

УТВЕРЖДАЮ

Проректор  
по научной работе, к.ф.-м.н.

Баган Виталий  
Анатольевич

« 21 » апреля 2022 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»  
(МФТИ, Физтех)

Диссертация «Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений» выполнена на кафедре проблем физики и астрофизики и в лаборатории фундаментальных и прикладных исследований релятивистских объектов Вселенной федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель **НОХРИНА Елена Евгеньевна** с 2015 по 2017 год работала на кафедре теоретической физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в должности доцента, и с 2017 года по настоящее время работает в Лаборатории фундаментальных и прикладных исследований релятивистских объектов Вселенной федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в должности старшего научного сотрудника.

В 2005 году Нохрина Е.Е. окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. В 2010 году в

диссертационном совете Д 212.156.07, созданном на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», защитила кандидатскую диссертацию «Цилиндрические релятивистские и нерелятивистские течения в астрофизике» под научным руководством доктора физико-математических наук, профессора Бескина Василия Семеновича по научной специальности 01.04.02 – Теоретическая физика. Ученая степень кандидата физико-математических наук присуждена 19 марта 2010 года, диплом ДКН № 115269.

По итогам обсуждения диссертации Е.Е. Нохриной «Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений», **принято следующее заключение.**

**Актуальность темы диссертации** связана с текущим развитием исследования природы активных ядер галактик (АЯГ), в том числе в связи с запуском новых инструментов (Телескоп Горизонта Событий), и с открытием новых эффектов по данным наблюдений. Работа посвящена разработке новых методов исследования релятивистских струйных выбросов в ядрах галактик и получению оценок физических параметров этих источников. Связь геометрии выброса с режимом течения плазмы дает новый инструмент для оценки параметров черной дыры, выброса и внешней среды. На основе методов оценки спинов черных дыр уже запланированы дальнейшие исследования на большей выборке источников с изломом. Предложенные методы оценки параметров по геометрии излома формы выброса применяются другими группами в своих исследованиях активных ядер галактик. Ограничения, полученные на значения параметров множественности и замагниченности используются при анализе кинематики выбросов и служат ограничением физических процессов рождения плазмы в основаниях джетов. Использование результатов аналитического моделирования позволяет уточнить методы исследования характеристик АЯГ.

**Целью диссертации** является понимание механизмов запуска релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик и природы активности последних. В частности, исследование связи процессов коллимации и ускорения релятивистских струйных выбросов; исследование роли внешней среды в коллимации и удержании джетов; оценка ключевых физических параметров центральной машины, определяющих ее активность; оценка ключевых параметров струйного выброса, определяющих его основные свойства.

**Основные результаты диссертации:**

1. Предложен метод оценки начальной замагниченности течения  $\sigma_M$  и параметра множественности  $\lambda$  по измерениям видимого сдвига ядра. По



результатам анализа величин сдвигов ядер для выборки из 97 источников получены распределения источников по параметрам замагниченности и множественности.

2. Предложен метод оценки величины магнитного поля, концентрации плазмы и локальной замагниченности в рамках модели однородного джета по измерениям яркостной температуры и видимого сдвига ядра. Показано, что при оценке параметров источников с наблюдаемой яркостной температурой, превышающей равновесное значение, важен учет поперечной неоднородности выброса. Получено выражение для оценки магнитного поля по яркостной температуре в рамках модели неоднородного джета.
3. Предложен метод оценки полного магнитного потока в струйном выбросе по данным измерений видимого сдвига ядра и яркостной температуры. Для выборки из 48 источников показано, что для большинства из них, их средняя мощность может быть объяснена механизмом Блэндфорда–Знайека. Полученные оценки магнитного потока в источниках хорошо согласуются с моделью диска с нормальной эволюцией.
4. Исследованы эффекты нагружения джетов электрон-позитронной плазмой в результате двухфотонной конверсии. Впервые исследовано влияние нагружения джета зарядами. Нагружение джета зарядами возмущает электрическое и магнитное поля в джете и способно как локально замедлять, так и ускорять плазму. Этот процесс может играть важную роль в развитии неустойчивостей во внешних частях джетов.
5. Для джета с полностью замкнутым внутри электрическим током предложен итерационный метод учета конечной температуры плазмы. На основе аналитического моделирования показано, что наблюдаемое в ряде источников изменение формы выброса с параболической на коническую может быть объяснено изменением состояния выброса: переходом джета от сильно замагниченного к слабо замагниченному режиму.
6. На основе измерения ширины джета в изломе и положения излома, предложен метод оценки ключевых параметров активного ядра галактики: радиуса светового цилиндра выброса, спина и массы черной дыры, величины давления внешней среды, удерживающей выброс. Для источников с массами, измеренными кинематическим методом, величины большинства спинов лежат в интервале 0.1–0.3, что хорошо согласуется с моделями запуска джетов и моделями эволюции спинов для близких источников.
7. Для исследования характерных масштабов положения изломов в выбросах в физических единицах проведен анализ масс черных дыр для выборки из 44 источников. Показано, что массы, полученные с использованием соотношения между размером области формирования широких линий и светимостью в линиях, имеют значимую отрицательную корреляцию с углом



