

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д002.023.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ "ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.
П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК" (ФИАН) ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 28 сентября 2022 года № 1

О присуждении Нохриной Елене Евгеньевне, гражданке Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук

Диссертация «Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений» по специальности 01.03.02 «астрофизика и звёздная астрономия» принята к защите 09 июня 2022 г., протокол №2282, диссертационным советом Д002.023.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук", 119991, Москва, Ленинский проспект, дом 53, ФИАН, приказ № 105/нк от 11.04.2012 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Соискатель Нохрина Елена Евгеньевна, 1981 года рождения, в 2005 году окончила с отличием Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский физико-технический институт (государственный университет)” (г. Долгопрудный, Московская область) с присуждением степени магистра по направлению “Прикладные математика и физика”, а в 2010 году окончила аспирантуру Московского физико-технического института (МФТИ). В 2010 году защитила диссертацию “Цилиндрические релятивистские и нерелятивистские течения в астрофизике” на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 “теоретическая физика” в диссертационном совете Д212.156.07 при Московском физико-техническом институте (диплом ДКН № 115269 от 09 июля 2010 года).

В период подготовки диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук соискатель Нохрина Е.Е. работала в должности старшего научного сотрудника в Лаборатории фундаментальных и прикладных исследований релятивистских объектов Вселенной МФТИ.

Диссертация выполнена в Московском физико-техническом институте (национальном исследовательском университете), г. Долгопрудный, Московская область.

Официальные оппоненты:

Барков Максим Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН, г. Москва;

Блинников Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НИЦ "Курчатовский институт" Курчатова комплекса теоретической и экспериментальной физики, г. Москва;

Докучаев Вячеслав Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института ядерных исследований РАН, г. Москва; дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук” (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН), ул. Политехническая, 26, г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, заведующим сектором теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе Д.Г. Яковлевым и утвержденным заместителем директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, доктором физико-математических наук П.Н. Брунковым, заключила, что диссертация по актуальности, объёму проделанной работы, достоверности и значимости полученных результатов полностью соответствует требованиям “Положения о порядке присуждения учёных степеней”, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор – Нохрина Елена Евгеньевна – несомненно, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 “Астрофизика и звёздная астрономия”.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается темой исследований, высокой компетентностью, профессиональными должностными обязанностями и наличием публикаций оппонентов и сотрудников ведущей организации по вопросам диссертационной работы.

Соискатель имеет 25 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 11 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 10 работ. Содержание диссертационной работы Нохриной Е.Е. изложено доступно, корректно и полно. В главных работах представлены основные положения диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения о работах, опубликованных соискателем учёной степени. В подавляющем большинстве работ соискатель является первым автором, его вклад является основным.

Наиболее значительные работы соискателя по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых изданиях:

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. — T. 447. — C. 2726—2737.

Hawley J., Fendt C., Hardcastle M., Nokhrina E., Tchekhovskoy A. Disks and Jets. Gravity, Rotation and Magnetic Fields // *Space Science Reviews*. — 2015. — T. 191. — C. 441—469.

Nokhrina E. E. Brightness temperature - obtaining the physical properties of a non-equipartition plasma // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — T. 468. — C. 2372—2381.

Nokhrina E. E., Beskin V. On the acceleration and deceleration of relativistic jets in active galactic nuclei – II. Mass loading // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — T. 469. — C. 3840—3850.

Beskin V., Chernoglazov A., Kiselev A., Nokhrina E. E. On the internal structure of relativistic jets collimated by ambient gas pressure // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — T. 472. — C. 3971—3978.

Nokhrina E. E. The Correlation between the Total Magnetic Flux and the Total Jet Power // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2017. — T. 4. — C. 63.

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. — T. 489. — C. 1197—1205.

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. — T. 498. — C. 2532—2543.

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. — T. 509. — C. 1899—1911.

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. — T. 495. — C. 3576—3591.

На диссертацию поступили положительные отзывы ведущей организации и официальных оппонентов.

