

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЛУННОЙ МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

© 2024 г. С. Ф. Лихачев¹, Т. И. Ларченкова^{1*}, А. С. Андрианов¹, Е. О. Васильев¹, Д. А. Литвинов¹,
С. В. Пилипенко¹, А. Г. Рудницкий¹, М. А. Щуров¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 05.08.2024 г.

После доработки 21.12.2024 г.; принята к публикации 21.12.2024 г.

Рассматриваются научные задачи Лунной миллиметровой и субмиллиметровой обсерватории, планируемой в рамках создания Международной научной лунной станции. С учетом этапности создания обсерватории – от одиночного телескопа малого диаметра как первого элемента Лунной интерферометрической сети до создания массива антенн (антенной решетки) – отдельно обсуждаются задачи для одиночного телескопа и антенной решетки, в том числе, в составе интерферометра Луна–Земля, Луна – Земля – космическая обсерватория.

Ключевые слова: Международная научная лунная станция, миллиметровый и субмиллиметровый телескоп, интерферометрическая сеть телескопов, антenna решетка, космология, реликтовое излучение, межзвездная среда, межзвездная пыль, активные ядра галактик, черные дыры, кротовые норы, галактики, общая теория относительности, темная материя.

DOI: 10.31857/S0320010824120097, EDN: LFCAQK

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы космические лунные программы переживают эпоху Ренессанса. Такого огромного интереса к естественному спутнику Земли не было с шестидесятых годов прошлого столетия, когда шла подготовка к первым лунным экспедициям.

В настоящее время международное научное сообщество активно интересуется Луной, как базой для исследования космоса (см., например, Силк и др., 2021, 2024). Причиной такого интереса является целый ряд преимуществ, которые дает размещение телескопов на ее поверхности по сравнению с расположением их на Земле или в космосе. Отсутствие атмосферы позволяет достичь значительно большей чувствительности как для интерферометрических исследований, так и для наблюдений в режиме одиночной антенны. В частности, отсутствие ионосферы позволяет проводить наблюдения излучения с длиной волн более 20 м, которое недоступно для земных экспериментов. Земная атмосфера также частично или полностью непрозрачна для субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов. Малая лунная гравитация облегчает монтаж массивных конструкций. Устойчивость лунной поверхности устраняет многие сложности в ориентации телескопов. Практически полное отсутствие сейсмической активности открывает перспективы эффективной регистрации гравитационных волн от слияния черных дыр. За счет приливного взаимодействия системы Земля–Луна обратная, скрытая

от нас, сторона Луны надежно экранирована от постоянных интенсивных радиосигналов с нашей планеты, которые являются серьезным препятствием для наблюдений на длинных радиоволнах. В то же время ближняя к нам сторона Луны может стать площадкой для наблюдений атмосферы самой Земли. Наличие лунных кратеров дает возможность использования их естественной формы для строительства больших зеркал телескопов. Кратеры, расположенные в приполярных областях, обеспечивают постоянную тень и защищают от солнечной радиации. Дно такого кратера – удобная площадка для установки телескопа и обеспечения эффективного пассивного охлаждения зеркала и приборов. Кроме того, сама по себе древняя поверхность Луны представляет интерес для изучения истории Солнечной системы.

Помимо решения научных задач освоение Луны бесспорно придаст ускорение развитию технологий будущего, совершенствованию и удешевлению средств доставки полезной нагрузки на другие планеты, как это уже случалось в 1960-е и 1970-е годы.

Научным сообществом на протяжении долгого времени рассматривается использование обратной стороны Луны для длинноволновых радионаблюдений. Размещение на Луне низкочастотной радиоинтерферометрической решетки, по-видимому, было впервые предложено в работе Горголовский (1965) и позднее рассматривалось во многих работах (см., например, Бернс, 1988; Такахаши, 2003; Джестер и Фальк, 2009; Мимун и др., 2012; Бентум и др., 2020; Полидан и др., 2024; Чен и др., 2024). Однако для постановки

*Электронный адрес: ltanya@asc.rssi.ru

такого эксперимента в первую очередь необходимо понимать влияние свойств плазмы и пыли вблизи поверхности Луны на измерения радиоволн (Хорани и др., 2024), и для этого в 2024 г. американским национальным управлением по аeronавтике и исследованию космического пространства (NASA) планируется запуск программы Radio wave Observations at the Lunar Surface of the photoElectron Sheath (ROLSES).

Успешная реализация и использование низкочастотной антенной решетки LOFAR позволяет европейскому научному сообществу применить накопленный опыт при создании подобной решетки на обратной стороне Луны (Джестер и Фальк, 2009; Кляйн-Вольт и др., 2012). Так, в планах Европейского космического агентства (ESA) развертывание массива из 4×4 антенн и дальнейшее расширение до 32×32 (Купманс и др., 2021).

Похожий проект разрабатывает и Национальное агентство США. На первом этапе в 2026 г. планируется установка одиночной дипольной антенны на обратной стороне Луны и в перспективе расширение и создание интерферометра из 128 антенн (Бернс и др., 2021). При этом предполагается ежегодно доставлять научные грузы на поверхность Луны с помощью коммерческих запусков. Отдельно Лаборатория реактивного движения (NASA JPL) рассматривает создание громадного телескопа, подобного Arecibo или FAST диаметром до 1 км в кратере размером около 3 км на обратной стороне Луны. Высокое пространственное разрешение такого инструмента позволит исключить сигналы фоновых радиоисточников.

Размещение интерферометра из мембранных антенн на обратной стороне Луны разрабатывается китайским научным сообществом. В рамках проекта Large-scale Array for Radio Astronomy on the Farside (LARAF) предполагается создание к середине 2030 гг. до 20 станций, каждая из которых включает 12 антенн с максимальной базой до 10 км (Чен и др., 2024).

Отдельно стоит упомянуть беспосадочный проект, инициированный в 2019 г. Китайской национальной космической администрацией, в рамках которого готовится запуск девяти спутников с дипольными антеннами для работы в режиме интерферометра и спутника для передачи данных. Предполагается, что спутники будут находиться на луноцентрической орбите. Запуск проекта запланирован на 2026 г.

В 2021 г. на совместной сессии российской Госкорпорации “Роскосмос” и Китайской национальной космической администрации была представлена Дорожная карта по созданию Международной научной лунной станции (МНЛС), в рамках которой предполагается создание инструментов для астрономических наблюдений с поверхности Луны. Создание миллиметровой и субмиллиметровой обсерватории для МНЛС начнется с размещения одиночного телескопа диаметром не более 3 м, и далее будет наращивать-

ся до интерферометрической сети роботизированных телескопов.

Среди научных задач, которые могут быть решены будущими лунными проектами, следует отметить исследование линий 21 см (радиолиний нейтрального водорода), сильно смещенных в длинноволновую область с красных смещений $\sim 100\text{--}300$. Это сигнал из “темной” эпохи начала формирования структуры Вселенной, родившийся после рекомбинации, но до начала реионизации (рис. 1, левая панель) (Меербург и др., 2019), который позволит исследовать негауссовость начальных возмущений плотности на малых масштабах (Морабито и Силк, 2021). Такая информация послужит достоверным индикатором инфляционной модели.

В инфракрасном диапазоне предполагается исследование первых звезд во Вселенной с помощью больших телескопов с беспрецедентным угловым разрешением (Шнайдер и др., 2019), а также экзопланет и биологических индикаторов в пригодных для жизни зонах таких планет (Сандора и Силк, 2020).

Также следует упомянуть задачи, связанные с исследованием гравитационных волн с помощью гравитационно-волновых антенн на Луне, которые рассматриваются, например, в работах Хармс и др. (2021), Стеббинс и Бендер (1990).

В работе Лихачев и др. (2024) была предложена концепция универсальной компактной роботизированной антенной решетки миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, которая может быть реализована на Луне. В настоящей работе рассматриваются наиболее перспективные научные задачи для этого инструмента с учетом его поэтапного создания — от установки одиночного телескопа малого диаметра к созданию роботизированной антенной решетки, т.е. задачи для одиночного телескопа и для решетки в целом. При этом антенная решетка при возможности может быть расширена с трех (четырех) антенн до большего числа.

Наблюдения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах электромагнитного спектра (0.1–6 ТГц) позволяют изучать фундаментальные физические процессы в ранней Вселенной, получать уникальную спектральную информацию о свойствах межзвездной среды и межзвездной пыли, исследовать свойства широкого круга космических объектов от протопланетных дисков и комет до далеких ультраярких галактик, а также в режиме интерферометра Луна–Земля получать изображения непосредственно центральных машин активных галактических ядер и исследовать ближайшие окрестности сверхмассивных черных дыр (СМЧД) или кротовых нор (КН). Особый интерес представляют спектрометрические исследования в этом диапазоне длин волн (Майярд, 2024). Они позволяют изучать особенности спектра реликтового излучения (РИ) с целью обнаружения его искажений (Хлуба и др., 2019; Майярд и др., 2024),

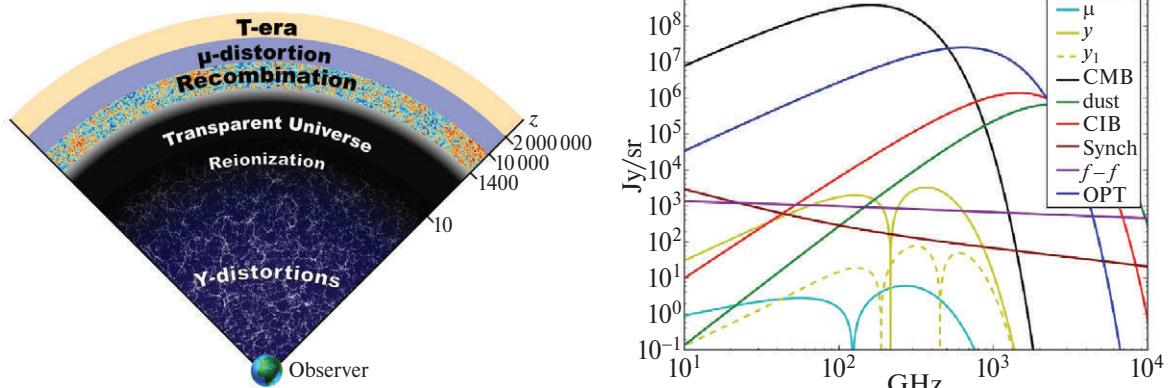


Рис. 1. Левая панель: схематическое изображение этапов эволюции Вселенной и рождения характерных сигналов в наблюдаемом спектре. Т-эра представляет собой эпоху термализации, когда любое нарушение термодинамического равновесия быстро восстанавливается и не приводит к изменению равновесной формы спектра реликтового излучения. В течение μ -эпохи рождаются μ -воздушения за счет выброса энергии в плазму и неизменности числа фотонов. На стадии рекомбинации формируется тепловая анизотропия реликта и его линейная поляризация. В “темную эпоху” прозрачной Вселенной после рекомбинации и до реионизации образуются линии 21 см, сильно смещенные для наблюдателя за счет большого красного смещения. После реионизации наступает эпоха Y -воздушений и формирования крупномасштабной структуры. Правая панель: Ожидаемые полезные сигналы: μ -искажения (Хлуба и др., 2012, 2016), Y -искажения (эффект Сюняева–Зельдовича и первая релятивистская поправка к нему y_1 (Хилл и др., 2015; Чаллинор и др., 2000)). Фоновые сигналы: космическая пыль (Коллаборация Планк, 2013), инфракрасный фон (Коллаборация Планк, 2013), синхротронное излучение (Коллаборация Планк, 2013), реликтовый фон, свободно-свободные переходы (Коллаборация Планк, 2013), излучение оптики телескопа. Для μ - и Y -искажений показаны модули их отклонений от планковского спектра в логарифмическом масштабе.

которые возникают как до рекомбинации водорода вследствие выброса энергии в космическую плазму, так и в результате возникающего много позже эффекта Сюняева–Зельдовича (Сюняев и Зельдович, 1972).

Для работы Лунной обсерватории в режиме РСДБ необходимо размещение на ней высокостабильных атомных часов. Помимо основной задачи – обеспечения временной привязки записываемых сигналов астрофизической природы для их последующей корреляции – такие часы открывают возможность для проведения ряда высокоточных экспериментов по поиску отклонений от общей теории относительности (Альтшулер и др., 2024; Дельва и др., 2018; Херрманн и др., 2018; Литвинов и Пилипенко, 2021) и детектированию темной материи, состоящей из сверхлегких скалярных частиц (Хис и др., 2018; Деревянко, 2018; Пилипенко и др., 2024).

Следуя логике создания Лунной миллиметровой и субмиллиметровой обсерватории, в настоящей работе будут рассмотрены научные задачи отдельно для одиночной антенны (раздел 1) и антенной решетки (раздел 2). В заключительном разделе 3 будут сделаны краткие выводы о перспективности создания Лунной миллиметровой и субмиллиметровой обсерватории и актуальности планируемых исследований, а также отмечены неизбежные сложности, связанные с осуществлением этого проекта.

1. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЛУННОЙ МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ДЛЯ ОДИНОЧНОЙ АНТЕННЫ МАЛОГО ДИАМЕТРА

С момента запуска первого космического эксперимента по изучению реликтового излучения – советского проекта “Реликт-1”, прошло 40 лет. За это время получены впечатляющие результаты в области изучения реликтового излучения Вселенной. Инструмент COBE/FIRAS с хорошей точностью измерил частотный спектр микроволнового космического фона, соответствующий планковскому распределению с температурой $T = 2.72548$ К (Мазер и др., 1990). Результаты экспериментов WMAP и Planck расширили наши знания о свойствах анизотропии и поляризации РИ. На масштабах вплоть до угловых минут был измерен спектр мощности C_ℓ анизотропии РИ и обнаружен крайне близкий к гауссовому характер распределения флуктуаций температуры и особенностей линейной поляризации реликтового излучения. Наземными телескопами ACT (Atacama Cosmology Telescope) и SPT (South Pole Telescope) были получены каталоги из более 4000 скоплений галактик и проведены измерения анизотропии РИ на малых угловых масштабах (Айола и др., 2020; Хилтон и др., 2021; Блим и др., 2024). Это позволило уточнить основные параметры современной космологической модели и приблизило к пониманию эволюции Вселенной.

