

«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ФГБУН «КраО РАН»  
Ростопчина-Шаховская Алла Николаевна



04

2025 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Крымская астрофизическая обсерватория РАН»  
о диссертации М. С. Бутузовой

Докторская диссертация «Джеты активных ядер галактик на различных пространственных масштабах: форма, ориентация, физические условия и переменность наблюдаемых параметров» выполнена в отделе радиоастрономии и геодинамики Крымской астрофизической Обсерватории РАН (КраО РАН).

В период подготовки диссертации Бутузова Марина Сергеевна работала в КраО РАН на должности старшего научного сотрудника.

В 2008 году Бутузова М.С. с отличием окончила Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина по специальности «Астрономия» с присуждением квалификации астронома, физика. С 2008 по 2011 обучалась в аспирантуре Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины (г. Харьков). Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук на тему «Физические параметры килопарсековых джетов квазаров, определяемые по радио- и рентгеновскому излучению» защитила 14 июня 2012 года в специализированном ученом совете Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (шифр Д 64.051.02).

Диплом о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук ДК № 008564 выдан 26 сентября 2012 года.

По результатам рассмотрения диссертации «Джеты активных ядер галактик на различных пространственных масштабах: форма, ориентация, физические условия и переменность наблюдаемых параметров» принято следующее заключение:

Основные цели диссертационного исследования Бутузовой М.С. состояли в исследовании формы и движения джетов активных ядер галактик

от парсековых до килопарсековых масштабов и изучении влияния искривленной формы и нерадиального движения на различные наблюдаемые свойства. А именно на долговременную и внутрисуточную переменность потока, квазипериодичность изменения плотности потока излучения и корреляцию между различными спектральными диапазонами и РСДБ-данными, поперечные распределения свойств поляризации.

В диссертационной работе для достижения поставленных целей были успешно решены следующие задачи:

- Разработана геометрическая и кинематическая модель для описания винтовой формы джетов активных ядер галактик на парсековых масштабах.
- Данная модель была применена при интерпретации данных фотометрических и радиоинтерферометрических наблюдений отдельных блазаров.
- Проанализированы прецессия центральной машины и неустойчивость Кельвина-Гельмгольца как возможные причины формирования винтовой формы джетов на примере джета блазара OJ 287.
- Проведено моделирование поперечных распределений свойств поляризации джетов в рамках разработанной модели при использовании широкого диапазона вариаций модельных параметров. Сравнение с данными РСДБ-наблюдений показало хорошее качественное согласие.
- Исследована внутрисуточная и долговременная оптическая переменность потока излучения блазара S5 0716+714 и сделан вывод относительно возможности образования переменности на короткой временной шкале вследствие искривленного движения субкомпонентов джета.
- Проанализировано обратное комптоновское рассеяние излучения центрального источника как возможный механизм образования рентгеновского излучения килопарсековых джетов квазаров.
- Проведена оценка скорости и угла килопарсековых джетов с лучом зрения в рамках предложенного выше механизма образования их рентгеновского излучения.
- Сформулированы выводы относительно формы и кинематики джетов от парсековых до килопарсековых масштабов.

#### **Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Личный вклад соискателя в получении результатов, представленных в диссертации, определяющий. Соискателем самостоятельно разработана модель винтового джета с нерадиальным движением компонентов, в рамках этой модели интерпретированы данные долговременных фотометрических и РСДБ-наблюдений блазара S5 0716+714, проведено моделирование свойств поляризации и получена оценка скоростей и направлений килопарсековых джетов. Так в 1/3 публикаций диссертант является единственным автором. В



большинстве коллективных работ Бутузова М.С. является первым автором. В остальных статьях вклад соискателя не меньший, чем других соавторов.

### **Степень достоверности результатов проведенных соискателем исследований.**

Результаты достоверны, так как при их получении использовались стандартные математические методы при моделировании, широко распространенный метод кинетического уравнения Больцмана при получении аналитических выражений, а также данные наблюдений на инструментах VLBI, Chandra и оптических телескопах АЗТ-8 (КрАО РАН), АЗТ-5 (ГАИШ МГУ) с апробированной методикой обработки. Результаты докладывались на семинарах и конференциях, опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах и цитируются коллегами.

### **Новизна проведенных соискателем исследования.**

Научная новизна исследований, представленных диссертантом определяется следующим:

- Разработана модель винтового джета с нерадиальным движением компонентов и применена для интерпретации различных наблюдаемых свойств и их корреляции между собой. В частности объяснено различие периодов переменности плотности потока излучения в различных спектральных диапазонах, различие в скорости движения наблюдаемых РСДБ-деталей джета, чередование интервалов сильной положительной, отрицательной корреляции и её отсутствия между интенсивностью излучения в различных спектральных диапазонах и позиционным углом внутренней части парсекового джета.
- Доказано, что джеты на парсековых масштабах имеют хорошо упорядоченное магнитное поле. При этом впервые показано, что по асимметрии поперечного джету распределения направления поляризации невозможно однозначно определить направление закрутки винтового магнитного поля в струе. Также получено, что ширина сердцевины джета, содержащей тороидальное магнитное поле больше, чем ширина области, в которой наблюдается продольное направление электрического вектора в волне.
- Интерпретация рентгеновского излучения джетов на килопарсековых масштабах обратным комптоновским рассеянием излучения, образованного в парсековом джете, наиболее просто объясняет наблюдаемые свойства и дает универсальный метод определения направления и скорости килопарсековых джетов.

