

А.В. Моисеев, САО РАН

# Методы исследования галактик.

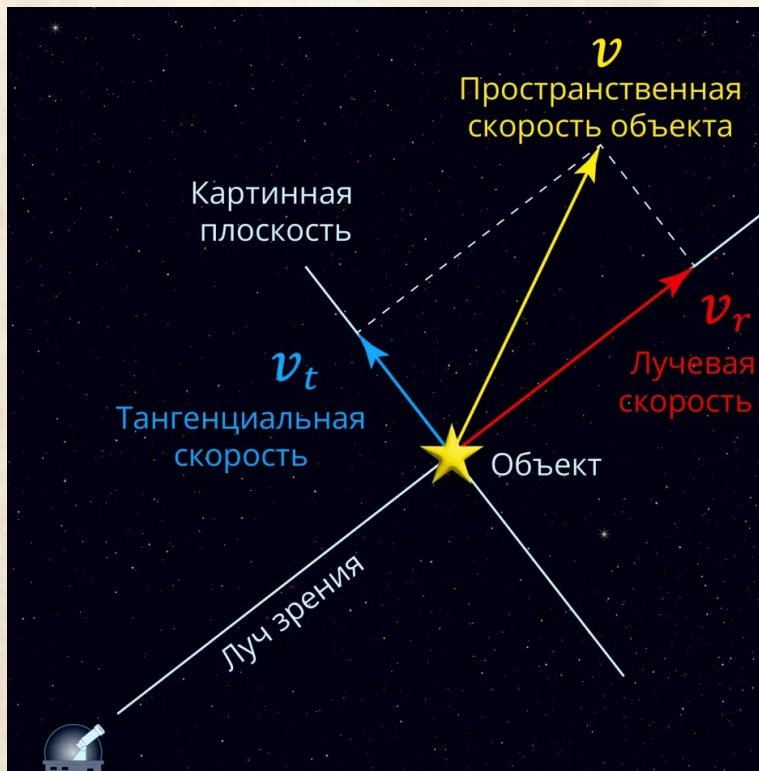
## Лекция V.

Кинематика и динамика галактик: дисперсия скоростей, динамическая масса, темная материя. Некруговые движения.

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

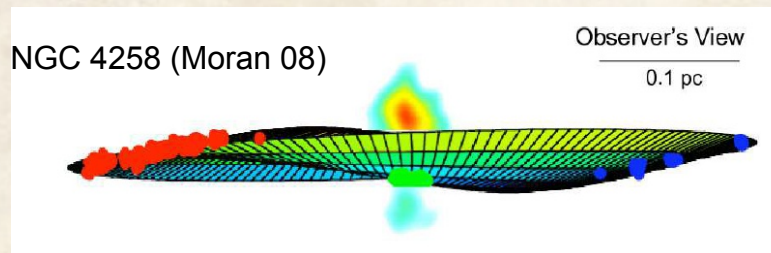
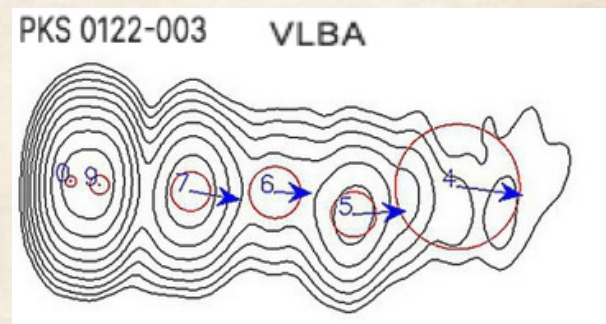
# >99 % информации о кинематике во внегалактики – из измерения скоростей по лучу зрения

Как правило, изучается распределение скоростей вдоль луча зрения – LOSVD, характеризующаяся не только скоростью  $v$ , но и более высокими моментами ( $\sigma, h_3, h_4 \dots$ )



В редких случаях внегалактических объектов тангенциальная скорость тоже измеряется:

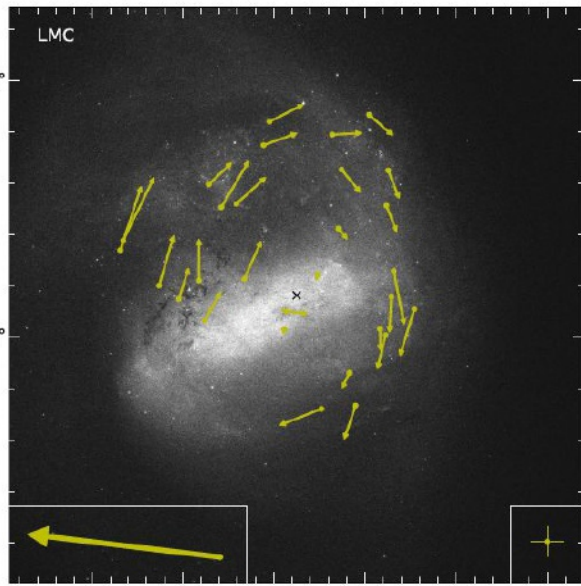
- Активные галактические ядра (джеты и мегамазеры)



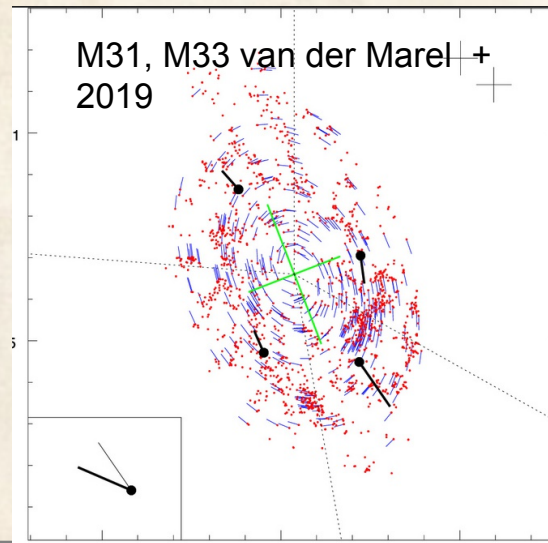
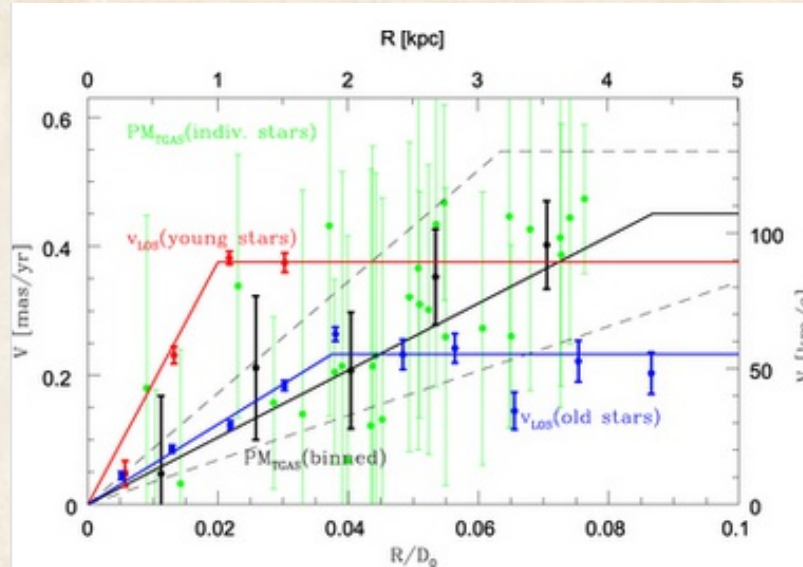
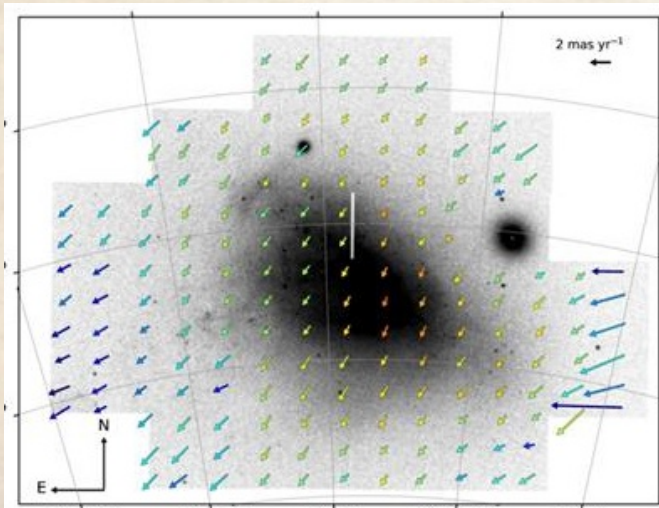


# Полный вектор скорости: есть для близких галактик

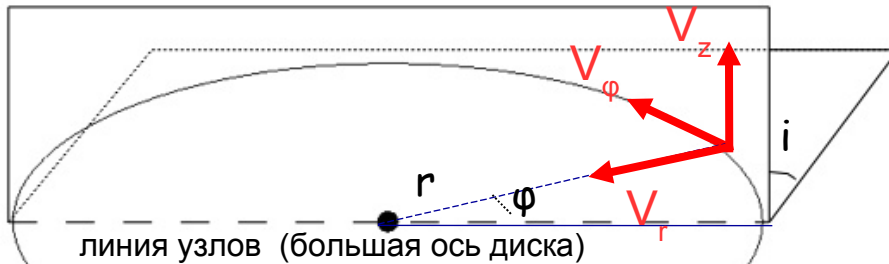
van der Marel & Sahlmann 2016



SMC, 2 млн звезд: Niederhofer + 2021



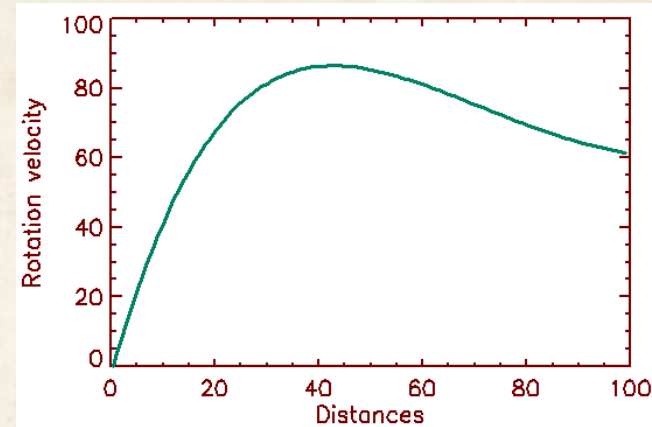
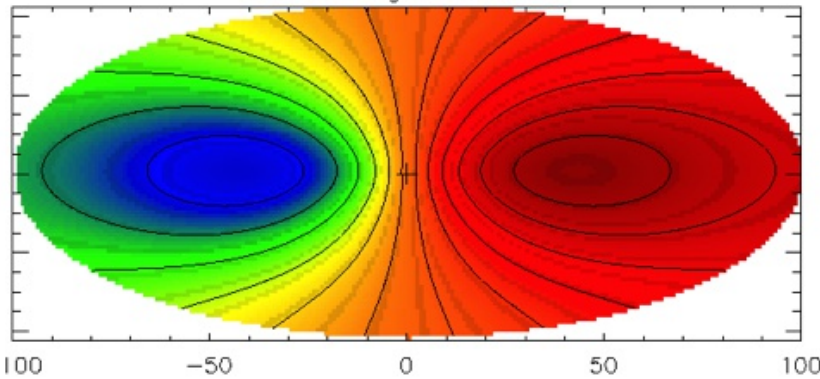
# Поле скоростей вращающегося диска



$$V_{OBS} = V_{SYS} + V_R \sin \varphi \sin i + V_\varphi \cos \varphi \sin i + V_Z \cos i$$

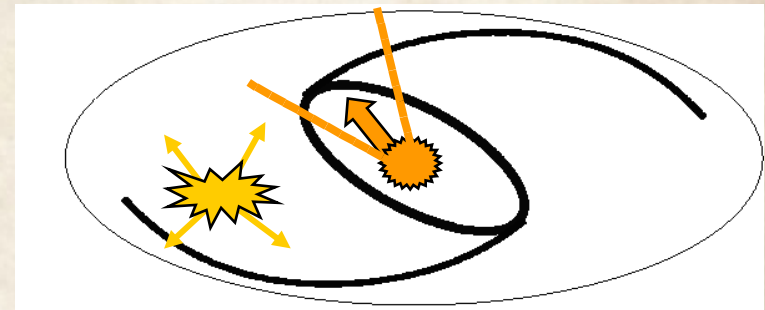
$$V_R = V_Z = 0, V_\varphi = V_{ROT}$$

line-of-sight velocities



“Некруговые движения”:

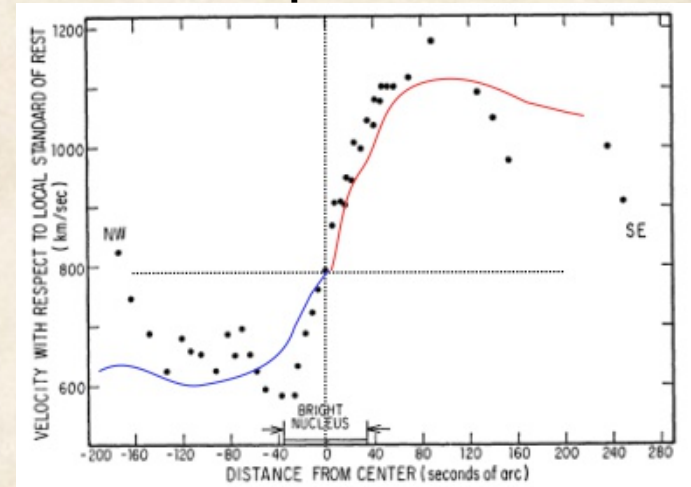
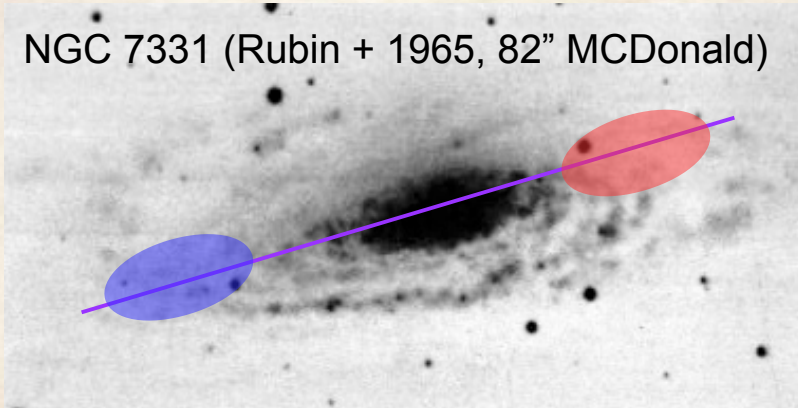
- Бар и спиральные волны, кольцевые волны
- Активное ядро, области звездообразования, “галактический ветер”
- Вращение, но в другой плоскости: изгиб диска (warp), полярные кольца, приливные возмущения





