

УДК 524.38, 52-17, 524.8

© Сажина О. С., Моисеев Ю. А., 2025

НОВЫЕ СТРАТЕГИИ НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО ПОИСКА НЕТРИВИАЛЬНЫХ СТРУКТУР ВО ВСЕЛЕННОЙ *Сажина О. С.^{a,1}, Моисеев Ю. А.^{a,2}^a Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова, Университетский пр., д. 13, 119234, Россия.

В современной астрофизике и космологии становится особенно важным поиск нетривиальных структур, в особенности тех, которые приобретают статус классических из-за их значимости для координации между теорией и современными наблюдениями. Гравитационная теория Эйнштейна предсказывает структуры с нетривиальной топологией: наиболее перспективными из них являются кротовые норы (КТ) и одиночные космические струны (КС). В статье обсуждается эффект, обусловленный проходимостью КТ, а именно: звезды, расположенные на другой стороне горловины КН, могут оказывать гравитационное воздействие на звезды, находящиеся со стороны наблюдателя. КС возникают при фазовых переходах в вакууме, а также в виде более экзотических структур, подобных КС, которые могут образовываться в результате эволюции многомерных пространств, которые могли иметь место в ранней, доинфляционной Вселенной. Существование дефектов в виде КС в настоящее время подтверждается рядом косвенных наблюдений; в статье обсуждается систематическая стратегия поиска КС. Наблюдательная идентификация принципиально новых объектов стала возможной благодаря созданию новых теоретических моделей и улучшенному качеству наблюдений, а также критически важна для понимания геометрии Вселенной.

Ключевые слова: космические струны, гравитационное линзирование.**NEW STRATEGIES FOR THE OBSERVATIONAL SEARCH FOR NONTRIVIAL STRUCTURES IN THE UNIVERSE**Sazhina O. S.^{a,1}, Moiseev Yu. A.^{a,2}^a SAI Lomonosov MSU, Universitetskiy pr., 13, 119234, Russia.

In modern astrophysics and cosmology, it is important to search for non-trivial structures that acquire the status of classical ones due to their relevance for coordinating theory and observations. The Einstein gravitational theory predicts structures of nontrivial topology: the most promising are wormholes (WH) and solitary cosmic strings (CS). The effect due to the traversability of WH is discussed: stars on the other side of the neck exert a gravitational disturbance on the stars from the observer's side. CS arise during vacuum phase transitions, as well as more exotic CS-like structures, the result of the evolution of multidimensional spaces of the pre-inflationary Universe. Defects in the form of CS are confirmed by a number of indirect observations; the systematic strategy for CS search is discussed. The observational identification of fundamentally new objects is made possible by a new theory and improved observation quality and is critically important for understanding the geometry of the Universe.

Keywords: cosmic strings, gravitational lensing.

PACS: 04.20.-q, 04.40.Dg, 04.20.Gz

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2025.2.134-139

* Моисеев Ю. А. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

¹E-mail: cosmologia@yandex.ru²E-mail: moiseev.ia20@physics.msu.ru

Введение

В современной космологии и астрофизике все более важную роль начинает играть поиск экзотических структур во Вселенной: топологических дефектов, косвенных проявлений многомерности пространства-времени, а также кротовых нор (КН), черных дыр (ЧД), сверхмассивных ЧД (СМЧД) и первичных ЧД широкого диапазона масс. Такой интерес, с одной стороны, обусловлен существующими пробелами в понимании единой картины физических взаимодействий и структуры скрытых секторов материи: темной материи и темной энергии, с другой стороны, такие исследования активно поддерживаются современной математической теорией. Наконец, современные наблюдательные данные выявляют противоречия Стандартной космологической модели с общей динамикой расширения Вселенной (проблема Hubble tension), а также с эволюцией ранних объектов во Вселенной (проблема возраста шаровых скоплений), что также может косвенно указывать на наличие экзотических структур как неучтенного фактора эволюции ранней Вселенной. В ряду всех теоретически возможных экзотических структур, не противоречащих текущим наблюдательным данным, широко поддерживаемых теорией и значимых на космологических временах и масштабах, особое место занимают космические струны (КС).

