

А.В. Моисеев, САО РАН

# Методы исследования галактик.

## Лекция VI.

Звездообразование: индикаторы его темпа и эффективности.  
Воздействие на окружающий газ. Инициированное  
звездообразование. Галактический ветер. Главная  
последовательность галактик.

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

# Гравитационная неустойчивость вращающегося диска

Звздообразование происходит в современную эпоху, т.е. **формирование дисков галактик еще продолжается.**

Критерий Джинса (1902) для линейных возмущений однородной среды:

Для дальнейшей фрагментации требуется отвод тепла (излучение молекул HD/H<sub>2</sub>, [CII]λ158 мкм и т.д.)

$$\lambda > \lambda_J = \sqrt{\pi c_g^2 / G \rho} \sim \sqrt{T / \rho}$$

Но вращение диска стабилизирует его относительно крупномасштабных возмущений (сохранения момента), так что выделяются только неоднородности с масштабом  $\lambda_{cr}$ :

$$\lambda_{cr} = \frac{2\pi^2 G \Sigma_g}{\kappa^2}, \quad \kappa = 2\Omega \left( 1 + \frac{r}{2\Omega} \frac{d\Omega}{dr} \right)^{1/2}, \quad \Omega = V/r, \quad V \approx const \Rightarrow \kappa \approx \sqrt{2}\Omega$$

- эпициклическая частота

При этом поверхностная плотность должна превышать критическое значение:

$$\Sigma_{cr} = \frac{c_g \kappa}{Q \pi G} \sim \frac{c_g V}{Q r}$$

Q – параметр устойчивости Тоомре (Тоомре, 1964)

Q=1 – для радиальных возмущений тонкого звездного диска

Модели трехмерных звездных и газовых дисков дают Q=1.5-3

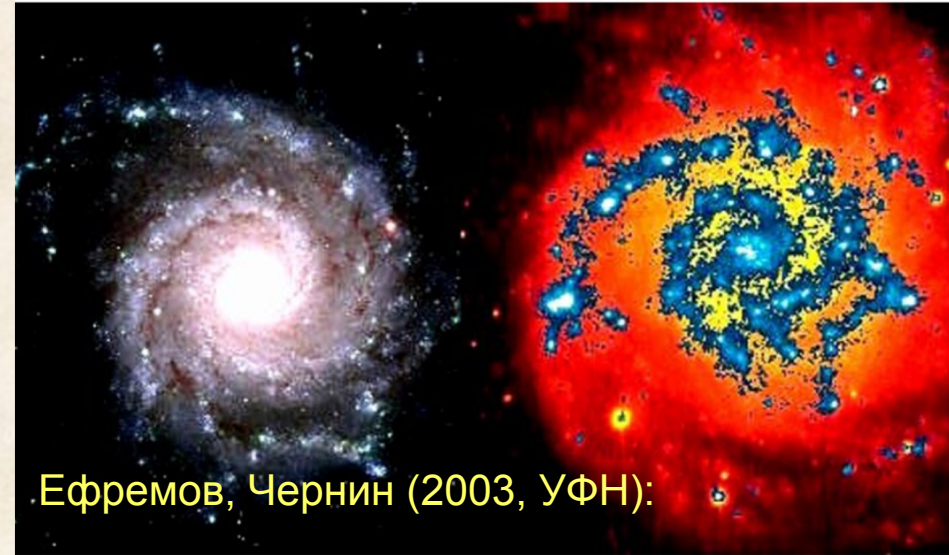
(Засов, Постнов “Общая астрофизика”)

# Критические размер и плотность в наблюдениях

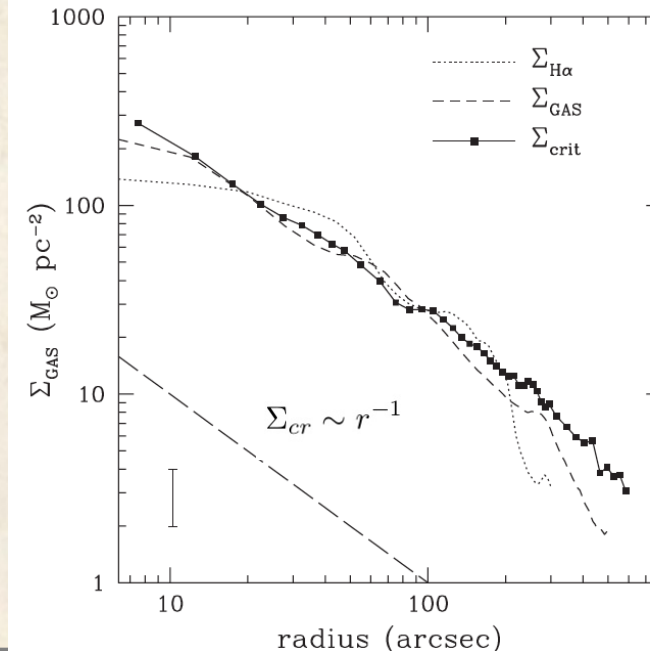
$\lambda_{cr} = 300-1000$  пк - характерный размер звездных комплексов Млечного пути и близких галактик (Ефремов, Элмегрин 1980-90е)

Видны как “цепочки областей ЗО”:

Масса исходных газовых облаков  $\sim 10^7 M_{\odot}$



Плотность газа в дисках спиральных галактик близка к критической, а там, где она ниже – звездообразование не идёт (внешние диски HI, включая галактики ранних типов, см. Лекция 3)

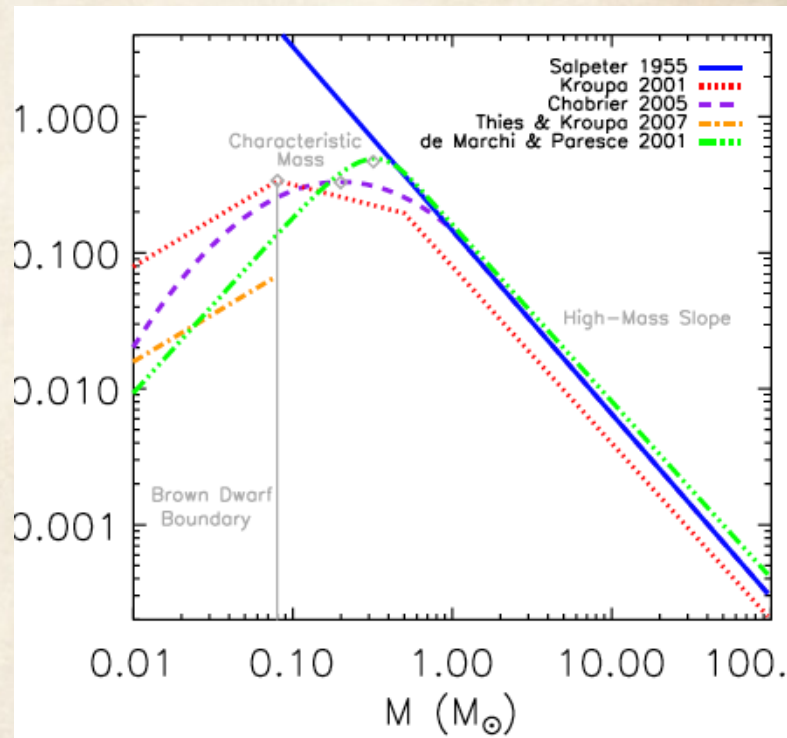
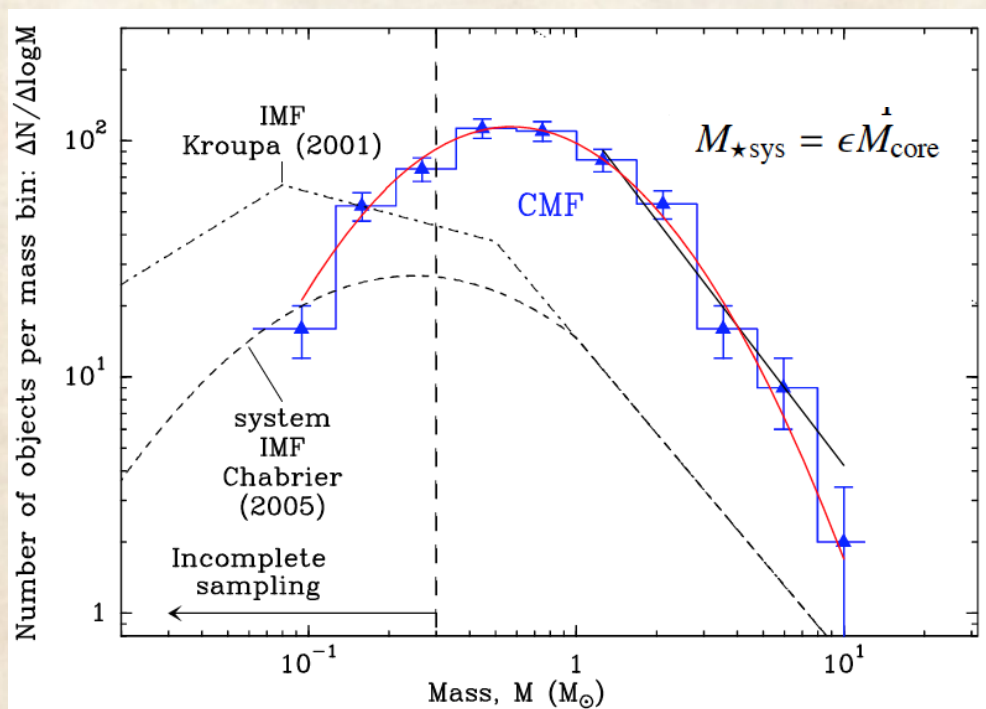


NGC 5055  
gas=HI+H<sub>2</sub>  
(Wong & Blitz 2002)

# Дальнейшая фрагментация, начальная функция масс

(Наблюдения молекулярных облаков пояса Гулда с Herschel, André + 2018)

НФМ звезд (Лекция 4):  
 $\Phi(t=0, m) \sim m^{-\alpha}$ , Salpeter (1955):  $\alpha = 2.35$



На малых массах степенное распределение переходит в логнормальное

# Star formation rate: $SFR = dM/dt$ [Mo/yr]

Лекция 4: “масса галактики определяется маломассивными звездами, а светимость – наоборот” (пока звёзды на ГП).

Молодые маломассивные звезды практически не проявляют себя в наблюдениях, но именно они составляют основную долю родившихся звезд.

Связь SFR “с индикаторной светимостью” учитывает НФМ:

$$(L_B/L_\odot)_{gal} = \int_{M_{min}}^{100} \alpha_L M^{-2.35} t(M) L_B(M) dM$$

(Gallagher, Hunter & Tutukov 1984)

В общем виде интегрирование ведется в диапазоне масс, где  $L_i(m) > 0$ , а затем SFR нормируется на относительную долю этих звезд в общую массу

$$L_i = SFR \int \Phi(m) t(m) L_i(m) dm$$

## Популярные индикаторы текущего SFR (по Kennicutt 1998):

- Лайман-кванты ( $\lambda < 912 \text{ \AA}$ ) от горячих OB-звезд, вызывающие рекомбинационное излучение

$$\begin{aligned} SFR(M_\odot \text{ year}^{-1}) &= 7.9 \times 10^{-42} L(\text{H}\alpha) \text{ (ergs s}^{-1}\text{)} \\ &= 1.08 \times 10^{-53} Q(\text{H}^0) \text{ (s}^{-1}\text{)}, \end{aligned}$$

- УФ континуум (1200-2800 Å), OBA звезды:

$$SFR(M_\odot \text{ year}^{-1}) = 1.4 \times 10^{-28} L_\nu \text{ (ergs s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}\text{)}.$$

$$m > 10M_\odot, t \approx 10 \text{ млн. лет}$$

- Нагретая ими пыль в дальнем ИК (8-1000  $\mu\text{m}$ ):

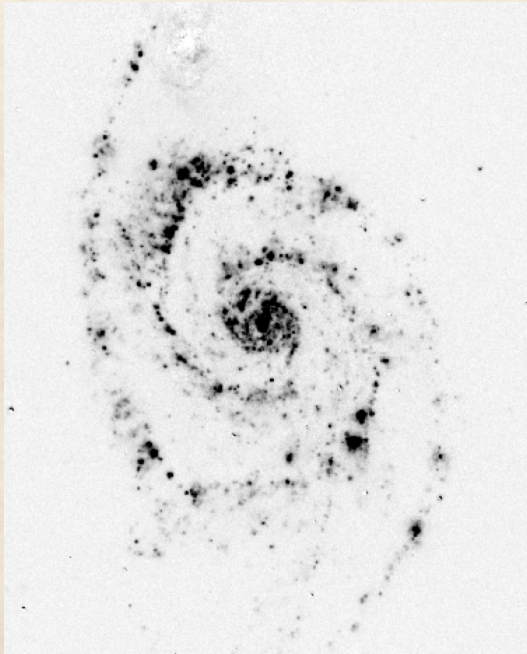
$$SFR(M_\odot \text{ year}^{-1}) = 4.5 \times 10^{-44} L_{FIR} \text{ (ergs s}^{-1}\text{)}$$

$$m > 2M_\odot, t \approx 100 \text{ млн. лет}$$

- Моделирование цветов и фотометрия звезд (Лекция 4)

## SFR (H $\alpha$ )

- Легкие наземные наблюдения
- Угловое разрешение  $\beta \sim 1''$
- Нужен учёт поглощения
- В фильтровых наблюдениях получаем H $\alpha$ + [NII] – вклад азота зависит от металличности и ударных волн (Лекция 3)
- Только массивные OB звезды

