

I. Введение: основные виды галактик с активными ядрами (AGN).

Галактики с активными ядрами (AGN) обычно делят на 3 основных типа: галактики Сейферта (SyG), радиогалактики (RG) и квазары (QSO). Каждый из этих типов AGN можно разделить на подтипы по тому или иному признаку.

- **Галактики Сейферта.**

Сейфертовские галактики (SyG - см. ниже - **рис. 1, 1а, 2, 2а**), в зависимости от ширины крыльев разрешенных линий излучения в спектрах, делят на SyI ($\Delta V > 5000$ км/с) и SyII (см. обзор [1]). Правда, почти 2/3 SyG относятся к промежуточным типам, а сами SyI и SyII не являются однородной популяцией. Например, SyI бывают с более широкими линиями в спектрах ($\Delta V > 5000$ км/с) (BL SyI) (рис.2) и с менее широкими (NL SyI). Выяснилось, что у NL SyI менее массивные ядра, более горячие аккреционные диски, более быстрая переменность излучения и более крутые спектры в рентгеновском диапазоне [2].

У NL SyI в ядрах наблюдаются компактные радиоисточники, и они являются источниками жесткого рентгеновского излучения. Это свидетельствует об ориентации выбросов из их ядер под малыми углами к лучу зрения. В свою очередь, у части SyII наблюдаются в поляризованном свете линии излучения такие же широкие, как и в SyI в неполяризованном свете. Это свидетельствует о том, что некоторые SyII, на самом деле, являются галактиками типа SyI, у которых область формирования широких линий (< 0.1 пк) загорожена от наблюдателя газо-пылевым тором - поэтому широкие линии видны лишь в рассеянном (поляризованном) свете. Однако есть SyII, в спектрах которых и в поляризованном свете не видно широких линий. Это означает, что у этих истинных SyII структура и кинематика газа в центральной области сильно отличается от SyI [3]. По мнению автора работы [4], отсутствие в спектрах низкосветимых SyII широких линий излучения связано с тем, что при

$$L_{\text{иониз.}} < 10^{41.8} (M_{\text{ВН}}/10^8 M_{\odot})^2,$$

где $M_{\text{ВН}}$ - масса черной дыры,

область формирования широких линий должна располагаться так близко к массивной черной дыре (Massive Black Hole - M_{BH}), что быстрые облака газа с дисперсией скоростей >5000 км/с будут разрушены.



Рис. 1, 1а. Две из примерно 3000 галактик Сейферта – массивные дисковые галактики со звездообразным ядром и широкими линиями излучения ($\Delta V > 1000$ км/с) в оптических спектрах.

<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/>, *рис. 1 - Sept. 5, 2004, “M51: The Whirlpool Galaxy in Dust and Stars”; рис. 1а - Oct. 4, 2002, “Facing NGC 6946”.*

В работе [5] показано, что свойства ядер галактик Сейферта (т.е. деление на SyI и SyII) зависят, в основном, от величины темпа аккреции dm/dt на черную дыру. Если

$$dm/dt > (dm/dt)_{\text{крит}} = 10^{-2} (dm/dt)_{\text{Эдд}},$$

$$((dm/dt)_{\text{Эдд}} = 2 \times 10^{-9} \text{ (М/М}_\odot\text{) в год, } L_{\text{Эдд}} = \eta (dm/dt)_{\text{Эдд}} c^2 = 1.38 \times 10^{38} \text{ (М/М}_\odot\text{)},$$

где η -кпд перевода кинетической энергии аккреции в излучение), то область формирования широких линий излучения (область тепловой неустойчивости в диске) расположена на $R \gg 3R_g$, т.е. находится дальше от черной дыры, чем последняя устойчивая орбита ($3R_g$) – это SyI. Если же $dm/dt < (dm/dt)_{\text{крит}}$ то облака газа, ответственные за формирование широких линий, не могут сформироваться, так как $R_{\text{крит}}$ (расстояние, на котором диск делается радиационно доминированным) становится $< 3R_g$ – это SyII (см. также [6]).

Таким образом, различия в свойствах SyI и истинных SyII не могут быть объяснены лишь за счет разных углов зрения, под которыми видны аккреционные диски, т.е. в рамках простой «унифицированной схемы» («УС») [7-9]. Не согласуется с выводами «УС» и разный темп космологической эволюции SyI и SyII, а также зависимость от светимости ядер отношения наблюдаемого числа SyI к SyII [10]. Кроме того, в литературе (например, [11]) отмечалось, что примерно в 50% ядер SyG обнаружены компактные ($< 0.''05$) нетепловые радиоисточники (РИ), а у остальных радиоизлучение обусловлено, по-видимому, вспышкой звездообразования, а не активностью ядра (хотя, возможно, эти явления связаны между собой).

Массы черных дыр в ядрах галактик Сейферта оцениваются по дисперсии скоростей звезд в их балджах (σ_*^{bul}):

$$M_{\text{BH}} \cong 10^8 \text{ М}_\odot (\sigma_*^{\text{bul}} / 200 \text{ км/с})^4$$

и почти не отличаются от соответствующих оценок M_{BH} для массивных спиралей без заметной активности в ядрах (например, [11а, 11б]) - рис. 2а.

