

На правах рукописи

Плавин Александр Викторович

**Изучение высокоэнергетических процессов в ядрах
активных галактик по данным радио, оптических и
нейтринных наблюдений**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Физическом институте имени П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
Ковалев Юрий Юрьевич

Официальные оппоненты: **Байкова Аниса Талгатовна**,
доктор физико-математических наук,
кандидат технических наук,
Главная Астрономическая Обсерватория
РАН, Пулково,
главный научный сотрудник
Лутовинов Александр Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
Институт космических исследований РАН,
заместитель директора

Ведущая организация: Крымская астрофизическая обсерватория
РАН

Защита состоится «—» апреля 2022 г. в — часов на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, подъезд А2, зал семинаров — к. 707.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), ученому секретарю диссертационного совета Д002.023.01.

Автореферат разослан 17 января 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д002.023.01,
кандидат физико-математических
наук

Шахворостова Н. Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Активные ядра галактик являются самыми мощными постоянно действующими источниками нетеплового излучения во Вселенной [1; 2]. Среди активных галактик с ярким радиоизлучением встречаются преимущественно блазары: объекты, релятивистская струя (джет) которых направлена под небольшим углом к наблюдателю [3]. Они известны такими характерными особенностями, как сильнопеременное излучение и видимое сверхсветовое движение [4–7]. Активные ядра излучают во всем электромагнитном спектре с распределением энергии, которое часто состоит из двух широких компонент. Одна из них приписывается преимущественно синхротронному излучению, которое простирается от низких радиочастот и достигает пика между ИК и рентгеновским диапазонами; вторая, более энергичная, соответствует обратному Комптоновскому рассеянию и другим механизмам, и достигает пика в низко- или высоко- энергетическом γ диапазоне [8; 9]. Среди оптических источников активные галактики достаточно редки, но они являются наиболее распространенным типом объектов, обнаруженных телескопами вне галактической плоскости [10; 11].

Наблюдения активных галактик в радиодиапазоне проводятся на масштабах от астрономических единиц до мегапарсек, используя одиночные антенны, компактные интерферометры, и интерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ) [12; 13]. Радиоизлучение приходит преимущественно от джета, при этом на характерных частотах наблюдений в несколько ГГц истинное начало джета скрыто из-за самопоглощения [14–16]; чем ниже частота наблюдения, тем дальше простирается непрозрачная область. Изучение таких эффектов позволяет определять расстояние от чёрной дыры до видимого начала джета [17], оценивать физические параметры в начальных областях джета [18]. Исходя из физических моделей предполагается, что видимое самопоглощение тесно связано со вспышками в области ядра [18; 19]. Имеющиеся наблюдательные результаты не дали убедительного подтверждения или опровержения такой связи [15; 19], что вероятно вызвано малым размером использованной выборки. Неизвестно также, насколько далеко простирается обратная зависимость размера непрозрачной области от частоты, и излучение каких областей доминирует в оптическом и рентгеновском диапазонах: на сегодня только РСДБ предоставляет миллисекундное угловое разрешение, достаточное для прямого ответа на такие вопросы.

Активные ядра давно рассматриваются как возможные ускорители массивных частиц, протонов [например, 20]. Они детектируются и напрямую в виде космических лучей энергий масштаба ПэВ–ЕэВ [21], и требуются как необходимый ингредиент для рождения астрофизических нейтрино от ТэВ до ПэВ [22–24]. Мощные активные галактики — одни из немно-

гих объектов, энергии и величины полей в которых достаточно для рождения таких частиц [25]. В 2017 году нейтрино 170922A, детектированное на IceCube, было ассоциировано с ярким блазаром TXS 0506+056 [26; 27], что усилило интерес к связи активных ядер и нейтрино. Тем не менее ассоциация высокоэнергичных нейтрино с блазарами как классом объектов не была обнаружена в многочисленных исследованиях, основанных на сравнениях с данными наблюдений в гамма-диапазоне: например, [28; 29].

