

А.В. Моисеев, САО РАН

# Методы исследования галактик.

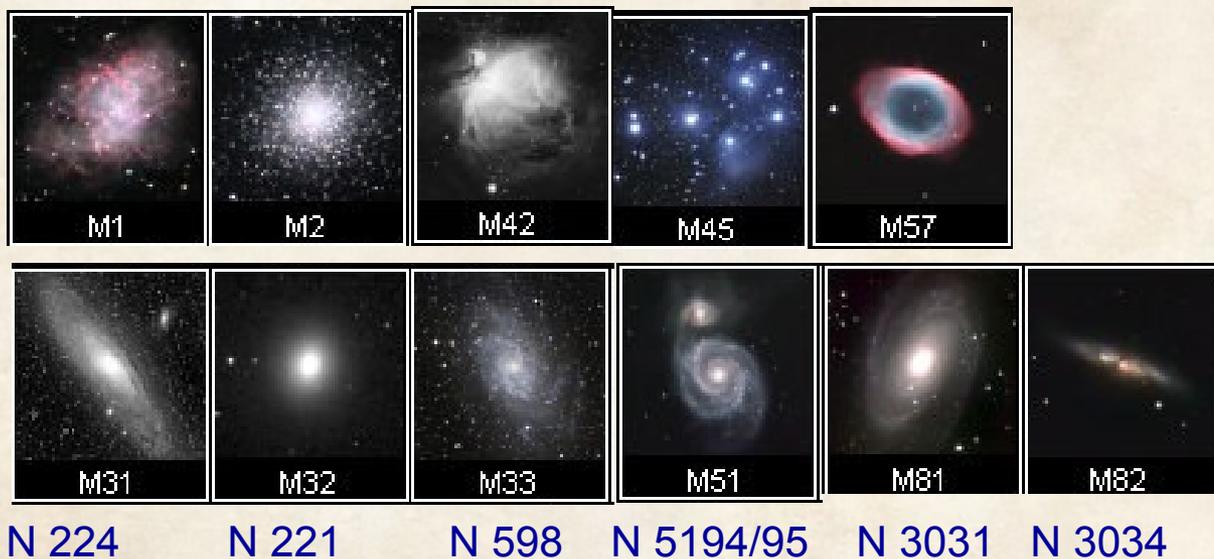
## Лекция II.

Каталоги и типы галактик: история и современный подход.  
Морфология галактик: распределение яркости, диски,  
балджи, псевдобалджи.

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

# Первые каталоги “туманностей”

1774-84 Каталог Шарля Мессье : 110 “туманных объектов” ( M104-110 добавлены в XX в., M102 – ложное) из них – 40 галактик



NGC (New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars)

1888 – Джон Дрейер, на основе наблюдений Вильяма, Каролины и Джона Гершелей и Джеймса Данлопа

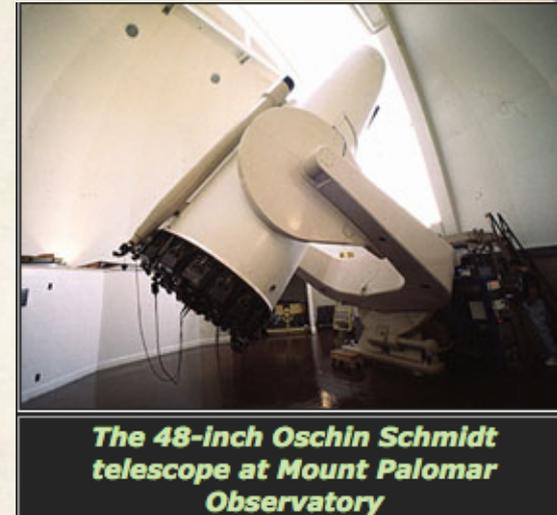
NGC – 7840 объектов, ~5000 галактика

1895 - 1908 IC (index catalogue) - 5386 объектов, ~4000 галактика

# Каталоги галактик в фотографическую эпоху

1948-1958 Паломарский обзор – 48" (122 см) телескоп Шмидта, красные и синие пластинки  
6°x6° (36 см), <22 mag, DEC>-33°

Эпоха изучения копий паломарских пластинок



Вторая версия (POSS-II): 1980-90

Южная версия: 124 см UK Schmidt Telescope (Siding Spring )

Сейчас всё оцифровано в рамках Digitized Sky Survey (DSS):

DSS-I/II (px=1.7" / 1" )

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

# Каталоги галактик в фотографическую эпоху

## Общие каталоги:

**CGCG** (Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies), 1961-68: 29148 галактик,  $<15.5 \text{ mag}$

**MCG** (Morphological catalogue of galaxies), 1962-71:  $\sim 34\,000$  галактик,  $<15. \text{ mag}$ , описание

**UGC** (Uppsala General Catalogue of Galaxies), 1973 г.: 12 921 галактик северной полусферы POSS-I,  $D > 1'$ ,  $<14.5 \text{ mag}$  + часть объектов CGCG

**PGC** (Principal Galaxies Catalogue), 1989 г: 73197 галактик, Lyon-Meudon Extragalactic Database (LEDA), сейчас в HyperLEDA

## Специализированные списки, вспоминаемые до сих пор:

### VV (Б.А. Воронцов-Вельяминов):

Взаимодействующие системы,  
1959 г – 335, 1976 + 497 ( до VV852)

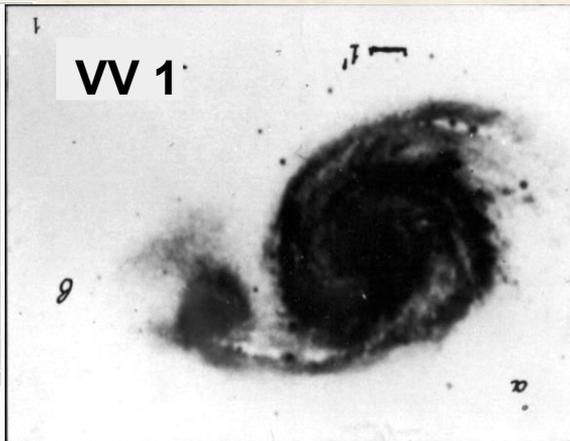
**H. Arp** - (1966) - атлас 338 пекулярных галактик

Галактики Маркаряна с УФ-избытками :  
**Mrk/ Mkn** 1967-1981, 1500 галактик

Борис Александрович  
Воронцов-Вельяминов



Дата рождения: 1 февраля 1904  
Место рождения: Днепрпетровск  
Дата смерти: 27 января 1994 (89 лет)

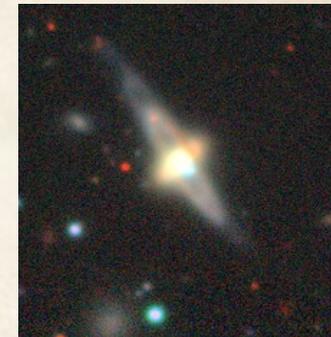


# Эпоха цифровых обзоров: просто имя+координаты

**M82 = NGC 3034 = IRAS 09517+6954 = SDSS J095551.73+694048.6**

Важно, что координаты могут различаться в последних цифрах  
(проблема отождествления, особенно актуально в радио и рентгене)

<input type="checkbox"/>	1	MESSIER 082	G
<input type="checkbox"/>	2	NGC 3034	G
<input type="checkbox"/>	3	UGC 05322	G
<input type="checkbox"/>	4	ARP 337	G
<input type="checkbox"/>	5	CGCG 333-008	G
<input type="checkbox"/>	6	CGCG 0951.7+6955	G
<input type="checkbox"/>	7	MCG +12-10-011	G
<input type="checkbox"/>	8	2MFGC 07685	G
<input type="checkbox"/>	9	PRC D-13	G
<input type="checkbox"/>	10	3C 231	RadioS
<input type="checkbox"/>	11	4C +69.12	RadioS
<input type="checkbox"/>	12	2MASX J09555243+6940469	IrS
<input type="checkbox"/>	13	SDSS J095551.73+694048.6	G
<input type="checkbox"/>	14	IRAS 09517+6954	IrS
<input type="checkbox"/>	15	IRAS F09517+6954	IrS
<input type="checkbox"/>	16	AKARI J0955536+694050	IrS
<input type="checkbox"/>	30	NVSS J095551+694046	RadioS
<input type="checkbox"/>	31	VLSS J0955.8+6940	RadioS
<input type="checkbox"/>	32	6C B095143.6+695502	RadioS
<input type="checkbox"/>	33	8C 0951+699	RadioS
<input type="checkbox"/>	34	UITBOC 1644	VisS

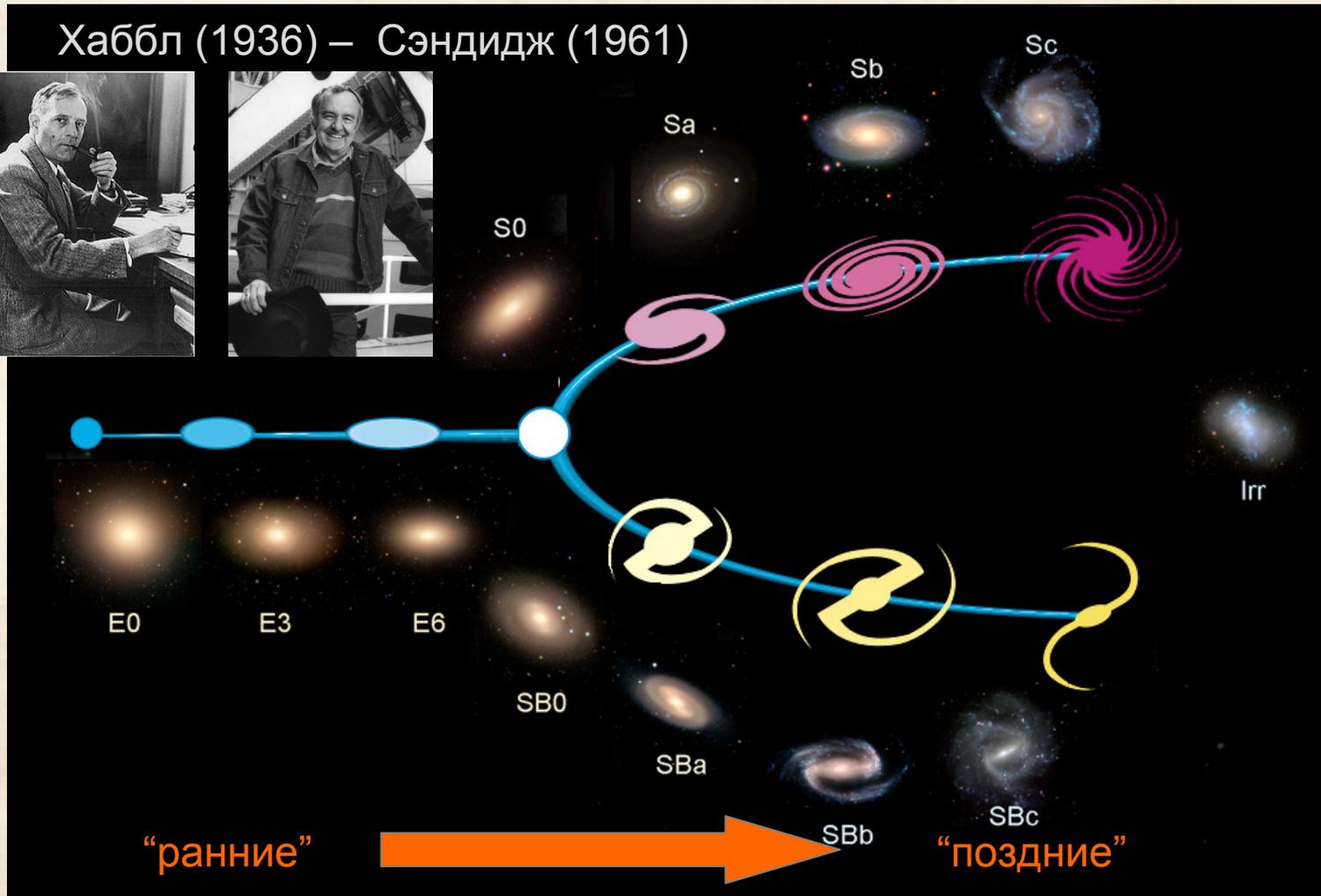


<input type="checkbox"/>	1	II Zw 092	G
<input type="checkbox"/>	2	CGPG 2045.6-0006	G
<input type="checkbox"/>	3	SPRC 069	G
<input type="checkbox"/>	4	WISEA J204805.66+000406.9	IrS
<input type="checkbox"/>	5	2MASXi J2048056+000407	IrS
<input type="checkbox"/>	6	2MASX J20480563+0004074	IrS
<input type="checkbox"/>	7	2MASS J20480567+0004078	IrS
<input type="checkbox"/>	8	SDSS J204805.66+000407.8	G
<input type="checkbox"/>	9	SDSS J204805.67+000407.8	G
<input type="checkbox"/>	10	GALEXASC J204805.74+000409.7	UvS
<input type="checkbox"/>	11	GALEXMSC J204805.70+000408.8	UvS
<input type="checkbox"/>	12	ASK 224975.0	G
<input type="checkbox"/>	13	NPM1G -00.0532	G

NED (NASA/IPAC Extragalactic Database)  
<http://ned.ipac.caltech.edu/>

# Классификация по внешнему виду: “Камертон Хаббла”

Хаббл (1936) – Сэндидж (1961)



- Уменьшается отношение балдж/диск (B/D)
- Растет контраст спиралей и угол закрутки
- Растет доля газопылевой материи