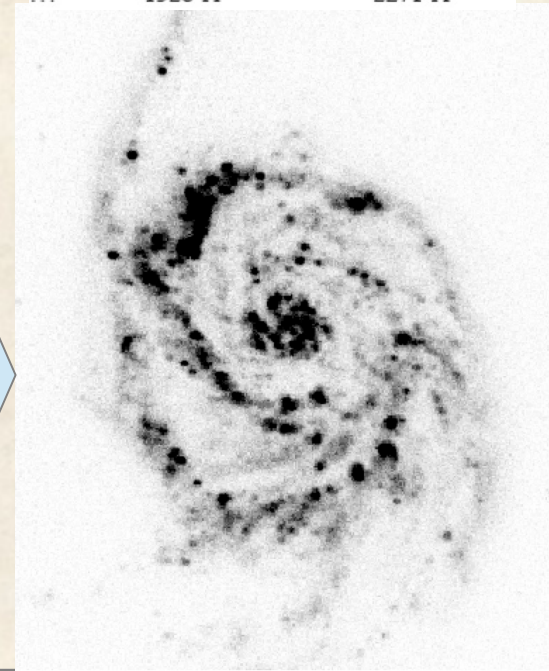


## SFR (UV)

- Космические телескопы (GALEX, SWIFT/UVOT)
- Угловое разрешение  $\beta \sim 5''$
- Нужен учёт поглощения
- Однородные данные, но не очень глубокие
- Менее массивные звезды

PERFORMANCE PARAMETERS FOR GALEX

FUV Band	NUV Band
1344–1786 Å	1771–2831 Å
1528 Å	2271 Å



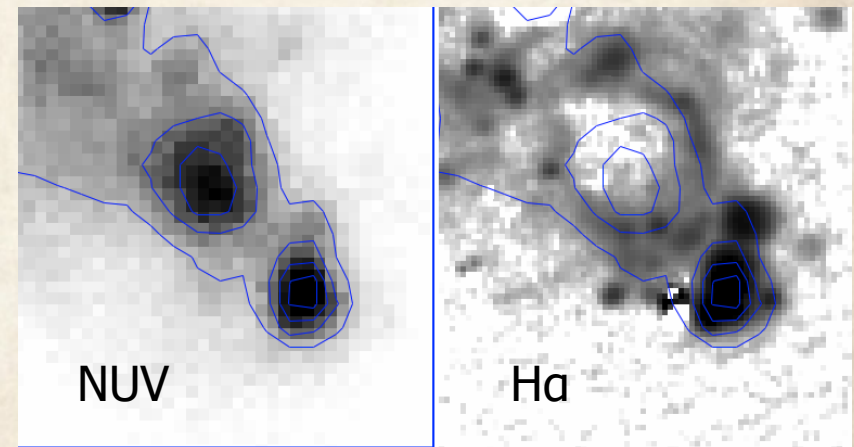
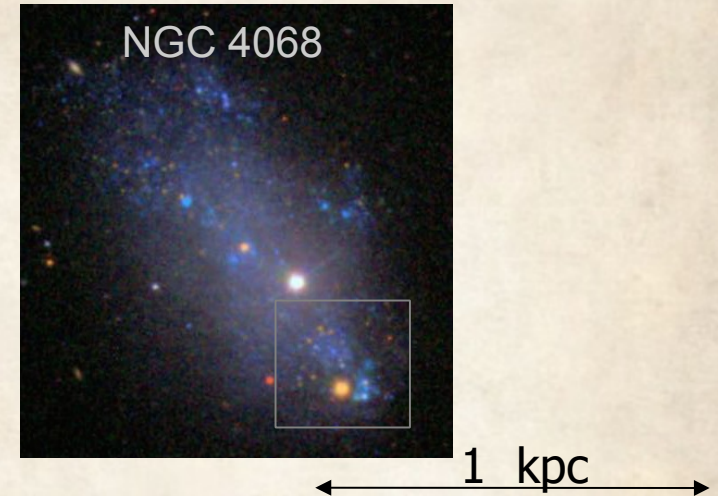
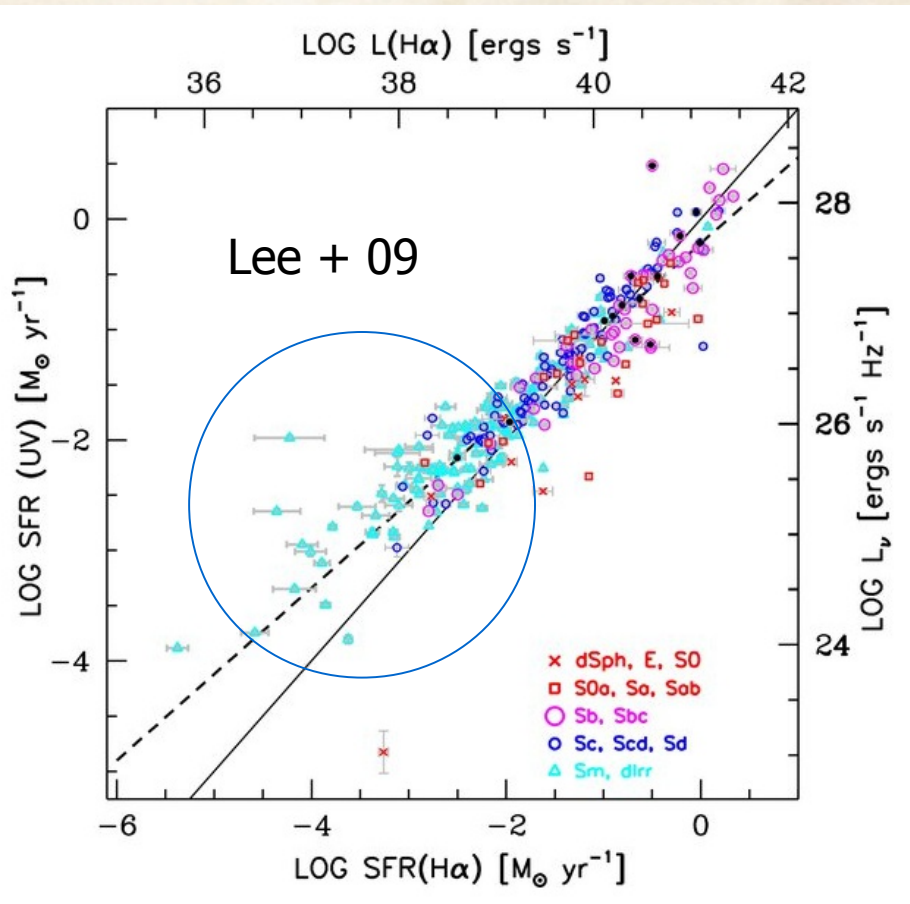
Доступно со  
“Спектр-УФ”

# H-alpha vs UV

SFR (H $\alpha$ )  $\sim$  1-10 млн. лет

SFR (FUV)  $\sim$  100-200 млн. лет

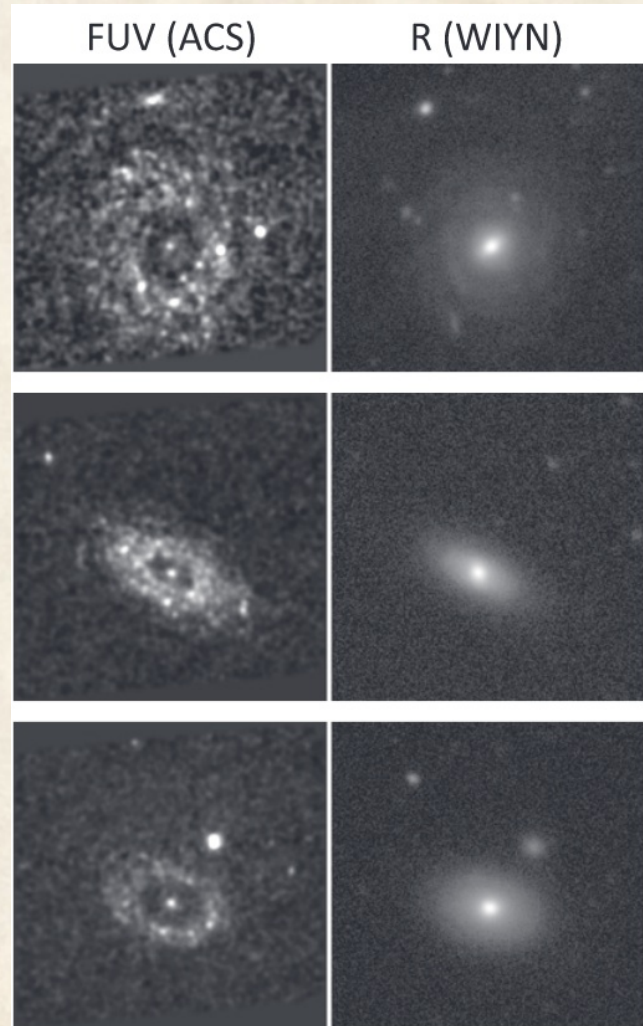
Интегральные SFR хорошо коррелируют, но возможны локальные отличия, связанные с историей ЗО за последние 200 млн. лет



Стохастичность заполнения НФМ – мала  
вероятность застать очень массивную  
молодую звезду в карликовой галактике

# GALEX: УФ-кольца даже в E-S0 галактиках

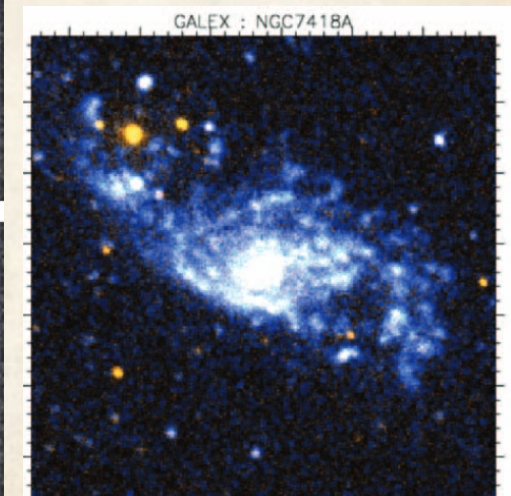
Не всегда сопровождается эмиссией в H $\alpha$ , т.е. вспышка 30 уже прошла



Salim+2012:  
3/4 ETG :  
SFR~0.5 Mo/yr  
25-75 кpc:

Газ захваченный галактиками  
(аккреция спутников)

Протяженные диски (XUV)  
Thilker + 2007





# SFR(FIR)

Вклад в ИК излучение

5-20  $\mu\text{m}$ : молекулы ПАУ(Полициклические Ароматические Углеводороды)

20-60  $\mu\text{m}$ : горячая (50-100K) мелкая пыль

60-1000  $\mu\text{m}$ : холодная (10-30K) крупная пыль

Типичное угловое разрешение  $\beta > 5-30''$

“(проблема  $\lambda / D$ ”, Лекция 3)

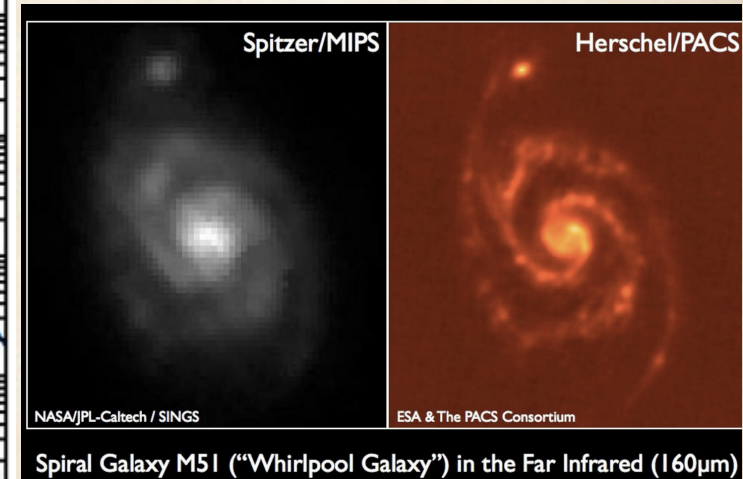
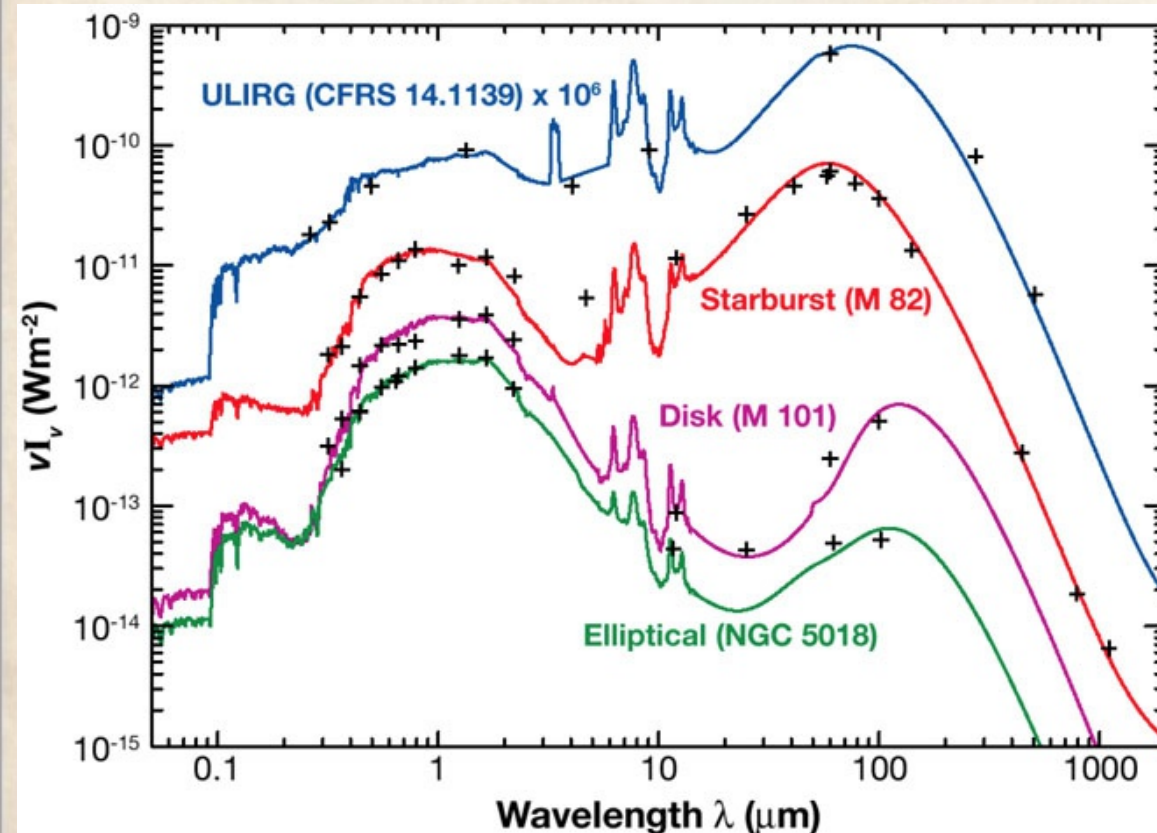
IRAS: 12-120  $\mu\text{m}$