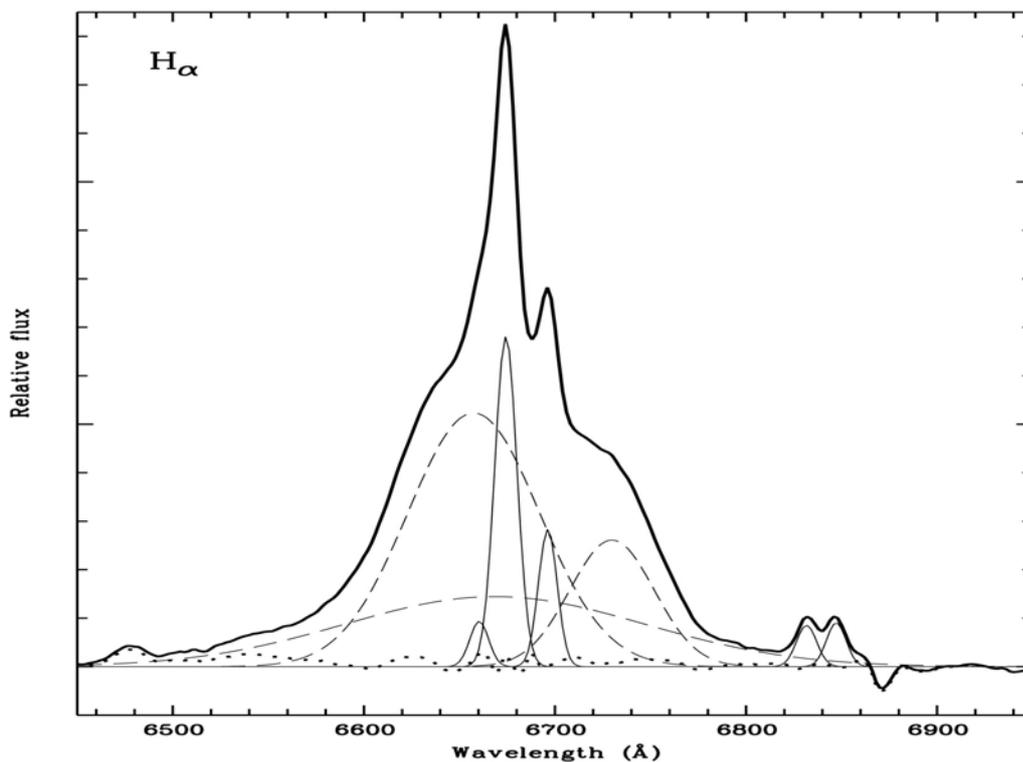


Рис. 2. Профиль линии $H\alpha$ в спектре сейфертовской галактики NGC 5548, полученный на 6-м телескопе (astro-ph/0405191). Видны широкие крылья, состоящие из «blue» и «red» широких компонентов (пунктир), и узкое ядро (тонкая линия).

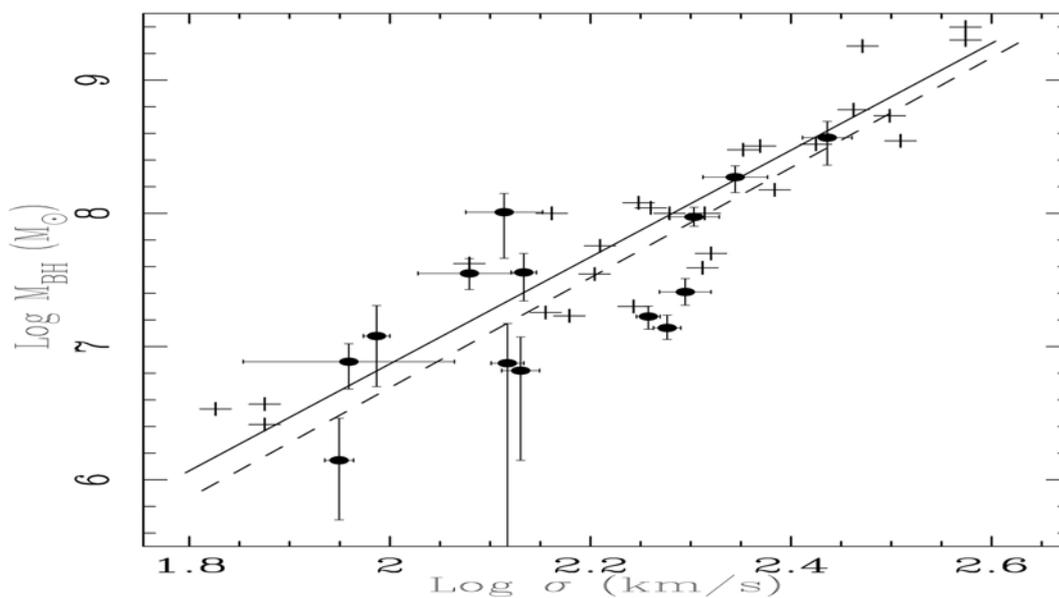


Рис. 2а. Зависимость между M_{BH} и дисперсией скоростей звезд в балджах для галактик Сейферта и нормальных E/SO галактик (из работы [11а]).

- **Радиогалактики.**

Радиогалактики (RG), так же как и SyG, можно делить на разные подтипы по виду их радиоспектров или радиоморфологии протяженных или ядерных областей. Например, Фанарофф и Рили [12] в 1974 г. предложили простое деление RG по виду их протяженных радиоструктур на масштабах десятков кпк: FRII (типа CugA с радиовыбросом и «горячими пятнами» на периферии) и FRI (типа ForA с усилением радиояркости в протяженных компонентах при приближении к оптической галактике) – **рис. 3,4.**

