

## **О Т З Ы В**

**официального оппонента на диссертационную работу М.С. Бутузовой “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».**

### **Актуальность темы.**

В диссертационной работе М.С. Бутузовой исследованы релятивистские струйные выбросы (джеты) в активных ядрах галактик на различных масштабах и в различных диапазонах от радиоволн до рентгеновских лучей. Не вызывает сомнения актуальность данной темы, которая ставит перед исследователями самые сложные и ключевые задачи — образование и энергетика сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в центрах галактик, взаимодействие СМЧД с аккрецирующим веществом МЗС, формирование релятивистских джетов в процессе аккреции, которые являются источником многих физических явлений как в самих галактиках, так и в их скоплениях. Этой теме посвящены сотни глубоких теоретических работ и имеется просто огромный объем наблюдательных данных, особо место в которых занимают РСДБ-карты с переменной структурой радиоизлучения, а также результаты многолетнего мониторинга переменного рентгеновского, оптического и радиоизлучения. В данной работе особую научную новизну исследований придает геометрическая модель изогнутого джета с нерадиальным движением именно применительно к картам высокого углового разрешения. В этом случае основной модели является эффект релятивистского усиления излучения в переменном направленном локальном джете.

Диссертантом показано, что эта модель в большой мере соответствует современным данным РСДБ-наблюдений. В результате применения этой модели сделаны выводы о взаимосвязи наблюдаемых величин и физических параметрах релятивистских джетов. Так автор обоснованно доказывает, что переменность синхротронного оптического излучения обусловлена винтовой геометрией джета, которая дополняется его прецессией. Поляризация радиоизлучения также может быть обусловлена особой структурой джета. Диссертант подробно рассматривает сценарий образования рентгеновского излучения вследствие обратного комптоновского рассеяния.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Диссертантом предложены более десяти выводов из проведенных исследований, которые, стоит заметить, полностью опубликованы в научных журналах списка ВАК, причем уже после защиты кандидатской диссертации. Это несомненно важный положительный момент данного исследования.

Именно успешное применение разработанной модели винтового парсекового джета с нерадиальным движением компонентов занимает ключевое место в диссертации (Глава 1). Можно предположить, что именно наблюдательные данные, не всегда легко объяснимые в теории, подтолкнули диссертанта к винтовой модели джета. На этой модели основаны многие выводы, представленные в работе: поток излучения на различных частотах, параметры поляризации. Интерпретированы наблюдаемых свойств блазаров на различных интервалах времени, предложен способ определения угла между вектором скорости компонента джета и радиальным направлением. Циклическое изменение доплер-фактора при последовательном изменении ориентации искривленного

джета к лучу зрения приводит к изменению квази-периодических вариаций наблюдаемых величин, образующихся на разных расстояниях. Важно, (хотя и не бесспорно), что автор нашел альтернативное объяснение наблюдаемым свойствам блазара OJ 287 — то есть в рамках одиночной СМЧД, а не двойной системы из черных дыр. Автор смело применяет механизм неустойчивости Кельвина-Гельмгольца для образования винтового джета, который испытывает прецессию из-за эффекта Лензе-Тирринга в системе одиночной СМЧД. Впервые доказано присутствие в джете блазара S50716+714 синхротронного самопоглощения в оптическом диапазоне. Для этого же блазара впервые предложена единая модель образования переменности, позволяющая самосогласованно описать различные особенности спектра излучения и переменности блеска на различных масштабах времени – от суток до десятков лет. Впервые показано изменение свойств поляризации в зависимости от геометрических и кинематических параметров джета в магнитном поле с фиксированной топологией.

### **Оценка новизны и достоверности.**

Научная новизна работы состоит в том, что диссертант привлекает самые современные и ключевые наблюдательные данные для формирования своей модели и представления выводов. Многие данные получены самим автором или большими научными коллективами, уже неоднократно проверялись или прямо или на основе дополнительных измерений. Особенно интересна, как с теоретической, так и с практической точки зрения разработанная в диссертации модель винтового джета. Для килопарсекового джета квазара 3C 273 подтверждено, а для блазаров PKS 1127–145, OJ 287, PKS 0637–752, PKS 1045–188, PKS 1510–089 показано, что рентгеновское излучение ближних к центральному источнику узлов их

килопарсековых джетов образуется вследствие обратного комптоновского рассеяния излучения парсекового джета.

