

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 524.7

Бутузова Марина Сергеевна

**ДЖЕТЫ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК
НА РАЗЛИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБАХ:
ФОРМА, ОРИЕНТАЦИЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И
ПЕРЕМЕННОСТЬ НАБЛЮДАЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 1.3.1 –
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

г. Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук».

Официальные оппоненты: **Барков Максим Владимирович,**

доктор физико-математических наук,
Институт астрономии Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник

Иванчик Александр Владимирович,

доктор физико-математических наук,
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник

Трушкин Сергей Анатольевич,

доктор физико-математических наук,
Специальная астрофизическая обсерватория Российской
академии наук,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится **15 апреля 2026 года в 12:00** на заседании диссертационного совета Д 24.1.262.02 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, Астрокосмический центр ФИАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и АКЦ ФИАН <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Заверенные отзывы направлять по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д 24.1.262.02.

Автореферат разослан _____ января 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.1.262.02, к.ф.-м. н.

Шахворостова Н.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы и современное состояние исследований

Активные ядра галактик (АЯГ) представляют собой самые мощные по энерговыделению на космологическом интервале времени объекты во Вселенной. Их чрезвычайно высокую яркость во всем доступном для наблюдения диапазоне электромагнитного спектра обеспечивает эффективная аккреция вещества на центральную сверхмассивную черную дыру (СМЧД), масса которой от 10^8 до 10^{10} солнечных масс. В результате аккреции формируются хорошо коллимированные биполярные струи плазмы (джеты), распространяющиеся в пространство на расстояния вплоть до 1 Мпк, что существенно превышает размеры родительских галактик. Коллимация джетов и их ускорение до ультрарелятивистских скоростей происходит на крайне малых расстояниях от СМЧД – в несколько десятков гравитационных радиусов (см, например, [1, 2]). Определяющую роль в коллимации и ускорении джетов играет магнитное поле [3]. Общепринято считать, что в джете присутствуют ультрарелятивистские электроны, возможно, есть некоторая доля позитронов и протонов. Электроны, двигаясь в магнитном поле джета, производят синхротронное излучение, а в поле низкочастотного излучения порождают излучение в рентгеновском и гамма-диапазонах за счет обратного комптоновского рассеяния. При этом в степенном спектре излучения отсутствуют спектральные линии. Поэтому истинная скорость джетов до сих пор неизвестна. Некоторые оценки можно сделать из наблюдаемого сверхсветового движения излучающих деталей джета, наблюдаемых при максимально достижимом угловом разрешении методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) [4]. Анализ 30-летнего ряда РСДБ-наблюдений нескольких десятков АЯГ, выполненных в рамках обзора неба на частоте 2 см и в программе MOJAVE, выявил инжекцию деталей под разными позиционными углами, изогнутые траектории их движения и ускорение [5, 6]. Причем на малых расстояниях от видимого начала джета источники проявляют как положительное ускорение, так и замедление, тогда как с де-проекции расстояний в 100 пк наблюдается только замедление [7]. Наблюдения с высоким угловым разрешением показали вращение компонентов вокруг оси джета М 87 [8] и спиральные нити в потоке джетов М 87 [9, 10], 3С 279 [11]. Все вышеперечисленное указывает на необходимость применения к джетам АЯГ более сложных геометрических и кинематических моделей, чем их представление в виде прямого и радиально движущегося потока.

Со сверхмассивными черными дырами и джетами активных ядер галактик связаны уникальные результаты, полученные в рамках крупных международных проектов за последнее десятилетие. Прежде всего, это обнаружение экстремальной яркости блазаров по данным наземно-космического радиоинтерферометра

«РадиоАстрон» [12]; ассоциация высокоэнергетического нейтрино как с отдельными блазарами (TXS 0506+056 [13], PKS 0735+17 [14], PKS 1741-03 [15]) и сейфертовской галактикой NGC 1068 [16], так и присутствие статистически значимой корреляции между популяцией блазаров и нейтринными событиями (см., например, одни из первых работ [17, 18]). Учитывая ввод в эксплуатацию Байкальского глубоководного нейтринного телескопа, всестороннее исследование активных ядер галактик будет крайне востребованным ещё многие годы. Также развитие радиоинтерферометрической сети, а именно, переход на более высокие частоты наблюдений (проекты Event Horizon Telescope (EHT) и Global Millimeter VLBI Array (GMVA)), вынос антенны на высокую эллиптическую геоцентрическую орбиту («Радиоастрон») позволило обнаружить тень черной дыры у ближайшей галактики M 87 (см., например, [19]) и изогнутые на субпарсековых масштабах джеты (например, S5 0716+714 [20], OJ 287 [21], 3C 279 [22]). Будущий качественный скачок в технике и получаемых результатах ожидается в разрабатываемом проекте «Миллиметрон» (см., например, [23, 24]). Изогнутые джеты могут быть результатом действия неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, что ставит вопросы к существующим представлениям об удержании струй магнитным полем. Также изогнутая форма джетов может быть результатом прецессии в компактной двойной системе сверхмассивных черных дыр, находящихся в центре активных ядер галактик. На детектирование гравитационных волн от таких систем направлены проекты пульсарного тайминга (Pulsar Timing Array, PTA) и космической гравитационно-волновой обсерватории (Laser Interferometer Space Antenna, LISA). Из вышесказанного следует, что активные ядра галактик являются актуальными объектами для исследований.

Целями диссертационной работы являются:

- анализ формы джетов от парсековых до килопарсековых масштабов;
- изучение влияния искривленной формы джетов и нерадиального движения вещества на поперечное распределение свойств поляризации при различных топологиях магнитного поля;
- исследование корреляции и связи периодов переменности наблюдаемых величин, относящихся к различным областям винтового джета;
- анализ механизмов переменности потока излучения блазаров на различных временных масштабах в предположении винтовой формы джета и нерадиального движения его деталей;
- определение механизмов, искривляющих форму джетов.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить нижеперечисленные **задачи**:

- Разработать геометрическую и кинематическую модель для описания винтовой формы джетов.
- Применить разработанную модель винтового джета к интерпретации данных фотометрических и радиоинтерферометрических наблюдений отдельных блазаров.
- Рассмотреть прецессию центральной машины и неустойчивость Кельвина-Гельмгольца как причины формирования винтовой формы струй на примере джета блазара OJ 287.
- Провести моделирование поперечных распределений свойств поляризации в рамках разработанной модели винтового джета с нерадиальным движением и сравнить с результатами РСДБ-наблюдений.
- Исследовать внутрисуточную и долговременную переменность потока излучения блазаров и сделать вывод относительно возможности образования переменности вследствие искривленного движения субкомпонентов джета.
- Проанализировать обратное комптоновское рассеяние излучения центрального источника как возможный механизм образования рентгеновского излучения килопарсековых джетов квазаров.
- Определить скорость и угол килопарсековых джетов с лучом зрения в рамках предложенного выше механизма образования их рентгеновского излучения.
- Сделать выводы относительно формы и кинематики джетов от парсековых до килопарсековых масштабов.