В отзыве **ведущей организации** говорится, что диссертация Нохриной Е.Е. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как важное научное достижение в понимании природы активных ядер галактик и в разработке комплексного подхода для интерпретации наблюдений этих объектов. Подчеркивается актуальность и новизна исследований, представленных в диссертации, и указано, что работа по данной тематике включена в план фундаментальных научных исследований Российской академии наук (раздел: Астрономия и исследование космического пространства; тема: Происхождение, строение и эволюция Вселенной). В отзыве отмечается проделанный систематический анализ методов интерпретации наблюдений струйных выбросов, который позволяет извлекать информацию о параметрах центральных черных дыр, механизмах генерации и распространения струйных течений и о параметрах среды, окружающей сверхмассивные черные дыры. Указано, что полученные результаты уже используются и, несомненно, будут использоваться в дальнейшем для изучения активных ядер галактик мировым научным сообществом. В Российской Федерации такие исследования проводятся в ГАИШ МГУ, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИКИ РАН, СПбГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и в ряде других организаций. В отзыве сделан ряд замечаний. Так, аналитическое моделирование, проделанное во многих разделах диссертации, основано на использовании достаточно приближенных выражений. При этом в диссертации приводятся вычисленные из наблюдательных данных параметры с тремя или четырьмя значащими цифрами, что является явным превышением порядка малости. В диссертации используется выражение для гравитационного радиуса быстро вращающейся чёрной дыры, в то время как речь в основном идёт о медленно вращающихся чёрных дырах, что вносит некоторую неопределённость. Другие замечания носят редакционный характер.

В отзыве **оппонента д.ф.-м.н. Баркова М.В.** особо отмечены результаты определения физических параметров джетов по наблюдаемому излому в их форме. Предложенный автором новый метод, основанный на измерении положения излома профиля струи, позволяющий определять фундаментальные параметры чёрной дыры, такие как параметр вращения и массу, является новым и перспективным инструментом для исследования активных ядер галактик. Указано, что выявленная в работе прямая связь положения точки излома с магнитным потоком/мощностью джета и давлением межзвёздного газа на радиусе излома может быть использована как для исследования свойств сверхмассивных чёрных дыр, так и газа в материнских галактиках. В отзыве высказан ряд замечаний. Так, например, не ясно, как изменятся результаты при больших значениях параметра эффективности ускорения частиц. В диссертации сделано противоречивое утверждение, что параметр множественности находится в хорошем согласии с моделью рождения пар в магнитосферах чёрных дыр, что не верно для моделей с зазором. Не обсуждается огромный разброс по мощностям джетов, составляющий 7 порядков (таблица 2.1).

Решение для магнетизации на рис. 3.3 не применимо для больших Лоренц-факторов. При решении задачи о нагрузке джетов не учитывалось влияние комптонизации. При выводе уравнения 3.96 не учитывалось влияние многих факторов, таких как оптическое излучение звёзд, инфракрасное излучение и излучение активных ядер галактик. Также указано на неточности в ряде формул (2.44, 3.92, 3.93, 4.64). Остальные замечания носят редакционный характер.

В отзыве **оппонента д.ф.-м.н. Блинникова С.И.** говорится, что разработанные в диссертации методы и полученные с их помощью результаты представляют большой теоретический и практический интерес и что диссертантом проделана важная работа в актуальной области астрофизики, связанной с исследованиями активности ядер галактик. В отзыве сделан акцент на предложенной модели выбросов с замкнутым током и конечной температурой плазмы, в которой давление на границе джета целиком определяется давлением плазмы. В рамках этой модели дана альтернативная интерпретация излома формы джета, в пользу которой сейчас получены аргументы по наблюдениям источника NGC315. Отмечено, что предложенная автором модель излома позволяет разработать инструмент оценки параметров джета, внешней среды и чёрной дыры по положению излома и ширины выброса в нём. Также очень полезен разработанный диссертантом инструмент оценки спина чёрных дыр. Указано, что метод оценки параметров активных ядер галактик по геометрии излома применён к выбросу из галактики M87 и полученные результаты находятся в согласии с результатами Телескопа Горизонта Событий. В отзыве также сделан обзор остальных результатов, вынесенных на защиту. Высказан ряд замечаний. Так, на стр. 27 предполагается равенство величин разных размерностей – плотности потока электромагнитной энергии и энергии плазмы в области излучения. Неясен выбор значения параметра $\alpha = -0.5$ на стр. 28. Неясно, какой вывод следует из противоречия полученного малого значения замагниченности и начального предположения о сильно замагниченном режиме (стр. 45). Остальные замечания носят стилистический характер.