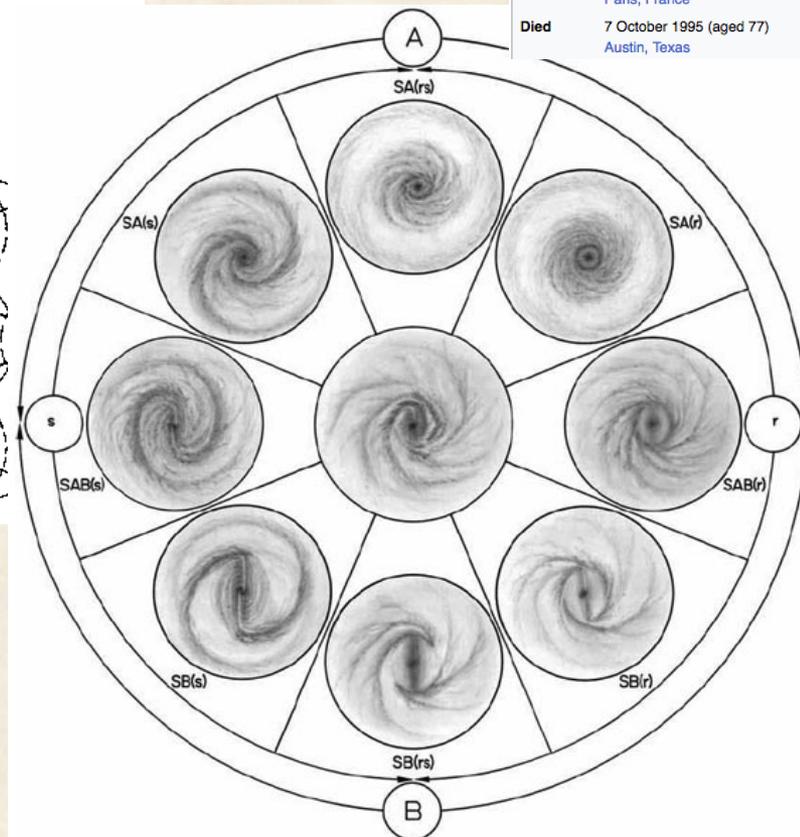
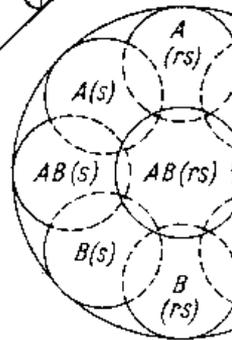
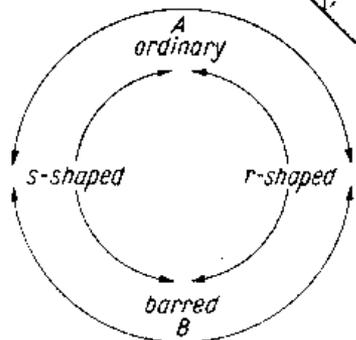
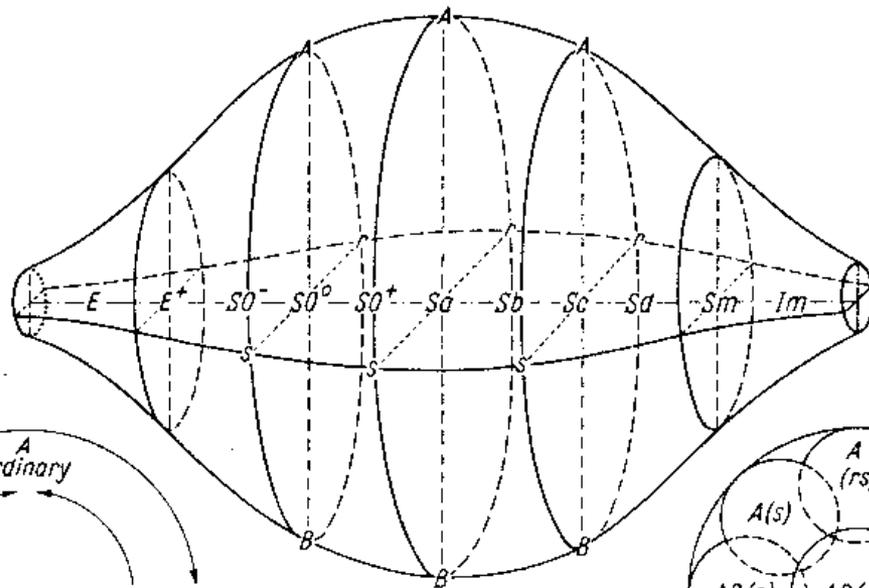
# Усложнение классификации: де Воккулер

Gérard de Vaucouleurs



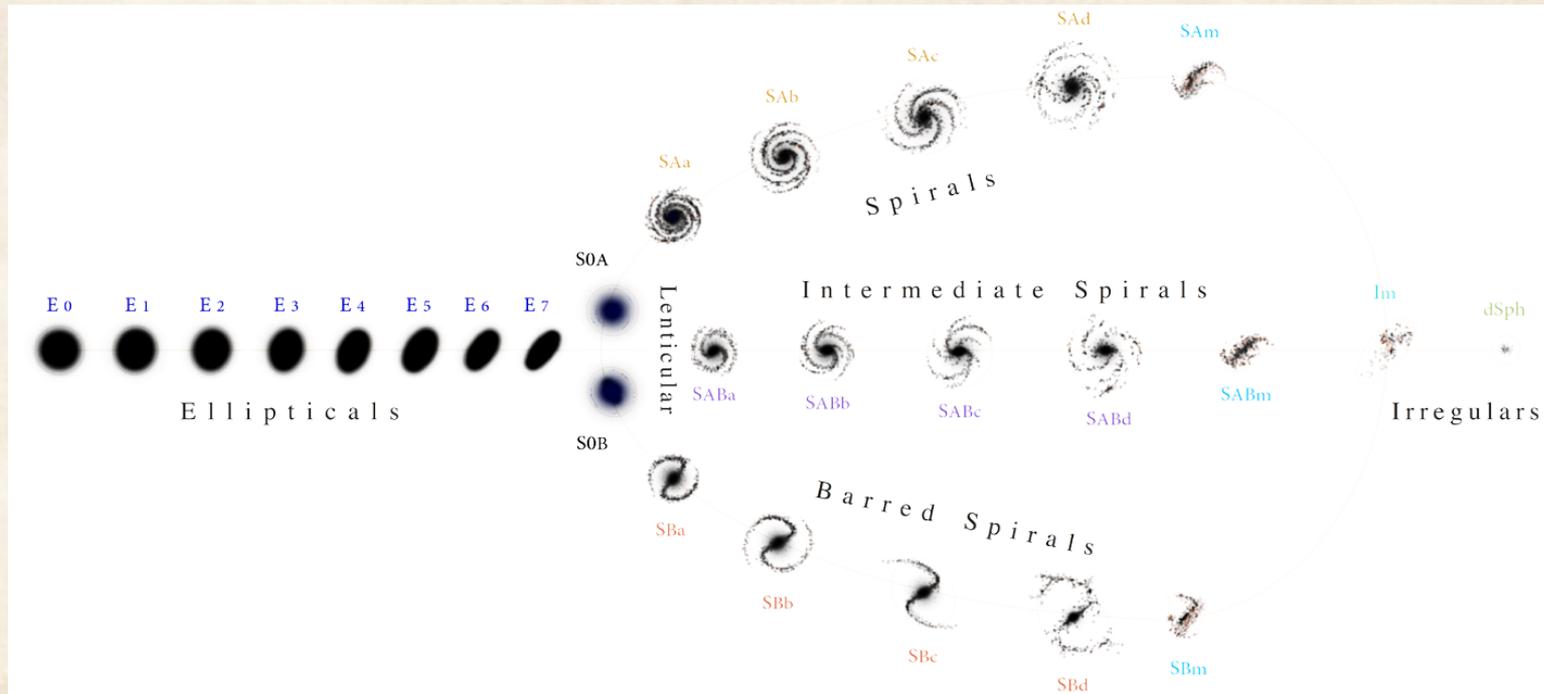
**Born** Gérard Henri de Vaucouleurs  
25 April 1918  
Paris, France  
**Died** 7 October 1995 (aged 77)  
Austin, Texas

ellipticals    lenticulars    spirals    irregulars



- + типы Sd-Sm
- + “промежуточные бары”
- + кольца

# Нумерация типов (каталог RC3, de Vaucouleurs + 1991)



Hubble stage $T$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
de Vaucouleurs class	cE	E	E <sup>+</sup>	S0 <sup>-</sup>	S0 <sup>0</sup>	S0 <sup>+</sup>	S0/a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sdm	Sm	Im

Удобно для цифрового представления

Сейчас тенденция – уход от морфологической классификации в сторону разделения по звездному населению или по динамическим характеристикам

# Гиганты, карлики, пекулярные...

cD = E в центре скоплений,  
протяженная корона, остатки  
спутников...

Karachentsev et al 2013



Classification for dwarf galaxies  
(fainter than the LMC or with  $W < 100$  km/s)

High	gc dE	dEem	BCD
Normal	dS0 Sph	dS0em Transition	BCD Im, Ir
Low	Sph	Ir/Sph Transition	Ir
X-Low	Sph	Transition	Ir HI cld
	Red	Mixed	Blue
	Gas content →		← Color Index

SB ↑

Рес...



# Фотометрические системы

## Johnson/Bessel UBVRI

С 1950 гг. - во многом случайный выбор стёкол, но накоплено много рядов и стандартов

**Johnson-Cousins UBVRIc** – учет чувствительности ПЗС матриц

## ugriz-SDSS

(Sloan Digital Sky Survey) - с 2000 г.

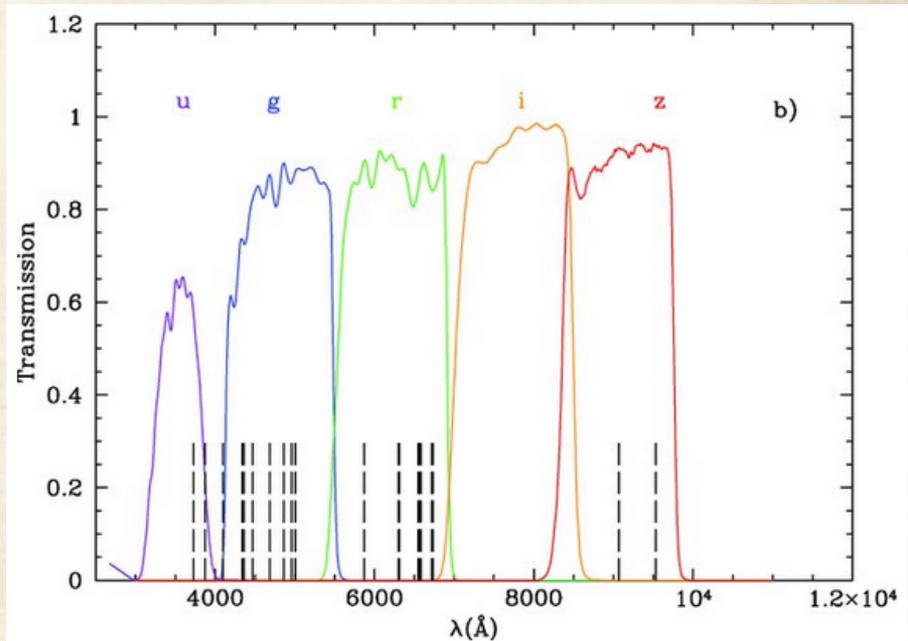
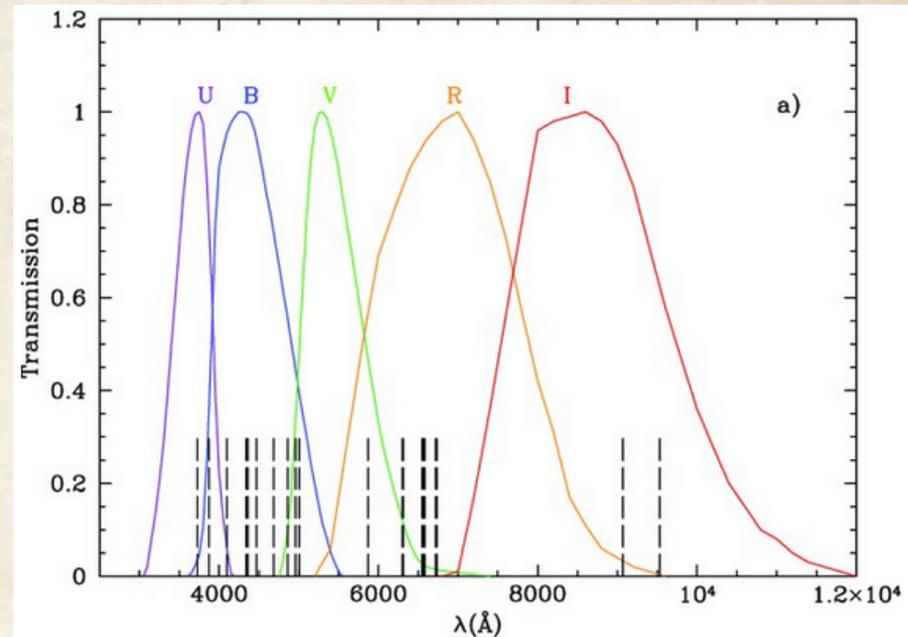
Интерференционные покрытия – дороже, но эффективнее для изучения распределения энергии.

Вторичные стандарты:

~35% неба в SDSS + последующие обзоры (Pan-STARRS, Legacy...)

*Бурнашёв В.И., Бурнашёва Б.А., "Фотометрия и спектрофотометрия звёзд и галактик"*

*Мионов А.В. "Прецизионная фотометрия"*



# Фотометрия галактик: единицы

Светимость:  $L$  [эрг/с]

Наблюдаемый поток:  $F$  [эрг/с/см<sup>2</sup>]

Видимая и абсолютная зв. величина

$m = -2.5 \lg F + \text{const}$ , (нуль-пункт определяется фотометрической системой)

$m - M = 5 \lg (d [\text{Мпк}]) + 25$

В светимостях Солнца:

$M = M_{\odot} - 2.5 \lg (L/L_{\odot})$ ,  $M_{\odot}(B) = +5.48$

Наблюдаемая поверхностная яркость:

$\mu = -2.5 \lg I + \text{const}$ , [mag/arcsec<sup>2</sup>], [ $\text{m}^2/\square''$ ]  $\Rightarrow$  для близких галактик

$$I(L_{\odot}/\text{пк}^2) = (206265)^2 \cdot 10^{0.4(M_{\odot} - \mu - 5)} = 4.255 \cdot 10^8 \cdot 10^{0.4(M_{\odot} - \mu)}$$

$\mu(B) = 27.05 - 2.5 \lg I(B)$ . Характерное значение поверхностной яркости, до которого без специальных ухищрений прослеживаются галактики, в цветовой полосе  $B$  составляет  $\mu(B) \sim 27^m$ /кв. сек. дуги или  $\sim 1 L_{\odot}^B/\text{пк}^2$ . Речь уже о весьма глубоких снимках!

