

А.В. Моисеев, САО РАН

Методы исследования галактик.

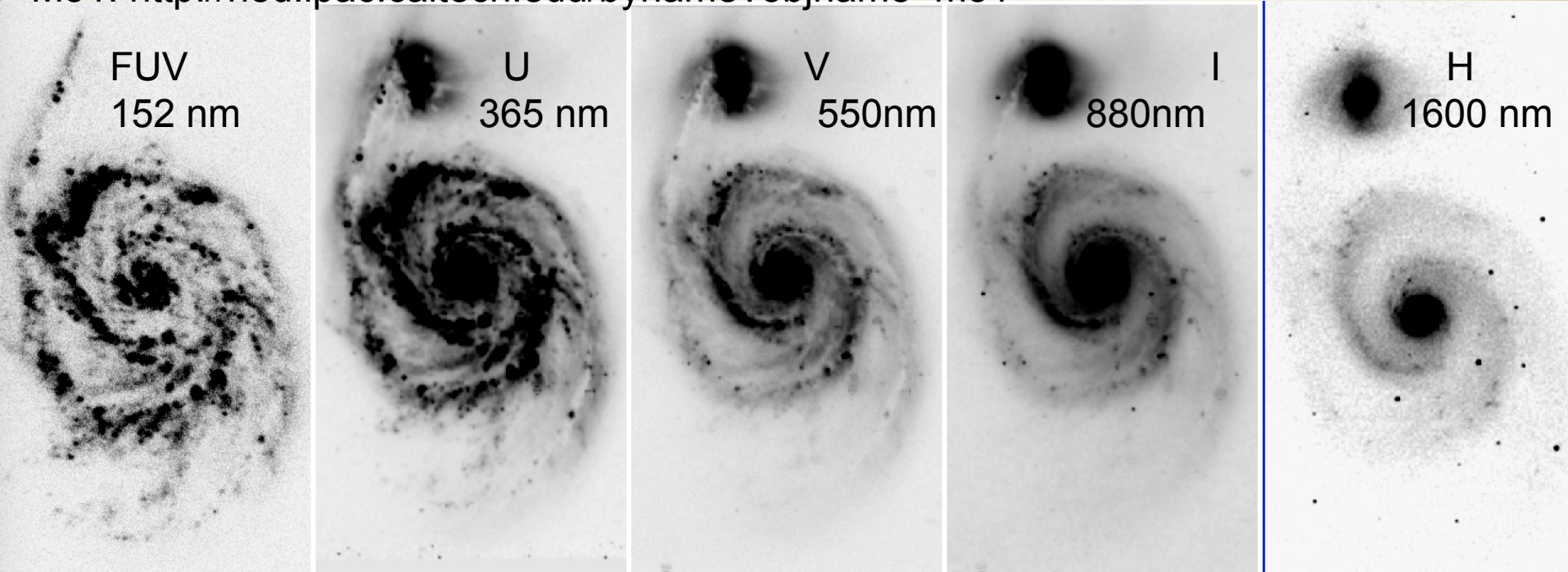
Лекция IV.

Параметры звездного населения галактик: фотометрия и спектроскопия. Пыль в галактиках.

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

Изменение внешнего вида с фотометрической полосой

M51: <http://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=m51>



При увеличении длины волны фильтра от УФ до ближнего ИК (в rest-frame):

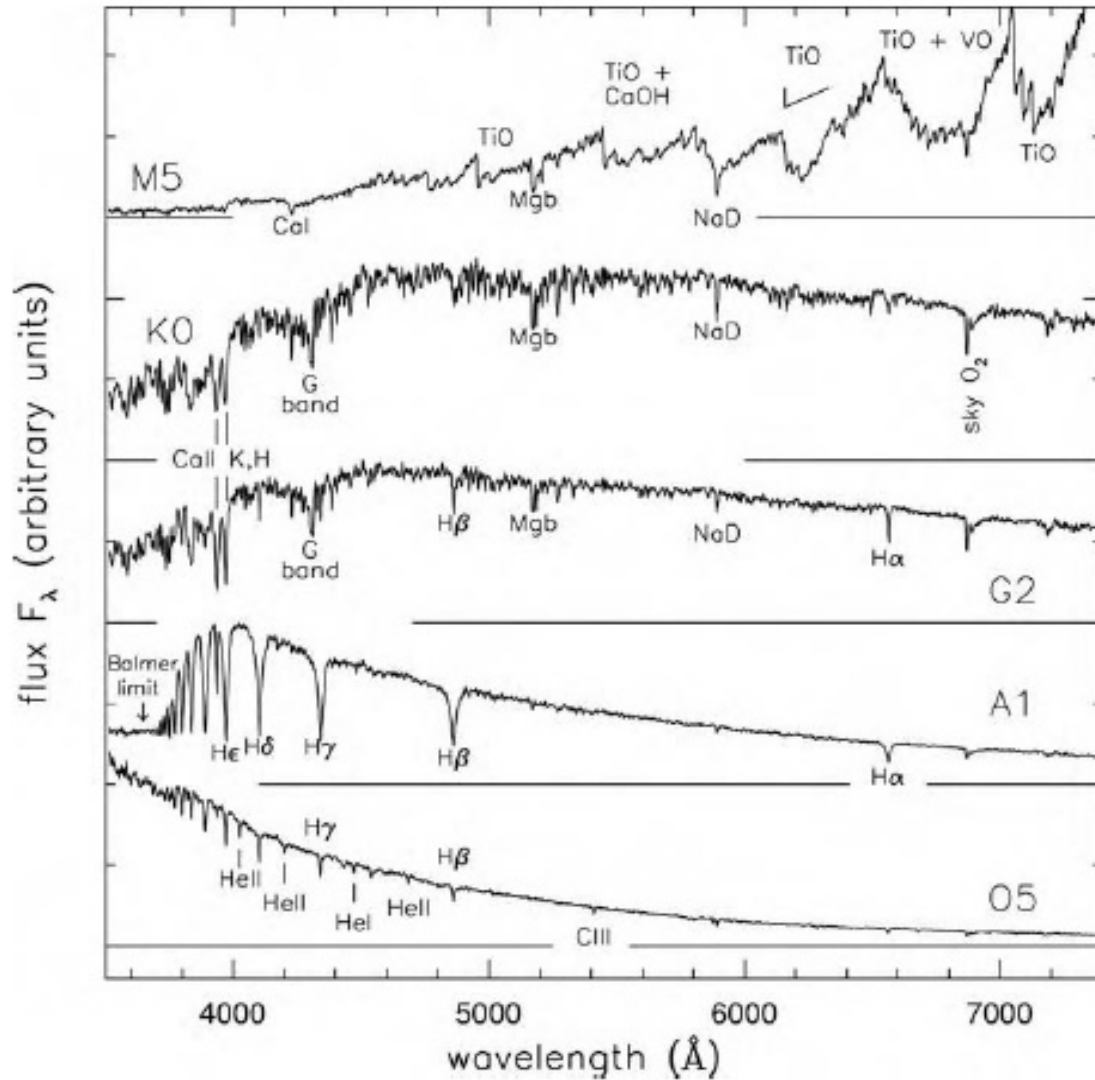
- Уменьшается вклад молодых звезд
- Уменьшается пылевое поглощение

Исключения (локальные):

- Излучение в эмиссионных линиях газа (молодые звезды в $H\alpha$, лекция 3)
- Молодые красные гиганты (но вклад меньше, чем у звезд ГП)

С переходом в средний и дальний ИК – начинаем видеть эмиссию пыли

Популяционный синтез: суммарный спектр звезд



Суммарный спектр без учета кинематики:

$$S_{\lambda}(t, Z) = \int_{M_{\text{low}}}^{M_{\text{up}}} S_{\lambda}(M, t, Z) \Phi(t, M) dM$$

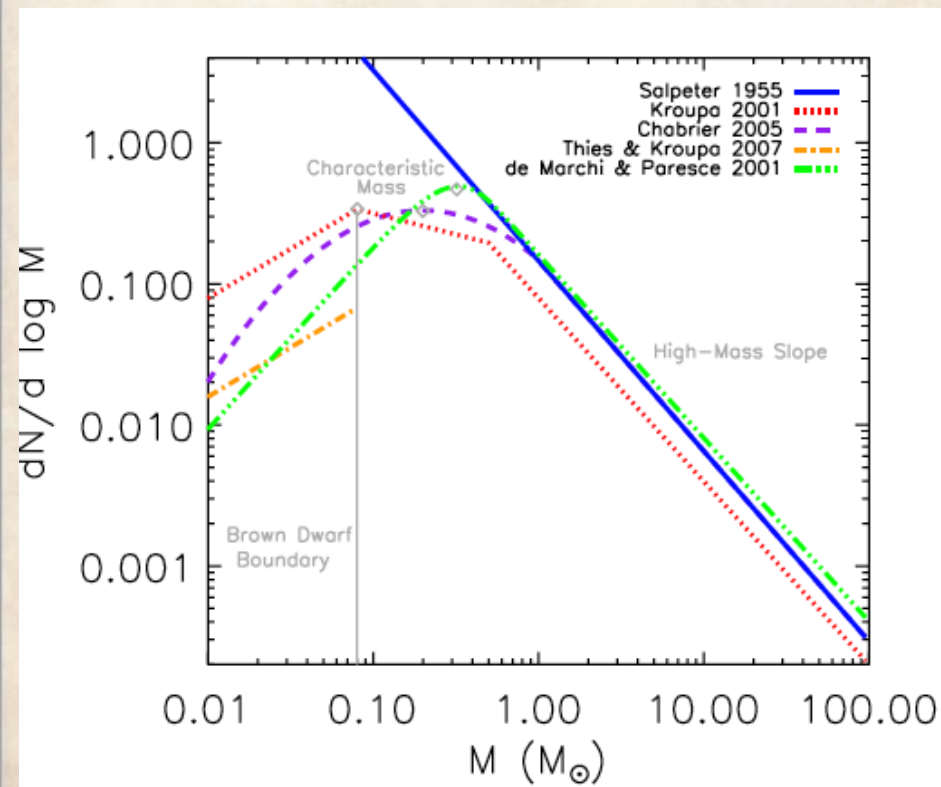
распределение энергии звезды
(SED, spectral energy distribution)

Функция масс

Начальная функция масс

$\Phi(t=0, m) \sim m^{-\alpha}$, Salpeter (1955): $\alpha=2.35$ – для $m > 1$ хорошо согласуется с современными оценками

Но форма НФМ и пределы масс в других галактиках – могут зависеть от параметров газовых облаков (T, Z, \dots)



Масса галактики определяется звездами малой массы:

$$M \sim \int_{m_{low}}^{m_{up}} m m^{-\alpha} dm = \frac{m^{2-\alpha}}{2-\alpha} \Big|_{m_{low}}^{m_{up}} \approx \frac{m_{low}^{2-\alpha}}{\alpha-2}$$

$$(\alpha > 2, m_{low} < 0.1 M_{\odot}, m_{up} \approx 100 M_{\odot})$$

А интегральная светимость (для ГП) – наоборот, **самыми массивными**

$$L_{MS} \sim m^3$$

$$L \sim \int_{m_{low}}^{m_2} m^3 m^{-\alpha} dm = \frac{m^{4-\alpha}}{4-\alpha} \Big|_{m_{low}}^{m_{up}} \approx \frac{m_{up}^{4-\alpha}}{4-\alpha}$$

Offner + 2014

Популяционный и эволюционный синтез, SSP

Популяционный синтез: наблюдаемое распределение энергии представляем суммой спектров разной M, t, Z

$$S_{\lambda}(t, Z) = \int_{M_{\text{low}}}^{M_{\text{up}}} S_{\lambda}(M, t, Z) \Phi(t, M) dM$$

Условная “сходность спектров” :

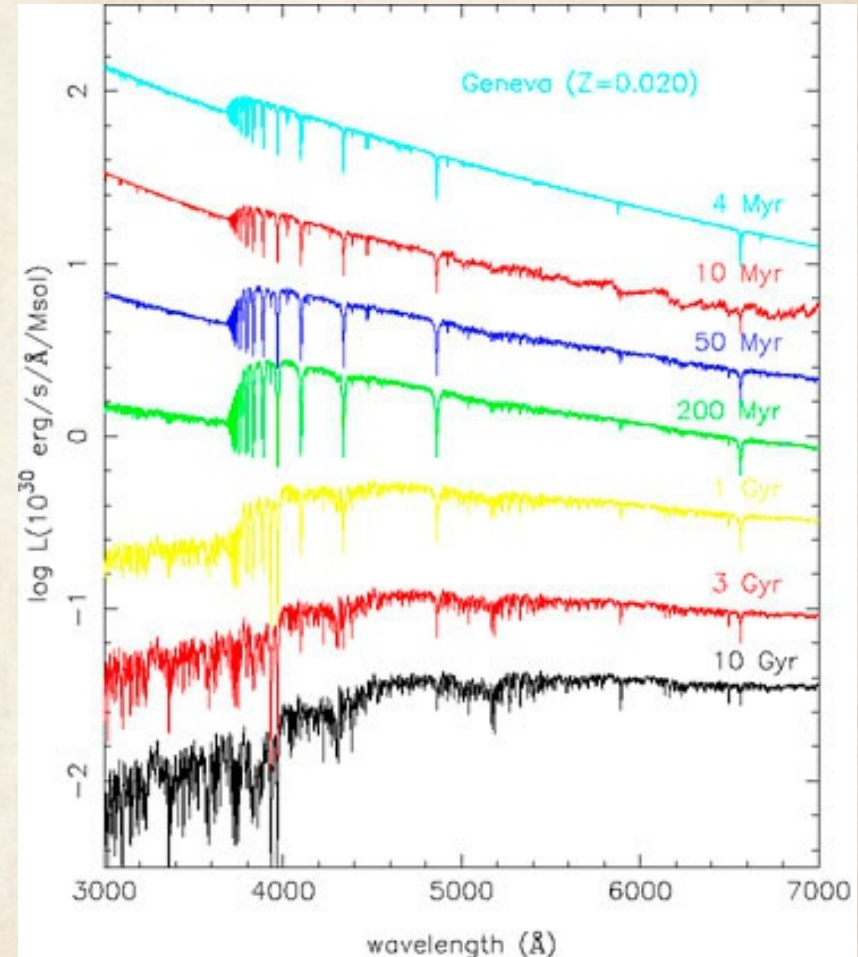
- E – галактики ~ звёзды KII-KV
- S – галактики ~ звёзды AF+K
- Irr – галактики ~ звёзды OB+K

Эволюционный синтез (моделирование):

