

А.В. Моисеев, САО РАН

Методы исследования галактик.

Лекция IX.

Обзоры галактик от рентгена до радио.
Спектральные обзоры, включая 3D-спектроскопию.

Презентации и видео: <https://www.sao.ru/hq/moisav>

Терминология, виды обзоров.

Нет возможности изучать эволюцию в реальном времени => сравниваем галактики разных типов и на разном z (возраст Вселенной). “Большие данные”

Под “обзором галактик/звёзд/туманностей” обычно понимают выполнение массовых (>100 объектов) наблюдения с помощью одинаковой однородной методики. Подразумевается, что в результате будет выполнено исследование статистических распределений получаемых характеристик, а также обозначены эффекты селекции.

По типу выполнения можно выделять такие виды обзоров:

- Всего неба/полусферы или её заметной части (DSS, SDSS, NVSS, eROSITA...)
- “Глубокие” детальных обзоры небольших площадок (HUDF, COSMOS...)
- Исследование однородной методикой выборки, которая выделяется по ограниченному набору параметров: расстояние, размер, светимость... (ATLAS-3D, CALIFA, MaNGA...)
- “Слепые” обзоры (обычно относят к радионаблюдениям в линиях - ALFALFA)
- Спектральные/фотометрические обзоры (иногда разделение отсутствует – Xray)
- По особенностям диапазона: радио, рентгеновские, оптические, широкополосные, узкополосные, многоволновые

В.П. Решетников, “Обзоры неба и глубокие поля наземных и космических телескопов”, 2005,
УФН: <https://ufn.ru/ru/articles/2005/11/b/>

Фотометрические обзоры неба (оптика, ближний ИК)

Фотографическая эпоха (Лекция 2): классификация галактик, зв. величины, размеры...
1948-1958 Паломарский обзор – 48" Шмидт, красные и синие пластинки $6^\circ \times 6^\circ$, $B \sim 22 \text{ mag}$, $\text{DEC} > -33^\circ$

Вторая версия (POSS-II): 1980-90, Южная версия: 124 см UK Schmidt Telescope

Оцифровано в рамках Digitized Sky Survey (**DSS**): DSS-I/II

Для части южного неба – *до сих пор единственный оптический цифровой обзор*

Нелинейность, передержка ярких областей

Цифровая эпоха:

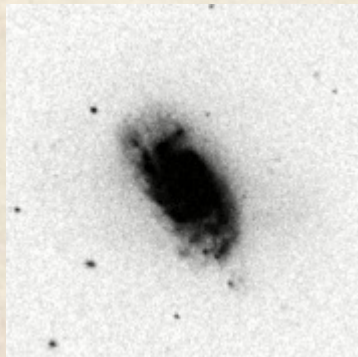
1997-2001 **2MASS** (Two Micron All Sky Survey) – 2*1.3-м (США, Чили), ИК, 2"/px, $J \sim 15 \text{ mag}$

2000-2008 **SDSS I-II** (Sloan Digital Sky Surveys): 2.5-м телескоп APO, 1/4 неба, ugriz, $g \sim 23 \text{ mag}$

2019-2024 **DESI Legacy survey**: 2*4м+2.3м телескопы (США, Чили), 1/3 неба, riz, $r \sim 24 \text{ mag}$

2025-... **LSST** (Large Synoptic Survey Telescope, 8.4 м)

NGC 1084 DSS



2MASS



SDSS



DESI Legacy survey



Слоановский обзор (SDSS): фотометрия

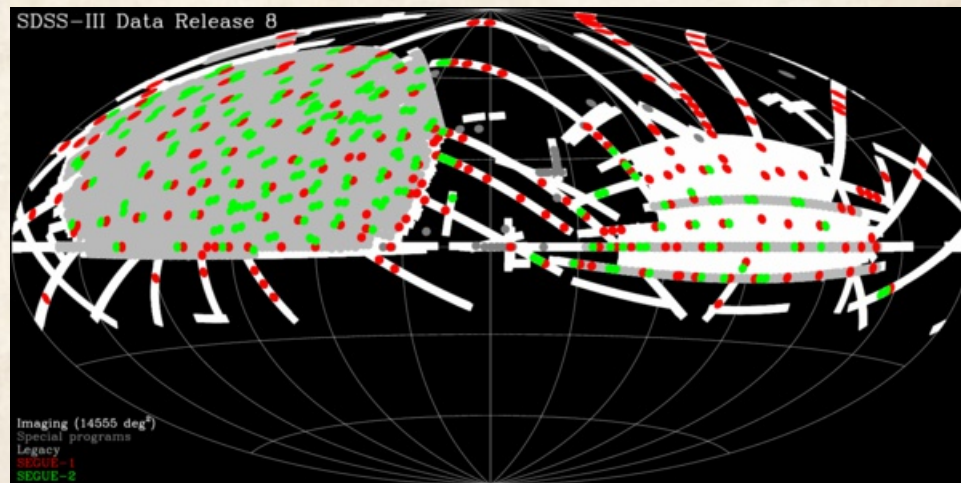


2.5 метровый широкоугольный
оптический телескоп (Apache Point Observatory,
New Mexico, US) :

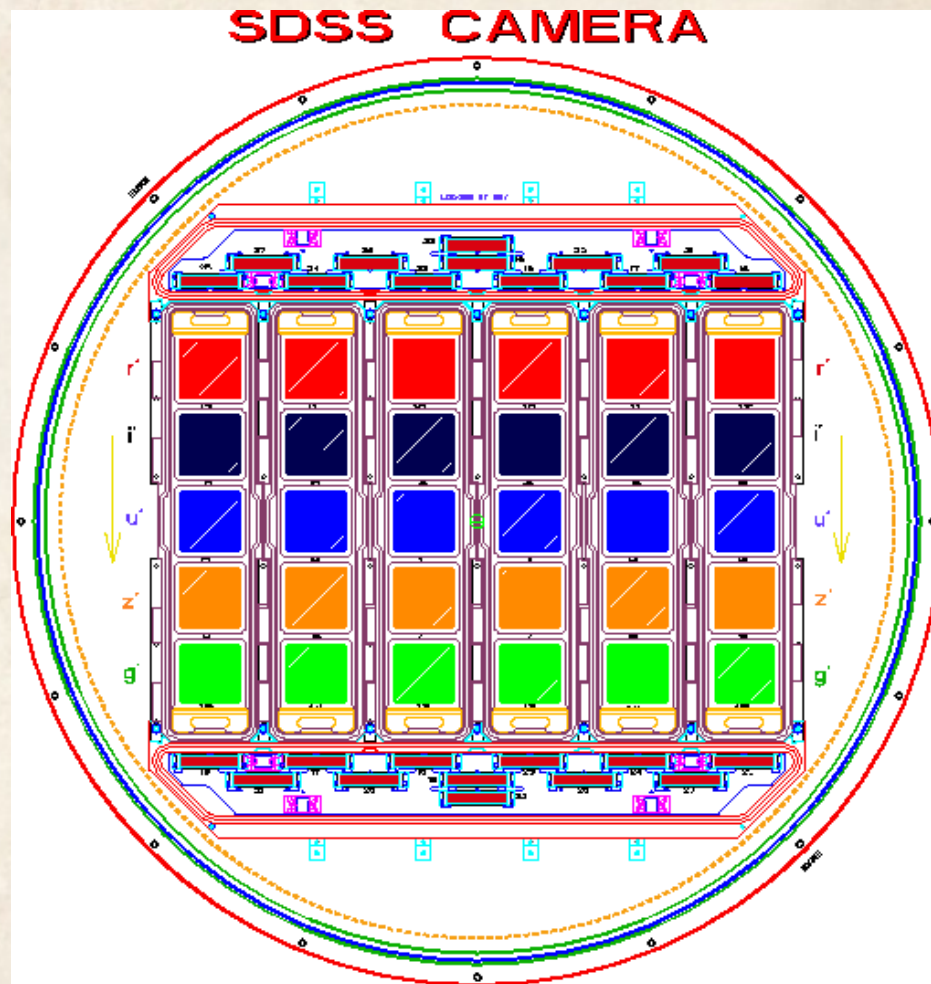
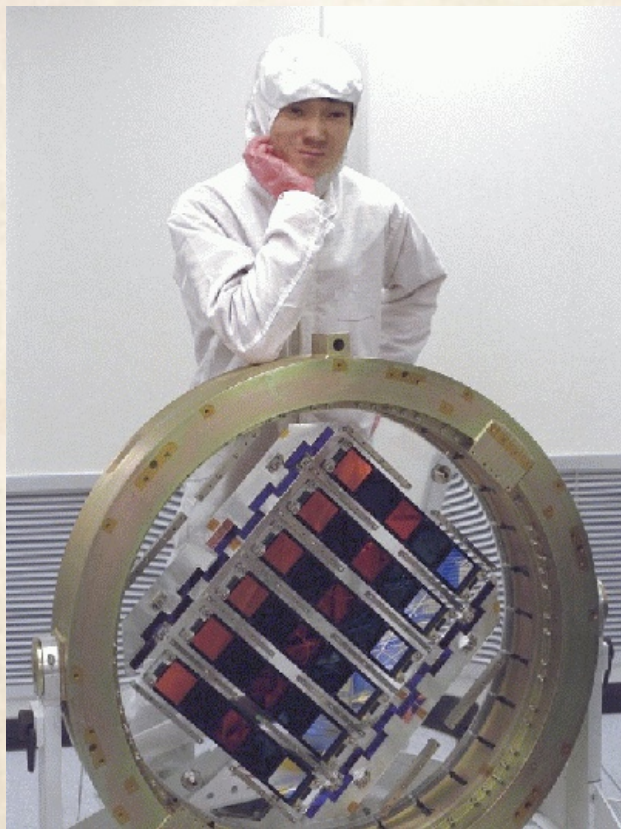
- изображения
- спектры (оптика и ИК)

$\sim 12000 \text{ deg}^2$ (всё небо - 41253 deg^2)

>200 млн. галактик



(SDSS): ugriz, дрейфовое сканирование



Фотометрическая система SDSS-ugriz (Лекция 2)

SDSS: открытый доступ к данным

Интерактивный (Navigate Tool): <https://skyserver.sdss.org/dr18/VisualTools/navi>

Selected Object
SDSS ID: 1237660339089899556
ra 43.80095
dec -0.18355
type GALAXY
u 16.23
g 14.16
r 13.15
i 12.63
z 12.19

Один из самых (самый?) цитируемый телескоп

Magnitudes		Magnitude Uncertainties	
u	16.235	err_u	0.011
g	14.164	err_g	0.002
r	13.149	err_r	0.002
i	12.628	err_i	0.002
z	12.187	err_z	0.002

Other observations	
Image MJD	52585
mode	PRIMARY
parentID	1237660339089899556
nChild	0
extinction_r	0.16
PetroRad_r (arcsec)	17.60 ± 0.659

SQL – запросы (составление выборок)

Каталоги фотометрических и спектральных параметров

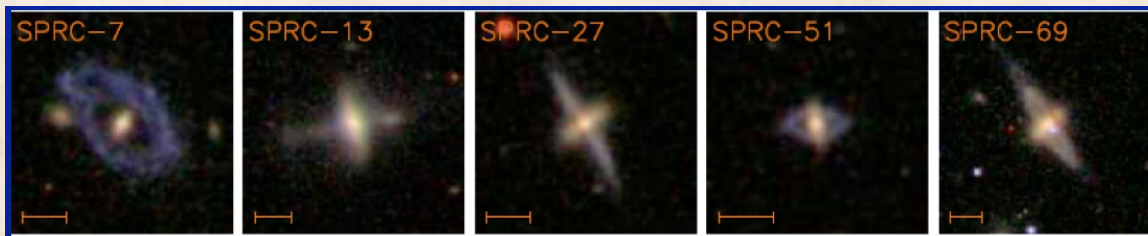
Волонтерский проект Galaxy Zoo (<https://www.zooniverse.org/>)

GalZoo1 (Lintott + 2011)

~900 000 простых классификаций (E-S-рес)

Позволило построить каталог полярных колец

(Moiseev + 2011)



Выборки AGN, сливающихся галактик...

GalZoo2 (Hart+ 2016)

Многоуровневая классификация ~300 000

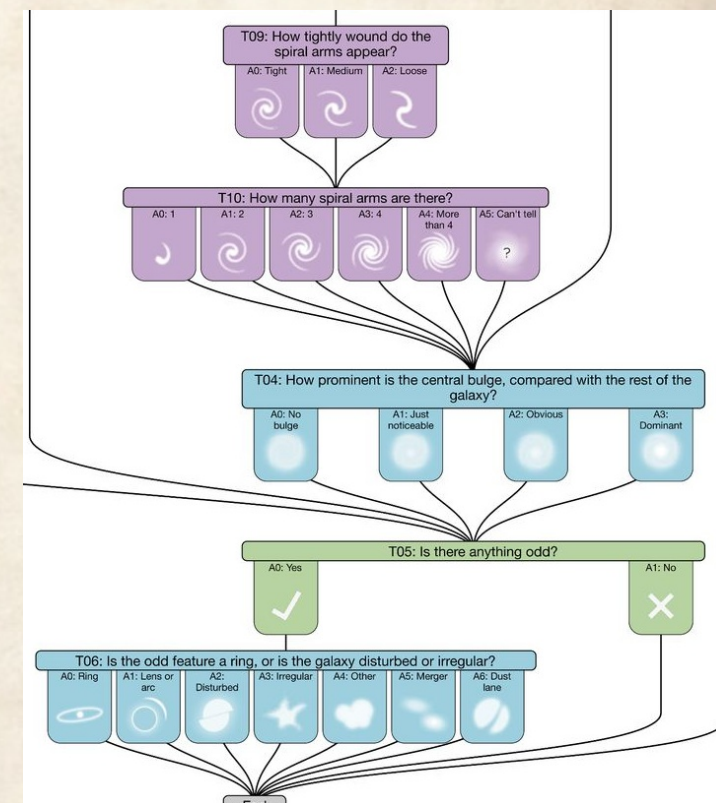
галактик: число рукавов, бары, кольца...

Наиболее массовая количественная оценка морфологических параметров (RC3 de Vaucouleurse ~23 000, Лекция 2)

Используется для тренировки машинного обучения...

Class	Button	Description
1		Elliptical galaxy
2		Clockwise/Z-wise spiral galaxy
3		Anti-clockwise/S-wise spiral galaxy
4		Spiral galaxy other (eg. edge on)
5		Star or Don't Know (eg. artefact)
6		Merger

Table 1. Galaxy Zoo classification categories showing schematic symbols



Новые типы объектов в Galaxy Zoo

IC 2497: Hanny's Voorwerp (Лекция 7)
(Hanny van Arkel)

“Зеленые горошины” (Green pea)

Hanny's Voorwerp* — A Space Oddity

1 Spiral galaxy IC 2497 gravitationally interacts with a bypassing galaxy.

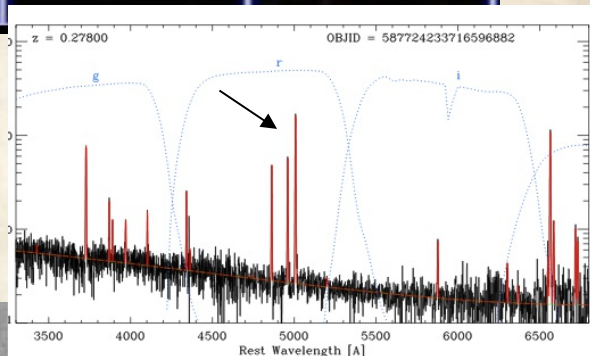
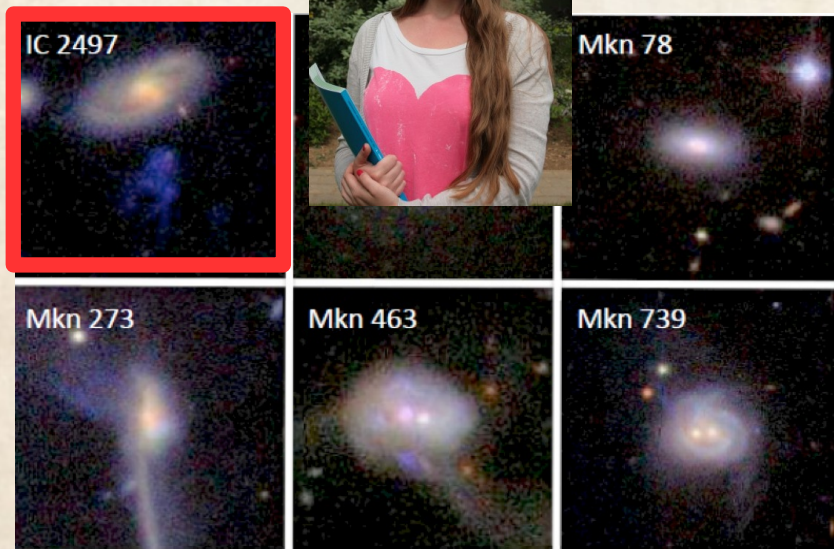
2 A large tidal tail of gas is pulled out from the spiral galaxy.