Научная новизна состоит в том, что, во-первых, впервые проведено комплексное исследование влияния винтовой формы парсековых джетов и нерадиального движения их компонентов на наблюдаемые фотометрические и радиоинтерферометрические параметры блазаров. В ходе этих исследований были впервые получены важные следствия. А именно, чередование периодов сильной и слабой корреляции наблюдаемых величин, относящихся к различным областям винтового джета; отсутствие однозначности в определении направления закрутки магнитного поля на основании асимметрии в поперечном распределении направления поляризации; доказано присутствие хорошо упорядоченного магнитного поля в джетах активных галактик на парсековых масштабах.

Во-вторых, в рамках интерпретации рентгеновского излучения килопарсековых джетов квазаров обратным комптоновским рассеянием излучения, образованного в парсековом джете, получено не только простое объяснение наблюдаемым в радио- и рентгеновском диапазонах свойствам узлов этих джетов, но и предложен универсальный способ исследования ориентации и скорости килопарсековых джетов квазаров, одним из следствий которого стало получение аргумента в пользу одиночной сверхмассивной черной дыры в центре блазара OJ 287, подвергающейся прецессии Лензе-Тирринга.

Теоретическая и практическая значимость заключается в том, что предложена модель винтового джета с нерадиальным движением компонентов и дифференциацией областей джета, которые ассоциируются с различными наблюдаемыми величинами (плотностью потока излучения на разных длинах волн и измерением позиционного угла деталей парсекового джета), и продемонстрирована возможность ее применения для широкого круга задач. С учетом того, что появляются все больше наблюдательных подтверждений квази-периодической изогнутости потока вещества джетов, теоретических исследований развития (магнито)-гидродинамических неустойчивостей в джете, предложенная модель является связующим звеном между теоретическими ожиданиями и их наблюдательными проявлениями.

Показано, что интерпретация фотометрической оптической переменности блазаров на различных временных шкалах в рамках предложенной модели винтового джета позволяет делать выводы относительно структуры потока джета и физических условий в излучающей области. Так для широко известного блазара S5 0716+714 было доказано действие синхротронного самопоглощения в области формирования оптического излучения. Этот результат был отмечен Научным советом по астрономии РАН как важнейшее достижение в секции Внегалактической астрономии за 2022 год.

Диссертантом получены важные следствия для периодов переменности наблюдаемых величин, относящихся к разным расстояниям джета от центрального сверхмассивного объекта. И, совместно с исследованиями формы джета блазара OJ 287 от парсековых до килопарсековых масштабов, доказано отсутствие компактной двойной системы черных дыр. Выводы о структуре и массе центрального объекта в активных ядрах галактик являются необходимыми для эволюционных моделей как отдельных галактик, так и Вселенной в целом, а также для прогнозирования детектирования гравитационных волн от слияния сверхмассивных компактных объектов в разрабатываемых сейчас проектах пульсарного тайминга и космического лазерного интерферометра LISA.

Присутствие хорошо упорядоченного глобального магнитного поля дает ограничения на природу ярких деталей джета, механизмов переменности излучения блазаров во всем диапазоне электромагнитного спектра, а также моделей распространения джета как (магнито)-гидродинамического потока. Поэтому результаты представляемых работ могут быть использованы в широком круге исследовательских задач.

Методология и методы исследования

Исследования проводились следующим образом. Во-первых, для анализа свойств объектов на парсековых и субпарсековых масштабах, было получено аналитическое описание движения компонента изогнутого джета по винтовой

траектории и рассмотрены различные варианты движения субкомпонентов относительно основного компонента. На основе этого был выполнен переход к наблюдаемым величинам, таким как угол раствора потока джета, позиционный угол и видимая скорость деталей джета, поток излучения на различных частотах и спектральный индекс, свойства поляризации. Затем, из сопоставления данных наблюдений, определялись геометрические и кинематические параметры винтового джета и заключенного в него магнитного поля.

При исследовании джетов на килопарсековых масштабах использовалась гипотеза об образовании их рентгеновского излучения за счет обратного комптоновского рассеяния излучения парсековых джетов, которое в системе отсчета килопарсекового джета, движущегося с умеренно релятивистской скоростью, подвергается доплеровскому усилению. При этом аналитическое выражение для наблюдаемой плотности потока рассеянного излучения было получено из решения кинетического уравнения Больцмана. Подстановкой в полученное выражение данных наблюдений в радио- и рентгеновском диапазонах, с учетом соответствующих поправок на релятивистские эффекты, определены скорости и углы с лучом зрения нескольких джетов квазаров. В рамках предположения о джете, как о едином потоке вещества, параметры, полученные на различных рассматриваемых масштабах, были согласованы между собой. Исходя из этого, можно делать выводы относительно свойств центрального сверхмассивного объекта в АЯГ, как это было продемонстрировано на примере OJ 287.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Предложена и успешно применена для описания различных, иногда противоречивых наблюдаемых свойств блазаров, модель винтового парсекового джета с нерадиальным движением компонентов и в предположении различного расстояния от истинного начала джета областей, ответственных за различные наблюдаемые величины (поток излучения на различных частотах, позиционный угол и параметры Стокса Q и U).

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. Винтовые модели джета предполагают циклическое изменение доплер-фактора при последовательном изменении ориентации искривленного джета

относительно луча зрения. При этом, в диссертационной работе впервые показано изменение квази-периода вариации наблюдаемых величин, образующихся на разных расстояниях от истинного начала джета.

5. Впервые показано, что наблюдаемые свойства блазара ОJ 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.

6. 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. При этом спектр излучения изогнутый.

7. Предложен и успешно применен метод определения кратчайшего времени переменности с высоким уровнем статистической значимости.

8. 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.

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

10. 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.

11. На большой выборке объектов доказано, что скорость и направление килопарсекового джета не являются параметрами, на основе которых определяется возможность его детектирования в рентгеновском диапазоне. Как зарегистрированные в рентгеновском диапазоне килопарсековые джеты, так и не зарегистрированные имеют между парсековым и килопарсековым масштабами

изгиб, величина которого примерно в полтора раза меньше угла парсекового джета с лучом зрения.

