

А.В. Моисеев, САО РАН

Методы исследования галактик.

Лекция VIII.

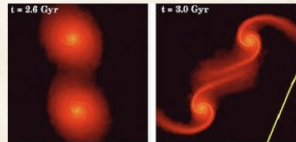
Взаимодействия галактик, большие и малые слияния. Группы и скопления галактик. Горячий "рентгеновский" газ.

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

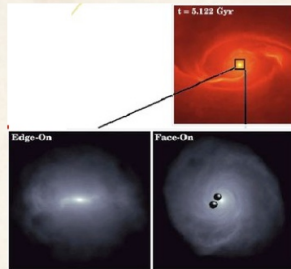
Двойные СМЧД: прямое следствие слияния галактик

Совместное происхождение или эволюция?

- **Происхождение:** если две галактики сольются, то сольются и их ЧД (одних слияний для образования галактик не достаточно, но возможно, именно так формируются балджи)

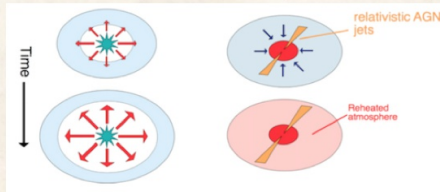


Goicovic et al 2017



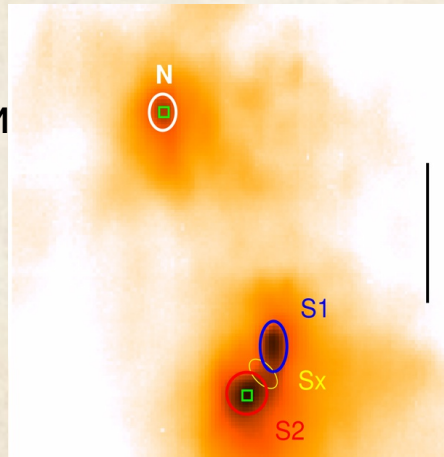
- **Эволюция:**
ЧД как-то воздействует на газ в галактике

- Нагрев/ионизация
- Выброс из галактики (джетом или излучением)

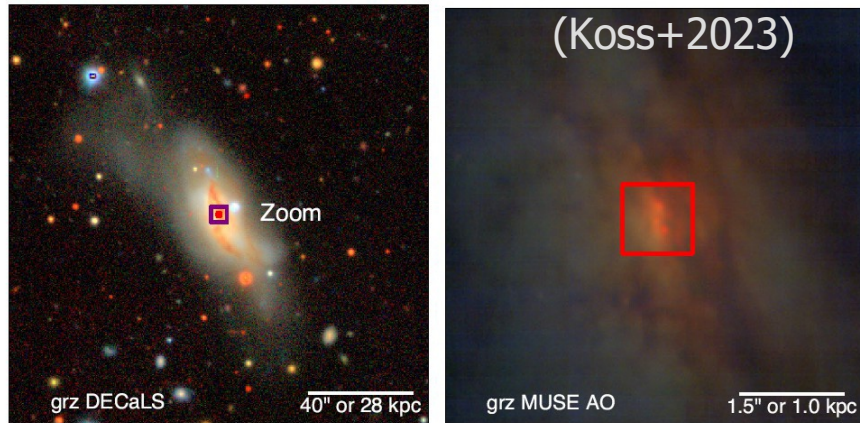


А.В. Моисеев, «Методы исследования галактик», 2024/03/26, лекция 7

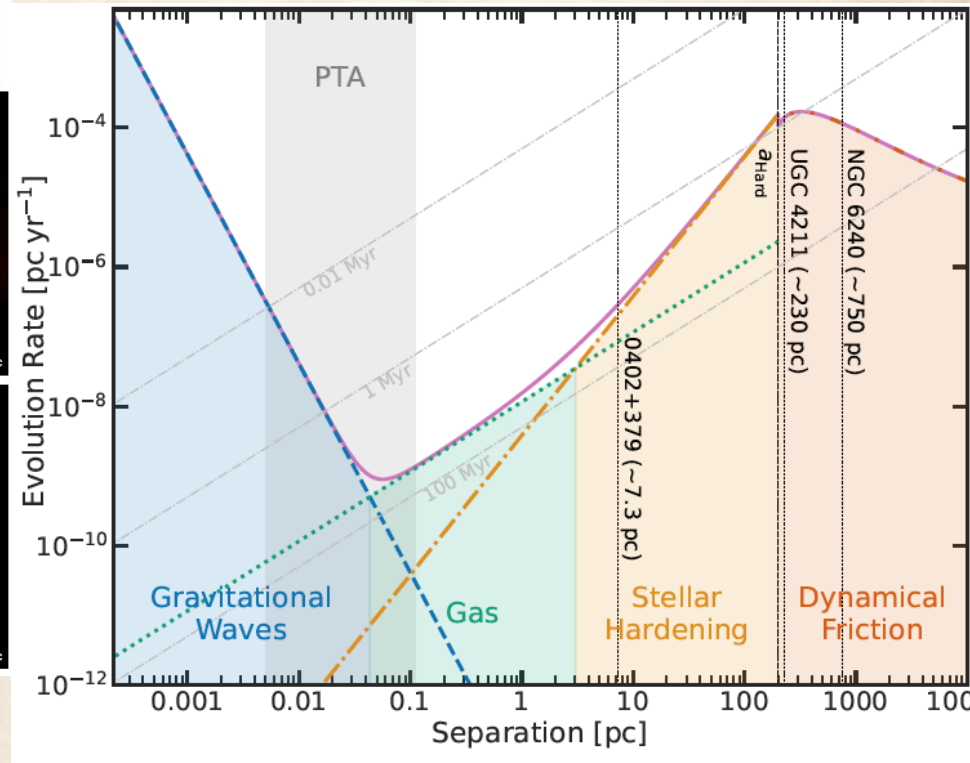
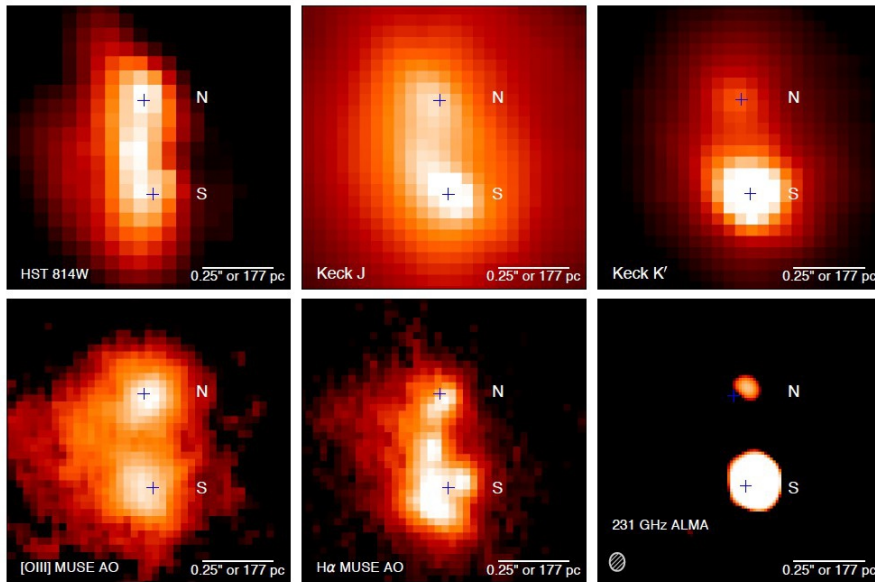
Kollatschny+2020:
внутри $r < 1$ крс три
ядра, из них два
активны



Близкий пример ($z=0.03$, $d=230$ pc): UGC 4211



Оценки дают слияние через ~ 1 Gyr – для сближения без газа, либо до 200 Myr при достаточном количестве газа
Излучение гравитационных волн – эффективно только при разделении < 0.1 пк

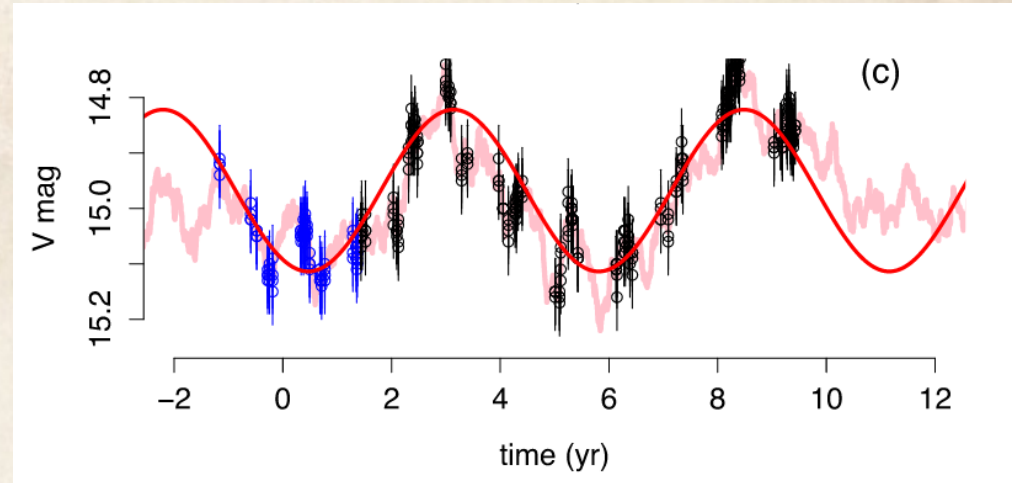


the σ_* relation derived by Kormendy & Ho (2013).
 $\log(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) = 8.4$ and 8.1

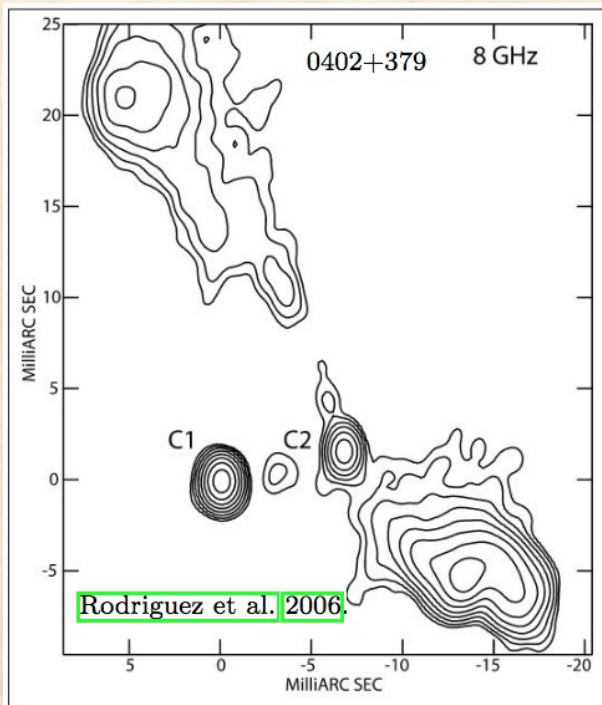
Двойные СМЧД: тесные пары (<10 пк)

Кривые блеска

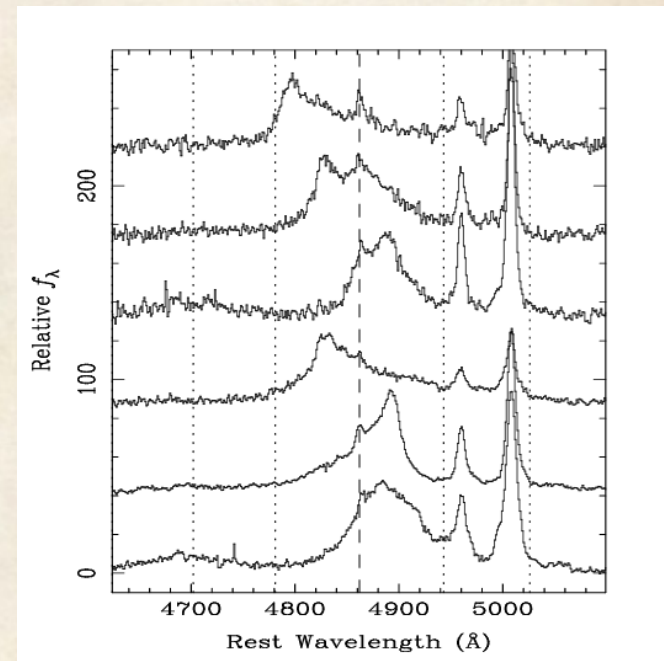
Если ядра не активны –
двойственность обнаружить
значительно сложнее



Радиоинтерферометрия



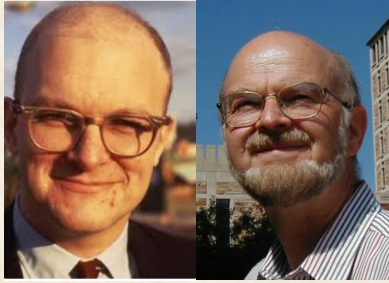
Спектроскопия



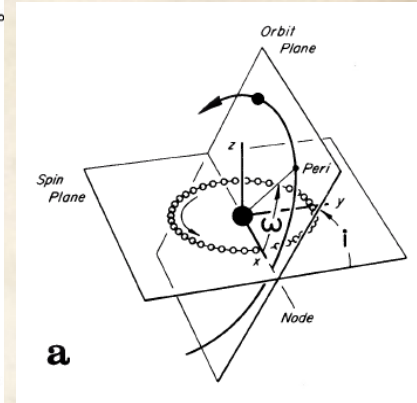
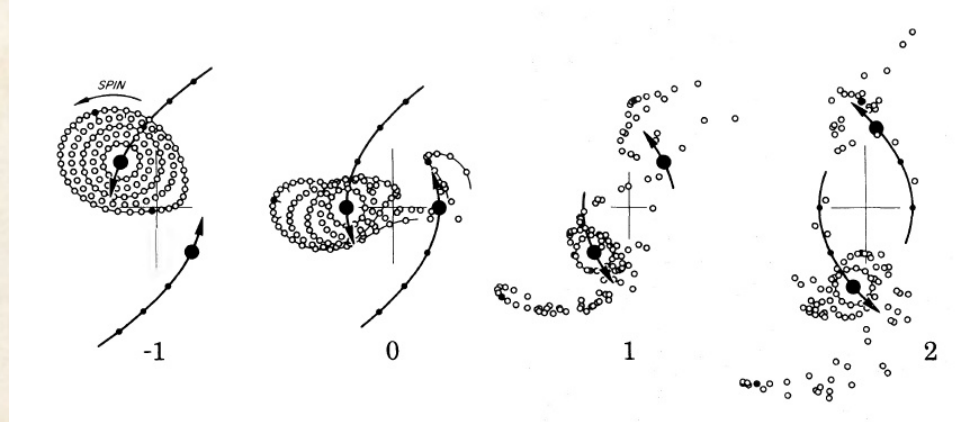
De Rosa+ 2020
Popović 2012
Eracleous + 2012
D'Orazio + 2016