3 A quasar illuminates the gas, creating a glowing cone of light.

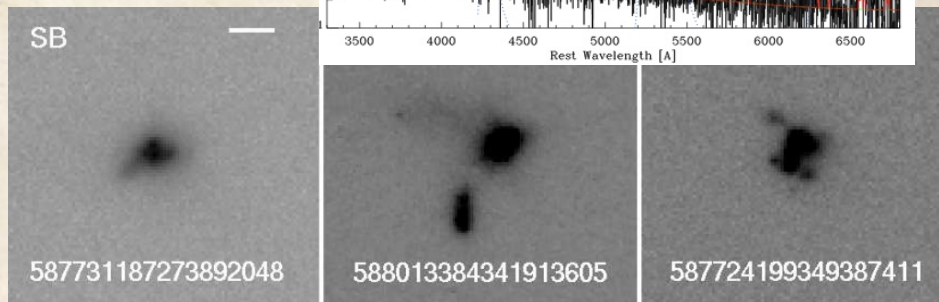
4 Gas streaming out from the galaxy's center impacts the tidal tail and triggers star formation.

*Hanny's Object

Компактные галактики со вспышкой звездообразования, [OIII]5007 в фильтре r на $z=0.1-0.4$ (Cardamone+ 2009).



HST:

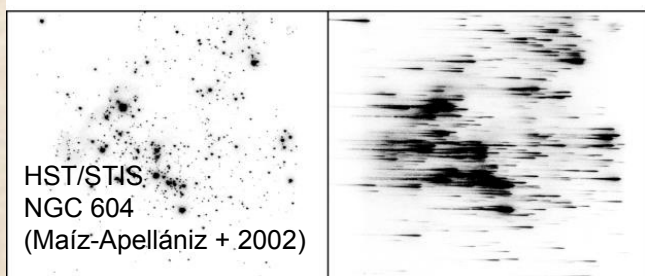
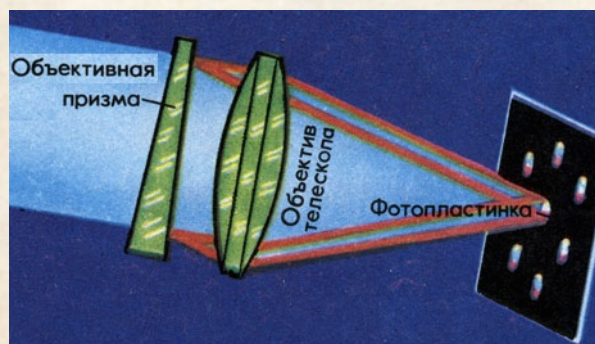


Поиск продолжается (Keel + 2012, 2017)

Методы многообъектной спектроскопии

Бесщелевая:

объективная призма,
PNe spectrograph...

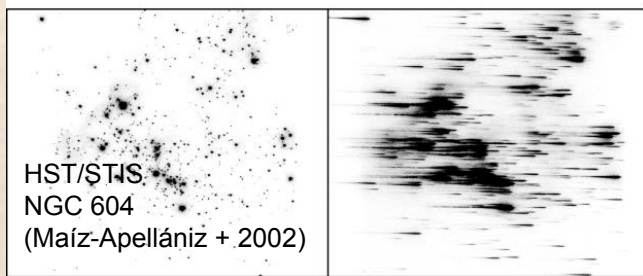
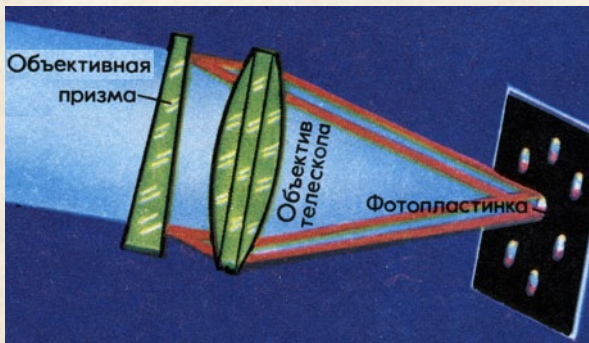


Проблемы переналожения и
фона, неэффективное
использование детектора

Методы многообъектной спектроскопии

Бесщелевая:

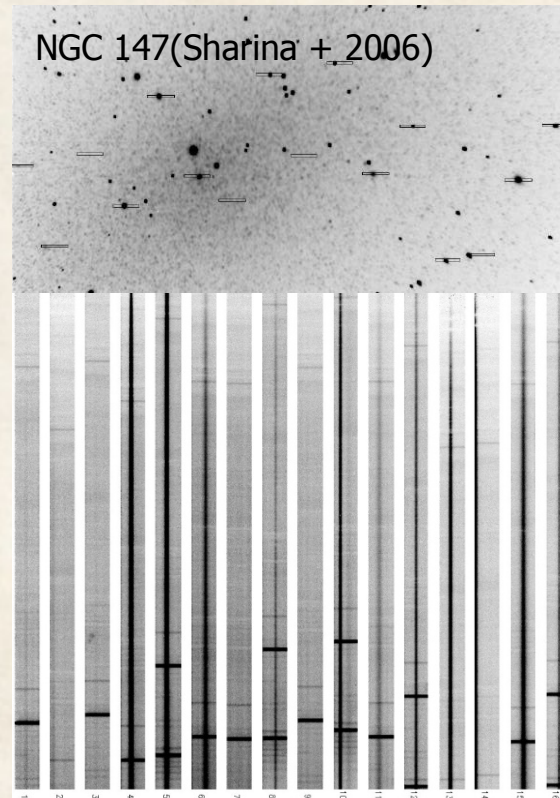
объективная призма,
PNe spectrograph...



Проблемы переналожения и
фона, неэффективное
использование детектора

Многощелевая:

Щелевая маска,
перемещаемые или
формируемые
(microshutter, JWST) щели

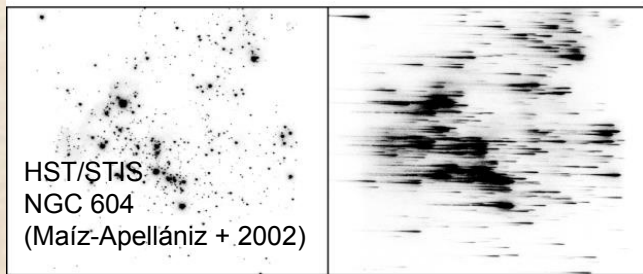
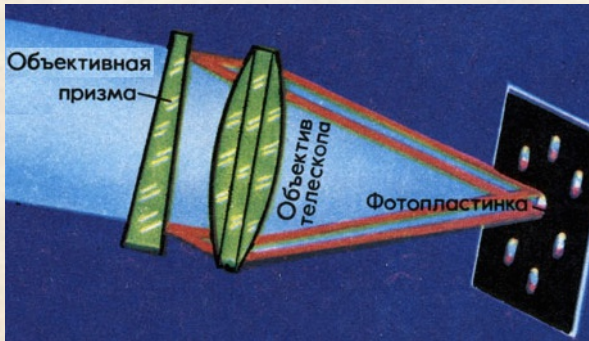


Ограничение по объектам,
обрезание диапазона

Методы многообъектной спектроскопии

Бесщелевая:

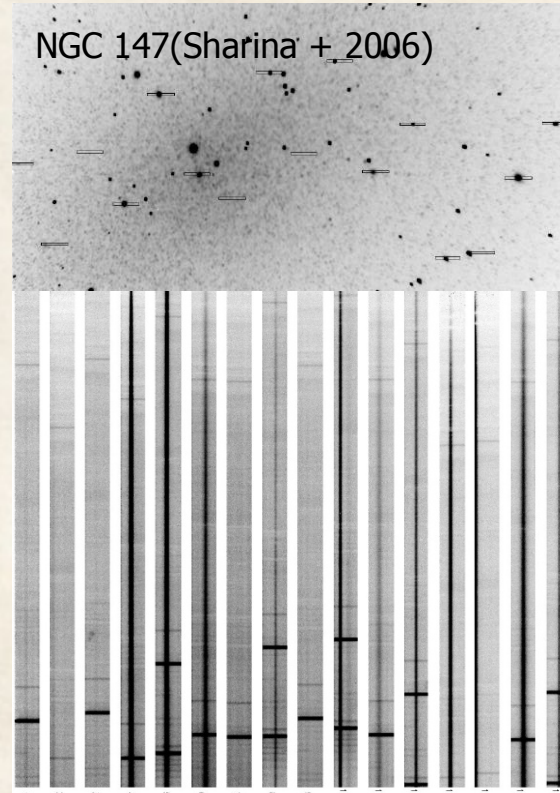
объективная призма,
PNe spectrograph...



Проблемы переналожения и
фона, неэффективное
использование детектора

Многощелевая:

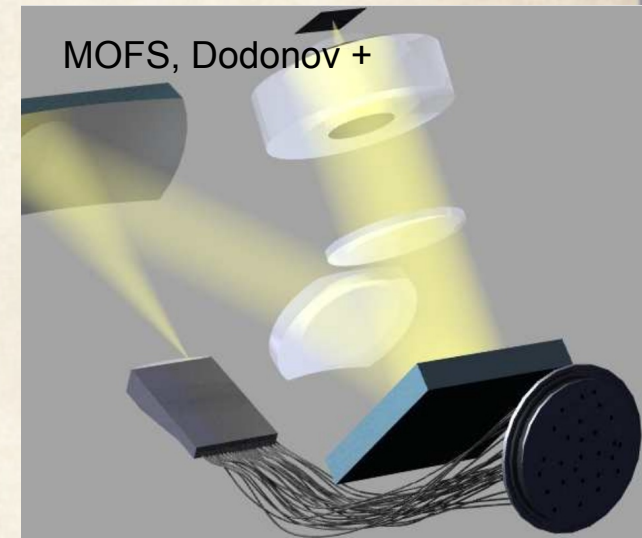
Щелевая маска,
перемещаемые или
формируемые
(microshutter, JWST) щели



Ограничение по объектам,
обрезание диапазона

Волоконная

Световолокна или их пучки,
установка в маску или
расстановка "рукой робота"

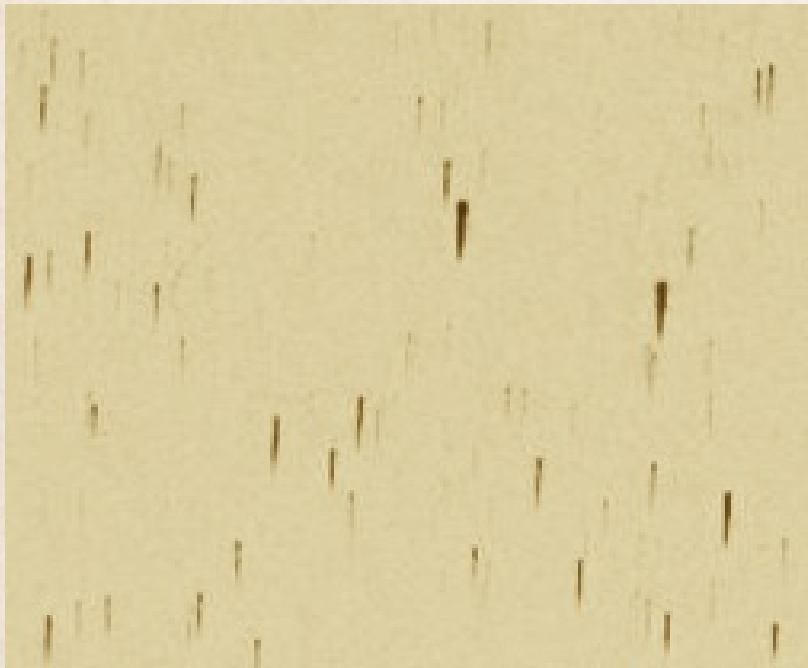


Удобно в массовых
обзорах, но есть проблема
фона неба

Бюраканский обзор (Маркарян +, 1965-1980, Лекция 7)



1500 галактик с УФ-избытками (использовалась повышенная синяя чувствительность эмульсии)
Первый поисковый обзор с отбором внегалактических объектов по их SED



2df и 6df: крупномасштабная структура

2dFGRS (2 degree Field Galaxy Redshift Survey)
1997-2002, $2000 \square^\circ$, $>200\ 000$ измерений $\langle z \rangle \sim 0.1$
 2° – поле зрения на 3.9м телескопе ААО
Одновременно - 400 спектров
Магнитный робот-расстановщик

2001-2009: 6df - 1.2м телескоп Шмидта ААО, 150 спектров
 $\sim 17000 \square^\circ$, $>130\ 000$ галактик