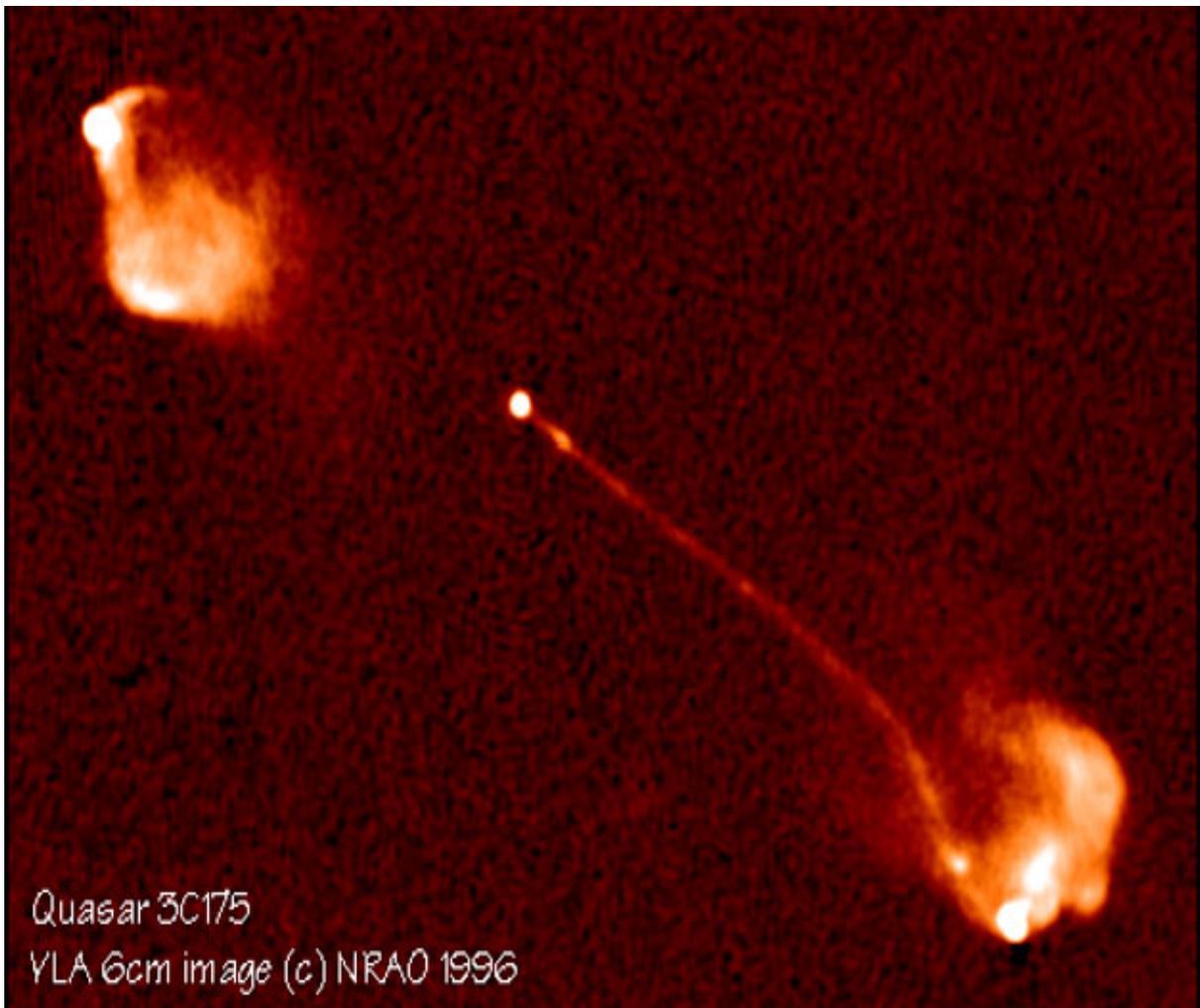


Рис. 3. Радиоизображение радиогалактики типа FRII (3C175).

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/> , Sept. 5 2001, “3C175: Quasar Cannon”.

