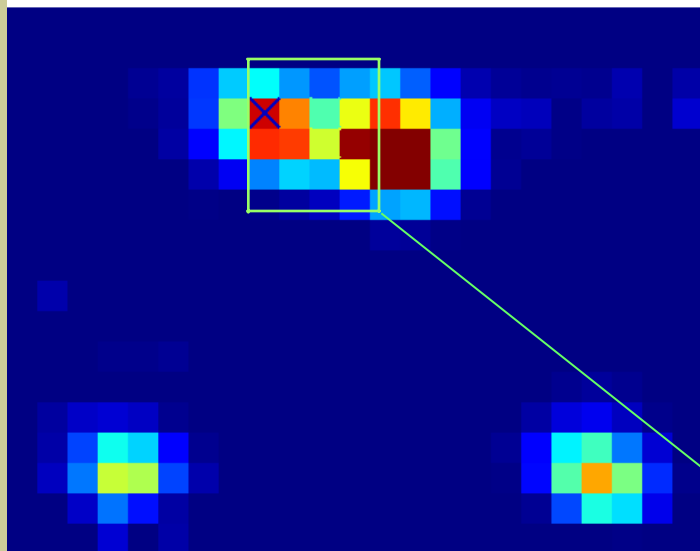


# MPFS: J1004+4112



Popovic, Afanasiev et al  
2020, A&A, 634, A2

# MPFS: J1004+4112



Popovic, Afanasiev et al  
2020, A&A, 634, A2

# Терминология

- 2D (bidimensional) спектроскопия к концу 90г — началу 00х превратилась в 3D (tridimensional)... Метод не менялся, но большее число размерностей выглядело солидней, куб все-таки
- Сейчас чаще говорят просто «3D», или «integral-field», **если это не интерферометр Фабри-Перо или не Фурье-спектрограф**
- **IFS**=Integral-field spectrograph/spectroscopy
- **IFU**=Intergal Field Unit
- **Куб данных** (data cube) — пришел из радиоастрономии, вместе с многомерным FITS
- Spaxel = **Spatial pixel** — пространственный элемент



# Основные астрофизические приложения

## 1. Центральные области близких галактик:

- движения ионизованного газа и звезд
- звездное население, химически выделенные ядра
- AGN: характеристики газа вблизи активного ядра

## 2. Далекие объекты:

- Эволюция радиогалактик
- Ионизованный газ в оболочках квазаров
- Гравитационные линзы

## 3. Наша Галактика:

- джеты из молодых звезд, объекты Хербига-Аро
- туманности вокруг массивных звезд (WR и LBV)
- остатки взрыва сверхновых

## 4. Спектроскопия звездообразных объектов на ярком фоне

- планетарные туманности, уникальные звезды в других галактиках

История метода: вновь, первым был G. Courtes...

Courtès (1960s) — возрождение наблюдений с эталоном Фабри-Перо

Courtès (1980) — описана идея спектрографа интегрального поля

Courtès (1982) — идея волоконного блока в сочетании с линзовым

Bacon et al (1988) — TIGER (линзы)/CFHT

Afanasiev et al (1990) — MPFS (линзы + волокна)/БТА

Далее везде, на больших и малых телескопах.

В космосе — будет на JWST

# Прототип IFS

Vanderriest (1980):  
2.2m Mauna Kea  
Total of 205 fibers, 100µm core

## A FIBER-OPTICS DISSECTOR FOR SPECTROSCOPY OF NEBULOSITIES AROUND QUASARS AND SIMILAR OBJECTS

C. VANDERRIEST\*

Observatoire de Paris-Meudon, Meudon, France

C. VANDERRIEST

O III 4959-5007

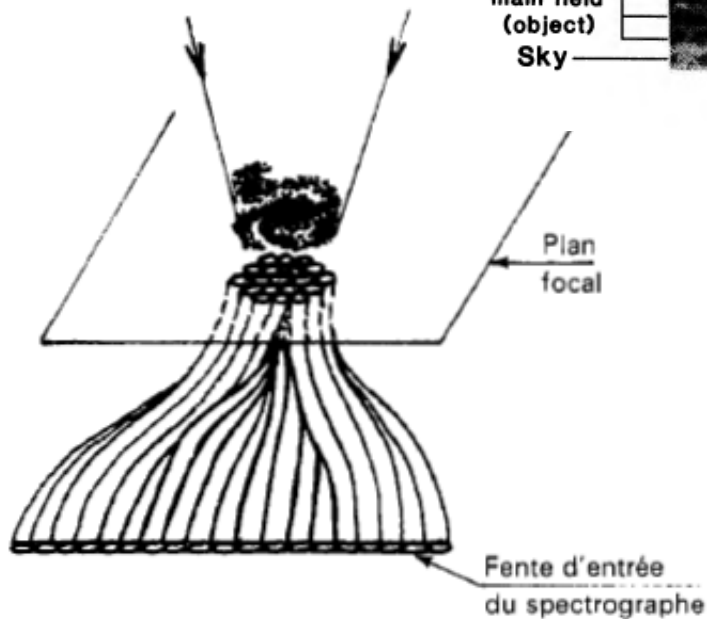
Night Sky Lines

860

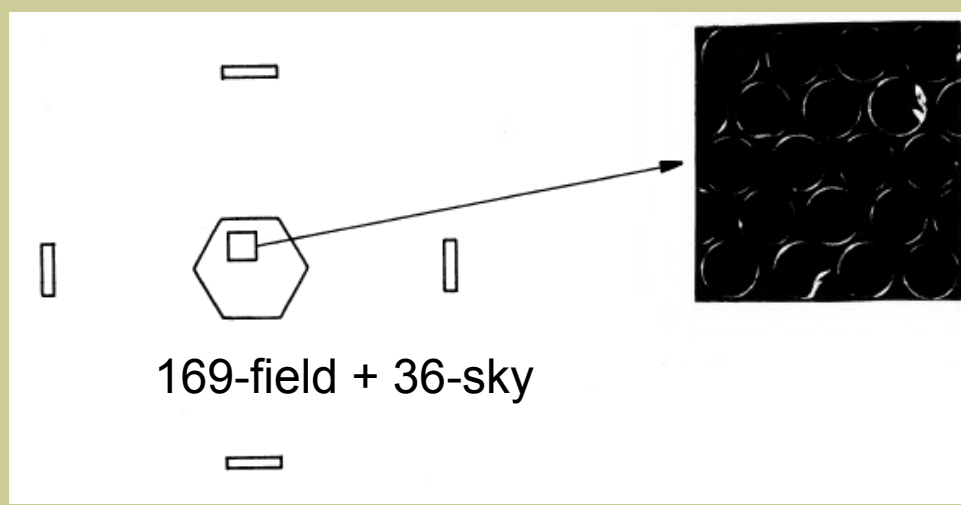
Successive  
rows of  
main field  
(object)  
Sky



FIG. 2.—Part of a spectrum of 3C 120 nebosity (regions A and B of Fig. 3). Exposure: 20 mn.



Configuration « Argus »



C. VANDERRIEST, G. COURTÈS, J. DONAS

*J. Optics (Paris)*, 1984, vol. 15,

## Georges Courtès

Со своим фокальным редуктором Куртес неоднократно приезжал в крупнейший в мире. Фото из сборника ["История САО РАН в фотогра](#)



24 avril 1925 - 31 octobre 2019

L'Académie des sciences a le  
faire part du décès de Georges  
le 31 octobre 2019, à l'âge  
quatorze ans. Il avait été  
l'Académie le 8 mars 1982,

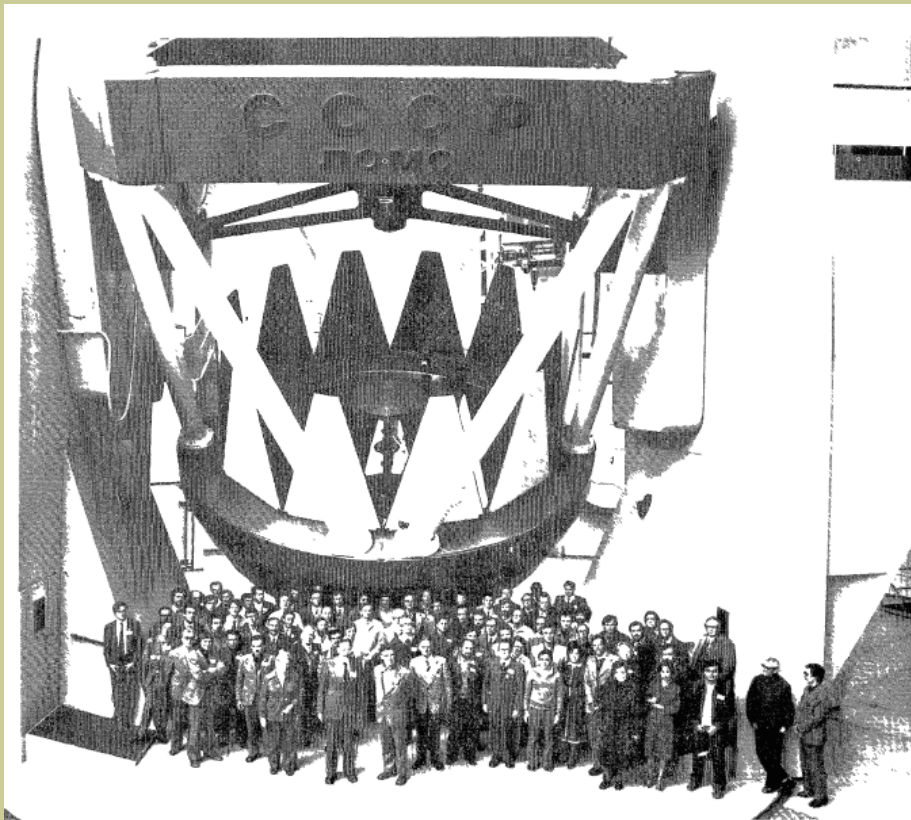
*Фото 4. Наблюдательная команда, выполнявшая на БТА обзор очагов звездообразования в галактиках М31 и М33. Справа налево: "папаша" Ж. Куртес, С.Н. Додонов, П. Сиван, В.Л. Афанасьев, В.Е. Караченцева, А. Пети, И.Д. Караченцев и Ж. Булестекс.*

<https://moisav.livejournal.com/494842.html>

# An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes

Courtesy 1982:

Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes,  
Proceedings of IAU Colloq. 67, held in  
Zelenchukskaya, USSR, September 8-10, 1981



ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE LIBRARY

## INSTRUMENTATION FOR ASTRONOMY WITH LARGE OPTICAL TELESCOPES

Edited by Colin M. Humphries

VOLUME 92

PROCEEDINGS



D. REIDEL PUBLISHING COMPANY

DORDRECHT, HOLLAND / BOSTON, U.S.A. / LONDON, ENGLAND



# An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes

Courtes 1982:

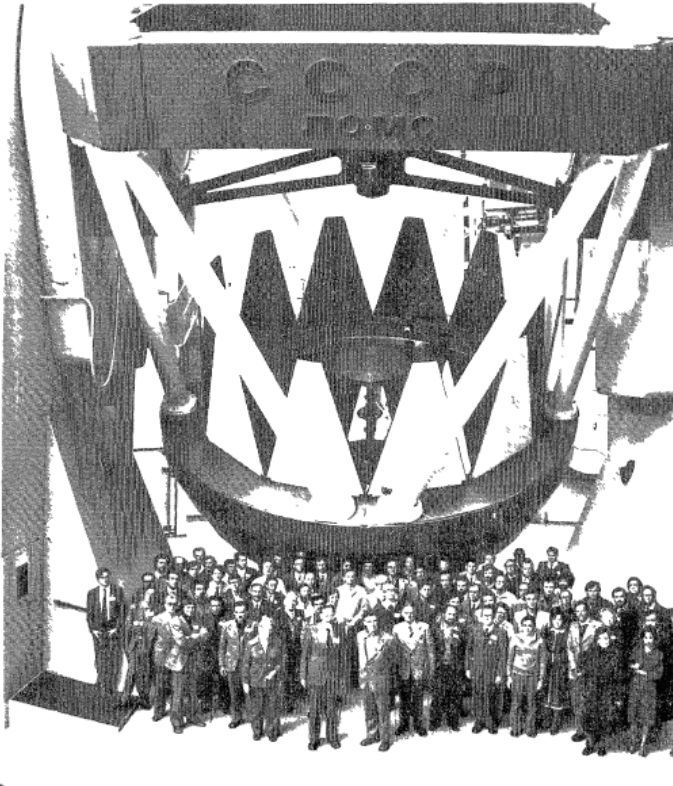
Instrumentation for Astronomy with Large Telescopes,  
 Proceedings of IAU Colloq. 67,  
 Zelenchukskaya, USSR, September

ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE LIBRARY

KEY TO CONFERENCE PHOTOGRAPH



- |                 |                    |                    |                 |
|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 1. Latham       | 19. Korovyakovskii | 37. Drazdis        | 55. Esipov      |
| 2. Angel        | 20. Dokuchaeva     | 38. Dodonov        | 56. Pronik      |
| 3. Kipper       | 21. Kim            | 39. Afanas'yev     | 57. Fossatt     |
| 4. Kuvshinov    | 22. Iliev          | 40. Pimonov        | 58. Fomenko     |
| 5. Denisjuk     | 23. Korol'kov      | 41. Barnes         | 59. Ioannisiani |
| 6. Steshenko    | 24. Amirkhanian    | 42. Ribes          | 60. Zaratsian   |
| 7. Prokof'eva   | 25. Humphries      | 43. Harmer, C.F.W. | 61. Burenkov    |
| 8. Mikhel'son   | 26. Picat          | 44. Brown          | 62. Sisask      |
| 9. Roddier      | 27. Lipovetskii    | 45. Lipatov        | 63. Murdin      |
| 10. Raouf       | 28. Shcherbakov    | 46. Gyavgyanen     | 64. Kopylov     |
| 11. Richardson  | 29. Harmer, D.     | 47. Chentsov       | 65. Kiselev     |
| 12. Rylov       | 30. Dravins        | 48. Chkhikvadze    | 66. Nevskii     |
| 13. Rosch       | 31. Glagolevskii   | 49. Korol'         | 67. Nazarenko   |
| 14. Nebelitskii | 32. Alekseyev      | 50. Kuz'menkov     | 68. Drabek      |
| 15. Wlérick     | 33. Malarev        | 51. Karachentsev   | 69. Romanyuk    |
| 16. Goryacheva  | 34. Dudinov        | 52. Notni          | 70. Lelièvre    |
| 17. Boulesteix  | 35. Somov          | 53. Beckers        | 71. Petrov      |
| 18. Tsvetkova   | 36. Zdanavicius    | 54. Shcheglov      | 72. Maillard    |



D. REIDEL PUBLISHING COMPANY

DORDRECHT, HOLLAND / BOSTON, U.S.A. / LONDON, ENGLAND

# Courtes (1982): Integral Field Spectrograph

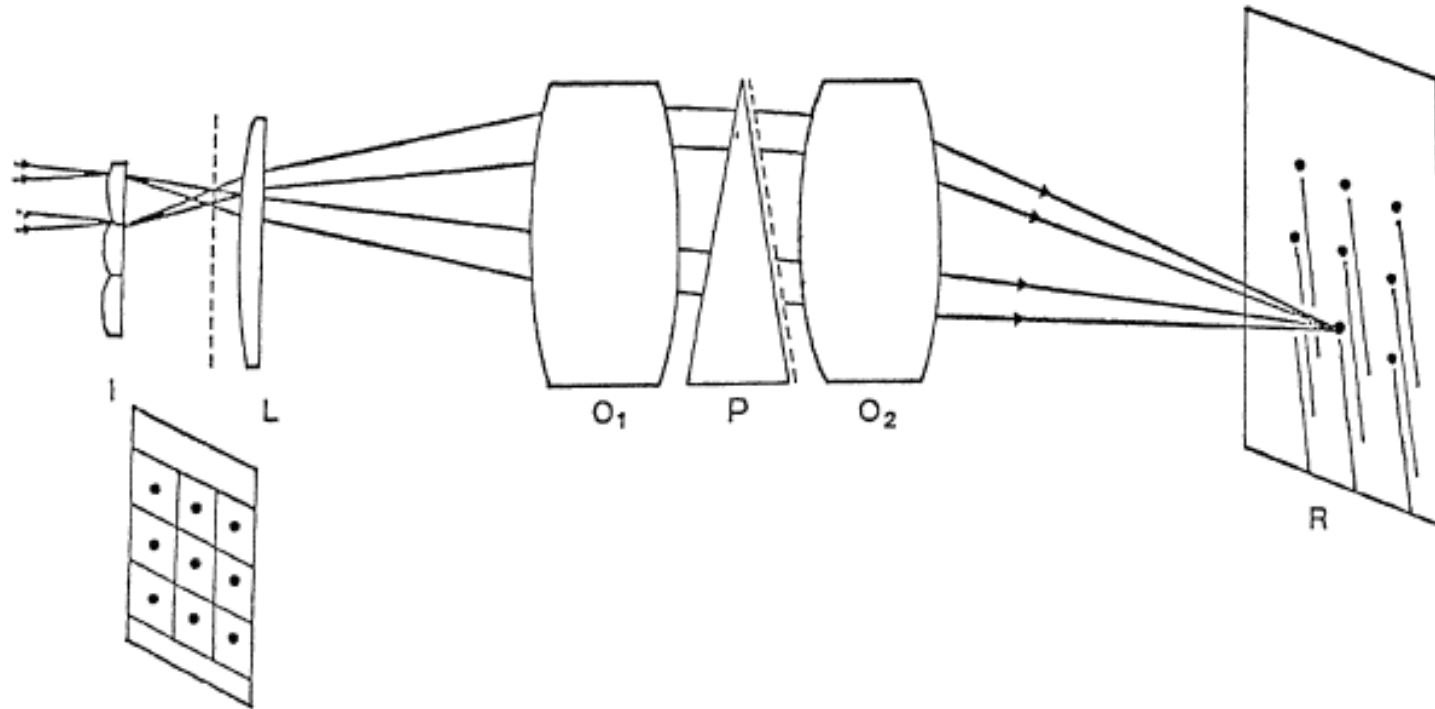


Figure 1. Integral Field Spectrograph: The array of lenses I is placed in the telescope focal plane and produces a checker pattern of exit pupils; the focal reducer LO<sub>1</sub>O<sub>2</sub>, equipped with a Carpenter prism-grating P, gives a two-dimensional distribution of the spectra corresponding to each pupil.

# Courtes (1982): волоконная технология

using them in series with a multi-lens array. The flux  $\Phi_1$  admitted at the front end of a fibre bundle is limited for two reasons:

- (1) for a hexagonal distribution of fibres (Figure 2),  $\Phi_1$  is less than the incident flux  $\Phi_0$  and even in the most favourable case  $\Phi_1 = 0.89\Phi_0$
- (2) the diameter of the most efficient area is related to the type of fibre used but is always smaller (dotted circle in Fig. 2) than the fibre diameter (in the mode of reflection or refractive index variations). Other losses are due to defects of the circular contour of the fibres.

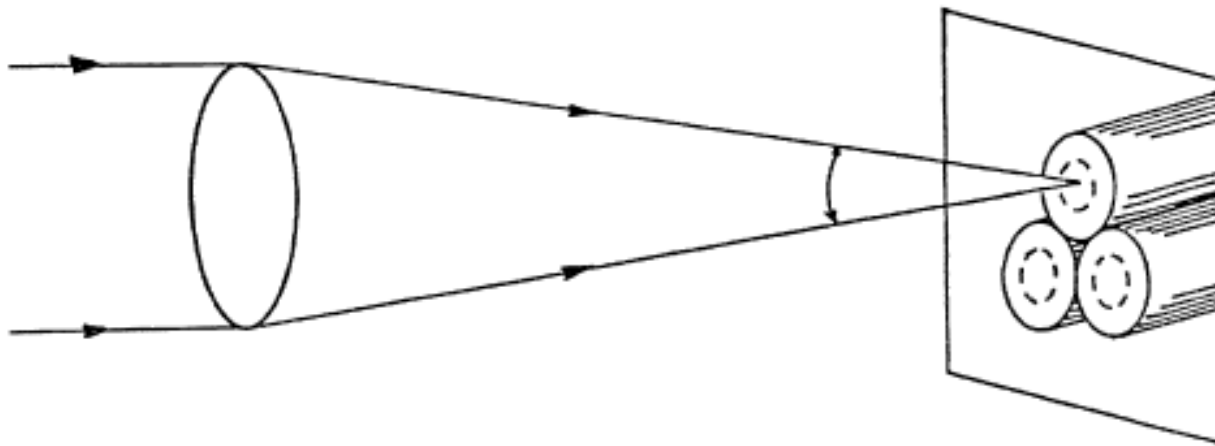


Figure 2. Hexagonal distribution of fibres; the zone of high efficiency at the entrance to each fibre is the core denoted by a dotted circle.

# Courtes (1982): микролинзы + волокно

ABSTRACT: A combination of an array of small lenses together with fibre optics can be used to produce a high transmission spectrograph which can record the spectra of many image elements simultaneously. Such a design may play an important role in ground based observations preparing for the NASA-ESA Space Telescope programmes.

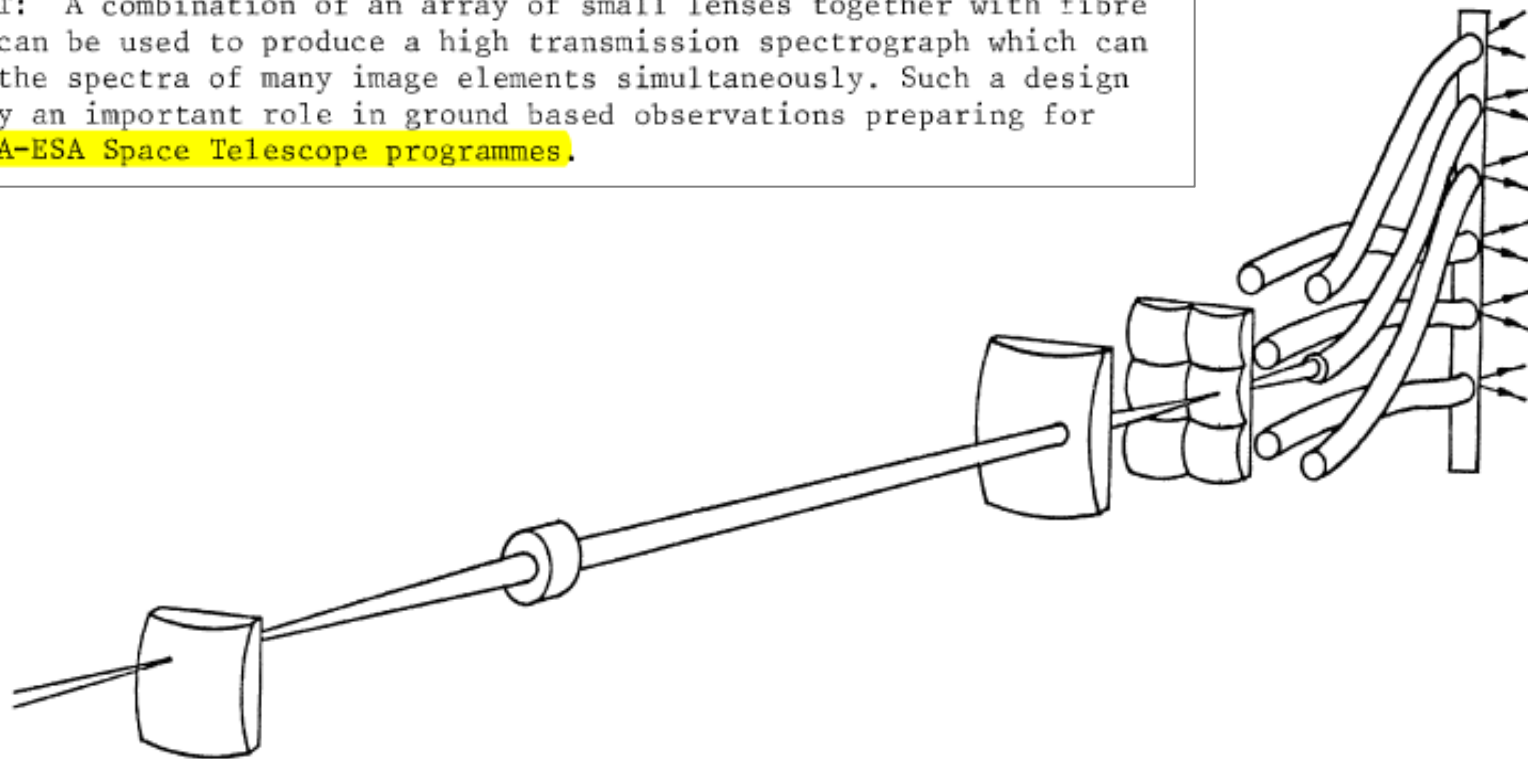
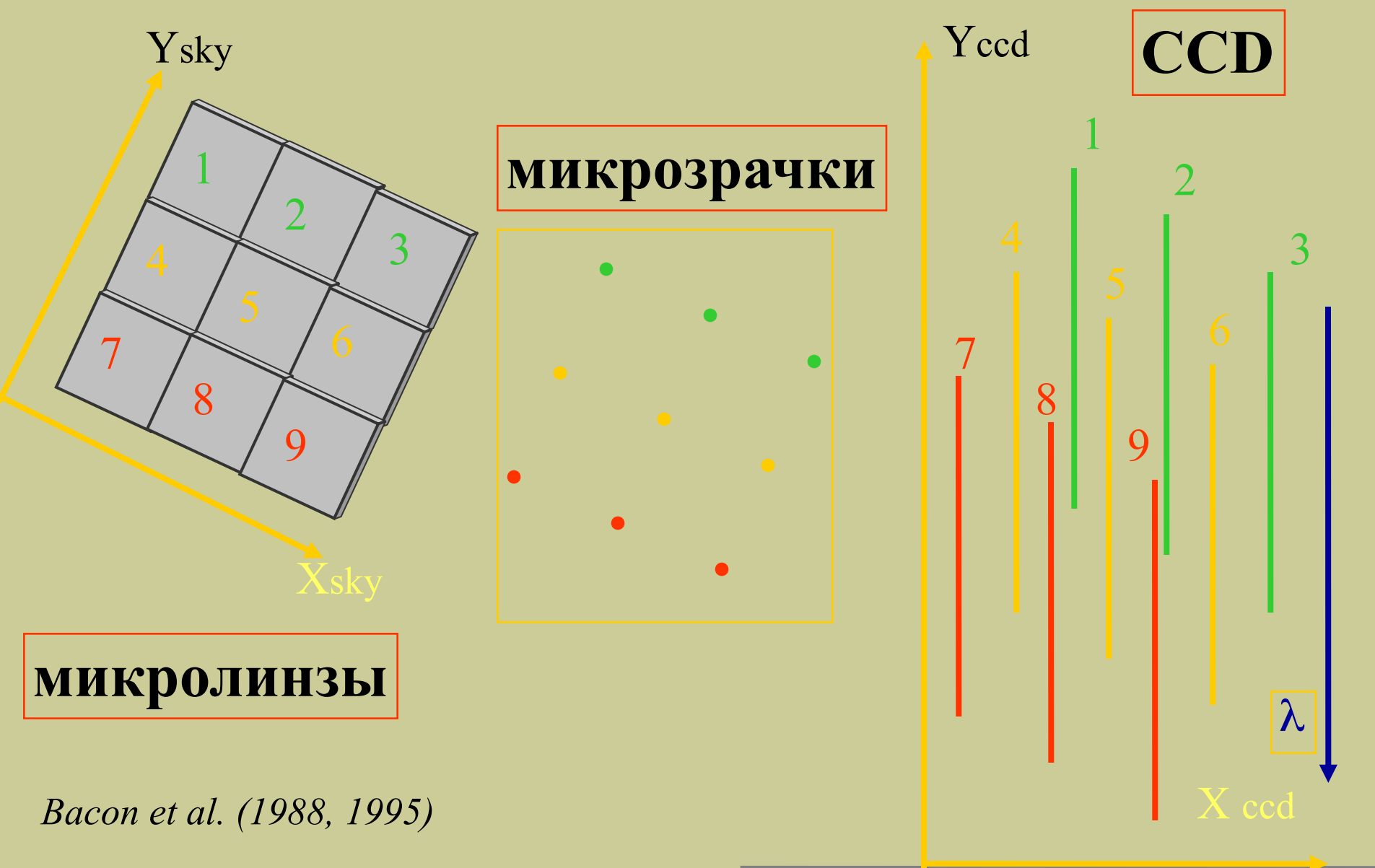


