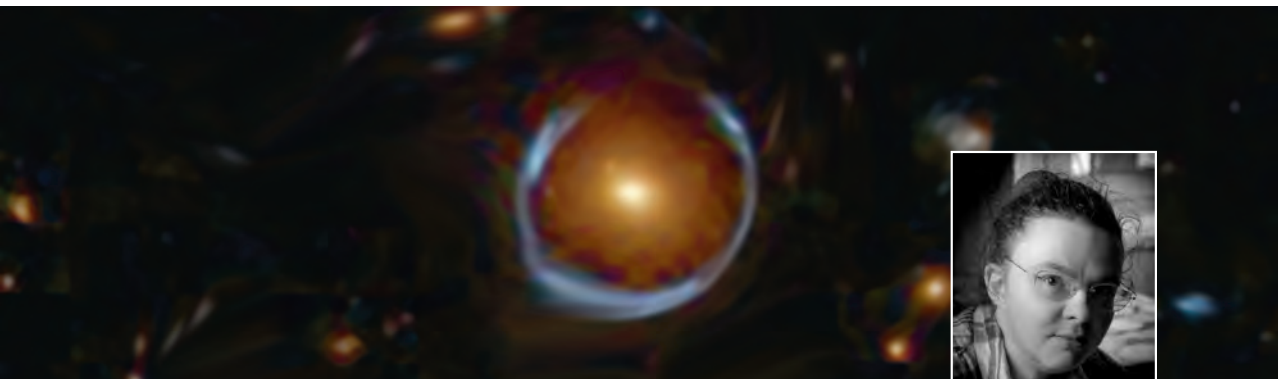


СКЛАДКИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ: ИСТОРИЯ ПОИСКА КОСМИЧЕСКИХ СТРУН ВО ВСЕЛЕННОЙ



САЖИНА Ольга Сергеевна,

доктор физико-математических наук

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ

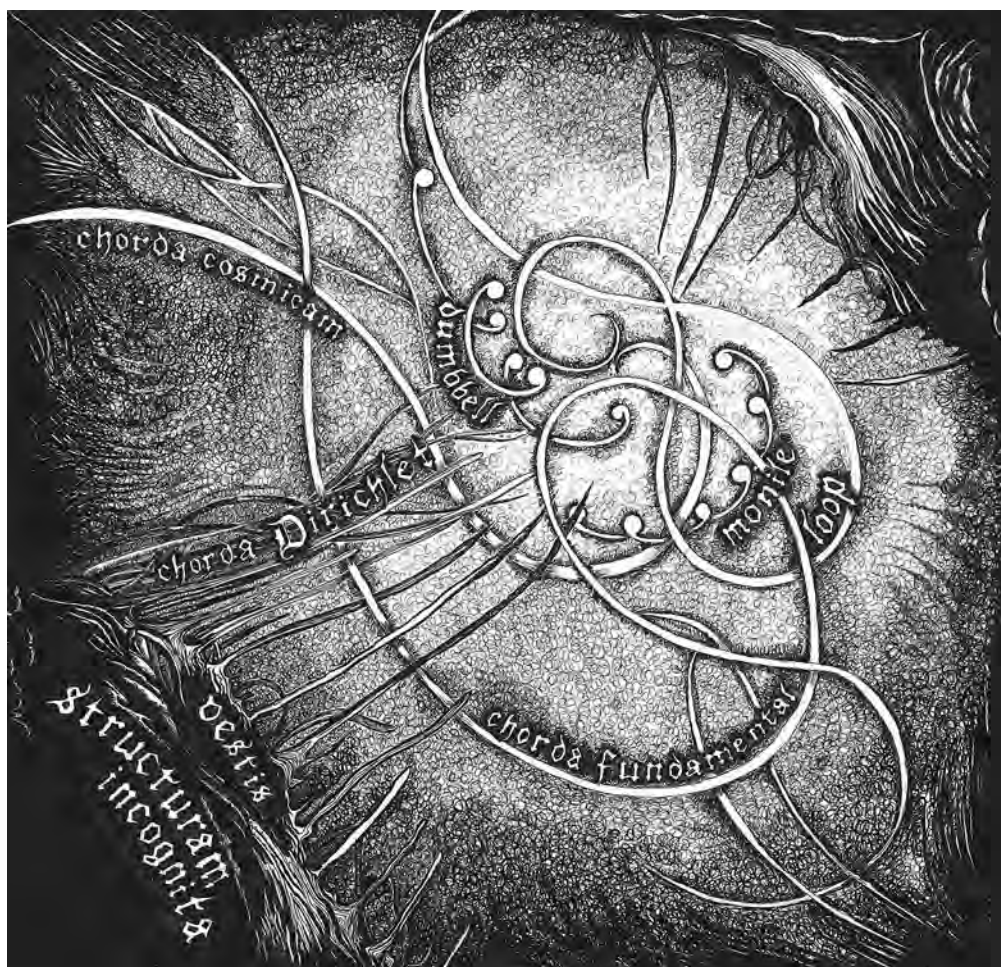
DOI: 10.7868/50044394824030022

ВВЕДЕНИЕ

Современные науки, изучающие космическое пространство – астрометрия, небесная механика, астрофизика, космология – смогли достичь глубокого понимания природы и эволюции космических объектов, точнейшего определения их динамики, а также понимания строения и эволюции Вселенной в целом, начиная с Большого взрыва и заканчивая не просто современным моментом времени, но экстраполируя наиболее вероятные сценарии в далекое будущее. Такие достижения стали возможными благодаря стремительному совершенствованию наземной и космической инструментальной базы, что позволяет вести наблюдения не только в широчайшем электромагнитном диапазоне длин волн, но и от-

крывает принципиально новый раздел наблюдательной астрономии – гравитационно-волновой. Растут вычислительные возможности для моделирования физических процессов, для обработки огромных объемов данных в том числе, даже в режиме реального времени.

