

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 524.7-82

Михайлов Александр Геннадьевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ СВЕРХМАССИВНЫХ
ЧЕРНЫХ ДЫР И ИССЛЕДОВАНИЕ
РАДИОСВОЙСТВ АКТИВНЫХ ЯДЕР
ГАЛАКТИК**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, с.н.с. лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов САО РАН
Пиотрович Михаил Юрьевич

Официальные оппоненты: **Бикмаев Ильфан Фяритович**,
доктор физико-математических наук, доцент, член-корр. АН Республики Татарстан, профессор кафедры астрономии и космической геодезии Института Физики Казанского (Приволжского) Федерального университета, старший научный сотрудник

Харинов Михаил Александрович,
кандидат физико-математических наук, Институт прикладной астрономии Российской академии наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится " " _____ 2022 г. в " " часов на заседании диссертационного совета Д 002.203.01 на базе САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " " _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Шолухова О. Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. К настоящему времени концепция черных дыр прочно утвердилась в астрофизике. Идеи, основанные на рассмотрении аккрецирующих черных дыр помогают объяснить многие явления как в масштабах Галактики, так и феномены, связанные с активными ядрами галактик (АЯГ) [1–3]. Черная дыра может быть полностью охарактеризована массой M_{BH} и угловым моментом вращения J (формально, у черной дыры еще может быть электрический заряд, но на практике его, как правило, не рассматривают). Часто используется безразмерный угловой момент вращения (спин) $a = cJ/GM_{BH}^2$, где c — скорость света, а G — гравитационная постоянная. В связи с этим, важнейшую роль приобретает разработка методов определения этих величин из наблюдательных данных. Методы определения массы достаточно развиты и позволяют получить оценки масс сверхмассивных черных дыр (СМЧД) для больших выборок объектов. Более сложная ситуация с определением спина. Наиболее популярными и хорошо разработанными к настоящему времени являются следующие методы: 1) анализ профиля рентгеновской линии железа FeK_{α} ; 2) анализ распределения излучения континуума аккреционного диска [4–6]. Первый из этих методов требует высококачественных спектров. Это условие ограничивает выборку объектов, к которым его в настоящее время можно применить, объектами с красными смещениями до 0.1. Указанным методом получены ограничения величины спина для нескольких десятков объектов (около 30–40). Метод анализа распределения излучения континуума, в свою очередь, требует проведения одновременных наблюдений в широком спектральном диапазоне, что также довольно сложно. Тем не менее, с учетом возможностей современных обсерваторий, данный метод позволяет получать ограничения величины спина для объектов с красным смещением до 1.5 [7].

Учитывая ограниченность выборки СМЧД, для которых получены ограничения величины спина, особый интерес представляет разработка и применение других методов. В данной работе используется подход, основу которого составляет предположение о зависимости мощности джета от величины спина СМЧД. Современные модели генерации релятивистских джетов привлекают действие механизмов Блэндфорда-Знайека и/или Блэндфорда-Пейна [8; 9]. За основу мы берем гибридные модели, в которых джет производится

совместным действием указанных механизмов [10—12]. Несмотря на неизбежную модельную зависимость этого подхода мы получаем возможность исследования больших по объему выборок с целью получения ограничений на величину спина. Полученные результаты могут использоваться, с одной стороны, для проверки моделей генерации релятивистских струй при помощи наблюдательных данных и способствовать дальнейшему прогрессу в этой области; а, с другой стороны, для проверки численных моделей эволюции СМЧД в ядрах галактик на космологических временах. Анализ диаграмм “масса–спин” и сопоставление их с теоретическими предсказаниями открывает возможность исследования характера и истории аккреции на центральную СМЧД.

Наблюдения АЯГ проводятся не только в видимом и рентгеновском диапазонах, но и в радиодиапазоне. Современные исследования показывают, что в ближней Вселенной среди популяции внегалактических радиоисточников численно преобладают компактные объекты относительно небольшой мощности, т. н. радиогалактики FR0 [13; 14]. Однако их природа и взаимосвязь с другими классами радиогромких АЯГ остается малоисследованной. Распространенность галактик FR0 предполагает, что феномен их активности связан с наиболее общими физическими механизмами. Изучение радиогалактик FR0 существенно расширяет исследуемый энергетический диапазон, что также важно с точки зрения изучения универсальных закономерностей и соотношений, которым следуют АЯГ. Важное значение при исследовании внегалактических радиоисточников имеют наблюдения в сантиметровом диапазоне. Радиотелескопы с возможностью измерения мгновенных радиоспектров в широком диапазоне частот обладают несомненным преимуществом. К числу таких инструментов относится РАТАН-600, который также позволяет проводить мониторинговые наблюдения больших выборок объектов [15—17].

