

УДК 520.274

ПРОЕКТ «МЕТРОН». I. НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ПРОЕКТА «МЕТРОН»

© 2024 В. К. Дубрович^{1*}, С. И. Грачев^{2**},
Ю. Н. Ерошенко^{3***}, С. И. Широков^{1****}, Г. Г. Валявин^{4*****}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский филиал,
Санкт-Петербург, 196140 Россия²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия³Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия⁴Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 4 июля 2023 года; после доработки 2 октября 2023 года; принята к публикации 18 октября 2023 года

В данной статье — первой в серии из четырех статей — освещаются научные цели проекта «Метрон» и приводятся характеристики космических объектов, доступных для изучения в его рамках. Радиотелескоп-интерферометр «Метрон» должен включать массивы дипольных антенн метрового диапазона, размещенных на Земле, в открытом космосе или на обратной стороне Луны (или комбинация этих вариантов). Работа в метровом диапазоне позволит изучать так называемую космологическую эпоху темных веков, которая сложна для наблюдений, но крайне интересна для понимания происхождения первых звезд, галактик и черных дыр, а также для поиска новых космологических объектов и процессов. Одной из возможностей является поиск поглощения в линии 21 см в протяженных гало вокруг ранних протогалактик и сверхмассивных первичных черных дыр, существование которых предсказывается в ряде моделей. Целью проекта «Метрон» может быть также прояснение аномального поглощения в линии 21 см, обнаруженного ранее телескопами EDGES, и наблюдение радиоизлучения от магнитосфер звезд и экзопланет. В проекте «Метрон» предполагается достигнуть беспрецедентного для метрового диапазона разрешения, что позволяет ожидать новых научных результатов мирового уровня. Антенны и приемная аппаратура метрового диапазона достаточно просты и дешевы, и построение из них интерферометрических массивов может быть осуществлено в достаточно короткие сроки.

Ключевые слова: квазары: сверхмассивные черные дыры — радиолинии: галактики — радиолинии: планетарные системы

1. ВВЕДЕНИЕ

От момента рекомбинации водорода до появления первых звезд во Вселенной не было источников излучения, поэтому этот период космологической истории называют темными веками. Исследование темных веков представляет большой интерес для космологии, поскольку в конце этой эпохи начинают формироваться звезды, галактики и сверхмассивные черные дыры.

Загадкой и нерешенной пока проблемой является происхождение сверхмассивных черных дыр в ранние эпохи. Наблюдение квазаров показало,

что черные дыры с массами $M_{\text{ВН}} \geq 10^9 M_{\odot}$ существовали уже при красных смещениях $z > 7$. Наличие столь массивных черных дыр сложно объяснить обычными астрофизическими процессами, и требуются изначальные объекты с массами около $M \sim (10^4 - 10^5) M_{\odot}$. Ими могут быть первичные черные дыры (ПЧД), формирование которых возможно по различным механизмам (Zel'dovich and Novikov, 1967; Hawking, 1971; Carr, 1975; Khlopov and Polnarev, 1980; Berezin et al., 1983; Dolgov and Silk, 1993; Rubin et al., 2001).

ИК-телескоп (Джеймс Уэбб) недавно представил неожиданные данные по галактикам в конце эпохи темных веков. Как оказалось, достаточно крупные структурированные галактики начали формироваться еще до реионизации Вселенной (Forconi et al., 2023). Другой проблемой является то, что в некоторых из ранних галактик наблюдается сильный дефицит темной материи (Comerón

*E-mail: dvk47@mail.ru

**E-mail: s.grachev@spbu.ru

***E-mail: eroshenko@inr.ac.ru

****E-mail: lakronous@mail.ru

*****E-mail: gvalyavin@gmail.com

et al., 2023). Эта загадка также требует объяснения. Еще одной проблемой, которая пока не нашла решения, является аномальное поглощение в линии 21 см нейтрального водорода, зарегистрированное телескопами EDGES (Bowman et al., 2018).

Для исследования эпохи темных веков мы предлагаем создать несколько массивов антенн метрового диапазона, работающих в режиме интерферометра. Каждый из массивов должен представлять собой площадку размером порядка квадратного километра со множеством антенн. Массивы антенн метрового диапазона, расположенные на Земле, являются относительно дешевыми системами и могут быть построены в достаточно короткие сроки — порядка нескольких лет. Уже с наземными телескопами можно будет получить принципиально новые результаты: возможно, удастся обнаружить новые космологические объекты, о которых говорится далее в этой статье. Выведение таких массивов в космос открывает беспрецедентные возможности, которые пока не были использованы в мировой радиоастрономии.

