

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Археология активности ядер галактик*

А.В. Моисеев, А. Аршинова, А.А. Смирнова

Существует достаточно много наблюдательных доказательств того, что активность сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик носит транзитный характер. Появился даже термин "археология активного ядра". Он подразумевает возможность восстановления истории активности (изменения со временем светимости ядра в различных диапазонах электромагнитного спектра) путём анализа того, как эта активность проявляла себя на галактических и внегалактических пространственных масштабах. Речь идёт о реликтовых радиоструктурах, газовых облаках, подсвеченных "ионизирующим эхом" былой активности и других подобных феноменах, включая пузыри Fermi/eROSITA. Нами представлен краткий обзор результатов изучения активности ядер галактик по их наблюдаемому воздействию на внутригалактическую и окологалактическую среду. Основное внимание уделяется оптическим наблюдениям конусов ионизации и свидетельствам переключения между излучающим (конусы ионизации) и кинетическим (радиоджеты) режимами активности.

Ключевые слова: активные ядра галактик, галактики, межзвёздная среда, физика высоких энергий

PACS number: 98.54.Cm

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.040022>

Содержание

1. Введение (257).
 2. Видоизменяющиеся активные ядра галактик (258).
 3. Реликтовые радиоструктуры (259).
 4. Ионизационное эхо (260).
 5. Галактики с переключением режимов активности (261).
 6. Заключение (262).
- Список литературы (262).

1. Введение

Активными ядрами галактик (АЯГ) называют "ядра, наблюдаемые свойства которых не объясняются в рамках рождения и эволюции нормального звёздного населения" [1]. К наблюдаемым свойствам относятся как излучение в электромагнитном спектре, так и ускорение релятивистских частиц — космических лучей высоких энергий, а с недавних пор с активными галактиками ассоциируют и потоки нейтрино [2]. Феномен АЯГ известен уже более 80 лет, начиная с пионерской работы Карла Сейферта, обнаружившего в ядрах шести близких галактик излучение линий газа в состоянии высокого возбуждения, в то время как уширение бальмеровских линий

водорода соответствовало разбросу лучевых скоростей 3500–8500 км с⁻¹ [3]. Последовавшие в 1960-х годах открытия радиогромких звездообразных объектов — квазаров [4], радиогалактик и расширение списка сейфертовских галактик благодаря маркарянновскому обзору неба [5] инициировали лавинообразное накопление новых наблюдательных данных и развитие теорий о природе АЯГ. Полная (болометрическая) светимость АЯГ может превышать 10⁴⁷ эрг с⁻¹ (3 × 10¹³ в светимостях Солнца), что делает их наиболее мощными источниками электромагнитного излучения в наблюдаемой Вселенной [6].

После многолетних дискуссий уже нет сомнений в том, что феномен активности вызван аккрецией окружающего вещества на центральную сверхмассивную чёрную дыру (СМЧД). Если ещё несколько лет назад на присутствие СМЧД указывали достаточно уверенные, но всё-таки косвенные признаки (см. обзоры [7, 8]), то теперь методом радиоинтерферометрии получены изображения СМЧД в ядре нашей Галактики [9] и АЯГ M87 [10]. Между массой СМЧД, измеренной разными методами, перечисленными в обзорах выше, и параметрами содержащих их галактик (прежде всего, светимость и масса сферического компонента) обнаружена тесная взаимосвязь [11, 12], независимая от текущей активности ядра. С одной стороны, это позволяет говорить о совместной эволюции галактик и СМЧД [13], с другой — указывает на то, что СМЧД должны присутствовать в центре практически всех галактик. К примеру, современные спектральные обзоры, такие как DESI (Dark Energy Spectros-

А.В. Моисеев^(а), А. Аршинова^(б), А.А. Смирнова^(с)
 Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
 Нижний Архыз, Зеленчукский район,
 Карачаево-Черкесская республика, Российская Федерация
 E-mail: ^(а) moisav@sao.ru, ^(б) arina.arshinova@gmail.com,
^(с) ssmirnova@gmail.com

Статья поступила 25 августа 2025 г.

* Статья написана на основе доклада, представленного на Научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук, 19 марта 2025 г. (см. УФН 196 (3) 238 (2026))

coric Instrument) позволяют обнаруживать АЯГ и измерять массы СМЧД в больших выборках карликовых галактик [14]. Отметим, что используемые здесь методики измерения массы центрального объекта по единственному спектру восходят к пионерским работам Э.А. Дибая 1970–1980 гг. [15].

Если первые оценки доли АЯГ указывали всего на несколько процентов сейфертовских ядер среди галактик ближней Вселенной, то массовые спектральные обзоры показали, что активные ядра содержатся в $\sim 20\%$ галактик с массой выше $10^{10} M_{\odot}$ [16, 17]. Отсюда следует, что если каждая СМЧД может стать АЯГ, то суммарная продолжительность спокойной фазы за время жизни галактики оказывается значительно длиннее, чем активной.

Очевидная причина, по которой галактики не могут постоянно поддерживать активность ядер — центральная аккреционная машина достаточно быстро вырабатывает "топливо" — т.е. газ, находящийся в сфере, контролируемой её гравитацией ($r \leq 1-10$ пк). Для продолжения активности, даже в случае присутствия газа в диске галактики, необходимо переместить его с орбит радиусом 1–20 кпк к центру, что означает уменьшение углового момента примерно в 10^4 раз. Известны динамические процессы, приводящие к потере углового момента галактического газа: это приливные взаимодействия и слияния галактик, центральные перемычки-бары, околоядерные спирали, двойные сверхмассивные чёрные дыры и т.д. [18]. Благодаря развитию в последнее десятилетие обзоров неба методом оптической 3D-спектроскопии, таким как MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at APO) обнаружена связь феномена АЯГ с наличием кинематически рассогласованных подсистем. То есть аккреция внешнего газа галактическим диском способствует и аккреции на СМЧД [19, 20]. Что явно наблюдается и в наиболее экстремальном случае рассогласованных подсистем — галактик с полярными кольцами, среди которых повышена доля АЯГ [21], имеются также численные расчёты транспортировки газа к ядру в этих объектах [22].