Исследование радиосвойств АЯГ на больших красных смещениях важно с точки зрения изучения эволюции активных ядер и воздействия их в процессах обратной связи (feedback) на родительскую галактику и крупномасштабную структуру Вселенной [18; 19]. Ключевое значение имеет исследование связи “диск–джет”, доли радиогромких квазаров, функции радиосветимости и их возможной эволюции с красным смещением [20—22]. Однако, вплоть до недавнего времени, отмечался недостаток работ, посвященных исследова-

нию радиосвойств АЯГ на больших красных смещениях: предельно далекие объекты изучались, в основном, средствами оптических инструментов.

Целью данной работы является определение физических параметров СМЧД в выборках АЯГ различных типов и исследование их радиосвойств.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Сопоставление современных подходов и методов определения спина ЧД, развитие метода расчета величины спина на основе гибридных моделей формирования джетов.
2. Формирование выборок, расчет величины спина СМЧД, построение диаграмм “масса–спин”, анализ полученных результатов.
3. Оценка величины магнитного поля в окрестности СМЧД в АЯГ, анализ зависимостей между величиной магнитного поля и массой СМЧД, эддингтоновским отношением, радиационной эффективностью.
4. Сбор литературных данных об измерениях в радиоконтинууме, угловой структуре радиогалактик FR0, квазаров и блазаров на больших красных смещениях, формирование выборок.
5. Подготовка и проведение наблюдений на РАТАН-600, калибровка и обработка измерений.
6. Определение параметров радиоизлучения исследованных объектов, анализ полученных результатов.

Научная новизна:

1. Для большинства объектов в изученных выборках ограничения величины спина СМЧД получены впервые. Впервые построены диаграммы “масса–спин” для СМЧД в выборках АЯГ следующих типов: радиогалактик типа FRI (Fanaroff-Riley Type I) и FRII (Fanaroff-Riley Type II), квазаров на больших красных смещениях $z > 4$.
2. Впервые выполнены оценки величины магнитного поля в аккреционном диске и на горизонте событий СМЧД в 28 радиоквазарах. Для выборки 52 АЯГ 1 типа впервые установлено обратное соотношение между величиной магнитного поля на горизонте событий и массой черной дыры: $\log B_H \sim -0.7 \log M_{BH}$.

3. Новые данные многочастотных измерений на РАТАН-600 спектральных плотностей потоков выборки 34 радиогалактик FR0. Впервые измерены квазиодновременные радиоспектры объектов в диапазоне 2 – 22 ГГц. Впервые показана двухкомпонентность среднего радиоспектра FR0 в сантиметровом диапазоне.
4. Показано, что среди квазаров на больших красных смещениях $z \geq 3$ половина объектов характеризуется радиоспектрами с пиком. По новым данным измерений РАТАН-600 оценены значения радиогромкости и радиосветимости. Впервые построен средний радиоспектр объектов в интервале красных смещений $z = 3.0 - 3.8$ с шагом $\Delta z = 0.1$. Независимо измерен радиоспектр блазара J0309+2717 на $z = 6.1$, впервые получена его кривая блеска на 4.7 ГГц на масштабе около полутора лет.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты могут быть использованы для тестирования современных моделей генерации джетов и механизмов энерговыделения в центральной машине на основе наблюдательных данных, тем самым способствуя дальнейшему прогрессу в этой области. Диаграммы “масса–спин” могут быть использованы для исследования истории и характера аккреции в центрах галактик путем сопоставления с результатами численного моделирования. В частности, анализ подобных диаграмм может выявить степень анизотропии аккреционных событий в процессе эволюции СМЧД.

Обширный наблюдательный материал, полученный для радиогалактик FR0, позволяет исследовать их взаимосвязь с другими классами внегалактических радиоисточников, что имеет ключевое значение для понимания природы объектов данного класса и природы активности в источниках ближней Вселенной. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования континуальных радиоспектров и оценки физических условий в радиоисточниках. Многочастотные измерения спектральных плотностей потоков далеких квазаров на $z \geq 3$ могут использоваться для построения функции радиосветимости АЯГ в ранней Вселенной и исследования связи “диск–джет”, что имеет ключевое значение при тестировании моделей аккреционных течений и запуска релятивистских джетов.