Более детально о технических сторонах реализации данного проекта и характеристиках планируемых телескопов метрового диапазона будет рассказано в последующих статьях. В данной работе мы обсудим возможные научные цели этого проекта.

Эпоха темных веков весьма перспективна для поиска редких космологических объектов в радиодиапазоне, так как до реионизации было мало звезд, галактик и аккрецирующих черных дыр, поэтому отсутствовали сильные локальные помехи и фоны. На красных смещениях $z > 15$ велика доля нейтрального водорода, и на больших z (но при $z \ll 150$) достаточно велика разница температур между веществом и реликтовым излучением, что дает возможность наблюдать поглощение реликтового излучения в линии 21 см (Pritchard and Loeb, 2012). Исходя из этого, мы рассматриваем красные смещения вблизи $z \sim 20$ как наиболее оптимальные для наблюдения редких массивных объектов, хотя принципиально имеется возможность наблюдать объекты в течение всей эпохи $10 < z < 150$.

ПЧД большой массы уже на красных смещениях $z > 20$ должны быть окружены гало, состоящими из темной материи и барионного газа (Dokuchaev and Eroshenko, 2001; 2003). Dubrovich and Glazyrin (2012) указали, что газ вблизи ПЧД может иметь аномалии химического состава (по сравнению с предсказанием теории первичного нуклеосинтеза в однородной Вселенной). Такие массивные и концентрированные объекты в ранней Вселенной были названы «космологическими динозаврами». Dubrovich et al. (2021) показали, что хотя в центре гало из-за аккреции газа на ПЧД возможно значительное выделение энергии,

на периферии гало водород остается нейтральным и может поглощать в линии 21 см.

В современную эпоху «космологические динозавры» должны представлять редкий класс плотных сфероидальных галактик (Su et al., 2023). Расстояние до ближайшей из них может превышать 50 Мпк (Dubrovich et al., 2021), что затрудняет их поиск на оптических телескопах. Напротив, телескопами, построенными по проекту «Метрон», можно будет наблюдать множество таких объектов в эпоху темных веков.

2. РАННИЕ ПРОТОГАЛАКТИКИ

В данном проекте предлагается создать массив радиотелескопов, которые будут способны регистрировать протяженные объекты в эпоху темных веков, даже если эти объекты не имеют собственного энерговыделения. Их наблюдение будет проводиться в линии поглощения 21 см, причем поглощение будет наблюдаться не «в среднем», как это производится, например, телескопами EDGES, а предполагается наблюдать индивидуальные объекты, если их угловой масштаб достаточно велик. Примером подобных объектов являются ранние протогалактики. Угловых разрешений планируемых телескопов проекта «Метрон» будет достаточно для таких наблюдений в некоторой разумной области параметров объектов, предсказываемых, в частности, в описываемых ниже моделях.

Принципиальное значение для наблюдения линий поглощения имеют неравновесные процессы в газе (Dubrovich, 1977; Varshalovich and Khersonskii, 1977; de Bernardis et al., 1993; Dubrovich and Lipovka, 1995). В частности, Varshalovich and Khersonskii (1977) показали, что разница температур барионов и реликтового излучения приводит к искажениям спектра при передаче энергии от фотонов веществу в линии водорода с длиной волны 21 см при неупругих столкновениях атомов водорода. Также для глубины поглощения очень важно состояние движения газа, особенно распределение его скорости на луче зрения. Сильное поглощение возникает в том случае, когда градиент лучевой скорости обращается в ноль (Zel'dovich, 1978).

Dubrovich (2018), Dubrovich and Grachev (2020) рассмотрели эффекты, связанные с наличием значительной неоднородности вещества и наличием специфических лучевых скоростей. На основе этого подхода Dubrovich et al. (2021) рассчитали поглощение на периферии протяженных гало вокруг ПЧД, где область поглощения формирует кольцо. В дальнейшем этот тип поглощения мы будем называть DGE-эффектом (Dubrovich, Grachev, Eroshenko). Аналогичное кольцо поглощения может быть вокруг протогалактик, наличие

которых уже при $z \sim 16$ было продемонстрировано недавно в наблюдениях телескопа им. Дж. Уэбба. Наблюдение этих протогалактик с помощью проекта «Метрон» стало бы важным дополнением к наблюдениям телескопа им. Дж. Уэбба и продвижением в сторону еще больших красных смещений.

Наблюдения флуктуаций реликтового излучения и распределения галактик свидетельствуют о том, что первичные космологические возмущения плотности имеют с высокой точностью гауссово распределение. Наиболее многочисленны среднеквадратичные возмущения и возмущения величины около 2σ , из которых образовались современные крупные галактики на красных смещениях $z \sim 1$.