В.П.Решетников "Поверхностная фотометрия галактик" (2002)

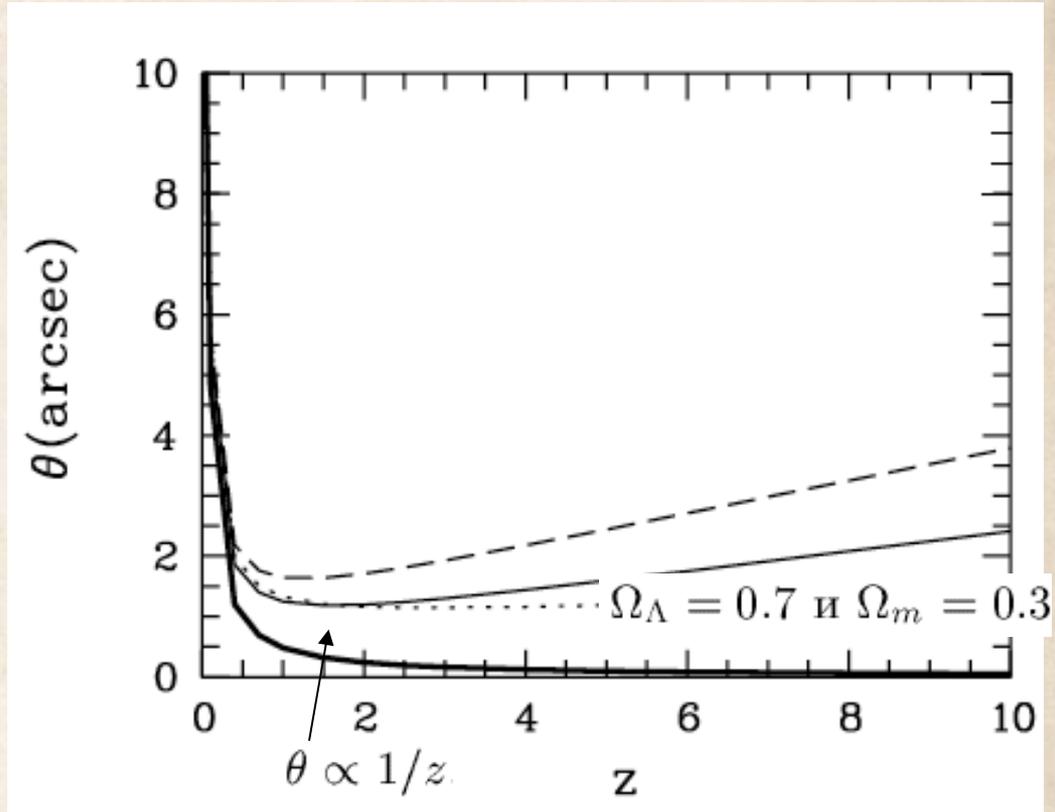
# Космологическое ослабление поверхностной яркости

Лекция 1: В расширяющейся Вселенной различаются фотометрическое расстояние ( $d_L$ ) и расстояние по угловому размеру ( $d_A$ )

$$d_L = (1 + z)^2 d_A$$

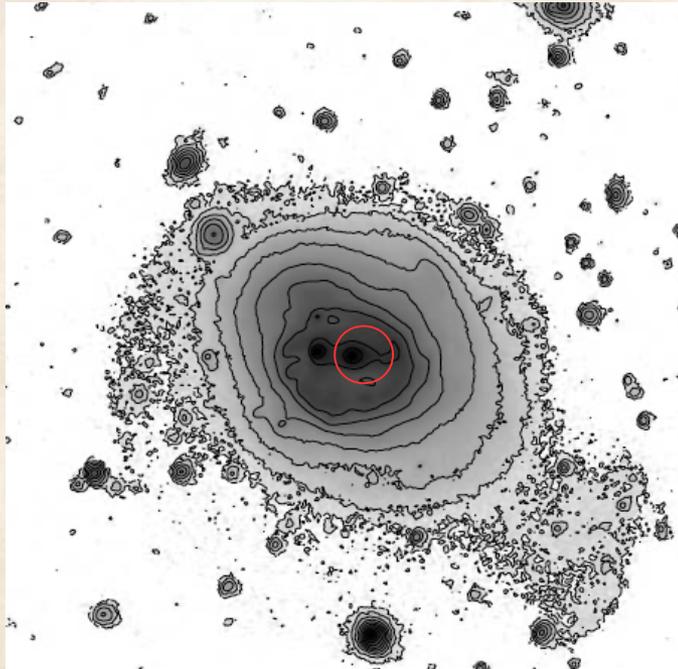
$$I_{obs} = \frac{I_{true}}{(1 + z)^4}$$

Приводит к резкому уменьшению наблюдаемого размера с  $z$  при том же пределе обнаружения



Видимый угловой размер галактики диаметром 10 кпк ( $\theta$ ) в зависимости от красного смещения  $z$  для разных космологических моделей. Толстой непрерывной кривой показана зависимость  $\theta \propto 1/z$ .

# Интегральная величина



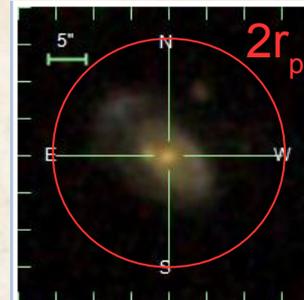
Отличие от фотометрии звезд –  $I(r)$  меняется по-разному в разных объектах.

- Измерение в фиксированной апертуре (для ядер)
- До уровня выбранной изофоты: (RC3:  $m_{25}$ ,  $D_{25}$  – зв. величина и диаметр внутри  $25^m/\square''$  в полосе B)
- Модель распределения яркости
- В пределах “Петросьяновского радиуса” (Petrosian 1976, Blanton et al. 2001), определяемого для фиксированного отношения средней  $I(r)$  к средней яркости внутри  $r$ :

$$\mathcal{R}_P(r) \equiv \frac{\int_{0.8r}^{1.25r} dr' 2\pi r' I(r') / [\pi(1.25^2 - 0.8^2)r^2]}{\int_0^r dr' 2\pi r' I(r') / (\pi r^2)},$$

$$F_P \equiv \int_0^{N_{PrP}} 2\pi r' dr' I(r').$$

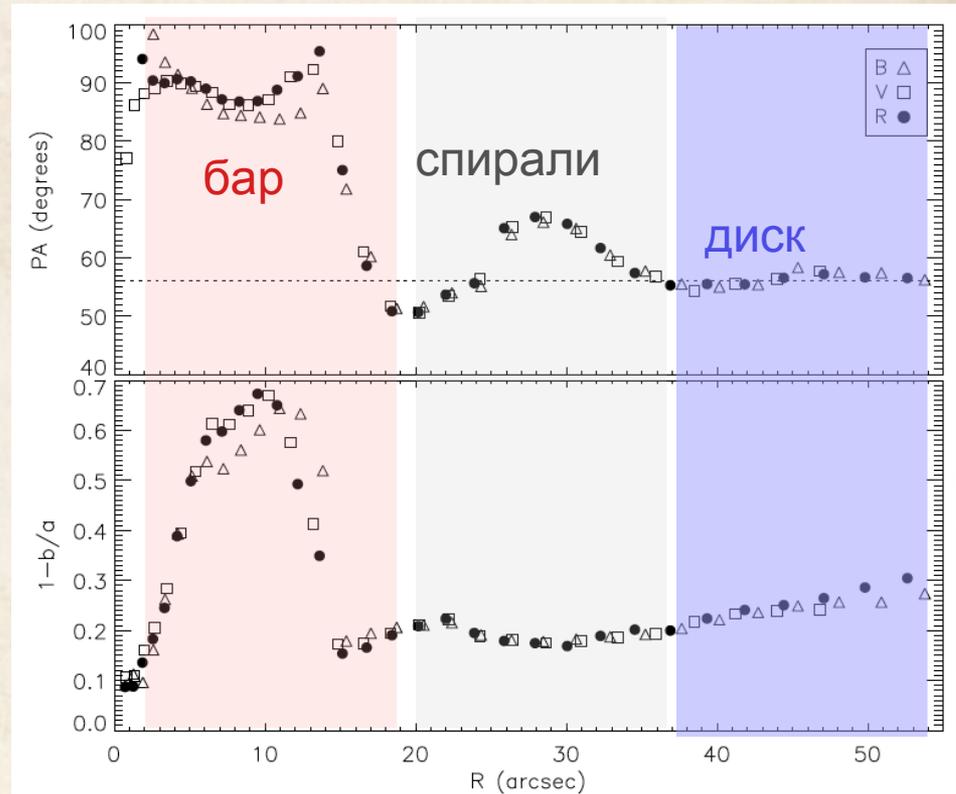
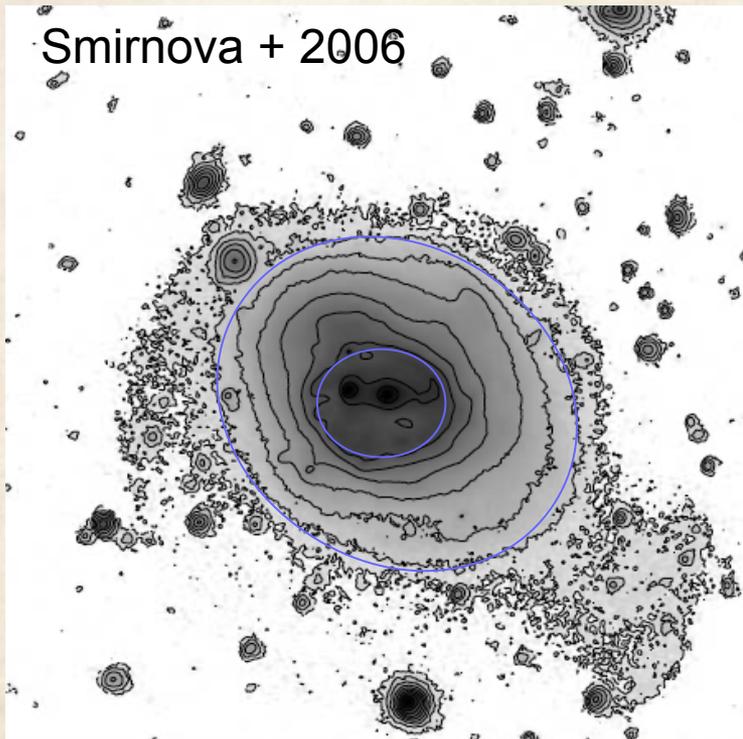
SDSS:  $R_{lim}(r_p) = 0.2$ ,  $N_p = 2$



Magnitudes				
u	g	r	i	z
19.10	17.60	16.83	16.44	16.14
Magnitude uncertainties				
err_u	err_g	err_r	err_i	err_z
0.04	0.01	0.01	0.01	0.01

Image MJD	mode	Other observations	parentID	nChild	extinction_r	PetroRad_r (arcsec)
51259	PRIMARY	2	1237648720693755916	0	0.06	7.43 ± 0.418
Mjd-Date		photoZ (KD-tree method)		Galaxy Zoo 1 morphology		
03/22/1999		0.090 ± 0.0211		Uncertain		

# Изофотный анализ: PA и $\epsilon$



Параметры эллипсов ( $r$ ) :  $I$ , PA,  $\epsilon=1-b/a$ ,  $X_c, Y_c$

Взаимная ориентация диск, бара, наклон диска, сплюснутость балджа

Наклонение диска у картинной плоскости (Хаббл 1926):

$$\cos^2 i = \frac{q^2 - q_0^2}{1 - q_0^2}$$

видимое сжатие:  $q=b/a$

истинное сжатие:  $q_0=0.2$  (спиральные),

0.1-0.5 (карликовые, Staveley-Smith 92)

$i=0^\circ$

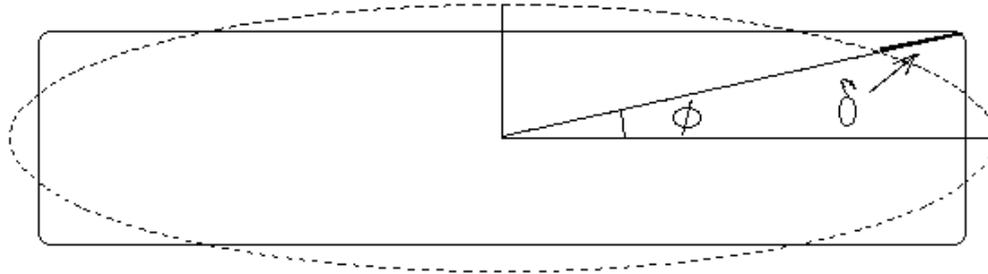


$i=90^\circ$



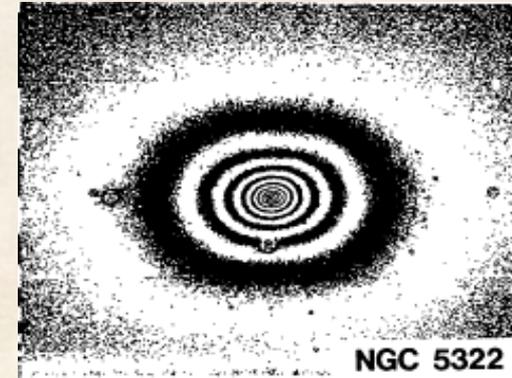
# Изофотный анализ: "boxy" и "disky"

$$\delta(\phi) = \delta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\phi + b_n \sin n\phi).$$

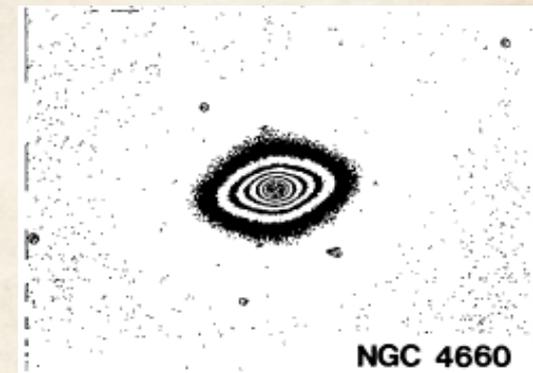


Непрерывная кривая изображает реальную изофоту галактики (ящикоподобную), штриховая линия -- ее приближение эллипсом

Ящикоподобные:  $a_4 < 0$

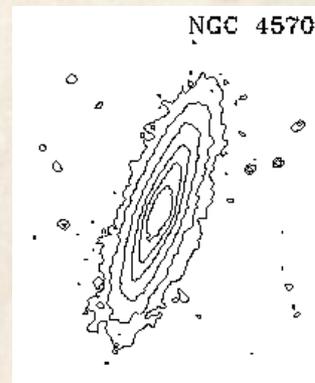
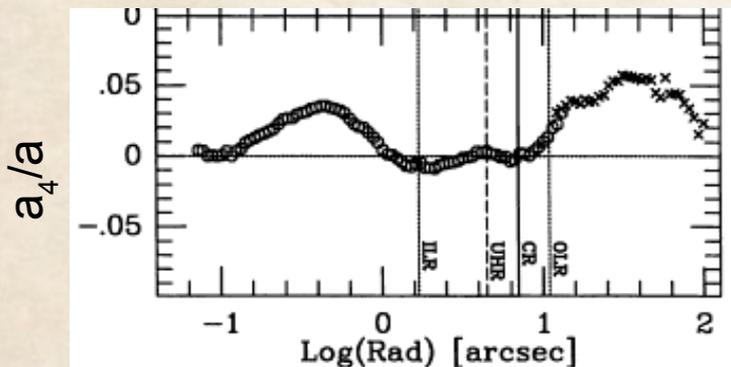