В данной статье на основе предыдущих исследований авторов впервые формулируются основные направления поиска таких нетривиальных структур как КС и КН.

В первом разделе обсуждаются новые возможности и перспективы комбинированного поиска КС, обладающих наклоном и кривизной, путем совместного анализа анизотропии реликтового излучения и характерных гравитационно-линзовых пар. Указывается важность нового понятия критического угла искривления КС, при котором КС не формирует гравитационно-линзовые пары. Обсуждается замена традиционного поиска цепочек гравитационно-линзовых пар на кластеры таких пар в связи с возможным сильным наклоном КС относительно луча зрения.

Во втором разделе обсуждается простейший метод возможного обнаружения проходимых КН на основе гравитационного влияния возмущающих объектов (звезд) по ту сторону горловины на движения наблюдаемых объектов (звезд). Рассматриваются сверхмассивная черная дыра в центре Галактики как кандидат в КН и ряд звезд, обращающихся по эллиптическим орбитам вокруг нее. Рассматриваются также пары, состоящие из ЧД, которая выполняет роль кандидата в КН, и звезды (другой ЧД, нейтронной звезды, звезды класса О или класса В). Поскольку текущая точность определения ускорения звезды в перицентре орбиты двойной системы в астрометрическом проекте Gaia сопоставима с предсказываемой моделью расчетной величиной искомого гравитационного возмущения, рассматриваемая простейшая модель может послужить хорошим инструментом для обнаружения КН. В данной работе указываются перспективы такого подхода.

1. Перспективы поиска КС общего положения

Очевидно, модель КС, обладающая наклонами и кривизной, является более реалистичной, чем традиционно рассматриваемая простейшая модель прямой КС, расположенной перпендикулярно лучу зрения (лучу, соединяющему наблюдателя и фоновую линзируемую галактику).

Согласно полученным в работе [1] результатам, замена простейшей модели на более сложную привносит ряд дополнительных эффектов, которые при дальнейшем рассмотрении оказываются критически важными для планирования будущих наблюдательных поисков этих экзотических объектов. Так, в силу того, что при некотором критическом угле искривления КС второе изображение фонового источника не формируется, приобретают разумное объяснение отсутствие позитивных результатов в попытке массово обнаружить такие события. Кроме того, особую актуальность приобретает обязательное комбинированное исследование кандидатов в КС различными независимыми наблюдательными методами.

Стратегия поиска КС может быть сформулирована следующим образом.

1. Поиск характерных ступенчатых структур в данных анизотропии реликтового излучения пу-

тем обработки радиокарт WMAP и Planck с помощью ступенчатого фильтра. Данный метод обусловлен существенной одномерностью КС и основан на общем физическом свойстве КС генерировать эффект Доплера при движении фотонов от поверхности последнего рассеяния к наблюдателю.