Figure 3. Integral Field Spectrograph (IFS) showing the application in which all image elements are transmitted to a spectrograph slit. The components shown are: the field lens in the focal plane of the telescope, the enlarging lens, the secondary field lens, the array of square shaped lenses, and the fibres going from the exit pupil to the slit.

# TIGER: Traitement Intégral des Galaxies par l'Étude de leurs Raies



*Bacon et al. (1988, 1995)*

# Васон + 1988: первые результаты 3.6m CFHT (всего 4 цитирования в ADS!)

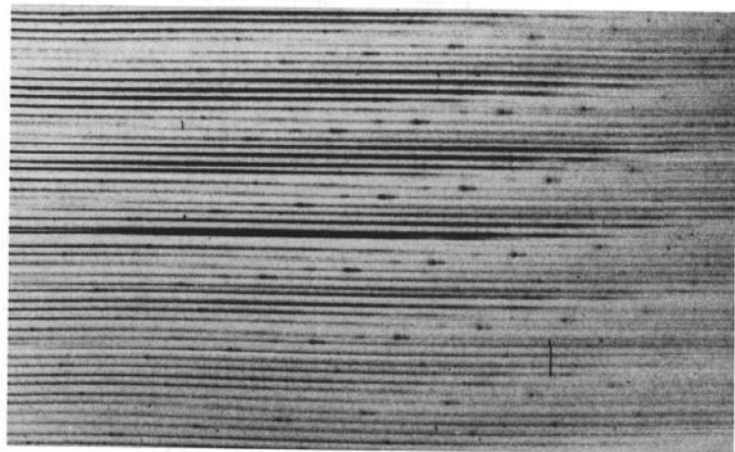


Figure 4 : Raw image in spectrographic mode

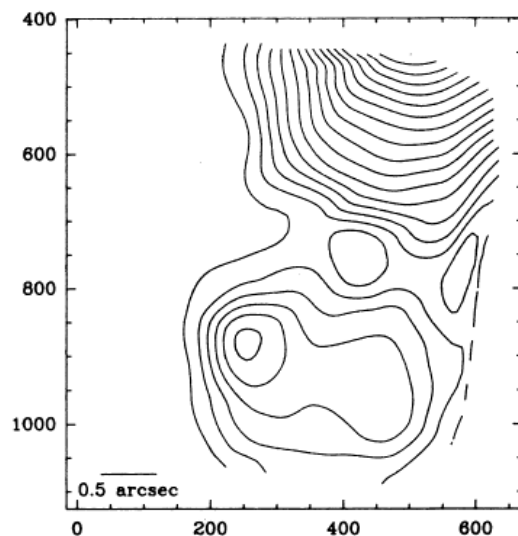


Figure 7 : Monochromatic map in [NII]-Ha of the nuclear region of M 51

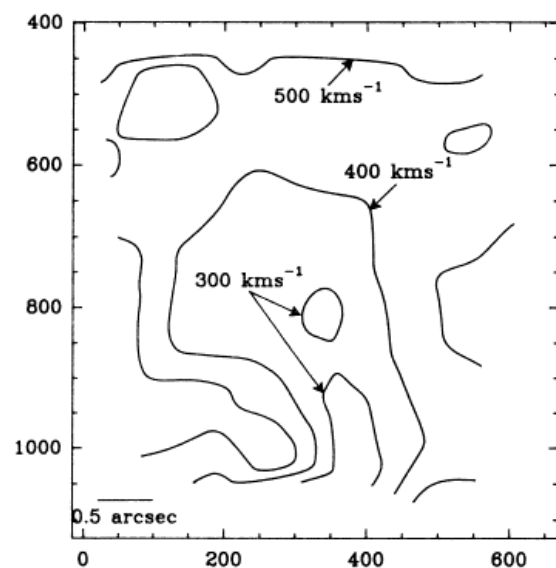


Figure 8 : Velocity field from the line [NII] 6584

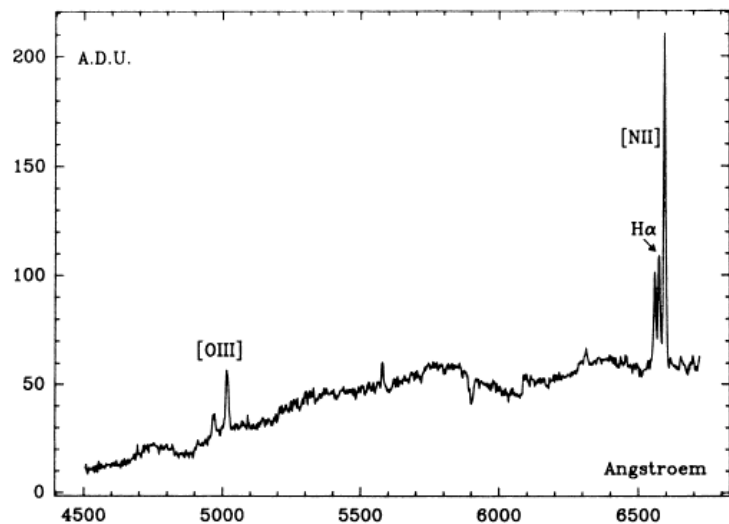


Figure 6 : Spectrum of M 51 with a medium dispersion ( $R = 1100$ )

## CONCLUSION:

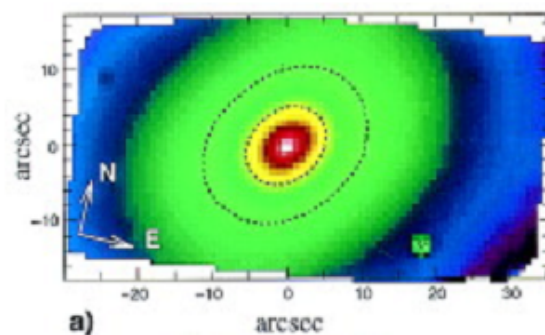
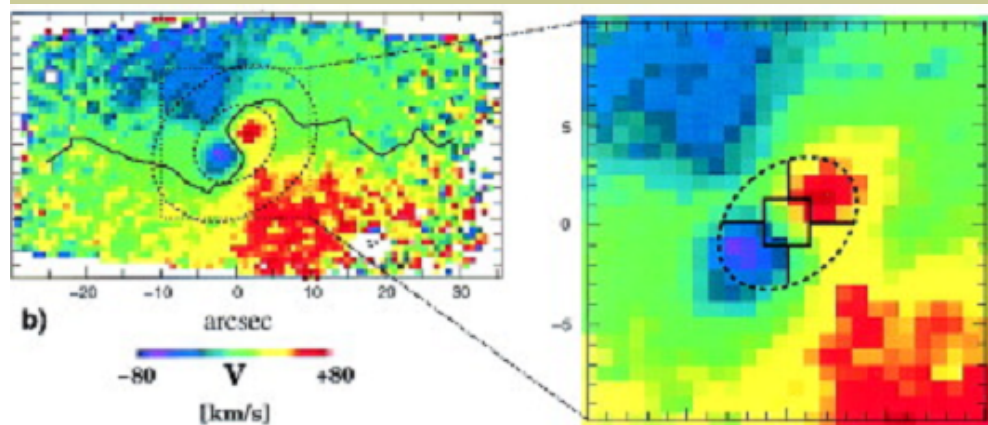
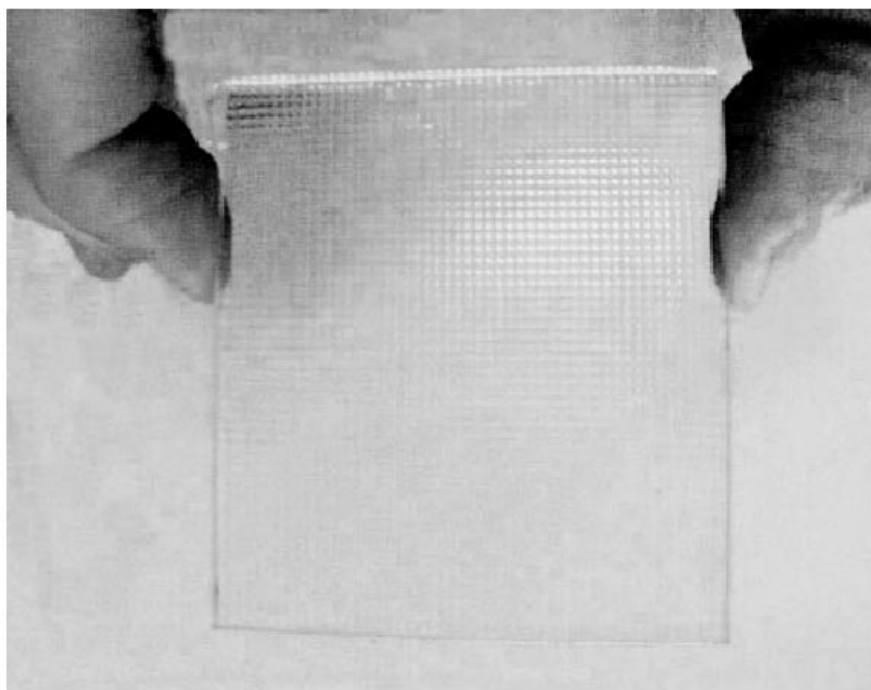
TIGER seems to be a good solution to the problem of integral field spectroscopy. It allows the obtention of a high spatial resolution in a wide spectral range, and can be adapted easily to any telescope. Moreover, as the micro-lenses can have a square section, a perfect covering of the field can be achieved without any light loss between the elements of the spatial sampling.