В дополнение к своим экстремальным астрофизическим свойствам, активные ядра галактик служат основой для международной небесной системы координат, ICRS [30]: основная её реализация, ICRF, построена на РСДБ-измерениях на частотах от 2 до 10 ГГц [31]. На этих частотах сильно проявляются эффекты непрозрачности, которые смещают видимое начало джета и могут влиять на измерения координат [19]. Наиболее точная система отсчёта в видимом свете также строится на наблюдениях активных ядер, которые измеряет космический телескоп Gaia [32]. Стабильность этих измерений существенно зависит от того, какие области доминируют в видимом излучении, и насколько сильно они переменны. Таким образом, детальное изучение и учёт упомянутых выше астрофизических эффектов требуются для построения наиболее точных инерциальных систем отсчёта.

Целью настоящей диссертационной работы являются исследования процессов в центральных областях активных ядер галактик на масштабах парсек. А именно:

- локализация оптического излучения активных галактик, выяснение механизмов и характерных пространственных масштабов этого излучения.
- определение природы видимых в радиодиапазоне вспышек в джетах, причин их возникновения;
- исследование гипотезы о возможности рождения нейтрино высоких энергий в областях близких к началу джета;

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

- Выяснить природу различий между астрометрическими измерениями квазаров в различных диапазонах электромагнитного спектра: оптическом и радио.
- Локализовать области активных ядер, доминирующие в их оптическом излучении. Разделить вклад аккреционного диска, джета, хозяйской галактики, поглощения пылью.
- Измерить смещения между видимым началом джета на разных радиочастотах для большого количества источников и моментов времени. Определить, меняется ли это смещение со временем, и как его изменения связаны с физическими процессами в джете.

- Изучить связь радиовспышек в ядрах квазаров с эффектами прозрачности излучения. Оценить, как и какие свойства джета приводят к таким изменениям.
- Определить, присутствует ли наблюдательная ассоциация рождения нейтрино высоких энергий с радиояркими блазарами.
- На основе энергетических соображений оценить возможность рождения нейтрино в центральных областях активных галактик.

Научная новизна работы заключается в анализе, проведённом впервые для настолько массовых выборок квазаров, либо и вовсе впервые для используемых наблюдательных данных. Так, измерены направления джетов для тысяч активных ядер и проведено сравнение этих направлений со сдвигами между РСДБ и Gaia координатами. Ранее анализ различий координат проводился без учёта направлений джетов, что не позволяло выявить астрофизическую природу эффекта. Измерены величины сдвига ядра для десятков эпох наблюдений 40 квазаров. Это привело к обнаружению сильной переменности видимого положения начала джета, которое было невозможным без таких измерений. Впервые проведено массовое сравнение детектированных нейтрино с РСДБ наблюдениями блазаров и с их переменностью в радиодиапазоне. Сопоставление всей доступной информации о нейтрино с полным каталогом радиоблазаров позволило связать рождение нейтрино и происходящие в релятивистских джетах процессы.

Научная значимость и ценность представляемой работы заключается в открытии новых направлений и способов исследования активных ядер галактик, обнаружении новых эффектов, проявляющихся в релятивистских джетах, а также в получении новых важных данных об условиях в начальных областях джетов. На основе заложенных идей и отработанных решений будут проводиться дальнейшие исследования оптического излучения джетов квазаров, как диссертантом, так и другими коллективами в мире. Обнаружение систематической связи ярких блазаров с нейтрино приводит к появлению новых наблюдательных кампаний в этом направлении, к расширению и дополнению результатов различными группами по всему миру на основе других наблюдательных данных. Получены ограничения на физические параметры джетов и на энергии происходящих в нём процессов: рождение нейтрино требует наличия ультрарелятивистских протонов; протяжённое оптическое излучение имеет синхротронную природу и исходит от высокоэнергичных заряженных частиц; наблюдаемые вспышки в джетах вызываются вбросом в них заряженных частиц с одновременным уменьшением магнитного поля. Объяснение этих результатов требует существенного развития и дополнения существующих моделей джетов активных ядер.

Практическая ценность. Обнаруженное яркое протяжённое оптическое излучение джетов вызывает смещение положений активных ядер галактик, измеряемых Gaia. Эти смещения необходимо учитывать при по-

строении инерциальных систем отсчёта на основе таких измерений. Наблюдаемая в радиодиапазоне структура более компактная, но обнаруженная переменность её начальной и самой яркой компоненты может влиять на РСДБ измерения, и должна учитываться при дальнейшем улучшении высокоточных систем координат. Исследованные в диссертационной работе эффекты уже сейчас используются для оценки достигаемой точности построения таких систем. Инерциальные системы отсчёта, основанные на наблюдениях квазаров, лежат в основе навигации на Земле, включая систему ГЛОНАСС.