2. Все полученные таким образом кандидаты в КС должны быть проверены оптическими методами, а именно, с помощью поиска характерных гравитационно-линзовых изображений.
3. При поиске гравитационно-линзовых изображений следует принимать во внимание, что они образуются не протяженными цепочками, а могут перемежаться областями, не содержащими таких событий, поскольку при определенных изгибах КС линзирования фоновых объектов не происходит.
4. Также при поиске гравитационно-линзовых изображений предпочтительнее следует искать их кластеры, но не протяженные наборы пары, поскольку наклонные КС будут порождать именно компактные группы таких изображений.
5. Все найденные таким образом гравитационно-линзовые изображения должны получить подтверждения своей гравитационно-линзовой природы несколькими способами: (а) проверка статистической идентичности красных смещений компонентов пары, (б) проверка статистической идентичности спектров компонент пары совместно с анализом фотометрической идентичности во всех доступных фильтрах.
6. Важно впервые обратить внимание на тот факт, что гравитационно-линзовые пары, порождаемые одной и той же КС, могут обладать разными угловыми расстояниями между компонентами, поскольку это расстояние зависит также и от расстояний “наблюдатель – КС – фоновая галактика”.
7. Важно впервые обратить внимание на тот факт, что КС с необходимостью должна обладать большим, чем традиционно рассматриваемые, набором свободных параметров, поскольку данная стратегия не содержит априорных предположений: (а) о топологической природе КС, (б) о наличии сетей КС, (в) об ограничениях на скорости КС. Следует принять свободными параметрами натяжение КС, угол наклона КС, поскольку наблюдательные данные дают ограничения только на совокупности параметров струны: так, угловое расстояние между компонентами гравитационно-линзовых пар определяется расстояниями “наблюдатель – КС – фоновая галактика”, скоростью и натяжением КС, а генерируемая КС анизотропия реликтового излучения, на которую имеются наблюдаемые ограничения, есть функция скорости и натяжения, но не каждого параметра по отдельности.

2. Поиск кротовых нор

КН, представляющие собой пространственно-временные структуры с нетривиальной топологией, естественным образом возникают в различных теориях гравитации. Задача поиска КН во Вселенной становится особенно актуальной на фоне достоверного обнаружения ЧД широкого спектра масс в различных астрофизических системах.

В работе [2] был проведен анализ возможности обнаружения КН методами наблюдательной астрономии путем обнаружения дополнительного возмущающего ускорения компонента астрофизической системы. Величина этого дополнительного ускорения

$$\Delta a = \mu \left(\frac{R}{r_p} - \frac{R}{r_a} \right) \cdot \frac{1}{r_1^2}, \quad (1)$$

зависит от массы КН μ , радиуса ее горловины R , радиального удаления наблюдаемого объекта от горловины КН r_1 , а также периферического и апоцентрического расстояния возмущающего объекта по ту сторону горловины r_p и r_a .

В рассмотренной модели существенным преимуществом является независимость эффекта от конкретного выбора метрики проходимой КН. Наличие возмущающего воздействия обеспечивается самим фактом проходимости КН. Точный вид ее метрики сделает рассмотрение модельно зависимым, ограничивая возможность оценки ожидаемой величины эффекта.

В качестве кандидатов в КН рассматривались известные ЧД в широких системах с наблюдаемыми звездами на их орбитах. Помещая на стороне 2 возмущающий объект (звезду), варьируя его массу и расстояние до горловины КН, были получены оценки величины гипотетического возмущающего ускорения наблюдаемой звезды на стороне 1 (Рис. 1). Величина возмущающего ускорения,