наблюдения. Это фактор необходимо учитывать при оценках данным методом масс черных дыр в близких активных ядрах галактик, так как он может давать заниженные значения.

8. Предложен метод оценки масс черных дыр по измеренной ширине джета в изломе. Показано, что массы, определенные этим методом для источников с обнаруженным изломом, находятся в хорошем согласии с оценками масс по кинематике – одним из наиболее точных методов определения масс черных дыр в АЯГ.
9. Проведено аналитическое моделирование формы границы джета в галактике М87, которое позволило точно воспроизвести форму выброса на масштабах от 1 до  $10^4$  парсек. Получены оценки радиуса светового цилиндра, спина черной дыры 0.1–0.3, полного магнитного потока в выбросе и мощности джета. По данным измерений формы границы, темпа аккреции и величины внешнего давления, предложен метод оценки массы черной дыры.
10. На основе аналитического моделирования и использования данных измерения видимого сдвига ядра и характерной скорости плазмы по запаздыванию вспышек, подтверждено наличие параболической части начала джета в далеких источниках, недоступных для прямых измерений формы их границы в силу конечной разрешающей способности инструментов. Параболичность важно учитывать при использовании частотной зависимости сдвига ядра для оценок параметров.

*Научная новизна работы* заключается в разработке новых методов определения параметров черной дыры, релятивистского выброса и внешней среды в активных ядрах галактик с помощью аналитического моделирования и данных наблюдений. В частности, впервые на основе измерений частотно-зависимого сдвига ядра проведена оценка максимально возможного фактора Лоренца джета для выборки из сотни источников и оценка параметра множественности, что позволило сделать выбор между двумя моделями рождения плазмы. Показана необходимость учета поперечной неоднородности выброса при оценке физических величин по измерениям яркостной температуры. Учет модельных поперечных профилей физических величин в выбросах позволил связать оценки магнитного поля на парсековых масштабах с величиной магнитного потока в выбросе. Впервые исследовано влияние нагружения зарядами на динамику нагруженных частей джета. Для определения параметров выбросов впервые применена связь изменения геометрии выброса с переходом течения от сильно замагниченному к слабо замагниченному режиму. Предложен метод оценки спинов и масс черных дыр и давления внешней среды. Для ближайшего АЯГ – М87 – с большим количеством наблюдательных данных впервые получена оценка спина черной дыры, полного магнитного потока в джете и определено состояние диска по моделированию формы джета. Впервые



предложен неявный метод оценки формы основания струйных выбросов для далеких источников с измеренным сдвигом ядра и скоростью плазмы, определенной по запаздыванию вспышек в ядрах.

**Практическая ценность** результатов диссертации заключается в том, что исследование частотной зависимости видимого сдвига ядра для струй с параболическим основанием позволит уточнить положение квазаров, являющихся реперами при определении инерциальной системы отсчета. Инерциальные системы отсчёта, основанные на наблюдениях квазаров, лежат в основе навигации на Земле, включая систему ГЛОНАСС.

**Обоснованность и достоверность результатов и выводов** проведенных исследований подтверждается многократной успешной проверкой результатов моделирования независимыми методами (в том числе численным моделированием и аналитическим моделированием в работах других авторов) и использовании надежных данных наблюдений. Все результаты докладывались и обсуждались на семинарах, конференциях и симпозиумах и используются другими учеными в своих работах. Часть результатов получила подтверждение других авторов в результате проведения наблюдений и их анализа. Результаты по M87 совпадают с выводами Телескопа Горизонта Событий.