В гауссовом распределении должны присутствовать и более редкие объекты, в том числе с массами около $10^{10} - 10^{12} M_{\odot}$, которые были сформированы в эпоху темных веков на $z \geq 10$, но в случае обычного спектра возмущений этих объектов на $z \geq 10$ должно быть очень мало. Тем не менее, телескоп им. Дж. Уэбба обнаружил присутствие массивных галактик на $z \geq 10$, которые должны были образоваться еще раньше — при $z \sim 16$ (Naidu et al., 2022; Donnan et al., 2023). Хотя этот вывод пока является косвенным, так как основан на прямых спектроскопических данных. Предлагались модификации спектра возмущений, способные объяснить наличие ранних галактик (Radmanabhan and Loeb, 2023). Даже независимо от теоретического объяснения, наблюдательный факт существования массивных протогалактик в эпоху темных веков на $z \sim 16$ дает уникальную возможность для их наблюдения по поглощению в линии 21 см.

Ранние протогалактики должны представлять собой достаточно плотные гало из темной материи. Если внутренняя область этих гало уже вириализовалась, то внешние области продолжают расширяться, следуя хаббловскому потоку. Существует радиус остановки, на котором происходит переход от расширения к сжатию. На этом радиусе должно происходить поглощение в линии 21 см нейтрального водорода (Vasiliev and Shchekinov, 2012) аналогично тому, как это происходит в гало вокруг ПЧД (Dubrovich et al., 2021). Мы полагаем, что в проекте «Метрон» можно будет наблюдать множество таких объектов, что даст ценную информацию о распределении возмущений плотности большой амплитуды (хвост гауссовского распределения или возможные отклонения от гауссовского закона). Также данные наблюдения представят информацию о состоянии космического газа в эпоху темных веков (температура, уровень ионизации и др.).

3. «КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ДИНОЗАВРЫ»

Другим вариантом являются объекты, которые были образованы из темной материи и барионного вещества вокруг сверхмассивных ПЧД, если они существовали во Вселенной. Текущие ограничения на возможное количество ПЧД во Вселенной в различных диапазонах масс приведены в обзоре Carr et al. (2021a). Ограничения даны в виде верхних пределов на долю ПЧД $f_{\text{РВН}}$ в составе темной материи. В интересующем нас диапазоне $10^9 - 10^{10} M_{\odot}$ существуют жесткие ограничения по μ -возмущениям реликтового излучения, связанные с диссипацией гауссовых возмущений (механизм Силка), из которых могли образоваться ПЧД. Однако эти ограничения применимы только в модели образования ПЧД из адиабатических возмущений плотности, тогда как при образовании по другим механизмам ПЧД столь больших масс могут быть вполне многочисленны. Динамические ограничения допускают величины $f_{\text{РВН}} \leq 10^{-5}$ (Carr et al., 2021a).

Carr et al. (2021b) исследовали ряд наблюдательных следствий и ограничений на ПЧД с очень большими массами $10^{11} - 10^{18} M_{\odot}$. Недавняя регистрация фона гравитационных волн с помощью тайминга пульсаров в проекте NANOGrav представила дополнительные свидетельства в пользу наличия популяции сверхмассивных черных дыр на больших красных смещениях (Agazie et al., 2023).

После перехода Вселенной на пылевидную стадию начинается быстрое натекание темной материи на ПЧД. Темная материя формирует вокруг ПЧД протяженное гало. Барионы изначально почти равномерно перемешаны с темной материей и также формируют гало. Отличие распределения плотности барионов от распределения темной материи можно ожидать только вблизи ПЧД, где велико энерговыделение от аккреции и поэтому происходит нагрев и перераспределение газа.

Основной интересной для телескопа проекта «Метрон» масштаб — это радиус остановки слоя темной материи (Bertschinger, 1985). Его смысл заключается в следующем. Сначала темная материя участвует в хаббловском расширении и удаляется от ПЧД. Но гравитационное поле ПЧД притягивает слои темной материи. В некоторый момент скорость удаления слоя от ПЧД становится нулевой, а затем слой движется в сторону ПЧД, где при его сжатии примерно в два раза происходит перемешивание и вириализация. С течением времени все более далекие слои останавливаются и начинают двигаться к ПЧД. Радиус остановки равен

$$r_s(z) = 22.4 \left(\frac{M_{\text{РВН}}}{2 \times 10^9 M_{\odot}} \right)^{1/3} \left(\frac{1+z}{21} \right)^{-4/3} \text{ кпк.} \quad (1)$$