Тем не менее, в изучении РИ и крупномасштабной структуры остается нерешенным ряд фундаментальных проблем. Из-за недостатка чувствительности экспериментов Planck и BICEP (Аде и др., 2021), наличия систематики в наблюдательных данных, а также поляризованной эмиссии пыли в нашей Галактике не удалось обнаружить космологическую составляющую В-моды поляризации реликтового излучения. По существу до сих пор нет непосредственного наблюдательного подтверждения инфляционной теории. Кроме того, чувствительность эксперимента COBE, проведенного более 30 лет назад, оказалась недостаточной для обнаружения малых искажений частотного спектра. С тех пор не было предпринято попыток уточнения этого спектра. Не существует наблюдательной оценки амплитуды наиболее интересных с точки зрения эволюции ранней Вселенной μ -искажений спектра РИ. В настоящий момент отсутствуют наблюдательные данные по измерению Y -искажений спектра РИ, покрывающие сколь-нибудь значительную часть небесной сферы с чувствительностью, достаточной для исследования релятивистских поправок к эффекту Суняева–Зельдовича и для получения карт крупномасштабной структуры Вселенной. Также отсутствует информация о спектре мощности начальных возмущений на малых масштабах.

Кроме того, на очень больших угловых масштабах на картах анизотропии реликтового излучения имеются аномалии, такие как слишком низкая величина квадрупольной гармоники, близкие ориентации квадруполя и октуполя, что крайне сложно объяснить с точки зрения современной инфляционной модели и гауссовой статистики. Что же касается космологического диполя, то информация о нем вообще отсутствует из-за движения наблюдателя относительно РИ.

Таким образом, обнаружение В-моды поляризации реликтового излучения и исследование искажений его частотного спектра являются на сегодняшний день важнейшими задачами наблюдательной космологии (Когут и др., 2023; Аде и др., 2019; Абитболь и др., 2017). Надежное установление наличия космологической В-составляющей поляризации станет доказательством присутствия тензорной моды начальных возмущений и, как следствие, прямым наблюдательным проявлением инфляционной модели эволюции Вселенной и квантовой гравитации. В то же время исследование искажений частотного спектра РИ, т.е. отклонений этого спектра от чернотельного, открывает огромный пласт информации о физических процессах в ранней Вселенной.

Наиболее многообещающим представляется обнаружение так называемых μ -искажений частотного спектра РИ. Эти искажения означают возникновение спектра Бозе–Эйнштейна с ненулевым химическим потенциалом $\mu \sim 10^{-8}$ вместо планковского распределения (Хлуба и др., 2012, 2016). В силу однород-

ности и изотропности Вселенной на больших масштабах можно ожидать появления монопольной части μ -искажений. Такое искажение будет одинаковым во всех направлениях, как и само реликтовое излучение; μ -искажения содержат информацию о нарушениях термодинамического равновесия в дорекомбинационную эпоху (рис. 1) за счет возможного выброса энергии в плазму. Подобные нарушения равновесия могут быть обусловлены распадом частиц с ограниченным временем жизни, испарением первичных черных дыр, диссипацией акустических колебаний за счет силковского затухания в барионной составляющей материи.

Надо отметить, что особенности начального спектра мощности возмущений на малых масштабах недоступны ни для каких иных наблюдений, кроме исследований частотного спектра РИ и линий 21 см из “темной эпохи”. Мелкомасштабные особенности стерты из анизотропии реликтового фона за счет силковской диссипации и не могут наблюдаться в крупномасштабной структуре ввиду большой нелинейности процессов гравитационного взаимодействия на малых масштабах.

Таким образом, спектр РИ определяется не одной константой, а именно, температурой $T = 2.72548$ К реликтового излучения (что и есть температура нашей Вселенной), а двумя константами T и μ , т.е. температурой и химическим потенциалом. Нахождение второй константы μ является крайне важной задачей для современной физики, так как она представляет собой ни что иное, как химический потенциал Вселенной.

Спектральные возмущения другого рода, так называемые Y -возмущения, также представляют большой интерес. Это тепловой эффект Суняева–Зельдовича и релятивистские поправки к этому эффекту. Y -искажения рождаются в значительно более позднюю эпоху эволюции на красных смещениях $z < 10$ (рис. 1) за счет комптоновского рассеяния фотонов на горячей плазме скоплений галактик и содержат информацию об их строении, температуре, плотности межгалактической среды, а также о крупномасштабной структуре Вселенной, которая проявляется в неоднородности распределения вещества на масштабах, превышающих 1 Мпк. На рис. 1 (правая панель) изображены спектры μ - и Y -искажений вместе с ожидаемыми спектрами фонового излучения пыли, инфракрасного фона, свободно–свободных переходов, реликтового фона, синхротронного излучения и излучения, создаваемого оптикой телескопа.

Неоднородности возникли в самые ранние моменты существования Вселенной (на стадии инфляции) из квантовых флуктуаций, а затем они эволюционировали под действием расширения Вселенной и изменений в ее составе. Поэтому неоднородности несут в себе информацию как о модели инфляции, так и о свойствах материи и энергии во Вселенной, таких

как соотношение между числом фотонов и барионов, эффективное число сортов нейтрино, масса частиц темной материи, уравнение состояния темной энергии и т.д. Исследование крупномасштабной структуры позволяет получать новые данные, необходимые для развития космологии, астрофизики и физики элементарных частиц. В отличие от наблюдений светящейся материи в оптическом и других диапазонах, исследование крупномасштабной структуры с помощью Y -искажений позволяет изучать распределение полной массы.

Важным источником информации о спектре мощности начальных возмущений и, главным образом, о его амплитуде σ_8 , является измерение масс скоплений галактик. Скопления представляют собой наиболее массивные гравитационно связанные образования во Вселенной, их массы начинаются от 10^{14} масс Солнца, и могут превышать 10^{15} масс Солнца. Количество скоплений определенной массы в единице объема очень чувствительно к величине σ_8 , поэтому позволяет ее измерять. Благодаря большой массе скопления являются хорошо заметными объектами во многих диапазонах, и их трудно пропустить в наблюдениях. Для измерения масс скоплений используются наблюдения в рентгеновском диапазоне и эффект Сюняева–Зельдовича (Коллаборация Планк, 2013).

Этот эффект, хорошо известный для скоплений, должен работать не только на них, но и на менее массивных группах галактик, а также на филаментах и стенах крупномасштабной структуры и сконцентрированных в них галактиках. Так, по оценкам Долаг и др. (2016), около половины среднего по небу сигнала Y -искажения (составляющего $\bar{Y} \approx 10^{-6}$) приходится на объекты с вириальной массой менее $10^{13} M_\odot$. Отдельные филаменты имеют величину комптон-параметра Y на уровне 0.6×10^{-8} (де Граафф и др., 2019), что соответствует вариациям плотности потока около 10 Ян/стер . Это слишком мало для детектирования отдельных филаментов за разумное время наблюдений, но применение метода томографии, тем не менее, должно помочь в получении важных ответов для космологии (см., например, Сэм и др., 2021).

Поскольку численные модели показывают хорошую корреляцию между величиной эффекта, так называемым Y -параметром, и плотностью материи, наблюдения данного эффекта от всей крупномасштабной структуры позволяют построить карту возмущений плотности материи в широком диапазоне красных смещений. Это, в свою очередь, ограничит эволюцию темной энергии (Комацу и Сельяк, 2002), но пока из-за недостаточной чувствительности проведенных наблюдений эта задача не решена. Эволюция темной энергии характеризуется двумя параметрами, w_0 и w_a . На сегодняшний день они известны с точностью $\sigma_{w_0} \approx 0.1$, $\sigma_{w_a} \approx 0.2$, в ближайшее десятилетие благодаря накоплению данных по слабому гравитационному линзированию и по сверхновым ожидается

достижение точности $\sigma_{w_0} \approx 0.06$, $\sigma_{w_a} \approx 0.15$. Добавление данных по Y -параметру позволит еще в 1.5 раза уменьшить эти ошибки.

В дополнение к вышесказанному с помощью исследований анизотропного эффекта Сюняева–Зельдовича от близких и далеких скоплений появляется возможность независимого измерения дипольной, квадрупольной и октупольной составляющих анизотропии и разделение обычного и интегрального эффектов Сакса–Вольфа (Едигарев и др., 2018; Новиков и др., 2020).

Важно отметить, что вышеперечисленные задачи могут быть решены только при условии успешного извлечения реликтового сигнала из фонов (рис. 1) (Майярд и др., 2024). Одним из наиболее сильных фоновых источников является тепловое излучение пылевой компоненты межзвездной среды нашей Галактики. Оно доминирует в спектральном диапазоне 3–3000 мкм. Тем не менее, этот фон оказывается не только помехой в изучении анизотропии и поляризации реликтового излучения на малых угловых масштабах, но и важнейшим источником информации о звездообразовании в галактиках, процессах ионизации и нагрева в межзвездной среде. Исследование теплового излучения пыли позволит получить сведения о мелкомасштабной волокнистой структуре среды, свойствах пыли и магнитных полях.

Зодиакальный свет доминирует в яркости неба в среднем ИК-диапазоне и оказывается менее существенным для дальнего и субмиллиметрового интервала длин волн. Более того, пространственный спектр этого излучения достаточно гладкий без значимых флуктуаций на масштабе угловых минут. Эмиссия отдельных астероидов оказывается ниже уровня детектирования.

Наиболее подробное исследование пылевой эмиссии в Галактике проводилось в рамках изучения анизотропии и поляризации реликтового излучения космической миссии Planck (Коллаборация Планк, 2011). В результате были получены карты распределения температуры пыли и оптической толщины в молекулярных облаках галактики, ограничения на содержание “темного” газа в облаках. В экспериментах по исследованию анизотропии реликтового фона на малых масштабах найдена значительная часть известных запыленных галактик на больших красных смещениях (Кейси и др., 2014; Рейтер и др., 2014). С помощью космического телескопа Herschel (Гордон и др., 2014) по тепловому излучению пыли была впервые обнаружена волокнистая структура межзвездной среды на субпарсековых масштабах. Предполагается, что для поддержания таких структур необходимы магнитные поля, в результате действия которых излучение пыли поляризуется. Наблюдения вблизи плоскости Галактики позволят изучить процессы звездообразования в центральной молекулярной зоне. Вдали от плоскости Галактики станут

заметными внегалактические источники излучения, связанные с находящимися на больших красных смещениях запыленными галактиками с активным звездообразованием. При достаточной чувствительности приемной аппаратуры станет возможно понижение порога наблюдаемого потока излучения и увеличение выборки таких источников.

Основные требования к инструменту

Для решения отмеченных выше задач, связанных с физикой реликтового излучения, крупномасштабной структурой и свойствами космической пыли, требуется получение многочастотных карт неба в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, покрывающих $\sim 30\%$ небесной сферы с высокой чувствительностью, пространственным и спектральным разрешением. Это позволит построить карты параметров Стокса для поляризации, оценить амплитуду μ -искажений, распределение Y -параметра и первых двух релятивистских поправок к нему, а также получить карты анизотропии РИ с хорошей чувствительностью, из которой можно извлечь информацию о гравитационном линзировании.

Характерные угловые размеры скоплений галактик составляют более 3 мин. дуги. Одна минута дуги на красных смещениях $z \sim 1$ в рамках стандартной космологической модели соответствует линейному размеру ~ 0.5 Мпк. Телескоп с апертурой 3 м на частоте 100 ГГц обеспечивает разрешение в 4 угл. мин, что позволяет построить карту Y -параметра с пространственным разрешением, достаточным для решения задач по исследованию крупномасштабной структуры Вселенной. Как было показано в работе де Бернардис и др. (2012), для точного определения величины теплового эффекта Сюняева—Зельдовича чрезвычайно важно обеспечить широкое спектральное покрытие с большим числом спектральных каналов, что позволяет использовать эффективные методы фильтрации (Новиков и Михальченко, 2023; Майярд и др., 2024) для извлечения полезного сигнала из фона.

Для решения поставленных выше задач предполагается использование телескопа с охлаждаемым 3-метровым зеркалом, установленным на дне лунного кратера, что обеспечит его постоянное пребывание в тени от солнечного излучения и облегчит его активное охлаждение. Оптимальная температура конструкции телескопа, при которой его фоновое излучение, с одной стороны, легко отделимо от спектров полезных сигналов, а с другой стороны, дает малый вклад в общий фон неба, составляет около 10 К (Майярд и др., 2024). На сегодняшний день рассматриваются различные места для установки телескопа, кратер — одно из возможных решений. Для надежного разделения компонент сигнала разной физической природы необходимо обеспечить покрытие широкого частотного диапазона от 100 ГГц до 4 ТГц с разрешением 15 ГГц, что достигается использованием Фурье спектрополя-

риметра с шириной частотных каналов 15 ГГц. Требуемая для обнаружения μ -искажения с амплитудой 10^{-8} чувствительность каждого канала не превышает 1 Ян/ср интегрально за все время работы прибора (Майярд и др., 2024).

Отметим, что чувствительность определяется суммой шумов детектора и фотонного шума — флуктуациями числа фотонов фона, приходящих в детектор во всем частотном диапазоне прибора. При этом технологии создания детекторов достаточно давно достигли такого уровня, что шумом детектора в этой сумме можно пренебречь, в частности, подобные детекторы были установлены на обсерватории Планк (Холмс и др., 2008; де Бернардис и др., 2012). Поэтому чувствительность Фурье-спектрометра определяется фотонным шумом. Для повышения чувствительности желательно сузить спектральное покрытие, что может быть достигнуто разделением всего диапазона на два поддиапазона, каждый со своим набором детекторов. Для наблюдения параметров Стокса необходимо обеспечить возможность измерения поляризации в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Отметим, что идеология предлагаемых исследований во многом схожа с проектом PIXIE (Когут и др., 2011, 2024).