Активно развиваются и теоретически модели. Астрофизика и космология давно берут на вооружение идеи и методы физики элементарных частиц, термодинамики, физики конденсированных сред, теоретической физики и многих других разделов естествознания. Однако только в очень недавнее, по меркам развития астрономии, время многие из абстрактных математических построений стали находить пути выхода на реальную проверку космическими наблюдениями. Так, ученые вплотную приблизились к наблюдательному поиску нетри-



«Зоопарк» космических струн: Вселенная с космическими струнами различных типов.
Рисунок автора

виальных структур во Вселенной, от различных топологических дефектов до проявлений скрытой многомерности нашего пространства-времени. Ранняя Вселенная – по меткому выражению советского физика и астронома Я.Б. Зельдовича, «ускоритель бедного человека», – предоставляет уникальные возможности проверки теорий, требующих для своей формулировки очень больших энергий, вплоть до энергии Планка (10^{19} ГэВ).

Экзотические структуры и объекты во Вселенной, которые, имея возможность

образоваться в очень ранней Вселенной, могли бы дожить со современного момента времени. Исследования по их поиску находят поддержку не только в современных математических моделях, но и в общепризнанных пробелах в Стандартной космологической модели, в современном понимании единой картины всех физических взаимодействий, а также в понимании структуры и происхождения скрытых секторов материи: темной материи и темной энергии.

В этой статье будут обсуждаться одни из наиболее значимых для кос-

мологии и наиболее хорошо теоретически обоснованных экзотических объектов во Вселенной – космические струны (КС). Пока существуют только косвенные наблюдательные признаки их существования во Вселенной, однако имеющейся статистической достоверности уже вполне хватает, чтобы поддерживать надежду и энтузиазм для дальнейших поисков.

Можно сказать без преувеличения, что реальное существование КС произвело бы настоящую революцию в современной Стандартной космологической модели, потому что открыло бы наблюдательную дорогу, в том числе к исследованию многомерности нашего пространства-времени, о котором ученые пока размышляют всего лишь с точки зрения теории.

КОСМИЧЕСКИЕ СТРУНЫ КАК ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

В космологию струны, названные космическими, изначально были введены как объекты, имеющие так называемое топологическое происхождение.

Если не говорить о строгом математическом определении топологических дефектов и рассматривать их как физические объекты, то можно сказать, что они образуются в различных средах под влиянием внешних полей или различных физических воздействий, а также в результате фазовых переходов и нарушая при этом определенные симметрии. Простейший пример – фазовый переход воды в лед при ее охлаждении. Жидкая фаза, очевидно, симметрична во всех направлениях, в то время как в твердой фазе появляются выделенные направления – кристаллики льда, – что уменьшает число симметрий всей системы. В целом, понятие топологического дефекта используется для описания физических локализованных структур в конденсированных средах (в различных кри-

сталлах, в том числе жидких, в сверхтекучих жидкостях и сверхпроводниках), а также в ранней Вселенной (монополи, КС, доменные стенки, текстуры), в физике элементарных частиц (в струнных моделях адронов в теории сильных взаимодействий). Топологические дефекты в лабораторной физике давно являются реальными физическими объектами. Так, советскому физiku А.А. Абрикосову была присуждена Нобелевская премия (2003) за теорию так называемой вихревой решетки Абрикосова. Топологические дефекты, предсказанные в физике твердого тела и обнаруженные экспериментально, имеют аналоги в теории элементарных частиц и теории поля. Следовательно, многие из этих структур должны существовать в природе.

Что касается КС, то такие топологические дефекты могли образоваться в ранней Вселенной в результате нарушения симметрии во время фазовых переходов вакуума. Основная идея заключается в том, что, как и в системах с конденсированным веществом, фазовый порядок увеличивается с повышением температуры, что приводит к восстановлению симметрии. Например, спонтанно нарушенная симметрия теории, которая описывает электромагнитное и слабое взаимодействия как одно целое (электрослабая теория) могла быть восстановлена при высоких температурах ранней Вселенной. При понижении температуры соответствующие симметрии могут нарушаться, однако, согласно математическому описанию симметрий с помощью теории групп, ни при всех таких нарушениях могут образовываться КС. Раз образовавшись, КС представляют собой очень тонкие, но очень длинные макроскопические структуры и, соответственно, должны обладать макроскопическими свойствами – это и является предметом поисков астрономов. Пространственные масштабы влияния КС могут быть сопоставимы

с размером современной видимой Вселенной. КС характеризуется энергией на единицу длины (линейной плотностью), которая зависит от того, при каких энергиях родилась струна. Все теоретически описываемые струны являются настолько «тяжелыми», другими словами, обладают настолько большими энергиями, что могут, например, пройти сквозь Землю как сквозь пустое пространство, даже не почувствовав ее. Для средней струны ее участок в одну астрономическую единицу может весить как вся наша Солнечная система, но допустимы струны и гораздо тяжелее. Единственным астрофизическим объектом, который способен «вступить в контакт» с КС является черная дыра.