К сожалению, в большинстве случаев трудно однозначно определить, какой механизм переноса углового момента действует в конкретной галактике. Хотя многочисленные статистические оценки указывают на некоторую связь между наличием АЯГ и такими факторами, как взаимодействие галактик, наличие сильного бара или кинематически рассогласованной подсистемы, речь идёт скорее о статистической тенденции, чем о строгой корреляции. Это можно объяснить тем, что временная шкала рабочего цикла АЯГ ($< 10^6$ лет, см. ниже) заметно меньше характерного времени крупномасштабных динамических процессов (10^8-10^9 лет).

Вариации темпа аккреции, прецессия и неустойчивость аккреционного диска приводят к изменению излучения активного ядра во всех диапазонах электромагнитного спектра. Переменность АЯГ в континууме и оптических эмиссионных линиях была открыта ещё в начале 1960-х годов [23–25]. Начиная с пионерской работы [26], запаздывание между изменениями потоков в континууме и широких эмиссионных линиях используется для измерения массы центрального объекта методом эхокартирования. Альтернативным независимым методом является сравнение кривых переменности потока в континууме на разных длинах волн, от УФ до ИК [27].

Активность ядра рассматривается как один из важнейших факторов в моделях галактической эволюции из-за радиационного и кинетического воздействия, которое АЯГ оказывает на межзвёздную среду галактики, вплоть до полной остановки звездообразования из-за потери холодного газа (quenching) [28–30]. Для корректного понимания взаимовлияния АЯГ и родительской галактики, а также для ограничения параметров численных моделей этого процесса, необходимо оценивать длительность полного цикла активности и изучать следы прошлой активности в галактиках со "спокойными" ядрами. И первым примером здесь является наша собственная звёздная система — Млечный путь. С относительной недавней активностью ядра Галактики связывают существование пузырей горячего газа Fermi и eROSITA [31], названных так в честь соответствующих космических обсерваторий, работающих в гамма и рентгеновском диапазонах. Моделирование показывают, что обе системы пузырей диаметром 8 и 14 кпк могут быть вызваны одной вспышкой активности ядра около 2 млн лет назад [32]. Эта оценка близка к возрасту конуса ионизации, направленного перпендикулярно галактическому диску в сторону Магелланова Потока — газового шлейфа, связанного с ближайшими массивными спутниками нашей Галактики [33, 34]. Интересно, что аналогичная система из двух симметричных горячих пузырей размером около 7 кпк обнаружена с помощью той же обсерватории Fermi в ближайшей массивной спиральной галактике Туманность Андромеды [35].

В дополнение к отмеченным выше гамма-пузырям, известные в литературе примеры включения/выключения активности ядра можно разделить на три класса феноменов:

1. Видоизменяющиеся АЯГ (CL-AGN, changing look AGN), с характерными временами длительности активности $\tau \approx 1-10$ лет.
2. Реликтовые радиоструктуры, $\tau \approx 10^6-10^8$ лет.
3. Реликтовые ионизованные туманности (конуса ионизации), $\tau \approx 10^4-10^6$ лет.

Применительно к последним двум пунктам недавно даже появился термин "археология активного ядра" [36]. Что подразумевает возможность восстановления истории излучения АЯГ путём анализа его воздействия на галактических и внегалактических пространственных масштабах. Очевидна аналогия с классической археологией, когда исследование реликтовых артефактов позволяет понять величие ушедших культур.

Далее кратко рассматриваются все перечисленные проявления АЯГ, при этом особое внимание уделяется недавно обнаруженному феномену переключения между различными режимами активности, принципиально отличающимися темпами аккреции вещества на СМЧД.

2. Видоизменяющиеся активные ядра галактик

В случае видоизменяющихся АЯГ спектры, полученные в разные эпохи, демонстрируют либо полное исчезновение признаков активности в объекте, ранее квалифицировавшемся как классический квазар или сейфертовское ядро, либо, наоборот, внезапное появление характерных широких линий в спектре ранее "спокойного" ядра, указывающих на наличие АЯГ [37]. Или же речь идёт о переключении между типами активности Сейферт-1 и Сейферт-2 —