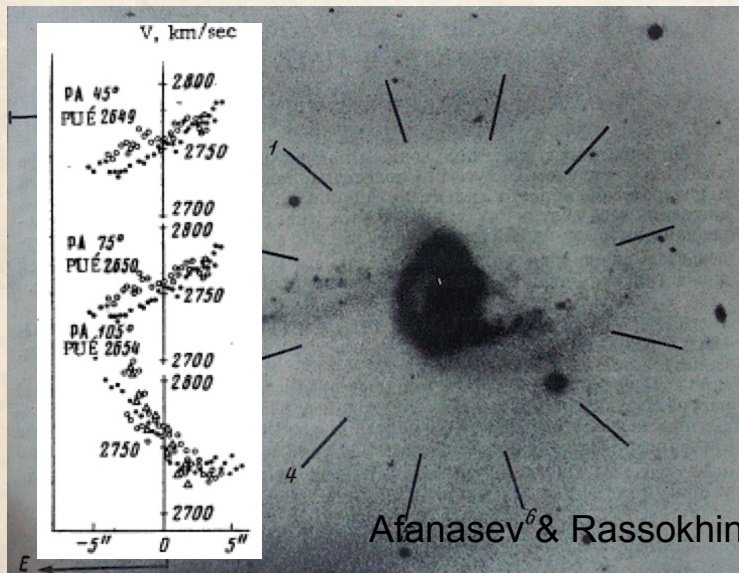
# Первые измерения: кривая лучевых скоростей

NGC 7331 (Rubin + 1965, 82" MCDonald)

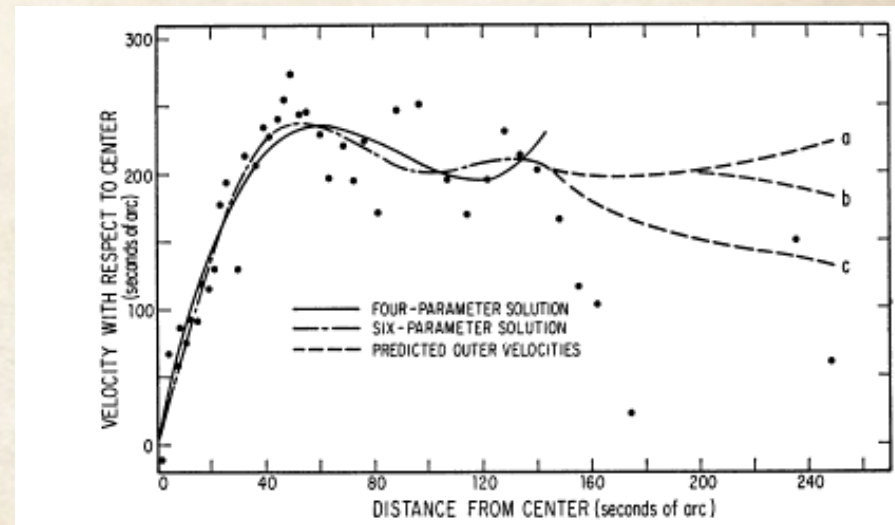


Проблема измерения наклона  $i$ :  
 по фотометрии (лекция 2)  
 по кинематике (разрезы с разными PA)

$$V_{OBS} = V_{SYS} \pm V_{ROT} \sin i$$

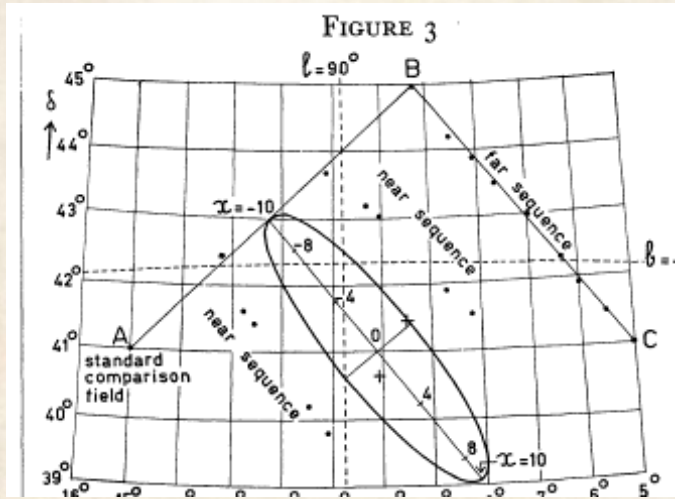


Afanasev & Rassokhin (1982)



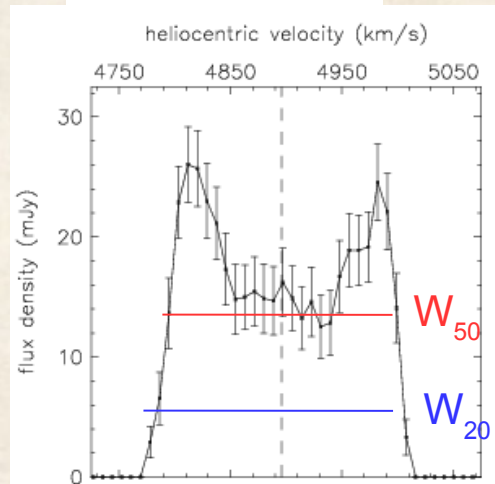
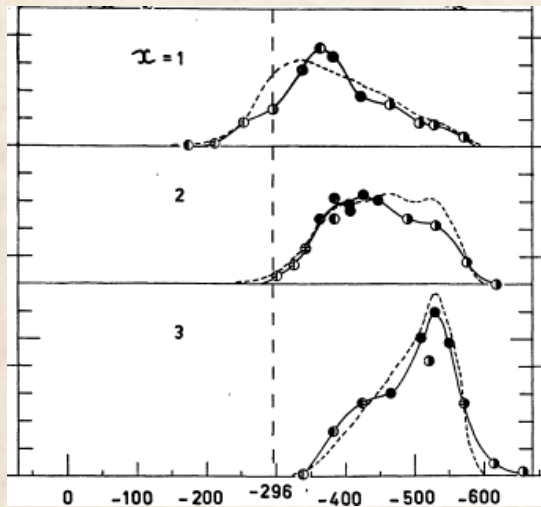
# Первые измерения: интегральный профиль HI

M31 (25m, van de Hulst + 1957)

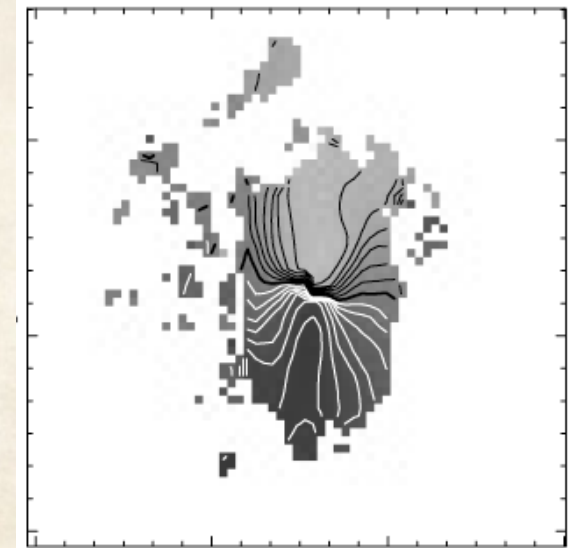
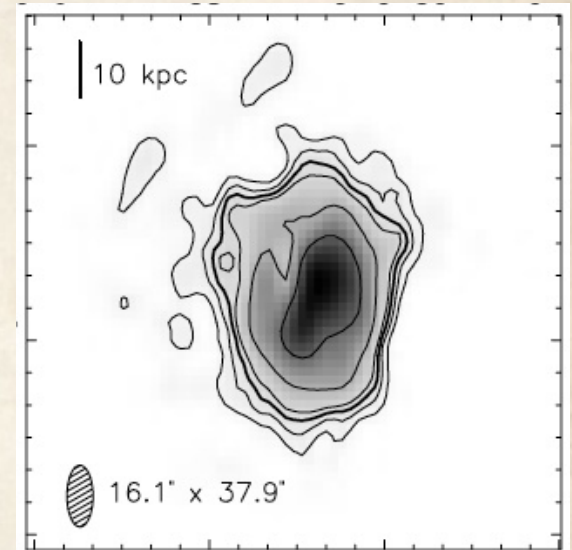


Пики соответствуют плато на кривой вращения

$$V_{ROT} \approx \frac{W_{50}}{2 \sin i}$$



Noordermeer + 2005

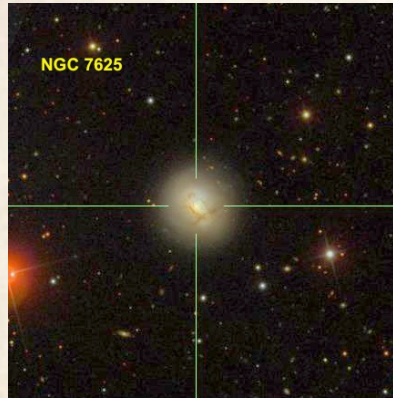




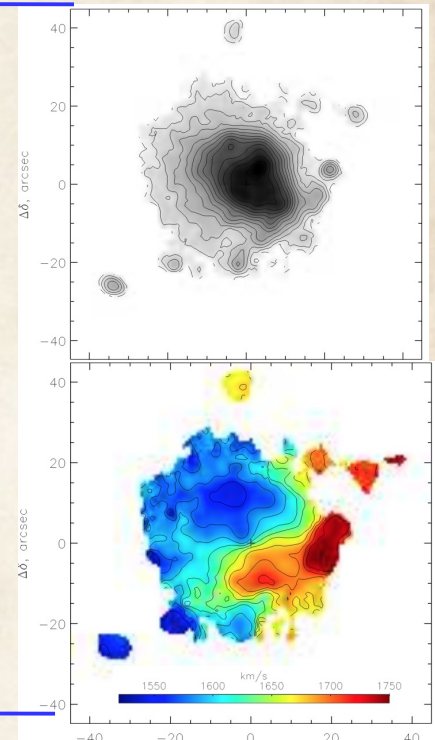
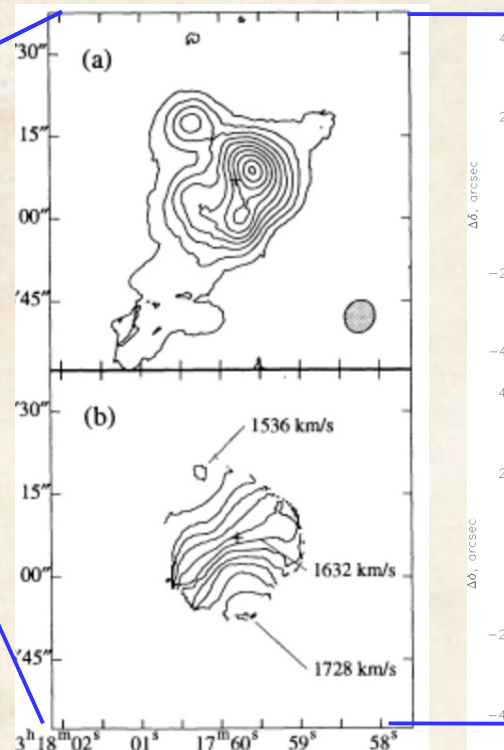
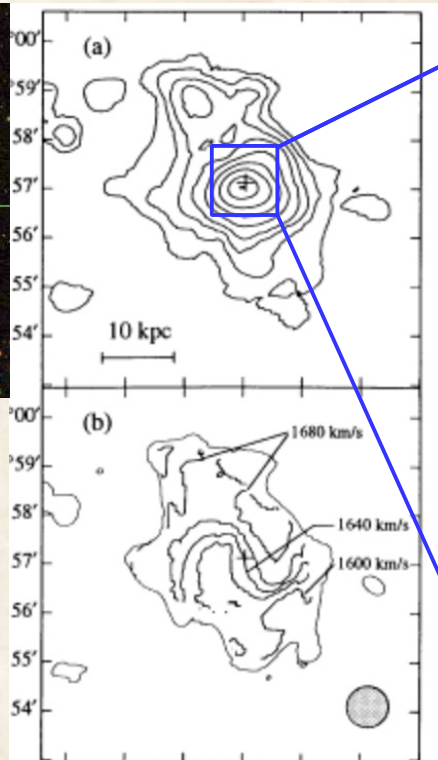
# Картирование: HI

# CO

# Ha



Li + 1993  
Moiseev 2008



Заполнение	Полное	Плотный холодный газ	Наличие источников ионизации
Связь с плотностью	$N(HI) \sim I_\nu$	$N(H_2) = X_{CO} W$	$ME \sim n_e^2 l$
Угл. разрешение (типичное)	>10-60"	>0.5-5"	>0.5-2"