Основным преимуществом предлагаемого телескопа на поверхности Луны для решения перечисленных задач, по сравнению с наземными телескопами (ACT, SPT, ALMA, CCAT и т.д.), являются непрерывное покрытие широкого спектрального диапазона при умеренном спектральном разрешении (более 100 спектральных каналов) и высокая чувствительность, которая достигается не только за счет охлаждения конструкции телескопа, но и за счет возможности длительного интегрирования потока от наблюдаемых источников в условиях отсутствия атмосферы. По сравнению с автоматическими орбитальными телескопами помимо отсутствия атмосферы неоспоримым преимуществом является стационарное и стабильное положение конструкции телескопа на Лунной поверхности. Важность спектрального разрешения и ширины диапазона обсуждалась в де Бернардис и др. (2012), где было показано преимущество Фурье-спектрометра по сравнению с массивами болометров в точном определении параметров скоплений по SZ-эффекту. Также большое количество спектральных каналов при широком диапазоне необходимо для успешного разделения слабых сигналов и фонов (Майярд и др., 2024), поэтому Фурье-спектрометр также выбран в качестве инструмента в миссии PIXIE и др. (Когут и др., 2011, 2024).

С целью измерения монопольной части μ -искажений необходима калибровка каналов на излучение черного тела аналогично тому, как это было сделано для прибора FIRAS. Согласно полученным оценкам (Майярд и др., 2024), оптимальная температура зеркала для измерения μ -искажений

составляет порядка 9 К. Это связано с тем, что температура зеркала должна быть отделена от температуры реликтового фона для избежания наложения искажений, создаваемых зеркалом, на аналогичные искажения спектра РИ с одной стороны, а с другой стороны, зеркало должно быть достаточно холодным для уменьшения фотонного шума.

2. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ЛУННОЙ МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Прежде, чем перейти к обсуждению научных задач Лунной миллиметровой и субмиллиметровой антенной решетки, остановимся на области применения метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). В первую очередь, РСДБ позволяет исследовать астрофизические объекты с высоким угловым разрешением, недостижимым другими средствами. Такое преимущество в угловом разрешении представляет интерес для исследования компактных релятивистских объектов. В частности, использование РСДБ – это уникальная возможность для наблюдения и исследования близких окрестностей СМЧД с целью точного определения физических параметров этих объектов, а также для проверки постулатов общей теории относительности.

Успешные наземные РСДБ наблюдения в миллиметровом диапазоне длин волн на частоте 230 ГГц с помощью Телескопа Горизонта Событий (Event Horizon Telescope – ЕНТ) позволили получить первые в истории астрономии изображения близких окрестностей СМЧД в галактике M87 и в центре нашей Галактики Sgr A* (Коллаборация Телескопа Горизонта Событий, 2019, 2022). Благодаря полученным результатам, существенно возрос интерес к дальнейшему развитию РСДБ в миллиметровом диапазоне как на Земле (next-generation Event Horizon Telescope – ngЕНТ), так и за ее пределами (Рулофс и др., 2019; Фиш и др., 2020; Андрианов и др., 2021; Лихачев и др., 2022; Рудницкий и др., 2023).

Нельзя не отметить, что наземные РСДБ сети имеют целый ряд ограничений. Так максимально достижимое угловое разрешение ограничено физическими размерами Земли. Чувствительность в миллиметровом диапазоне длин волн ограничена длительностью когерентного накопления принимаемого сигнала, что обусловлено влиянием атмосферы Земли. Наличие атмосферы также существенно ограничивает возможности наблюдений на более высоких частотах, например, на 345 ГГц, 690 ГГц и выше. Для наблюдений на таких частотах требуется уникальный астроклимат, который присутствует на Земле лишь в нескольких местах, например, в пустыне Атакама в Чили, где расположена Atacama Large Millimeter Array (ALMA).

Очевидным становится использование систем, состоящих из телескопов миллиметрового диапазона космического базирования, таких, как, например, обсерватория “Миллиметрон” (Новиков и др., 2021; Лихачев и Ларченкова, 2024), оснащенная чувствительными РСДБ-приемниками (Худченко и др., 2024). Разрабатываются новые концепции для реализации РСДБ наблюдений за пределами Земли (см., например, Гурвиц и др., 2021), что позволит избежать ограничений, обусловленных нашей планетой, а именно, повысить угловое разрешение и длительность когерентного накопления сигнала.

В этом контексте Лунная миллиметровая и субмиллиметровая обсерватория может быть использована в качестве плеча РСДБ с телескопами космического базирования и с наземными телескопами ЕНТ, ngЕНТ (Блэкберн и др., 2019; Рэймонд и др., 2021).

2.1. Исследование тонкой структуры близких окрестностей СМЧД

Актуальной задачей для интерферометра Земля–Луна является определение параметров метрики пространства-времени в окрестности сверхмассивных черных дыр, таких как Sgr A* и M87*. После получения изображения теней черных дыр в обоих этих источниках на сети наземных телескопов ЕНТ основной интерес дальнейших исследований сместился на исследование тонких деталей тени. В частности, на исследование формы фотонных колец, для получения сигнатур которых необходимо повышение углового разрешения, снижение вклада от рассеяния (Джонсон и др., 2016, 2018) излучения на межзвездной среде. Как уже было отмечено, это реализуемо путем увеличения протяженности базы интерферометра и наблюдениями на более высоких частотах.

Фотонные кольца представляют собой линзированные изображения аккреционного диска, образованные фотонами, излученными в аккреционном диске и сделавшими несколько полуоборотов n вокруг центральной черной дыры перед тем, как достичь наблюдателя (рис. 2). Более подробно данные детали тени описаны в работе Гралла и Лупсаска (2020). Данные детали изображения тени интересны в первую очередь тем, что их форма слабо зависит от турбулентных свойств плазмы в аккреционном диске, и определяется только свойствами пространства-времени в окрестности центрального массивного объекта. А также тем, что они хорошо подходят для исследования с помощью РСДБ интерферометра с большой базой (необходимой для того, чтобы отфильтровать вклад от аккреционного диска), такого как интерферометр Земля–Луна.

При РСДБ наблюдениях аккреционного диска СМЧД вклад в измеряемую интерференционную функцию видности дает как сам аккреционный диск СМЧД, так и его линзированные изображения

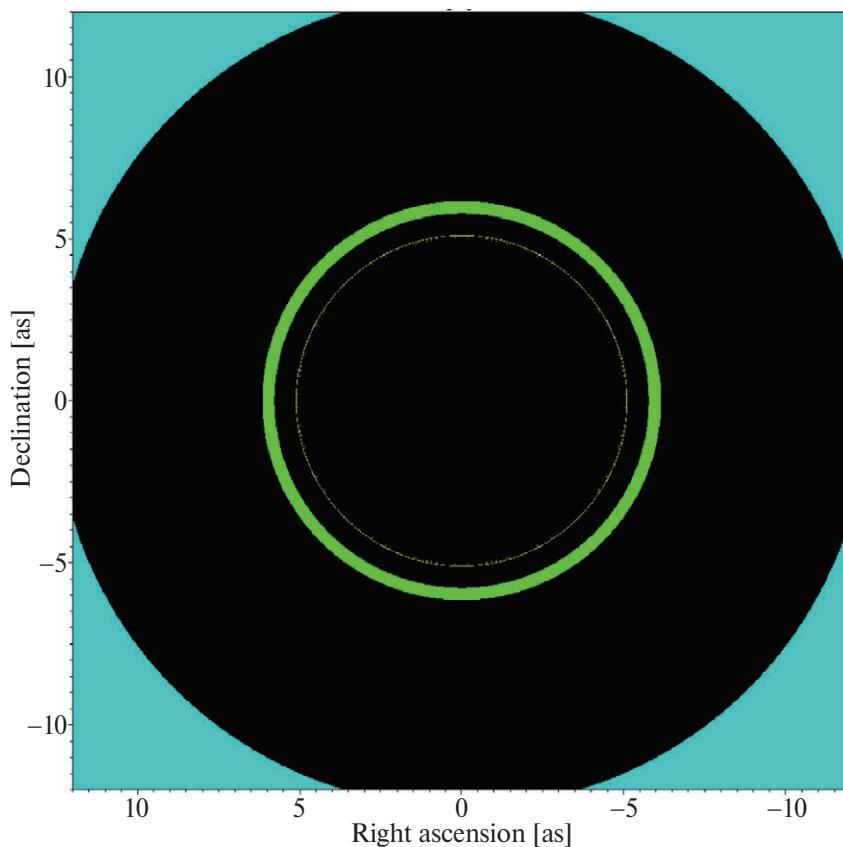


Рис. 2. Изображение тонкой структуры тени черной дыры. Разными цветами показаны аккреционный диск (синим) и его линзированные изображения (фотонные кольца), образованные фотонами, сделавшими n полуоборотов вокруг черной дыры, перед тем как достичь наблюдателя. Зеленым цветом показано фотонное кольцо, соответствующее $n = 1$, желтым — $n = 2$.

(фотонные кольца). По мере увеличения базы интерферометра вклад крупномасштабных структур в измеряемый отклик интерферометра уменьшается, а вклад мелкомасштабных структур остается постоянным. За счет этого при увеличении РСДБ базы в измеряемом отклике интерферометра постепенно исчезает влияние турбулентного аккреционного диска и начинает доминировать вклад от фотонных колец, которые в силу своей малой толщины (дополнительно уменьшающейся по мере роста номера фотонного кольца n) начинают определять измеряемый отклик интерферометра. Для источников M87* и Sgr A* интерферометр с наземной базой (такой как ЕНТ) оказывается максимально чувствительным к вкладу аккреционного диска. Интерферометр с базой Земля–Луна позволит обнаружить первое и второе фотонные кольца, а интерферометр с еще большей базой, такой как “Миллиметрон” (РСДБ база Земля–L2) позволяет исследовать третье фотонное кольцо (Джонсон и др., 2020).

На рис. 3 представлены изображения первого фотонного кольца и соответствующие им интерферометрические функции видности. Период осцилляций функции видности однозначно связан с диаметром кольца, а асимметрия с параметром вращения

и направлением на наблюдателя. Структура функции видности будет иметь определенную форму, с помощью которой однозначно определяются масса и спин черной дыры (Джонсон и др., 2020). Важно отметить, что для получения физических параметров метрики в окрестности центрального объекта (в случае Керровской черной дыры это спин и угол между осью вращения черной дыры и направлением на наблюдателя) нет необходимости проводить полноценное РСДБ картографирование и добиваться качественного заполнения области пространственных частот (uv -плоскости). Достаточно измерения амплитуды интерферометрической функции видности в нескольких точках uv -плоскости или на небольших одномерных треках в перпендикулярных направлениях (необходимо измерить период осцилляции функции видности в двух различных направлениях на uv -плоскости). Данная задача хорошо подходит для двухэлементного интерферометра с длинной базой. Такими интерферометрами могут быть как интерферометр Земля–Луна, так и интерферометр “Миллиметрон”–Луна. Полный поток в первом фотонном кольце составляет 4–13% от полного потока источника (Джонсон и др., 2020) в зависимости от параметра вращения черной дыры. Необходимая

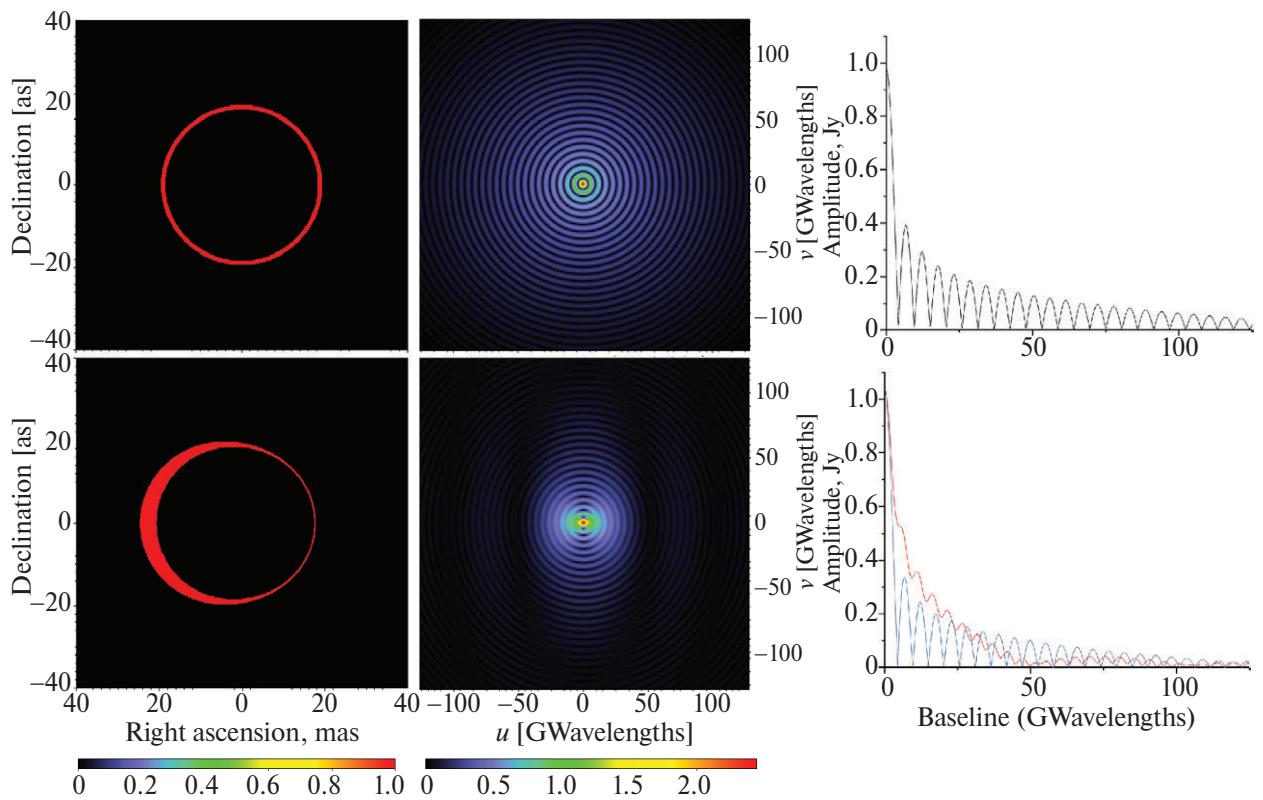


Рис. 3. Модельное изображение (левый столбец) первого фотонного кольца при различном угле между осью вращения черной дыры и направлением на наблюдателя (0 градусов верхний ряд, 17 градусов нижний ряд), соответствующая интерферометрическая функция видности (средний столбец), а также проекции интерферометрической функции видности на вертикальное и горизонтальное направления (правый столбец).