Spitzer: 3.6-160  $\mu\text{m}$

Herschel: 55-672  $\mu\text{m}$

AKARI: 1.7-180  $\mu\text{m}$

WISE: 3.2-22  $\mu\text{m}$



# Типичные величины SFR

E-S0, dIrr: <1 Mo/год

Sa-Sd: 1-10 Mo/год

Млечный путь: 1.9 Mo/год (Chomiuk & Povich 2011)

Starburst: 10-100 Mo/год

SFR по разным индикаторам – статистически коррелируют, но отличия могут достигать нескольких раз (НФМ, история 30)

Эффективность звездообразования:

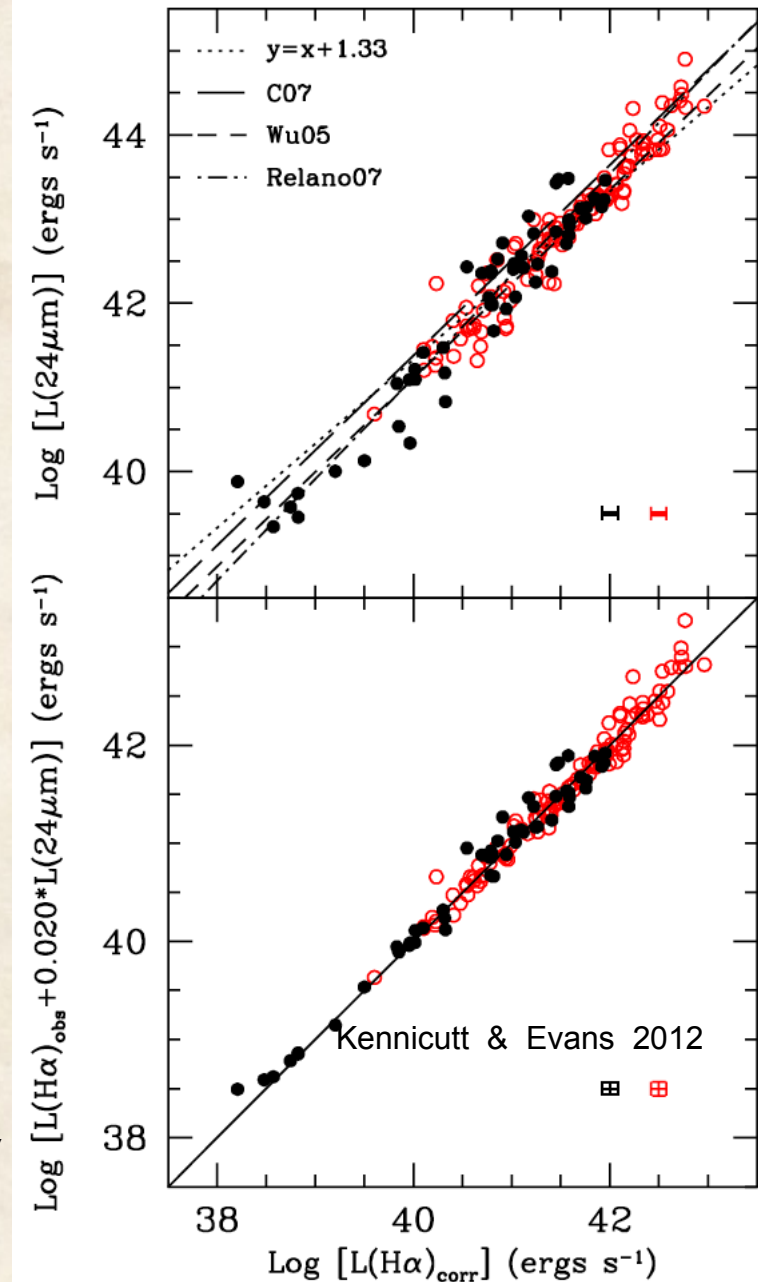
SFR на единицу массы газа:

$$\text{SFE} = \text{SFR} / M_{\text{gas}} [\text{год}^{-1}] = 1 / t_{\text{dep}}$$

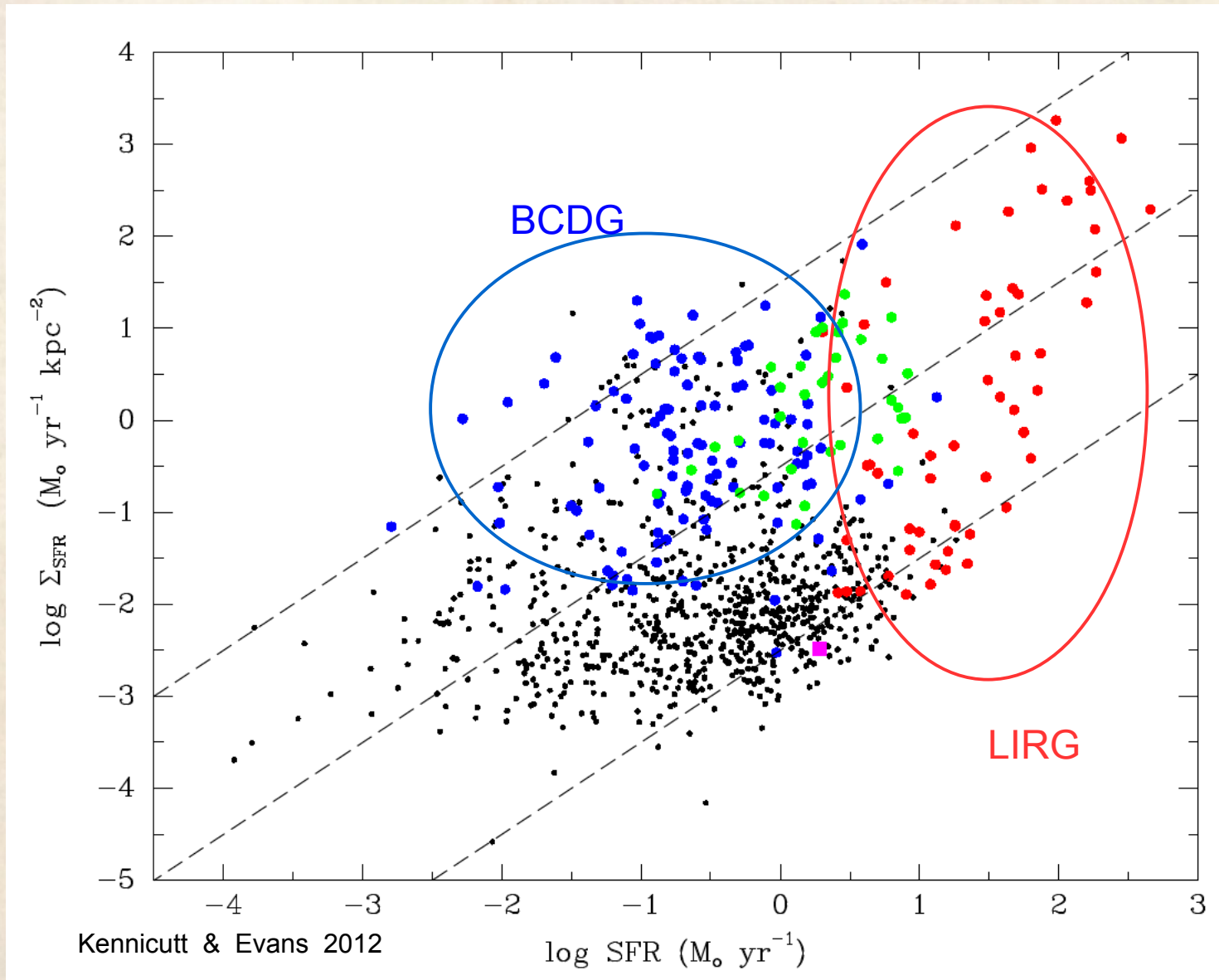
Типичное время истощения газа:

$$t_{\text{dep}} = 1-2 \text{ млрд. лет}$$

Либо мы так “удачно” застали все галактики, либо наличные запасы HI – лишь временный “резервуар”, куда может приходиться внешний газ (и возвращение переработанного в звездах)



# SFR на единицу площади



# Закон Кенниката-Шмидта

Schmidt (1959)

$$\rho_{SFR} \sim \rho_{H_2}^{n_s}$$

Переход к легко наблюдаемым величинам, Kennicutt (1989):

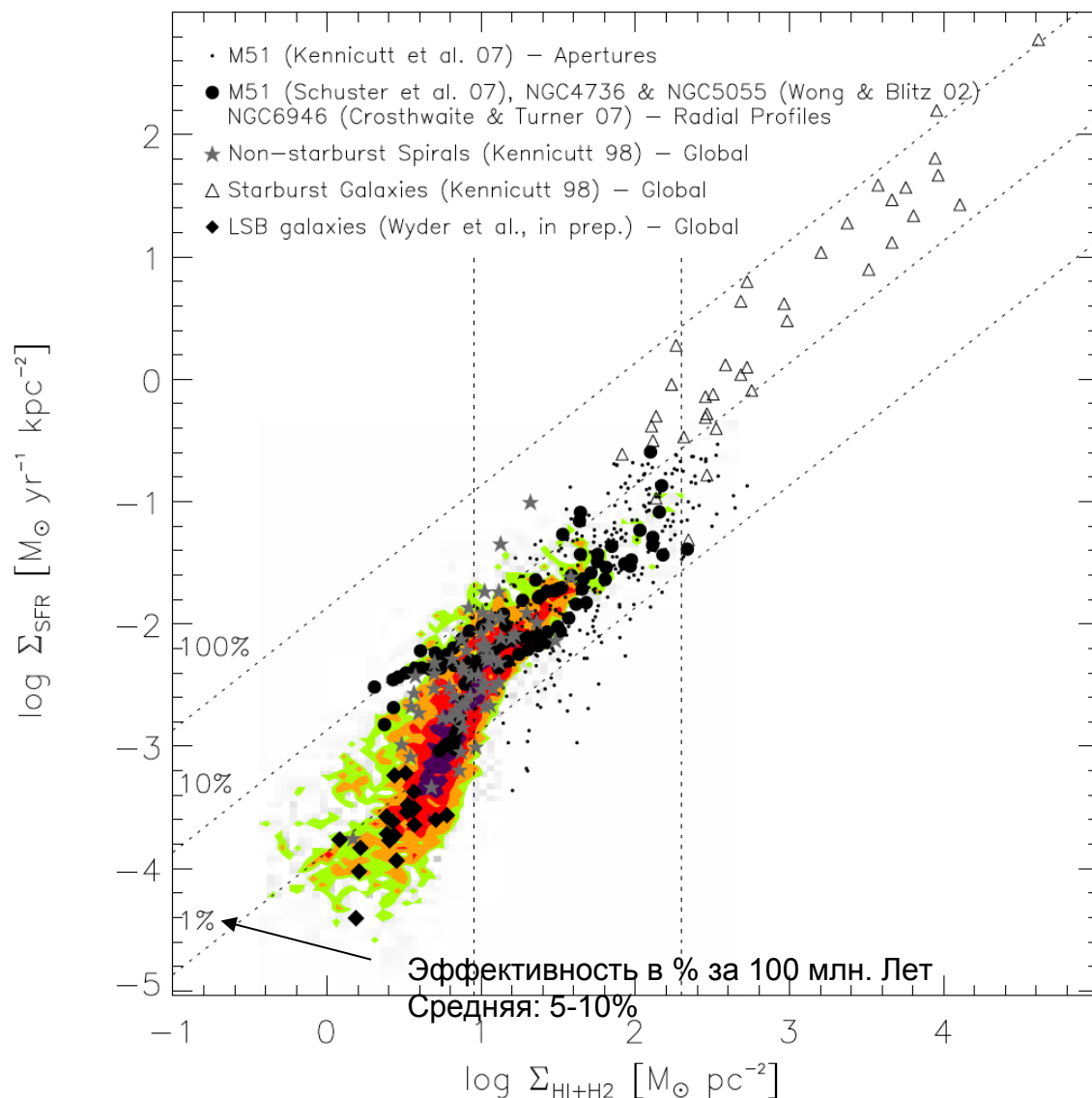
$$\Sigma_{SFR} \sim \Sigma_{gas}^n, n = 1.4 \pm 0.15$$

Одно из обоснований закона:

$$\rho_{SFR} \propto \frac{\rho_{gas}}{(G\rho_{gas})^{-0.5}} \propto \rho_{gas}^{1.5}$$

