

А.В. Моисеев, САО РАН

Методы исследования галактик.

Лекция VII.

Наблюдательные проявления активности галактических ядер. Унифицированная схема. Сверхмассивные чёрные дыры, методы оценки их масс.

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

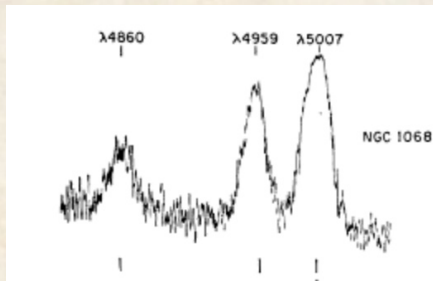
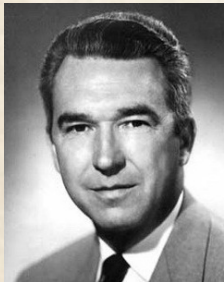
Активное ядро (Active galactic nucleus - AGN)

Ядра, наблюдаемые свойства которых не объясняются в рамках рождения и эволюции нормального звездного населения”

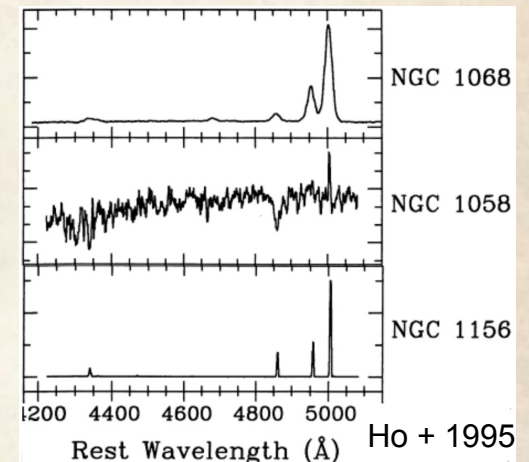
(“... nuclei whose properties cannot be explained in the context of normal star formation and evolution” R. Terlevich)

“Наблюдаемые свойства”: излучение электромагнитное и иное (космические лучи, нейтрино, в перспективе - гравволны), линейные размеры излучающих областей, их температура, плотность и т.д.

Карл Сейферт
1911-1960



Seyfert (1943)



NGC	Max. Width of H Lines (in Km/Sec)	Abs. Mag. of Nucleus	Percentage of Total Light in Nucleus
4051.....	3600	-12.0	12
1068.....	3600	-13.0	6
1275.....	>4500	-15.0	10
4151.....	7500	-14.0	48
3516.....	8500	-14.8	25
7469.....	8500	-15.5	30:

Необычные спектры ядер 6 близких галактик (1.5-м телескоп)

- скорости до 8500 км/с
- линии высокой ионизации (как у планетарных туманностей)
- Вклад ядра в общую светимость растет с шириной линий



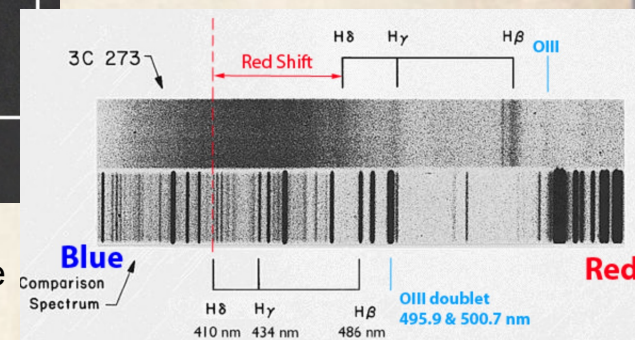
Мартен Шмидт (1929-2022)

1963 - первый квазар (QSO, quasi-stellar)

=> объект ~100 раз ярче в оптике известных галактик



3C 273 (z=0.16)
5-м телескоп (Palomar)



3C – обзор с кембриджским интерферометром, уточнение координат – покрытие Луной на 64 м телескопе Parks

1963 Шаров и Ефремов: переменность блеска 3C273 (12-12.7 mag) на временах несколько дней (фотоархив ГАИШ МГУ)

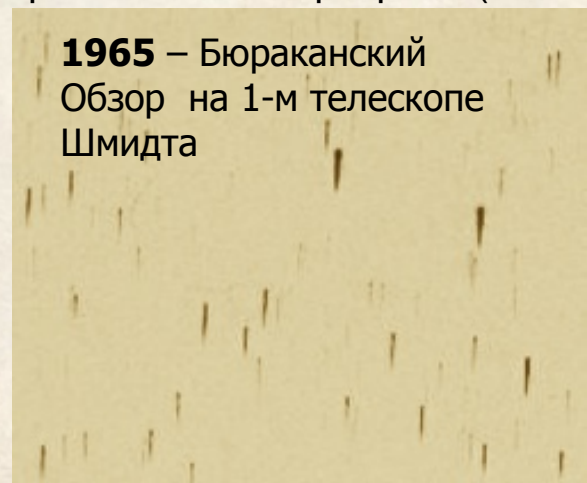
1965 Шкловский : источник энергии галактик Сейферта – тот же, что и в 3C273

1968, Conference on Seyfert Galaxies and Related Objects (University of Arizona): уже обнаружено 11 Sy среди галактик NGC + 3C120, VV150, Zw II... (см. Лекция 1)

А также появились первые спектры галактик Маркаряна (Mrk 1, 3, 6, 9, 10...)



Вениамин Маркарян



1965 – Бюраканский Обзор на 1-м телескопе Шмидта

Первые спектры (2-5 м телескопы, Хачикян, Weedman, Lynds, Arp: **1967-68**

Последующие спектры: Крым (1.5-2.6 м), CAO (6-м)

Галактик Сейферта много: >10% из списков Маркаряна

“Сейферта” и квазары: нет чёткой границы

Светимость сейфертовского ядра слабее
родительской галактики

NLR: FWHM=200-500 км/с, запрещенные линии,
 $n_e \sim 10^3 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$

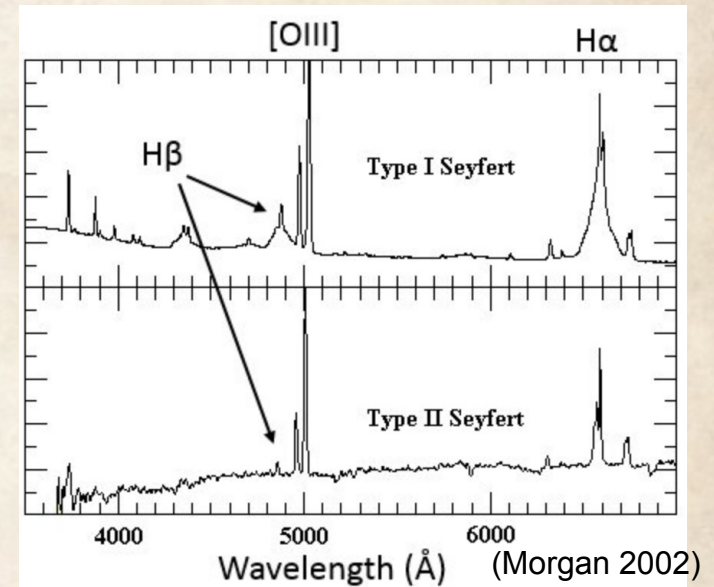
BLR: FWHM~10 000 км/с, бальмеровские линии
 $n_e \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$

Два типа спектров (Khachikian & Weedman 1974):

Sy1 –BLR+NLR

Sy2 – только NLR

Промежуточные типы: Sy1.5, NLSy1



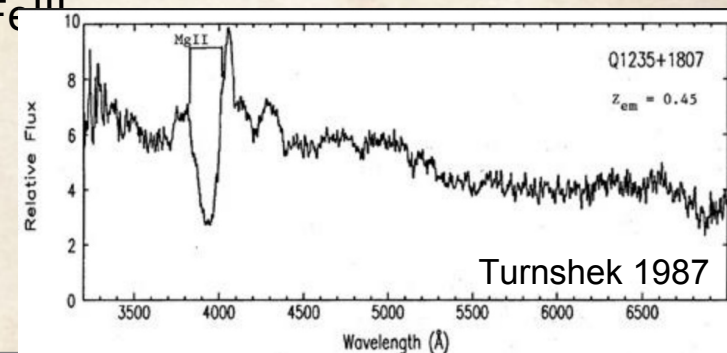
Квазары изначально – точечные мощные радиоисточники, но после оказалось, что это ядра галактик, доминирующие в общей светимости. И только 10% из них радиогромкие

Похожие два типа спектров: QSO 1 & 2

Широкие линии разрешенных ионов: MgII, CIV, SiIV, FeIII

BAL-QSO- наличие широкий абсорбций смещенных
в синюю сторону ($V_{outflow} > 10000 \text{ км/с}$)

Сейчас под QSO понимают просто мощное АЯГ
(в популярной литературе – часто любое АЯГ)

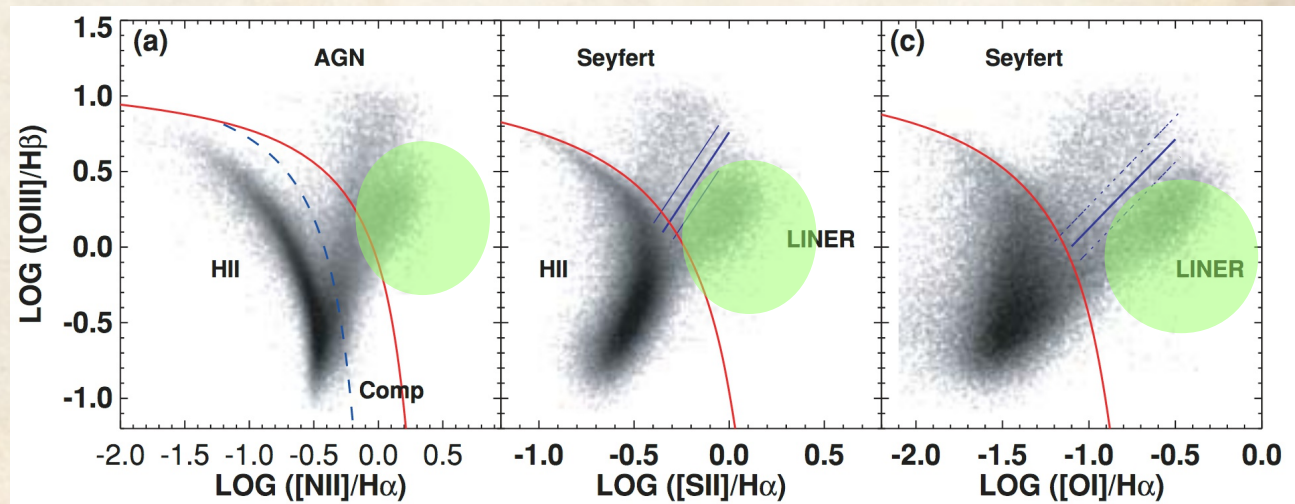
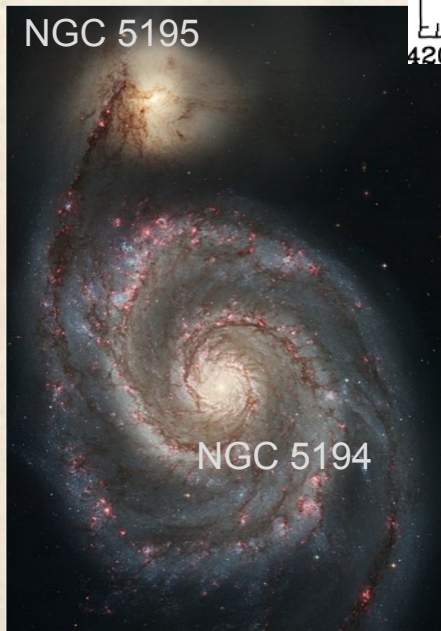
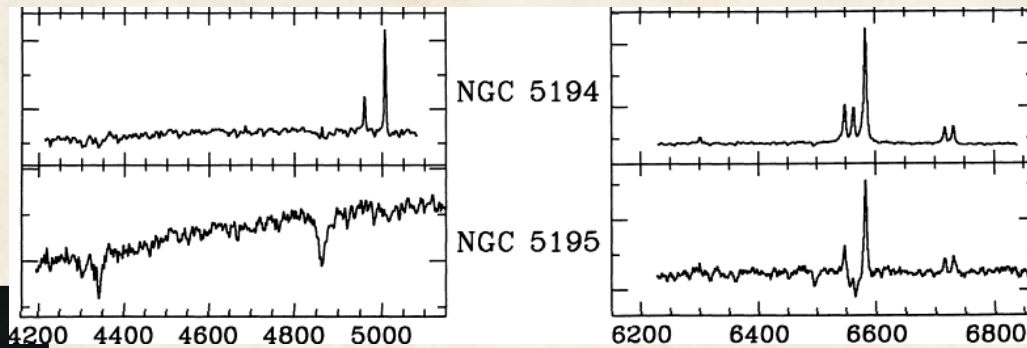


LINER (low-ionization nuclear emission-line region)

В отличие от Sy 2 – усилены линии только ионов низкой ионизации ($[NII]$, $[SII]$), а линии более высокого возбуждения слабы ($[OIII]$, $H\alpha$..)

К LINER относится до 30% близких эллиптических галактик

Как просто с мощным околоядерным звездообразованием (LIRG – Лекция 6), так и случаи слабого АГЯ



Kewley + 2006

(Лекция 3)

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

Радиогалактики (структуры за пределами оптики)

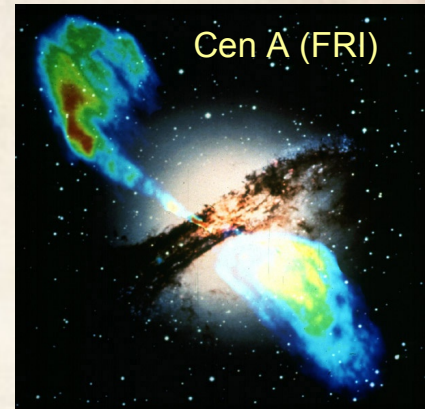
Fanaroff & Riley (1974) : классификация АЯГ, разрешаемых на 1.4 и 5 МГц по распределению яркости вдоль джетов:

FR I – яркость уменьшается с удалением от центра, укрупнение радиоспектра (старение частиц), меньше светимость.