чувствительность в случае интерферометра Земля–Луна может быть достигнута как за счет фазирования нескольких наземных телескопов в один виртуальный телескоп, так и за счет использования технологии переноса фазы при одновременных наблюдениях на нескольких частотах (Гуан-Яо Чжао и др., 2018). В случае интерферометра Луна–“Миллиметрон” оба плеча интерферометра не будут подвержены влиянию атмосферы, поэтому необходимая чувствительность может быть достигнута путем увеличения времени накопления. По мере увеличения числа телескопов в Лунной решетке чувствительность интерферометров также будет увеличиваться. Еще одним способом кардинально (на порядок) снизить требования по чувствительности при решении данной задачи является измерение параметров фотонных колец в Sgr A* и M87* по наблюдениям вспышечной активности (Андреанов и др., 2022).

Метод определения метрики пространства–времени, основанный на РСДБ наблюдениях фотонных колец подходит не только для определения параметров вращения черных дыр. В случае, если в центрах Sgr A* или M87* или другого объекта находится кротовая нора (или другой экзотический объект со своей метрикой), это также найдет отражение в

изображении фотонных колец. На рис. 4 представлено изображение тени кротовой норы в метрике Лами (Лами и др., 2018). Легко заметить, что структура фотонных колец (и соответственно, форма и период осцилляций интерферометрической функции видности) будет отличаться от случая, когда центральным объектом является черная дыра. И интерферометр Земля–Луна является подходящим инструментом для того, чтобы обнаружить эту разницу.

2.2. Моделирование

Рассмотрим некоторые возможности наблюдения близких окрестностей СМЧД с помощью методов РСДБ с использованием телескопа, расположенного на поверхности Луны. Возможно несколько вариантов реализации геометрии такого интерферометра: Земля–Луна, Земля–Луна–“Миллиметрон”, Луна–космический интерферометр (Рудницкий и др., 2023). Для оценки наблюдательных возможностей рассмотрим три вышеуказанные геометрические конфигурации РСДБ интерферометра в моделировании наблюдений нескольких компактных источников.

Среди возможных кандидатов для таких наблюдений выберем четыре объекта: M87*, Sgr A*, M84 и OJ287. Первые два, как уже обсуждалось, ранее наблюдались ЕНТ.



Рис. 4. Тень кротовой норы в метрике Лами (Лами и др., 2018) с тонкой структурой фотонных колец. Разными цветами показаны аккреционный диск (красный) и его линзированные изображения (фотонные кольца).

Источник в галактике M87 – активное ядро галактики с координатами $\alpha = 12^{\text{h}}30^{\text{m}}49.423^{\text{s}}$, $\delta = +12^{\circ}23'28.044''$ (J2000), СМЧД с массой $M = 6.5(\pm 0.9) \times 10^9 M_{\odot}$ (Коллаборация Телескопа Горизонта Событий, 2019) расположена на расстоянии 16.7 Мпк (Листер и др., 2021), $z \approx 0.00436$ (Макконнелл и Ма, 2013).

Sgr A* – СМЧД в центре нашей Галактики с координатами $\alpha = 17^{\text{h}}45^{\text{m}}40.0409^{\text{s}}$, $\delta = -29^{\circ}0'28.118''$ (J2000) (Рид и Брунталер, 2004), с массой $M = 4.0 \times 10^6 M_{\odot}$ (Коллаборация Телескопа Горизонта Событий, 2022), расстоянием до Земли 8.277 кпк (Коллаборация Телескопа Горизонта Событий, 2022).

Источник OJ287 с координатами $\alpha = 8^{\text{h}}54^{\text{m}}48.875^{\text{s}}$ и $\delta = +20^{\circ}6'30.641''$ (J2000) – лацертида – представляет отдельный интерес, так как является кандидатом в двойную СМЧД (Дей и др., 2019; Валтонен и др., 2024), расположен на расстоянии 1577 Мпк (Листер и др., 2021), $z = 0.306$ (Стикель и др., 1989). Согласно современным моделям, массы СМЧД могут составлять около $M = 18.35 \times 10^9 M_{\odot}$ и $m = 1.50 \times 10^8 M_{\odot}$ (Лейн и др., 2020).

M84 – гигантская эллиптическая галактика с центральной СМЧД с координатами $\alpha = 12^{\text{h}}25^{\text{m}}03.74333^{\text{s}}$, $\delta = +12^{\circ}53'13.1393''$ (Ламберт и Гонтье, 2009), расположенная на красном смещении $z = 0.00327$ (Абазаджян и др., 2009), ранее не исследовалась так детально, как M87 и Sgr A*.

В моделировании рассчитывалось заполнение (u, v) -плоскости для нескольких вариантов РСДБ интерферометра: Земля–Луна, Земля–Луна–“Миллиметрон”, Земля – Луна – космический интерферометр. В качестве наземных телескопов предполагается использование телескопов, входящих в состав ЕНТ. Орбитальная конфигурация для космического интерферометра взята из работы Рудницкий и др. (2023). Рассматривалось два временных промежутка длительности наблюдений: 2 дня и 30 дней. Частота наблюдений в моделировании составляла 345 ГГц, мгновенная полоса пропускания $\Delta F = 8$ ГГц. Продолжительность одного сегмента (скана) в наблюдениях $\Delta t = 600$ с для наблюдений с большей скоростью эволюции и $\Delta t = 3600$ с для наблюдений с меньшей скоростью эволюции (u, v) -покрытий соответствующих интерферометров. Для источника M87* дополнительно использовались модели распределения радиояркости близких окрестностей СМЧД (Чернов, 2021) и строились зависимости амплитуды функции видности от проекции базы.

2.3. Результаты моделирования

На рис. 5, 7, 9, 11 представлены заполнения (u, v) -плоскости для M84, M87, Sgr A* и OJ287 для наблюдений длительностью 2 дня. На рис. 6, 8, 10, 12 приведены заполнения (u, v) -плоскости для тех же источников в том же порядке, но для наблюдений длительностью 30 дней.

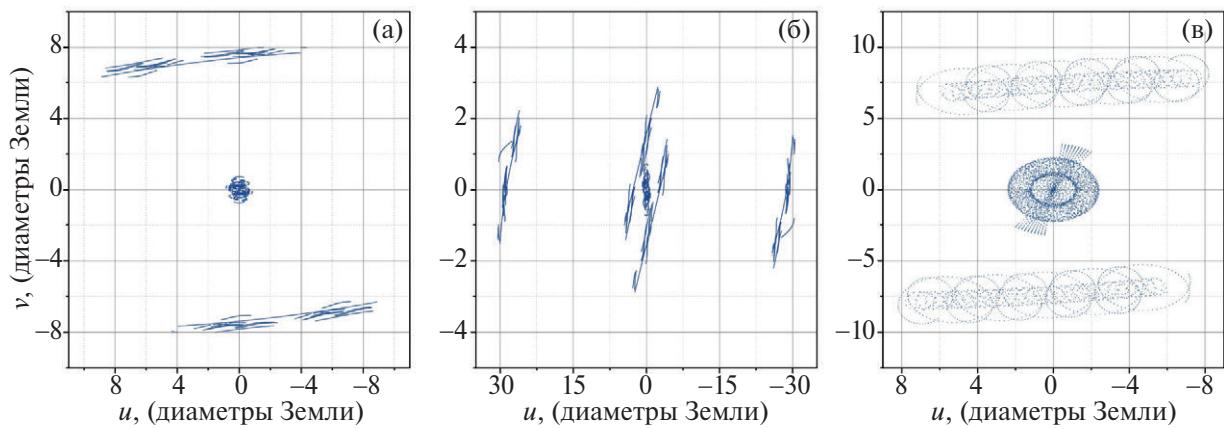


Рис. 5. Заполнение (u, v) -плоскости источника M84 с длительностью наблюдений 2 дня для следующих конфигураций геометрии интерферометра: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр. Координаты выражены в диаметрах Земли.

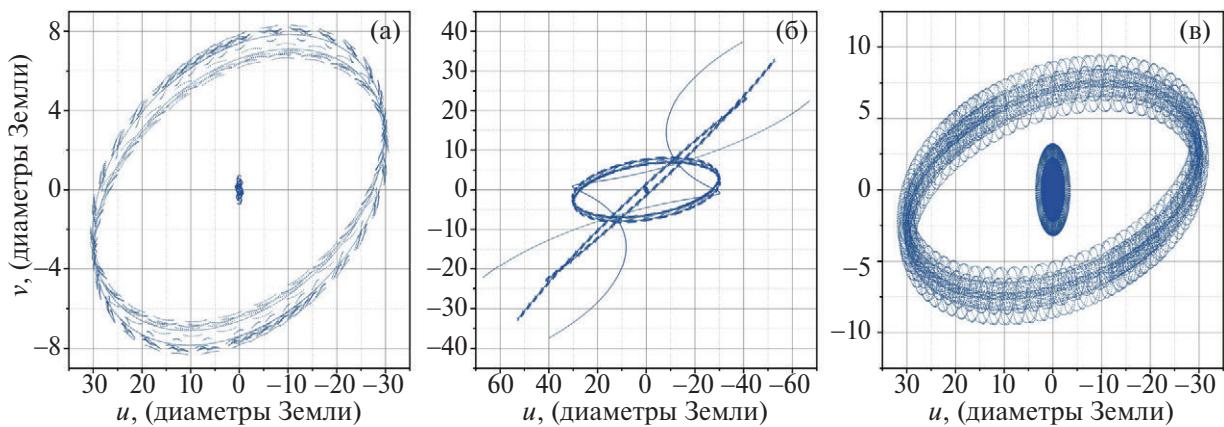


Рис. 6. Заполнение (u, v) -плоскости источника M84 с длительностью наблюдений 30 дней для следующих конфигураций геометрии интерферометра: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр. Координаты выражены в диаметрах Земли.

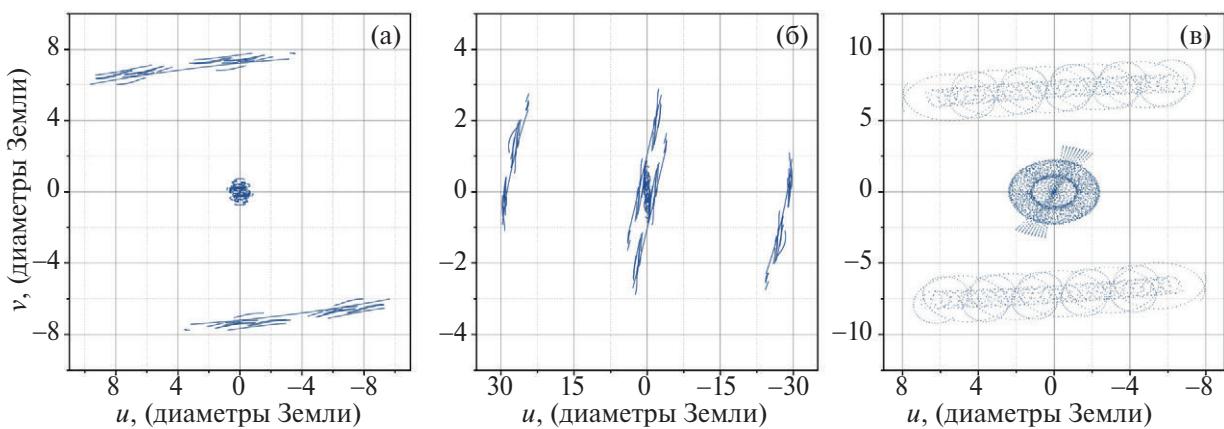


Рис. 7. Заполнение (u, v) -плоскости источника M87* с длительностью наблюдений 2 дня для следующих конфигураций геометрии интерферометра: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр. Координаты выражены в диаметрах Земли.

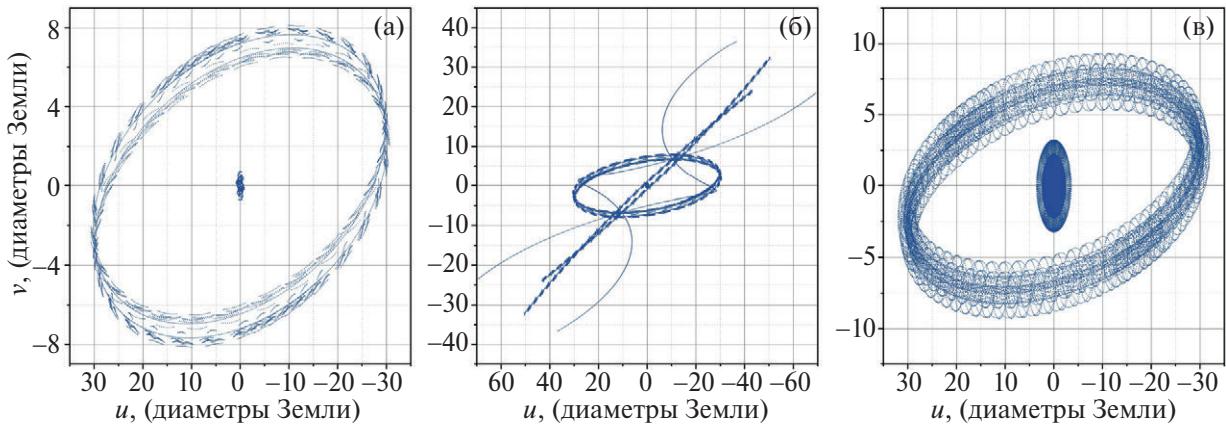


Рис. 8. Заполнение (u, v) -плоскости источника M87* с длительностью наблюдений 30 дней для следующих конфигураций геометрии интерферометра: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр. Координаты выражены в диаметрах Земли.

Таблица 1. Угловое разрешение, реализуемое для рассмотренных конфигураций РСДБ интерферометра для соответствующего источника

Параметры	Максимальное угловое разрешение, μas			
Конфигурация	OJ287	M84	M87	Sgr A*
Луна + ЕНТ + ММ	0.20	0.18	0.22	0.23
Луна + ЕНТ	0.40	0.40	0.40	0.40
Луна + SpSp	0.40	0.40	0.40	0.40

Как видно на рис. 5, 6, 7 и 8 заполнения (u, v) -плоскости практически идентичны, что обусловлено относительно близким расположением на небесной сфере источников M84 и M87*. Следует обратить внимание на представленные рис. 6б и рис. 8б (u, v) -заполнения. Такие удовлетворительного качества заполнения потенциально позволяют не только получать информацию о зависимости амплитуды функции видности от проекции базы, но и восстанавливать двумерные изображения наблюдаемых источников.

