

УДК 52-17, 524.8

© Сажина О. С., 2025

КОСМИЧЕСКИЕ СТРУНЫ: ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ СОВРЕМЕННОГО ПОИСКА

Сажина О. С.^{a,1}

^a Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова, Университетский пр., д. 13, 119234, Россия.

В работе рассматривается обобщенная модель гравитационного линзирования (ГЛ) фоновых объектов (галактик) на космических струнах (КС). КС представляют собой существенно одномерные объекты космологических масштабов, которые могут иметь как топологическую природу, так и оказаться следствиями взаимодействий многомерных пространств в ранней доинфляционной Вселенной. КС на текущий момент исследований достоверно не обнаружены. Метод поиска характерных событий ГЛ является одним из ключевых методов поиска таких объектов. В работе обсуждается ГЛ на КС общего положения, в том числе, обладающих значительным наклоном относительно луча зрения, соединяющего наблюдателя и фоновый объект, а также обладающих искривлением в плоскости, перпендикулярной лучу зрения. На основе моделирования делаются выводы, что стратегия поиска цепочек ГЛ событий может быть пересмотрена в пользу поиска кластеров таких событий. Также обсуждается вопрос влияния геометрии КС на количество ГЛ событий: так, при достаточно большом искривлении, ГЛ пары не образуются. Результаты моделирования подтверждаются наблюдательными данными. Также указана возможность существования КС существенно больших напряжений, чем традиционно рассматривается в рамках модели сетей КС.

Ключевые слова: Космические струны, гравитационное линзирование.

PROBLEMS AND METHODS OF MODERN SEARCH FOR COSMIC STRINGS

Sazhina O. S.^{a,1}

^a SAI Lomonosov MSU, Universitetskiy pr., 13, 119234, Russia.

The paper considers a generalized model of gravitational lensing (GL) of background objects (galaxies) on cosmic strings (CS). CS are essentially one-dimensional objects of cosmological scales, which can have both a topological nature and be the consequences of interactions of multidimensional spaces in the early pre-inflationary Universe. CS have not been reliably detected at the current moment. The method of searching for special GL events is one of the key methods of searching for such objects. The paper discusses lensing on CS of a general position, including those with a significant inclination relative to the line of sight connecting the observer and the background object, as well as those with a curvature in the plane perpendicular to the line of sight. Based on the modeling, it is concluded that the strategy of searching for chains of GL events can be revised in favor of searching for clusters of such GL events. The influence of CS geometry on the number of GL events is also discussed: for example, with a sufficiently large curvature, GL pairs do not form. The simulation results are confirmed by observational data. The possibility of the existence of CS with significantly higher tensions than is traditionally considered in the framework of the CS network model is also indicated.

Keywords: Cosmic strings, gravitational lensing.

PACS: 04.20.?q, 04.20.Gz

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2025.1.145-149

¹E-mail: cosmologia@yandex.ru

Введение

В современной астрофизике и космологии большую роль начинает играть поиск нетривиальных структур, которые приобретают статус классических из-за их значимости для согласования теории и наблюдений. К таким объектам относятся:

- черные дыры (ЧД);
- первичные ЧД (сверхмассивные и промежуточных масс), которые объясняют формирование звезд и галактик в ранней Вселенной, согласовывая данные космических телескопов “Хаббл” и “Джеймс Уэбб” со Стандартной космологической моделью;
- кротовые норы;
- космологические топологические дефекты, которые, согласно общепринятым представлениям, возникают при вакуумных фазовых переходах;
- более экзотические структуры, являющиеся результатом эволюции многомерных пространств доинфляционной Вселенной ($F-$, $D-$ струны).

Стандартная космологическая модель ΛCDM не решает проблему феномена темной энергии: остро стоит вопрос о рассогласовании значений современного параметра Хаббла на основе данных из ближней и ранней Вселенной (Hubble tension). Очевидно, эта проблема тесно связана с пробелами в понимании природы темной энергии, а фазовые переходы ранней Вселенной напрямую связаны со свойствами темной энергии.

