



«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора по научной работе

ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН

д.ф.-м.н.

П.Н. Брунков

7 сентября 2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук**

194021, Санкт-Петербург, Политехническая 26)

на диссертацию

**Михайлова Александра Геннадьевича**

на тему: «**Определение физических параметров сверхмассивных черных дыр и исследование радиосвойств активных ядер галактик**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»**

**Актуальность.** Черные дыры являются одними из самых загадочных объектов нашей Вселенной. Представления о них как о классических темных звездах, возникшие более двухсот лет назад, претерпели радикальное изменение с появлением Общей Теории Относительности и квантовой механики. Являясь самым сильным искривлением пространства-времени, они представляют собой объекты, экстремальные свойства которых порождают различные предсказания о их возможных наблюдательных проявлениях. Уже многие десятилетия проводятся наблюдения разнообразных наблюдательных проявлений черных дыр, как звездной массы, так и гигантских сверхмассивных черных дыр, массы которых составляют миллионы и миллиарды масс Солнца. Они являются мощнейшими ускорителями космических лучей, генерируют высокоэнергичное рентгеновское и гамма-излучение, располагаясь в центрах формирующихся молодых галактик и определяя их активность, являются маяками Вселенной, просвечивая более 90% объема ее видимой части. Но, несмотря на огромный накопленный наблюдательный материал и серьезные продвижения в теории черных дыр, до сих пор остаются нерешенные проблемы в понимании этих объектов.

Представленная диссертационная работа посвящена исследованию сверхмассивных черных дыр (СМЧД), определению одного из ключевых параметров, их характеризующих – спину черных дыр, а также исследованию их радиосвойств. Несомненно, эти исследования важны для понимания общей картины такого феномена, как черные дыры, что и определяет **актуальность** диссертационной работы.



## **Основное содержание диссертационной работы.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 152 страницы, включающих 38 рисунков и 21 таблицу. 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** приводится обзор методов определения величины спина черных дыр. Отмечается, что применение методов рентгеновской отражательной спектроскопии и анализа спектрального распределения энергии ограничено возможностями существующих инструментов. В п. 1.2 описывается применяемый в диссертационной работе метод, основанный на моделях энерговыделения в АЯГ в форме релятивистских джетов. Используются две гибридные модели, привлекающие механизмы Блэндфорда-Знаека и Блэндфорда-Пейна: модель Мейера и модель flux-trapping. В п. 1.3 и п. 1.4 развитый автором 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. 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. 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. 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 авторами. Обосновывается актуальность исследования в широком диапазоне частот этой многочис-



ленной 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. 3.6 подводятся итоги исследования радиосвойств галактик FR0 на основе квазиодновременных 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  $z = 3-3.8$ , 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.

**Приложения** содержат таблицы с результатами измерений спектральных плотностей потока радиогалактик FR0, а также графические изображения их спектров.

**Среди наиболее важных результатов** следует отметить следующие:

1. Разработан метод определения спина СМЧД на основе гибридных моделей генерации релятивистских джетов. Данный метод применен для получения ограничений величины спина СМЧД в выборках далеких АЯГ на  $z > 4$  и радиогалактик FR I и FR II. 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 радиоквазаров и сейфертовских галактик. Найдено, что типичное значение магнитного поля составляет  $10^4$  Гс, что 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. 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.

Результаты, представленные в диссертационной работе, являются новыми и представляют несомненную научную ценность, поскольку расширяют наши представления о спинах сверхмассивных черных дыр и радиосвойствах активных ядер галактик.

**Достоверность** полученных результатов обусловлена 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.

**Научная и практическая значимость** полученных результатов заключается в том, что они могут быть использованы для тестирования современных моделей генерации джетов и механизмов энерговыделения в центральной машине на основе наблюдательных данных, тем самым будут способствовать 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.

К представленной диссертационной работе имеется ряд **замечаний**.

1. В главе 1 в параграфе, посвященном рентгеновской отражательной спектроскопии, появляется цифра 0.998 (стр. 15), характеризующая предельное значение спина черной дыры. Это не случайная цифра и впоследствии также используется в тексте диссертации, поэтому при ее первом появлении в тексте желательно более подробное ее описание и обязательна ссылка на работу, в которой это значение было посчитано. Выполнение данного действия сняло бы и вопрос к Таблице 7 (представленной в Главе 2), где явно бросается в глаза значение спина черной дыры с нулевой верхней погрешностью (0.998+0.000).
2. Во введении (или во введении к главам) должны четко определяться ключевые используемые понятия, а не возникать по ходу дела без объяснения со скользь возникающими впоследствии пояснениями. Так в Первой Главе возникают понятия проградного и ретроградного вращения и после многократного их использования лишь на 31 странице кратко поясняются условия возникновения ретроградных систем.
3. Глава 1 стр. 32 последнее предложение параграфа «Заключение» - «Например, измерения степени поляризации излучения аккреционного



диска могли бы прояснить ситуацию» - подвисает в воздухе, поскольку просто отсутствует объяснение «почему такого рода измерения могли бы прояснить ситуацию».

4. В таблицах 3, 4, 5 (Глава 1) представлены объекты с существенно отличающимися красными смещениями, было бы очень неплохо чтобы значения красных смещений конкретных объектов были представлены (в виде отдельного столбца) в этих таблицах.
5. В продолжения пункта 4 возникает вопрос: почему не выполнен совместный анализ всех систем, представленных в таблицах 3, 4, 5.
6. В Главе 3 на рис. 3.4 представлен средний спектр FR0 по данным РАТАН-600 (стр. 76), в то время как реальные спектры вынесены в конец диссертации в виде приложения, не очень понятно, для чего это сделано. Без этих спектров данный рисунок мало информативен и непонятна его статистическая значимость. Этого можно было бы избежать если бы, например, рядом с этим рисунком был рисунок с реальными спектрами, нанесенными на один график, или на рис. 3.4 была бы изображена полоса неопределенности подобно тому, как это сделано на рисунке 4.1

Представленные замечания несколько не умоляют научной и практической ценности диссертационной работы.

Автореферат соответствует основным положениям диссертационной работы. Основные результаты опубликованы в российских и международных журналах, входящих в список ВАК.

#### **Заключение ведущей организации.**

Диссертационная работа Михайлова Александра Геннадьевича «**Определение физических параметров сверхмассивных черных дыр и исследование радиосвойств активных ядер галактик**» соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Доклад А.Г. Михайлова по материалам диссертационной работы заслушан и одобрен 11.05.2022 на заседании семинара сектора Теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

**Отзыв составлен** доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником сектора Теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Иванчиком Александром Владимировичем.

А.В. Иванчик



Подпись Иванчика А.В. удостоверяю  
Зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

И.С. Буланов

**Сведения о ведущей организации**

Федеральное государственное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26

Телефон: (812) 297-22-45

Факс: (812) 297-10-17

Электронная почта: [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)