



На правах рукописи

Мурыгин Борис Сергеевич

**Формирование солитонных структур в ранней Вселенной
и астрофизические проявления первичных чёрных дыр**

Специальность 1.3.15
Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный
руководитель:

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика элементарных частиц»
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ»
Кириллов Александр Александрович

Официальные
оппоненты:

Дубрович Виктор Константинович,
доктор физико-математических наук, руководитель
лабораторией Санкт-Петербургского филиала
Федерального государственного учреждения науки
«Специальная астрофизическая лаборатория» РАН

Сажина Ольга Сергеевна,
доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник Государственного астрономического института
имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова

Гробов Алексей Викторович,
кандидат физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Защита состоится 15 апреля 2026г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МИФИ.1.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru>.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, ученому секретарю диссертационного совета МИФИ.1.05.

Автореферат разослан « » _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МИФИ.1.05



Улин Сергей Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В рамках современной космологии существует ряд неразрешенных вопросов. Одним из них является природа скрытой массы (СМ). В данный момент доминируют две качественно различающихся гипотезы о природе СМ (см. обзор [1]):

- СМ представляет собой частицы.
- СМ представляет собой первичные черные дыры (ПЧД).

Вышеуказанные гипотезы друг друга не исключают, то есть возможно, что СМ состоит из обеих компонент.

Попытки объяснить всю СМ через ПЧД встречаются существенные трудности, связанные с сильными ограничениями почти во всех массовых диапазонах (см. обзор [2]), которые, однако, могут быть несколько ослаблены, если ПЧД обладают немонахроматическим спектром масс и группируются в кластеры [3].

Комбинированная СМ (ПЧД и частицы) рассматривается в литературе [4; 5]. Более того, в большей части массового диапазона ПЧД не могут составлять всю СМ, см. [2] и ограничения там. Эти ограничения обуславливают необходимость существования частиц СМ вместе с ПЧД в теориях, где ПЧД образуются.

Гипотеза о существовании ПЧД позволяет объяснить не только явления, связанные непосредственно с СМ (то есть наблюдаемые гравитационные эффекты, которые нельзя объяснить при помощи наблюдаемой массы различных астрофизических объектов), но и ряд других явлений. В частности, ранние квазары на больших красных смещениях $z > 7$ [6; 7], а также массивные галактики на больших красных смещениях $z > 10$ [8]. Более того, в [9] показано, что образование ранних массивных галактик можно объяснить при помощи комбинированной СМ.

Кроме объяснения природы СМ, интерес к ПЧД вызван обнаружением гравитационных волн, соответствующих массам сливающихся объектов $10-100 M_{\odot}$ [10]. Например, в [11; 12] исследуется возможность объяснения событий слияния ЧД, наблюдаемых детекторами LIGO-VIRGO, при помощи ПЧД. Кроме того, массы [13] и угловые моменты [14] некоторых сливающихся ЧД в этих событиях не соответствуют тем, которые ожидают от астрофизических ЧД, что намекает на то, что сливаются именно ПЧД.

Основным рассматриваемым механизмом формирования ПЧД сегодня является коллапс неоднородностей плотности на разных стадиях эволюции Вселенной [15; 16]. Однако рассматриваются и другие механизмы рождения ПЧД. Например, интересующее нас в данной работе образование из топологических дефектов, формирующихся в ранней Вселенной.

Топологические дефекты (солитоны) — это класс решений нелинейных полевых уравнений, топологически отличных от вакуумного. То есть такие решения невозможно непрерывными преобразованиями через последовательность конфигураций с конечной энергией привести к вакуумному решению. Под топологией в данном случае подразумевается топология вакуумного многообразия.

В рамках физики частиц солитоны впервые были введены в рассмотрение в работе [17], а затем и в космологии в работе [18]. Затем в работах [19–21] были предложены реалистичные модели, в которых возникают солитонные решения. Однако активно проявляться интерес к солитонам в космологии начал после работ [22–26], в которых рассматривалось влияние солитонов на космологическую эволюцию Вселенной.

Образование различных типов солитонных решений в трехмерном пространстве, как было показано в работе [23], связано с топологией множества вакуумов полевой теории. Наиболее часто рассматриваются доменные стенки, струны и монополи. Кроме того, в той же работе [23] был предложен механизм, который при наличии фазового перехода делает образование солитонов неизбежным. Далее в работах [27; 28] было показано, что образование монополей в ранней Вселенной привело бы к недопустимо высокой их плотности, чего в современной Вселенной не наблюдается, что фактически закрыло модели с образованием монополей. Возможность образования доменных стенок и струн полностью не закрыта и рассматривается в современных работах, несмотря на существенные наблюдательные ограничения [29–35].

Связь между солитонами и ПЧД не является непосредственной, однако механизм образования последних может сводиться к эволюции солитонов. Например, в [36] рассматривается образование ПЧД из столкновения вакуумных пузырей (замкнутых доменных стенок), а в [37–42] из коллапса замкнутых космических струн. В [43–45] показано, что коллапс доменных стенок может приводить к образованию ПЧД.

Таким образом, природа СМ и существование ПЧД являются актуальными вопросами современной космологии, что обуславливает актуальность данной диссертации.

Цель работы

Целью работы является разработка полевой модели физики частиц, которая может быть положена в основу создания единой модели образования ПЧД и частиц СМ, а также механизма их кластеризации, и способа поиска возможных наблюдательных проявлений массивных ПЧД.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Модель образования кластера солитонной пены в ранней Вселенной, естественным следствием которой является существование двухкомпонентной СМ.

2. Наблюдательные проявления сверхмассивных ПЧД, окруженных гало барионов, на больших красных смещениях в излучении нейтрального водорода с длиной волны 21 см.

3. Возможность поиска сверхмассивных ПЧД по излучению нейтрального водорода в линии 21 см с учетом аккреционного излучения, основанное на решении задачи об эволюции барионного гало вокруг ПЧД.

Научная новизна полученных результатов

1. Впервые рассмотрена полевая модель, приводящая к образованию кластера солитонной пены в ранней Вселенной.

2. Впервые решена задача об эволюции сверхмассивной ПЧД и окружающего ее гало барионов и частиц СМ в догалактическую эпоху с учетом влияния

аккреционного излучения на гало.

3. Впервые предсказана форма спектра поглощения в линии нейтрального водорода с $\lambda = 21$ см вокруг сверхмассивных ПЧД. Также показана принципиальная возможность наблюдения подобных структур на радиотелескопах текущего поколения.

