

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Фролова Валерия Александровна

**Моделирование синхротронного излучения с учётом
самопоглощения от стратифицированного релятивистского
джета**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт» (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Нохрина Елена Евгеньевна

Официальные оппоненты: **Соколов Дмитрий Дмитриевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, профессор

Савченко Сергей Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра астрофизики, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Защита состоится 16 декабря 2026 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.1.262.02 при Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, дом 84/32, Астрокосмический центр ФИАН, зал семинаров - к.707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет». Заверенные отзывы направлять по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д.53 (АКЦ), диссертационный совет Д24.1.262.02.

Автореферат разослан 15 октября 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.1.262.02,
канд. физ.-мат. наук

Шахворостова Надежда Николаевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень её разработанности

За последние годы в связи с активным развитием интерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) [1] произошло существенное улучшение разрешения в наблюдениях активных ядер галактик (АЯГ). Примерами этого являются результаты программ наземно-космического интерферометра «Радио-астрон» [2—4] и Телескопа Горизонта Событий [5].

Релятивистские джеты из АЯГ представляют собой высококоллимированные потоки плазмы, которые, как предполагается, формируются в окрестностях аккрецирующих сверхмассивных чёрных дыр, обладающих угловым моментом (спином) [6]. Для большого количества АЯГ было обнаружено, что структура излучения их релятивистских джетов имеет выраженную поперечную стратификацию. Поперечная стратификация интенсивности излучения, при которой интенсивность возрастает к границам джета, называется уярчением к краю. Уярчение к краю обнаружено в таких источниках, как Mrk501 [7], M87 [8], 3C 84 [3], Cen A [9]; в 3C 273 обнаружен переход от двухгорбого поперечного профиля интенсивности излучения к одnogорбому на частотах 1.6 – 4.8 ГГц [10]; помимо этого, в M87 обнаружены трёхгорбые поперечные профили [11], наблюдаемые вплоть до масштабов нескольких гравитационных радиусов [12]. Кроме интенсивности, поперечная стратификация может проявляться и в других характеристиках излучения. Так, в M87 наблюдаются поперечные неоднородности спектрального индекса и поляризации [13], а поперечные градиенты меры фарадеевского вращения выявлены также в ряде других АЯГ [14].

Природа такой картины излучения неясна и является одним из наиболее активно развиваемых направлений в исследовании релятивистских джетов. Среди возможных механизмов формирования наблюдаемой поперечной структуры рассматривается, во-первых, доплеровское усиление, связанное с поперечной стратификацией поля скоростей. В частности, в M87 обнаружена выраженная стратификация поля скоростей, включающая медленный умеренно-релятивистский слой и более быструю ускоряющуюся компоненту [15]; наличие медленной оболочки использовалось также для интерпретации поперечной структуры излучения 3C 273 [10].

Во-вторых, существенную роль может играть пространственная зависимость распределения излучающих частиц по энергиям,

$$dn = k_e(\mathbf{r})\gamma^{-p}d\gamma. \quad (1)$$

Показатель степени p связан с оптически прозрачным спектральным индексом синхротронного излучения α_{thin} как

$$\alpha_{\text{thin}} = \frac{1-p}{2},$$

где используется определение спектрального индекса α с положительным знаком:

$$S_\nu \propto \nu^\alpha. \quad (2)$$

Степенное распределение частиц по энергиям может формироваться при ускорении на ударных волнах, в частности по механизму Ферми первого порядка [16], а также при магнитном пересоединении [17; 18]. При этом процессы ускорения могут быть локализованы в отдельных областях джета, например вблизи его границы вследствие развития неустойчивостей — пинчевых [19; 20] и Кельвина–Гельмгольца [13; 21]. Дополнительным механизмом формирования неоднородного поперечного распределения нетепловых частиц может служить сдвиговое ускорение [22; 23].