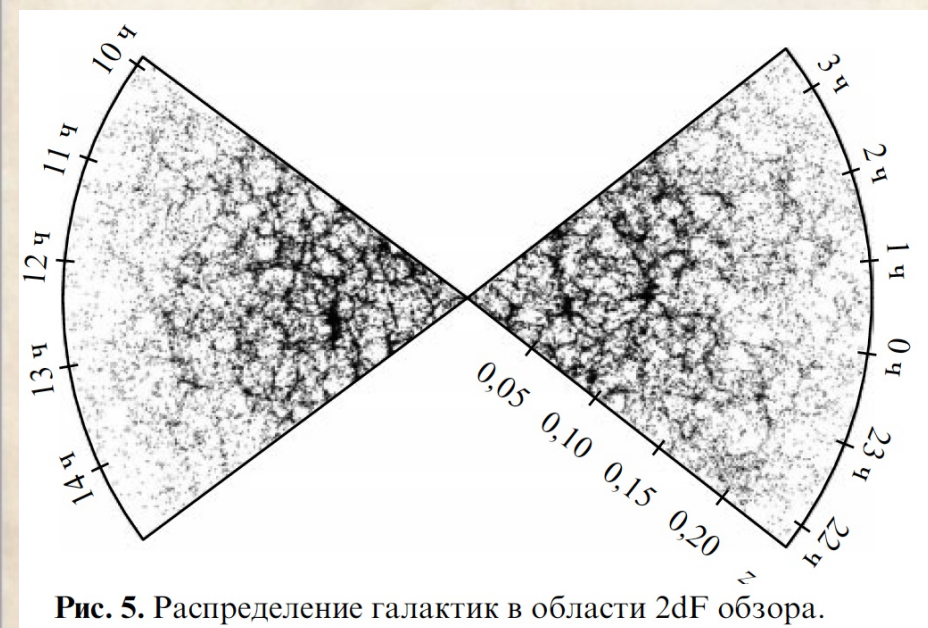
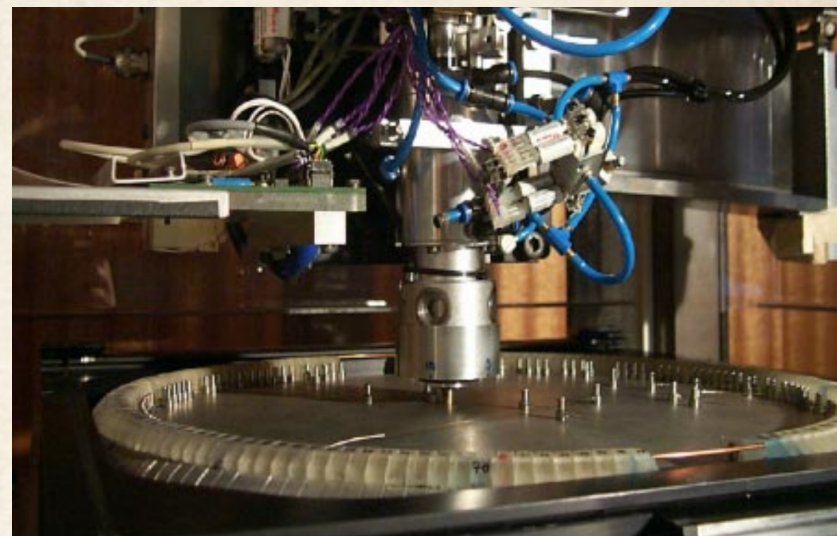
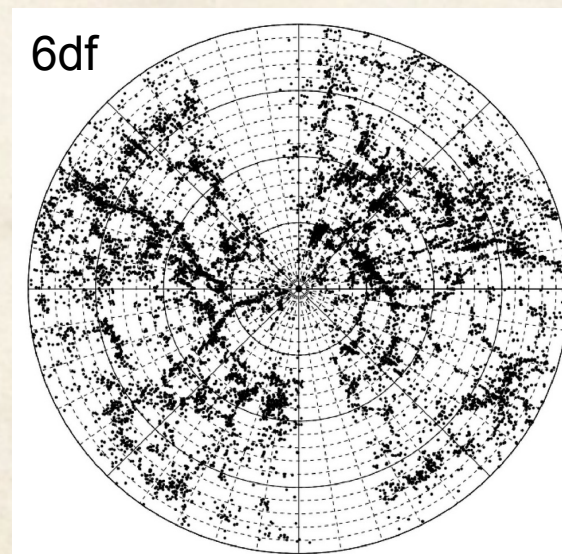
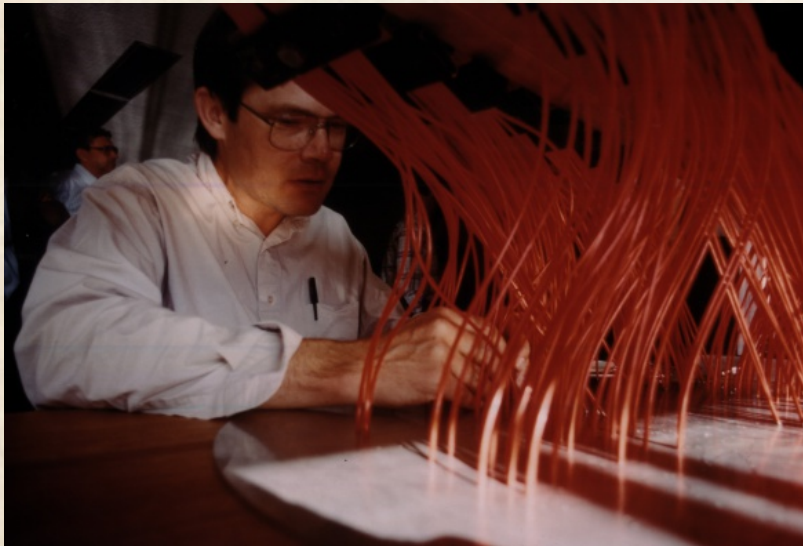
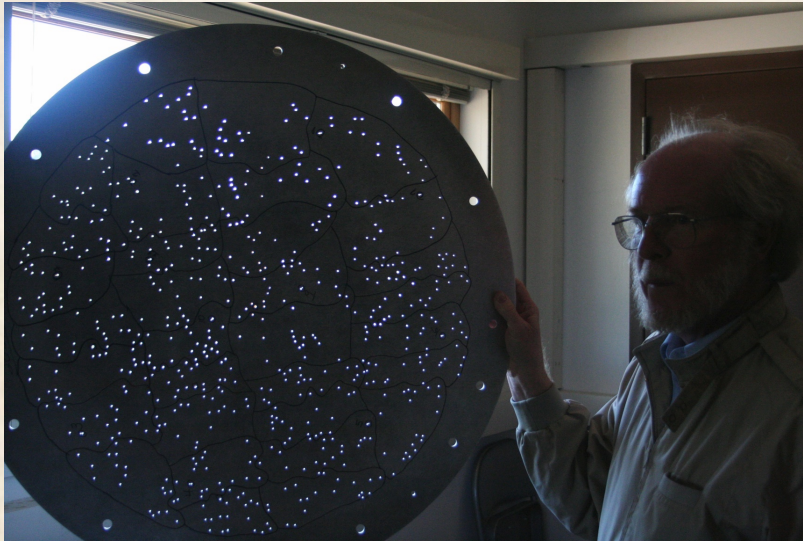


Рис. 5. Распределение галактик в области 2dF обзора.

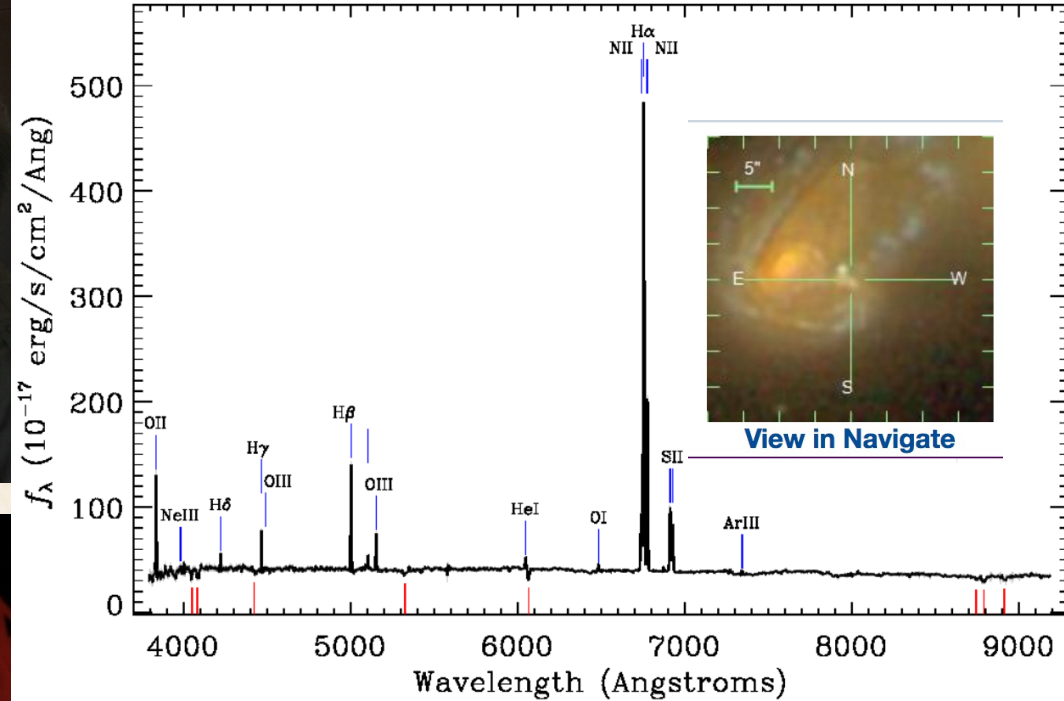


Пекулярные скорости, ВАО...

Спектроскопия SDSS



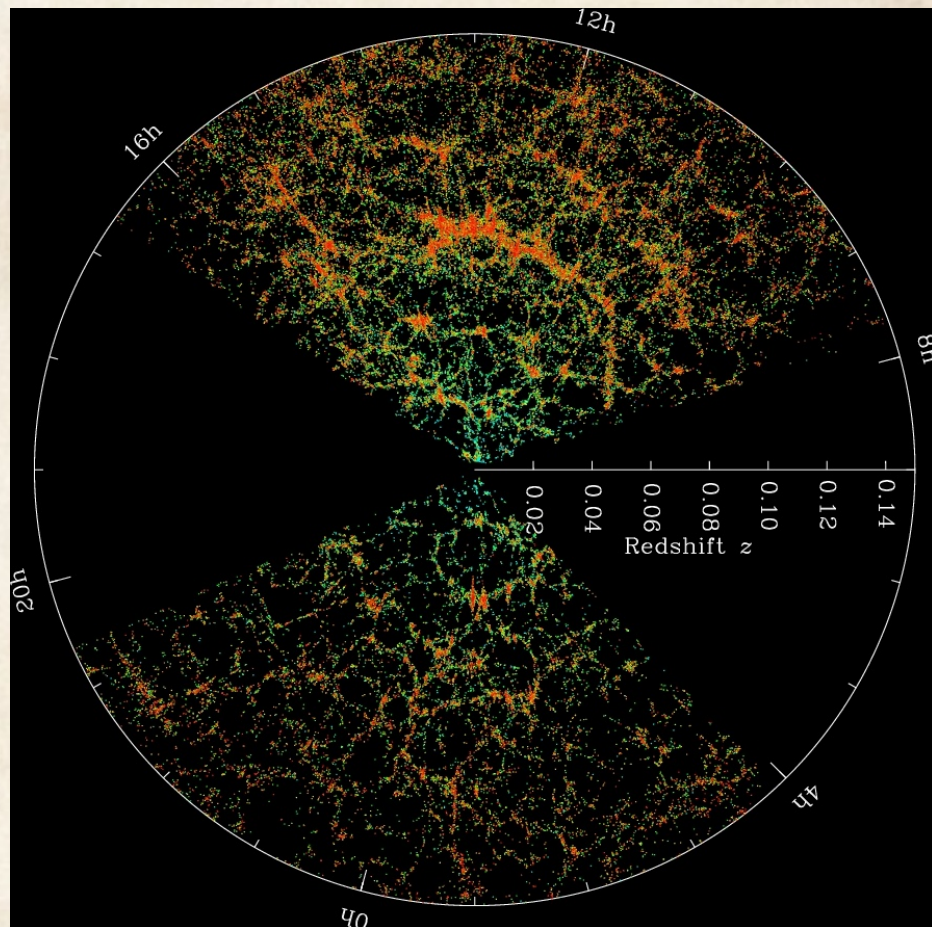
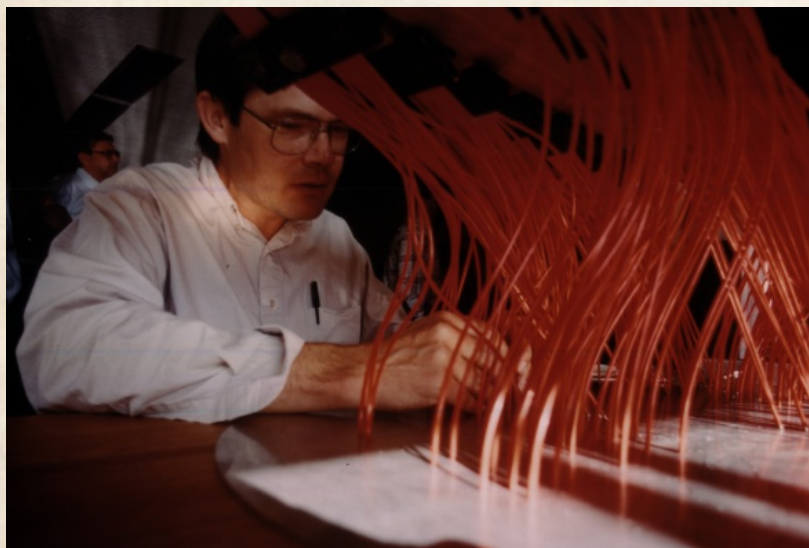
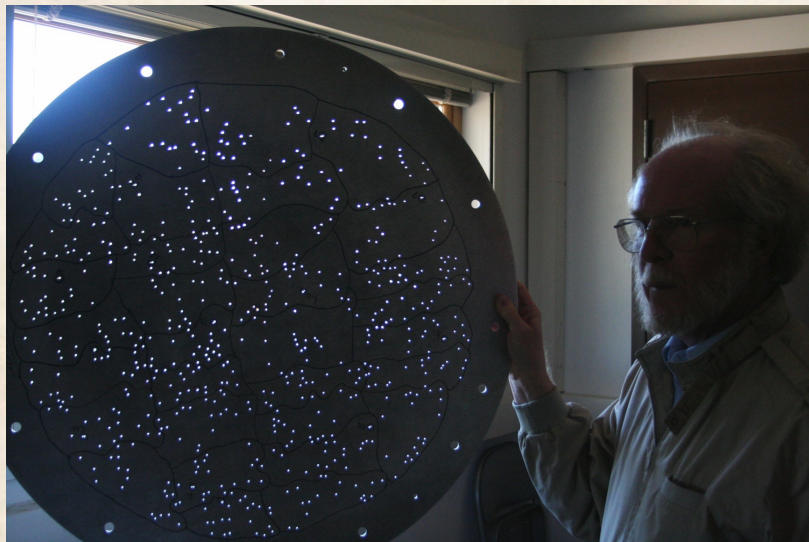
Survey: *sdss* Program: *southern* Target: *GALAXY_RED GALAXY*
RA=43.79873, Dec=-0.18394, Plate=1068, Fiber=192, MJD=52614
 $z=0.02887 \pm 0.00001$ Class=GALAXY STARBURST
No warnings.



640 (потом - 1000) световолокон
>800 000 галактик
>100 000 QSO (отбор по цветам)
Открытый каталог спектров, параметров линий

Сейчас уже - DR18

Спектроскопия SDSS



640 (потом - 1000) световолокон
>800 000 галактик
>100 000 QSO (отбор по цветам)

Сейчас уже - DR18

LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope)

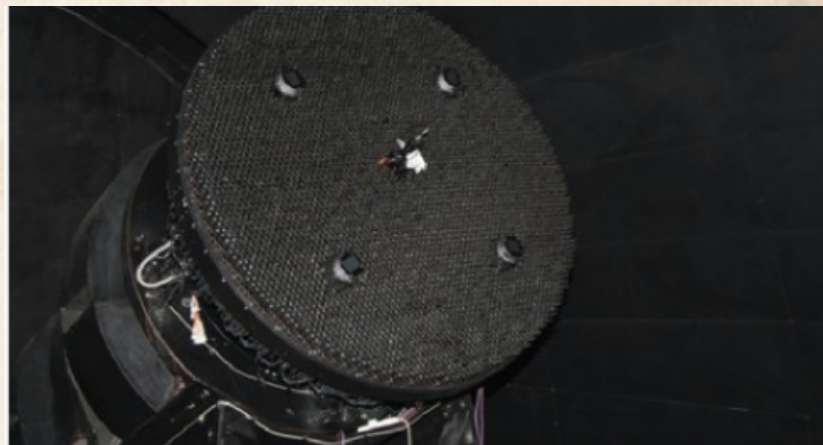


Figure 1 LAMOST

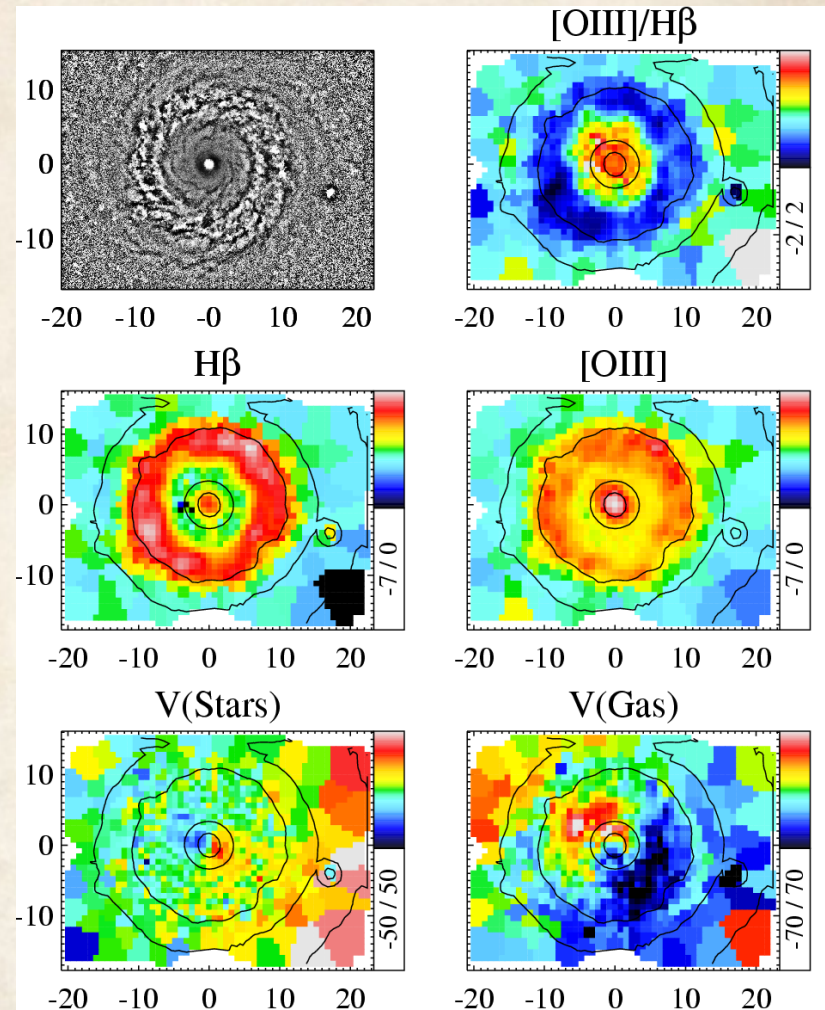
...ber positioning units. Lower right: the fiber positioning units. (<http://www.>