Методология и методы исследования. Решение поставленных целей и задач выполняется посредством обработки и анализа наблюдательных данных с использованием методов радиоинтерферометрии, работы с изображениями, сопоставления различных астрономических каталогов, современных методов математической статистики, включая оценку значимости и достоверности результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Найдено, что значимые сдвиги наблюдаемых положений ядер активных галактик между радио (РСДБ) и оптическим (*Gaia*) диапазонами преимущественно происходят параллельно направлениям их джетов. Показано, что большинство этих различий величиной до десятков миллисекунд дуги объясняется протяжённым оптическим излучением релятивистских струй. Это является массовым наблюдательным свидетельством наличия мощных оптических джетов в активных галактиках.
2. На основе архивных РСДБ-наблюдений проведены массовые измерения смещений видимого начала джетов в ядрах галактик с частотой. Обнаружена значимая переменность смещения для большинства объектов с характерной величиной 0.3 миллисекунды дуги или 0.5 парсек. Эта переменность вызывается вспышками в джетах, сопровождающимися изменением плотности излучающих релятивистских частиц.
3. Обнаружена связь десятков блазаров, имеющих компактную РСДБ-структуру, с нейтрино высоких энергий, детектируемых обсерваторией IceCube. С использованием многолетних данных наблюдений на телескопе РАТАН-600 сделан вывод о рождении нейтрино преимущественно во время мощных радиовспышек в джетах. Эти результаты говорят, что нейтрино с энергиями от нескольких ТэВ до ПэВ рождаются в центральных областях блазаров на масштабах парсек. Такие частицы могут образовываться при взаимодействиях релятивистских протонов с высокоэнергичными фотонами в джетах. Из проведённых оценок следует, что радиоблазаров может быть достаточно для объяснения треков от астрофизических нейтрино, обнаруженных на IceCube.

Достоверность проведённых исследований и представленных результатов базируется на использовании обсерваторий, телескопов, и их сетей, зарекомендовавших стабильность своей работы в работах учёных со всего мира; на выполнении обработки и анализа данных с использованием современных статистических и вычислительных методов.

Результаты опубликованы в ведущих международных журналах, доложены на международных и российских конференциях, и используются в своей работе другими учёными. Получены независимые подтверждения представленных результатов: (i) авторы [33] провели анализ РСДБ и Gaia координат выбранных квазаров, и также пришли к выводу об астрофизических причинах их различий; (ii) в [34] обнаружена аналогичная корреляция времени прихода высокоэнергичных нейтрино со вспышками в радиодиапазоне; (iii) получены указания на связь блазаров с нейтрино, детектированными на ANTARES и Байкал-GVD [35–37].

Апробация работы. Исследования, вошедшие в диссертацию, отмечены премией им. Д. В. Скобельцына ФИАН в 2020 году; они многократно докладывались и обсуждались на семинарах Астрокосмического центра ФИАН, отдела теоретической физики ФИАН, а также других российских и зарубежных институтов.

Результаты были доложены диссертантом на 5 российских и 17 международных конференциях, включая перечисленные ниже. Доклад на Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (2021) удостоен награды The Young Scientist Award.

- European Astronomical Society Annual Meeting, Лейден, Нидерланды, онлайн (2021), *приглашённый доклад*
- Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, Рим, Италия, онлайн (2021)
- 37th International Cosmic Ray Conference, Берлин, Германия, онлайн (2021)
- 43rd COSPAR Scientific Assembly, Сидней, Австралия, онлайн (2021)
- 30th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Портсмут, Великобритания (2019)
- 14th European VLBI Network Symposium, Гранада, Испания (2018)
- Half a Century of Blazars and Beyond, Турин, Италия (2018)
- 10th IVS General meeting, Лонгйирбюен, Норвегия (2018)
- Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Кейп-Таун, ЮАР (2017)
- Всероссийская астрономическая конференция, Ялта, Россия (2017)
- European Week of Astronomy and Space Science, Прага, Чехия (2017)
- 13th European VLBI Network Symposium, Санкт-Петербург, Россия (2016)

Личный вклад. Диссертант совместно с соавторами участвовал в постановке исследовательских задач, выборе методов их решения, анализе экспериментальных данных, интерпретации и обсуждении результатов, и формулировке выводов работы. Во всех выносимых на защиту результатах личный вклад диссертанта является основным и определяющим.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus.

