

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на диссертацию

Фроловой Валерии Александровны

«Моделирование синхротронного излучения с учётом самопоглощения

от стратифицированного релятивистского джета»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.1. Физика космоса, астрономия.

В связи с появлением большого количества наблюдательных данных в высоком разрешении для релятивистских джетов из активных ядер галактик возникает необходимость их интерпретации, и в настоящее время эта проблема является одним из центральных вопросов моделирования излучения от релятивистских джетов. Исследование В.А. Фроловой посвящено моделированию синхротронного излучения с использованием полуаналитических и аналитических магнитогидродинамических моделей и сфокусировано на объяснении эффектов сильной поперечной стратификации излучения — уярчения к краю.

Диссертация состоит из трёх глав и представляет собой последовательное рассмотрение того, как внутренняя структура джета и пространственное распределение излучающей плазмы формируют наблюдаемое излучение, с применением различных подходов: полуаналитического и аналитического МГД-моделирования, а также непосредственного анализа многочастотных РСДБ-данных.

Первая глава посвящена наиболее общему исследованию условий формирования поперечных профилей интенсивности на основе самосогласованной полуаналитической МГД-структуры джета. В.А. Фролова провела систематическое исследование пространства параметров моделирования. За основу была принята геометрия джета М87 — ближайшего и одного из наиболее хорошо разрешённых источников с выраженной поперечной структурой; при выборе параметров использовались характерные для разных классов АЯГ углы наблюдения и статистические данные по РСДБ-кинематике. Таким образом, в первую очередь В.А. Фролова исследовала общие факторы, определяющие условия формирования одно-, двух- и трёхгорбых поперечных профилей интенсивности; затем для М87 были получены оценки магнитного поля и концентрации излучающей плазмы и сопоставлены с оценками в модели Блэндфорда–Кёнигла. Разработанный в этой работе подход может быть применён для моделирования и других источников, что составляет одно из направлений дальнейшей работы.

Чтобы отделить роль самой МГД-стратификации от влияния распределения излучающих частиц, В.А. Фролова сначала рассмотрела случай, в котором излучающие частицы следуют распределению полной плазмы, заданному МГД-решением. Анализ показал, что одной МГД-стратификации магнитного поля, скорости и полной концентрации плазмы недостаточно для одновременного воспроизведения наблюдаемой

морфологии и характерной интенсивности. Далее В.А. Фролова рассмотрела ограничение излучения центрального кора, омический нагрев и равнораспределение энергии и пришла к выводу, что вклад центрального кора должен быть существенно подавлен, а доля излучающих частиц в нём должна составлять порядка одного процента или меньше от полной концентрации плазмы. Это ограничение является ключевым результатом работы. Дальнейшим шагом является исследование конкретных механизмов формирования пространственного распределения излучающей плазмы, в частности моделирование неустойчивостей в джете.

Подобный результат был впервые получен при моделировании излучения на основе самосогласованной внутренней МГД-структуры джета. Однако применение полуаналитических моделей вычислительно затратно, что послужило одной из мотивировок разработки аналитической модели внутренней структуры джета в научной группе. Во второй главе В.А. Фролова описывает эту модель и строит на её основе карты полной интенсивности для различных геометрий и распределений излучающей плазмы. Показано, что в такой постановке также рост локального коэффициента излучения к границе сам по себе не обеспечивает выраженного уярчения к краю, тогда как локализация излучающих частиц на внешних магнитных поверхностях существенно усиливает краевой вклад и может приводить к трёхкомпонентной структуре интенсивности.

Наконец, в третьей главе задача определения внутренней структуры джета рассматривается с привлечением наблюдательных данных. Соавторами был разработан метод независимого определения магнитного поля и концентрации излучающей плазмы по многочастотным измерениям размеров и яркостных температур радио- и миллиметровых ядер без априорного предположения о равнораспределении энергии. Применяв этот метод к опубликованным РСДБ-данным, В.А. Фролова проинтерпретировала зависимости магнитного поля и концентрации излучающей плазмы от ширины джета. Было показано, что магнитное поле убывает быстрее, чем ожидается при сохранении полоидального магнитного потока, что может указывать на его диссипацию или смещение наблюдаемой области относительно магнитных поверхностей; поведение концентрации требует дополнительного источника излучающих частиц. Полученные зависимости свидетельствуют также об отклонении от равнораспределения энергии.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятой теории переноса синхротронного излучения с самопоглощением, самосогласованных МГД-моделей и опубликованных многочастотных РСДБ-данных. Распределения физических величин в полуаналитических моделях согласуются с результатами независимого численного МГД-моделирования, а основные выводы первой главы проверены в широком диапазоне параметров. Результаты диссертации опубликованы в трёх статьях в журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* и представлены на российских и международных научных конференциях и семинарах.

За время работы над диссертацией В.А. Фролова проявила себя как самостоятельный исследователь. Она стремится рассматривать научную проблему всесторонне, уделяя большое внимание деталям моделирования и интерпретации результатов, а также ограничениям используемых подходов. В процессе работы В.А. Фролова самостоятельно разрабатывала программные коды для моделирования излучения и анализа результатов и систематизировала материалы по теме исследования. Особенно нужно отметить такое качество Валерии как скрупулёзность и критичность при анализе полученных результатов. Например, при рассмотрении неоднородной модели величина спектрального индекса получилась больше ожидаемого теоретического значения 2.5. Валерия провела анализ, дополнительные проверки и выяснила, что результат действительно может реализоваться для неоднородных источников, и представляет собой малоизвестное явление реабсорбции. Помимо научной работы Валерия активно участвует и делает доклады на российских и международных конференциях, занимается преподавательской работой. В.А. Фролова была исполнителем двух грантов (грант РНФ успешно завершён, грант Фонда "Базис" выполняется в течение двух лет) и показала себя ценным участником работы над проектом. Всё сказанное позволяет считать В.А. Фролову сформировавшимся исследователем, демонстрирующим все составляющие работы учёного.

Диссертация Фроловой В.А. является завершённой научно-квалификационной работой, выполнена на высоком уровне, демонстрирует квалификацию и компетентность автора и полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Автор работы, Фролова Валерия Александровна, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по этой специальности.

Научный руководитель,
доктор физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник — заведующий
лабораторией
Лаборатория фундаментальных и
прикладных исследований релятивистских
объектов Вселенной МФТИ

Нохрина Елена Евгеньевна

« 31 » августа 2026 г.

ЗАВЕРЯЮ
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УЧЕНОГО СОВЕТА МФТИ
ЕГ ЕВСЕЕВ

Подпись Нохриной Елены Евгеньевны удостоверяю:
Ученый секретарь Ученого совета МФТИ, к.ф.-м.н., доцент
Е.Г. Евсеев

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Почтовый адрес: Россия, 117303, г. Москва, ул. Керченская, д. 1А, корп. 1

Телефон: +7 (495) 408-45-54

Адрес электронной почты: info@mipt.ru