Из какого же «вещества» сделаны КС, что именно в ранней Вселенной претерпевает фазовые переходы? Ученые говорят о вакууме, которое может быть определено как некоторое поле. Если считать, что такой феномен, как темная энергия, ассоциирован с вакуумом, то можно сказать, что КС состоят из реликтовой темной энергии, которая оказывается «пойманной» в окружении новой темной энергии.

В ранней горячей Вселенной вакуумное состояние могло обладать большим количеством симметрий. По мере того как Вселенная расширялась и охлаждалась от своей начальной высокосимметричной фазы, она проходила через серию фазовых переходов, каждый из которых частично утрачивал первоначальную симметрию. Во Вселенной этот процесс продолжался до тех пор, пока при низких температурах сначала не стало преобладать излучение, а затем вещество. Каждая из стадий имела соответствующую симметрию, определяемую фундаментальными взаимодействиями. Таким образом, экспериментально подтвержденная физика элементарных частиц низкой энергии описывает два из четырех фундаментальных взаимо-

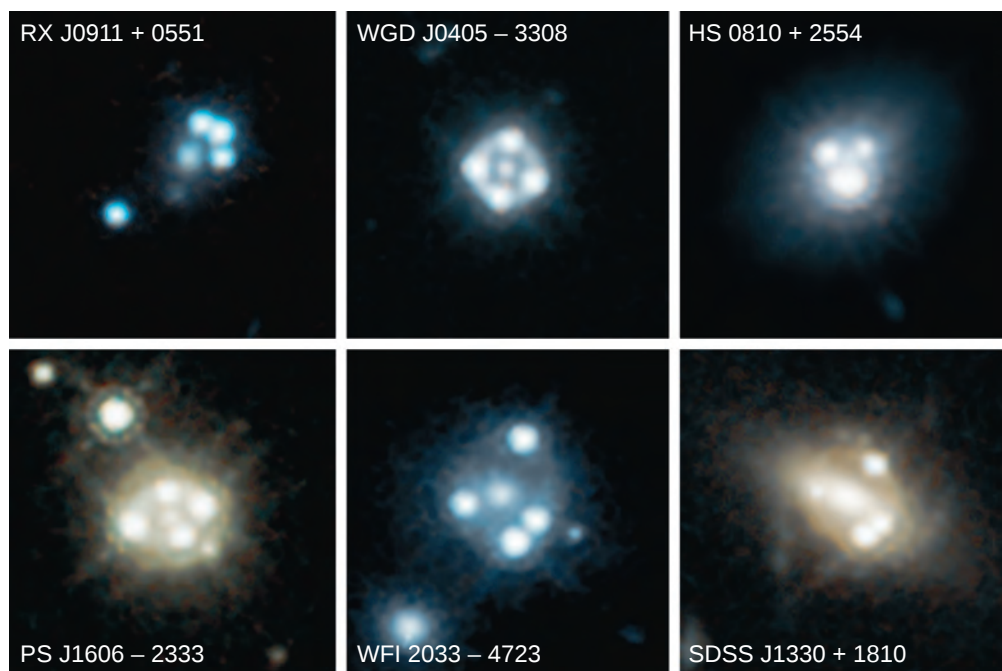
действий: электромагнитное и слабое ядерное (модель Вайнберга-Салама), каждое из которых математически описывается своими симметриями. Сильные ядерные взаимодействия, которые приводят к удержанию кварков, также связаны с определенной симметрией. Теории объединения четырех фундаментальных взаимодействий, включая гравитационное, предсказывают многочисленные фазовые переходы, связанные с нарушением различных групп симметрий в разные моменты времени и при разных энергиях, вплоть до планковской. Пока такая теория Великого объединения не имеет ни экспериментальных, ни наблюдательных подтверждений, хотя существует множество указаний на существование новой физики за пределами известной Стандартной модели.

КС теоретически могли бы образовываться при очень многих из описанных фазовых переходов, т. е. ассоциироваться, например, либо с нарушением электрослабого взаимодействия, либо с нарушением какой-то их объединенных высокосимметричных теорий. Чем из более высокосимметричной и пока еще гипотетической теории рождается КС, тем она «тяжелее».

КС как возможные космологические объекты были впервые предсказаны Т. Кибблом (1976) и активно изучались в последующие годы Я.Б. Зельдовичем, А. Виленкиным, П. Шеллардом, М. Хиндмаршом, М. Сажиным и многими другими исследователями, как астрономами, так и физиками-теоретиками.

ПОИСК КОСМИЧЕСКИХ СТРУН ПО ЭФФЕКТУ ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ

Существование струн в космосе широко поддерживается в теории и, что немаловажно, наличием большого количества реальных лабораторных примеров



Изображения шести гравитационных линз. Фото: космический телескоп «Хаббл»

в различных областях физики. Кроме того, эти объекты не вносят противоречий в имеющиеся на данный момент данные космологических наблюдений.

Однако, что касается непосредственных наблюдений КС, то вопрос оказывается гораздо более сложным. Такой объект, будучи очень тонким и очень длинным, масштабов галактик или даже всей видимой Вселенной, сам по себе невидим, но теоретически может и должен ярко проявлять себя косвенно в некоторых астрономических наблюдениях.