Практическая значимость

Значимость и актуальность диссертации заключается в разработке полевой модели физики частиц, которая может быть положена в основу единого механизма образования ПЧД и частиц СМ. Такая модель позволит связать физические свойства обеих компонент комбинированной СМ и поставить единые ограничения на их параметры. Предсказанные кольцеобразные структуры могут выступать мотивацией для создания радиотелескопов нового поколения. Кроме того, регистрация колец в спектре поглощения нейтрального водорода вокруг сверхмассивных ЧД вместе с центральным ярким источником на $z \sim 10 - 20$ может выступить доказательством существования ПЧД.

Вклад автора

а) лично проведено численное моделирование образования кластера солитонной пены; б) лично построена симуляция гидродинамической эволюции барионного газа в гравитационном поле центральной сверхмассивной ПЧД и эволюционирующего гало СМ; в) лично получена зависимость степени ионизации барионного газа вокруг ПЧД от расстояния и времени.

Апробация работы

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, представлялись и обсуждались на конференциях: Bled Workshop «What Comes Beyond Standard Models» 2020 (Bled, Slovenia 04-12.07.2020) и 2024 (Bled, Slovenia 08-17.07.2024), International Conference on Particle Physics and Astrophysics 2020 (Москва, 05-09.10.2020), 2022 (Москва, 29-02.12.2022), 2024 (Москва, 22-25.10.2024), Научная сессия секции ядерной физики отделения физических наук РАН (Дубна, 01-05.04.2024), Complexity in High Energy and Statistical Physics 2024 (Erice, Sicily, Italy, 01-07.12.2024)

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 рецензируемых научных журналах [D1–D6]. Из них 4 изданы в журналах, входящих в «Белый список» научных журналов и в базы данных Scopus / Web of Science, [D3–D6] (в том числе 2 в журналах уровня BC1 [D3; D5], 1 в журнале уровня BC2 [D4], 1 в журнале уровня BC4 [D6]). Остальные публикации [D1; D2] в журналах входящих в базы данных Scopus / Web of Science .

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, двух глав, и заключения. Объем диссертации составляет 93 страницы, включает 20 рисунков и список литературы с 88 источниками.

Содержание

Во введении обоснована актуальность исследования первичных черных дыр (ПЧД), солитонов и скрытой массы (СМ) и их роли в космологии. Проведен об-

зор современных гипотез о природе СМ, механизмах формирования ПЧД и их наблюдательных проявлениях. Сформулированы цели и задачи диссертации.

Первая глава «Солитонные эффекты в ранней Вселенной» посвящена созданию полевой модели физики частиц, естественным следствием которой является образование кластера солитонной пены. Далее обсуждается возможность объяснения двухкомпонентной СМ при помощи такой модели. Результаты данной главы опубликованы в [D1–D3; D5; D6].

В начале главы обсуждается модель двух скалярных действительных полей ϕ и χ и с потенциалом (изображен на рисунке 1):

$$\mathcal{V}(\phi, \chi) = \frac{m^2}{2} (\phi^2 + \chi^2) + \Lambda^4 \exp\left(-\frac{(\phi - \phi_0)^2 + (\chi - \chi_0)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

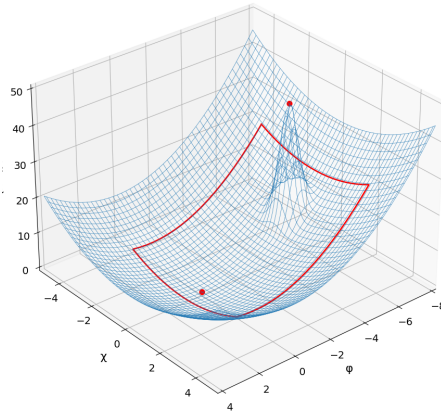


Рисунок 1 — Потенциал полевой модели. Красными точками отмечены минимум и максимум потенциала. Красным квадратом выделена область в которой далее будут рассматриваться солитонные конфигурации

Данный потенциал имеет 5 параметров, m — определяет общий наклон потенциала, Λ — определяет высоту локального пика, σ определяет ширину пика, а ϕ_0 и χ_0 — определяет координаты пика в пространстве полей.

Потенциал модели допускает формирование солитонных решений за счет наличия второго слагаемого (локального пика) [46]. Механизм образования солитонов в модели подробно рассматривается в приложении А.

Образование солитонов в модели осуществляется за счет классической динамики полей, то есть за счет скатывания полевой конфигурации в минимум потенциала (1). В результате успешного (для образования солитонов) скатывания в потенциале могут образоваться два типа полевых структур. Это связано с топологией эффективного вакуума модели [47].

Первым типом солитонных структур являются замкнутые доменные стенки, которые в трехмерном физическом пространстве будут представлять собой вакуумные пузыри. Данный тип солитонных решений образуется, если начальная полевая конфигурация находилась выше седловой точки и скатывание привело к зацеплению полевой конфигурации за пик. Данная конфигурация представлена на рисунке 2.

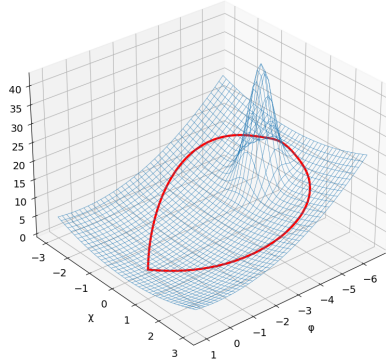


Рисунок 2 — Полевая конфигурация соответствующая замкнутой доменной стенке

Вакуум в данном потенциале обладает тривиальной топологией — одна точка. Однако в случае, если пик достаточно большой, полевые конфигурации, выходящие из вакуума, обходящие пик, а затем возвращающиеся в вакуум, оказываются нестягиваемыми. То есть топологически такие контуры (полевые конфигурации) будут отличаться от тривиальных, а вакуум модели для таких конфигураций оказывается эффективно разделен на два. Возможно и дальнейшее разделение, в случае если конфигурация несколько раз обходит пик, как это показано в [46]. Таким образом вакуум модели эффективно приобретает топологию Z_2 , что приводит к возможности образования доменных стенок [47]. В случае если пик бесконечный, то стенки будут стабильными, однако в случае конечной высоты они могут коллапсировать путем перетягивания конфигурации через пик.

Вторым типом солитонных структур являются доменные стенки ограниченные струнами (такая конфигурация в пространстве полей показана на рисунке 3), которые в трехмерном физическом пространстве будут представлять собой вакуумные пузыри с дырками, при этом границей дырки будет струна.