12. Для килопарсекового джета квазара 3C 273 подтверждено, а для блазаров PKS 1127–145, OJ 287, PKS 0637–752, PKS 1045–188, PKS 1510–089 получено впервые, что рентгеновское излучение ближних к центральному источнику узлов их килопарсековых джетов образуется вследствие обратного комптоновского рассеяния излучения парсекового джета. На основе этого разработан метод определения скорости продвижения и нижнего ограничения на угол с лучом зрения килопарсековых джетов. Получены субрелятивистские скорости килопарсековых джетов, которые с лучом зрения составляют углы более 20° .

Достоверность проведенных исследований подтверждается использованием стандартных математических методов при численном моделировании. Аналитические выражения для обратного комптоновского рассеяния получены с учетом перехода в соответствующие системы отсчета при релятивистском движении и с использованием широко известного метода кинетического уравнения Больцмана. Все оценки физических параметров объектов получены на основе надежных данных наблюдений. Все результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах и используются другими исследователями в своих работах.

Апробация результатов

Исследования, выполненные в рамках диссертационной работы, докладывались и обсуждались на семинарах Крымской астрофизической обсерватории и Астрокосмического центра ФИАН. Основные результаты были представлены на следующих российских и международных конференциях:

- Всероссийские астрономические конференции, г. Ялта (2017), г. Москва (2021).
- «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино (2016, 2017, 2018, 2019).
- 11-я молодежная научная школа-конференция «Исследования космоса: микро- и макромир», п. Научный и г. Симферополь (2016).
- «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», г. Москва (2018, 2019).
- 15th Potsdam Thinkshop «The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflow», г. Потсдам, Германия (2018).
- European VLBI Network (EVN) Symposium and Users Meeting, г. Гранада, Испания (2018); г. Корк, Ирландия (2021).
- International conference on gravitation, cosmology and astrophysics, г. Санкт-Петербург (2020).
- Международная конференция «Extragalactic jets on all scales – launching, propagation, termination», online (2021).

- Международная конференция «Galaxies with Active Nuclei on Scales from Black Hole to Host Galaxy» dedicated to the E.A. Dibai's 90th anniversary, п. Научный (2021).
- Конференция «Вселенная: от большого взрыва до наших дней», посвященная 90-летию Н. С. Кардашева, г. Москва (2022).
- Конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения», посвященная 90-летию академика Ю. Н. Парийского, п. Нижний Архыз (2022).
- Международная научная конференция «Активные галактики на разных масштабах и длинах волн», п. Нижний Архыз (2024).

Публикации автора по теме диссертации

Результаты диссертационной работы содержатся в 18 научных статьях [A1—A18], опубликованных в рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus. Все статьи опубликованы после защиты кандидатской диссертации.

- A1. *Butuzova M. S.* Search for differences in the velocities and directions of the kiloparsec-scale jets of quasars with and without X-ray emission // *Astronomy Reports.* – 2016. – V. 60, Is. 3. – P. 313-321.
- A2. *Raiteri C. M., Villata M., Acosta-Pulido J. A., ..., Butuzova M. S., ... (86 авторов)* Blazar spectral variability as explained by a twisted inhomogeneous jet // *Nature.* – 2017. – V. 552, Is. 7685. – P. 374.
- A3. *Butuzova M. S.* Geometrical and kinematic parameters of the jet of the blazar S5 0716+71 in a helical-jet model // *Astronomy Reports.* – 2018. – V. 62, Is. 2. – P. 116-122.
- A4. *Butuzova M. S.* Periods of the long-term variability of the blazar 0716+714 and their inter-correlations in a helical jet model // *Astronomy Reports.* – 2018. – V. 62, Is. 10. – P. 654-663.
- A5. *Pushkarev A. B., Butuzova M. S., Kovalev Y. Y., Hovatta T.* Multifrequency study of the gamma-ray flaring BL Lacertae object PKS 2233-148 in 2009-2012 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2019. – V. 482, Is. 2. – P. 2336-2353.
- A6. *Butuzova M. S., Pushkarev A. B.* Inverse Compton Scattering of the Central Source Photons as an X-Ray Emission Mechanism on Kiloparsec Scales in PKS 1127-145 // *The Astrophysical Journal.* – 2019. – V. 883, Is. 2. – P. 131-141.
- A7. *Vercellone S., Romano P., Piano G., ..., Butuzova M.S., ... (59 авторов)* AGILE, Fermi, Swift, and GASP/WEBC multi-wavelength observations of the high-redshift blazar 4C +71.07 in outburst // 2019. – *Astronomy & Astrophysics.* – V. 621. – id. A82.

- A8. *Raiteri C. M., Villata M., Carnerero M. I., ..., Butuzova M.S., ... (64 астропа)* The beamed jet and quasar core of the distant blazar 4C 71.07 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2019. – V. 489, Is. 2. – P. 1837.
- A9. *D'Ammando F., Raiteri C. M., Villata M., ..., Butuzova M.S., ... (99 астропов)* Investigating the multiwavelength behaviour of the flat spectrum radio quasar CTA 102 during 2013-2017 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – V. 490, Is. 4. – P. 5300.
- A10. *Butuzova M. S., Pushkarev A. B., Shablovinskaya E. S., Nazarov S. V.* Inverse Compton Scattering of Radiation from a Central Source as a Possible Mechanism for the Formation of X-Ray Radiation from Kiloparsec Jets of Core-Dominated Quasars // Astronomy Reports. – 2020. – V. 64, Is. 11. – P. 894-914.
- A11. *Butuzova M. S., Pushkarev A. B.* Is OJ 287 a Single Supermassive Black Hole? // Universe. – 2020. – V. 6, Is. 11. – id. 191.
- A12. *Butuzova M. S.* A geometrical interpretation for the properties of multiband optical variability of the blazar S5 0716+714 // Astroparticle Physics. – 2021. – V. 129. – id. 102577.
- A13. *Butuzova M. S.* The Blazar OJ 287 Jet from Parsec to Kiloparsec Scales // Astronomy Reports. – 2021. – V. 65, Is. 8. – P. 635-644.
- A14. *Gorbachev M. A., Butuzova M. S., Sergeev S. G., Nazarov S. V., Zhovtan A. V.* Long-term Multiband Optical Variability of Blazar S5 0716+714 // The Astrophysical Journal. – 2022. – V. 928, Is. 1. – P. 86-104.
- A15. *Butuzova M. S.* The Observed Polarization Direction Depending on Geometrical and Kinematic Parameters of Relativistic Jets // Astronomy Reports. – 2022. – V. 66, Is. 10. – P. 845-871.
- A16. *Butuzova M. S., Pushkarev A. B.* Configuration of the global magnetic field in AGN parsec-scale jets // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – V. 520, Is. 4. – P. 6335-6349.
- A17. *Gorbachev M. A., Butuzova M. S., Nazarov S. V., Zhovtan A. V.* Evidence of jet-caused 12-year optical periodicity of blazar OJ 287 // Astroparticle Physics. – 2024. – V. 160. – id. 102965.
- A18. *Butuzova M. S., Guseva V. A., Gorbachev M. A., Krivenko A. S., Nazarov S. V.* A new method for studying the blazar variability on the shortest time scales and its application to S5 1803+784 // Journal of High Energy Astrophysics. – 2025. – V. 45. – P. 19.