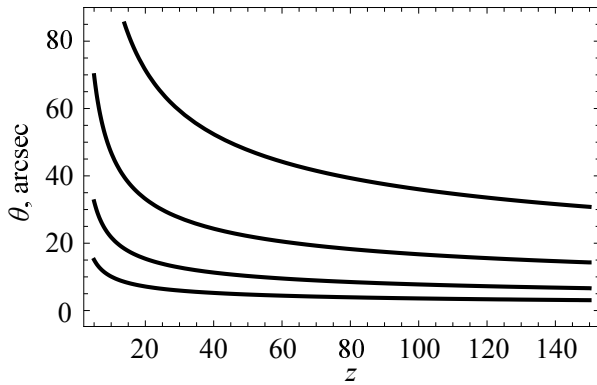


Рис. 1. Угловой размер радиуса остановки (1) в угл. сек. в зависимости от красного смещения z и масс ПЧД (снизу вверх) $M_{\text{ПЧД}} = 10^9 M_\odot, 10^{10} M_\odot, 10^{11} M_\odot, 10^{12} M_\odot$.

При красных смещениях $z \sim 10\text{--}20$ масса темной материи внутри этого радиуса примерно на два порядка превышает массу ПЧД (Dokuchaev and Eroshenko, 2001; 2003). Вблизи радиуса r_s можно ожидать сильное поглощение в линии 21 см нейтрального водорода по механизму DGE-эффекта (Dubrovich et al., 2021). Если вблизи ПЧД должна происходить ионизация, то на больших расстояниях степень ионизации спадает. Оценки Dubrovich et al. (2021) показали, что на радиусе остановки r_s водород в основном нейтрален из-за того, что r_s превышает так называемый радиус ионизации. Задача по более точному исследованию структуры «космологических динозавров» и вычислению радиуса ионизации поддержана грантом Российского научного фонда¹. Из выражения (1) следует, что угловой радиус кольца поглощения составляет $9''$ при $z \sim 20$ и массе ПЧД $2 \times 10^9 M_\odot$.

На рис. 1 приведен угловой размер радиуса остановки в зависимости от массы ПЧД и красного смещения.

Угловой радиус кольца поглощения $9''$ при $z \sim 20$ вполне соответствует современным техническим возможностям телескопа LOFAR (van Haarlem et al., 2013), но наблюдение ширины самого кольца потребует на порядок лучшего разрешения, которое станет доступно в проекте «Метрон». Кроме того, потребуются новые компьютерные алгоритмы поиска таких объектов, которые планируется разработать в рамках рассматриваемого проекта.

Dubrovich et al. (2021) рассчитали спектральное распределение и пространственное изменение яркости в линии 21 см атомарного водорода с

¹Проект № 23-22-00013 Российского научного фонда «Наблюдательные проявления первичных черных дыр в далеком космосе и в Солнечной системе», <https://rscf.ru/project/23-22-00013/>

использованием теории переноса излучения. Эти расчеты показали, что узкое и глубокое поглощение возникает в виде сферической оболочки вокруг ПЧД.

Приведем расчет яркостной температуры оболочки в линии 21 см водорода. В качестве примера мы рассчитываем распределения яркостной температуры по частотам и направлениям для оболочки на красном смещении $z = 20$. Из рассмотрения исключается центральная (горячая) часть оболочки с радиусом 5 кпк. В качестве внешнего радиуса берется $r_0 = 44.8$ кпк, что соответствует удвоенному радиусу остановки r_s . На $r = r_0$ условия в оболочке уже близки к условиям в невозмущенной среде. Оболочка находится в поле чернотельного изотропного фонового излучения, которое в современную эпоху называется космическим микроволновым фоновым излучением.

На рис. 2 приведено распределение яркостной температуры по видимому диску на центральной частоте линии $\nu = \nu_0$. Общее слабое падение яркости при переходе от края диска к центру определяется увеличением плотности вещества, а также уменьшением спиновой температуры, вызванным ростом вероятности гибели фотонов линии, который, в свою очередь, определяется резким увеличением коэффициента ударной деактивации q_{10} верхнего уровня перехода с ростом температуры газа при переходе от края оболочки к центру. Этот (последний) эффект определяет, в частности, глубину линии в случае статической оболочки (Dubrovich and Grachev, 2020).

Резкое уменьшение яркости в узкой области вблизи $p/r_0 = 0.5$ ($p \approx 22$ кпк) вызывается сильным поглощением излучения на луче зрения на расстояниях от центра, близких к радиусу остановки $r_s = 22.4$ кпк, где градиент лучевой скорости равен нулю. Согласно рис. 2, отношение ширины пространственного распределения интенсивности на уровне половины максимума к радиусу остановки составляет $r_s = 0.05$.

На рис. 3 приведены частотные профили линии 21 см для двух прицельных расстояний. Согласно рис. 3, глубина линии при $p = r_s$ равна примерно -0.4 К, а относительная ширина на уровне -0.2 К составляет $\Delta\nu/\nu \approx 2.6 \times 10^{-4}$.

