

Отзыв официального оппонента Иванчика А.В.  
на диссертационную работу  
**Бутузовой Марины Сергеевны**  
**«Джеты активных ядер галактик**  
**на различных пространственных масштабах:**  
**форма, ориентация, физические условия и переменность**  
**наблюдаемых параметров»,**  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия

Активные ядра галактик одни из удивительных и красивых астрофизических объектов, **актуальность** исследования которых сохраняется в настоящий момент, не смотря на десятилетия их активного наблюдения и построения множества теоретических моделей, описывающих как сами эти объекты, так и обширную физику процессов, формирующих их проявления. Одним из таких проявлений являются джеты – мощные релятивистские коллимированные струи, наблюдаемые во всех диапазонах электромагнитного спектра, а также являющиеся источниками высокоэнергетического космического излучения. Исследованию этих объектов, разнообразие физики которых определяется огромным диапазоном расстояний, проходящим джетами, посвящена представленная диссертационная работа. Результаты этой работы могут быть интересны не только для физики непосредственно самих джетов, но, например, и для выяснения структуры центральной машины – является ли она одиночной вращающейся сверхмассивной черной дырой или это две сливающиеся черные дыры, интерес к которым, может лежать в области гравитационно-волновой астрофизики. Еще одной областью интересов, связанной с высокой энергией и релятивизмом джетов, может быть физика космических лучей и высокоэнергетические нейтрино, исследования которых активизировались в последние десятилетия с развитием нейтринной астрономии и вступлением в строй мегаустановок по их регистрации. Все перечисленные обстоятельства дополнительно подчеркивают **актуальность** исследований, выполненных в диссертации.

Представленная диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. **Во введении**, описаны цели работы и ее актуальность, основные положения, выносимые на защиту, список публикаций по теме диссертации. **В первой главе** разрабатывается модель джета, имеющего винтовую форму и нерадиальное движение компонентов, в рамках которой проводится интерпретация различных наблюдаемых свойств блазаров S5 0716+714 и OJ 287. Рассматриваются парсековые (пк) масштабы. В Разделе 1.1 приводятся основные результаты РСДБ-наблюдений джетов АЯГ и вводятся основные понятия, используемые в диссертации. Раздел 1.2 содержит основные данные фотометрических и многолетних РСДБ-наблюдений джета блазара S5 0716+714. В Разделе 1.3 проводится совместный анализ скоростей и позиционных углов деталей джета, полученных по РСДБ-наблюдениям, выполненным в различные годы. Предлагается способ оценки угла вектора скорости деталей джета с радиальным направлением. Раздел 1.4 посвящен корреляции изменений наблюдаемых величин и связи (квази)периодов переменности этих величин, вызванной винтовой формой джета. В Разделе 1.5 выявляется изменение  $\text{PAin}$  джета блазара OJ 287 на основе 145 эпох 15 ГГц РСДБ-наблюдений за интервал с 1994 по 2019 гг. **Глава вторая** посвящена моделированию поперечных потоку джета распределений свойств поляризации в различной топологии магнитного поля в рамках разработанной в диссертации модели винтового джета. В разделе 2.1 приведены формулы для вычисления параметров Стокса в системе отсчета наблюдателя с учетом релятивистских эффектов. В разделе 2.2 анализируются результаты моделирования для прямого джета с радиальным движением компонентов. Результаты моделирования в случае винтовой формы джета и нерадиального движения компонентов представлены в разделе 2.3. В разделе 2.4 проводится сравнение модельных поперечных распределений свойств поляризации с наблюдаемыми для квазаров 0333+321 (NRAO 140), 0836+710 (4C +71.07) и 1611+343 (DA 406). В разделе 2.5 исследуется влияние геометрических и кинематических параметров на форму поперечного распределения. **Глава 3** посвящена исследованию оптической переменности блазаров S5 0716+714 и S5 1803+784 как «зонду» физических условий в джете на субпарсековых масштабах. В разделе 3.1 описаны наблюдаемые свойства внутрисуточной переменности блеска блазара S5 0716+714 и их интерпретация в рамках различных моделей образования переменности. В разделе 3.2 содержатся результаты наблюдений внутрисуточной переменности блазара S5 0716+714. В Разделе 3.3 предлагается модель образования кратковременной переменности потока излучения в рамках винтовой формы джета на масштабах от субпарсек до парсек. В разделе 3.4