The simplicity of the mechanical and electronical design should make TIGER a reliable instrument; this, combined with a very high time-efficiency, gives an instrument well suited for large telescopes and VLT's, where trouble-free operation and ultimate performance must be combined.



# SAURON: Spectroscopic Areal Unit for Research on Optical Nebulae

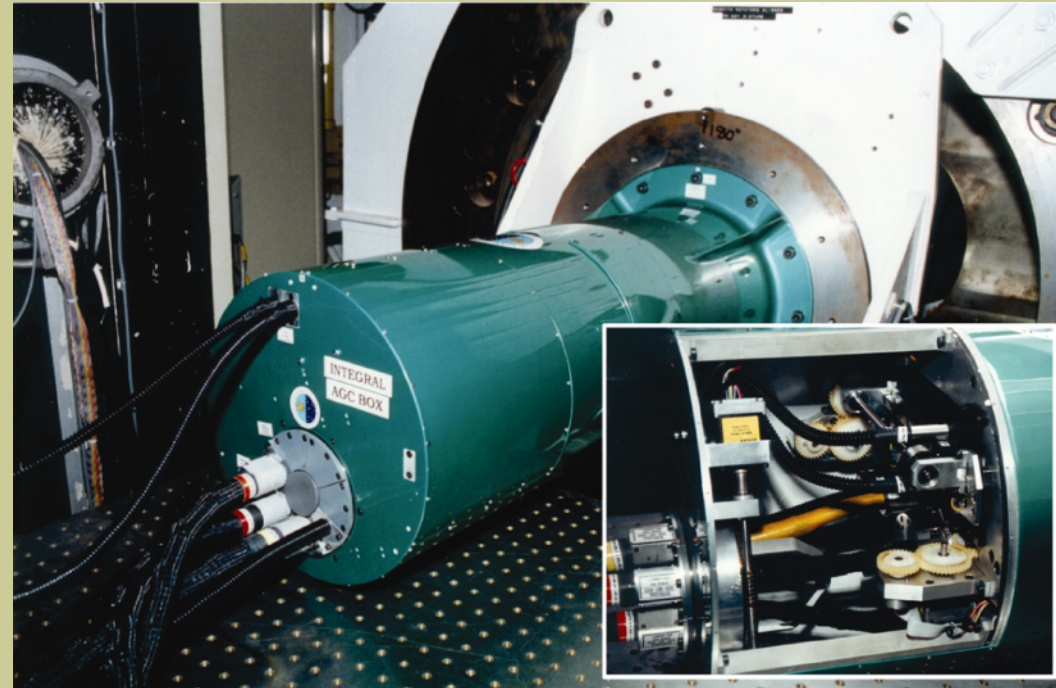
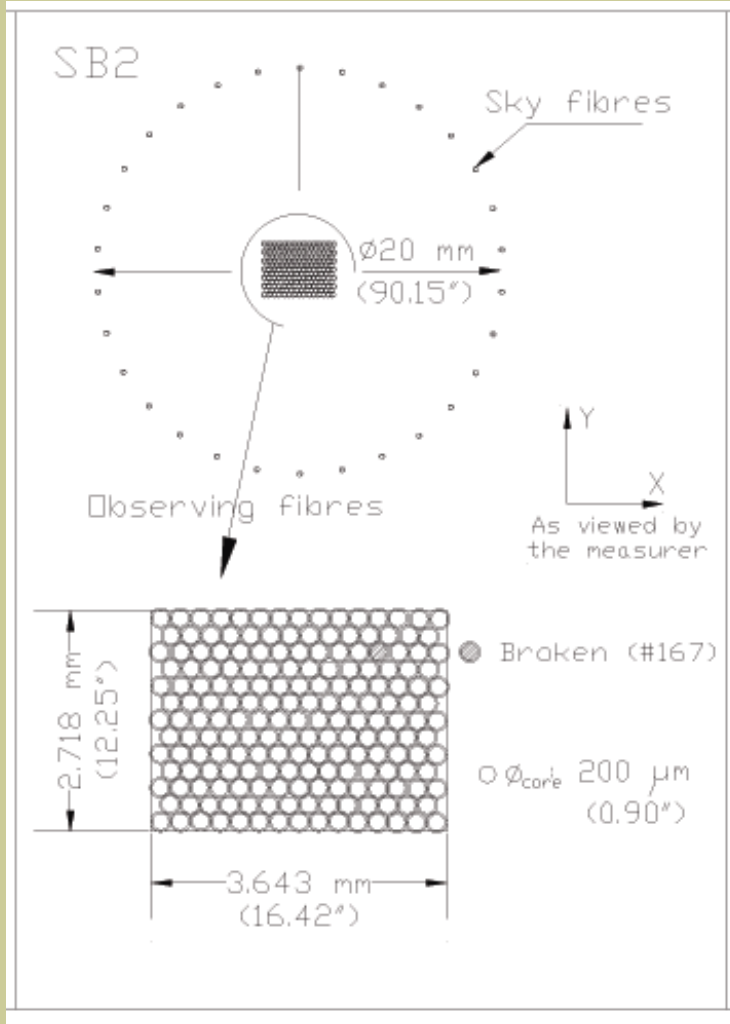
44x35 квадратных линз





# INTEGRAL on WHT

Arribas et al. 1998

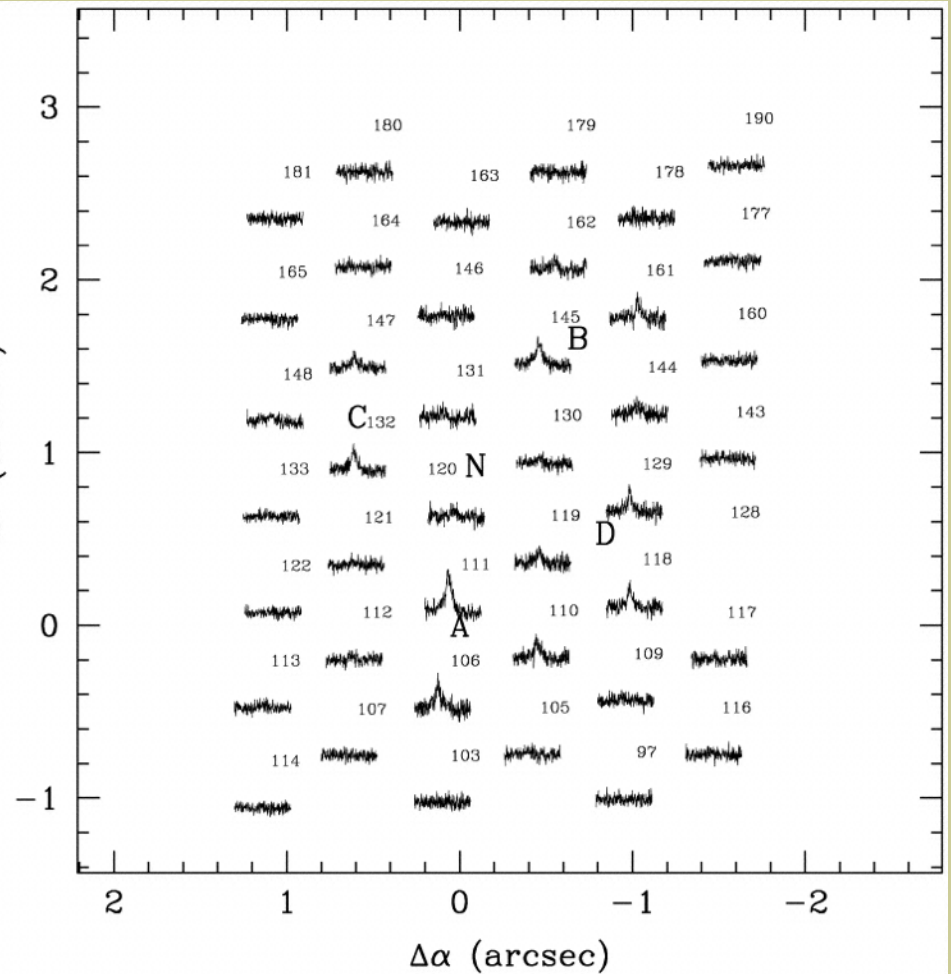
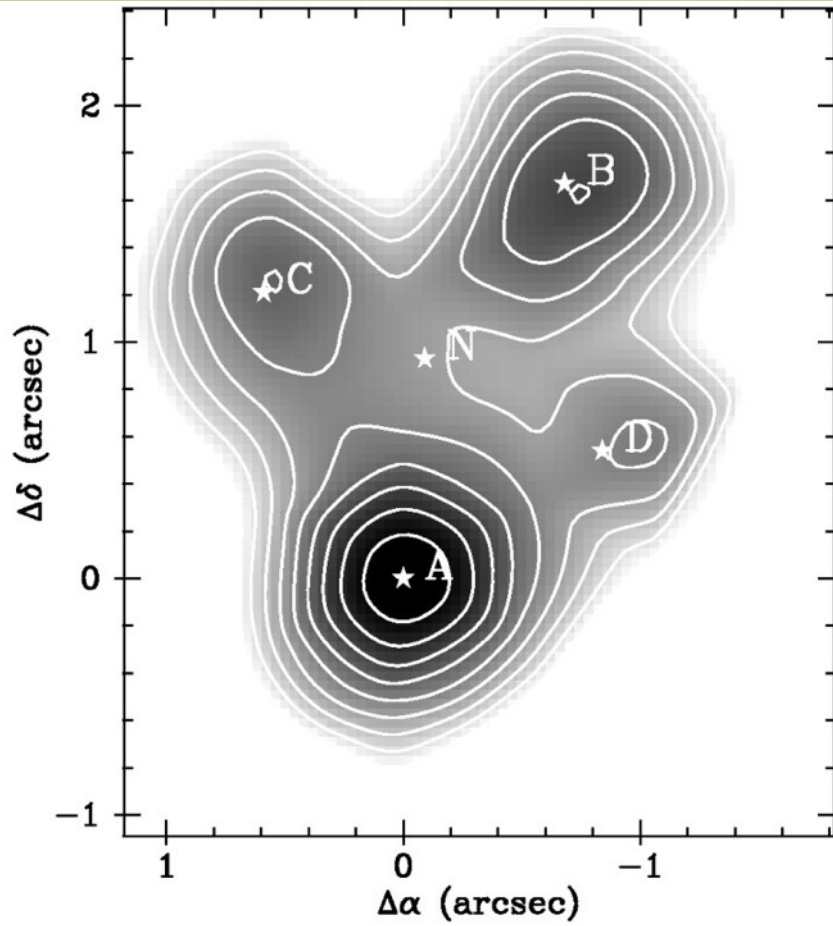


3 fiber bundles:

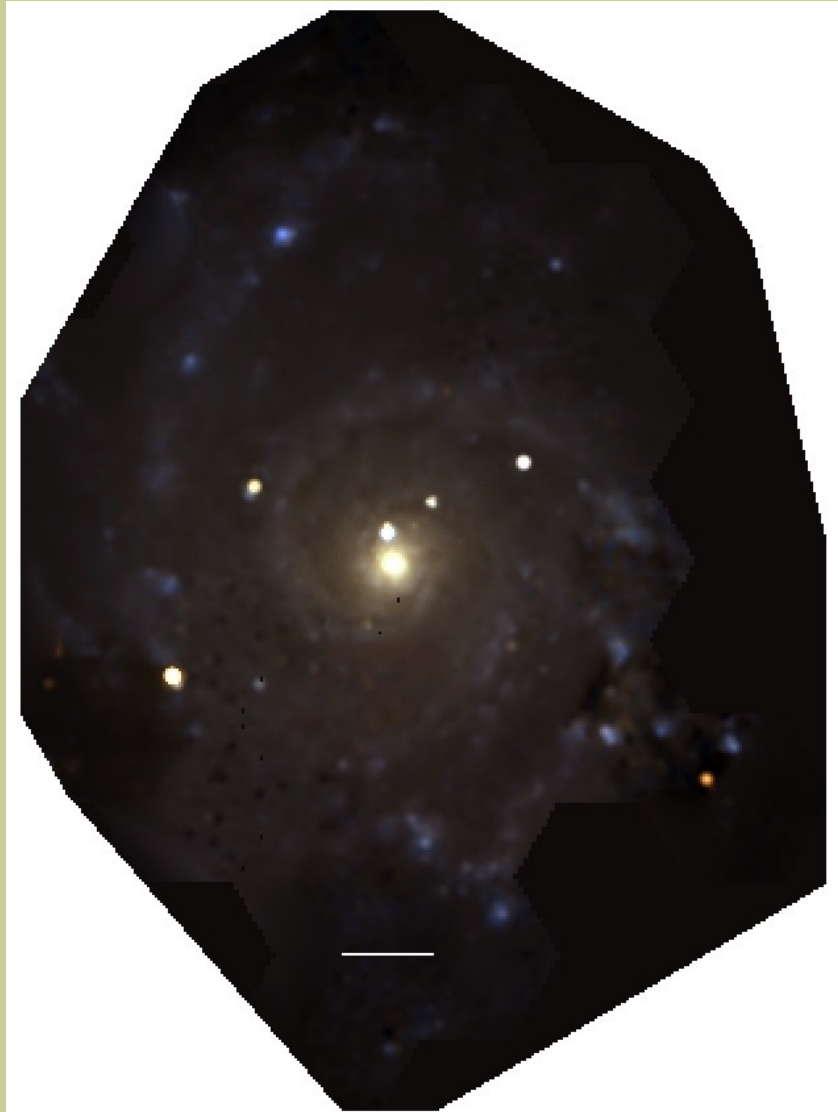
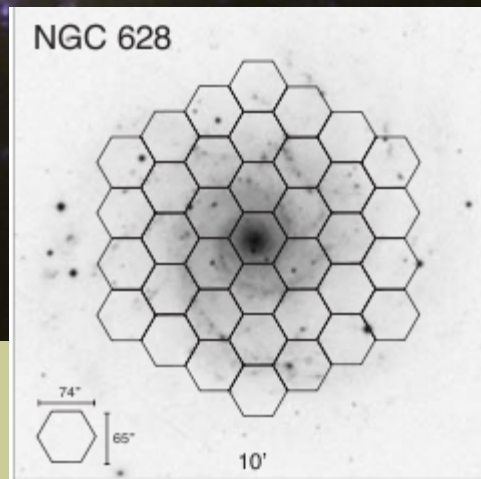
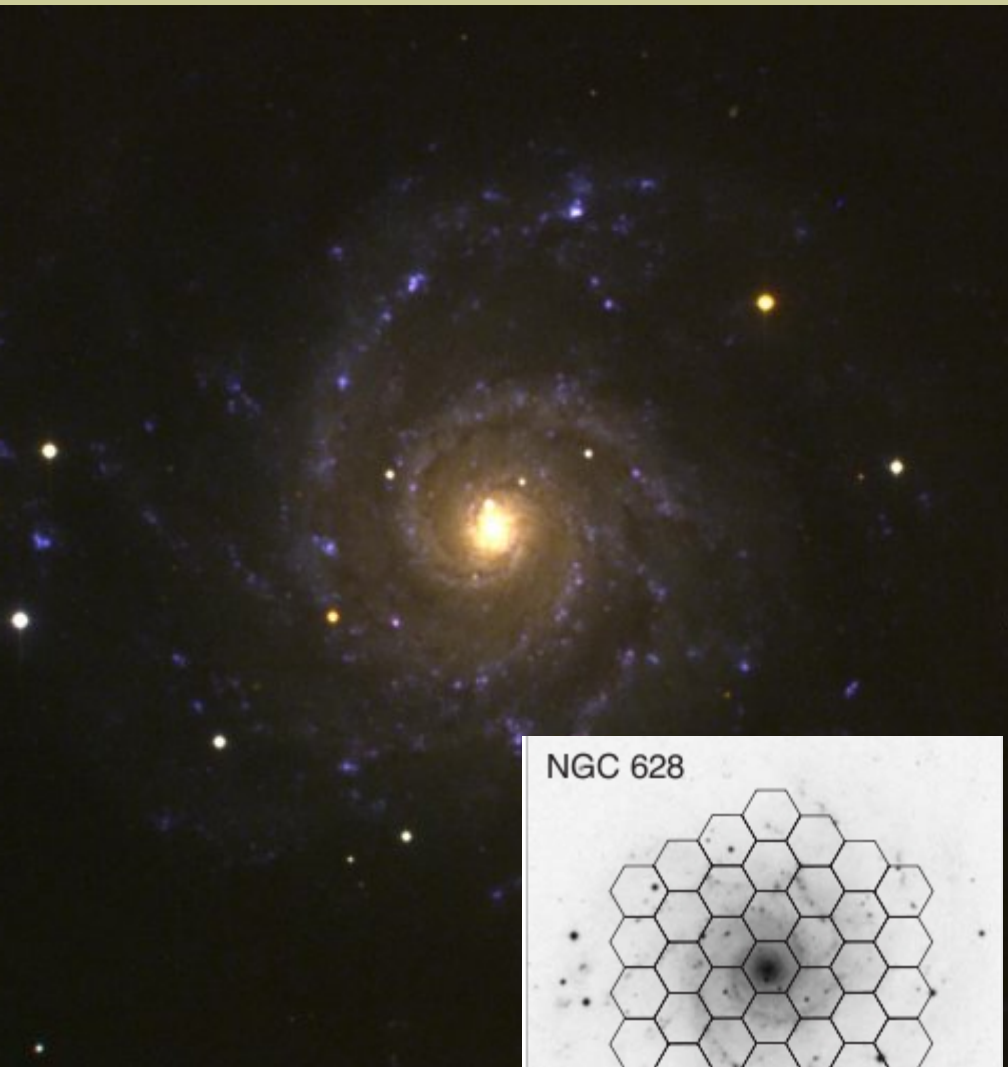
Mode	FoV ("x")	$\varnothing$ (")
SB1	7.80x6.40	0.45
SB2	16.0x12.3	0.90
SB3	33.6x29.4	2.70

# INTEGRAL: Einstein Cross

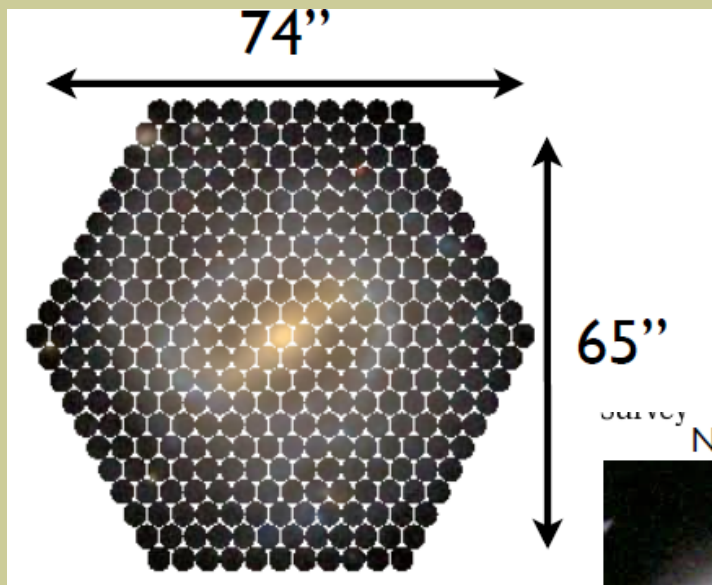
*Mediavilla et al. (1998)*



# РРАК – мозаика спектров в галактике NGC 628



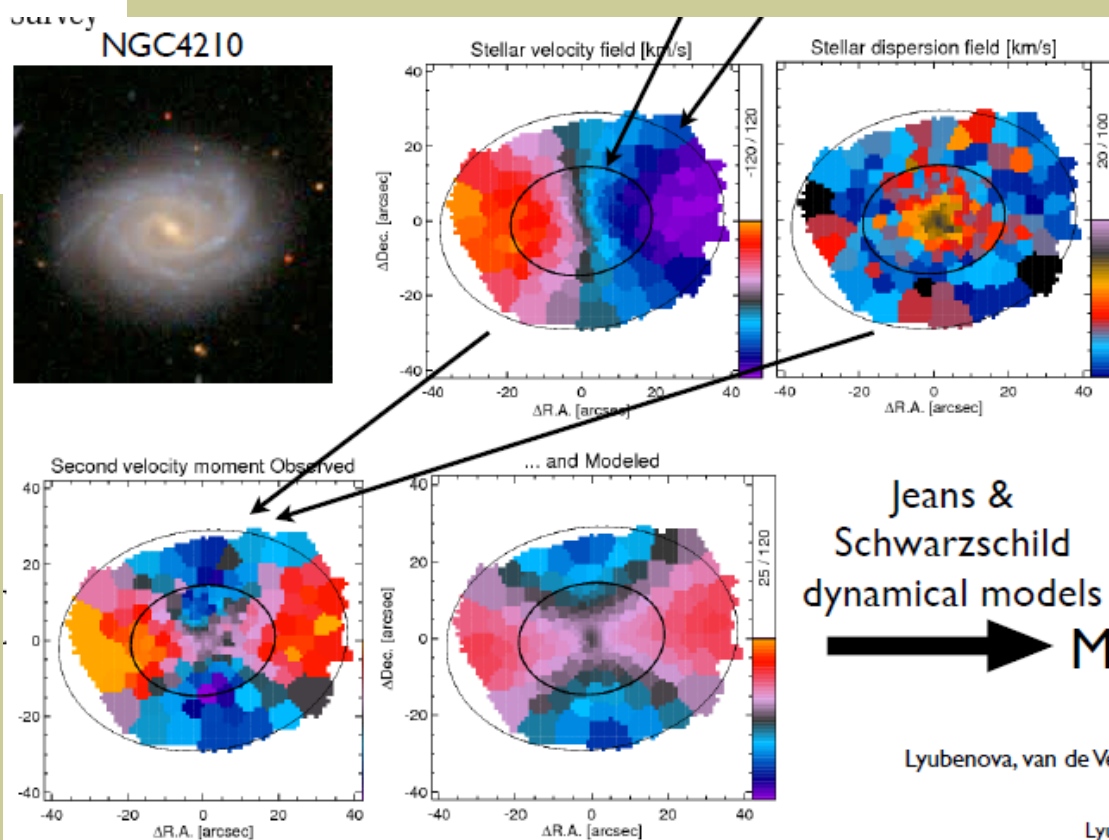
# CALIFA



PMAS/PPAK 3.5 m Calar Alto

600 галактик:

- внутренняя динамика
- вклад темного и барионного вещества
- история звездообразования



Jeans & Schwarzschild dynamical models

→  $M_{\text{tot}}(<R)$

Lyubenova, van de Ven et al., *in prep.*

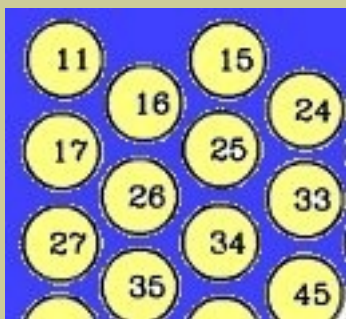


# Multi Pupil Fiber Spectrograph: линзы + волокна

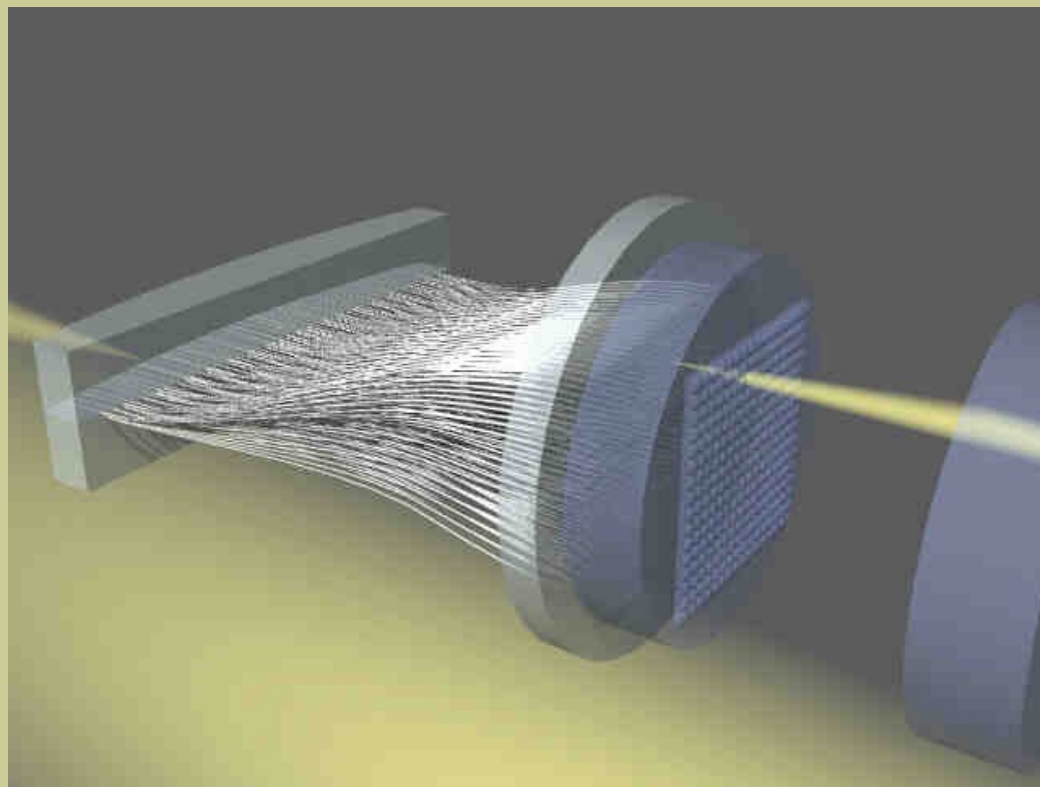
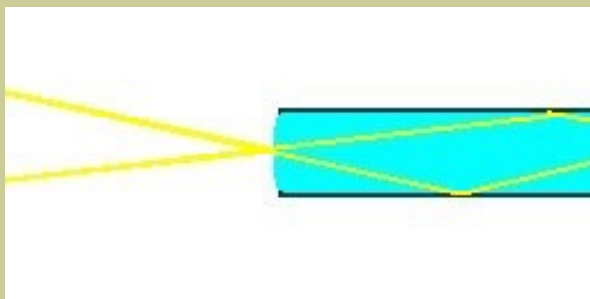
## Проблемы пучков световолокон:

Afanasiev et al (1990, 2001)

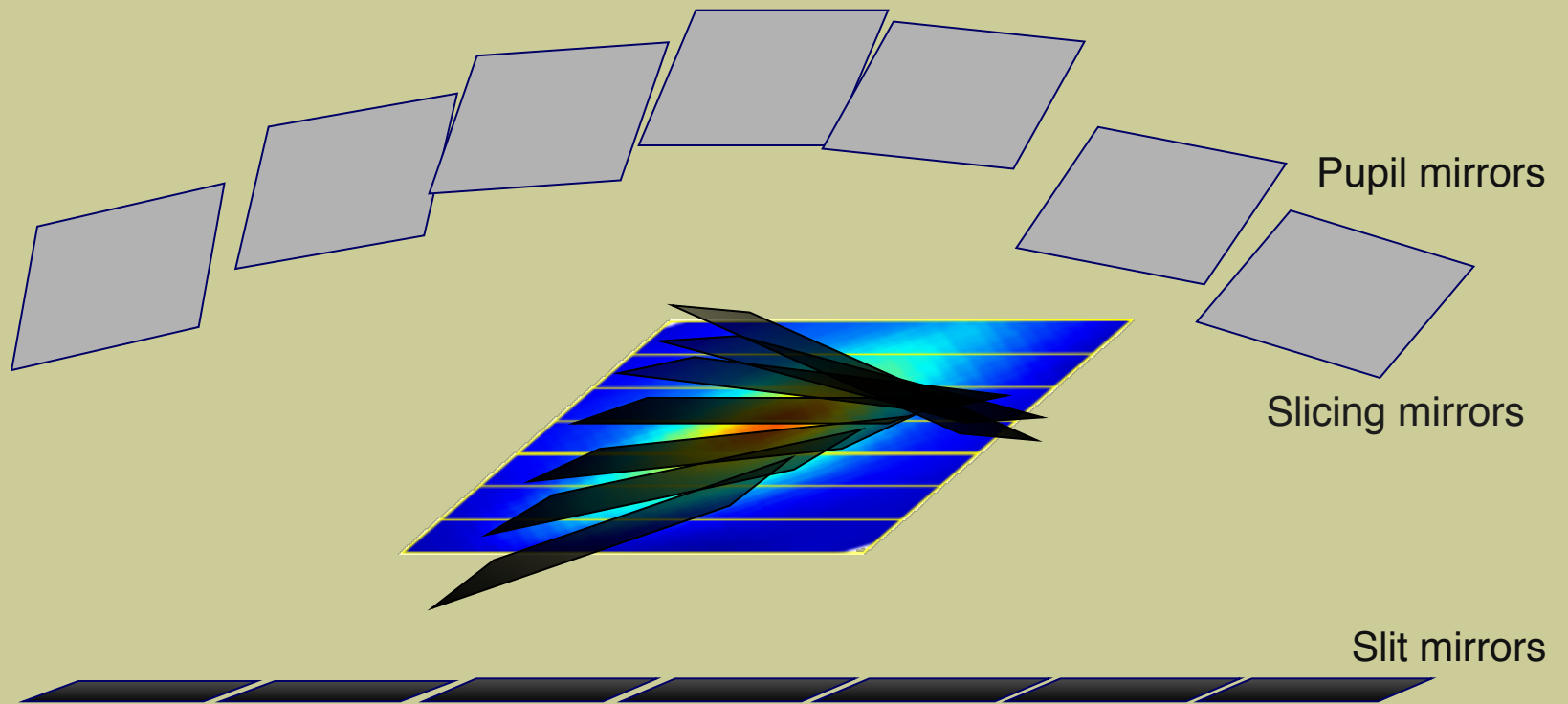
### 1. Фактор заполнения:



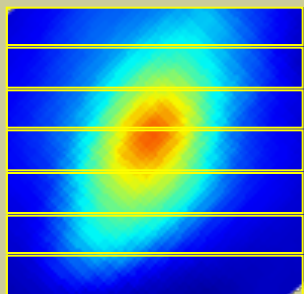
### 2. Деградация апертуры:



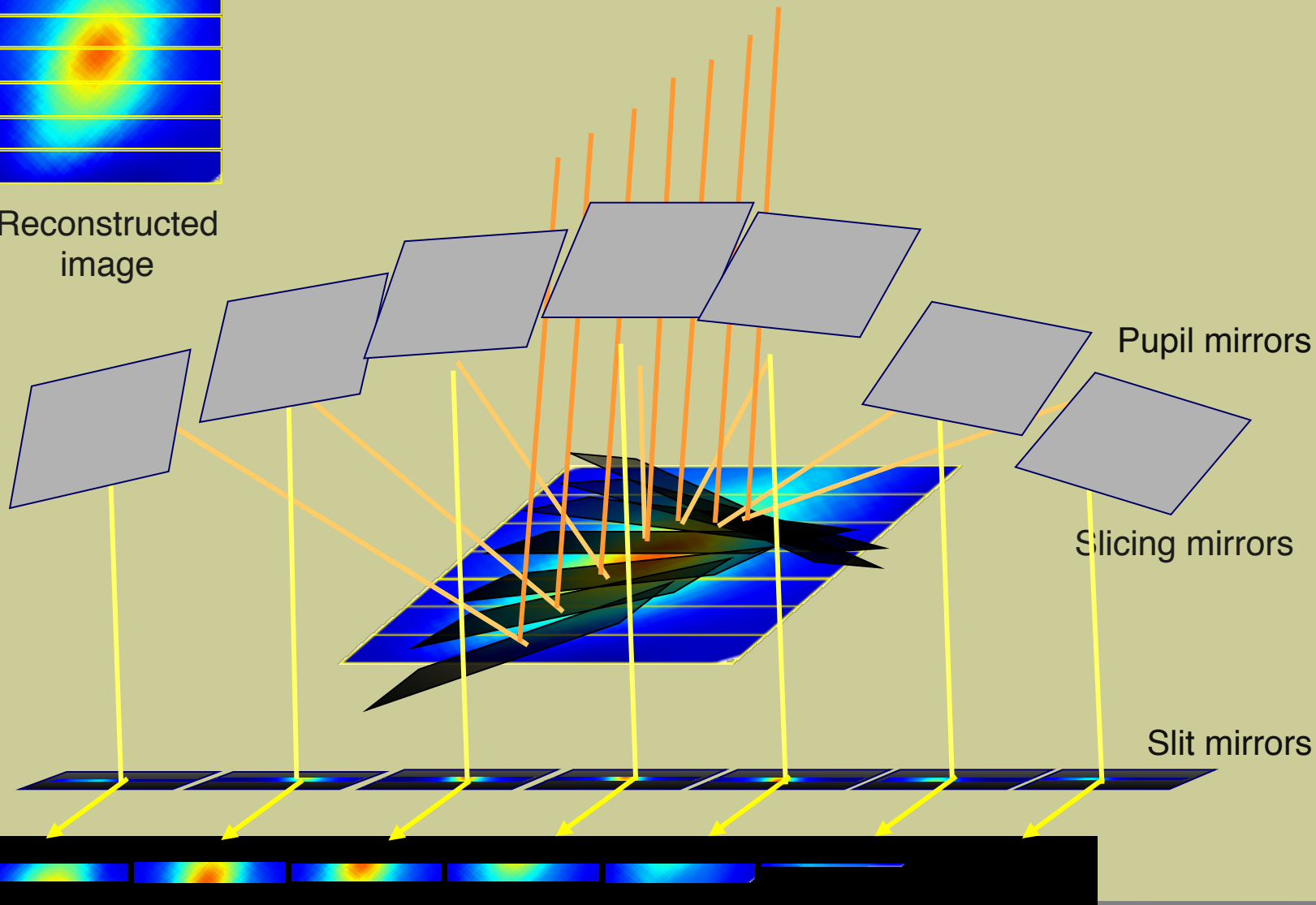
# Резатель (slicer)