Дископодобные:  $a_4 > 0$



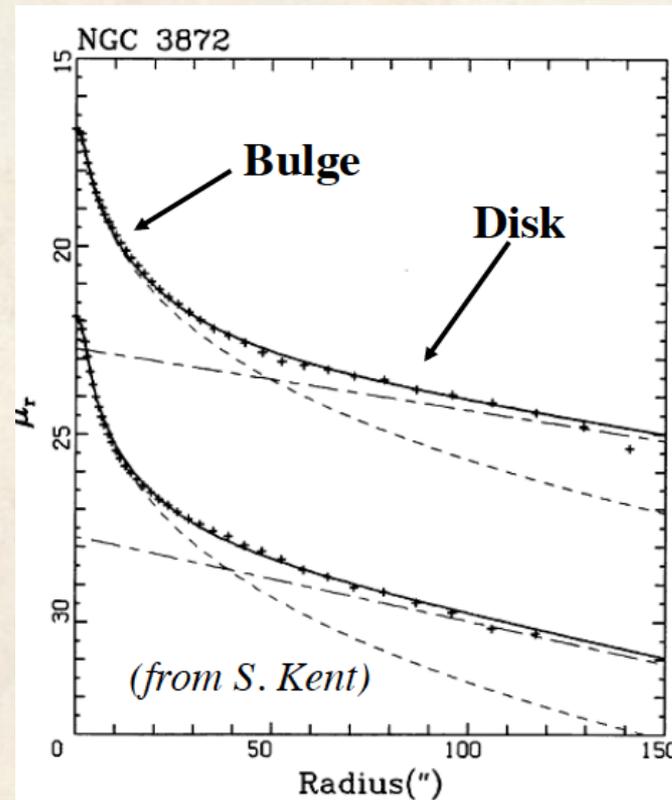
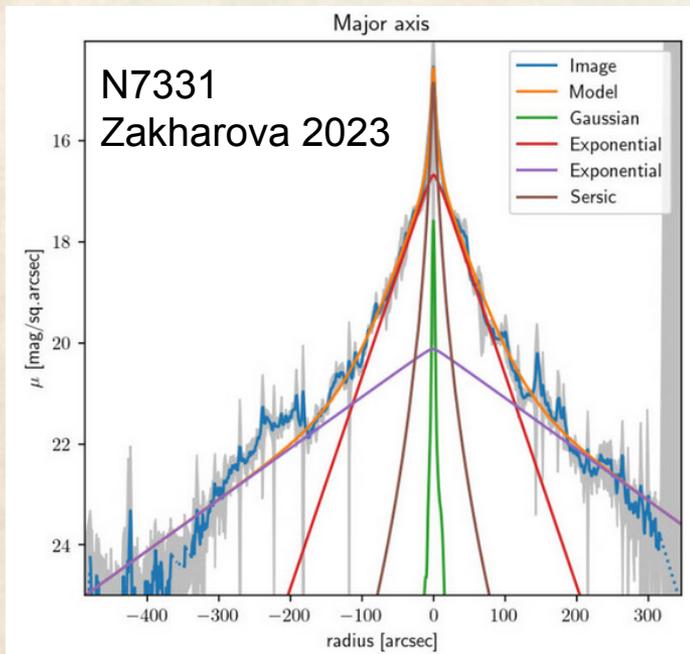
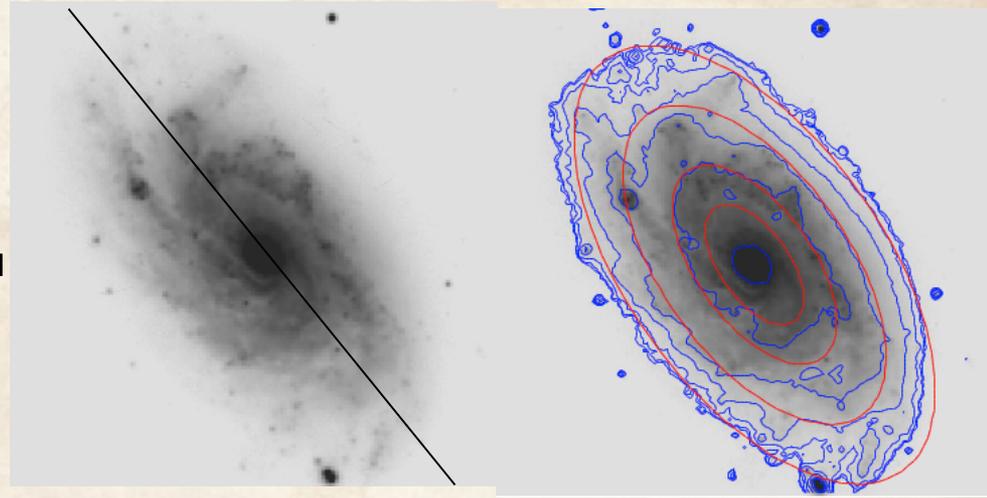
*Bender 1987*

NGC 4570: внутренний и внешний диски



# Радиальный профиль $I(r)$

- Разрез вдоль большой или малой оси
- Усреднение в эллиптических кольцах, ориентированных по внешним изофотам
- $I(r)$  как результат изофотного анализа



# Экспоненциальные диски

$$I(r) = I_0 e^{-r/h}$$

$$\mu(r) = \mu_0 + 1.0857 r/h$$

Удобный закон, хорошо интегрируется:

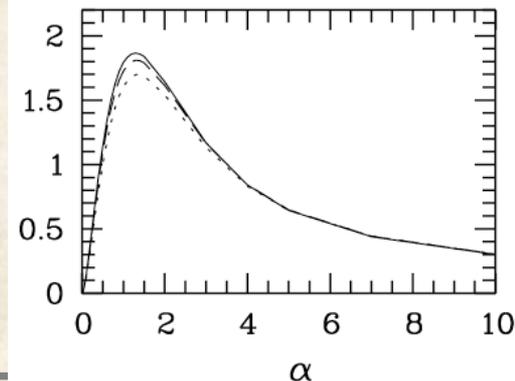
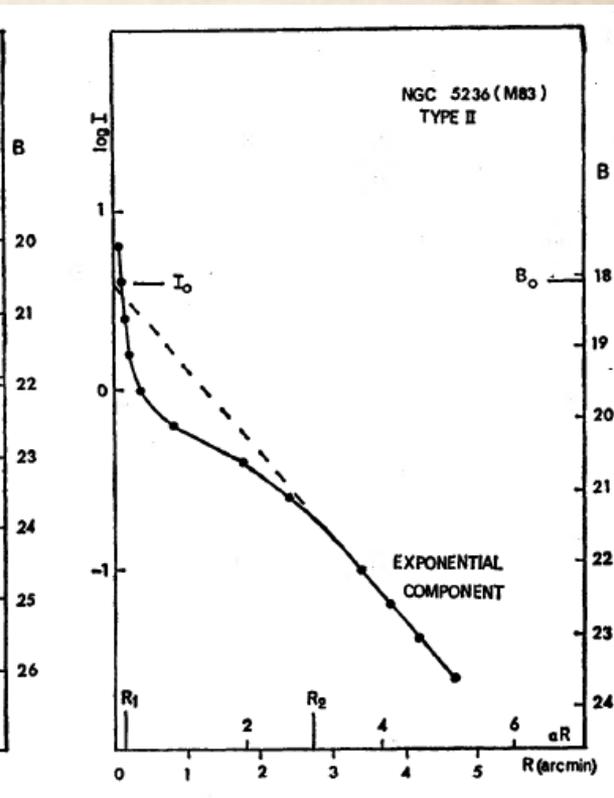
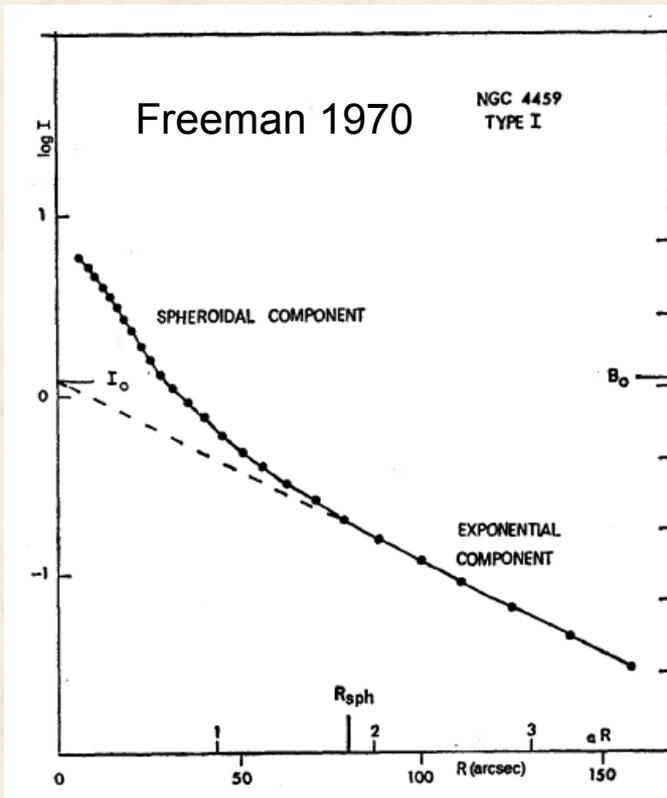
$$L_T = 2\pi I_0 h^2$$

Воспроизводится в моделировании

Кривая вращения:

$$V_{max} = 0.623 \sqrt{GM_{\text{disk}}/h}$$

$$r = 2.15 h$$



# Усеченные диски (truncated)

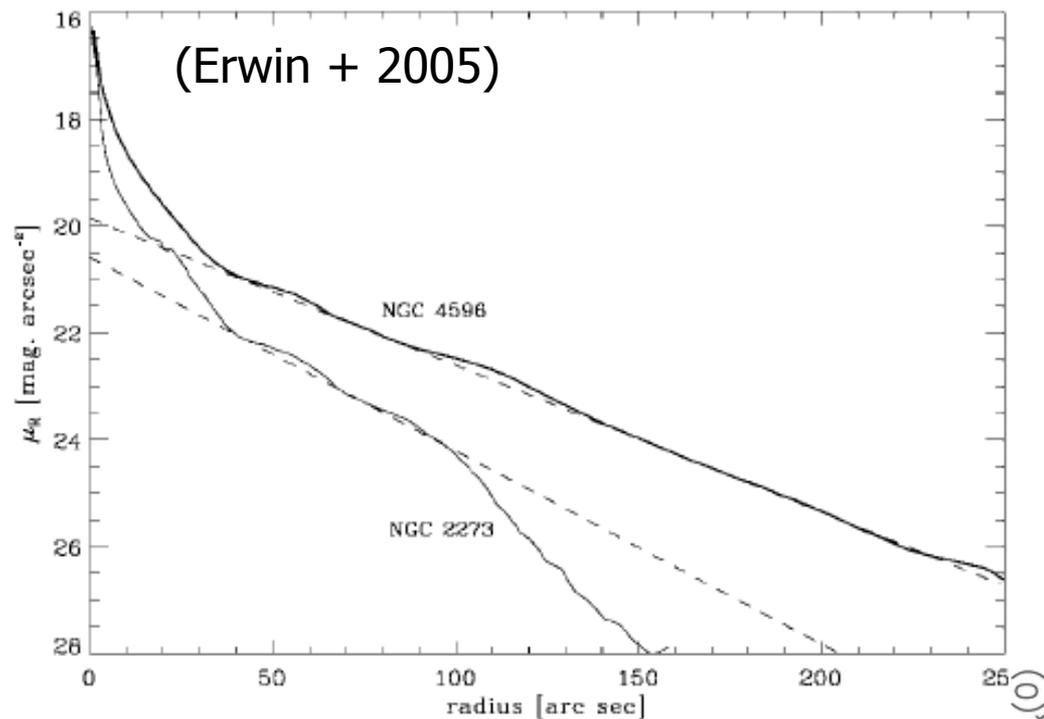
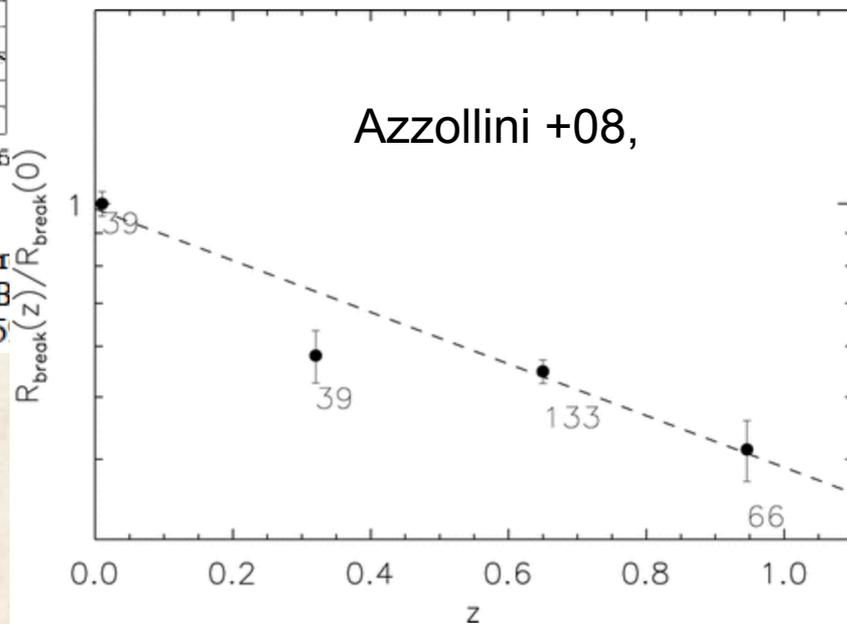