проанализировано влияние доплер-фактора субкомпонентов на общую яркость объекта. В разделе 3.5 предлагается альтернативная интерпретация наблюдаемого тренда к более синему цвету объекта при повышении яркости. В разделе 3.6 приведены примеры двух последовательных вспышек на внутрисуточной шкале переменности, имеющих различную зависимость показателя цвета от яркости, что интерпретируется в рамках предложенного в диссертации механизма переменности. В разделе 3.7 описывается способ определения кратчайшего характерного времени переменности и оценки его уровня статистической значимости на основе равномерных рядов данных на протяжении нескольких суток, предоставляемых космической миссией TESS. В разделе 3.8 проводится оценка напряженности магнитного поля в области, ответственной за наблюдаемое излучение в оптическом диапазоне блазара S5 0716+714, при условии действия синхротронного самопоглощения. В разделе 3.9 обсуждаются результаты и сформулированы основные выводы данной главы. **Глава 4** посвящена определению ориентации, физических параметров и механизмов рентгеновского излучения джетов квазаров на килопарсековых масштабах. В разделе 4.1 исследуется вопрос, о том действительно ли кпк-джеты, имеющие зарегистрированное рентгеновское излучение, сохраняют с пк-масштабов свою скорость и направление практически неизменными, тогда как джеты, рентгеновское излучение которых не обнаружено, замедляются и/или изгибаются между пк- и кпк-масштабами. В разделе 4.2 получены аналитические выражения для плотности потока излучения, образованного ОКР в поле релятивистски усиленного излучения от пк-джета. В разделе 4.3 производится вывод формул для оценки угла зрения кпк-джета из условия доминирования в наблюдаемом рентгеновском излучении рассеяния излучения пк-джета над рассеянием фотонов реликтового фона. Раздел 4.4 содержит вывод формулы для напряженности магнитного поля в предположении, что распределение электронов, производящее синхротронное излучение в радиодиапазоне, создает также посредством ОКР рентгеновское излучение. Тогда напряженность магнитного поля находится из отношения наблюдаемых потоков в радио- и рентгеновском диапазонах. Раздел 4.5 включает в себя результаты исследований кпк-джетов квазаров. В разделе 4.6 исследуется джет блазара OJ 287 от пк- до кпк-масштабов. В разделе 4.7 собраны результаты Главы 4 и проводится их обсуждение.

В **Заключении** диссертации представлены положения, выносимые на защиту.

В результате выполнения диссертационной работы были получены **новые и важные** научные результаты.

1. Предложена и применена для описания различных свойств блазаров модель винтового парсекового джета с нерадиальным движением компонентов.
2. Дана интерпретация различному поведению наблюдаемых свойств блазаров в различные интервалы времени. А именно, различной видимой скорости компонентов парсекового джета, имеющих одинаковый позиционный угол, и чередованию интервалов сильной положительной, отрицательной корреляции и её отсутствия между наблюдаемыми величинами, образующимися на разных расстояниях от истинного начала джета.
3. Впервые предложен способ определения угла между вектором скорости компонента джета и радиальным направлением из отношения наибольшей и наименьшей видимой скорости компонентов джета.
4. Впервые показано, что наблюдаемые свойства блазара OJ 287 от парсековых до килопарсековых масштабов могут быть обусловлены прецессией с периодом около 1200 лет винтового джета, образованного развитием неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Сама прецессия является результатом эффекта Лензе-Тирринга в системе одиночной сверхмассивной черной дыры и её аккреционного диска.
5. Для блазара S5 0716+714 впервые предложена единая модель образования переменности, позволяющая самосогласованно описать различные, иногда противоположные, поведения спектра излучения при переменности блеска на различных масштабах времени – от суток до десятков лет. Эта модель состоит в постоянном появлении и эволюции в потоке джета субкомпонентов, вектор скорости которых немного отклоняется от общей траектории и изменяется, например, из-за вращательного движения субкомпонентов.
6. Предложен и успешно применен метод определения кратчайшего времени переменности с высоким уровнем статистической значимости.
7. Получены убедительные доказательства присутствия, хорошо упорядоченного глобального магнитного поля в джетах на парсековых масштабах на основе сопоставления многолетних данных поляризационных РСДБ-наблюдений с моделированием поперечных распределений свойств поляризации, выполненном в рамках разработанной в диссертационной работе модели винтового джета с

нерадиальным движением компонентов и при широком наборе топологий магнитного поля.

8. Впервые показано, что по асимметрии поперечного джета распределения направлений электрического вектора в волне невозможно однозначно определить направление закрутки винтового магнитного поля.

9. Впервые продемонстрировано существенное изменение свойств поляризации в зависимости от геометрических и кинематических параметров джета при магнитном поле с фиксированной топологией. Ранее это изменение интерпретировалось исключительно вариацией конфигурации магнитного поля.

Научные положения, выносимые на защиту, представляются **вполне обоснованными**.

Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации.

Однако есть ряд замечаний по представлению результатов и их описанию в диссертации, а также несколько стилистических замечаний.