- A1. *Kovalev Y. Y., Petrov L., Plavin A. V.* VLBI-Gaia offsets favor parsec-scale jet direction in active galactic nuclei // *A&A*. — 2017. — Февр. — Т. 598. — С. L1.
- A2. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Petrov L. Y.* Dissecting the AGN Disk-Jet System with Joint VLBI-Gaia Analysis // *ApJ*. — 2019. — Февр. — Т. 871, № 2. — С. 143.
- A3. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., Lobanov A. P.* Significant core shift variability in parsec-scale jets of active galactic nuclei // *MNRAS*. — 2019. — Май. — Т. 485, № 2. — С. 1822–1842.
- A4. *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 // *ApJ*. — 2020. — Май. — Т. 894, № 2. — С. 101.
- A5. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., Troitsky S. V.* Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars // *ApJ*. — 2021. — Февр. — Т. 908, № 2. — С. 157.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, и заключения. Полный объем диссертации 117 страниц с 25 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 216 наименований.

Содержание работы

Во **введении** приведено общее описание диссертации, обзор современного состояния исследований ядер активных галактик и джетов в них, обосновывается актуальность проводимого исследования; обсуждаются цели и задачи работы, которые включают изучение физических свойств ярких радиоблазаров на масштабах парсек; приводятся основные результаты, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию оптического излучения активных ядер галактик путём сравнения их астрометрических положений между радио- и оптическим диапазонами. Такие измерения с точностью миллисекунд дуги проводятся радиоинтерферометрами со сверхдлинной

базой (например, система координат ICRF [38]), и космическим оптическим телескопом *Gaia* [39; 40]. Сравнения показали хорошее, в среднем, согласие между этими диапазонами, но было выделено около 400 активных галактик со значимыми расхождениями положений [41; 42]. Природа этих расхождений оставалась невыясненной, считалось маловероятным что они вызваны влиянием астрофизических свойств объектов [например, 32].

Мы сопоставили наиболее полные каталоги РСДБ (Фундаментальный радиокаталог, Radio Fundamental Catalog¹) и *Gaia* [43], и проанализировали ассоциированные между ними активные галактики. Направление радиоджета на парсековых масштабах было определено для 4023 таких совпадений на основе исторических РСДБ изображений. В качестве дополнительной наблюдательной информации использовались оптические цвета из каталога *Gaia*, а также измерения красных смещений и классов активных галактик из базы данных NED².

Оказалось, что различия координат между РСДБ и *Gaia* преимущественно следуют направлению джета, смещения направлены по течению или против него. Это свидетельствует о том, что расхождения вызваны влиянием астрофизических эффектов как минимум в 3/4 случаев. Сдвиги от РСДБ к *Gaia* положениям против направления джета имеют величины порядка одной миллисекунды дуги, и могут быть частично объяснены эффектами протяжённой и частотно-зависимой (сдвиг ядра; см. вторую главу диссертации) радиоструктуры. Для объяснения сдвигов вдоль джета, которые достигают 50 mas, требуется присутствие яркого протяжённого оптического излучения джетов на масштабах сотен парсек. Эти результаты — первое массовое указание на наличие такого излучения.

Сдвиги РСДБ-*Gaia* против направления джета требуют, чтобы оптическое положение находилось вблизи центральной чёрной дыры — существенно ближе, чем видимая радиоструктура. Разделить оптическое излучение начала джета и аккреционного диска в таких случаях помогла информация о красном смещении объектов и об их оптическом цвете. Мы увидели, что только относительно далёкие и синие активные ядра могут иметь РСДБ-*Gaia* сдвиги против направления джета. Известно, что основное излучение аккреционного диска находится в ультрафиолетовой области [2], в отличие от синхротронного падающего (более красного) спектра джетов. Таким образом, сдвиги в этом направлении преимущественно связаны с доминированием аккреционного диска в оптическом излучении активной галактики и с непрозрачностью начала джета в радиодиапазоне. Полученное понимание природы сдвигов также важно для построения наиболее точных радио и оптических систем координат и для их совмещения.