Потенциал (1) не обладает симметрией относительно вращений ($U(1)$), требуемой для образования струн [47], однако, в случае если пик достаточно высокий (такой что остальными членами потенциала можно пренебречь), потенциал оказывается инвариантным относительно вращений вокруг центра пика, что приводит к возможности появления струн. Их отдельное существование,

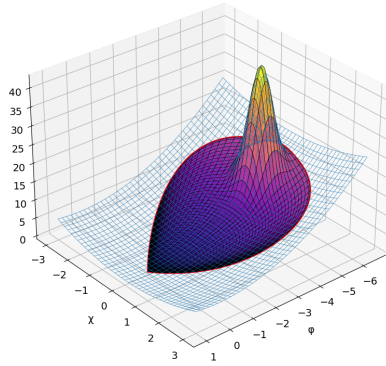


Рисунок 3 — Полевая конфигурация соответствующая доменной стенке ограниченной струной

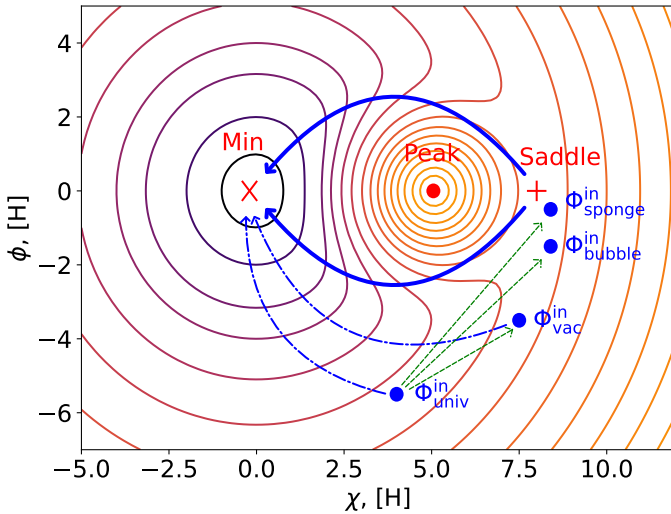


Рисунок 4 — Схематическое описание механизма образования кластера солитонной пены. $\Phi^{in} \equiv (\phi^{in}, \chi^{in})$ — начальная конфигурация (до квантовых флуктуаций), зелеными стрелками показаны возможные конфигурации которые могут образоваться в результате флуктуаций

однако, невозможно, так как потенциал обладает указанной ранее симметрией только приближенно, а действительная нетривиальная топология вакуума имеет место только для контуров огибающих пик, то есть для доменных стенок которые описывались ранее. Таким образом существование какого-либо соли-

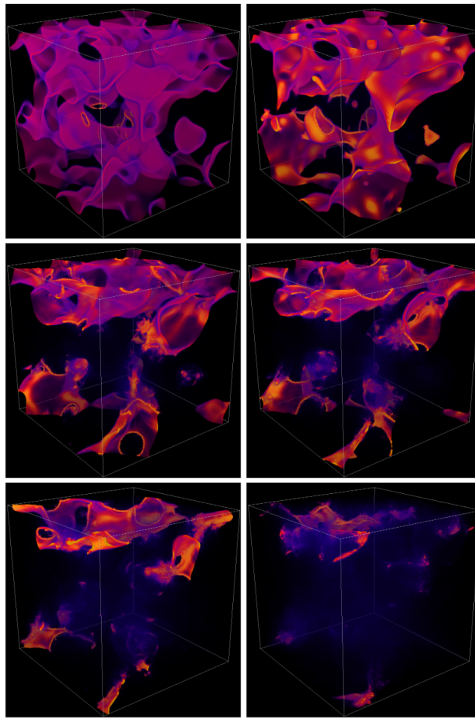


Рисунок 5 — Распределение плотности энергии для плотной солитонной пены в трехмерном физическом пространстве. Разные картинки представляют последовательное отображение эволюции распределения

тона без образования стенки оказывается невозможным.

Далее в главе обсуждается получение начальных условий, которые удовлетворяли бы критериям необходимым для образования солитонных структур. Такие условия получаются из рассмотрения эволюции скалярных полей во время инфляционной стадии — квантовые флуктуации.

Во время инфляции, если поля сами не являются инфлатонными, их классическая эволюция оказывается эффективно заморожена, и основная эволюция происходит путем квантовых флуктуаций. В результате флуктуаций значение поля в начальной области достаточно малой, чтобы поле в ней было однородным, во-первых смещается, а во-вторых становится неоднородным, то есть расплывается на потенциале (см. рисунок 4). Также в результате инфляции данная область быстро растет в размерах. Таким образом значения полей в области могут сместиться в ту часть потенциала, где удовлетворяются условия для образования солитонов.

Смещение и расплывание значений поля во время инфляции за один e -фолд являются известными [48], а описание самого процесса опирается на формализм

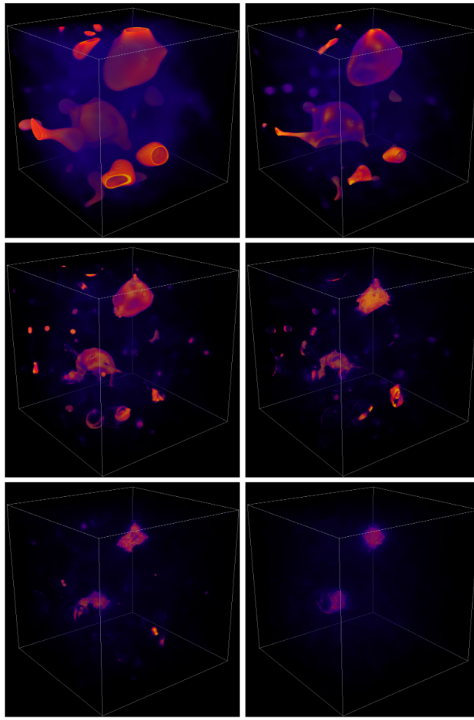


Рисунок 6 — Распределение плотности энергии для разреженной солитонной пены в трехмерном физическом пространстве. Разные картинки представляют последовательное отображение эволюции распределения

гауссовых случайных полей. Характер данного рассмотрения также налагает простейшие ограничения на параметры модели

$$\mathcal{V}''(\phi, \chi) \ll H_{\text{inf}}^2,$$

эти ограничения обеспечивают применимость приближения плоского потенциала, в котором возможно использование формализма гауссовых случайных полей.