Завал SFR ниже критической плотности

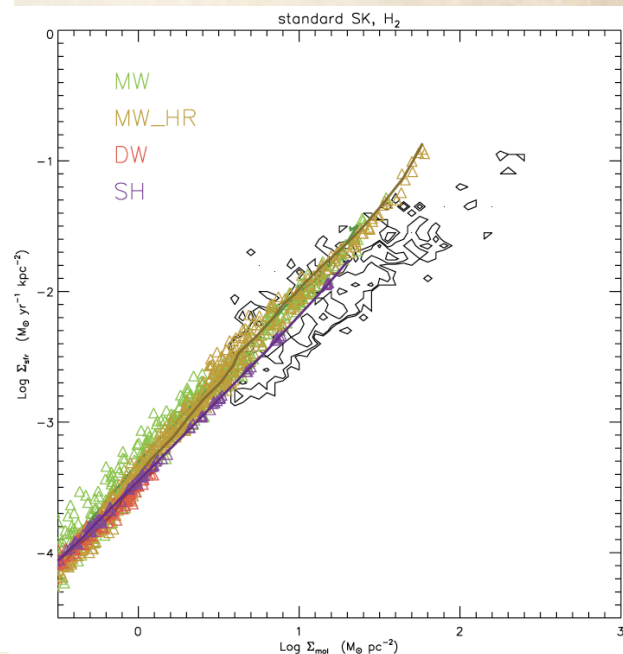
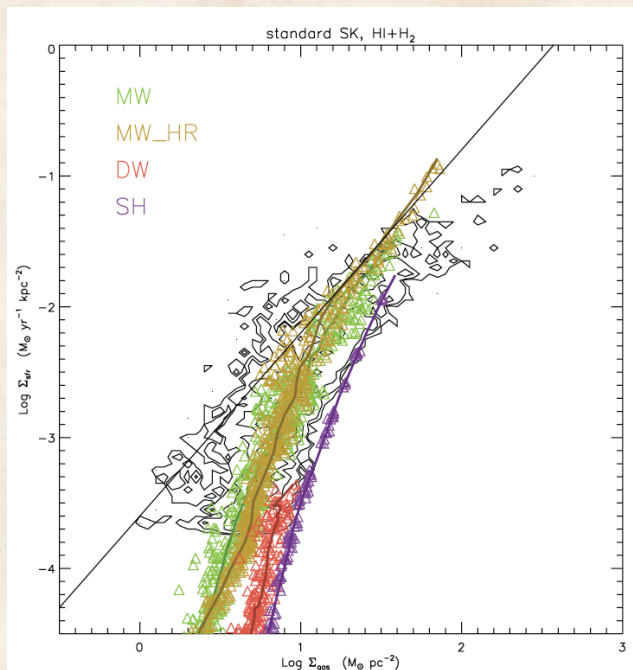
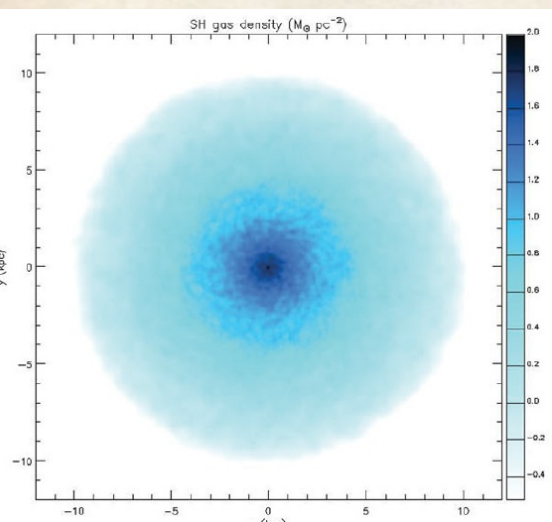
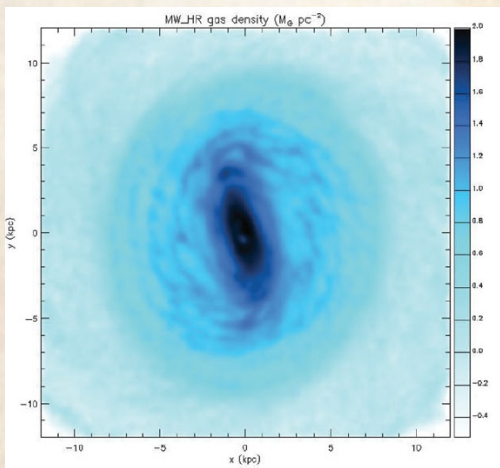
Более высокая SFE для starburst (высокая плотность газа)



Kennicutt & Evans 2012

# Закон Кенниката-Шмидта: моделирование

Мокасo + 2008: сравнение с наблюдениями, соотношение более тесное для молекулярного газа

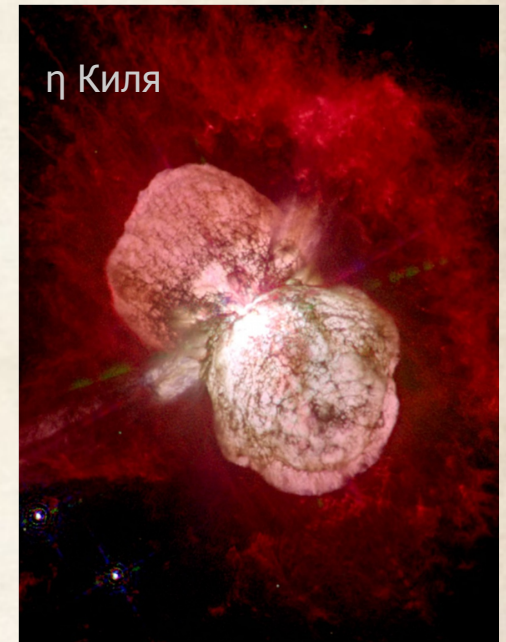


Учёт воздействия сверхновых и других факторов (Orr + 2018)

# Воздействие звёзд на окружающий газ (feedback)

Что может одна звезда: остатки сверхновых, туманности вокруг LBV, WO

$E \sim 10^{50-51}$  эрг,  $r \sim 1-100$  пк,  $t = 10-100$  тыс. лет



# Оболочки вокруг звёздных скоплений/ассоциаций

$E \sim 10^{52} - 10^{53}$  эрг (10-100 SN)

$r \sim 100 - 200$  пк

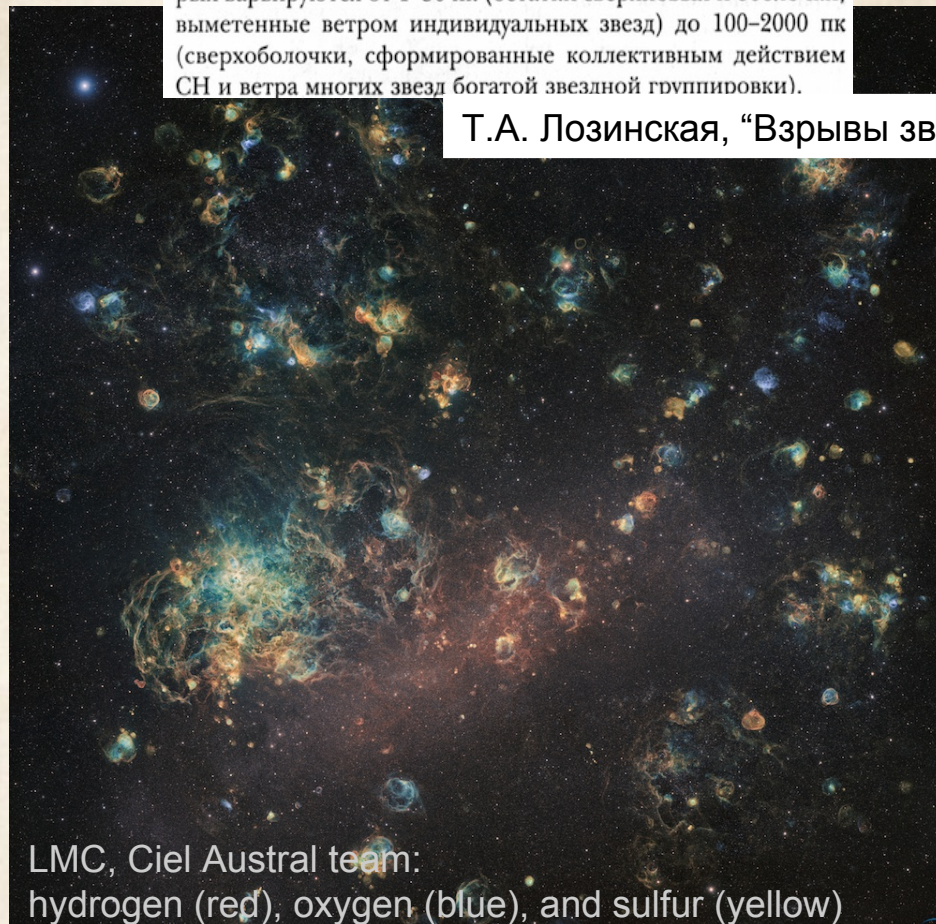
$t \sim$  до 1 млн. лет

LHA 120-N 180B ('Gargantuan Bubble')



показано на рис. 3.6. Все подобные изображения с достаточно высоким угловым разрешением демонстрируют, что газовая среда галактик представляет собой «слой пены», состоящий из множественных оболочек и сверхоболочек, размеры которых варьируются от 1–50 пк (остатки сверхновых и оболочки, выметенные ветром индивидуальных звезд) до 100–2000 пк (сверхоболочки, сформированные коллективным действием SN и ветра многих звезд богатой звездной группировки).

Т.А. Лозинская, "Взрывы звезд..."

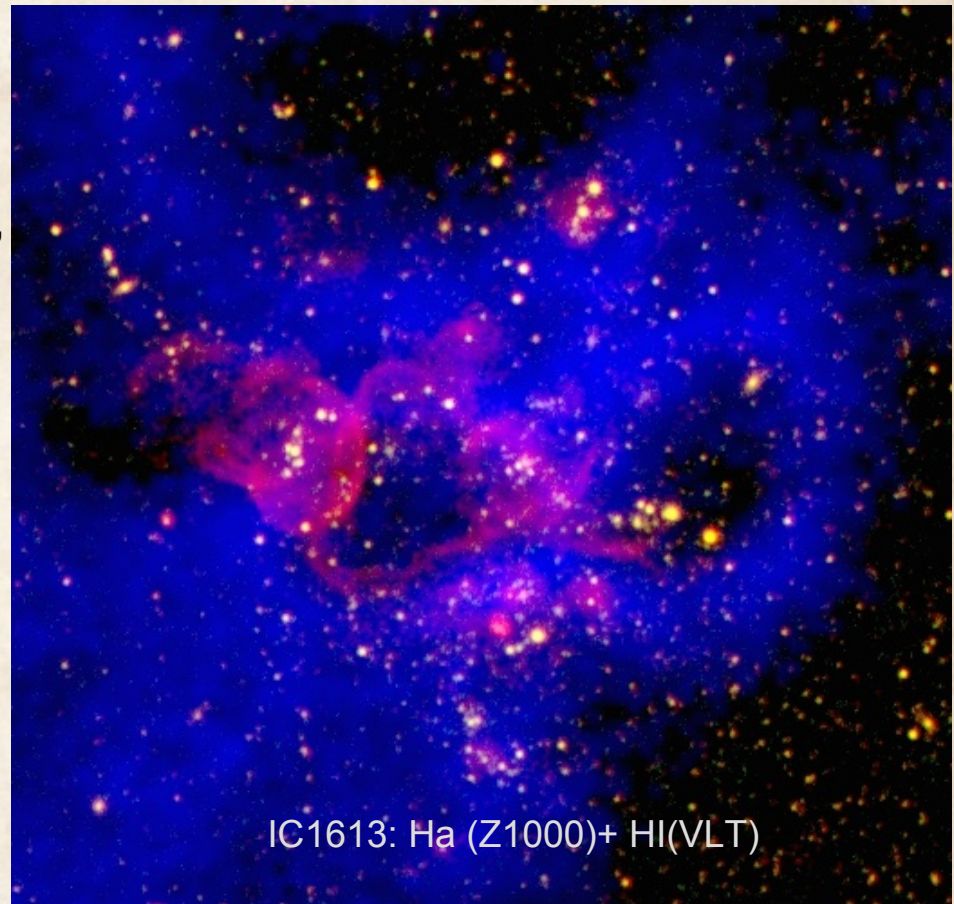


LMC, Ciel Austral team:  
hydrogen (red), oxygen (blue), and sulfur (yellow)