Личный вклад в совместные работы

В работах A2, A7 – A9 соискателем были выполнены оптические фотометрические наблюдения на телескопе АЗТ-8 КрАО РАН, вклад с другими сотрудниками КрАО РАН равный.

В работе А5 соискателем производилась обработка данных РСДБ-наблюдений блазара PKS 2233-148, расчет смещения видимого начала джета на различных частотах и вывод аналитического выражения для перпендикулярной лучу зрения составляющей магнитного поля из радиоспектра с завалом на низких частотах, обусловленным синхротронным самопоглощением при учете релятивистских эффектов. В работе А6 диссертантом поставлена задача, получены аналитические выражения для наблюдаемой плотности потока излучения, образованного обратным комптоновским рассеянием релятивистски усиленного излучения парсекового джета, для интервалов возможных значений угла килопарсекового джета с лучом зрения. Промоделирован спектр рассеянного излучения с учетом границ степенного спектра рассеиваемых фотонов и электронов. Предсказан излом в спектре высокоэнергетического излучения. Предложен метод определения скорости килопарсекового джета PKS 1127–145. Получены оценки напряженности и концентрации электронов в узлах джета. В статье А10 диссертантом проведена обработка наблюдений рентгеновской обсерватории Chandra килопарсекового джета квазара PKS 1045–18, определены физические параметры узлов джетов рассматриваемых объектов, проведена оценка углов зрения и скоростей килопарсековых джетов. Также для исследуемых объектов были построены спектры высокочастотного излучения в предположении его образования вследствие обратного комптоновского рассеяния излучения парсекового джета. В статье А11 диссертантом разработана концепция исследования, получены геометрические и кинематические параметры используемой модели винтового джета. Рассмотрена неустойчивость Кельвина-Гельмгольца как причина изогнутой формы джета и прецессия центральной машины при интерпретации вековых изменений на кривой блеска блазара OJ 287. В работе А14 диссертантом поставлена задача, проведена часть фотометрических наблюдений, выполнена их обработка, получены оценки концентрации излучающих электронов. В работе А16 диссертантом применена модель винтового джета с нерадиальным движением его деталей при моделировании поперечных джету распределений свойств поляризации в различных топологиях магнитного поля и выполнено сравнение с наблюдаемыми распределениями соответствующих параметров. В статье А17 соискателем поставлена задача, определены геометрические параметры части джета блазара OJ 287, от которой приходит наблюдаемое излучение в оптическом диапазоне и проведено соответствие с геометрическими параметрами части джета, наблюдаемой на VLBA. Вклад первых двух авторов в обсуждение результатов определяющий и равноценный. В работе А18 диссертантом разработан метод определения кратчайшего времени переменности и проведена фотометрическая обработка объекта по суммированным вырезкам из полнокадровых изображений TESS.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключения и Библиографии. Общий объем диссертации составляет 212 страниц, включая 89 рисунков и 23 таблицы. Библиография состоит из 288 наименований.

Содержание работы

Во **введении** освещаются современные представления о действующих в джетах АЯГ процессах, их наблюдательном проявлении. Затем указывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи работы. Обосновывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, указываются методы исследования. Далее представлены положения, выносимые на защиту, и информация об апробации результатов диссертации и личном вкладе соискателя в совместные работы.

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. Базируясь на интерпретации квазипериодического изменения позиционного угла внутреннего (ближайшей к РСДБ-ядру области) джета PA_{in} , вводится геометрическая модель джета, ось которого формирует винтовую линию на поверхности воображаемого конуса. Рассматривая в качестве компонента джета отрезок, в пределах которого ось джета можно считать прямой, безотносительно к природе наблюдаемых РСДБ-компонентов, получены выражения для изменения угла между лучом зрения и вектором скорости компонента джета, при его движении по радиальной и нерадиальной траектории. Проведены оценки параметров модели из данных РСДБ-наблюдений джета блазара S5 0716+714.

В Разделе 1.3 проводится совместный анализ скоростей деталей джета, полученных по РСДБ-наблюдениям, выполненным в различные годы, и позиционным углом этих деталей. 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. При этом учитывается, что наблюдаемые величины образуются на различном расстоянии от истинного начала джета. Так, например, область, ответственная за

наблюдаемое излучение в оптическом диапазоне, находится выше по течению от РСДБ-ядра из-за эффекта синхротронного самопоглощения и энергетических потерь ультрарелятивистских электронов на излучение. Тогда как расстояние от РСДБ-ядра, на котором измеряется PA_{in} , составляет 1–1.5 миллисекунд дуги. Показано, что временные интервалы, в которых присутствует сильная положительная корреляция между указанными величинами будут сменяться интервалами с отрицательной или отсутствующей корреляцией. (Квази)период изменения наблюдаемых величин при радиальном движении без замедления компонентов сохраняется постоянным на различных расстояниях от истинного начала джета. При нерадиальном движении компонентов отношение периодов равно отношению расстояний областей, с которыми ассоциируются наблюдаемые величины, от вершины воображаемого конуса. Отметим, что положение вершины конуса не совпадает с положением как центральной СМЧД, так и истинного начала джета. Результаты, представленные в Разделах 1.2-1.4 получены диссертантом единолично.

В Разделе 1.5 выявляется изменение PA_{in} джета блазара OJ 287 на основе 145 эпох 15 ГГц РСДБ-наблюдений за интервал с 1994 по 2019 гг. Из аналитической аппроксимации изменения PA_{in} определяются параметры джета в рамках предложенной в Разделе 1.2 модели. Далее показывается, что винтовая форма с полученными параметрами может быть следствием развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в потоке джета при широком интервале возможных значений числа Маха в струе и отношения плотностей джета и окружающей среды. В предположении, что винтовая форма джета блазара OJ 287 влияет и на переменность потока излучения в оптическом диапазоне, производя квазипериодические 12-летние вспышки, анализируется возможность интерпретации векового изменения пикового потока во время этих вспышек за счет прецессии винтового джета. При этом диссертантом получены приемлемые оценки геометрических параметров прецессии, период которой в системе отсчета источника составляет 1200 лет. Смоделированная в рамках данных предположений кривая блеска хорошо согласуется с данными наблюдений (Рисунок 1). Из интерпретации 50-летнего многополосного оптического мониторинга блазара OJ 287 определяются геометрические параметры части джета, ответственной за наблюдаемое оптическое излучение и находящееся выше по течению от РСДБ-ядра. Имеется хорошее согласие с геометрическими параметрами джета, найденными из РСДБ-данных. Показано, что прецессия с указанным периодом может происходить вследствие эффекта Лензе-Тирринга. Этот вывод подтверждается из анализа формы килопарсекового джета блазара OJ 287. Результаты Главы, за исключением наблюдаемого изменения PA_{in} джета и долговременной кривой блеска в оптическом диапазоне блазара OJ 287, получены диссертантом лично.