В-третьих, на поперечную структуру излучения могут существенно влиять эффекты оптической толщи [24]. Наконец, наблюдаемая поперечная стратификация излучения может возникать непосредственно вследствие неоднородной внутренней структуры джета, прежде всего стратификации магнитного поля и концентрации излучающей плазмы. Кроме того, несколько из указанных механизмов могут действовать одновременно [25].

Исследованию структуры магнитного поля в релятивистских джетах посвящено большое число работ. Вместе с тем при моделировании излучения геометрия магнитного поля нередко задаётся в виде нескольких заранее выбранных конфигураций: рассматриваются полоидальное, тороидальное и спиральное поле и исследуется их влияние на карты интенсивности и поляризации [26; 27]. Такой подход позволяет непосредственно исследовать влияние геометрии магнитного поля на наблюдаемое излучение, однако рассматриваемые конфигурации представляют собой выделенные случаи возможной структуры магнитного поля, а пространственные распределения различных физических величин в джете вводятся в модель независимо друг от друга. Более полное описание внутренней структуры дают аналитические и полуаналитические магнитогидродинамические (МГД) модели [28–30], в которых совместно определяются стационарные распределения магнитного поля, поля скоростей и полной концентрации плазмы. Преимуществом такого подхода является самосогласованность получаемой внутренней структуры джета. При этом предсказываемые полуаналитическими МГД-моделями [29–31] распределения физических величин хорошо согласуются с результатами численного моделирования [20; 32].

Необходимо подчеркнуть, что аналитические и полуаналитические МГД-модели определяют распределение полной, холодной концентрации плазмы, тогда как для расчёта синхротронного излучения требуется распределение излучающих нетепловых частиц. Таким образом, поскольку теоретическое моделирование не задаёт это распределение, всё больше работ посвящено исследованию различных вариантов пространственного распределения излучающей плазмы и возможных физических механизмов его формирования. В моделировании такое распределение нередко задаётся феноменологически, причём его выбор

может существенно влиять на получаемую морфологию излучения. Так, для воспроизведения уячѐнных к краю поперечных профилей интенсивности в [33] использовались гауссовы распределения тепловых и нетепловых электронов, при которых соответствующий эффект был получен для высоких значений спина чёрной дыры. В [34] сходное ограничение было получено для кольцеобразного гауссова распределения излучающих частиц вблизи основания джета, а в [35] с использованием такого распределения воспроизведѐн также трёхгорбый поперечный профиль. В работах [36; 37] при расчѐте переноса излучения исключается высокосомагнитная центральная область джета. Другие возможные способы связать распределение излучающих частиц с локальными физическими характеристиками течения включают омический нагрев и предположение о равномерном распределении энергии магнитного поля и излучающих частиц [26]; вместе с тем ряд работ указывает на возможность нарушения равномерного распределения [38].

Таким образом, исследование того, как внутренняя структура релятивистского джета и пространственное распределение излучающей плазмы формируют наблюдаемую поперечную стратификацию излучения, представляет собой актуальное направление моделирования излучения релятивистских джетов. Именно этой проблематике посвящена диссертация.

Целью данной работы является установление связи между наблюдаемой поперечной стратификацией синхротронного излучения релятивистских джетов АЯГ, их внутренней МГД-структурой и пространственным распределением излучающей плазмы, а также разработка методов количественного определения физических параметров джета по наблюдательным данным.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- Провести численное моделирование синхротронного излучения с самопоглощением в полуаналитических МГД-моделях релятивистского джета, исследовать пространство параметров моделирования и определить условия формирования эффекта уячѐния к краю и многогорбых поперечных профилей интенсивности, а также установить, какие пространственные распределения излучающей плазмы способны воспроизводить наблюдаемую морфологию.
- 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.
- 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.

Научная новизна

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 значимость

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 M87, и дальнейшего построения самосогласованных моделей излучения релятивистских джетов.

