

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Сазонова С.Ю.
на диссертацию Корюковой Татьяны Андреевны «Влияние эффектов распространения радиоволн в межзвездной среде Галактики на наблюдаемые свойства струй активных ядер галактик», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия».

В диссертации изучается взаимодействие радиоизлучения квазаров с ионизированной компонентой межзвездной среды (МЗС) Галактики. Цель исследования двоякая: во-первых, изучить свойства рассеивающих плазменных экранов, а во-вторых, восстановить истинные размеры радиоизлучающих областей (внутренних областей джетов) активных ядер галактик (ЯАГ). Такие сверхкомпактные структуры, с характерным размером порядка миллисекунды дуги в картинной плоскости, можно изучать по изображениям, полученным с помощью РСДБ-наблюдений, либо более косвенным путем — по кривым блеска квазаров. И в том, и в другом методе требуется использовать несколько спектральных частот.

Высокая актуальность диссертационной работы обусловлена, во-первых, тем, что мы по-прежнему плохо понимаем внутреннее устройство АЯГ и в частности то, как струи релятивистской плазмы формируются в окрестности сверхмассивной черной дыры и затем распространяются за ее пределами. Для корректной интерпретации данных РСДБ-наблюдений квазаров требуется учесть влияние внешних факторов, к которым относится искажение сигнала квазара при прохождении через МЗС Галактики. Во-вторых, в научном сообществе есть большой интерес к тому, как устроена межзвездная плазма Галактики на мелких масштабах, и именно наблюдения компактных радиоисточников, таких как пульсары и квазары, позволяют получать уникальную информацию об этом. Наконец, у диссертационной работы есть и важный практический аспект — ее результаты и выводы в перспективе могут позволить построить более точную инерциальную систему отсчета для земной и космической навигации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и двух приложений. Объем диссертации составляет 161 страницу. Во **Введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, описаны новизна исследования и значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту научные положения.

В первой главе представлены результаты исследования рассеивающих свойств МЗС Галактики на основе огромного набора (около 60 тысяч наблюдений для примерно 9 тысяч квазаров) данных РСДБ-наблюдений в диапазоне частот от 1.4 до 86 ГГц. Получены подробные

карты распределения наблюдаемых угловых размеров квазаров по небу (за исключением области вокруг Южного полюса) на нескольких частотах. Выявлена явная тенденция увеличения размера при приближении к плоскости Галактики, в особенности в направлении областей звездообразования и крупных остатков сверхновых. Обнаружена сильная корреляция между размытием изображений квазаров и интенсивностью излучения МЗС в линии Н-альфа. Анализ статистики угловых размеров источников позволил надежно показать, что «крылья» изображений на низких галактических широтах характеризуются степенной частотной зависимостью с индексом k в районе двух, что в пределах погрешности согласуется как с моделью рассеяния на плоском экране, так с моделью колмогоровской турбулентности.

Вторая глава является логическим продолжением предыдущей. Среди всех квазаров с признаками сильного рассеяния ($k > 1.5$) были отобраны те, на изображениях которых имеются признаки рефракции, т. е. расщепления изображения на отдельные компоненты примерно вдоль галактической широтной линии. В литературе описано очень мало подобных случаев, причем о первом (насколько я понимаю) достоверном обнаружении такого явления для внегалактического объекта (квазара 2023+335) объявил в своей публикации 2013 года научный руководитель диссертанта. В настоящей же диссертационной работе описано открытие рефракционного расщепления изображения другого квазара — 2005+403. По данным антенной решетки VLBA удалось продемонстрировать, что изображение ядра источника на низких частотах существенно уширено вдоль плоскости Галактики (примерно перпендикулярно направлению джета, который виден на высоких частотах), что сложно объяснить иначе, как рефракционно-доминированным рассеянием на плазменных экранах в Галактике. Кроме того, на кривой блеска квазара, полученной на радиотелескопе обсерватории Оуэнс-Вэлли, выявлено вероятное событие экстремального рассеяния, причем примерно в то же время, когда было обнаружено расщепление РСДБ-изображения. Это подтверждает, что мы скорее всего имеем дело с прохождением рассеивающих плазменных экранов через луч зрения на квазар.

