

"УТВЕРЖДАЮ"

И.о. проректора по научной работе
Санкт-Петербургского
государственного университета

Е.В. Лебедева

" 30 " *марта* 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»
о диссертации Бутузовой Марины Сергеевны
«Джеты активных ядер галактик
на различных пространственных масштабах:
форма, ориентация, физические условия
и переменность наблюдаемых параметров»,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

В диссертации разработана аналитическая модель винтового джета блазара, исследованы особенности поведения такого джета и его проявления на ПК и КПК масштабах. На этой основе дана интерпретация многих наблюдательных данных, полученных разными методами, разными авторами в радио, оптике и рентгене, включая поляризационные данные. Джеты отдельных блазаров исследованы особенно подробно. Для большой выборки блазаров построены статистические зависимости.

Объект и предмет исследования. В диссертации исследуются джеты активных ядер галактик — блазаров, строятся модели таких джетов для конкретных объектов, объясняется их движение, свечение и другие характеристики, доступные наблюдениям.

Актуальность темы диссертации очевидна, так как изучаемые в ней объекты — активные ядра галактик и исходящие из них джеты — одни из самых интересных во Вселенной, которые характеризуются чрезвычайно большими значениями массы, энергии и скорости. Технологический прогресс позволяет получать для них большое количество наблюдательных данных, поэтому своевременная интерпретация этих данных, чему и посвящена диссертация, может только приветствоваться.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

Глава 1 посвящена построению геометрической и кинематической модели парсековых джетов блазаров, имеющих винтовую форму и нерадиальное движение компонентов. Ось джета описывается как винтовая линия на поверхности воображаемого конуса. После обзора современных сведений о наблюдаемых проявлениях джетов модель винтового джета применяется для непротиворечивой интерпретации наблюдений двух блазаров S5 0716+714 и OJ 287. Уточняются параметры модели: расположение конуса, вдоль которого идет винтовая траектория движения вещества джета, угол его раствора, углы между направлением скорости в джете и лучом зрения. Показано, что винтовая форма джета может быть порождена неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца. Рассмотрены изменения ориентации и скорости компонентов при движении по радиальным и искривлённым траекториям. Предложен метод оценки угла между вектором скорости частицы и радиальным направлением. Исследована взаимосвязь (квази)периодов и корреляций наблюдаемых величин (светимости, поляризации, угла PA) в различных областях винтового джета (разный радиус и частота излучения). На примере блазара OJ 287 анализируется прецессия джета, объясняемая эффектом Лензе-Тирринга, возникающим при вращении сверхмассивной чёрной дыры. Отмечается, что и другие особенности джетов согласуются с принятой моделью, например, корреляции между потоком излучения в определенных диапазонах спектра с позиционным углом джета на разных расстояниях от его начала.

В Главе 2 моделируются поперечные распределения параметров поляризации в парсековых джетах. Описывается два типа топологий магнитного поля: винтовое разной угловой закрутки и «канал-оболочка» (с тороидальным полем в ядре и полоидальным в оболочке), учитываются релятивистские эффекты. Для каждого типа исследуется, как параметры поляризации меняются в поперечном срезе. Показано, что при радиальном движении компонентов наилучшее соответствие наблюдаемым профилям даёт структура «канал-оболочка», но отклонения угла поляризации от направления джета тогда принимают лишь 0 или 90 градусов, что не соответствует наблюдаемым значениям. Случай винтовой формы джета и нерадиального движения способен воспроизвести наблюдаемые поперечные распределения параметров поляризации, интенсивности и отклонения угла поляризации.

Глава 3 посвящена внутрисуточной оптической фотометрической переменности блазаров S5 0616+714 и S5 1803+784 с целью исследования физических условий на субпарсековых масштабах джета. Построена модель возникновения внутрисуточной переменности, согласно которой в джете присутствуют отдельные части (субкомпоненты), движущиеся под углом к общей траектории. Эволюция таких компонентов определяет перемен-

ность потока на коротких временных масштабах.

