

А.В. Моисеев, САО РАН

# Методы исследования галактик.

## Лекция X.

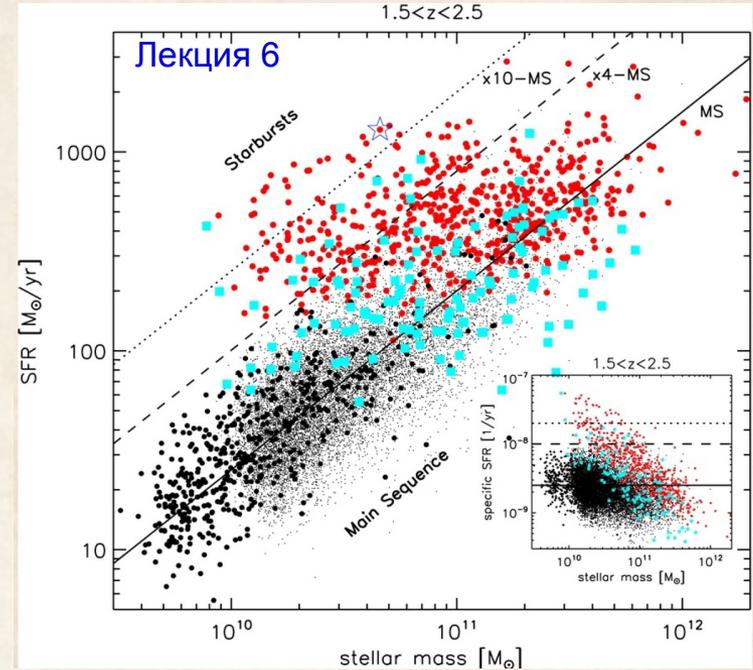
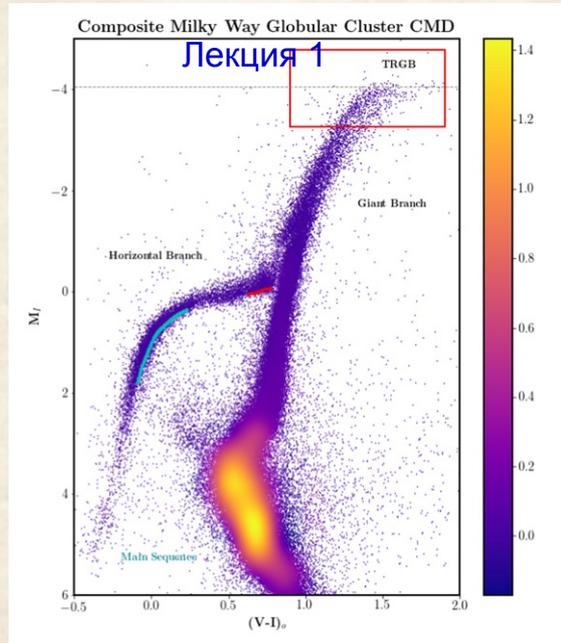
Эволюция галактик. Рассогласование наблюдений и  $\Lambda$ CDM. Аккреция газа. Изменение параметров галактик с красным смещением, остановка звездообразования, обратные связи.

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

# От главной последовательности – к её объяснению

Герцшпрунг (1909) – Расселл (1913)

Noeske et al (2007), Rodighiero et al (2011)



**Параметры:** M и Z

**Объяснение** звездной эволюции (1930-50е):  
Гамов, Пенгеймер, Бете, Солпитер, Вейцзеккер,  
Чандрасекар, Шварцшильд...

**Окружение** (ТДС, 60-80е): (Горбацкий, Торн,  
Зельдович, Шакура, Сюняев)

Протозвезды: 1970-90е

**Параметры:**  $M_{\text{gas}}$ , Z, T,  $M(\text{BH})$ -AGN?

**Объяснение:** ??

**Окружение:** множество эффектов

# Проблемы исследования эволюции галактик

- Чем больше красное смещение – тем более молодые галактики мы видим. Можем изучать свойства популяции, но не знаем, какими именно они станут на  $z=0$
- Эффекты селекции – на больших  $z$  видим наиболее ярких (во всех смыслах) представителей
- Смещение диапазона – с ростом  $z$  в оптике видим все более далекий ультрафиолет. Частично решается наблюдениями в УФ для близких и в ИК – для далеких галактик, но это (за исключением ближнего ИК) - удел редких космических телескопов
- Эволюция как самих галактик, так и их окружения (включая температуру реликтового излучения и плотность межгалактической среды)

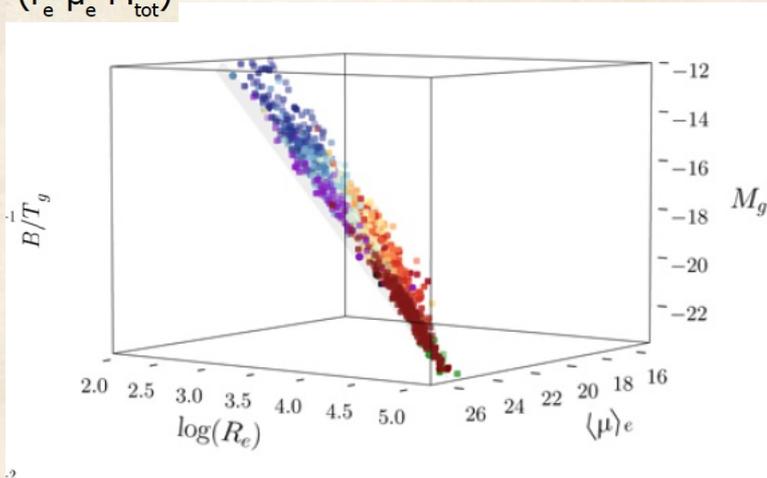
Silk et al. “Galaxy formation”, 2013, <https://arxiv.org/abs/1312.0107>

Сильченко О.К. “Эмпирические сценарии эволюции галактик”, 2022, УФН

Сильченко О.К. “Происхождение и эволюция галактик”, 2017/ 2022

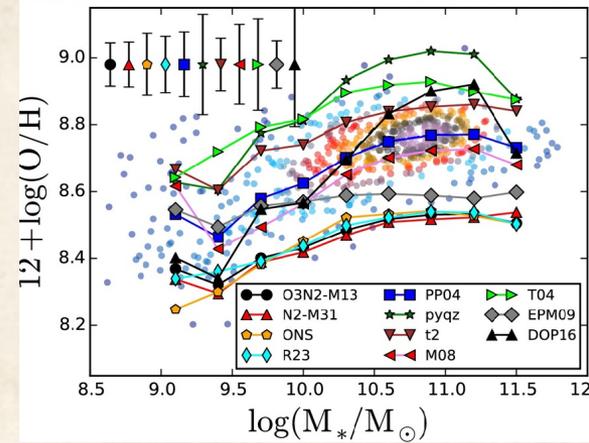
# Масштабные соотношения требуют объяснения

$$(r_e - \mu_e - M_{\text{tot}})$$

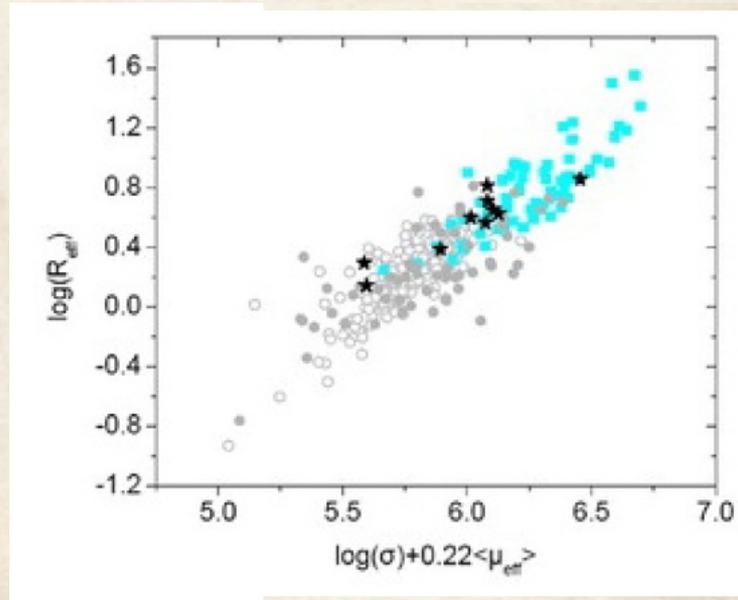


Барийонное Талли-Фишер ( $M^*-V$ )

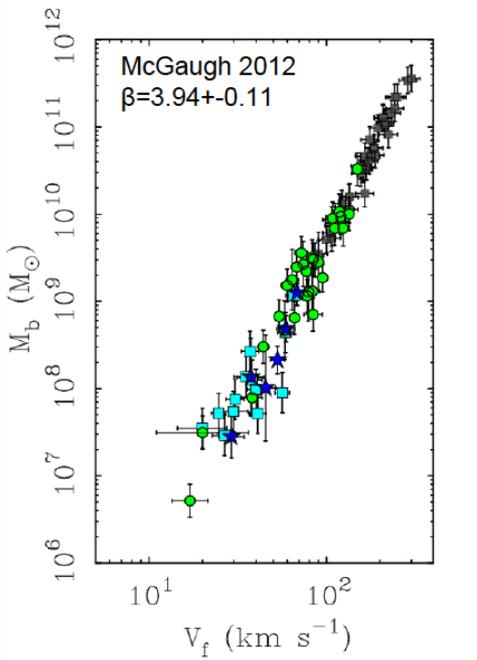
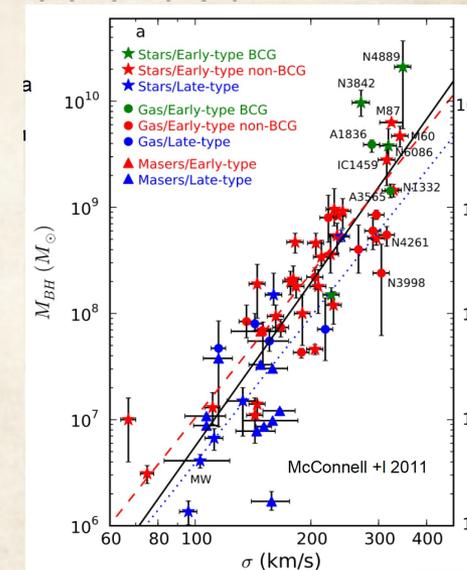
Масс-металличность, или FMR ( $M-Z$ -SFR)?



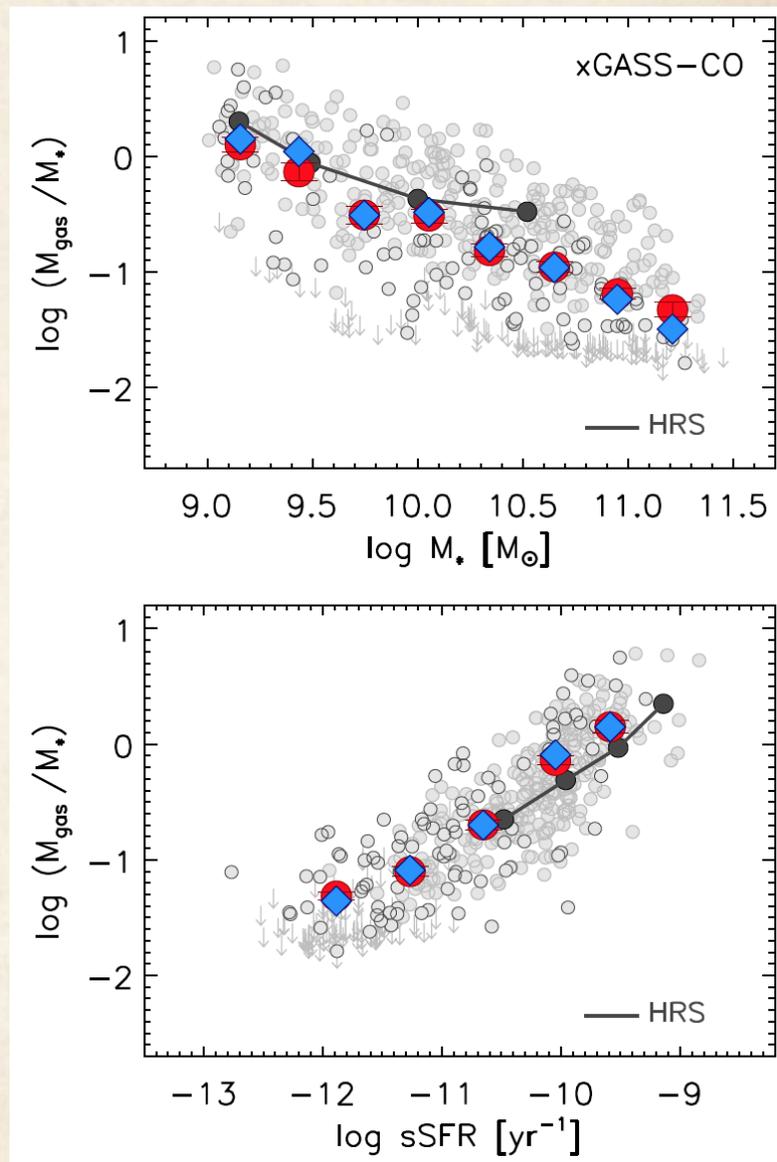
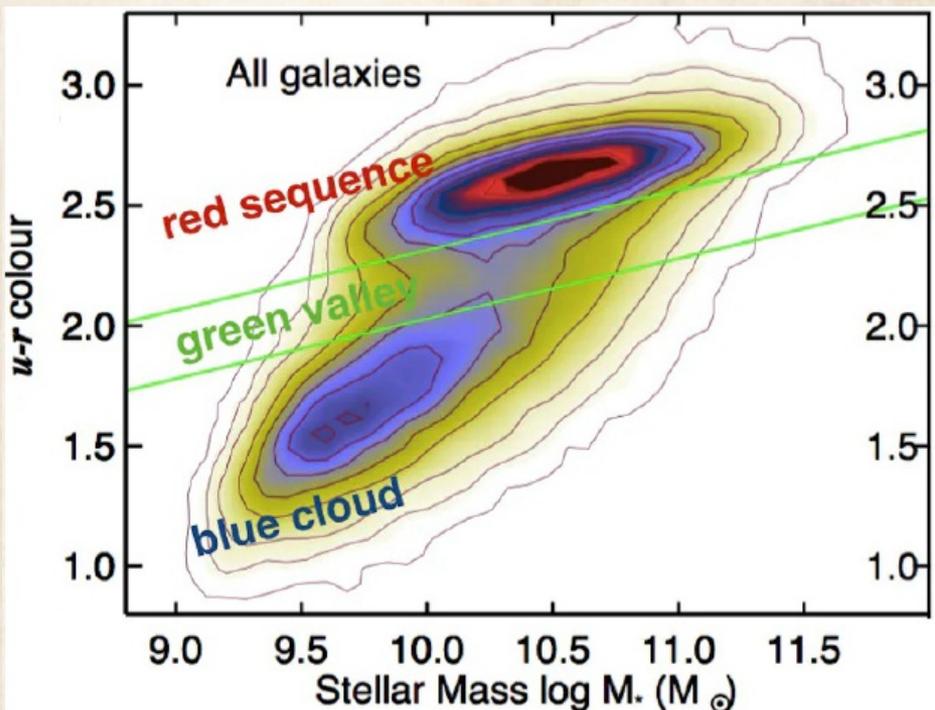
Фундаментальная плоскость