Аналогично с источниками M84 и M87*, для источников Sgr A* и OJ287 (см. рис. 9б и 10б, 11б и 12б) также реализуются (u, v) удовлетворительного качества заполнения с возможностью получения высокодетальных изображений.

В табл. 1 приведены значения максимально достижимого углового разрешения в микросекундах дуги (μas) для всех рассмотренных конфигураций РСДБ интерферометра и источников. Видно, что для этих источников максимальное угловое разрешение составляет $\sim 0.2 \mu\text{as}$.

На рис. 13 и 14 приведены распределения амплитуды функции видности в зависимости от проекции базы для всех конфигураций РСДБ интерферометров для источника M87* в случае 2 и 30 дней наблюдений соответственно. Как видно из этих рисунков, наилучшей реализацией является конфигурация Земля–Луна–Миллиметрон для 30 дней наблюдений,

так как в этом случае в измерениях амплитуды функции видности достигается максимальный диапазон проекций базы с минимальными разрывами, что позволяет исследовать тонкую структуру близких окрестностей СМЧД на проекциях базы вплоть до 60 диаметров Земли, что соответствует линейному угловому разрешению $\sim 0.22 \mu\text{as}$.

Оценим возможную достигаемую чувствительность РСДБ интерферометра, состоящего из телескопов, расположенных на поверхности Луны, обсерватории “Миллиметрон” и наземной антенной решетки миллиметрового диапазона ALMA. Чувствительность отдельно взятого радиотелескопа определяется значением эквивалентной плотности потока – SEFD (System Equivalent Flux Density):

$$SEFD = \frac{2k \cdot T_{\text{sys}}}{\eta_A A_g}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, T_{sys} – температура системы, η_A – коэффициент использования поверхности антенны $\eta_A = A_g/A_e$ (A_g – геометрическая площадь антенны, A_e – эффективная площадь антенны). Для оценок чувствительности положим, что температура системы равна шумовой температуре приемника $T_{\text{sys}} = T_{rx} = 60 \text{ K}$ на частоте 345 ГГц.

Чувствительность антенной решетки, состоящей из N одинаковых элементов, выражается следующим со-

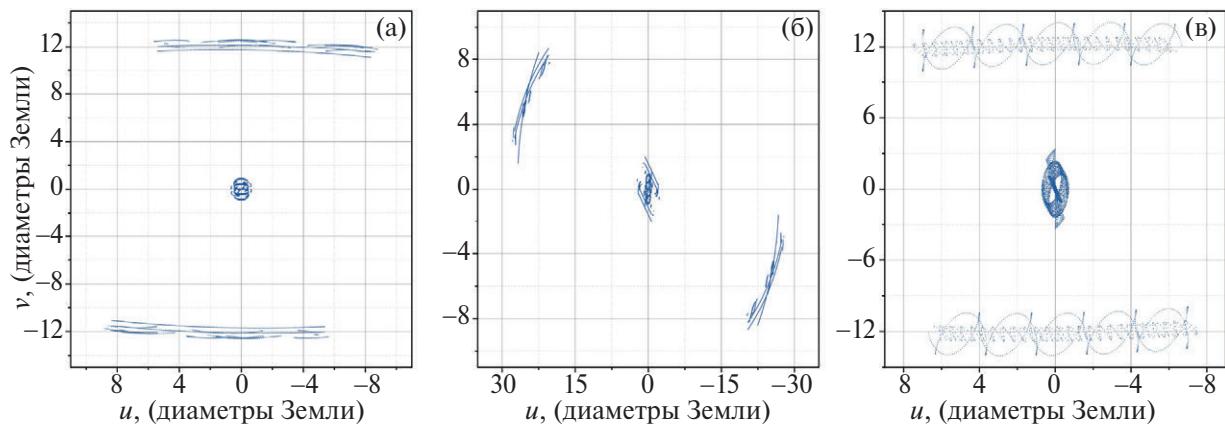


Рис. 9. Заполнение (u, v) -плоскости источника Sgr A* с длительностью наблюдений 2 дня для следующих конфигураций геометрии интерферометра: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр. Координаты выражены в диаметрах Земли.

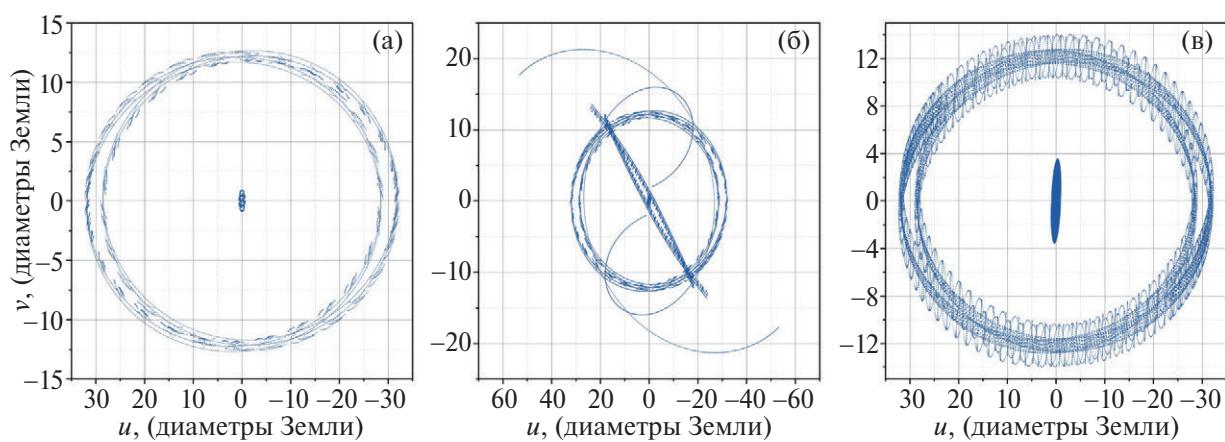


Рис. 10. Заполнение (u, v) -плоскости источника Sgr A* с длительностью наблюдений 30 дней для следующих конфигураций геометрии интерферометра: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр. Координаты выражены в диаметрах Земли.

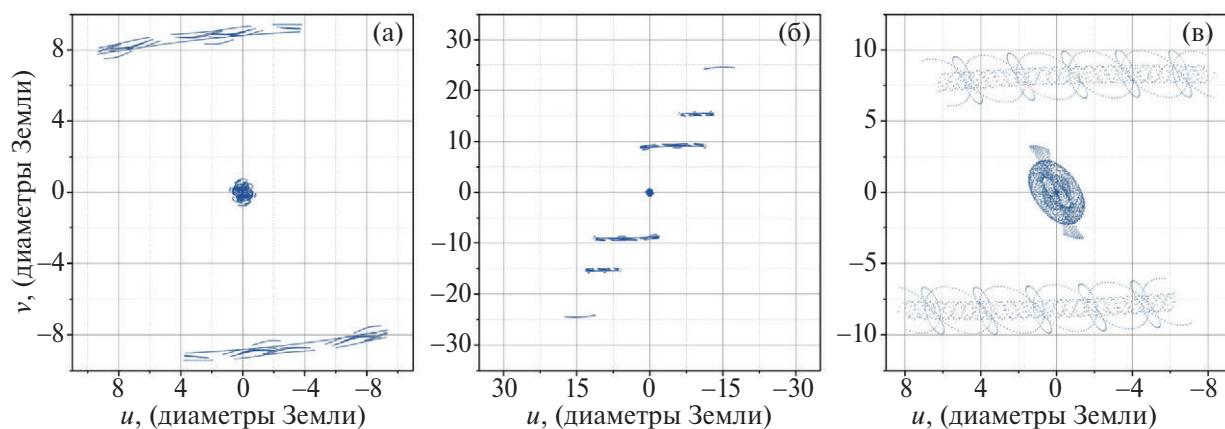


Рис. 11. Заполнение (u, v) -плоскости источника OJ287 с длительностью наблюдений 2 дня для следующих конфигураций геометрии интерферометра: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр. Координаты выражены в диаметрах Земли.

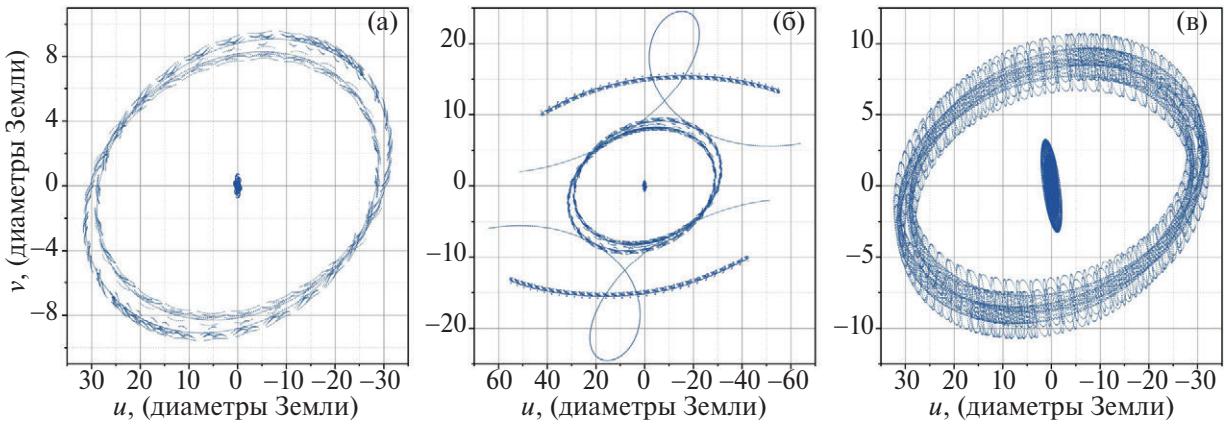


Рис. 12. Заполнение (u, v) -плоскости источника OJ287 с длительностью наблюдений 30 дней для следующих конфигураций геометрии интерферометра: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр. Координаты выражены в диаметрах Земли.

Таблица 2. Оценки эквивалентной плотности потока SEFD

Параметры	SEFD, Ян
Телескоп на поверхности Луны	32753
Антенна решетка на поверхности Луны	7369
Обсерватория Миллиметрон	7180
Наземный телескоп ALMA	70

отношением:

$$SEFD_{\text{Total}} = \eta_{\phi} \cdot \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{SEFD_i} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $\eta_{\phi} \approx 0.9$ – потери при фазировании антенной решетки.

В табл. 2 приведены результаты оценок эквивалентной плотности потока $SEFD$ для одиночной антенны и антенной решетки из четырех телескопов, расположенных на поверхности Луны.

Флуктуационную чувствительность интерферометра в континууме по плотности потока σ , состоящего из N телескопов, можно оценить следующим образом:

$$\sigma = \frac{1}{\eta_c} \cdot \sqrt{\frac{SEFD_1 \cdot \dots \cdot SEFD_N}{n \cdot N \cdot (N-1) \cdot \Delta v \delta t}}, \quad (3)$$

где η_c – коэффициент потерь, связанных с квантованием сигнала (для случая двухбитного квантования сигнала $\eta_c = 0.88$), $SEFD_1 \cdot \dots \cdot SEFD_N$ – произведение эквивалентных плотностей потока N телескопов, n – количество поляризационных каналов в наблюдении, Δv – ширина полосы пропускания, δt – время накопления сигнала.

В табл. 3 приведены оценки флуктуационной чувствительности в континууме по плотности потока интерферометров разной конфигурации для статистически значимого детектирования сигнала на уровне 5σ в предположении, что $\Delta v = 16$ ГГц на один канал (две

субполосы по 8 ГГц каждая), а также $n = 2$ поляризационных канала – левая и правая круговые поляризации, время интегрирования $\delta t = 600, 3600$ с.

Таким образом, результаты моделирования продемонстрировали принципиальную возможность изучения тонкой структуры близких окрестностей СМЧД с точки зрения наблюдения фотонных колец с использованием Лунной миллиметровой и субмиллиметровой антенной решетки. Для всех рассмотренных случаев и каждой конфигурации на частоте 345 ГГц достигается угловое разрешение $\sim 0.2 - 0.4$ мас.

На примере источника M87* (рис. 13, 14) отчетливо наблюдаются квазипериодические затухающие колебания амплитуды функции видности в зависимости от проекции базы, что свидетельствует о наличии фотонных колец. Стоит отметить, что для успешного наблюдения фотонных колец чувствительность интерферометра должна быть не хуже 1 мЯн. С учетом выполненных оценок, вполне возможным представляет детектировать сигналы на уровне $5\sigma \leq 1$ мЯн с действованием чувствительного наземного телескопа на длительных временах интегрирования.

Из всех рассмотренных конфигураций РСДБ интерферометра наиболее перспективной представляется интерферометр Земля–Луна–Миллиметрон, для которого становится возможным получать не только одномерные распределения амплитуды функции видности от проекции базы, но и высокодетальные изображения рассмотренных источников. Поскольку в этом случае, несмотря на существенные пробелы, заполнение (u, v) -плоскости обладает некоторой симметрией. Подобные двумерные изображения можно восстанавливать с пространственным разрешением, которое существенно превышает разрешение интерферометра Земля–Миллиметрон (Лихачев и др., 2022) и Земля – космический интерферометр (Рудницкий и др., 2023).