Эту тему продолжает **третья глава**, в которой представлены результаты многолетнего регулярного мониторинга квазара 2005+403 на российском радиотелескопе РАТАН-600, дополненного данными РСДБ-наблюдений в рамках программы MOJAVE. На кривой блеска квазара выявлено несколько кандидатов в события экстремального рассеяния. Детальное рассмотрение этих эпизодов в рамках модели рефракции на неоднородностях МЗС позволило оценить физические параметры рассеивающих экранов: ширина в картинной плоскости — около 1 а.е., поперечная скорость — около 70 км/с, плотность в предположении гауссовой линзы — порядка 1000 электронов на см в кубе. Важно отметить, что последнее значение указывает на экстремальное (по сравнению с обычной МЗС) давление в плазменном экране, но схожие результаты, для других объектов, уже обсуждались в литературе и ранее, и все эти, пока

редкие, факты могут указывать, во-первых, на то, что рассеивающая линза на самом деле является очень тонким экраном, ориентированным вдоль луча зрения, а во-вторых, проявляется сильный селекционный эффект.

В **Заключении** суммированы результаты диссертационной работы.

Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить тщательность проделанной работы по обработке и интерпретации наблюдательных данных. Все результаты получены с применением апробированных (в том числе в многочисленных работах научного руководителя) методов обработки данных РСДБ-наблюдений и измерений на одиночных антеннах и **хорошо обоснованы**. Результаты диссертационной работы опубликованы в трех статьях в ведущем астрофизическом журнале *Monthly Notices of the Royal Astrophysical Society* (квартиль Q1), индексируемом Белым списком Российского центра научной информации и входящим в *Web of Science* и другие международные базы цитирований. Соискатель внес **решающий личный вклад** во все публикации. Кроме того, результаты диссертации докладывались на восьми научных конференциях. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Все результаты диссертационной работы характеризуются **существенной новизной**. Впервые получена подробная карта распределения мощности рассеяния радиоволн в Галактике и выявлена сильная корреляция областей сильного рассеяния с зонами высокой интенсивности излучения МЗС в линии Н-альфа. Впервые обнаружены рефракционное расщепление изображения и ряд событий экстремального рассеяния у квазара 2005+403.

Результаты диссертационной работы имеют **высокую научную значимость и практическую ценность**. Они существенно расширяют представления о мелкомасштабной структуре межзвездной среды Галактики; создают основу для будущих высокоточных наблюдений АЯГ на радиотелескопах нового поколения, таких как LOFAR и SKA; могут использоваться при создании высокоточной инерциальной системы нового поколения для решения задач навигации, в частности в рамках российских проектов ГЛОНАСС и Сфера.

Диссертация хорошо структурирована и написана ясным языком. Введение в нее дополнительного к публикациям иллюстративного материала полностью оправдано, так как позволило улучшить презентацию полученных результатов. В ходе чтения текста у меня не возникло **никаких замечаний** кроме следующего: при обсуждении результатов третьей главы (отчасти это относится и ко второй), касающихся свойств рассеивающих плазменных экранов, как мне кажется, можно было бы более подробно остановиться на физической интерпретации обнаруженных явлений и их статистических свойствах. А именно на обсуждении того факта, что для объяснения событий экстремального рассеяния, по всей видимости, требуется

расположить очень тонкий и практически плоский (с огромным отношением длины и толщины) плазменный экран перпендикулярно картинной плоскости — гипотеза, которая кажется фантастической, но вроде бы не имеет альтернативы. Это кратко отмечено в тексте, со ссылками на предыдущие работы по теме, но так как в данном исследовании получен большой объем новой информации о событиях экстремального рассеяния, то, наверное, можно попробовать использовать всю накопленную к настоящему моменту статистику для получения более сильных ограничений на эту или другие гипотезы о структуре межзвездной плазмы. Это соображение носит исключительно рекомендательный характер и скорее относится к продолжению данного исследования в будущем. Скорее всего, соискатель со своим научным руководителем и сами планируют двигаться в этом направлении.

Считаю, что рассматриваемая диссертация удовлетворяет всем критериям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Корюкова Татьяна Андреевна, заслуживает присуждения ей искомой ученой степени.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией экспериментальной астрофизики,

ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий

ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН),

доктор физико-математических наук,

профессор РАН

С.Ю. Сазонов

Контактные данные:

тел.: +7 495 3335357, эл. почта: sazonov@cosmos.ru

Адрес места работы: 117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32,

ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук

Подпись С.Ю. Сазонова заверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН,

кандидат физико-математических наук

А.М. Садовский

27 марта 2026 г.