# Анализ поля скоростей

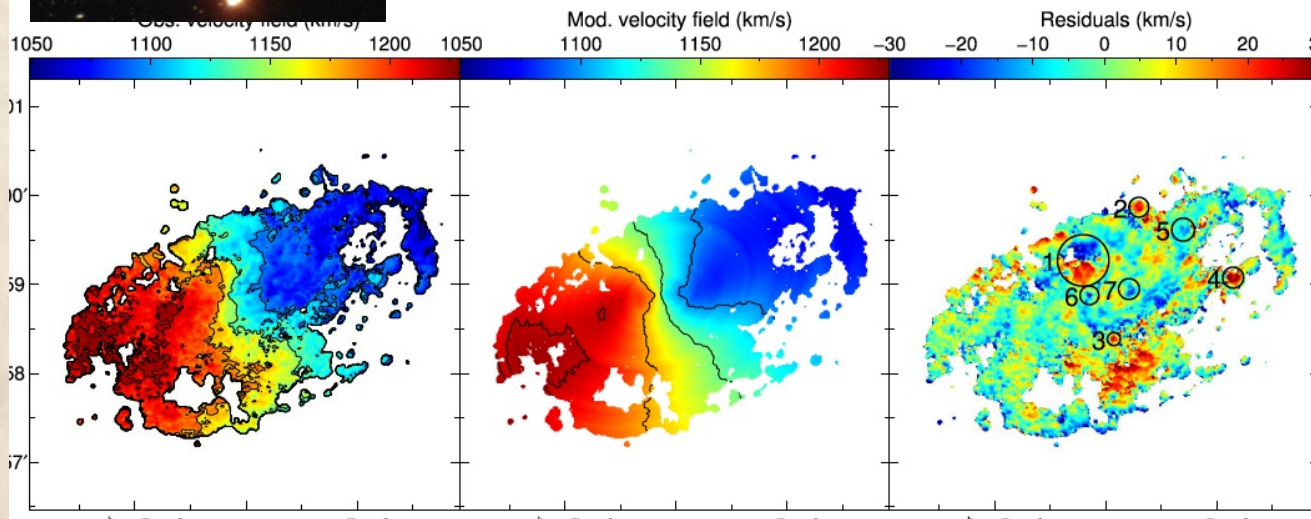
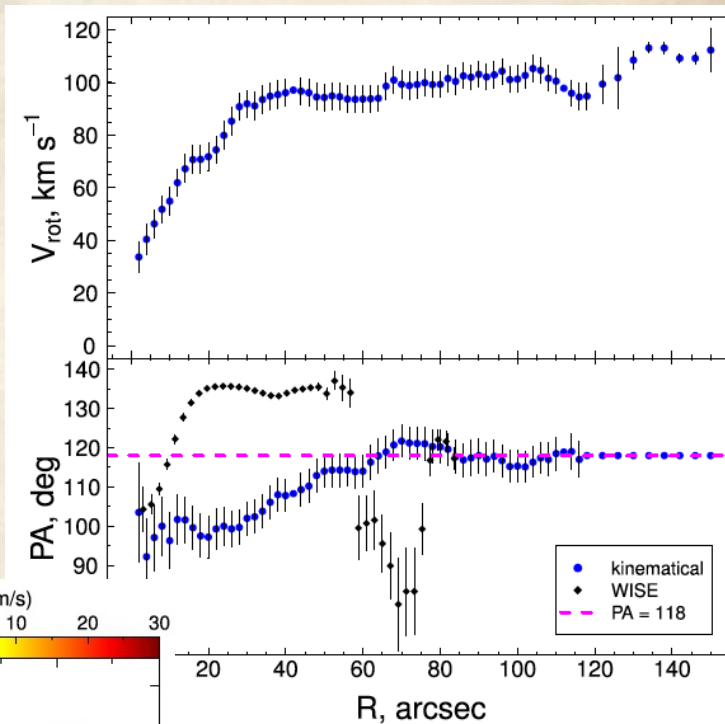
Разные способы подгонки наблюдений моделью:

- Наклонное кольцо (tilted-ring)
- Фурье-анализ по  $\varphi$  (Kinemetry)
- Модель всего поля или куба (TiRiFiCm <sup>3D</sup>BAROLO)  
(Моисеев, 2021, АБ, "Сканирующий интерферометр...")



Глобальные отличия от кругового вращения (бар, изгиб) – сводят к изменению параметров ориентации круговых орбит

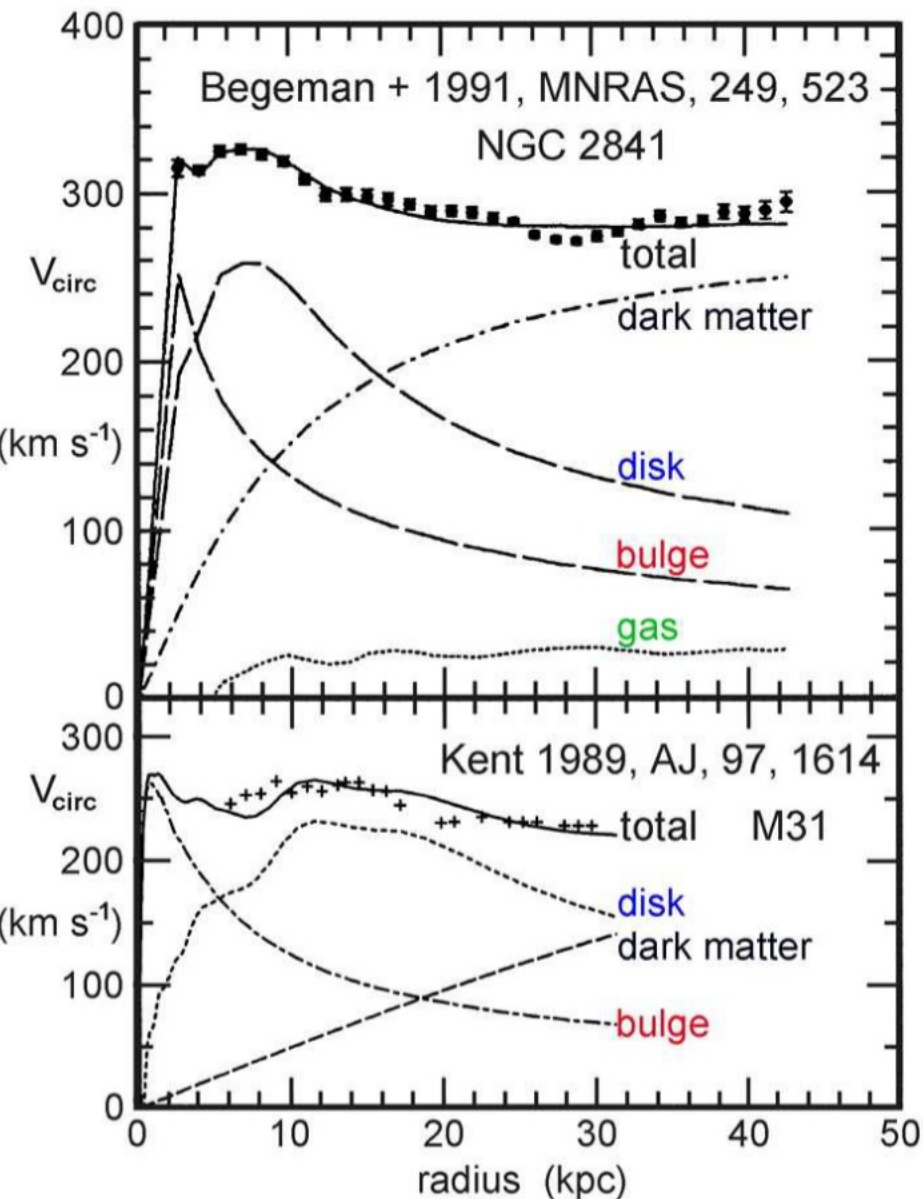
$$V_{OBS} = V_{SYS} + V_R \sin \varphi \sin i + V_\varphi \cos \varphi \sin i + V_Z \cos i$$



Egorova + 2019



# Декомпозиция кривой вращения



Круговая скорость пробной частицы:

$$\frac{V_c^2(r)}{r} = -\frac{\partial\Phi(r, z=0)}{\partial r} \quad \Delta\Phi(r, z) = -4\pi G\rho(r, z)$$

$$V_c(r) = \sqrt{\sum_{i=1}^M V_{ci}^2(r)}$$

$i = \text{bulge, disk}^*, \text{gas, halo}$

Задаем законы распределения плотности и подбираем параметры компонент

Ограничения – из фотометрии (балдж Серсика, exp-disk или толстый диск)

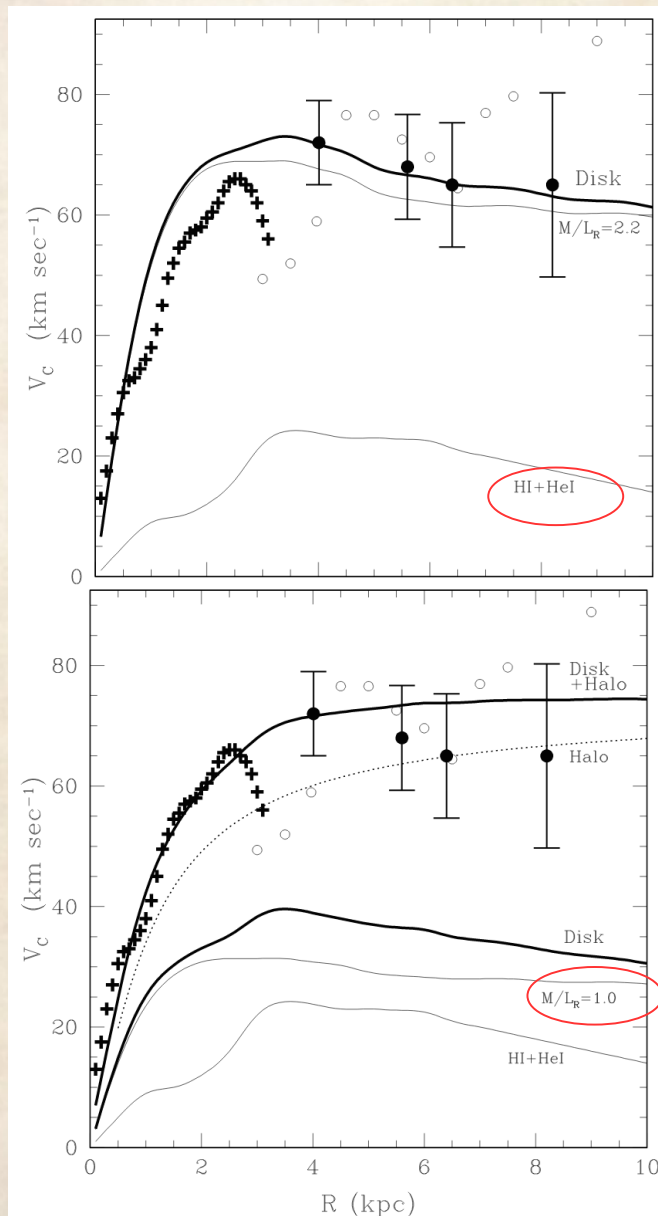
$$\rho(r, z) = \rho_0 \exp(-r/r_d) \text{ch}^{-2}(z/h)$$

Плотность темной материи:

- Квазиизотропическое гало
- Наварро-Френка-Уайта (NFW):

$$\rho_{NFW}(r) = \rho_0 / ((r/a)(1 + r/a)^2)$$

# Минимальный и максимальный диски



Выделение вклада темного гало из кривой вращения – задача неоднозначная.

От принятого  $M/L$  зависит соотношение между вкладом диска и гало. Возможные ограничения:

- $M/L$  – из фотометрии или спектроскопии звездного населения (но спектры внешних областей трудно получить – лекция 4)
- Из предположение об устойчивости звёздного диска относительно гравитационных возмущений (при известной дисперсии скоростей звёзд)

Alves & Nelson 2000



# Проблема скрытой массы

Скрытая масса: для объяснения наблюдаемого движения внутри галактик и их систем требуется масса большая, чем наблюдается в виде газа и звёзд

Цвикки (1937) – вириальная масса скопления Coma в  $\sim 500$  раз выше рассчитанной по светимости галактик

Темная материя – самый популярный вариант решения проблемы скрытой массы, вещество, участвующее только в гравитационных взаимодействиях

Альтернативные решения: изменение закона тяготения (MOND, варианты ОТО)

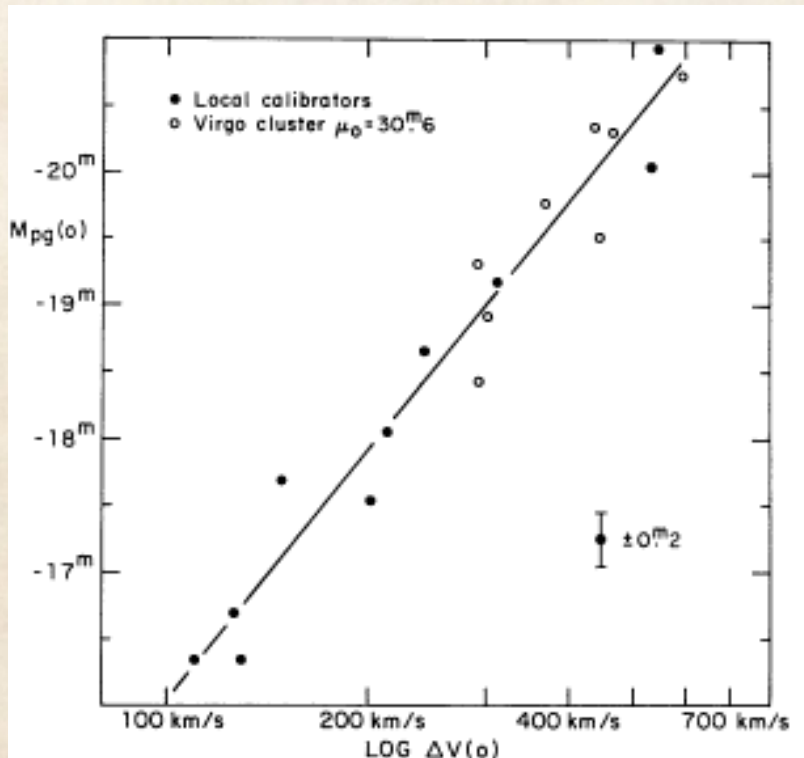
Указания на DM:

- Тёмное гало галактик из кривых вращения (Рубин, Бербиджи и др. 1960-80)
- Динамика скоплений галактик, сталкивающиеся скопления
- Движение спутников галактик
- Гравитационное линзирование
- Космология: спектр реликтового излучение и формирование первичных неоднородностей в LCDM

Кривые вращения дисковых галактик – одно из первых указаний на проблему скрытой массы, в то же время, далеко не самое надежное

# Соотношение Талли-Фишера

Tully & Fisher 1977:  
Связь ширины профиля HI и  
светимости галактики



(Лекция 1)