Одним из направлений таких наблюдений является гравитационное линзирование. Астрономам хорошо известен эффект гравитационного линзирования. Его механизм связан с тем очевидным фактом, что лучи света какого-нибудь далекого источника света, например галактики, двигаясь в искривленном массивными телами пространстве, будут двигаться уже не по прямым тра-

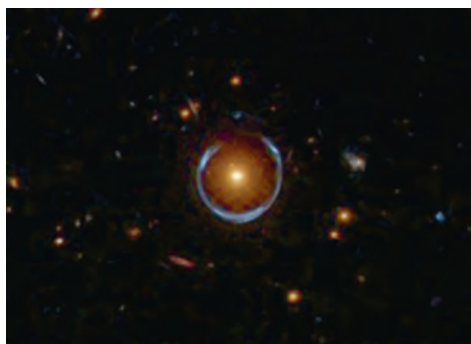
екториям, в результате чего мы, наблюдатели, увидим не сам этот далекий источник, а несколько его фантомных изображений.

Если на пути лучей попадет маломассивный объект, то нескольких разрешенных изображений не получится, однако сам источник будет или искажен (слабое линзирование), или будет наблюдаться изменение его блеска (микролинзирование). Гравитационное линзирование является, в том числе, мощным инструментом для поиска темной материи астрономическими методами, поскольку эта составляющая нашей Вселенной никак не проявляется себя в электромагнитном диапазоне, но проявляет себя гравитационно. Так, по искажениям далеких источников излучения можно строить точные «гравитационные карты» распределения темной материи.

КС тоже порождают вполне наблюдаемый эффект гравитационного лин-

зирования, однако очень особенный. Особенность связана тем, что КС меняет глобальную геометрию нашего пространства. Согласно современным наблюдательным данным, астрономы и космологи могут с уверенностью утверждать, что наше Вселенная трехмерно плоская, другими словами, ее пространственная геометрия глобально евклидова (если говорить не только о пространстве, но и о времени, то соответствующее пространство-время называется в честь Г. Минковского). Если же во Вселенной присутствует КС, то Вселенная приобретает иную пространственную геометрию, а именно геометрию конуса. Это связано с тем, что математически Вселенная с такой струной описывается уже не просто метрикой Минковского, а метрикой Минковского с так называемым дефицитом угла. Другими словами, если мы хотим обогнуть струну по окружности, то длина этой окружности уже не будет равна 2π , она будет меньше. Если говорить с точки зрения наблюдений, то, окажись между далеким источником и нами, наблюдателями, такая струна, то лучи света на пути к нам будут огибать этот конус по обе стороны от вершины и, таким образом, образуется два изображения этого источника.

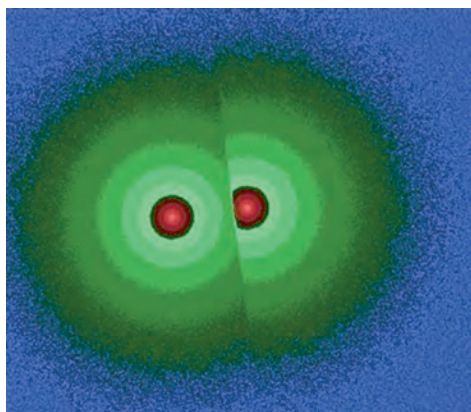
Очень важно отметить отличия от обыкновенного гравитационного линзирования. В случае КС лучи будут двигаться в плоском пространстве, и полученные два изображения будут лишены каких бы то ни было искажений. Очевидно, что случае обыкновенного гравитационного линзирования лучи света движутся в искривленном пространстве, и поэтому получаемые изображения будут, как правило, обладать значимыми искажениями. Более того, если массивное тело и далекий источник находятся на одном луче зрения, то мы увидим максимально искривленное изображение – кольцо (так называемое кольцо Эйнштейна).



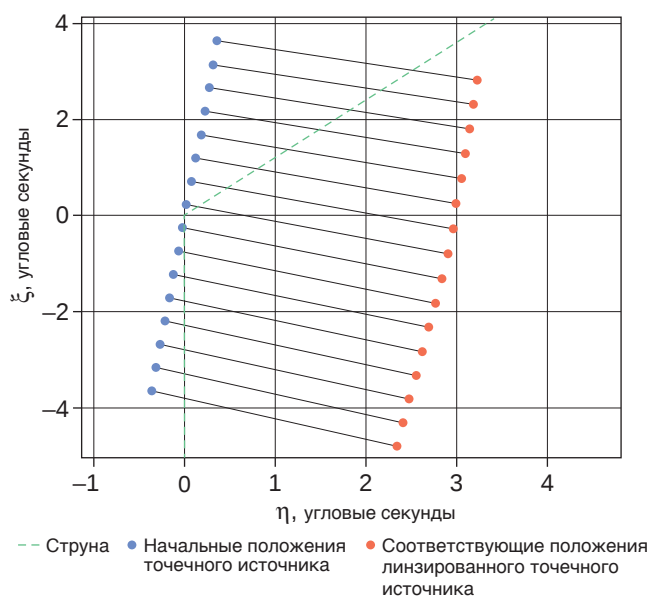
Изображение гравитационно-линзовой системы LRG 3-757 («Подкова»).

Фото: космический телескоп «Хаббл»

Отсутствие искажений на изображениях фонового источника – не единственная отличительная черта гравитационного линзирования на КС. В силу того, что струна очень тонка, при проекционном расположении струны не точно посередине линзируемого источника одно из изображений будет обладать резкими характерными срезами внешних изофот яркости. Такие срезы возможно различить на космическом



Моделирование гравитационного линзирования галактики на КС. Отчетливо видно отсутствие искажений изофот яркости, а также характерные срезы, обусловленные существенной одномерностью КС. Рисунок автора



Моделирование, показывающее отсутствие гравитационно-линзовых изображений на КС с изгибом (для простоты представлен изломом). Синие точки: истинное положение источника. Красные точки: положение изображения, которое единственно и представляет собой просто смещение реального источника.