использование эволюционных треков, учёт ионизации газа, расчёт на разные эпохи с учетом изменения темпа 3σ :

$$\text{SFR}(t) = dM/dt \sim \exp(-t/\tau)$$

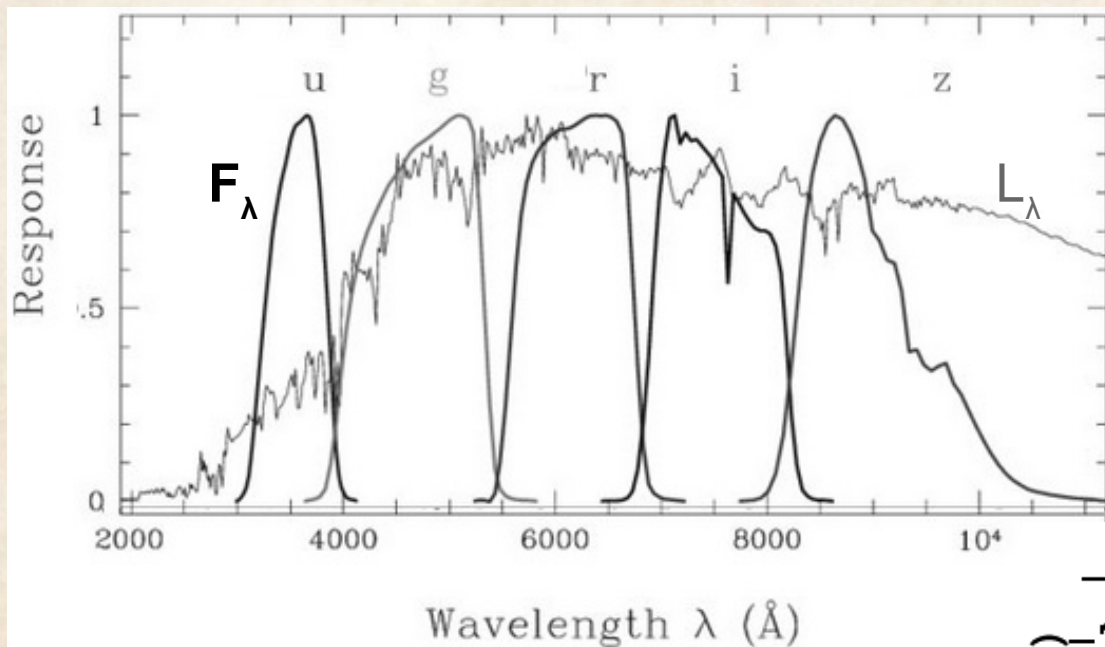
Наиболее часто применяется предположение о единственной популяции SSP (single stellar populations) – звёзды сформировались квазиодновременно (относительно времени жизни системы) и дальше эволюционируют



Популярные коды: PEGASE, Starburst99

González Delgado +2005

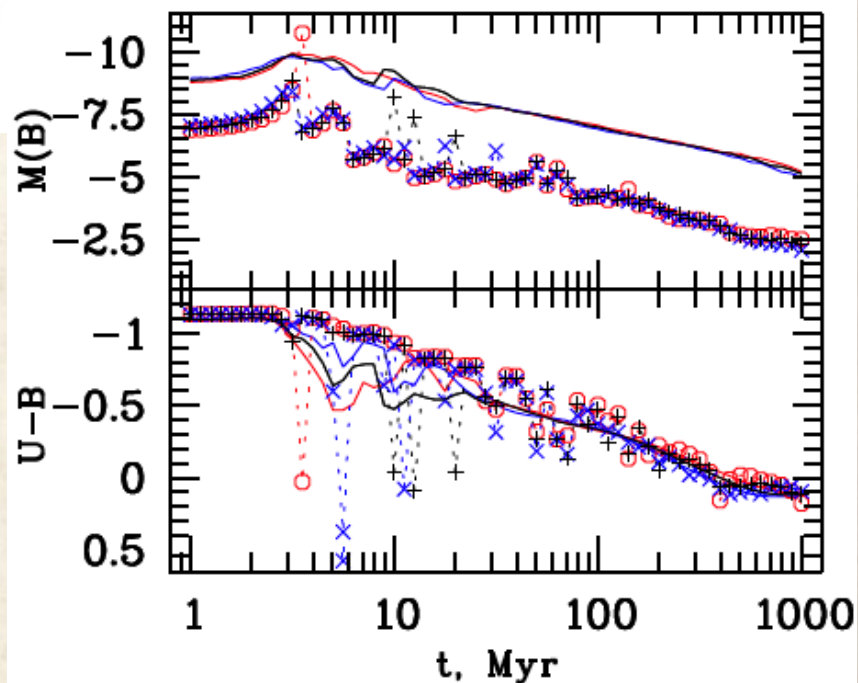
Переход от модельного спектра к зв. величине



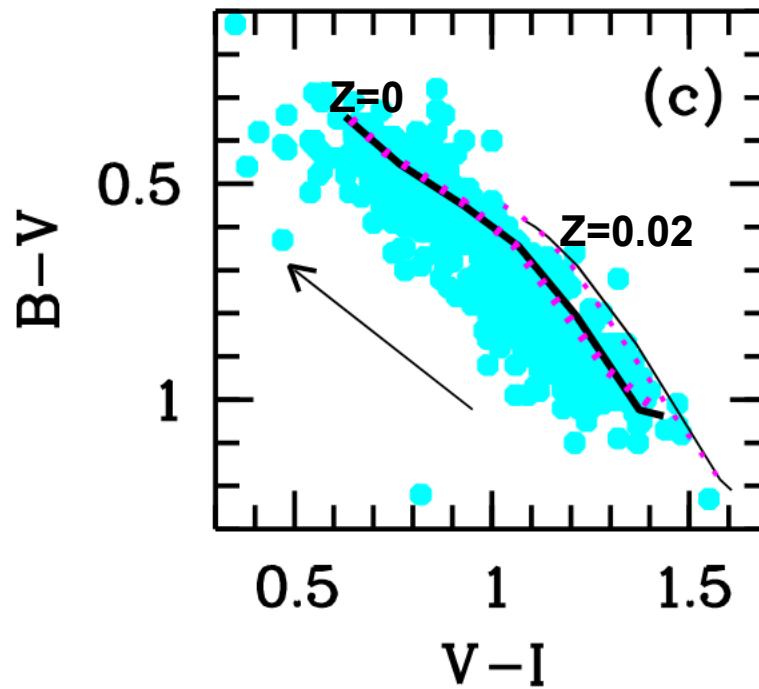
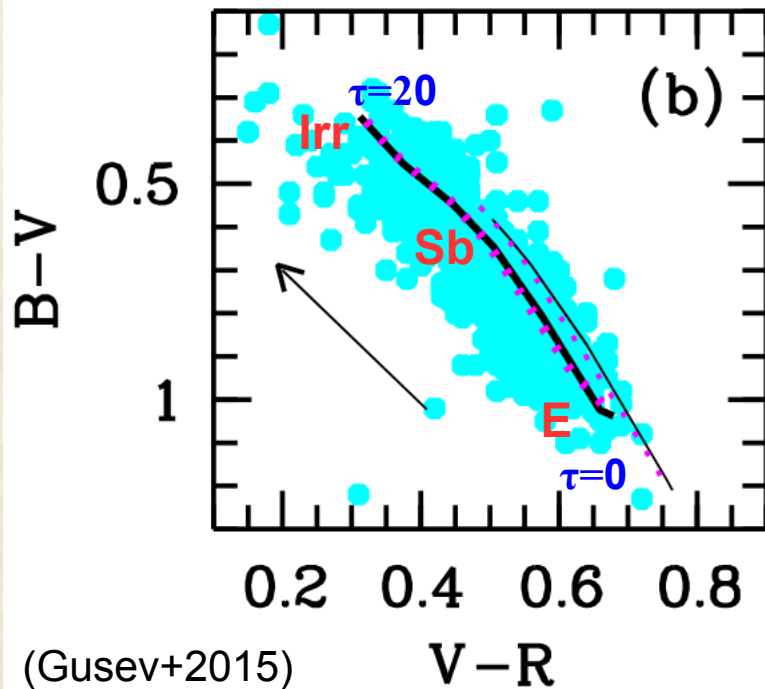
$$mag = -2.5 \lg \int L_\lambda(\lambda) F(\lambda) d\lambda + const$$

const – задается
фотометрической
системой

Эволюционная последовательность
областей $30 \sim 10^4$ Мо для разных Z и
разных вариантов заселенности НФМ в
моделях SSP (Гусев + 2024)



“Нормальная последовательность цветов”



В среднем распределение объясняется при $t=10-13$ Gyr и различных параметрах длительности вспышки ($\tau=0$ – одновременное рождение, звездные скопления и E-галактики, $\tau>10$ – Irr галактики)

Вырождение “возраст-металличность”: и t , и Z и пыль одинаково сдвигают точки

Одинаковые цвета у старой низкометалличной и молодой богатой металлами галактик (при низкой Z – больше T при той же L + слабее линии металлов в голубой части)

Оценка звездой массы по фотометрии

Используя эволюционный синтез рассчитываются модели звездных систем, описывающие наблюдаемый набор цветовых характеристик галактики.

Зависимость от принятой НФМ, истории ЗО (пассивная эволюция, продолжающаяся вспышка), вклада пылевого поглощения.

На практике для “стандартного населения” работают простое соотношения:

$$M^* = (M/L)_g L_g$$

$$M/L_g = F(g-r)$$

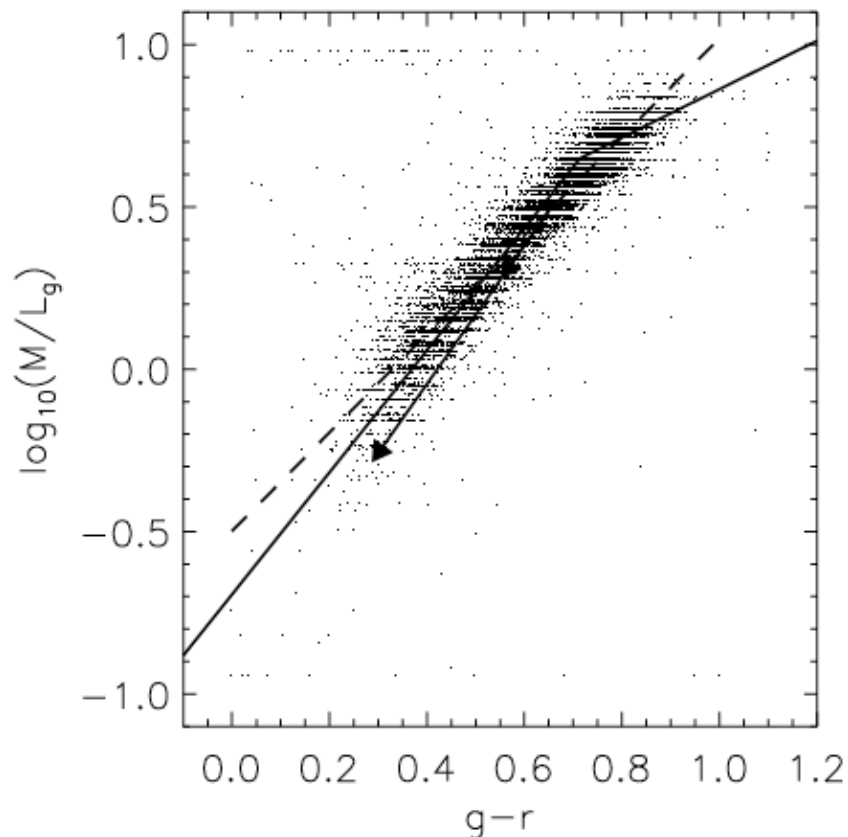
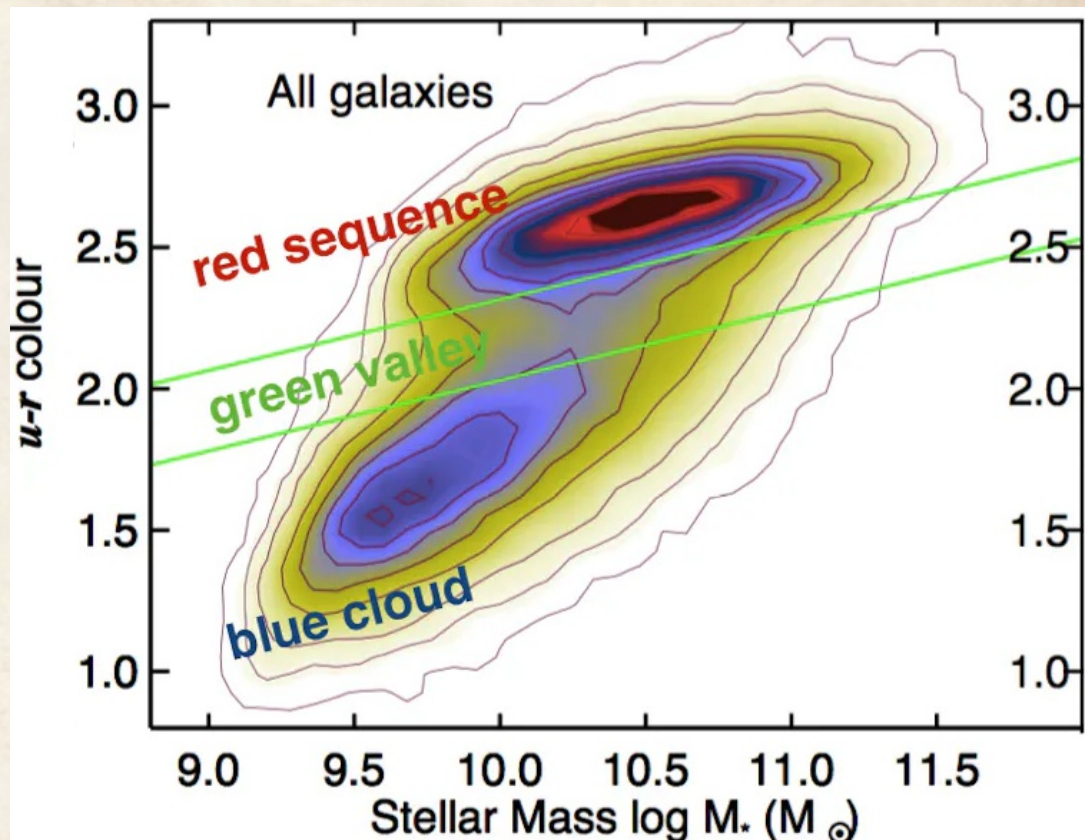
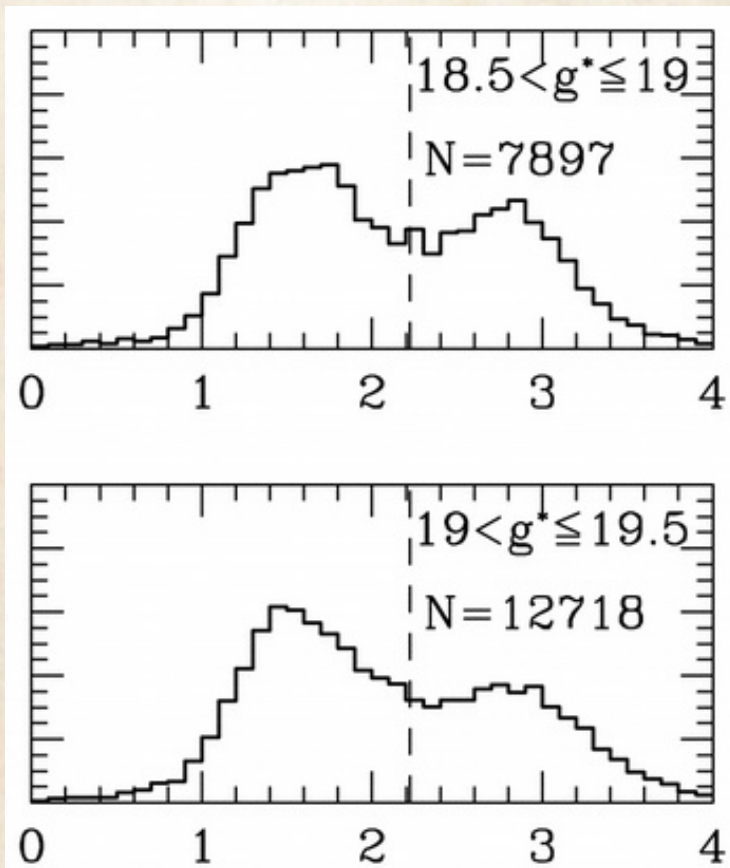