В отзыве **оппонента д.ф.-м.н. Докучаева В.И.** отмечается, что разработанные в диссертации Нохриной Е.Е. методы исследования физических параметров джетов и астрофизических чёрных дыр лежат в русле актуальной тематики изучения активных ядер галактик и представляют теоретическое и практическое значение с точки зрения развития программ наблюдений АЯГ. В отзыве представлен анализ основных результатов диссертации, сделан вывод об их значимости как нового инструмента исследования природы активности ядер галактик. Даются рекомендации по использованию результатов работы в научных организациях, таких как ФИАН им. П.Н. Лебедева, в ОИЯИ (Дубна), ИФВЭ, ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау, ИЯИ РАН, на физических факультетах МГУ, РУДН, КГУ. Отмечена важность предложенной в работе независимой оценки начальной замагниченности струйного выброса и связанного с ним параметра множественности. Эта важность обусловлена тем, что параметр начальной

замагниченности определяет максимальный фактор Лоренца плазмы, который в принципе может быть достигнут в джете, а величина параметра множественности связана с возможным сценарием рождения плазмы в основании джетов, что до сих пор является актуальным вопросом в физике запуска струйных выбросов. Особо отмечена глава 4 диссертации, посвященная исследованию недавно открытого явления изменения формы выброса от параболической к конической для более чем десятка близких АЯГ. В отзыве высказано замечание о том, что в работе отсутствуют подробные оценки точности астрофизических наблюдений, необходимые для проверки теоретических результатов диссертации. Других замечаний нет.

Во всех отзывах отмечается, что сделанные замечания не затрагивают основных результатов работы, носят рекомендательный характер и не влияют на значимость и высокую оценку диссертационной работы Нохриной Е.Е., а соискатель, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 «астрофизика и звёздная астрономия». Соискатель представил полные ответы на все высказанные в отзывах замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработан метод оценки параметров множественности и замагниченности джетов АЯГ по измерениям видимого сдвига ядра. **Изучено** распределение 97 источников по начальной замагниченности течения и **определена** характерная величина параметра множественности. На основании параметра множественности **выдвинут аргумент** в пользу модели рождения электрон-позитронных пар в результате двухфотонной конверсии в магнитосфере чёрной дыры.

Исследована причинная связность джетов с границей различной формы. **Разработан** метод оценки параметров (замагниченность, величина магнитного поля и концентрация плазмы) источников, демонстрирующих экстремальную величину яркостной температуры. **Исследовано** влияние неоднородности релятивистского струйного выброса на оценку величины магнитного поля по яркостной температуре. **Предложен** метод оценки полного магнитного потока в выбросах — одного из ключевых параметров, определяющих мощность джетов. **Получены оценки** магнитного потока для выборки из 48 источников по данным измерений видимого сдвига ядра и яркостной температуры. **Исследовано** возможное состояние дисков в данной выборке источников.

Исследовано влияние вторичной плазмы, образующейся в результате двухфотонной конверсии, на динамику релятивистского струйного выброса. **Исследована** роль нагружения массой и нагружения зарядами в процессах локального ускорения и торможения джетов. **Проведена оценка** светимостей, необходимых для объяснения наблюдаемых ускорений.