Следует отметить, что центральной массой, вокруг которой образуется гало темной материи, может быть не только ПЧД, но и другие компактные массивные объекты. Примером таких объектов могут быть замкнутые петли космических струн (Berezinsky et al., 2011; Shlaer et al., 2012) или другие топологические дефекты.

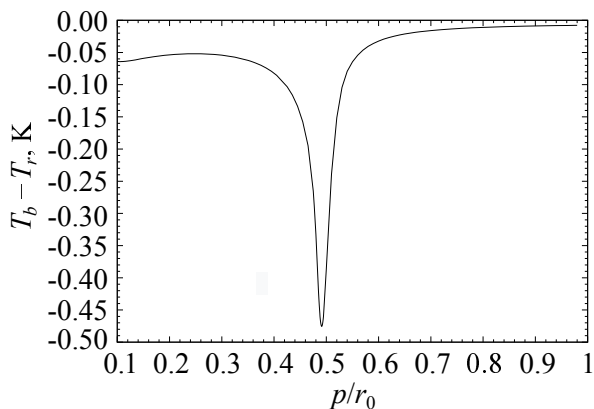


Рис. 2. Распределение яркости по видимому диску на частоте $\nu = \nu_0$ ($r_0 = 2r_s = 44.8$ кпк).

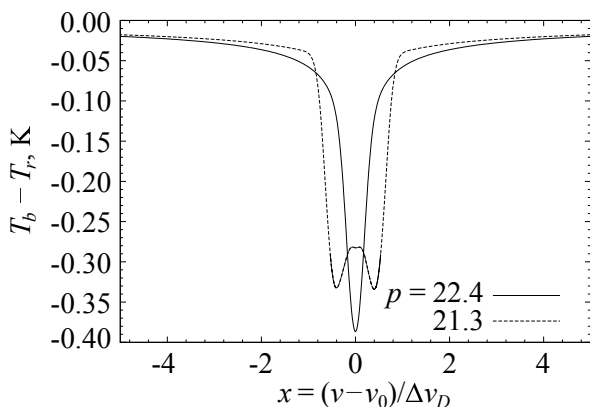


Рис. 3. Частотные профили линии для прицельных расстояний $p = 21.3$ и $p = r_s = 22.4$ кпк.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ВОЛНЕ 21 см

В 2018 г. телескопами EDGES было обнаружено аномальное поглощение в линии 21 см нейтрального водорода на красных смещениях $z = 15-20$ (Bowman et al., 2018). Измеренная глубина поглощения 500 мК примерно в два раза превышает теоретическую величину 230 мК. Статистическая значимость отклонения измеренной величины поглощения от рассчитанной составляет 3.8σ . Хотя в некоторых работах делается попытка объяснить результат EDGES погрешностями наблюдений, этот результат остается пока загадкой радиоастрономии. Для его объяснения предлагались модели охлаждения барионов за счет нового гипотетического взаимодействия их с частицами темной материи. Механизм поглощения может быть связан как с подобными новыми физическими явлениями, так и с недооценкой в стандартной картине каких-то важных факторов. В любом случае прояснение результатов EDGES представляет большой фундаментальный интерес.

Проект «Метрон» позволит с новой точки зрения исследовать проблему указанного аномального поглощения. Большое разрешение проекта «Метрон» поможет прояснить вопрос: является ли поглощение на 21 см однородным в масштабах кпк или оно неоднородное. Если будут обнаружены крупномасштабные неоднородности, то это существенно сузит круг моделей поглощения и, возможно, поможет в объяснении результата EDGES.

5. ПРОВЕРКА НОВЫХ КОСМОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Хотя в настоящее время доминирующей является стандартная Λ CDM-космологическая модель с инфляционной парадигмой, она нуждается в объяснении ряда наблюдательных фактов, таких как обилие ранних галактик, массивные затравки для ранних сверхмассивных черных дыр, проблема Hubble tension, происхождение фона длинноволновых гравитационных волн, галактики с дефицитом темной материи и др. Эти проблемы весьма сложны, но пока не представляются полностью необъяснимыми в рамках стандартной Λ CDM-модели. Тем не менее нельзя исключать и более существенных модификаций Λ CDM-модели в различных ее аспектах. Поскольку проект «Метрон» призван наблюдать процессы в ранней Вселенной, чувствительные к фоновой космологии и составу Вселенной, можно ожидать, что полученные в его рамках данные могут пролить свет на те или иные аспекты строения Вселенной.