FR II – увеличение яркости в “ушах” (lobes)+ “горячие пятна”

Центральные галактики скоплений (сD)

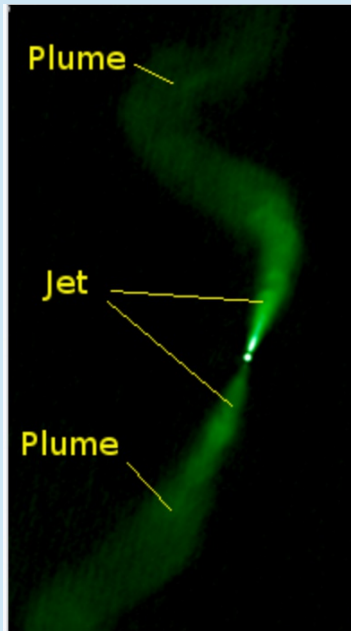
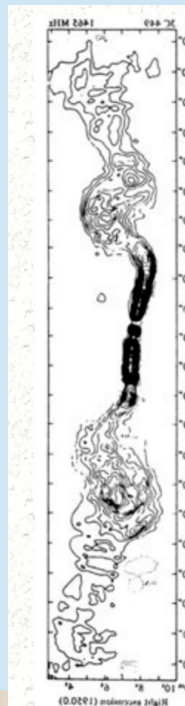
Зависимость от окружения + свойства центрального источника



3C449

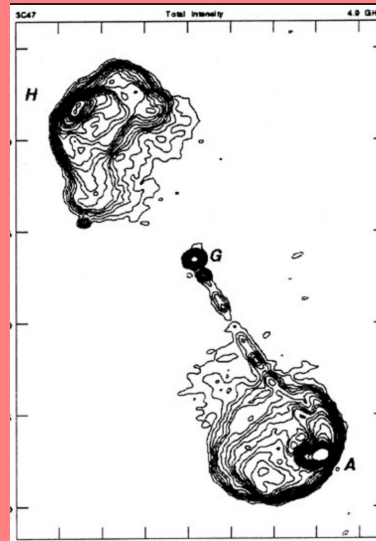
3C 31

FR I

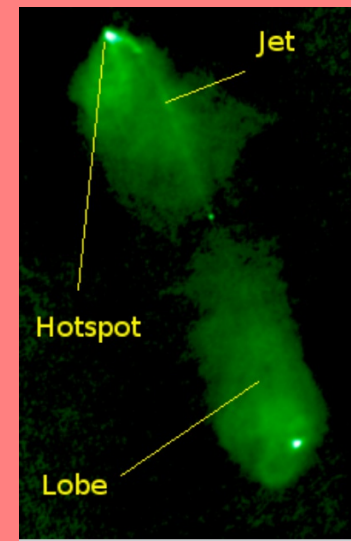


FR II

3C 47



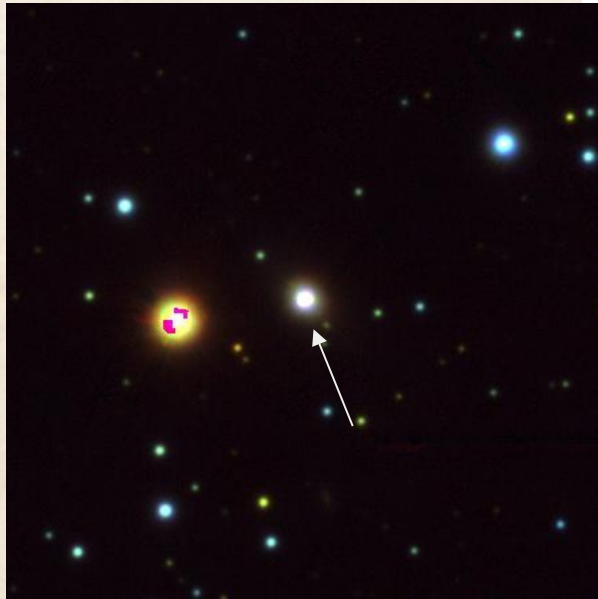
3C98



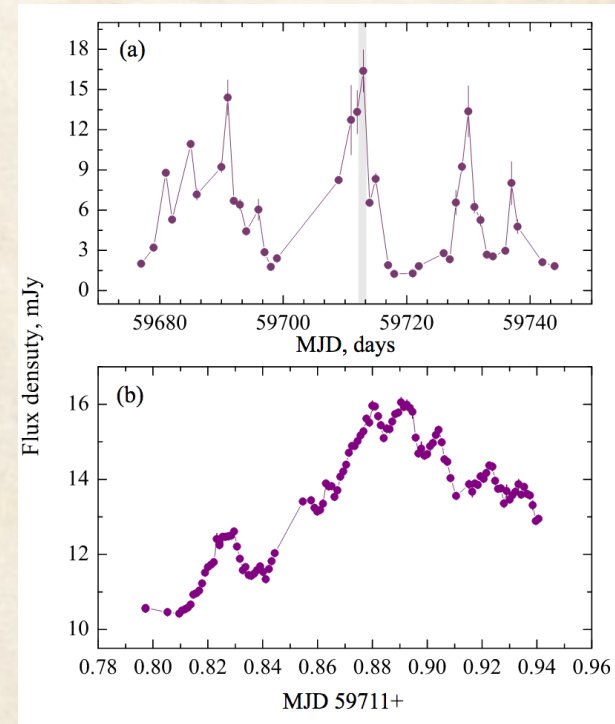
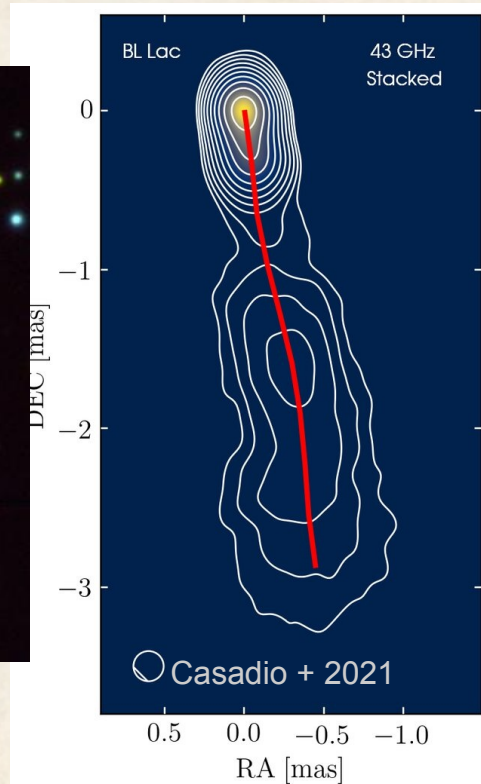
FR II достигают в размере 4-5 Мпк

Блазары (Лацертиды – BL Lac)

- Звездообразный источник, в оптическом спектре – нет специфических линий, только от подстилающей галактики, которую сложно различить
- Сильная переменность от гамма до радио, $t < 1$ дня
- Поляризация оптического и радиоизлучения (5-10%)
- Односторонний радиоджет (релятивистское усиление) с переменной во времени структурой)

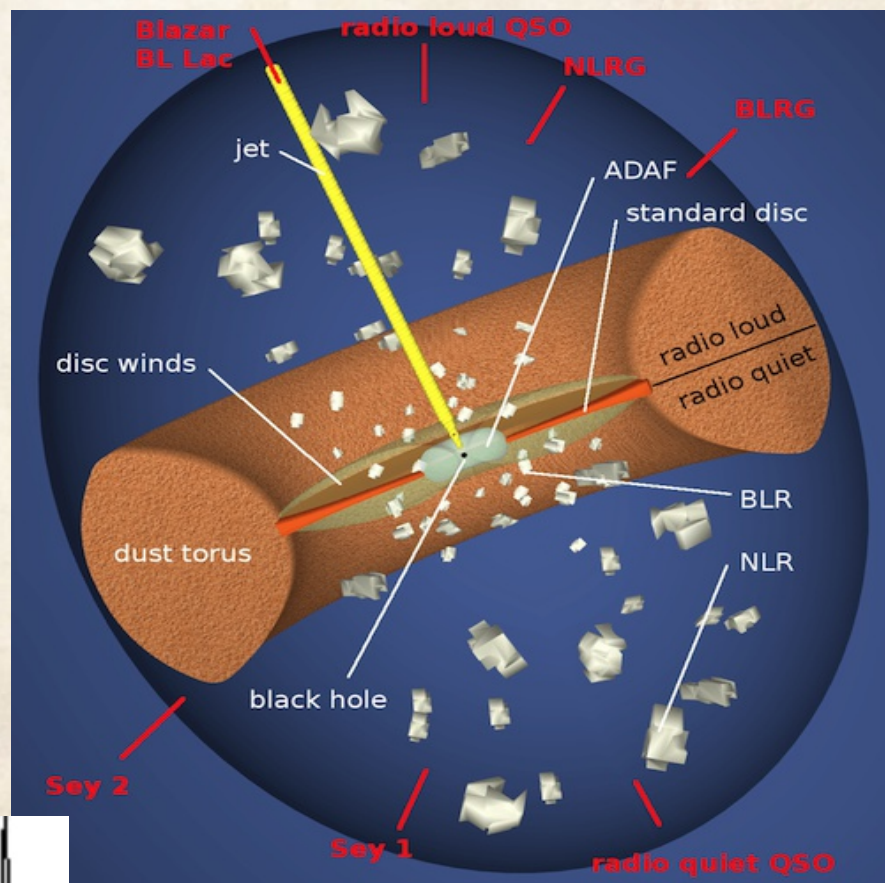


PanSTARRS-1



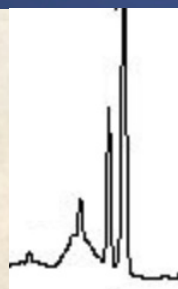
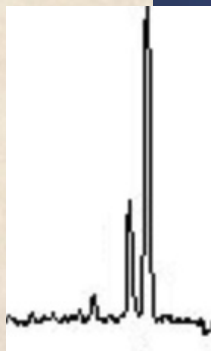
(S4 0954+658, Власюк + 2023)

Унифицированная схема (Unified model)



Все определяется углом зрения и типом аккреции:

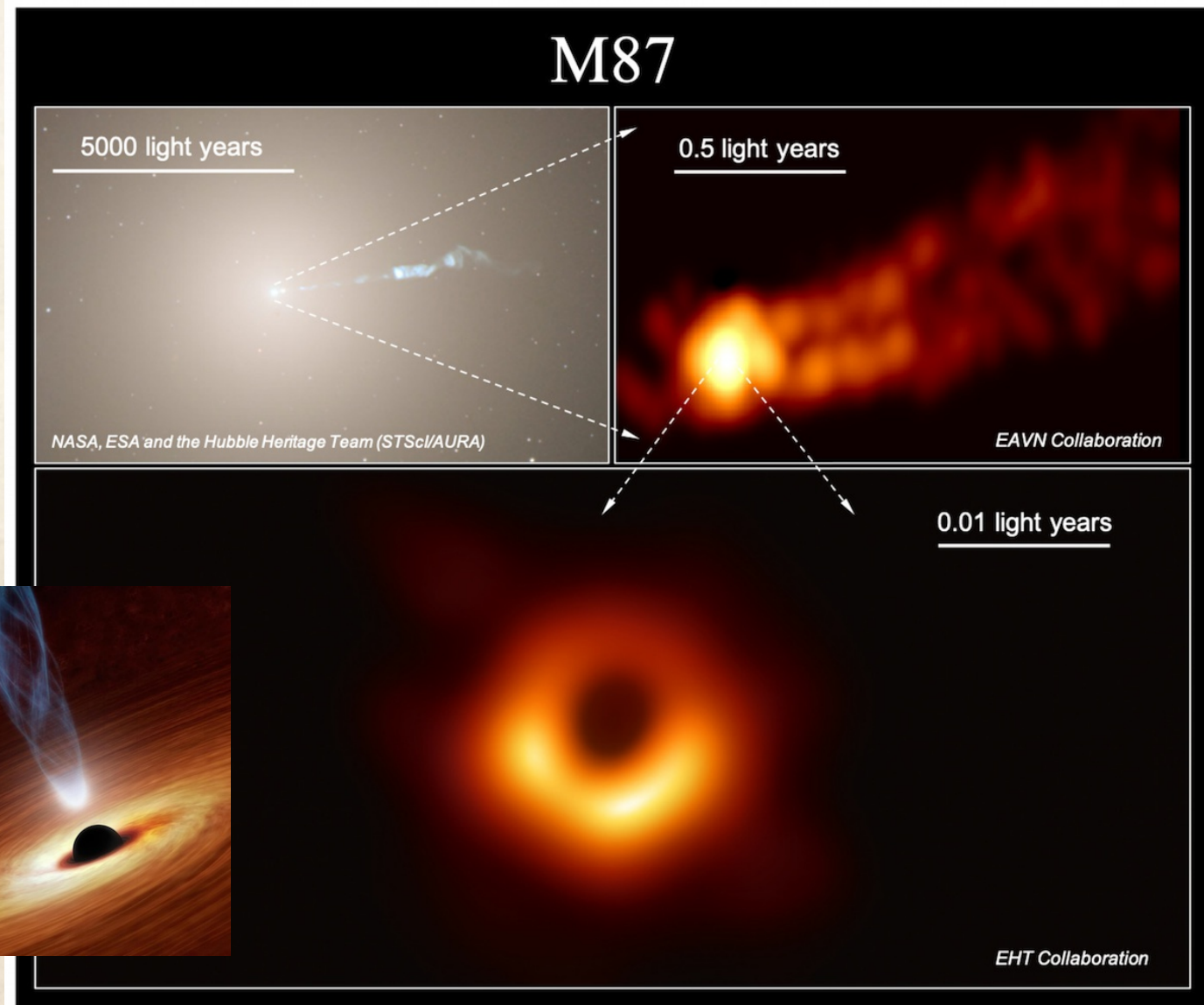
- Высокоэффективная ($\sim 10\%$) с горячим плотным диском, основная энергия уходит в излучение
- Низкоэффективная ($\sim 1\%$) адвекционная (ADAF, advection dominated accretion flow) - “распухший диск”, формирование мощного радиоджета