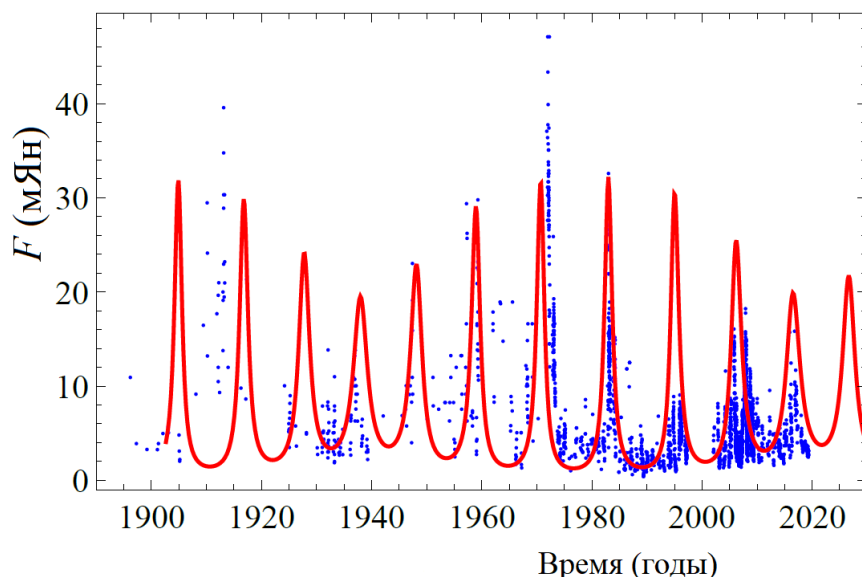


Рис. 1 – Кривая блеска блазара OJ 287 в оптическом диапазоне (точки) и ее аппроксимация, полученная диссертантом в рамках модели винтового прецессирующего джета (линия).

Глава вторая посвящена моделированию поперечных потоку джета распределений свойств поляризации в различной топологии магнитного поля в рамках разработанной в диссертации модели винтового джета.

В начале Главы 2 описываются характерные для многих джетов наблюдаемые особенности распределения свойств линейной поляризации, приводятся аргументы в пользу используемых в моделировании топологий магнитного поля.

В начале Раздела 2.1 приведены формулы для вычисления параметров Стокса в системе отсчета наблюдателя с учетом релятивистских эффектов. В эти формулы входит вектор скорости компонента β . В рамках рассматриваемой модели β , ось джета и радиальное направление не совпадают друг с другом (Рисунок 2). Этот случай в моделировании свойств поляризации был рассмотрен впервые диссертантом единолично. В завершении приводится сетка параметров, используемая в моделировании. Магнитное поле рассматривается двух топологий: винтовое с различным углом закрутки ψ' от 0° (продольное джету) до 90° (тороидальное) и структура «канал-оболочка». В последнем случае тороидальное поле в центральном канале окружено оболочкой, пронизанной полоидальным полем.

В Разделе 2.2 анализируются результаты моделирования для прямого джета с радиальным движением компонентов. Лучшее соответствие поперечного джету модельного распределения степени поляризации наблюдаемым присутствует в случае структуры «канал-оболочка». Но в моделях отклонения вектора поляризации от оси джета $|\text{PA}_{\text{jet}} - \text{EVPA}|$ составляют исключительно 0° и 90° , что не соответствует наблюдениям.

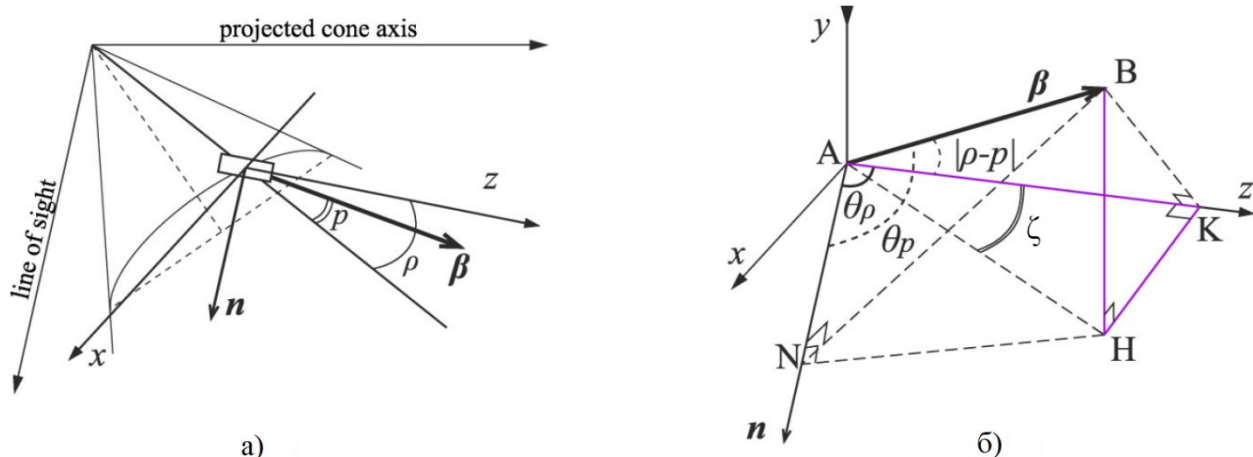


Рис. 2 – Схема системы координат, ассоциированной с отдельным компонентом джета, с проиллюстрированными параметрами модели. (а) – Общий вид. Компонент джета представлен прямоугольником на поверхности воображаемого конуса. \mathbf{n} – луч зрения, лежащий в плоскости x - z . (б) – Подробная схема для β и его компонент (отмечены цветом). Геометрическая схема предложена диссертантом и использована им при моделировании.

Результаты моделирования в случае винтовой формы джета и нерадиального движения компонентов представлены в Разделе 2.3. Обе рассматриваемые конфигурации магнитного поля способны воспроизвести наблюдаемые поперечные распределения степени поляризации, интенсивности в поляризации и $|\text{PA}_{\text{jet}} - \text{EVPA}|$. Случай, в котором с одной стороны от оси джета вектор поляризации продолен оси, а с другой стороны – перпендикулярен, реализуется только при винтовом магнитном поле. Важно отметить, что при этом при неизменном магнитном поле, стороны джета с продольным и поперечным направлением поляризации могут поменяться местами при изменении геометрических и кинематических параметров джета (см. Рисунок 3, тип 5 и 6). Этот результат получен впервые. Дополнительно показано, что в поляризационной структуре «канал-оболочка» ширина области с продольным джету направлением поляризации меньше, чем ширина области, пронизанной тороидальным магнитным полем.