О том, что история космологии еще далека от завершения, говорит, например, возродившийся интерес к циклическим или осциллирующим космологическим моделям и к моделям с «отскоком» (Brandenberger and Peter, 2017). Циклические модели в конформной парадигме со сменой космологических эонов развивали Gurzadyan and Penrose (2013). Этот класс моделей предсказывает существование кольцеобразных структур в распределении реликтового излучения, но подобные структуры пока достоверно не обнаружены.

Gorkavyi and Vasilkov (2018), Gorkavyi and Tyul'bashev (2021) развивают циклические космологические модели и делают многочисленные предсказания, которые могут соответствовать многим наблюдательным данным, полученным в последние годы. Одним из важных предсказаний является наличие популяций черных дыр, оставшихся от предшествующих эпизодов расширения Вселенной и переживших ее сжатие. В отличие от ПЧД, такие черные дыры были названы реликтовыми. В данной модели естественным образом возникает популяция ранних массивных галактик и квазаров

(с затравками из реликтовых черных дыр), объясняется сигнал NANOGrav (Gorkavyi, 2022) и ускоренное расширение Вселенной.

Упомянем, наконец, серию работ В. А. Рубакова и его коллег Ageeva et al. (2021; 2022), в которых были принципиально обоснованы и развиты новые космологические модели с «генезисом» в рамках теорий Хорндески и решена проблема сильной связи, когда эффективная планковская масса стремится к нулю в асимптотическом прошлом. В этих моделях возможен отскок с переходом на горячую стадию Большого взрыва как через промежуточную стадию инфляции, так и без инфляции.

Важным аспектом будущих космологических наблюдений может стать проявление микрофизики на космологических масштабах. В инфляционных сценариях такое проявление демонстрируют возмущения плотности и гравитационные волны, возникшие в малых масштабах, но затем растянутые до масштабов галактик, скоплений и сверхскоплений. В новых космологических моделях, в зависимости от природы темной материи и других факторов, микрофизика может проявиться новым интересным образом. Например, есть (пока еще очень предварительные) указания на волновую природу темной материи, полученные из наблюдения гравитационного линзирования (Amruth et al., 2023).

6. МАГНИТОСФЕРЫ ЗВЕЗД И ЭКЗОПЛАНЕТ

Источниками радиоизлучения метрового диапазона являются также звезды. Регистрация их излучения важна для понимания процессов в магнитосферах. Причем особенно мощную вспышечную активность, которая может сопровождаться радиовсплесками, показывают карликовые звезды.

Одним из научных прорывов в астрономии в последние годы стала регистрация (к настоящему времени уже тысяч) планет вокруг других звезд — экзопланет. Наблюдение экзопланет имеет большое мировоззренческое значение, особенно в контексте проблемы происхождения жизни во Вселенной. Возможности оптических и ИК-наблюдений, однако, весьма ограничены. Изучение экзопланет в метровом радиодиапазоне с большой чувствительностью стало бы важным дополнением к другим методам, а также, возможно, представило бы новые уникальные результаты. Важно отметить, что первое наблюдение излучения экзопланеты (в системе звезды τ Волопаса) было выполнено именно в радиодиапазоне наземным телескопом LOFAR (Turner et al., 2021), что указывает на перспективность радионаблюдений.

В метровом диапазоне можно ожидать сильного излучения магнитосфер экзопланет и, возможно,

искусственных источников радиоизлучения. Мощность радиоизлучения экзопланет можно оценить на основе данных по радиоизлучению Юпитера. Как известно, Юпитер в метровом диапазоне является самым мощным источником после Солнца. Излучение в метровом диапазоне имеет вспышечный характер с типичной длительностью всплесков 0.1–1 с и величиной около 10^6 Ян в максимуме. Для экзопланет в нашей Галактике, находящихся на типичном расстоянии порядка 1 кпк, аналогичный сигнал составит около 10^{-9} Ян. На меньших расстояниях поток излучения больше, т. к. он изменяется по закону $1/r^2$. Также можно ожидать, что у некоторых экзопланет-гигантов магнитосферы более мощные и вспышки сильнее на несколько порядков величины.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Телескоп проекта «Метрон» с планируемыми характеристиками будет способен регистрировать протяженные объекты, такие как ранние протогалактики и «космологические динозавры», которые, возможно, существовали в эпоху темных веков, у которых на основании DGE-эффекта формируются области поглощения со значительной глубиной линии. Проект «Метрон» позволит исследовать аномальное поглощение в линии 21 см нейтрального водорода и, вероятно, прояснить его природу. Еще одной целью будет изучение магнитосфер звезд и экзопланет. Телескопы проекта «Метрон» при их размещении на Земле позволят также изучать ряд аспектов физики ионосферы и метеорных явлений.