FIG. 6.—Our g -band stellar M/L ratio estimate (from the maximum-likelihood fit to the galaxy SED) against $g-r$ color for the g -band-selected sample of 11,848 galaxies. The dashed line is the biweight least-squares fit to the data. The solid line is a rough fit to the relationship in Fig. 19 of Kauffmann et al. (2003a), accounting for the 0.15 dex offset between a Kennicutt IMF and our diet Salpeter IMF. In addition, we transform

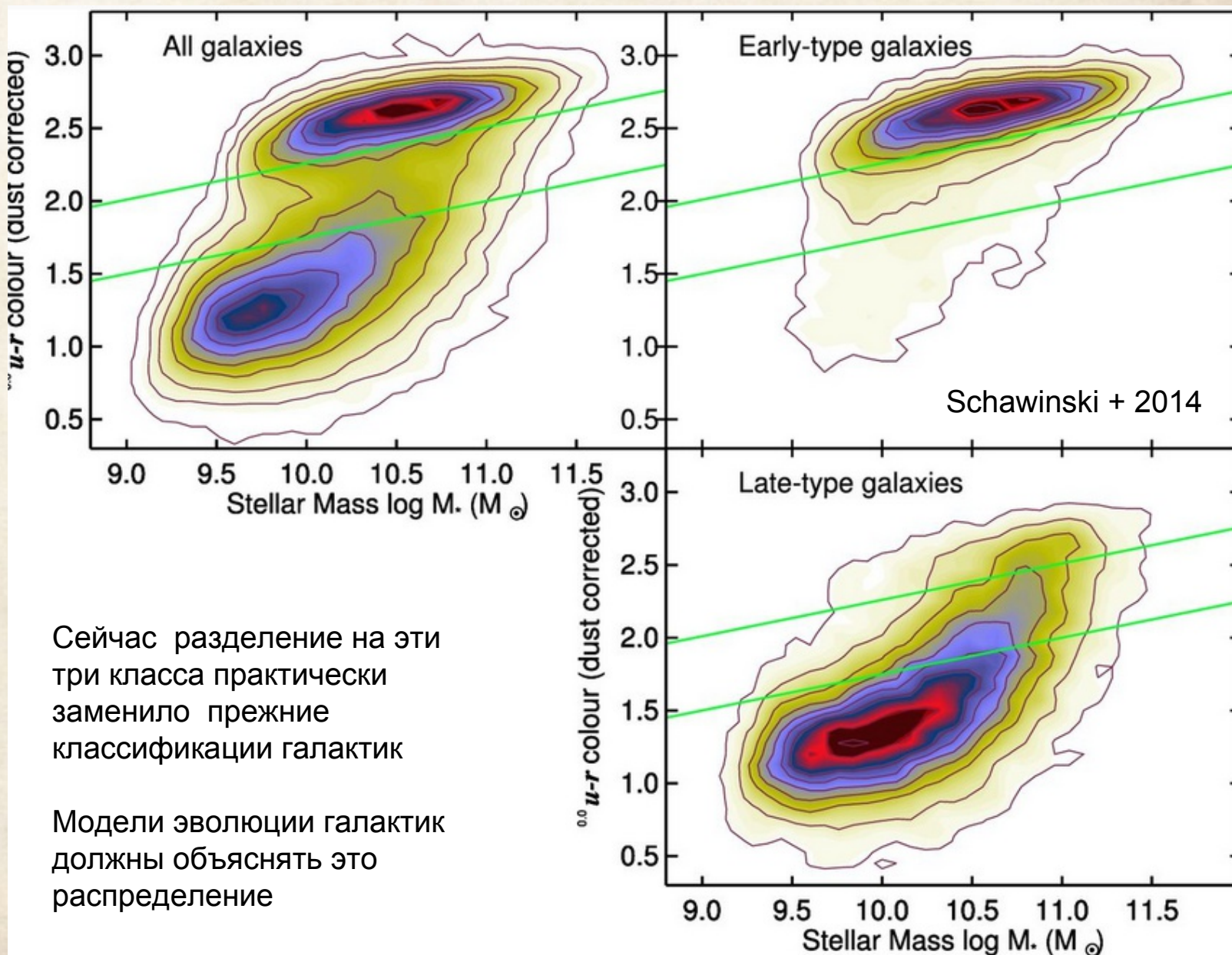
Bell + 2003

Бимодальность распределения галактик по цветам

~150 000 SDSS gal (Strateva + 2001)



Красная последовательность, голубое облако, зелёная долина.



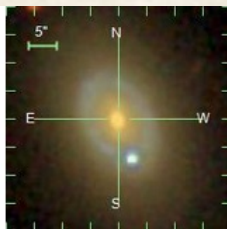
Сейчас разделение на эти три класса практически заменило прежние классификации галактик

Модели эволюции галактик должны объяснять это распределение

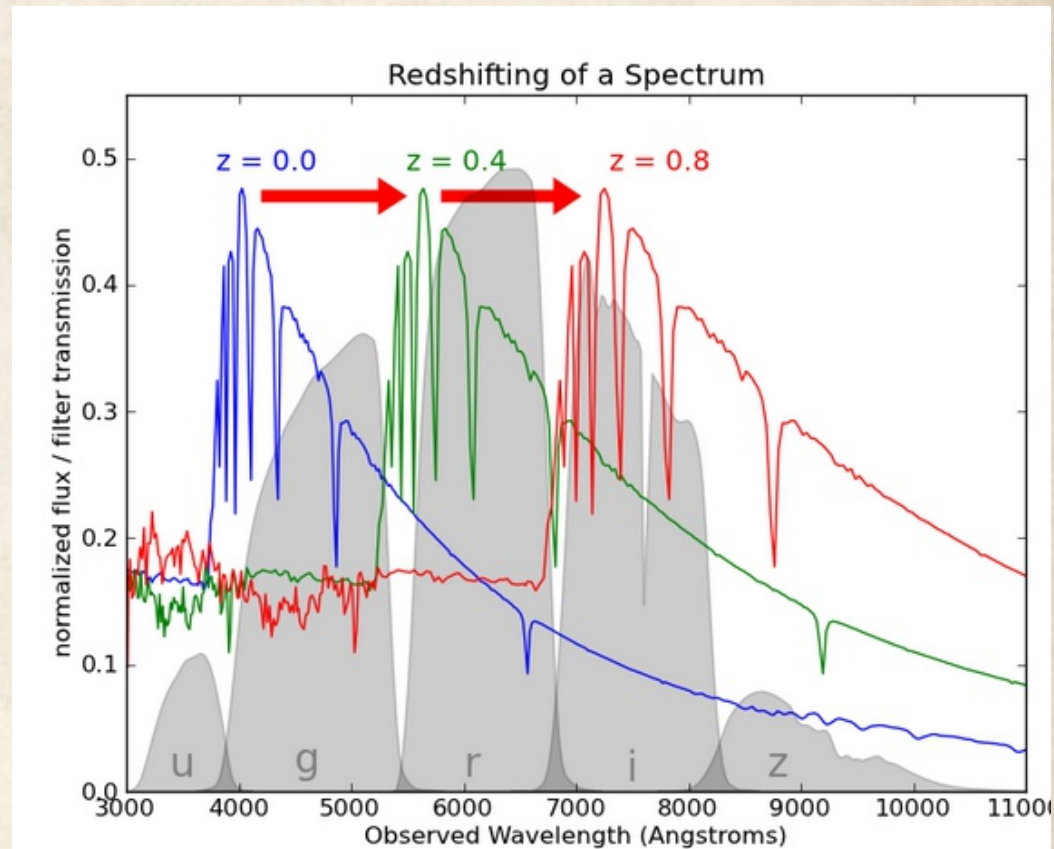
Фотометрические красные смещения

Наличие статистической связи между потоками в разных фильтрах позволяет проводить оценку красных смещений по наблюдаемым цветам:

- прямое сравнение наблюдений с цветами галактик с известным z
- Использование “синтетических цветов”, рассчитанных по модельным SED с учётом K -поправки (изменение спектрального диапазона с z).
- Применение методов машинного обучения



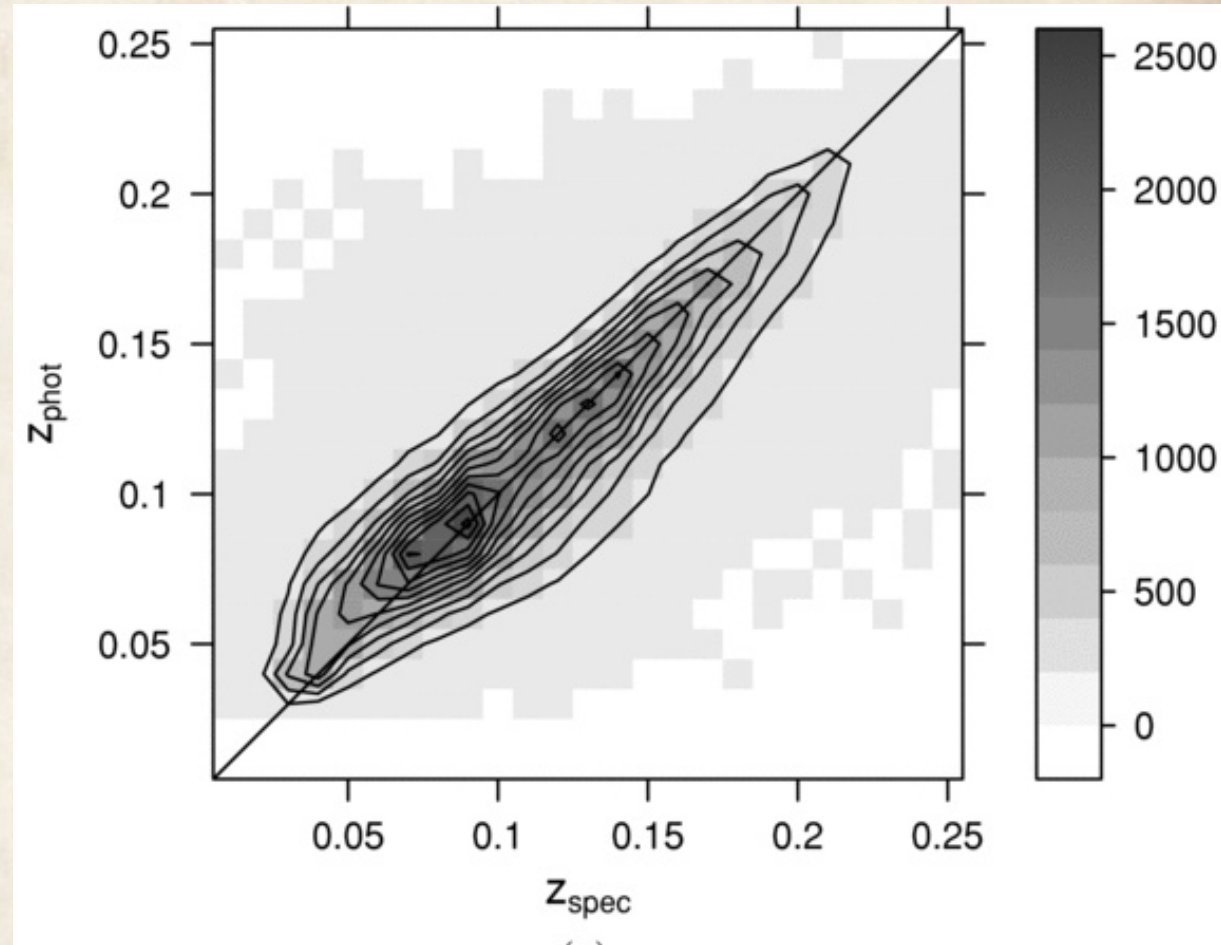
Magnitudes		Magnitude Uncertainties	
u	16.406	err_u	0.009
g	14.518	err_g	0.002
r	13.614	err_r	0.002
i	13.228	err_i	0.002
z	12.918	err_z	0.003
photoZ (KD-tree method)		0.028 ± 0.0074	
Galaxy Zoo 1 morphology		Uncertain	



Фотометрические красные смещения

Статистически работает, но отклонения возникают для объектов со специфическими свойствами:

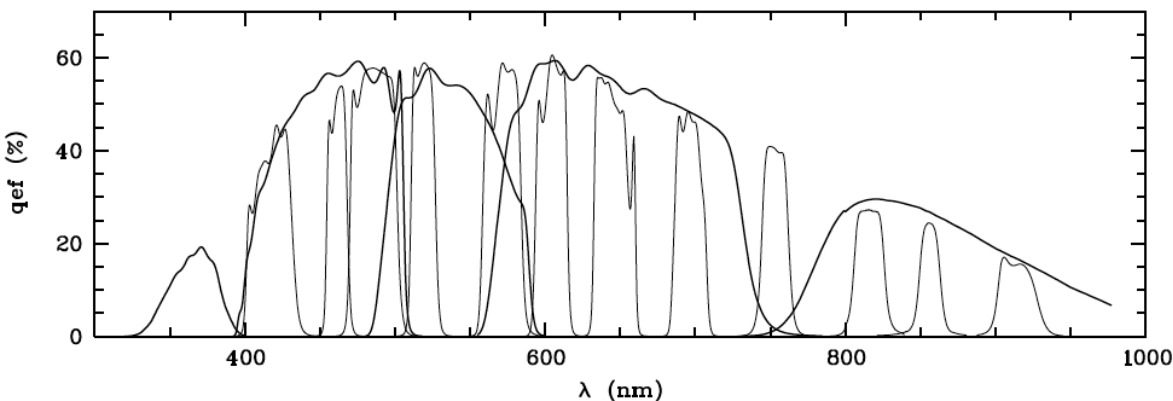
- Мощные эмиссионные линии: ULIGRG, AGN
- Далекие галактики $z > 6$ (путаница с красными карликами)



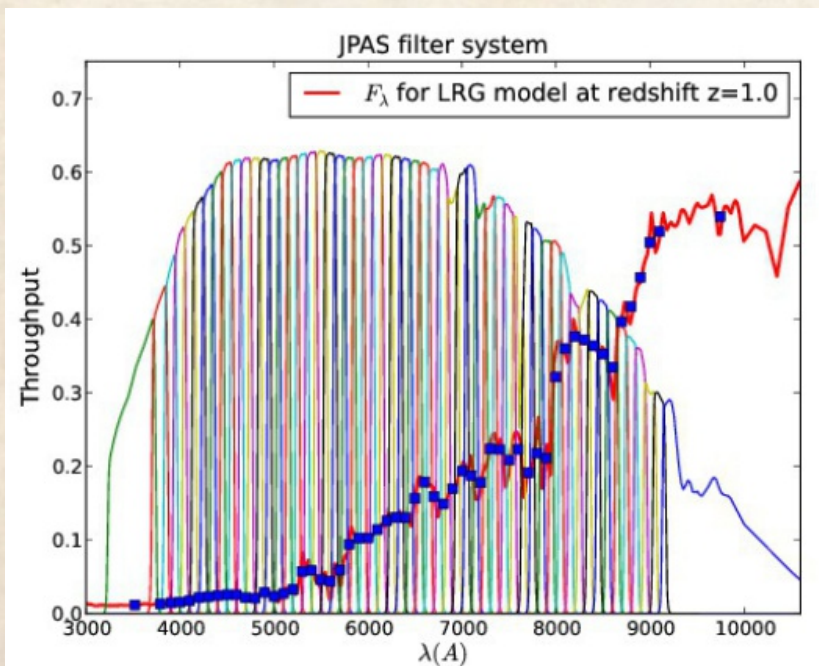
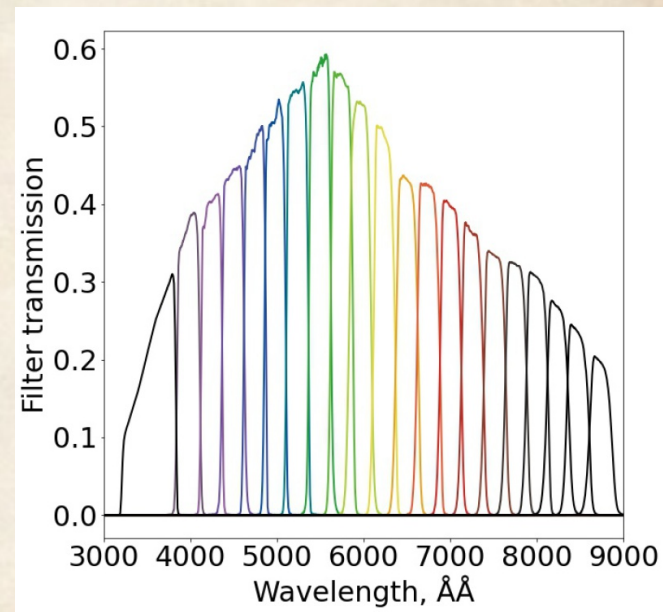
Carliles + 2010