В Главе 4 анализируются ориентация, скорость и механизмы излучения джетов на килопарсековых масштабах. Привлекаются данные РСДБ и рентгеновских наблюдений, обсуждаются механизмы генерации рентгеновского излучения (прямой синхротрон, обратное комптоновское рассеяние). На основе двух предположений о механизме (рассеяние фонового микроволнового излучения или рассеяния излучения центрального источника) получены оценки угла с лучом зрения и скорости кпк-джетов. В этой же Главе по литературным данным составлено два списка квазаров: с обнаруженными кпк-джетами в рентгене и без таких джетов. Приводятся красные смещения, позиционные углы PA пк и кпк-джетов и модули их разностей (ΔPA). Строятся распределения двух выборок по приведенным параметрам, оценивается их сходство с нормальным распределением. Это позволяет делать выводы о смещениях и угловой структуре джетов.

Каждая глава дополнена выводами о проделанной работе, указан вклад диссертанта.

Результаты диссертации опубликованы в 18 статьях (4 в *MN RAS*, по 2 в *ApJ* и *APRH*, 6 в *Астрономическом журнале*, по одной в *A&A*, *Nature*, *Universe* и *ЖНЕА*), причем в 10 из них М.С. Бутузова первый автор.

Научная новизна диссертации заключается в комплексном подходе к исследованию структуры и поведения джетов активных ядер галактик на разных масштабах, который привел к интересным результатам. Во-первых, впервые проведено всестороннее моделирование влияния винтовой формы и нерадиального движения компонентов парсековых джетов на наблюдаемые фотометрические и поляризационные характеристики излучения галактик. Это позволило обнаружить ранее неизвестные закономерности, такие как чередование периодов сильной и слабой корреляции между величинами, возникающими на разных расстояниях от ядра. Во-вторых, предложено новое объяснение свечения рентгеновских кпк-джетов квазаров (в частности OJ 287) обратным комптоновским рассеянием, связанным с парсековым джетом. На основе этого объяснения разработан универсальный метод определения ориентации и скорости кпк-джета. Как следствие, получен сильный довод в пользу модели одиночной прецессирующей чёрной дыры в OJ 287, что отвергает высказанную другими авторами гипотезу двойной СМЧД в этом объекте. Этот результат является важным вкладом в дискуссию об эволюции блазаров и демонстрирует широкую применимость предложенных моделей.

В научной значимости работы следует также отметить, что все результаты получили широкую апробацию и подтверждены публикациями. Многие результаты неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях. Авторский подход сочетает наблюдательные данные разных диапазонов с современной теорией, что соответствует критериям актуальности и высокого уровня проводимого исследования. Та-

ким образом, диссертация вносит значимый вклад в астрофизику галактических джетов, расширяя представления о их природе.

Значимость результатов диссертации для развития физико-математической области науки

Результаты, полученные в диссертации М. С. Бутузовой, имеют существенное значение для развития современной астрофизики активных ядер галактик и физики релятивистских джетов.

Работа вносит вклад в решение одной из ключевых проблем астрофизики активных ядер галактик — понимание геометрии, динамики и физических условий в релятивистских джетах на различных пространственных масштабах. Особое значение имеют результаты, касающиеся интерпретации наблюдаемой структуры и переменности джетов блазаров на парсековых и субпарсековых масштабах.

В диссертации предложены и исследованы модели винтовой структуры джета и нерадиального движения излучающих компонентов, позволяющие объяснить ряд наблюдаемых эффектов, таких как изменение позиционного угла выброса компонентов, искривление траекторий движения деталей джета, корреляции между кинематическими параметрами джета и наблюдаемой переменностью их излучения, особенности распределения поляризации синхротронного излучения.

Полученные результаты расширяют представления о геометрии и кинематике релятивистских струй в блазарах и дают физическую интерпретацию ряду наблюдательных феноменов, выявленных в рамках долгосрочных программ радиоинтерферометрических наблюдений с высоким угловым разрешением.