$M(BH)-\sigma$

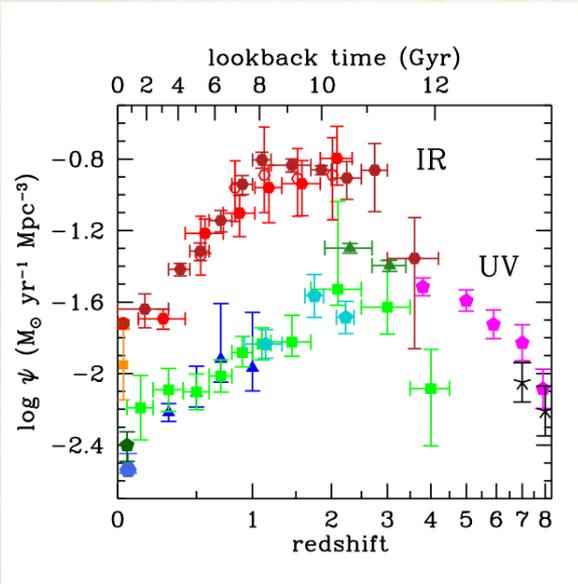


# Звёздное население, масса звёзд и газа...

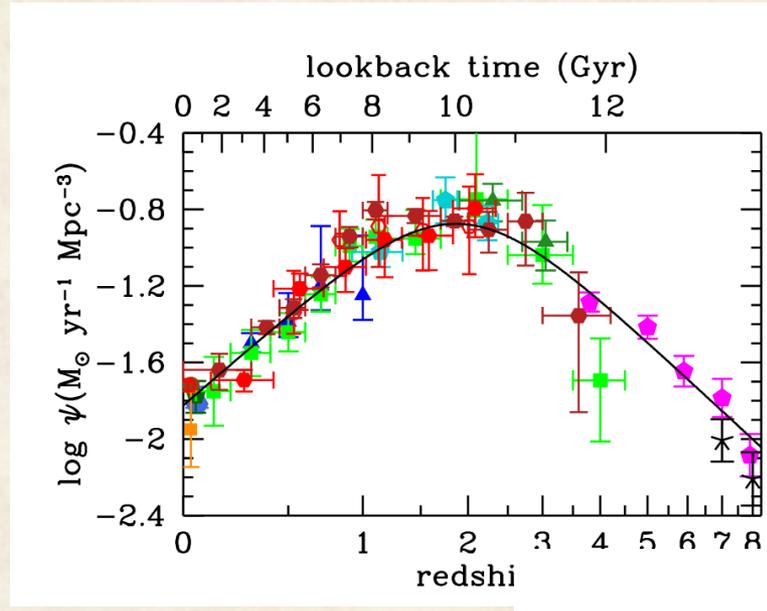


Catinella et al., 2018

# История звездообразования во Вселенной ("Madau plot")

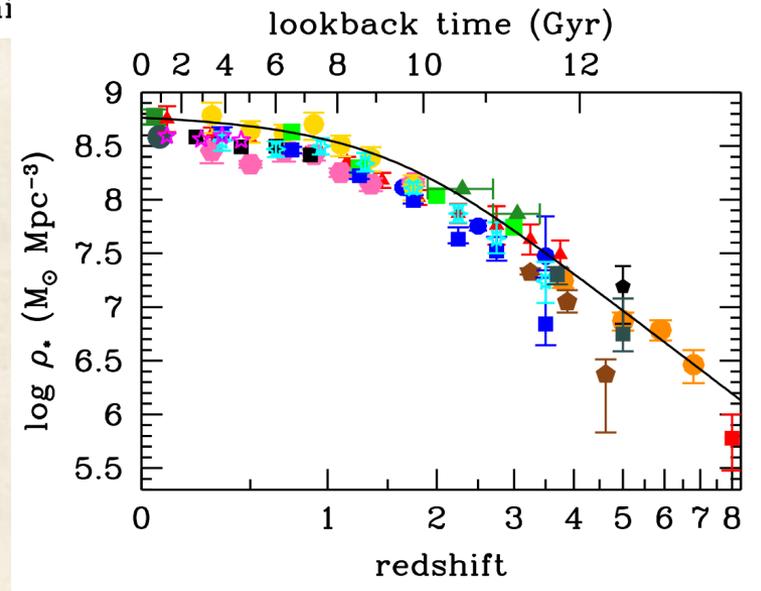


Madau & Dickinson (2014)



Первый вариант – Madau et al (1998)  
 Корреция за пыль, эффекты селекции..

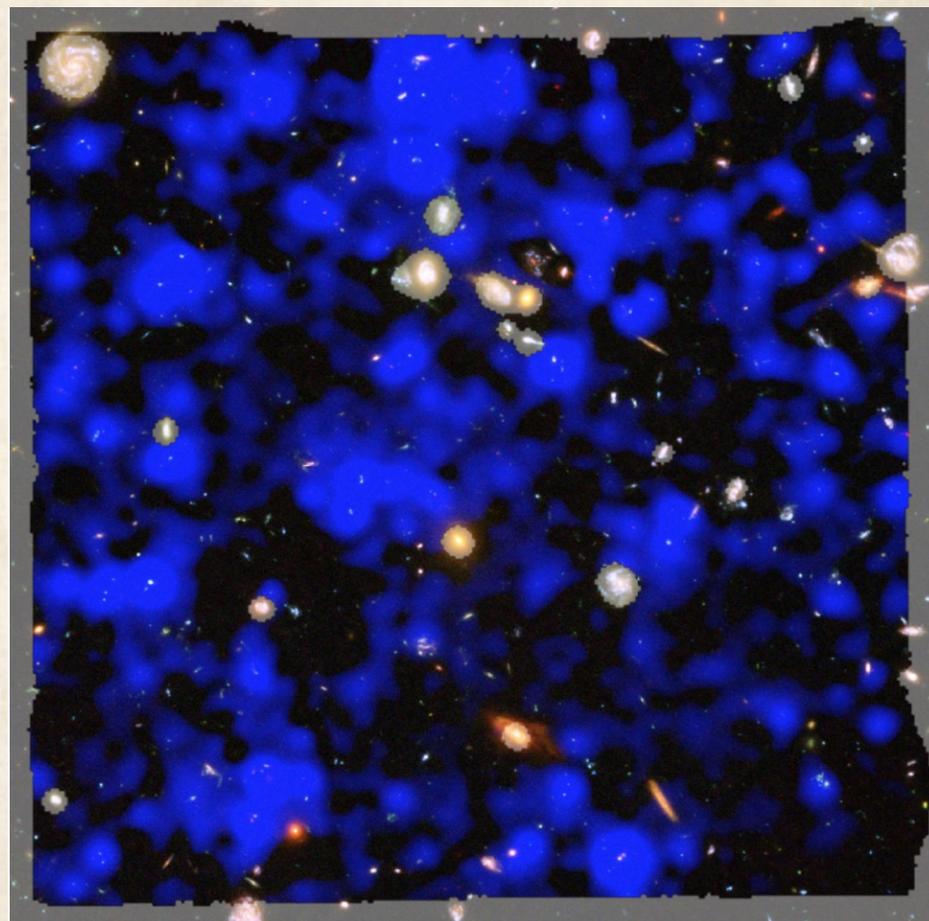
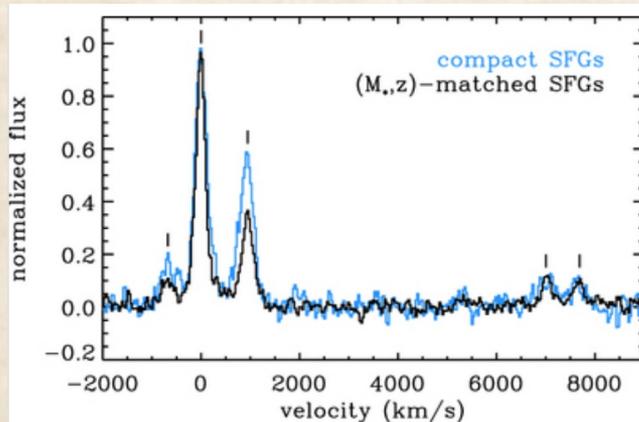
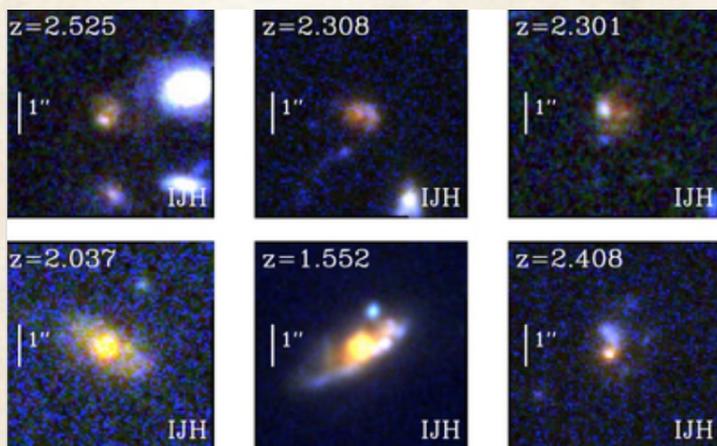
Плотность  
 массы звёзд



# Удобство наблюдений галактик на $z=2-4: \lambda = \lambda_0(1+z)$

Na+[NII]:  $6563\text{\AA} \cdot (1+2) = 2\ \mu\text{m}$  (NIR)  
(диагностика теми же методами,  
что и в оптике)

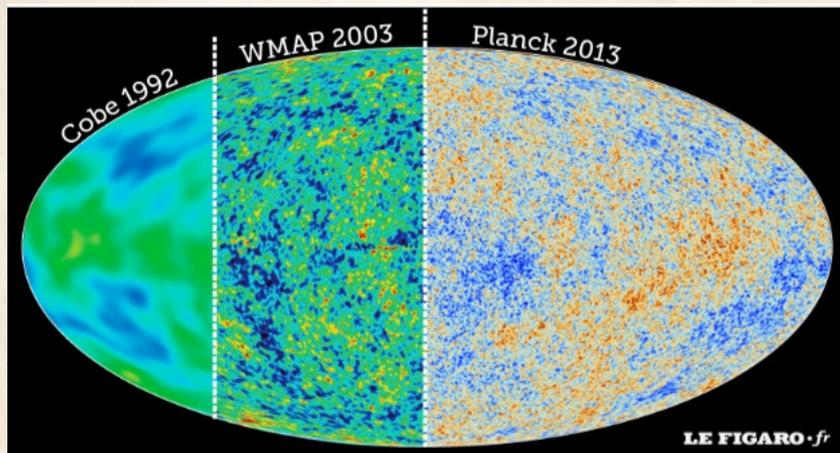
Ly- $\alpha$   $1216\text{\AA} \cdot (1+3) = 4800\ \text{\AA}$   
(Лайман-альфа гало)



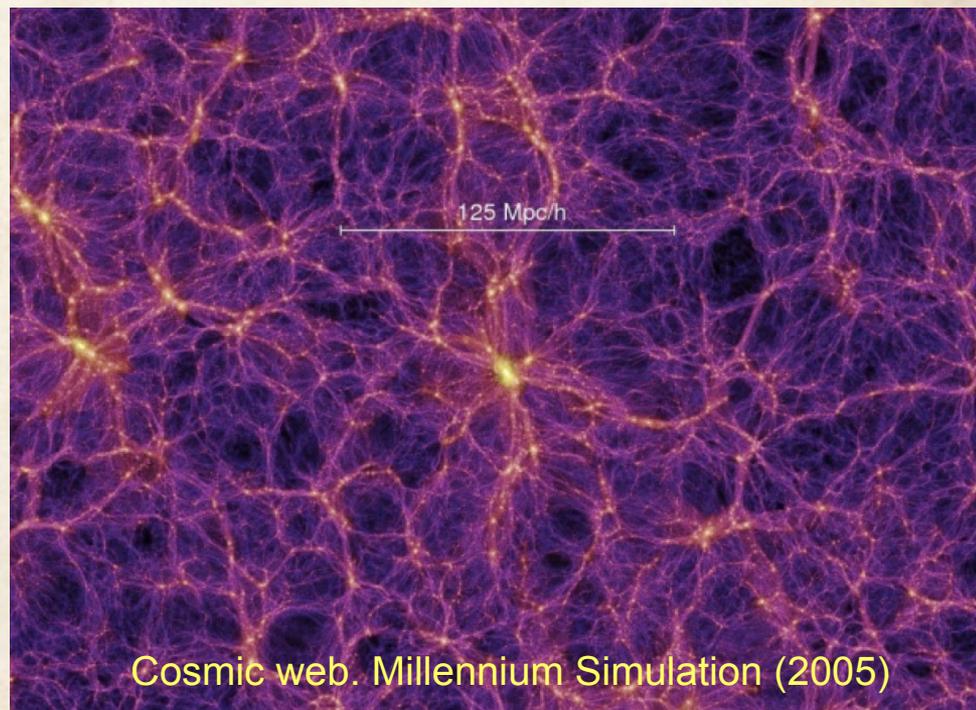
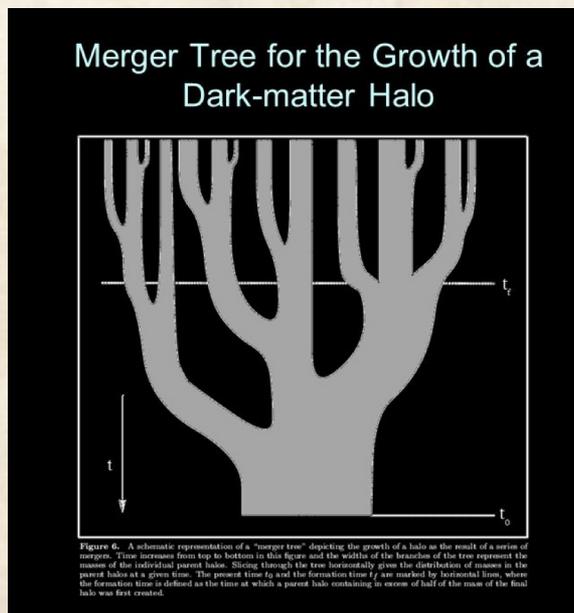
VLT KMOS<sup>3D</sup> survey (Wisnioski+2018)

