

УТВЕРЖДАЮ

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

Баган Виталий
Анатольевич

« 02 » сентября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Моделирование синхротронного излучения с учётом самопоглощения от стратифицированного релятивистского джета» выполнена на базовой кафедре проблем физики и астрофизики 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 с 2021 г. по настоящее время соискатель **Фролова Валерия Александровна** работала 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 лаборанта-исследователя в 2021 г. и в должности младшего научного сотрудника с 2022 г. по настоящее время.

В 2021 г. Фролова В.А. окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. В 2025 г. окончила очную аспирантуру МФТИ по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2026 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент Нохрина Елена Евгеньевна. Основное место работы – федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт

имени П.Н. Лебедева Российской академии наук», Лаборатория проблем физики космоса, высококвалифицированный старший научный сотрудник.

По итогам обсуждения диссертации «Моделирование синхротронного излучения с учётом самопоглощения от стратифицированного релятивистского джета» **принято следующее заключение.**

Актуальность темы диссертации связана с развитием радиоинтерферометрических наблюдений релятивистских джетов активных ядер галактик (АЯГ), позволяющих исследовать их поперечную структуру на субпарсековых масштабах. В ряде хорошо разрешённых источников наблюдаются выраженное уярчение к краю, двухгорбые и трёхгорбые поперечные профили интенсивности, происхождение которых требует учёта как внутренней структуры джета, так и пространственного распределения излучающей плазмы. Работа посвящена моделированию синхротронного излучения с самопоглощением на основе самосогласованных МГД-моделей внутренней структуры релятивистского джета и сопоставлению результатов моделирования с многочастотными РСДБ-наблюдениями. Такой подход позволяет связать наблюдаемую морфологию излучения с физическими параметрами джета и получить ограничения на распределение излучающих частиц.

Цели и задачи диссертации:

Целью диссертации является установление связи между наблюдаемой поперечной стратификацией синхротронного излучения релятивистских джетов АЯГ, их внутренней МГД-структурой и пространственным распределением излучающей плазмы, а также количественное определение физических параметров джета по наблюдательным данным.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести численное моделирование синхротронного излучения с самопоглощением в полуаналитических МГД-моделях релятивистского джета, исследовать пространство параметров моделирования и определить условия формирования эффекта уярчения к краю и многогорбых поперечных профилей интенсивности, а также установить, какие пространственные распределения излучающей плазмы способны воспроизводить наблюдаемую морфологию.
2. Построить карты полной интенсивности на основе аналитической МГД-модели внутренней структуры джета и исследовать влияние её поперечной стратификации и продольной эволюции, а также различных пространственных распределений излучающей плазмы на наблюдаемую морфологию излучения.
3. Провести анализ многочастотных РСДБ-наблюдений параметров радио- и миллиметровых ядер АЯГ на основе метода независимого определения магнитного поля и концентрации излучающей плазмы без априорных предположений о равномерном распределении энергии, получить ограничения на зависимости этих физических величин от ширины джета, исследовать их связь с зависимостями вдоль джета с учётом его геометрии и сопоставить полученные результаты с предсказаниями стандартных МГД-моделей.

Основные результаты диссертации:

1. На основе полуаналитических МГД-моделей релятивистского джета и решения уравнения переноса синхротронного излучения с самопоглощением получены характерные карты распределения спектральной плотности потока для различных моделей нагрева плазмы.
2. Показано, что МГД-стратификация внутренней структуры джета недостаточна для выраженного воспроизведения наблюдаемой морфологии, при этом двухгорбые профили возникают при больших максимальных Лоренц-факторах или при достаточно большой оптической толще, тогда как трёхгорбые профили требуют существенного подавления излучения центрального коря.
3. Установлено, что для согласования модельных амплитуд и характерной формы поперечных профилей интенсивности с наблюдениями доля излучающих частиц в центральном коря должна составлять порядка одного процента или меньше, а в качестве распределений излучающей плазмы, способных обеспечить наблюдаемые свойства, рассмотрены краевая локализация нетепловых электронов и омический нагрев.
4. Для параметров, характерных для М87, оценены значения магнитного поля и концентрации излучающей плазмы, объясняющие наблюдаемое поперечное распределение интенсивности.
5. Построены карты полной интенсивности релятивистского джета на основе аналитического описания его внутренней МГД-структуры и исследовано влияние стратификации магнитного поля, скорости и концентрации плазмы на морфологию излучения. Показано, что на субпарсековых масштабах формируется уярчённая к краю структура, тогда как ниже по течению ожидается переход к доминированию центральной области. При расчёте карт рассмотрены два варианта задания излучающей плазмы: равномерное распределение энергии и распределение с порогом по магнитному потоку, при котором излучают только частицы на силовых линиях с $\Psi \geq 0.75 \Psi_0$.
6. По данным многочастотных измерений ширины и яркостной температуры ядра показано, что в большинстве источников из проанализированной выборки присутствуют признаки диссипации магнитного потока и нагрев плазмы, что позволяет сделать вывод об отклонении от равенства плотностей энергий магнитного поля и излучающей плазмы в собственной системе отсчёта. Это подтверждает выводы, сделанные при моделировании спектральной плотности потока джетов.

Все **результаты диссертации получены лично соискателем** при научном руководстве доктора физико-математических наук, доцента Нохриной Е. Е.

Научная новизна работы заключается в том, что связь между наблюдаемой поперечной стратификацией синхротронного излучения и внутренней структурой релятивистского джета впервые исследована на основе самосогласованных полуаналитических и аналитических МГД-моделей. Впервые в такой постановке определены условия формирования эффекта уярчения к краю и многогорбых поперечных профилей интенсивности, получены ограничения на пространственное распределение излучающей плазмы и построены карты полной

интенсивности с учётом продольной эволюции джета. Кроме того, впервые на основе анализа многочастотных РСДБ-наблюдений без априорного предположения о равномерном распределении энергии сделаны выводы о признаках возможной диссипации магнитного потока и нагреве плазмы в джетах АЯГ на парсековых и субпарсековых масштабах.

Теоретическая и практическая ценность результатов диссертации заключается в том, что полученные результаты позволяют уточнить, посредством каких физических механизмов формируется наблюдаемый эффект уярчения к краю в релятивистских джетах АЯГ и как устроено пространственное распределение излучающей плазмы, являющееся одним из ключевых факторов при анализе стратифицированного излучения. В работе показано, что распространённое в моделировании предположение о равномерном распределении между энергией магнитного поля и энергией излучающих частиц во многих случаях не выполняется, что существенно для аккуратного моделирования синхротронного излучения как в рамках полуаналитических и аналитических МГД-моделей, так и при интерпретации результатов кинетических симуляций. Полученные ограничения на долю излучающей плазмы в центральной части джета и указание на возможную локализацию излучающих частиц в его граничных областях свидетельствуют о важной роли взаимодействия плазмы джета с окружающей средой и о необходимости дальнейшего исследования соответствующих физических механизмов, в частности развития неустойчивостей. Полученные результаты могут быть применены для интерпретации многочастотных РСДБ-наблюдений джетов АЯГ, анализа физических параметров конкретных источников, в том числе М87, и дальнейшего построения самосогласованных моделей излучения релятивистских джетов.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Достоверность результатов диссертации обеспечивается согласованием предсказаний используемых полуаналитических и аналитических моделей внутренней структуры релятивистских джетов с результатами независимого численного МГД-моделирования. Расчёт синхротронного излучения основан на общепринятом уравнении переноса с учётом самопоглощения, а анализ наблюдений – на опубликованных многочастотных РСДБ-данных. Дополнительным подтверждением служит согласие результатов работы с современными наблюдаемыми характеристиками джетов АЯГ, в том числе М87. Положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили квалифицированную апробацию на российских и международных научных конференциях и семинарах. Достоверность также подтверждается публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Материалы диссертации опубликованы соискателем достаточно полно в следующих работах:

1. Frolova V. A., Nokhrina E. E., Pashchenko I. N. Synchrotron intensity plots from a relativistic stratified jet // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – July. – Vol. 523, no. 1. – P. 887–906.
2. Nokhrina E. E., Pashchenko I. N., Frolova V. A., Todorov R. V. Jet MHD analytical model – framework for radiative transfer // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2025. – Nov. – Vol. 543, no. 4. – P. 4342–4354.