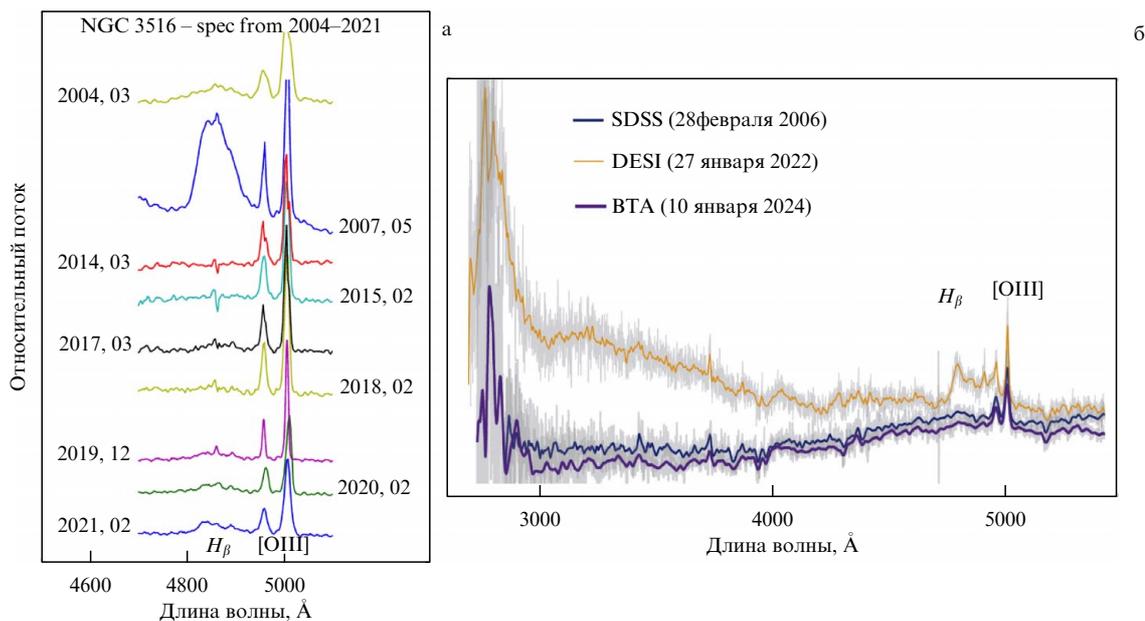


Рис. 1. Примеры оптических спектров видоизменяющихся АЯГ в разные эпохи, красным отмечены положения широкой эмиссионной линии H_{β} и дублета кислорода $[O III] \lambda 4959,5007$. (а) NGC 3516 в 2004–2021 гг. [38], большая часть спектров получена на 1-м и 6-м телескопах CAO РАН. (б) Галактика на красном смещении $z = 0,34$ J075947.73 + 112507.3, показаны спектры из обзора SDSS (2006 г.), DESI (2022 г.) и с 6-м телескопа CAO РАН (2024 г.) согласно [41]. (Кредит: Astronomy & Astrophysics.)

т.е. об исчезновении или появлении широких бальмеровских линий водорода в присутствии ярких запрещённых эмиссионных линий других элементов. Интересно, что среди шести галактик вошедших в список К. Сейферта, две относятся к типу CL-AGN: NGC 3516 (рис. 1, [38]) и NGC 4151 [39]. Такое высокое число обнаружений, значительно большее, чем в других выборках, возможно, объясняется тем, что для этих классических объектов имеются наиболее продолжительные спектральные ряды, охватывающие несколько десятилетий. Среди других близких галактик этого типа весьма детально исследована NGC 1566 [40].

Изменения типа активности на шкале в несколько лет не согласуются с классической унифицированной моделью активного ядра, поскольку характерная "вязкая" временная шкала изменений аккреционного диска оценивается в $10^3 - 10^4$ лет. Хотя ряд авторов предполагает, что наблюдаемые изменения связаны со значительно более короткой "тепловой" шкалой [42]. Для объяснения видоизменяемости АЯГ предлагаются различные модели, такие как перераспределение поглощающей материи в центральной области, включая запылённый ветер от ядра, неустойчивость аккреционного диска, а также реальные изменения темпа аккреции. Но даже в последнем случае пока невозможно утверждать идёт ли речь о глобальном выключении активности на сотни тысяч или миллион лет (как в нашем Млечном Пути) или же вскоре наступит обратное переключение. Возможно, что некоторая часть случаев видоизменяющихся АЯГ родственна событиям приливного разрушения (TDE, tidal disruption event), интенсивно изучаемых в последние годы, в том числе, благодаря миссии космической рентгеновской обсерватории "Спектр-РГ" [43]. Предполагают, что эти события связаны с отдельными звёздами, слишком близко подошедших к СМЧД, так что из образовавшейся приливной структуры горячей плазмы формируется короткоживущий аккреционный диск.

Надежды на дальнейшее понимание природы видоизменяющихся АЯГ связаны с массовыми спектральными обзорами неба, которые добавляют новые эпохи измерений к уже существующим данным обзора SDSS. Прежде всего, речь идёт об упоминавшемся выше обзоре DESI, в ходе которого уже открыты очень интересные объекты. К примеру, в галактике J075947.73 + 112507.3 спектр DESI, полученный в 2022 г. указывает на наличие активного ядра, а через два года, как демонстрирует спектр с 6-м телескопа CAO РАН (см. рис. 1), характерные для АЯГ широкие линии полностью пропали, так же как это было ранее в 2006 г. в эпоху SDSS. При этом кривая блеска ядра за этот период показывает от 4 до 6 вспышек. Природа столь быстрой смены темпа аккреции пока не ясна [41].

3. Реликтовые радиоструктуры

Значительно более длинную временную шкалу активных событий дают наблюдения в радиодиапазоне. В ряде радиогромких АЯГ удаётся отследить протяжённые реликтовые структуры, указывающие на прошлую активность. Они выделяются крутым наклоном синхротронного радиоспектра, по которому в рамках определённых предположений о радиационных потерях можно оценить возраст последнего впрыска релятивистских электронов радиоджета в магнитное поле, а также особенностями в пространственном распределении радиоизлучения (наличие выраженного компактного ядра и т.д.). Здесь речь идёт о временах от 1 до 100 млн лет, в соответствии с пространственными размерами наблюдаемых структур. Подробный обзор результатов в этой области представлен в работах [36] (в которой введён термин "археология активных галактик") и [44]. Серьёзный прогресс в подобных наблюдениях связан с началом работы низкочастотных высокочувствительных радиотелескопов, обладающих также высоким угловым разре-

пением, таких как Low-Frequency Array (LOFAR). Рабочие частоты ниже 250 МГц важны для выявления наиболее старых структур с точки зрения длительности синхротронного излучения, интенсивность которого зависит от частоты как $I_\nu \sim \nu^{-\alpha}$, $\alpha > 1$. Частота встречаемости случаев повторного запуска активности в радиодиапазоне (restarted AGN) в глубоких наблюдениях с LOFAR составляет около 13–15 % [45]. Благодаря таким наблюдениям удается проследить целую серию вспышек активности радиоджета. Например, в J1225+4011 наблюдаются следы трёх пар радиоструктур размером 118, 572 и 1349 кпк, что соответствует кинематическому возрасту 2, 19 и 220 млн лет [46].