# Резатель (slicer)

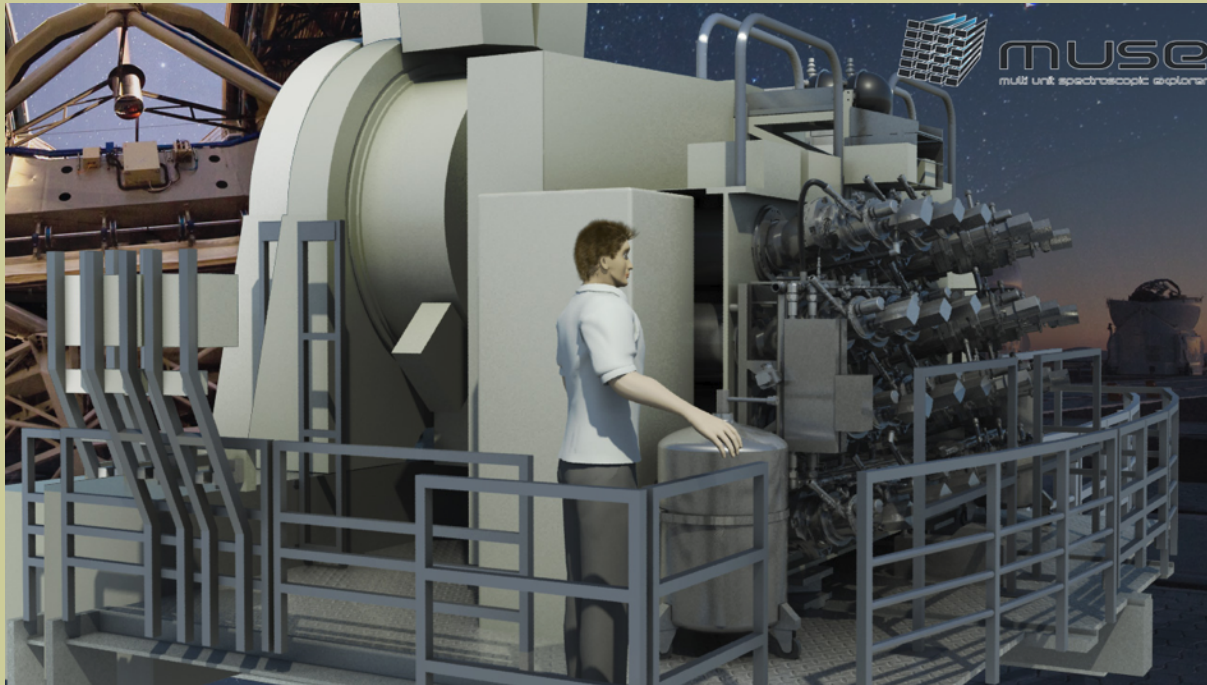


Reconstructed image

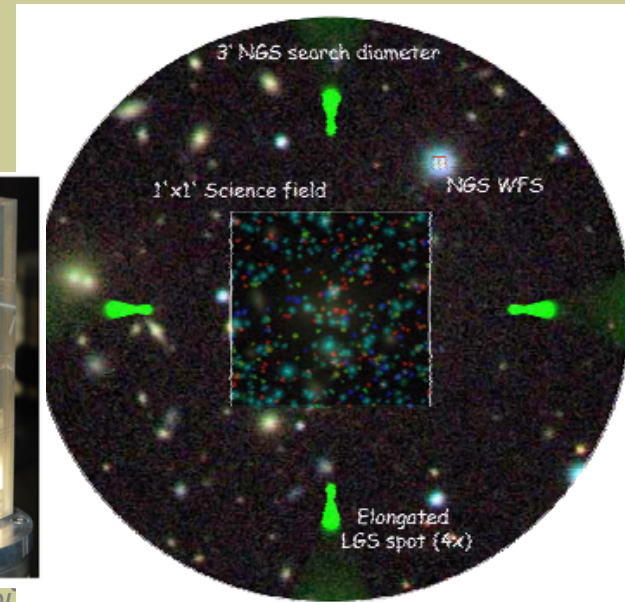
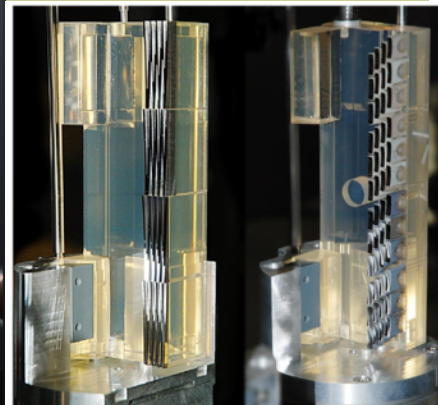
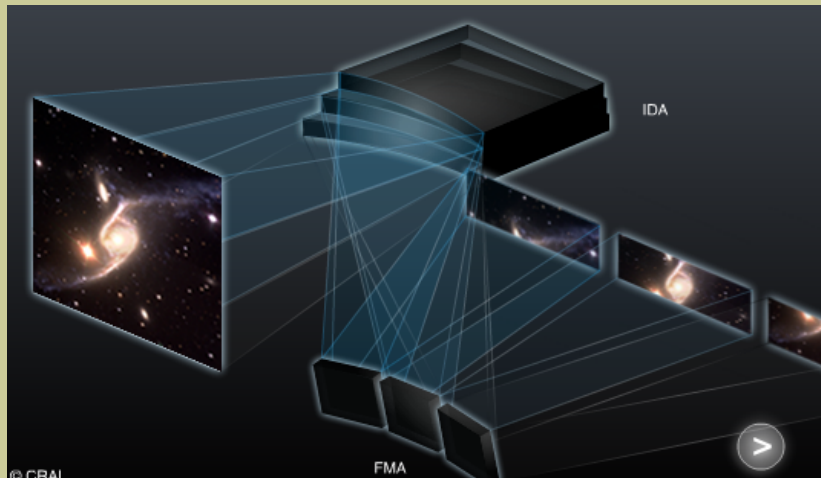




# A Multi Unit Spectroscopic Explorer - MUSE



Observational Parameters	
Spectral range (simultaneous)	0.465-0.93 $\mu\text{m}$
Resolving power	2000@0.46 $\mu\text{m}$
	4000@0.93 $\mu\text{m}$
Wide Field Mode (WFM)	
Field of view	1x1 arcmin <sup>2</sup>
Spatial sampling	0.2x0.2 arcsec <sup>2</sup>
Spatial resolution (FWHM)	0.3-0.4 arcsec
Gain in ensquared energy within one pixel with respect to seeing	2
Condition of operation with AO	70%-ile
Sky coverage with AO	70% at Galactic Pole
Limiting magnitude in 80h	I <sub>AB</sub> = 25.0 (R=3500)
	I <sub>AB</sub> = 26.7 (R=180)

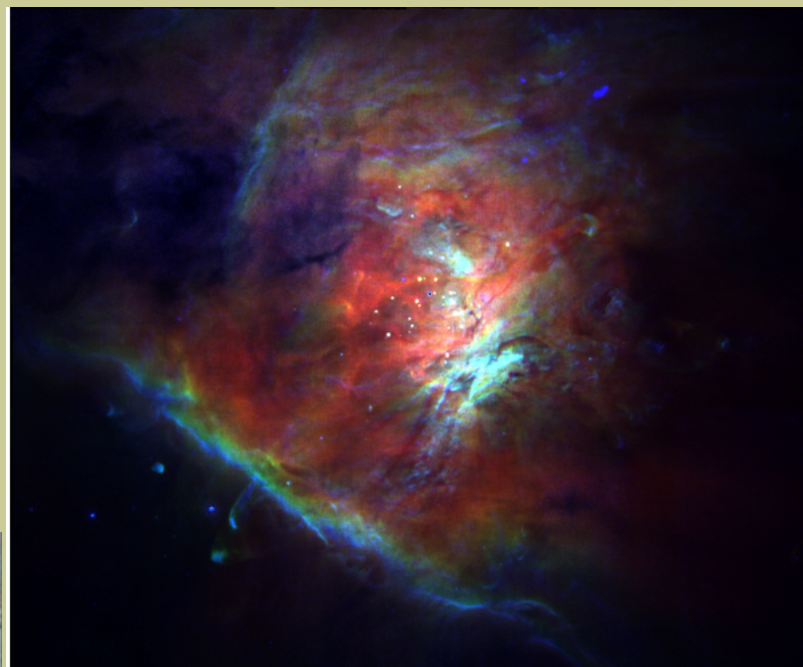


# MUSE: Туманность Ориона

6 x 5 arcmin  
Weilbacher et al 2015

red: [S II] 6731  
blue: Hbeta,  
green: [N II] 6584

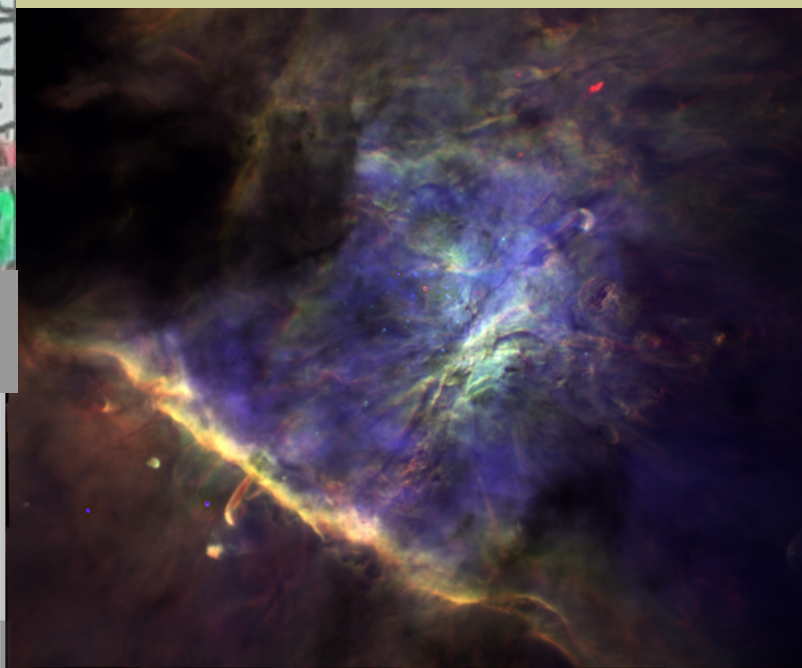
<http://muse-vlt.eu/science/m42/>



	Requested Nights		
	XShooter	MUSE	FORST
P97	221	220	215
P98	255	229	231
P99	168	203	198
P100	287	266	190
P101	201	166	177
P102	274	277	222
P103	260	250	140
P104	200	360	180

Ronald Bacon plenary talk,  
EWASS-2019

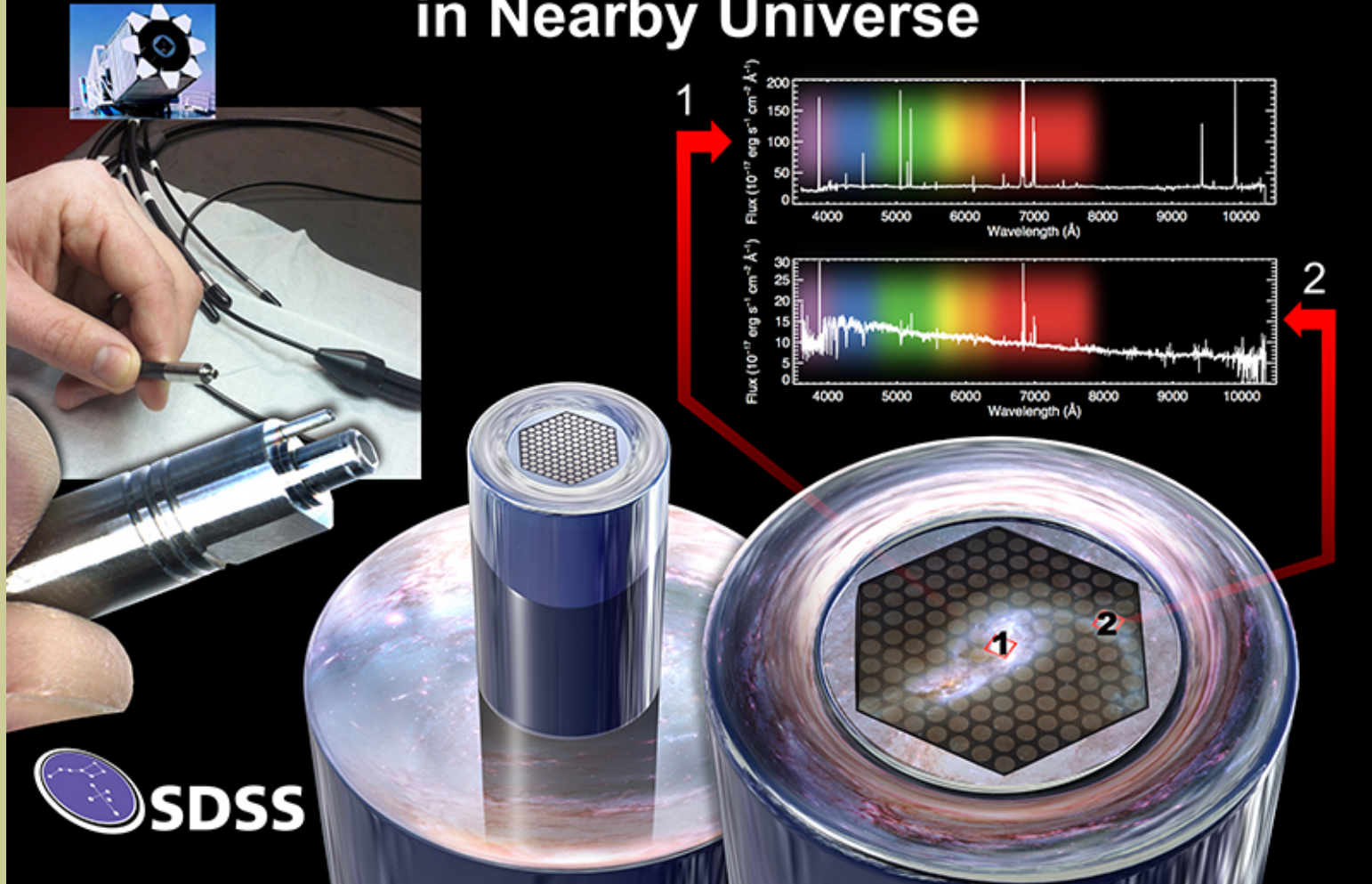
red: [O III] 5007  
green: [O II] 7320  
blue: [O I] 6300