# Карликовые dIrr галактики как “лаборатория ЗО”

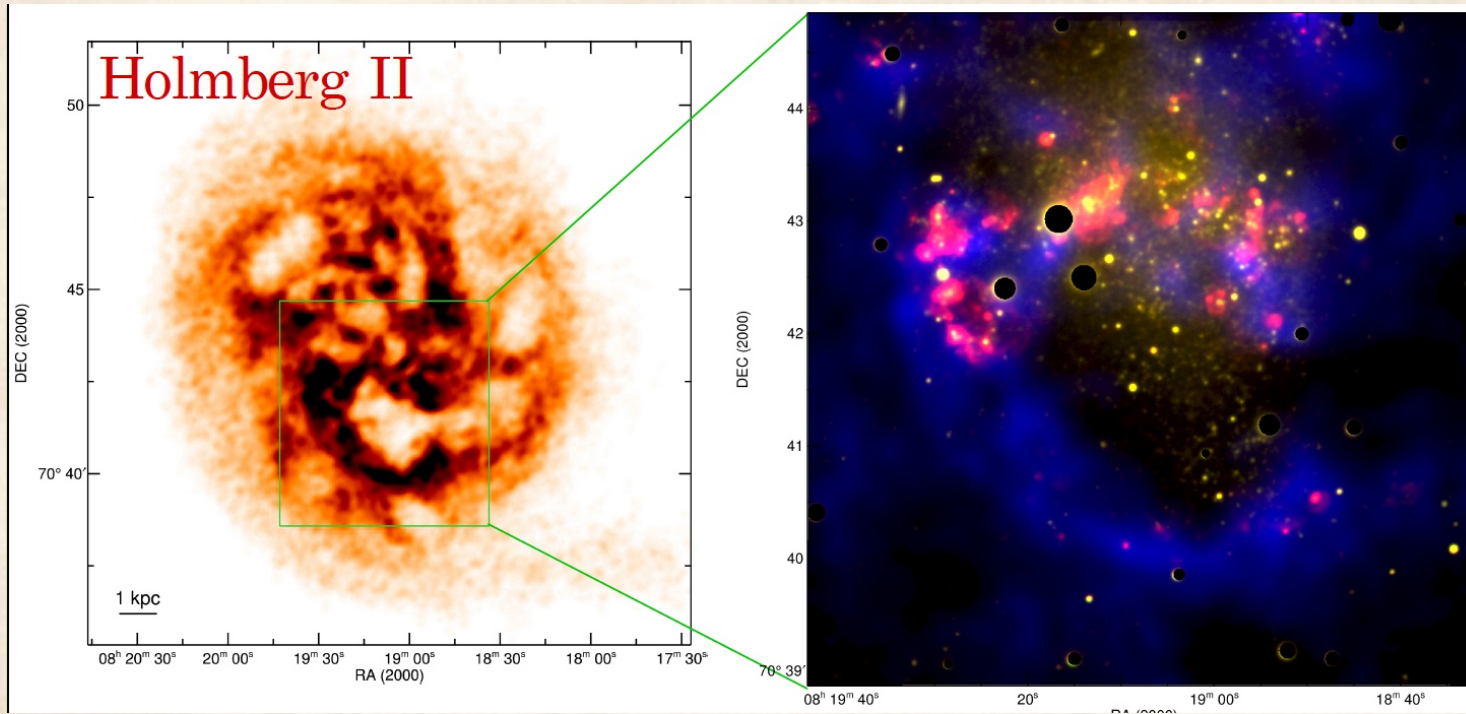
Кинетическая энергия от процессов звездообразования “впрыскивается” в МЗС (сверхновые, звездный ветер, радиационное давление на пыль, джеты протозвезд...)

- Удобно наблюдать “со стороны”
- толстые диски HI (“пузыри не прорываются”)
- Нет спиральных волн (“пузыри не деформируются”)
- Особенности эволюции массивных звезд и МЗС низкой металличности
- Мало пыли – мало межзвездное поглощение





# Индукцированное звездообразование в стенках

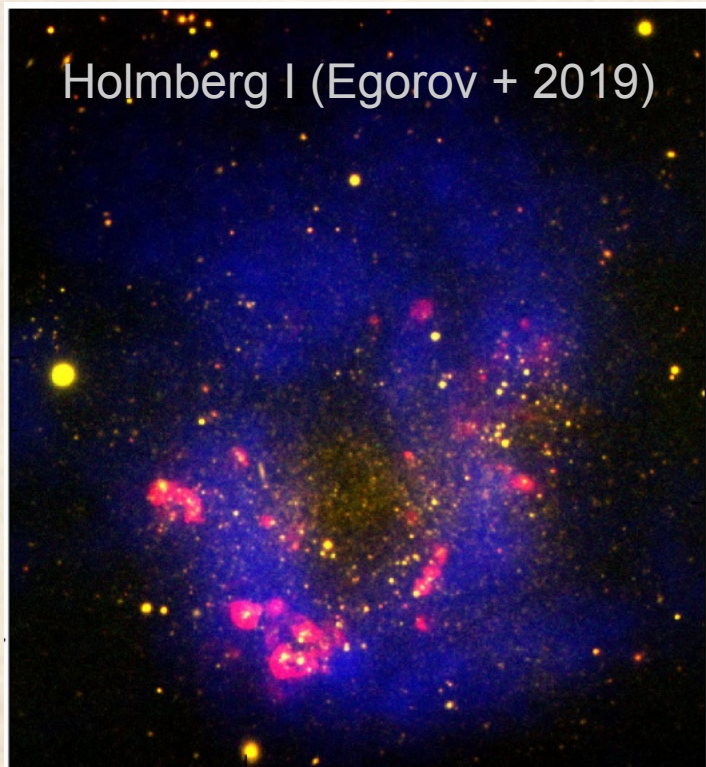


HI (VLA) + HII (BTA): Egorov +2017

Энергии центральных скоплений недостаточно для наблюдаемых сверхоболочек, размером до 1 кпк ( Kim + 1999; Silich +2006)

=> фотометрия HST указывает на последовательное ЗО (Weisz+ 2009; Cannon+2011)  
Не только центральные скопления, но и звездообразование в стенках

# Энергетический бюджет оболочек



Holmberg I (Egorov + 2019)

$E \sim 10^{52} - 10^{53}$  эрг (10-100 SN)

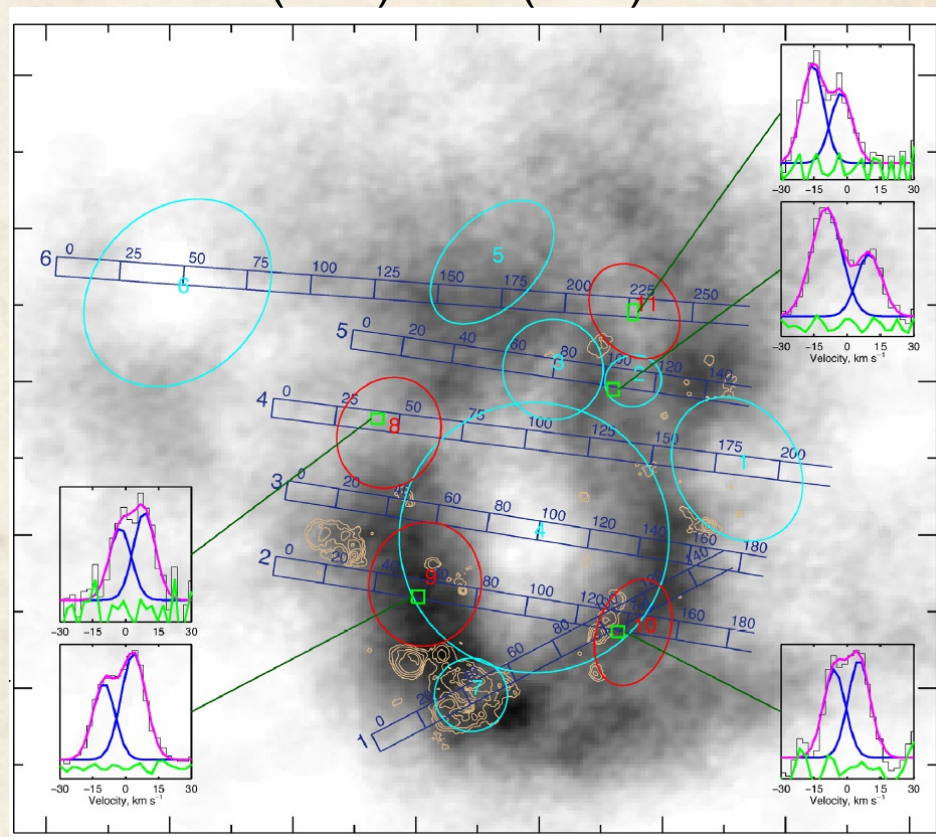
$r \sim 200 - 1000$  пк

$t \sim 1 - 50$  млн. лет

Кинетическая энергия расширения – по линиям HI (VLA) и HII (БТА)

Энергетика центральных скоплений – по моделям звездной эволюции

Баланс сходится!

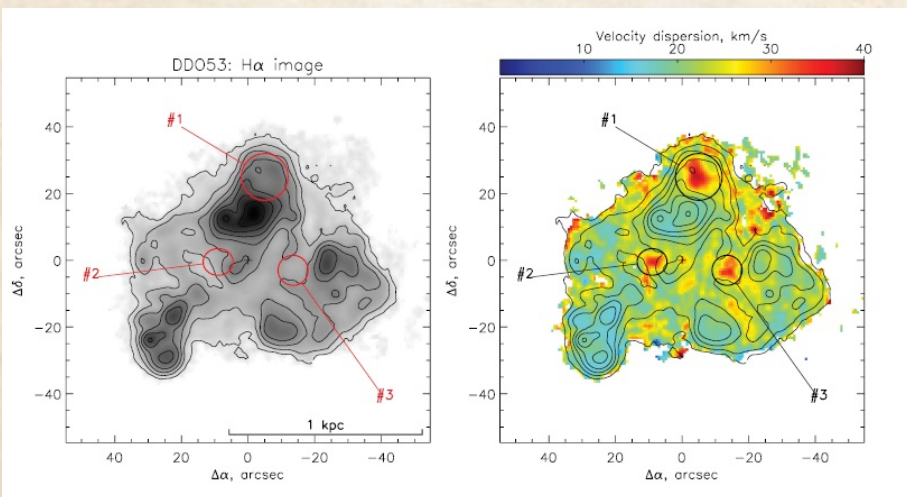
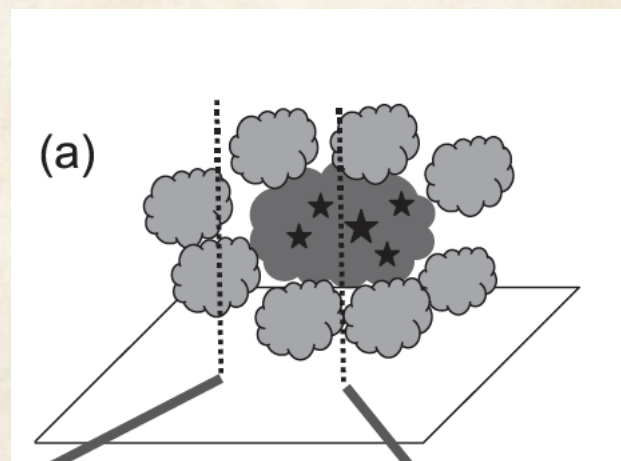


# Дисперсия скоростей, как мера турбулентных движений

Наблюдаем “дисперсию лучевых скоростей” (по уширению линий), она не равна тождественно той  $\sigma_{\text{gas}}$ , что входит в формулы гидродинамики.

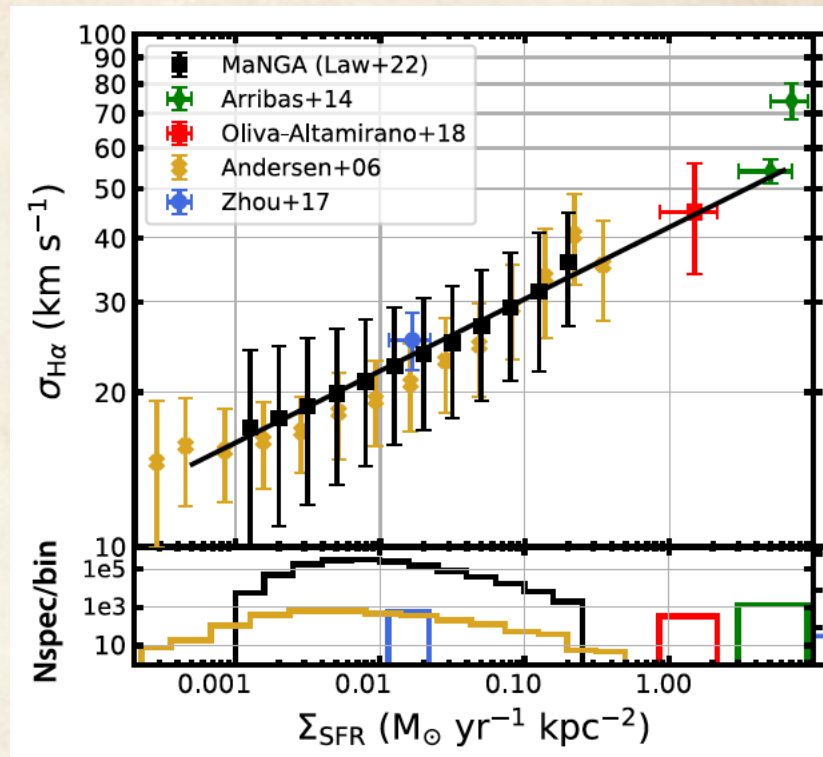
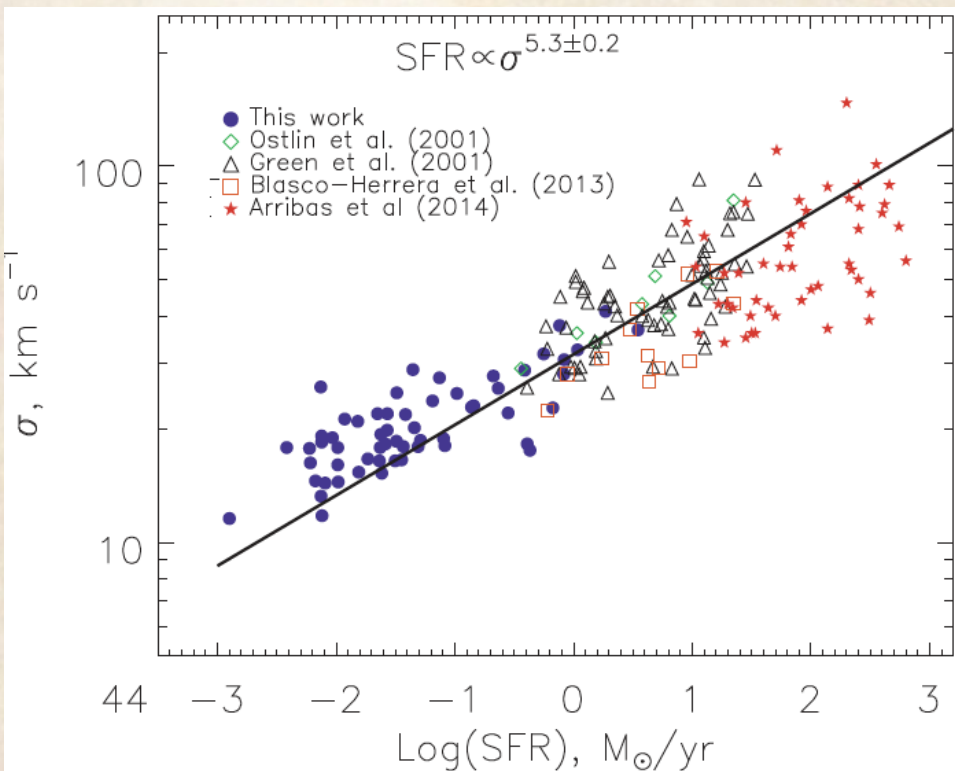