Приливные структуры: хвосты и мосты

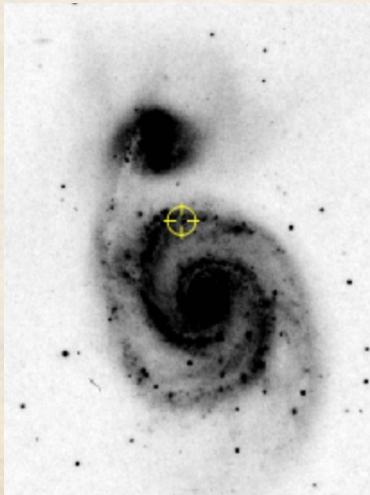
Спор о значимости приливных сил и первые расчеты: Lindblad (1961, АЖ), Ташпулатов (1979)



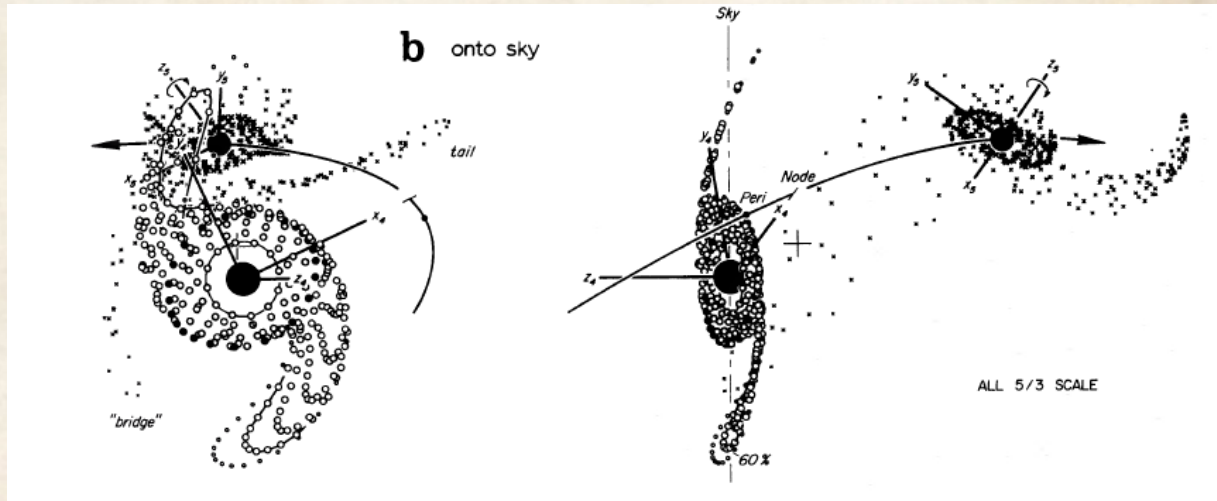
Alar & Juri Toomre (1972)



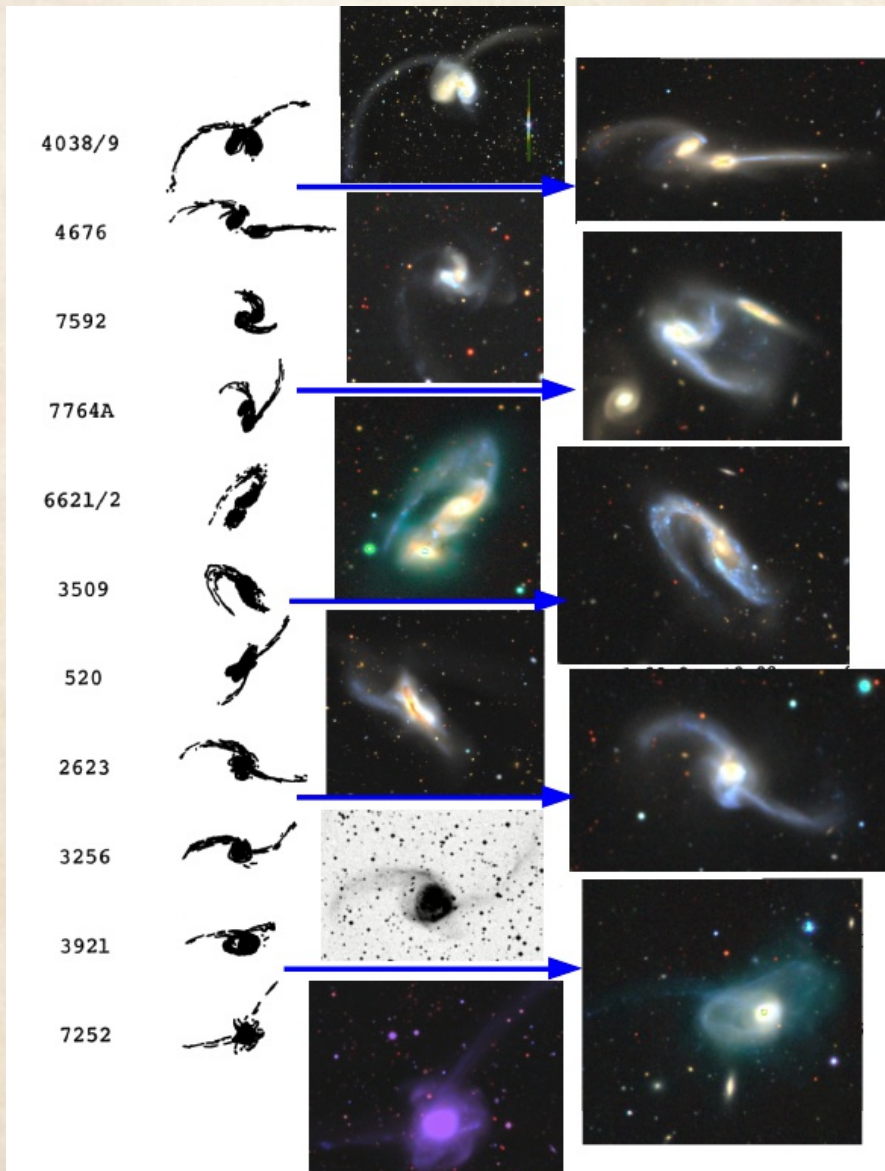
И мосты и хвосты создает гравитация: мост – ближе к пролетающему спутнику, хвост – с другой стороны. Эксперименты с разными начальными параметрами столкновений (со-вращение дает большее возмущение, чем пролет в противовращении), в первоначальном варианте внешние точки не взаимодействовали друг с другом не имели массы и двигались в потенциале центральных тел.



M51 / VV 1



"Последовательность Тоомре" (1977)

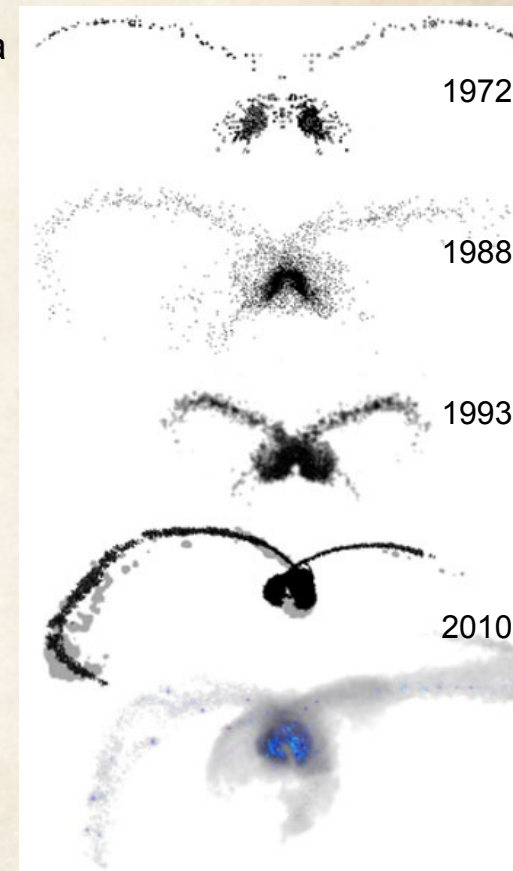


Не все наблюдаемые системы сейчас считаются результатом эквивалентных по массе слияний. Но общий принцип остался:

- Звезды – напрямую не сталкиваются
- Газ – столкновительная система, что приводит к диссипации энергии и углового момента

Dry merging – без газа
Wet merging – с газом
("мокрый" – так как гидродинамика)

Прогресс численных расчетов галактик Антенны (по Duc & Renaud 2011)



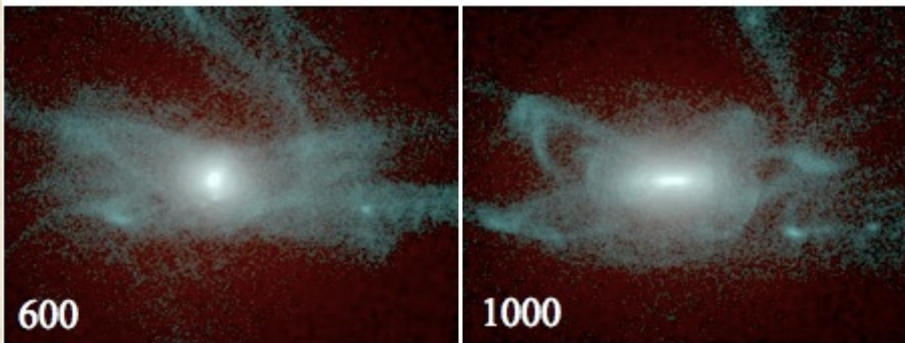
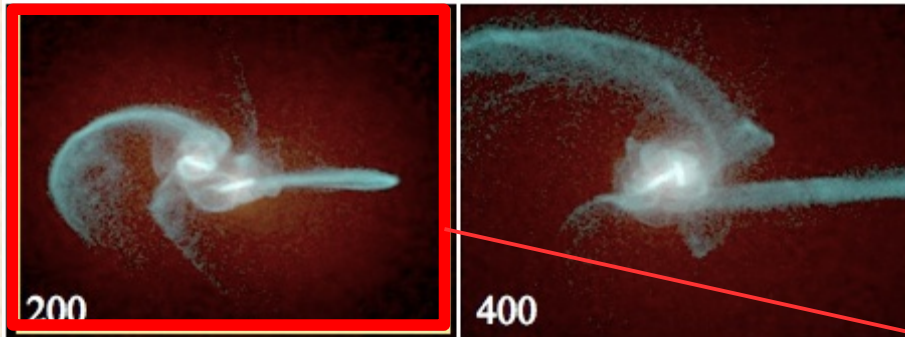
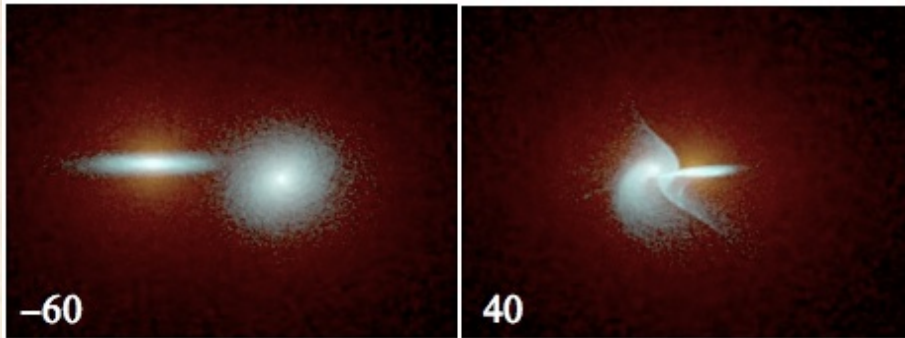
Газ и звезды во взаимодействующих системах



- Газовый диск часто более протяженный, чем звездный – слабее притягивается "своей" галактикой
- Более 70% газа диска может уйти в хвосты, в звездах - всего несколько %
- Но во внутренних частях диска - потеря момента, движение к центру, вспышка ЗО или АЯГ (лекции 6 и 7).

HI (синий) + оптика (Duc & Renaud 2011)

Исследование результатов численных моделей



- Важен обмен энергией между гравитирующими частицами
- Структуры – трехмерные
- “Частицы” - по массе значительно превосходят звезды (10^3 - $10^5 M_{\odot}$), нет точного соответствия
- “Включение” звездообразования (закон Кенниката-Шмидта, лекция 6)
- Построение проекций множества параметров ($t, Z, vel, \Sigma(HI)...$)
- Темное гало влияет на длину хвостов

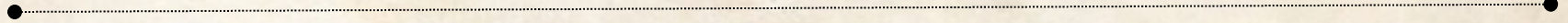


The Mice: Hubble Space Telescope

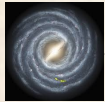
VIDEO: <https://www.youtube.com/watch?v=pR4pzthwqkA>

Почему галактики сталкиваются, а звезды – нет?

От Солнца до α Центавра — **3.2 миллиона** диаметров



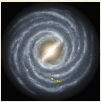
От Млечного Пути до Туманности Андромеды — **17** диаметров



Почему галактики сталкиваются, а звезды – нет?