Далее в этой главе описывается численное моделирование классической эволюции полей после конца инфляции. Моделирование проводится при помощи метода конечных разностей, который описан в тексте главы и приложении Б. В результате классической эволюции происходит образование солитонов по механизмам описанным выше.

После этого обсуждаются результаты моделирования. Обсуждаются различные эффекты, проявляющиеся в эволюции солитонных структур, на примере эволюции специально подобранных для иллюстрации начальных условий. В рамках рассмотрения данных эффектов показаны процессы коллапса двух

типов солитонных структур, а также генерация волн скалярного поля, которые вдали от солитонов могут быть интерпретированы как частицы скалярного поля. Далее представляются результаты моделирования эволюции полей с начальными условиями, полученными из квантовых флуктуаций на инфляционной стадии. В случае таких более реалистичных начальных условий конечная структура полевой конфигурации будет достаточно сложной. В ней будут множество раз реализовываться условия для образования солитонов, причем в различных областях конфигурации могут выполняться разные условия, то есть образовываться либо замкнутые стенки, либо стенки ограниченные струнами. Такую конфигурацию ввиду ее сложной структуры будем называть солитонной пеной.

Схематично образование солитонной пены показано на рисунке 4. В результате квантовых флуктуаций возможны три качественно различных сценария проиллюстрированных:

- Φ_{sponge}^{in} , плотная солитонная пена, в ней будет множество переплетенных между собой доменных стенок, а также множество дырок в этих стенках, вид данной конфигурации в трехмерном физическом пространстве показан на рисунке 5. Для образования такой конфигурации необходимо, чтобы начальная конфигурация находилась очень близко к пику и отчасти лежала на нем,
- Φ_{bubble}^{in} , менее плотная пена состоящая из множества вакуумных пузырей, вид данной конфигурации в трехмерном физическом пространстве показан на рисунке 6. Для образования такой конфигурации необходимо, чтобы начальная конфигурация находилась рядом с пиком, но не лежала на нем,
- Φ_{vac}^{in} , тривиальный случай, когда скатывание полей не пошло по пути образования солитонов, так как локальный пик оказался слишком далеко.

Реализация каждого из данных сценариев зависит от положения начальной конфигурации на потенциале, при этом четкой границы между сценариями нет, а так как поля должны иметь непрерывное распределение в пространстве, различные сценарии должны реализовываться в одной структуре, которую можно назвать кластером солитонной пены.

Данный кластер состоит из трех частей (в соответствии с тремя сценариями): центр кластера должен быть плотной солитонной пеной, который при отдалении от центра должен плавно переходить в разреженную солитонную пену, а при еще большем отдалении плавно переходить в тривиальный сценарий без образования солитонов, что будет определять границу кластера. Заметим, что точками на рисунке 4 отмечены только центры полевых распределений, в действительности распределение будет занимать более существенную часть потенциала, а размер зависит от длительности рассматриваемой инфляционной эволюции.

Солитоны в данном кластере, как указывалось ранее, не являются стабильными. Как показано в [39–41; 43–45] коллапс солитонов может приводить к

образованию ПЧД. Кроме того, частицы скалярного поля в модели взаимодействия с полями Стандартной Модели только гравитационно, то есть являются формой скалярной СМ [1]. Таким образом в результате эволюции солитонной пены возможны следующие сценарии

- Коллапс солитонов в кластере не привел к образованию ПЧД. В этом случае образуется гало из частиц скалярного поля.
- Коллапс разреженной солитонной пены в кластере приводит к образованию кластера ПЧД, а коллапс плотной солитонной пены к образованию ПЧД не приводит. В этом случае образуется кластер ПЧД примерно одинаковой массы окруженный гало частиц скалярного поля.
- Коллапс и разреженной и плотной солитонной пены в кластере приводит к образованию ПЧД. В этом случае образуется кластер ПЧД примерно одинаковой массы с центральной более массивной ПЧД окруженный гало частиц скалярного поля.

Вторая глава «Структура барионного гало вокруг сверхмассивной первичной черной дыры» посвящена исследованию эволюции барионного гало в гравитационном поле сверхмассивной ПЧД и гало скрытой массы на больших красных смещениях $z \sim 20$. Результаты данной главы опубликованы в [D4].

В начале главы ставится задача о поиске радиуса ионизации вокруг ПЧД в зависимости от времени. Данная задача существенна для способа поиска ПЧД по линии поглощения нейтрального водорода с длиной волны 21 см в спектре реликтового излучения предложенного в [49]. В случае существенной ионизации вещества вокруг ПЧД линия будет отсутствовать, так как она присутствует только в нейтральном водороде.

Способ поиска ПЧД по линии 21 см основан на исследовании радиальных скоростей движения газа вокруг ПЧД. Достаточно близко от ПЧД находится вириализованная область в которой движение газа является существенно несферичным, что делает эту область сложной для исследования численным моделированием. За пределами вириального радиуса, то есть за границами вириальной области, движение газа можно приближенно считать сферически симметричным, таким образом исследование движения газа в этой области сводится к задаче о сферически-симметричном коллапсе газа в расширяющейся Вселенной.

Задача о сферически-симметричном коллапсе хорошо исследована, и структура решения следующая: в области, где гравитация ПЧД доминирует, вещество радиально падает на центр, при этом чем ближе к центру, тем больше скорость падения, дальше от центра скорости уменьшаются по модулю и в какой-то момент достигают нулевого значения. Радиус, на котором это происходит, называют радиусом остановки. За радиусом остановки вещество отдаляется от ПЧД, причем чем дальше от ПЧД, тем быстрее, асимптотически приближаясь по скорости к невозмущенному хаббловскому потоку.

Наблюдение линий поглощения в спектре реликтового излучения на детекторах должно учитывать смещение линий. Это смещение происходит из-за крас-

ного смещения либо из-за эффекта Доплера. Эффект Доплера заключается в смещении частоты света воспринимаемой, движущимся приемником, относительно частоты, воспринимаемой неподвижным приемником.

Газ в барионном гало находится в движении, это означает, что из-за эффекта Доплера линия 21 см будет смещена. В результате теплового движения газа линия будет расширяться, то есть перестанет быть монохроматической, а в результате различных радиальных скоростей движения газа как целого, линия будет смещаться в зависимости от величины и направления скорости. Смещение линии зависит от значения проекции радиальной скорости на луч зрения. При этом у лучей зрения с разными прицельными параметрами — минимального расстояния от луча до ПЧД — будет разная картина смещения линии (см. схему на рисунке 7).