4. Ионизационное эхо

Унифицированная схема активного ядра предполагает, что аккреционный диск вокруг СМЧД окружён непрозрачным газопылевым тором. В случае самых близких АЯГ эти торы, размер которых составляет 0,5–10 пк, удаётся непосредственно наблюдать с помощью интерферометрии в ИК-диапазоне на длинах волн 8–13 мкм [47]. Коллимация тором излучения горячего аккреционного диска приводит к тому, что ионизирующее УФ-излучение распространяется в виде двух симметричных конусов. Если внутри конуса оказываются газовые облака, находящиеся как в диске галактики, так и в её окружении, то конус, или его часть может наблюдаться непосредственно в оптических эмиссионных линиях, наиболее яркой из которых, как правило оказывается дублет [O III] $\lambda 4959, 5007 \text{ \AA}$. Обзор текущего состояния исследований протяжённых (размером 10–100 кпк) конусов ионизации представлен в нашей недавней работе [48].

На рисунке 2 показан один из характерных примеров конусов ионизации — случай близкой галактики Mrk 6. С помощью 6-м телескопа CAO РАН здесь обнаружены филаменты ионизованного газа, протянувшиеся до расстояний 40 кпк от ядра, за пределы звёздного диска. Наблюдаемое распределение лучевых скоростей объясняется в предположении, что излучение АЯГ ионизовало газ, захваченный Mrk 6 из межгалактической среды [49].

Если производство ядром ионизирующих фотонов заметно уменьшается, то наблюдается эффект ионизационного эха — внешние облака газа демонстрируют признаки АЯГ, но само ядро уже таковых не имеет. Если время высвечивания в линиях достаточно мало, то характерное время затухания равно времени прохождения света от ядра до ионизованного облака. Прототипом этого класса объектов является Hanny's Voorwerp ("Объект Ханни") — туманность, которую волонтер проекта Зоопарк Галактик Ханни ван Аркел обнаружила на снимках SDSS рядом со спиральной галактикой IC 2497. Спектр туманности содержит характерные линии АЯГ, в то время как светимость инфракрасной области спектра указывает на то, что в самом ядре активность отсутствует, а не скрыта пылевым экраном. Наблюдаемая картина объясняется в предположении, что активность ионизирующего источника снизилась почти на два порядка за последние 10^5 лет [50].

Сперва случаи фиксации ионизационного эха имели случайный характер, но для уверенных выводов об истории ионизирующей активности АЯГ необходимо работать со статистически значимыми выборками объектов.

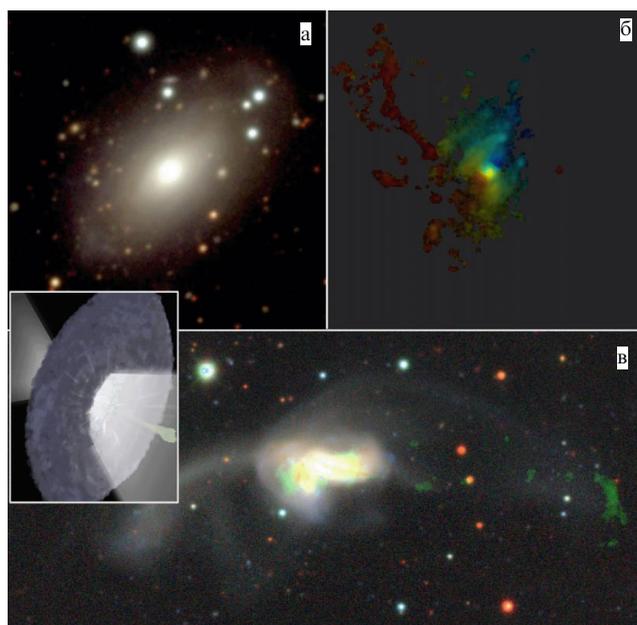


Рис. 2. Примеры конусов ионизации. (а) Глубокое оптическое изображение галактики Mrk 6, полученное с помощью 6-м телескопа CAO РАН и распределение ионизованного газа в том же масштабе (б), согласно [49]. Яркость соответствует логарифму интенсивности в линии $H\alpha$, цвет — лучевым скоростям газа ($-100 \dots +200 \text{ км с}^{-1}$ для синего и красного соответственно). (в) Изображение NGC 5514 в DESI Legacy survey. Зелёным цветом показано распределение излучения в линии ионизованного кислорода согласно наблюдениям с прибором MaNGA на 2.5-м телескопе ГАИШ МГУ. На врезке — художественное изображение конуса ионизации. (Рисунок Е.А. Мальгина (CAO РАН).)

Остановимся на наиболее важных результатах в этой области, отсылая за подробностями к обзору [48].