SED со среднеполосными фильтрами (10-30 нм)

COMBO-17 (2.2m telescope Wolf + 2003)

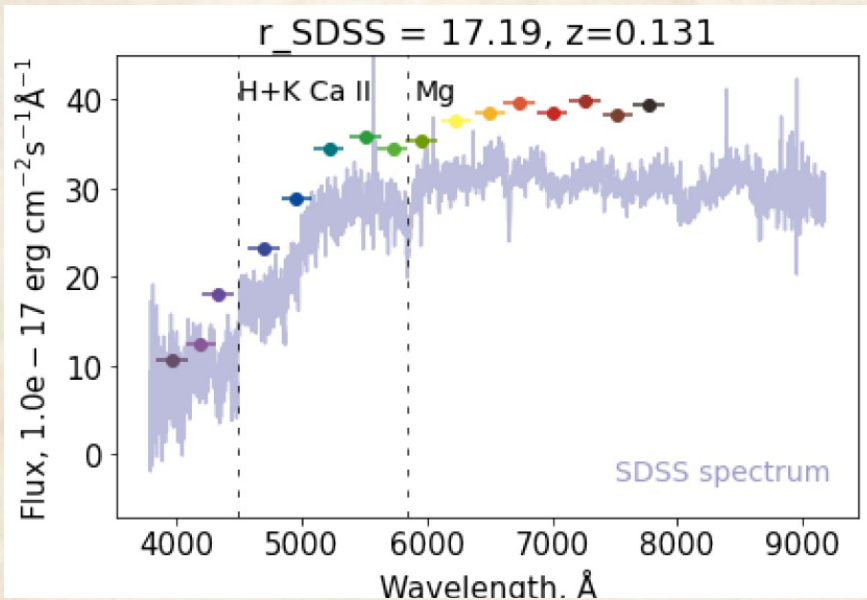


CAO-Бюракан: 21 фильтр
(1м Шмидт, Dodonov + 2017)



JPAS (Benitez + 2014):
54+2 фильтра

SED со среднеполосными фильтрами



Сравнение спектра SDSS для ядра галактики с интегральной фотометрией в среднеполосных фильтрах

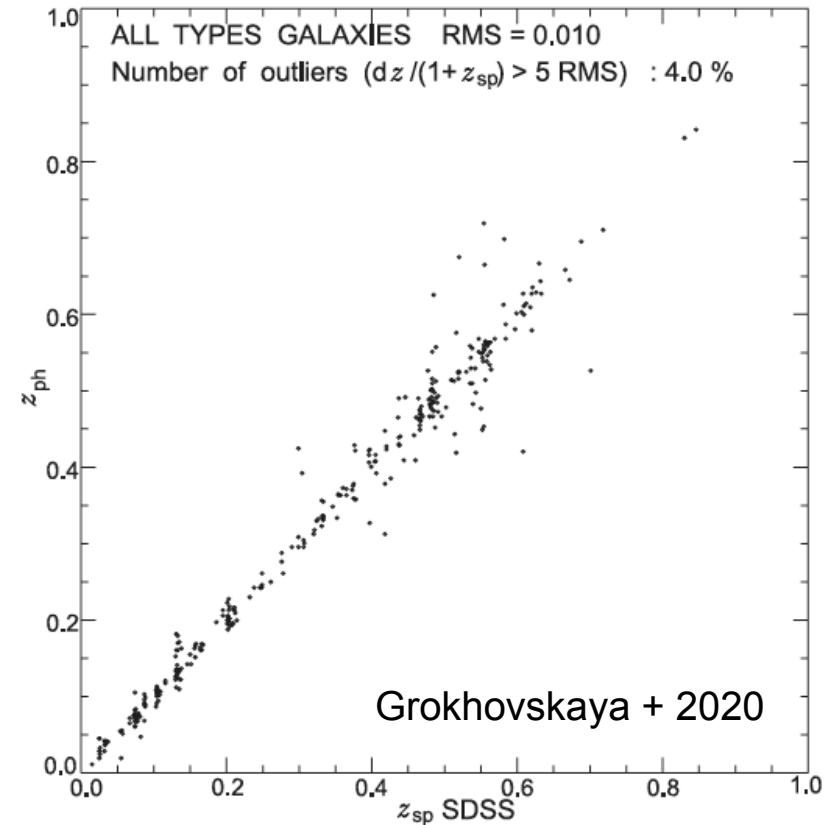


Рис. 2. Сравнение фотометрических красных смещений галактик z_{ph} , полученных с помощью программы ZEBRA в режиме Maximum Likelihood (Feldmann et al. 2006), со спектроскопическими красными смещениями галактик z_{sp} , взятыми из SDSS (Guo et al. 2013; 2014), с распределением ошибок $\Delta z/(1+z)$ для 473 галактик с известными спектроскопическими красными смещениями. Точность определения фотометрического красного смещения $\sigma_z < 0.01$, процент выбросов

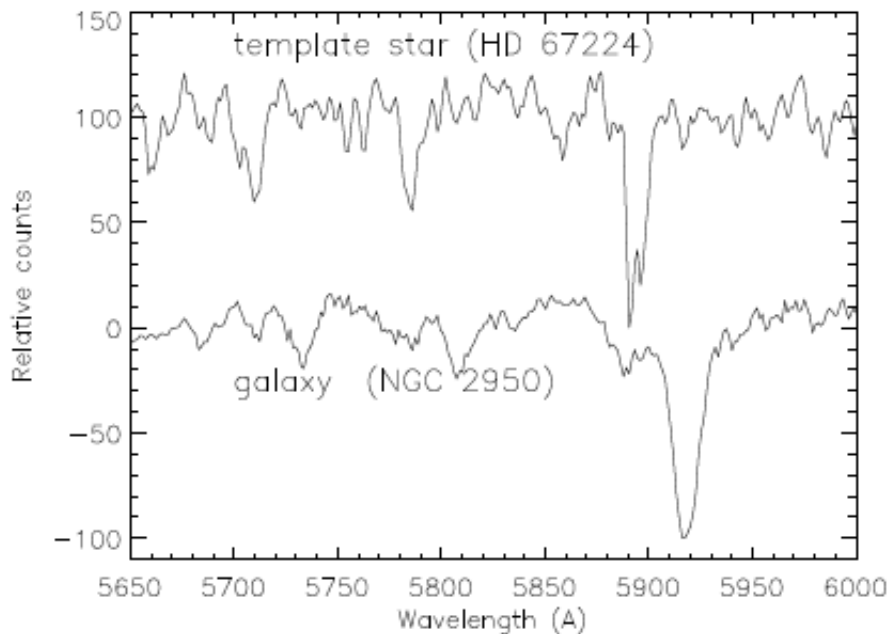
Интерпретация спектров: прямая подгонка

Наблюдаемый спектр – свертка спектра звезд с функцией распределения лучевых скоростей (LOSVD) с учетом отклика спектрографа

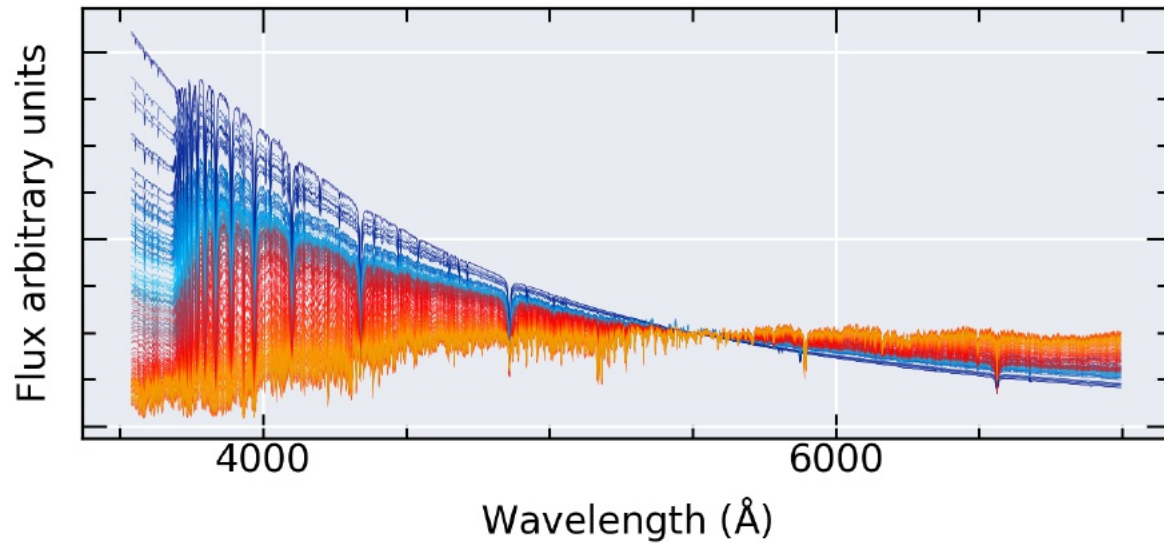
Одновременное определение кинематических параметров (v, σ) и населения (Z, t).

Проблемы:

- Зависит от набора спектров-шаблонов
- Ограничение моделью SSP, проблема несолнечной $[X/H]$
- Восстановление истории ЗО требует повышенной спектральной разрешенности
- Требуется собрать много фотонов:
(спектры: $\Delta\lambda=1 \text{ \AA}$, фотометрия: $\Delta\lambda=200\text{-}1000 \text{ \AA}$) – работа для относительно больших телескопов



Спектр галактики S0 и звезды K (Moiseev 2001)



1: GSD156 template library. This library includes 156 templates with 39 stellar ages (1 Myr to 13 Gyr) and 4 different metallicities ($Z/Z_{\odot} = 0.2, 0.4, 1$ and 1.5).

Для подгонки – библиотеки спектров (реальных звезд или синтетических)

$$S_{\lambda} = \sum_{j=1}^N w_j F_{j\lambda}(\lambda) 10^{-0.4A_{\lambda}} \otimes G(v_{\star}, \sigma_{\star})$$

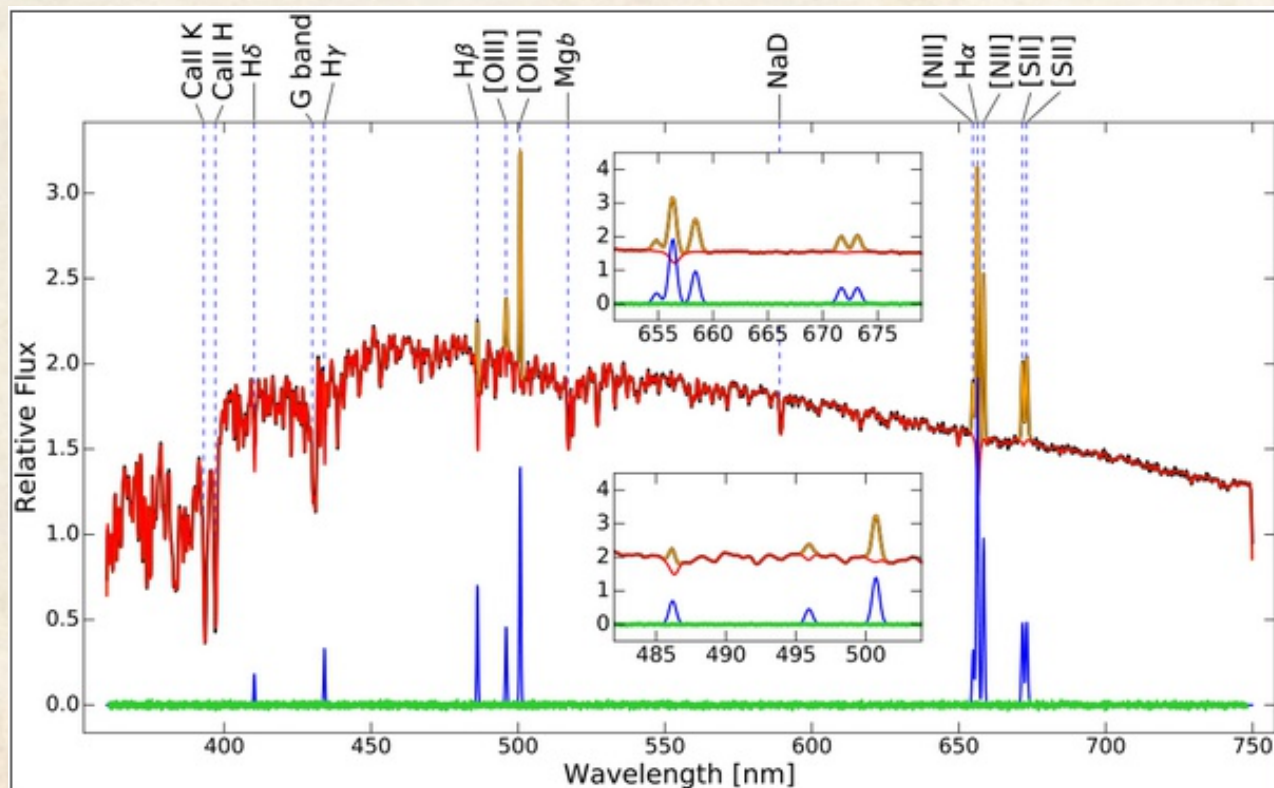
where F_j is the flux at wavelength λ of the j^{th} template; A_{λ} is the extinction in magnitudes at λ (parameterized by the value at the V-band); w_j is the coefficient of the j^{th} template in the final modeled spectrum; N is the total number of templates; the term $G(v_{\star}, \sigma_{\star})$ describes the line-of-sight velocity distribution of the SSP assuming

Разные коды и наборы библиотек звезд

UlySS (Koleva et al 2009) STARSLIGHT (Cid Fernandes et al 2007)