Теорема вириала:

$$\frac{GM}{\langle R \rangle} = k_E \frac{\langle V^2 \rangle}{2} \quad \Upsilon = M/L, k_E = 2$$

$$L \sim \langle V^2 \rangle \langle R \rangle / \Upsilon$$

но  $\langle V \rangle$  - не скорость вращения,  
 $M/L$  и  $\langle R \rangle$  - не константы

$$L \sim V^\beta, \beta = 3 - 4$$

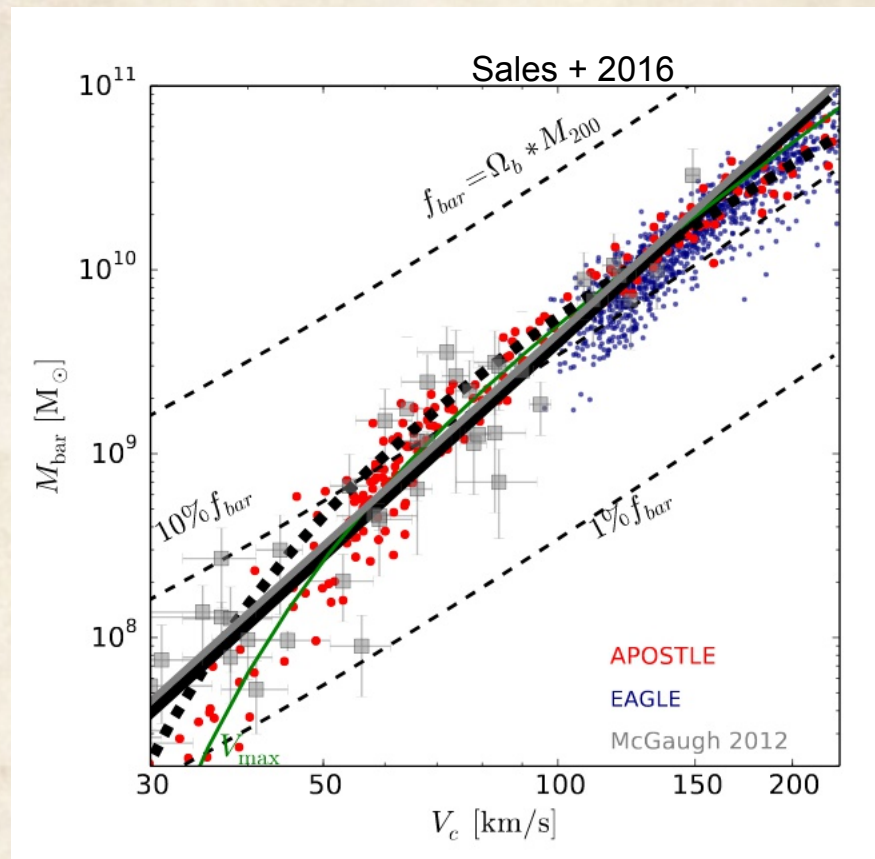
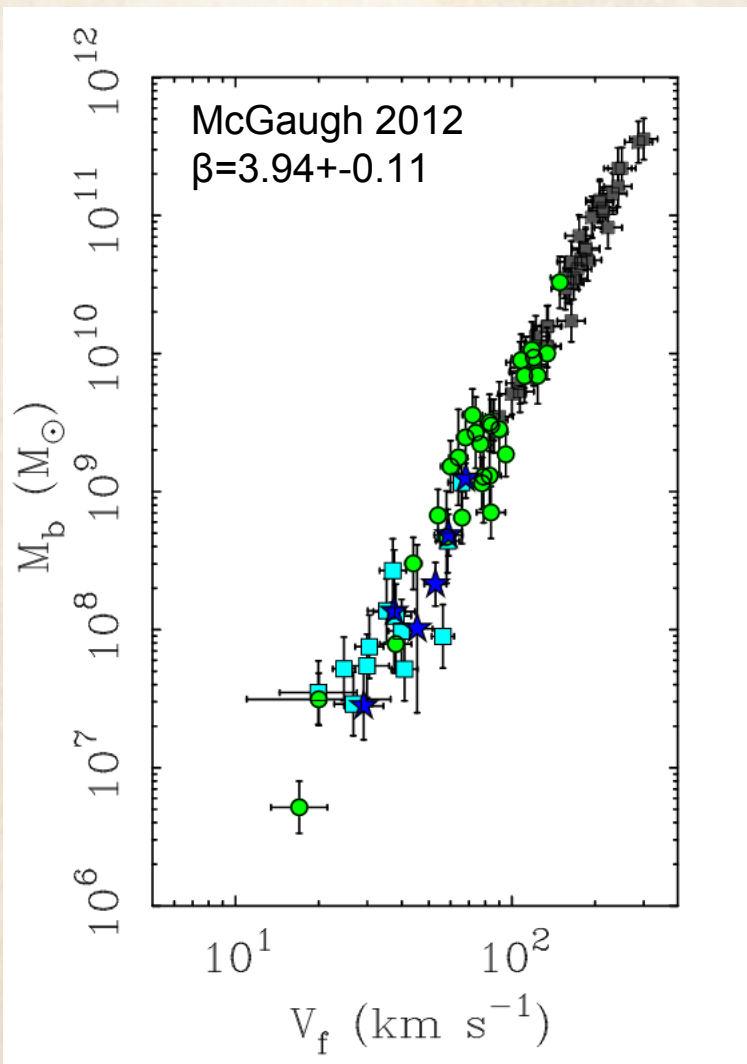
Но если максимальная скорость  
вращения задается темным гало, то  
Т-Ф означает наличие тесного  
соотношения между массой темной  
и барионной материи



# TF: барионное соотношение

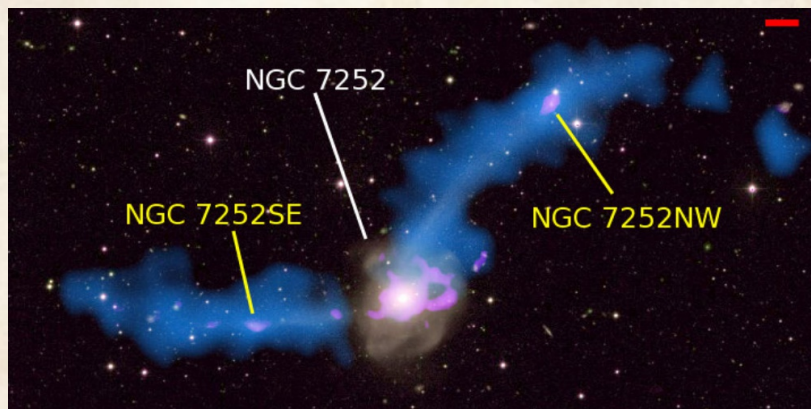
Масса барионов=газ+звезды (Лекции 3 и 4)

$V_f$  – скорость вращения на плоском участке

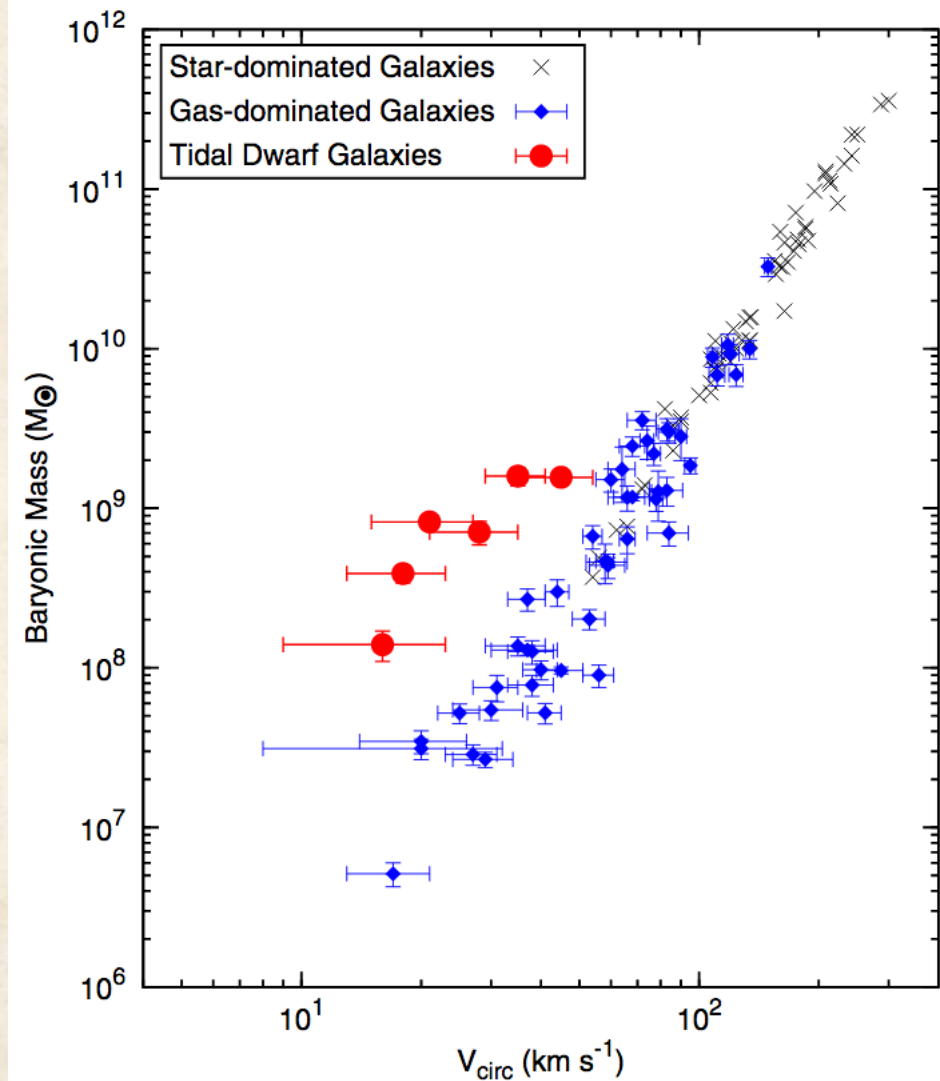
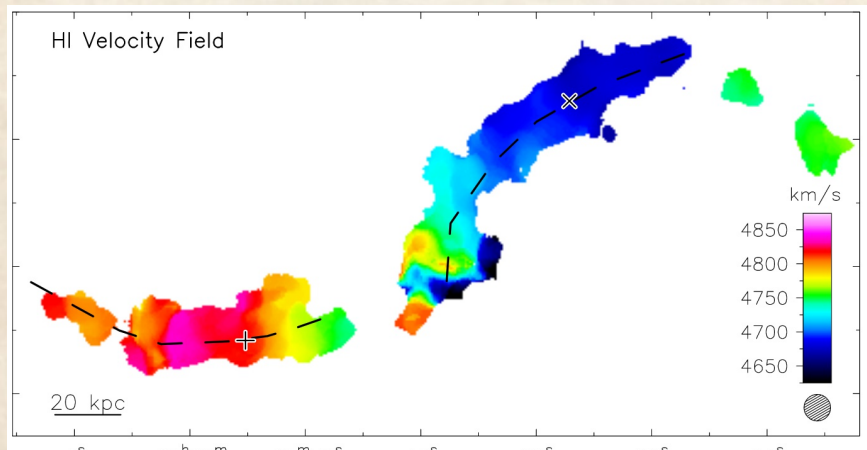


ΛCDM предсказывает загиб на малых массах  
MOND:  $\beta=3.94$

# TF: приливные карлики “без темной материи”



Lelli + 2016



То, что TDG находятся в динамическом равновесии – следует из моделей взаимодействия галактик



# Скорость вращения и круговая скорость

Круговая скорость пробной частицы задается только гравпотенциалом:

$$\frac{V_c^2}{R} = \frac{\partial \Phi}{\partial R}$$

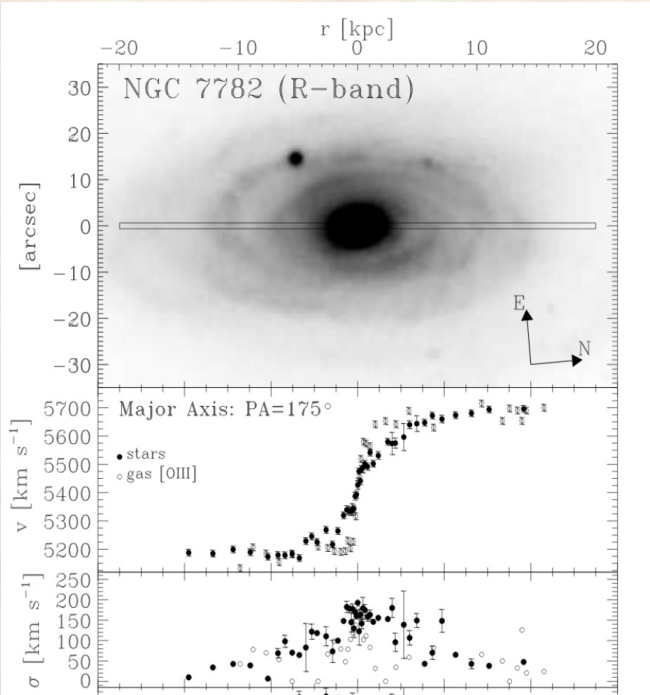
Но газ – не пробная частица, есть градиент давления, поэтому наблюдаемая скорость вращения:

$$V_{rot}^2 = R \left( \frac{\partial \Phi}{\partial R} + \frac{\text{grad} P_r}{\rho} \right), P_r = \rho_g \sigma_g^2$$

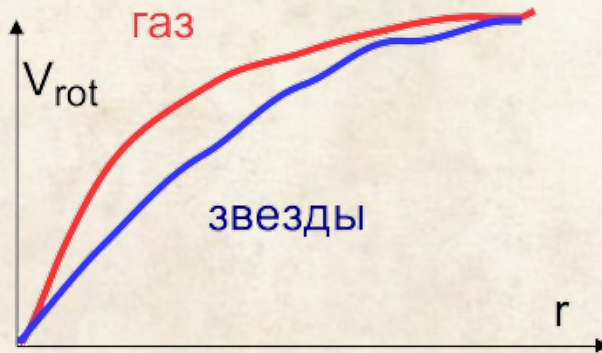
$$V_{rot}^2 = V_c^2 - \sigma_g^2 \frac{d \ln \rho_g}{d \ln R}$$

(Не всегда можно пренебречь, существенно вблизи центра карликовых галактик)  
Для звёзд из уравнения Джинса следует (в изотропном случае):

$$V_{rot}^2 = V_c^2 + \frac{R}{\rho_*} \frac{\partial (\rho_* \sigma_*^2)}{\partial R}$$



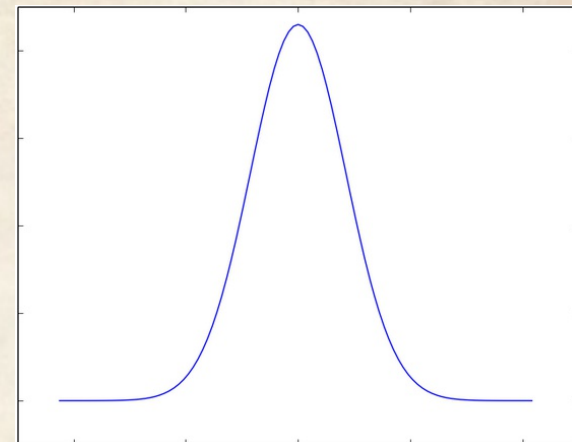
Чем выше дисперсия скоростей – тем ниже наблюдаемая скорость вращения (асимметричный дрейф, )  
Необходимо выполнять коррекцию за этот эффект!



