



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Диссертация «Определение физических параметров сверхмассивных черных дыр и исследование радиосвойств активных ядер галактик», представляемая на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по научной специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия, выполнена в лаборатории радиоастрофизики САО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Михайлов Александр Геннадьевич работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) в должности младшего научного сотрудника лаборатории радиоастрофизики. Часть результатов, вошедших в диссертацию, получена в период работы соискателя в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Главной астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН) в должности стажера-исследователя лаборатории физики звезд (развитие метода определения спина СМЧД на основе гибридных моделей генерации джетов, расчеты спина радиогалактик типа FRI и FRII, расчеты магнитного поля в аккреционном диске и на горизонте событий в выборке 28 радиоквazarов).

В 2014 г. окончил Санкт-Петербургский политехнический университет, по окончании которого присвоена квалификация Магистр по направлению подготовки 011200 Физика.

Научный руководитель - Пиотрович Михаил Юрьевич работает по совместительству в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук в лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов в должности старшего научного сотрудника.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

К настоящему времени концепция черных дыр прочно утвердилась в астрофизике. Многообразие явлений, наблюдаемых в активных ядрах галактик (АЯГ), связано с процессом аккреции на сверхмассивную черную дыру (СМЧД). Характеристики данного процесса во многом определяются параметрами центральной СМЧД. Черная дыра характеризуется массой  $M_{\text{ВН}}$  и спином  $a=cJ/GM_{\text{ВН}}^2$ . Следовательно, для понимания явлений в АЯГ, влияния активного ядра на родительскую галактику и ее окружение необходима разработка методов определения параметров СМЧД. Наиболее разработанным методом определения спина в настоящее время является метод рентгеновской отражательной спектроскопии. Однако его успешное применение требует высококачественных рентгеновских спектров. В настоящее время получены ограничения величины спина  $\sim 40$  СМЧД в относительно близких АЯГ на красных смещениях до 0.1. Это обстоятельство стимулирует разработку других методов определения спина СМЧД. В

представленной работе используется подход, основанный на взаимосвязи между мощностью релятивистского джета и спином черной дыры.

Важное значение для понимания природы АЯГ имеют наблюдения в радиодиапазоне. Современные исследования показывают, что в ближней Вселенной среди популяции внегалактических радиоисточников численно преобладают компактные объекты относительно небольшой мощности ( $\sim 10^{40}$  эрг/с), т.н. радиогалактики FR0 (Fanaroff-Riley Type 0). Однако их природа и взаимосвязь с другими классами радиогромких АЯГ остается малоисследованной. Распространенность галактик FR0 предполагает, что природа их активности связана с наиболее общими физическими механизмами. Исследование радиосвойств АЯГ на больших красных смещениях важно для изучения эволюции активных ядер и воздействия их в процессах обратной связи (feedback) на родительскую галактику и ее окружение. Ключевое значение имеет исследование связи диск-джет и ее возможной эволюции с красным смещением. Однако, вплоть до недавнего времени, отмечался недостаток работ, посвященных исследованию радиосвойств АЯГ на больших красных смещениях. Проблема определения радиосвойств и доли радиогромких квазаров среди популяции АЯГ и эволюции этих величин с красным смещением относится к числу первостепенных задач. Важное значение при этом имеют измерения мгновенных радиоспектров в широком диапазоне частот. Такую возможность предоставляет радиотелескоп РАТАН-600 САО РАН.

В работе соискателем развит метод определения спина СМЧД на основе гибридных моделей генерации релятивистских джетов, им выполнены расчеты величины спина, магнитного поля в центральных областях АЯГ, построены диаграммы «масса-спин» для радиогалактик FRI и FRII, квазаров на красных смещениях  $z > 4$ . Диссертанту принадлежит постановка задачи исследования радиогалактик FR0 на РАТАН-600 (подготовка наблюдательных заявок в 2020-21 гг., подготовка наблюдений), постановка задачи исследования блазара J0309+2717 на  $z=6.1$  на РАТАН-600. Автором диссертационной работы проведена калибровка и обработка измерений на РАТАН-600 (для радиогалактик FR0 и блазара J0309+2717). Им проведена спектральная классификация радиогалактик FR0, расчет параметров радиоизлучения квазаров на  $z \geq 3$  (в соавторстве с А. А. Кудряшовой) и галактик FR0, расчет средних радиоспектров объектов в исследованных выборках. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводилась совместно с соавторами.