Мы рассмотрели смещения между радио- и оптическими координатами отдельно для различных классов активных галактик: квазаров, лацер-

¹<http://astrogeo.org/rfc/>

²<https://ned.ipac.caltech.edu/>

тид, сейфертовских галактик. Измеренные сдвиги у квазаров присутствуют в обе стороны; вероятно, относительный вклад оптического джета и аккреционного диска сильно зависит от конкретного объекта. Лацертиды наблюдательно характеризуются доминированием излучения джета из-за доплеровского усиления. Большинство таких объектов, более 85%, показывают РСДБ-*Gaia* сдвиги по направлению джета, что дополнительно подтверждает объяснение таких сдвигов влиянием яркого джета. Сейфертовские галактики демонстрируют самую сильную связь между оптическим цветом и направлением сдвига: выраженная дихотомия между красными объектами с РСДБ-*Gaia* сдвигами вдоль джета, и синими со сдвигами в противоположную сторону. Это говорит о роли аккреционного диска: либо он полностью скрыт пылевым тором, либо открыт и определяет оптические координаты активной галактики. Полученные результаты хорошо согласуются с предсказаниями унифицированной схемы активных ядер [1].

Вторая глава посвящена исследованию видимого начала (ядра) радиоджета активных галактик, переменности частотного сдвига этого начала. При наблюдении квазаров в радиодиапазоне различия их видимых положений между частотами возникают преимущественно в силу так называемого эффекта сдвига ядра. А именно, из-за синхротронного излучения и самопоглощения прозрачность в области видимого начала релятивистских джетов (ядра) отличается при наблюдении на разных частотах [14]. Детальное понимание этого эффекта и его изменений со временем важно для оценки физических параметров в начальных областях джетов, для определения природы наблюдаемых вспышек радиоизлучения [18; 19].

Нами проведены самые массовые измерения эффекта сдвига ядра для 40 активных галактик, использовано 1691 РСДБ наблюдение из базы данных *Astrogeo*³ одновременно на 2 и 8 ГГц, с 1994 по 2016 годы. Именно большое количество измерений каждого отдельного объекта позволило исследовать переменность такого эффекта. Разработан новый автоматизированный метод измерения сдвига ядра, что и позволило провести массовые измерения. Для совмещения многочастотных изображений использован анализ карт спектрального индекса; положение ядра определялось путём изолирования центральной области и моделирования её гауссовой компонентой [44].

На основе проведённых измерений обнаружена значимая переменность сдвига ядра между 2 и 8 ГГц для большинства (33 из 40) источников. Величина переменности достигает 1 mas или 5 парсек в проекции на небо; это сопоставимо с величиной самого сдвигом между ядрами на 2 и 8 ГГц. Из величины переменности получена оценка размеров слустков плотной плазмы, вызывающих вспышки: в среднем, они не могут быть меньше 1-2 парсек. Оказалось, что видимое ядро отдалается от истинного начала джета одновременно со вспышками, т.е. с увеличением радиопотока ядра. В

³http://astrogeo.org/vlbi_images/

рамках модельных предположений [45; 46], форма этой зависимости указывает на увеличение плотности излучающих частиц в джете во время вспышки с одновременными ослаблением магнитного поля.

Показано, что перемещения видимого ядра тесно связаны со скоростью течения плазмы вдоль джета. Предложен независимый способ получить оценку скорости потока вещества в джете на основе проведённых измерений переменности сдвига ядра: плазма должна течь быстрее, чем происходит смещение видимого ядра. Результаты этого подхода согласуются с измерениями РСДБ кинематики в проекте MOJAVE [47] для объектов с достаточно большим количеством движущихся компонент. В некоторых случаях предложенный способ даёт более сильные нижние ограничения на скорость потока плазмы по сравнению с измерением кинематики.