Рис. И.И. Булыгина

телескопе «Хаббл», а также на недавно вступившем в строй новом телескопе Euclid.

Кроме того, как догадается внимательный читатель, поскольку струна предполагается очень длинной, то она будет порождать множество гравитационно-линзовых пар фоновых источников, другими словами, формировать характерный только для струны так называемый «новый Млечный путь» таких пар.

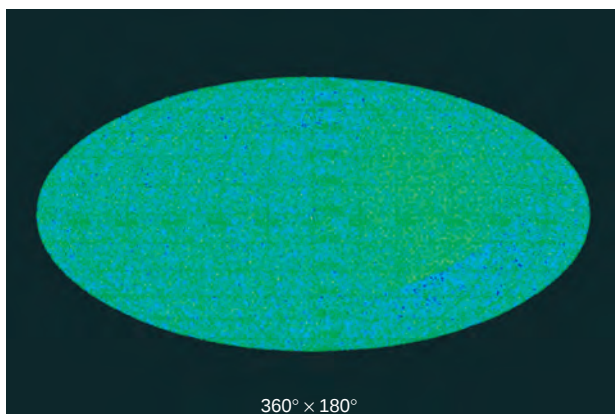
Совсем недавно при математическом моделировании гравитационного линзирования на КС обнаружился очень интересный эффект (И.И. Булыгин и др., 2023). Дело в том, что до сих пор, говоря о двойных изображениях, всегда подразумевалась простая модель, когда КС прямая и перпендикулярная лучу, соединяющему наблюдателя и далекий излучающий объект. Однако в реальности, очевидно, струна может быть и наклонена к наблюдателю, и изогнута. Если же учесть эти эффекты, то оказывается, что при определенном изгибе струны двойные изображения вообще не образуются! Другими словами, эффект гравитаци-

онного линзирования может быть вовсе не наблюдаем для реалистичных КС. Это, конечно, не очень хорошие новости, однако с успехом объяснят тот факт, что, несмотря на убедительные теоретические предсказания струн во Вселенной, так и не наблюдаются соответствующие гравитационно-линзовые события в массовом количестве — самое общее и естественное проявление наличия струн во Вселенной.

ПОИСК КОСМИЧЕСКИХ СТРУН ПО АНИЗОТРОПИИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В космологии общепринятой является Стандартная космологическая модель, согласно которой наша Вселенная родилась примерно 14 млрд лет назад в результате Большого взрыва и сейчас находится в состоянии расширения, даже более того, в состоянии ускоренного расширения. Как известно из школьной физики, все тела с расширением охлаждаются. Это означает, что в далеком прошлом Вселенная была очень горячей — горячей настолько, что

Моделирование «отпечатка» КС
на фоне тестового шума.
Данные традиционно
отображены в проекции
Мольвейде (экватор – плоскость
Галактики). Рисунок автора



находилась в состоянии плазмы, когда фотоны постоянно сталкивались с частицами вещества и не могли «вырваться на свободу». Однако Вселенная расширялась и охлаждалась, и примерно через 380 тыс. лет после Большого взрыва Вселенная остыла настолько, что частицы объединились в нейтральные атомы, а излучение получило возможность распространяться свободно. Тогда его температура составляла примерно 3 тыс. К, а к современному моменту времени, когда Вселенная расширилась примерно в тысячу раз, это излучение приобрело температуру всего в 2.71 К. Оно носит название реликтового излучения, самого первого, родившегося во Вселенной. Соответствующая сферическая поверхность называется поверхностью последнего рассеяния.

Очевидно, что все без исключения космические объекты, в том числе и КС, находятся между нами и этим реликтовым излучением, а потому на его карте (полученной, в том числе, космическими обсерваториями WMAP и Planck), с неизбежностью должны быть «отпечатки» КС. Поскольку, как мы уже обсуждали, струны являются существенно одномерными объектами, то на карте неоднородностей реликтового излучения должны быть пятна с резкими перепадами температуры, и именно их следует искать в астрономических данных.

Конечно, эти перепады будут очень незначительны на фоне основной анизотропии, вызванной и движением нас, наблюдателей, относительно реликтового излучения, и колебаниями поверхности последнего рассеяния, связанного с различным распределением на ней вещества, и с другими эффектами. Тем не менее эти перепады можно и нужно искать с помощью соответствующей статистической обработки данных.

РЕДКИЕ СОБЫТИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СТРУН

Мы оказались бы счастливыми в поиске КС, если бы нам довелось стать свидетелями такого редчайшего события, как взаимодействие вращающейся черной дыры и КС. Будучи топологической и поэтому не имея концов в силу сохранения так называемого топологического заряда, космическая струна принялась бы бесконечно наматываться на черную дыру, порождая излучение на больших промежутках времени и, скорее всего, в довольно широком диапазоне электромагнитных волн. Поскольку КС обладает энергией, то, скорее всего, такое наматывание привело бы к росту массы черной дыры, и пределы этого роста неизвестны.

Если дополнительно задаться теоретическими условиями, что струна может обладать каким-либо зарядом, то возможен поиск какого-либо излучения от этого и без того экзотического объекта.