Достоверность

Достоверность полученных результатов обусловлена и обеспечена современным уровнем развития теоретических представлений о центральной машине АЯГ, а также известной точностью использованных наблюдательных данных. Достоверность результатов измерений спектральных плотностей потоков на РАТАН-600 обеспечена использованием штатных методов наблюдений и калибровки наблюдательных данных. Спектральные плотности потоков объектов измерены на шести частотах одновременно, что позволило исключить влияние систематических ошибок измерений и переменности объектов на результат.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты определения величин спинов СМЧД в АЯГ на основе гибридных моделей генерации релятивистских джетов для выборок АЯГ различных типов. Типичные значения полученных спинов лежат в пределах $0.5 < a < 0.9$.
2. Результаты определения величины магнитного поля на горизонте событий СМЧД в 52 АЯГ 1 типа. Показано, что типичное значение магнитного поля составляет $B_H = 10^4$ Гс, что согласуется с результатами других авторов. Найдена обратная зависимость величины магнитного поля от массы черной дыры: $\log B_H \sim -0.7 \log M_{BH}$.
3. Результаты многочастотных измерений на РАТАН-600 спектральных плотностей потоков 34 радиогалактик FR0 на частотах 2.3, 4.7, 8.2, 11.2, 22.3 ГГц. Получена спектральная классификация FR0, показано, что преобладает пиковая форма спектра. Установлена двухкомпонентность среднего спектра. Определены радиосвойства объектов в сантиметровом диапазоне: характерная радиосветимость $10^{38.8} - 10^{40.6}$ эрг/с, доминирование радиоядра ($\log R \approx -0.1$). Показано, что 10 % исследованных радиогалактик FR0 могут быть отнесены к GPS источникам небольшой мощности ($L_{4.7} \approx 10^{40}$ эрг/с).
4. Определены радиосвойства полной по спектральной плотности потока ($S_{1.4} > 100$ мЯн) выборки 102 квазаров на $z \geq 3$: характерные радиосветимость $L_{4.7} = 2 \times 10^{44}$ эрг/с, радиогромкость $\log RL = 3.5$. Установлено, что для исследованных объектов характерен спектр с пиком, что означает доминирующий вклад излучения яркого компактного ядра в наблюдаемый радиоспектр. Для одного из самых

далеких блазаров $z = 6.1$ измерен спектр на 4.7 – 11.2 ГГц. Кривая блеска объекта на частоте 4.7 ГГц, полученная на масштабе 1.5 года, выявила переменность на уровне 30 %.

Апробация работы.

Результаты исследований были лично представлены диссертантом на следующих российских и международных конференциях:

1. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», НЕА-13 (Москва, ИКИ РАН, 23-26 декабря 2013). Стендовый доклад «Оценка величин спинов сверхмассивных черных дыр в активных галактических ядрах» // А.Г. Михайлов, Ю.Н. Гнедин.
2. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», НЕА-15 (Москва, ИКИ РАН, 21-24 декабря 2015). Стендовый доклад «Прямая связь между спином сверхмассивной черной дыры и фактором Эддингтона для аккреционного диска в активных ядрах галактик» // М.Ю. Пиотрович, С.Д. Булига, Ю.Н. Гнедин, А.Г. Михайлов, Т.М. Нацвлишвили, Н.А. Силантьев.
3. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», НЕА-16 (Москва, ИКИ РАН, 20-23 декабря 2016). Стендовый доклад «Определение величин спинов сверхмассивных черных дыр в радиогалактиках типа FRI и FRII» // А.Г. Михайлов.
4. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», НЕА-17 (Москва, ИКИ РАН, 18-21 декабря 2017). Стендовый доклад «Критерии ретроградного вращения аккрецирующих черных дыр» // А.Г. Михайлов, М.Ю. Пиотрович, Ю.Н. Гнедин, Т.М. Нацвлишвили, С.Д. Булига.
5. Конкурс-конференция работ сотрудников САО - 2019 год (Нижний Архыз, САО РАН, 7 февраля 2019). Устный доклад «Ограничения величины спина сверхмассивных черных дыр в активных ядрах галактик» // А.Г. Михайлов.
6. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», НЕА-19 (Москва, ИКИ РАН, 17-20 декабря 2019). Стендовый доклад «Радиосвойства галактик FR0» // А.Г. Михайлов.