Размер континуального источника – световые дни

Antonucci (1993)

Прямые наблюдения ЧД с телескопом горизонта событий (ЕНТ): Дева А и Млечный Путь (Sgr A*)



Унифицированная схема: пылевые торы

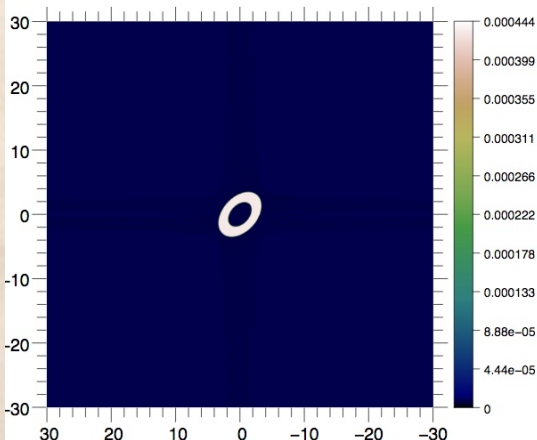
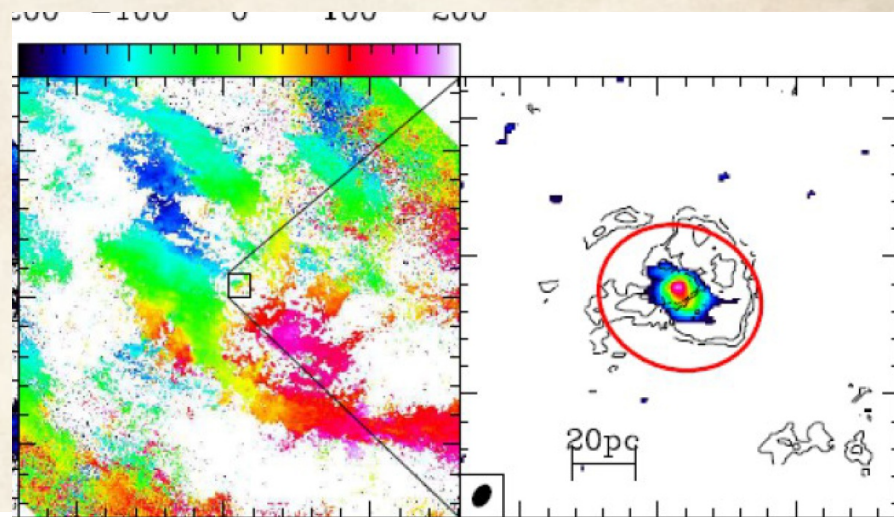
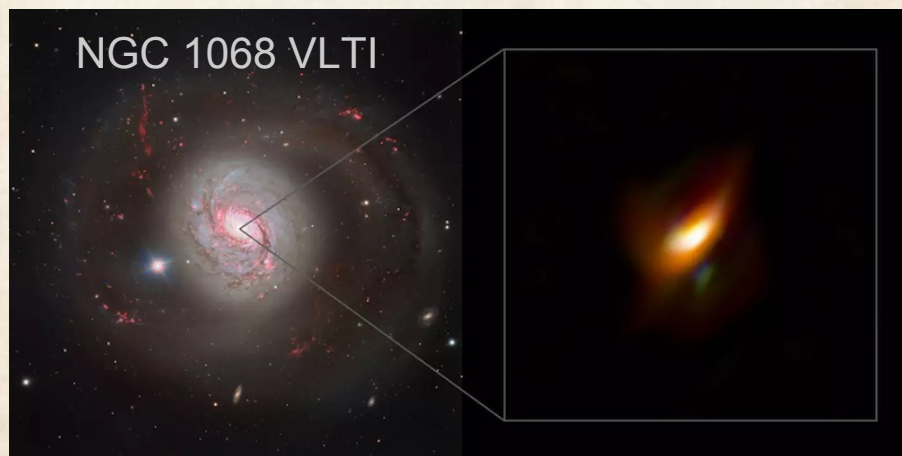
Интерферометр VLTI ($\lambda \sim 8-13 \mu\text{m}$)

$T \sim 400\text{K}$

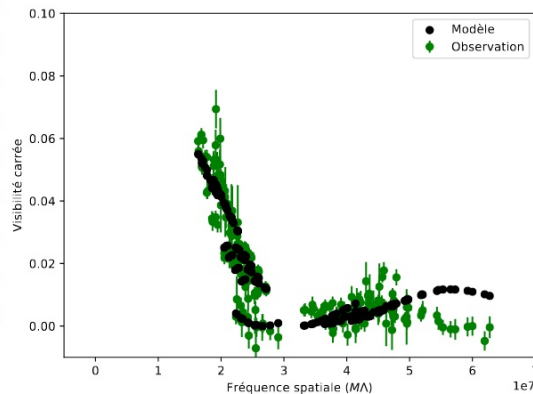
$d = 0.5-10 \text{ пк}$

Моделирование распределения яркости

Внешние части торов – молекулярный газ
ALMA (Combes +2018,2020)

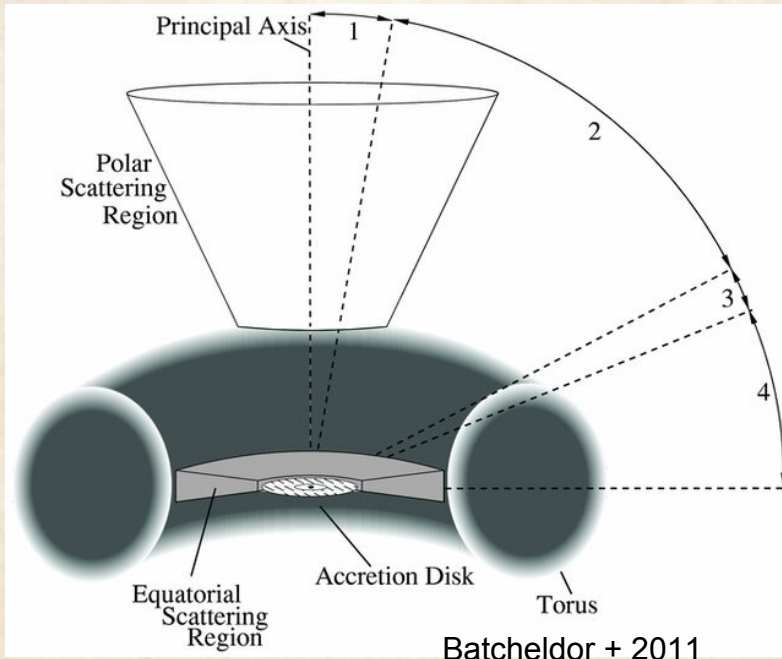


Vermot + 2021



Выделяются и морфологией и кинематикой
Радиус 6-27 пк
Масса $0.7-4 \cdot 10^7 \text{ Mo}$

Унифицированная схема: поляризация над диском



Рассеяние на свободных электронах над “центральной машиной” приводит к тому, что в спектре Sy2 присутствует поляризованный свет от BLR, уровень поляризации – до нескольких %

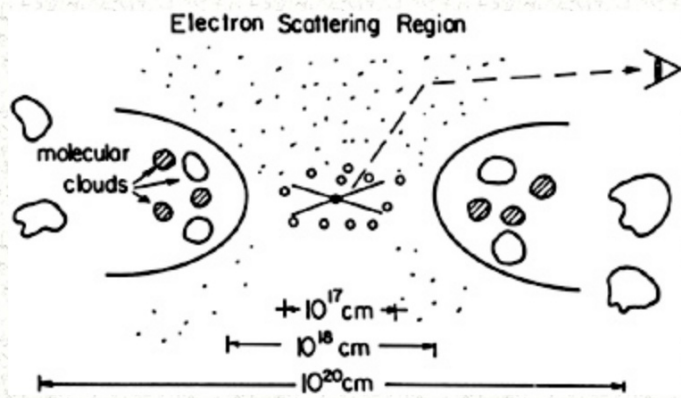
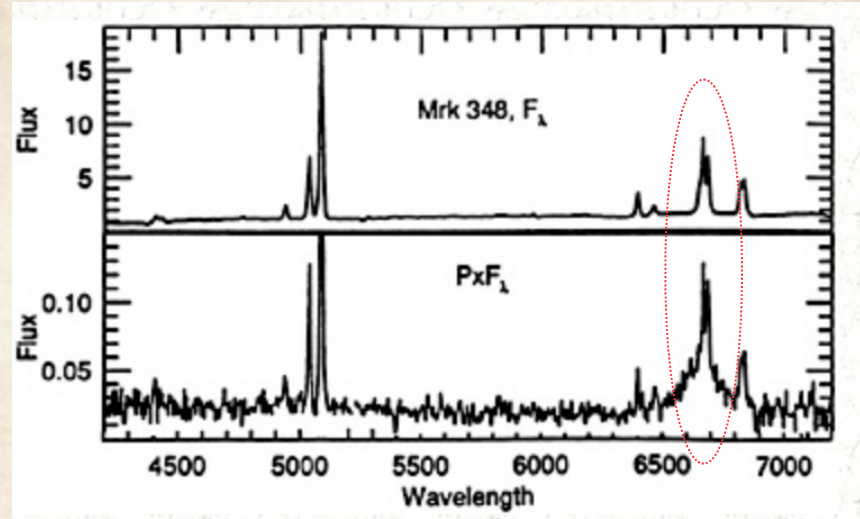
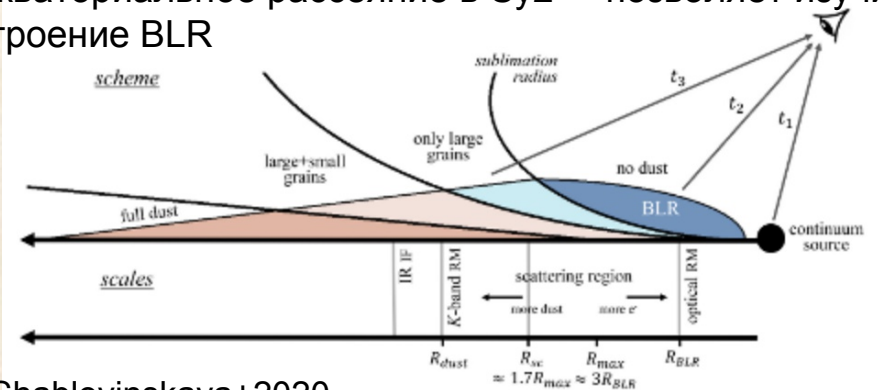


Figure 37. A unified model for Seyfert galaxies. The central source and the BLR are surrounded by a thick torus of molecular gas. The
Netzter 1990

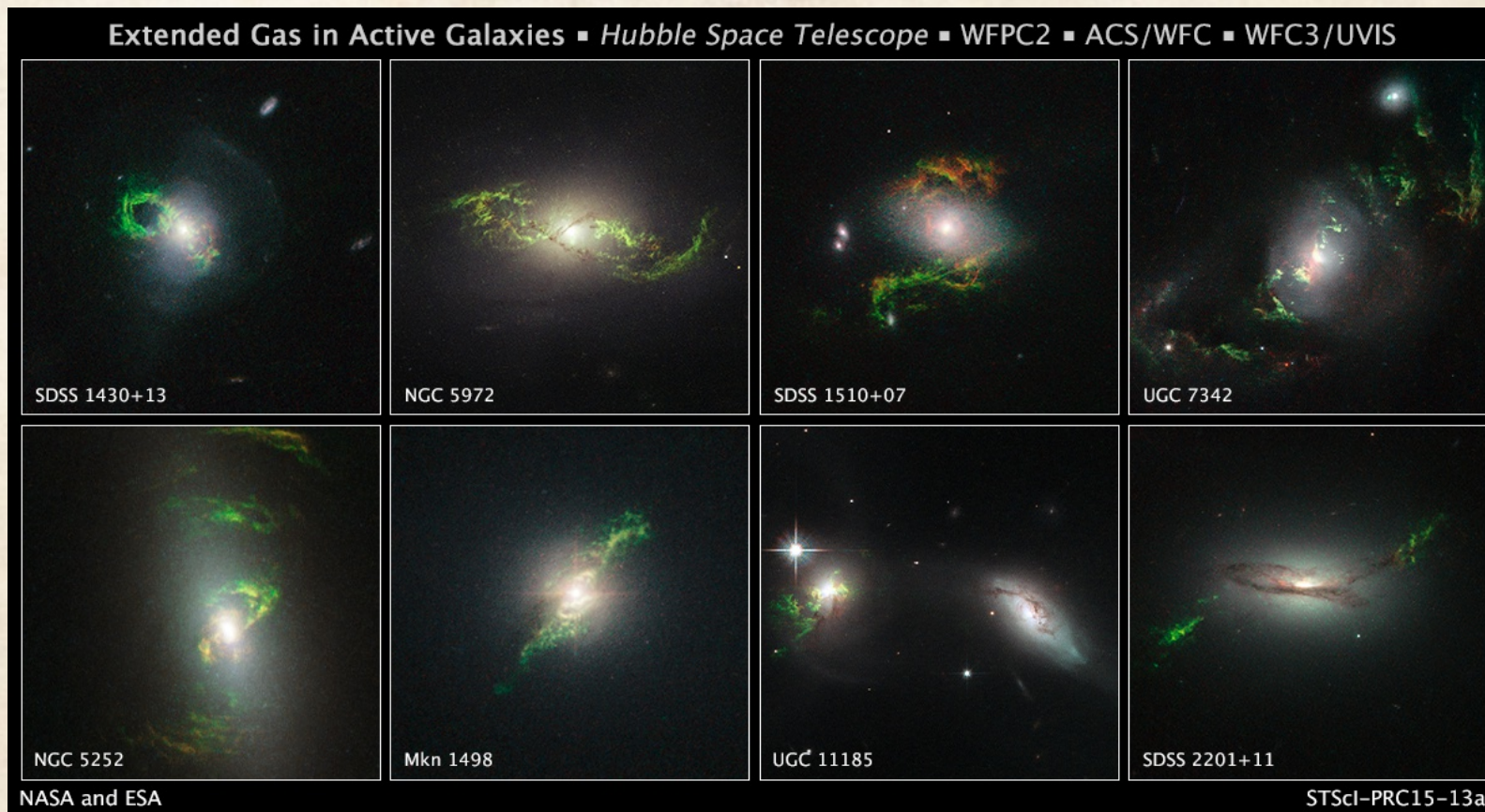
Экваториальное рассеяние в Sy2 – позволяет изучить строение BLR