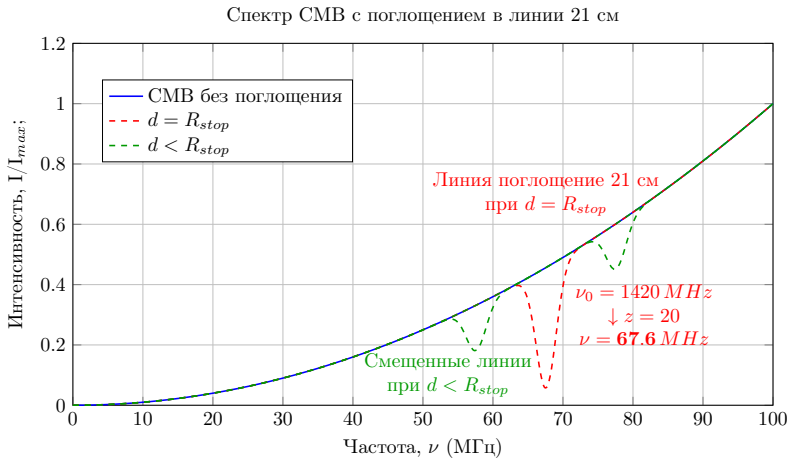


Рисунок 7 — Схематическое описание смещения линий поглощения для лучей зрения с разными прицельными параметрами d . Частота излучения на $z \sim 20$ будет равна 1420 МГц, наблюдаемая частота будет смещена в 67.6 МГц

Для лучей зрения, проходящих вне радиуса остановки, смещение будет приводить к тому, что пик поглощения будет «размазан» по множеству частот, фактически пика в этом случае не будет. Это происходит в результате того, что вдоль таких лучей зрения отсутствуют области, где производная проекции скорости на луч зрения обращается в ноль. А именно в таких областях будет происходить основное поглощение, так как это области где воспринимаемая частота меняется медленно и, соответственно, больше поглощается на близких частотах.

На лучах зрения, пересекающих сферу остановки, то есть с прицельными параметрами меньше радиуса остановки, распределение радиальных скоростей будет приводить к появлению двух пиков, симметрично смещенных относительно линии 21 см.

Наконец, на лучах зрения, касательных к сфере остановки, то есть при прицельном параметре, равном радиусу остановки, смещение пика поглощения 21 см будет отсутствовать. Такое отличие картин при разных прицельных параметрах и позволяет сформулировать способ поиска ПЧД. При наблюдении сферически симметричного объекта лучи зрения с одинаковым прицельным параметром будут образовывать конус, то есть наблюдаться будет кольцо (основание конуса), таким образом, можно говорить о кольце поглощения.

Задача о нахождении радиуса ионизации вокруг ПЧД связана с проверкой возможности существования этих колец поглощения. В случае, когда радиус ионизации больше чем радиус остановки, сигнал в линии 21 см будет отсутствовать, так как отсутствует нейтральный водород.

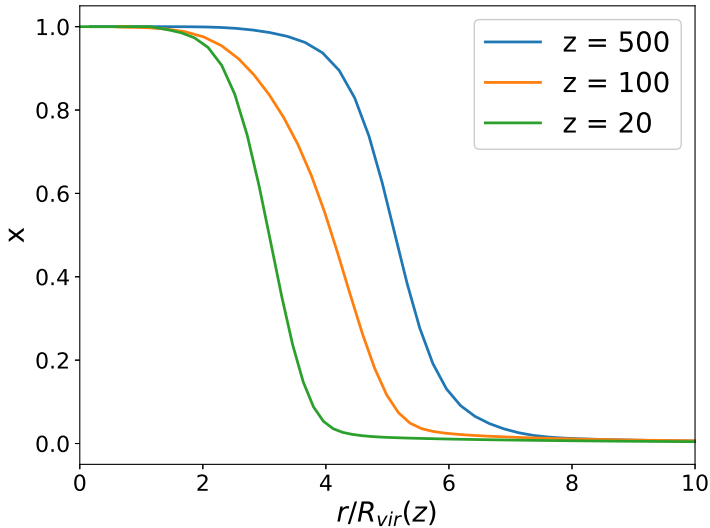


Рисунок 8 — Зависимость степени ионизации от расстояния (в вириальных радиусах) при разных красных смещениях

Далее в главе описываются методы, при помощи которых исследуется структура барионного гало и радиус ионизации. Исследование проводится методом численного решения уравнений гидродинамики с учетом переноса излучения от

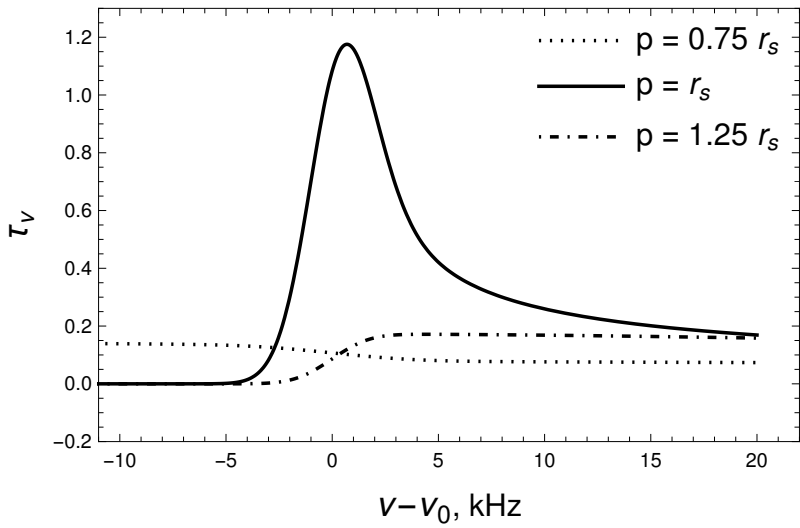


Рисунок 9 — Оптическая толщина при прохождении фотонов реликтового излучения через гало вокруг ПЧД при различных прицельных параметрах (минимальных расстояниях до луча зрения от центра гало) в зависимости от частоты при красном смещении $z = 20$

аккреции вещества на ПЧД. Данные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v) &= 0, \\
 \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial r} - \rho \frac{\partial \phi}{\partial r} + f_{\text{rad}}, \\
 \rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + v \frac{\partial e}{\partial r} \right) &= -P \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v) - \Lambda + \Gamma,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где ρ — плотность барионного газа, v — радиальная скорость газа, P — давление, ϕ — гравитационный потенциал, \mathbf{f}_{rad} — сила радиационного давления, e — удельная внутренняя энергия газа, Λ — скорость потерь энергии газом (радиационное охлаждение), Γ — скорость притока энергии в газ (радиационный нагрев).