Методология и методы исследования

В работе сочетаются теоретические, численные и наблюдательные подходы к изучению релятивистских джетов АЯГ. Внутренняя структура джета описывается с использованием самосогласованных полуаналитических и аналитических моделей стационарного осесимметричного релятивистского МГД-течения. В полуаналитической модели для описания хорошо коллимированных течений используется цилиндрическое приближение, тогда как аналитическая

модель учитывает продольную эволюцию внутренней структуры джета. Для построения поперечных профилей и карт полной интенсивности синхротронного излучения численно решается уравнение переноса с учётом самопоглощения. Для получения независимых ограничений на магнитное поле и концентрацию излучающей плазмы используются опубликованные результаты многочастотных РСДБ-измерений размеров и яркостных температур радио- и миллиметровых ядер АЯГ.

Основные положения, выносимые на защиту

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 кора.
3. Установлено, что для согласования модельных амплитуд и характерной формы поперечных профилей интенсивности с наблюдениями доля излучающих частиц в центральном коре 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 M87, 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 уячнённая 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.

Достоверность полученных результатов обеспечивается согласованием предсказаний используемых полуаналитических и аналитических моделей внутренней структуры релятивистских джетов с результатами независимого численного МГД-моделирования [20; 32]. 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.

Апробация работы

Результаты были доложены на семинарах Астрокосмического центра и Отдела теоретической физики ФИАН им. П.Н. Лебедева и на 4 научных конференциях, 3 из которых — международные:

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. Пашченко, «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, «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.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 3 научных статьях [A1—A3], опубликованных в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК.

- A1. *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.
- A2. *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.

- A3. *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. — P. 1–7.

Личный вклад

В работе [A1] вклад диссертанта 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.

В работе [A2] вклад диссертанта заключается в построении карт полной интенсивности на основе аналитической МГД-модели, анализе, интерпретации и обсуждении полученных результатов, а также подготовке публикации.

В работе [A3] вклад диссертанта заключается в интерпретации эволюции магнитного поля и концентрации излучающей плазмы с шириной джета, а также подготовке публикации.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 125 страниц, включая 26 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 126 наименований.

Содержание работы

Во **введении** рассматривается современное состояние исследований поперечной стратификации излучения релятивистских джетов активных ядер галактик и возможные механизмы её формирования, связанные с внутренней МГД-структурой джета и пространственным распределением излучающей плазмы. Обосновывается актуальность темы диссертации, связанная с необходимостью установления связи между этими физическими характеристиками джета и наблюдаемой морфологией синхротронного излучения. Далее формулируются цель и задачи работы, обсуждаются её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, характеризуются методология и методы исследования. Затем приводятся положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов, приводятся сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации и личном вкладе диссертанта, а также характеризуются объём и структура работы.

Первая глава посвящена исследованию механизмов воспроизведения эффекта уярчения к краю в поперечных профилях интенсивности релятивистских джетов в рамках полуаналитических МГД-моделей. В главе рассматривается моделирование синхротронного излучения с самопоглощением для джета с самосогласованной внутренней структурой и анализируются условия формирования двухгорбых и трёхгорбых поперечных профилей интенсивности,

в частности применительно к М87. Основные результаты главы опубликованы в работе [A1].

В §1.1 задаётся внутренняя структура джета и обсуждаются варианты пространственного распределения излучающей плазмы. Сначала кратко излагается подход Грэда–Шафранова в цилиндрическом приближении, позволяющий описывать внутреннюю структуру джета в рамках стационарной осесимметричной магнитогидродинамики. Затем рассматриваются две полуаналитические МГД-модели внутренней структуры, М1 и М2, и выделяются три характерные области поперечного сечения джета: центральный кор, переходная область и внешняя область. В завершение раздела описываются используемые в главе варианты задания концентрации излучающей плазмы, включая случай излучения всей плазмы, распределения, соответствующие равномерному и омическому нагреву, а также ступенчатое подавление излучения центрального кора.