От Солнца до α Центавра — **3.2 миллиона** диаметров

От Млечного Пути до Туманности Андромеды — **17** диаметров



Milky Way

Andromeda

Milkomeda

4-5 Млрд лет

IMAGES: Frank Summers (Space Telescope Science Institute), Chris Mihos (Case Western Reserve University), Lars Hemquist (Harvard University)

Dubinski + 1996
Cox & Loeb 2008
Riccardo 2020



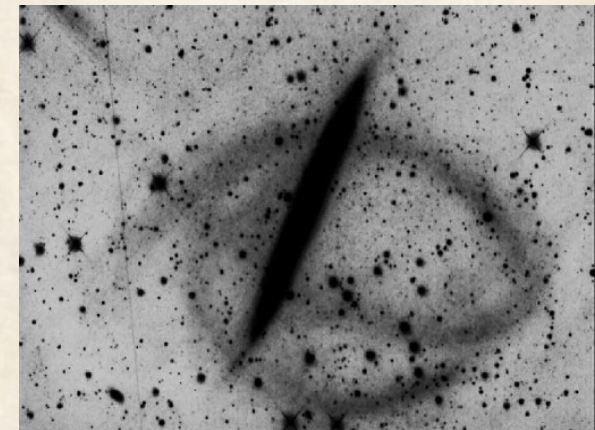
<http://www.space.com/15944-milkyway-galaxy-crash-andromeda-artist-pictures.html>

Большие и малые слияния

Критерий отношения масса (или светимостей) условный, обычно около $M_2:M_1=1/5$



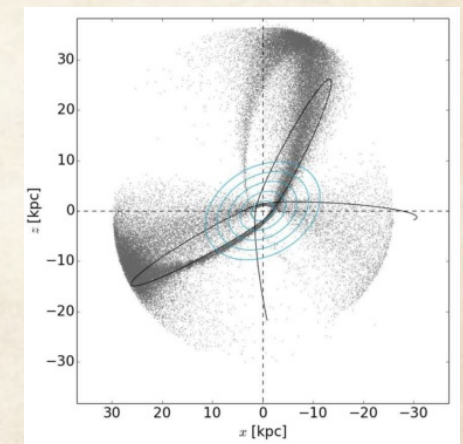
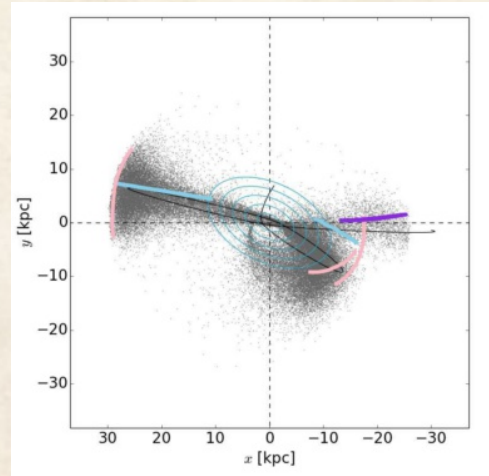
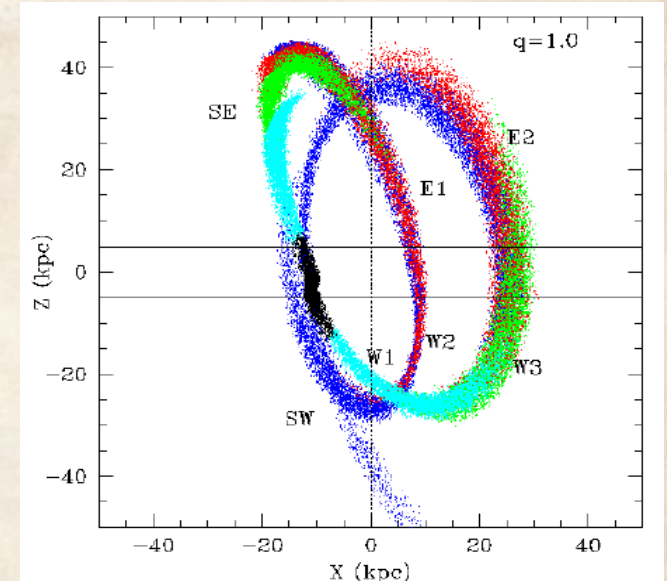
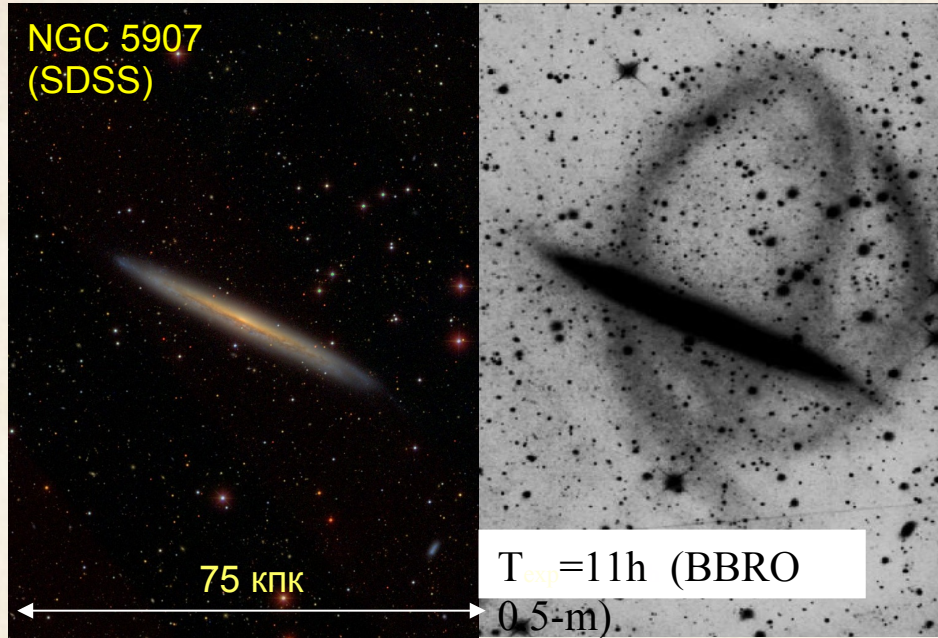
Полное изменение структуры исходных галактик (из двух - одна)



Сохранение массивного компаньона, но он может приобрести кинематически и морфологически выделенный компонент (Лекция 5)

Малый мерджинг: приливные потоки

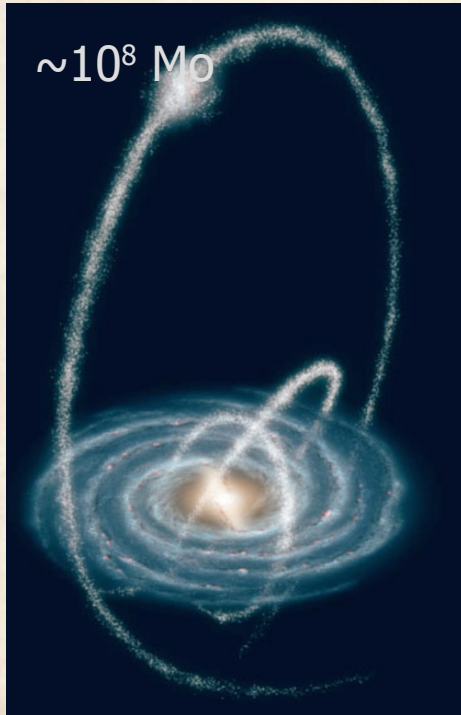
(Martínez-Delgado, 2008)



Mass ratio 1/50, $t \sim \text{few Gyr}$

Foster + 2014

В Млечном Пути: Стрелец и Сосиска, Шива и Шакти



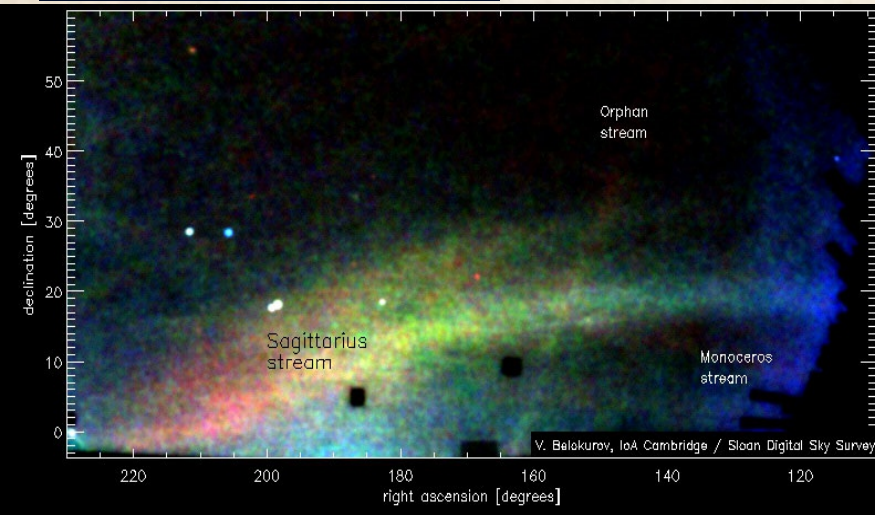
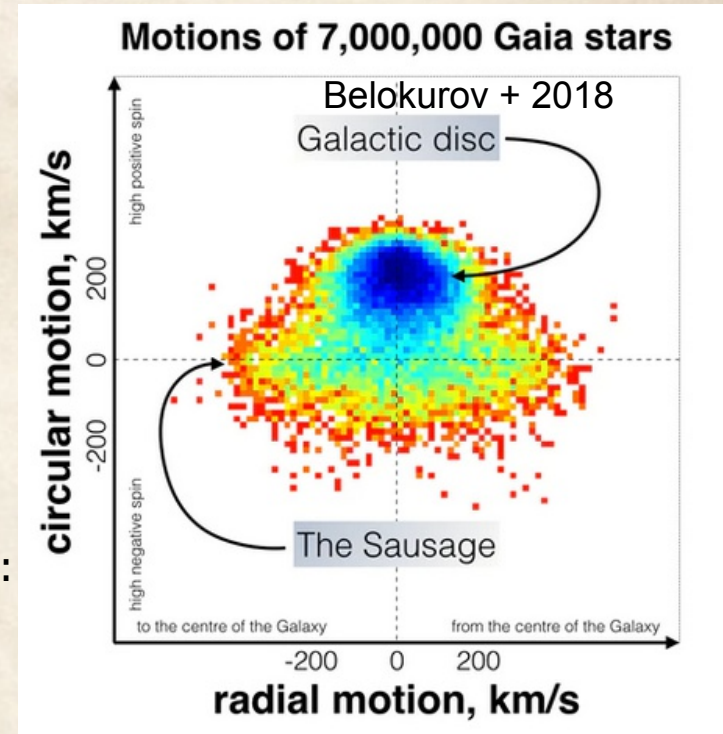
Sgr Dwarf – трекер трехосности гало

SDSS/APOGEE, GAIA

Богатый газом карлик:
$10^9 M_{\odot}$, 8.2 Gyr (Lian+20)

Сосиска
 $\sim 10^9 M_{\odot}$, 10 Gyr (Helmi + 18)

Шива и Шакти (Malhan & Rix 24):
 $\sim 10^7 M_{\odot}$, 12 Gyr
 $-2.5 < [M/H] < -1.0$



Галактики с полярными кольцами

1) Слияние галактик (~25%):

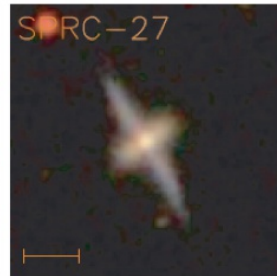
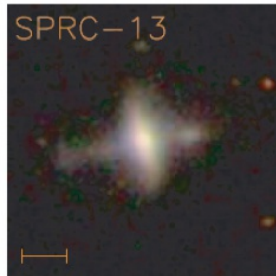
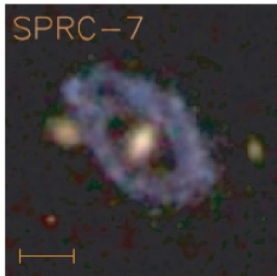
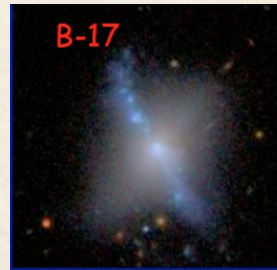
- лобовое столкновение между двумя ортогональными дисками (Bekki, 1998; Bournaud & Combes, 2003)

2) Аккреционные сценарии (~75%):

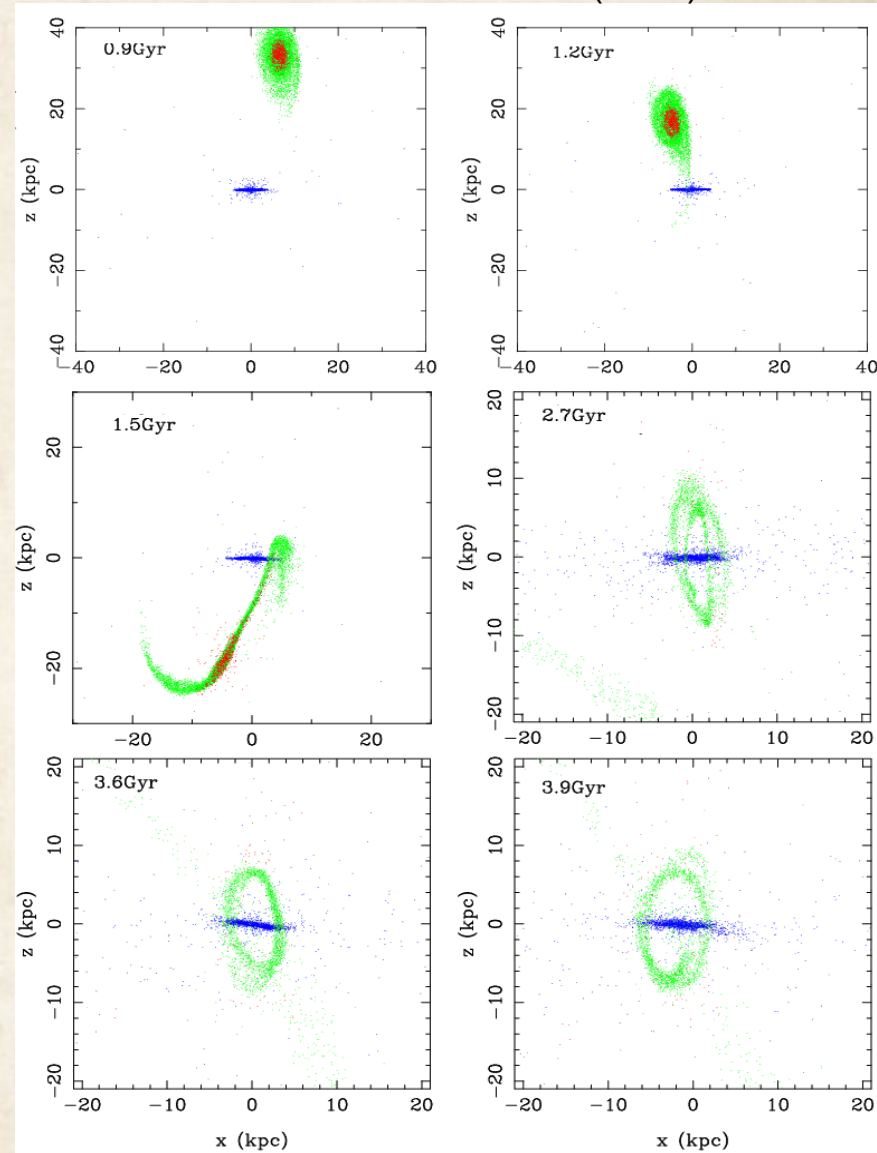
- приливная аккреция материи с богатого газом спутника (Schweizer et al. 1983; Reshetnikov & Sotnikova 1997)