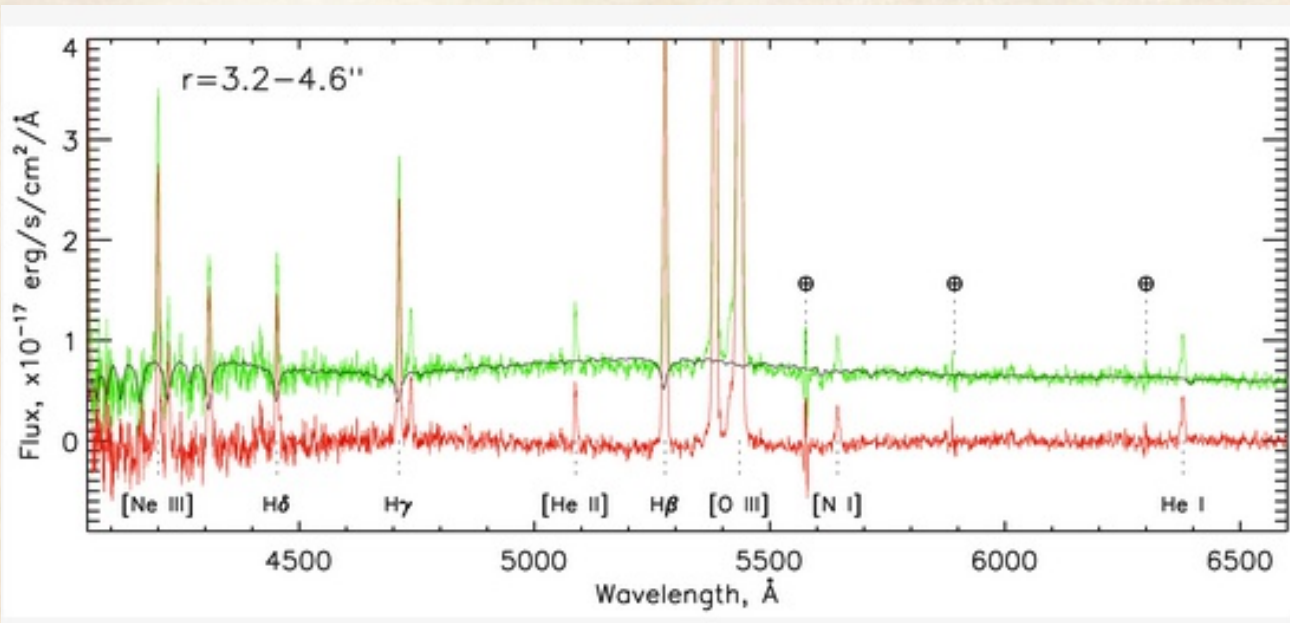
pPXF (Cappellari 2017) NBurst (Chilingarian et al. 2007)

- Зависимость от выбора библиотек звездных спектров (наблюдаемых или синтетических), моделей эволюции.
- Проблема несолнечного химсостава: $[Fe/H]$, $[Mg/H]$
- Восстановление истории звездообразования – требуются спектры высокого разрешения

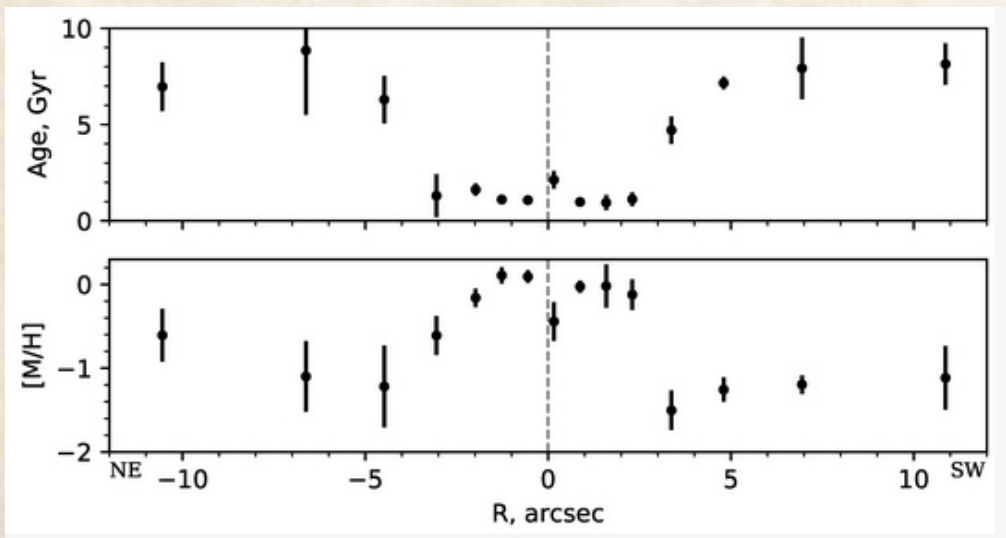


(taken from [Cappellari 2017](#)).

Примеры подгонки спектров



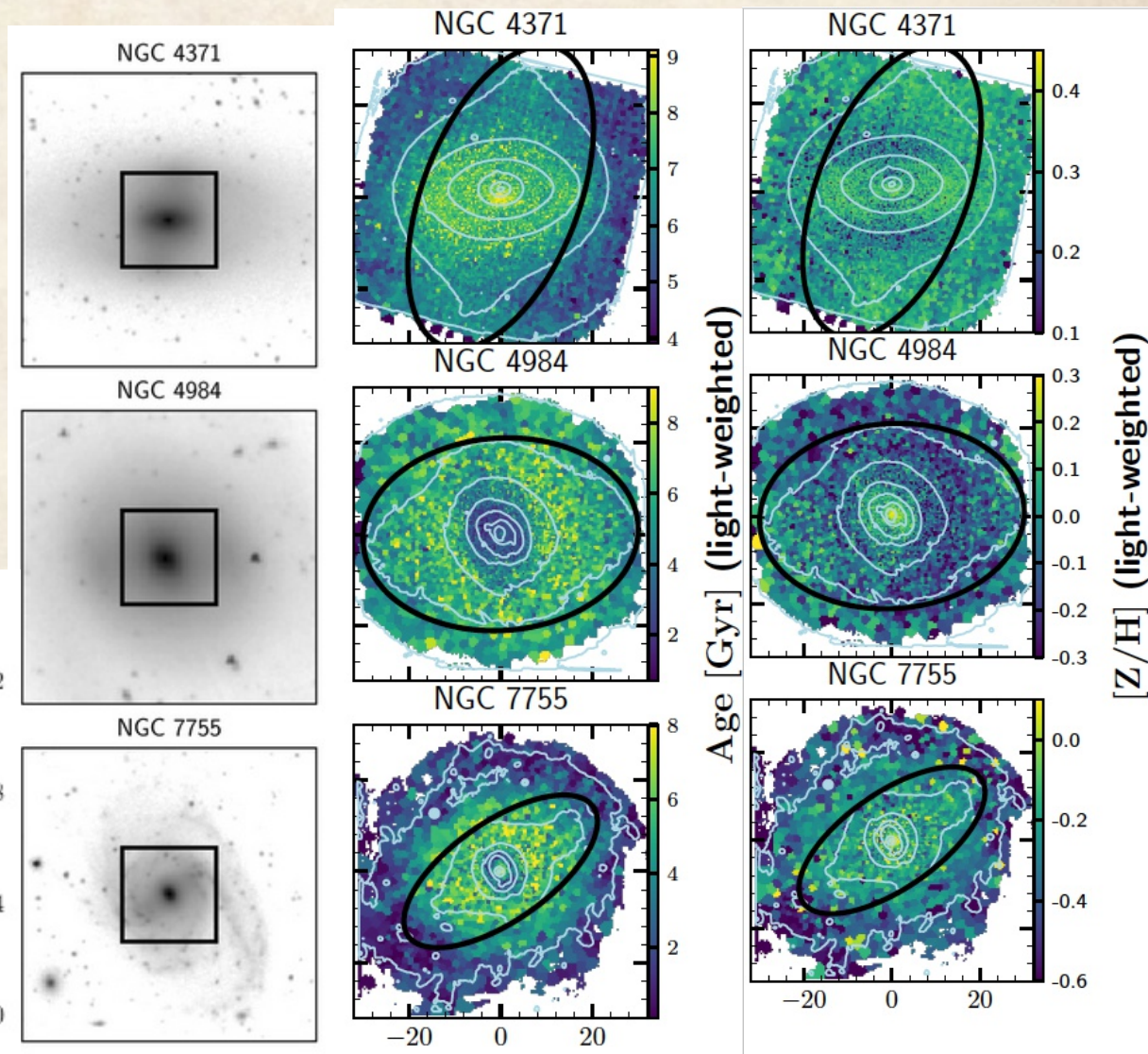
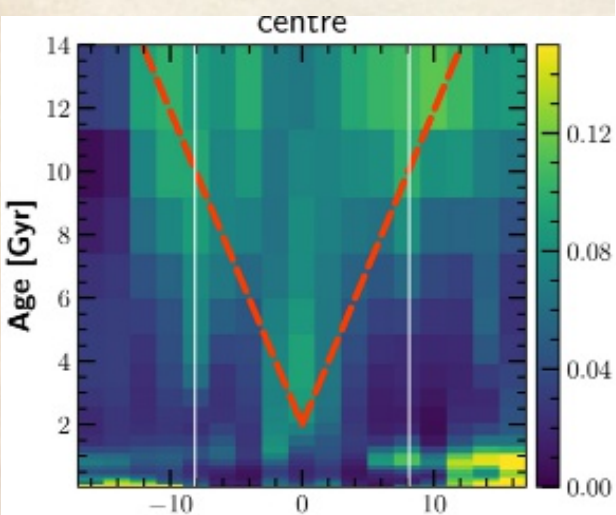
Teacup AGN
(Moiseev & Ikhsanova 23)



Карты параметров звездного населения

SSP-возраста и
металличности,
взвешенные со
светимостью:

История 3O (SFH)



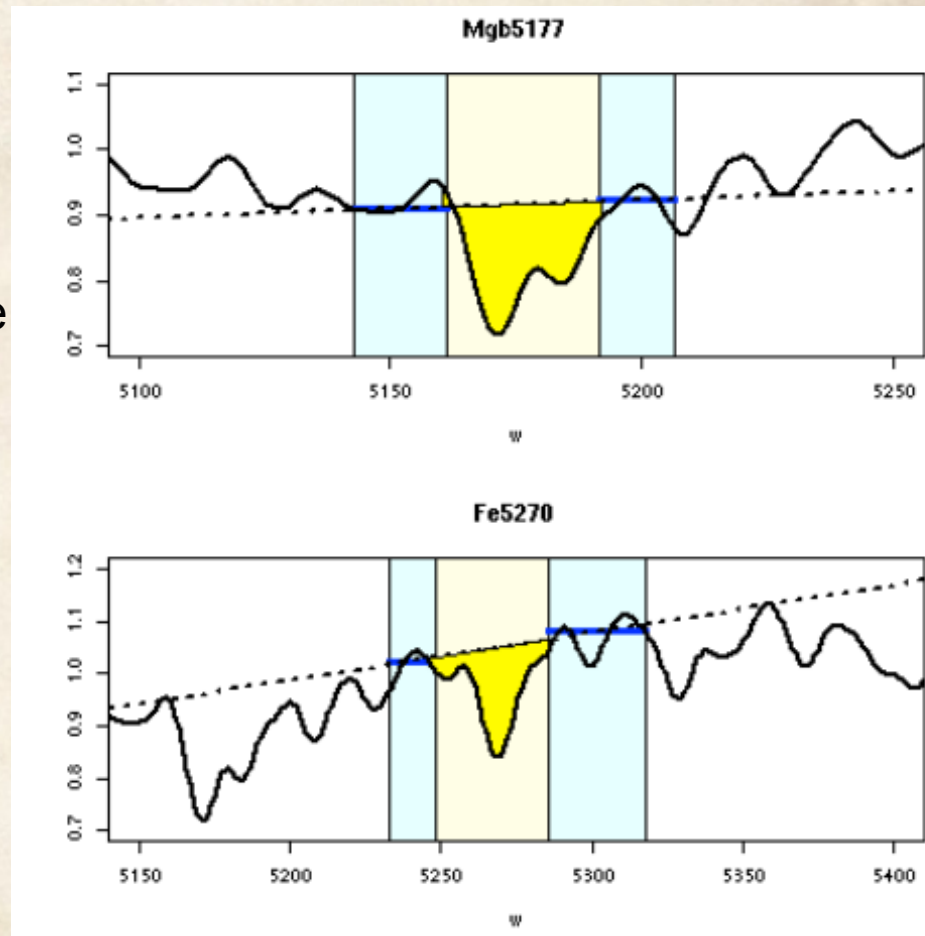
MUSE map (Neumann + 2020)

Ликские индексы: определение

Lick Observatory Stellar Library
(Worthey et al. 1994)

Эквивалентные ширины, рассчитанные
в фиксированных границах

Низкое разрешение FWHM=9Å



Возможность работы с несолнечным отношением альфа-элементов (O, Mg..) к Fe

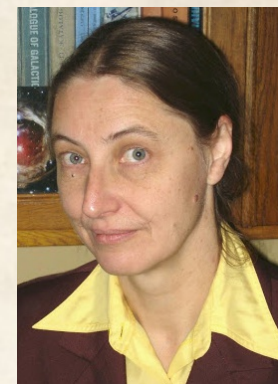
Mg – SN Ibc, SN II, $t < 10$ Myr

Fe – SN Ia, $t > 100$ Myr

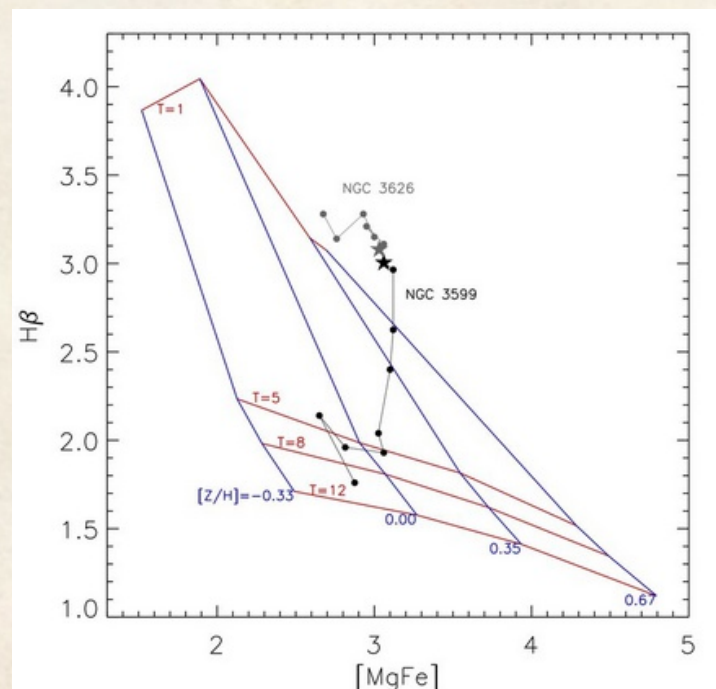
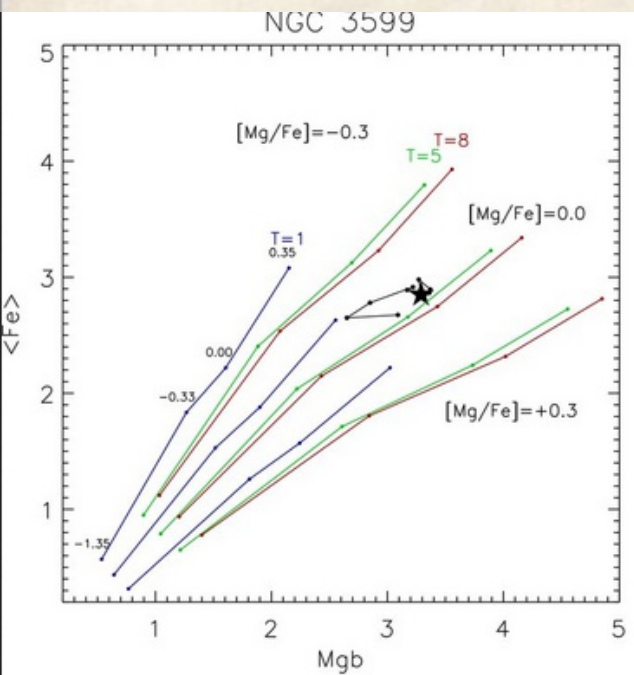
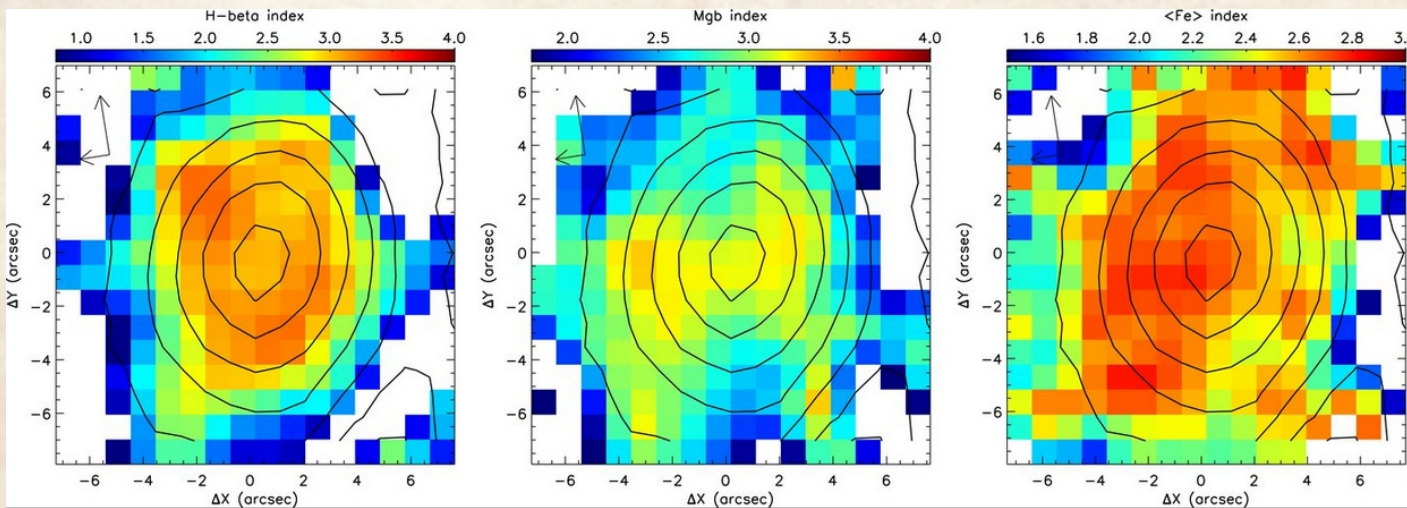
Высокий $\langle \text{Mg} \rangle / \langle \text{Fe} \rangle$ - свидетельство короткой вспышки ЗО (< 1 Gyr)