В §1.2 формулируется задача расчёта поперечных профилей интенсивности излучения. Джет рассматривается в цилиндрическом приближении, и численно решается уравнение переноса для синхротронного излучения с самопоглощением. Приводятся используемые выражения для коэффициентов излучения и поглощения, обсуждается их преобразование между системой отсчёта плазмы и лабораторной системой, а также вводятся параметры, задающие энергетическое распределение излучающих частиц.

В §1.3 задаётся пространство параметров моделирования. Сначала обсуждаются параметры модели и оразмеривание МГД-решения, включая начальную замагниченность, радиус светового цилиндра и полный магнитный поток. Рассматриваются физические ограничения на радиус светового цилиндра, в том числе связанные со спином центральной чёрной дыры и вращением аккреционного диска. Затем описывается выбор пробных параметров для обобщённого моделирования: характерной геометрии джета, углов наблюдения, значений начальной замагниченности, безразмерной ширины джета и показателя степени распределения излучающих частиц по энергиям. При этом пространство параметров выбирается так, чтобы, с одной стороны, опираться на наблюдательные данные для М87, а с другой — охватывать условия, характерные для более широкого класса АЯГ.

В §1.4 рассматривается случай, когда в излучении участвует вся плазма джета, предсказываемая МГД-моделями.

В §1.4.1 исследуются поперечные профили интенсивности в режиме фиксированной геометрической ширины джета. Последовательно анализируется влияние угла наблюдения, начальной замагниченности, оптической толщи и наличия медленной оболочки на форму профилей. Показано, что в оптически прозрачном режиме доминирует вклад центрального кора, тогда как двухгорбые профили возникают при больших максимальных Лоренц-факторах или при достаточно большой оптической толще. В модели М2 наличие медленной оболочки в сочетании с повышенной концентрацией плазмы вблизи границы может приводить к формированию трёхгорбых профилей интенсивности.

При этом выраженное воспроизведение наблюдаемой морфологии одной лишь МГД-стратификацией достигается лишь в ограниченной области пространства параметров.

В §1.4.2 рассматривается эволюция поперечного профиля интенсивности вдоль джета в режиме фиксированного радиуса светового цилиндра. Показано, что по мере удаления от центральной машины профиль может переходить от двухгорбой структуры к одногорбой. Кроме того, стратификация внутренней структуры и оптической толщи способна приводить к видимому смещению максимума интенсивности относительно хребтовой линии даже для прямого стационарного осесимметричного джета.

В §1.5 исследуются модифицированные распределения излучающей плазмы.

В §1.5.1 рассматривается модель с подавлением излучения центрального кора, соответствующая преимущественной локализации нетепловых частиц во внешней области джета. Показано, что уменьшение концентрации излучающих частиц в центральной области существенно усиливает уярчение к краю и позволяет получить выраженные трёхгорбые поперечные профили интенсивности.

В §1.5.2 анализируется модель омического нагрева, в которой пространственное распределение излучающих частиц определяется плотностью электрического тока в собственной системе отсчёта плазмы. Такое распределение естественным образом выделяет области повышенной плотности тока в центральной части и вблизи границы джета и может приводить к формированию симметричных уярчённых к краю и трёхгорбых профилей интенсивности.

В §1.5.3 рассматривается распределение излучающей плазмы, соответствующее равномерному распределению энергии между магнитным полем и излучающими частицами. Показано, что в рассматриваемых МГД-моделях такое предположение не приводит к существенному подавлению вклада центрального кора и не даёт значительных отличий от случая, когда в излучении участвует вся плазма джета.

В §1.6 анализируется избыточная интенсивность, получаемая в моделировании. Показано, что в случае, когда излучает вся плазма джета, модельная пиковая интенсивность существенно превышает типичные наблюдаемые значения, главным образом за счёт вклада плотного центрального кора. Для согласования абсолютного уровня интенсивности с наблюдениями необходимо, чтобы в центральной области в синхротронном переносе участвовала лишь малая доля плазмы, порядка одного процента или меньше, тогда как основная её часть оставалась холодной.

В §1.7 проводится обсуждение полученных результатов.