Среди 20 галактик с протяжёнными эмиссионными структурами, обнаруженными волонтерами проекта Зоопарк Галактик и подтвержденными спектральными наблюдениями, в семи имеет место затухание активности (включая Объект Ханни) [51]. Дальнейшее исследование истории их активности выполнялось на основе данных космического телескопа им. Хаббла (изображения в эмиссионных линиях и спектроскопия) [52–54] и методами 3D-спектроскопии с помощью 6-м телескопа CAO РАН [52], 8-м телескопов Gemini и VLT [53, 55] и архивных данных обзора MaNGA [56]. Спектральные наблюдения необходимы для доказательства того, что наблюдаемый газ является динамически холодным и ионизован именно излучением ядра. Показано, что в этих галактиках светимость ядра менялась на фактор 0,2–3 dex за последние $(4–8) \times 10^4$ лет [55].

Целенаправленный поиск внешних, ионизованных излучением ядра облаков среди близких галактик ($z < 0,03$) на уровне яркости на порядок ниже, чем у Объекта Ханни в рамках проекта TELPERION (Tracing Emission Lines Probing Extended Regions Ionized by Once-active Nuclei) привёл к обнаружению ещё трёх случаев затухающей активности в ограниченной по светимости выборке 111 АЯГ [57]. Наиболее впечатляющий пример взаимодействующей системы NGC 5514 в которой ионизирующая активность уменьшилась более чем в 3 раза за последние 250 тыс. лет. показан на рис. 2. Удалось оценить частоту встречаемости таких облаков: они обнару-

живаются среди $\sim 2\%$ близких АЯГ, причём эта доля возрастает до 12% всех активных галактик, имеющих заметные приливные структуры, поскольку увеличивается вероятность получить удобный "экран", отслеживающий конус ионизации [58].

Среди 93 АЯГ переживших недавнюю вспышку звездообразования в обзоре SDSS/MaNGA обнаружено 6 случаев протяжённых эмиссионных областей, в пяти из которых прослеживаются признаки падения ионизирующей активности. Везде речь идёт о временах короче 100 тыс. лет, что является следствием ограниченного поля зрения спектрографа [59]. Отметим, что потенциал обзора MaNGA, в ходе которого получены данные 3D-спектроскопии более чем 10 000 галактик ещё не полностью реализован в этом направлении.

И хотя сейчас известно всего около дюжины галактик с выявленными следами падения ионизирующей активности, этот список будет пополняться благодаря новым глубоким обзорам неба. Так, уже на первых представленных снимках LSST (Legacy Survey of Space and Time) обнаружено 5 новых протяжённых конусов ионизации [60]. Основной проблемой по-прежнему является необходимость выполнения последующей спектроскопии объектов низкой поверхностной яркости, для которой требуются телескопы диаметром не меньше 3–4 метров.

5. Галактики с переключением режимов активности

В литературе обычно отдельно рассматривают признаки затухания для радиогромких и радиотихих АЯГ, поскольку эти типы объектов связывают с разными темпами аккреции (низким или высоким, близким к эддингтоновскому пределу), или кинетическим и радиацион-

ным типом активности соответственно [36]. Но благодаря накоплению многоволновых данных для близких АЯГ, обнаружено, что ядро галактики могло переключиться из кинетического в радиационный режим или наоборот. Детального теоретического объяснения такого поведения пока нет, но скорее всего важную роль здесь играет воздействие, которое ядро производило на межзвёздную среду галактики на предыдущем этапе активности [63]. Пока речь идёт всего о нескольких галактиках, рассмотренных ниже. Оптические и радио изображения трёх из них приведены на рис. 3.

Так, в самом Объекте Ханни — IC 2497 обнаружены следы реликтового радиоджета возрастом около 100 млн лет [64]. Возможно, что недавно исследованная нами на 2.5-м телескопе ГАИШ МГУ и 6-м телескопе CAO РАН галактика Mrk 783 является примером перехода к состоянию, наблюдаемому в Объекте Ханни [62]. Здесь присутствует протяжённая старая радиоструктура, конус ионизации, возрастом не менее 10^5 лет, затрагивающий диск галактики-спутника на проекционном расстоянии около 100 кпк и внутренний компактный радиоджет не совпадающий с ними по направлению.

В NGC 5972 одновременно сосуществует затухающий (на шкале несколько десятков тыс. лет) ионизационный конус и перпендикулярная к нему реликтовая структура, типичная для радиогалактики, активность которой завершилась не менее десятка миллионов лет назад [54]. Такое рассогласование пространственных направлений возможно вызвано наличием в ядре двойной СМЧД. В радиогалактике Mrk 1498 также сосуществуют реликтовая радиоструктура (возраст около 100 млн лет), текущая активность в радиодиапазоне и затухающий конус ионизации, не совпадающий со старой радиоструктурой [65].