Методика решения уравнений гидродинамики (2) описана в главе и в приложении В. Расчеты проводятся начиная с красного смещения $z = 3400$, то есть с момента перехода от стадии доминирования излучения (RD-стадии) к стадии доминирования вещества (MD-стадии). Такой выбор начального момента расчета связан с известными свойствами гало на тот момент истории Вселенной. Плотность вещества в гало совпадает со средней плотностью во Вселенной, так как только с момента RD-MD перехода начинается рост неоднородностей вещества во Вселенной, аналогично скорости газа соответствуют хаббловскому

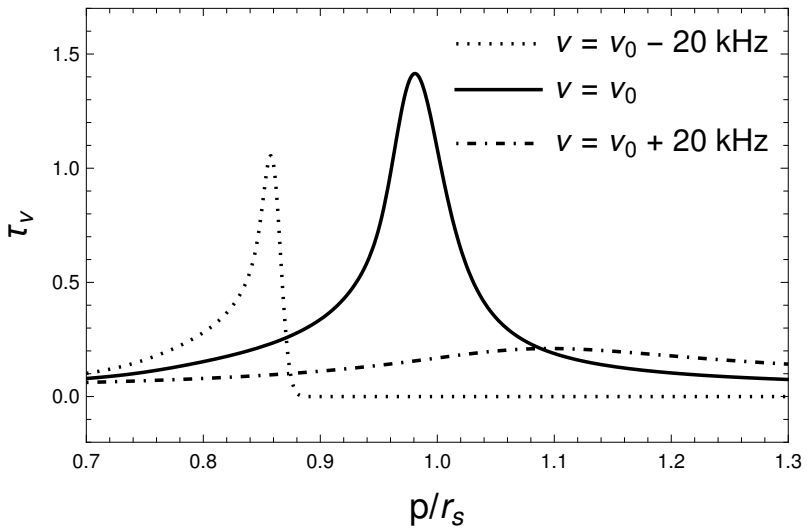


Рисунок 10 — Оптическая толщина при прохождении фотонов реликтового излучения через гало вокруг ПЧД при различных частотах, в зависимости от прицельного параметра в единицах радиуса остановки слоя СМ при $z = 20$. На этой картинке предполагается, что везде степень ионизации $x = 0$

потоку по той же причине. Также вещество остается полностью ионизованным вплоть до момента рекомбинации $z = 1100$.

Кроме непосредственно уравнений гидродинамики (2), система должна быть дополнена уравнением переноса излучения, которое решается в виде первого уравнения моментов, детальный вывод которого можно найти в [50]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 H_\nu) = -c n_{H^0} k_\nu^{ion} J_\nu - c n_e \sigma_{scat} J_\nu^{scat}, \quad (3)$$

где J_ν — плотность энергии излучения, H_ν — поток энергии излучения, J_ν^{scat} — суммарный поток комптоновских фотонов, σ_s — томсоновское сечение рассеяния фотонов, n_{H^0} и n_e концентрации нейтрального водорода и свободных электронов соответственно, c — скорость света. Сечение фотоионизации

$$k_\nu^{ion} = \sigma_{ion} \left(\frac{\nu}{\nu_{min}} \right)^{-3}, \quad (4)$$

где $h\nu_{min} = 13.6$ эВ — энергия ионизации водорода, а $\sigma_{ion} = 6 \cdot 10^{-18}$ см². Индекс ν в уравнении (3) обозначает частоту, для которой решается данное уравнение, поэтому для каждой частоты в спектре излучения необходимо решать свое уравнение (3). В диссертации рассматривается плоский спектр излучения, как, например, в [51], с диапазоном частот $h\nu_{min} = 13.6$ эВ и $h\nu_{max} = 200$ кэВ. Заметим, что уравнение переноса излучения решается только для ионизирующих фотонов $h\nu \geq 13.6$ эВ.

Как указывалось ранее, движение газа внутри вириальной области является существенно несферическим, что делает исследование данной области численными методами затруднительным. Однако именно в этой области движение газа определяет темп аккреции на ПЧД, что, в свою очередь, определяет поток аккреционного излучения. Поток газа на ПЧД в вириальной области можно оценить, изучая критические точки потока, как это делается, например, в [52]. Для этого рассматривается стационарный сферически симметричный поток. Оценка темпа аккреции, полученная в таком приближении, будет верхним пределом, так как несферичность движения газа в вириальной области может уменьшить темп аккреции. Итоговая оценка темпа аккреции

$$\dot{M}_{BH} \approx 72\pi^3 \frac{\Omega_B}{\Omega_M} R_{vir}^2(z) \rho_M(z) \frac{V_c(z)}{\sqrt{2}} \approx 430 \left(\frac{M_{BH}}{10^9 M_\odot} \right) (1+z)^{1/2} \frac{M_\odot}{\text{год}}, \quad (5)$$

где M_{BH} — масса ПЧД, Ω_B, Ω_M — доли барионов и материи в составе Вселенной соответственно, R_{vir} — вириальный радиус, V_c — круговая скорость движения газа. Тогда мощность излучения

$$L = \epsilon \dot{M}_{BH} c^2, \quad (6)$$

где $\epsilon < 1$ — эффективность аккреции энергии. Для дисковой аккреции $\epsilon \sim 0.1$,

$$L = 1.3 \cdot 10^{48} \epsilon \left(\frac{M_{BH}}{10^9 M_\odot} \right) (1+z)^{1/2} \text{ эрг с}^{-1}, \quad (7)$$

здесь M_{BH} — начальная масса ПЧД.

Далее приводятся результаты расчетов для радиуса ионизации (см. рисунок 8). По результатам можно сделать вывод о том, что радиус ионизации меньше, чем радиус остановки. Это означает, что наблюдение кольца поглощения не исключается аккрецией на ПЧД.

После этого исследуется поглощение в линии 21 см и приводится результат вычисления приращения оптической толщины из-за наличия барионного гало (см. рисунки 9 и 10). Основной особенностью исследуемого механизма поиска ПЧД является то, что поглощение в линии 21 см будет идти уже на $z \sim 20$, то есть в момент истории Вселенной, когда астрофизические черные дыры, то есть те, которые образовались из эволюции звезд, еще не могли образоваться, так как звездообразование начинает активно идти только при $z \sim 10 - 15$. Таким образом, наблюдение колец поглощения в линии 21 см на $z \sim 20$ будет означать, что обнаружена именно первичная черная дыра.