7. Всероссийская конференция «Наземная астрономия в России. XXI век» (Нижний Архыз, САО РАН, 21-25 сентября 2020). Устный доклад «Радиосвойства галактик FR0: наблюдения на РАТАН-600» // А.Г. Михайлов.
8. Конкурс-конференция работ сотрудников САО - 2021 год (Нижний Архыз, САО РАН, 9 февраля 2021). Устный доклад «Радиосвойства квазаров на красных смещениях $z \geq 3$ » // А.Г. Михайлов, Ю.В. Сотникова, Т.В. Муфахаров, Н.Н. Бурсов, М.Г. Мингалиев, В.А. Столяров, А.А. Кудряшова, П.Г. Цыбулев, Т.А. Семенова, Н.А. Нижельский, А.К. Эркенов.
9. Международная конференция: Идеи С.Б. Пикельнера и С.А. Каплана и современная астрофизика (Москва, ГАИШ МГУ, 8-12 февраля 2021). Устный доклад «Свойства радиогалактик FR0 в сантиметровом диапазоне» // А.Г. Михайлов.
10. Международная конференция «6th workshop on Compact Steep Spectrum and GHz-Peaked Spectrum radio sources» (Torun, Poland, 10-14 May 2021). Устный доклад «The relationship between FR0 radio galaxies and GPS sources» // A.G. Mikhailov, Yu.V. Sotnikova.
11. Конференция пользователей российских телескопов (Нижний Архыз, САО РАН, 13 мая 2021). Устный доклад «Наблюдения радиогалактик FR0 на РАТАН-600» // A.G. Mikhailov.
12. ВСЕРОССИЙСКАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ — 2021 (ВАК-2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований» (Москва, ГАИШ МГУ, Россия, 23-28 августа 2021 года). Устный доклад «Многочастотное исследование радиогалактик FR0 на РАТАН-600» // А.Г. Михайлов.
13. Международная конференция: Crimean-2021 AGN Conference "Galaxies with Active Nuclei on Scales from Black Hole to Host Galaxy" (Научный, КрАО РАН, 13-17 сентября 2021). Устный доклад «Determination of the spins of supermassive black holes in active galactic nuclei» // A.G. Mikhailov.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

- A1 Gnedin Yu. N., **Mikhailov A. G.**, Piotrovich M. Yu.; "The most distant quasar at $z = 7.08$: Probable retrograde rotation of an accreting supermassive black hole", *Astronomische Nachrichten*, Vol. 336, Issue 3, p. 312 (2015)
- A2 **Mikhailov A. G.**, Gnedin Yu. N., Belonovsky A. V.; "Determination of the Magnitude of the Spins of Supermassive Black Holes and the Magnetic Fields in Active Galactic Nuclei", *Astrophysics*, Vol. 58, Issue 2, pp. 157-167 (2015)
- A3 Piotrovich M. Yu., Buliga S. D., Gnedin Yu. N., **Mikhailov A. G.**, Natsvlshvili T. M.; "Dependence of the Spin of Supermassive Black Holes on the Eddington Factor for Accretion Disks in Active Galactic Nuclei", *Astrophysics*, Vol. 59, Issue 4, pp. 439-448 (2016)
- A4 **Mikhailov A. G.**, Gnedin Yu. N.; "Determination of the Spins of Supermassive Black Holes in FR I and FR II Radio Galaxies", *Astronomy Reports*, Vol. 62, Issue 1, pp. 1-8 (2018)
- A5 **Mikhailov A. G.**, Piotrovich M. Yu., Gnedin Yu. N., Natsvlshvili T. M., Buliga S. D.; "Criteria for retrograde rotation of accreting black holes", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, Vol. 476, Issue 4, pp. 4872-4876 (2018)
- A6 **Mikhailov A. G.**, Piotrovich M. Yu., Buliga S. D., Natsvlshvili T. M., Gnedin Yu. N.; "Relationship Between the Spins and Masses of Supermassive Black Holes in Distant Active Galactic Nuclei with $z > 4$ ", *Astronomy Reports*, Vol. 63, Issue 6, pp. 433-444 (2019)
- A7 Piotrovich M. Yu., **Mikhailov A. G.**, Buliga S. D., Natsvlshvili T. M.; "Determination of magnetic field strength on the event horizon of supermassive black holes in active galactic nuclei", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, Vol. 495, Issue 1, pp. 614-620 (2020)
- A8 **Mikhailov A. G.**, Sotnikova Yu. V.; "Radio Properties of FR0 Galaxies According to Multifrequency Measurements with RATAN-600", *Astronomy Reports*, Vol. 65, Issue 4, pp. 233-245 (2021)
- A9 Mufakharov T. V., **Mikhailov A. G.**, Sotnikova Yu. V., Mingaliev M. G., Stolyarov V. A., Erkenov A. K., Nizhelskij N. A., Tsybulev, P. G.; "Flux-density measurements of the high-redshift blazar PSO