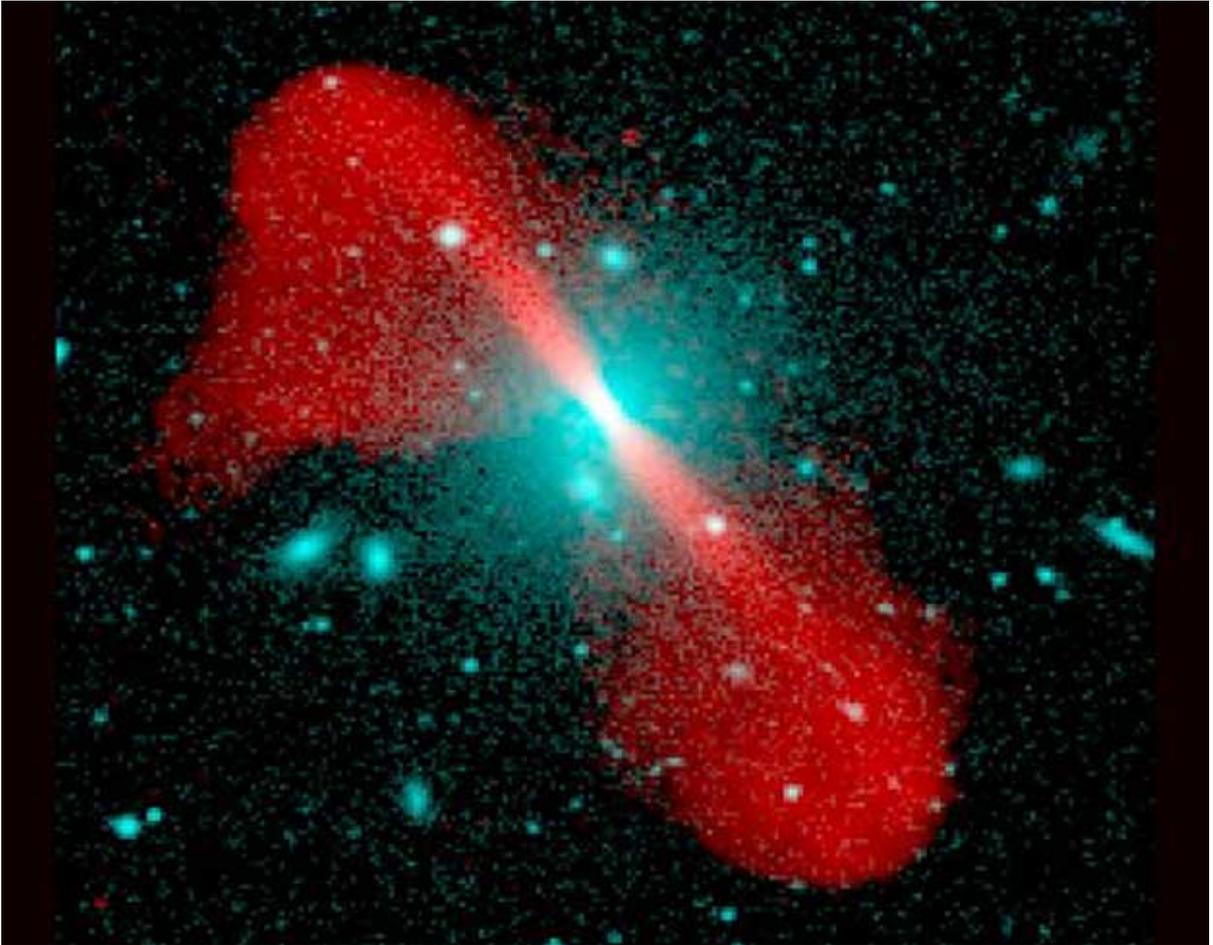


Рис. 4. Радиоизображение радиогалактики типа FRI (3C296).

<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/> ,

Feb. 26, 2002, "Jets from Radio Galaxy 3C296".

Деление RG на эти два класса оказалось удачным, так как оно характеризует условие равновесия между давлением релятивистского газа внутри протяженных радиокомпонент и внешним давлением среды. Более мощные FR II успешно противостоят внешнему давлению даже находясь в скоплениях галактик, а менее мощные RG в скоплениях галактик под воздействием внешнего давления имеют морфологию типа FRI. Сначала граница по радиосветимости между FR II и FRI проводилась на $P_{178 \text{ МГц}}^* = 2 \times 10^{26} \text{ Вт/Гц}$ (или $L_{178 \text{ МГц}}^* = 3.5 \times 10^{41} \text{ эрг/с}$) [13]. Однако позже было показано, что граница зависит от оптической светимости хозяйской галактики (h_g) [14] и от радиосветимости [15]. Утверждение о разном темпе космологической эволюции у FR II и FRI оказалось ошибочным. Так что складывается

впечатление, что в зависимости от радиомощности RG могут становиться то типом FR II, то - FRI. И хотя на плоскости $\log P_{1.4 \text{ ГГц}} - \log M_{\text{ВН}}$ (рис. 5) условно проводят линию «раздела» между FRI и FR II, которая не противоречит полученной в [16] для относительно слабых RG зависимости $P_{5 \text{ ГГц}} \sim M_{\text{ВН}}^{2.73}$, однако, по-видимому, здесь замешена селекция, и для более полной выборки RG эта зависимость замывается [17]. Во всяком случае, вид распределения $N(R \equiv L_{\text{radio}}/L_{\text{opt}})$ мало меняется при переходе от радиогалактик с $R > 10$ к радиогалактикам с $R < 10$.