### **Практическая значимость и ценность научных работ соискателя.**

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в широком круге задач, связанных с феноменом активных ядер галактик. В-первых, предложенная модель винтового джета может быть применена при



интерпретации новых данных РСДБ-наблюдений инструментами Event Horizon Telescope (EHT) и Global Millimeter VLBI Array (GMVA), указывающие на изогнутую форму джетов активных ядер галактик, и способствовать определению причины искривления струи. Модель, представленная в диссертации, может быть применена для исследования структуры потока джета и физических условий в нем. Так результат о присутствии синхротронного самопоглощения в оптическом диапазоне в джете блазара S5 0716+714 был отмечен Научным советом по астрономии РАН как важнейшее достижение в секции Внегалактической астрономии за 2022 год.

Во-вторых, присутствие хорошо упорядоченного магнитного поля в джетах на парсековых масштабах ограничивает теоретические модели распространения джетов, механизмы переменности наблюдаемых величин и предположения о природе наблюдаемых ярких РСДБ-деталей.

В-третьих, исследования джетов от парсековых до килопарсековых масштабов, совместно с исследованиями квазипериодичности величин, относящихся к субпарсековым и парсековым масштабам, востребованы для эволюционных моделей галактик. Для многоканальной астрономии и прогнозирования результатов проектов пульсарного тайминга и космического лазерного интерферометра LISA актуальными являются вывод об отсутствии в центре блазара OJ 287 тесной системы двойной черной дыры, который может быть распространен на многие блазары с квазипериодичностью в переменности потока излучения на длительной временной шкале.

### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени.**

Результаты, представленные в диссертации, полностью изложены в 18 научных работах, опубликованных в рецензируемых журналах, индексируемых базами данных “Web of Science”, “Scopus” и “RSCI”: 10 статей в журналах Q1, 2 статьи в журналах Q2 и 6 статей в Q3.

В 6 публикациях соискатель является единственным автором, в 4 статьях – первым автором. Основные результаты диссертации представлялись на астрофизических семинарах КрАО РАН и Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, на всероссийских и международных конференциях.

### **Ценность научных работ соискателя ученой степени.**

В своих научных работах соискатель:

- Предложил модель винтового джета с нерадиальным движением компонентов и применил эту модель для совместной интерпретации различных фотометрических и РСДБ-данных наблюдений некоторых активных ядер галактик. При этом был получен ряд важных результатов, среди которых вывод об отсутствии в центре блазара OJ 287 компактной



двойной системы черных дыр; чередование периодов с различной корреляцией между наблюдаемыми величинами, ассоциированными с областями, находящимися на разных расстояниях от истинного начала джета; увеличение продолжительности квазипериода переменности величин с удалением области, ответственной за эту наблюдаемую величину, от истинного начала джета; вывод о присутствии синхротронного самопоглощения в оптическом диапазоне в джете блазара S5 0716+714.

- Доказал присутствие хорошо упорядоченного магнитного поля в джетах активных ядер галактик на парсековых масштабах. Проиллюстрирована сильная зависимость характера поперечных джету распределений свойств поляризации от геометрических и кинематических параметров компонента джета. Доказана невозможность однозначного определения направления закрутки винтового магнитного поля из направлений электрического вектора в волне на разных сторонах джета.
- Доказал, что скорость и направление килопарсековых джетов не являются параметрами, определяющими возможность детектирования килопарсекового джета в рентгеновском диапазоне. Установлено, что вне зависимости от детектирования рентгеновского излучения на килопарсековых масштабах, в джетах активных ядер галактик происходит изгиб между парсековыми и килопарсековыми масштабами, величина которого примерно в полтора раза меньше угла парсекового джета с лучом зрения.
- Показал, что рентгеновское излучение килопарсековых джетов квазаров производится за счет обратного комптоновского рассеяния излучения парсекового джета. При этом в высокочастотном спектре присутствует излом из-за перемены энергий взаимодействующих частиц, дающих основной вклад в рассеянное излучение на фиксированной частоте. Предложен универсальный метод определения скорости продвижения и угла с лучом зрения килопарсековых джетов квазаров.

Текст диссертации соответствует установленным правилам научного цитирования, библиографические ссылки оформлены корректно.

Диссертационное исследование по своему содержанию соответствует заявленной специальности 1.3.1. – «Физика космоса, астрономия».

Основные идеи и положения диссертационной работы изложены в 18 научных работах. Все эти статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science / Scopus / RSCI.

Астрофизический семинар КрАО РАН пришел к заключению, что по своей актуальности, новизне и практической значимости диссертационная работа Бутузовой М.С. полностью удовлетворяет всем требованиям о присуждении ученых степеней и является завершённой научно-квалификационной работой. Исследование удовлетворяет требованиям,

предъявляемым к докторским диссертациям, а диссертант заслуживает присвоения ему степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Джеты активных ядер галактик на различных пространственных масштабах: форма, ориентация, физические условия и переменность наблюдаемых параметров» Бутузовой Марины Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия» (физико-математические науки).

Заключение принято на астрофизическом семинаре Крымской астрофизической обсерватории РАН. На заседании присутствовало 26 чел. Результаты голосования: «за» - 26 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел. Протокол № 4 от « 9 » апреля 2025 г.

Руководитель  
астрофизического семинара

Петров Петр Петрович,  
доктор физ.-мат. наук, г.н.с.,  
отдел физики звезд

Секретарь астрофизического  
семинара  
отдел физики звезд

Бакланова Диляра Наилевна,  
кандидат физ.-мат. наук, с.н.с.

Зам директора по научной  
работе КраО РАН

Антонюк Кирилл Анатольевич,  
кандидат физ.-мат. наук