- разрушение малого компаньона на полярной орбите

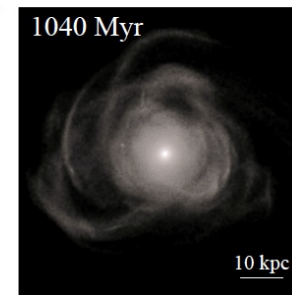
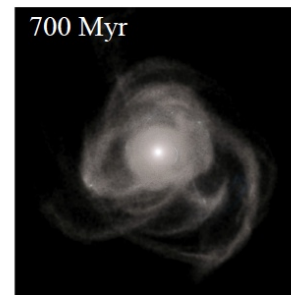
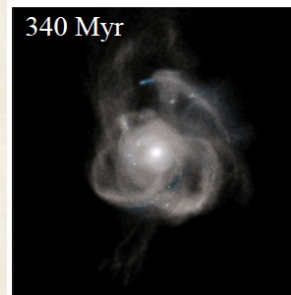
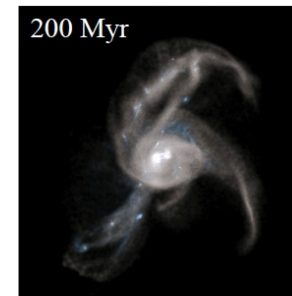
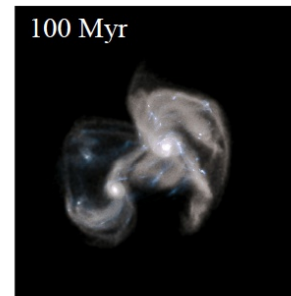
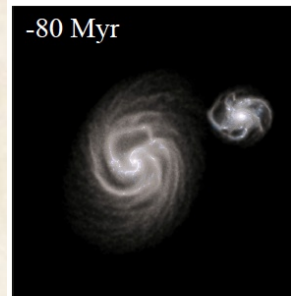
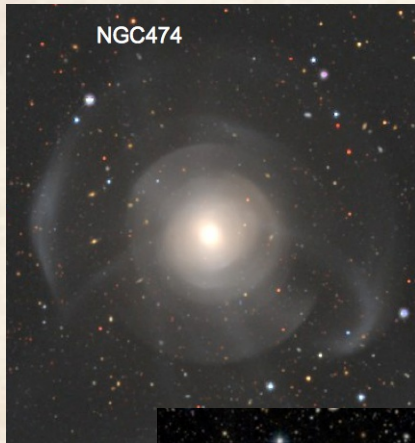
- аккреция газа из филаментов межгалактической среды (Лекция 10)



Bournaud & Combes (2003)



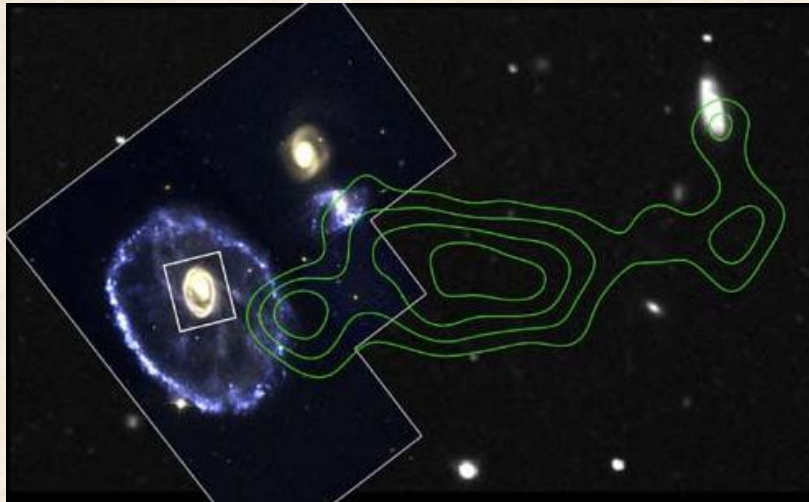
Рябь (ripples, shells): “средний мерджинг” (1/10-1/2)



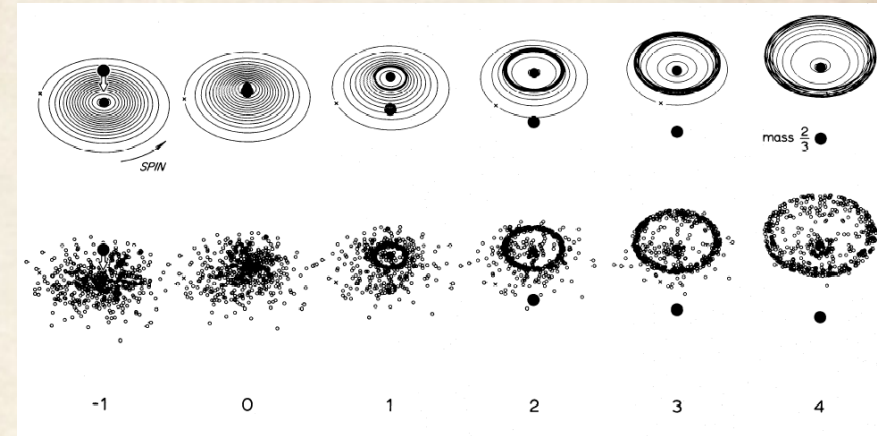
Petersson + 2022

- Специфические начальные условия: пролёт спутника в той же плоскости с малым прицельным параметром.
- Перестройка диска в сфероид, газовый диск распухает, плотность – ниже пороговой
- Оболочки формируются из звезд спутника, сохранивших момент и уходящих в апоцентр. В газе этого не происходит из-за быстрой диссипации энергии
- В этом – принципиальное отличие от приливных рукавов, где удар меньше
- Оболочки живут дольше 1 млрд. лет

Кольцевые столкновительные галактики



Lynds & Toomre (1976).

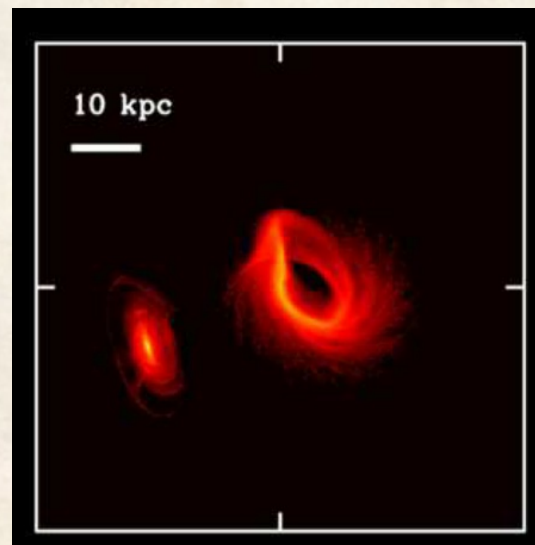


Лобовой удар массивного спутника на параболических скоростях
Распространение кольцевой волны плотности – тест для разных моделей иницирования ЗО
(лекция 6)

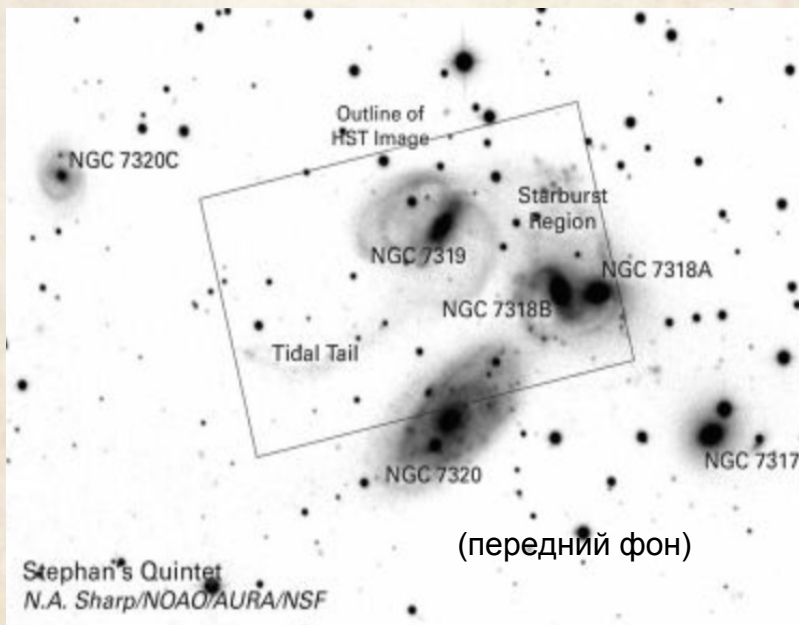
Смещенный от центра удар
– ядро уходит в кольцо

Пример: Arp 147, $M_1/M_2=1/2$

(Mapelli & Mayer 2011)

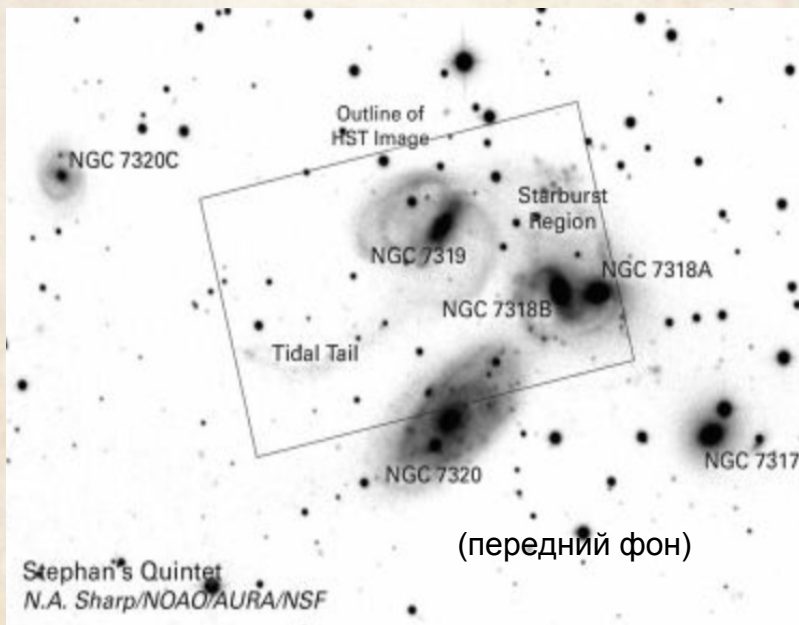


Группы галактик



- Пространственно выделенные агрегаты от нескольких до ~ 50 крупных галактик, общая масса - до $10^{13} M_{\odot}$
- Содержат до 50% галактик Местной Вселенной
- Гравитационные взаимодействия наиболее ярко проявляются в компактных группах, так как $R < 500$ кпк, $\Delta V \sim 100-200$ км/с
(см. Hickson 1997)

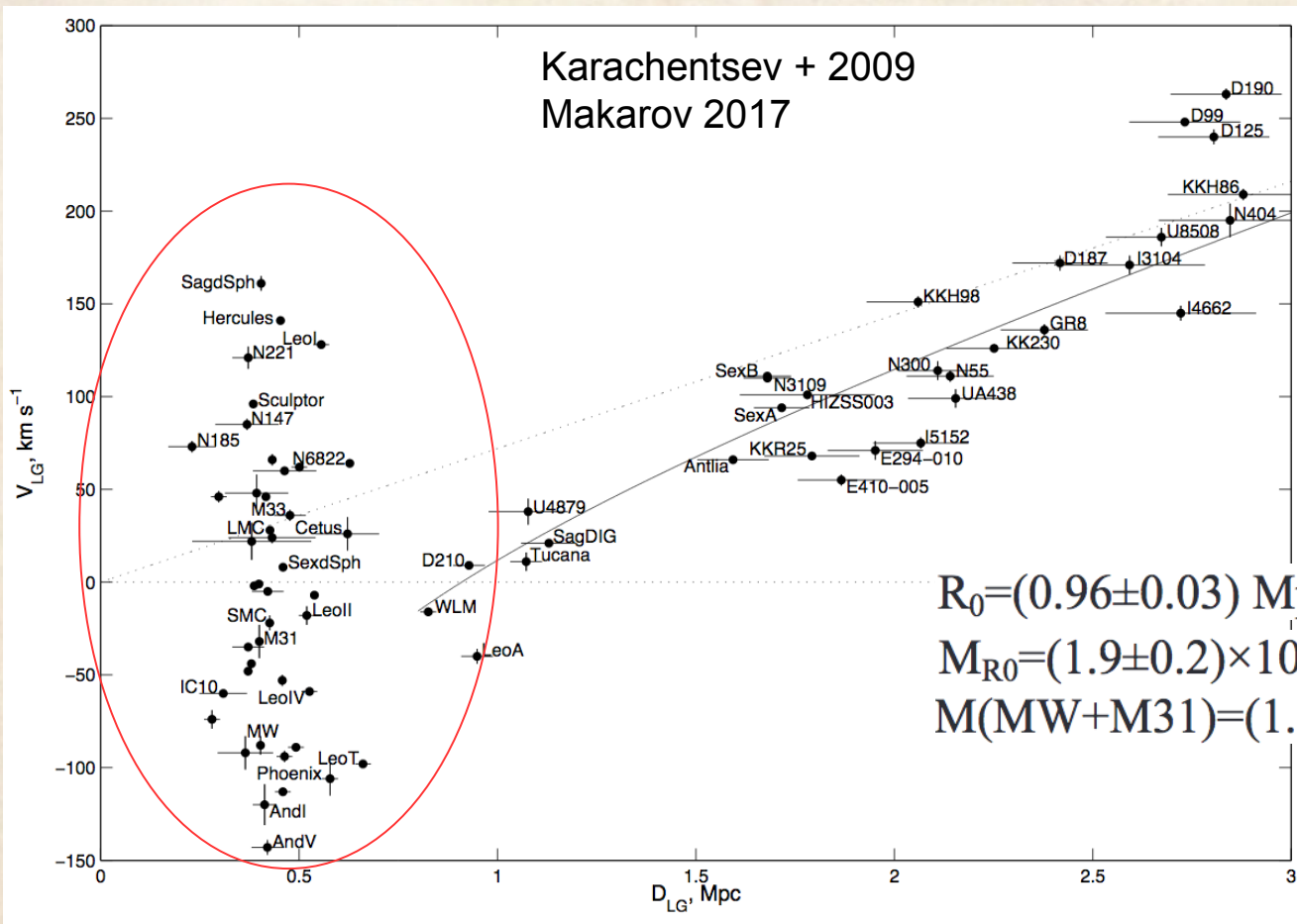
Квинтет Стефана (Édouard Stephan 1877)