VLT MUSE in HUDF (Wisotzki+2018)

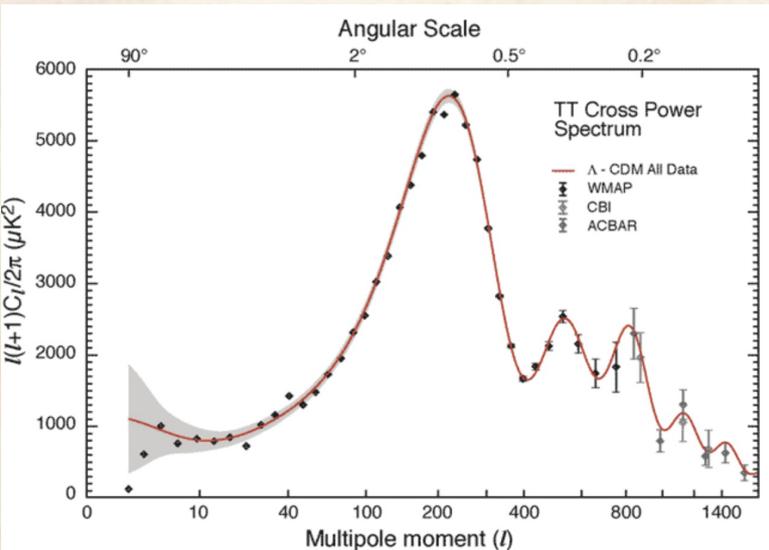
# ΛCDM и иерархическое скучивание



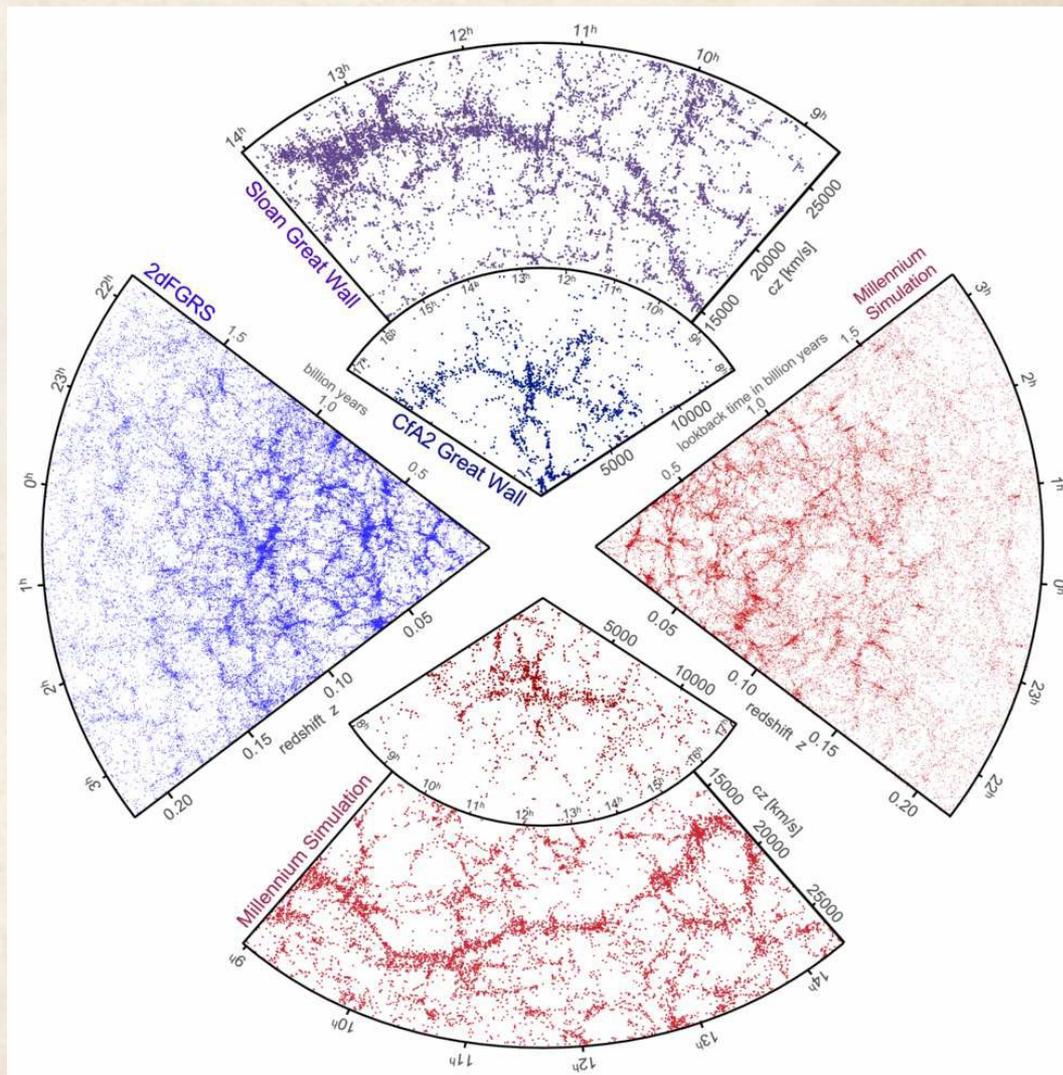
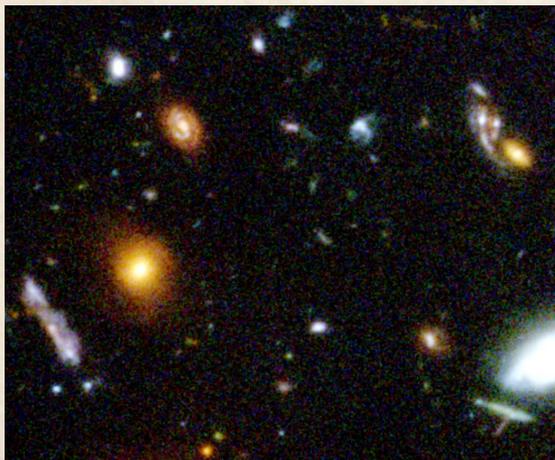
Возмущения реликта в момент рекомбинации:  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$   
В расширяющейся Вселенной их амплитуда растёт линейно с  $z$  (если бы не было тёмной материи)



# $\Lambda$ CDM: крупномасштабная структура гало ТМ



Глубокое поле Хаббла: пекулярные галактики = следствие слияний?



Springel, Frenk & White (2006)

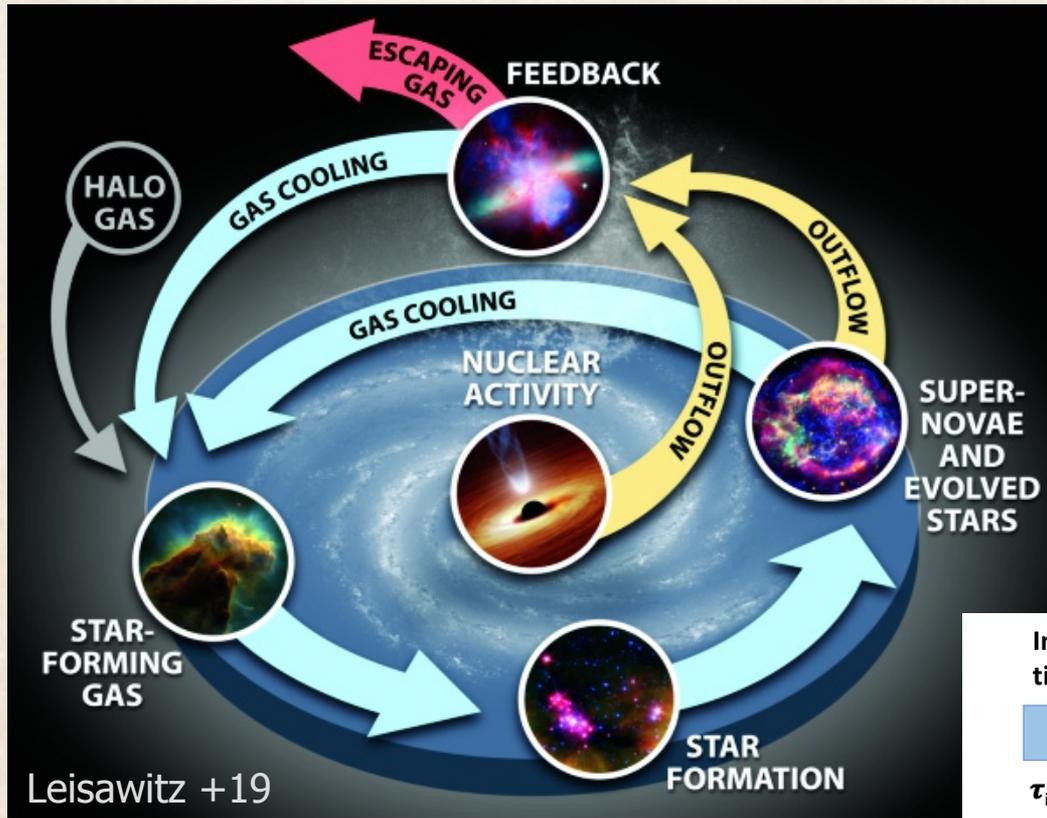
# Моделирование vs наблюдения

- Нехватка карликовых спутников в Местной Группе (Klypin + 1999): 40 вместо 300 (сейчас известно  $\sim 2$  раза больше, но нет “темных галактик”)
- Слияния предсказывают резкое возрастание плотности ТМ к ядру (NFW-profile), но во многих галактиках темные гало более “рыхлые”
- Нуль-пункт соотношения Т-Ф
- Функция масс (светимостей) галактик отлична от предсказанной
- Последние большие слияния массивных E-галактик должны быть на  $z \sim 0.5$ , в реальности же они наблюдаются уже на  $z = 1-2$ , старое звездное население
- Аналогично со спиральными – в хаббловском глубоком поле ( $z \sim 2$ ) отдельные яркие области ЗО в ультрафиолете, в реальности – много сформировавшихся дисков
- Массивные галактики формируются первыми (downsizing)
- Диски с доминированием вращения на  $z > 4$
- Слишком сверхмассивные ЧД в ядрах галактик с возрастом  $< 1$  млрд. лет

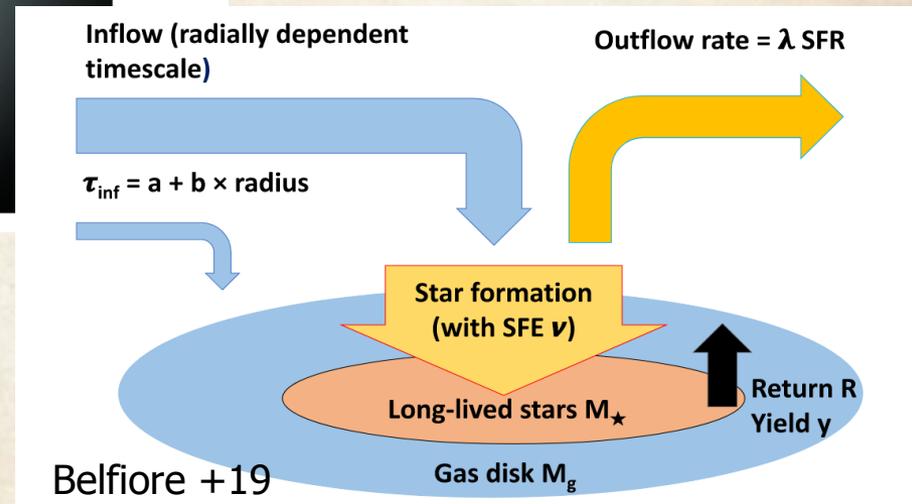
*“Всякая модель есть карикатура на реальность” (А.В. Засов)*

- Проблема физическая или численной модели?
- Потеря “предсказательной силы космологии”?  
(в отличие от СМВ, предсказания пульсаров, ОТО, ЧД, Нептуна...)