В §1.7.1 проводится сводный анализ поперечных профилей интенсивности для случая, когда в излучении участвует вся плазма джета. Рассматривается

зависимость морфологии профилей от параметров модели и показано, что разрешимое уярчение обоих краёв трудно получить одновременно с физически приемлемой оптической толщиной и интенсивностью.

В §1.7.2 модельные значения магнитного поля и концентрации излучающих частиц сопоставляются с оценками классической модели Блэндфорда–Кёнигла. Показано, что при излучении всей плазмы концентрация существенно превышает соответствующие оценки, тогда как для модели с подавлением центрального кора расхождение уменьшается, а наилучшее соответствие средней концентрации излучающих частиц получено для модели омического нагрева.

В §1.7.3 проводится сводный анализ профилей интенсивности при ограниченной излучающей компоненте. Показано, что качественное воспроизведение трёхгорбой структуры требует участия в синхротронном переносе лишь малой доли плазмы центрального кора, тогда как модель омического нагрева при высокой начальной замагниченности способна формировать симметричные уярчённые к краю профили с интенсивностью, наиболее близкой к наблюдаемой среди рассмотренных вариантов.

В §1.7.4 рассматриваются диапазоны физических параметров, соответствующие исследованным моделям и режимам излучения, включая полный магнитный поток, мощность джета, магнитное поле и концентрацию плазмы.

В §1.8 суммируются основные результаты главы.

Вторая глава посвящена исследованию механизмов воспроизведения эффекта уярчения к краю с использованием аналитической МГД-модели внутренней структуры джета. В отличие от главы 1, здесь используется аналитическое описание, позволяющее учитывать продольную эволюцию внутренней структуры джета и существенно ускорять расчёт переноса излучения и построение карт интенсивности. Основные результаты главы опубликованы в работе [A2].

В §2.1 описывается аналитическая модель внутренней структуры джета. Сначала вводится аналитическое описание электромагнитного поля, затем рассматривается кинематическая аппроксимация скорости течения, задаются распределение полной концентрации плазмы, давление джета и форма его границы. После этого рассчитывается безразмерный коэффициент излучения с учётом доплеровской поправки. Показано, что в области применимости модели аналитические зависимости хорошо согласуются с численным МГД-решением и позволяют непосредственно рассчитывать распределения магнитного поля, скорости и концентрации плазмы вдоль и поперёк джета, существенно упрощая последующий расчёт синхротронного излучения.

В §2.2 на основе аналитической модели рассчитываются карты полной интенсивности. Рассматриваются параболическая и коническая геометрии джета, два значения радиуса светового цилиндра и два варианта пространственного распределения излучающей плазмы: равномерное распределение энергии между магнитным полем и излучающими частицами и распределение, при котором излучает только плазма, расположенная на внешних магнитных поверхностях,

$\Psi \geq 0.75\Psi_0$. Показано, что рост локального коэффициента излучения к границе джета сам по себе не гарантирует уярчения к краю на картах полной интенсивности, поскольку вклад соответствующей области ограничивается её малой геометрической толщиной. При равномерном распределении энергии заметное уярчение к краю сохраняется только для рассмотренного параболического джета при $R_L = 0.01$ пк. Если излучает только плазма на внешних магнитных поверхностях, вклад краевых областей существенно возрастает и формируются как уярченные к краю, так и трёхгорбые структуры. В области эффективного МГД-ускорения уярчение к краю преимущественно ожидается ближе к основанию джета, тогда как ниже по течению происходит переход к доминированию центральной области.

В §2.3 суммируются основные результаты главы.

Третья глава посвящена применению метода независимого определения магнитного поля и концентрации излучающей плазмы к многочастотным РСДБ-измерениям параметров радио- и миллиметровых ядер АЯГ. Основные результаты главы основаны на работе [A3].