Ликские индексы: t & Z

MPFS
Sil'chenko et al 2010



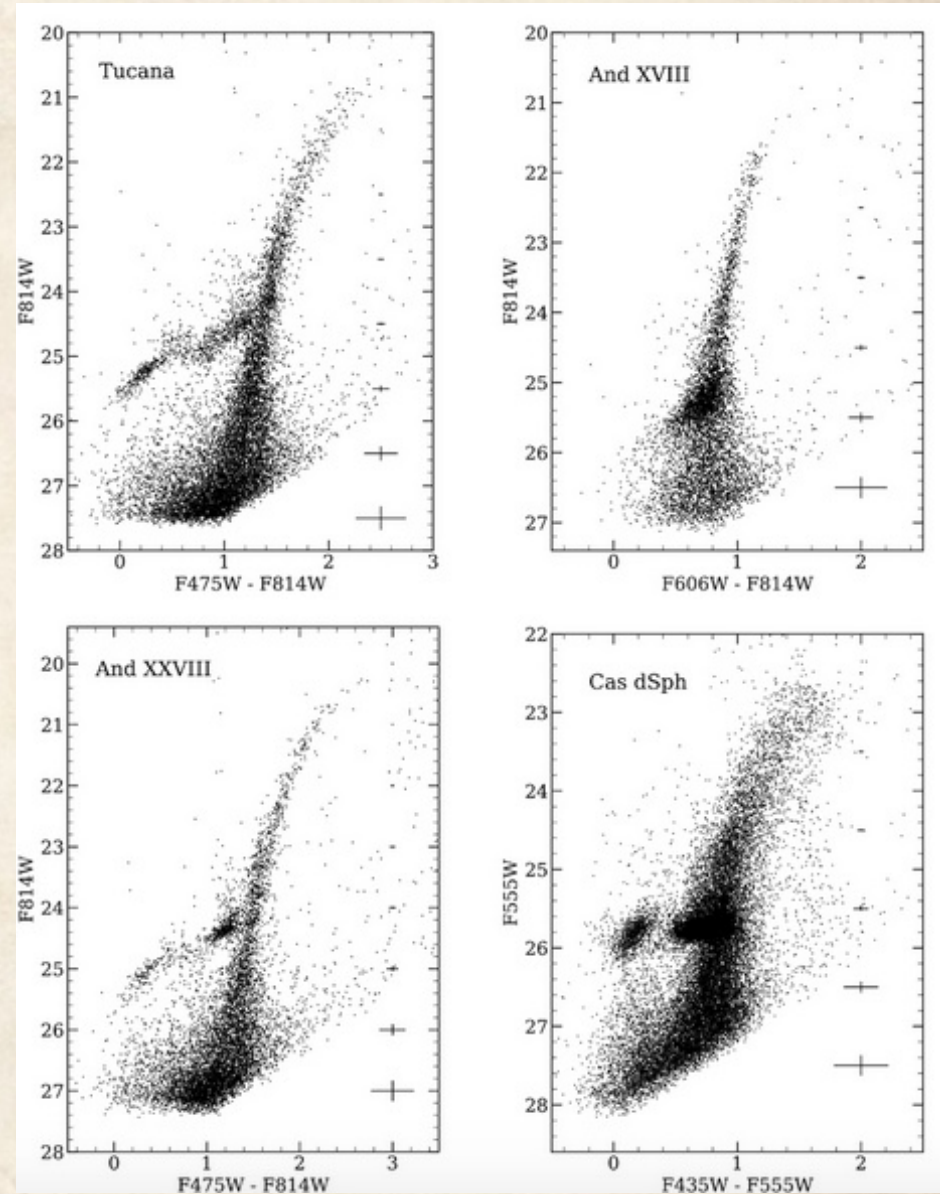
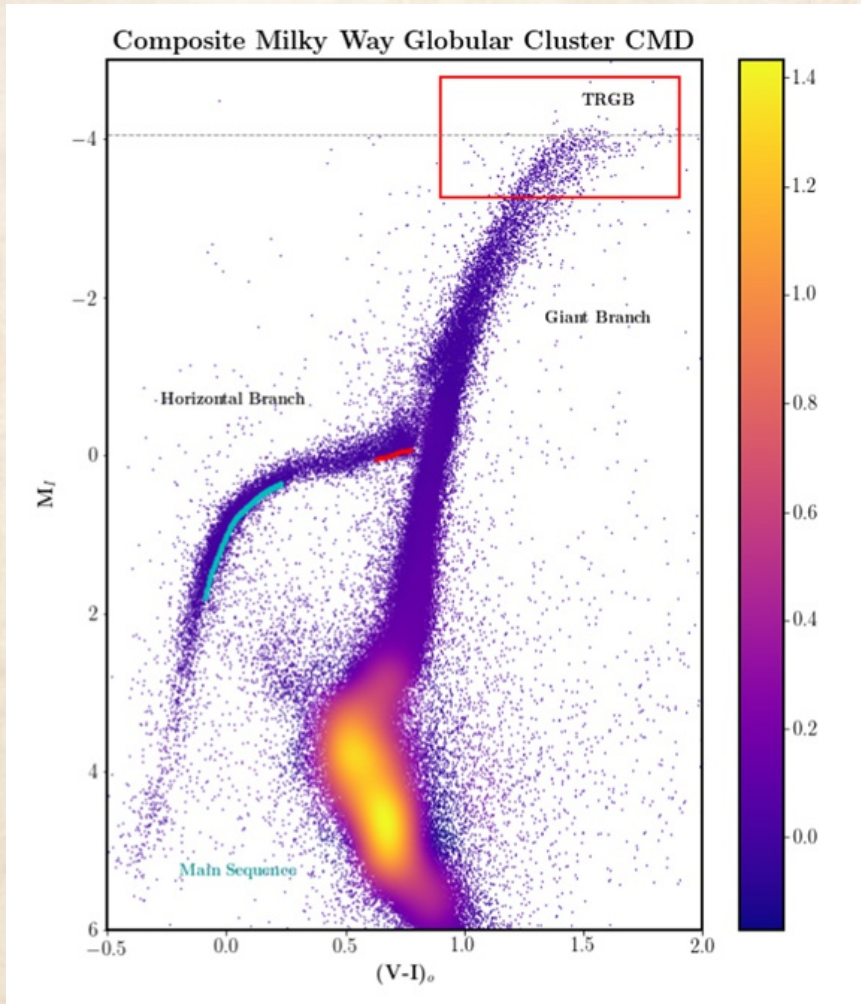
О. К. Сильченко



Сравнение с
моделями звездной
эволюции

Фотометрия отдельных звёзд

(Makarova & Makarov 2021)



(см. Лекция 1)

Фотометрия отдельных звёзд: I Zw 18

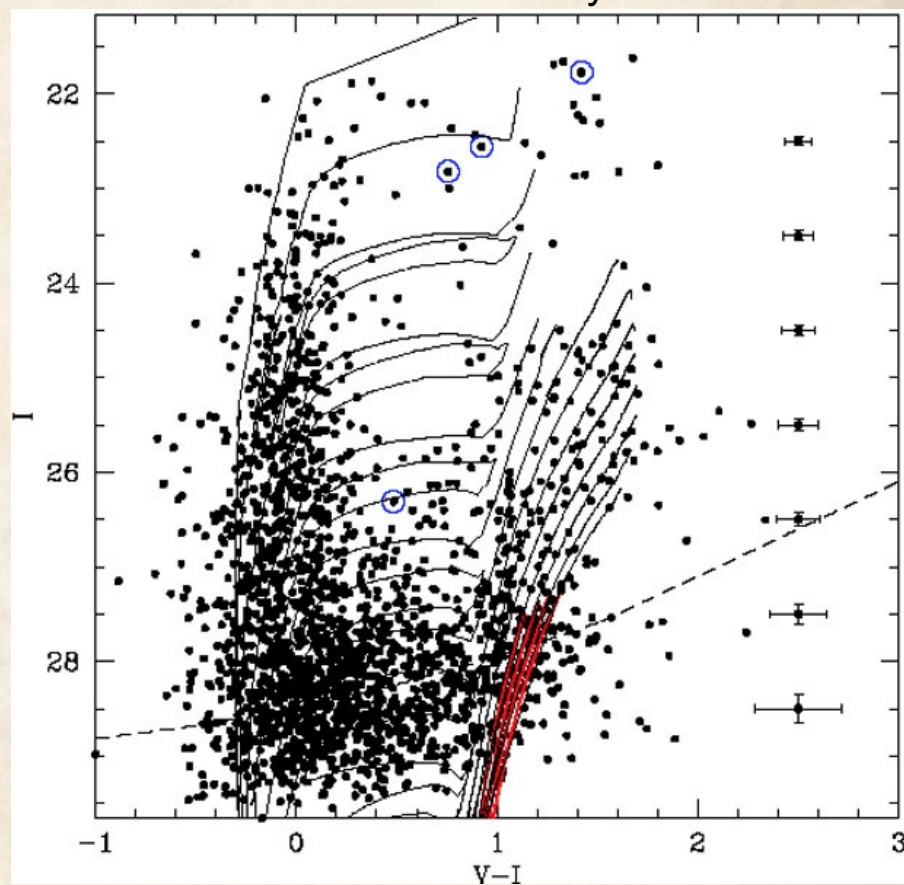
Сравнение с модельными изохронами:
выделение звезд разного возраста и Z

$1/31 Z_{\odot}$



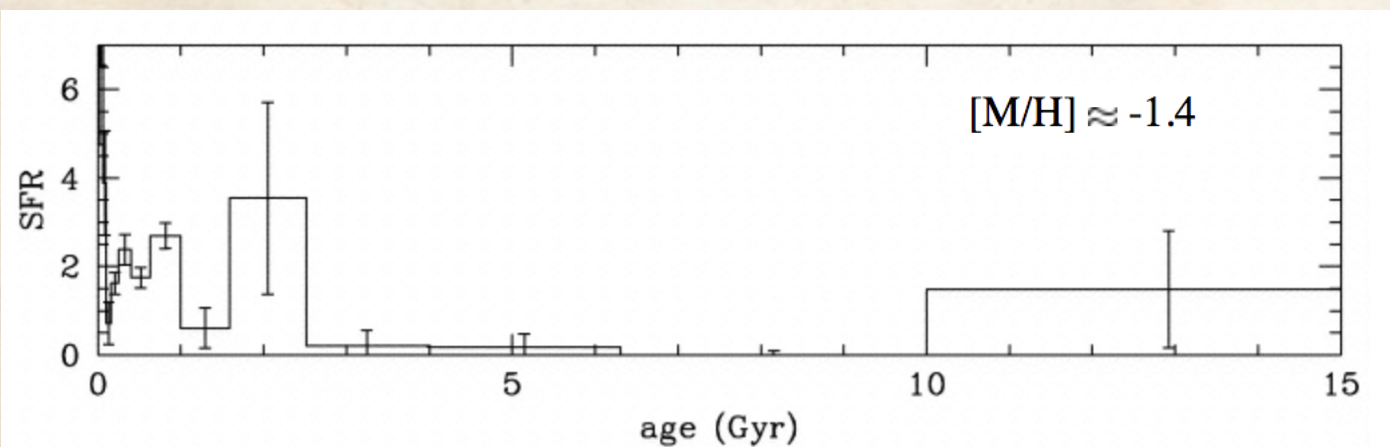
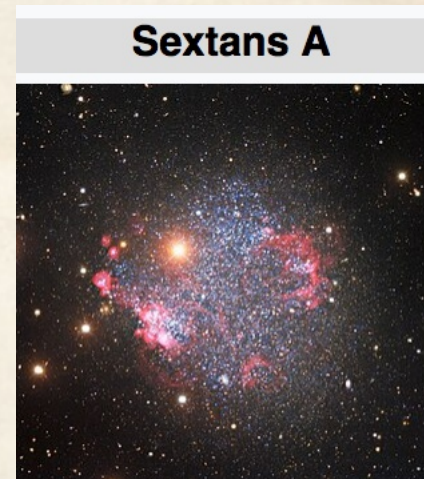
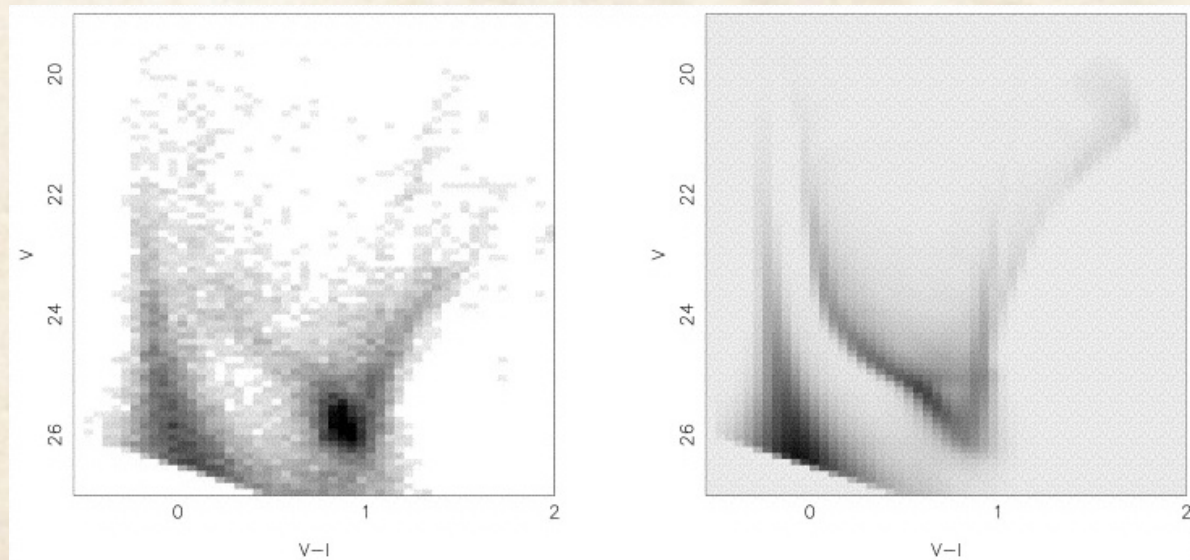
I Zw 18: $Z=0.0004$

Значимое население $t > 1$ Gyr!