## Дисперсия скоростей: газ

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \approx 2.3548\sigma$$

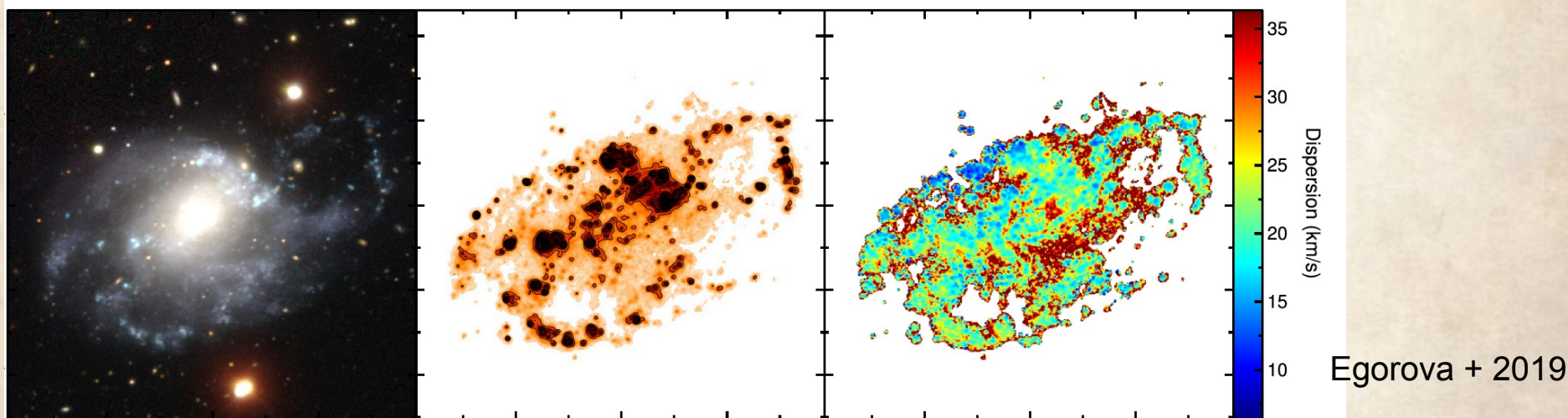


Если **все профили гауссовские**, то легко учитывается уширение инструментального профиля:

В радио наблюдениях инструментальная ширина примерно равна ширине канала

$$\sigma_{real} = \sqrt{\sigma_{obs}^2 - \sigma_{instr}^2}$$

Иногда – более сложная параметризация инструментального контура (ИФП, см. Моисеев 2021)





# Измерение дисперсии скоростей: звезды

Sil'chenko et al 2009

Сложная форма LOSVD  
(line-of-sight velocity distribution)

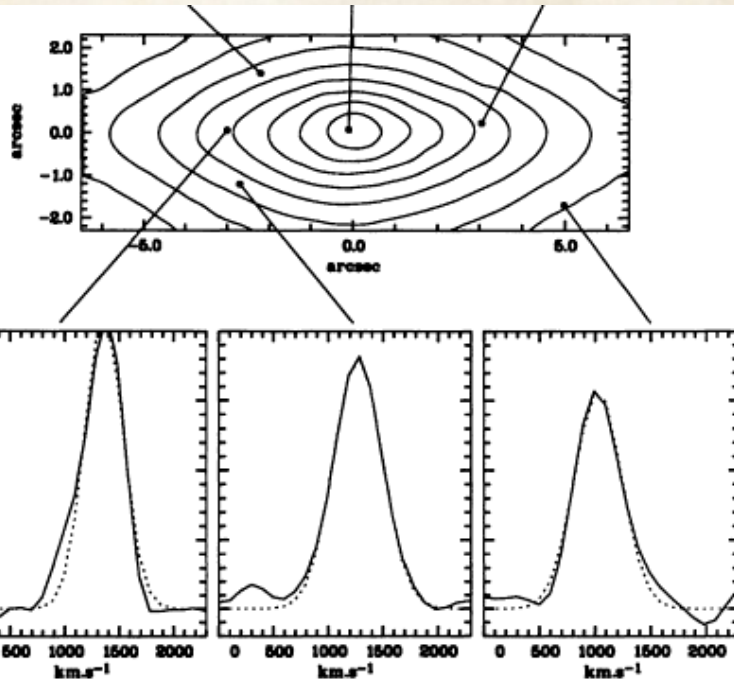
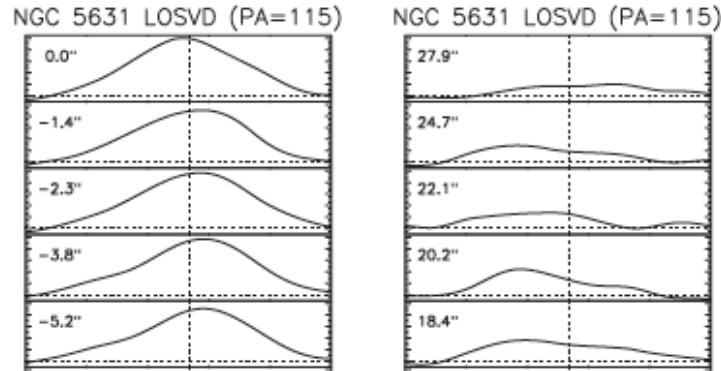
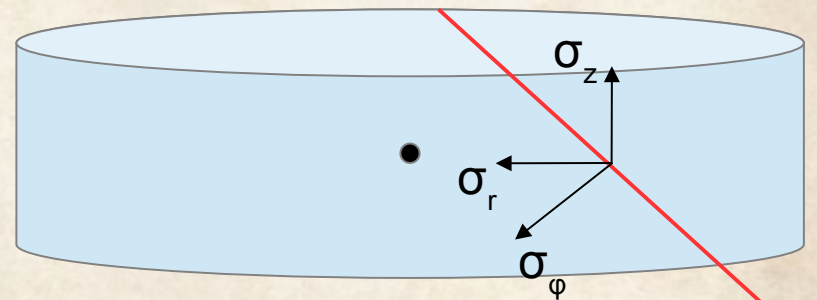


Figure 1. LOSVDs of M 104 at different points of the TIGER field, and the corresponding best gaussian fits (pointed lines): note the asymmetries of the profiles close to the major axis. The central panel shows the reconstructed TIGER image.

Газ – как правило, тонкий, динамический холодный компонент.

В звездах – смотрим сквозь толстый диск (или балдж) с неизотропным распределением дисперсии скоростей

$$\sigma_r \neq \sigma_z \neq \sigma_\phi$$



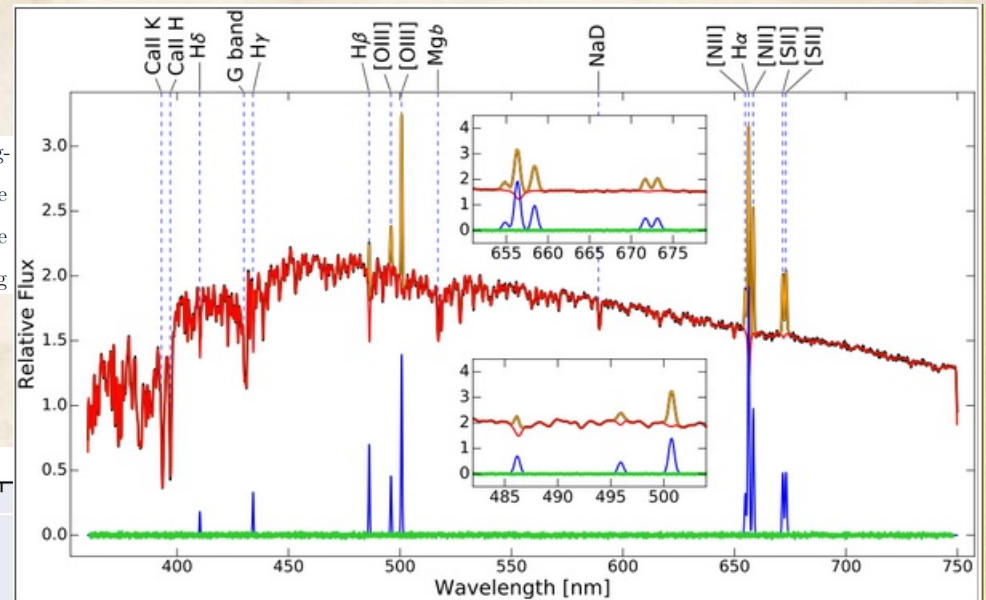
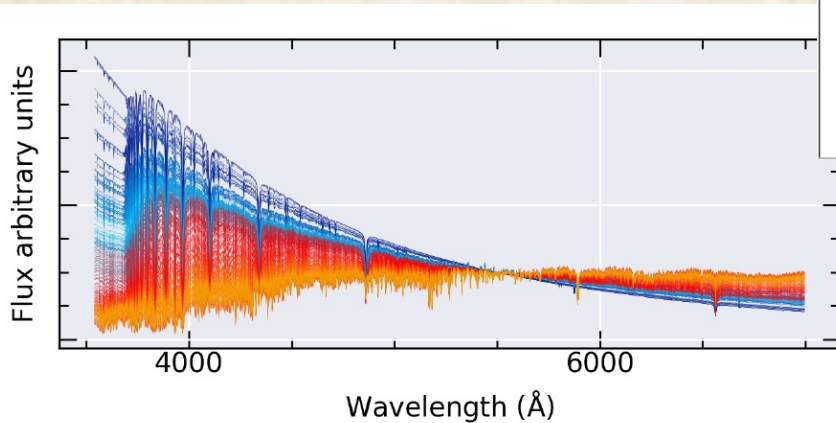
Emsellem et al 1994

# Измерение дисперсии скоростей: звезды

- По ширине кросс-корреляционного пика при корреляции спектра с шаблоном
- Дисперсия скоростей как один из параметров для моделирования звездных спектров (лекция 4)

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

where  $F_j$  is the flux at wavelength  $\lambda$  of the  $j^{\text{th}}$  template;  $A_\lambda$  is the extinction in magnitudes at  $\lambda$  (parameterized by the value at the V-band);  $w_j$  is the coefficient of the  $j^{\text{th}}$  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



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

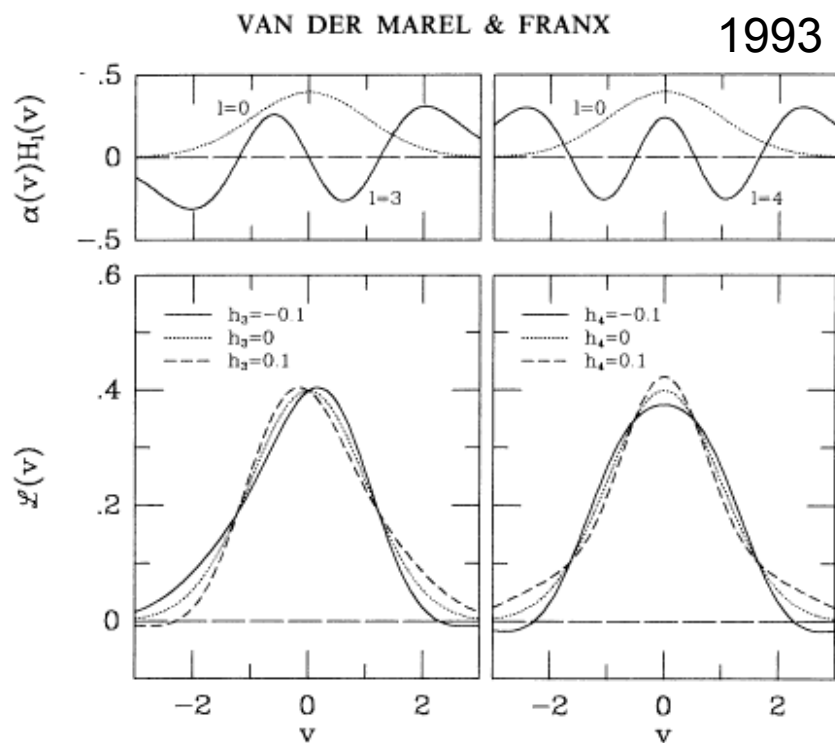


# Функция Гаусса-Эрмита для описания LOSVD

and quite good parametrization of the velocity distribution profile is the truncated Gauss-Hermite (GH) expansion (Gerhard, 1993; van der Marel & Franx, 1993):

$$GH(v; \gamma, V, \sigma, h_m) = \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{v-V}{\sigma} \right)^2 \sum_{m=0}^{N_{GH}} h_m H_m \left( \frac{v-V}{\sigma} \right) \right], \quad (2.10)$$

where  $H_m$  are the physicists Hermite polynomials,  $h_m$  are the Hermite coefficients and  $N_{GH}$  is the order of the truncation corresponding to the total number of mo-