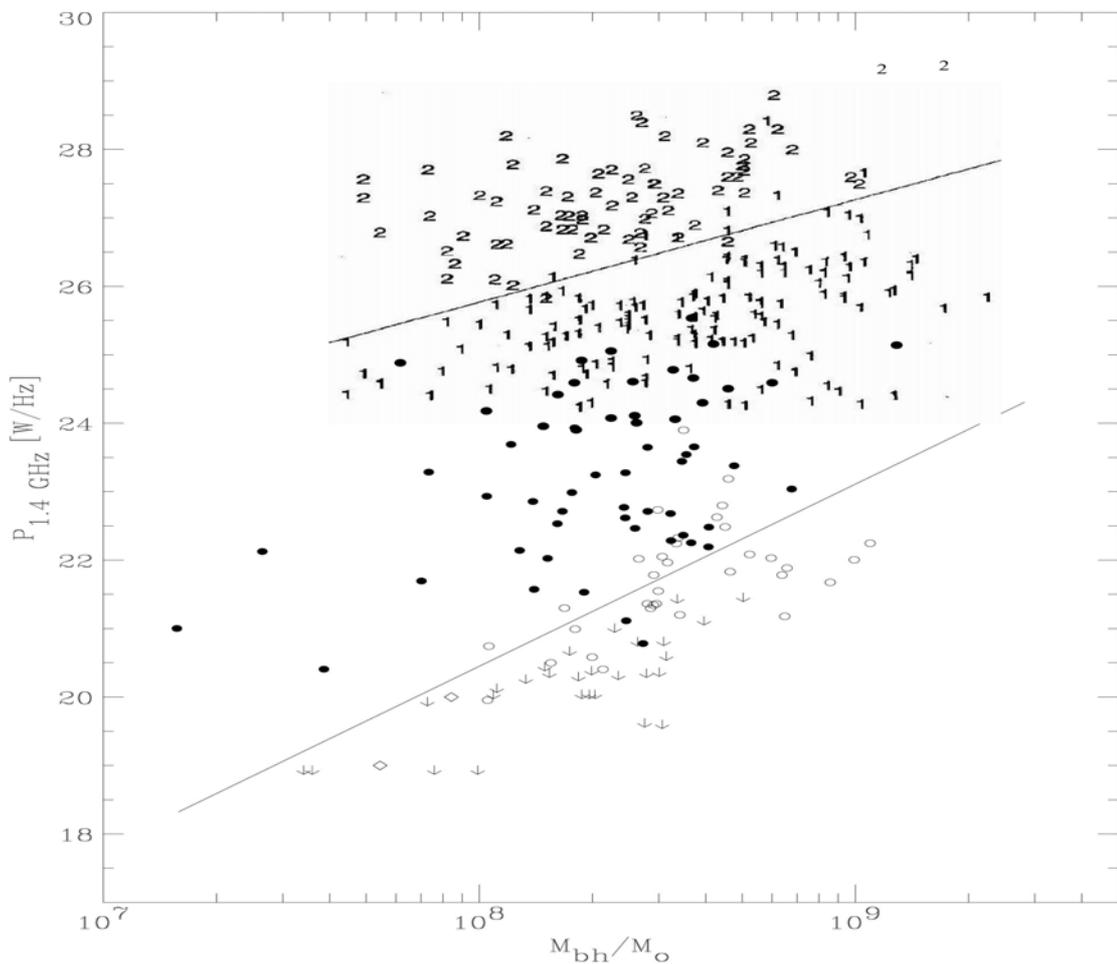


Рис. 5. Радиогалактики типа FR II (2) и FRI (1), а также радиоисточники, связанные с E-галактиками (темные кружки – наблюдается протяженное излучение, светлые – не наблюдается (каталог NVSS)) на плоскости $P_{1.4 \text{ ГГц}}$ (Вт/Гц) - $M_{\text{ВН}}$ (из работы [15]).

Верхняя прямая делит условно области FRI и FR II, а нижняя соответствует зависимости $P_{1.4} \sim M_{\text{ВН}}^{2.5}$, которая верна лишь для относительно слабых радиоисточников [16].

В ряде работ высказывалось предположение, что RG типа FR II со временем (по мере затухания активности) могут превращаться в FRI [18]. Косвенным подтверждением такого сценария может служить вывод о бóльшей массе $M_{\text{ВН}}$ у FRI. Действительно, согласно [19-20], есть связь между массами/светимостями черных дыр и балджей «хозяйских галактик» hg (M_{bul} – масса, $M_{\text{k}}^{\text{bul}}$ – абсолютная звездная величина балджа в фильтре «k»):

$$\log M_{\text{ВН}} = 0.96 \log M_{\text{bul}} - 2.56$$

$$\log(M_{\text{ВН}}/M_{\odot}) = -0.62 M_{\text{k}}^{\text{bul}} - (5.41 \pm 1.75).$$

И если «граница» между FR II и FRI соответствует примерно $L_{178 \text{ МГц}}/L_{\text{Эдд}} = 0.015$, то при одинаковых $L_{178 \text{ МГц}}$ у RG типа FRI оказываются бóльшие $M_{\text{ВН}}$. Но для образования более массивных ВН требуется и бóльшее время [18,21].

Считается, что RG типов FR II и FRI являются относительно старыми ($\tau > 10^{5-6}$ лет) объектами, протяженные компоненты которых успели выйти за пределы оптической хозяйской галактики (hg). На ранней своей стадии, когда радиокомпоненты еще не вышли за пределы hg, эти RG проходили стадии компактных радиоисточников с размерами от долей пк до сотен пк. Они получили названия: GPS (с максимумом в спектре в области $\nu_p \approx 1 \text{ GHz}$), CSS (с крутыми спектрами), CSO (с симметричными компонентами). Времена жизни τ этих компактных RG не превосходят 10^{3-4} лет (см., например, [22,23]). Вывод о молодости этих RG основан не только на их небольших размерах (у некоторых компактных радиоисточников наблюдаются слабые протяженные структуры, которые могут свидетельствовать о рекуррентном характере их активности в радиодиапазоне (например, [24]), но и на теории формирования синхротронных спектров с максимумом потока на определенной частоте ν_p . Согласно работе [25] для GPS RG наблюдается обратная зависимость между величиной ν_p и радиоразмером:

$$\log \nu_p = -0.21(\pm 0.05) - 0.65(\pm 0.05) \log l_r \quad (\text{где } l_r \text{ – в кпк}),$$

по которой, в принципе, можно оценивать расстояние до этих объектов, если известны из наблюдений величины ν_p и ϑ_r (угловой размер радиоисточника). По-видимому, компактные RG со временем превратятся в протяженные типов

FRII/FRI, пространственная плотность которых будет выше плотности предшественников в отношении их времен жизни, т. е. в $10^{5-6}/10^{3-4}=10^2$ раз. В работе [26] для компактных радиоисточников приводятся теоретические значения ν_p при разных радиоразмерах l_r и временах жизни. Отметим, что в работе [27] говорится еще об одном типе компактных радиоисточников с максимумом спектра на частоте $\nu_p > 5$ ГГц (HFP – high frequency peakers). Среди HFP гораздо выше доля квазаров, чем среди GPS. Для случая HFP-квазаров, в отличие от HFP-радиогалактик, часто наблюдается протяженный переменный радиокомпонент, т.е. радиовыброс.

- **Квазары.**

Квазары (QSO), число которых с измеренными красными смещениями достигло 25000, обычно подразделяются на радиогромкие (RLQ), которые по-другому называют «квазизвездными источниками» =QSS, и радиотихие (RQQ), или, по-другому, «квазизвездные галактики» =QSG:

$$P_{5 \text{ ГГц}} = \begin{cases} > 10^{25-26} \text{ Вт/Гц} - \text{QSS} \\ > 10^{22-24} \text{ Вт/Гц} - \text{QSG}. \end{cases}$$

Однако по мере увеличения чувствительности радиообзоров и добавления к ним выборок в оптическом и рентгеновских диапазонах наметилась тенденция к замыванию «провала» между QSS и QSG (**рис. 6**).