- J047.4478+27.2992 at 4.7 and 8.2 GHz with RATAN-600", Mon. Not. R. Astron. Soc., Vol. 503, Issue 3, pp. 4662-4666 (2021)
- A10 **Mikhailov A. G.**, Sotnikova Yu. V.; "The relationship between FR0 radio galaxies and gigahertz-peaked spectrum sources", Astronomische Nachrichten, Vol. 342, Issue 1130, pp. 1130-1134 (2021)
- A11 Sotnikova Yu. V., **Mikhailov A. G.**, Mufakharov T. V., Mingaliev M. G., Bursov N. N., Semenova T. A., Stolyarov V. A., Udovitskiy R. A., Kudryashova A. A., Erkenov A. K.; "High-redshift quasars at $z > 3$ - I. Radio spectra", Mon. Not. R. Astron. Soc., Vol. 508, Issue 2, pp. 2798-2814 (2021)

Личный вклад.

В работе [A1] автор принимал участие в оценках физических величин. В работах [A2,A3] автором выполнены расчеты величины спина и магнитного поля, автор участвовал в написании статей наравне с соавторами. В работах [A4,A6,A8,A10] вклад автора определяющий, ему принадлежит постановка задачи, автором проведены расчеты величины спина, исследование влияние неопределенностей эмпирических соотношений на результаты, построены диаграммы "масса-спин", расчет параметров радиоизлучения. Основная работа по подготовке текста статей выполнена автором. В работах [A5,A7,A9,A11] автор выполнил расчеты величины спина и магнитного поля, радиосветимости и радиогромкости (совместно с Кудряшовой А.), принимал участие в подготовке текста статей. Автор рассчитал средние спектры квазаров в интервале красных смещений $z = 3 - 3.8$ с шагом $\Delta z = 0.1$. Во всех работах обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с соавторами.

Результаты Главы 3 получены в рамках наблюдательной программы «Спектры галактик FR0 в сантиметровом диапазоне», выполняемой на РАТАН-600 с февраля 2020 года. В данной программе автор является единственным заявителем, им осуществлена постановка задачи, подготовка наблюдательных заявок в 2020-2021 гг., подготовка наблюдений, калибровка и обработка измерений на РАТАН-600. Помимо этого, автору принадлежит постановка задачи исследования блазара на красном смещении $z = 6.1$, калибровка и обработка измерений.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 152 страницы с 38 рисунками и 21 таблицей. Список литературы содержит 204 наименования.

Во **введении** дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность диссертационного исследования, ставятся цели и задачи, отмечается научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов. Приводится список конференций, где проводилась апробация полученных результатов; список работ, содержащих основные результаты диссертации, описывается степень личного вклада в их получение. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** в п. 1.1 приводится обзор методов определения величины спина черных дыр. Отмечается, что применение методов рентгеновской отражательной спектроскопии и анализа спектрального распределения энергии ограничено возможностями существующих инструментов, поэтому в настоящее время получены ограничения спина только для небольшого числа (≈ 40) относительно близких объектов. Данное обстоятельство стимулирует поиск других подходов для определения спина черных дыр. В п. 1.2 описывается применяемый в данной работе метод, основанный на моделях энерговыделения в АЯГ в форме релятивистских джетов. Мы используем две гибридные модели, привлекающие механизмы Блэндфорда-Знаека и Блэндфорда-Пейна: модель Мейера и модель flux-trapping. Для каждой из указанных моделей выводятся уравнения, в которых соотношение между мощностью джета и болометрической светимостью аккреционного диска является некоей функцией спина черной дыры. Решение данных уравнений позволяет получить ограничение величины спина по определяемым из наблюдений величинам. Приводится сравнение получаемых данным методом результатов с результатами, полученными методом рентгеновской отражательной спектроскопии. В п. 1.3 и п. 1.4 развитый нами метод применяется для выборок радиогалактик типов FRI и FRII и далеких квазаров на красных смещениях $z > 4$. В результате построены диаграммы “масса-спин”, которые могут быть использованы для исследования вопроса о характере и истории аккреции на центральную СМЧД.