В §3.1 вводятся моделируемые и наблюдаемые физические величины. Магнитное поле B^* , концентрация излучающей плазмы N^* и Доплер-фактор задаются степенными зависимостями от ширины джета d , а форма его границы связывает ширину с расстоянием вдоль джета. В качестве основных наблюдаемых величин используются многочастотные измерения углового размера и яркостной температуры радиоядра, характеризующиеся индексами p и q ; дополнительно вводится частотная зависимость положения радиоядра, описываемая индексом сдвига ядра k_r . Эти соотношения позволяют связать наблюдаемые частотные зависимости с пространственными зависимостями физических параметров джета.

В §3.2 выводится связь между индексами спада магнитного поля и концентрации излучающей плазмы. Индексы b и s , описывающие зависимости $B^*(d)$ и $N^*(d)$, выражаются через наблюдаемые индексы p и q и индекс t , задающий зависимость Доплер-фактора от ширины джета. Полученные соотношения позволяют независимо оценивать пространственные зависимости магнитного поля и концентрации излучающей плазмы без априорного задания связи между ними и тем самым непосредственно проверять предположение о равномерном распределении энергии.

В §3.3 полученные соотношения применяются к многочастотным измерениям параметров радио- и миллиметровых ядер.

В §3.3.1 рассматриваются ожидаемые значения наблюдаемых индексов p и q для различных режимов течения джета, соответствующих различным зависимостям магнитного поля, концентрации излучающей плазмы и Доплер-фактора от ширины джета. Сопоставление этих моделей с наблюдаемыми частотными зависимостями позволяет определить, какие режимы течения способны воспроизводить измеряемое поведение размера и яркостной температуры радиоядра.

В §3.3.2 метод применяется к опубликованным многочастотным данным. Получены зависимости индексов b и s от индекса t . Для физически допустимого диапазона $0 \leq t \leq 1$ спад магнитного поля оказывается более быстрым, чем $B^* \propto d^{-2}$, ожидаемый для чисто полоидальной компоненты при сохранении магнитного потока. Полученная зависимость концентрации излучающей плазмы указывает на наличие дополнительного источника излучающих частиц вдоль джета, который может быть связан с непрерывным ускорением части холодной плазмы до ультрарелятивистских энергий. Рассматривается также непосредственная связь между индексами b и s и её соответствие условиям сохранения концентрации излучающей плазмы и равномерного распределения энергии.

В §3.4 рассматривается экстраполяция параметров джета к малым масштабам с учётом его геометрии. Показано, что дополнительная информация о форме джета, полученная из непосредственных измерений либо из анализа частотно-зависимого сдвига радиоядра, позволяет перейти от зависимостей $B^*(d)$ и $N^*(d)$ к зависимостям $B^*(r)$ и $N^*(r)$ вдоль джета и экстраполировать магнитное поле к масштабам порядка гравитационного радиуса. В качестве «полного набора наблюдаемых» рассматриваются многочастотные измерения ширины, яркостной температуры и положения радиоядра, позволяющие определять $B^*(r)$, $N^*(r)$ и форму границы джета без априорного предположения о связи между магнитным полем и концентрацией излучающей плазмы.

В §3.5 суммируются основные результаты главы.

В **заключении** подведены итоги работы, обсуждаются перспективы дальнейших исследований по данной тематике.