Из уже существующих радиотелескопов конкурентом нашего проекта является низкочастотный массив дипольных антенн LOFAR (Low-Frequency Array), работающий в диапазоне 10–240 МГц (de Gasperin et al., 2023; van Haarlem et al., 2013). В проекте «Метрон» планируется достичь значительно лучшего углового разрешения и чувствительности за счет создания больших антенных массивов, работающих в режиме интерферометра. Из проектов, планируемых к реализации, прямым конкурентом можно считать SKA (Square Kilometre Array), а точнее его низкочастотную подсистему SKA-low array, перекрывающую диапазон 50–350 МГц. В проекте «Метрон» мы планируем сконцентрироваться только на низкочастотном (метровом) диапазоне, что значительно удешевляет весь проект, и создать антенные массивы этого диапазона, сопоставимые или более масштабные по своим возможностям, чем у SKA-low array.

В трех последующих статьях мы осветим технические характеристики антенн и аппаратуры проекта «Метрон» в зависимости от мест размещения интерферометрических массивов. Во второй статье

будет описана конструкция телескопов, в третьей работе будет обсуждаться аппаратурная часть и в последней статье будут описаны методики обработки данных — очистка их от шумов и выделение полезной астрофизической информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам статьи за полезные замечания и предложения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта РФФ № 23-62-10013.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- G. Agazie, A. Anumarlapudi, A. M. Archibald, et al., *Astrophys. J.* **951** (1), id. L8 (2023). DOI:10.3847/2041-8213/acdac6
- Y. Ageeva, P. Petrov, and V. Rubakov, *Physical Review D* **104** (6), article id. 063530 (2021). DOI:10.1103/PhysRevD.104.063530
- Y. Ageeva, P. Petrov, and V. Rubakov, *arXiv e-prints astro-ph/2207.04071* (2022). DOI:10.48550/arXiv.2207.04071
- A. Amruth, T. Broadhurst, J. Lim, et al., *Nature Astronomy* **7**, 736 (2023). DOI:10.1038/s41550-023-01943-9
- V. A. Berezin, V. A. Kuzmin, and I. I. Tkachev, *Physics Letters B* **120** (1-3), 91 (1983). DOI:10.1016/0370-2693(83)90630-5
- V. S. Berezinsky, V. I. Dokuchaev, and Y. N. Eroshenko, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2011** (12), id. 007 (2011). DOI:10.1088/1475-7516/2011/12/007
- E. Bertschinger, *Astrophys. J. Suppl.* **58**, 39 (1985). DOI:10.1086/191028
- J. D. Bowman, A. E. E. Rogers, R. A. Monsalve, et al., *Nature* **555** (7694), 67 (2018). DOI:10.1086/191028
- R. Brandenberger and P. Peter, *Foundations of Physics* **47** (6), 797 (2017). DOI:10.1007/s10701-016-0057-0
- B. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda, and J. Yokoyama, *Reports on Progress in Physics* **84** (11), id. 116902 (2021a). DOI:10.1088/1361-6633/ac1e31
- B. Carr, F. Kühnel, and L. Visinelli, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **501** (2), 2029 (2021b). DOI:10.1093/mnras/staa3651
- B. J. Carr, *Astrophys. J.* **201**, 1 (1975). DOI:10.1086/153853
- S. Comerón, I. Trujillo, M. Cappellari, et al., *Astron. and Astrophys.* **675**, id. A143 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346291
- P. de Bernardis, V. Dubrovich, P. Encrenaz, et al., *Astron. and Astrophys.* **269** (1-2), 1 (1993).
- F. de Gasperin, H. W. Edler, W. L. Williams, et al., *Astron. and Astrophys.* **673**, id. A165 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202245389
- V. I. Dokuchaev and Y. N. Eroshenko, *Astronomy Letters* **27** (12), 759 (2001). DOI: 10.1134/1.1424357
- V. I. Dokuchaev and Y. N. Eroshenko, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **22** (4-5), 727 (2003). DOI:10.1134/1.1424357
- A. Dolgov and J. Silk, *Physical Review D* **47** (10), 4244 (1993). DOI:10.1103/PhysRevD.47.4244
- C. T. Donnan, D. J. McLeod, J. S. Dunlop, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **518** (4), 6011 (2023). DOI:10.1093/mnras/stac3472
- V. K. Dubrovich, *Sov. Astron. Lett.* **3**, 128 (1977).
- V. K. Dubrovich, *arXiv e-prints astro-ph:1805.04430* (2018). DOI:10.48550/arXiv.1805.04430
- V. K. Dubrovich, Y. N. Eroshenko, and S. I. Grachev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503** (2), 3081 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab689
- V. K. Dubrovich and S. I. Glazyrin, *arXiv e-prints astro-ph:1208.3999* (2012). DOI:10.48550/arXiv.1208.3999
- V. K. Dubrovich and S. I. Grachev, *Astronomy Letters* **45** (11), 701 (2020). DOI:10.1134/S1063773719110021
- V. K. Dubrovich and A. A. Lipovka, *Astron. and Astrophys.* **296**, 301 (1995).
- M. Forconi, Ruchika, A. Melchiorri, et al., *arXiv e-prints astro-ph:2306.07781* (2023). DOI:10.48550/arXiv.2306.07781
- N. Gorkavyi, *New Astronomy* **91**, article id. 101698 (2022). DOI:10.1016/j.newast.2021.101698
- N. Gorkavyi and A. Vasilkov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476** (1), 1384 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty335
- N. N. Gorkavyi and S. A. Tyul'bashev, *Astrophysical Bulletin* **76** (3), 229 (2021). DOI:10.1134/S199034132103007X
- V. G. Gurzadyan and R. Penrose, *European Physical Journal Plus* **128**, article id. 22 (2013). DOI:10.1140/epjp/i2013-13022-4
- S. Hawking, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **152**, 75 (1971). DOI:10.1093/mnras/152.1.75
- M. Y. Khlopov and A. G. Polnarev, *Physics Letters B* **97** (3-4), 383 (1980). DOI:10.1016/0370-2693(80)90624-3
- R. P. Naidu, P. A. Oesch, P. van Dokkum, et al., *Astrophys. J.* **940** (1), id. L14 (2022). DOI:10.3847/2041-8213/ac9b22
- H. Padmanabhan and A. Loeb, *Astrophys. J.* **953** (1), id. L4 (2023). DOI:10.3847/2041-8213/acea7a