Достоверность результатов проведенных исследований 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 калибровками наблюдательных данных. Спектральные плотности потоков объектов измерены на пяти частотах одновременно, что позволило исключить влияние систематических ошибок измерений и переменности объектов на результат.

Научная новизна работы заключается в том, что 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 и FRII, квазаров на больших красных смещениях  $z > 4$ . Впервые выполнены оценки величины магнитного поля в аккреционном диске и на горизонте событий СМЧД для 28 радиоквазаров. Для выборки 52 АЯГ 1 типа впервые установлено

обратное соотношение между величиной магнитного поля на горизонте событий и массой черной дыры:  $\log B_H \sim -0.7 \log M_{BH}$ . Получены новые величины спектральных плотностей потоков выборки 34 радиогалактик FR0 по данным многочастотных измерений на РАТАН-600, на основе которых впервые построены квазиодновременные радиоспектры объектов в диапазоне 2–22 ГГц. Впервые показана двухкомпонентность среднего радиоспектра объектов типа FR0 в сантиметровом диапазоне. Показано, что среди квазаров на больших красных смещениях  $z \geq 3$  половина источников характеризуется радиоспектрами с пиком. По новым данным измерений на 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 полученных результатов состоит в том, что они могут быть использованы для тестирования современных моделей генерации джетов и механизмов энерговыделения в центральной машине АЯГ на основе наблюдательных данных, тем самым способствуя дальнейшему развитию исследований 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 установить 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.

Результаты, полученные в диссертации, полностью изложены в публикациях в рецензируемых российских и зарубежных журналах. Ценность научных работ заключается в успешном сочетании теоретического подхода к изучению АЯГ и обширного наблюдательного материала, полученного при непосредственном участии диссертанта.

Все результаты, выносимые на защиту, аргументированы и подробно изложены в 11 статьях соискателя, опубликованных в рецензируемых журналах списка ВАК. Представленные результаты и выводы обсуждались на 13 международных и всероссийских конференциях, а также семинарах САО РАН.

По докладу автора на Ученом совете САО РАН были заданы вопросы, на которые докладчик исчерпывающе ответил.

В выступлениях Романюк И. И. отметил хороший уровень работы, порекомендовал поработать над представлением диссертации. Цыбулев П. Г. высказал пожелание более четко обозначить личный вклад автора. Шолухова О. Н. и Моисеев А.В. порекомендовали доработать формулировки положений, выносимых на защиту, Пустильник С. А. - улучшить графическое представление результатов, Трушкин С. А. - математически обосновать двухкомпонентность среднего радиоспектра объектов FR0.

Моисеев А.В. также отметил, что работа объемная, разнообразная и полностью соответствует критериям, предъявляемым к кандидатской диссертации. Валявин Г.Г. обратил внимание на представление доклада и хороший список работ по теме диссертационного исследования. Научный руководитель соискателя Пиотрович М. Ю. подчеркнул актуальность темы исследования и отметил самостоятельность и трудолюбие диссертанта в процессе подготовки работы. Мингалиев М. Г. положительно оценил представленную работу и отметил, что в ней удачно сочетаются теоретические методы исследований и наблюдательные данные, полученные при непосредственном участии диссертанта.

Ученый совет пришел к заключению, что представляемая диссертация является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, паспорту научной специальности, а соискатель заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Определение физических параметров сверхмассивных черных дыр и исследование радиосвойств активных ядер галактик» Михайлова Александра Геннадьевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании Ученого совета САО РАН 3 марта 2022 года.

Присутствовало на заседании 15 чел.

Результаты голосования: “за” - 15 чел., “против” - 0 чел., “воздержалось” - 0 чел., протокол №401 от 3 марта 2022 г.

Председатель Ученого совета,  
директор САО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

Ученый секретарь САО РАН  
кандидат физ.-мат. наук



/Валявин Г. Г./

/Кайсина Е. И./