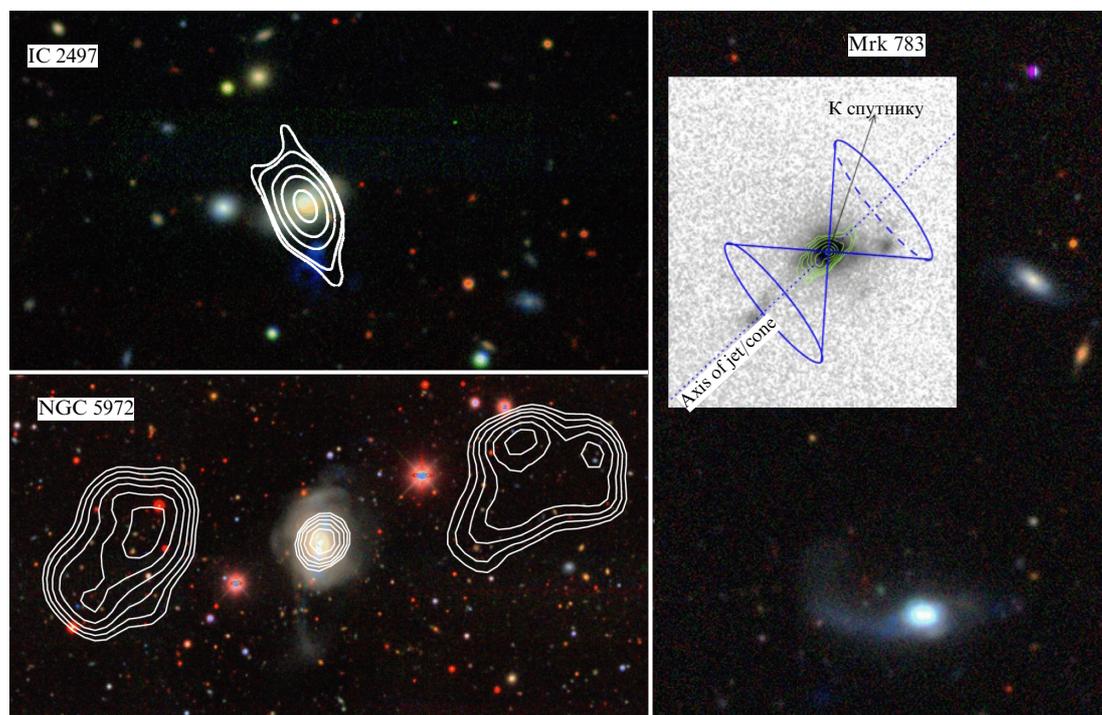


Рис. 3. Оптические изображения галактик с переключением режима аккреции из обзора DESI Legacy Survey. Для IC 2497 и NGC 5972 показаны изолинии распределения синхротронного радиоизлучения из [61] и архива NRAO/VLA Sky Survey в полосе L, соответственно. На врезке для Mrk 783 приведено изображение в [O III], полученное на 2.5-м телескопе ГАИШ МГУ с нанесёнными радиокартами и схемой расположения конуса ионизации [62].

Интересен более далёкий объект RGZ J123300.2 + 060325 (красное смещение $z = 0,3$), в котором одновременно наблюдаются протяжённый радиоджет возрастом около 6 млн лет и конус ионизации, указывающий на сильное уменьшение УФ-светимости ядра за последние 150 тыс. лет [66]. Эта галактика относится к типу, называемому "зелёная фасоль" (green bean). Они считаются родственными Объекту Ханни, но демонстрируют на порядок более высокую светимость, представляя собой эхо ионизации от мощных квазаров, а не галактики Сейферта. В обзоре SDSS было найдено всего 17 "фасолин", находящихся на красных смещениях $z = 0,2-0,6$ [67]. На оптических снимках они выглядят вытянутыми и ярко-зелёными благодаря заметному красному смещению линии [O III] в область г-фильтра. Этот список был недавно расширен до 166 кандидатов в "зелёную фасоль", пять из которых уже получило спектральное подтверждение, как реальные конусы ионизации [68].

С целью получения новых наблюдательных данных об объектах, которые удалось застать в редкий момент переключения режима активности, нами в 2025 г. на 6-м телескопе САО РАН начата программа по комплексному исследованию кинематики, морфологии и состояния ионизации в выборке "зелёных фасолин" с протяжёнными радиоструктурами.

6. Заключение

С точки зрения "археологического изучения" активности галактик отметим следующие, наиболее важные, по мнению авторов моменты:

1. Наблюдения протяжённых (и удалённых) эмиссионных облаков позволяют получать информацию о кинематике и состоянии ионизации газа на расстояниях до 100 кпк от активных галактик и выполнять изучение ионизирующей активности их ядер на временной шкале 10^4-10^6 лет.

2. В ряде близких ($z < 0,3$) активных галактик мы видим свидетельства перехода между разными режимами аккреции (доминирование конуса излучения либо — радиоджета) на характерной шкале $\sim 10^5$ лет. Смена темпа аккреции возможно связана с воздействием, произведённым на межзвёздную среду галактики на предыдущем этапе активности.

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утверждённого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Часть представленных результатов получена на 6-м телескопе САО РАН, наблюдения на котором выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта "Наука и университеты".