Однако, несмотря на имеющиеся многочисленные достоинства работы, выраженные в подробных публикациях, широком охвате проблем джетов, в ней имеются отдельные недостатки, которые серьёзно не влияют на представленные выводы и результаты.

Нельзя не отметить, что несмотря на успешное применение модели винтового джета, все-таки эта модель не касается физического содержания и эволюции струйного джета. Не дан ответ струи на главный вопрос: джеты — это непрерывный поток релятивистских частиц, рожденных в «парсековой» окрестности СМЧД и взаимодействующих с магнитным полем, или это отдельные независимые сгустки (blobs), баллистически движущиеся, создавая «винтовую» траекторию, что мы наглядно видим в микроквазарах. Когда мы смотрим на сложно-структурные радиокарты радиоизлучения джетов или на кривые блеска в оптическом или радиодиапазоне с множеством вспышечных событий, трудно представить, что вся эта сложность создается геометрией струи. Это особенно заметно из Рис.1.19 в диссертации, где приведена многолетняя кривая блеска OJ287 в оптическом диапазоне вместе с модельной кривой блеска прецессирующего винтового джета. Никак нельзя сказать, что эти кривые хорошо совпадают. (Стоило бы привести коэффициент корреляции.) Похоже для более всестороннего представления струйной активности потребуются комплексные трехмерные МГД-модели, наполненные внутренней переменностью компонент структуры джетов, ускорением релятивистских частиц на месте, возможно, в релятивистских ударных волнах, взаимодействием выброшенного из окрестностей СМЧД вещества с окружающей средой (вспомним, что для протяженных струй требуется «удержание» (confinement) и/или коллимация).

В целом текст диссертации производит хорошее впечатление — графики и таблицы полностью описаны, даны все ссылки из обильного списка литературы, все авторские работы помечены отдельно в тексте и в подписях к рисункам.

Замечено очень небольшое число опечаток и пропущенных слов. И стоит отметить, что имеются авторские особенности построения предложений - автор не использует уместные краткие формы прилагательных и часто применяет обезличенные предложения. Стоило бы дать текст на прочтение опытному филологу. Не всегда легко понять терминологию - «детали, компоненты, субкомпоненты» на РСДБ-картах. В русско-язычной литературе приняты переводы фамилий: механизмы «Блэндфорда-Знаека» и «Блэндфорда -Пейна».

Подводя итог, важно заключить, новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для мировой астрофизики и наблюдательной практики в области исследований СМЧД. Диссертация является законченным научным исследованием темы, представленной в названии диссертации. Работа исключительно полезна исследователям в данной области астрофизики, например в РФ: в САО РАН, АКЦ ФИАН РАН, МФТИ, ИПА РАН, СПбГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации, содержит обоснованные выводы, отвечает требованиям ВАК Минобрнауки РФ.

Диссертационная работа полностью отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Марина Сергеевна Бутузова заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. - «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент:  
Заведующий лабораторией  
радиоастрофизики САО РАН,  
ведущий научный сотрудник,  
доктор физико-математических наук  
тел.: +7 (928)3963178, e-mail:  
[satr@sao.ru](mailto:satr@sao.ru). Специальность, по  
которой официальным оппонентом  
защита диссертация: 01.03.02.  
Астрофизика, звездная астрономия  
Адрес места работы: 369167,  
Карачаево-Черкесская республика,  
пос. Нижний Архыз, САО РАН  
Тел.: +7 (87878) 46336; e-mail:  
[admsao@sao.ru](mailto:admsao@sao.ru)

Трушкин Сергей Анатольевич

Ученый секретарь САО РАН Е.И.  
Кайсина

Подпись официального оппонента  
С.А. Трушкина заверяю

30 марта 2026