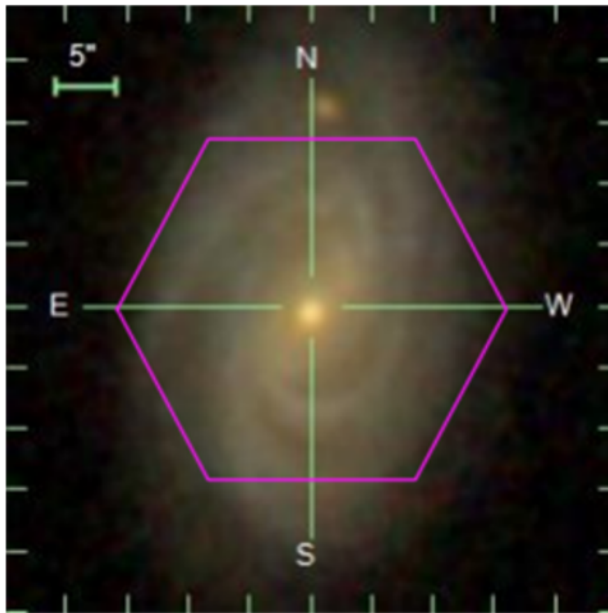


# SDSS MaNGA: Mapping Nearby Galaxies at APO

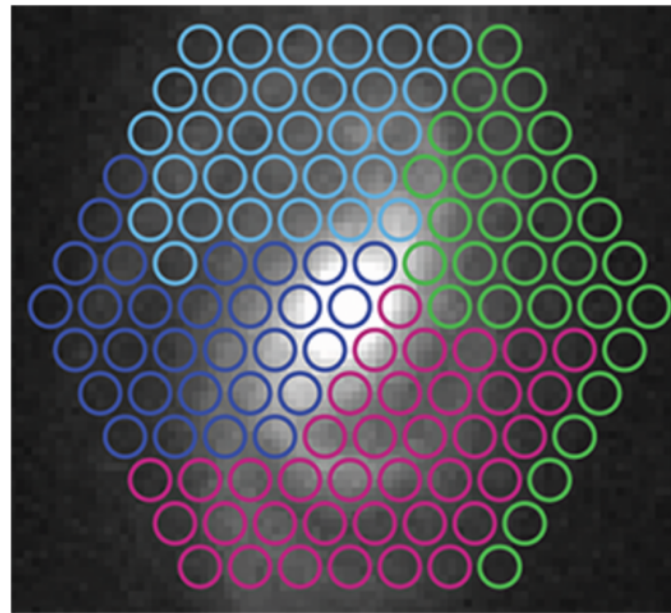
## SDSS-IV Dissects 10,000 Galaxies in Nearby Universe



# SDSS MaNGA: Mapping Nearby Galaxies at APO

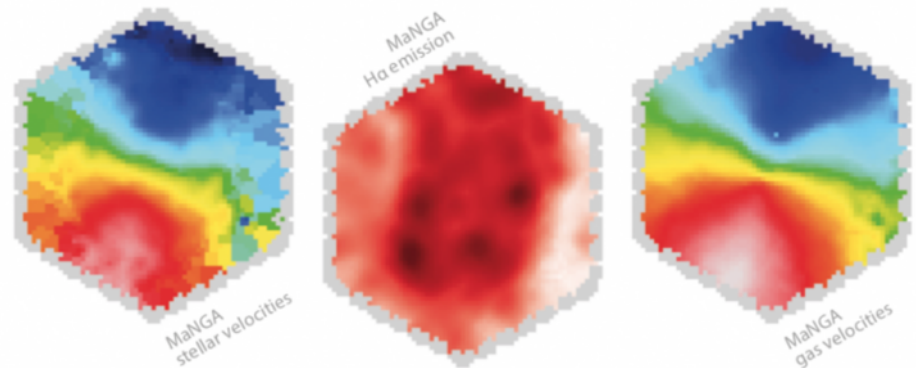


A face-on spiral galaxy seen by MaNGA – the red hexagon shows the coverage of the MaNGA IFU instrument



The same spiral galaxy, now showing circles for the

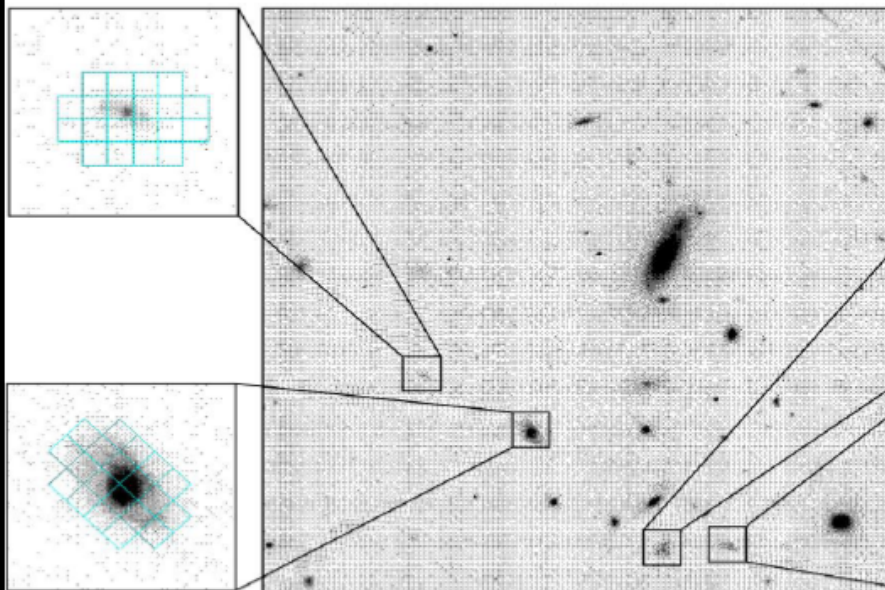
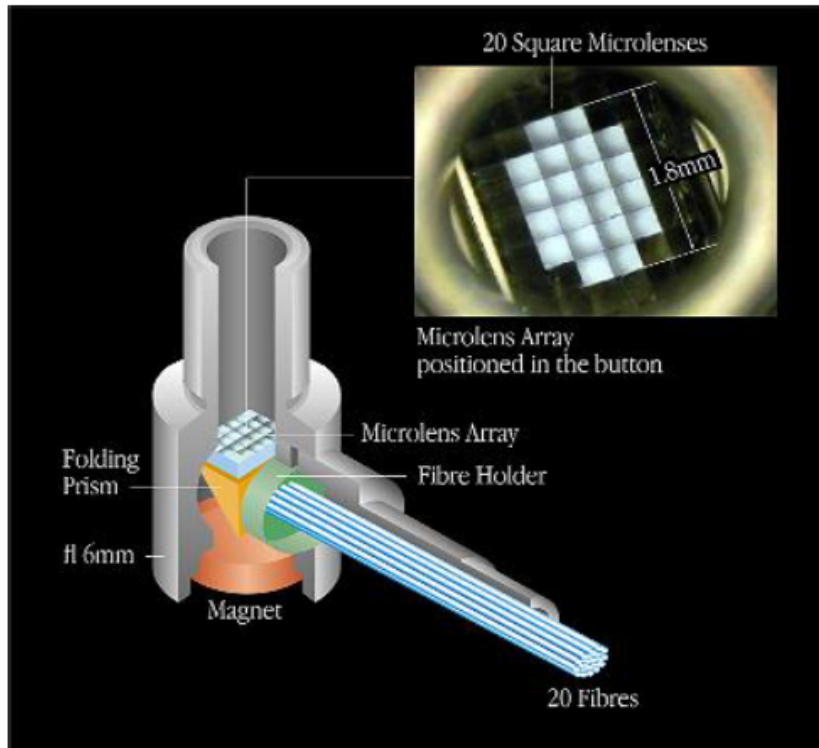
~10 000  
близких галактик  
(данные должны быть открыты  
к концу этого года)



# Многообъектный панорамный спектрограф

## IFU Techniques: Optical Fibres

### FLAMES - VLT





# KMOS: K-band Multi-Object Spectrograph

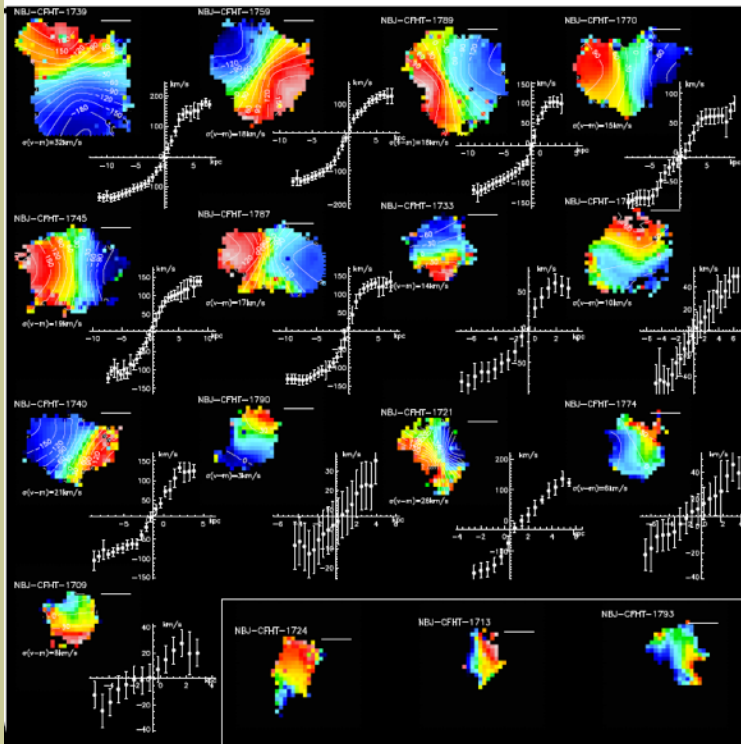
- Instrument capabilities
  - VLT 8m
  - 24 MOS probes, 2.8x2.8 arcsec each, sampled at 0.2 arcsec (14 slices)
  - 4704 spatial elements total (188 arcsec<sup>2</sup>)
  - 7.2 arcmin diameter patrol field
  - 0.8-2.5  $\mu\text{m}$  range
  - 1000 spectral elements ( $R \sim 3600$ )
  - $\varepsilon = 0.3 * \text{telescope} * \text{atmosphere}$



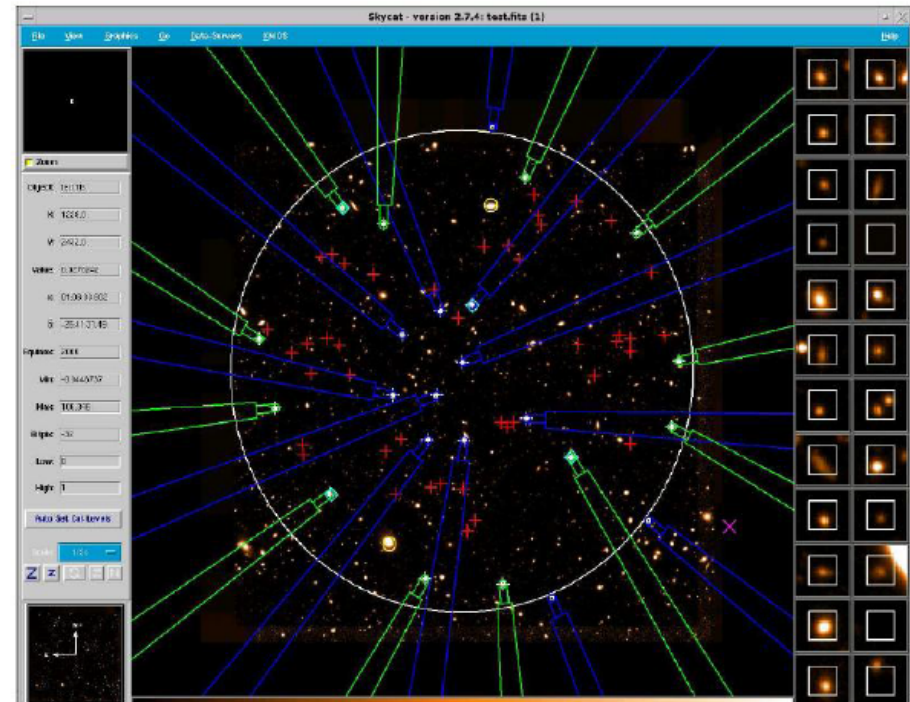
See also e.g., Sharples,  
Cirasuolo's talks  
+ KMOS session



## 2 hours of VLT time



## KMOS (NIR)



# Зачем так много всего? Решение разных задач!

	Спектр. диапазон	Поле зрения	Фактор заполнения
ЛИНЗЫ 	маленький	Большое	Неполный, проблема фона неба
Волокна 	Большой	Малое	Потери на входе, Учет фона неба
ЛИНЗЫ+ ВОЛОКНА 	Большой	Малое	Хорошее заполнение + фон неба
резатель 	Большой	Малое	Полное заполнение Проблема фона



Спасибо за внимание!

И прочитайте, пожалуйста статью Куртеса!

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982ASSL...92..123C/abstract>

AN INTEGRAL FIELD SPECTROGRAPH (IFS) FOR LARGE TELESCOPES

G. COURTES

Laboratoire d'Astronomie Spatiale du CNRS, Marseille  
et Observatoire de Marseille

ABSTRACT: A combination of an array of small lenses together with fibre optics can be used to produce a high transmission spectrograph which can record the spectra of many image elements simultaneously. Such a design may play an important role in ground based observations preparing for the NASA-ESA Space Telescope programmes.