Уширение линий, как мера скорости расширения оболочек:  
 $t \sim r/\Delta V \sim r/\sigma_{\text{gas}}$



Динамически “холодное” ядро области ЗО и динамически “горячий” диффузный газ вокруг

# SFR- $\langle\sigma\rangle$ (усредненное по галактике)



(~4500 галактик, Law + 2022)

Соотношение выполняется в широчайшем диапазоне SFR – от карликов до гигантов. Турбуленция газа в дисках галактик связана с их “накачкой” от звездообразования, это более важный фактор, чем динамическая масса

# Всплывающие "пузыри" и "фонтаны" в диске

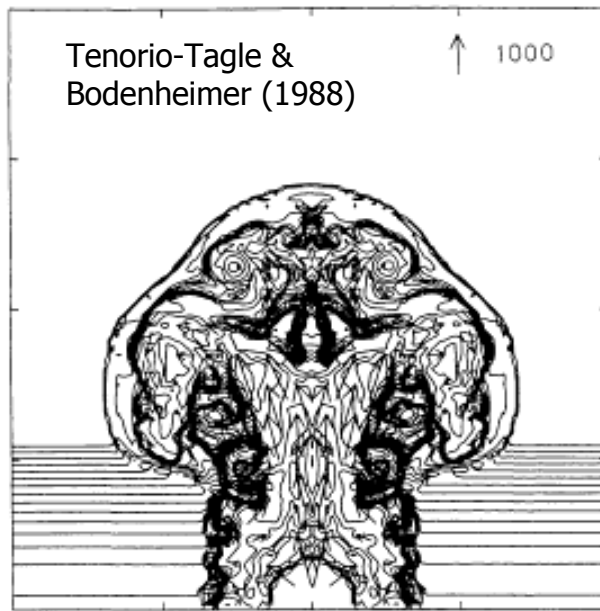
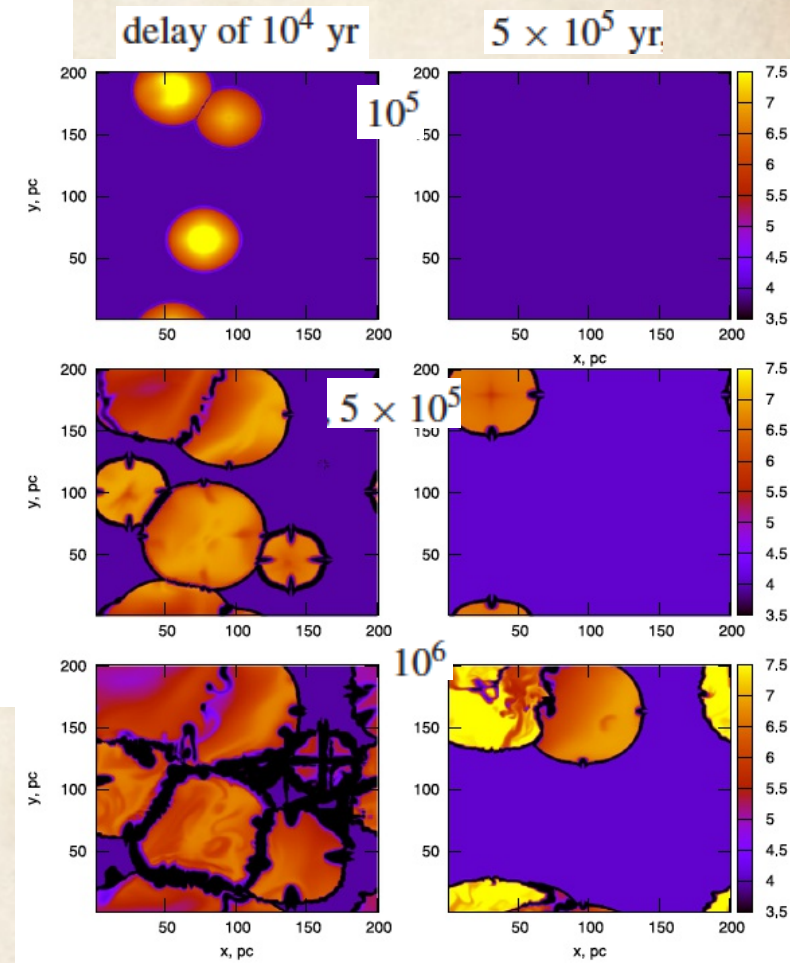


Figure 4 The remnant caused by sequential supernova explosions in a disk with Gaussian density stratification, after a time of  $5.6 \times 10^6$  yr. The disk parameters are  $n_0 = 1 \text{ cm}^{-3}$  and  $H = 100$  pc. The supernova parameters are  $z_{\text{OB}} = 0$  pc, supernova interval  $\Delta\tau = 2 \times 10^5$  yr, and energy  $E = 10^{51}$  ergs per explosion. Density contours and velocity vectors are given as



Требуются частые (раз  $\sim 10\,000$  лет )  
взрывы сверхновых в компактной  
области

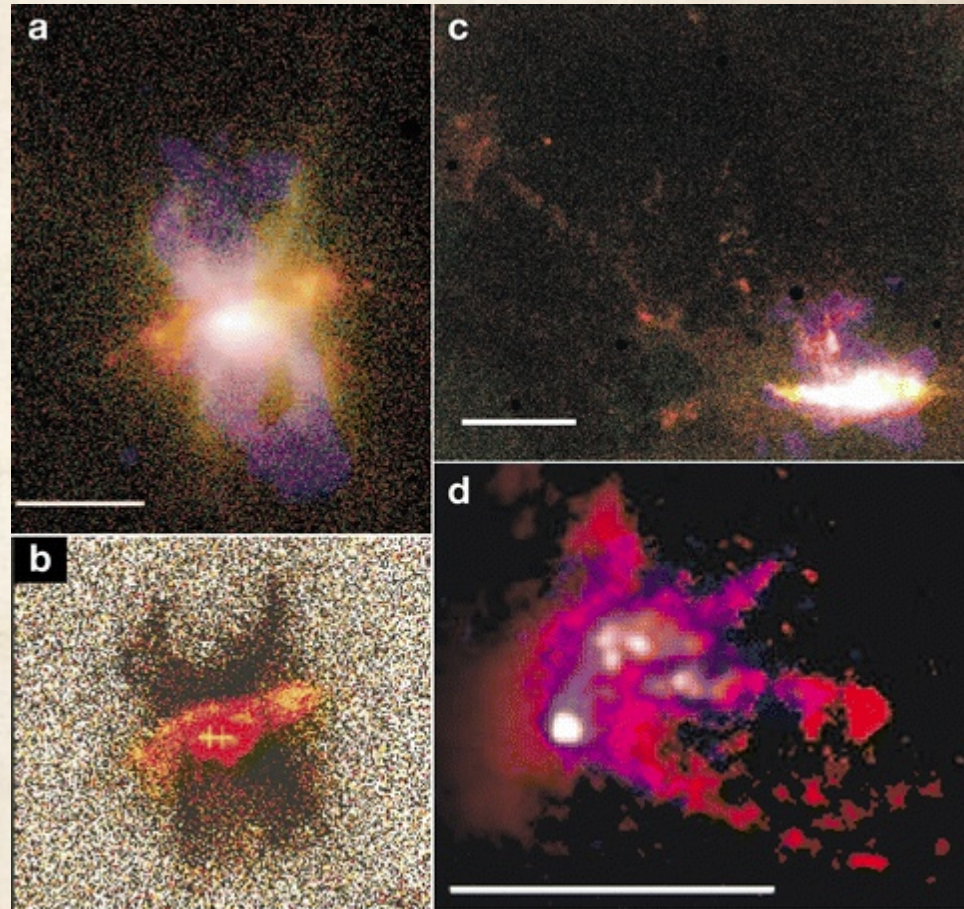
Vasiliev + 2015

# “Галактический ветер”: M82 и другие

$E \sim 10^{54} - 10^{56}$  erg (1-100 тыс. SN)  
 $r \sim 3 - 10$  кпк  
 $t \sim 10$  млн. лет



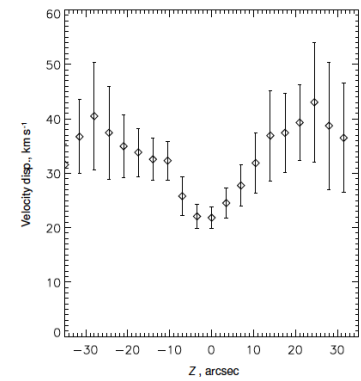
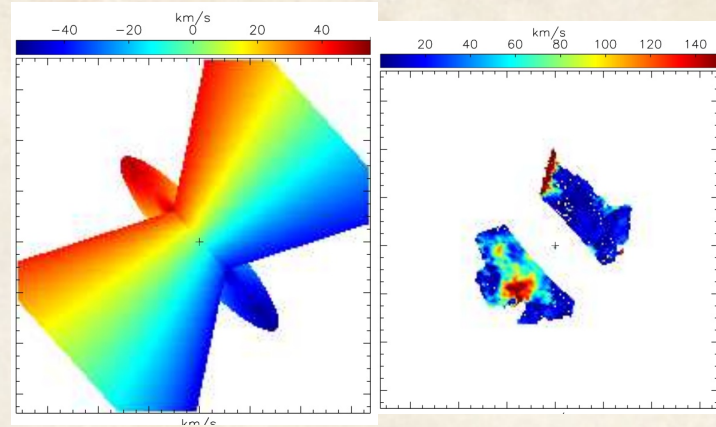
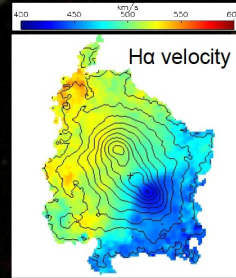
Veilleux, S et al. 2005



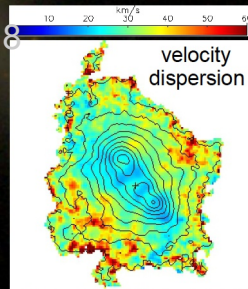
Veilleux, S et al. 2005  
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 43: 769-826

# Параметры галактического ветра

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



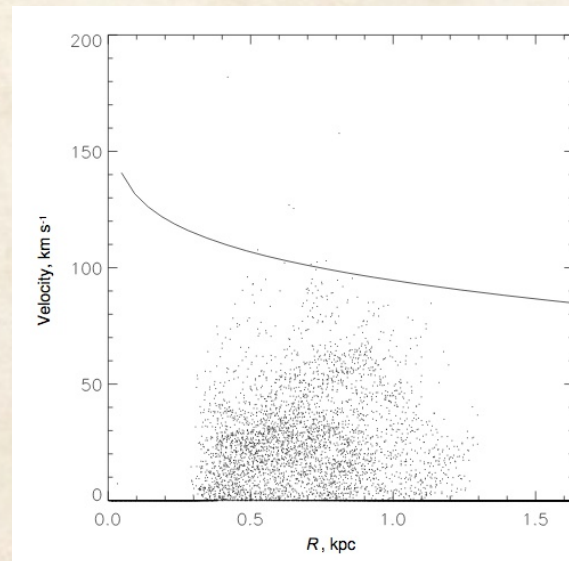
Oparin & Moiseev 2018



$V_{out} = 50-70 \text{ km/s} \sim \sigma_{gas}$

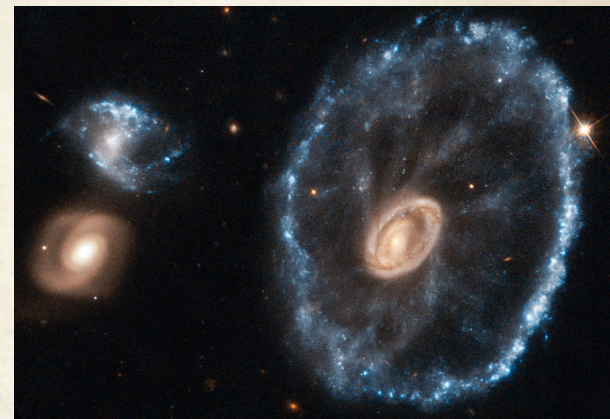
3 kpc

$V_{out} < V_{esc}$  – типично для близких галактик (кроме M82) – газ должен вернуться и вновь включиться в процесс ЗО



# Индукцированное звездообразование

- Гравитационная неустойчивость (“спокойный”, “тлеющий” режим)
- Ударные волны, часто связанные с отклонением распределения гравитационного потенциала от осевой симметрии:
  - спиральные волны, бар, кольцевые волны
  - захват газового облака/спутника
  - слияния с близким по массе компаньоном