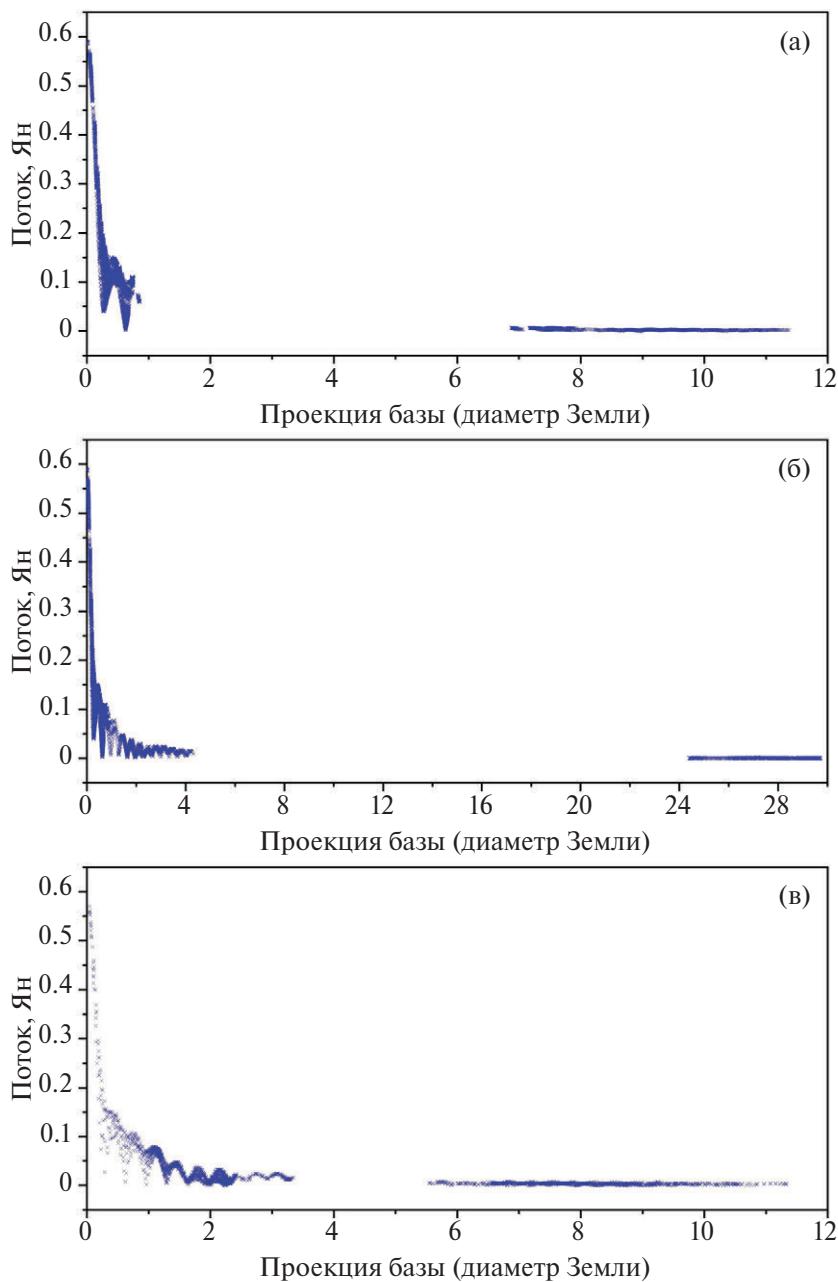


Рис. 13. Зависимость амплитуды функции видности от проекции базы, выраженной в диаметрах Земли, для источника M87 в наблюдениях длительностью 2 дня: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр.

2.4. Поиск отклонений от общей теории относительности и детектирование темной материи

Неотъемлемым компонентом будущей Лунной обсерватории является атомный стандарт частоты и времени (кратко, часы), необходимый для проведения РСДБ наблюдений. В связи с практически полным отсутствием у Луны атмосферы, именно стабильность часов будет являться основным фактором, ограничивающим время когерентного накопления сигнала интерферометра Луна–“Миллиметрон” или Луна –

космический интерферометр. Поэтому использование часов с минимально возможным уровнем шумов является эффективным средством повышения чувствительности данного интерферометра.

В последнее десятилетие в технике создания атомных часов произошел прорыв, связанный с появлением часов на оптических переходах, который привел к росту их стабильности и точности до уровня $\sim 10^{-18}$ и даже $\sim 10^{-19}$ (аллановская девиация относительной частоты на интервалах усреднения ~ 1 ч) (Ботвелл и др., 2019; Ким и др., 2023). Использование таких часов на Лунной обсерватории в перспективе позволит

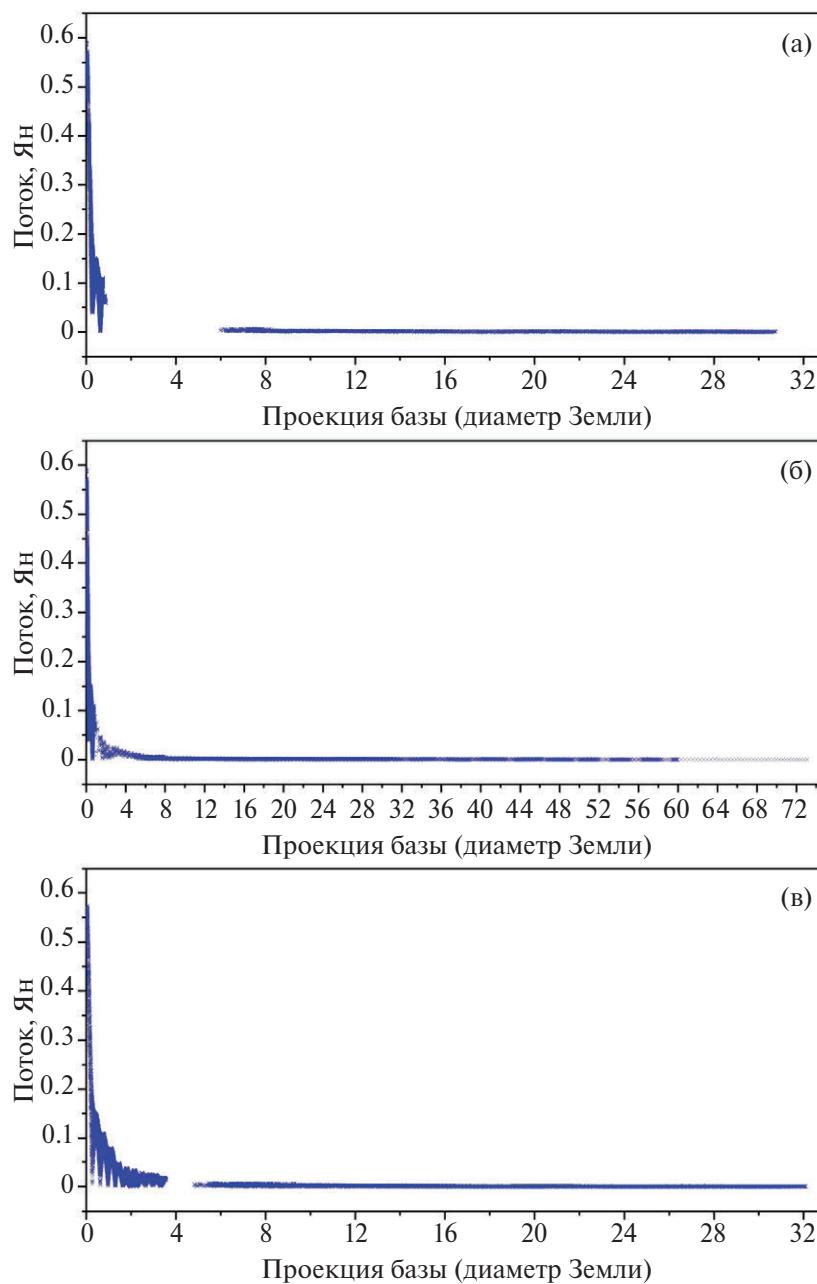


Рис. 14. Зависимость амплитуды функции видности от проекции базы, выраженной в диаметрах Земли, для источника M87 в наблюдениях длительностью 30 дней: (а) – конфигурация Земля–Луна, (б) – Земля–Луна–Миллиметрон, (в) – Луна – космический интерферометр.

повысить время когерентного накопления на 2–3 порядка по сравнению с традиционными водородными стандартами частоты, а также откроет возможности для проведения новых типов экспериментов по поиску отклонений от общей теории относительности (ОТО) и детектированию темной материи (ТМ). Тем не менее на первом этапе создания обсерватории наиболее рациональным представляется использование водородных мазерных стандартов частоты и времени, обладающих малыми массогабаритными характеристиками (12–60 кг, 50 × 70 см), небольшим энер-

гопотреблением (<50 Вт) и отработанной технологией производства, в т.ч. в космическом исполнении. Параметры стабильности современных водородных часов достигают 1×10^{-16} на временах усреднения ~ 1 ч (Поляков и др., 2021). Несмотря на более низкую стабильность по сравнению с оптическими, такие часы, тем не менее, позволяют осуществить в рамках проекта Лунной обсерватории ряд принципиально новых гравитационных экспериментов, а также значительно улучшить точность существующих. Рассмотрим кратко два из них.

Таблица 3. Чувствительность различных конфигураций РСДБ интерферометра, состоящего из антенной решетки на поверхности Луны, наземного телескопа ALMA и обсерватории Миллиметрон

Конфигурация интерферометра / Чувствительность	$\tau = 600$ с	$\tau = 3600$ с
	5σ , мЯн	5σ , мЯн
Лунный телескоп + Миллиметрон	14.06	5.74
Лунный телескоп + ALMA	1.39	0.57
Лунная телескоп + ALMA + Миллиметрон	67.92	27.73
Лунная решетка	12.26	5.01
Лунная решетка + Миллиметрон	6.67	2.72
Лунная решетка + ALMA	0.66	0.27
Лунная решетка + ALMA + Миллиметрон	32.22	13.15

2.5. Поиск отклонений от ОТО

Прямыми следствием эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ) является эффект гравитационного замедления времени или гравитационного красного смещения. В связи с предположением о нарушении ЭПЭ при объединении ОТО и квантовой теории, в экспериментах активно ведутся поиски нарушений этого принципа и, в частности, отклонения величины эффекта гравитационного замедления времени от предсказываемого ОТО (Альтшуль и др., 2024; Литвинов и др., 2018; Литвинов и Пилипенко, 2021). В случае двух одинаковых часов, находящихся в точках, между которыми имеется разность гравитационных потенциалов ΔU , в низшем ненулевом порядке по слабому гравитационному полю в рамках ОТО данный эффект описывается соотношением

$$\frac{\Delta T}{T} = (1 + \epsilon) \frac{\Delta U}{c^2}, \quad (4)$$

где T – интервалы времени, измеряемые часами, c – скорость света, ϵ – параметр, равный 0 в случае справедливости ЭПЭ (Литвинов и др., 2018). На настоящий момент значимого отклонения данного параметра от 0 не обнаружено, но установлено, что он может зависеть как от элементного состава источника гравитационного поля (в первую очередь, соотношения числа протонов и нейтронов), так и от типа часов, используемых для измерения интервалов времени (Альтшуль и др., 2024). Наилучшая точность измерения данного параметра на сегодня составляет $(2 - 3) \times 10^{-5}$ для измерений в гравитационном поле Земли (Дельва и др., 2018; Херрманн и др., 2018) и 1×10^{-2} для измерений в поле Солнца (Кришер и др., 1993). Измерения в поле Луны до настоящего момента не проводились.

В рамках проекта Лунной обсерватории возможно существенное улучшение точности измерения данного параметра для гравитационных полей Земли и Солнца, а также впервые – для гравитационного поля Луны. Доступные в рамках проекта точности измерения приведены в табл. 4 для случая водородных часов со стабильностью 1×10^{-16} (параметры взяты для

стандарта VCH-2021 из работы Поляков и др., 2021) и табл. 5 для случая оптических часов со стабильностью 8×8^{-18} (параметры часов, размещенных на китайской орбитальной станции Тяньгун из работы Шен и др., 2023). Приведенные оценки получены с помощью метода максимального правдоподобия и неравенства Крамера–Рао с учетом окрашенного шума часов согласно работам (Литвинов и Пилипенко, 2021; Литвинов, 2024а). Эксперименты в поле Луны и Земли требуют проведения измерений на участке перелета космического аппарата с атомными часами от Земли к Луне, а также оснащения данного аппарата системой компенсации нерелятивистского эффекта Доплера (Литвинов и др., 2018). Измерение эффектов в поле Солнца может быть выполнено с помощью часов, размещенных непосредственно на Лунной станции.

2.6. Детектирование темной материи

Одним из перспективных кандидатов на роль темной материи (ТМ) являются легкие скалярные частицы, описываемые действительным скалярным полем. Массы частиц для этого типа ТМ лежат в диапазоне от 10^{-24} эВ до 1 эВ. Из-за очень больших чисел заполнения этот вид ТМ может быть описан с помощью волн классического поля ϕ , в силу чего такую ТМ часто называют волновой. Поле ϕ может взаимодействовать с другими полями материи и колебаться с комптоновской частотой в диапазоне от 10^{-10} до 10^{14} Гц, что стимулирует проведение экспериментов по прямому детектированию этих колебаний. На константы связи данного типа ТМ был наложен ряд ограничений с помощью экспериментов с атомными часами, с использованием данных гравитационно-волновых детекторов, экспериментов типа Этвеша и др. (Хис и др., 2016; Вермёлен и др., 2021; Шламмингер и др., 2008). ТМ данного типа будет проявляться в колебаниях скорости хода часов, зависящих от координат и времени, а также, возможно, и от устройства часов. Эксперименты по сравнению хода часов, расположенных на далеких геоцентрических или гелиоцентрических орбитах необходимы для исследования широкого возможного диапазона масс частицы ТМ и

Таблица 4. Точность экспериментов по измерению параметра отклонения от ОТО, связанного с гравитационным замедлением времени. Часы Лунной станции: водородный стандарт VCH-2021 (Поляков и др., 2021). Завершенные миссии: GREAT с навигационными спутниками Galileo 5 и 6 (Дельва и др., 2018; Херрманн и др., 2018), эксперимент с зондом Galileo (Кришер и др., 1993). Планируемые: ACES на Международной космической станции (Гесс и др., 2011), эксперимент с оптическими часами на китайской орбитальной станции Тяньгун (Шен и др., 2023). Прочерк означает, что эксперимент не проводился или невозможен

Источник	Точность	Улучшение по сравнению			
		GREAT 3×10^{-5} (2018)	Galileo 1×10^{-2} (1991)	ACES 2×10^{-6} (2026+)	Тяньгун 2×10^{-7} (2027+)
Земля	$(1 - 6) \times 10^{-7}$	50–300	–	3–20	0.3–2
Солнце	$(2 - 4) \times 10^{-5}$	–	250–500	–	–
Луна	$(1 - 2) \times 10^{-5}$	–	–	–	–

Таблица 5. Точность экспериментов по измерению параметра отклонения от ОТО, связанного с гравитационным замедлением времени. Часы Лунной станции: оптический стандарт частоты и времени с параметрами, соответствующими часам на китайской орбитальной станции Тяньгун (Шен и др., 2023). Описание сравниваемых миссий см. в табл. 4

Источник	Точность	Улучшение по сравнению			
		GREAT 3×10^{-5} (2018)	Galileo 1×10^{-2} (1991)	ACES 2×10^{-6} (2026+)	Тяньгун 2×10^{-7} (2027+)
Земля	$(1 - 5) \times 10^{-8}$	600–3000	–	40–200	4–20
Солнце	$(2 - 3) \times 10^{-6}$	–	3000–5000	–	–
Луна	$(1 - 2) \times 10^{-6}$	–	–	–	–

величин констант связи (Деревянко, 2018; Цай и др., 2023; Пилипенко и др., 2024). На Лунной станции возможно реализовать несколько типов экспериментов по поиску ТМ. На первом этапе может быть проведен эксперимент по поиску периодического сигнала, связанного с ТМ, в сигнале автоподстройки атомных часов Лунной станции, т.е. осуществлен эксперимент по схеме сравнения частот атомного перехода и резонатора (Пилипенко и др., 2024). Для этого не требуется установки дополнительного оборудования, кроме необходимого для РСДБ. В случае оснащения Лунной станции системой компенсации нерелятивистского эффекта Доплера (и шумов тропосферы для наземной станции) может быть проведен поиск связанного со скалярной ТМ сигнала путем непосредственного сравнения скоростей хода часов Лунной станции и наземной станции слежения (либо оснащенного высокоточными часами космического аппарата) по схеме (Пилипенко и др., 2024). В зависимости от типа часов, реализация данной программы позволит на 5–7 порядков улучшить ограничения на константы связи ТМ из легких скалярных частиц с массами в диапазоне $10^{-20} - 10^{-12}$ эВ.