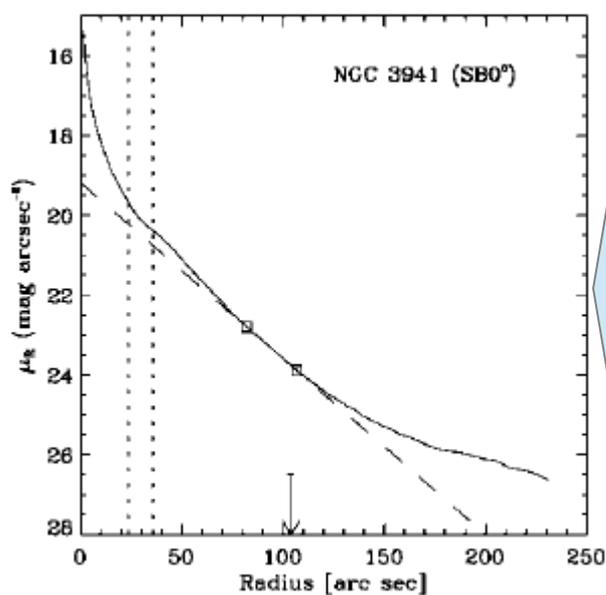
FIG. 1.—Truncated and untruncated surface brightness profiles of barred galaxies: azimuthally averaged surface brightness profiles for NGC 4596 (SB) and NGC 2273 (SBa), along with exponential fits (dashed lines). NGC 45

- Формирование звёздного диска изнутри наружу (парадигма inside-out)
- Миграция звезд, перераспределение углового момента
- Максимальный угловой момент первоначального газового облака?  
(см. Martín-Navarro + 2012)



# Многорярусные (antitruncated): Тип III

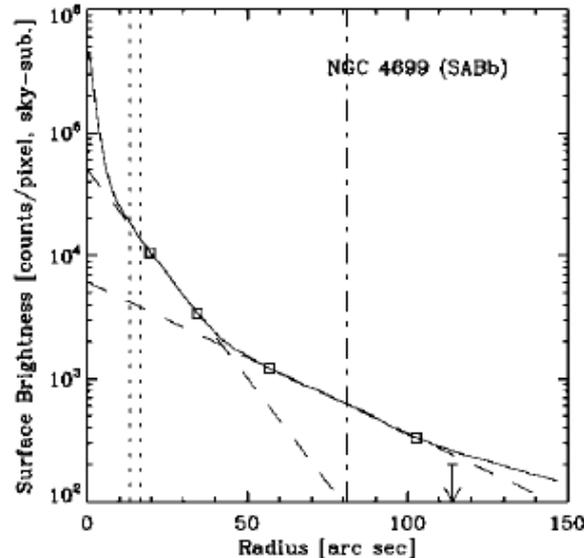
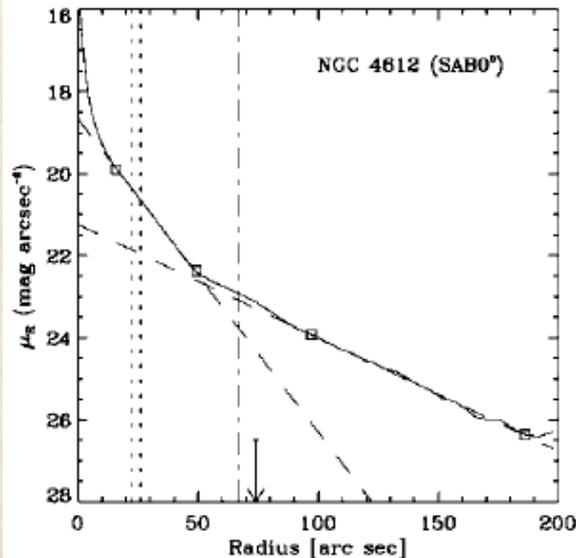
(Erwin + 2005)



Первоначально обнаружены в SB0-SBb галактиках: Type III=25%

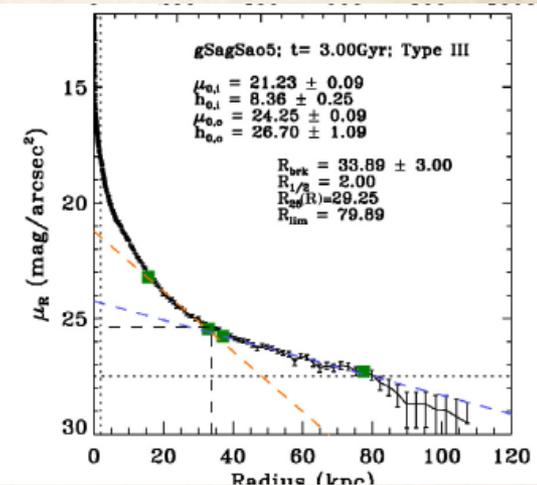
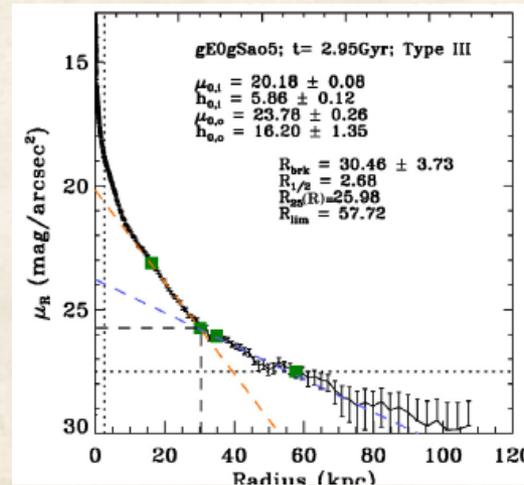
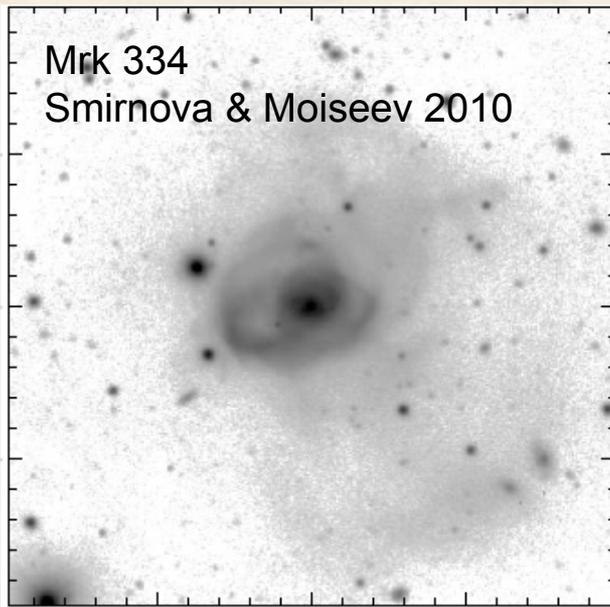
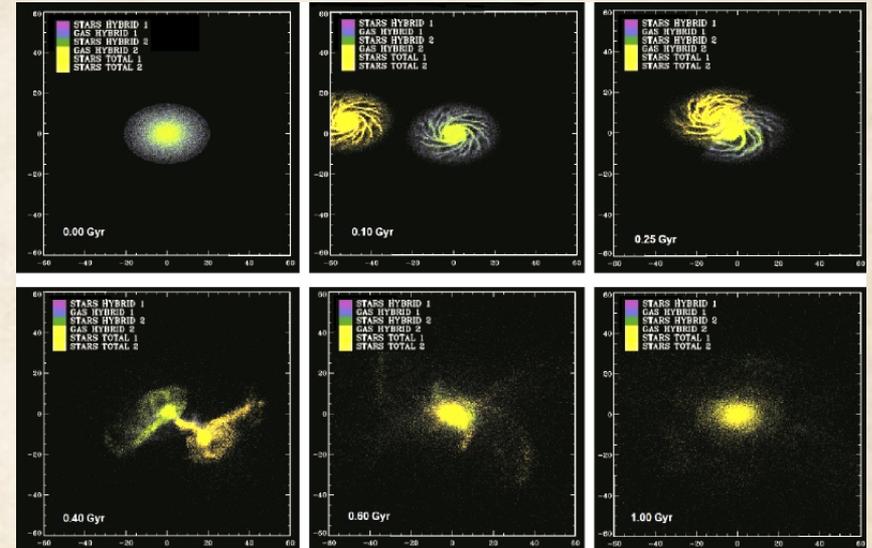
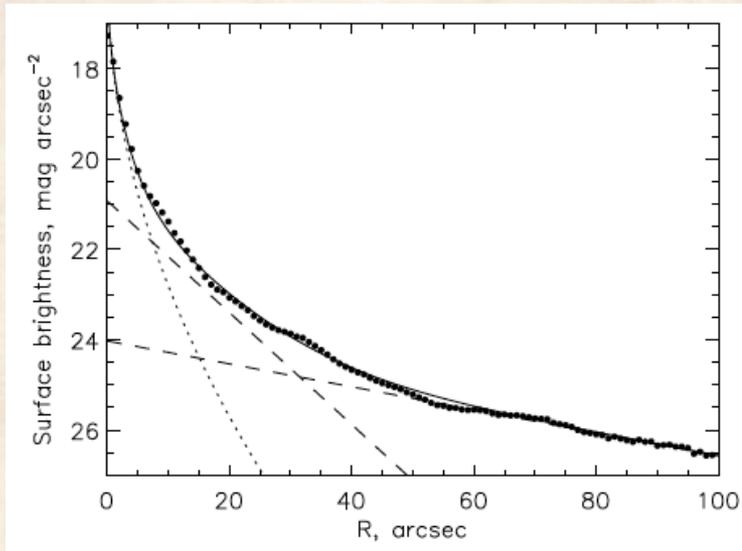
~1/3: Внешние области имеют более низкую эллиптичность, т.е. - это звездное гало.

Но в ~2/3 случаев – именно внешний диск с более длинной радиальной шкалой

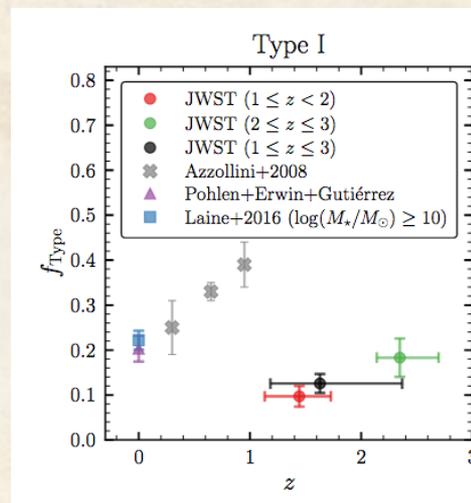
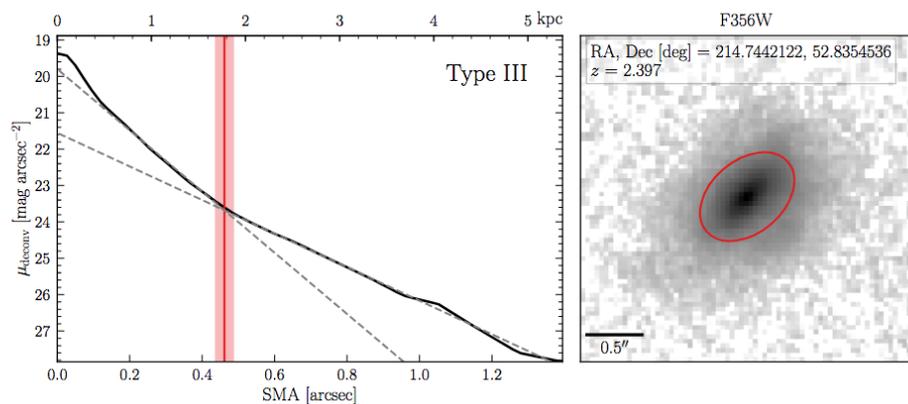
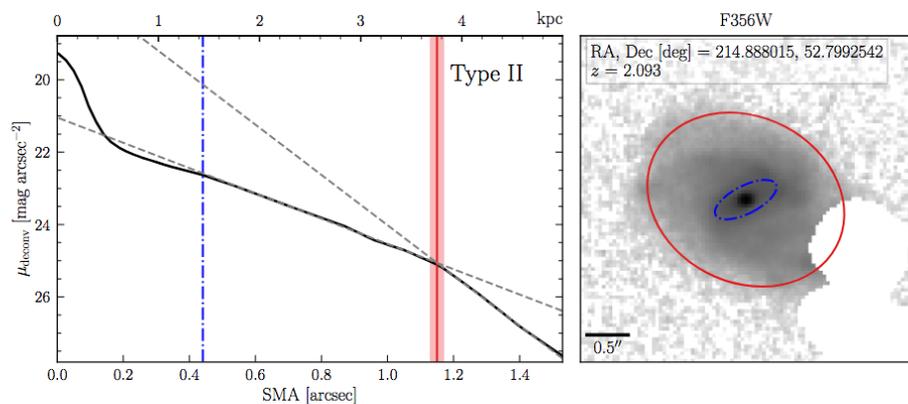
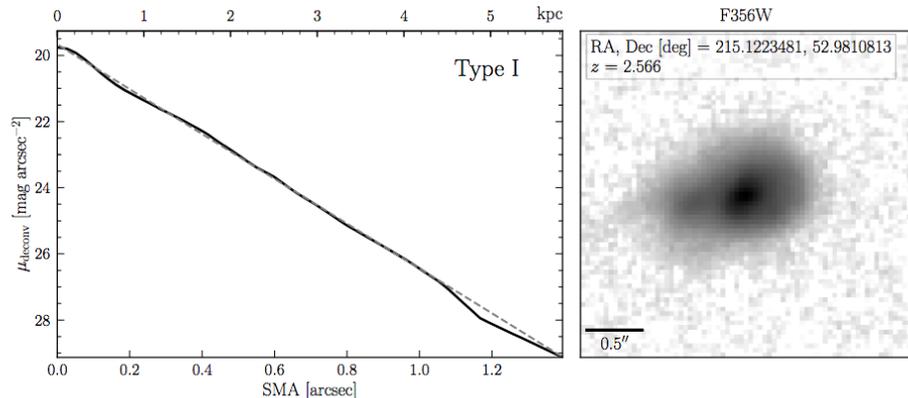


# Происхождение профилей типа III

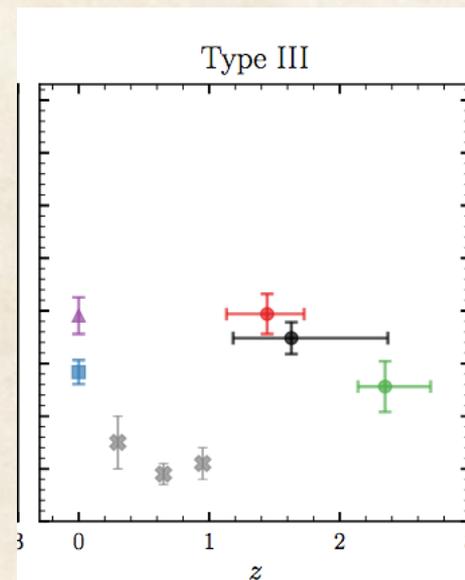
## Моделирование слияния галактик (Borlaff + 2014, major merging)