# Необходимость учёта барионной материи в моделях

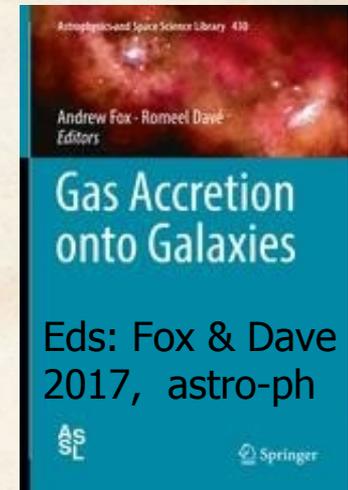
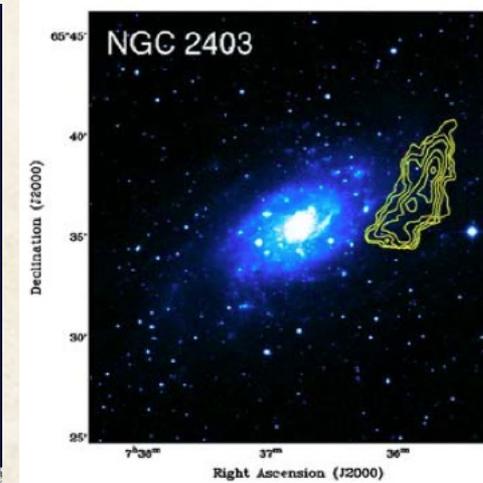
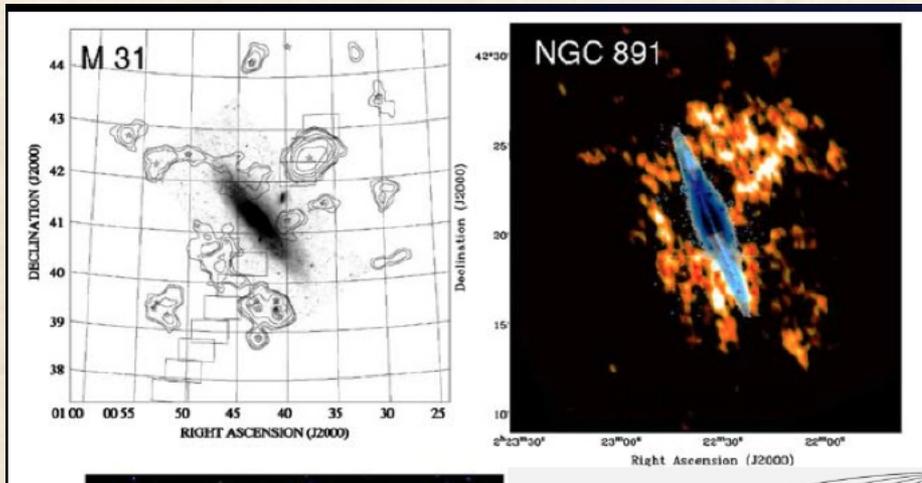


Барионный цикл:  
один и тот же тип объектов  
может давать и положительную и  
отрицательную обратную связь  
со звездообразованием



# Косвенные признаки аккреции внешнего газа

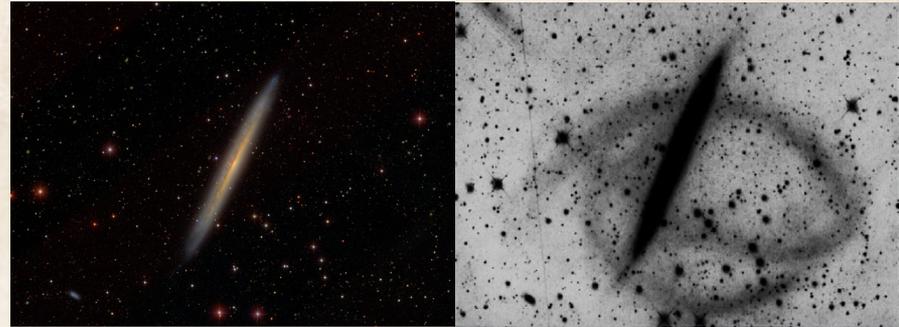
- Проблема G-карликов Млечного Пути (Larson 1972): модели химэволюции требуют приток газа  $\sim 1 \text{ Mo/год}$ ,  $\sim 0.1 Z_{\odot}$
- Характерное время исчерпания газа в галактиках со звездообразованием:  $T_{\text{depl}} = M_{\text{gas}} / \text{SFR} \sim 1 \text{ Gyr}$  (Kennicutt+1983, Genzel+ 2010)
- Высокоскоростные облака Млечного Пути
- Облака газа вокруг близких галактик (Sancisi+ 2008, A&ARv; Lockman 2016)
- “Головастики”



Обзор Sanchez-Almeida et al (2014)

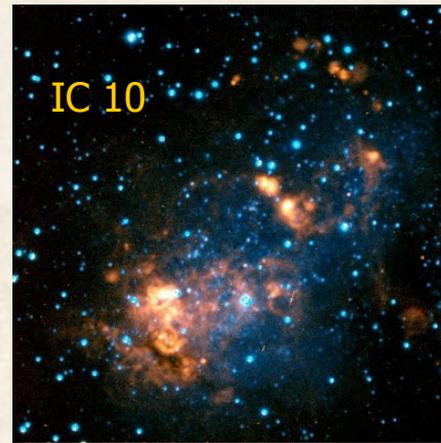
# “Аккреция” в широком понимании этого слова

Малые слияния ( $<1/5-1/10$ )

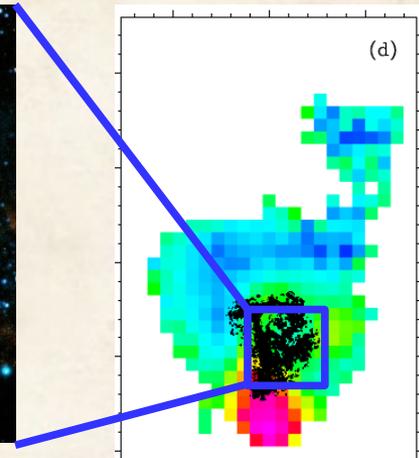


Захват газовых облаков

(+ “дождь малых облаков”)



IC 10



Холодная аккреция из филаментов

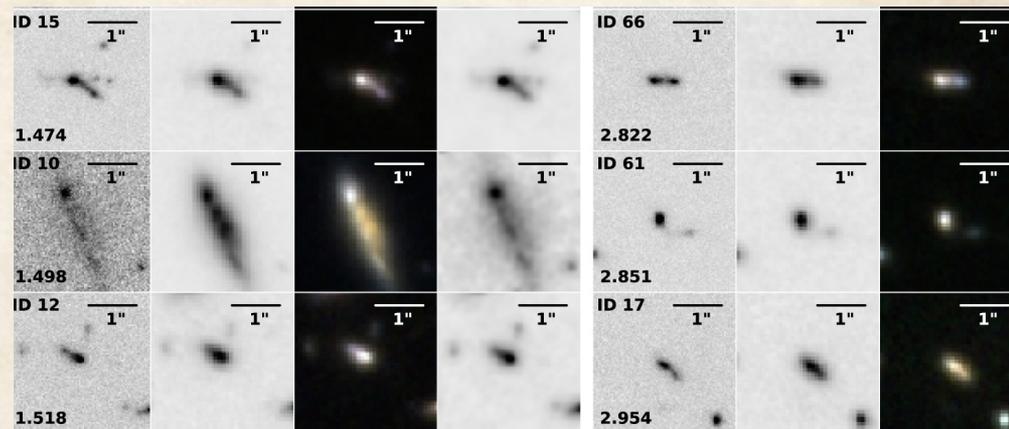
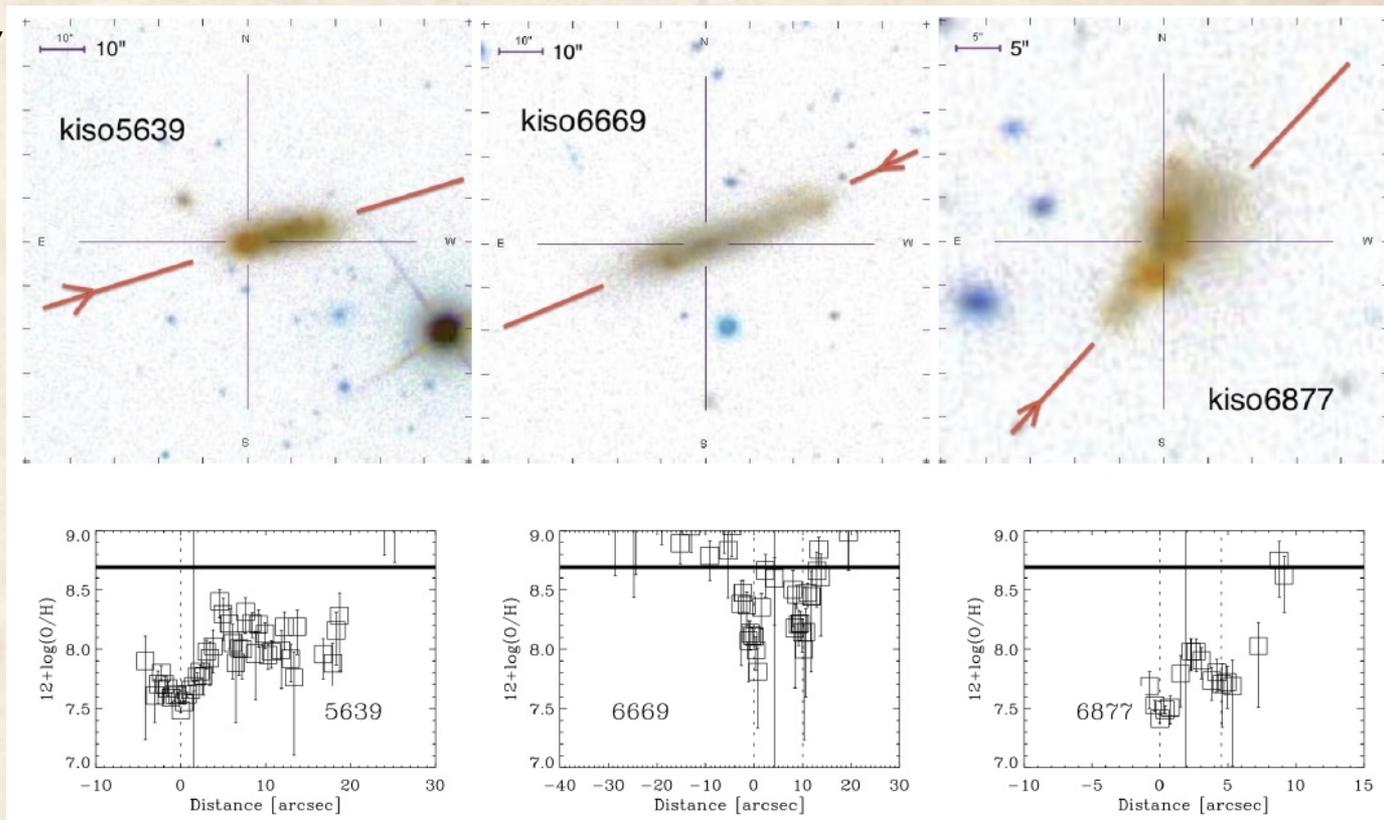


# “Головастики”

Tadpole galaxies:

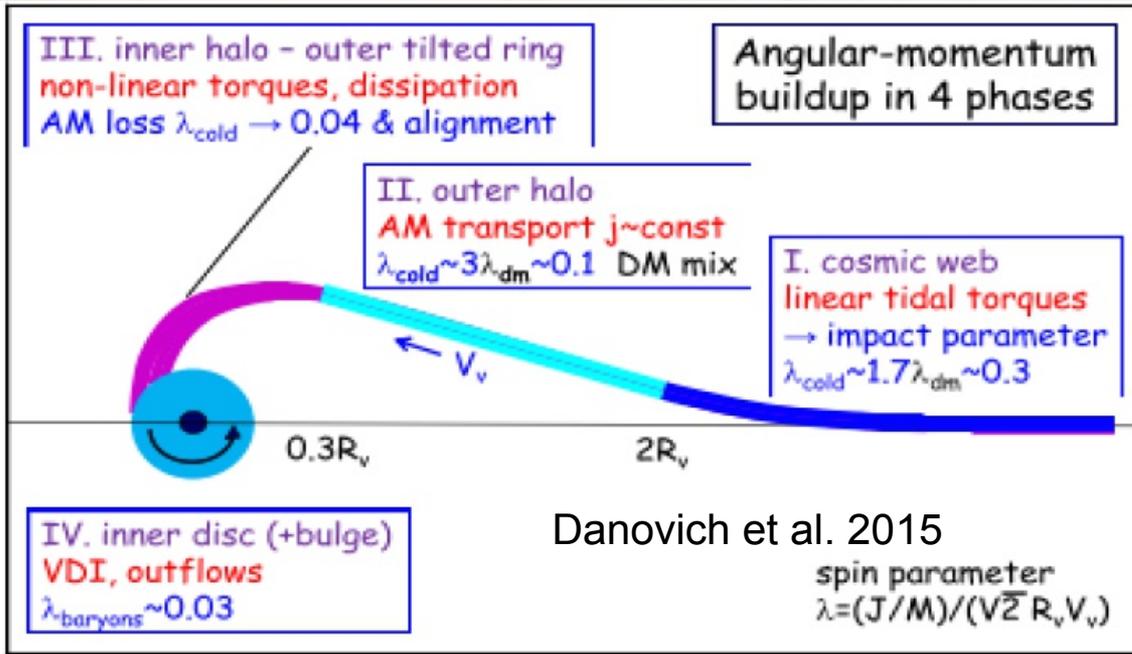
Низкая  
металличность  
периферийных  
областей ЗО

Sanchez Almeida  
et al. (2013).



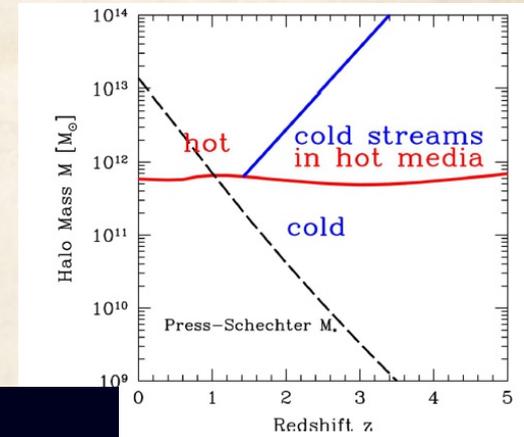
0.3 < z < 3.2 (Hubble Ultra Deep Field, Straughn+ 2015)

# Филаменты: решение проблемы углового момента?

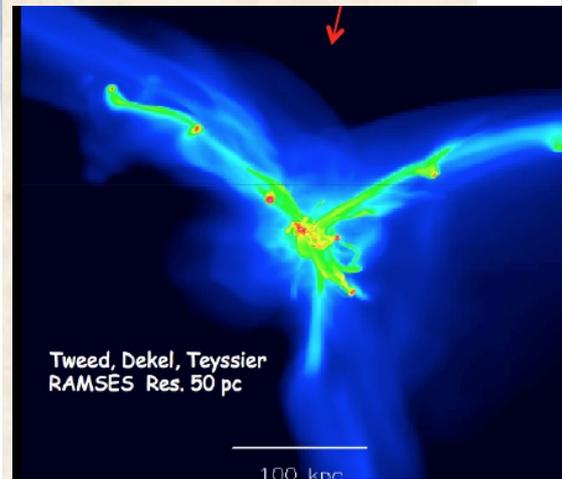
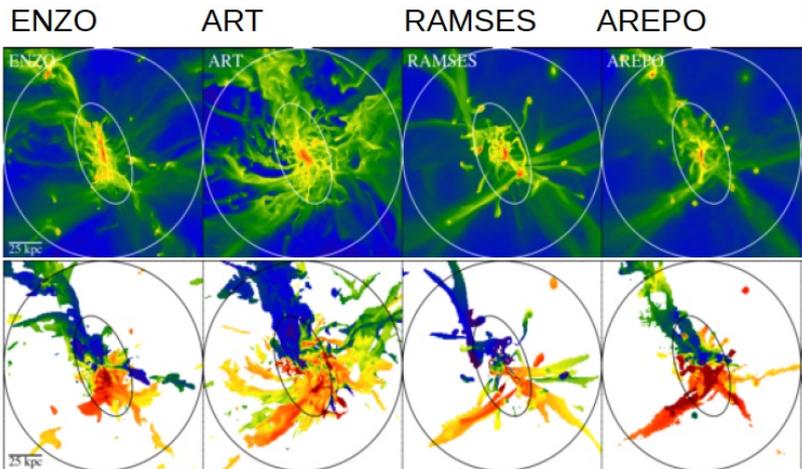


“Холодная” - так как температура газа ниже вириальной ( $T < 10^5$  K, лекция 7)

Путь формирования дисков?