Во второй главе в п. 2.1 - 2.2 получены ограничения величины магнитного поля в аккреционном диске и на горизонте событий для выборки 28 радиоквазаров, в которых величина спина СМЧД определена методом анализа непрерывного спектра излучения аккреционного диска с некоторыми модельными предположениями о темпе аккреции вблизи последней устойчивой орбиты и взаимосвязи между величиной спина и законом степенного распределения магнитного поля в аккреционном диске. Показано, что для объектов с малым значением спина величина магнитного поля существенно превосходит значение, соответствующее случаю равномерного распределения, когда плотности давлений магнитного поля и аккрецирующего вещества равны. Данный результат свидетельствует, либо о неверности модельных предположений, использованных зарубежными авторами при вычислении спина СМЧД в выборке 28 радиоквазаров, либо требует разработки механизма существенного усиления магнитного поля. Показано, что в случае определения спина методом рентгеновской отражательной спектроскопии существенного превышения магнитного поля над равновесным значением не возникает, в большинстве объектов соотношение между плотностью энергии магнитного поля и плотностью энергии аккрецирующего вещества близко к единице. Этот результат означает, что предположение о равномерном распределении является достаточно хорошим приближением. В п. 2.3 выводится соотношение, связывающее величину магнитного поля на горизонте событий черной дыры с величинами, определяемыми из наблюдений: шириной эмиссионной линии H_{β} , углом наклона аккреционного диска i и спином. Далее это соотношение применяется для двух выборок АЯГ: 1) 36 АЯГ 1 типа у которых угол наклона аккреционного диска и спин определен из спектрополяриметрических наблюдений на БТА; 2) 16 АЯГ у которых спин определен методом рентгеновской отражательной спектроскопии. Показано, что типичное значение магнитного поля на горизонте событий СМЧД составляет около 10^4 Гс, найдена обратная зависимость величины магнитного поля от массы черной дыры. Показано, что для выборки сейфертовских галактик 1 типа плотность энергии магнитного поля на горизонте событий не превосходит плотность энергии аккрецирующего вещества.

В третьей главе в п. 3.1 приведен обзор результатов, полученных при изучении компактных радиогалактик типа FR0 зарубежными автора-

ми. Обосновывается актуальность исследования в широком диапазоне частот этой многочисленной в ближней Вселенной популяции радиоисточников. В п. 3.2 описывается выборка 34 радиогалактик FR0, методы наблюдений и обработки данных на РАТАН-600. П. 3.3 посвящен описанию основных наблюдательных результатов: плоский характер радиоспектра, доминирующая форма мгновенных спектров, радиосветимость и степень доминирования радиоядра. П. 3.4 посвящен обсуждению радиосвойств FR0 в сантиметровом диапазоне, проведено сопоставление с наблюдениями на VLA и VLBI, обсуждается местоположение FR0 на фундаментальной плоскости АЯГ. В п. 3.5 рассматривается вопрос о связи радиогалактик FR0 с GPS источниками. Рассмотрены свойства переменности на масштабе 1-1.5 лет, показано что 10 % объектов исследованной выборки могут являться GPS источниками малой мощности. Продемонстрирована неоднородность исходного каталога FR0CAT. В п. 3.6 подводятся итоги исследования радиосвойств галактик FR0 на основе квази-одновременных наблюдений на РАТАН-600.

В четвертой главе в п. 4.1 обосновывается актуальность и значение радиоизмерений далеких АЯГ с целью исследования эволюции СМЧД и понимания взаимосвязи диск-джет. В п. 4.2 приводятся результаты определения радиосвойств выборки 102 далеких квазаров на $z \geq 3$ на основе измерений спектральных плотностей потоков на РАТАН-600: результаты вычисления радиосветимости и радиогромкости, исследование возможной корреляции спектральный индекс - красное смещение. Приводятся результаты усреднения радиоспектров квазаров в интервале красных смещений $z = 3 - 3.8$ с шагом $\Delta z = 0.1$, показано доминирование компактного радиоядра в суммарном спектре и отсутствие значимой эволюции среднего радиоспектра на исследованных красных смещениях. В п. 4.3 описываются результаты исследований блазара на $z = 6.1$, обсуждаются свойства переменности объекта на масштабе 1.5 лет. Проведено сравнение свойств данного объекта с другими тремя наиболее далекими известными в настоящее время блазарами на $z > 5$.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработан метод определения спина СМЧД на основе гибридных моделей генерации релятивистских джетов. Данный метод применен для получения ограничений величины спина СМЧД в выборке