Shablovinskaya+2020

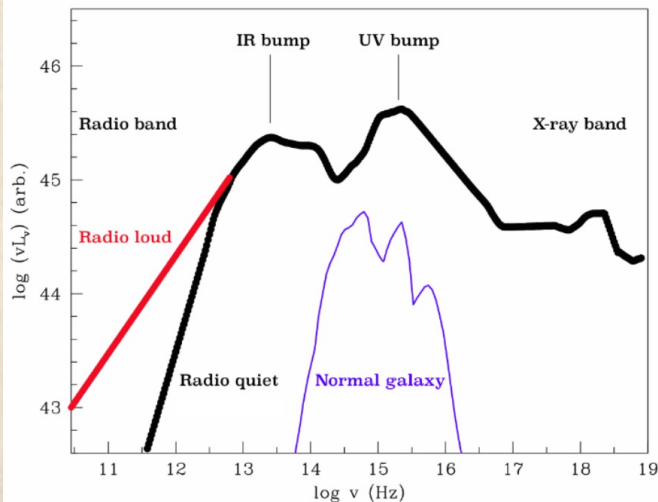
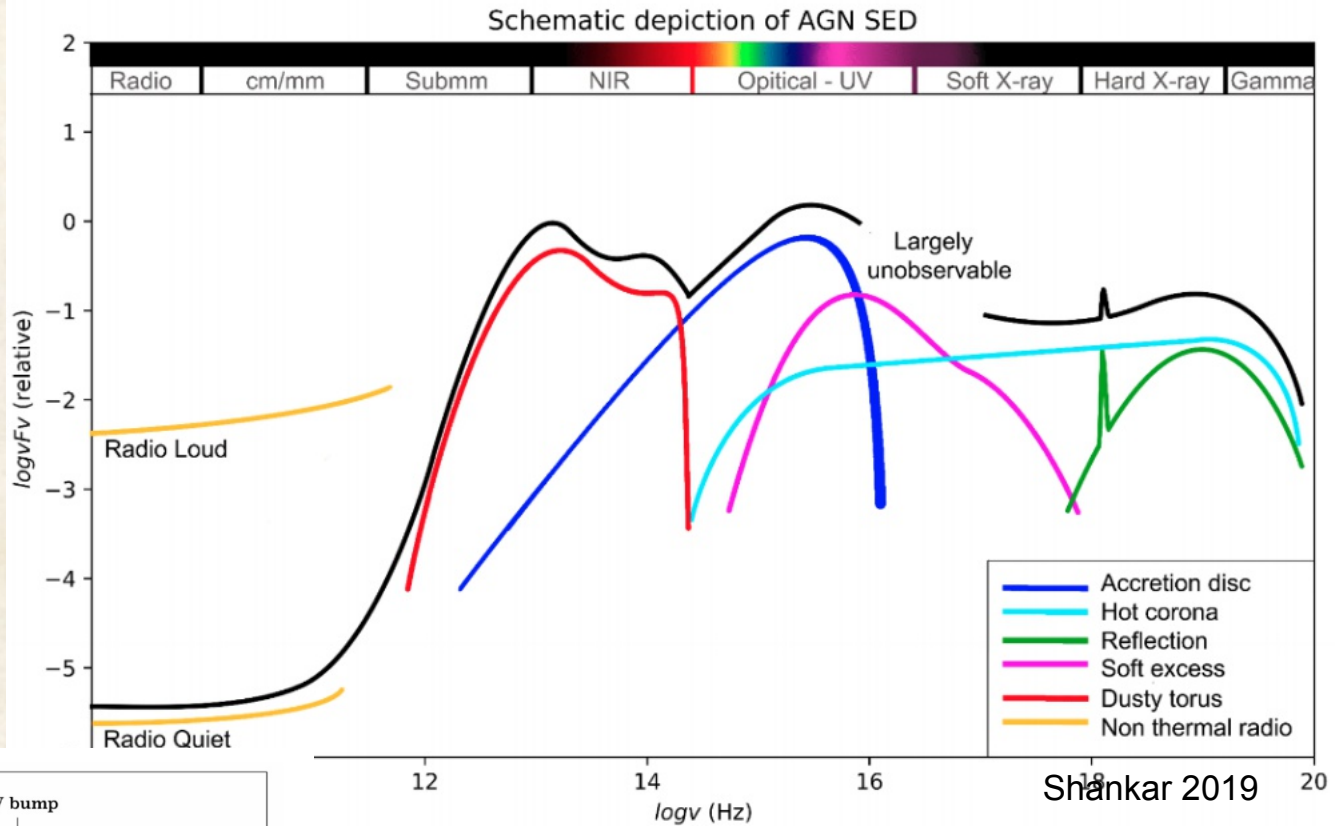
Унифицированная схема: конусы ионизации

Протяженные NLR (от 10 пк до десятков кпк) часто имеют симметричную биконическую форму (при условии, что на пути конуса есть газ)



Характерная ширина раствора конуса $\sim 70^\circ$ (Keel + 2019)

Распределение энергии (SED)



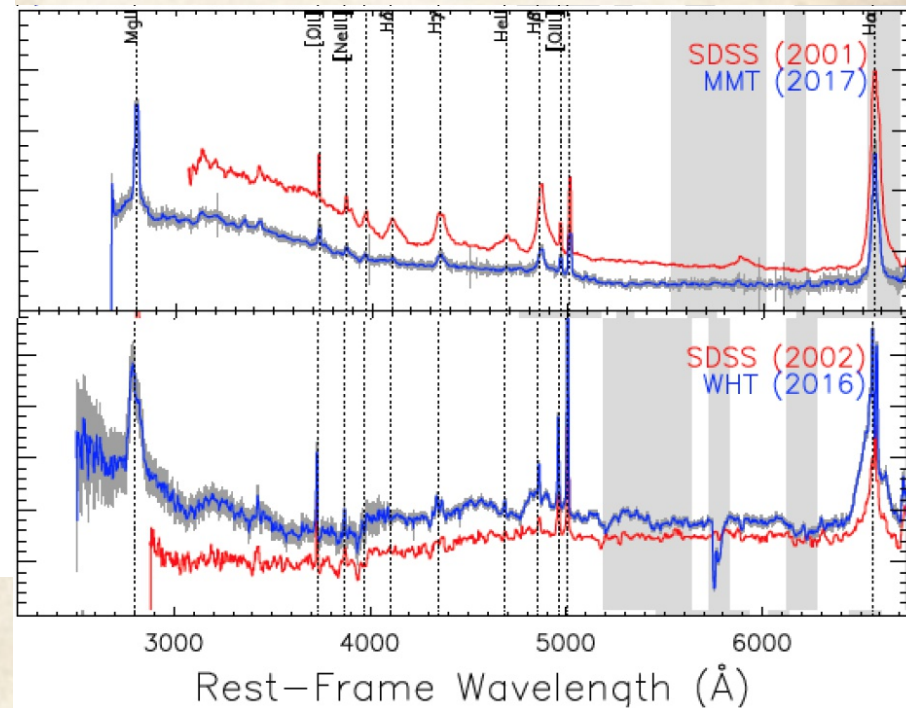
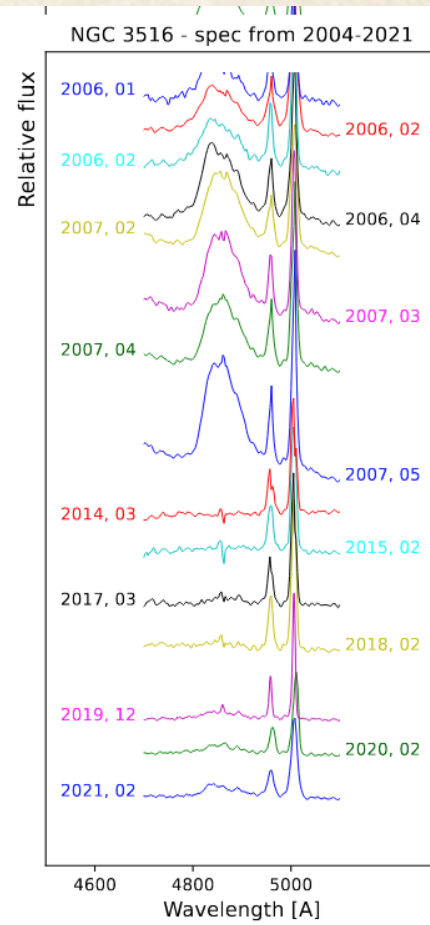
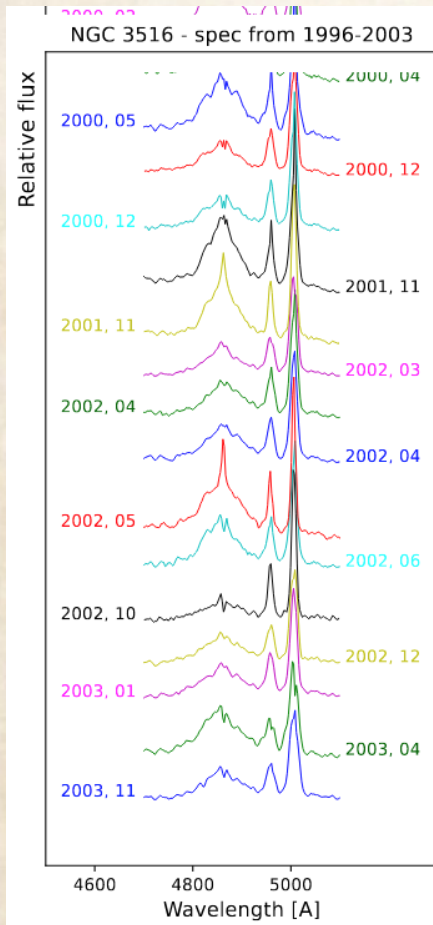
Отличие от нормальных галактик:

- излучение аккреционного диска (UV-bump)
- горячая корона вокруг “центральной машины”
- избыток ИК от горячей пыли тора
- синхротронное излучение релятивистских частиц в джете

Излучение: переменность линий BLR и континуума

Смена темпа аккреции, отражающаяся на ионизации газа в BLR, изменение поглощение по лучу зрения ("пыльный ветер") и т.д.

Видоизменение активного ядра (Changing-look AGN) – полное исчезновение широких компонент



Popovic + 2023

MacLeod+2018

Синхротронное радиоизлучение АЯГ

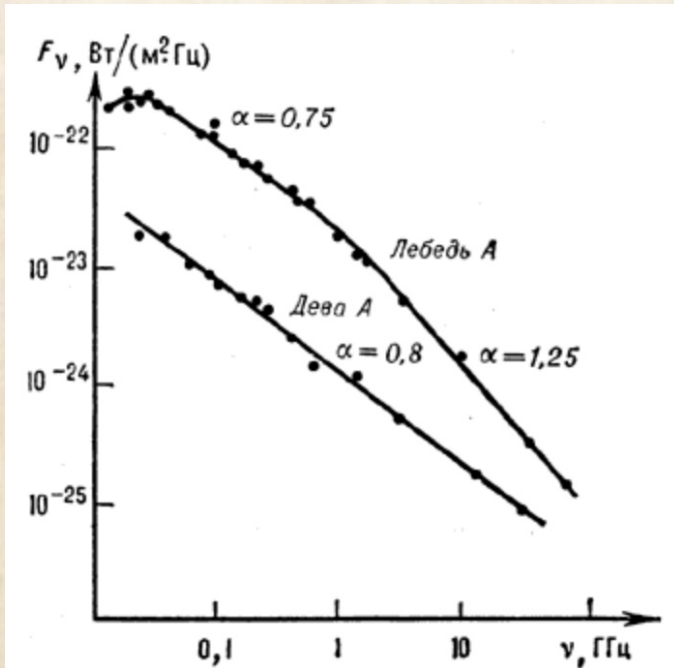
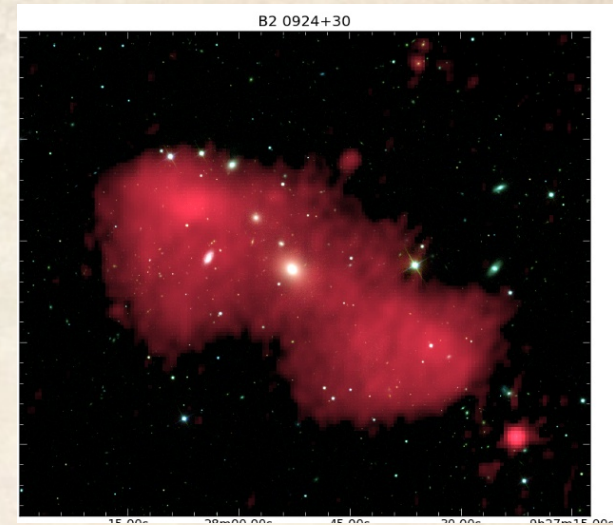
$$R = f(4400A) / f(5 \text{ ГГц}, 6 \text{ см})$$