Фотометрия отдельных звёзд

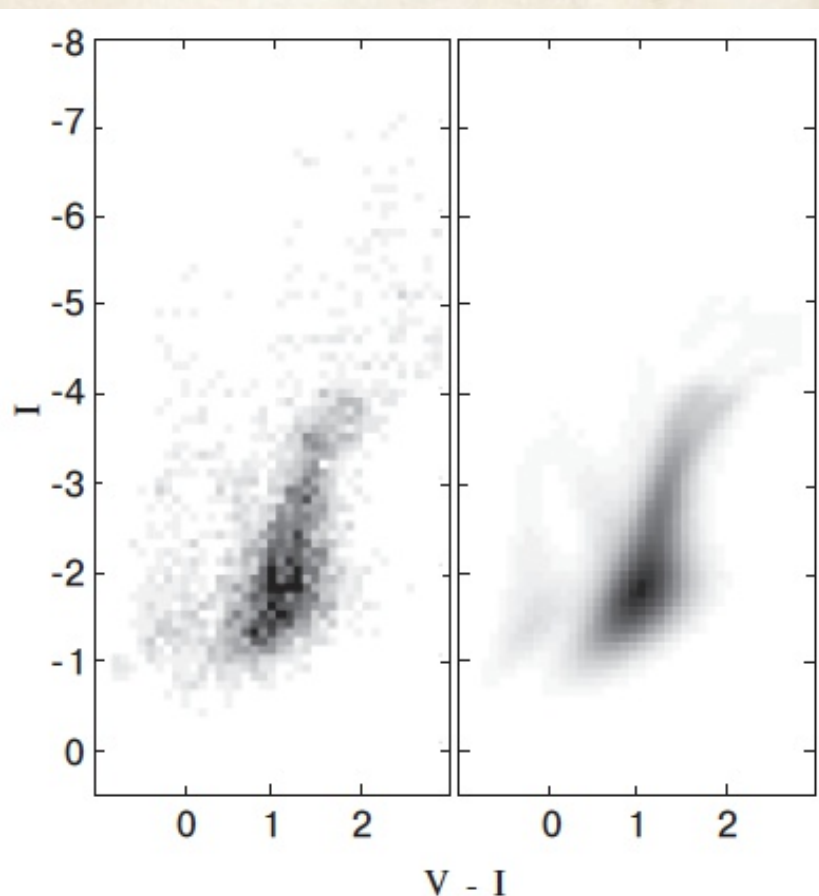
- Линейная суперпозиция эволюционных треков – для восстановления истории ЗО



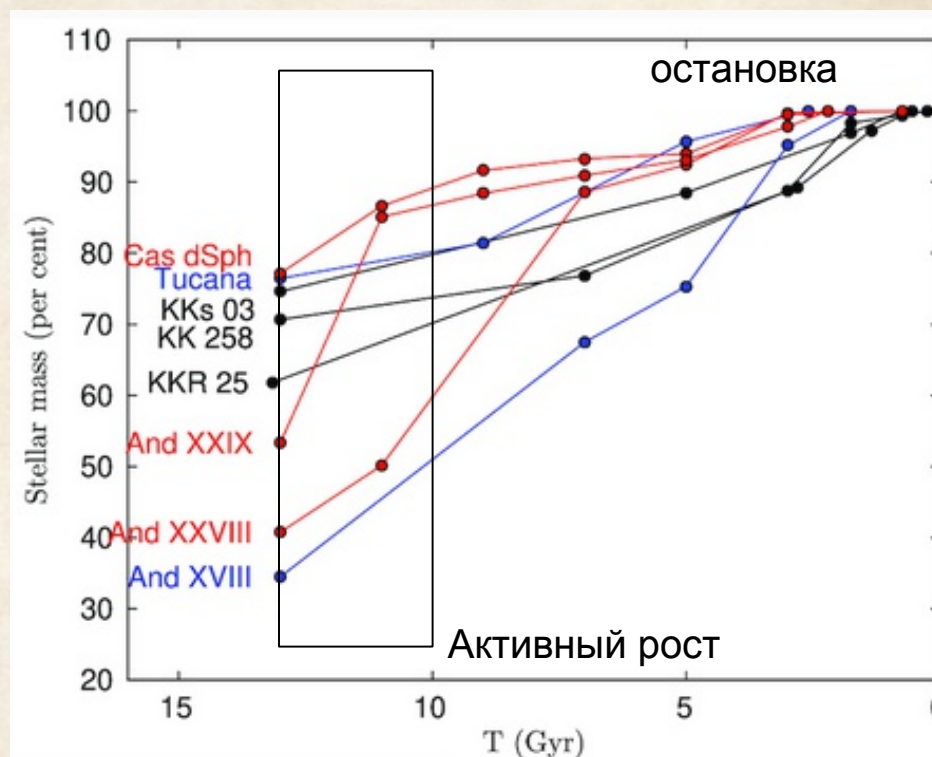
Dolphin + 2003

Обратный пример – остановка звездообразования

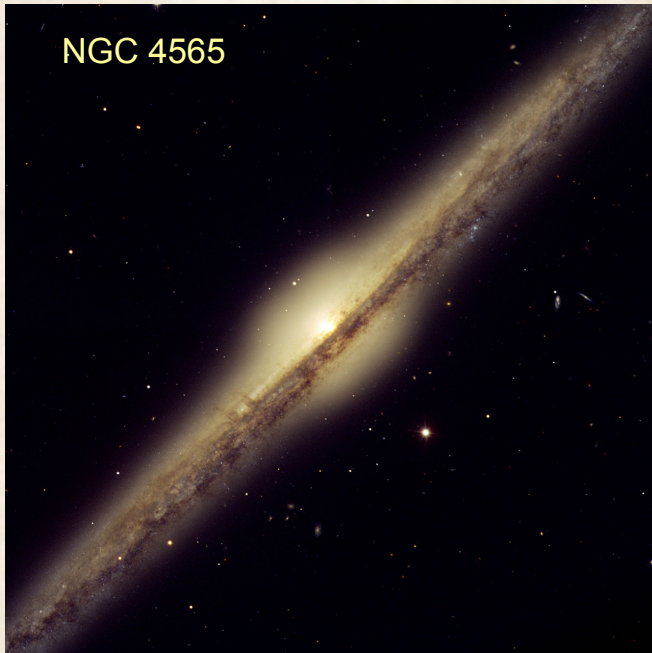
- Линейная суперпозиция эволюционных треков – для восстановления истории ЗО



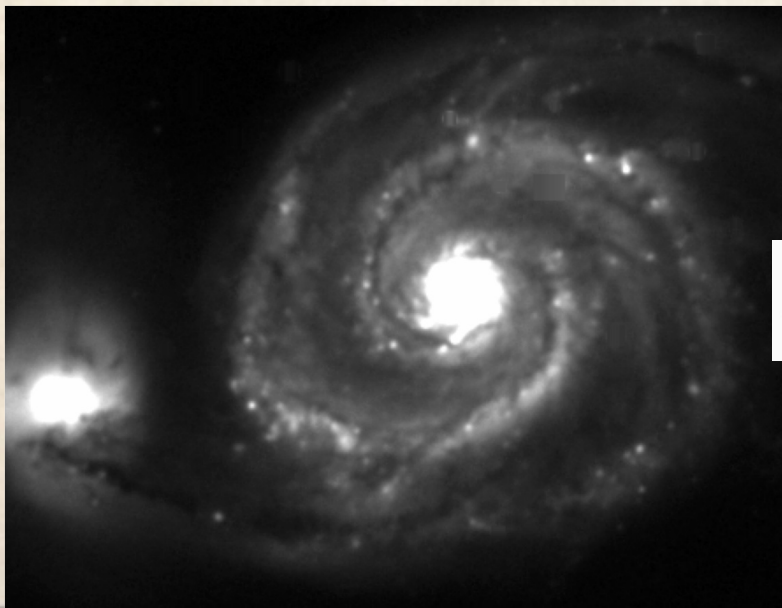
(Makarova & Makarov 2021)



Распределение пыли в галактическом диске



- Пыль – продукт эволюции звезд, содержит значительную часть тяжелых элементов МЗС
- “Газо-пылевой диск”
- На краях спиралей и баров – перенос пылевых частиц в газе, уплотненном ударной волной
- Отношение пыль/газ~0.01 , зависит от металличности
- Неоднозначная связь массы пыли с A_V – лучше определять в моделировании



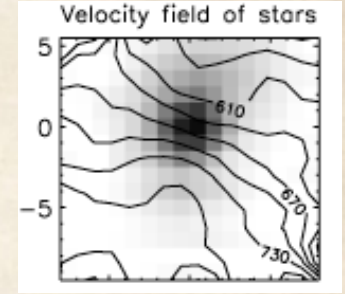
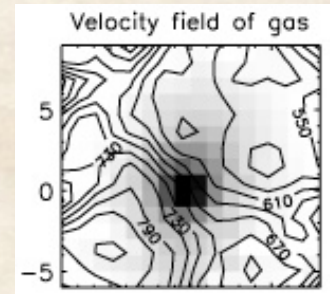
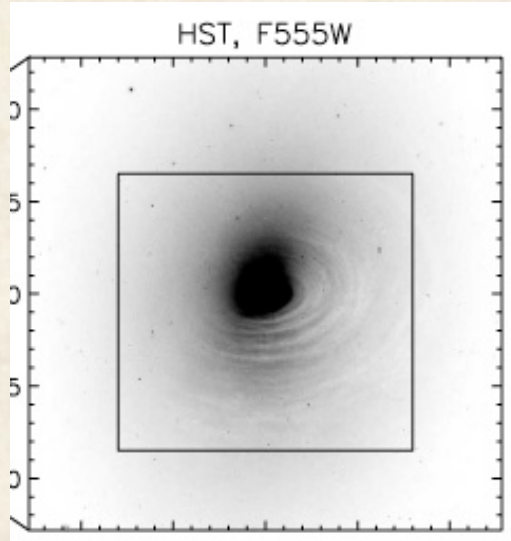
$$N_H (\text{cm}^{-2}) = (2.21 \pm 0.09) \times 10^{21} A_V \quad \text{Guver \& Ozel 2009}$$

Эмпирическая зависимость от наклона
 $R = \lg(a/b)$

$$A(R) = -2.5 \log(k + (1 - k) \cdot R^{2C(1+0.2/K)-1})$$

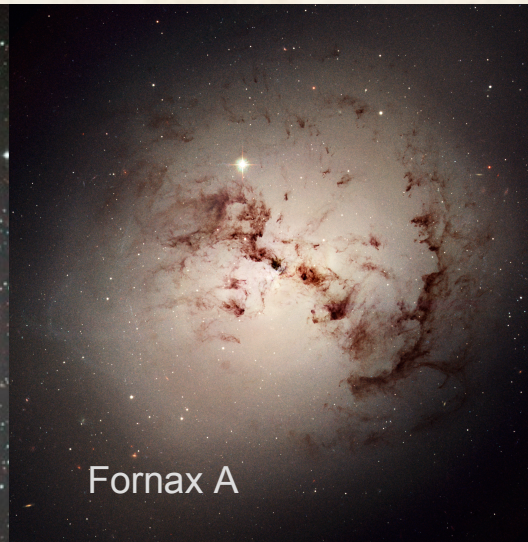
$k = \text{bulge/disk}$, K - зависит от типа
(HyperLEDA)

Пыль вне звездного диска

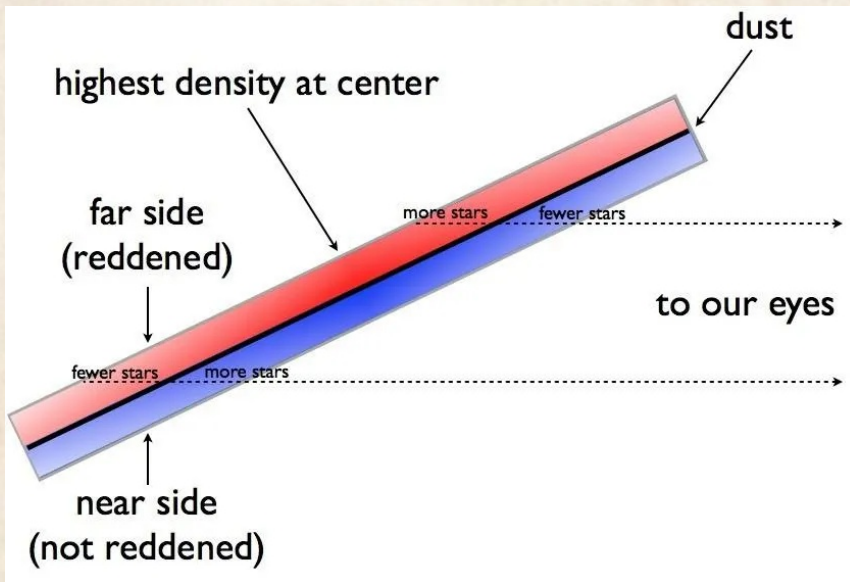


Sil'chenko & Afanasiev 2004

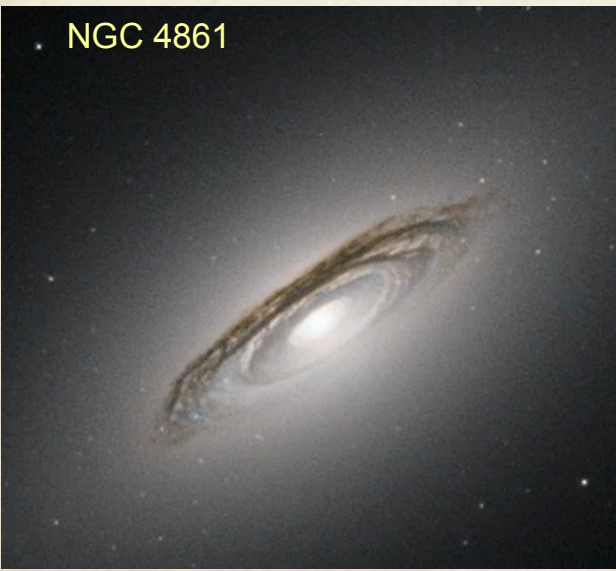
Результат захвата газопылевой материи с иным орбитальным моментом