4000 световолокон
~ 1 млн. галактик
~ 10 млн звёзд

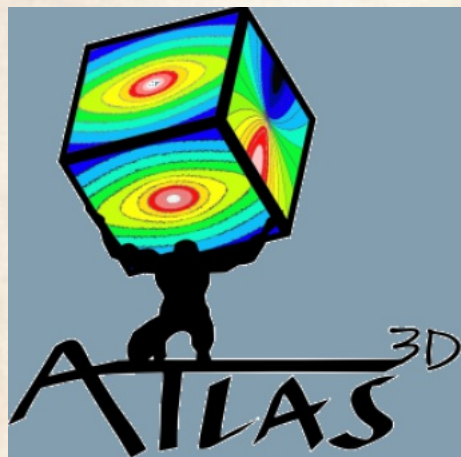
Интегрально-полевые обзоры: SAURON/ATLAS 3D



4.2m WHT



de Zeeuw et al. 2002



260 галактик ранних типов

(Лекция 5):

Home Page

The People

Publications

Data and Published Quantities

SAURON data

MegaCam Images

News and Press Releases

Private Wiki

Быстрые и медленные ротаторы

Удельный угловой момент

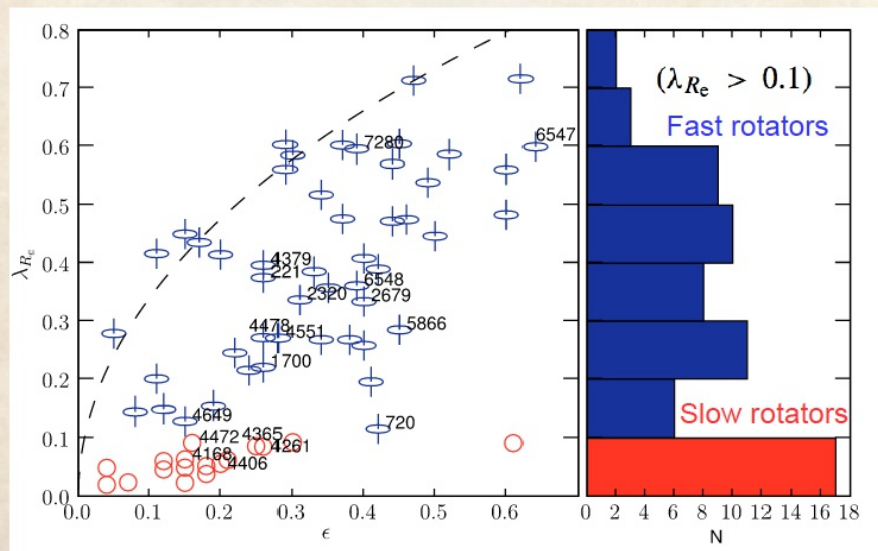
$$\lambda_R \equiv \frac{\langle R|V| \rangle}{\langle R \sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle}, \quad (\text{Emsellem+ 2007}) \quad (5)$$

and measured via two-dimensional spectroscopy as

$$\lambda_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} F_i R_i |V_i|}{\sum_{i=1}^{N_p} F_i R_i \sqrt{V_i^2 + \sigma_i^2}}, \quad (6)$$

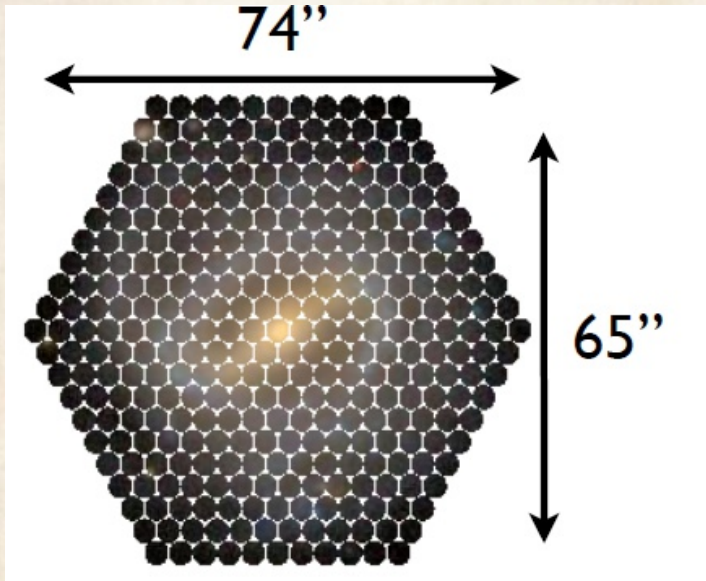
where F_i is the flux inside the i th bin, R_i its distance to the centre,

“Медленные” - в среднем более массивные, как правило, E-галактики, часто со следами слияний



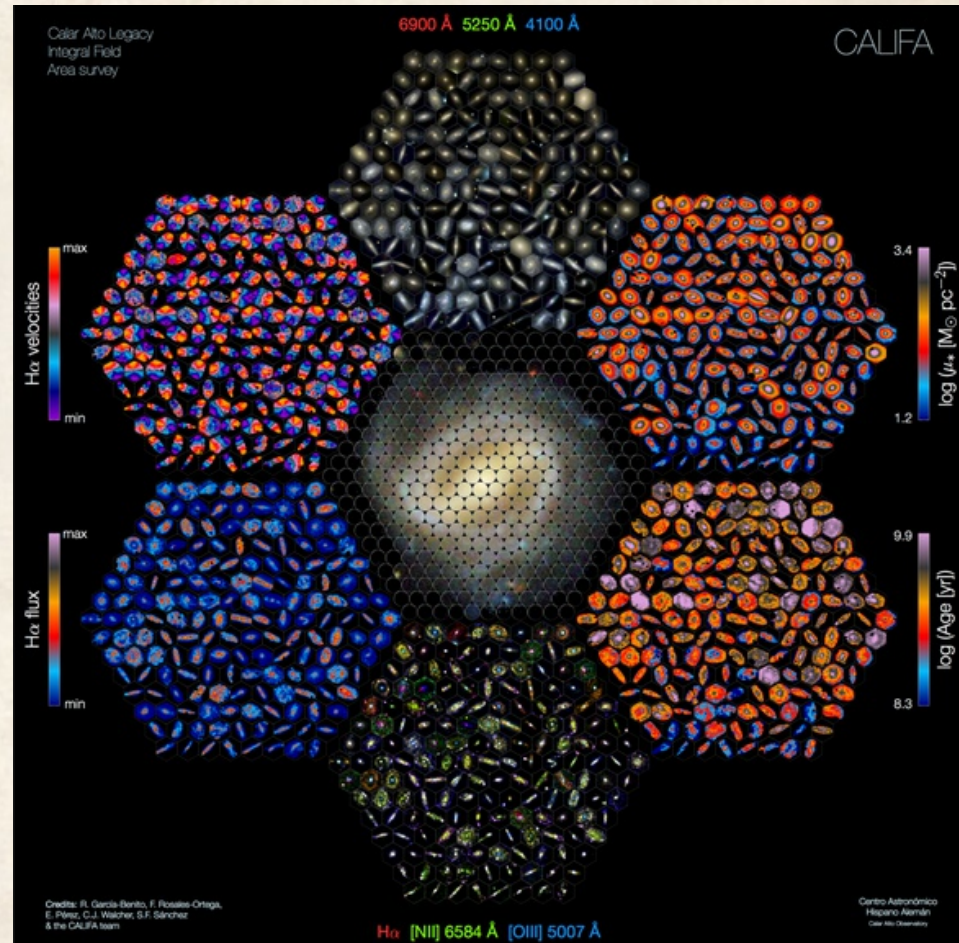
А.В. Моисеев, «Методы исследования галактик», 2024/03/06, лекция 5

CALIFA: Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area survey



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

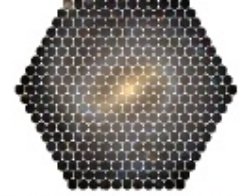
Два диапазона:
4300-7000 AA R=850
3700-5000 AA at R=1650



данные для 600 галактик в свободном доступе
Включая софт для анализа и визуализации

Kinematics and morphology

AYKALI



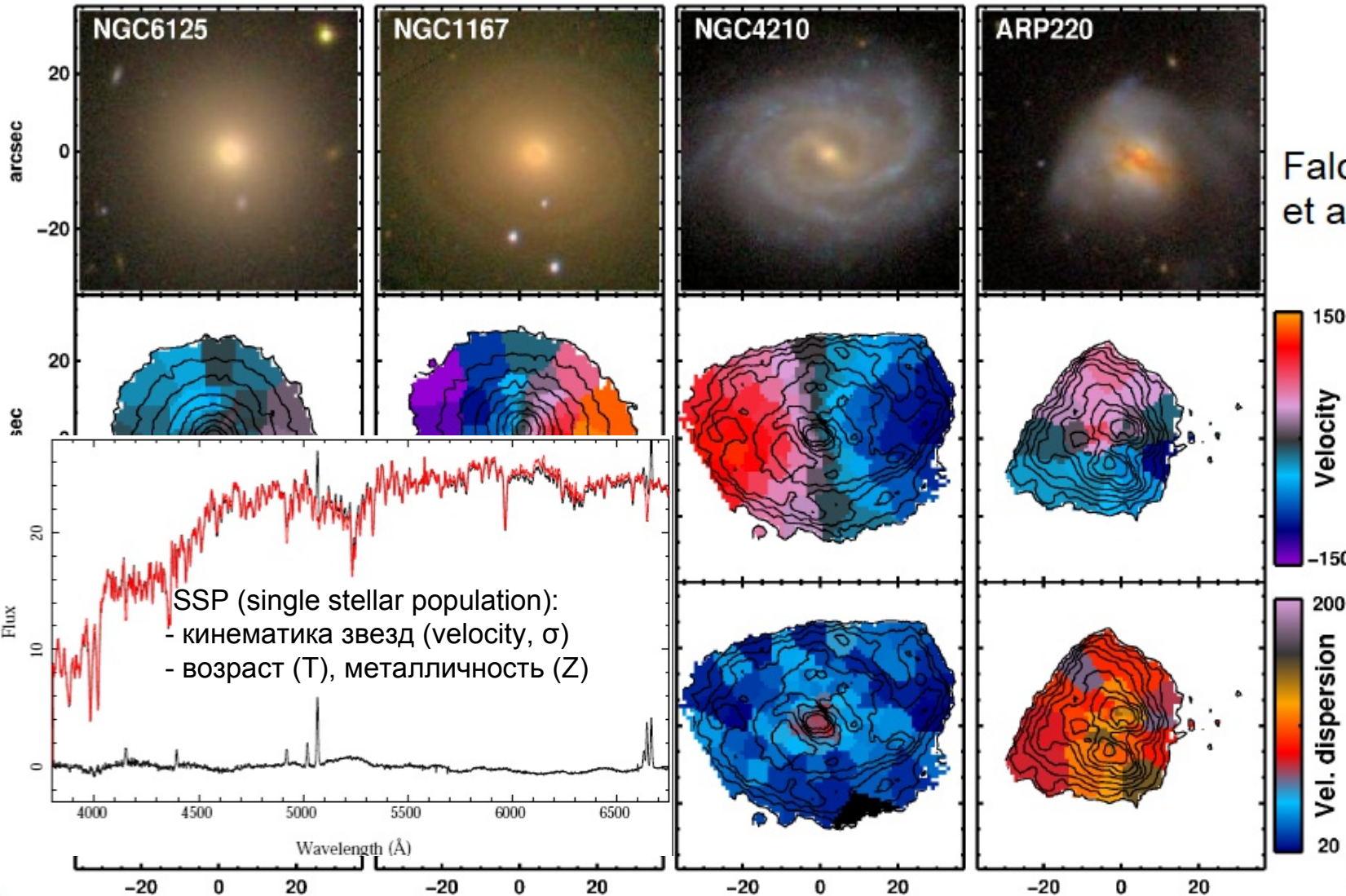
CALIFA Survey

Ellipse

Spiral

Late Spiral

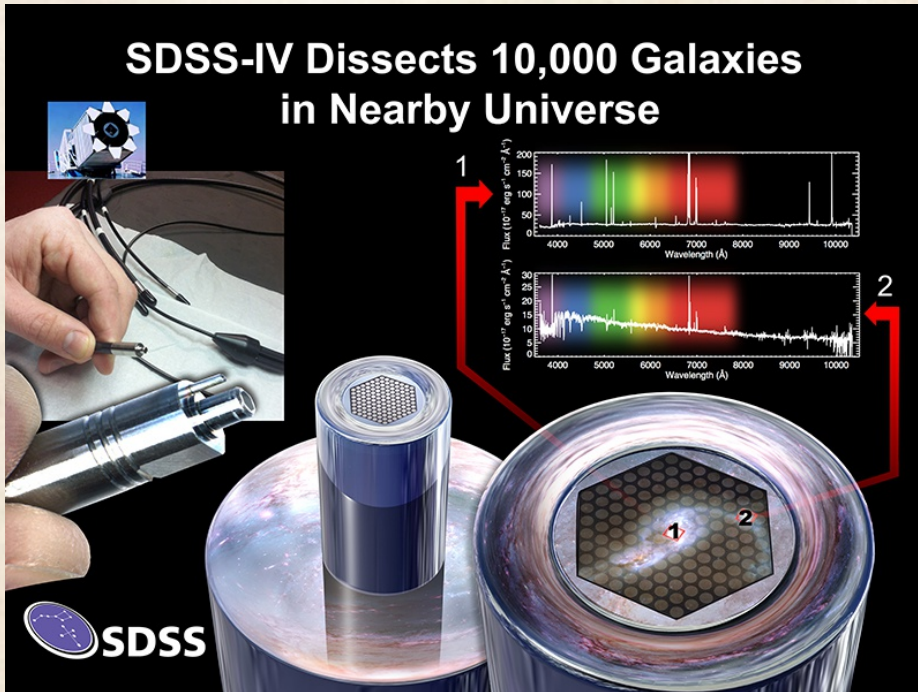
Irregular



Falcon-Barros
et al., subm.