Мы показали, что переменность сдвига ядра нарушает любую зависимость между частотой наблюдения и положением ядра вдоль джета. Таким образом, наиболее точные оценки физических свойств джетов активных галактик получаются при измерении сдвига ядра в спокойном состоянии, а не во время вспышек. Отсутствие постоянной зависимости положения ядра от частоты также может влиять на астрометрические измерения положений с помощью РСДБ, включая построение и сопоставление высокоточных систем координат.

Третья глава посвящена анализу возможной ассоциации космических нейтрино высоких энергий с радиояркими блазарами, и процессам рождения таких частиц. Наблюдательная информация о высокоэнергетических (ТэВ-ПэВ) астрофизических нейтрино непрерывно собирается обсерваториями, впервые они были протектированы на установке IceCube [48]. Источники таких нейтрино до недавнего времени оставались неизвестными, несмотря на сопоставление одной из обнаруженных частиц с блазаром TXS 0506+056 в 2017 году [26].

В данной главе используются данные РСДБ наблюдений и полная выборка из 3388 активных ядер галактик с РСДБ потоком на 8 ГГц выше 150 мЯн (Фундаментальный радиокаталог, Radio Fundamental Catalog⁴). Мы сопоставляем объекты из этой выборки с детектированиями нейтрино на IceCube: 57 событий с 2009 по 2019 годы на экстремально высоких энергиях частиц ≥ 200 ТэВ, и карта неба на основе 712830 событий за 2008-2015 годы во всём диапазоне энергий с доминированием частиц на десятках ТэВ.

Статистический анализ показал, что нейтрино значимо чаще приходят с направлений ярких в радиодиапазоне блазаров, чем могло получиться случайным образом: вероятность случайного совпадения составила $4 \cdot 10^{-5}$ (значимость 4.1σ). Сделан вывод, что нейтрино приходят к нам от блазаров, джеты которых направлены под небольшим углом к наблюдателю. На экстремально высоких энергиях ≥ 200 ТэВ за эту ассоциацию

⁴<http://astrogeo.org/rfc/>

ответственны 4 блазара, которые впервые выделены как вероятные источники нейтрино: 3C 279, PKS 2145+067, PKS 1741–038 и 1730–130. Проведённая ассоциация позволила также оценить величину систематической ошибки определения направления прихода частиц на IceCube. На энергиях ≥ 200 ТэВ она составила в среднем 0.5° , что согласуется с верхними пределами в [48]. Мы показали, что во всём диапазоне энергий IceCube блазаров-источников нейтрино более 70.

В дополнение к РСДБ наблюдениям, мы использовали долговременный мониторинг 1099 РСДБ-отобранных блазаров на телескопе РАТАН-600 на частотах 5, 8, 11 и 22 ГГц. Сравнив этот мониторинг с данными IceCube мы обнаружили, что радиопоток от блазаров на высоких частотах в среднем возрастает вблизи времени прихода нейтрино. Значит, нейтрино рождаются в центральных областях блазаров на масштабах парсек, преимущественно во время мощных радиовспышек. Наиболее сильная корреляция радиопотока с приходом нейтрино наблюдается для объекта 1502+106, отмечая его как вероятный источник нейтрино впервые среди рецензируемых публикаций.

Мы предлагаем возможный механизм, который качественно объясняет как рождение нейтрино, так и наблюдаемое электромагнитное излучение от блазаров. Нейтрино могут рождаться во взаимодействии релятивистских протонов с рентгеновскими фотонами джета. Образующиеся в том же процессе гамма-фотоны энергий порядка ТэВ теряют энергию на образование пар, и выходят из джета уже со значительно более низкими энергиями. Наши численные оценки говорят, что радиоярких блазаров может оказаться достаточно для объяснения всего наблюдаемого потока астрофизических нейтрино с энергиями выше десятков ТэВ.

В заключении сформулированы результаты диссертации, и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Список литературы

1. *Urry C. M., Padovani P.* Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // *PASP.* — 1995. — Сент. — Т. 107. — С. 803.
2. *Padovani P.* [и др.]. Active galactic nuclei: what's in a name? // *A&A Rev.* — 2017. — Авг. — Т. 25. — С. 2.
3. *Lister M. L.* [и др.]. MOJAVE. XVII. Jet Kinematics and Parent Population Properties of Relativistically Beamed Radio-loud Blazars // *ApJ.* — 2019. — Март. — Т. 874, № 1. — С. 43.
4. *Smith H. J., Hoeffleit D.* Light Variations in the Superluminous Radio Galaxy 3C273 // *Nature.* — 1963. — Май. — Т. 198, № 4881. — С. 650–651.