Так, по данным радиообзора FIRST ($\lambda=21$ см, $S_{\text{lim}}=1$ мЯн) в распределении QSO по параметру $R \equiv L_r/L_{\text{opt}}$ не видно «двугорбости» [28], хотя раньше по меньшим выборкам получали (см. также работы [29,30]:

$$R = \begin{cases} > 10 - \text{QSS (FRII)} \\ > 10 - \text{QSG (FRI/FRII)}. \end{cases}$$

К аналогичному выводу приходят и авторы работы [31], анализируя данные по 113 QSO в диапазоне параметров:

$$S_{1.4 \text{ ГГц}} \geq 1 \text{ мЯн}, m_b = 18.25 \div 20.85 \text{ и } z = 0.3 \div 2.2.$$

Об этом свидетельствует и общий вид зависимости L_{XR} от L_{opt} для QSS и QSG:

$$L_{XR} = -16.56 + 1.42L_{opt} \quad [32].$$

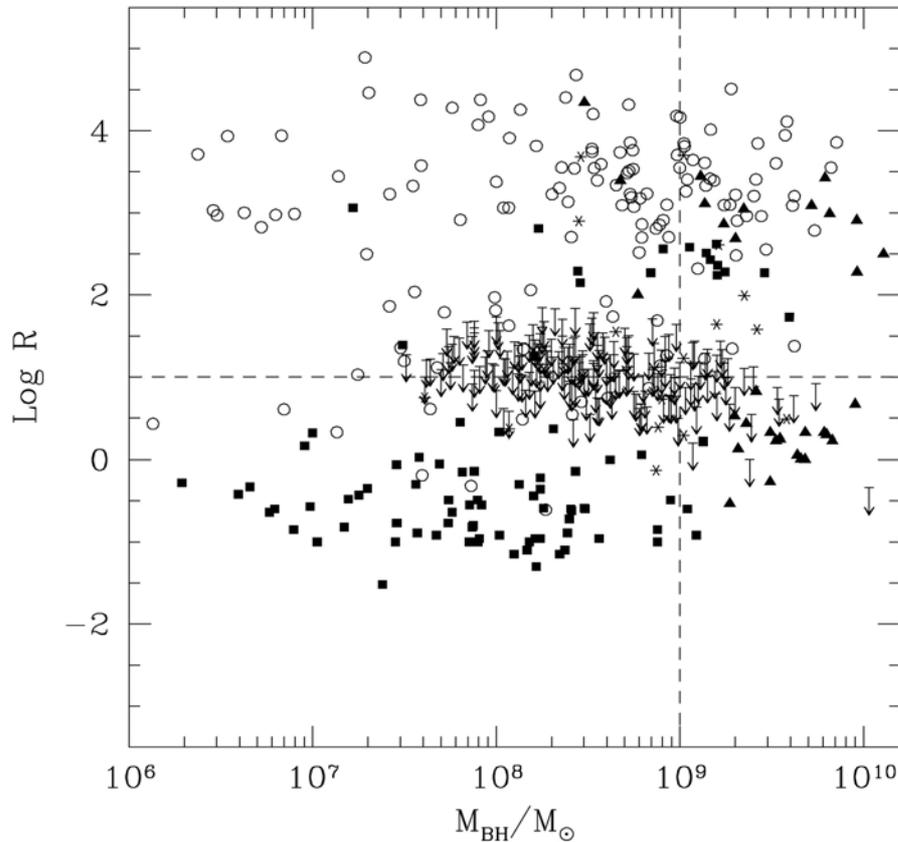


Рис. 6. Плоскость $(R \equiv L_{radio}/L_{opt}) - M_{BH}/M_{\odot}$ [17]. Видно, что по параметру R резкого различия между RL и RQ-квазарами не наблюдается.

Не видны также различия в значениях их M_{BH} .

$N_{tot}=452$ объекта:

\square - PG QSO ($z < 0.5$), \circ - QSO ($z < 1$), Δ - QSO ($z = 2-2.5$), $$ - LB QS ($z = 0.5-1$).*

Нет заметного различия между QSS и QSG и по величинам масс их ядер, которые оцениваются, исходя из их светимости в УФ и ширин разрешенных линий в их спектрах [33]:

$$\begin{aligned} M_{BH}/M_{\odot} &= 3.37(\lambda L_{3000\text{\AA}}/10^{37} \text{ Вт}) [\Delta V_{1/2}(\text{MgII}) \text{ км/с}]^2 = \\ &= 4.74(\lambda L_{3000\text{\AA}}/10^{37} \text{ Вт}) [\Delta V_{1/2}(\text{H}\beta) \text{ км/с}]^2. \end{aligned}$$

В работе [34] отмечалось, что если у сильных радиоквазаров ввести коррекцию на доплеровское уярчение светимости в релятивистских

выбросах, то эти QSS по своей радиосветимости попадают в «провал» между QSS и QSG.

«Хозяйскими галактиками» RLQ всегда являются гигантские сфероидальные системы, а RQQ могут быть связаны и с дисковыми галактиками ранних морфологических типов (рис. 7).