Дефекты в виде космических струн (КС) — существенно одномерных объектов космологических масштабов — неизменно присутствуют в теоретических моделях ранней Вселенной в течение последних 50 лет и не противоречат всем современным наблюдательным данным. Более того, существование единичных КС подтверждается рядом косвенных наблюдений:

- наличием компоненты стохастического гравитационно-волнового фона с сигнатурой, нехарактерной для слияния двойных объектов и не имеющей удовлетворительной интерпретации в рамках известных астрофизических процессов;
- КС обеспечивают удовлетворительное описание аномалий в спектре мощности реликтового излучения на больших угловых масштабах;
- КС были обнаружены в данных анизотропии реликтового излучения, один из кандидатов в КС (CSc-1) был подтвержден независимым оптическим методом по избытку гравитационно-линзовых пар.

Ввиду сказанного представляется особенно важным улучшить стратегию поиска, рассматривая, с одной стороны, наиболее общие свойства КС, которые на зависели бы от их конкретной модели (топологического или нетопологического происхождения, зарядов, наличия локальных петель, кинков, каспов и др.), а с другой стороны, предполагая больше свободных параметров в их геометрии.

1. Анализ КС общего положения

Очевидно, модель КС, обладающая изгибами и наклонами, является более реалистичной, чем модель прямой КС, расположенной перпендикулярно лучу зрения (лучу, соединяющему наблюдателя и фоновую линзирующую галактику).

В работе [1] было рассмотрено две отдельные модели КС:

- КС, имеющая один изгиб в плоскости (моделируемый кривой Безье), перпендикулярной лучу зрения, когда линзируемые изображения строятся численно, точка за точкой; в этом случае задачу построения изображений не удается решить аналитически, потому что изображения определяются геодезическими фотонами, траектории которых не могут быть рассмотрены в рамках приближения геометрической оптики и конического пространства, как это делается для прямой КС (как без наклона, так и с наклоном);
- прямая с наклоном относительно луча зрения, когда расстояние между линзируемыми изображениями определяется формулой:

$$\theta_E = \Delta\theta(\cos i + \xi \sin i) \left(1 - \frac{R_s}{R_g(1 + \xi \tan i)} \right), \quad (1)$$

где R_s – расстояние от наблюдателя до КС, R_g – расстояние от наблюдателя до фоновой линзируемой галактики, $\Delta\theta = 8\pi G\mu/c^2$ дефицит угла КС, определяемый натяжением струны μ .

В первом случае численный результат показал, что при некотором критическом угле искривления КС второе изображение фонового источника не формируется. Принимая во внимание тот факт, что кандидаты в КС были найдены по анализу анизотропии реликтового излучения [2], 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.

Во втором случае 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.

2. Оценки линейной плотности КС

Единственный параметр, которым обладают все КС вне зависимости от модели, – это натяжение (линейная плотность), пропорциональная квадрату энергии образования КС, определяемая как $G\mu/c^2$.

Согласно оценкам по угловому спектру анизотропии реликтового излучения космической обсерватории Planck, $G\mu/c^2 \in \{1.5 \cdot 10^{-7} \dots 2.0 \cdot 10^{-7}\}$ в зависимости от типа КС (Намбу–Гото, полулокальная, Абель–Хиггс), также априори предполагается масштабно-инвариантная модель топологических КС.

При поиске одиночных КС в рамках априорного предположения об известной начальной плотности распределение сети КС, об ее масштабной инвариантности и в предположении перпендикулярности КС лучу зрения, оценка есть $G\mu/c^2 \leq 3.7 \cdot 10^{-6}$, [3]. При использовании другого метода – конволюции карт анизотропии реликтового излучения фильтром Хаара – результат получается схожий, но все так же оставаясь в парадигме простейшей модели КС, перпендикулярной лучу зрения, $G\mu/c^2 \leq 7.36 \cdot 10^{-7}$, [4].