5. *Blandford R. D., Konigl A.* Relativistic Jets as Compact Radio Sources // Bulletin of the American Astronomical Society. Т. 10. — 09.1978. — С. 629.
6. *Lister M. L.* [и др.]. MOJAVE. X. Parsec-scale Jet Orientation Variations and Superluminal Motion in Active Galactic Nuclei // AJ. — 2013. — Ноябрь. — Т. 146. — С. 120.
7. *Falomo R., Pian E., Treves A.* An optical view of BL Lacertae objects // A&A Rev. — 2014. — Сент. — Т. 22. — С. 73.
8. *Fossati G., Maraschi L., Celotti A., Comastri A., Ghisellini G.* A unifying view of the spectral energy distributions of blazars // MNRAS. — 1998. — Сент. — Т. 299, № 2. — С. 433–448.
9. *Giommi P.* [и др.]. Simultaneous Planck, Swift, and Fermi observations of X-ray and γ -ray selected blazars // A&A. — 2012. — Май. — Т. 541. — A160.
10. *Abdollahi S.* [и др.]. Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog // ApJS. — 2020. — Март. — Т. 247, № 1. — С. 33.
11. *Bulgarelli A.* [и др.]. Second AGILE catalogue of gamma-ray sources // A&A. — 2019. — Июль. — Т. 627. — A13.
12. *Kraus J. D.* Radio astronomy. — Cygnus-Quasar Books, 1966.
13. Многоканальная астрономия / под ред. А. М. Черепашук. — Фрязино : Век 2, 2019. — С. 528.
14. *Blandford R. D., Königl A.* Relativistic jets as compact radio sources // ApJ. — 1979. — Авг. — Т. 232. — С. 34–48.
15. *Sokolovsky K. V., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., Lobanov A. P.* A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets. I. Evidence of dominating synchrotron opacity // A&A. — 2011. — Авг. — Т. 532. — A38.
16. *Pushkarev A. B.* [и др.]. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // A&A. — 2012. — Сент. — Т. 545. — A113.
17. *Hada K.* [и др.]. An origin of the radio jet in M87 at the location of the central black hole // Nature. — 2011. — Сент. — Т. 477. — С. 185–187.
18. *Lobanov A. P.* Ultracompact jets in active galactic nuclei // A&A. — 1998. — Февр. — Т. 330. — С. 79–89.
19. *Kovalev Y. Y., Lobanov A. P., Pushkarev A. B., Zensus J. A.* Opacity in compact extragalactic radio sources and its effect on astrophysical and astrometric studies // A&A. — 2008. — Июнь. — Т. 483. — С. 759–768.

20. *Biermann P. L., Strittmatter P. A.* Synchrotron Emission from Shock Waves in Active Galactic Nuclei // *ApJ*. — 1987. — Ноябрь. — Т. 322. — С. 643.
21. *Matthews J. H., Bell A. R., Blundell K. M., Araudo A. T.* Fornax A, Centaurus A, and other radio galaxies as sources of ultrahigh energy cosmic rays // *MNRAS*. — 2018. — Сентябрь. — Т. 479, № 1. — С. L76–L80.
22. *Berezinsky V.* // Proceedings of the Neutrino-77 Conference, Moscow. — 1977. — С. 177.
23. *Eichler D.* High-energy neutrino astronomy: a probe of galactic nuclei? // *ApJ*. — 1979. — Август. — Т. 232. — С. 106–112.
24. *Berezinskii V. S., Ginzburg V. L.* On high-energy neutrino radiation of quasars and active galactic nuclei // *MNRAS*. — 1981. — Январь. — Т. 194. — С. 3–14.
25. *Hillas A. M.* The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays // *ARA&A*. — 1984. — Январь. — Т. 22. — С. 425–444.
26. *IceCube Collaboration* [и др.]. Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A // *Science*. — 2018. — Июль. — Т. 361, № 6398.
27. *IceCube Collaboration* [и др.]. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert // *Science*. — 2018. — Июль. — Т. 361, № 6398. — С. 147–151.
28. *Huber M.* Searches for steady neutrino emission from 3FHL blazars using eight years of IceCube data from the Northern hemisphere // 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019). Т. 36. — 07.2019. — С. 916. — (International Cosmic Ray Conference).
29. *Albert A.* [и др.]. ANTARES and IceCube Combined Search for Neutrino Point-like and Extended Sources in the Southern Sky // *ApJ*. — 2020. — Апрель. — Т. 892, № 2. — С. 92.
30. *Arias E. F., Charlot P., Feissel M., Lestrade J. .-.F.* The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS. // *A&A*. — 1995. — Ноябрь. — Т. 303. — С. 604–608.
31. *Fey A. L.* [и др.]. The Second Extension of the International Celestial Reference Frame: ICRF-EXT.1 // *AJ*. — 2004. — Июнь. — Т. 127, № 6. — С. 3587–3608.
32. *Gaia Collaboration* [и др.]. Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2) // *A&A*. — 2018. — Август. — Т. 616. — A14.
33. *Xu M. H.* [и др.]. Evidence of the Gaia-VLBI position differences being related to radio source structure // *A&A*. — 2021. — Март. — Т. 647. — A189.