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). Эти объекты имеют типичные и отличающиеся друг от друга распределения свойств поляризации. Для каждого квазара приведены конкретные параметры, варьирующиеся в узком интервале значений, при которых модельные распределения свойств поляризации хорошо согласуются качественно с данными наблюдений, предоставленными соавтором публикации [A16].

В Разделе 2.5 исследуется влияние геометрических и кинематических параметров на форму поперечного распределения $|PA_{jet} - EVPA|$. Для этого было дано параметрическое описание типичным наблюдаемым распределениям направлений поляризации и составлены массивы с указанием типов распределений, присутствующих в каждом фиксированном наборе модельных параметров. В результате доказано, что винтовая форма джета является причиной того, что воспроизводятся несколько характерных типов поперечных распределений свойств поляризации при фиксированном магнитном поле и параметрах модели винтового джета. При этом нет явно выраженной зависимости формы поперечного распределения свойств поляризации от параметров модели (см., например, Рисунок 3). Результаты данной главы, основанные на моделировании, получены диссертантом единолично.

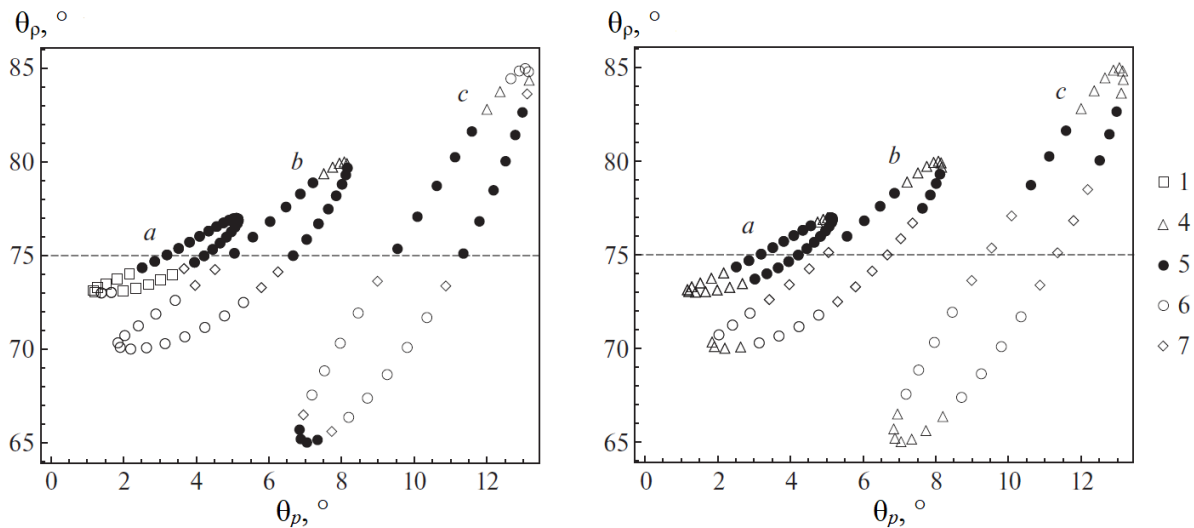


Рис. 3 – Типы распределения $|PA_{jet} - EVPA|$ (отмечены разными символами) в зависимости от θ_r и θ_p при $p = 3^\circ$ и $\rho/p = 25$. Точки, формирующие петли a , b и c , получены при равноотстоящих значениях ϕ для $\theta_0 = 2, 5$ и 10° , соответственно. Штриховая линия соответствует $\theta_r = p$. Графики приведены для $\psi' = 25^\circ$ (слева) и 65° (справа). Результат диссертанта.

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, выполненных в 2014-2015 гг. Дорошенко В.Т.. Для ночей с обнаруженной переменностью проводится анализ данных на выявление возможных корреляций между показателем цвета, яркостью и амплитудой переменности.

Проводится поиск различий фотометрических параметров для ночей с обнаруженной переменностью и без нее.

В Разделе 3.3 предлагается модель образования кратковременной переменности потока излучения в рамках винтовой формы джета на масштабах от субпарсек до парсек (разработана диссертантом лично). А именно, в потоке джета предполагается присутствие субкомпонентов – отдельных частей, движущихся под некоторым малым углом к общей траектории. При условии, что доплер-фактор этих компонент может быть больше доплер-фактора основного потока, эволюция субкомпонентов определяет переменность на короткой временной шкале. Получено аналитическое выражение для изменения доплер-фактора субкомпонентов. В Разделе 3.4 проанализировано их влияние на общую яркость объекта. Показано, что при некоторых параметрах возможно быстрое изменение доплер-фактора за несколько часов в системе отсчета наблюдателя.

В Разделе 3.5 предлагается альтернативная интерпретация наблюдаемого тренда к более синему цвету объекта при повышении яркости. Она заключается в том, что степенной спектр излучения области, производящей фотоны с частотами, попадающими в наблюдаемый оптический диапазон, становится более пологим на низких частотах. Тогда большой доплер-фактор, достигаемый субкомпонентом, будет приводить к более пологому спектру при повышении яркости, т.е. к более синему цвету объекта. В то же время другой субкомпонент бо́льший по объему и с меньшим доплер-фактором может приводить ко вспышке с такой же амплитудой, но без изменения спектра излучения объекта. Предполагается естественный процесс, приводящий к изменению спектра с уменьшением частоты – синхротронное самопоглощение. Проводится проверка данного предположения на основе наблюдаемых амплитуды переменности и зависимостей показателя цвета от яркости как для внутрисуточной вспышки (в JD 2457130), так и для долговременной переменности. Полученные в двух случаях оценки частоты максимума спектра и частоты, при которой оптическая толщина равна единице, согласуются. (Личный результат диссертанта).

В Разделе 3.6 приведены примеры двух последовательных вспышек на внутрисуточной шкале переменности (по данным Дорошенко В.Т.), 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. На примере блазара S5 1803+784 показана неприменимость данных, извлекаемых стандартным инструментарием TESS, для исследований блазаров и предложен способ обработки данных TESS, уменьшающий

влияние пуассоновского шума на кривую блеска блазара. Проводится интерпретация результатов исследования кратковременной переменности блазара S5 1803+784 в предположении присутствия в потоке джета субкомпонентов.