$R > 10$: радио-громкие, $d > 10$ кпк

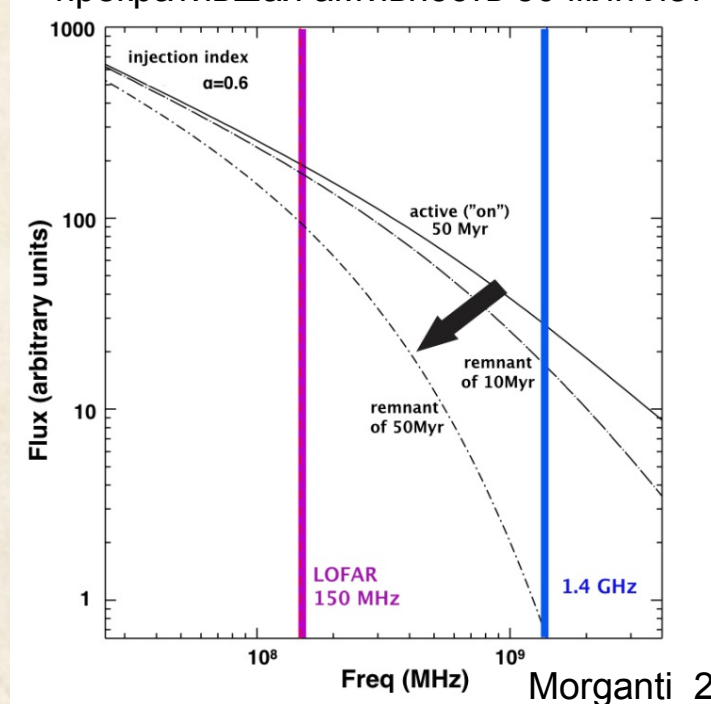
$R < 10$: радио-тихие, $d < 10$ кпк

(Kellermann + 1989, 2016)

$F_\nu \sim \nu^{-\alpha}$, α -спектральный индекс



“Старение” спектра – рост α . Радиогалактика, прекратившая активность 50 млн лет назад



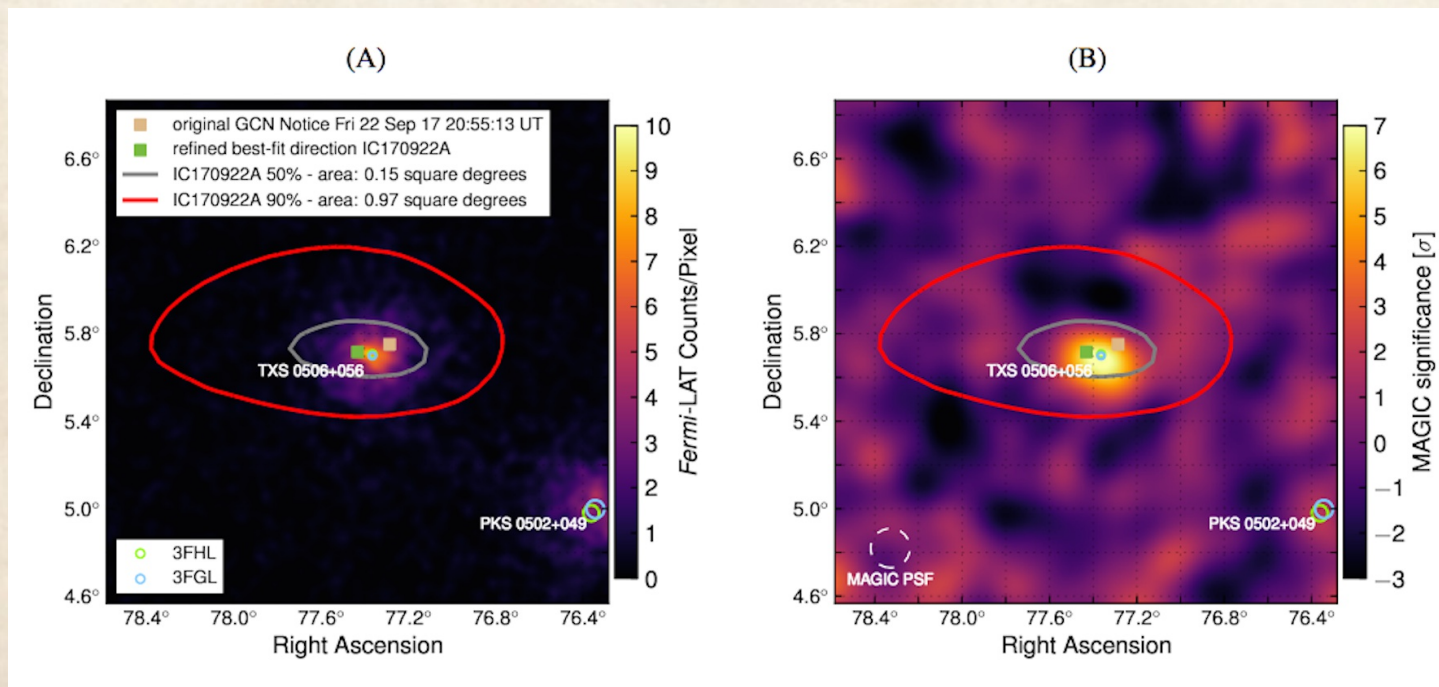
Morganti 2017

Рентгеновское и гамма излучение, космические лучи и нейтрино

Светимость от $L_x=10^{42}$ эрг/с (Sy) до 10^{47} эрг/с (QSO)

- Обратное комптоновское рассеяние излучение от горячего аккреционного диска (Т до 10^9 К) на релятивистских частицах в джете
- Горячий ветер и “корона” вокруг центральной машины

TXS 0506 + 056 – первый блазар-источник нейтрино (The IceCube+2018, 996 авторов)
Взаимодействие джета с веществом – > поток пионов -> распад на фотон и нейтрино?



Проблема “кормления” (перенос углового момента)

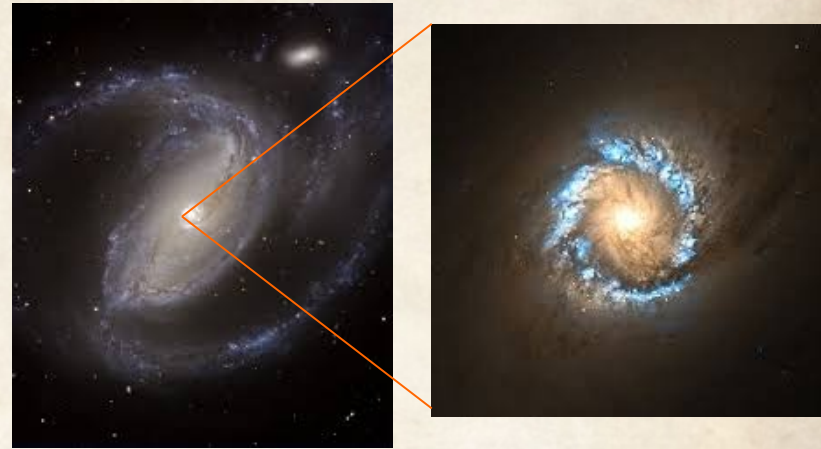
Необходимая потеря углового момента для
газа в диске: ~ 10000 раз (Combes, 2001
Fueling the AGN)

Требуемые массы $\sim 1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$



Почти те же механизмы, что и для усиления ЗО
(лекция 6), возмущающие гравпотенциал:
Взаимодействия, слияния
Бары, внутренние спирали

Но корреляции не очень четкие, так как время
активной фазы (< 1 млн. лет) сильно короче
характерных динамических времен этих
процессов (0.1-1 млрд. лет)

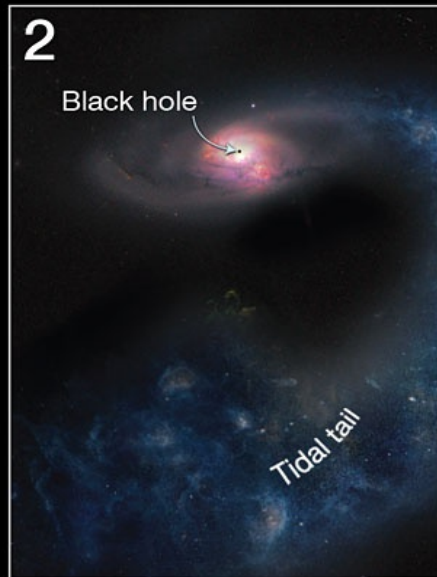


Объект Ханни – возможность оценить это время

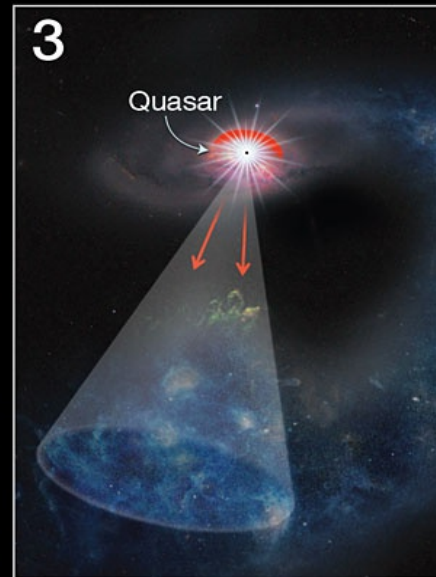
Hanny's Voorwerp: a space oddity



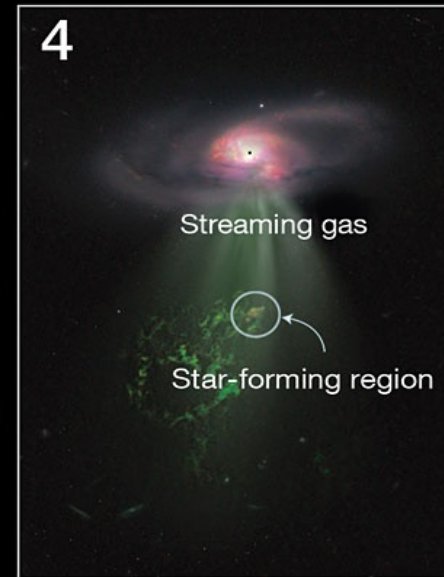
1
Spiral galaxy IC 2497 gravitationally interacts with a bypassing galaxy



2
A large tidal tail of gas is pulled out of the spiral galaxy



3
Engorged with gas, a black hole at the centre of IC 2497 "turns on" as a quasar and emits a powerful cone of light, which ionises a portion of the tidal tail, creating Hanny's Voorwerp

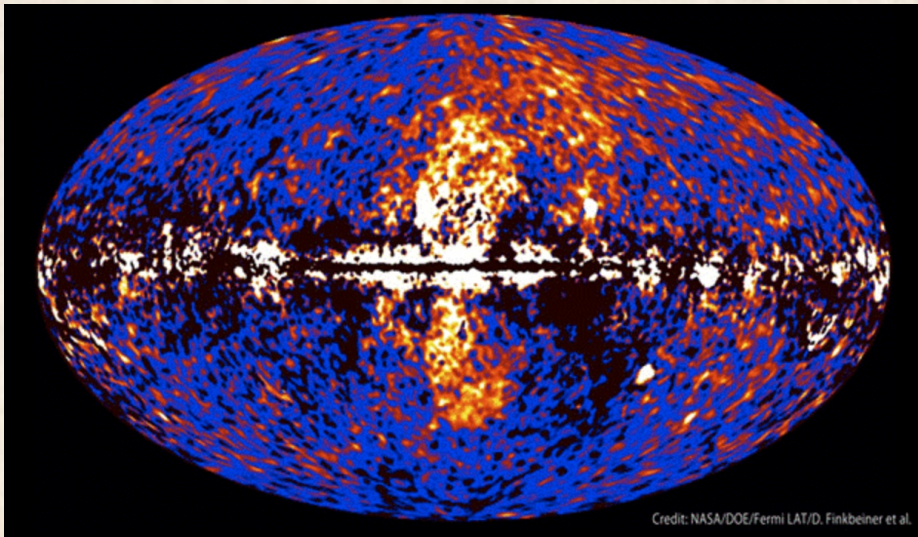


4
Gas streaming out from the galaxy centre impacts the tidal tail and triggers star formation

Резкое уменьшение ионизирующей радиации: ~ 100 раз / $1-2 \times 10^5$ лет

-
- (Lintott + 09, Keel +12)

Moiseev & Smirnova (2023 Galaxies)