34. *Hovatta T.* [и др.]. Association of IceCube neutrinos with radio sources observed at Owens Valley and Metsähovi Radio Observatories // A&A. — 2021. — Июнь. — Т. 650. — A83.
35. *Illuminati G.* ANTARES search for neutrino flares from VLBI radio blazars // PoS. — — Т. ICRC2021. — С. 1137.
36. *Aublin J., Plavin A.* Search for an association between neutrinos and radio-selected blazars with ANTARES // PoS. — — Т. ICRC2021. — С. 1240.
37. *Allakhverdyan V.* [и др.]. The Baikal-GVD neutrino telescope: search for high-energy cascades // PoS. — — Т. ICRC2021. — С. 900.
38. *Fey A. L.* [и др.]. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // AJ. — 2015. — Авг. — Т. 150. — С. 58.
39. *Lindgren L.* [и др.]. Gaia Data Release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes // A&A. — 2016. — Ноябрь. — Т. 595. — A4.
40. *Gaia Collaboration* [и др.]. The Gaia mission // A&A. — 2016. — Ноябрь. — Т. 595. — A1.
41. *Petrov L., Kovalev Y. Y.* On significance of VLBI/Gaia position offsets // MNRAS. — 2017. — Май. — Т. 467. — С. L71–L75.
42. *Petrov L., Kovalev Y. Y., Plavin A. V.* A quantitative analysis of systematic differences in the positions and proper motions of Gaia DR2 with respect to VLBI // MNRAS. — 2019. — Янв. — Т. 482. — С. 3023–3031.
43. *Gaia Collaboration* [и др.]. Gaia Data Release 2 - Summary of the contents and survey properties // A&A. — 2018. — Т. 616. — A1. — URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051>.
44. *Homan D. C.* [и др.]. MOJAVE. XIX. Brightness Temperatures and Intrinsic Properties of Blazar Jets // ApJ. — 2021. — Дек. — Т. 923, № 1. — С. 67.
45. *Marscher A. P.* Synchro-Compton emission from superluminal sources // Superluminal Radio Sources / под ред. J. A. Zensus, T. J. Pearson. — 1987. — С. 280–300.
46. *Lobanov A. P., Zensus J. A.* Spectral Evolution of the Parsec-Scale Jet in the Quasar 3C 345 // ApJ. — 1999. — Авг. — Т. 521. — С. 509–525.
47. *Lister M. L.* [и др.]. MOJAVE: XIII. Parsec-scale AGN Jet Kinematics Analysis Based on 19 years of VLBA Observations at 15 GHz // AJ. — 2016. — Июль. — Т. 152. — С. 12.

48. *IceCube Collaboration*. Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector // *Science*. — 2013. — Ноябрь. — Т. 342, № 6161. — С. 1242856.

Плавин Александр Викторович

Изучение высокоэнергетических процессов в ядрах активных галактик по
данным радио, оптических и нейтринных наблюдений

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____