2.7. Звездообразование в галактиках и физика межзвездной среды

В субмиллиметровый диапазон попадает значительное число диагностических линий атомов, ионов и молекул, в том числе, линии молекулы воды и слож-

ных органических молекул. Поэтому наблюдения в этом диапазоне электромагнитного спектра крайне перспективны для исследования астрохимии Вселенной, а также для изучения взаимосвязи молекул в областях звездообразования с возникновением жизни на Земле.

Одним из основных направлений исследования является изучение звездообразования в галактиках на разных этапах их эволюции. В частности, вопросы, связанные с эффективностью и темпом звездообразования. Наблюдение молекулярных облаков, их взаимодействия с ударными волнами от сверхновых и ветровыми оболочками вокруг массивных звезд позволит проследить как подавление звездообразования при разрушении облаков, так и стимулирование последующего звездообразования при постепенном сжатии облаков. Области взаимодействия, очевидно, будут яркими в молекулярных линиях с высокой энергией возбуждения, например, высоких переходов молекул CO и H₂O. В диффузном газе будут наблюдать линии ионов [CII], [13CII], [NII], а в разреженных областях ИК-линии высокоионизованных металлов. Наблюдение большого числа таких диагностических линий позволяют оценить физические параметры соответствующих областей звездообразования и определить его эффективность.

Отдельно стоящей задачей остается проблема происхождения воды в межзвездной среде и определение механизма ее переноса. Ее пытались решать с помо-

щью космической обсерватории *Herschel* (ван Дишок и др., 2021). Однако нехватка времени для наблюдений значительного числа протозвездных объектов не позволила ответить на основные вопросы. Поэтому эта задача остается приоритетной для всех космических ИК обсерваторий, в частности, для обсерватории “Миллиметрон” (Кирсанова и др., 2025).

Каждая из 3-метровых антенн Лунной миллиметровой и субмиллиметровой антенной решетки сравнима по размеру с зеркалами проекта *SOFIA*¹ и космического телескопа *Herschel*². При использовании антенн решетки в однозеркальном режиме количество исследуемых протозвездных объектов возрастет кратно. Для наблюдений предполагается использовать спектрометр высокого разрешения – СВР (Третьяков и др., 2024), диапазон рабочих частот которого составляет 0.5–2.4 ТГц и покрывает интервалы спектральных инструментов, использованных в проектах *SOFIA* и *Herschel*.

Наиболее яркие объекты в областях звездообразования предполагается изучать в режиме интерферометра. Подобные наблюдения проводятся наземной решеткой *ALMA* (см., например, Йоргенсен и др., 2016) на более низких частотах. Переход к более высоким частотам позволит исследовать более высоко возбужденные состояния молекул в протозвездных облаках, в областях звездообразования с лучшим пространственным разрешением.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы повышается интерес международного научного сообщества к использованию поверхности Луны для проведения астрономических наблюдений. Как было отмечено во Введении, у таких экспериментов много преимуществ по сравнению как с наземными наблюдениями, так и с наблюдениями на космических аппаратах. В рамках Международной научной лунной станции одним из рассматриваемых для реализации проектов является Лунная миллиметровая и субмиллиметровая обсерватория (Лунная миллиметровая и субмиллиметровая антенная решетка). Создание этой обсерватории планируется начать с установки одиночной роботизированной антенны с холодным зеркалом малого диаметра (не более трех метров), на которой будут отработаны все необходимые технологии для последующего создания интерферометрической сети (антенной решетки) подобных телескопов.

При этом важным этапом реализации этого проекта станет создание наземного прототипа Лунной миллиметровой и субмиллиметровой антенной решетки. Предполагается, что прототип будет состоять из четырех антенн с приемной аппаратурой, работающей в диапазоне частот от 100 до 345 ГГц. В качестве перв-

спективного места размещения прототипа в настоящее время рассматривается площадка на плато в районе пика Хулугайша в Восточных Саянах. Разворачивание такой наземной антенной решетки позволит не только отработать все ключевые технологии и системы для последующего создания Лунной миллиметровой и субмиллиметровой антенной решетки, но и станет первым в Российской Федерации наземным инструментом миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн.

Важно отметить, что даже одиночная антenna столь небольшого диаметра на Луне, оснащенная комплексом необходимой научной аппаратуры, в том числе, Фурье-спектрополяриметром с покрытием широкого частотного диапазона от 100 ГГц до 4 ТГц и шириной частотных каналов не более 15 ГГц, позволит решить целый круг актуальных задач, связанных с физикой реликтового излучения, крупномасштабной структурой и свойствами космической пыли. Для этого в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах будут получены с высокой чувствительностью, пространственным и спектральным разрешением многочастотные карты ~30% небесной сферы. В свою очередь, эти многочастотные карты позволят построить карты параметров Стокса для поляризации, оценить амплитуду μ -искажений реликтового излучения (химический потенциал Вселенной), получить распределение Y -параметра и первых двух релятивистских поправок к нему, а также построить с хорошей чувствительностью карты анизотропии реликтового излучения для извлечения информации о гравитационном линзировании. В отличии от наблюдений свящующейся материи в оптическом и других диапазонах, исследование крупномасштабной структуры с помощью Y -искажений позволяет исследовать распределение полной массы.

Использование Лунной миллиметровой и субмиллиметровой антенной решетки в составе интерферометра Луна–Земля, Луна – Земля – космическая обсерватория или Луна – Земля – космический интерферометр открывает новые возможности для определения параметров метрики пространства-времени в окрестности сверхмассивных черных дыр в таких объектах, как, например, *Sgr A**, *M87**, *M84* и *OJ287*. Увеличение протяженности базы интерферометра и наблюдения на более высоких частотах по сравнению с проведенными наблюдениями ЕНТ позволят исследовать тонкие детали тени СМЧД или кротовой норы, в частности форму фотонных колец, которая слабо зависит от турбулентных свойств плазмы в аккреционном диске и определяется только свойствами пространства-времени в окрестности массивного объекта. По наблюдаемой форме фотонных колец появляется возможность установить природу массивного объекта, например, отличить СМЧД от кротовой норы.

¹<https://science.nasa.gov/mission/sofia>

²https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Herschel

Фазированная Лунная миллиметровая и субмиллиметровая антенна решетка позволит также изучать вопросы, связанные со звездообразованием в галактиках разных типов, с происхождением и переносом воды во Вселенной, образованием сложных молекул и поиском пребиотиков.

Наличие атомного стандарта частоты и времени как неотъемлемого элемента Лунной миллиметровой и субмиллиметровой антенной решетки, необходимого для проведения наблюдений в режиме интерферометра, позволит провести как принципиально новые гравитационные эксперименты, так и значительно улучшить точность существующих.

При реализации проекта по созданию Лунной миллиметровой и субмиллиметровой антенной решетки, как и других научных проектов на Луне, необходимо учитывать возможные сложности, связанные с наличием над поверхностью Луны пыли микронного и субмикронного размера, вероятно электрически заряженной (см., например, Хорани и др., 2024). Постоянная метеоритная бомбардировка поверхности Луны, выбивающая осколки лунной породы, приводит к образованию частиц пыли, а плазма солнечного ветра и ультрафиолетовое излучение Солнца, достигающие лунной поверхности, создают приповерхностную плазменную среду. Эта среда может приводить к зарядке и транспортировке лунной пыли. Частицы пыли покрывают оптические поверхности научных приборов, а также ухудшают характеристики тепловых радиаторов и солнечных панелей. В настоящее время нет достоверных данных о свойствах лунной пыли в приполярных областях, где планируется размещение Международной Лунной научной станции. В ближайшее время для изучения этих вопросов NASA планирует запуск программы ROLSES.

Следует также иметь ввиду гравитационные деформации, которые следует учитывать на этапе эскизного проектирования телескопа. Среди наиболее очевидных решений проблемы гравитационной деформации можно отметить следующие: использование для создания антенны и некоторых элементов конструкции телескопа (фермы, контуррефлектора) высокомодульного углепластика, имеющего малый температурный коэффициент расширения; использование системы обеспечения температурного режима для стабилизации температурного поля конструкции; использование системы адаптации для союстировки рефлектора и контуррефлектора.

Авторы благодарят Д.И. Новикова за неоценимую помощь при подготовке этой статьи. Работа выполнена в рамках программы ФИАН ННГ 36-2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абазаджян и др. (K. Abazajian, J.K. Adelman-McCarthy, M.A. Agueros, S.S. Allam, C. Allende Prieto, D. An, K.S.J. Anderson, S.F. Anderson, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **182**, 543 (2009).
2. Абитбол и др. (M.H. Abitbol, J. Chluba, J.C. Hill, and B.R. Johnson), *MNRAS* **471**, 1126 (2017).
3. Аде и др. (P. Ade, et al.), *JCAP* **1902**, 056 (2019).
4. Аде и др. (P.A.R. Ade, et al.), *Phys. Rev. Lett.* **127**, 151301 (2021).
5. Айола и др. (S. Aiola, E. Calabrese, L. Maurin, S. Naess, B.L. Schmitt, M.H. Abitbol, G.E. Addison, P.A.R. Ade, et al.), *J. Cosmology Astropart. Phys.* **12**, 047 (2020).
6. Альтшуль и др. (B. Altschul, Q.G. Bailey, L. Blanchet, K. Bongs, Ph. Bouyer, L. Cacciapuoti, S. Capozziello, N. Gaaloul, et al.), *Adv. Space Res.* **55**, 501 (2015).
7. Андрианов и др. (A.S. Andrianov, A.M. Baryshev, H. Falcke, I.A. Girin, T. de Graauw, V.I. Kostenko, et al.), *MNRAS* **500**, 4866 (2021).
8. Андрианов и др. (A. Andrianov, S. Chernov, I. Girin, S. Likhachev, A. Lyakhovets, and Yu. Shchekinov), *Phys. Rev. D* **105**, 063015 (2022).
9. Бентум и др. (M.J. Bentum, M.K. Verma, R.T. Rajan, A.J. Boonstra, C.J.M. Verhoeven, E.K.A. Gill, A.J. van der Veen, H. Falcke, et al.), *Adv. Space Res.* **65**, 856 (2020).
10. Бернс (J.O. Burns), *LPICo* **652**, 41 (1988).
11. Бернс и др. (J. Burns, S. Bale, R. Bradley, Z. Ahmed, S.W. Allen, J. Bowman, S. Furlanetto, et al.), *arXiv:2103.05085* (2021).
12. Блим и др. (L.E. Bleem, M. Klein, T.M.C. Abbot, P.A.R. Ade, M. Aguena, O. Alves, A.J. Anderson, F. Andrade-Oliveira, et al.), *Open J. Astron.* **7**, 13 (2024).
13. Блэкберн и др. (L. Blackburn, Sh. Doebleman, J. Dexter, J.L. Gomez, M.D. Johnson, D.C. Palumbo, et al.), *arXiv e-prints* (2019) <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv190901411B>
14. Ботвелл и др. (T. Bothwell, et al.), *Metrologia* **56**, 065004 (2019).
15. Валтонен и др. (M. Valtonen, S. Zola, A.C. Gupta, Sh. Kishore, A. Gopakumar, S.G. Jorstad, P.J. Wiita, M. Gu, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **968**, L17 (2024).
16. ван Дишок и др. (E.F. van Dishoeck, L.E. Kristensen, J.C. Mottram, A.O. Benz, E.A. Bergin, P. Caselli, F. Herpin, et al.), *Astron. Astrophys.* **648**, A24 (2021).
17. Вермёлен и др. (S. Vermeulen, Ph. Relton, H. Grote, V. Raymond, Ch. Affeldt, F. Bergamin, A. Bisht, M. Brinkmann, et al.), *Nature* **600**, 424 (2021).
18. Гесс и др. (M. Hess, et al.), *Acta Astronautica* **69**, 929 (2011).
19. Горголевский (St. Gorgolewski) *Proceedings of the 1st Lunar International Laboratory (LIL) Symposium on Research in Geosciences and Astronomy*, org. by the International Academy of Astronautics at the 16th International Astronautical Congress Athens, September 16th, 1965. Ed. F.J. Malina. Wien: Springer, p.78 (1966).
20. Гордон и др. (K.D. Gordon, and 35 colleagues), *Astrophys. J.* **797**, 85 (2014).
21. Гралла и Лупсаска (S.E. Gralla and A. Lupsasca), *Phys. Rev. D* **101**, 044031 (2020).
22. Гуан-Яо Чжао и др. (Guang-Yao Zhao, et al.), *Astron. J.* **155**, 26 (2018).
23. Гурвиц и др. (I.I. Gurvits, Z. Paragi, V. Casasola, J. Conway, J. Davelaar, et al.), *Experimental Astron.* **51**, 559 (2021).