С этим также связан выбор массы центральной ПЧД. Данный механизм образования колец поглощения принципиально не зависит от массы черной дыры, однако от массы зависит радиус остановки, чем больше масса тем он больше. А так как $z \sim 20$ это ранний момент истории Вселенной, современные радиотелескопы обладают предельными угловыми разрешениями примерно в одну угловую секунду, что соответствует десяткам кпк на $z \sim 20$, что, в свою очередь, соответствует порядку величины радиуса остановки для $M \sim 10^9 M_\odot$.

В **заключении** приведены основные результаты диссертации, которые заключаются в следующем:

1. Продемонстрирована возможность образования кластера солитонной пены в рамках механизма, без теплового фазового перехода в ранней Вселенной. Исследована структура образующегося кластера, а также обнаружены различные солитонные эффекты, происходящие в нем. В отличие от механизма генерации солитонных структур в рамках теплового фазового перехода, данный механизм не генерирует солитонную сеть во всей Вселенной, а создает отдельные кластеры солитонной пены, погруженные в когерентный фон колебаний скалярного поля.
2. Предложена идея метода поиска сверхмассивных ПЧД, окруженных гало барионов, на больших красных смещениях на основе детектирования излучения нейтрального водорода с длиной волны 21 см. Данный метод может подходить также для поиска кластеров ПЧД, которые могли образоваться из кластеров солитонной «пены».
3. Обоснована возможность поиска сверхмассивных ПЧД по излучению нейтрального водорода в линии 21 см с учетом аккреционного излучения путем численного решения задачи об эволюции гало нейтрального водорода и гало скрытой массы вокруг сверхмассивной первичной черной дыры в догалактическую эпоху. Показано, что аккреционное излучение не влияет на возможность поиска ПЧД. Обнаружение подобной структуры может стать существенным доводом в пользу существования ПЧД и двухкомпонентной СМ.

Список литературы

Публикации по материалам диссертации

- D1. *Kirillov A. A., Murygin B. S.* Domain walls and strings formation in the early Universe // Bled Workshop in Physics. — 2020. — Т. 21. — С. 128–133.
- D2. *Kirillov A. A., Murygin B. S.* The mechanism of domain walls and strings formation in the early Universe // J. Phys. Conf. Ser. / под ред. P. Teterin. — 2020. — Т. 1690, № 1. — С. 012144.
- D3. *Kirillov A. A., Murygin B. S., Nikulin V. V.* Cosmological Formation of $(2 + 1)$ -Dimensional Soliton Structures in Models Possessing Potentials with Local Peaks // MDPI Physics. — 2021. — Т. 3, № 3. — С. 563–568.
- D4. *Murygin B., Stasenko V., Eroshenko Y.* Structure of the Baryon Halo Around a Supermassive Primordial Black Hole // Particles. — 2024. — Т. 7, № 4. — С. 1004–1016.
- D5. *Kirillov A. A., Murygin B. S., Nikulin V. V.* Soliton foam formation in the early Universe // Phys. Lett. B. — 2025. — Т. 860. — С. 139201.
- D6. *Kirillov A. A., Murygin B. S., Nikulin V. V.* Soliton foam formation in the early Universe // Phys. Part. Nucl. — 2025. — Т. 56, № 3. — С. 625–631.

Список использованных источников

1. *Cirelli M., Strumia A., Zupan J.* Dark Matter // arXiv e-prints. — 2024.
2. *Carr B.* [и др.]. Constraints on primordial black holes // Rept. Prog. Phys. — 2021. — Т. 84, № 11. — С. 116902.
3. *Carr B.* [и др.]. Primordial black hole constraints for extended mass functions // Phys. Rev. D. — 2017. — Т. 96, вып. 2. — С. 023514.
4. *Boudaud M.* [и др.]. In-depth analysis of the clustering of dark matter particles around primordial black holes. Part I. Density profiles // J. Cosmol. Astropart. Phys. — 2021. — Т. 08. — С. 053.
5. *Carr B., Kuhnel F., Visinelli L.* Black holes and WIMPs: all or nothing or something else // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 2021. — Т. 506, № 3. — С. 3648–3661.
6. *Yang J.* [и др.]. Pōniua‘ena: A Luminous $z = 7.5$ Quasar Hosting a 1.5 Billion Solar Mass Black Hole // Astrophys. J. Lett. — 2020. — Т. 897, № 1. — С. L14.

7. *Wang F.* [и др.]. A Luminous Quasar at Redshift 7.642 // *Astrophys. J. Lett.* — 2021. — Т. 907, № 1. — С. L1.
8. *Yan H.* [и др.]. First Batch of $z = 11$ –20 Candidate Objects Revealed by the James Webb Space Telescope Early Release Observations on SMACS 0723-73 // *Astrophys. J. Lett.* — 2022. — Т. 942, № 1. — С. L9.
9. *Liu B., Bromm V.* Accelerating Early Massive Galaxy Formation with Primordial Black Holes // *Astrophys. J. Lett.* — 2022. — Т. 937, № 2. — С. L30.
10. *Abbott B. P.* [и др.]. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Phys. Rev. Lett.* — 2016. — Т. 116, вып. 6. — С. 061102.
11. *Sasaki M.* [и др.]. Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914 // *Phys. Rev. Lett.* — 2016. — Т. 117, № 6. — С. 061101.
12. *Hall A., Gow A. D., Byrnes C. T.* Bayesian analysis of LIGO-Virgo mergers: Primordial vs. astrophysical black hole populations // *Phys. Rev. D.* — 2020. — Т. 102. — С. 123524.
13. *Carr B.* [и др.]. Observational evidence for primordial black holes: A positivist perspective // *Phys. Rept.* — 2024. — Т. 1054. — С. 1–68.
14. *García-Bellido J.* Massive Primordial Black Holes as Dark Matter and their detection with Gravitational Waves // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2017. — Т. 840, № 1. — С. 012032.
15. *Young S., Byrnes C. T.* Signatures of non-gaussianity in the isocurvature modes of primordial black hole dark matter // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* — 2015. — Т. 04. — С. 034.
16. *Musco I., Miller J. C., Rezzolla L.* Computations of primordial black-hole formation // *Class. Quantum Gravity.* — 2005. — Т. 22, № 7. — С. 1405.
17. *Skyrme T. H. R.* Particle States of a Quantized Meson Field // *Proc. R. Soc. Lond. A.* — 1961. — Т. 262, № 1309. — С. 237–245.
18. *Nambu Y.* Triplets, Static SU(6), and Spontaneously Broken Chiral SU(3) Symmetry // *International Conference Elementary Particles / под ред. Y. Tanikawa.* — 1966. — С. 131.
19. *Nielsen H. B., Olesen P.* Vortex-line models for dual strings // *Nucl. Phys. B.* — 1973. — Т. 61. — С. 45–61.
20. Magnetic monopoles in unified gauge theories // *Nucl. Phys. B.* — 1974. — Т. 79, № 2. — С. 276–284.
21. *Polyakov A. M.* Particle spectrum in quantum field theory // *J. Exp. Theor. Phys.* — 1974. — Т. 20. — С. 194.
22. *Zeldovich I. B., Kobzarev I. I., Okun L. B.* Cosmological consequences of a spontaneous breakdown of a discrete symmetry // *J. Exp. Theor. Phys.* — 1975. — Т. 67, № 1. — С. 3–11.
23. *Kibble T. W. B.* Topology of cosmic domains and strings // *J. Phys. A.* — 1976. — Т. 9, № 8. — С. 1387–1398.