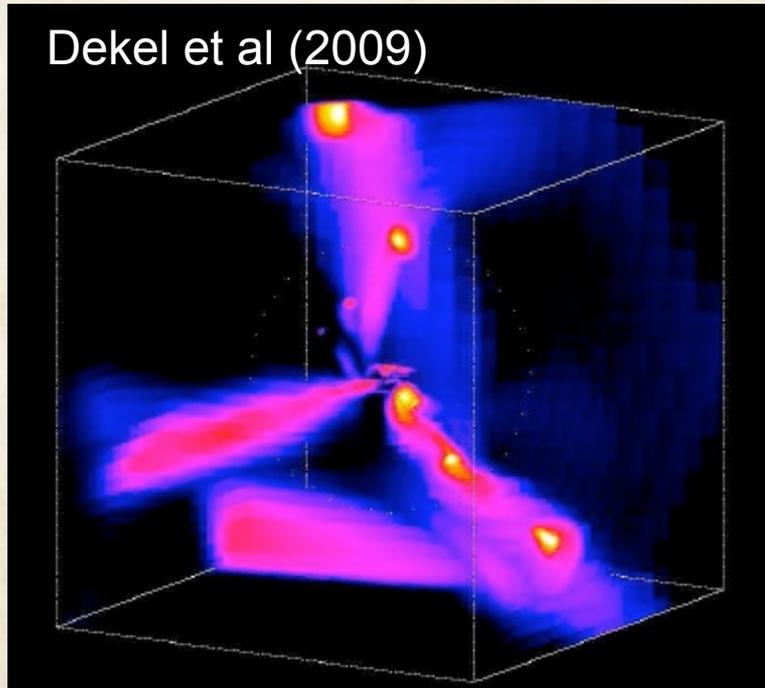


Stewart et al. 2016



Sanchez Almeida +14

# NGC 4650A: полярный диск из филаментов?



Brook et al (2008):  
модель аналога NGC 4650A

Iodice et al (2010): низкая металличность газа ( $Z=0.2 Z_{\text{sun}}$ ) в полярном диске NGC 4650A указывает на его формирование в результате холодной аккреции?

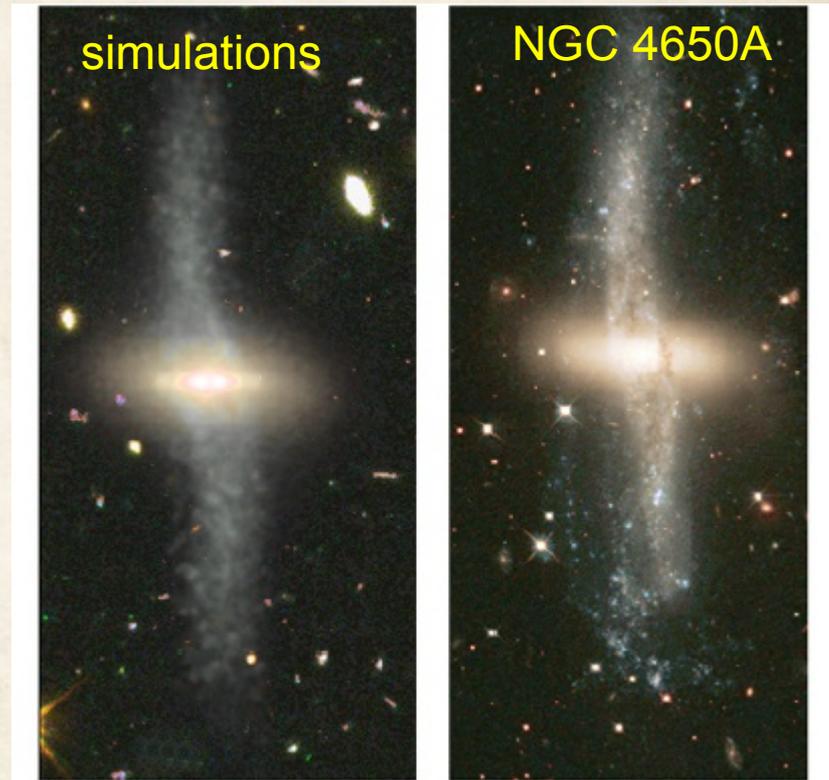
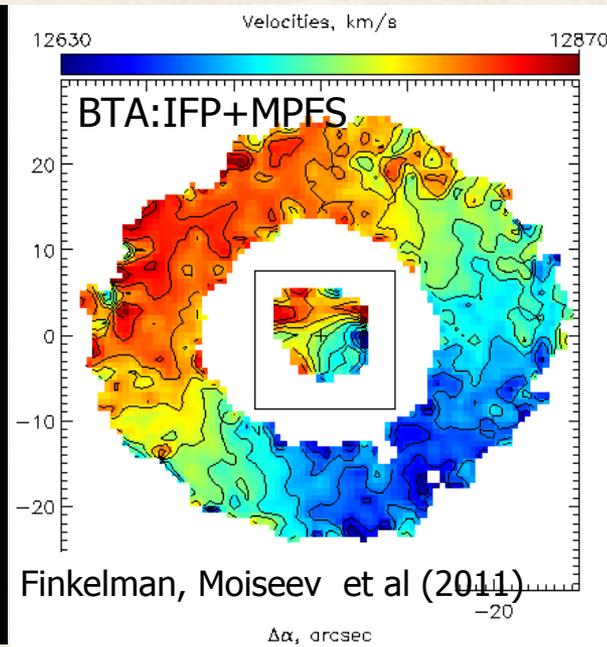
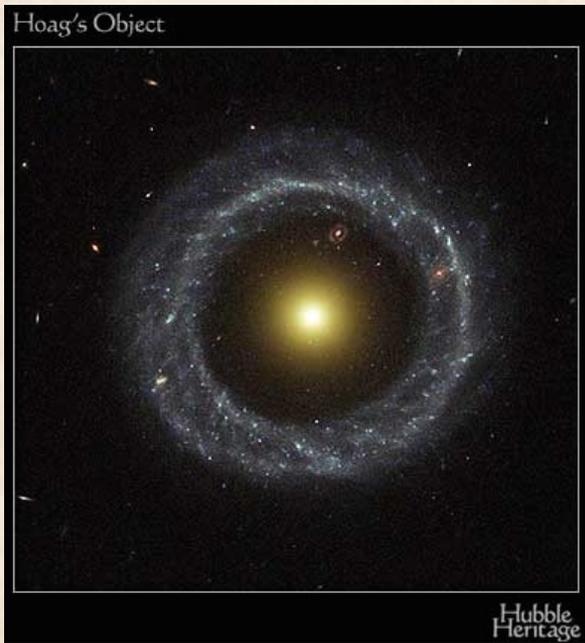


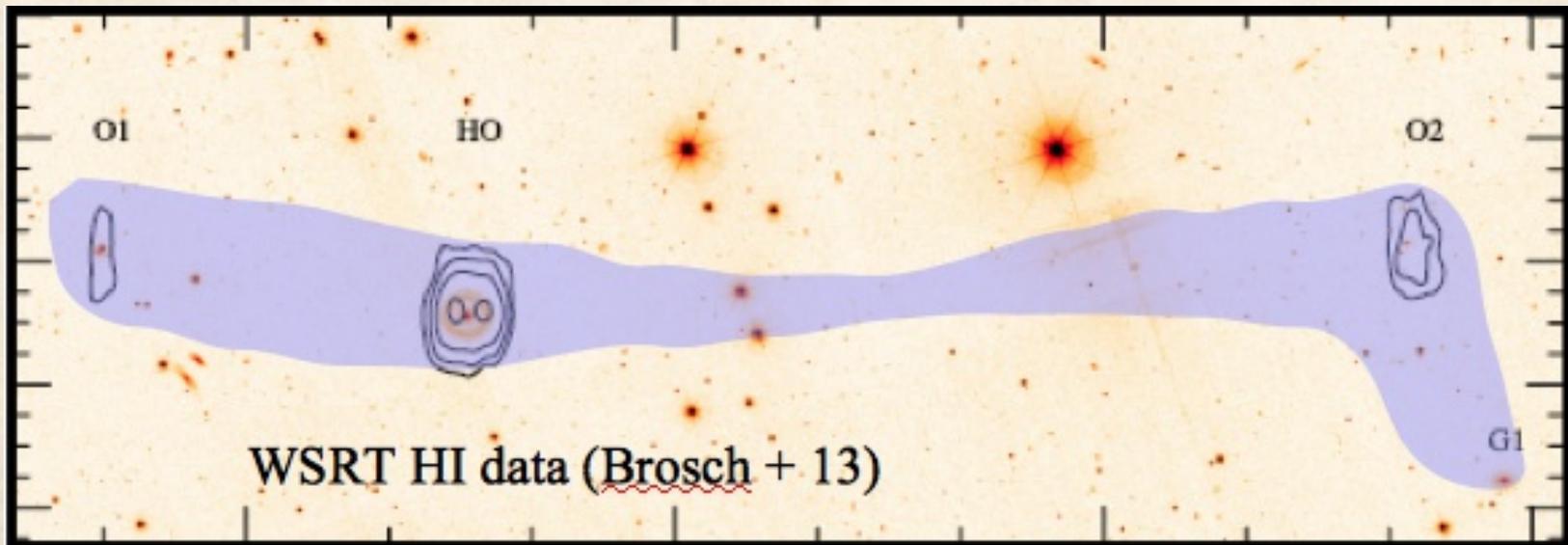
FIG. 3.— The simulated polar disk (left) is imaged by assigning

# Объект Хога: доказательство холодной аккреции?

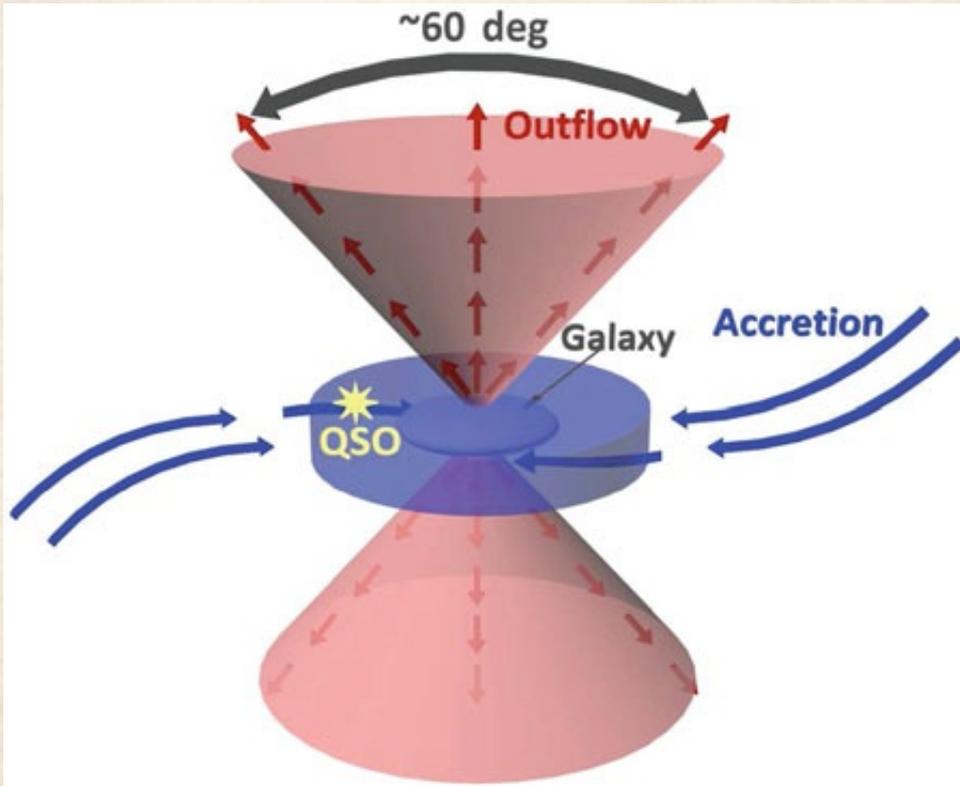


Фотометрия + кинематика + анализ возраста звездного населения центра и кольца:

Образование кольца в результате продолжительной «холодной» аккреции газа из филаментов межгалактической среды примерно 5 млрд. лет назад



# Аккреция в сочетании с истечением (ветром)



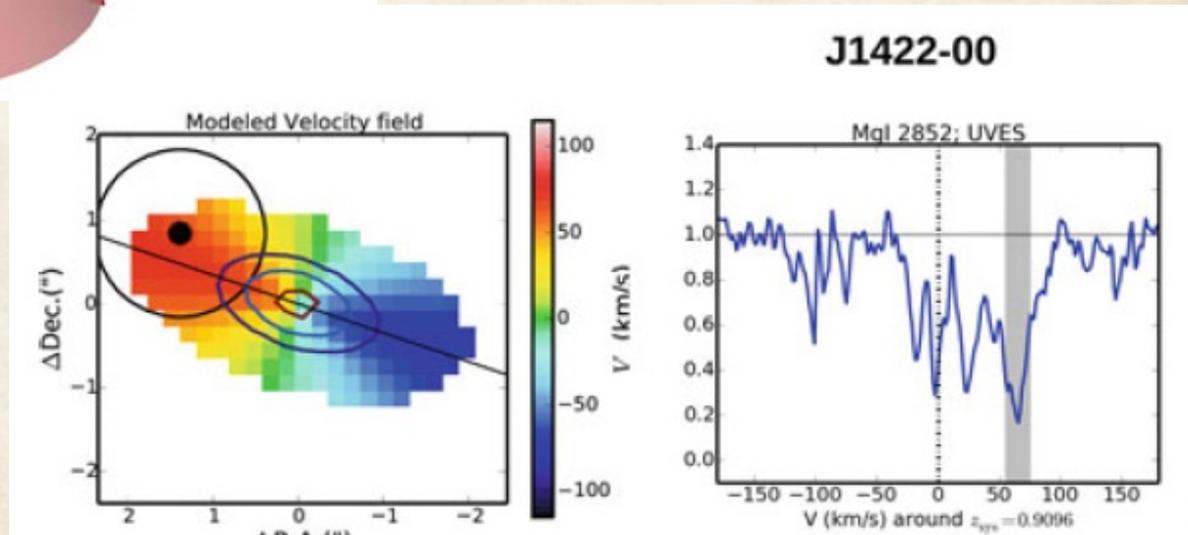
$z \sim 1-2$ , VLT (MUSE, SINFONI)  
HST/COS