**Материалы диссертации опубликованы автором достаточно полно** в 10 следующих научных статьях в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

1. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Nokhrina E.E., Beskin V.S., Kovalev Y.Y., Zheltoukhov A.A.* Intrinsic physical conditions and structure of relativistic jets in active galactic nuclei // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2015. – Vol. 447. – P. 2726–2737.
2. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Hawley J.F., Fendt C., Hardcastle M., Nokhrina E., Tchekhovskoy A.* Disks and Jets – Gravity, Rotation and Magnetic Fields // Space Science Reviews. – 2015. – Vol. 191. – P. 441–469.
3. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Nokhrina E.* Brightness temperature – obtaining physical properties of non-equipartition plasma // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2017. – Vol. 468(2). – P. 2372–2381.
4. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Nokhrina E.E., Beskin V.S.* On the acceleration and deceleration of relativistic jets in active galactic nuclei – II. Mass-loading // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2017. – Vol. 469(4). – P. 3840–3850.
5. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Beskin V.S., Chernoglazov A.V., Kiselev A.M., Nokhrina E.E.* On the internal structure of relativistic jets collimated by ambient gas pressure // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2017. – Vol.472. P. 3971–3978.



6. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Nokhrina E.E.* The Correlation between the Total Magnetic Flux and the Total Jet Power // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences.* – 2017. – Vol. 4. – P. 63.
7. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Nokhrina E.E., Gurvits L.I., Beskin V.S., Nakamura M., Asada K., Hada K.* M87 black hole mass and spin estimate through the position of the jet boundary shape break // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2019. – Vol. 489(1). – P. 1197–1205.
8. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Kovalev Y.Y., Pushkarev A.B., Nokhrina E.E., Plavin A.V., Beskin V.S., Chernoglazov A.V., Lister M.L., Savolainen T.* A transition from parabolic to conical shape as a common effect in nearby AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2020. – Vol.495. – P. 3576–3591.
9. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Nokhrina E.E., Kovalev Y.Y., Pushkarev A.B.* Physical parameters of active galactic nuclei derived from properties of the jet geometry transition region // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2020. – Vol. 498. – P. 2532–2543.
10. **[Индексируется базами данных WoS и Scopus]** *Nokhrina E.E., Pashchenko I.N., Kutkin A.M.* Parabolic jet shape on parsec scales in high redshift AGN // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2022. – Vol. 509. – P. 1899–1918.

Содержание диссертационной работы Е.Е. Нохриной изложено максимально доступно, корректно и полно.

**Личный вклад соискателя** во все результаты диссертации, выносимые на защиту, является определяющим.

**Личный вклад соискателя** в работах с соавторами заключается в следующем: [1] – участие в постановке исследовательских задач, выбор метод их решения, получение теоретических результатов для оценок параметров, анализ экспериментальных данных, интерпретация и обсуждение результатов, участие в формулировке выводов работы; [2] – работа над разделом по определению параметров джетов по измерениям частотно-зависимого сдвига ядра; [4, 7, 9, 10] – основной вклад в постановку исследовательских задач, выбор метод их решения, получение теоретических результатов для оценок параметров, анализ экспериментальных данных, интерпретацию и обсуждение результатов, формулировку выводов работы; [5] – участие в постановке исследовательских задач, проведение аналитического моделирования; [8] – участие в постановке исследовательских задач, получение теоретических результатов для оценок параметров, интерпретация и обсуждение теоретического моделирования, участие в формулировке выводов работы.

**Основные результаты работы** докладывались и обсуждались на семинарах АКЦ ФИАН, научной группы SHERPAS в Институте Планетологии



и Астрофизики Гренобля и VLBI группы в Радиоастрономическом Институте Макса Планка, и были представлены в виде стендовых, устных и приглашенных докладов на 1 всероссийской и 15 международных конференциях и симпозиумах.

*Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, в частности, пунктам:*

- п. 1 – Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, нейтринного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах; разработка методов анализа электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям.
- п. 2 – Исследования физических свойств космических объектов (планет, звезд, галактик и их систем) межпланетной, околозвездной, межзвездной и межгалактической среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях.
- п. 3 – Изучение происхождения, движения и эволюции космических объектов на базе фундаментальных физических теорий и астрономических наблюдений.

Диссертация «Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений» **НОХРИНОЙ Елены Евгеньевны** удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание степени доктора наук, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.**

Заключение принято на заседании кафедры проблем физики и астрофизики МФТИ, Физтех. Присутствовало на заседании 12 человек. Результаты голосования: «за» – 12 чел., «против» – 0, «воздержались» – 0, протокол № б/н от 20 «апреля» 2022 года.

---

Зыбин Кирилл Петрович,  
член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук,  
заведующий кафедрой  
проблем физики и астрофизики  
МФТИ, Физтех