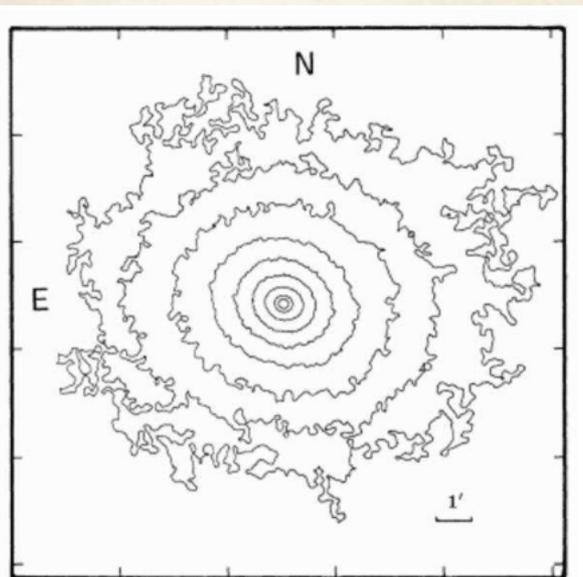
# JWST(z=1-3): профили I, II, III: 13/52/35%



Xu & Yu  
2402.04233



# Закон Вокулера для балджей и E- галактик



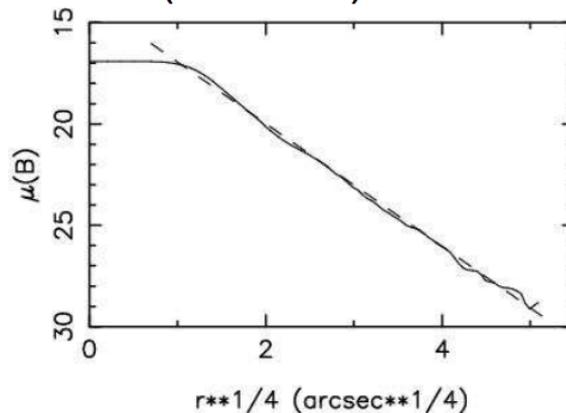
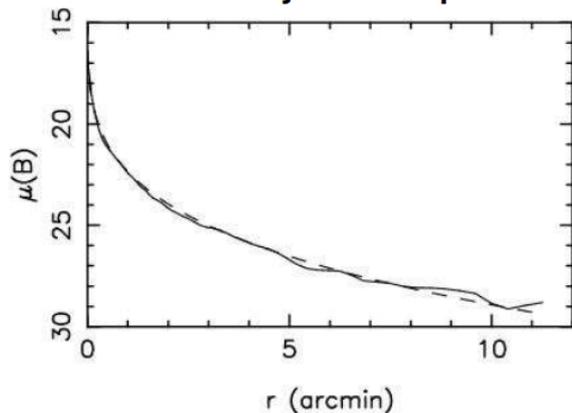
$I \sim \exp(-k(r/r_e)^{1/4})$  de Vaucouleurs' (1948, 1953)

$$\lg \frac{I(r)}{I_e} = -3.33071 \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{1/4} - 1 \right]$$

$r_e$  - эффективный радиус (50% светимости),  $I_e = I(r_e)$

$$\mu(r) = \mu_e + 8.32678 \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{1/4} - 1 \right].$$

Major axis profile of NGC 3379 (solid line)



(Sersic 1968)

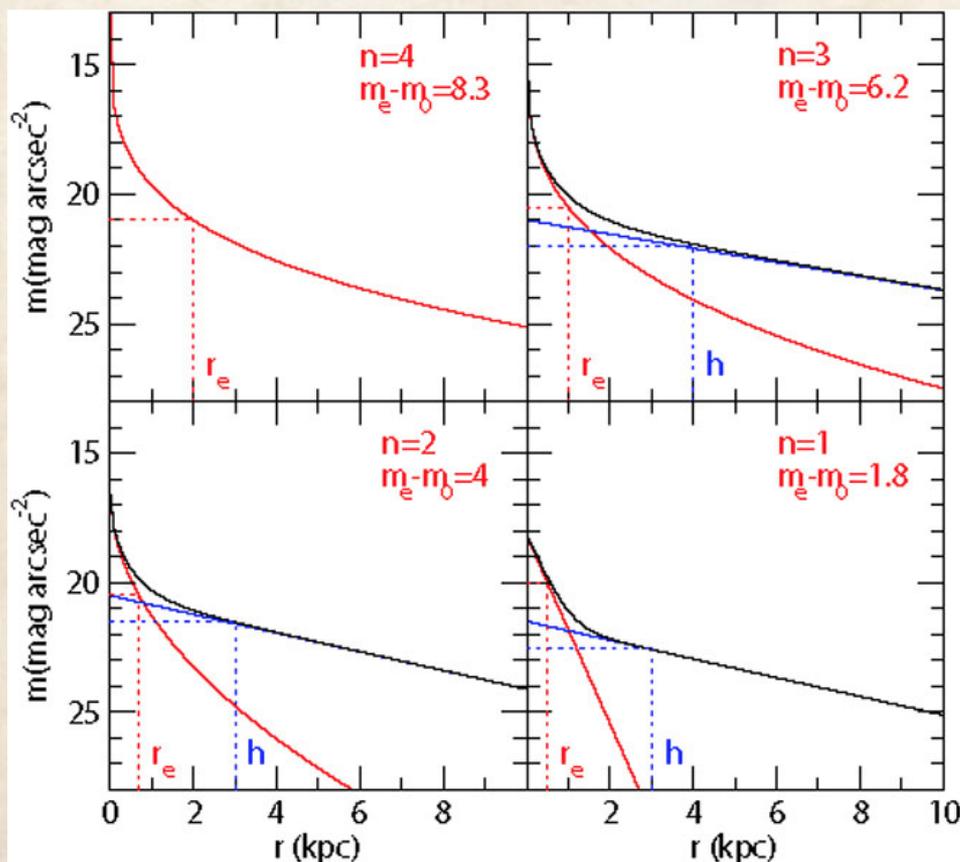
# Закон Серсика (Sérsic 1963)

$$I(r) = I_0 e^{-\nu_n \alpha^{1/n}}$$

$n=4$  - закон Вокулера

$n=1$  - экспоненциальный диск

Очень удобное обобщение, подходит для большинства (?) галактик



$$\mu(r) = \mu_0 + \frac{2.5\nu_n}{\ln 10} \left( \frac{r}{r_e} \right)^{1/n}$$

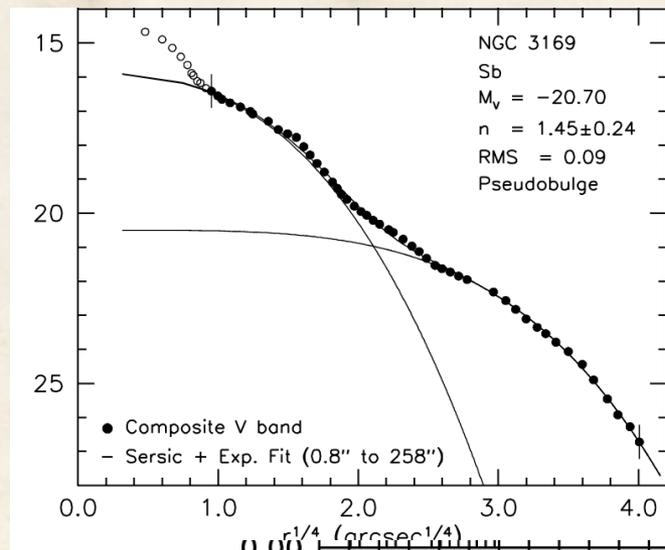
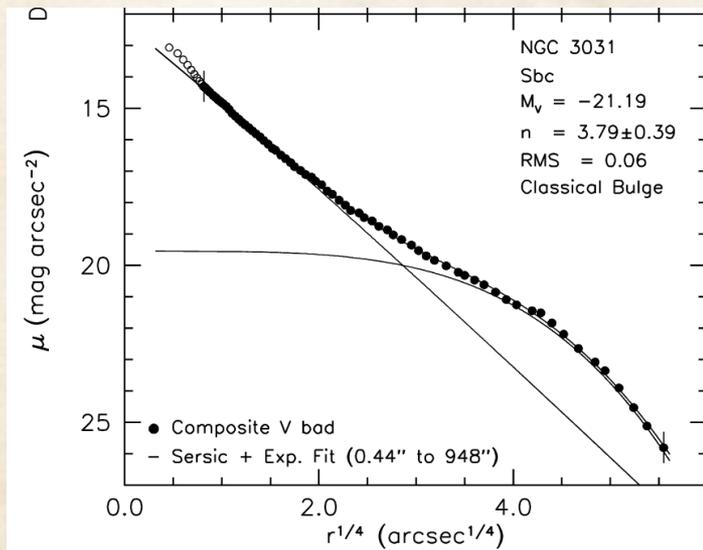
$$\gamma(2n, \nu_n) = \frac{1}{2} \Gamma(2n)$$

(Gadotti 2011)

# Псевдобалджи

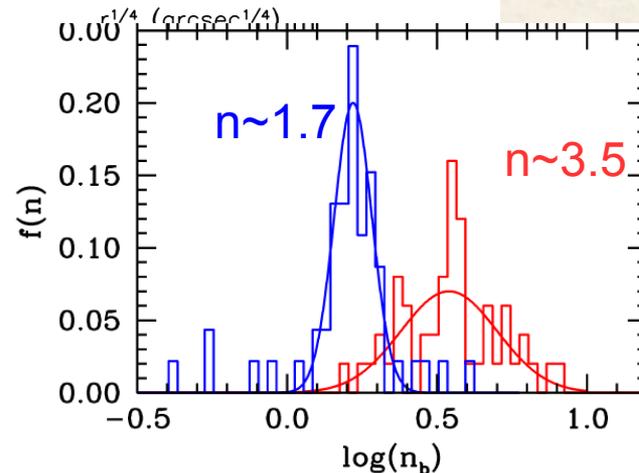
“Классический балдж”:  $n=4$ , динамический горячий ( $V/\sigma \ll 1$ )

Псевдобалджи – то, что сильно от этого отличается,  $n < 2$



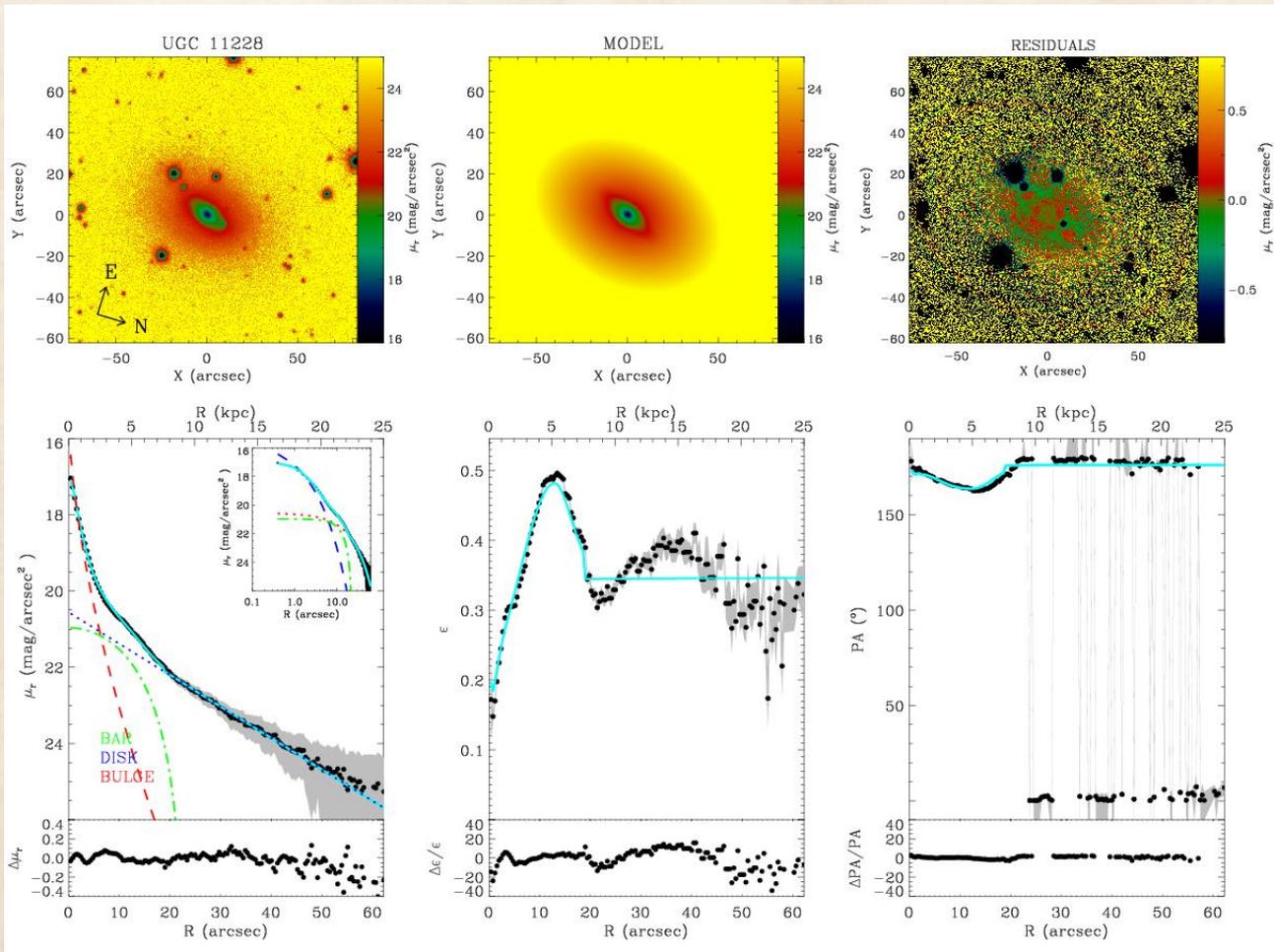
Формирование в результате внутренней (“секулярной”) эволюции?  
 Как правило – меньшее отношение светимостей B/D