24. *Kibble T. W. B.* Some implications of a cosmological phase transition // *Phys. Rep.* — 1980. — T. 67, № 1. — C. 183–199.
25. *Kirzhnits D. A.* Weinberg Model and the “Hot” Universe // *J. Exp. Theor. Phys.* — 1972. — T. 15. — C. 529.
26. *Kirzhnits D. A., Linde A. D.* Macroscopic consequences of the Weinberg model // *Phys. Lett. B.* — 1972. — T. 42, № 4. — C. 471–474.
27. *Zeldovich Y. B., Khlopov M. Y.* On the concentration of relic magnetic monopoles in the universe // *Phys. Lett. B.* — 1978. — T. 79, № 3. — C. 239–241.
28. *Preskill J. P.* Cosmological production of superheavy magnetic monopoles // *Phys. Rev. Lett.* — 1979. — T. 43, № 19. — C. 1365–1368.
29. *Albrecht A., Battye R. A., Robinson J.* Detailed study of defect models for cosmic structure formation // *Phys. Rev. D.* — 1998. — T. 59, № 2. — C. 023508.
30. *Albrecht A., Battye R. A., Robinson J.* Detailed study of defect models for cosmic structure formation // *Phys. Rev. D.* — 1998. — T. 59, № 2. — C. 023508.
31. *Wyman M., Pogosian L., Wasserman I.* Bounds on cosmic strings from WMAP and SDSS // *Phys. Rev. D.* — 2005. — T. 72, № 2. — C. 023513.
32. *LIGO Scientific Collaboration* [и др.]. Constraints on Cosmic Strings from the LIGO-Virgo Gravitational-Wave Detectors // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — T. 112, № 13. — C. 131101.
33. *Conversi L.* [и др.]. Are domain walls ruled out? // *Astropart. Phys.* — 2004. — T. 21, № 4. — C. 443–449.
34. *Santana Mota H. F., Hindmarsh M.* Big-bang nucleosynthesis and gamma-ray constraints on cosmic strings with a large Higgs condensate // *Phys. Rev. D.* — 2015. — T. 91, № 4. — C. 043001.
35. *Hindmarsh M., Kume J.* Multi-messenger constraints on Abelian-Higgs cosmic string networks // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* — 2023. — T. 2023, № 4. — C. 045.
36. *Hawking S. W., Moss I. G., Stewart J. M.* Bubble collisions in the very early universe // *Phys. Rev. D.* — 1982. — T. 26, вып. 10. — C. 2681–2693.
37. *Hawking S.* Black holes from cosmic strings // *Phys. Lett. B.* — 1989. — T. 231, № 3. — C. 237–239.
38. *Polnarev A., Zembowicz R.* Formation of primordial black holes by cosmic strings // *Phys. Rev. D.* — 1991. — T. 43, вып. 4. — C. 1106–1109.
39. *Hawking S. W.* Black holes from cosmic strings // *Phys. Lett. B.* — 1989. — T. 231, № 3. — C. 237–239.
40. *Polnarev A., Zembowicz R.* Formation of primordial black holes by cosmic strings // *Phys. Rev. D.* — 1991. — T. 43, № 4. — C. 1106–1109.
41. *Caldwell R. R., Casper P.* Formation of black holes from collapsed cosmic string loops // *Phys. Rev. D.* — 1996. — T. 53, № 6. — C. 3002–3010.

42. *Vilenkin A., Levin Y., Gruzinov A.* Cosmic strings and primordial black holes // J. Cosmol. Astropart. Phys. — 2018. — T. 2018, № 11. — C. 008.
43. *Rubin S. G., Khlopov M. Y., Sakharov A. S.* Primordial Black Holes from Non-Equilibrium Second Order Phase Transition // Grav. Cosmol. S. — 2000. — T. 6. — C. 51–58.
44. *Rubin S. G., Sakharov A. S., Khlopov M. Y.* The Formation of Primary Galactic Nuclei during Phase Transitions in the Early Universe // J. Exp. Theor. Phys. — 2001. — T. 92, № 6. — C. 921–929.
45. *Liu J., Guo Z.-K., Cai R.-G.* Primordial black holes from cosmic domain walls // Phys. Rev. D. — 2020. — T. 101, № 2. — C. 023513.
46. *Gani V. A., Kirillov A. A., Rubin S. G.* Classical transitions with the topological number changing in the early Universe // J. Cosmol. Astropart. Phys. — 2018. — T. 04. — C. 042.
47. *Vilenkin A., Shellard E. P. S.* Cosmic Strings and Other Topological Defects. — Cambridge University Press, 2000.
48. *Linde A. D.* Particle Physics and Inflationary Cosmology. T. 5. — CRC press, 1990.
49. *Dubrovich V. K., Eroshenko Y. N., Grachev S. I.* Observational manifestations of ‘cosmological dinosaurs’ at redshifts $z \approx 20$ // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2021. — T. 503, № 2. — C. 3081–3088.
50. *Castor J. I.* Radiation Hydrodynamics. — Cambridge University Press, 2004.
51. *Carr B. J.* Pregalactic black hole accretion and the thermal history of the universe // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1981. — T. 194. — C. 639–668.
52. *Sharma R., Sharma M.* The origin of supermassive black holes at cosmic dawn // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2024. — T. 531, № 3. — C. 3287–3296.