Список литературы

1. Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиоинтерферометре с большой базой // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 1965. — Т. 8, № 4. — С. 651—654.
2. Gómez J. L., Lobanov A. P., Bruni G., [et al.]. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // Astrophysical Journal. — 2016. — Feb. — Vol. 817, no. 2. — P. 96.
3. Giovannini G., Savolainen T., Orienti M., [et al.]. A wide and collimated radio jet in 3C84 on the scale of a few hundred gravitational radii // Nature Astronomy. — 2018. — Apr. — Vol. 2. — P. 472—477.
4. Vega-García L., Lobanov A. P., Perucho M., [et al.]. Multiband RadioAstron space VLBI imaging of the jet in quasar S5 0836+710 // Astronomy and Astrophysics. — 2020. — Sept. — Vol. 641. — A40.
5. Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama K., Alberdi A., [et al.]. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // Astrophysical Journal Letters. — 2019. — Apr. — Vol. 875, no. 1. — P. L1.
6. Blandford R., Meier D., Readhead A. Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2019. — Aug. — Vol. 57. — P. 467—509.
7. Giroletti M., Giovannini G., Feretti L., [et al.]. Parsec-Scale Properties of Markarian 501 // Astrophysical Journal. — 2004. — Jan. — Vol. 600, no. 1. — P. 127—140.
8. Walker R. C., Hardee P. E., Davies F. B., [et al.]. The Structure and Dynamics of the Subparsec Jet in M87 Based on 50 VLBA Observations over 17 Years at 43 GHz // Astrophysical Journal. — 2018. — Mar. — Vol. 855, no. 2. — P. 128.
9. Janssen M., Falcke H., Kadler M., [et al.]. Event Horizon Telescope observations of the jet launching and collimation in Centaurus A // Nature Astronomy. — 2021. — July. — Vol. 5. — P. 1017—1028.
10. Bruni G., Gómez J. L., Vega-García L., [et al.]. RadioAstron reveals a spine-sheath jet structure in 3C 273 // Astronomy and Astrophysics. — 2021. — Oct. — Vol. 654. — A27.
11. Hada K. The Structure and Propagation of the Misaligned Jet M87 // Galaxies. — 2017. — Jan. — Vol. 5, no. 1. — P. 2.
12. Lu R.-S., Asada K., Krichbaum T. P., [et al.]. A ring-like accretion structure in M87 connecting its black hole and jet // Nature. — 2023. — Apr. — Vol. 616, no. 7958. — P. 686—690.

13. *Nikonov A. S., Kovalev Y. Y., Kravchenko E. V., [et al.].* Properties of the jet in M87 revealed by its helical structure imaged with the VLBA at 8 and 15 GHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2023. — Dec. — Vol. 526, no. 4. — P. 5949—5963.
14. *Gabuzda D. C., Roche N., Kirwan A., [et al.].* Parsec scale Faraday-rotation structure across the jets of nine active galactic nuclei // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2017. — Dec. — Vol. 472, no. 2. — P. 1792—1801.
15. *Mertens F., Lobanov A. P., Walker R. C., [et al.].* Kinematics of the jet in M 87 on scales of 100-1000 Schwarzschild radii // *Astronomy and Astrophysics.* — 2016. — Oct. — Vol. 595. — A54.
16. *Kirk J. G., Melrose D. B., Priest E. R.* Plasma Astrophysics. Vol. 24 / ed. by A. O. Benz, T. J.-L. Courvoisier. — Berlin, Heidelberg : Springer, 1994. — (Saas-Fee Advanced Course).
17. *Sironi L., Spitkovsky A.* Relativistic Reconnection: An Efficient Source of Non-thermal Particles // *Astrophysical Journal Letters.* — 2014. — Mar. — Vol. 783, no. 1. — P. L21.
18. *Ball D., Sironi L., Özel F.* Electron and Proton Acceleration in Trans-relativistic Magnetic Reconnection: Dependence on Plasma Beta and Magnetization // *Astrophysical Journal.* — 2018. — July. — Vol. 862, no. 1. — P. 80.
19. *McKinney J. C.* General relativistic magnetohydrodynamic simulations of the jet formation and large-scale propagation from black hole accretion systems // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2006. — June. — Vol. 368, no. 4. — P. 1561—1582.
20. *Chatterjee K., Liska M., Tchekhovskoy A., [et al.].* Accelerating AGN jets to parsec scales using general relativistic MHD simulations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2019. — Dec. — Vol. 490, no. 2. — P. 2200—2218.
21. *Hardee P. E., Eilek J. A.* Using Twisted Filaments to Model the Inner Jet in M 87 // *Astrophysical Journal.* — 2011. — July. — Vol. 735, no. 1. — P. 61.
22. *Ostrowski M.* Diffusive acceleration of cosmic ray particles at tangential discontinuity of velocity field // *Astronomy and Astrophysics.* — 1990. — Nov. — Vol. 238, no. 1/2. — P. 435—438.
23. *Ostrowski M.* Acceleration of ultra-high energy cosmic ray particles in relativistic jets in extragalactic radio sources // *Astronomy and Astrophysics.* — 1998. — July. — Vol. 335. — P. 134—144.
24. *Zakamska N. L., Begelman M. C., Blandford R. D.* Hot Self-Similar Relativistic Magnetohydrodynamic Flows // *Astrophysical Journal.* — 2008. — June. — Vol. 679, no. 2. — P. 990—999.