Наблюдаются оба типа движений газа:

- аккреция – в плоскости диска
- ветер – вдоль оси вращения

$$\dot{M}_h \approx 4 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

Bouché  
(2017)



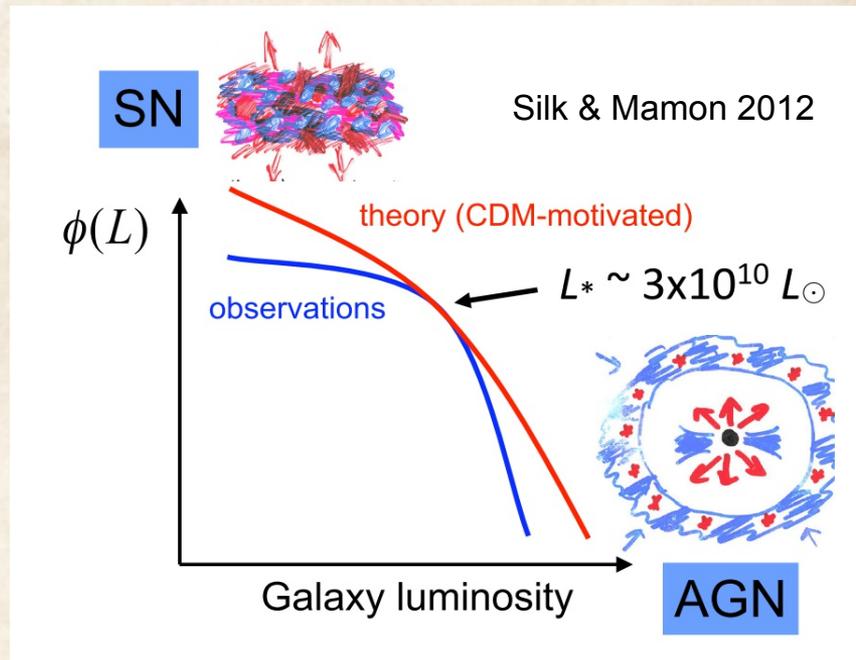
# Подавление звездообразования (negative feedback)

Сверхновые и АЯГ:

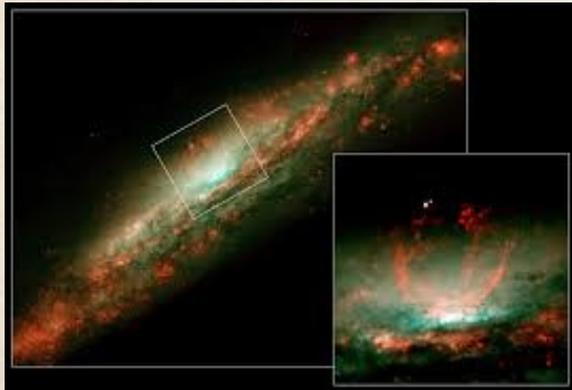
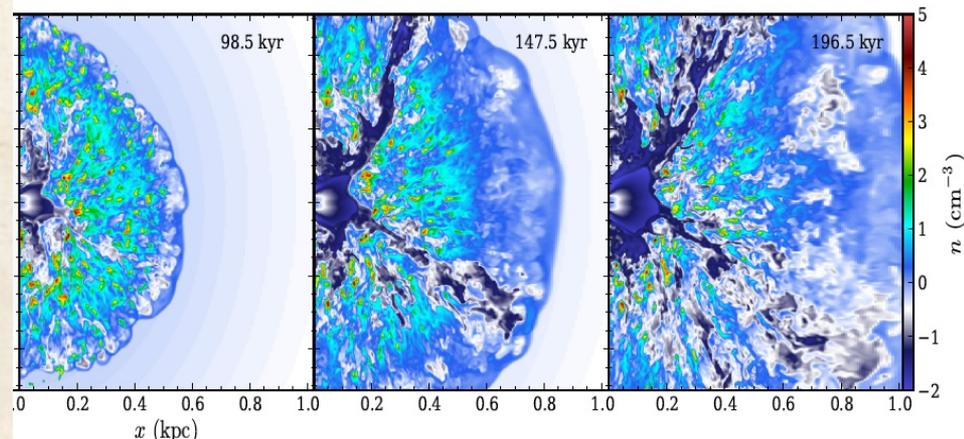
- Кинематическое воздействие (оболочки, джеты)
- Радиационное давление
- Ионизация нейтральной среды

Перенос и энергии и момента

Красиво работает в моделях, но наблюдения противоречивы: нет четких указаний на “выключение ЗО в АЯГ”, наблюдаемые истечения газа достигают 1000 км/с только у ядра, а на масштабах галактики скорости меньше параболических (лекция 6).

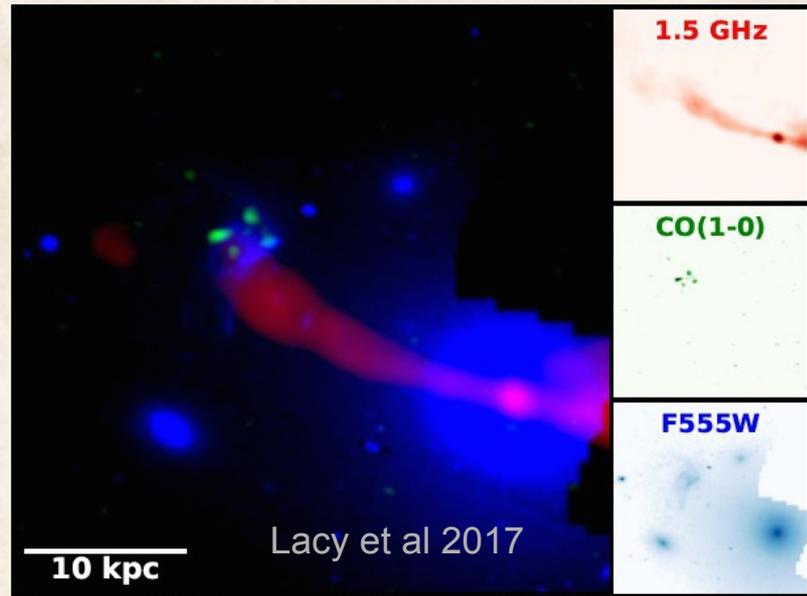
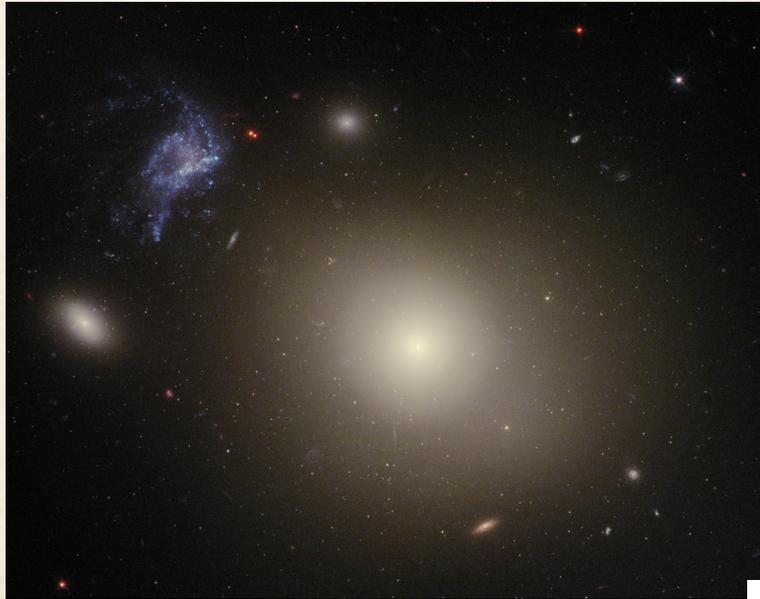


J. SILK, A. DI CINTIO, I. DVORKIN

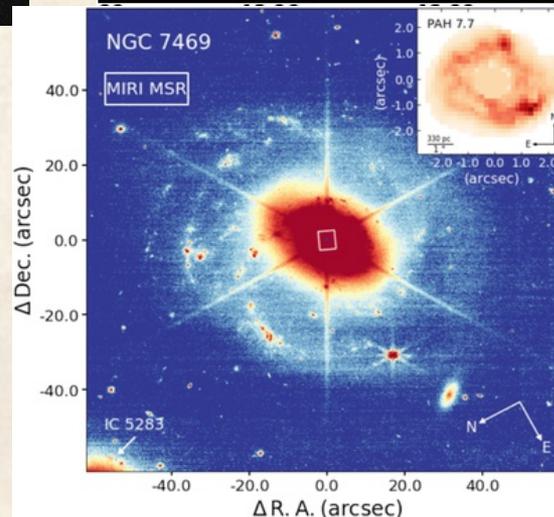


# Положительная обратная связь (positive feedback)

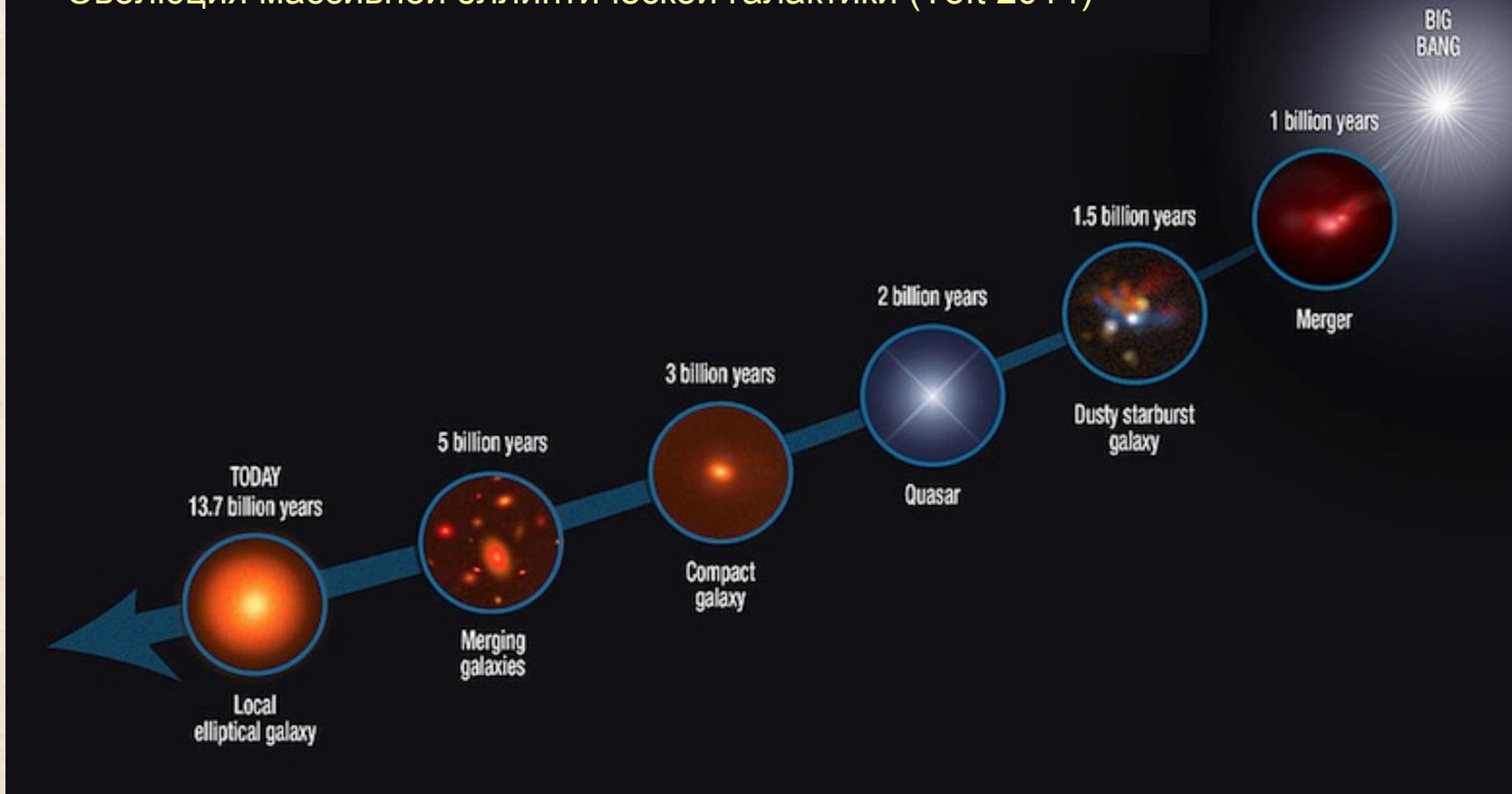
Объект Минковского (NGC 541 Abell 194),



NGC 7469 JWST ( Zhang & Ho):  
рост окооядерного  
звздообразование под  
воздействием излучения и  
истечений из ядра



## Эволюция массивной эллиптической галактики (Toft 2014)

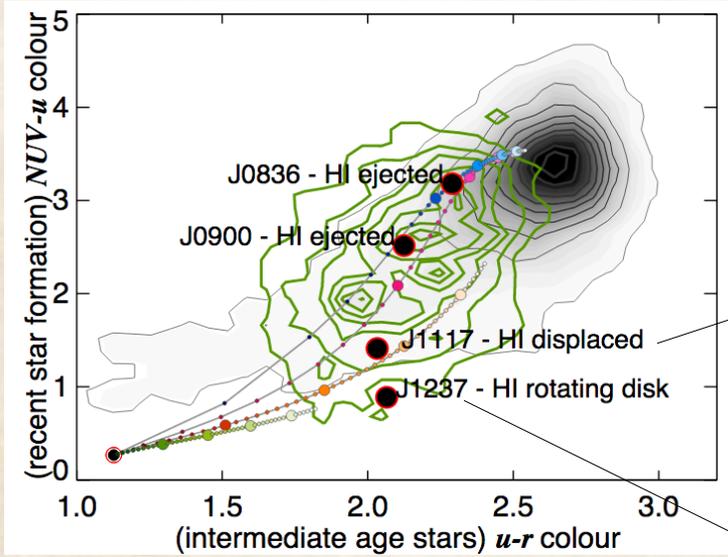


Необходимая быстрая остановка звездообразования и потеря газа (quenching)