Пространственное расположение диска

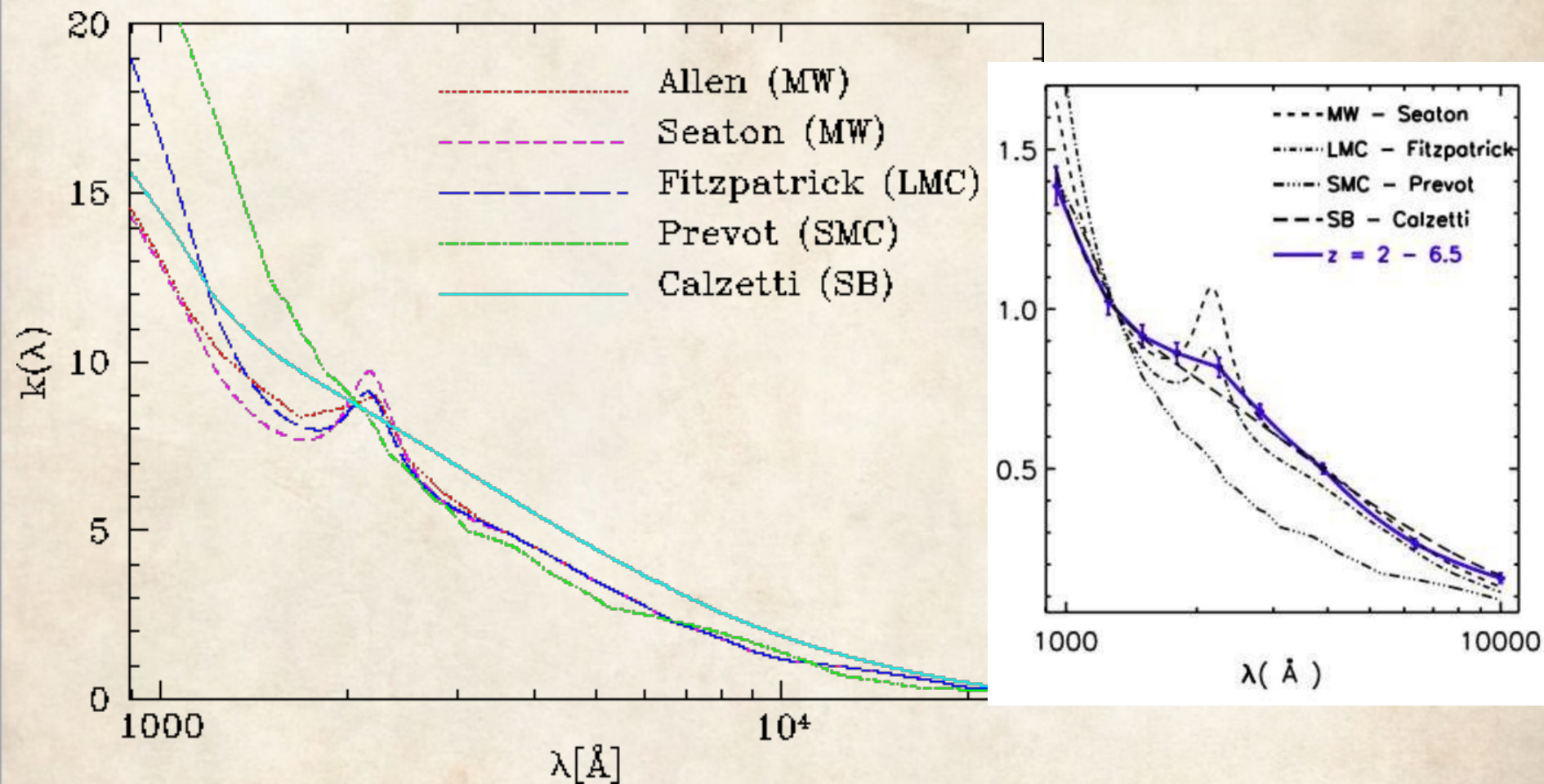


Более запыленная сторона диска – ближе к нам.
Возможность определить направление закрутки спиральной структуры (в подавляющем большинстве, спирали - отстающие)



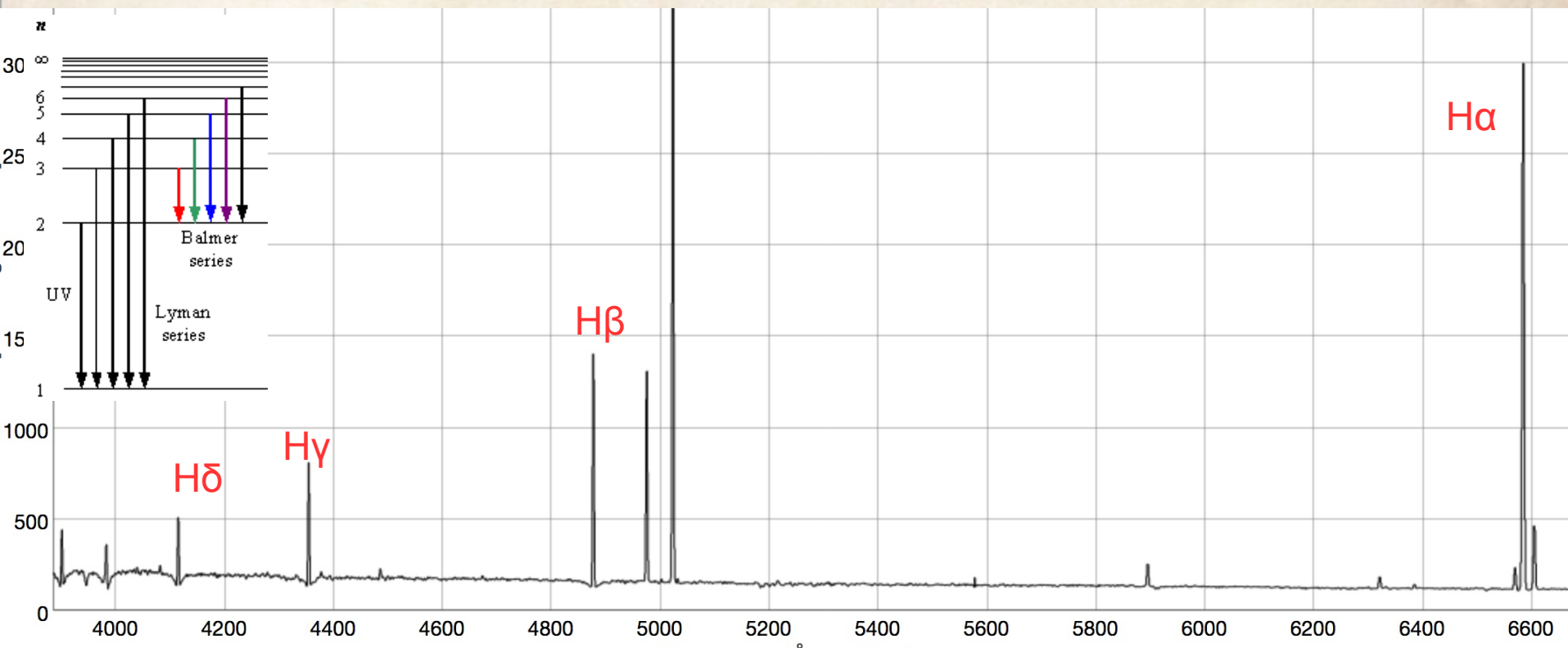
Закон поглощения (покраснения)

Насколько данные о поглощении в Млечном Пути подходят к другим галактикам?



Scoville et al. (2015)

Бальмеровский декремент, как метод оценки A_V



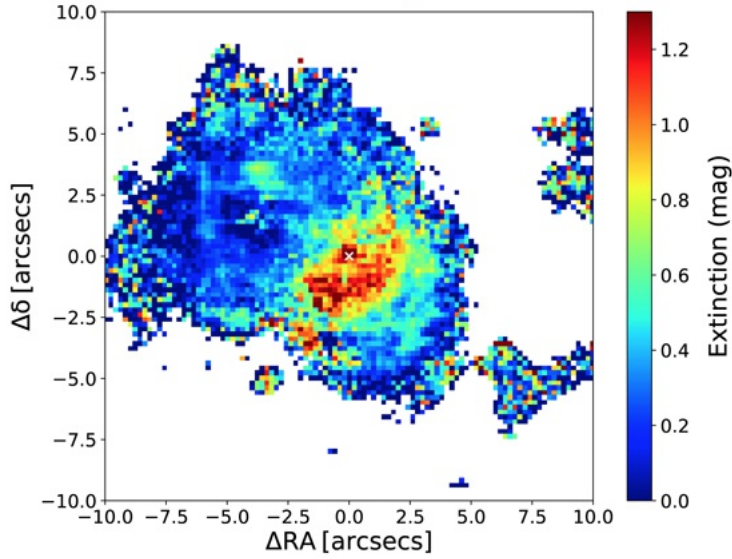
Можно показать, что отношение слабо зависит от T_e и плотности
 $H\alpha/H\beta = 2.86$ ($T=10\ 000\text{K}$) 3.04 ($T=5\ 000\text{K}$) 2.75 ($T=20\ 000\text{K}$), $n=100$
В реальном объекте отношение будет больше (покраснение)

Проблемы:

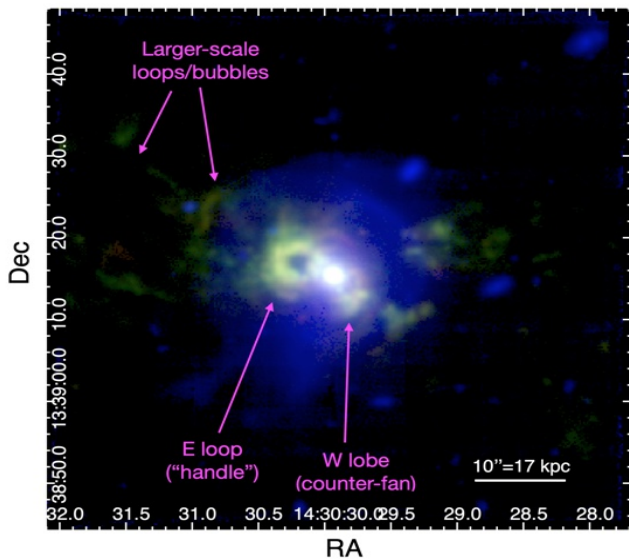
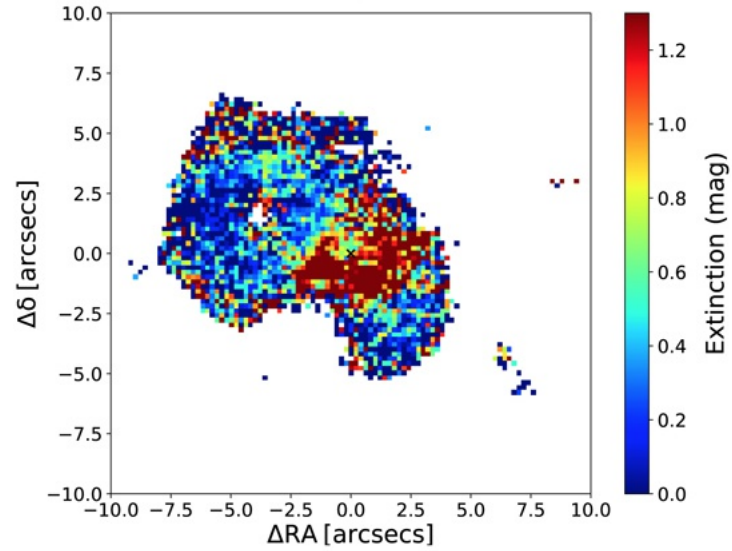
- Абсорбции подстилающего звёздного населения
- Для их учёта лучше несколько линий, а они слабые

Бальмеровский декремент: карты

A_V ($H\alpha/H\beta$)

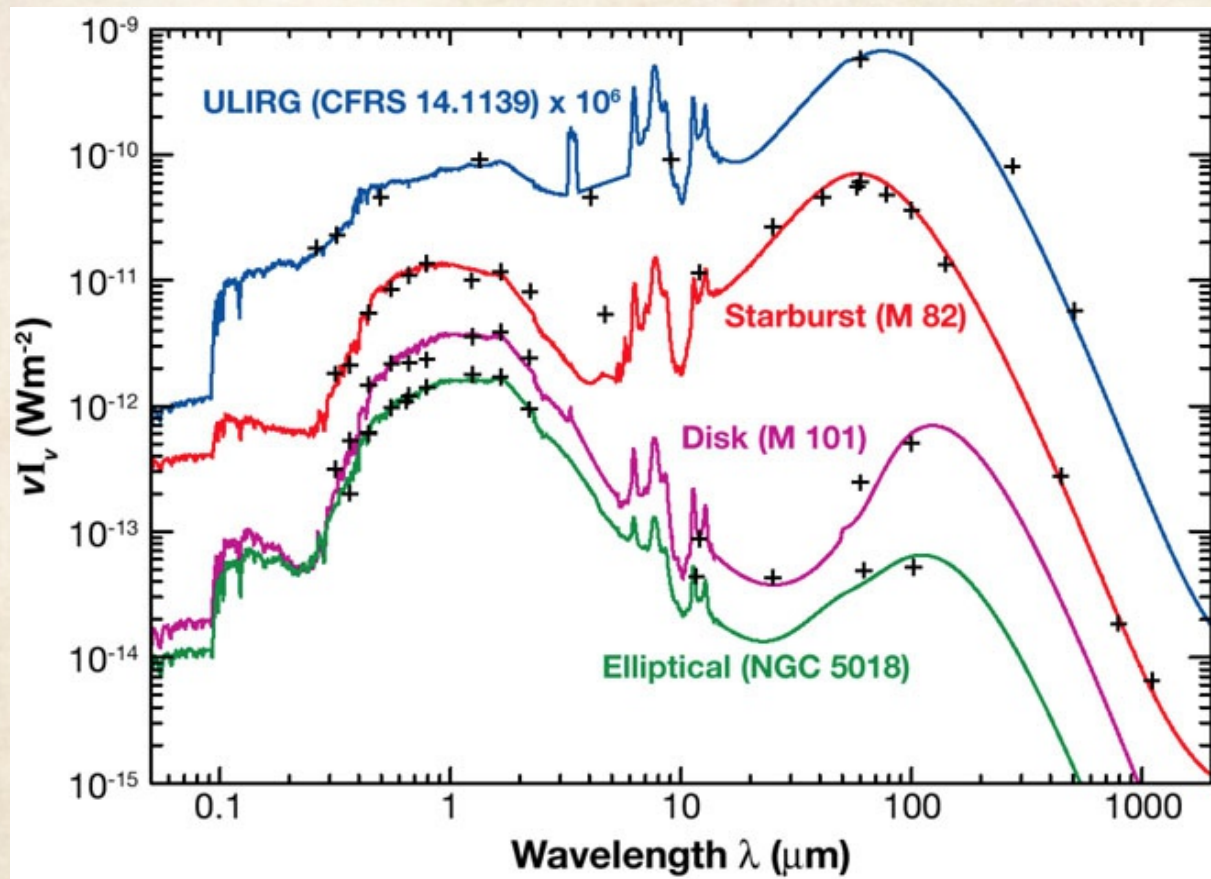


A_V ($H\gamma/H\beta$)



Venturi + 2024

Теплая пыль: IRAS, AKARI, Spitzer, WISE, Herschel



Пыль поглощает заметную долю всего УФ и оптического излучения, а излучает в ИК (спектр не Планковский, так как размер частиц $< \lambda$)

Масса пыли – из моделирования SED

Излучение пыли: взгляд с JWST/MIRI 5 μm – 28 μm

Графитовая и силикатная пыль + эмиссия ПАУ