Список литературы

1. Terlevich R "Star formation in galactic nuclei" *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.* **21** 163 (1990)
2. Plavin A V et al. "Directional association of TeV to PeV astrophysical neutrinos with radio blazars" *Astrophys. J.* **908** 157 (2021)
3. Seyfert C K "Nuclear emission in spiral nebulae" *Astrophys. J.* **97** 28 (1943)
4. Schmidt M "3C 273: A star-like object with large red-shift" *Nature* **197** 1040 (1963)
5. Маркарян Б Е *Астрофизика* **3** 55 (1967)
6. Trefoloni B et al. "The most luminous blue quasars at $3.0 < z < 3.3$ III. LBT spectra and accretion parameters" *Astron. Astrophys.* **677** A111 (2023)
7. Черепашук А М "Поиски черных дыр" *УФН* **173** 345 (2003); Cherepashchuk A M *Phys. Usp.* **46** 335 (2003)
8. Черепашук А М "Наблюдения звёздных и сверхмассивных чёрных дыр" *УФН* **186** 778 (2016); Cherepashchuk A M "Observing stellar mass and supermassive black holes" *Phys. Usp.* **59** 702 (2016)
9. Akiyama K et al. (Event Horizon Telescope Collab.) "First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way" *Astrophys. J. Lett.* **930** L12 (2022)
10. Akiyama K et al. (Event Horizon Telescope Collab.) "First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the central supermassive black hole" *Astrophys. J. Lett.* **875** L4 (2019)
11. Gebhardt K et al. "A relationship between nuclear black hole mass and galaxy velocity dispersion" *Astrophys. J. Lett.* **539** L13 (2000)
12. Ferrarese L, Merritt D "A fundamental relation between supermassive black holes and their host galaxies" *Astrophys. J. Lett.* **539** L9 (2000)
13. Kormendy J, Kennicutt R C (Jr.) "Secular evolution and the formation of pseudobulges in disk galaxies" *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **42** 603 (2004)
14. Pucha R et al. "Tripling the census of dwarf AGN candidates using DESI early data" *Astrophys. J.* **982** 10 (2025)
15. Дибай Э А *Письма в Астрон. журн.* **3** 3 (1977); Dibai E A "Mass of the central bodies of active galaxy nuclei" *Sov. Astron. Lett.* **3** 1 (1977)
16. Kauffmann G et al. "The host galaxies of active galactic nuclei" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **346** 1055 (2003)
17. Ho L C "Nuclear activity in nearby galaxies" *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **46** 475 (2008)
18. Combes F "Fueling the AGN", in *Advanced Lectures on the Starburst-AGN Connection, Proc. of a Conf., Tonantzintla, Puebla, Mexico, 26-30 June, 2000* (Eds I Aretxaga, D Kunth, R Mujica) (Singapore: World Scientific, 2001) p. 223, DOI:10.1142/9789812811318_0006
19. Raimundo S I, Malkan M, Vestergaard M "An increase in black hole activity in galaxies with kinematically misaligned gas" *Nature Astron.* **7** 463 (2023)
20. Zhou Y et al. "Misaligned external gas acquisition boosts central black hole activities" *Astrophys. J.* **994** 9 (2025)
21. Смирнов Д В, Решетников В П *Письма в Астрон. журн.* **46** 535 (2020); Smirnov D V, Reshetnikov V P "Active galactic nuclei among polar-ring galaxies" *Astron. Lett.* **46** 501 (2020)
22. Khrapov S S, Khoperskov A V "Retrograde infall of the intergalactic gas onto S-galaxy and activity of galactic nuclei" *Open Astron.* **33** 20220231 (2024)
23. Sharov A S, Efremov Yu N "On the light variability of the object identified with the radio source 3C 273" *Inform. Bull. Variable Stars* (23) 1 (1963)
24. Smith H J, Hoffleit D "Light variations in the Superluminous Radio Galaxy 3C273" *Nature* **198** 650 (1963)
25. Дибай Э А, Проник В И *Астрон. журн.* **44** 952 (1967); Dibai E A, Pronik V I *Sov. Astron.* **11** 767 (1968)
26. Cherepashchuk A M, Lyutyi V M "Rapid variations of H α intensity in the nuclei of Seyfert Galaxies NGC 4151, 3516, 1068" *Astrophys. Lett.* **13** 165 (1973)
27. Couto G S, Storchi-Bergmann T "The interplay between radio AGN activity and their host galaxies" *Galaxies* **11** (2) 47 (2023)
28. Silk J, Mamon G A "The current status of galaxy formation" *Res. Astron. Astrophys.* **12** 917 (2012)
29. Pillepich A et al. "Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **473** 4077 (2018)
30. Сильченко О К "Эмпирические сценарии эволюции галактик" *УФН* **192** 1313 (2022); Sil'chenko O K "Empirical scenarios of galaxy evolution" *Phys. Usp.* **65** 1224 (2022)
31. Predehl P et al. "Detection of large-scale X-ray bubbles in the Milky Way halo" *Nature* **588** 227 (2020)