Spitzer, JWST: ударная волна при столкновении галактик порождает молекулярные облака (лекция 6)

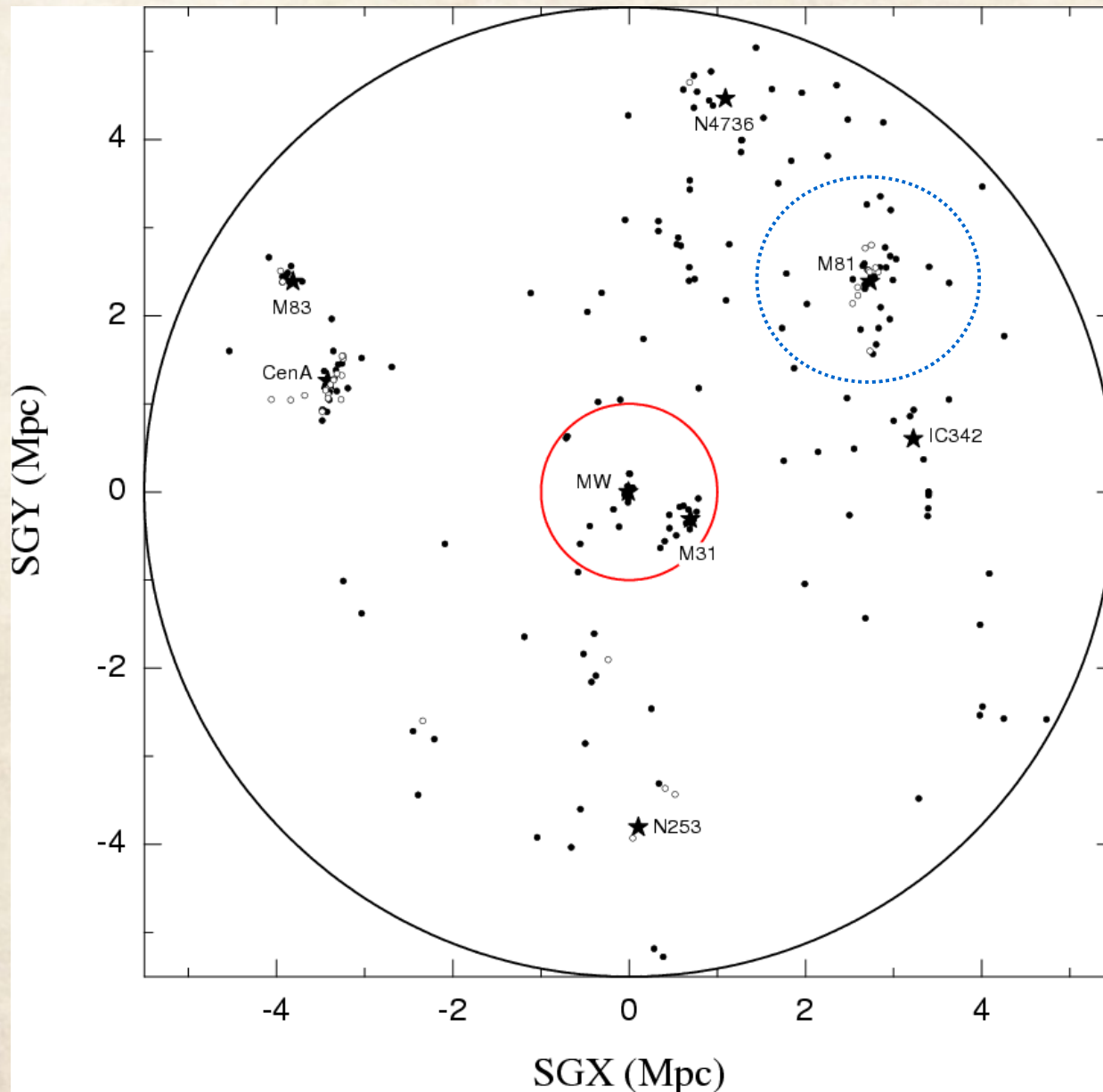
NGC 7319 – активное ядро с конусом ионизации

Местная Группа: MW+M31+M33+...



- Выделение из “хаббловского потока” по сфере нулевой скорости
- Прямые оценки расстояний
- Возможности построить пространственное распределение галактик
- Собственные движения (HST, GAIA, мазеры...)

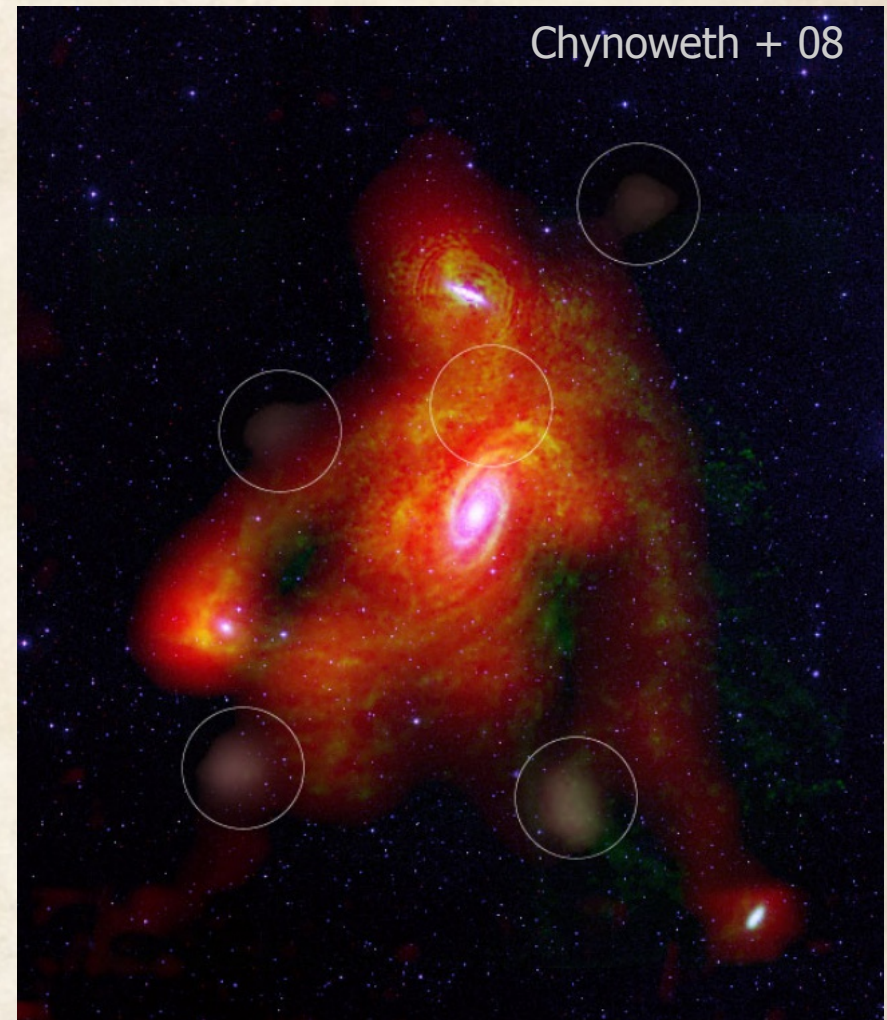
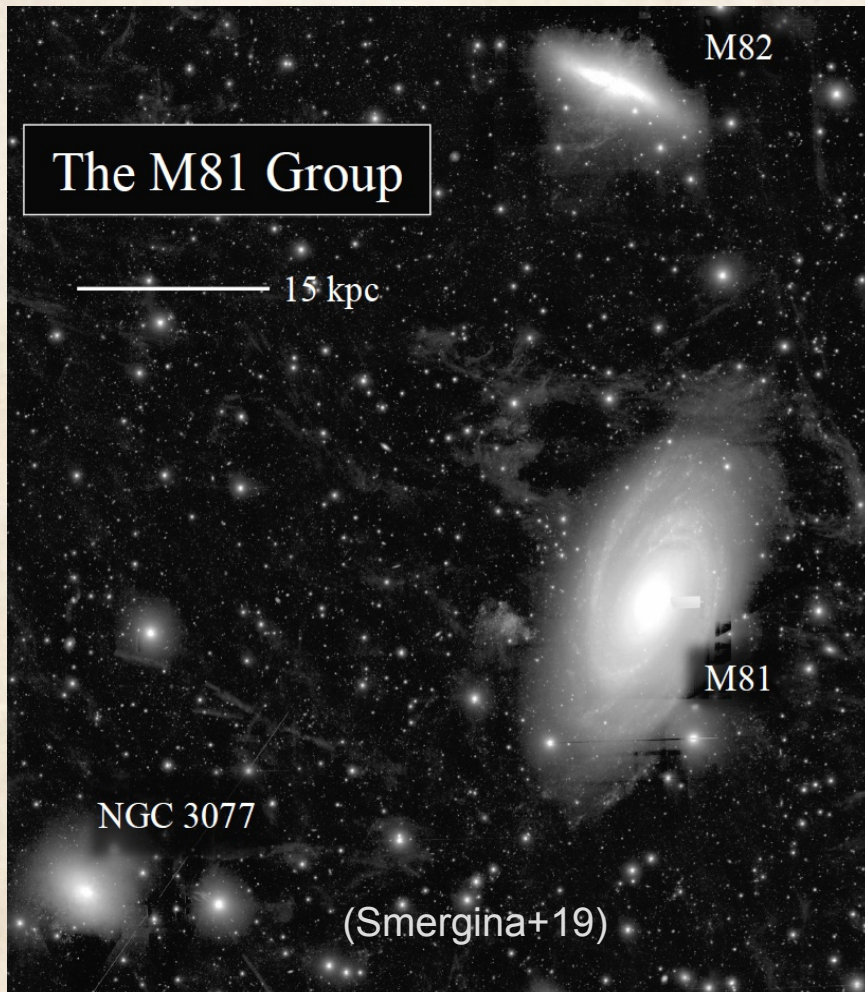
Местная Группа галактик и ее окружение



M81:
D=3.7 Mpc

Karachentsev+03

Богатая газом группа M81



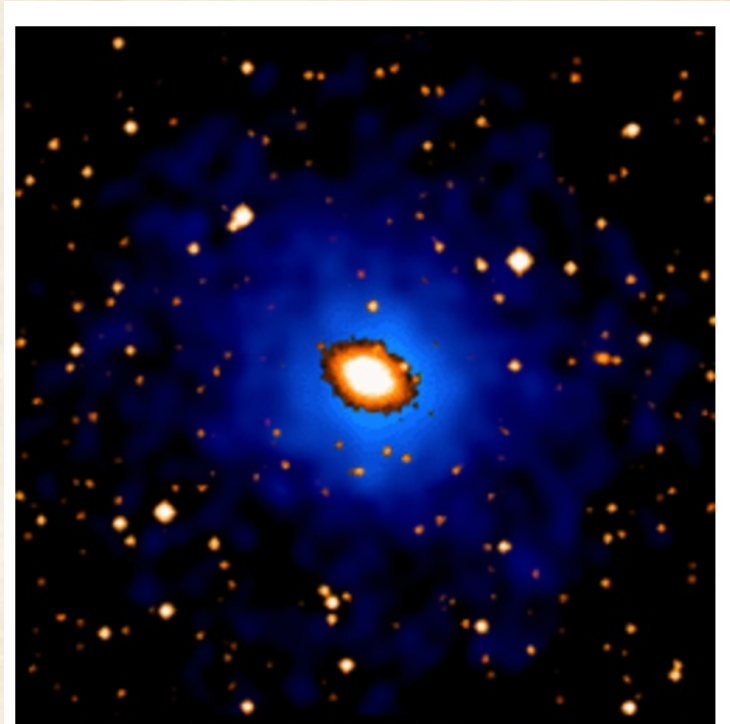
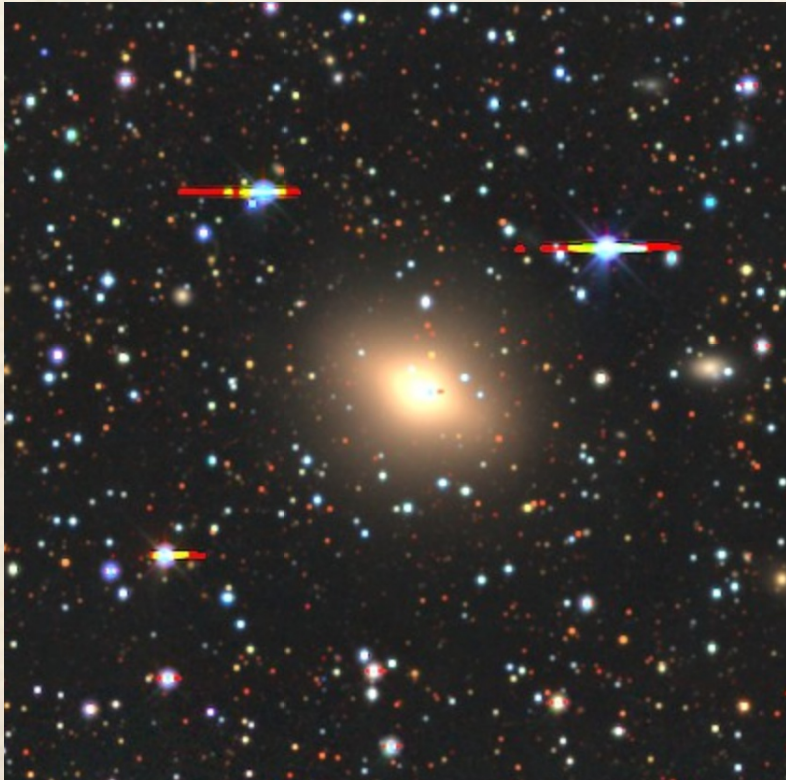
The total HI mass of the galaxies in the M81 system is $3.5 \times 10^9 M_{\odot}$, whereas the total HI mass detected in the field is $1.1 \times 10^{10} M_{\odot}$. This implies that only about 31 per cent of the HI in the region resides in galaxies. The majority of the HI is in the form

~2/3 массы всего нейтрального газа находится между галактиками группы (Sorgho + 2019)

Ископаемые (fossil) группы - финал слияний?