Наконец, наверное было бы очень интересно наблюдение за процессом взаимодействия двух или даже более КС.

Очевидно, что все указанные процессы гораздо более редки, чем возможные наблюдения эффекта гравитационного линзирования или поиска «отпечатков» струны на карте анизотропии реликтового излучения. И все указанные методы нужно отложить до тех счастливых времен, когда КС действительно будет убедительно найдена.

КОСМИЧЕСКИЕ СТРУНЫ КАК УКАЗАНИЕ НА РЕАЛЬНОСТЬ МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВ

Уделив большое внимание описанию топологических дефектов, теперь очень важно отметить, что КС могли бы иметь и нетопологическую природу, связанную со скрытой многомерностью пространства-времени. Такие модели возникают в попытке построения единой теории всех физических взаимодействий и в попытке решить важнейшую проблему объединения теории гравитации и квантовой теории.

Обнаружилось (пока, конечно, только теоретически), что объекты, аналогичные КС, могут возникать и совсем другим способом, а именно в многомерных теориях, как результат взаимодействия многомерных пространств.

Так, космологические суперструны могут возникать в модели мира на бране, согласно которой наш мир погружен в пространство большего числа измерений. Дефекты этого типа представляют собой макроскопические состояния фундаментальных струн (F-струны), а также браны Дирихле (Dp-браны или ассоциированные с ними D-струны),

растянутые в одном из макроскопических измерений. Кроме того, существуют M-браны и так называемые браны Навье-Шварца, поведение которых также аналогично поведению КС; их единственное пространственное измерение намотано на дополнительные измерения пространства-времени.

Говоря о космических суперструнах, следует отличать их от собственно суперструн, элементарных «кирпичиков» материи в соответствующей теории. Важно отметить, что в нашем четырехмерном пространстве-времени фундаментальные микроскопические суперструны не могут растягиваться и достигать космологических масштабов. Будь так, они бы «разрывались», превращаясь в систему микроскопических струн. К существованию суперструн в космологических масштабах приводит свертывание (компактификация) дополнительных измерений в многомерной модели мира на бране либо взаимодействие бран в объемлющем пространстве. В этом случае фундаментальные суперструны есть результат такого взаимодействия.

Что касается бран Дирихле и соответствующих им D-струн, то в многомерном пространстве, помимо фундаментальных струн, допустимы и струны, присоединенные к D-бранам. Основное свойство модели мира на бране применительно к струнам заключается в том, что обычная материя сосредоточена на гиперповерхности, встроенной в многомерное объемлющее пространство (так называемый балк), и все взаимодействия, за исключением гравитационного, распространяются только на бране, в то время как гравитация может распространяться в балке. Так, энергия такой суперструны (которая в балке равна планковской энергии) может оказаться значительно меньше в четырех пространственных измерениях нашего мира.

Фундаментальные струны и D-струны могут объединяться друг с другом,

образуя одномерные объекты, называемые FD-струнами. Визуально представить полученную струну можно, например, в виде двух линий, которые приближаются друг к другу под некоторым углом и переплетаются в «косичку».

Основное различие между топологическими КС и КС, которые являются продуктами многомерных теорий, заключается в особенностях их взаимодействия друг с другом. Поскольку вероятность обнаружения двух или более взаимодействующих струн гораздо ниже, чем вероятность обнаружения одной струны, то с точки зрения наблюдения такая разница пока не существенная. На данный момент не разработано четких критериев, позволяющих различать эти струны, поскольку они ведут себя сходным образом с точки зрения эффектов гравитационной линзы или влияния на анизотропию реликтового излучения.

В ПОИСКАХ КОСМИЧЕСКИХ СТРУН

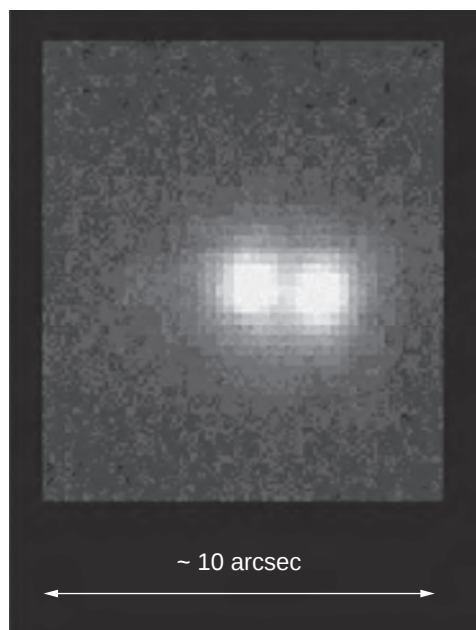
Поиск КС с помощью эффекта гравитационного линзирования начался в 1980-х гг. с изучения нескольких пар квазаров (G. Hazzard и др.). Было сообщено о «концентрации» квазаров в поле с координатами $\alpha = 11^{\text{h}}46^{\text{m}}14^{\text{s}}$ и $\delta = 11^{\circ}11'42''$ (координаты указаны на эпоху B1950). У двух квазаров из этой группы обнаружили одинаковые красные смещения, что является необходимым условием для гравитационно-линзовых изображений, поскольку они, очевидно, находятся на одном и том же расстоянии от наблюдателя. Однако угловое расстояние между этими квазарами оказалось слишком большим, больше $1'$. С точки зрения традиционной теории, рассматривающей сети (т. е. априорно большое количество) КС, считалось невозможным подобрать параметры струны для соответствия таким наблюдательным данным, однако недавние исследования нашей группы

показывают, что эти расстояния все же могут быть допустимы для одиночных КС. Поиски пар квазаров продолжались (например, QSO1146+111B, C), но расстояние между компонентами пар снова оказалось слишком большим.