ках далеких АЯГ на $z > 4$ и радиогалактик FRI и FRII. Показано, что построенные диаграммы “масса–спин” могут быть использованы для исследования истории и характера аккреции на СМЧД.

2. Выполнены оценки величины магнитного поля в аккреционном диске и на горизонте событий СМЧД в выборках радиоквazarов и сейфертовских галактик 1 типа. Спины СМЧД в рассмотренных выборках определены независимыми методами, отличными от применявшегося нами в первой главе: XRS, TCF и методом радиационной эффективности с использованием спектрополяриметрических наблюдений. Это обстоятельство позволило показать, что предположение о равномерном распределении между плотностями энергии магнитного поля и аккрецирующего вещества является достаточно разумным. Найдено, что типичное значение магнитного поля $B_H = 10^4$ Гс, это согласуется с оценками других авторов. Установлена обратная зависимость между величиной магнитного поля и массой СМЧД.
3. Представлены результаты исследования компактных внегалактических радиоисточников класса FR0 на основе систематических квазиодновременных измерений на РАТАН-600. Важность изучения источников данного класса обусловлена их численным доминированием среди радиообъектов в ближней Вселенной. Проведенные исследования позволили надежно установить основные свойства объектов в сантиметровом диапазоне, исследовать взаимосвязь с классом молодых компактных радиоисточников GPS.
4. Определены радиосвойства АЯГ на больших красных смещениях ($z > 3$) на основе квазиодновременных измерений на РАТАН-600. К настоящему времени отмечается дефицит радиоизмерений далеких объектов и наблюдательные данные, составившие основу представленных результатов, имеют тем самым большое значение. Преимуществом РАТАН-600 является его способность проводить мониторинговые наблюдения большого числа объектов (около ста источников в течение суток на Северном секторе). Тем самым открывается возможность получения долговременных кривых блеска в широком диапазоне частот. Это обстоятельство открывает естественную нишу РАТАН-600 в современной радиоастрономии и возможности

радиотелескопа в этом направлении продемонстрированы на примере изучения наиболее далекого из открытых в настоящее время блазара на $z = 6.1$.

Список литературы

1. *Bardeen J. M., Press W. H., Teukolsky S. A.* Rotating Black Holes: Locally Nonrotating Frames, Energy Extraction, and Scalar Synchrotron Radiation // *ApJ*. — 1972. — Дек. — Т. 178. — С. 347—370. — DOI: 10.1086/151796.
2. *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Reprint of 1973A&A....24..337S. Black holes in binary systems. Observational appearance. // *A&A*. — 1973. — Июнь. — Т. 500. — С. 33—51.
3. *Novikov I. D., Thorne K. S.* Astrophysics of black holes. // *Black Holes (Les Astres Occlus)*. — 01.1973. — С. 343—450.
4. *Brenneman L.* Measuring the Angular Momentum of Supermassive Black Holes. — 2013. — DOI: 10.1007/978-1-4614-7771-6.
5. *Middleton M.* Black Hole Spin: Theory and Observation // *Astrophysics of Black Holes: From Fundamental Aspects to Latest Developments*. Т. 440 / под ред. С. Bambi. — 01.2016. — С. 99. — (Astrophysics and Space Science Library). — DOI: 10.1007/978-3-662-52859-4_3. — arXiv: 1507.06153 [astro-ph.HE].
6. *Reynolds C. S.* Observational Constraints on Black Hole Spin // *Annual Review of Astron and Astrophys*. — 2021. — Сент. — Т. 59. — DOI: 10.1146/annurev-astro-112420-035022. — arXiv: 2011.08948 [astro-ph.HE].
7. Active galactic nuclei at $z \sim 1.5$ - III. Accretion discs and black hole spin / D. M. Capellupo [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Июль. — Т. 460, № 1. — С. 212—226. — DOI: 10.1093/mnras/stw937. — arXiv: 1604.05310 [astro-ph.GA].
8. *Blandford R. D., Znajek R. L.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1977. — Май. — Т. 179. — С. 433—456. — DOI: 10.1093/mnras/179.3.433.