“Пузыри Ферми” $D \sim 8$ крс

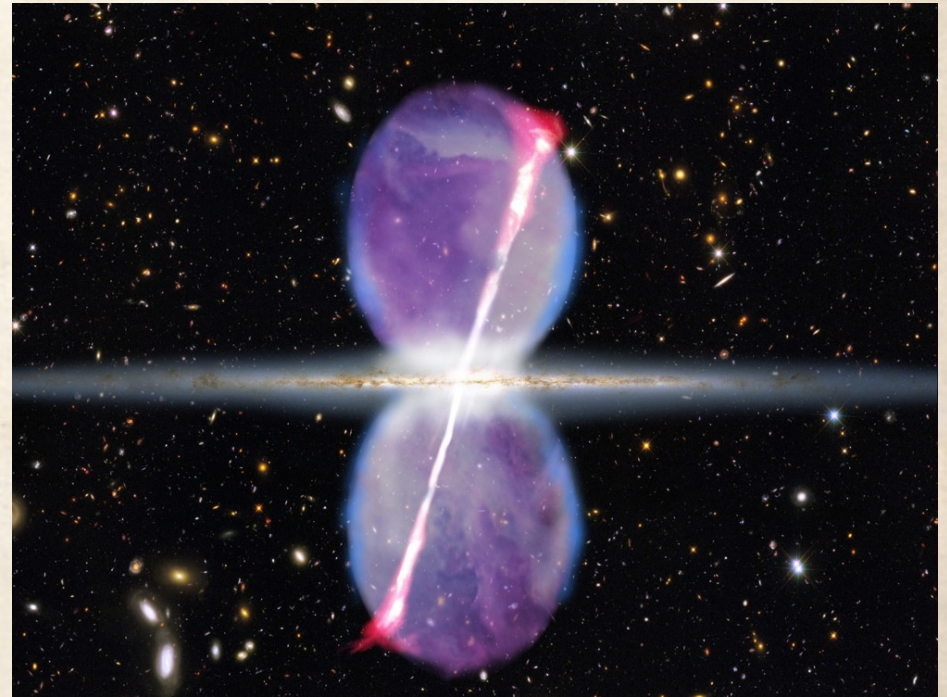
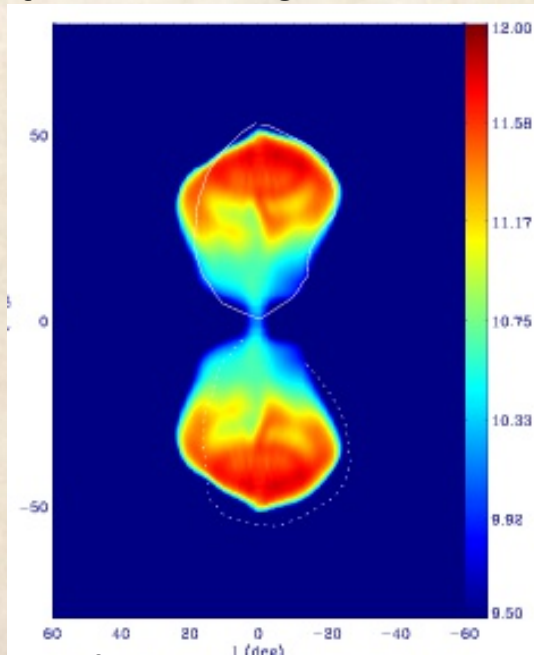
ROSAT – 1997

WMAP – 2004

Fermi - 2010

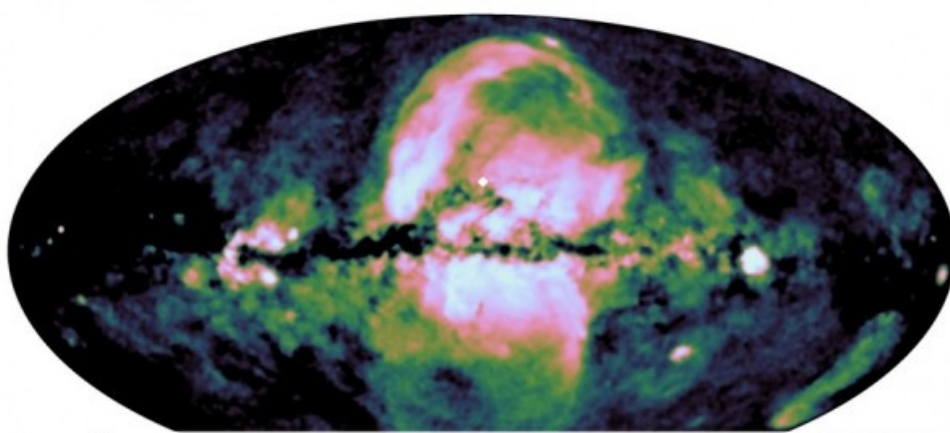
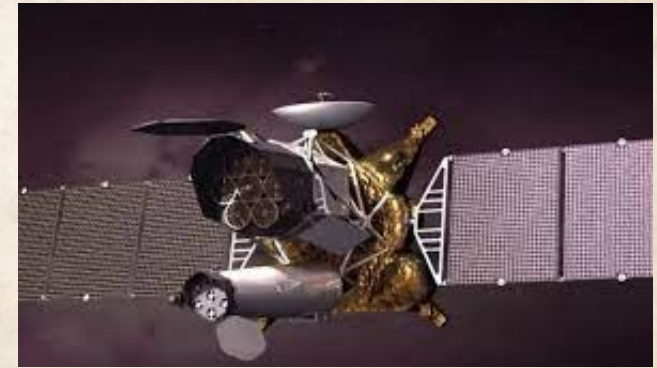
$E \sim 10^{55}$ ergs (эквивалент 10 000 сверхновых)

Нужна активность ядра
 $t \sim 1-2$ млн.лет

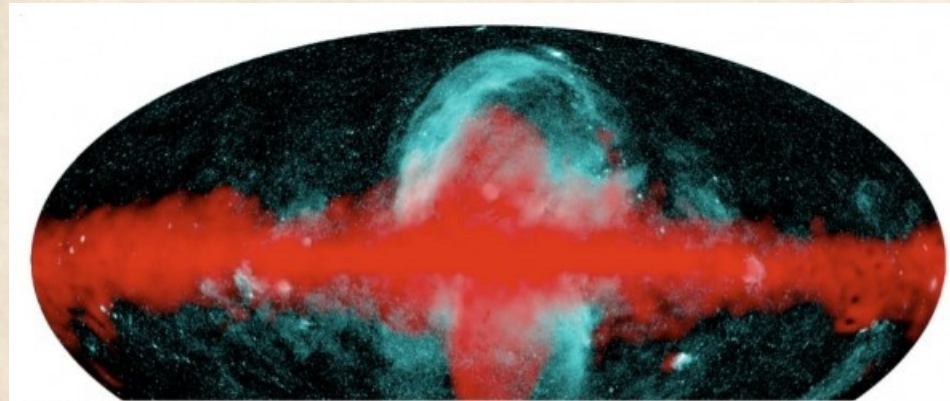


Barkov & Bosch-Ramon (2013); Yang + 2018

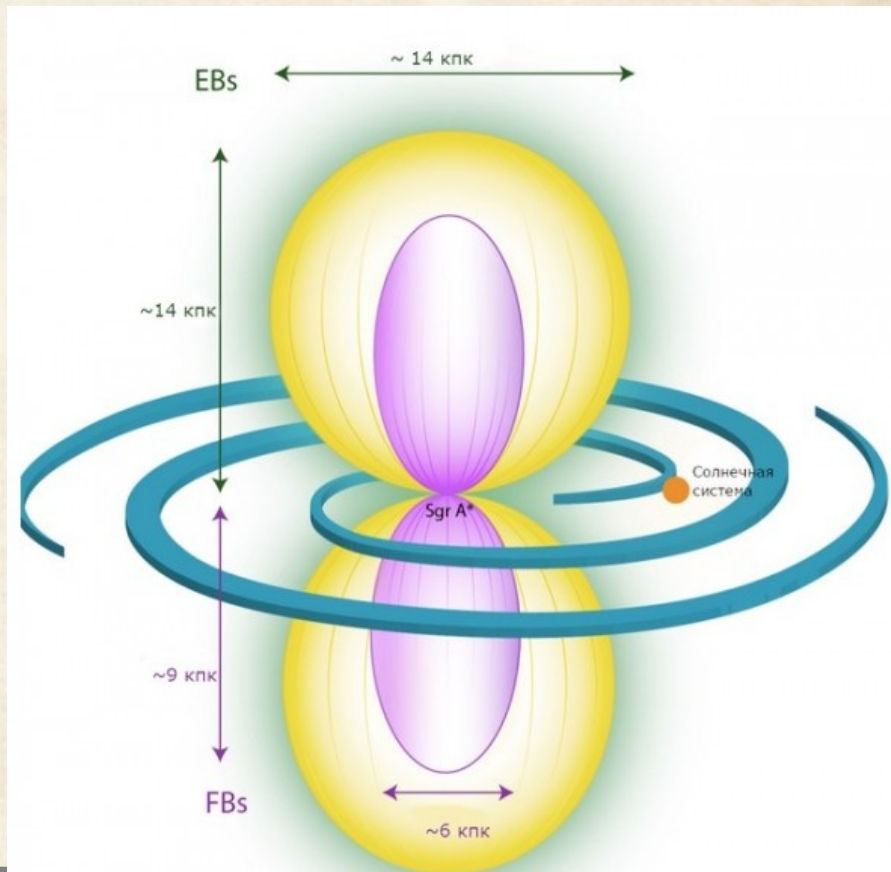
А теперь – и СРГ/еРОЗИТА



Карта диффузного рентгеновского излучения в диапазоне 0.6–1.0 кэВ, полученная телескопом СРГ/еРОЗИТА. Вклад точечных источников был удален. Изображение из статьи P. Predehl, R.A. Sunyaev, et al

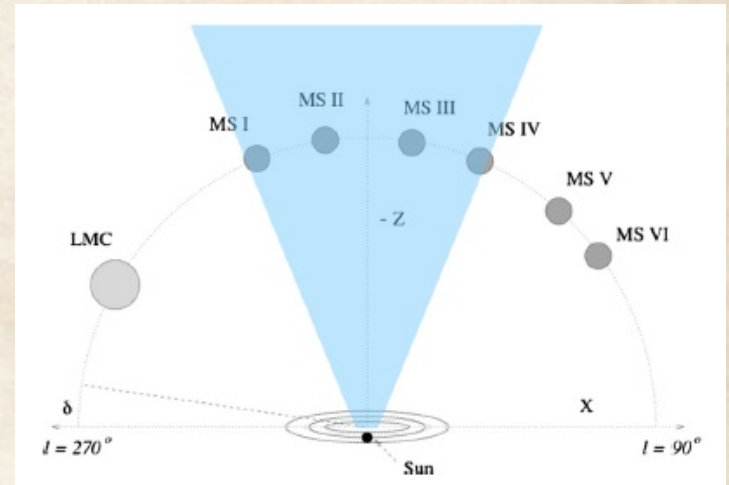
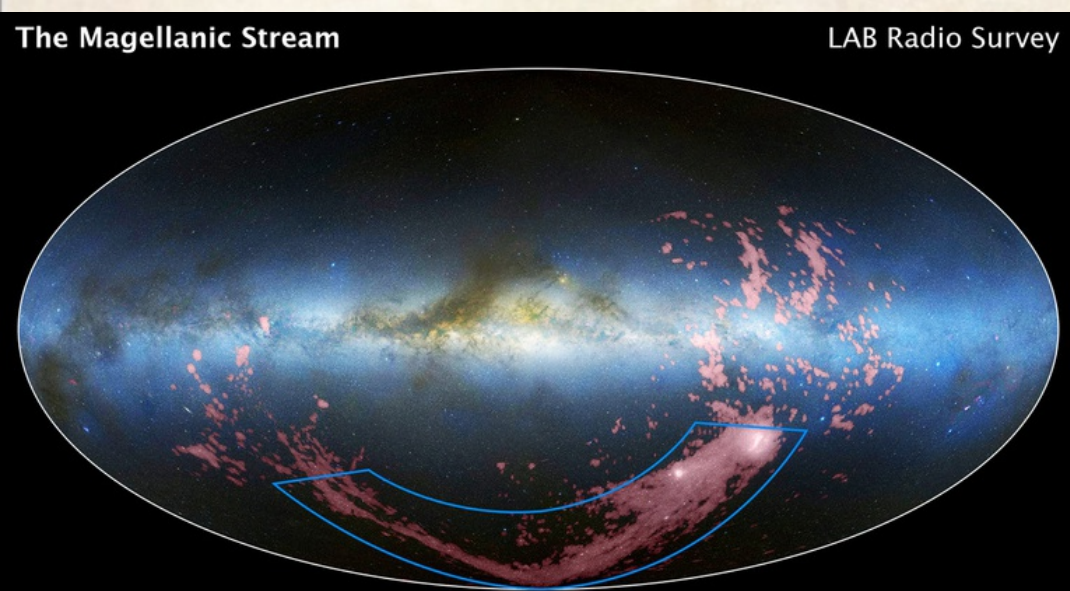


Наложение карт нашей Галактики, полученных телескопами СРГ/еРОЗИТА и «Ферми» (NASA). Диффузное рентгеновское излучение, регистрируемое телескопом СРГ/еРОЗИТА (0.6–1 кэВ, обозначено оттенками голубого), окружает область более жесткого излучения (гигаэлектрон-вольты, обозначено красным), получившей название «пузыри Ферми». Изображение из статьи P. Predehl, R.A. Sunyaev, et al.