Особое значение имеет проведенное в работе моделирование поляризационных свойств джетов, позволяющее исследовать влияние различных конфигураций магнитного поля (в том числе винтовых магнитных структур) на наблюдаемую картину линейной поляризации. Эти результаты важны для интерпретации данных радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами и поляриметрических наблюдений активных ядер галактик.

В диссертации также рассматриваются проявления переменности излучения блазаров на малых временных масштабах и их возможная связь с динамикой релятивистского потока. Полученные результаты способствуют лучшему пониманию физических процессов в областях формирования джетов вблизи сверхмассивных черных дыр.

Результаты диссертации представляют несомненный интерес для астрофизики внегалактических объектов, могут быть полезны и использоваться в ГАИШ МГУ, ИНАСАН, СПбГУ и других астрономических учреждениях, занимающихся изучением активных ядер галактик. В частности, предложенные в работе модели геометрии и кинематики джетов могут применяться при анализе данных радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (VLBI) для интерпретации движения компонентов джетов блазаров;

при исследовании морфологии и эволюции джетов в рамках долгосрочных мониторинговых программ; при моделировании наблюдаемых характеристик синхротронного излучения, включая поляризационные свойства. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при интерпретации наблюдений, проводимых на крупнейших мировых радиоинтерферометрических установках и в международных мониторинговых программах исследования джетов активных ядер галактик.

Отметим некоторые недостатки в тексте диссертации. Приведем часть из них. 1) Нехватка количественной оценки погрешностей. В ряде разделов отсутствует подробный анализ влияния экспериментальных ошибок и систематических неопределенностей на полученные параметры. Было бы полезно добавить оценку чувствительности результатов к исходным данным. 2) Ограниченность статистических выборок. Модели и выводы неоднократно проверены на нескольких конкретных примерах (OJ 287, S5 0716+714 и др.), но применение к более широкой выборке не представлено. Понятно, что используемые в диссертации подходы требуют сложных наблюдений (например, плотных внутрисуточных кривых блеска), которые доступны лишь для очень ограниченного числа объектов, однако их малое число ограничивает степень обобщения результатов. 3) Стилиевые и языковые неточности. Текст в целом научно корректен, однако встречаются длинные сложные предложения и иногда страдает последовательность изложения. Имеется некоторое количество опечаток.

Указанные замечания носят, в основном, формальный и уточняющий характер, они не умаляют научных достижений диссертации и легко могли быть устранены при редакционной правке.

Вывод и рекомендация

Диссертационная работа М.С. Бутузовой представляет собой серьезное научное исследование в области астрофизики активных ядер галактик. В ней скомбинированы наблюдательные данные и оригинальное теоретическое моделирование, что позволило обнаружить и объяснить ряд эффектов, существенных для понимания природы джетов. Работа основана на большом объеме фактического материала, подкреплена публикациями в авторитетных изданиях, соответствует современному уровню исследований. Диссертация выполнена добросовестно, результаты логично обоснованы и отвечают высоким критериям. Несмотря на некоторые упрощения в моделях, ключевые выводы устойчивы и важны для развития темы. Исходя из изложенного, можно заключить, что диссертация Марины Сергеевны Бутузовой «Джеты активных ядер галактик на различных пространственных масштабах: форма, ориентация, физические условия и переменность наблюдаемых параметров» по содержанию и форме соответствует высоким научным требованиям и содержит значительные оригинальные достижения, тем самым отвечает требованиям, установленным пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановле-

нием Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. N 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Бутузова Марина Сергеевна заслуживает присуждения ей искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Отзыв подготовлен профессором кафедры астрофизики Дмитрием Исидоровичем Нагирнером и ведущим научным сотрудником Сергеем Сергеевичем Савченко, обсужден и утвержден на заседании кафедры астрофизики 24 марта 2026 года, протокол N 44/8/2-02-2.

И.о. заведующего кафедрой астрофизики
профессор

В.П. Решетников

Сведения о ведущей организации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»
Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9
Тел.: +7(812) 328-97-01
e-mail: spbu@spbu.ru
web-site: <https://spbu.ru/>

Специальный по ка...
2008