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. При этом размер излучающей области предполагается равным одному гравитационному радиусу центральной ЧД, масса которой для вычислений принимается 10^8 и 10^9 масс Солнца. Перпендикулярная лучу зрения составляющая магнитного поля находится в интервале 0.1–100 Гс и 10^3 – 10^5 Гс, соответственно.

В Разделе 3.9 обсуждаются результаты и сформулированы основные выводы данной главы. Результаты Разделов 3.7 и 3.8 получены диссертантом совместно с Горбачевым М.А., вклад обоих равноценный и определяющий.

Глава 4 посвящена определению ориентации, физических параметров и механизмов рентгеновского излучения джетов квазаров на килопарсековых (кпк) масштабах. В начале Главы 4 описываются инструменты, используемые для наблюдений джетов с высоким угловым разрешением, основные механизмы образования рентгеновского излучения в джетах и их трудности в интерпретации некоторых наблюдаемых свойств. Широко распространено предположение, что рентгеновское излучение в кпк-джетах квазаров образуется за счет обратного комптоновского рассеяния (ОКР) фотонов реликтового фона – так называемая «beamed IC/CMB» модель. При этом, для выполнения условия равномерного распределения энергии, кпк-джет, по аналогии с парсековым (пк), полагается ультрарелятивистским и направленным под малым углом к лучу зрения. Альтернативное предположение состоит в том, что в ближних к центральному источнику узлах кпк-джета рентгеновское излучение образуется за счет ОКР релятивистки усиленного излучения пк-джета, тогда как для дальних узлов – ОКР на реликтовом фоне. Модели, в которых рентгеновское излучение образуется синхротронным механизмом от другой, более высокоэнергетической, популяции электронов или протонов, имеют много свободных параметров и в диссертации не рассматриваются.

В Разделе 4.1 исследуется вопрос, 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. Проверять это предлагается на основе разницы позиционных углов $\Delta\alpha$ между джетами на указанных масштабах. Для этого описываются ожидаемые различия в распределении $\Delta\alpha$ для двух выборок. Перечисляются свойства и объекты этих двух выборок. Далее приводятся полученные распределения $\Delta\alpha$ и их

анализ на однородность, проведенный с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Обсуждается отсутствие пика при $\Delta\alpha \approx 90^\circ$, который ранее отмечали другие исследователи пространственной ориентации джетов. Делается вывод об однородности двух выборок и присутствия изгиба в джетах между пк- и кпк-масштабами, величина которого примерно в полтора раза меньше угла пк-джета с лучом зрения (личный результат диссертанта).

В Разделе 4.2 получены аналитические выражения для плотности потока излучения, образованного ОКР в поле релятивистски усиленного излучения от пк-джета. Для этого использован метод кинетического уравнения Больцмана и учтены наклоны и границы спектров рассеиваемого излучения и энергетического электронного распределения. Характеристики рассеиваемого в кпк-джете низкочастотного излучения получены из наблюдаемого спектра с учетом необходимых релятивистских преобразований при переходе в другую систему отсчета (личный результат диссертанта). Показано, что присутствует два случая, дающие различный спектр рассеиваемого излучения. В первом случае присутствует ограничение со стороны фотонного спектра. То есть основной вклад в рассеиваемое излучение дает ОКР фотонов с частотой, соответствующей одной из границ фотонного спектра, на электронах с энергией далекой от граничных значений. Тогда спектральный индекс производимого высокочастотного излучения определяется наклоном электронного энергетического распределения. Во втором случае происходит ограничение со стороны электронного спектра, что означает доминирующий вклад в высокочастотное излучение от ОКР на электронах с энергией, соответствующей граничному значению, фотонов с частотой, далекой от граничных значений. В этом случае спектральные индексы излучения до и после рассеяния равны.

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. Далее приводятся формулы для оценки скорости кпк-джета из интерпретации различия углов зрения джетов на разных масштабах за счет релятивистской абберации.

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, отобранным по признакам, указанным в начале данного Раздела. В Пункте 4.5.1 рассматривается распределение интенсивности и спектрального индекса излучения в радио- и рентгеновском диапазонах для кпк-джета квазара PKS 1127–145,

указываются параметры пк-джета, наблюдаемый спектр центрального источника ассоциируется с излучением пк-джета и аппроксимируется тремя степенными законами. Затем из сравнения спектральных индексов узлов в радио- и рентгеновском диапазонах определяется ограничение, действующее при ОКР частиц со степенными спектрами, вычисляются напряженность магнитного поля и концентрация излучающих электронов в узлах. Далее проводится оценка угла с лучом зрения и скорости кпк-джета. В завершении моделируется весь спектр излучения, образованного в рамках ОКР, и сравнивается с минимальным постоянным потоком в гамма-диапазоне, который используется как верхнее ограничение на поток гамма-излучения от кпк-джета.

В Пункте 4.5.2 определяется угол изгиба джетов квазаров PKS 0637–752, PKS 1045–188, 3C 273, PKS 1510–089 между пк- и кпк-масштабами. Затем моделируется наблюдаемое излучение от квазаров степенными законами и в рамках предположения о действии ОКР излучения пк-джета в ближних к центральному источнику узлах кпк-джета, определяется угол (в некоторых случаях только нижнее ограничение на его значение) между кпк-джетом и лучом зрения. Далее для каждого объекта из наблюдаемого радио- и рентгеновского излучения узлов джетов определяются напряженность магнитного поля и концентрация излучающих электронов, проводится моделирование спектра излучения, образованного за счет ОКР, и сопоставляются ожидаемые значения потока гамма-излучения в диапазоне Fermi-LAT с минимальным зарегистрированным потоком от соответствующих источников, который взят как верхнее ограничение на постоянный уровень гамма-излучения от кпк-джета. Для всех объектов ОКР на излучении пк-джета дает поток в гамма-диапазоне ниже верхнего ограничения на него по данным Fermi-LAT. В спектрах рассеянного излучения присутствуют изломы, вызванные переходом от ограничения фотонным спектром к ограничению электронным спектром (или наоборот). Углы кпк-джетов с лучом зрения более 20° . Напряженность магнитного поля ниже значения, оцениваемого из условия равномерного распределения энергии между частицами и полем.