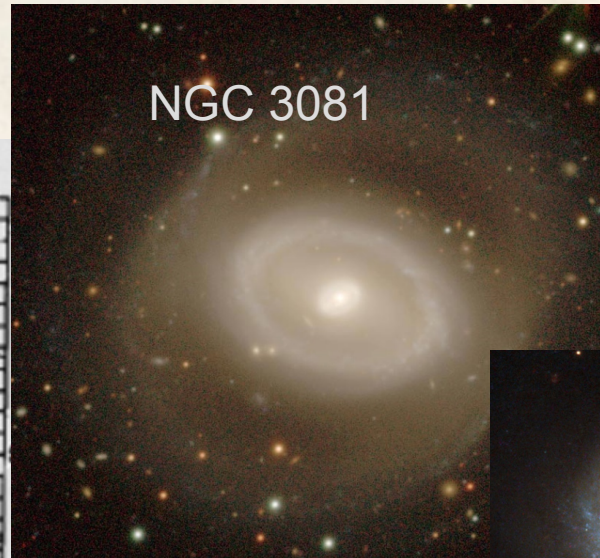
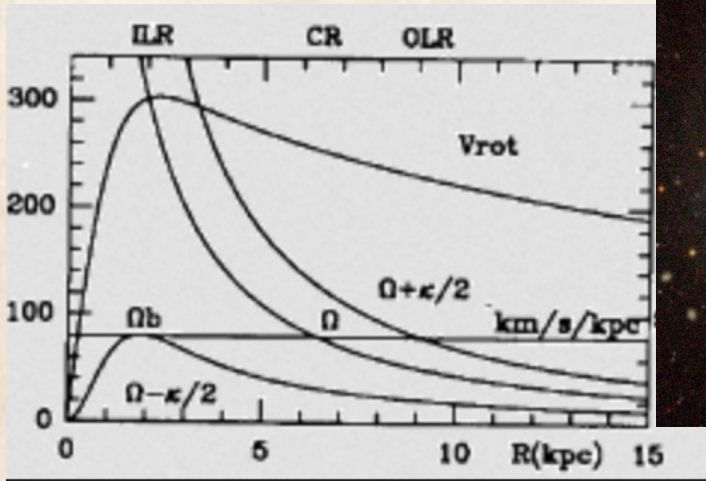


# Индукцированное звездообразование: бар, спирали

Удар - из-за разности скоростей вращения:

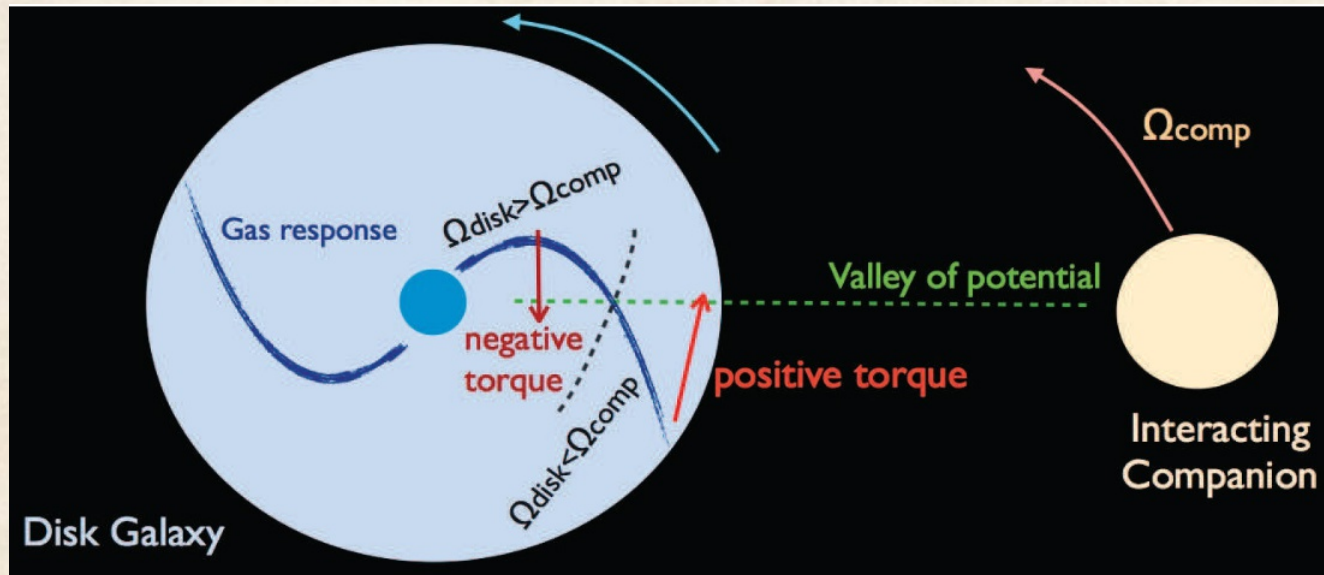
$$\Delta V = |\Omega - \Omega_b| r = 50-100 \text{ км/с (бар)}, 20-30 \text{ км/с (спираль)}$$

Перенос углового момента, концентрация газа на внутреннем (ILR) или внешнем (OLR) линдбландовских резонансах, Колец



Buta & Combes 1996

# Сходный принцип при гравитационном взаимодействии

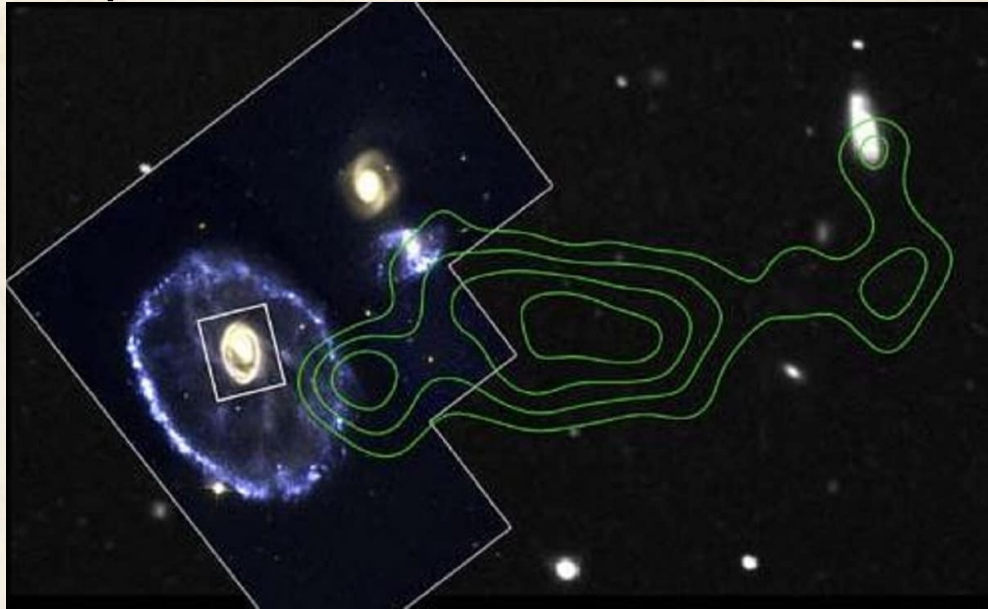


(Bournaud 2010):

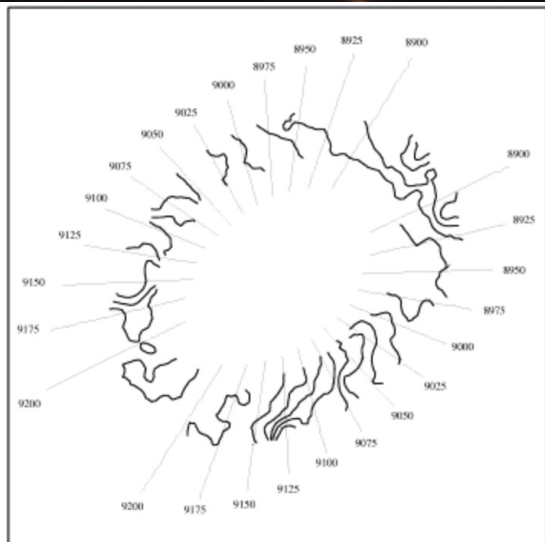
- Хвосты – результат перераспределения момента
- Высокая  $\sigma_{gas}$  при богатых газом слияниях (турбуленция, удар)  $\rightarrow$  рост  $\lambda_c$ , высокая SFE формирование массивных скоплений,
- Наиболее мощная вспышка – перед первым прохождением перицентра
- Лишь 10% больших (1:1-1:5) слияний дают мощную вспышку 3O ( $SFR > 10SFR_{old}$ )



# Столкновительные кольцевые галактики



(21 cm Hidgon 1996)



Amram + 1998 : из поля скоростей  $V_{\text{exp}}=13-30 \text{ km/s}$

$t \sim 400$  млн. лет

Быстрое формирование кольцевой волны  
(Arp 10: 85 млн. лет, Viziaev +2006)

# Большие слияния (1:1) и ультраяркие ИК галактики

Luminous infrared galaxies (LIRGs):  $L(\text{FIR}) > 10^{11} L_{\odot}$ ,  $L(\text{FIR}) > L(\text{opt})$

ULIRG:  $L(\text{FIR}) > 10^{12} L_{\odot}$

SFR = 100-1000  $M_{\odot}/\text{год}$

Высокое пылевое поглощение

ULIRG – бывает вклад от активного ядра

NGC 6240 – ближайший прототип, 3 ядра



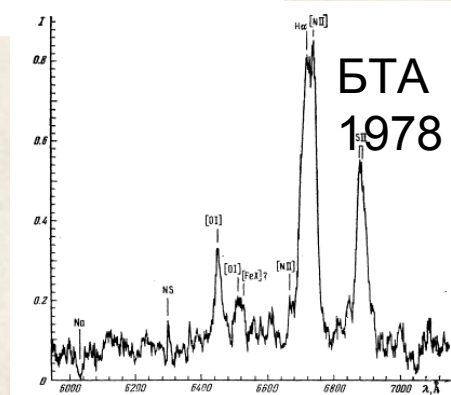
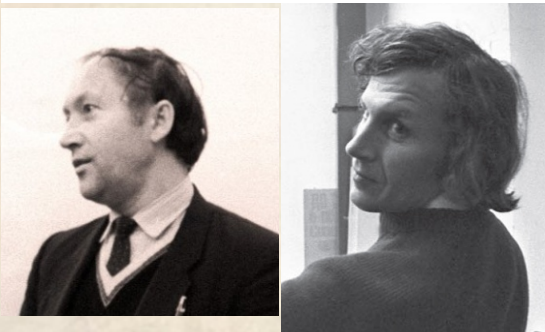
## The unusual object NGC 6240 (VV 617)

A. V. Zasov and I. D. Karachentsev

*Sternberg Astronomical Institute, Moscow  
and Special Astrophysical Observatory, Academy of Sciences of the USSR, Nizhnii Arkhiz*

(Submitted January 23, 1979)

*Pis'ma Astron. Zh.* 5, 237-241 (May 1979)

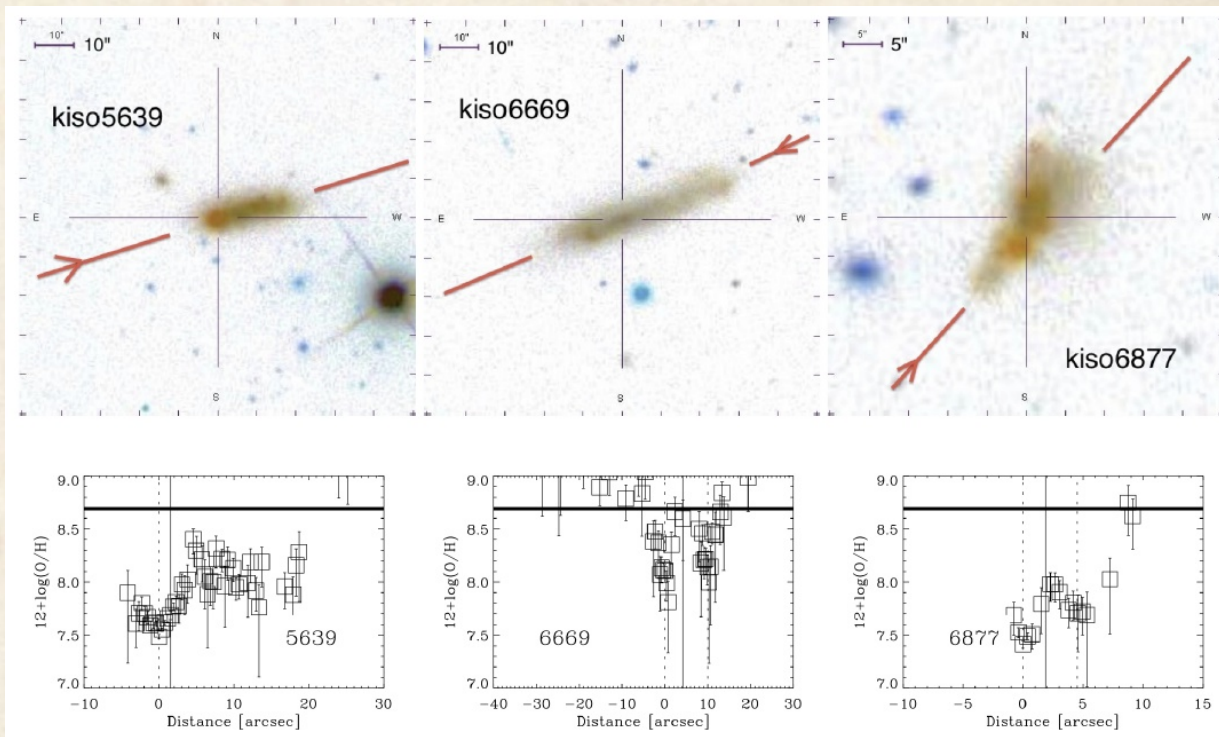


# Головастики – пример выпадение низкометаллического газа

Tadpole galaxies:

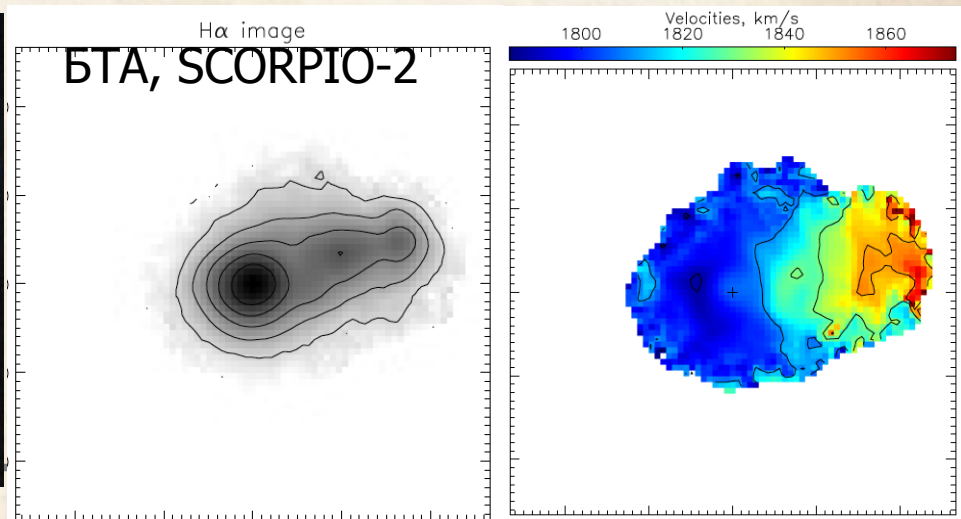
Низкая  
металличность  
периферийных  
областей ЗО

Sanchez Almeida  
et al. (2013).