Исследована роль конечной температуры в модели джета с замкнутым электрическим током. **Показана** связь изменения геометрии выброса с

переходом течения от сильно замагниченного режима к слабо замагниченному режиму. Исследованы возможные кинематические признаки наличия излома. На основе связи геометрии выброса в изломе с его внутренними характеристиками, **предложен метод** оценки ключевых параметров джета, чёрной дыры и внешней среды, таких как радиус светового цилиндра, спин чёрной дыры, полный магнитный поток, мощность выброса и величина давления внешней среды. **Проведены оценки** этих параметров для источников с обнаруженным изломом. **Предложен метод** оценки масс черных дыр в АЯГ с изменением геометрии джета с точностью до одного порядка величины. **Показано**, что массы, определенные этим методом для источников с обнаруженным изломом, находятся в хорошем согласии с оценками масс по кинематике. **Проведено** аналитическое моделирование формы границы джета в галактике М87, которое точно воспроизвело форму выброса на масштабах от 1 до 10^4 парсек. **Получены оценки** радиуса светового цилиндра, спина чёрной дыры $\sim 0.1 - 0.3$, полного магнитного потока в выбросе и мощности джета. **Показано**, что ожидаемый темп аккреции согласуется с наличием магнитоарестованного диска около чёрной дыры в М87.

Предложен неявный метод оценки формы выбросов в далёких источниках по результатам моделирования и данным наблюдений. **Оценено** влияние параболической формы на показатель степени частотнозависимого видимого сдвига ядра.

Диссертационный совет подтверждает, что все перечисленные выше результаты соискателя и выносимые на защиту положения, являются **новыми**.

Значение полученных соискателем результатов исследования состоит в том, что:

- разработаны новые методы исследования природы активности релятивистских струйных выбросов в ядрах галактик и получены оценки физических параметров активных ядер галактик;
- на основе выявленной в работе связи геометрии выброса с режимом течения предложен новый инструмент для оценки параметров чёрной дыры, выброса и внешней среды;
- на основе предложенных в работе методов оценки спинов чёрных дыр уже запланированы дальнейшие исследования на большей выборке источников с изломом;
- предложенные методы оценки параметров по геометрии излома формы выброса уже применяются другими группами в своих исследованиях АЯГ;
- ограничения на значения параметров множественности и замагниченности, полученные в работе, используются при анализе кинематики выбросов и служат ограничением физических процессов рождения плазмы в основаниях джетов.

Оценка **достоверности** результатов исследования:

Достоверность всех полученных в диссертации результатов подтверждается многократной проверкой результатов моделирования независимыми методами

(в том числе численным и аналитическим моделированием в работах других авторов) и использованием надежных данных наблюдений. Все результаты докладывались и обсуждались на семинарах, конференциях и симпозиумах, и уже используются другими учёными в своих работах.

Личный вклад соискателя во все результаты, выносимые на защиту, является основным и определяющим. Диссертантом предложена постановка исследовательских задач, выполнены теоретические и аналитические расчёты, проведена работа с результатами наблюдений и дана их интерпретация, подготовлены тексты публикаций.

Диссертация Нохриной Е.Е. соответствует паспорту специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная астрономия» в части п.1-3: *«Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, нейтринного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах [...] Исследования физических свойств космических объектов (планет, звёзд, галактик и их систем) межпланетной, околозвёздной, межзвёздной и межгалактической среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях. Изучение происхождения, движения и эволюции космических объектов на базе фундаментальных физических теорий и астрономических наблюдений»* и отрасли физико-математических наук в части практического значения специальности 01.03.02, заключающегося *«в исследовании вещества в экстремальных состояниях (по плотности, температуре, степени намагниченности и другим физическим параметрам), недоступных для экспериментальной физики»*.

На заседании 28 сентября 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Нохриной Елене Евгеньевне учёную степень доктора физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 15 докторов наук и 1 кандидат наук по специальности 01.03.02, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за – 16,
против – 0,
недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного
совета, д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Новиков И.Д.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.ф.-м.н.

Шахворостова Н.Н.

28 сентября 2022 г.