В Разделе 4.6 исследуется джет блазара OJ 287 от пк- до кпк-масштабов. Сначала приводятся данные наблюдений кпк-джета в радио- и рентгеновском диапазоне. Затем описывается обработка данных наблюдений Chandra для узлов кпк-джета и аппроксимируется спектр центрального источника двумя степенными законами. Далее определяется изгиб джета, происходящий между пк- и кпк-масштабами, и из данных радио- и рентгеновского излучения узлов кпк-джета определяется магнитное поле, концентрация электронов и угол джета с лучом зрения. Затем моделируется высокочастотный спектр излучения джета в рамках ОКР, который в рабочем диапазоне Fermi-LAT имеет поток ниже, чем верхнее ограничение на предполагаемый поток от кпк-джета. В предположении, что

изогнутая форма кпк-джета образовалась вследствие прецессии центральной машины, определяется период прецессии. При этом используется значение угла кпк-джета с лучом зрения, полученное в двух моделях образования рентгеновского излучения. А именно, в рамках «beamed IC/СМВ» и ОКР на излучении пк-джета. Далее учитывается изменение периода винтового джета, ось которого расположена на поверхности воображаемого конуса, с расстоянием от вершины конуса. На пк-масштабах в анализе используется период как в 12 лет, так и в 92 года, полученный в Разделе 1.5. Доказывается, что периоды винтовой линии джета блазара ОJ 287 на пк- и кпк-масштабах согласуются между собой только в рамках ОКР на излучении пк-джета и периоде 92 года на пк-масштабах.

В Разделе 4.7 собраны результаты Главы 4 и проводится их обсуждение. Результаты данного раздела преобладающей частью получены диссертантом

В Заключении представлены положения, выносимые на защиту.

Список литературы

1. *Junor W., Biretta J.A., Livio M.* Formation of the radio jet in M87 at 100 Schwarzschild radii from the central black hole // *Nature*. – 1999. – Т. 401, вып. 6756. – С. 891.
2. *Hada K., Doi A., Kino M.* [и др.]. An origin of the radio jet in M87 at the location of the central black hole // *Nature*. – 2011. – Т. 477, вып. 7363. – С. 185.
3. *Blandford R., Meier D., Readhead A.* Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — Т. 57. — С. 467.
4. *Matveenko L. I., Kardashev N. S., Sholomitskii G. B.* Large base-line radio interferometers // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 1965. – Т. 8. – С. 461.
5. *Lister M. L., Homan D. C., Hovatta T., Kellermann K. I.* [и др.]. MOJAVE. XVII. Jet Kinematics and Parent Population Properties of Relativistically Beamed Radio-loud Blazars // *The Astrophysical Journal*. – 2019. – Т. 874. – С. 43.
6. *Lister M. L., Homan D. C., Kellermann K. I., Kovalev Y. Y.* [и др.]. Monitoring Of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. XVIII. Kinematics and Inner Jet Evolution of Bright Radio-loud Active Galaxies // *The Astrophysical Journal*. – 2021. – Т. 923. – С. 30.
7. *Homan D. C., Lister M. L., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B.* [и др.]. MOJAVE. XII. Acceleration and Collimation of Blazar Jets on Parsec Scales // *The Astrophysical Journal*. – 2015. – Т. 798. – С. 134.
8. *Mertens F., Lobanov A. P., Walker R. C., Hardee P. E.* Kinematics of the jet in M 87 on scales of 100-1000 Schwarzschild radii // *Astronomy & Astrophysics*. – 2016. – Т. 595. – С. A54.
9. *Pasetto A., Carrasco-González C., Gómez J. L.* [и др.]. Reading M87's DNA: A Double Helix Revealing a Large-scale Helical Magnetic Field // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2021. – Т. 923. – С. L5.
10. *Nikonov A. S., Kovalev Y. Y., Kravchenko E. V.* [и др.]. Properties of the jet in M87 revealed by its helical structure imaged with the VLBA at 8 and 15 GHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2023. – Т. 526. – С. 5949.
11. *Fuentes A., Gómez J. L., Martí J. M.* [и др.]. Filamentary structures as the origin of blazar jet radio variability // *Nature Astronomy*. – 2023. – Т. 7. – С. 1359.
12. *Kardashev N. S., Alakoz A. V., Andrianov A. S.* [и др.]. RadioAstron Science Program Five Years after Launch: Main Science Results // *Solar System Research*. – 2017. – Т. 51, вып. 7. – С. 535.
13. *IceCube Collaboration, Aartsen M. G., Ackermann M.* [и др.]. Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A // *Science*. – 2018. – Т. 361. – С. eaat1378.
14. *Dzhilkibaev Zh.-A., Suvorova O., Baikal-GVD Collaboration* Baikal-GVD observation of a high-energy neutrino candidate event from the blazar PKS 0735+17 at the day of

- the IceCube-211208A neutrino alert from the same direction // The Astronomer's Telegram. – No. 15112. – 2021.
15. Kovalev Y. Y., Plavin A. V., Troitsky S. V. [и др.]. The radio-bright blazar PKS 1741-03 coincident with the high energy neutrino alert IceCube-220205B // The Astronomer's Telegram. – No. 15215. – 2022.
 16. IceCube Collaboration, Abbasi R., Ackermann M. [и др.]. Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068 // Science. – 2022. – Т. 378. – С. 538.
 17. Giommi P., Glauch T., Padovani P. [и др.]. Dissecting the regions around IceCube high-energy neutrinos: growing evidence for the blazar connection // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – Т. 497. – С. 865.
 18. Plavin A., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., Troitsky S. Observational Evidence for the Origin of High-energy Neutrinos in Parsec-scale Nuclei of Radio-bright Active Galaxies // The Astrophysical Journal. – 2020. – Т. 894. – С. 101.
 19. Akiyama K., Kuramochi K., Ikeda S. [и др.]. Imaging the Schwarzschild-radius-scale Structure of M87 with the Event Horizon Telescope Using Sparse Modeling // The Astrophysical Journal. – 2017. – Т. 838. – С. 1.
 20. Kravchenko E. V., Gómez J. L., Kovalev Y. Y., Voitsik P. A. The jet of S5 0716 + 71 at μ as scales with RadioAstron // Advances in Space Research. – 2020. – Т. 65. – С. 720.
 21. Zhao G.-Y., Gómez J. L., Fuentes A. [и др.]. Unraveling the Innermost Jet Structure of OJ 287 with the First GMVA + ALMA Observations // The Astrophysical Journal. – 2022. – Т. 932. – С. 72.
 22. Kim J.-Y., Krichbaum T. P., Broderick A. E. [и др.]. Event Horizon Telescope imaging of the archetypal blazar 3C 279 at an extreme 20 microarcsecond resolution // Astronomy & Astrophysics. – 2020. – Т. 640. – С. 69.
 23. Novikov I. D., Likhachev S. F., Shchekinov Yu. A. [и др.]. Objectives of the Millimetron Space Observatory science program and technical capabilities of its realization // Physics Uspekhi. – 2021. – Т. 64. – С. 386.
 24. Likhachev S. F., Rudnitskiy A. G., Shchurov M. A. [и др.]. High-resolution imaging of a black hole shadow with Millimetron orbit around lagrange point l2 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – Т. 511. – С. 668.