KISO 5639: HST

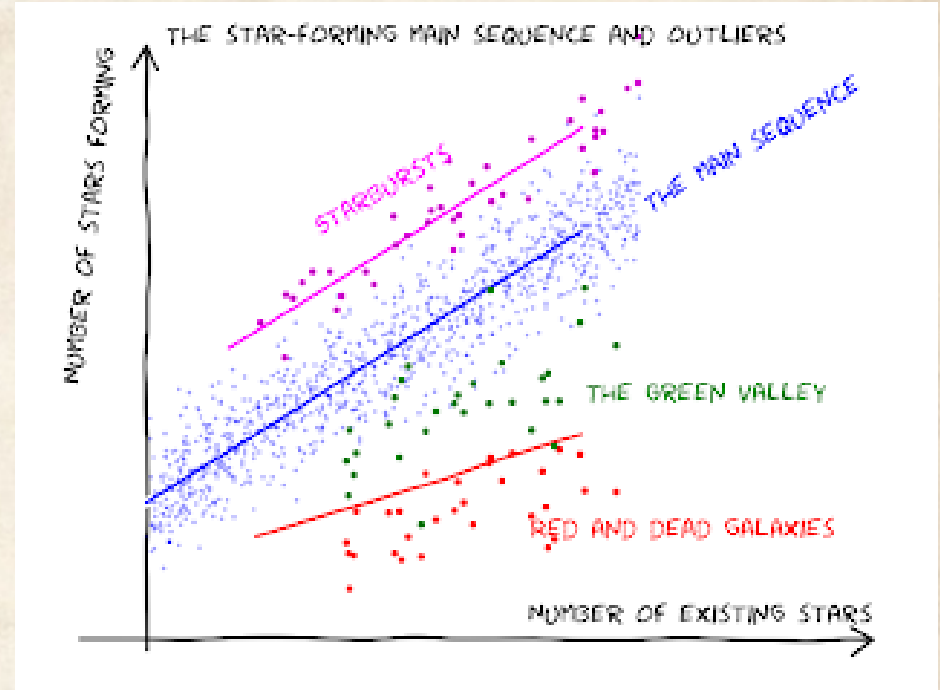
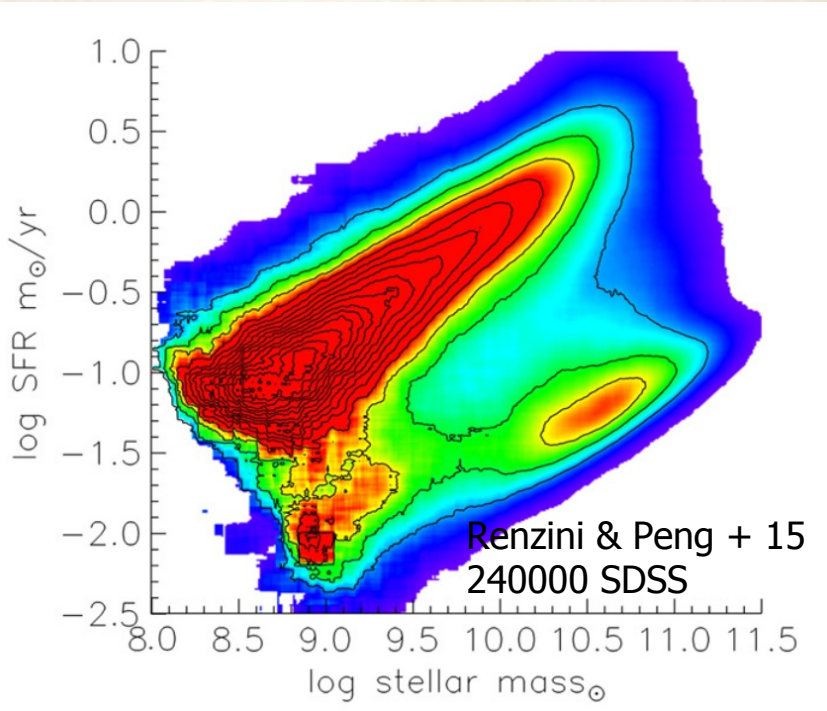
*А.В. Мусеев,*



# Главная последовательность

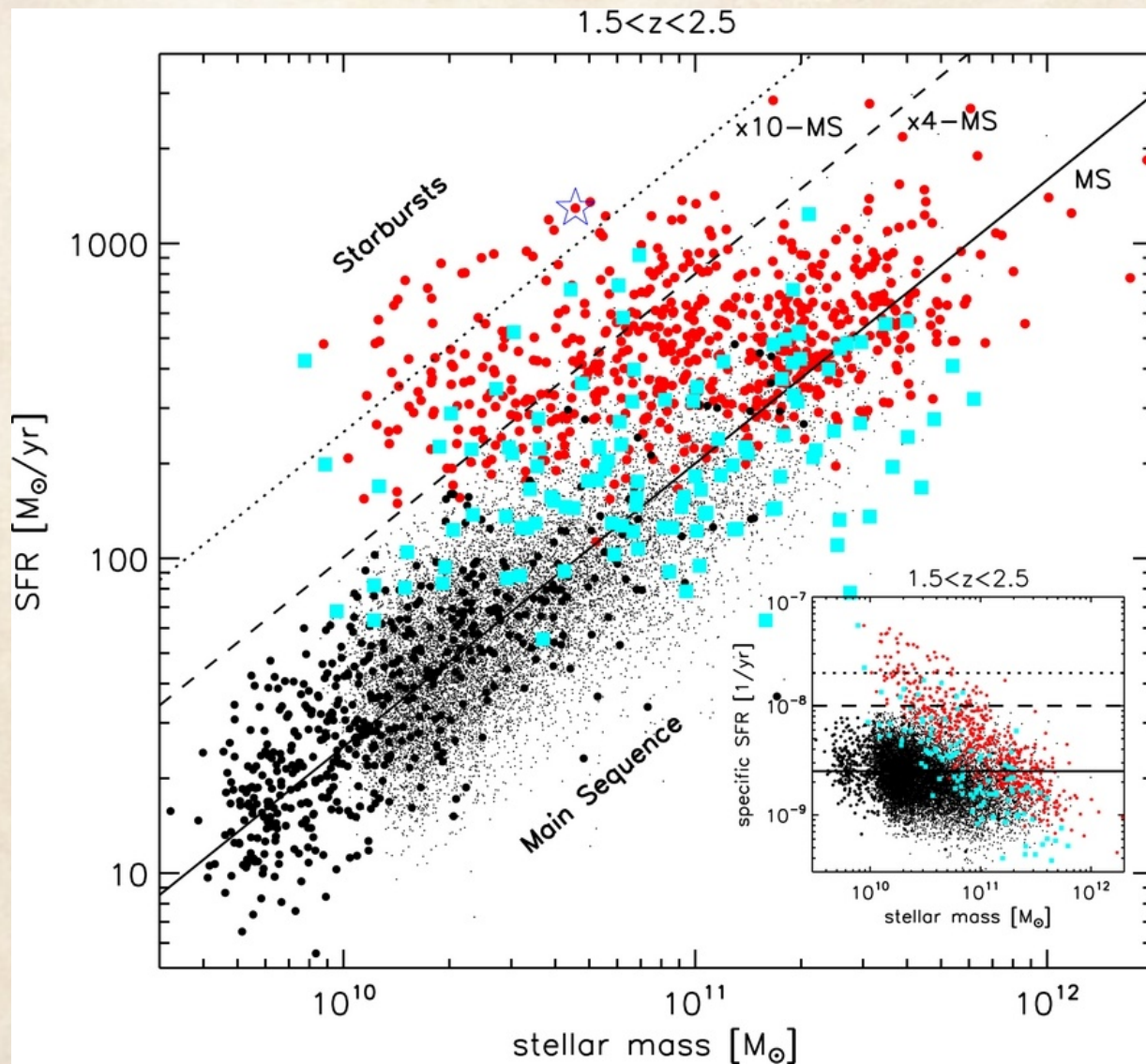
( Strateva et al., 2001; Noeske+07)

Ferguson/CANDELS



Галактики большей массы - имеют более высокий SFR (аккреция, мерджинг?)  
Основная масса звезд сформирована на ГП, а не во вспышках

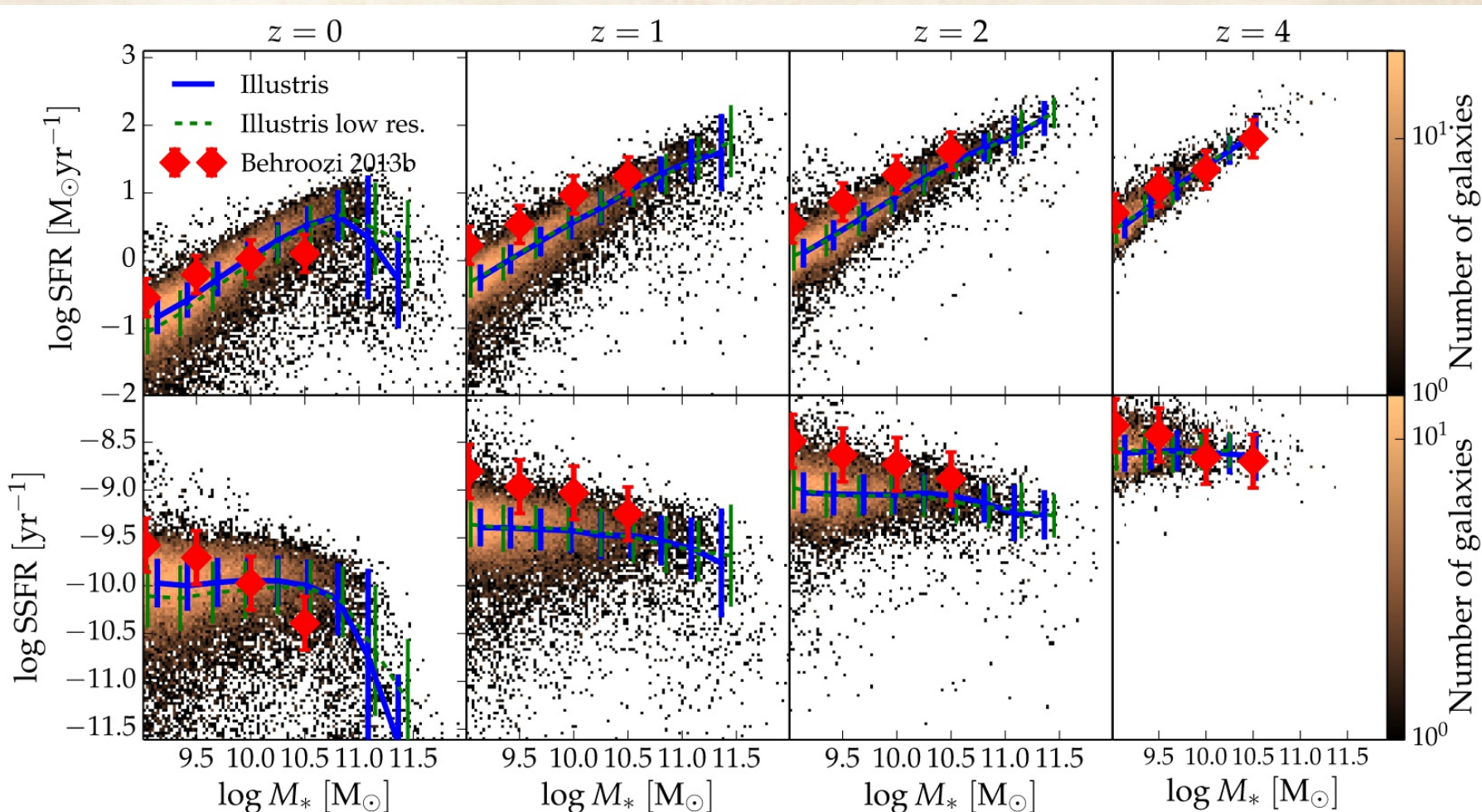
# ГП на больших $z$ : предмет для наблюдений и моделей



Starburst only 2% of mass-selected star-forming galaxies and account for only 10% of the cosmic SFR density at  $z \sim 2$  (Rodighiero + 2011)

Наклон зависимости –  
удельный SFR:  
 $s\text{SFR} = \text{SFR}/M^*$

# Эволюция ГП с красным смещением: наблюдения и модели



Sparre + 2015