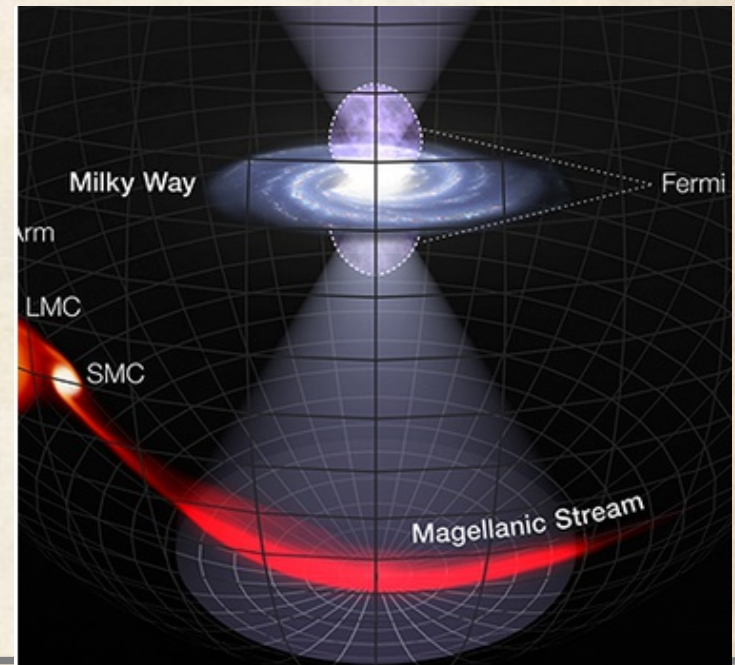
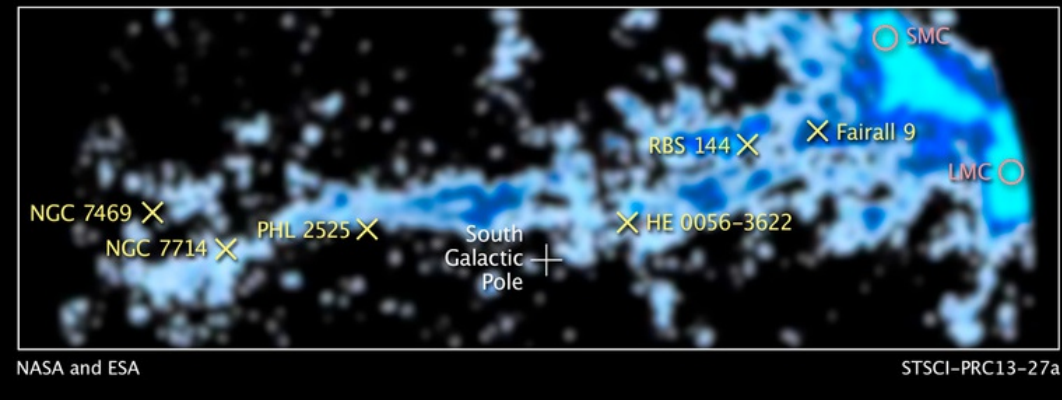


Predehl et al. 2020,

Магелланов поток



Bland-Hawthorn+ 2013:
 $T \sim 3.5$ млн лет.



Fox + 2020

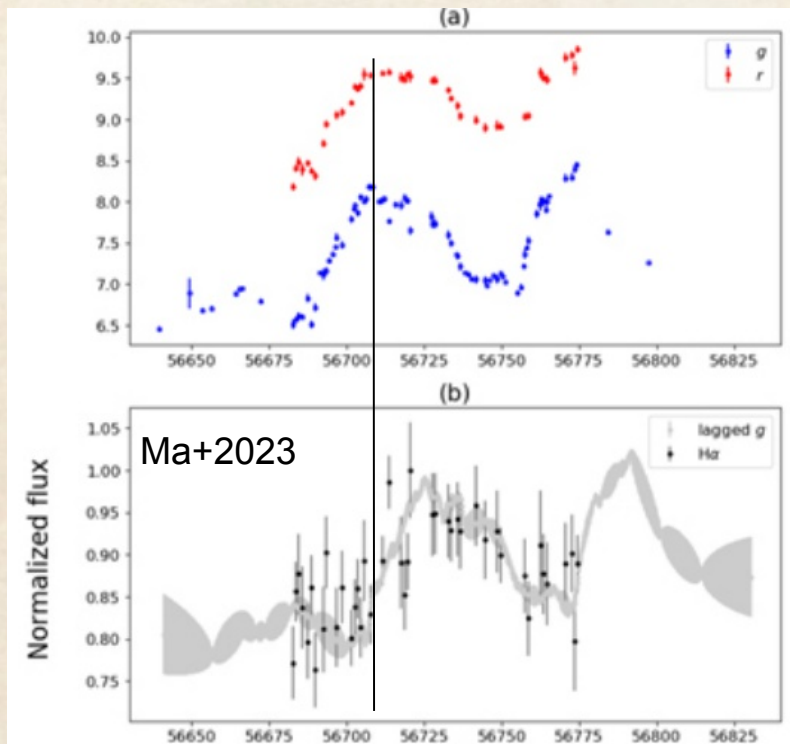
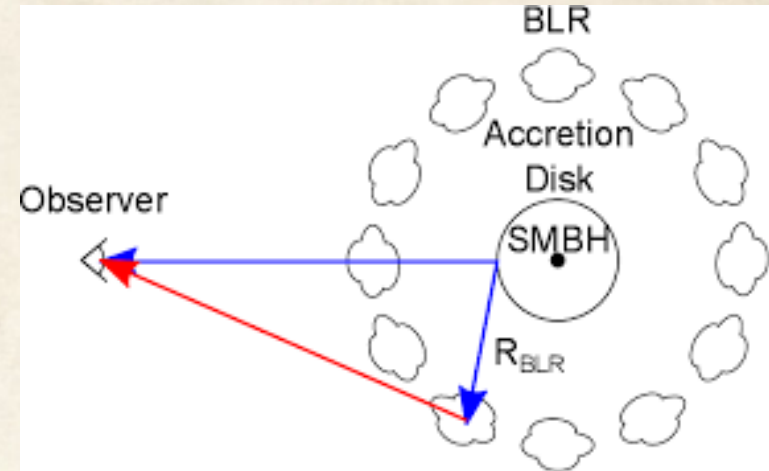
Масса СМЧД: эхокартирование

1967: Дибай, Проник - переменность бальмеровских линий относительно [OIII]

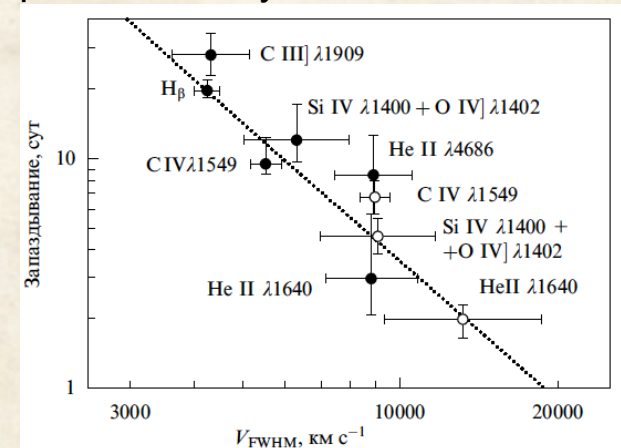
1971-73: Лютый, Черпащук – запаздывание переменности в линии относительно континуума NGC 1068, 3516, 4151

$$M_{\text{BH}} = f \frac{R_{\text{BLR}} \cdot \sigma_v^2}{G}$$

$\sigma \sim \text{WFHM} (\text{H}\beta)$
 $R = c\Delta t$
 $f \sim 1$



Возможность “картировать” по линиям разного возбуждения



Черпащук (УФН, 2003, 2014, 2016)

Метод Дибая (спектр одной эпохи)

$$M_{\text{BH}} = f \frac{R_{\text{BLR}} \cdot \sigma_v^2}{G}$$

Дибай (1977):

По сути, то же соотношение, но R оценивалось из объема излучающего ионизованного газа:

$$L(\text{H}\beta) \sim \epsilon n_e^2 R^3$$

$$n_e = 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}, \epsilon = 0.001$$

В похожих вариациях массово применяется и сейчас

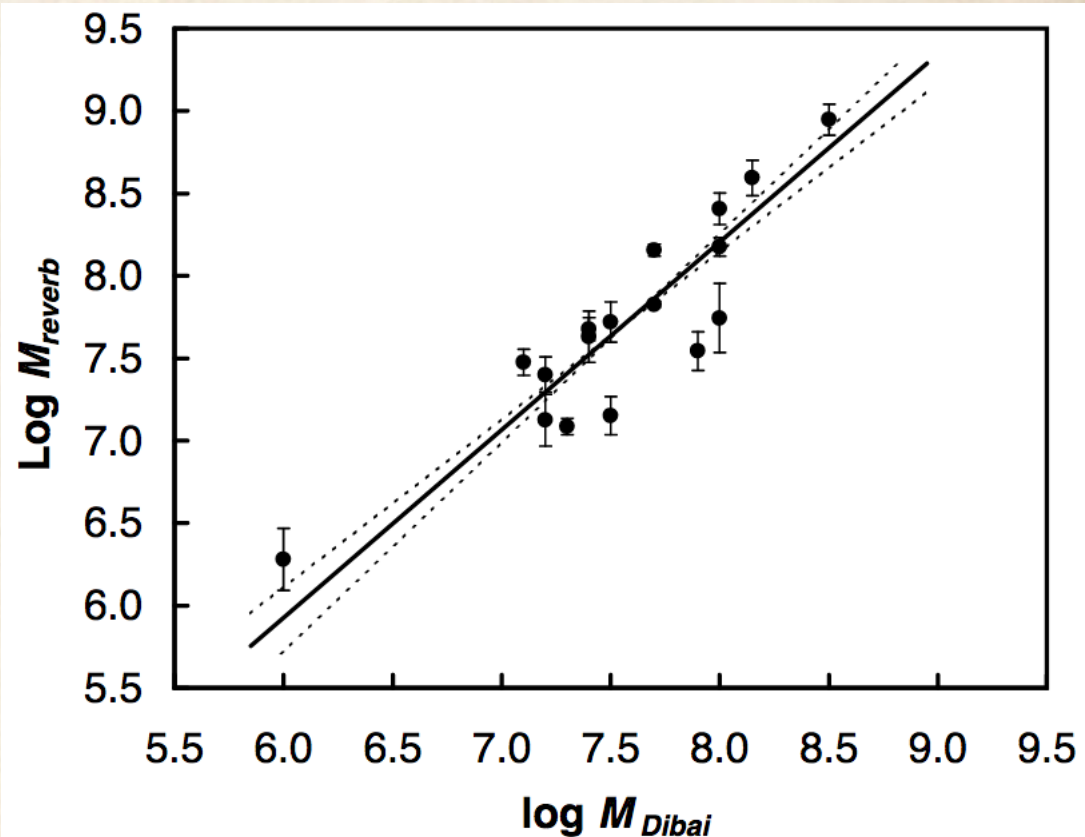


FIG. 1.— Comparison of the mass estimates of [Dibaï \(1984\)](#), M_{Dibai} with reverberation mapping masses, M_{reverb} . The solid line is the OLS bisector fit and the two dotted lines show

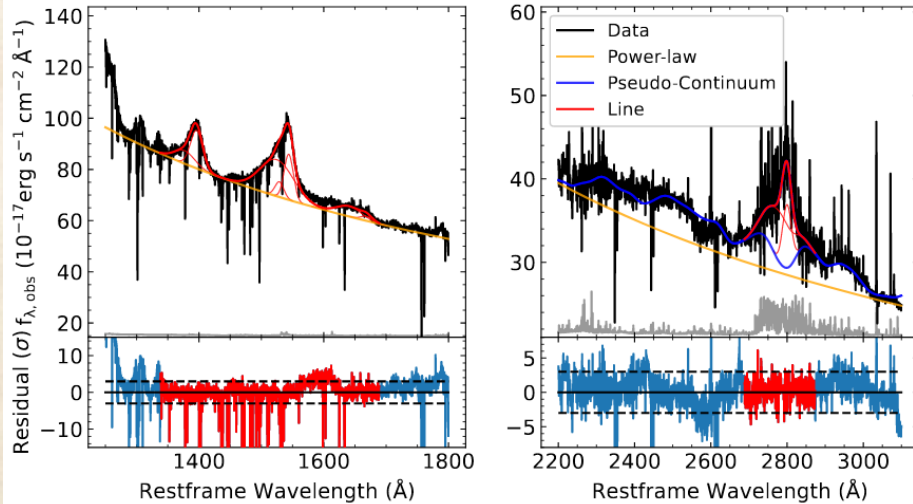
(Bochkarev & Gaskell 2009)

Вариции метода одного спектра

$$\frac{M_{\text{bh}}}{M_{\odot}} = 3.37 \left(\frac{\lambda L_{3000}}{10^{37} \text{ W}} \right)^{0.47} \left[\frac{\text{FWHM}(\text{Mg II})}{\text{km s}^{-1}} \right]^2$$

Связь R(BLR) с УФ светимостью
(McLure & Jarvis, 2002)

J0529-4351 (Wolf + 2024) z=3.9



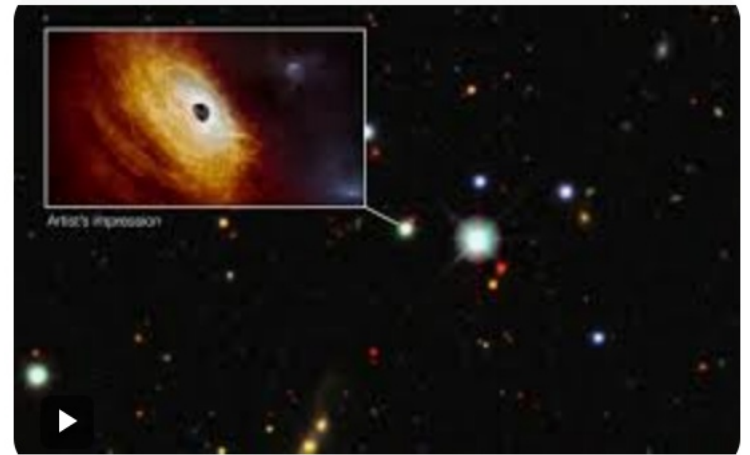
$\log M/M_{\odot} = 10.24$ for C IV $\lambda 1549$ (left) and 10.20 for Mg II $\lambda 2799$ (right)

основан на гипотезе, согласно которой болометрическая светимость ядра близка к эддингтоновскому пределу L_E , при котором сила давления излучения уравнивает силу гравитационного притяжения (Зельдович и Новиков [41]):

$$L_E = 1,3 \times 10^{38} \mu \frac{m_x}{M_{\odot}}, \quad (3)$$

N+1

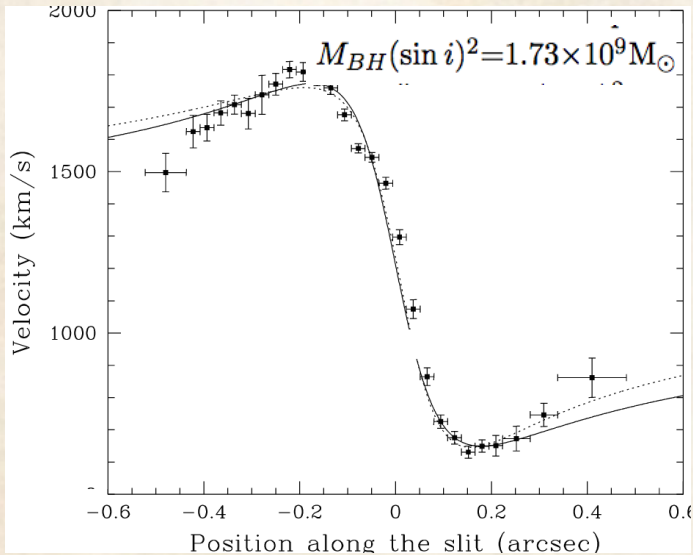
Астрономы отыскали рекордно яркий и быстрорастущий квазар. Черная дыра в нем массивнее Солнца в 17 миллиардов раз.