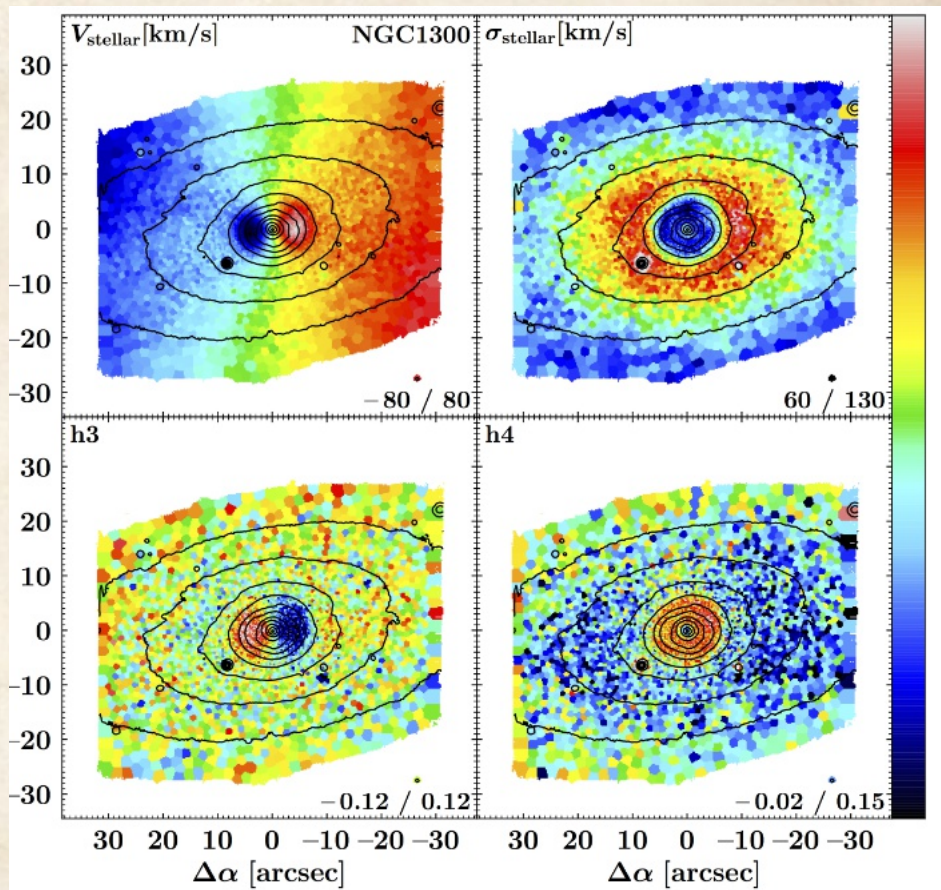
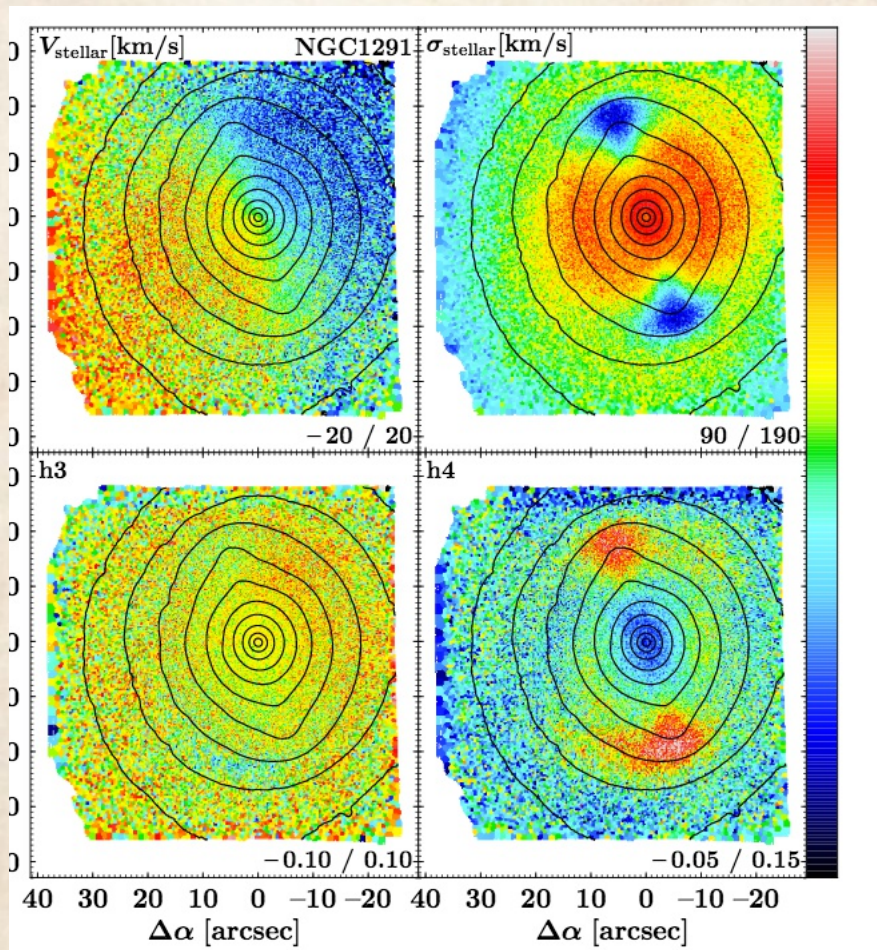
Обычно ограничиваются  $N=4$ ,  
при этом  $h_0=1$ ,  $h_1=0$ ,  $h_2=0$

$h_3$  - асимметрия

$h_4$  - негауссовость



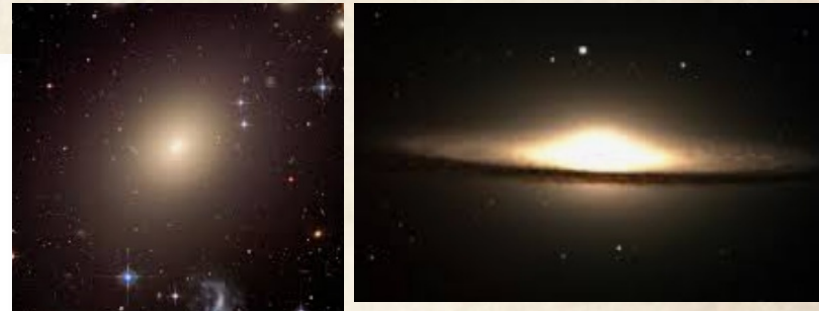
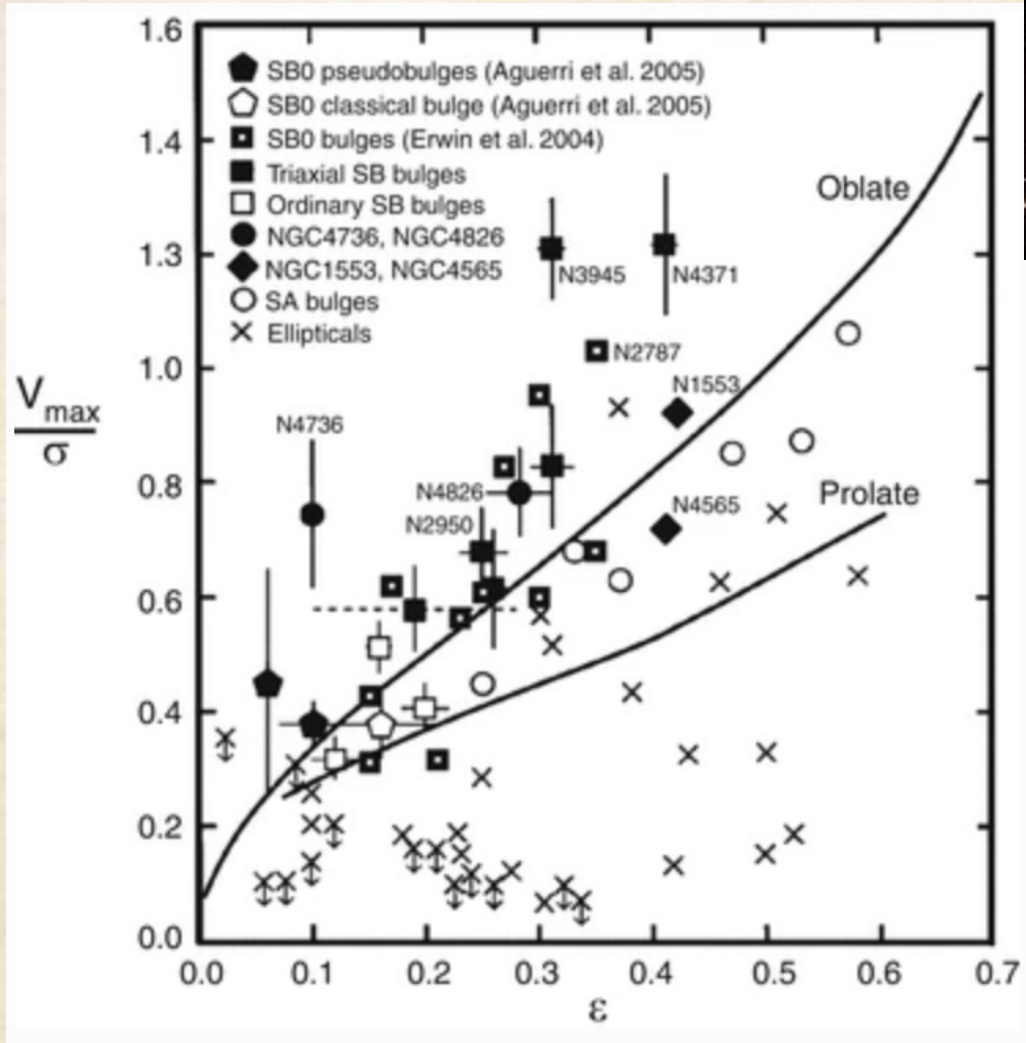
# Распределения $v, \sigma, h3, h4$ с MUSE



Gadotti + 2020



# E-галактики и балджи S-галактик



Разные причины сплюснутости:

- Вращение балджей
- Анизотропия дисперсии скоростей в E-галактиках

Параметр  $V_{\max}/\langle\sigma\rangle$  как характеристика “поддержки вращением”

$\langle\sigma\rangle$  - дисперсия скоростей, взвешенная с яркостью внутри эффективного радиуса  $R_e$

Kormendy & Illingworth 1982  
Kormendy & Fishe 2008

# Быстрые и медленные ротаторы

Удельный угловой момент

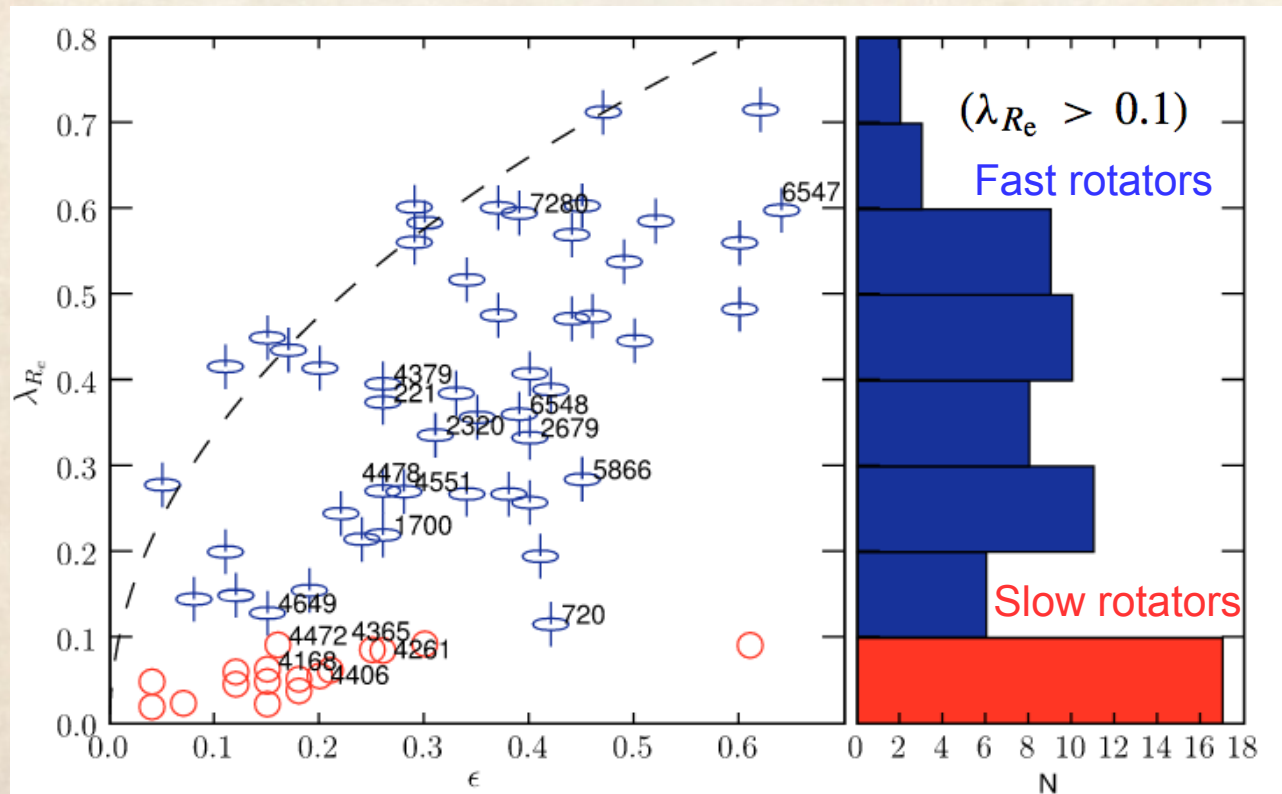
$$\lambda_R \equiv \frac{\langle R |V| \rangle}{\langle R \sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle}, \quad (\text{Emsellem+ 2007}) \quad (5)$$