9. *Blandford R. D., Payne D. G.* Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1982. — ИЮНЬ. — Т. 199. — С. 883—903. — DOI: 10.1093/mnras/199.4.883.
10. *Meier D. L.* A Magnetically Switched, Rotating Black Hole Model for the Production of Extragalactic Radio Jets and the Fanaroff and Riley Class Division // *ApJ.* — 1999. — СЕНТ. — Т. 522, № 2. — С. 753—766. — DOI: 10.1086/307671. — arXiv: astro-ph/9810352 [astro-ph].
11. *Daly R. A.* Bounds on Black Hole Spins // *ApJL.* — 2009. — МАЙ. — Т. 696, № 1. — С. L32—L36. — DOI: 10.1088/0004-637X/696/1/L32. — arXiv: 0903.4861 [astro-ph.CO].
12. *Garofalo D., Evans D. A., Sambruna R. M.* The evolution of radio-loud active galactic nuclei as a function of black hole spin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — АВГ. — Т. 406, № 2. — С. 975—986. — DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16797.x. — arXiv: 1004.1166 [astro-ph.CO].
13. *Baldi R. D., Capetti A., Giovannini G.* The new class of FR 0 radio galaxies // *Astronomische Nachrichten.* — 2016. — ФЕВР. — Т. 337, № 1/2. — С. 114. — DOI: 10.1002/asna.201512275. — arXiv: 1510.04272 [astro-ph.GA].
14. *Baldi R. D., Capetti A., Massaro F.* FR0CAT: a FIRST catalog of FR 0 radio galaxies // *A&A.* — 2018. — ЯНВ. — Т. 609. — A1. — DOI: 10.1051/0004-6361/201731333. — arXiv: 1709.00015 [astro-ph.GA].
15. *Parijskij Y. N.* RATAN-600 - The world's biggest reflector at the 'cross roads' // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* — 1993. — АВГ. — Т. 35, № 4. — С. 7—12. — DOI: 10.1109/74.229840.
16. Gigahertz-peaked spectrum (GPS) galaxies and quasars / М. G. Mingaliev [и др.] // *Astrophysical Bulletin.* — 2013. — ИЮЛЬ. — Т. 68, № 3. — С. 262—272. — DOI: 10.1134/S1990341313030036.
17. Simultaneous spectra and radio properties of BL Lacs / М. Mingaliev [и др.] // *Astronomische Nachrichten.* — 2017. — ИЮЛЬ. — Т. 338, № 6. — С. 700—714. — DOI: 10.1002/asna.201713361. — arXiv: 1707.07949 [astro-ph.GA].

18. On the nature of bright compact radio sources at $z > 4.5$ / R. Coppejans [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Дек. — Т. 463, № 3. — С. 3260—3275. — DOI: 10.1093/mnras/stw2236. — arXiv: 1609.00575 [astro-ph.GA].
19. Radio spectra of bright compact sources at $z > 4.5$ / R. Coppejans [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Май. — Т. 467, № 2. — С. 2039—2060. — DOI: 10.1093/mnras/stx215. — arXiv: 1701.06622 [astro-ph.GA].
20. Constraining the Radio-loud Fraction of Quasars at $z > 5.5$ / E. Bañados [и др.] // ApJ. — 2015. — Май. — Т. 804, № 2. — С. 118. — DOI: 10.1088/0004-637X/804/2/118. — arXiv: 1503.04214 [astro-ph.GA].
21. The space density of $z > 4$ blazars / A. Caccianiga [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — Март. — Т. 484, № 1. — С. 204—217. — DOI: 10.1093/mnras/sty3526. — arXiv: 1901.02910 [astro-ph.GA].
22. Constraining the Quasar Radio-loud Fraction at $z \sim 6$ with Deep Radio Observations / Y. Liu [и др.] // ApJ. — 2021. — Февр. — Т. 908, № 2. — С. 124. — DOI: 10.3847/1538-4357/abd3a8. — arXiv: 2012.07301 [astro-ph.GA].

Михайлов Александр Геннадьевич

Определение физических параметров сверхмассивных черных дыр и исследование радиосвойств активных ядер галактик

Подписано в печать _____. Заказ № 208с

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография Специальной астрофизической обсерватории РАН