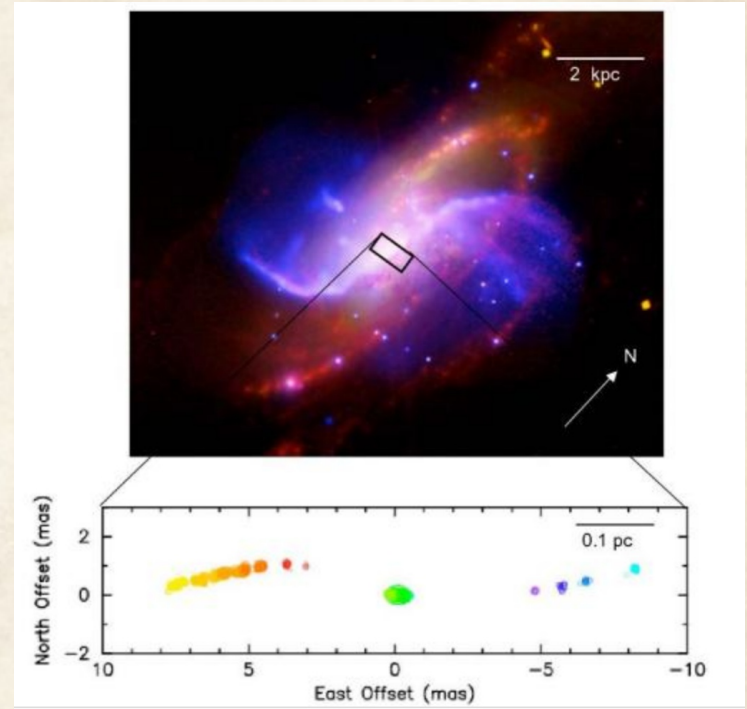
Кеплеровские кривые вращения

$$M(r) = \frac{rv_r^2}{G \sin^2 i}$$

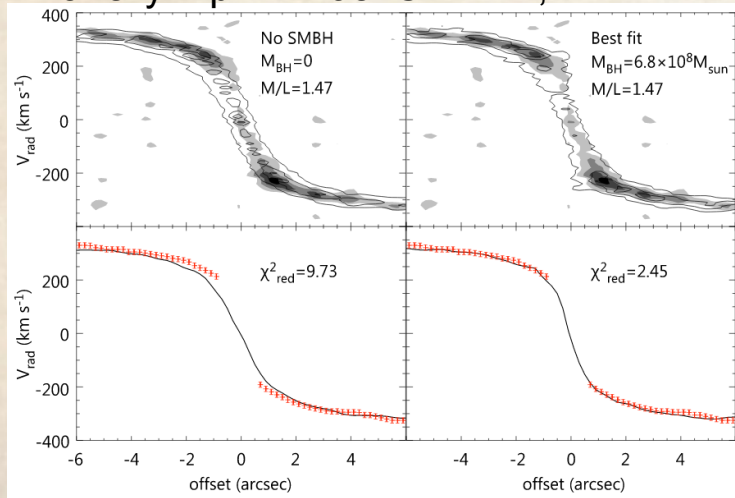
HST (Macchetto + 1997) M87



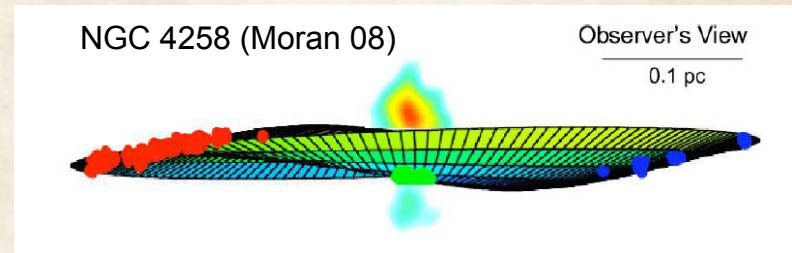
Лучевые скорости и собственные движения
мегамазеров H₂O в диске <0.2 пк



Молекулярный газ: CARMA, ALMA



(Onishi + 2016)



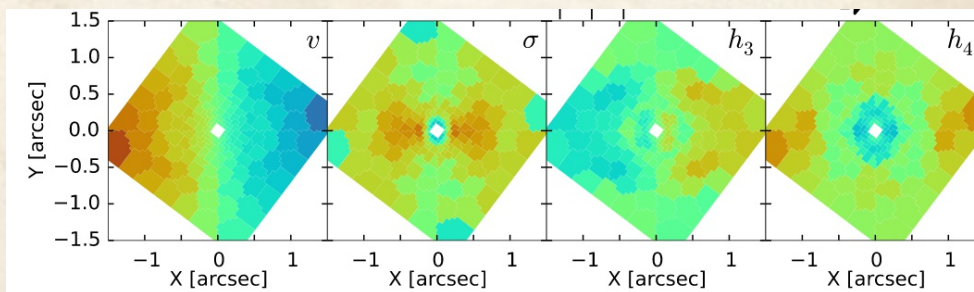
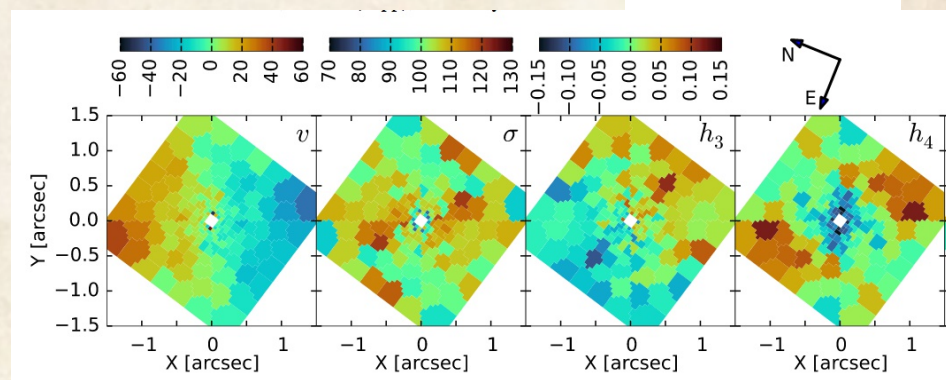
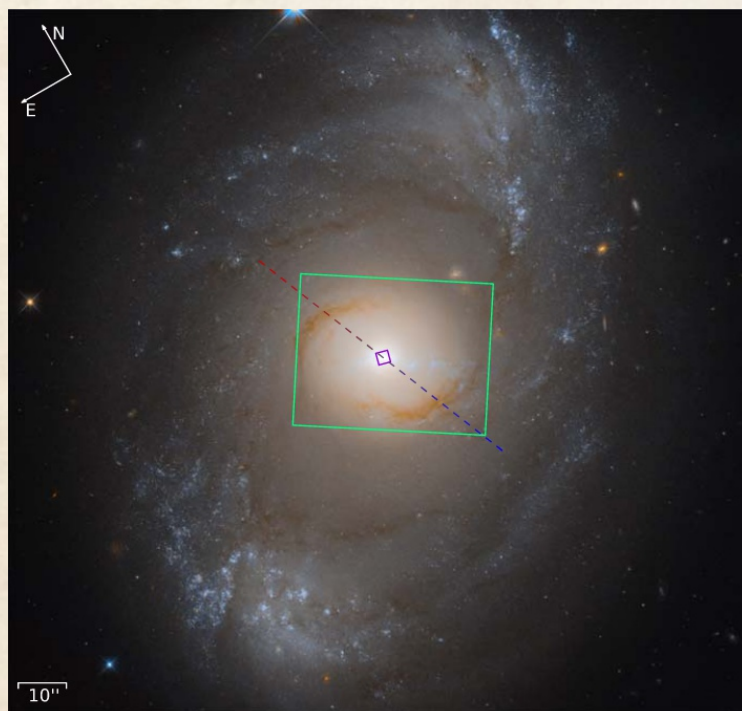
Звездинодинамические модели

3D спектроскопия звездного населения:
распределения яркости, скорости и
дисперсии скоростей (Лекция 4)

M_{BH} - один из параметров модели

$$M(r) = \frac{V^2 r}{G} + \frac{\sigma_r^2 r}{G} \left[-\frac{d \ln v(r)}{d \ln r} - \frac{d \ln \sigma_r^2}{d \ln r} - \left(1 - \frac{\sigma_\theta^2}{\sigma_r^2}\right) - \left(1 - \frac{\sigma_\phi^2}{\sigma_r^2}\right) \right].$$

$$M_{\text{BH}} = 1.3 \times 10^7 M_\odot$$



Связь M_{BH} с массой сферического компонента

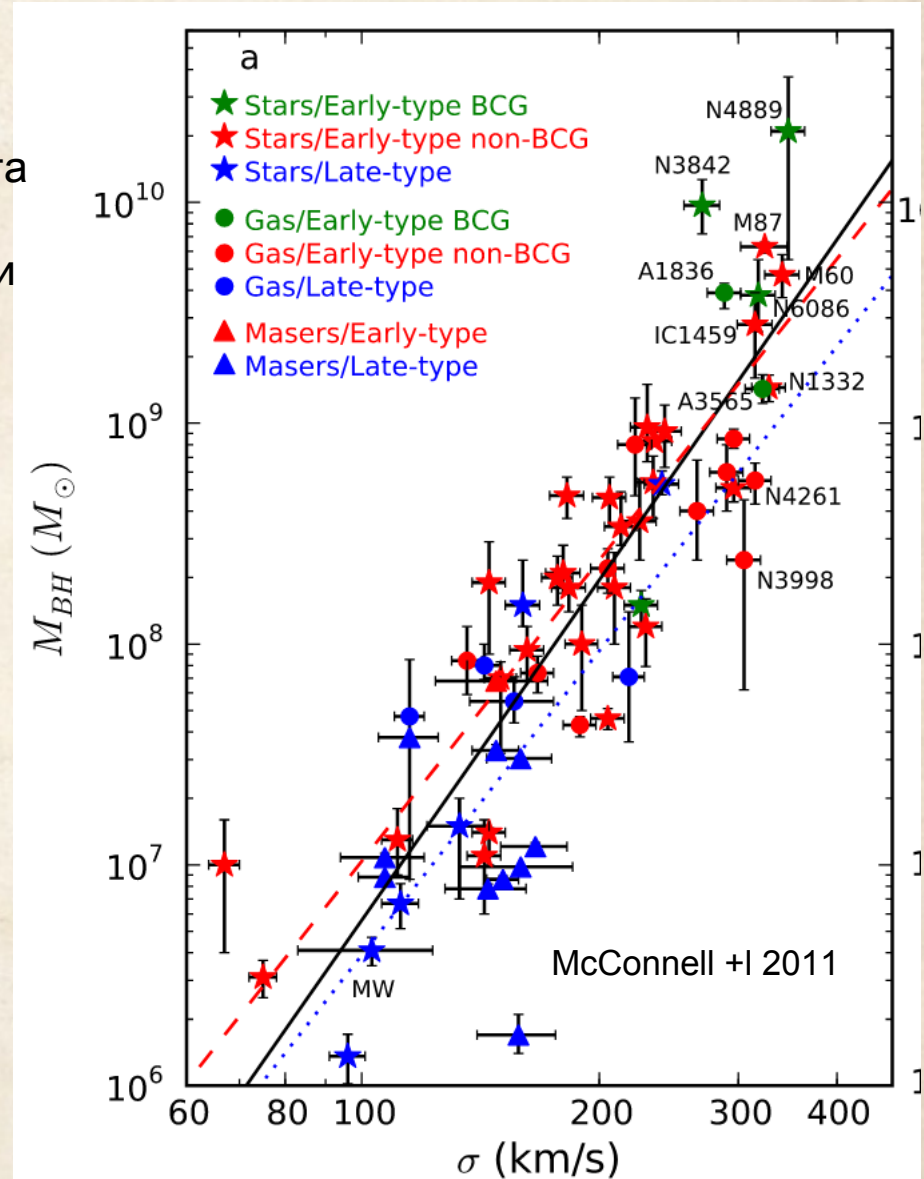
- Тесная корреляция с дисперсией скоростей звёзд/массой сферического к-та (балджа или всей E-галактики)
- Слабая корреляция для псевдоблажей и темного гало
- Нет корреляций с массой диска

(Kormendy + 2013):

$$\frac{M_{\text{BH}}}{10^9 M_{\odot}} = 0,310^{+0,037}_{-0,033} \left(\frac{\sigma}{200 \text{ км с}^{-1}} \right)^{4,38 \pm 0,29}$$

$$\frac{M_{\text{BH}}}{10^9 M_{\odot}} = (0,49^{+0,06}_{-0,05}) \left(\frac{M_{\text{bulge}}}{10^{11} M_{\odot}} \right)^{1,17 \pm 0,08}$$

$$\Rightarrow M_{\text{BH}} \sim 0.5\% M_{\text{Bulge}}$$



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)



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

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