SDSS/MaNGA: Mapping Nearby Galaxies at APO

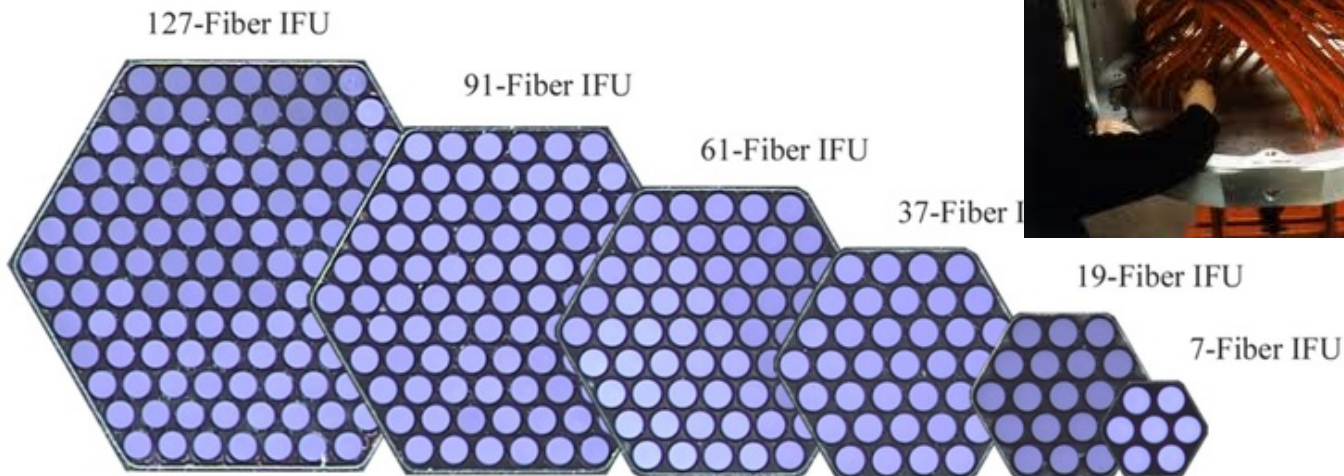
2.5-m APO



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

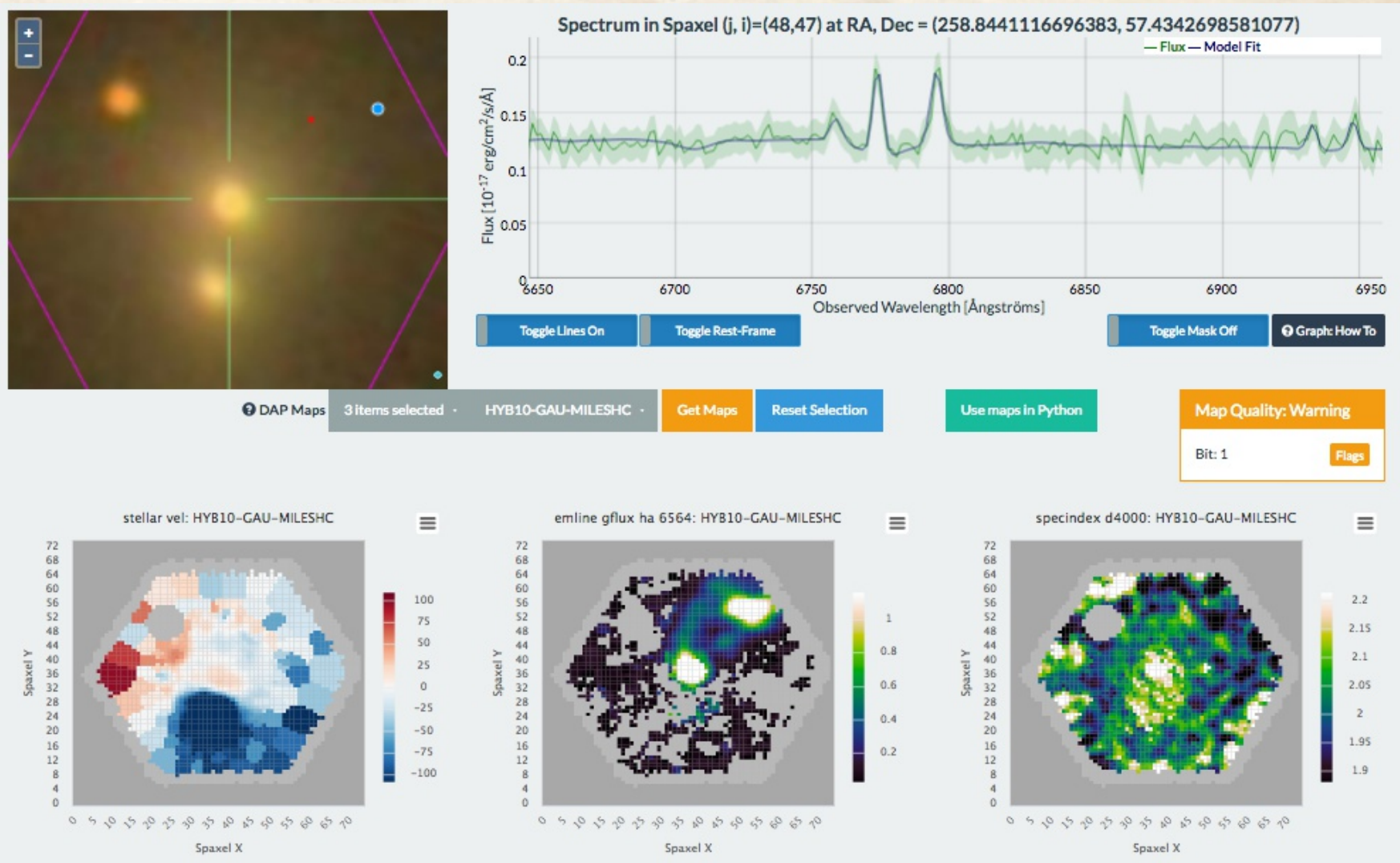
- ☆ Roughly flat stellar mass distribution with $M > 10^9 M_{\odot}$
- ☆ Smallest galaxy diameter sampled by 25 spatial bins
- ☆ Primary sample: 67%, radial coverage to 1.5 Re (effective or half-light radius)
- ☆ Secondary sample: 33%, radial coverage to 2.5 Re
- ☆ No size or inclination cuts



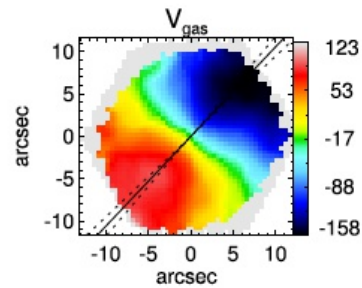
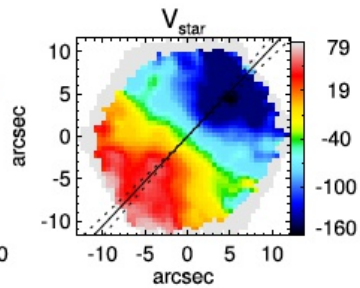
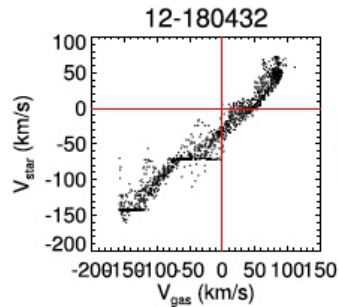
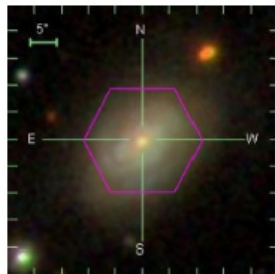
~1400 волокон
собраны в 17
жгутов:
(12"- 32" @ 2")

MaNGA: открытый доступ к данным (MARVING)

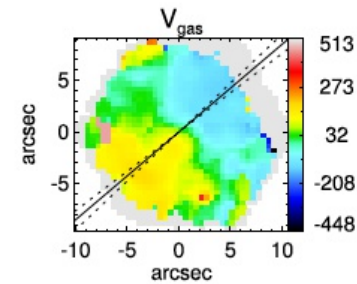
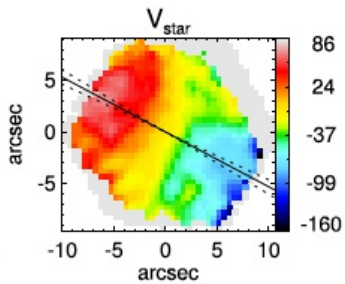
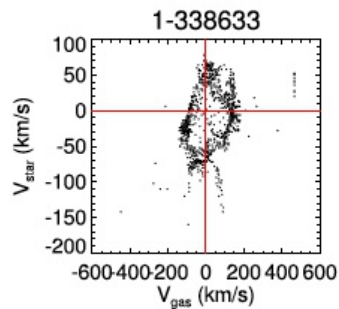
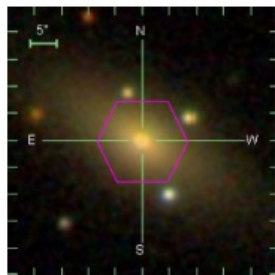
Кубы, карты параметров, интерактивный анализ...



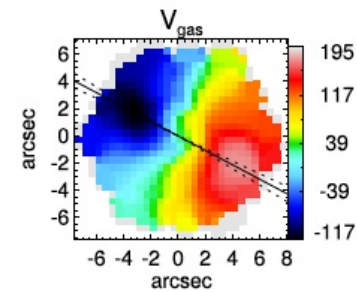
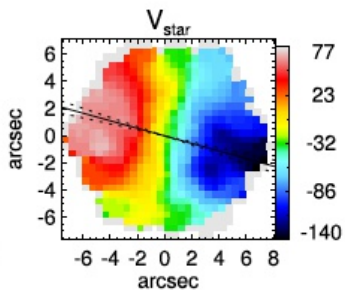
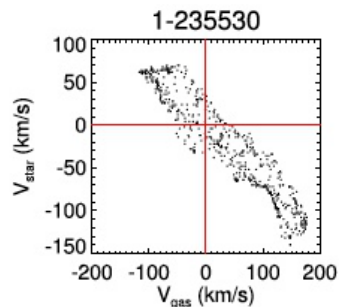
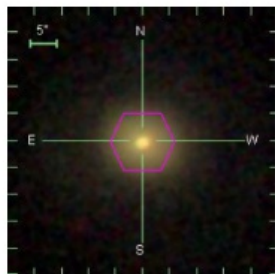
MaNGA: кинематически выделенные подсистемы



Нормальное
Вращение



Полярный газ?

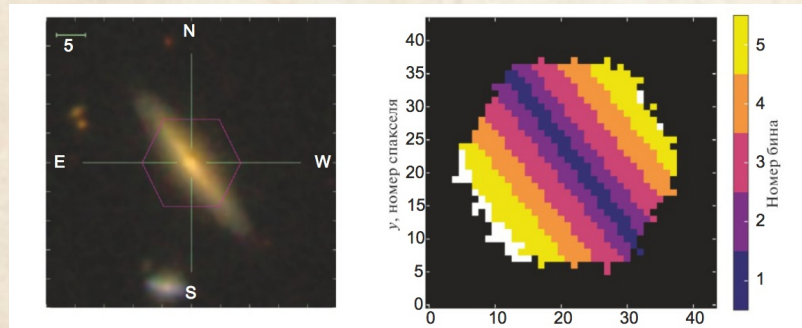
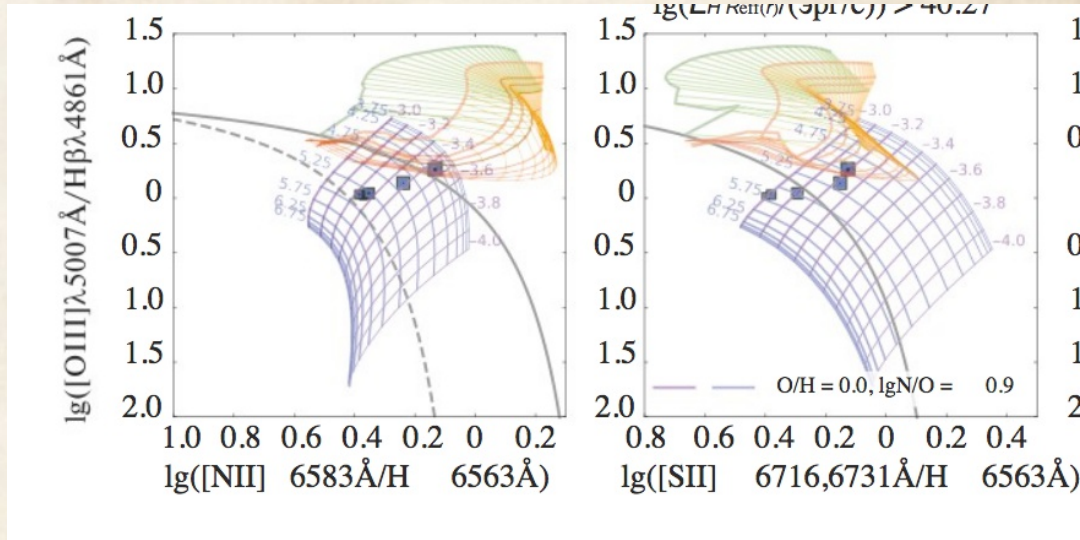
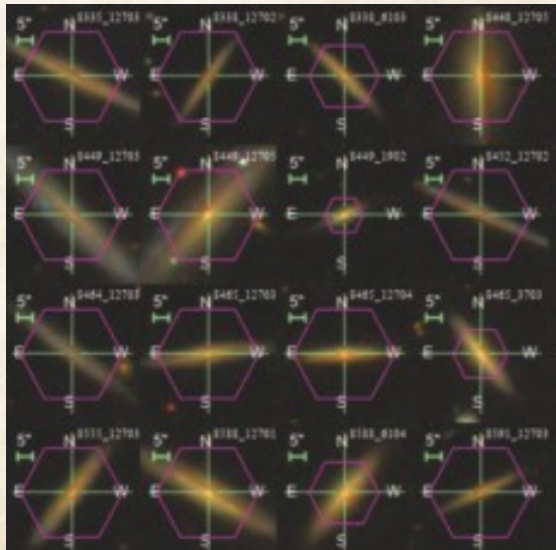


Противовращение

Jin et al. 2016

Суммирование похожих объектов (stacking)

Складывание спектров от сходных областей (например – один диапазон относительных высот над диском) с целью измерить линии низкой интенсивности.



Каждый символ – измерение отношения потоков линий в суммарном спектре десятков галактик на данной высоте

- $z/z_0 < 0.5$
- $z/z_0 (0.5 \quad 1.5)$
- $z/z_0 (1.5 \quad 3.0)$
- $z/z_0 (3.0 \quad 4.5)$
- $z/z_0 > 4.5$

Постникова, Бизяев, 2023, ПАЖ, "SDSS-IV MaNGA: источники ионизации диффузной газовой среды на больших галактических высотах"

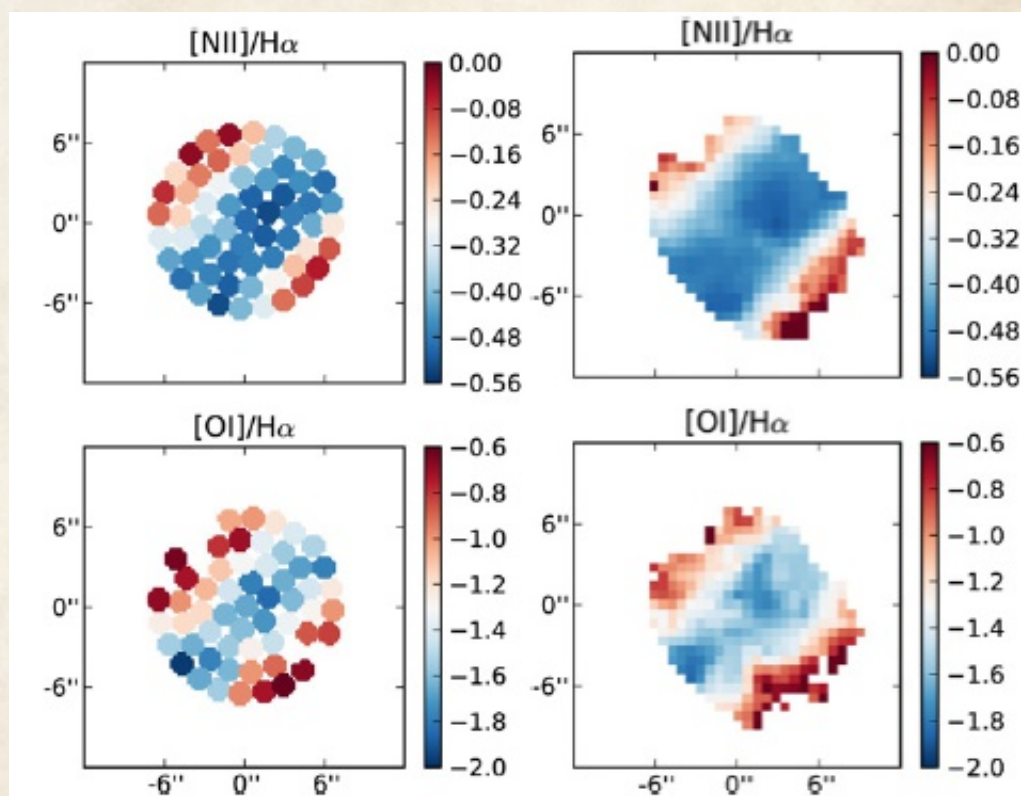
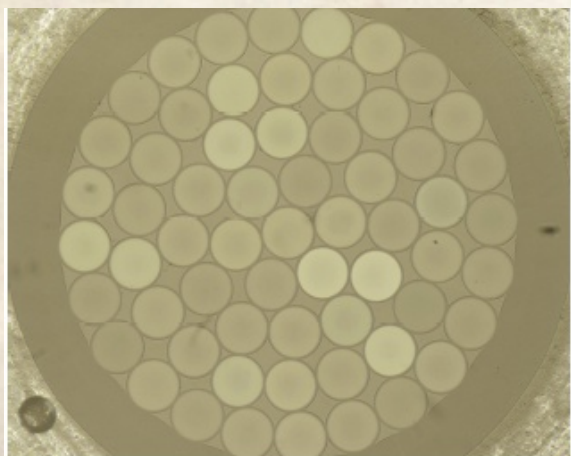
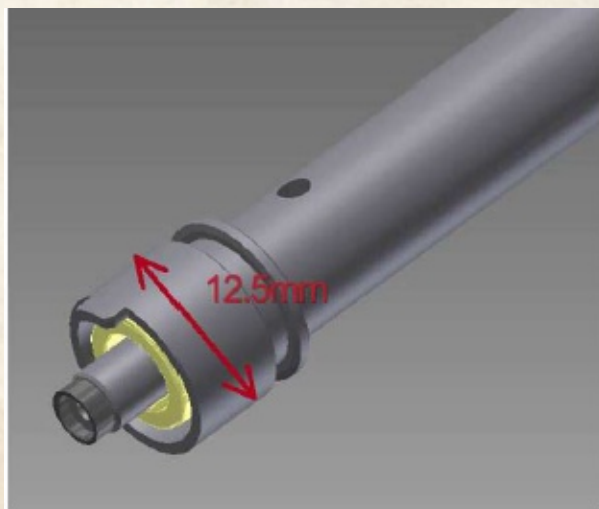
SAMI: Sydney-AAO Multi-object Integral-field spectrograph