Для КС, обладающих дополнительным свободным параметром – наклоном i – наблюдательные данные (двойной объект SDSSJ110429 – A, B , [5]) указывают на величину натяжения КС $G\mu/c^2 = 5 \cdot 10^{-2}$ при $i = 89.9995^\circ$ ($R_s/R_g = 0.31$).

Подчеркнем, что модель наклонной КС проверялась на наблюдениях указанного двойного объекта, уже ранее подтвержденного двумя независимыми методами как кандидат в гравитационное линзирование на КС, а именно: этот объект принадлежит найденной по анизотропии реликтового излучения КС (протяженный объект CSc-1, $\alpha = 11 : 29 : 03, \delta = +15 : 23 : 37; \alpha = 10 : 57 : 47, \delta = +25 : 03 : 51$, [4]), а также является гравитационно-линзовым по ряду необходимых

фотометрических критериев (для компонент пары одинаковые красные смещение, одинаковые отношения интенсивностей в 5-ти фильтрах, одинаковые спектры с доверительной вероятностью 0.9 по общему континууму и по отдельным линиям ($H\alpha$, $H\beta$ и др.)).

Подобные “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 очень ранней Вселенной.

Отметим также, что с наблюдательной точки зрения формальных запретов на “тяжелые” КС нет, поскольку из наблюдений имеется ограничение только на совокупность скорости v и генерируемой анизотропии δT , а именно:

$$\frac{\delta T}{T} \approx G\mu/c^2 \cdot \gamma \frac{v}{c}, \quad (2)$$

где, например, $\delta T \approx 38\mu K$ для объекта CSc-1. Данные по спектру анизотропии реликтового излучения оценивают вклад сетей КС в общую плотность Вселенной в априорной модели сетей КС, но не предполагают наличие одной “тяжелой” КС, обеспечивающей такой вклад. Наконец, оценки линейной плотности КС по данным пульсарного тайминга априори предполагают не только наличие сетей КС, но и более сильное допущение: наличие осциллирующих петель, которые не являются обязательными для КС общего вида.

Заключение

Для формирования дальнейшей стратегии поиска КС следует принимать во внимание, что более общая теория ГЛ на КС, а именно, учет ее наклона и изгиба, позволяет пересмотреть ограничения на энергию КС, а также пересмотреть стратегию поиска цепочек гравитационно-линзовых пар. Поиск цепочек пар может быть заменен на поиск характерных кластеров ГЛ, которые образуются при КС с большими наклонами. Учет изгиба КС позволяет объяснить отсутствие таких цепочек из-за появления т.н. критического угла изгиба, при котором гравитационно-линзовье пары не образуются. Наблюдательная идентификация принципиально новых объектов стала возможной благодаря новой теории и улучшенному качеству наблюдений и критически важна для понимания геометрии Вселенной.

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. 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.
3. Jeong E. and Smoot G. F. Search for Cosmic Strings in CMB Anisotropies. *Astrophys. J.*, 2005, vol. 624, pp. 21–27.
4. Sazhina O.S., Scognamiglio D., Sazhin M.V. Observational constraints on the types of cosmic strings. *EPJC*, 2014, vol. 74, no. 8, pp. 29–72.
5. Safonova M., Bulygin I. I., Sazhina O. S., Sazhin M. V., Hasan P., Sutaria F. Deep Photometry of Suspected Gravitational Lensing Events: Potential Detection of a Cosmic String. *Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege*, 2024, vol. 93, no. 2, pp. 819–825.

Авторы

Сажина Ольга Сергеевна, д.ф.-м.н., внс, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова, Университетский пр., д. 13, 119234, Россия.

E-mail: cosmologia@yandex.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сажина О. С. Космические струны: проблемы и методы современного поиска. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2025. № 1. С. 145–149.

Authors

Sazhina Olga Sergeevna, DHDR, Associate Professor, SAI Lomonosov MSU, Universitetskiy pr., 13, 119234, Russia.

E-mail: cosmologia@yandex.ru

Please cite this article in English as:

Sazhina O. S. Problems and methods of modern search for cosmic strings . *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2025, no. 1, pp. 145–149.