25. *Gabuzda D. C.* Inherent and Local Magnetic Field Structures in Jets from Active Galactic Nuclei // *Galaxies*. — 2021. — Aug. — Vol. 9, no. 3. — P. 58.
26. *Lyutikov M., Pariev V. I., Gabuzda D. C.* Polarization and structure of relativistic parsec-scale AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2005. — July. — Vol. 360, no. 3. — P. 869–891.
27. *Kramer J. A., MacDonald N. R.* Ray-tracing in relativistic jet simulations: A polarimetric study of magnetic field morphology and electron scaling relations // *Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — Dec. — Vol. 656. — A143.
28. *Beskin V. S., Malyshkin L. M.* On the Internal Structure of Relativistic Jets // *Astronomy Letters*. — 2000. — Apr. — Vol. 26, no. 4. — P. 208–218.
29. *Beskin V. S., Nokhrina E. E.* The effective acceleration of plasma outflow in the paraboloidal magnetic field // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — Mar. — Vol. 367, no. 1. — P. 375–386.
30. *Beskin V. S., Chernoglazov A. V., Kiselev A. M., [et al.]*. On the internal structure of relativistic jets collimated by ambient gas pressure // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Dec. — Vol. 472, no. 4. — P. 3971–3978.
31. *Lyubarsky Y.* Asymptotic Structure of Poynting-Dominated Jets // *Astrophysical Journal*. — 2009. — June. — Vol. 698, no. 2. — P. 1570–1589.
32. *Komissarov S. S., Vlahakis N., Königl A., [et al.]*. Magnetic acceleration of ultrarelativistic jets in gamma-ray burst sources // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Apr. — Vol. 394, no. 3. — P. 1182–1212.
33. *Broderick A. E., Loeb A.* Imaging the Black Hole Silhouette of M87: Implications for Jet Formation and Black Hole Spin // *Astrophysical Journal*. — 2009. — June. — Vol. 697, no. 2. — P. 1164–1179.
34. *Takahashi K., Toma K., Kino M., [et al.]*. Fast-spinning Black Holes Inferred from Symmetrically Limb-brightened Radio Jets // *Astrophysical Journal*. — 2018. — Dec. — Vol. 868, no. 2. — P. 82.
35. *Ogihara T., Takahashi K., Toma K.* A Mechanism for the Triple-ridge Emission Structure of AGN Jets // *Astrophysical Journal*. — 2019. — May. — Vol. 877, no. 1. — P. 19.
36. *Cruz-Orsio A., Fromm C. M., Mizuno Y., [et al.]*. State-of-the-art energetic and morphological modelling of the launching site of the M87 jet // *Nature Astronomy*. — 2022. — Jan. — Vol. 6. — P. 103–108.
37. *Fromm C. M., Cruz-Orsio A., Mizuno Y., [et al.]*. Impact of non-thermal particles on the spectral and structural properties of M87 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2022. — Apr. — Vol. 660. — A107.
38. *Nokhrina E. E.* Brightness temperature - obtaining the physical properties of a non-equipartition plasma // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — June. — Vol. 468, no. 2. — P. 2372–2381.

Фролова Валерия Александровна

Моделирование синхротронного излучения с учётом самопоглощения
от стратифицированного релятивистского джета

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____