В оптической яркости доминирует одна большая E-галактика,
Рентгеновская светимость горячего газа (L_x) – как у богатых групп (Ponman et al. 1994)

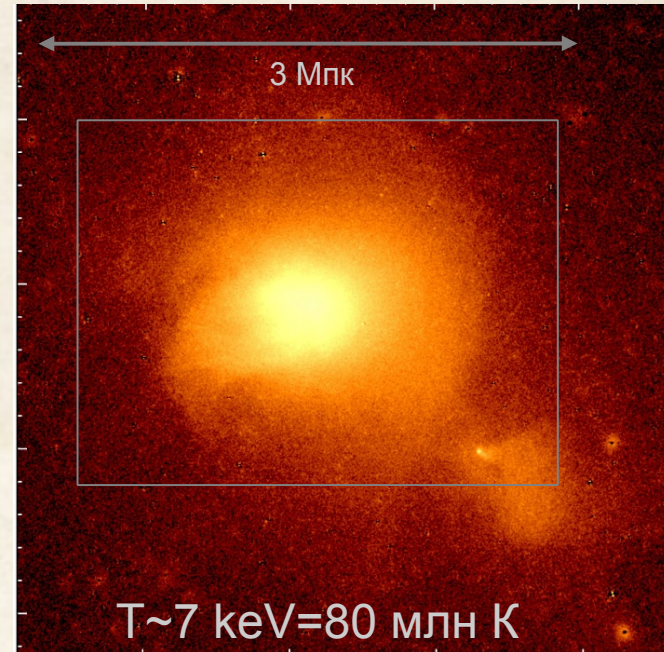
T_x ~ 10 млн. К (~вириальная температура)



Nearest Fossil Group: Chandra X-ray observations of the giant elliptical galaxy NGC 6482, at the centre of this image, show that it is surrounded by a cloud of hot gas (shown in blue), which has a temperature of about 10 million degrees Celsius and measures over 700,000 light years across. This giant galaxy is believed to have

Скопления галактик

eROSITA (0.2-4KeV, Churazov+2021)



Coma:

>1000 галактик, доминирование ранних типов (E, S0 - “красная последовательность”, лекция 4)

$R_{500} \sim 1.5 \text{ Мпк}$, - объем с плотностью в 500 раз выше средней в по Вселенной. $R_{200} = 1.5 R_{500}$

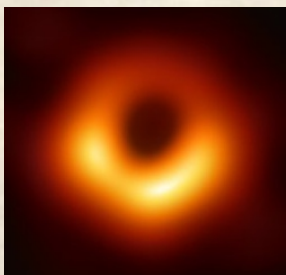
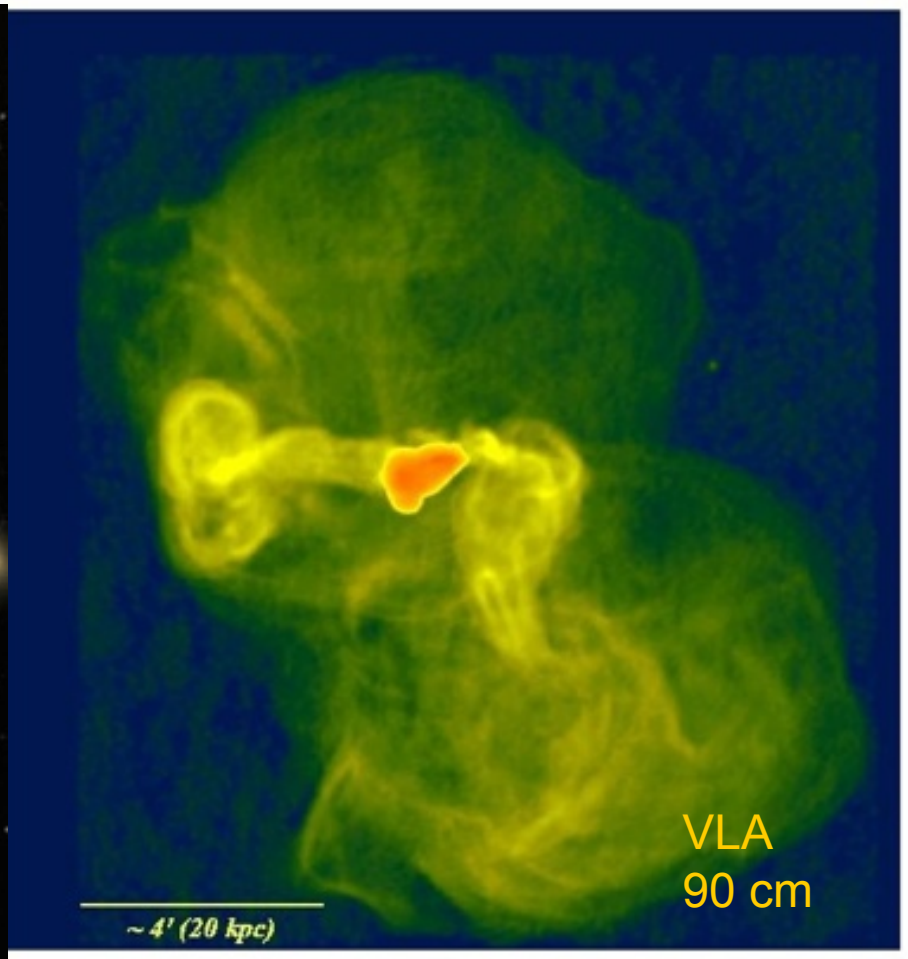
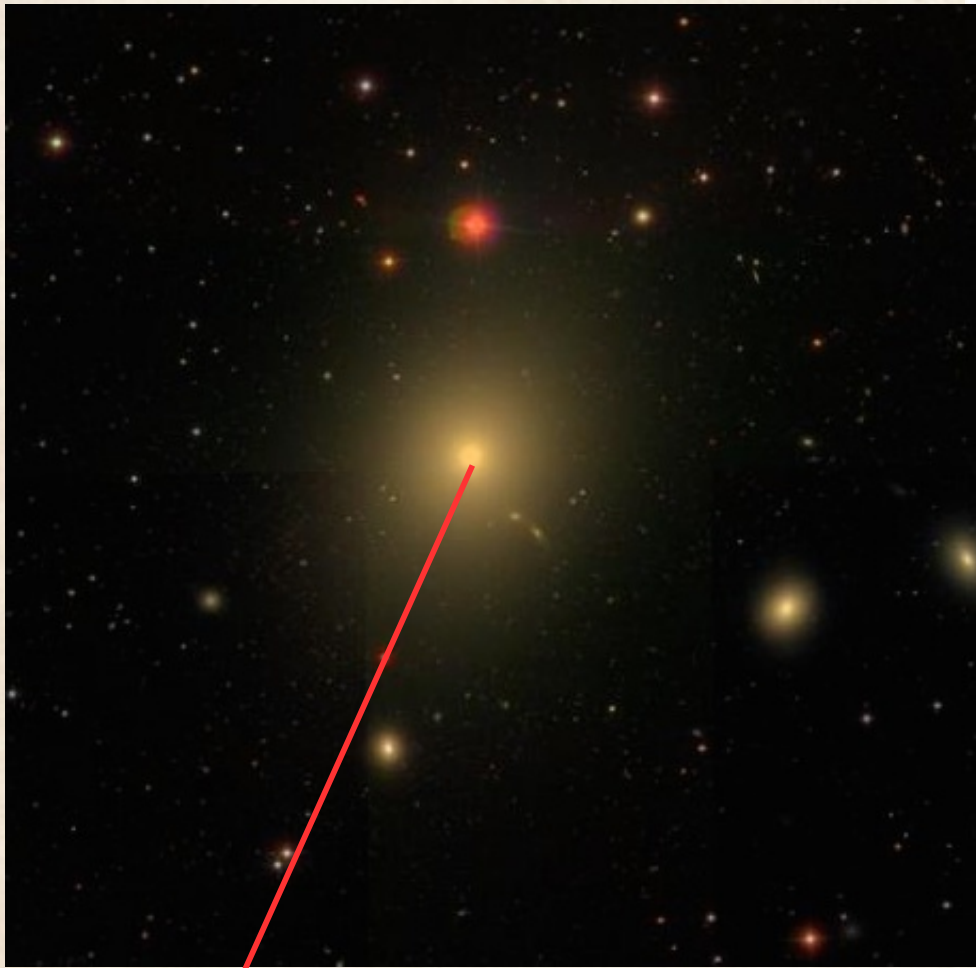
Свободно-свободные переходы в горячей плазме – форма спектра дает T.

Концентрация:

$$I(r)_\nu = \int n_e(r)^2 \lambda(T)_\nu dl, \rightarrow n_e = 10^{-6} - 10^{-4}, \text{ cm}^{-3}$$

“Вириальная температура газа” - скорость атомов (ионов) близка к средней дисперсии скоростей галактик членов скопления $\Delta V \sim 1000 \text{ км/с}$: $(\Delta V)^2 = 3kT/m_p$

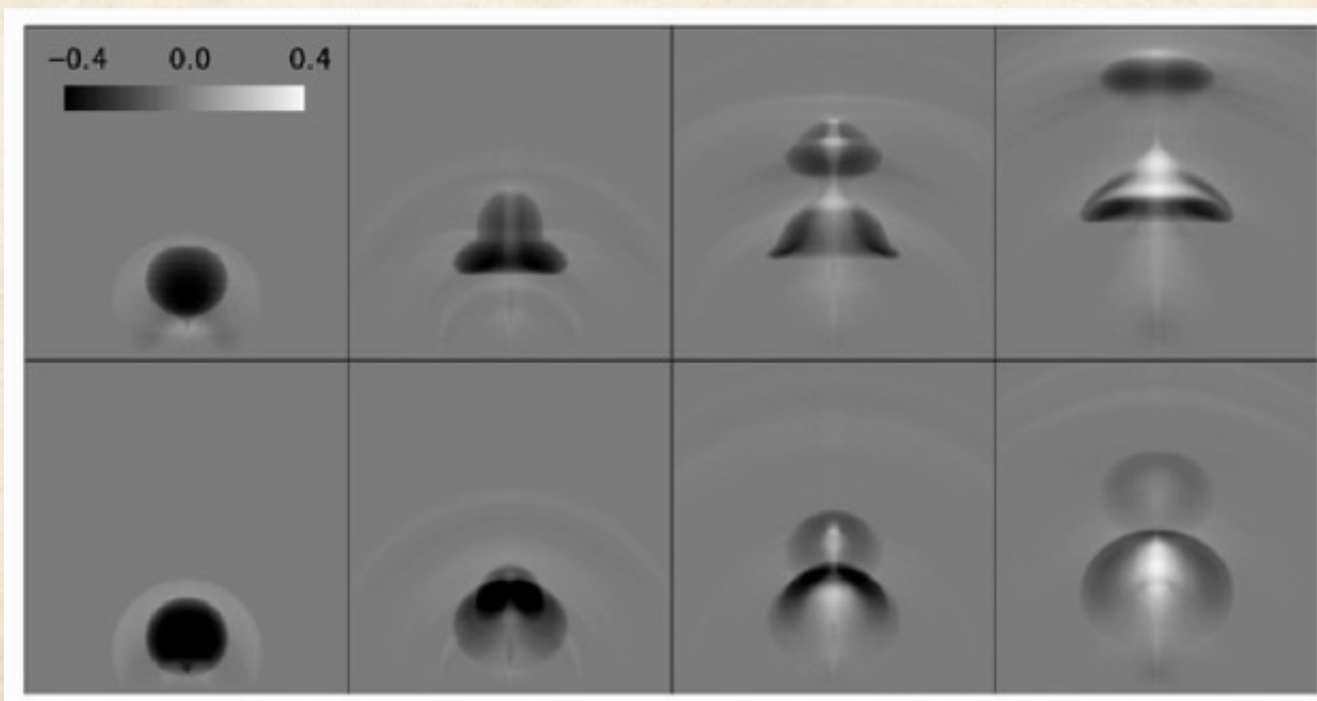
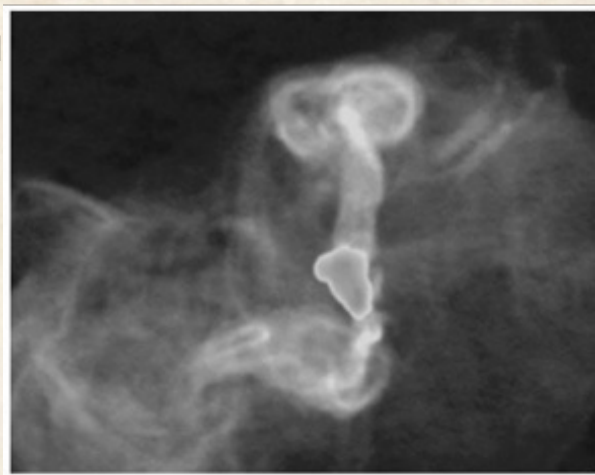
Скопление галактик в Деве: горячие пузыри