Fisher & Drory 2008



# 2D декомпозиция

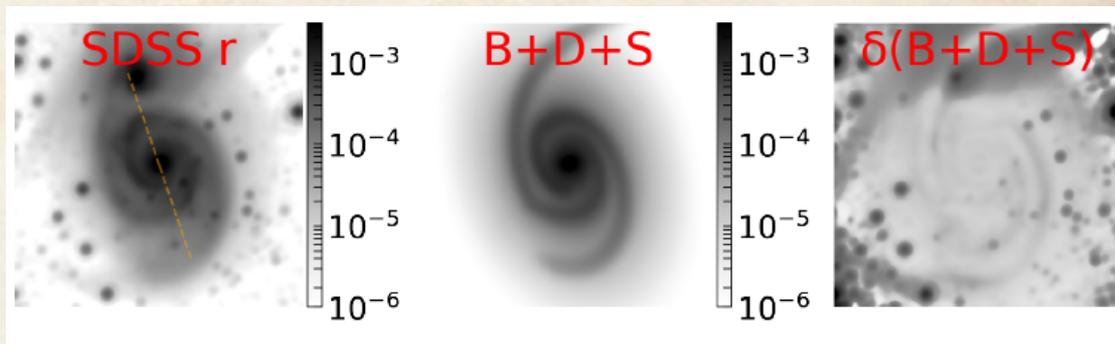
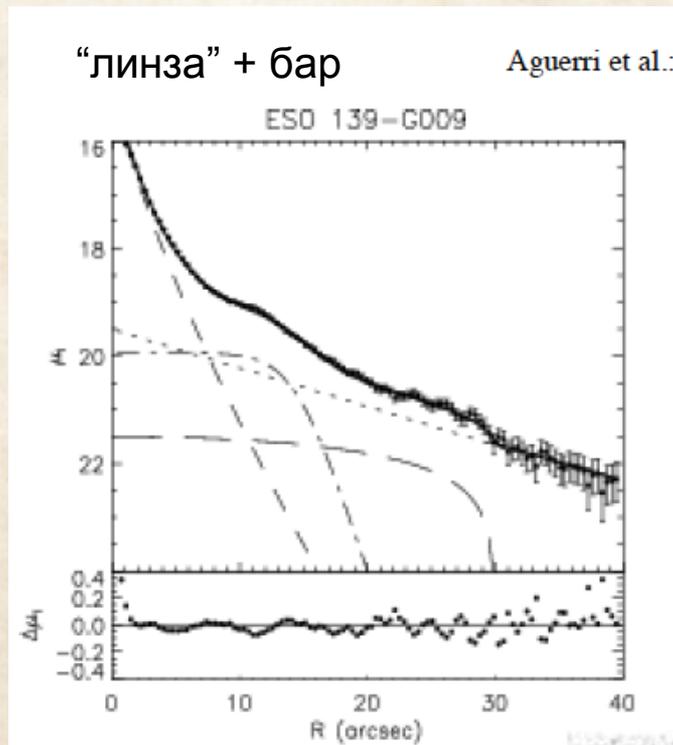
Восстановление реального 3D распределения яркости по проекции – обратная некорректная задача. Но мы хотим определить лишь несколько наиболее характерных параметров. Помогает то, что дисковый и сферический компоненты имеют разную сплюснутость – надо использовать 2D информацию.



Доступные пакеты программ:  
GALFIT, BUDDA,  
GASP2D, IMFIT,  
DECA

Méndez-Abreu + 2017

# Дополнительные компоненты: линзы, бары, спирали...



Marchuk 2402.08531: модель спиралей (12 параметров)

$$I_{\parallel}(r(\varphi), \varphi) = \frac{1}{l} (h_s \times \varrho(\varphi))^{\varrho(\varphi_{\max})} \exp(-\varrho(\varphi))$$

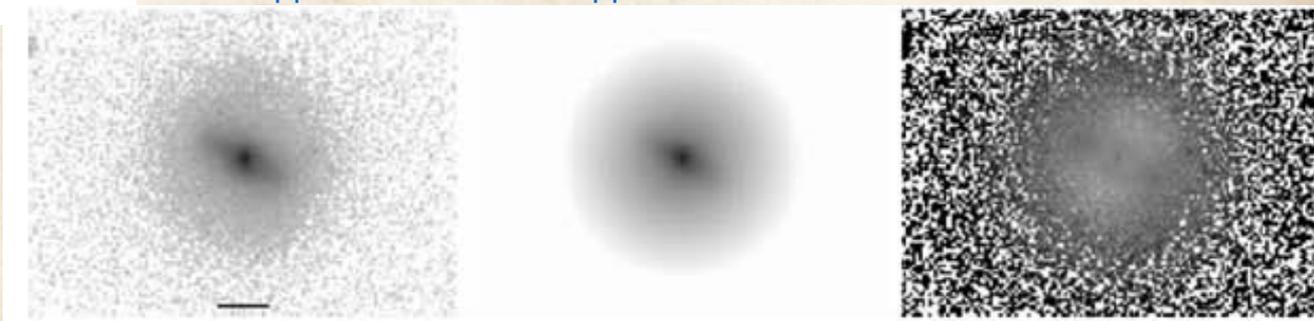
Бар: тот же закон Серсика

$$\mu_{\text{bar}}(r) = \mu_{e,\text{bar}} + c_{n,\text{bar}} \left[ \left( \frac{r}{r_{e,\text{bar}}} \right)^{1/n_{\text{bar}}} - 1 \right]$$

наблюдения

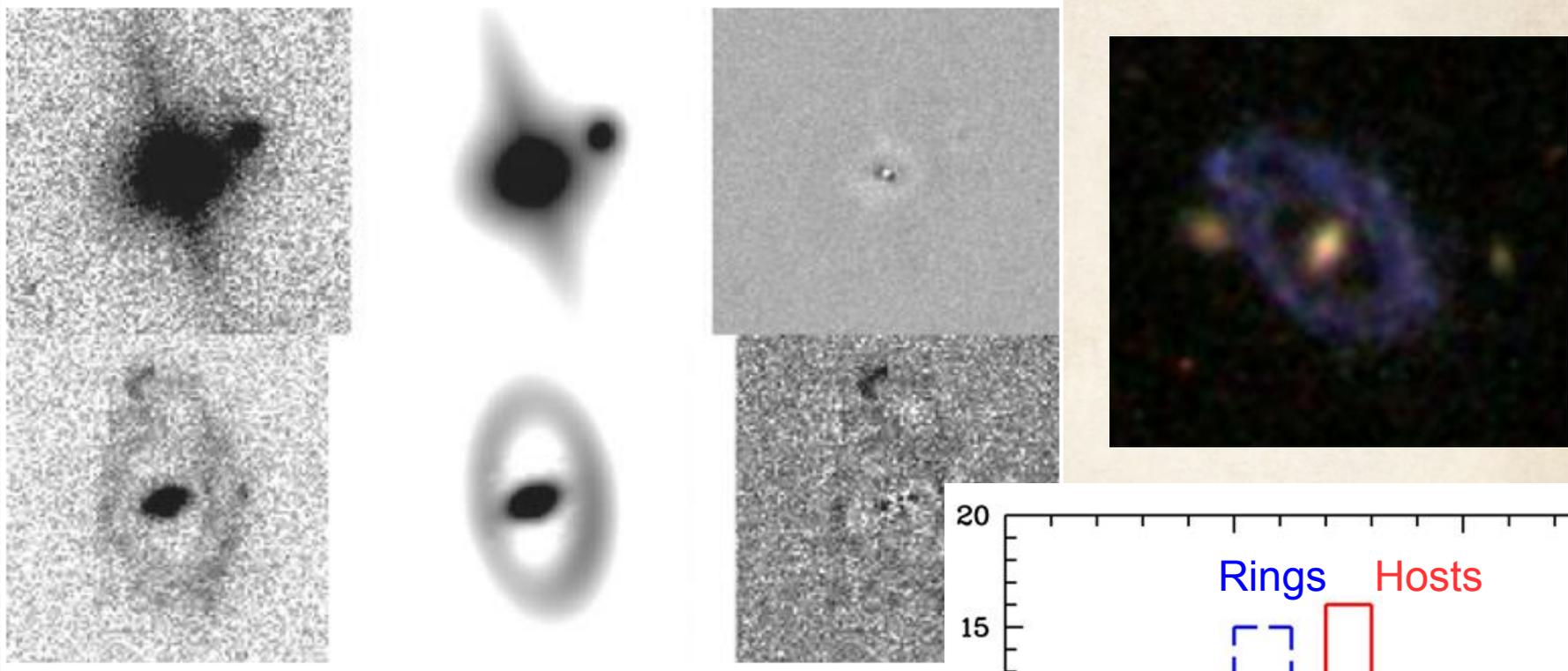
модель

остатки

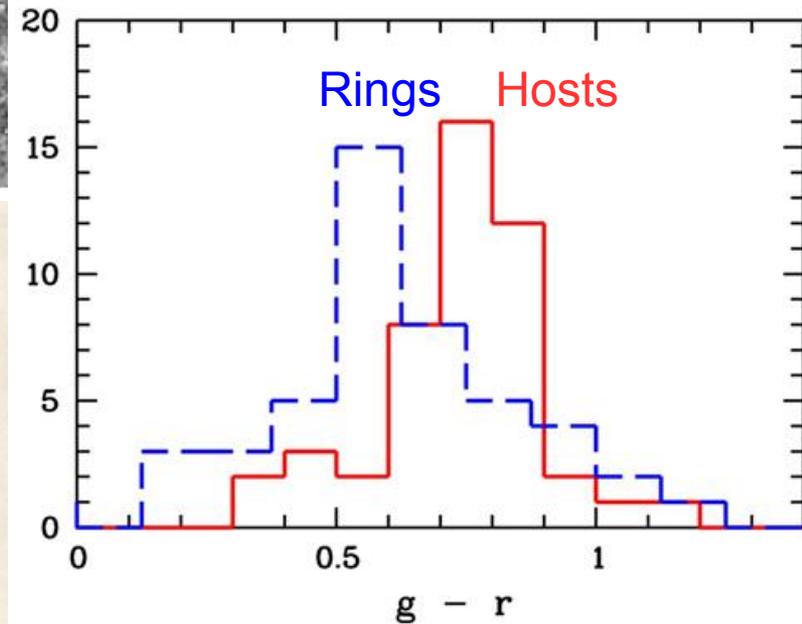


Gadotti  
2009

# Кольца



GALFIT 2D:  
Examples of the PRGs images modelling: SPRC-58 (top), SPRC-7 (bottom). From left to right: original SDSS r-band image, 2D model, and residual image.



# Галактики видимые с ребра: вертикальная шкала диска

$$I(z) = I_0 \operatorname{sech}^2(z/z_0)$$

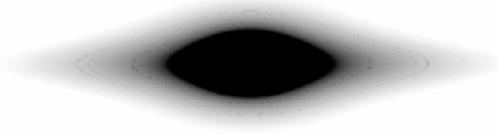
Факторы роста относительной толщины ( $z_0/h$ ):

- взаимодействие, поглощение спутников
- бары

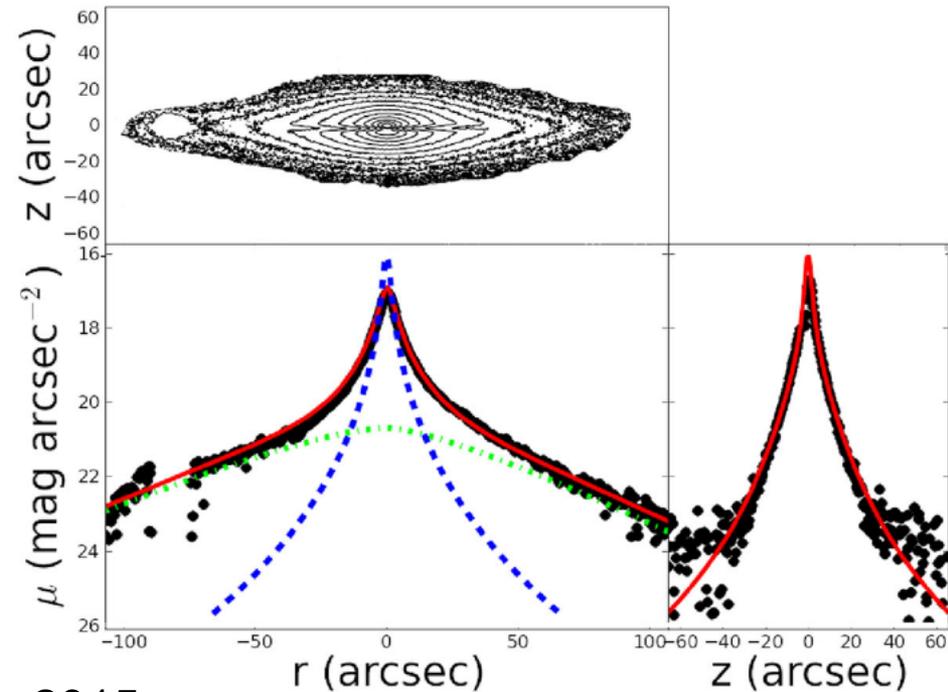
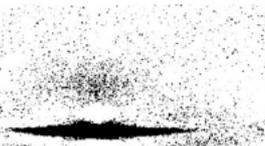
Galaxy