## 1. Глава 1.

1.1. Описание в начале главы основных формул определяющих физику процессов, формирующих свойства электромагнитного излучения в джете дается только в теоретическом, символьном виде. Однако, для более полного представления об объекте исследования, желательно приводить, не откладывая на потом, конкретные наблюдательные значения ключевых параметров или их диапазонов. Поэтому здесь, было бы уместным привести значения доплер- или лоренц-факторов, реализуемых в джетах, связанные с ними энергетические диапазоны ускоренных релятивистских электронов, связанные с ними диапазоны спектральных индексов как излучения, так и электронов.

1.2. В таблице 1.3. представлены фактические данные, на основе которых диссертантом получены углы оси винтовой линии джета и построен довольно показательный рисунок 1.18, в свою очередь на основе которого, получено одно из положений, выносимых на защиту. Эта таблица по нескольким причинам вызвала интерес оппонента, однако приведенные ссылки на данные

наблюдений [66, 70] по их названию относятся к 2005-2009 гг. и 2015 г. Только непосредственное обращение к работе [66] позволило оппоненту понять природу данных представленных в таблице 1.3 и на рисунке 1.19, для построения которого данные также взяты по-видимому из работы [66], но в подписи к этому рисунку об этом вообще не сказано. Таблицы и рисунки — это логически самостоятельные элементы, подписи к которым должны давать максимально исчерпывающую информацию о них.

2. В главе 2 вывод 8 – джеты АЯГ на парсековых масштабах содержат хорошо упорядоченное глобальное магнитное поле – представляется довольно важным, однако он сформулирован чисто качественным образом, было бы неплохо если бы именно в этом пункте были приведены количественные характеристики, поясняющие что означает «хорошо» упорядоченное и «глобальное», а также численные значения величины магнитного поля.

3. Глава 3.

3.1. Глава 3 начинается с параграфа с максимально общих утверждений, минимальная конкретика к которым все же не помешала бы, например,

(i) «сведения о физических условиях в джете на субпарсековых расстояниях от его начала» - где его начало, что такое субпарсековые расстояния, в контексте того, что в главе 3 встречаются значения 4, 4.6, 6.68 пк и  $2.2 \times 10^{-4}$  пк?

3.2. Рисунок 3.1. демонстрирует случай обнаруженной IDV (внутрисуточной переменности), довольно очевидно, что, если бы рядом был представлен пример наблюдений, где IDV не зарегистрировано, это могло бы дать наглядный пример как самого эффекта, так и его значимости.

3.3. Формула (3.1), взятая по всей видимости из работы [146] и определяющая ключевую характеристику для регистрации IDV, а именно амплитуду переменности  $A$ , вызывает ряд вопросов, например,

(i) как так получается, что значение самой величины (а не ее статистическая значимость) определяется через среднюю погрешность измерений за ночь?

(ii) почему эта величина не определена «стандартным» способом, как разность максимальной и минимальной величины со статистической погрешностью, «стандартным» образом определяемой по ошибкам этих величин?

(iii) Где формула, определяющая ошибку самой амплитуды переменности, которая представлена в таблице 3.1?

Поскольку речь идет о ключевых величинах исследования, представленных в главе 3, то базовые формулы, по которым они определяются, а также их обоснованность должны быть более детально описаны в диссертации.

Стилистические замечания:

1. Выбор последовательности глав диссертации выглядит немного непонятным: сперва, в главах 1 и 2 обсуждаются явления на парсековых масштабах, потом идет уменьшение масштаба: в главе 3 обсуждаются субпарсеки, потом скачек назад и увеличение масштабов в 1000 раз в главе 4. Казалось бы, причинно-следственная связь диктует иную последовательность – от зарождения джета на минимальных расстояниях в сторону их увеличения.
2. В 12-м положении в тексте диссертации (в начале и заключении) после перечисления квазаров пропущено словосочетание «получено впервые», это обстоятельство выявляется сложностью читаемости положения и сравнением его с авторефератом. При этом формулировка «подтверждено, что рентгеновское излучение образуется вследствие ...» читается нормально, а вот фраза «получено впервые, что рентгеновское излучение образуется вследствие» очевидно требует переформулирования.

Указанные замечания не носят принципиального характера в отношении результатов, полученных в диссертации и не умаляют их научной значимости.

Считаю, что диссертационная работа **Бутузовой Марины Сергеевны** «Джеты активных ядер галактик на различных пространственных масштабах: форма, ориентация, физические условия и переменность наблюдаемых параметров», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 — Физика космоса, астрономия, полностью соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года No 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе,

доктор физико-математических наук,

член-корреспондент РАН

E-mail: [iav@astro.ioffe.ru](mailto:iav@astro.ioffe.ru)

 Иванчик А.В.

27 марта 2026 г.

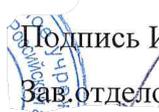
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

Телефон: (812) 297-2245

E-mail: [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

  
Подпись Иванчика А.В. удостоверяю  
Зав. отделом кадров ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
\_\_\_\_\_/ Е.М. Сулиаури

27.03.2026