3.9-m AAO (тот же, где выполнялся 2dF)

SAMI: 3400 галактик, 13 hexabundles (15" @61 fibersx1.6") <http://sami-survey.org/>

NESTOR: >30 000 галактик, 21 IFUs: 26" - 169 fibers, 22" - 127, 15" - 61

Внимание на разное окружение (поле, группы, скопления)

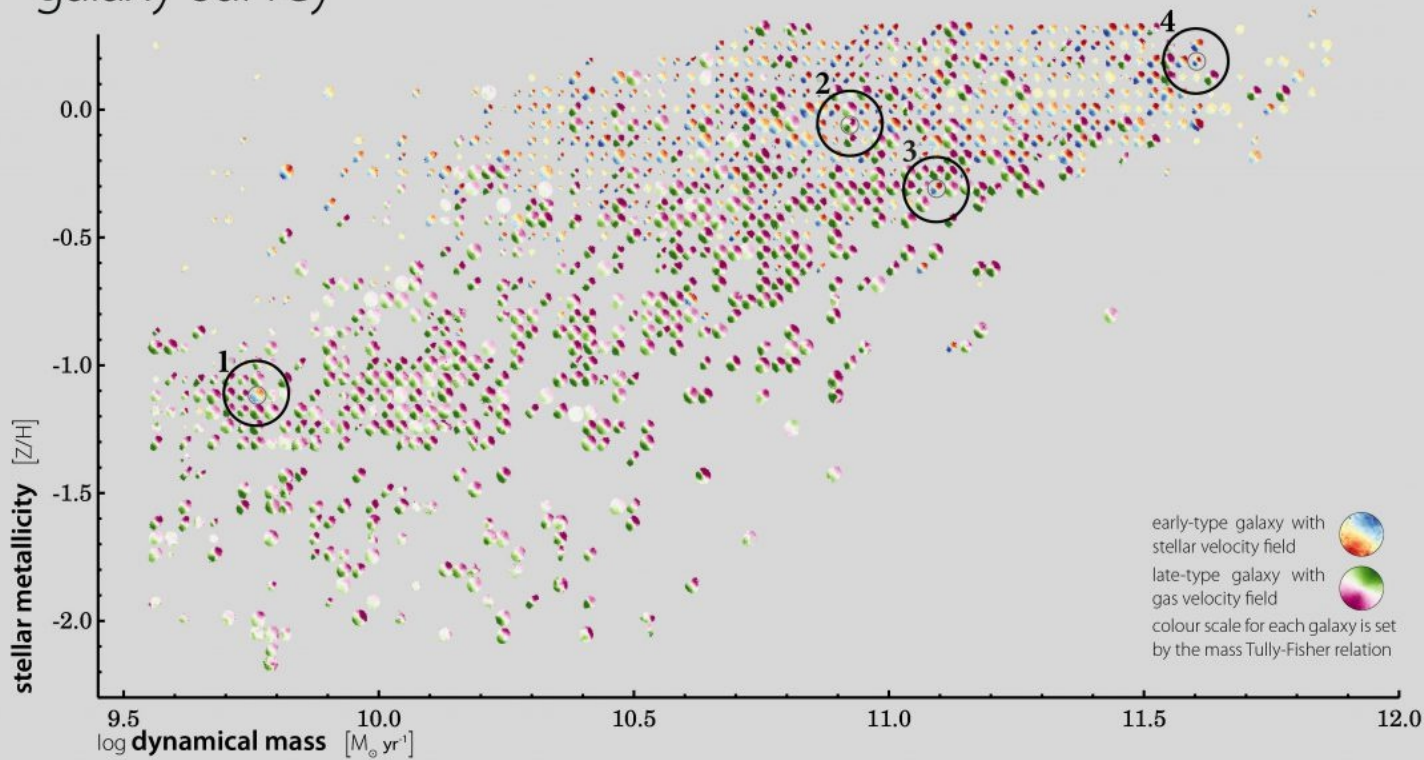


SAMI (2013-2018): dr1-dr3

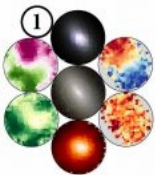


data release 2: absorption-line physics

sami-survey.org/abdr



1559 galaxies • $0.02 < z < 0.10$ • reduced spectral cubes • absorption-line maps • emission-line maps • ancillary data products



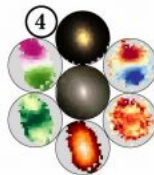
1 Disturbed Gas Disk in a Rotating Early-Type Dwarf
GAMA-69740 is a low-mass early-type galaxy with regular stellar rotation but without a dispersion dominated bulge. The H α emission shows a central co-rotating component, but also reveals an outer disturbed component with a different rotation angle.



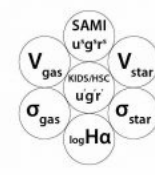
2 Asymmetric Velocity Field in a Barred Spiral Galaxy
GAMA-22887 is a prime example of how a central bar and spiral arms affect both the motions of stars and interstellar gas within galaxies; both the stellar and gas velocity maps show a high-degree of asymmetry. The H α emission reveals a region of recent star formation above the central bulge.



3 Polar Ring Galaxy
GAMA-570260 is an intriguing special case of stellar/gas rotational misalignment. The stellar disk rotates North-South, but is surrounded by an East-West ring of gas and dust forming stars. The polar ring is likely formed from gas accretion during a close passage of another galaxy, or from filamentary cold flows (Bryant et al. 2018).



4 Embedded Disk in a Massive Early-Type Galaxy
GAMA-56140 has a peculiar dispersion profile that points to an embedded disk. The ratio of V_{rot} and σ_{rot} first increases with radius, but at $R > R_c$ starts to decline. This radial kinematic transition hints towards a two-phase formation history, with an inner in-situ and outer accreted stellar component (Foster et al. 2018).



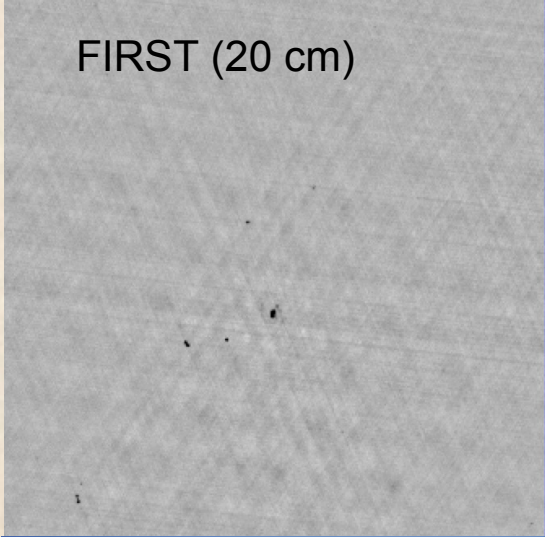
The SAMI Galaxy Survey is based on observations made at the Anglo-Australian Telescope. The Sydney-AAO Multi-object Integral field spectrograph (SAMI) was developed jointly by the University of Sydney and the Australian Astronomical Observatory. The SAMI input catalogue is based on data taken from the Sloan Digital Sky Survey, the GAMA Survey and the 9ST ATLAS Survey. The SAMI Galaxy Survey is supported by the Australian Research Council Centre of Excellence for All Sky Astrophysics in 3 Dimensions (ASTRO 3D), through project number CE170100013, the Australian Research Council Centre of Excellence for All-Sky Astrophysics (CAASTRO), through project number CE110001020, and other participating institutions. The SAMI Galaxy Survey website is <http://sami-survey.org/>. Galaxy colour images are from KIDS, the Kilo-Degree Survey Collaboration (<http://kids.strw.leidenuniv.nl/>), and HSC-SSP: the Hyper-Spectral-Cam Subaru Strategic Program (<https://hsc-release.mtk.nao.ac.jp/NAOJ/HSC-Collaboration>).

Poster by Jesse van de Sande

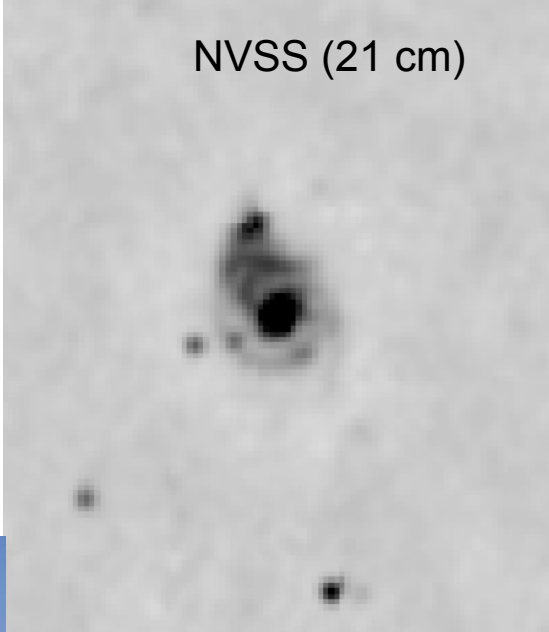
Радиообзоры неба (континуум)

- Началось еще с Кембриджского интерферометра (1963, 3C273, Лекция 7)
- Основные источники: радиогалактики и другие АЯГ, но галактики со звездообразованием то же излучают и в синхротроне и в тепловом радио (SNe)
- Агрегатор каталогов CATS: <https://www.sao.ru/cats/>
- 1993-2004 FIRST (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-cm): VLA, 1.5 GHz, 8", 25%sky (область SDSS, 946 000 источников)
- 1993-96 NVSS (NRAO VLA Sky Survey): VLA, 1.4 GHz, 45", 82% sky (DEC>-40)

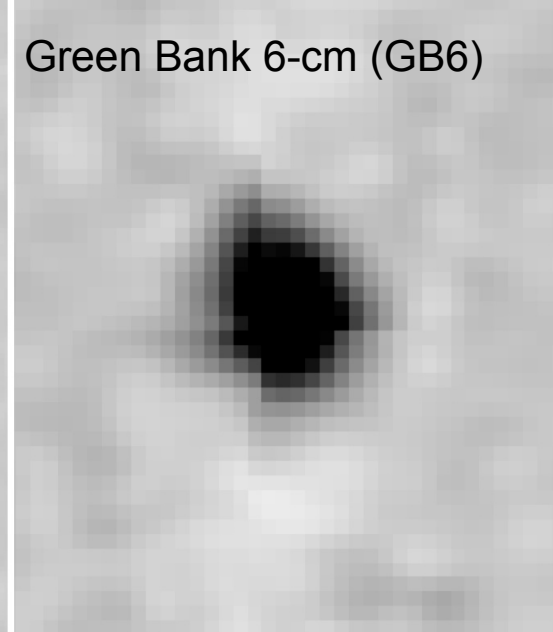
FIRST (20 cm)



NVSS (21 cm)

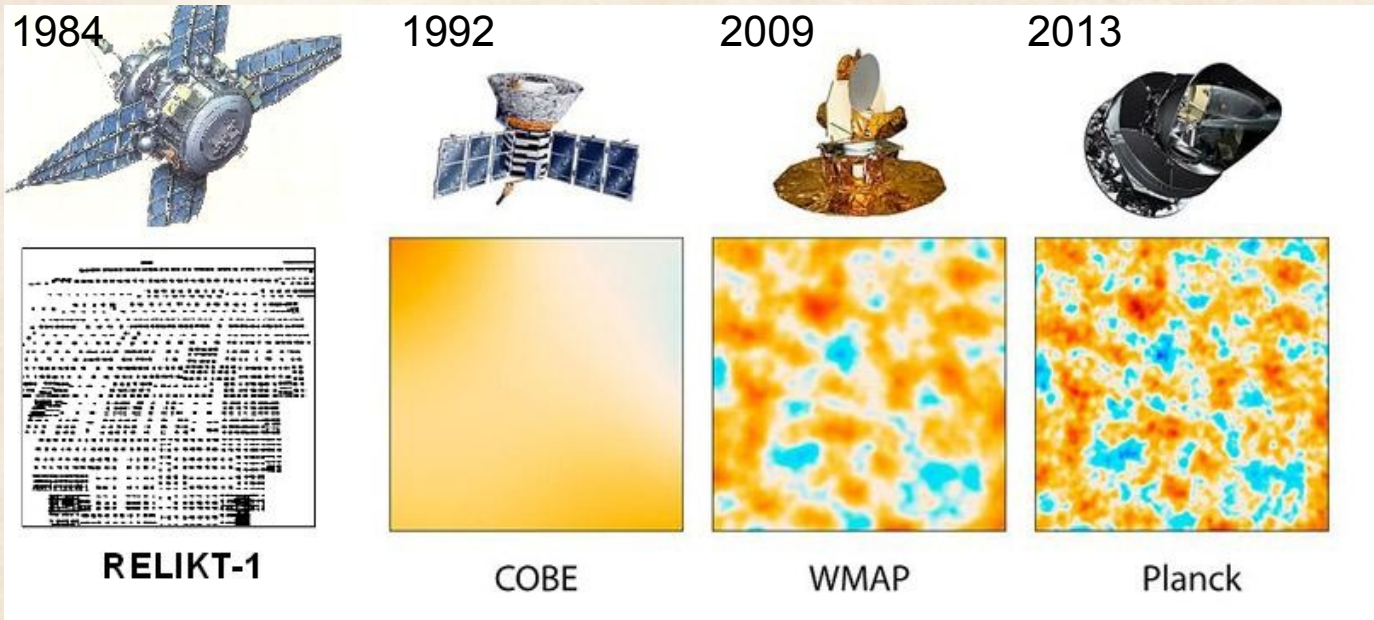


Green Bank 6-cm (GB6)