Model



Residual

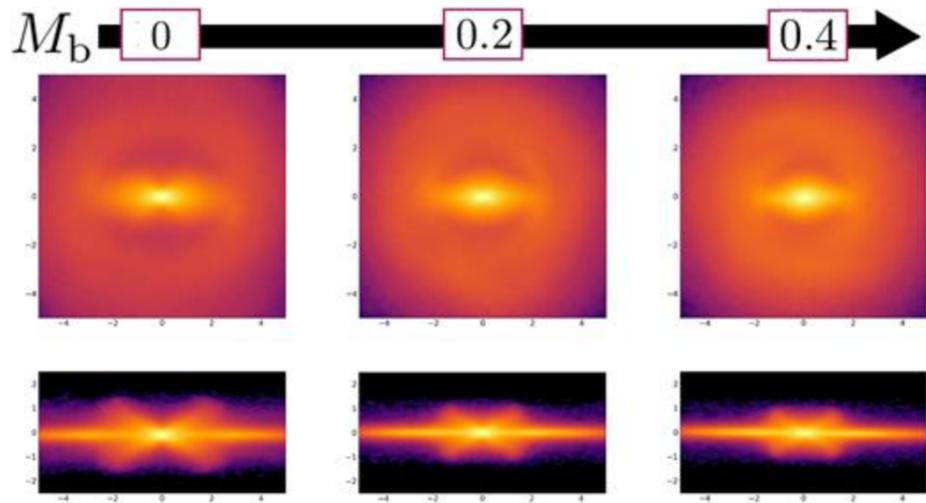
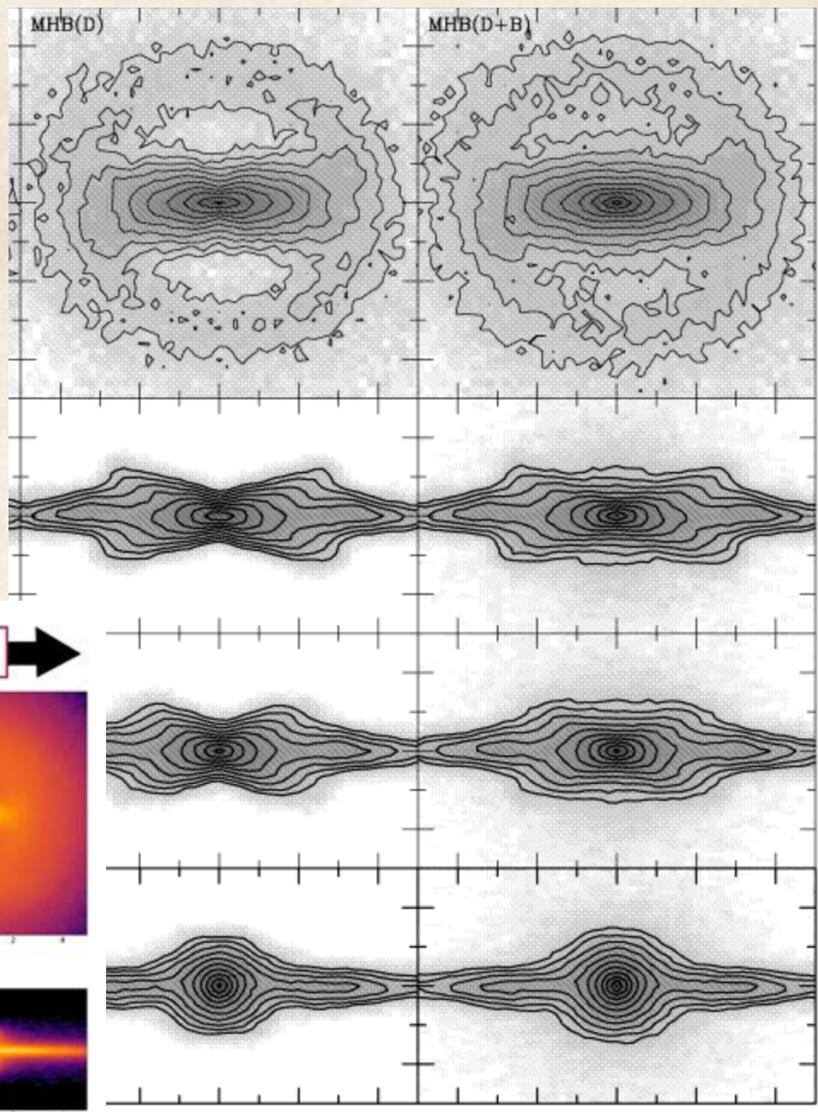


Mosenkov +2015

# X-подобные "арахисовые" балджи: бары с ребра



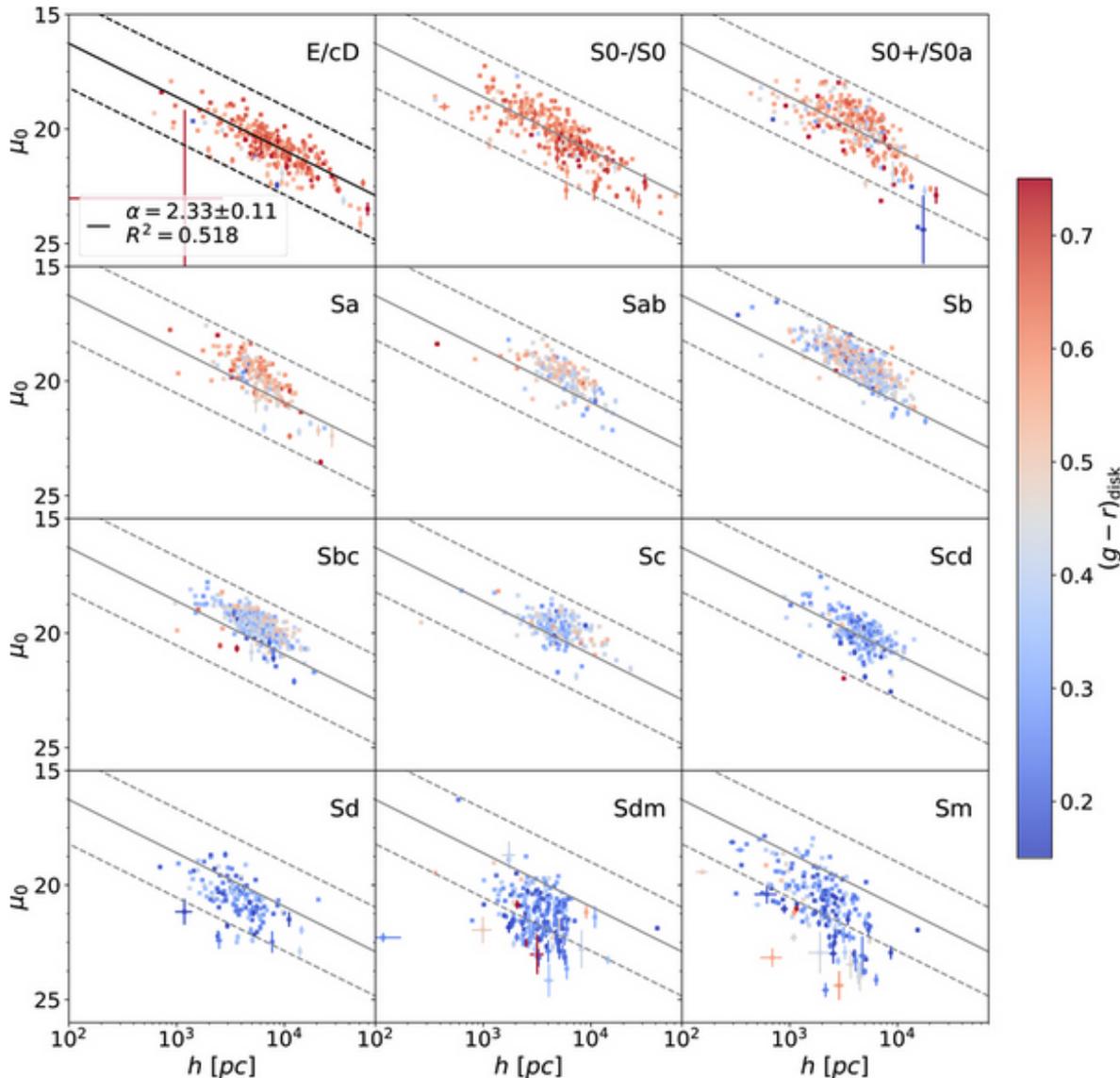
Зависимость от параметров  
бара, балджа, диска, гало...



Smirnov & Sornikova 2018

Athanassoula 2005

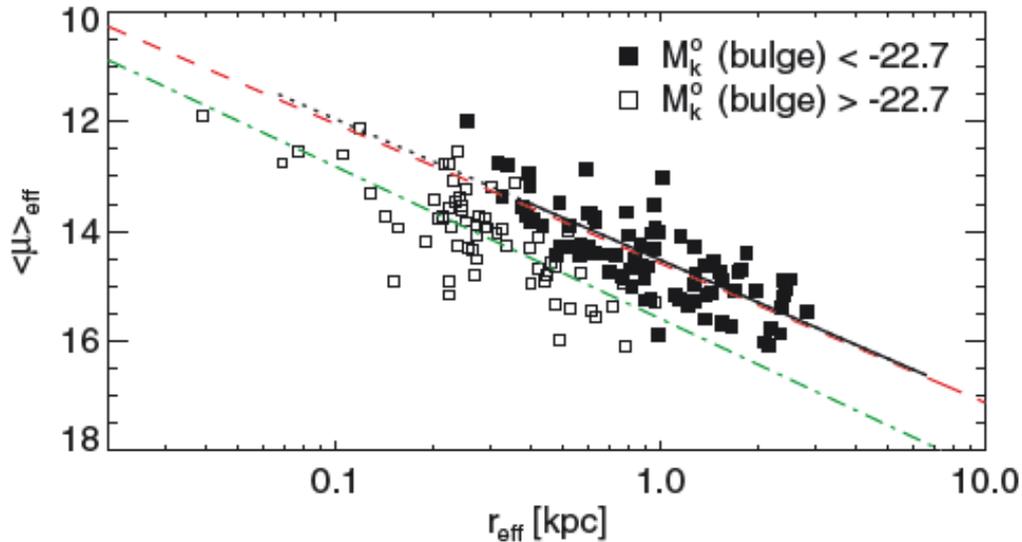
# Масштабные соотношения: шкала и яркость диска



- Параметры галактик не могут быть произвольными
- Группируются для объектов со сходным происхождением и эволюцией

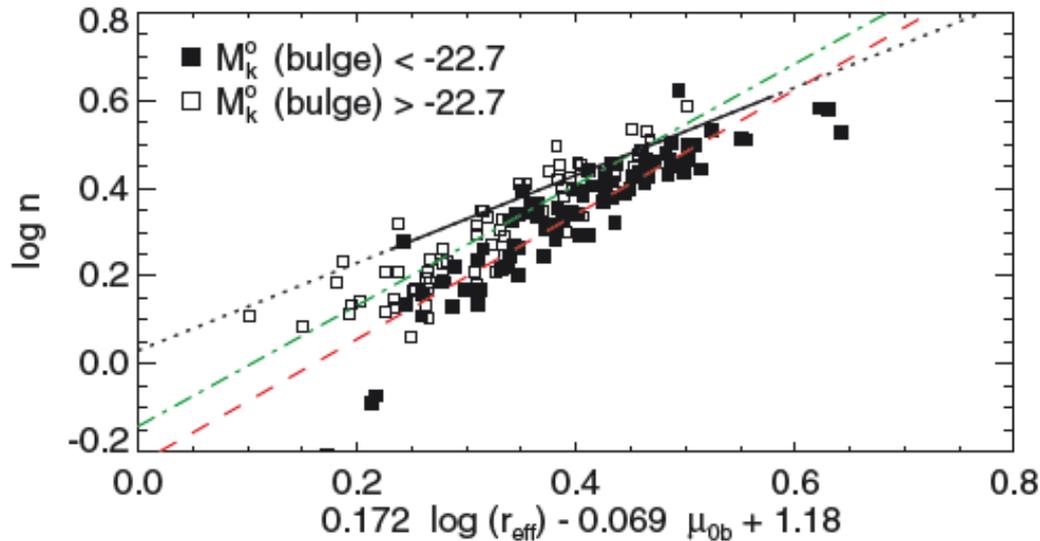
Quilley & Lapparent 2023  
3106 SDSS galaxies,  $i < 70^\circ$

# Соотношение Корменди: балджи и E-галактики



Kormendy (1977)

$$\mu_e \approx 3 \lg r_e + \text{const}$$



Введение третьего параметра –  $n$  делает соотношение более тесным

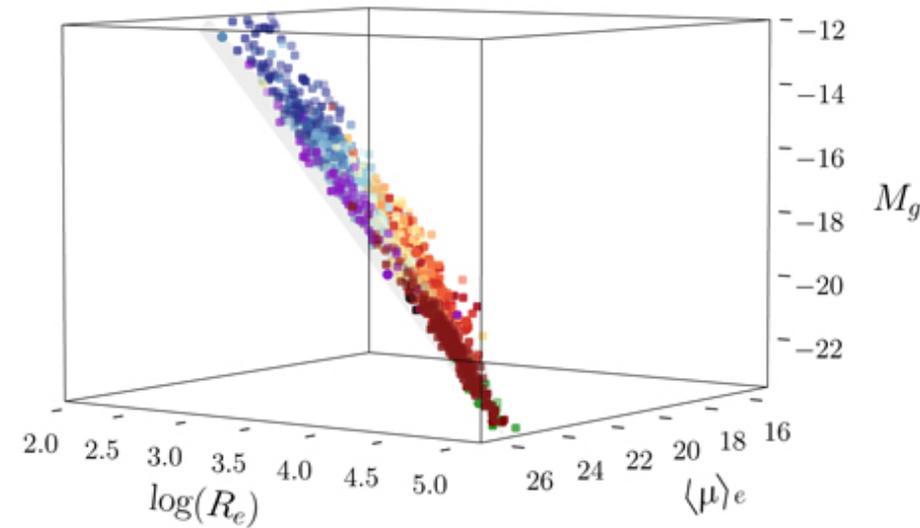
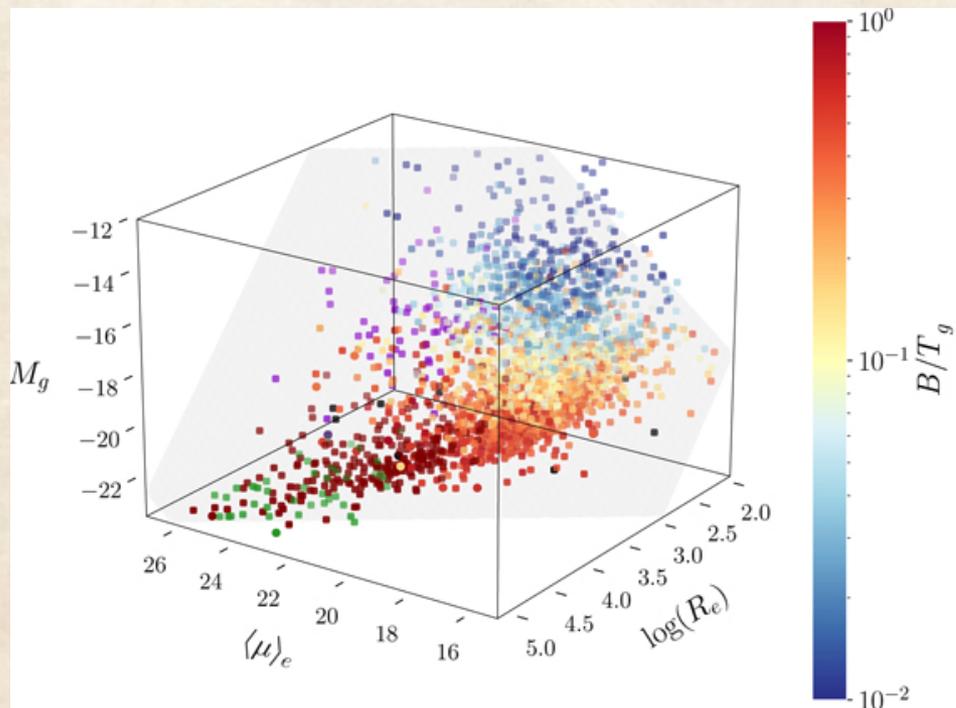
Laurikainen + 2010

# Проекция более общего соотношения ( $r_e - \mu_e - M_{\text{tot}}$ )

Связь с общей светимостью галактики

Общее соотношение для галактик всех типов, от E/cD до балджей Sm

Следствие слияния галактик вдоль хаббловской последовательности?



Quilley & Lapparent 2023