35. J. R. Pritchard and A. Loeb, *Reports on Progress in Physics* **75** (8), id. 086901 (2012). DOI:10.1088/0034-4885/75/8/086901
36. S. G. Rubin, A. S. Sakharov, and M. Y. Khlopov, *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* **92** (6), 921 (2001). DOI:10.1134/1.1385631
37. B. Shlaer, A. Vilenkin, and A. Loeb, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2012** (5), id. 026 (2012). DOI:10.1088/1475-7516/2012/05/026
38. B.-Y. Su, N. Li, and L. Feng, *arXiv e-prints astro/ph:2306.05364* (2023). DOI:10.48550/arXiv.2306.05364
39. J. D. Turner, P. Zarka, J.-M. Grießmeier, et al., *Astron. and Astrophys.* **645**, id. A59 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/201937201
40. M. P. van Haarlem, M. W. Wise, A. W. Gunst, et al., *Astron. and Astrophys.* **556**, id. A2 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201220873
41. D. A. Varshalovich and V. K. Khersonskii, *Soviet Astronomy Letters* **3**, 155 (1977).
42. E. O. Vasiliev and Y. A. Shchekinov, *Astronomy Reports* **56** (2), 77 (2012). DOI:10.1134/S1063772912020096
43. Y. B. Zel'dovich, *Soviet Astronomy Letters* **4**, 88 (1978).
44. Y. B. Zel'dovich and I. D. Novikov, *Sov. Astron.* **10**, 602 (1967).

The Metron Project. I. The Metron Project Science Program

V. K. Dubrovich¹, S. I. Grachev², Yu. N. Eroshenko³, S. I. Shirokov¹, and G. G. Valyavin⁴

¹St. Petersburg Branch of Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

³Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

⁴Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

In this paper, the first in a series of four articles, the scientific goals of the Metron project are highlighted, and the characteristics of the cosmic objects available for study within its framework are provided. The Metron interferometer radio telescope should include arrays of meter-range dipole antennas placed on Earth, in outer space, or on the far side of the Moon (or a combination of these options). Working in the meter range will enable the study of the so-called cosmological epoch of the “Dark Ages”, which is challenging to observe but highly interesting for understanding the origin of the first stars, galaxies, and black holes, as well as for the search for new cosmological objects and processes. One possibility is to search for absorption in the 21-cm line within the extended halos around early protogalaxies and supermassive primordial black holes, whose existence is predicted in a number of models. Another goal of Metron may be to clarify the anomalous absorption in the 21-cm line previously detected by the EDGES telescopes and to observe radio emissions from the magnetospheres of stars and exoplanets. The Metron project aims to achieve unprecedented resolution in the meter range, which is expected to yield new world-class scientific results. Meter-range antennas and receivers are relatively simple and inexpensive, and the construction of interferometric arrays from them can be accomplished in a relatively short period of time.

Keywords: *quasars: supermassive black holes—radio lines: galaxies—radio lines: planetary systems*