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,

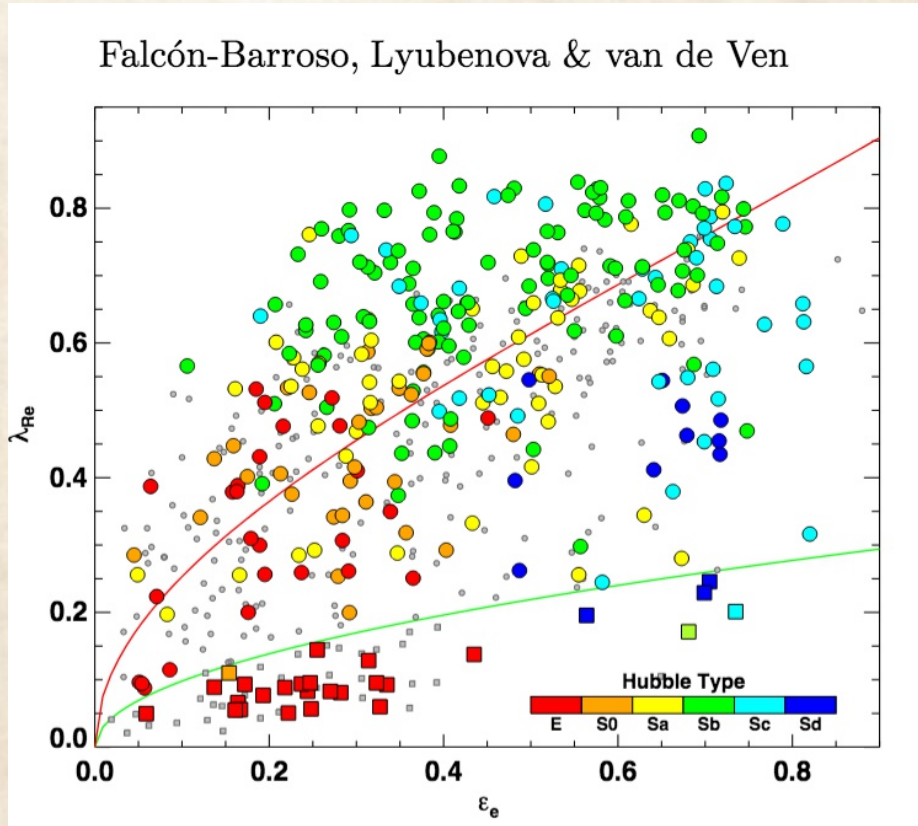
“Медленные” - в среднем более массивные, как правило, E-галактики, часто со следами слияний





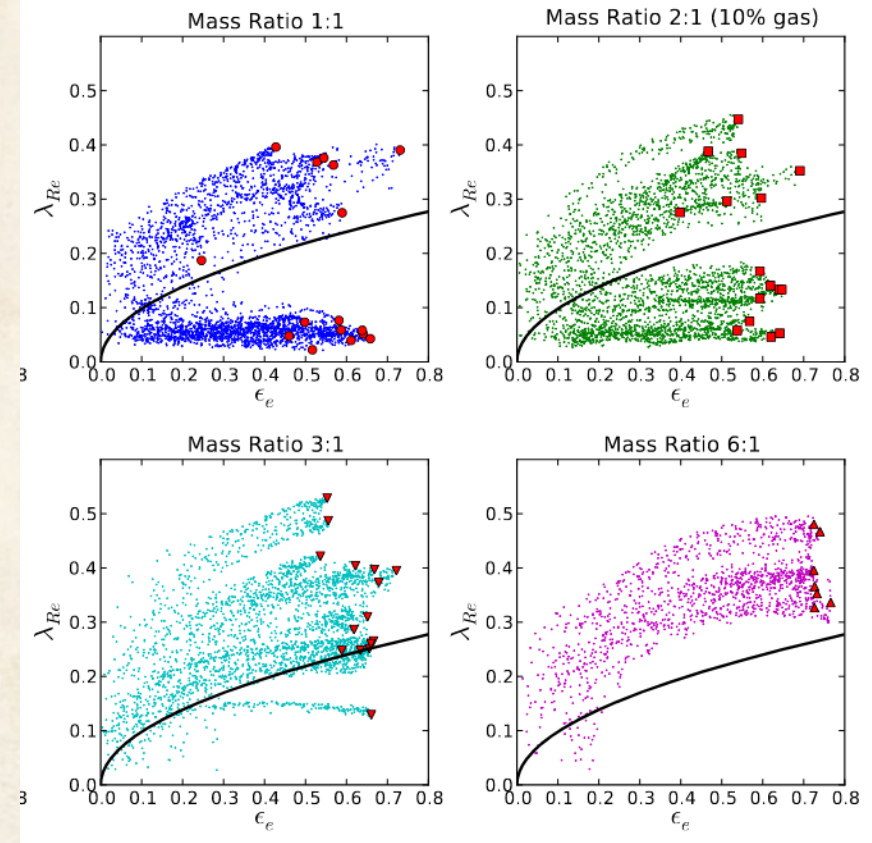
# Быстрые и медленные ротаторы

Связь с морфологическим типом



Маломассивные Sd – больше вклад темной материи?

## Моделирование слияний галактик (Bois + 2012)



# Фундаментальная плоскость эллиптических галактик

$$\frac{GM}{\langle R \rangle} = k_E \frac{\langle V^2 \rangle}{2}$$

$$r_e = k_R \langle R \rangle, \quad \sigma_0^2 = k_V \langle V^2 \rangle, \quad L = k_L \langle I \rangle_e r_e^2$$

(Решетников см. лекция 2)

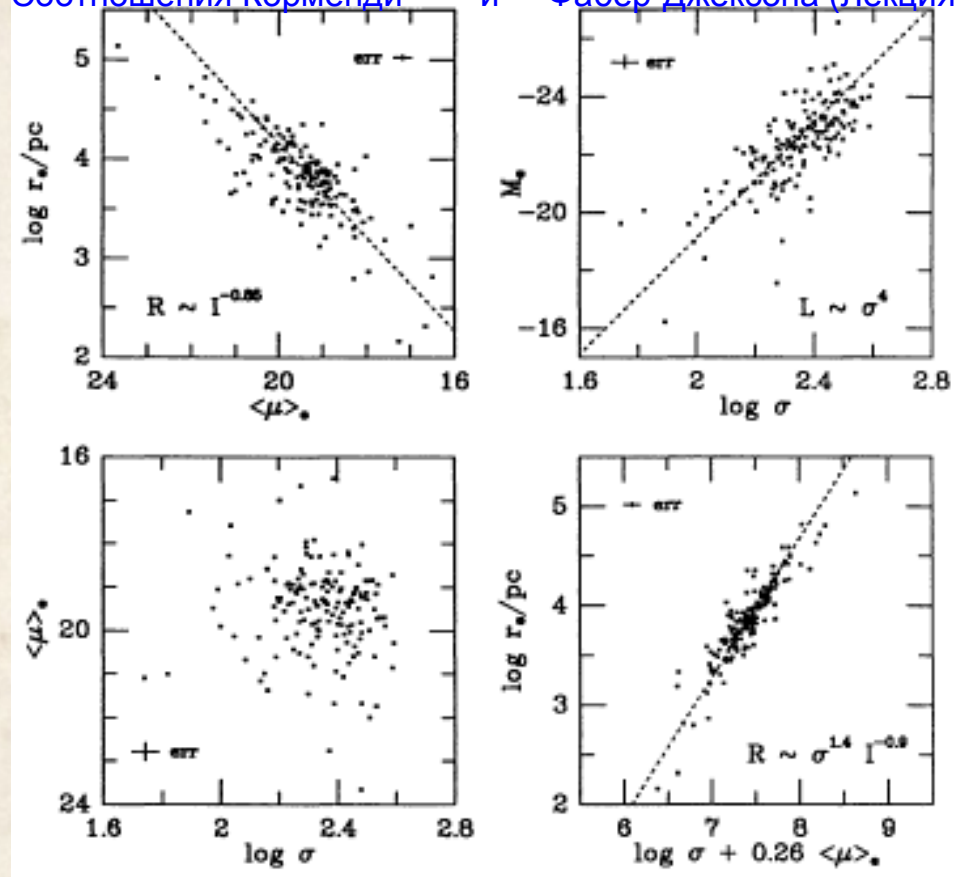
$$r_e = k_S (M/L)^{-1} \sigma_0^2 \langle I \rangle_e^{-1}$$

Поскольку E галактики не гомогенны, а M/L – различается, то

$$r_e \sim \sigma^{1.4} I_e^{-0.8}$$

Используют разные комбинации связанных параметров  $(r_e, \sigma_0, \mu_e)$ ,  $(L, \sigma_0, I_e)$ ,  $(r_e, \sigma_0, L)$

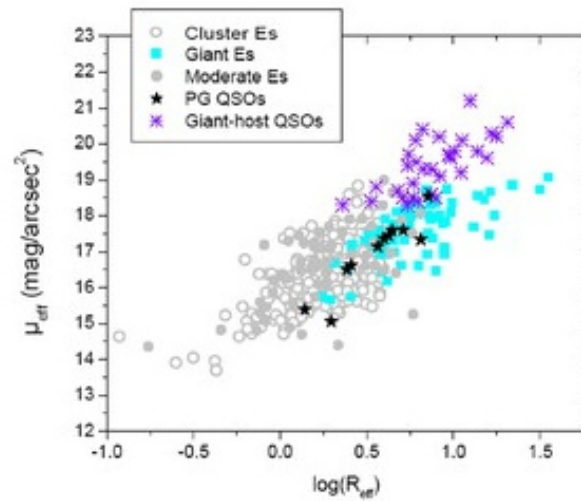
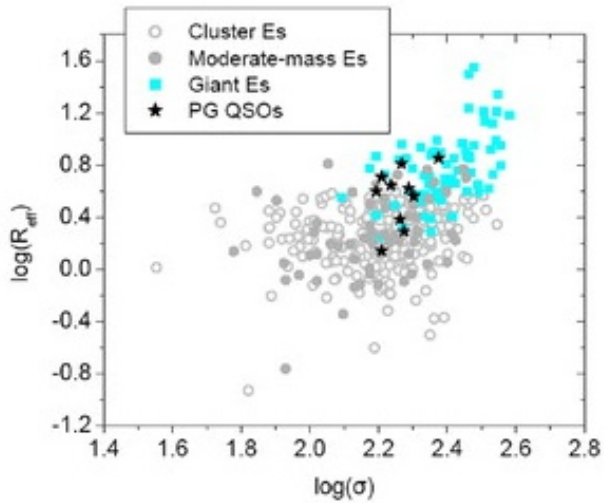
Соотношения Корменди и Фабер-Джексона (Лекция 1)



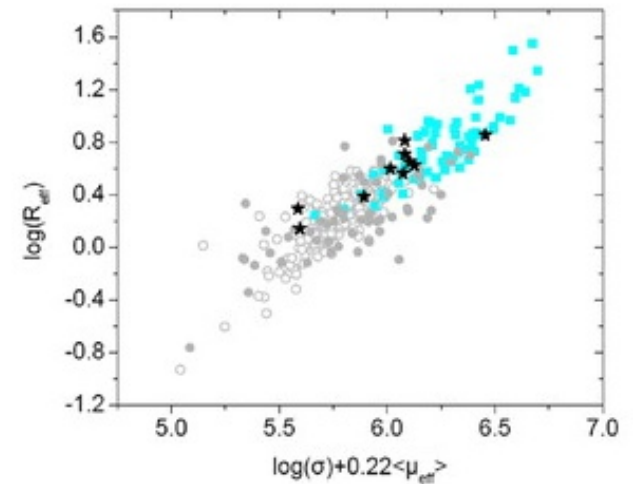
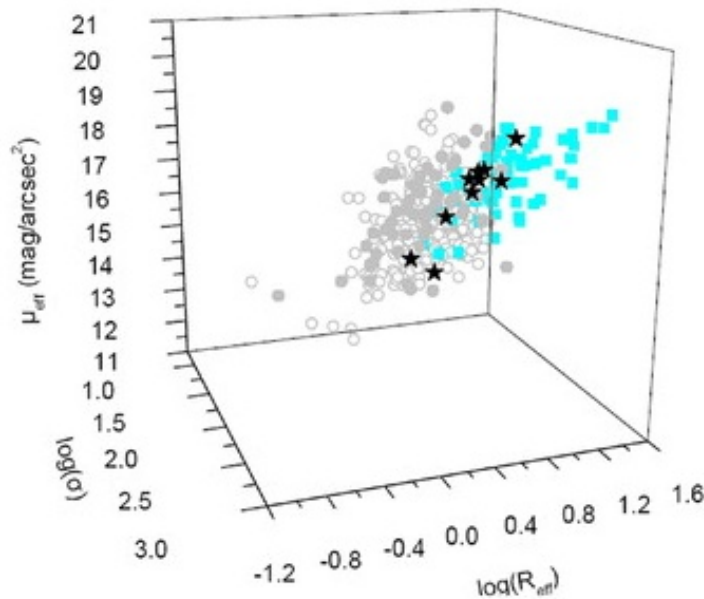
Kormendy & Djorgovski 1989



# Фундаментальная плоскость



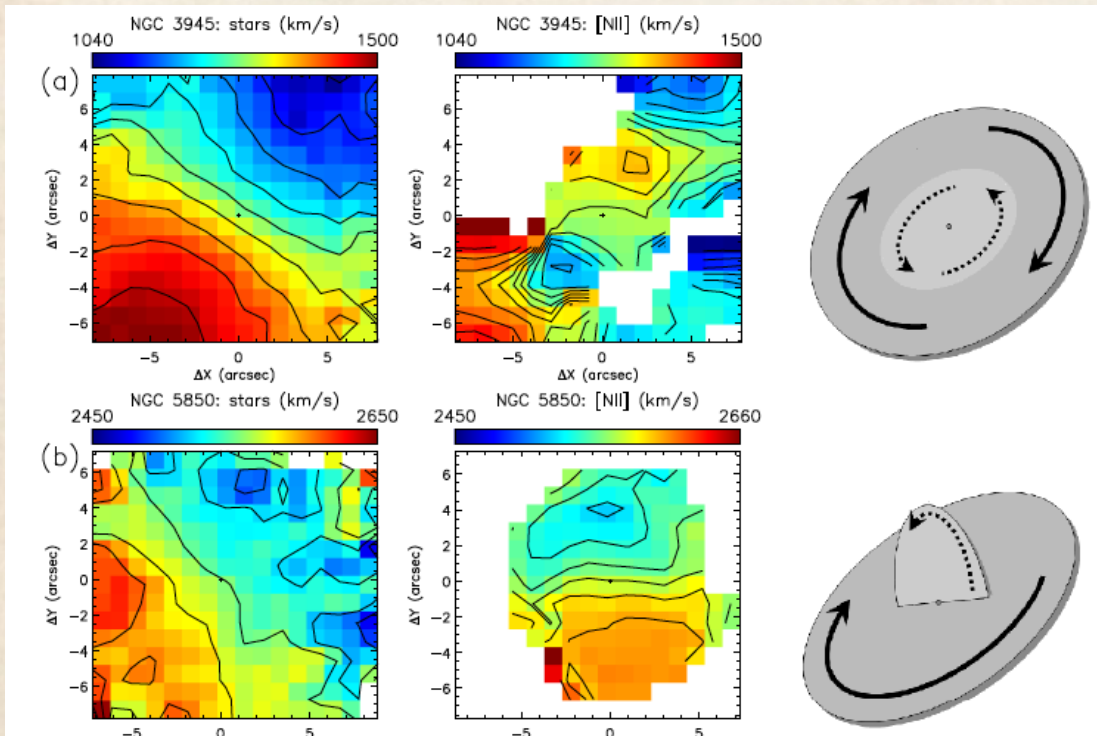
Даже при разных путях формирования, основные параметры галактик подчиняются общим зависимостям