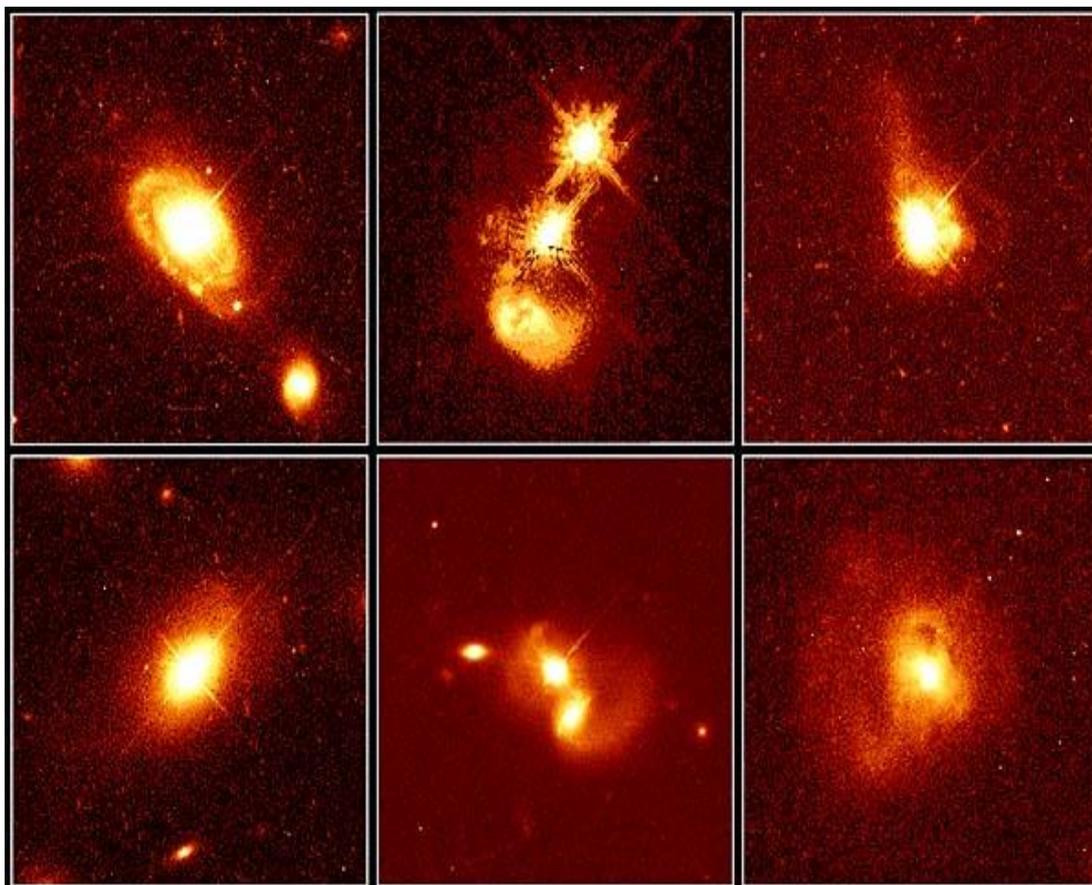


Рис. 7. Примеры изображений хозяйских галактик для некоторых относительно близких квазаров, полученные с помощью Хаббловского Космического Телескопа (HST)

(<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/> , Nov. 25 1996, “A Quasar Portrait Gallery”).

- **Деление AGN на радиогромкие и радиотихие (диаграмма «Герцшпрунга-Рессела» для AGN).**

И все же деление AGN на радиосильные и радиослабые в литературе остается для характеристики объектов, расположенных на разных концах общего распределения по радиосветимости (В работе [35] отмечалось, что в рентгеновском диапазоне между RL и RQ AGN имеются заметные различия.

Это, по мнению авторов, обусловлено разной структурой внутренних областей в их аккреционных дисках). Так например, к радиотихим относят:

- галактики SyI с узкими линиями в спектрах (NL SyI),
- квазары с широкими линиями поглощения (BAL QSO),
- квазары с мощным излучением в ИК-диапазоне (IR QSO).

К радиосильным:

- квазары с широкими линиями излучения (QSOI),
- радиогалактики FRII с широкими линиями излучения (BL RG).

К промежуточным:

- галактики SyI с широкими линиями излучения (BL SyI),
- радиогалактики с узкими линиями излучения (NL RG),
- квазары с узкими линиями излучения (QSOII).

Отметим еще, что для радиотихих RQ AGN, в спектре которых преобладает квазитепловое излучение от относительно холодного аккреционного диска и его более горячей короны, в ряде работ (например, [36-38]) была предпринята попытка построения аналога диаграммы «Герцшпрунга-Рессела». В этом случае за характеристику цвета диска принималось отношение эквивалентных ширин W линий H_{β} и $Fe(4570 \text{ \AA})$, формирующихся в нем. А вместо светимости использовали полуширину $\Delta V_{1/2}$ линии H_{β} , по которой можно оценить величину M_{BH} , а значит, и эддингтоновскую светимость:

$$M_{BH}/M_{\odot} = 4.57(\lambda L_{5100 \text{ \AA}}/10^{37} \text{ Вт})^{0.5} \times (\Delta V_{1/2}(H_{\beta})/\text{км/с})^2 \text{ (эрг/с) [39];}$$

$$L_{\text{Эдд}} = 1.38 \times 10^{38} (M_{BH}/M_{\odot}) = 1.38 \times 10^{46} (M_{BH}/10^8 M_{\odot}).$$

Из **рис. 8** видно, что, при прочих равных условиях, активное ядро имеет большее отношение L_r/L_0 , т.е. является более радиосильным, если обладает большей массой ядра (более широкими линиями излучения в спектре) и меньшим темпом аккреции (по отношению к $(dm/dt)_{\text{Эдд}}$). Возможно, что наблюдаемый факт увеличения доли радиоспокойных квазаров с ростом красных смещений (например, [40]), может быть связан с большим темпом аккреции на массивные ВН в ранние космологические эпохи, что приводит к ослаблению радиосветимости (см. подробности ниже).