32. Yang H-Y K, Ruzkowski M, Zweibel E G "Fermi and eROSITA bubbles as relics of the past activity of the Galaxy's central black hole" *Nature Astron.* **6** 584 (2022)
33. Bland-Hawthorn J et al. "The large-scale ionization cones in the Galaxy" *Astrophys. J.* **886** 45 (2019)
34. Fox A J et al. "Kinematics of the Magellanic Stream and implications for its ionization" *Astrophys. J.* **897** 23 (2020)
35. Pshirkov M S, Vasiliev V V, Postnov K A "Evidence of Fermi bubbles around M31" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **459** L76 (2016)
36. Morganti R "Archaeology of active galaxies across the electromagnetic spectrum" *Nature Astron.* **1** 39 (2017)
37. Ruan J J et al. "Toward an understanding of changing-look quasars: An archival spectroscopic search in SDSS" *Astrophys. J.* **826** 188 (2016)
38. Popović L Č et al. "Long-term optical spectral monitoring of a changing-look active galactic nucleus NGC 3516. II. Broad-line profile variability" *Astron. Astrophys.* **675** A178 (2023)
39. Feng H-C et al. "Velocity-resolved reverberation mapping of changing-look active galactic nucleus NGC 4151 during outburst stage. II. Results of four seasons of observation" *Astrophys. J.* **976** 176 (2024)
40. Oknyansky V L et al. "New changing look case in NGC 1566" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **483** 558 (2019)
41. Guo W-J et al. "Multiple flares and asymmetric broad emission lines in a recurring changing-look active galactic nucleus" *Astron. Astrophys.* **698** A135 (2025)
42. Graham M J et al. "Understanding extreme quasar optical variability with CRTS - II. Changing-state quasars" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **491** 4925 (2020)
43. Sazonov S et al. "First tidal disruption events discovered by SRG/eROSITA: X-ray/optical properties and X-ray luminosity function at $z < 0.6$ " *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **508** 3820 (2021)
44. Morganti R "What have we learned about the life cycle of radio galaxies from New Radio Surveys" *Galaxies* **12** (2) 11 (2024)
45. Jurlin N et al. "The life cycle of radio galaxies in the LOFAR Lockman Hole field" *Astron. Astrophys.* **638** A34 (2020)
46. Chavan K, Dabhade P, Saikia D J "A giant radio galaxy with three cycles of episodic jet activity from LoTSS DR2" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **525** L87 (2023)
47. Vermot P et al. "The inner hot dust in the torus of NGC 1068. A 3D radiative model constrained with GRAVITY/VLTi" *Astron. Astrophys.* **652** A65 (2021)
48. Moiseev A V, Smirnova A A "Ionizing spotlight of active galactic nucleus" *Galaxies* **11** (6) 118 (2023)
49. Smirnova A A, Moiseev A V, Dodonov S N "A close look at the well-known Seyfert galaxy: extended emission filaments in Mrk 6" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **481** 4542 (2018)
50. Lintott C J et al. "Galaxy Zoo: 'Hanny's Voorwerp', a quasar light echo?" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **399** 129 (2009)
51. Keel W C et al. "The Galaxy Zoo survey for giant AGN-ionized clouds: past and present black hole accretion events" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **420** 878 (2012)
52. Keel W C et al. "HST imaging of fading AGN candidates. I. Host-galaxy properties and origin of the extended gas" *Astron. J.* **149** 155 (2015)
53. Keel W C et al. "Fading AGN candidates: AGN histories and outflow signatures" *Astrophys. J.* **835** 256 (2017)
54. Harvey T et al. "Signatures of feedback in the spectacular extended emission region of NGC 5972" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **526** 4174 (2023)
55. Finlez C et al. "The luminosity history of fading local quasars over 10^{4-5} years as observed by VLT-MUSE" *Astron. Astrophys.* **703** A63 (2025)
56. Mo H et al. "Properties of a fading AGN from SDSS-IV MaNGA" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **529** 4500 (2024)
57. Keel W C et al. "The TELPERION survey for distant [O iii] clouds around luminous and hibernating AGN" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **510** 4608 (2022)
58. Keel W C et al. "The TELPERION survey for extended emission regions around active galactic nuclei: a strongly interacting and merging galaxy sample" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **530** 1624 (2024)
59. French K D et al. "Fading AGNs in poststarburst galaxies" *Astrophys. J.* **950** 153 (2023)
60. Jonkeren A F, Keel W C "Candidate AGN extended emission-line regions in the Rubin Virgo field" *Res. Notes AAS* **9** 201 (2025) DOI:10.3847/2515-5172/adf324
61. Józsa G I G et al. "Revealing Hanny's Voorwerp: radio observations of IC 2497" *Astron. Astrophys.* **500** L33 (2009)
62. Moiseev A V, Smirnova A A, Movsessian T A "Enigmatic emission structure around Mrk 783: Cross-ionization of a companion 100 kpc away" *Universe* **9** (12) 493 (2023)
63. Hopkins P F, Elvis M "Quasar feedback: more bang for your buck" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401** 7 (2010)
64. Smith D J B et al. "Relic jet activity in 'Hanny's Voorwerp' revealed by the LOFAR two metre sky survey" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **514** 3879 (2022)
65. Cazzolli S et al. "Clues of the restarting active galactic nucleus activity of Mrk 1498 from GTC/MEGARA integral field spectroscopy data" *Astron. Astrophys.* **690** A251 (2024)
66. Sanderson K N et al. "Signatures of active galactic nucleus feedback modes: A Green Bean Galaxy with 150 kpc jet-induced radio emission" *Astrophys. J.* **971** 20 (2024)
67. Schirmer M et al. "A sample of Seyfert-2 Galaxies with ultraluminous Galaxy-wide Narrow-Line Regions: Quasar light echoes" *Astrophys. J.* **763** 60 (2013)
68. Dijeau A F, Prescott M K M, Sanderson K N "The Green Chile Project. I. A new catalog of low-redshift extended emission-line nebulae" *Astron. J.* **169** 207 (2025)

Archaeology of galactic nuclei activity

A.V. Moiseev^(a), A. Arshinova^(b), A.A. Smirnova^(c)

Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences,

Nizhnii Arkhyz, Zelenchukskiy region, Karachai-Cherkessian Republic, Russian Federation

E-mail: ^(a) moisav@sao.ru, ^(b) arina.arshinova@gmail.com, ^(c) ssmirnova@gmail.com

Considerable observational evidence suggests that the activity of supermassive black holes in galactic nuclei is transient. The term "active galactic nuclei archaeology" has even been coined. This implies the possibility of reconstructing the history of activity, such as changes in the nuclear luminosity over time across various ranges of the electromagnetic spectrum, by analysing how this activity manifested itself on galactic and extragalactic spatial scales. These phenomena include relic radio structures, gas clouds illuminated by the 'ionising echo' of past activity, and Fermi/eROSITA bubbles. We provide a review of the results galactic nucleus activity studies, focusing on its observable impact on the intergalactic medium and circumgalactic environment. Our main focus is on optical observations of ionisation cones and evidence of switching between radiative (ionisation cones) and kinetic (radio jets) modes of nuclear activity.

Keywords: active galactic nuclei, galaxies, interstellar medium, high energy physics

PACS number: 98.54.Cm

Bibliography — 68 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **196** (3) 257–263 (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.040022>

Received 25 August 2025

Physics – Uspekhi **69** (3) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.03.040022>