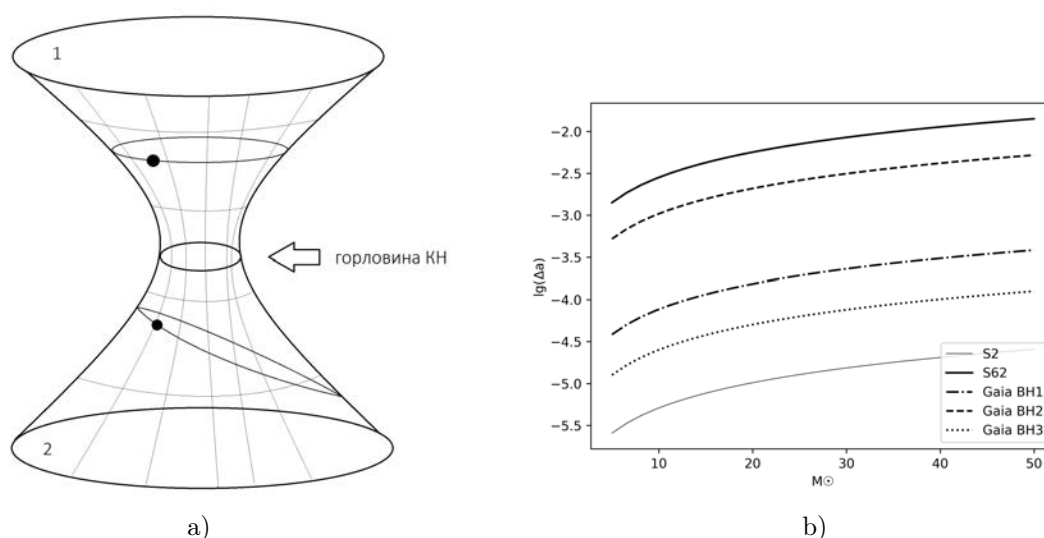


Рис. 1. а) Наглядное представление положения наблюдаемой звезды и возмущающего объекта на сторонах 1 и 2 относительно КН, б) Результаты моделирования возмущающего ускорения в зависимости от массы возмущающего объекта для различных систем

оцененная для реальных объектов, варьируется от 10^{-4} до 10^{-2} см/с², что в будущем при увеличении точности наблюдений позволит выявить искомый эффект.

Отдельно подчеркнем, что для звезд в галактическом центре эффект возмущающего ускорения преобладает над основными конкурирующими эффектами (возмущением от окружающих звезд и от гало темной материи), а точность определения ускорения звезды в перигеи орбиты двойной системы по данным Gaia, оцененная как функция ошибок наблюдения параметров двойной системы (масс каждой компоненты, эксцентриситета орбиты, периода), уже сопоставима с предсказываемой моделью расчетной величиной искомого эффекта.

Стратегия поиска КН может быть сформулирована следующим образом.

1. Систематическое построение каталога пар «ЧД звездной массы – звезда», «СМЧД – звезда». ЧД и СМЧД следует считать кандидатами в проходимые КН; звезды следует отбирать по принципу определяемых с наименьшими ошибками величин скорости и ускорения, а также не подверженных значительным аккреционным эффектам.
2. Поиск в данных по скоростям отобранной совокупности звезд, вращающихся вокруг кандидатов в КН, характерной периодической компоненты скорости с целью обнаружения дополнительного ускорения, появляющегося за счет наличия движущегося объекта (звезды) по другую сторону КН по орбите, отличной от круговой.
3. Расчет релятивистских красных смещений для отобранной совокупности звезд для искомого эффекта и его сравнение с соответствующим эффектом в отсутствие КН.

Заключение

В данной работе подводится итог серии исследований авторов по поиску КС и КН, впервые сформулированы основные направления будущих наблюдательных поисков, основанных на (а) рассмотрении единичных КС общего положения с набором дополнительных свободных параметров, а также (б) основанных на рассмотрении наиболее общих модельно независимых свойств проходимых КН.

Дальнейшая стратегия поиска нетривиальных структур во Вселенной с необходимостью должна включать следующие этапы.

1. Исследование динамических эффектов в отобранных астрофизических системах, а именно: ряд объектов в широких двойных системах из данных миссии Gaia (2024), содержащих темные объекты. В рамках этой задачи планируется организация наблюдательной программы на телескопе БТА САО РАН, как в оптическом диапазоне, так и в режиме спектроскопических измерений. Из выделенных объектов системы Gaia DR3 4318465066420528000 (0.59 кпк) и Gaia DR3 4373465352415301632 (0.48 кпк) доступны для наблюдений в условиях БТА и представляют собой перспективные кандидаты для составления заявки, организации, проведения наблюдательной программы и обработки результатов.
2. Расчет и моделирование стохастических гравитационных полей с целью учета их влияния на гравитационные возмущения, которые объект (звезда), находящийся по другую сторону горловины проходимой кротовой норы, будет оказывать на объект (звезду), находящуюся со стороны наблюдателя.
3. Планирование заявок на наблюдения на телескоп НСТ (республика Индия) с целью исследования кластеров гравитационно-линзовых событий, ранее найденных членами коллектива в поле прохождения предполагаемого кандидата в КС (объект CSc-1). Также планируется аналогичная заявка на телескоп DOT (республика Индия) с последующей обработкой и интерпретацией наблюдательных данных.