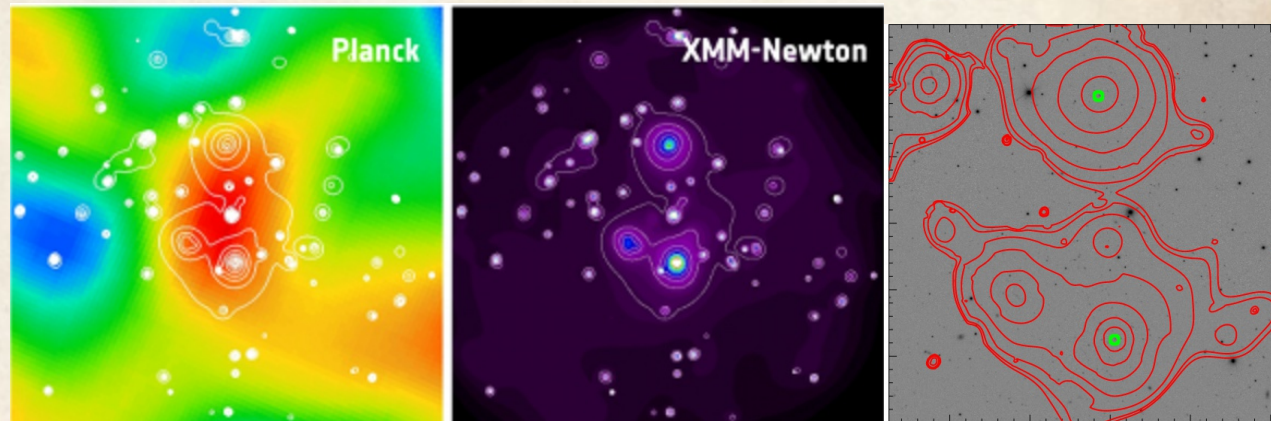
<https://skyview.gsfc.nasa.gov/>

Радиообзоры неба (мм - субмм)



Planck
300 μm – 11.1 mm / 27-857 GHz
Beam=5-31'

Внегалактика: не только реликтовый фон, но и эффект Сюняева Зельдовича – обнаружение новых массивных скоплений галактик до $z \sim 1$ (лекция 8)

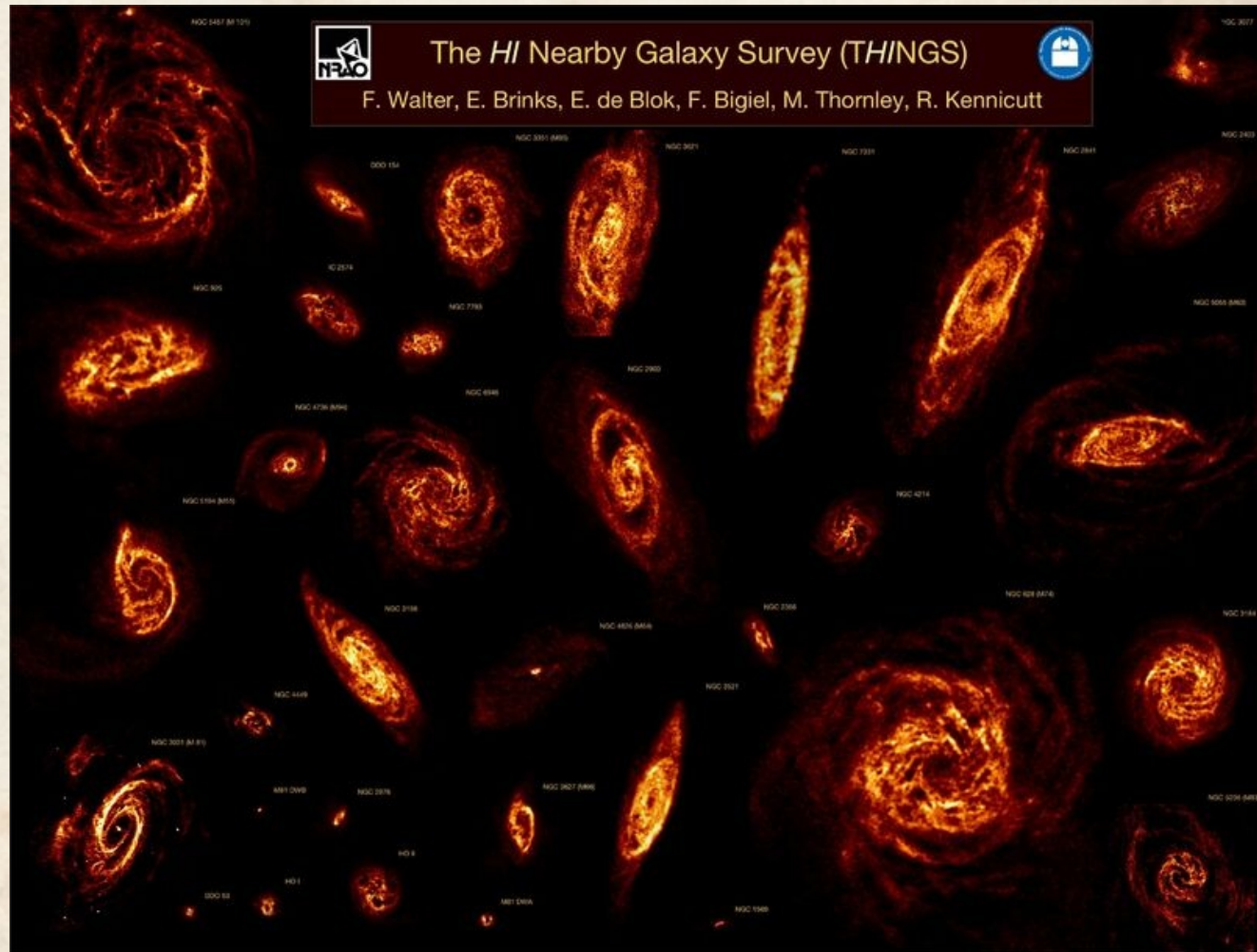


Тройное скопление PLCK G214.6+37.0 (Ade + 2013)

Радиобзоры HI (21 см)

Построение карт (или интегральные профили) HI по спискам ранее отобранных галактик и их окрестностей (доступны кубы данных и карты для собственного анализа)

- VLA/THINGS (34)
 - WSRT/WISP (409)
 - FAST/FEASTS (116)
- (в скобках – число объектов)
Beam~5-20"



Слепые обзоры

Просмотр выбранной области неба в диапазоне частот красномещенных линии 21 см (список ранних обзоров см. Mayer + 2004)

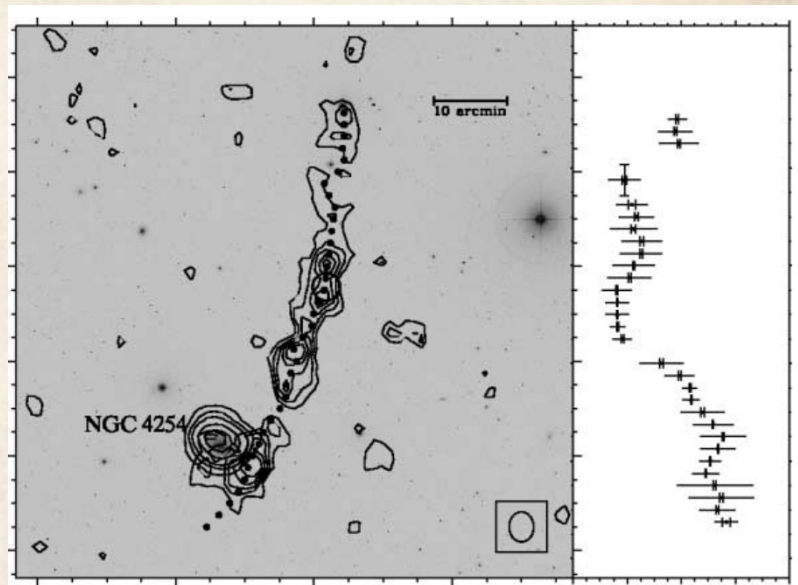
HIPASS (HI Parkes All Sky Survey, 64 м, 1997-2002): $\sim 71\%$ sky, beam=14', >5000 галактик, $v=-1280..+12700$ км/с ($z<0.04$)

ALFALFA (The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey, 300 м, 2005-2011), $\sim 17\%$ sky, beam=3.5', >31000 источников, $v=-2000..+18000$ км/с ($z<0.06$)

WALLABY (Widefield ASKAP L-band Legacy All-sky Blind survey, 36x12 м), $\sim 75\%$ sky, DEC $<+30$, beam=30", $\sim 500\,000$ источников, $z<0.26$



ALFALFA: предел на число “темных галактик” $<2\%$ HI не отождествляется в оптике, часто это – приливные структуры в скоплениях (Virgo)

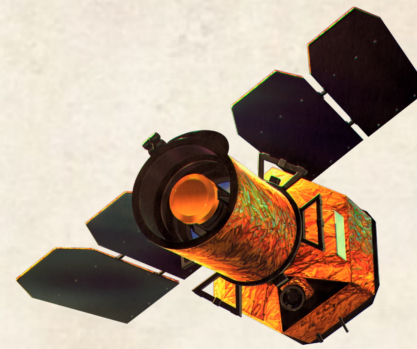


Приливной хвост из NGC 4254, ~ 250 кпк (Haynes + 2007)

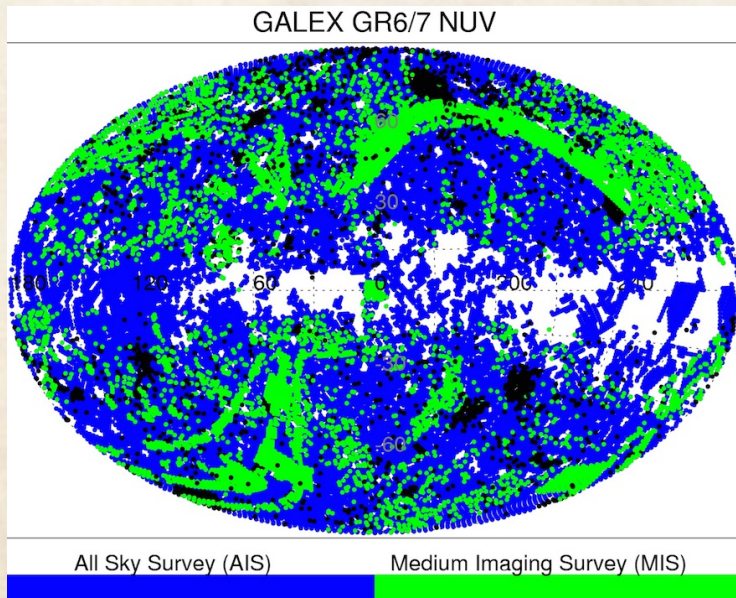
Обзоры из космоса: УФ (GALEX)

The Galaxy Evolution Explorer (2003-09)

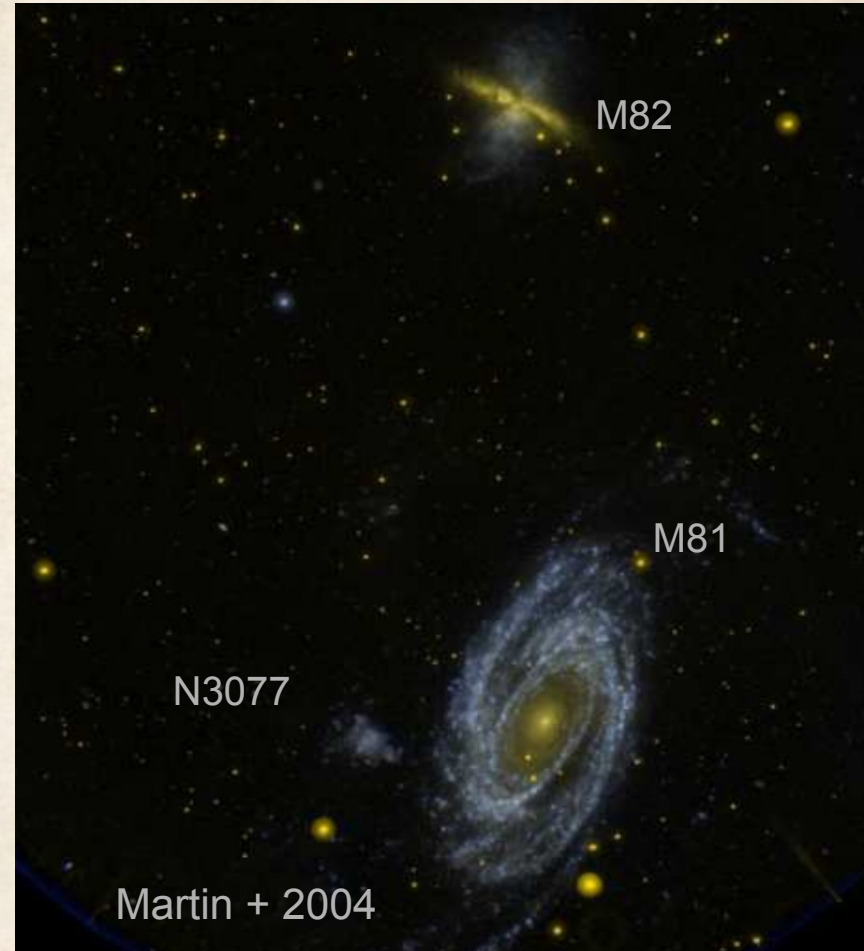
Всё небо + отдельно глубокие наблюдения площадок и близких



FUV 1350-1750 Å
NUV 1750-2750 Å



SFR, звездное население, поглощение (лекция 6)



Обзоры из космоса: ИК (IRAS, Spitzer, WISE...)

(Лекция 6)

Обзоры всего неба:

IRAS (1983, 57 см): 12-120 μm , 30"-2'
250 000 источников, LIRG, ULIRG...

AKARI (2006, 67 см): 2-180 μm , 30-50"

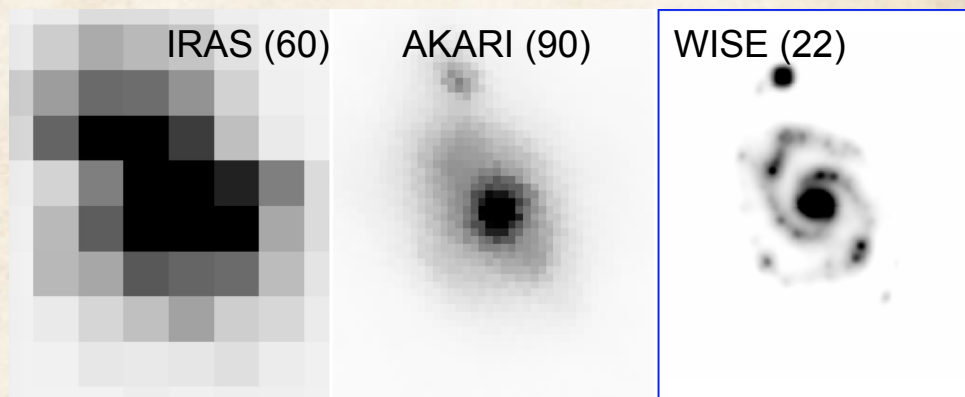
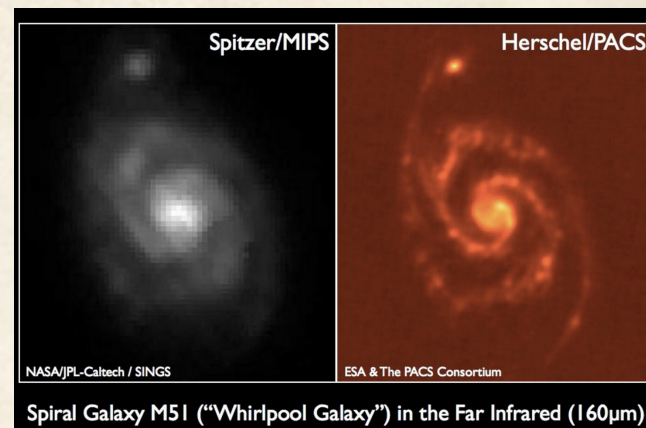
WISE (2009, 40 см): 3 -22 μm , 6-12"
+**COBE**, **WMAP**, **Plank** (см выше)

Наведения:

Spitzer (2003, 0.85 м): 3.6-160 μm

Herschel (2009, 3.5 м): 55-670 μm

JWST (2021, 6.5 м): 0.6-28 μm



Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S4G):

2817 галактик, каталог модельных параметров, фотометрическая
2D декомпозиция (лекция 2), данные 3D спектроскопии (выборочно)

<https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/S4G/overview.html>

Рентгеновские обзоры неба: ROSAT, eROSITA

Основные внегалактические источники:

- Горячий газ: группы и скопления (лекция 8)
- Горячий газ: галактический ветер (лекция 5)
- Активные ядра (лекция 7)