3. Nokhrina E. E., Lobanov A. P., Istomin A. Y., Frolova V. A. Magnetic field and plasma number density from radio and millimetre core measurements in AGN jets // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2026. – Aug. – Vol. 550, no. 2. – stag1260.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем:

[1] – вклад основной и включает численное моделирование синхротронного излучения с самопоглощением на основе полуаналитических МГД-моделей, исследование пространства параметров моделирования, анализ механизмов формирования поперечных профилей интенсивности, получение оценок физических параметров для характерных режимов излучения, интерпретацию и обсуждение результатов, а также подготовку публикации;

[2] – вклад заключается в построении карт полной интенсивности на основе аналитической МГД-модели, анализе, интерпретации и обсуждении полученных результатов, а также подготовке публикации;

[3] – вклад заключается в интерпретации эволюции магнитного поля и концентрации излучающей плазмы с шириной джета, а также подготовке публикации.

Основные результаты работы были представлены на следующих научных конференциях и семинарах:

1. V.A. Frolova, «Limitations on the emitting particles spatial distribution and heating mechanism in relativistic jets», The Fifth Zeldovich Meeting, Ереван, Армения, 14.06.2023.
2. V.A. Frolova, E.E. Nokhrina, I.N. Pashchenko, «Limitations on the emitting particles spatial distribution and heating mechanism in relativistic jets», XXXII IAU General Assembly, Кейптаун, Южно-Африканская Республика, 14.08.2024.
3. В.А. Фролова, Е.Е. Нохрина, И.Н. Пащенко, «Ограничения на пространственное распределение и механизмы нагрева излучающей плазмы в стратифицированном релятивистском джете», Всероссийская астрономическая конференция 2024, Нижний Архыз, Россия, 28.08.2024.
4. V.A. Frolova, Nokhrina E.E. «Semi-analytical and analytical modelling of a stratified transverse intensity structure in relativistic jets», AGES-2026: Active galaxies and other issues of extragalactic astrophysics, Санкт-Петербург, Россия, 24.04.2026.
5. В.А. Фролова, Е.Е. Нохрина, «Об эффекте уярчения к краю в релятивистских джетах», Астрофизический семинар ОТФ ФИАН, 04.12.19.
6. В.А. Фролова, «Синхротронное излучение релятивистской струи со стратификацией», Семинар по наблюдательной астрофизике ФИАН-МФИ, 05.06.2023.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, в частности, пунктам:

- п. 1 – Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, корпускулярного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах; разработка методов анализа излучения в различных спектральных и

энергетических диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям и физическим измерениям.

- п. 3 – Изучение происхождения, структуры, движения и эволюции космических объектов на базе физических теорий, астрономических наблюдений и физических измерений.
- п. 12 – Теоретические и экспериментальные исследования космической плазмы.

Диссертация соискателя Фроловой Валерии Александровны соответствует требованиям, установленным в соответствии с Федеральным законом от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Диссертация «Моделирование синхротронного излучения с учётом самопоглощения от стратифицированного релятивистского джета» Фроловой Валерии Александровны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Заключение принято на заседании базовой кафедры проблем физики и астрофизики МФТИ, Физтех. Присутствовало на заседании 12 человек. Результаты голосования: «за» – 12 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол № б/н от « 2 » сентября 2026 года.

Зыбин Кирилл Петрович,
академик РАН,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
заведующий базовой кафедрой
проблем физики и астрофизики МФТИ