Мы уже говорили о том, что для объяснения многообразия типов AGN была выдвинута гипотеза об определяющей роли угла между лучом зрения и осью радиовыброса, так называемая «унифицированная схема» («УС») [6-8].

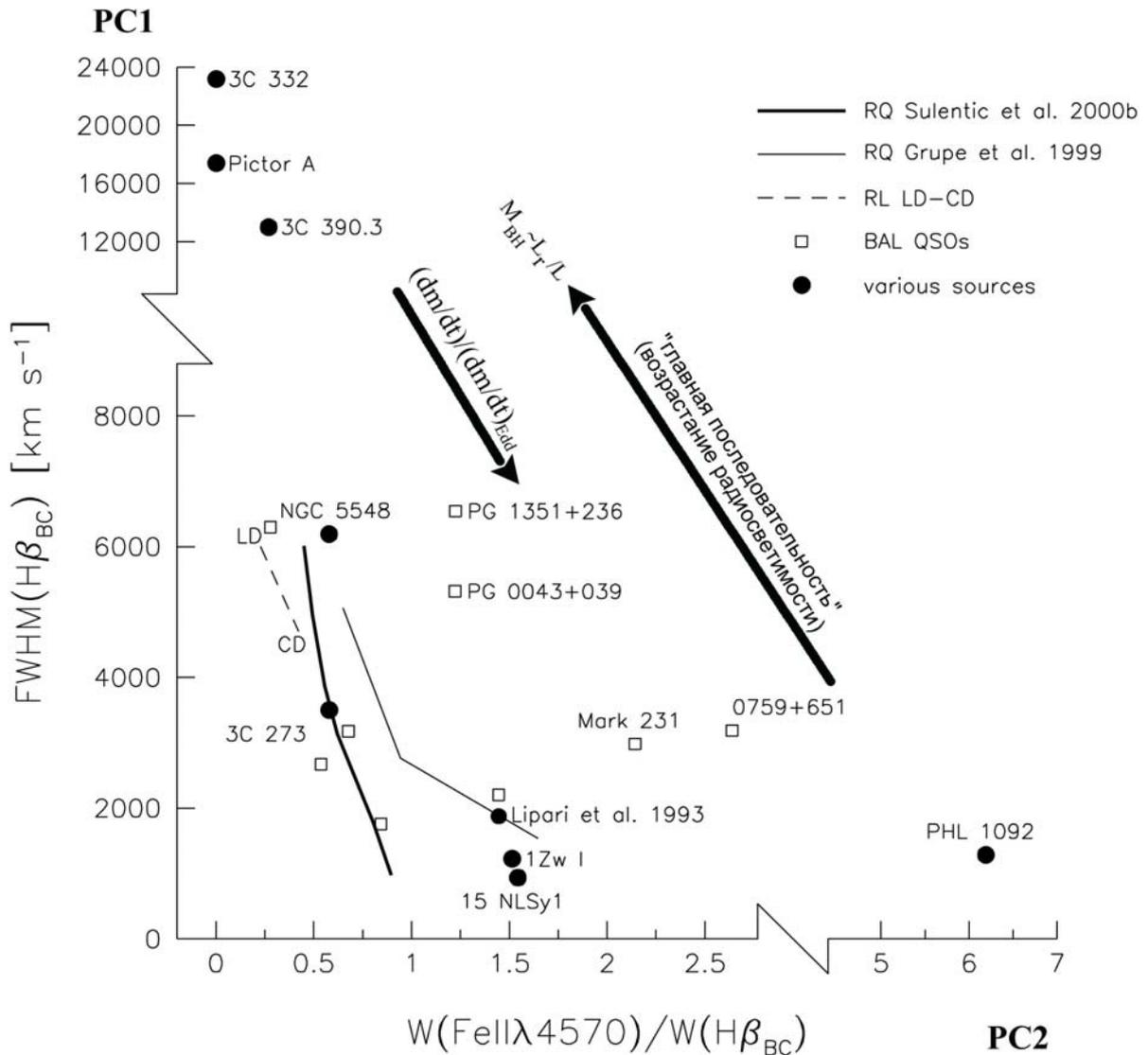


Рис. 8. Аналог диаграммы «Герцишпрунга-Рессела» для радиотихих AGN (из работы [38]) в координатах PC1-PC2 (PC – principal component), составленных по данным спектроскопии. Квазипепловое излучение аккреционных околядерных дисков на плоскости «светимость-цвет» может служить некоторым аналогом излучения звезд на главной последовательности.

В последующие годы многие авторы (например, [41-48]) отмечали, что такой подход является слишком упрощенным и следует учитывать, кроме ориентации, еще целый ряд других факторов. К ним можно отнести: эволюционные изменения, типы hg , богатство окружения, особенности аккреционных потоков и конфигурацию магнитных полей в них, взаимонаправленность осей вращения околоядерных дисков и черных дыр и т.п. В рамках этих предположений, согласно, например [42], RL QSO со временем эволюционируют и воспринимаются наблюдателями как RG, а RQ QSO – как SyG. Предположение в рамках простой «УС» (например, [9]) о том, что родительской популяцией объектов BL Lac являются RG типа FRI, в последние годы также подвергается критике (например, [47]).

Недостаточность простой «УС» особенно четко проявилась при рассмотрении наблюдательных особенностей так называемых блазаров (BLAZ), которые включают в себя объекты типа BL Lacertae со слабыми линиями излучения или их отсутствием в спектрах и плоскоспектральные QSS с линейной поляризацией в оптике $> 3\%$ (HPQ – high polarisation QSS). Остановимся более подробно на свойствах этой разновидности квазаров.