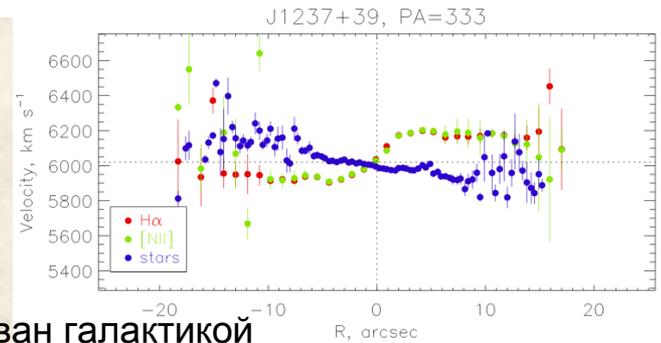
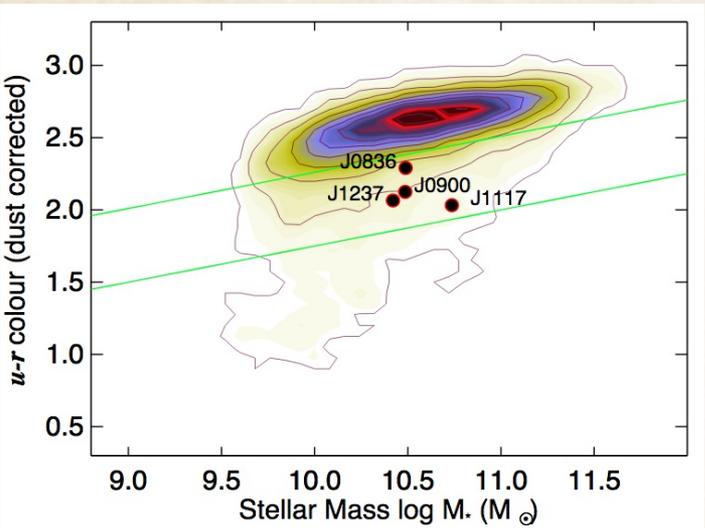
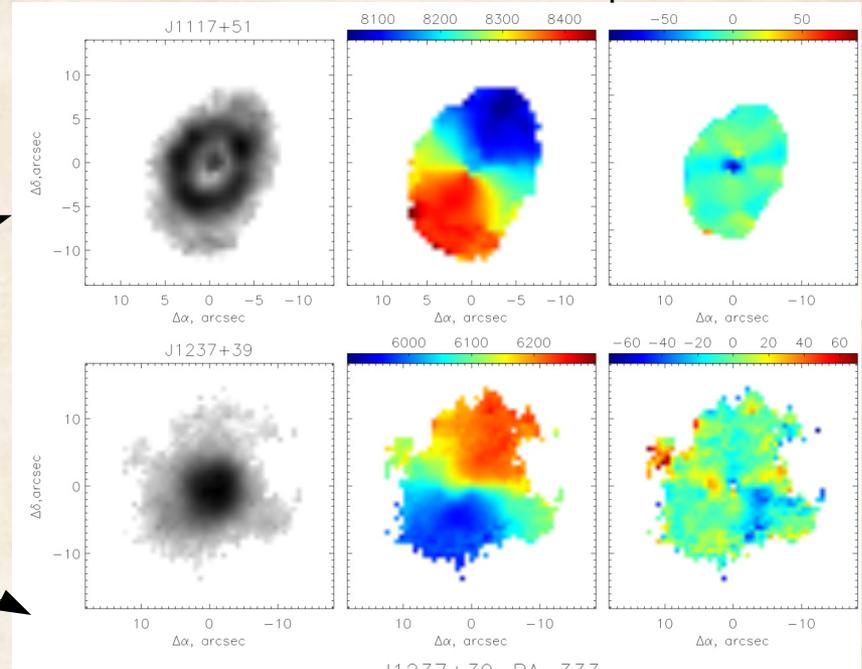
# Сложность интерпретации наблюдаемой картины

Wong + 15: последовательный уход HI в галактиках зеленой долины?

Bryukhareva & Moiseev (2019):



AGN outflow  $\sim 1$  kpc:

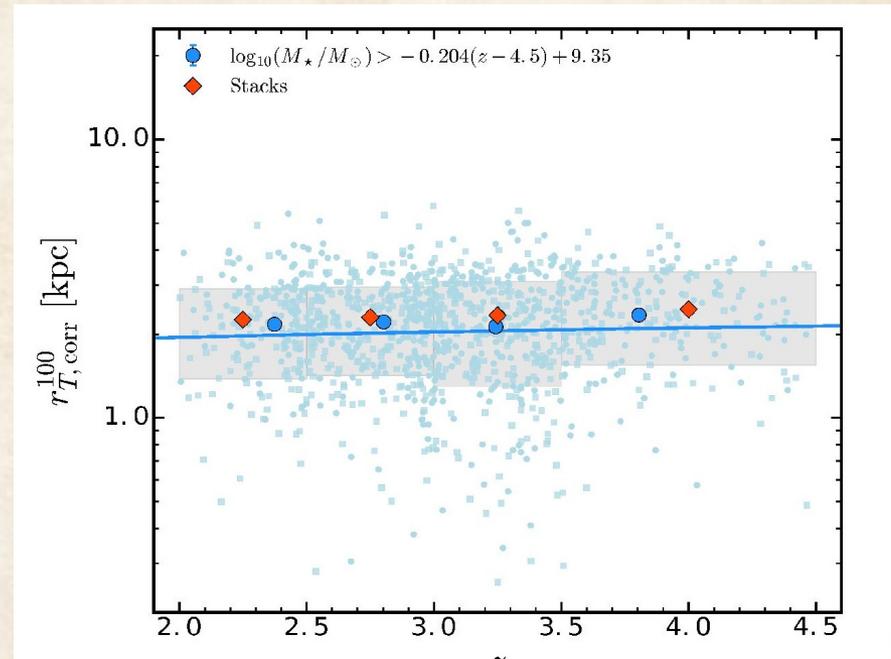
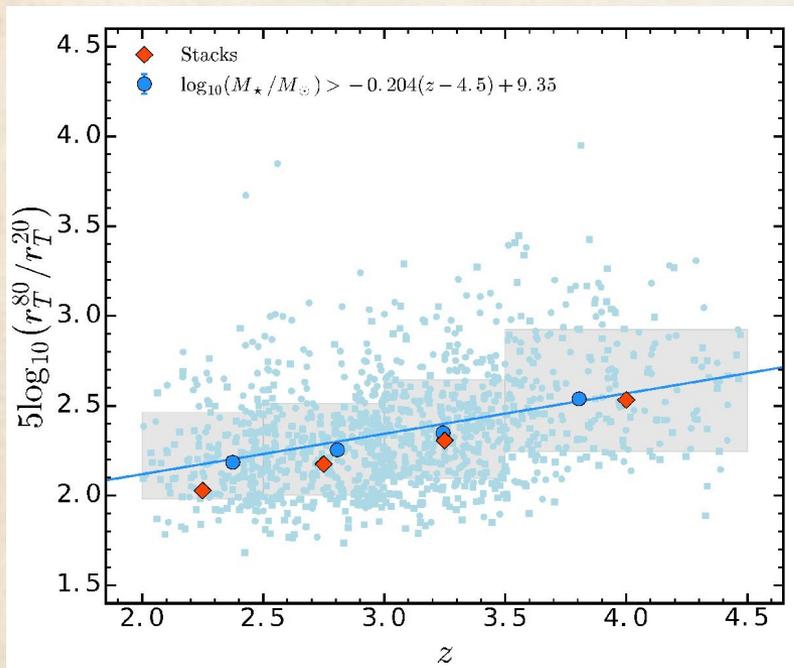


Газ аккрецирован галактикой

# Изменение параметров галактик с $z$

COSMOS/VIMOS (Ribeiro + 2016)

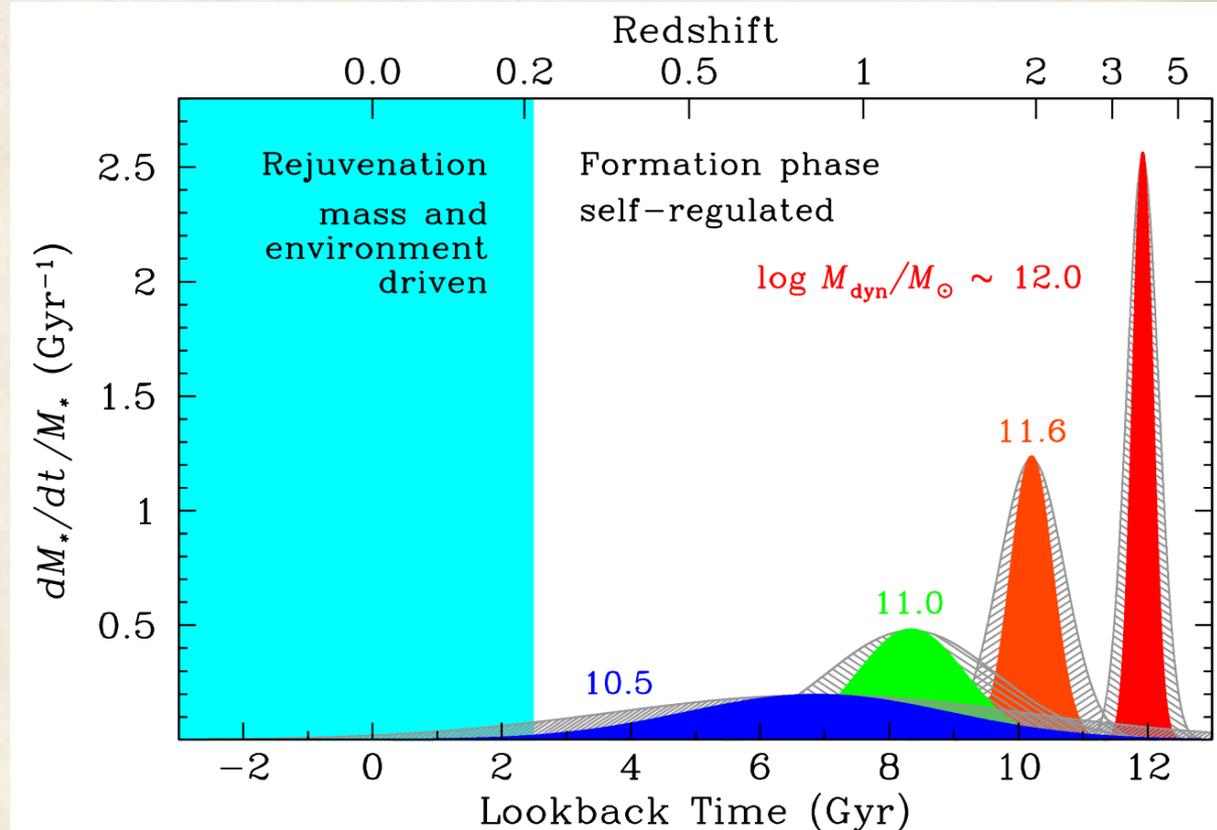
На больших  $z$  галактики более концентрированы, но полный размер меняется мало (смесь разных эволюционных факторов?)



# От большого к малому (антииерархия, downsizing)

Наиболее массивные галактики набрали основную звездную массу раньше карликов (30 в первые 2 Gyr,  $z > 3$ )

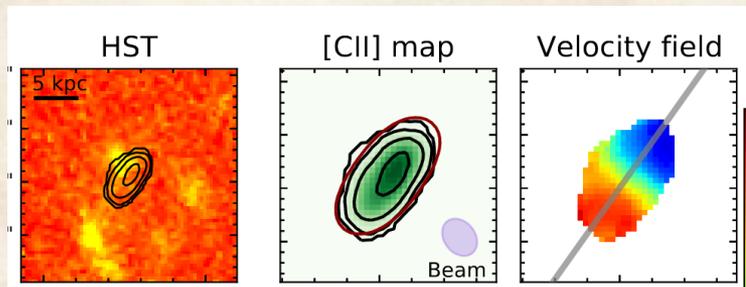
Тоже и с обогащением металлами (быстрее всего оно шло в раннюю эпоху в более массивных системах)



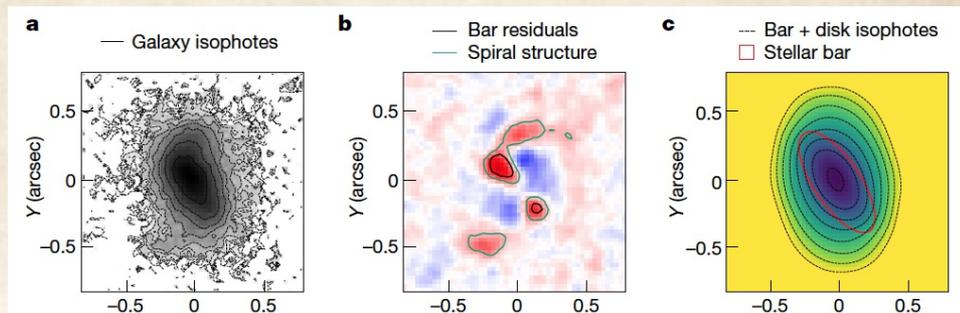
Thomas + 2010

# Динамически холодные диски на больших $z$

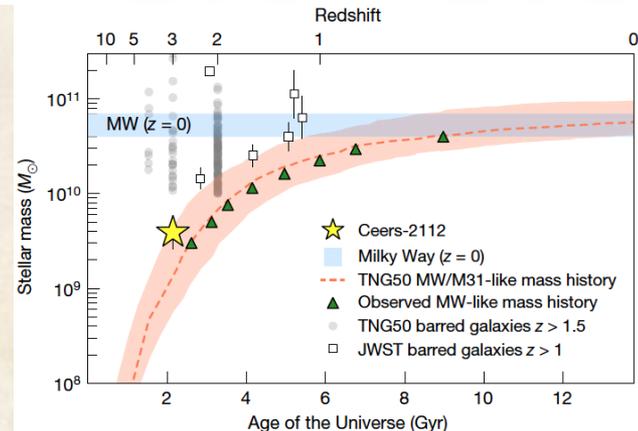
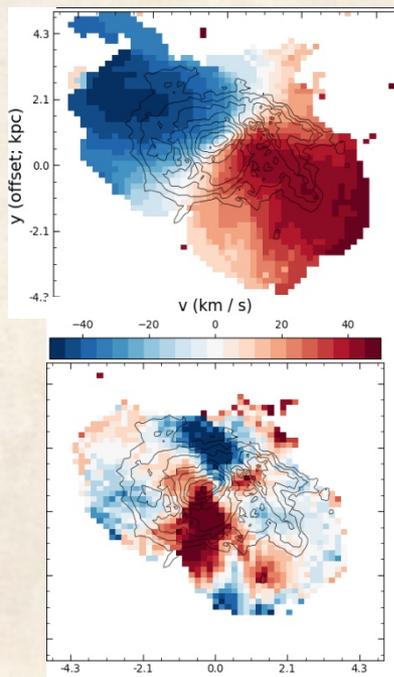
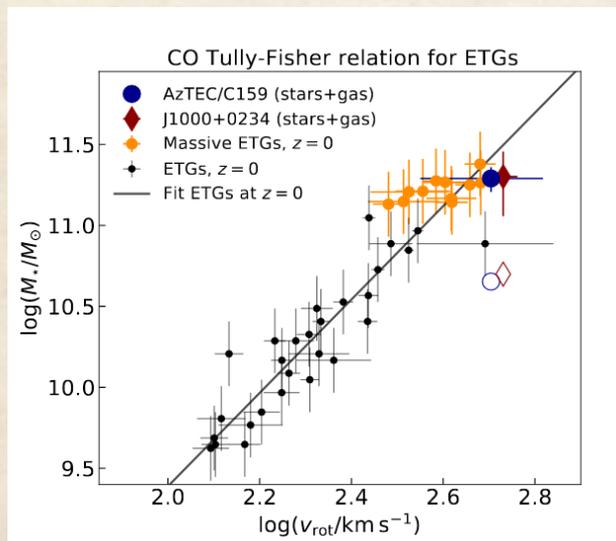
ALMA  $z \sim 4.5$  (Fraternali+2021)  
Диски с  $V/\sigma > 20$