24. де Бернардис и др. (P. de Bernardis, S. Colafrancesco, G. D'Alessandro, L. Lamagna, P. Marchegiani, S. Masi, and A. Schillaci), *Astron. Astrophys.* **538**, A86 (2012).
25. де Граафф и др. (A. de Graaff, Yan-Chuan Cai, C. Heymans, and J.A. Peacock), *Astron. Astrophys.* **624**, A48 (2019).
26. Дей и др. (L. Dey, A. Gopakumar, M. Valtonen, S. Zola, A. Susobhanan, R. Hudec, P. Pihajoki, T. Pursimo, et al.), *Universe* **5**, 108 (2019).
27. Дельва и др. (P. Delva, N. Puchades, E. Schonemann, et al.), *Phys. Rev. Lett.* **121**, 231101 (2018).
28. Деревянко (A. Derevianko), *Phys. Rev. A* **97**, 042506 (2018).
29. Джестер и Фальк (S. Jester and H. Falcke), *New A Rev.* **53**, 1 (2009).
30. Джонсон и др. (M.D. Johnson, Y.Y. Kovalev, C.R. Gwinn, L.I. Gurvits, R. Narayan, J.-P. Macquart, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **820**, L10 (2016).
31. Джонсон и др. (M.D. Johnson, R. Narayan, D. Psaltis, L. Blackburn, Y.Y. Kovalev, C.R. Gwinn, et al.), *Astrophys. J.* **865**, 104 (2018).
32. Джонсон и др. (M.D. Johnson, A. Lupsasca, A. Strominger, G.N. Wong, S. Hadar, et al.), *Science Adv.* **6**, eaaz1310, arXiv:1907.04329 [astro-ph.IM] (2020).
33. Долаг и др. (K. Dolag, E. Komatsu, and R. Sunyaev), *MNRAS* **463**, 1797 (2016).
34. Едигарев и др. (I.G. Edigaryev, D.I. Novikov, and S.V. Pilipenko), *PhRvD* **98**, 123513 (2018).
35. Йоргенсен и др. (J.K. Jørgensen, M.H.D. van der Wiel, A. Coutens, J.M. Lykke, H.S.P. Muller, E.F. van Dishoeck, H. Calcutt, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, A117 (2016).
36. Кейси и др. (C.M. Casey, D. Narayanan, and A. Cooray), *Phys. Rep.* **541**, 45 (2014).
37. Ким и др. (K. Kim, et al.), *Phys. Rev. Lett.* **130**, 113203 (2023).
38. Кирсанова М. и др., *Успехи физ. наук* **195**, 294 (2025) [Kirsanova et al., *Phys. Usp.* **68**, (2025)].
39. Кляйн-Волт и др. (M. Klein-Wolt, A. Aminaei, Ph. Zarka, J.-R. Schrader, A.-J. Boonstra, and H. Falcke), *Planet. Space Sci.* **74**, 167 (2012).
40. Когут и др. (A. Kogut, D.J. Fixsen, D.T. Chuss, J. Dotson, E. Dwek, M. Halpern, G.F. Hinshaw, S.M. Meyer, et al.), *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **7**, 025 (2011).
41. Когут и др. (A. Kogut, D. Fixsen, N. Aghanim, J. Chluba, D.T. Chuss, J. Delabrouille, B.S. Hensley, J.C. Hill, et al.), *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **7**, 057 (2023).
42. Когут и др. (A. Kogut, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2405.20403 (2024).
43. Коллаборация Планк (Planck Collaboration and 207 colleagues) *Astron. and Astrophys.* **536**, 19, (2011).
44. Коллаборация Планк (Planck Collaboration), *Astron. Astrophys.* **550**, A129 (2013).
45. Коллаборация Планк (Planck Collaboration), *Astron. Astrophys.* **571**, A11 (2014).
46. Коллаборация Планк (Planck Collaboration), *Astron. Astrophys.* **594**, A10 (2016).
47. Коллаборация Планк (Planck Collaboration), *Astron. Astrophys.* **596**, A109 (2016).
48. Коллаборация Телескопа Горизонта Событий (Event Horizon Telescope Collaboration), *Astrophys. J. Lett.* **875**, L6 (2019).
49. Коллаборация Телескопа Горизонта Событий (Event Horizon Telescope Collaboration), *Astrophys. J. Lett.* **930**, L12 (2022).
50. Комацу и Сельяк (E. Komatsu and U. Seljak), *MNRAS* **336**, 1256 (2002).
51. Кришер и др. (T. Krisher, D.D. Morabito, and J.D. Anderson), *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2213 (1993).
52. Купманс и др. (L.V.E. Koopmans, R. Barkana, M. Bentum, G. Bernardi, A.-J. Boonstra, J. Bowman, J. Burns, X. Chen, et al.), *Exp. Astron.* **51**, 1641 (2021).
53. Ламберт и Гонтье (S.B. Lambert and A.M. Gontier), *Astron. Astrophys.* **493**, 317 (2009).
54. Лами и др. (F. Lamy, et al.), *Classic. Quant. Gravit.* **35**, 115009 (2018).
55. Лейн и др. (S. Laine, L. Dey, M. Valtonen, A. Gopakumar, S. Zola, S. Komossa, M. Kidger, P. Pihajoki, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **894**, L1 (2020).
56. Листер и др. (M.L. Lister, D.C. Homan, K.I. Kellermann, Y.Y. Kovalev, A.B. Pushkarev, E. Ros, and T. Savolainen), *Astrophys. J.* **923**, 30 (2021).
57. Литвинов и др. (D. Litvinov, et al.), *Phys. Lett. A* **382**, 2192 (2018).
58. Литвинов Д.А., Письма в Астрон. журн. **50**, 253 (2024) [D.A. Litvinov, *Astron. Lett.* **50**, 221 (2024)].
59. Литвинов и Пилипенко (D.A. Litvinov and S.V. Pilipenko), *Classic. Quant. Gravit.* **38**, 135010 (2021).
60. Лихачев и др. (S.F. Likhachev, A.G. Rudnitskiy, M.A. Shchurov, A.S. Andrianov, A.M. Baryshev, et al.), *MNRAS* **511**, 668 (2022).
61. Лихачев и др. (S.F. Likhachev, et al.), *Cosmic Res.* **62**, 117 (2024).
62. Лихачев С.Ф., Ларченкова Т.И., Успехи физ. наук **198**, 814 (2024) [Likhachev, Larchenkova, *Phys. Usp.* **67**, 768 (2024)].
63. Лю и Ву (F.K. Liu and X.-B. Wu), *Astron. Astrophys.* **388**, L48 (2002).
64. Мазер и др. (J.C. Mather, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **354**, L37 (1990).
65. Майярд (J.P. Maillard), *Phil. Trans. R. Soc. A* **382**, 20230070 (2024).
66. Майярд и др. (J.-P. Maillard, A. Mihalchenko, D. Novikov, A. Osipova, S. Pilipenko and J. Silk), *Phys. Rev. D* **109**, 023523 (2024).
67. Макконнелл и Ма (N.J. McConnell and Chung-Pei Ma), *Astrophys. J.* **764**, 184 (2013).
68. Меербург и др. (P.D. Meerburg, D. Green, R. Flauger, B. Wallisch, M.C.D. Marsh, E. Pajer, G. Goon, C. Dvorkin, et al.), *Bull. Am. Astron. Soc.* **51**, 107 (2019).
69. Мимун и др. (D. Mimoun, M.A. Wieczorek, L. Alkalai, W.B. Banerdt, D. Baratoux, J.-L. Bougeret, S. Bouley, B. Cecconi, et al.), *Exp. Astron.* **33**, 529 (2012).
70. Морабито и Силк (L.K. Morabito and J. Silk), *Phil. Trans. R. Soc. A* **379**, 20190571 (2021).
71. Новиков и др. (D.I. Novikov, S.V. Pilipenko, M. De Petris, G. Luzzi, and A.O. Mihalchenko), *Phys. Rev. D* **101**, 123510 (2020).
72. Новиков и др. (I.D. Novikov, S.F. Likhachev, Yu.A. Shchekinov, A.S. Andrianov, A.M. Baryshev, et al.), *Phys. Uspekhi* **64**, 386 (2021).

73. Новиков и Михальченко (D.I. Novikov and A.O. Mihalchenko), *Phys. Rev. D* **107**, 063506 (2023).
74. Пилипенко и др. (S.V. Pilipenko, D.A. Litvinov, M.V. Zakhvatkin, and A.I. Filetkin), *Astron. Rep.* **68**, 300 (2024).
75. Полидан и др. (R.S. Polidan, J.O. Burns, A. Ignatiev, A. Hegedus, J. Pober, N. Mahesh, T.-C. Chang, et al.), *Adv. Space Res.* **74**, 528 (2024).
76. Поляков и др. (V. Polyakov, et al.), Frequency stability improvement of an active hydrogen maser with a single-state selection system, in 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), p. 1–4 (2021).
77. Рейтер и др. (C. Reuter, and 23 colleagues), *Astrophys. J.* **902**, 78 (2020).
78. Рид и Брунталер (M.J. Reid and A. Brunthaler), *Astrophys. J.* **616**, 872 (2004).
79. Рудницкий и др. (A.G. Rudnitskiy, M.A. Shchurov, S.V. Chernov, T.A. Syachina, and P.R. Zapevalin), *Acta Astronautica* **212**, 361 (2023).
80. Рулофс и др. (F. Roelofs, H. Falcke, Ch. Brinkerink, M. Moscibrodzka, L.I. Gurvits, M. Martin-Neira, et al.), *Astron. Astrophys.* **625**, A124 (2019).
81. Рэймонд и др. (A.W. Raymond, D. Palumbo, S.N. Paine, L. Blackburn, R. Cordova Rosado, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 5 (2021).
82. Сандора и Силк (M. Sandora and J. Silk), *MNRAS* **495**, 10001015 (2020).
83. Силк и др. (J. Silk, I. Crawford, M. Elvis, and J. Zarnecki), *Phil. Trans. R. Soc. A* **379**, 20190560 (2021).
84. Силк и др. (J. Silk, I. Crawford, M. Elvis, and J. Zarnecki), *Phil. Trans. R. Soc. A* **382**, 20230079 (2024).
85. Силланпää и др. (A. Sillanpää, S. Haarala, M.J. Valtonen, B. Sundelius, and G.G. Byrd), *Astrophys. J.* **325**, 628 (1988).
86. Стеббингс и Бендер (R.T. Stebbins and P.L. Bender), Physics and Astrophysics from a Lunar Base **202**, 18 (1990).
87. Стиклер и др. (M. Stickel, J.W. Fried, and H. Kuehr), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **80**, 103 (1989).
Ben H.P. Chan, et al.), *Astron. J.* **153**, 37 (2017).
88. Сэм и др. (Y. Sam, E. Komatsu, and K. Dolag), *Phys. Rev. D* **104**, 083538 (2021).
89. Сюняев и Зельдович (R.A. Sunyaev and Ya.B. Zeldovich), *Comment. Astrophys. Space Phys.* **4**, 173 (1972).
90. Такахashi (Y.D. Takahashi), *Adv. Space Res.* **31**, 2473 (2003).
91. Третьяков и др. (I.V. Tretyakov, et al.), *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **15**, Iss. 2, 191 (2025).
92. Фиш и др. (L.F. Vincent, Maura Shea, and Kazunori Akiyama), *Adv. Space Res.* **65**, 821 (2020).
93. Хармс и др. (J. Harms, F. Ambrosino, L. Angelini, V. Braito, M. Branchesi, E. Brocato, E. Cappellaro, E. Coccia, et al.), *Astrophys. J.* **910**, 1 (2021).
94. Херрманн и др. (S. Herrmann, F. Finke, M. Lulf, et al.), *Phys. Rev. Lett.* **121**, 231102 (2018).
95. Хилл и др. (J.C. Hill, N. Battaglia, J. Chluba, S. Ferraro, E. Schaan, and D.N. Spergel), *Phys. Rev. Lett.* **115**, 261301 (2015).
96. Хилтон и др. (M. Hilton, C. Sifon, S. Naess, M. Madhavacheril, M. Oguri, E. Rozo, E. Rykoff, T.M.C. Abbott, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 3 (2021).
97. Хис и др. (A. Hees, A. Hees, S. Bouquillon, C. Le Poncin-Lafitte, G. Francou, and M.-C. Angonin), *Phys. Rev. Lett.* **117**, 061301 (2016).
98. Хис и др. (A. Hees, O. Minazzoli, E. Savalle, et al.), *Phys. Rev. D* **98**, 064051 (2018).
99. Хлуба и др. (J. Chluba), *MNRAS* **425**, 1129 (2012).
100. Хлуба и др. (J. Chluba), *MNRAS* **460**, 227 (2016).
101. Хлуба и др. (J. Chluba, et al.), *arXiv e-prints.* arXiv:1909.01593 (2019).
102. Холмс и др. (W.A. Holmes, et al.), *Appl. Optic.* **47**, 5996 (2008).
103. Хорани и др. (M. Horanyi, J.R. Szalay, and X. Wang), *Phil. Trans. R. Soc. A* **382**, 20230075 (2024).
104. Худченко и др. (A. Khudchenko, S. Turygin, E. Golubev, K.I. Rudakov, A. Smirnov, et al.), *Proceed. of the SPIE* **13102**, id. 131022A (2024).
105. Цай и др. (Y.-D. Tsai, J. Eby, and M.S. Safronova), *Nat. Astron.* **7**, 113 (2023).
106. Чаллинор и др. (A.D. Challinor, M.T. Ford, and A.N. Lasenby), *MNRAS* **312**, 159 (2000).
107. Чернов (S.V. Chernov), *Astron. Rep.* **65**, 110 (2021).
108. Чен и др. (X. Chen, et al.), *Phil. Trans. R. Soc. A* **382**, 20230094 (2024).
109. Шен и др. (W. Shen, P. Zhang, Z. Shen, R. Xu, X. Sun, M. Ashry, A. Ruby, W. Xu, et al.), *Phys. Rev. D.* **108**, 064031 (2023).
110. Шламмингер и др. (S. Schlamming, K.-Y. Choi, T.A. Wagner, J.H. Gundlach, and E.G. Adelberger), *Phys. Rev. Lett.* **100**, 041101 (2008).
111. Шнайдер и др. (J. Schneider, J. Silk, F. Vakili, I. Crawford, M. Elvis, S. Jacquemoud, R. Kaiser, and M. Sandora), *arXiv e-prints.* arxiv:1908.02080 (2019).