Скопление галактик в Деве: горячие пузыри

Саморегуляция активности
ядра через всплывающие
пузыри...
(Чуразов +)

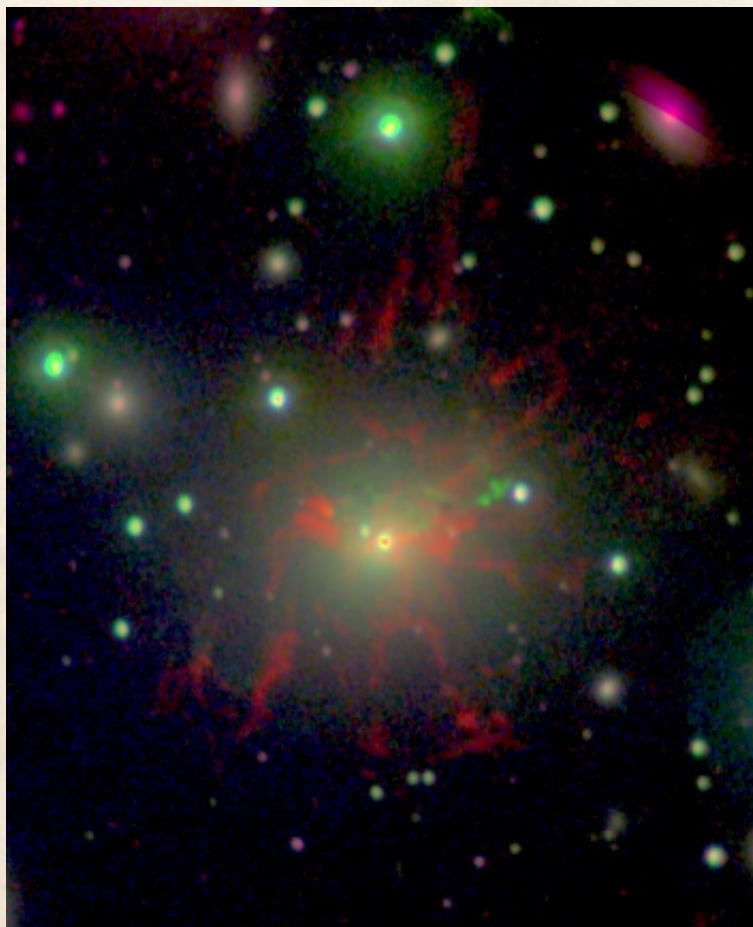
$E \sim 10^{57}$ эрг
 $t \sim 12$ млн. лет
 $r \sim 30$ кпк



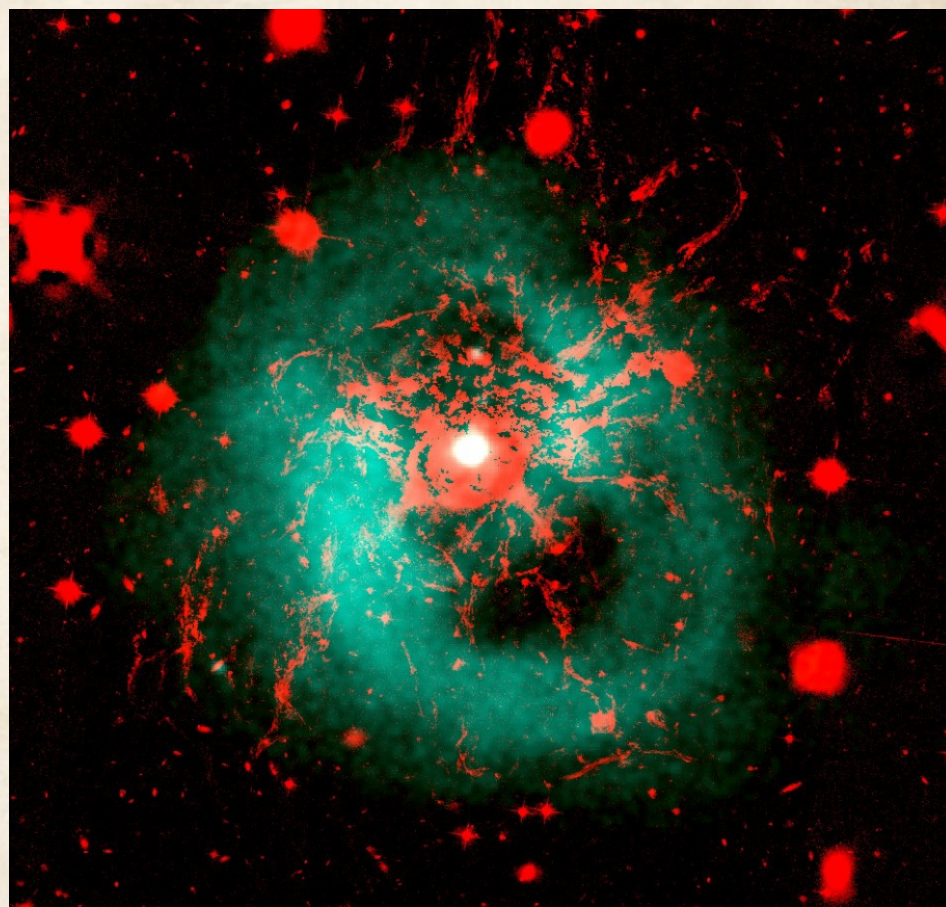
Персей А (NGC1275): течения охлаждения (cooling flow)

Время охлаждения $t \sim T/n_e$ – в центрах скоплений плотный газ успевает охладиться, концентрируется и возвращается к сД галактике.

[NII]+cont+[OIII]



Moiseev + 2020



HII (HST) + рентген (40 млн. К)

Скопления галактик: измерение массы

$$\Delta V = \sqrt{3}\Delta V_{obs}, \quad M = f \frac{R_e (\Delta V)^2}{G}$$

1) Вириальная масса по дисперсии скоростей (начиная с Цвикки 1933, лекция 5), формула почти как для $M(BH)$ (лекция 7)

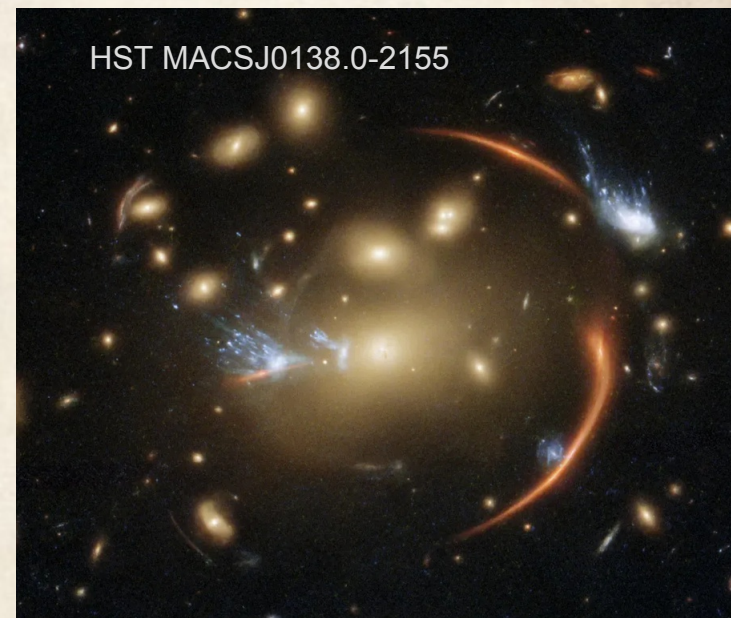
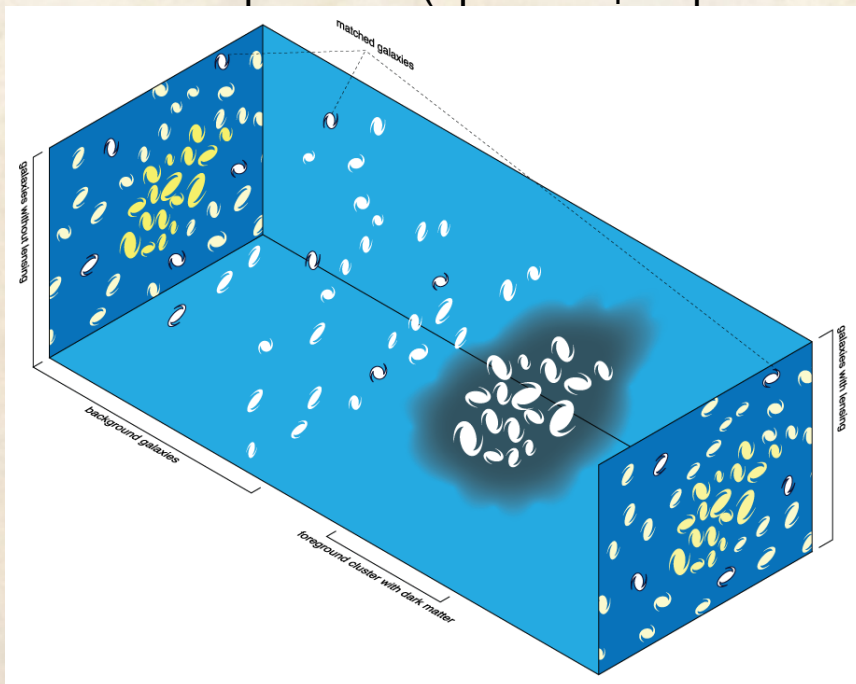
2) Гидростатическое равновесие горячего газа, точнее чем просто из теоремы вириала, строим модель скопления

$$\frac{dP}{dR} = \frac{kd(n(R)T(R))}{dR} = \rho(R)g(R) = -n(r)m \frac{GM(R)}{R^2}$$

3) Гравитационное линзирование:

Моделирование дуг источников дальнего фона

Слабое линзирование (ориентация фоновых галактик)



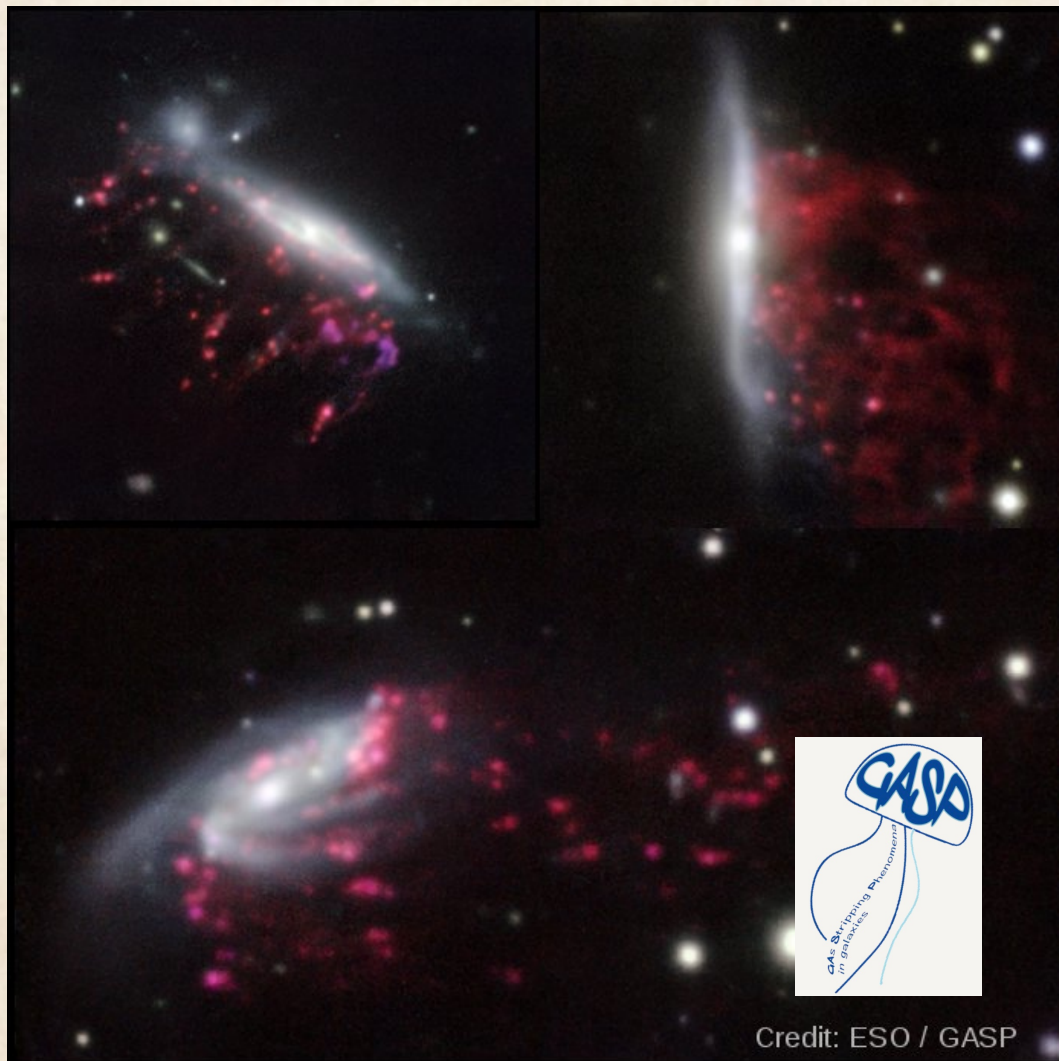
Особенности взаимодействия галактик в скоплении

- Характерные массы: 10^{13} - 10^{15} M_{\odot}
- Масса горячего газа – равна или превосходит барионную массу галактик
- При этом $M/L > 8-10$ – указание на тёмную материю
- Времена пересечения – несколько млрд. лет
- Галактики “не успевают” сливаться, за исключением захвата центральной (сD) галактикой скопления (часто она активна – лекция 7) - в скопления понижен процент кинематически выделенных структур (противовращение, полярные диски-лекция 5)
- Работает приливное трение - “обдирание” дисков галактик меньшей массы
- На таких скоростях – динамическое давление внешнего газа может превосходить внутреннее

Fornax A (NGC 1316)