# Кинематически выделенные подсистемы

Вещество с другим направлением орбитального момента вращения, чем у основного диска

- Кинематически выделенные ядра
- Глобальные противовращающиеся диски
- Внешние полярные кольца

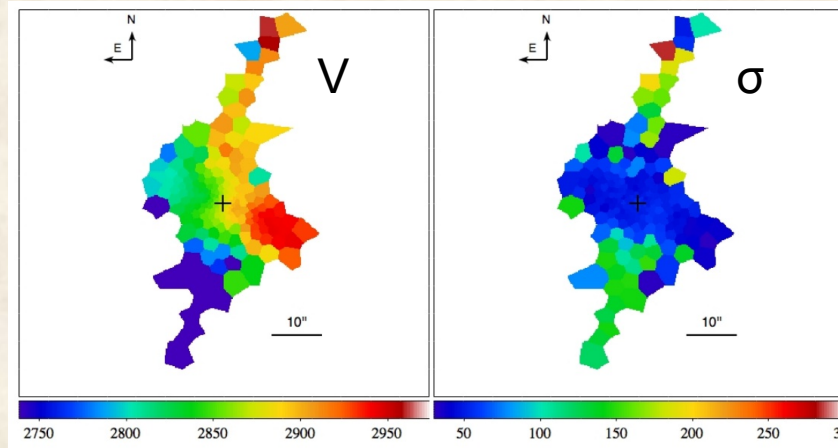




# Галактики с полярными кольцами

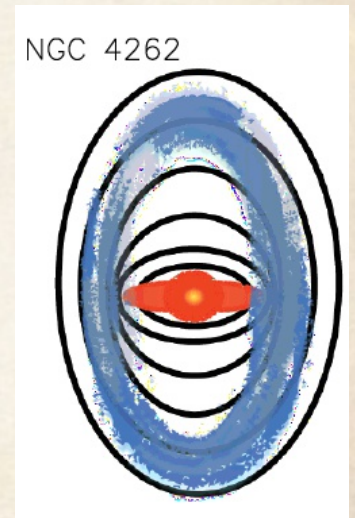
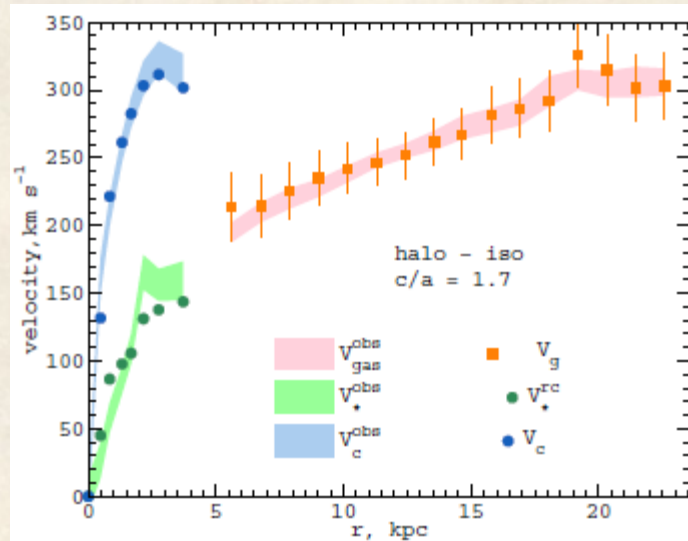


Кинематика звёзд



NGC 4650A  
(Iodice+2015)

Форма тёмного гала из сравнения кривых вращения:

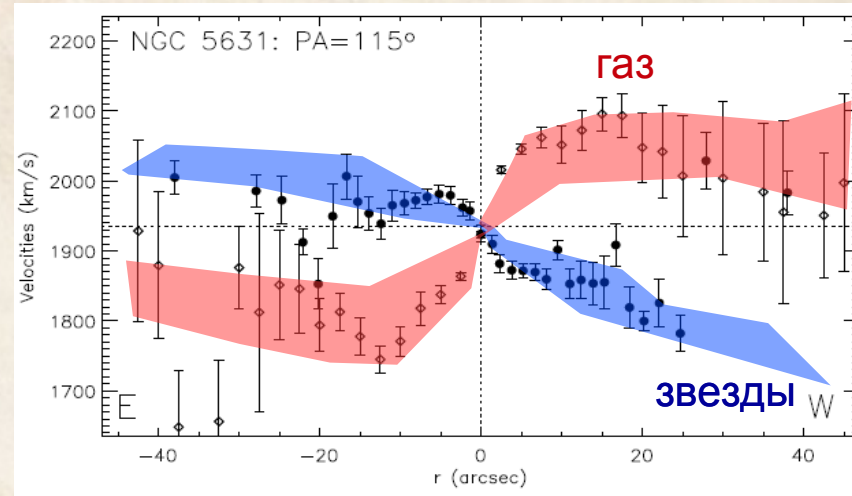


NGC 4262

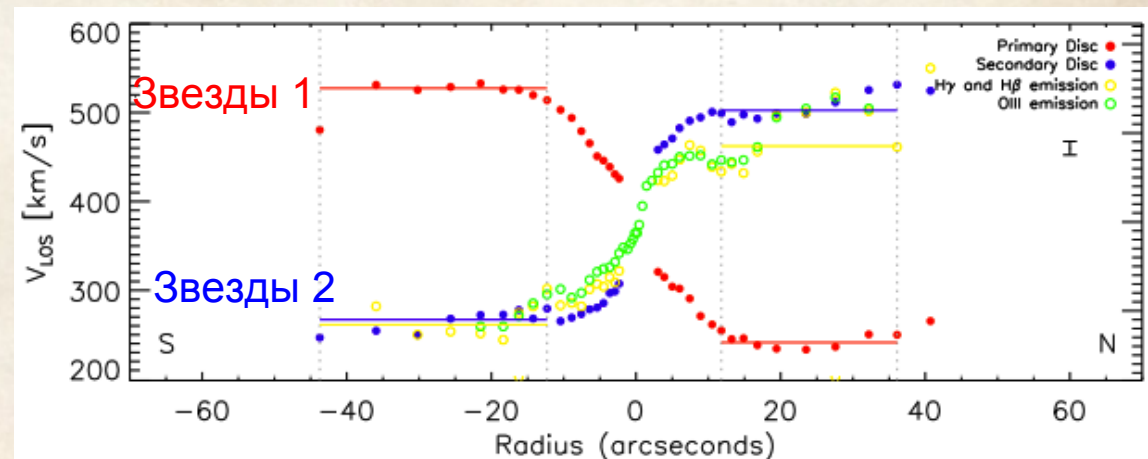
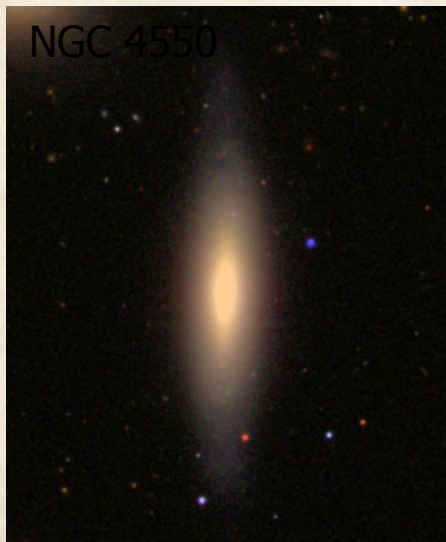
Khoperskov + 2014, Moiseev+2015

# Противовращение газ-звезды

Лучевые скорости (Sil'chenko, Moiseev & Afanasiev, 2009) □



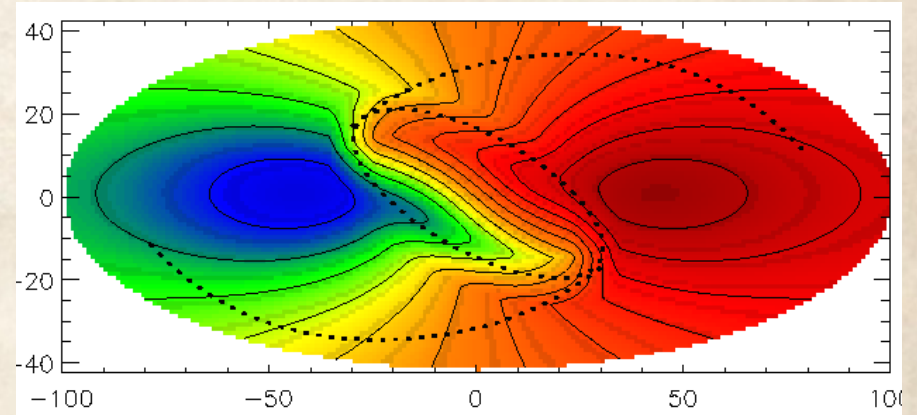
Результат поглощения галактикой богатого газом компаньона  
Формирование новых звезд из этого газа:



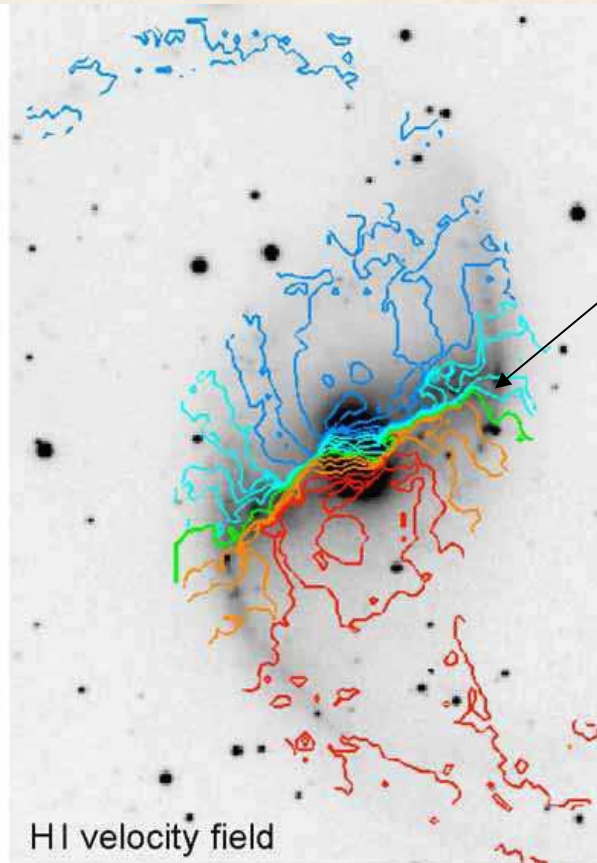


# Бар и спиральный узор

Бар – отнимает угловой момент газа, формирование радиальных движений к ядру (>20-100 км/с)  
В спиральных: 10-50 км/с



NGC 1530



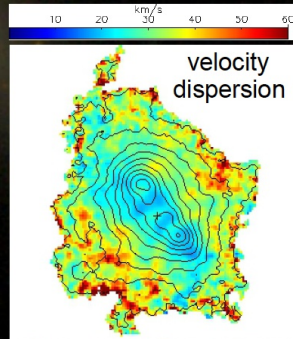
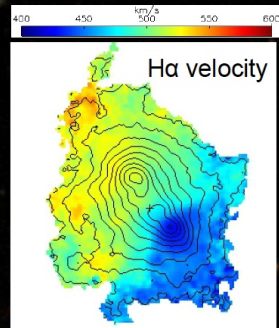
HI velocity field

Кромка ударной волны в распределении скоростей

# Галактический ветер и фонтаны

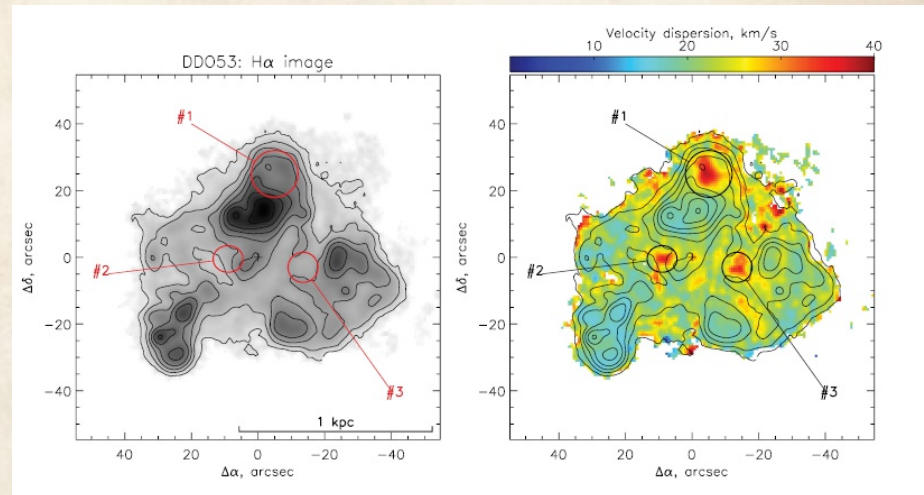
Эффекты коллективного звездообразования чаще более заметны в дисперсии скоростей

NGC 4460  
SDSS + H $\alpha$  (FPI, red)



3 kpc

Опарин и Моисеев 2015



Будет на следующей лекции

Moiseev & Lozinskaya 2012