Статья о возможном обнаружении КС была опубликована в 1987 г. (L.L. Cowie¹, E.M. Hu), когда в поле $45'' \times 45''$ с центральными координатами $\alpha = 2^{\text{h}}49^{\text{m}}23^{\text{s}}.00$; $\delta = -18^{\circ}25'32''$ (B1950) была обнаружена группа из четырех двойных галактик, которые демонстрировали характеристики гравитационного линзирования на КС. Так, каждая пара состояла из двух почти идентичных объектов с почти одинаковым угловым расстоянием между компонентами. У трех пар было одинаковые красные смещения, что указывало на их пространственную близость, а компоненты четвертой пары обладали одинаковыми спектрами. Исследователи отмечали, что необходимы дополнительные исследования, которые и были вскоре осуществлены, в результате чего спектры четвертой пары все-таки оказались немного различными. Наблюдения в радиодиапазоне (J.N. Hewitt, 1990) также не подтвердили гипотезу КС для этих объектов.

Поиски продолжались, но, к сожалению, очень часто естественным альтернативным объяснением для гипотезы КС при обнаружении нескольких близко расположенных и схожих объектов (галактик) оказывалась просто принадлежность их к физически связанному единому скоплению галактик или эффект проекции, когда физически далекие галактики расположены на малом угловом расстоянии друг от друга.

Одно из наиболее резонансных исследований последних 20-ти лет – это обнаружение российско-итальянской группой (Сажин и др., 2002) двойного объекта CSL-1 (Capodimonte-Sternberg-Lens-1, $\alpha = 12^{\text{h}}23^{\text{m}}30^{\text{s}}.5$; $\delta = -12^{\circ}38'57.0''$ (J2000)), состоящего из двух эллиптических галактик, иден-



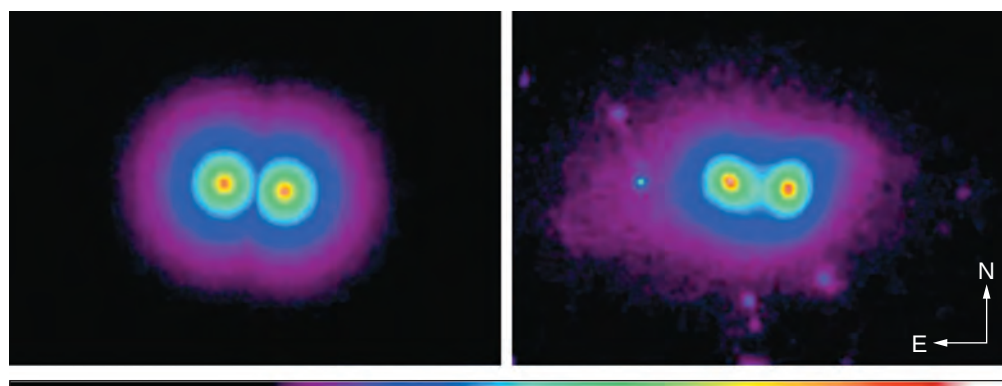
Объект CSL-1 (снимок глубокого обзора астрономической обсерватории Каподимонте, 2002 г.)

тичных по морфологии, красному смещению и спектрам, разделенных угловым расстоянием около $2''$. Объект был обнаружен в глубоком обзоре

астрономической обсерватории Каподимонте в г. Неаполе (Италия). Никакие модели и наземные наблюдения не смогли опровергнуть гипотезу КС, пока в 2004 г. этой научной группой не было получено время для наблюдений на телескопе «Хаббл», в результате которых, к огромному сожалению не только самих исследователей, но и всей мировой научной общественности, было показано, что этот двойной объект представляет собой все-таки пару различных галактик, очень близких пространственно, но расположенных так, что приливные гравитационные искажения заметны только на космическом телескопе высокой разрешающей способности. Такой объект сам по себе очень большая редкость, но интерес к нему был мгновенно потерян, настолько сильны были ожидания подтверждения гипотезы именно космической струны.

Поиски продолжались. Помимо поиска характерных гравитационно-линзовых изображений и их цепочек, один из способов – это наблюдение аномальных колебаний яркости источников, которые могут быть вызва-

Объект CSL-1. Моделирование в случае гравитационного линзирования на космической струне, которое было бы наблюдаемо на телескопе «Хаббл» (слева). Реальный снимок объекта на телескопе «Хаббл» (справа). В реальных наблюдениях присутствуют указания на наличие приливных сил между компонентами пары. По материалам работ российско-итальянской группы (М.В. Сажин и др., 2004)



ны эффектом микролинзирования на колеблющихся петлях КС. Подобные квазипериодические всплески яркости у двух гравитационно-линзовых изображений квазара Q0957+561A, В наблюдались в 2004 г. Однако ученым не хватило статистических данных для каких-либо уверенных выводов.

Наличие осциллирующих и схлопывающихся петель петель у КС дало бы дополнительные наблюдательные «окна» для их поиска: например, множество таких петель могли бы стать источниками низкочастотных гравитационных волн.