ROSAT (Röntgensatellit, 1990), 0.1-2 кэВ, 5",
>200 000 источников

Спектр-РГ/eROSITA(0.2-8кэВ, 30") несколько млн. источников
/ART-XC им М.Н. Павлинского (4-30 кэВ,45")

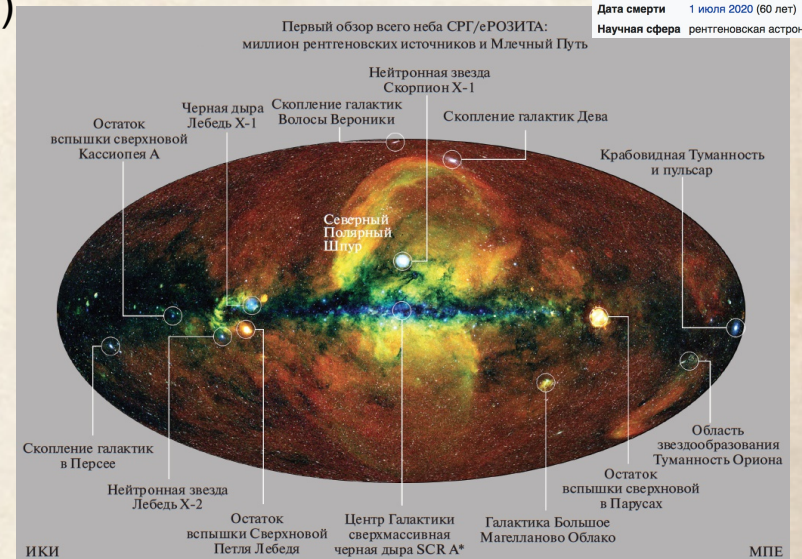
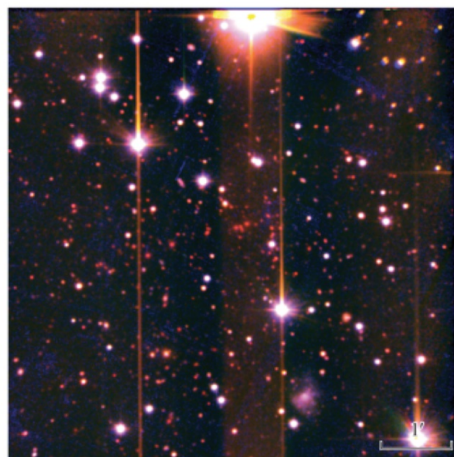
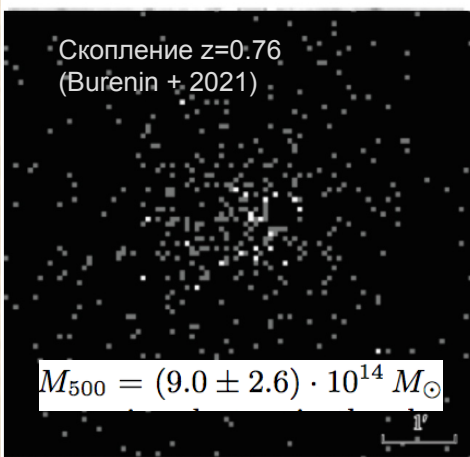
Особенность наблюдений: счет фотонов с учётом энергии (т.е. временное и спектральное разрешение, если хватает сигнала)



Михаил Николаевич Павлинский

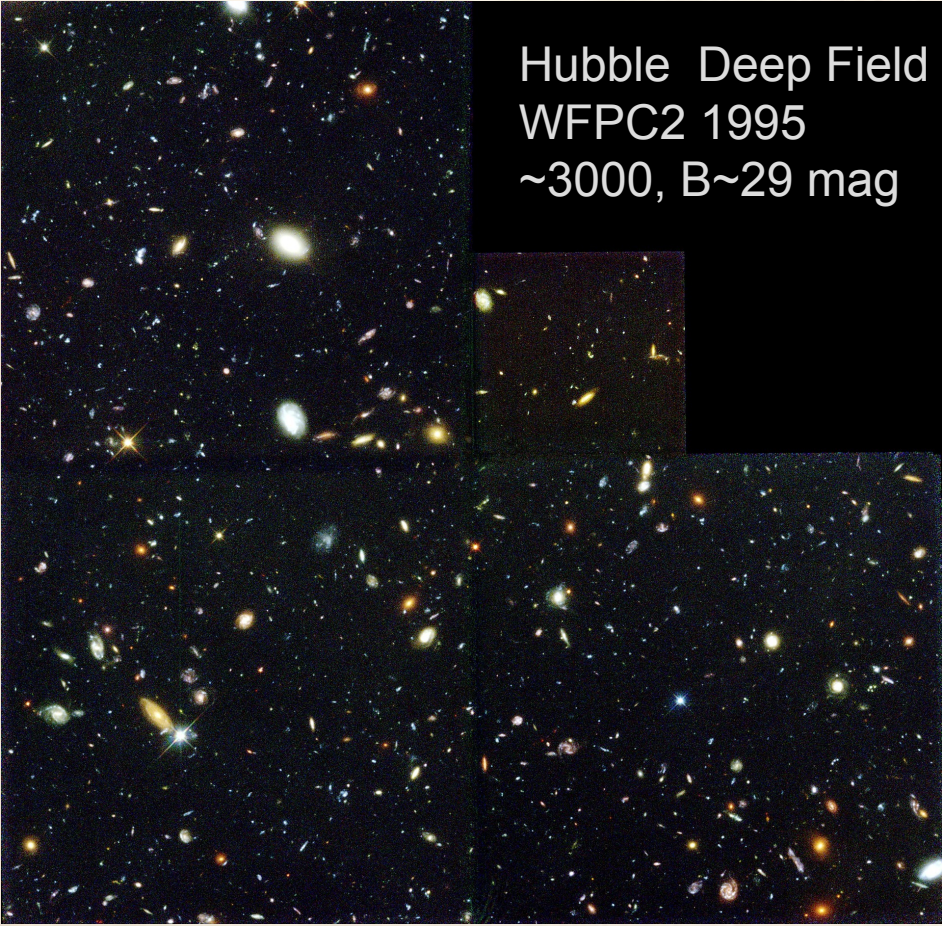


Дата рождения 8 декабря 1959
Дата смерти 1 июля 2020 (60 лет)
Научная сфера рентгеновая астрономия



Тематический номер ПАЖ 2022 о Спектр-РГ:
http://hea.iki.rssi.ru/pazh/ru/Pisma05_2022_SRG-ART-XC.pdf

Хаббловские глубокие поля (t=10-11 д.)



Hubble Deep Field
WFPC2 1995
~3000, B~29 mag



Hubble Ultra Deep Field
ACS 2003
~10 000, B~30 mag

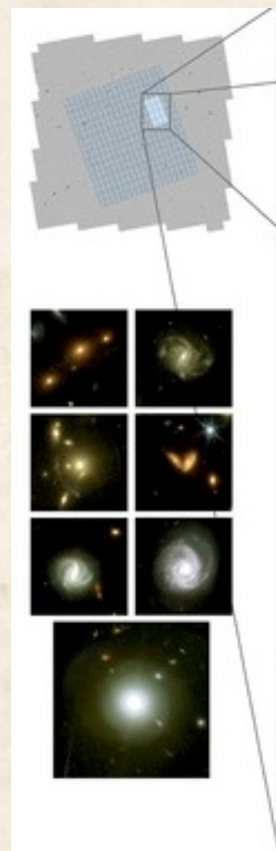
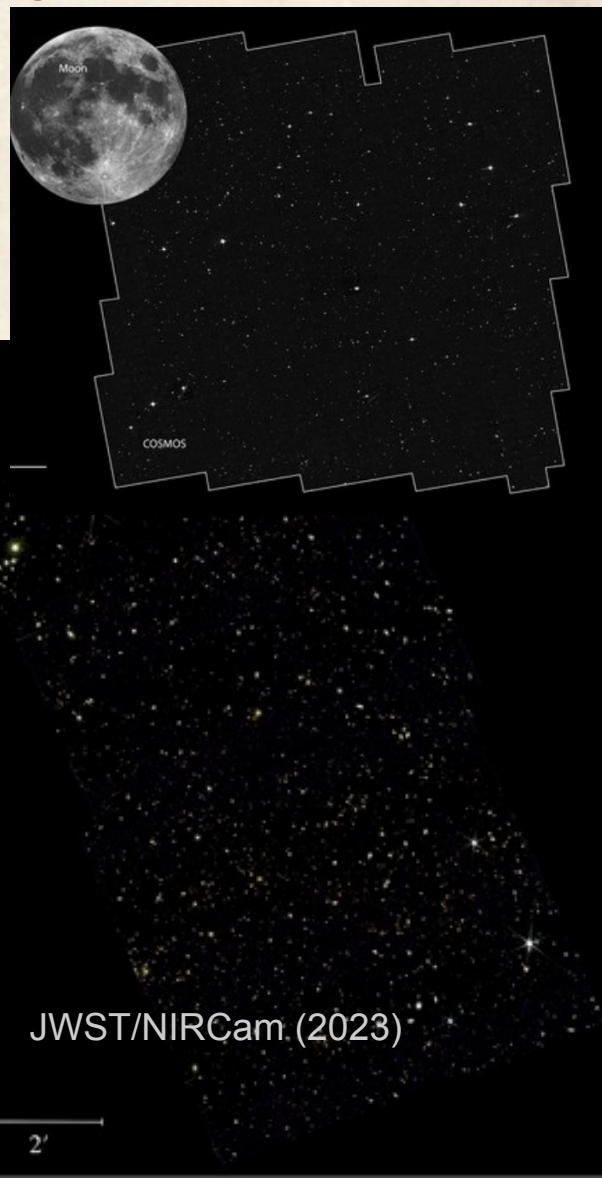
Статистика галактик,
многоволновые наблюдения...

Cosmic Evolution Survey (COSMOS): 2deg² HST

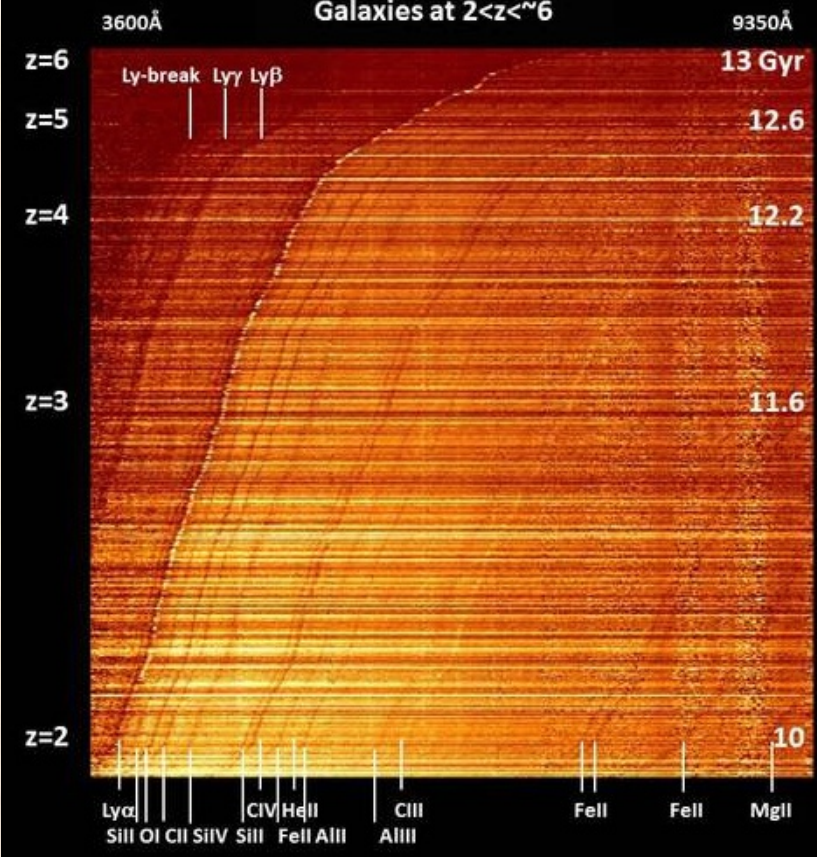
Наблюдения от рентгена до оптики

~1 000 000 объектов с фотометрией в 30 фильтрах

>35 000 спектральных z



VIMOS Ultra Deep Survey
Galaxies at $2 < z < \sim 6$

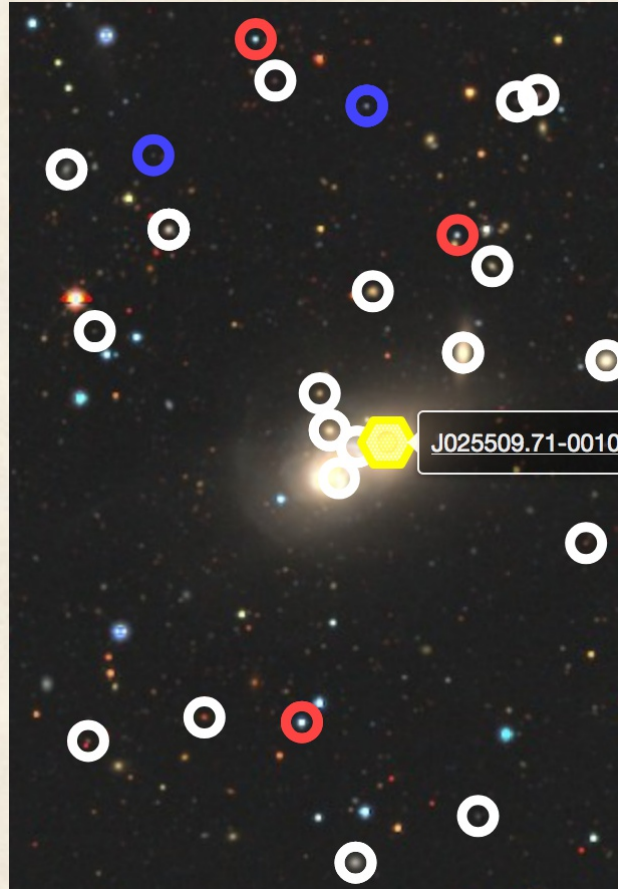


DESI Legacy survey interactive viewer (NGC 1142)

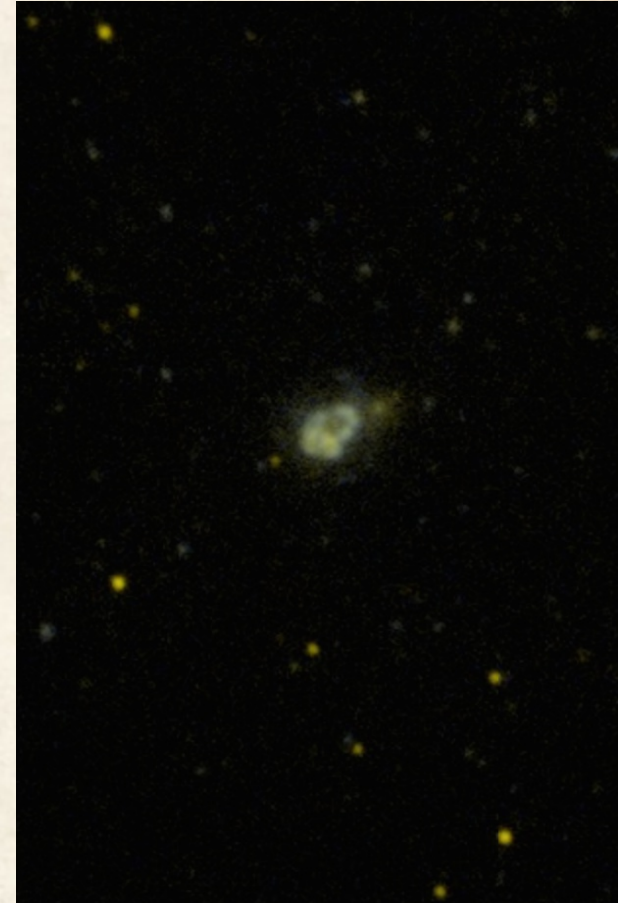
DESI riz



+ MaNGA+SDSS



Galex FUV/NUV



<https://www.legacysurvey.org/viewer>