JWST, Costantin + 2023: бары в дисках галактик уже на  $z > 3$  (модели дают  $z < 1.5$ )

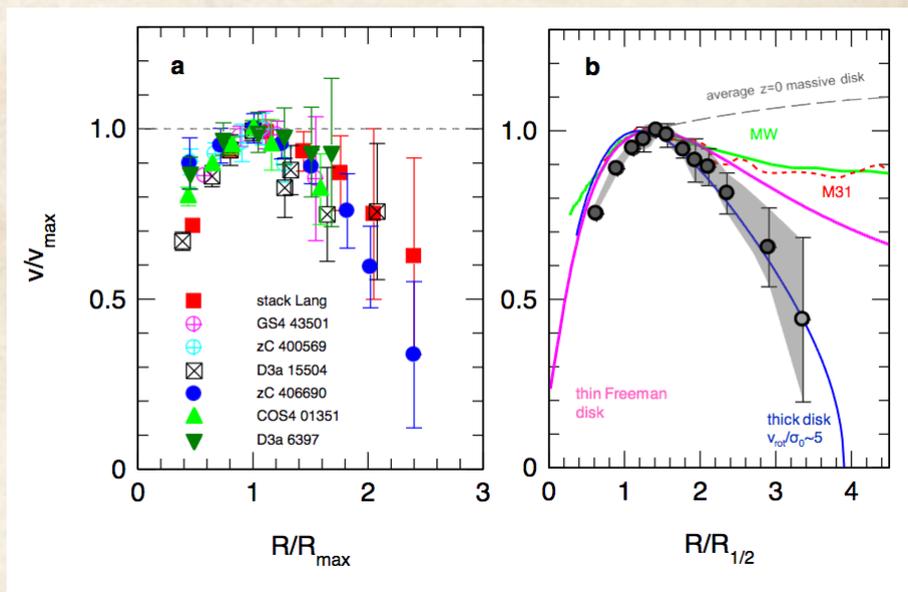
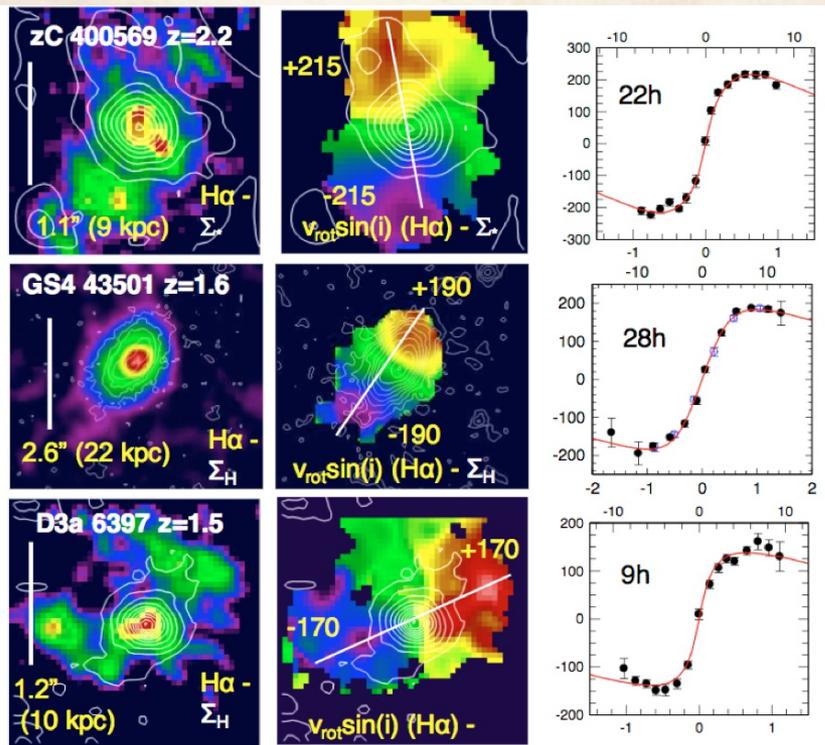


Станут массивными ETG?  
Но как?



JWST+HST+ALMA,  $z = 3.8$   
Amvrosiadis + 2024  
Измерены радиальные потоки газа

# Темной материи меньше на $z \sim 2$ ?



Genzel et al., 2017

Reinhard Genzel



- Awards**
- Otto Hahn Medal (1980)
  - Balzan Prize (2003)
  - Shaw Prize (2008)
  - Crafoord Prize (2012)
  - Tycho Brahe Prize (2012)
  - Fellow of the Royal Society
  - Harvey Prize (2014)
  - Nobel Prize in Physics (2020)

Проблема не решена и продолжает подтверждаться наблюдениями:

Shachar + (2023), "RC100: Rotation Curves of 100 Massive Star-forming Galaxies at  $z = 0.6-2.5$  Reveal Little Dark Matter on Galactic Scales"

# Массивные ЧД в ранней Вселенной

Decarli + 2018: в квазарах на  $z > 6$

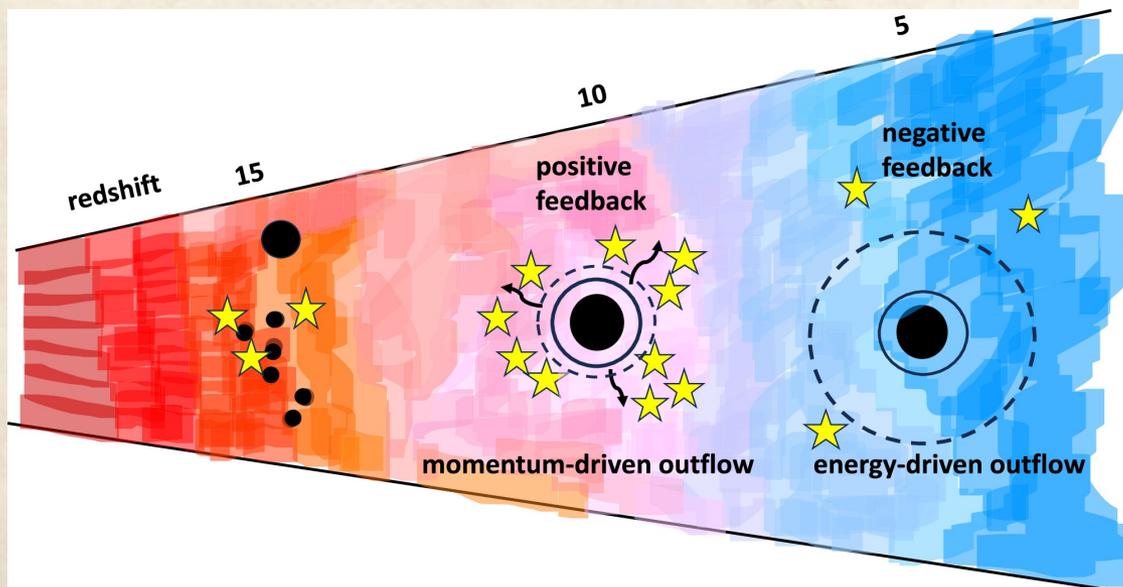
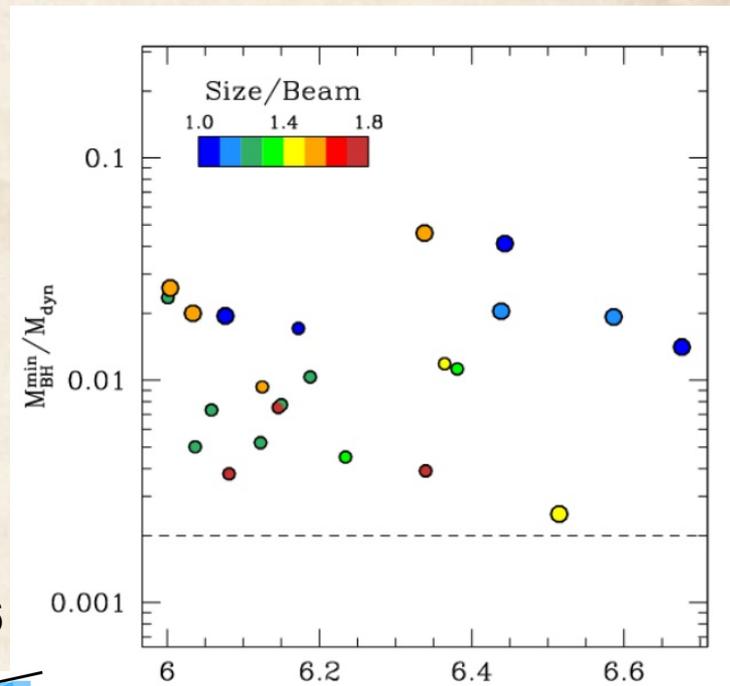
$M(\text{BH})/M_{\text{gal}} = 0.04\text{-}5\%$

$z=0$ : **0.5%** (Лекция 7)

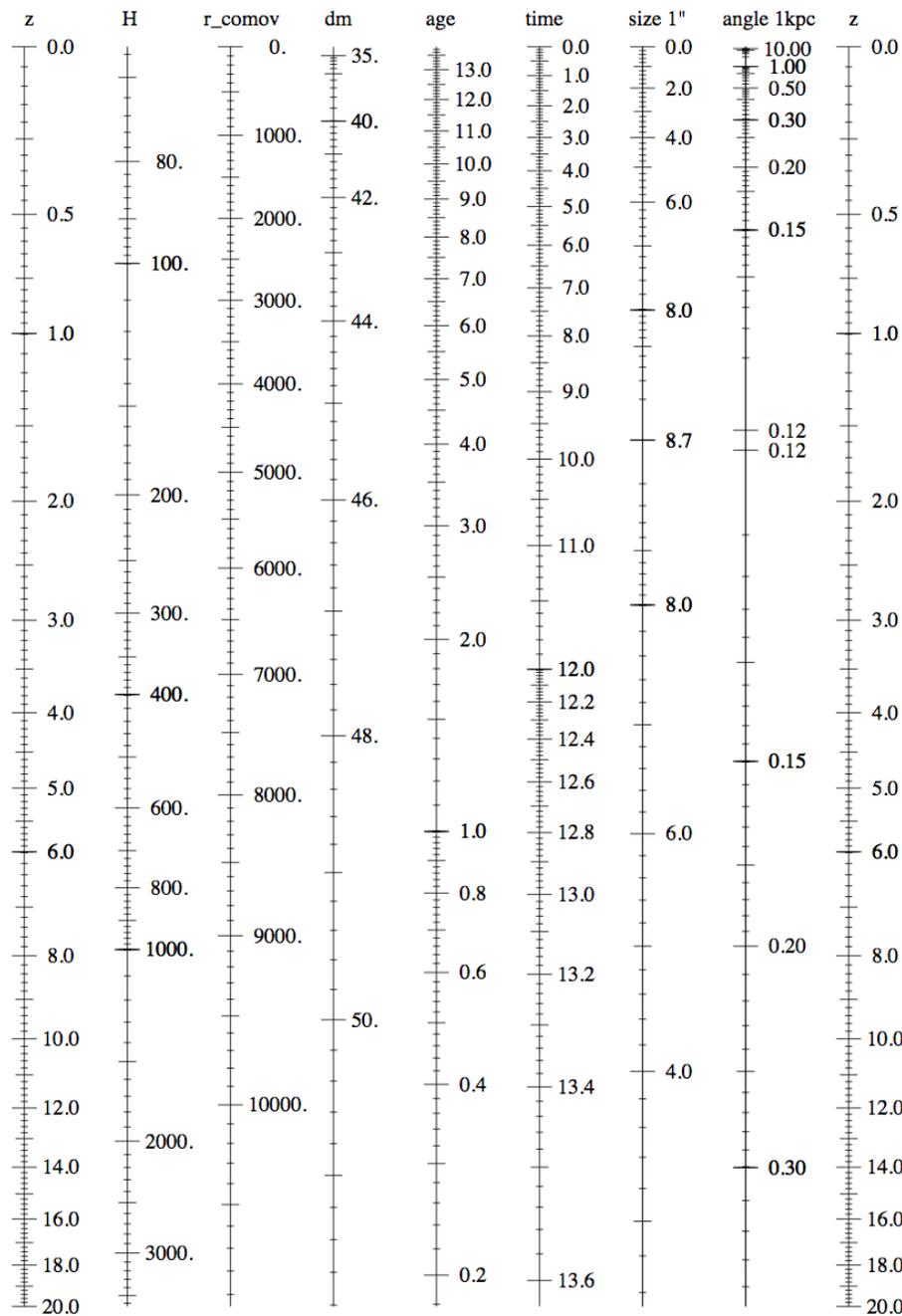
СМЧД уже набрали свою массу а галактики – нет?

Silk et al (2024):

Смена знака воздействия на АЯГ на МЗС на  $z \sim 6$



$H_0 = 67.4$ ,  $\Omega_{\Lambda} = 0.685$ ,  $\Omega_m = 0.315$



Paper-and-pencil  
cosmological calculator  
(Sergey V. Pilipenko,  
2013-2021)