Другой способ поиска КС, какого бы происхождения они ни были, заключается в анализе анизотропии реликтового излучения. Как уже было сказано, КС должна оставлять на карте реликтового излучения очень характерный отпечаток – к сожалению, довольно сильно «замытый» неоднородностями другой природы, в том числе очень большими шумами нашей собственной Галактики (синхротронное излучение, излучение пыли и др.), и требующий поиска с помощью методов математической статистики и использованием подходящих фильтров.

Одним из таких простейших, но эффективных фильтров является ступенчатая функция Хаара, которая позволяет искать скачкообразные перепады температуре на картах анизотропии реликтового излучения, полученные космическими обсерваториями WMAP и Planck. Так, в 2014 г. с помощью такого фильтра было найдено несколько кандидатов в КС, в том числе кандидат CSc-1, который интересен тем, что на протяжении 2019–2024 гг. в области его предполагаемого нахождения искались и гравитационно линзовые пары (Сажина и др.).

Поговорим о результатах этих исследований. Очевидно, что гравитационно-линзовые пары должны присутствовать во Вселенной и не будучи никак

связанными с КС, это могут быть обыкновенные гравитационные линзы, образовавшиеся путем линзирования далеких галактик на таких же галактиках. Искажения изофот при большом удалении не будут заметны, и неразрешенные объекты морфологически будут очень напоминать ситуацию линзирования на КС. Однако, если струна действительно находится в исследуемом поле, то таких событий должно быть, очевидно, больше, и они должны формировать своего рода цепочки гравитационно-линзовых пар на все прохождение КС. Вот такой избыток и был обнаружен исследователями, что, конечно, является весомым, хотя пока что только статистически, доказательством наличия струны. Ученые пошли и дальше – взяли одну такую пару и проверили ее на соответствие модели наклонной КС. Совпадение наблюдений и моделирования оказалось почти идеальным! Только вот КС получалась слишком уж «тяжелой», по энергии сравнимой с облучаемой выше фундаментальной нетопологической струной, и поэтому нужны дополнительные исследования и моделирование. Как бы ни хотелось впервые обнаружить указания на многомерность нашего пространства, все-таки топологические струны представляются более реалистичными, поскольку их существование подтверждено лабораторно.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В качестве итогов – одни вопросы вместо ответов. Так, хотелось бы привлечь внимание читателя на некоторые проблемы в довольно распространенном подходе по поиску КС. Дело в том, что ряд исследований по наблюдательному поиску КС по анизотропии реликтового излучения до сих пор основываются на априорном предположении о наличии сетей таких объектов, сформированных

в результате фазовых переходов. Можно ограничить вклад сети таких топологических струн в общую энергию Вселенной (по данным космических обсерваторий WMAP и Planck), однако при таком подходе нельзя определить, сколько именно струн может оказаться во Вселенной. Другими словами, современные наблюдательные данные не противоречат такой ситуации, когда имеется не множество «легких» струн, но только одна «тяжелая». Легкие струны обладают меньшими энергиями и могли бы сформироваться позже, например, при электрослабых фазовых переходах в ранней Вселенной. Тяжелые струны могут обладать энергиями вплоть до планковской и быть сформированными в эпохи, близкие к эпохе инфляции или даже раньше, если предположить их нетопологическое происхождение и связь с многомерными пространствами.

Другими словами, при текущем состоянии исследований в области поиска КС, при отсутствии массового гравитационного линзирования на предполагаемых сетях, представляется разумным задавать параметры струн в возможно широком диапазоне, и не ограничиваться только множеством легких топологических струн. И только уже найдя хотя бы один такой объект, следует пытаться понять его происхождения и детальные свойства.

Очень большим подспорьем в поиске в будущем окажет гравитационно-волновая астрономия. Уже сейчас открытый в 2023 г. гравитационно-волновой фон может быть хотя бы частично ассоциирован с гравитационным излучением колеблющихся КС, прежде всего петель. Конечно, при попытках учесть нетопологическое происхождение струн или рассматривать их в становящихся все более популярными модифицированных теориях гравитации, будут возникать серьезные математические трудности в попытках

сопоставить расчетный и наблюдаемый сигналы. Фактически, придется пересчитывать заново все возможные эффекты, давно вычисленные в теории относительности, в том числе связанные и с возможным излучением струн.

При рассмотрении эффекта гравитационного линзирования до недавнего времени рассматривались простые модели, в которых струна считалась или прямой и перпендикулярной лучу зрения, или подчиняющейся модели броуновского движения. В первом случае все эффекты вычисляли в конечном пространстве в пределах геометрической оптики, а во втором случае проводились численные моделирования. В общем случае искривленной и наклонной струны требуется решать уравнения общей теории относительности или еще более сложные уравнения модифицированных теорий гравитации (например, теории Бранса-Дикке или теории Хорндекси).

Поиск КС во Вселенной – задача трудная и многоплановая. Однако велик и приз. Обнаружение КС космических масштабов позволило бы не только раскрыть природу и закономерности эволюции темной энергии в ранней Вселенной, но и изучить масштаб энергий, недостижимых на современных земных ускорителях, а также выявить нетривиальную глобальную структуру нашей Вселенной.

Литература

1. Sazhin M.V., Sazhina O.S. Space fabric wrinkles: history of observational searches for exotic structures in the Universe. Riv. Nuovo Cim. 44, 397–451 (2021).
2. Сажина О.С. Топологический дефект // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. (Дата публикации: 26.07.2022. Дата обновления: 01.11.2022.)
3. Сажин М.В., Сажина О.С. Теория Большого взрыва // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. (Дата публикации: 09.06.2022. Дата обновления: 20.09.2023.)