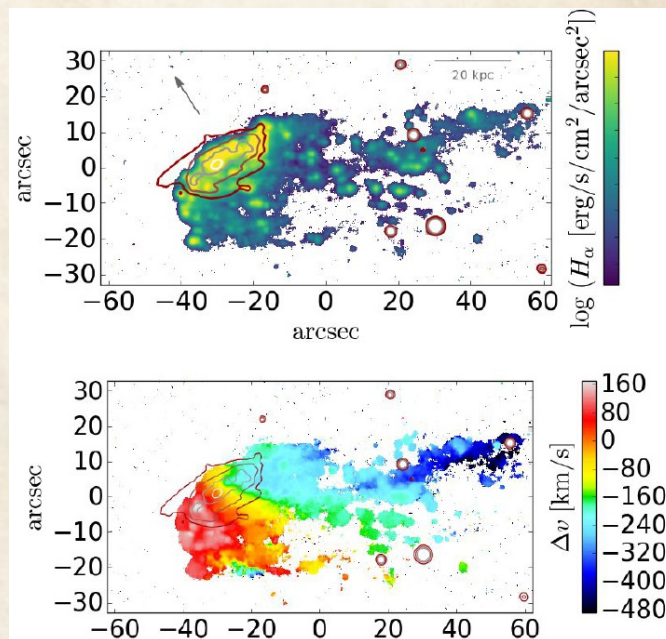


Обдирание динамическим давлением: "медузы"



Ram pressure stripping

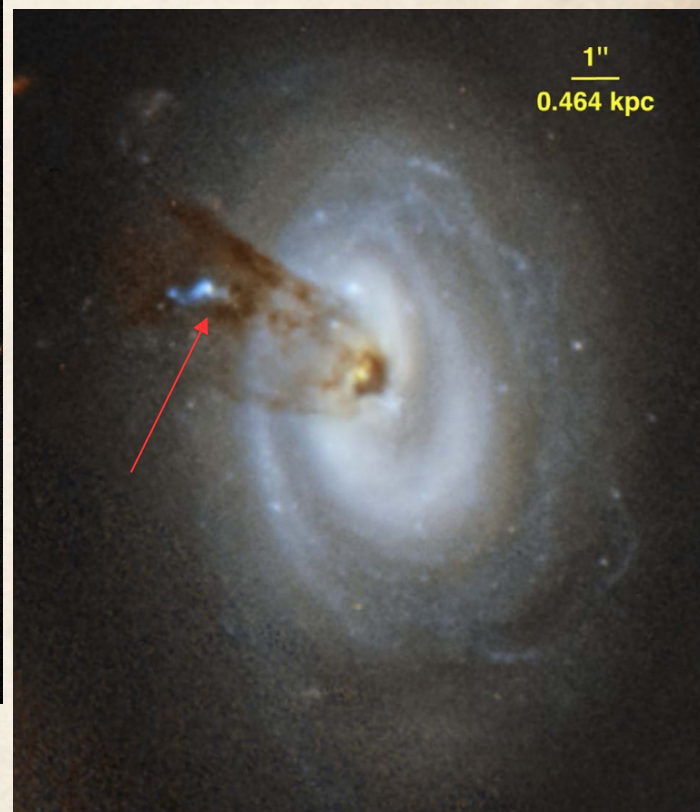
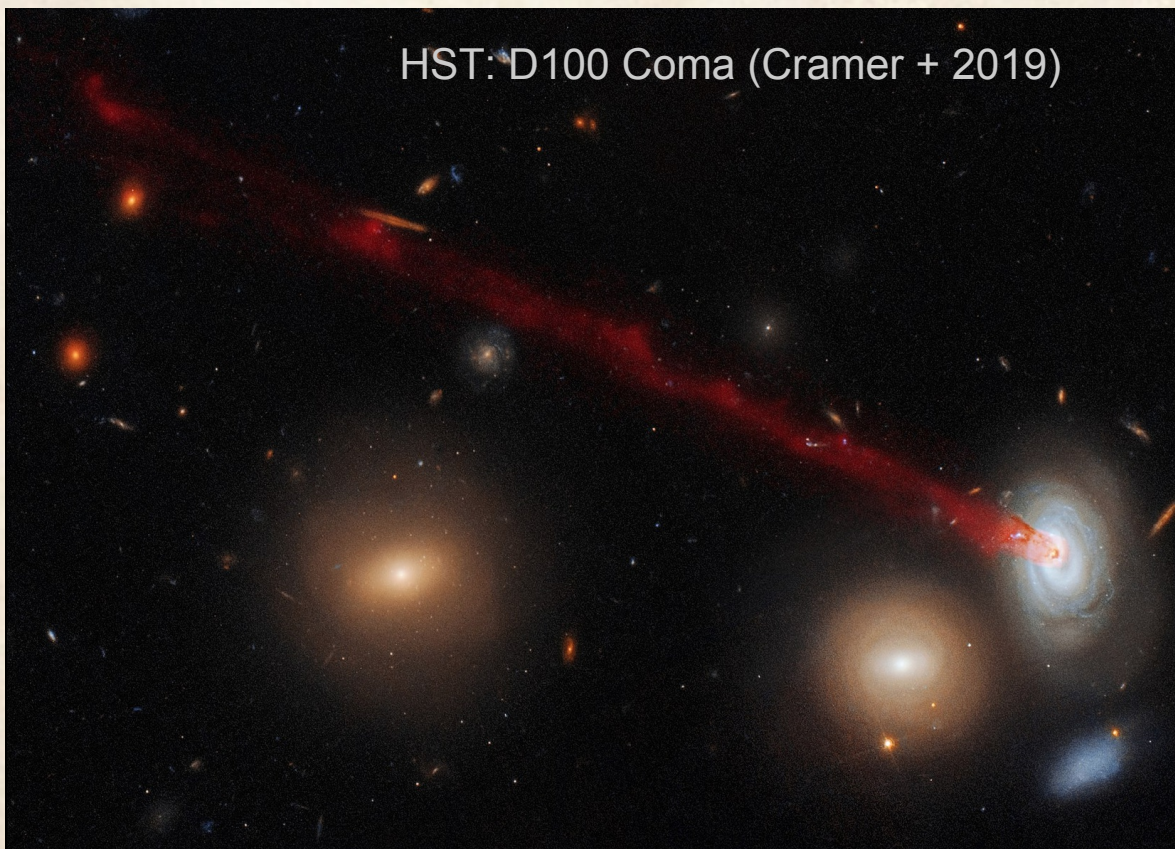
При скоростях $V \sim 1000$ км/с выметание начинается при плотностях газа $\sim 5 M_{\odot}/\text{пк}^2$ (Засов 1993)



$\sim 15\%$ газа покинуло галактику, $r > 20$ кпк (Poggianti + 2017)

GAs Stripping Phenomena in galaxies with MUSE

Звздообразование (“щупальца” обжаты газом)



Эмиссионный хвост: 1.5×60 кпк
Звездные комплексы, $SFR \sim 0.006 \text{ Mo/yr}$

Эффект Сюняева-Зельдовича



Р.А. Сюняев

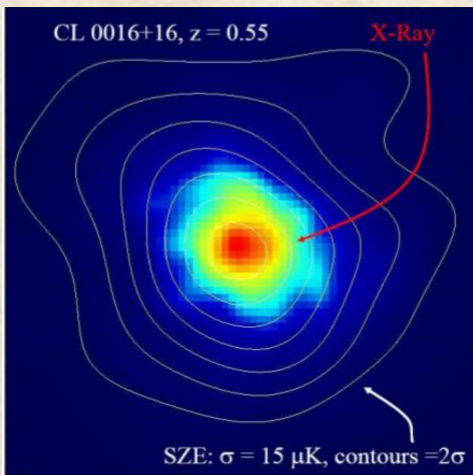


Я.Б. Зельдович (1914-1987)

“Комптонизация” (обратной комптоновское рассеяние) реликтовых фотонов – добавляется энергия от горячих электронов (с учетом релятивистского эффекта Доплера)

В Р-Д области яркостная температура уменьшается

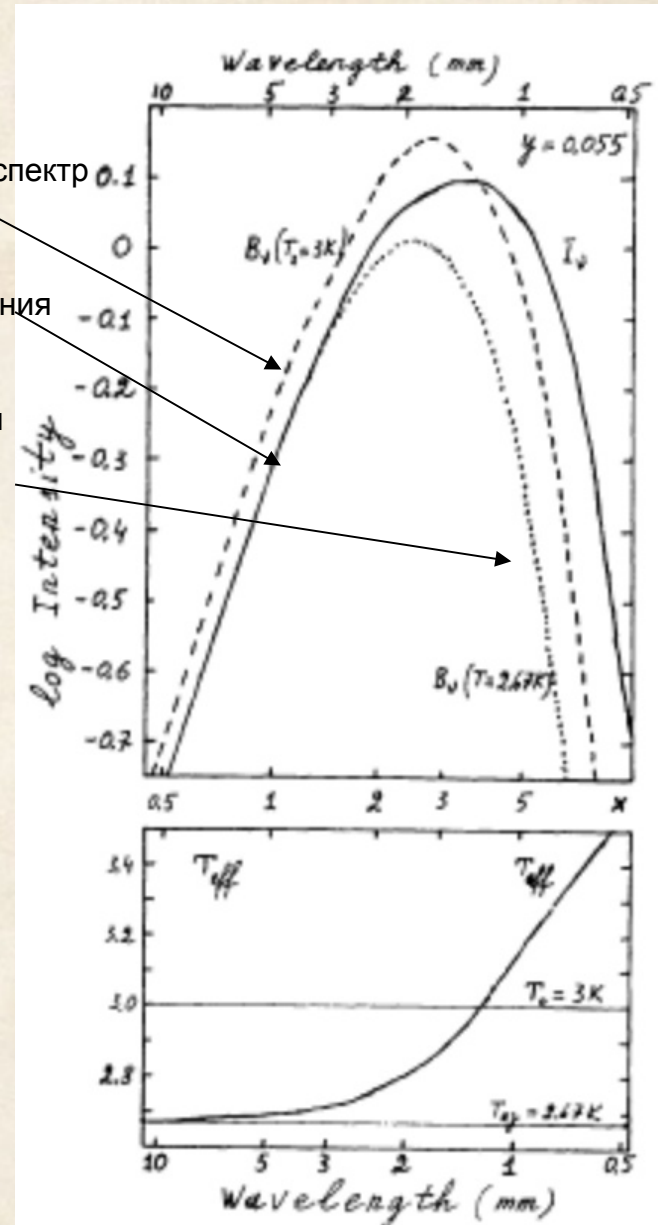
- прямое измерение размеров скоплений
- космологические тесты



Начальный спектр (T=3K)

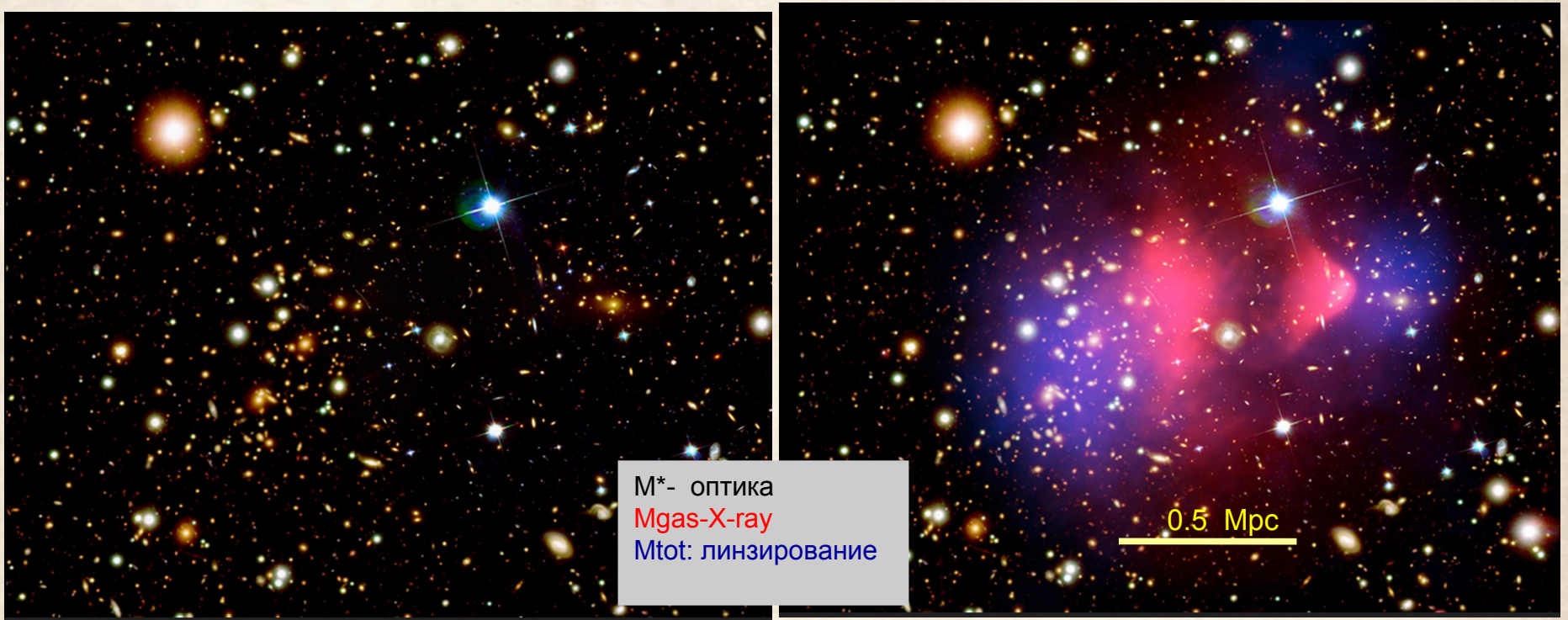
После рассеяния

Аппроксимация в Релей-Джинсовской части (T=2.7K)



Sunyaev & Zeldovich (1980)

Столкновение скоплений: Bullet Cluster (1E 0657-56)



Ударная волна: $T_x \sim 100$ млнК, $V \sim 4500$ км/с

Полная масса – по слабому линзированию $M \simeq 7 \times 10^{13} M_{\odot}$

Markevitch + 2004: сечение взаимодействия темной материи $\sigma/m < 1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Альтернативные теории скрытой массы должны описывать эти распределения.