Принимая во внимание тот факт, что кандидаты в КС были найдены по анализу анизотропии реликтового излучения [3], указанным обстоятельством можно объяснить отсутствие массового явления ГЛ на КС. КС с изгибом, очевидно, является более реалистичным объектом, чем прямая КС, перпендикулярная лучу зрения, которая должна производить многочисленные протяженные цепочки ГЛ. Кроме того, появление дополнительного свободного параметра (угла наклона КС) приводит к тому, что при сопоставлении этой модели с наблюдательными данными линейная плотность КС оказывается очень большой, на 4 порядка превышающей известные ограничения, следующие из априорных предположений о топологической природе КС и наличии их сетей в ранней Вселенной. Ожидаемые “тяжелые” КС не лежат в парадигме масштабно-инвариантной сети топологических КС, но являются одиночными нетопологическими КС, которые могли бы сформироваться в доинфляционную или инфляционную эпоху и проявлять себя как первые свидетельства многомерности ранней планковской Вселенной.

В связи с прогрессом наблюдений в гравитационно-волновом канале и массовым обнаружением таких объектов как черные дыры, возникает задача различения этих объектов от кротовых нор (КН), которые наравне с черными дырами предсказываются ОТО, и предложенный авторами метод, будучи модельно независимым, будет способствовать получению ограничений на существование проходимых КН.

Список литературы

1. Bulygin I., Sazhin M., Sazhina O. Theory of gravitational lensing on a curved cosmic string. *EPJC*, 2023, vol. 83, p. 844.

2. Моисеев Ю. А., Сажина О. С. Методы и перспективы наблюдательного поиска кротовых нор в астрофизических системах. *ЖЭТФ*, 2025, том 167, вып. 2, стр. 205–219.
3. Sazhina O.S., Scognamiglio D., Sazhin M.V., Capaccioli M. Optical analysis of a CMB cosmic string candidate. *MNRAS*, 2019, vol. 485, no. 2, pp. 1876–1885.

References

1. Bulygin I., Sazhin M., Sazhina O. Theory of gravitational lensing on a curved cosmic string. *EPJC*, 2023, vol. 83, p. 844.
2. Moiseev Iu. A., Sazhina O. S. Metody i perspektivy nablyudatel'nogo poiska krotovyh nor v astrofizicheskikh sistemah. *JETP*, 2025, vol. 167, no. 2, pp. 205–219. (in Russ.).
3. Sazhina O.S., Scognamiglio D., Sazhin M.V., Capaccioli M. Optical analysis of a CMB cosmic string candidate. *MNRAS*, 2019, vol. 485, no. 2, pp. 1876–1885.

Авторы

Сажина Ольга Сергеевна, д.ф.-м.н., в.н.с., государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова, Университетский пр., д. 13, 119234, Россия.
E-mail: cosmologia@yandex.ru

Моисеев Юрий Александрович, ведущий программист, государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ им. М. В. Ломоносова, Университетский пр., д. 13, 119234, Россия
E-mail: moiseev.ia20@physics.msu.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сажина О. С., Моисеев Ю. А. Новые стратегии наблюдательного поиска нетривиальных структур во Вселенной. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2025. № 2. С. 134–139.

Authors

Sazhina Olga Sergeevna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading researcher, SAI Lomonosov MSU, Universitetskiy pr., 13, 119234, Russia.
E-mail: cosmologia@yandex.ru

Moiseev Iurii Aleksandrovich, Leading programmer, SAI Lomonosov MSU, Universitetskiy pr., 13, 119234, Russia.
E-mail: moiseev.ia20@physics.msu.ru

Please cite this article in English as:

Sazhina O.S., Moiseev Iu. A. New strategies for the observational search for nontrivial structures in the Universe. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2025, no. 2, pp. 134–139.