

На правах рукописи



Панасенко Любовь Алексеевна

**Исследование влияния эффекта Герценштейна на
спектр реликтовых гравитационных волн**

Специальность 1.3.3 — Теоретическая физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет».

Научный руководитель: **Долгов Александр Дмитриевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты: **Рамазанов Сабир Рамазанович**,
кандидат физико-математических наук,
Институт теоретической и математической
физики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,
ведущий научный сотрудник

Арбузов Андрей Борисович,
доктор физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория теоретической физики им.
Н.Н. Боголюбова,
начальник сектора

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Защита состоится 23 сентября 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.306.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВО ИГУ) по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского государственного университета и на сайте <https://isu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физико-математических
наук, доцент

Растёгин Алексей Эдуардович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Исследование гравитационных волн (ГВ) астрофизического и космологического происхождения приобретает все большую актуальность. Впервые предсказанные общей теорией относительности в 1915 году [1; 2], они были экспериментально зарегистрированы лишь сто лет спустя — в 2015 году с помощью лазерного интерферометра LIGO [3].

ГВ — это тензорные возмущения фонового пространства-времени, которые удовлетворяют волновому уравнению и распространяются со скоростью света.

Как известно, астрофизические ГВ излучаются двойными системами массивных компактных объектов (черных дыр и нейтронных звезд). Космологические ГВ возникают в процессах космологического масштаба: в результате усиления квантовых флуктуаций гравитационного поля в эпоху космологической инфляции [4; 5].

Теория инфляции была предложена для решения проблем теории горячего Большого взрыва: проблем плоскостности, однородности и изотропности Вселенной, энтропии и первичных неоднородностей (Гл. 11 книги [6]). Данная теория предполагает расширение Вселенной по квази-экспоненциальному закону в течение короткого временного интервала между планковским временем и началом эпохи разогрева Вселенной.

Одна из основных целей теории инфляции — согласовать теоретически предсказываемый спектр первичных скалярных возмущений метрики с наблюдаемым. Это важно, так как именно скалярные возмущения метрики становятся в дальнейшем центрами формирования крупномасштабной структуры (гл. 7 книги [6]). Однако наиболее простые модели инфляции предсказывают также рождение тензорных метрических возмущений — реликтовых гравитационных волн — достаточно большой амплитуды. Такие ГВ должны были оставить отпечаток на фоне реликтового излучения. Тем не менее, обнаружить этот след до сих пор не удается [7].

Одно из возможных решений существующего противоречия между теоретическими предсказаниями и наблюдениями — разработка более сложных моделей инфляции (см., например, работы [8; 9]).

В диссертации предлагается рассмотреть проблему с другой стороны: проверить гипотезу об изменении спектра реликтовых гравитационных волн вследствие эффекта их конверсии в электромагнитные волны под действием космологического магнитного поля.

Эффект конверсии был впервые рассмотрен Герценштейном в 1961 году [10; 11] для перехода электромагнитной волны в гравитационную под действием внешнего магнитного поля. Обратный эффект Герценштейна в астрофизике рассмотрен в работах [12–15]. Особый интерес представляет

статья [16], где обратный эффект Герценштейна изучается в контексте реликтового гравитационно-волнового фона.

Все вышеперечисленные работы ограничивались задачей взаимных превращений электромагнитной и гравитационной волн на фоне плоского пространства-времени Минковского. Однако в космологическом случае необходимо учитывать зависимость амплитуды реликтовых ГВ, а также напряженности магнитного поля от масштабного фактора. Поэтому в диссертации была поставлена задача исследования обратного эффекта Герценштейна на фоне расширяющегося пространства-времени Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера (ФЛРУ).

Важно пояснить природу внешнего магнитного поля, с которым взаимодействуют реликтовые ГВ — это крупномасштабное межгалактическое магнитное поле (космологическое магнитное поле). Есть экспериментальные подтверждения того, что межгалактическое пространство заполнено магнитным полем [17–21]. Таким образом, магнитное поле присутствует в областях, где текущих источников нет.

Гипотезы формирования крупномасштабного магнитного поля можно разделить на два класса: астрофизические и космологические. В основе астрофизических моделей лежит идея «выдувания» магнитного поля из галактик — в первую очередь, из галактик с активным звездообразованием [22; 23].

В диссертации рассмотрены только космологические модели, которые базируются на идеях генерации магнитного поля в процессах космологического масштаба, таких как инфляция или фазовые переходы первого рода, с последующим усилением внутри галактик и кластеров эффектом магнитогидродинамического динамо [21; 24].

Несмотря на то, что общепринятой теории магнитогенезиса еще нет, точно известно, что крупномасштабное межгалактическое магнитное поле существует, а также есть верхнее и нижнее ограничения на его напряженность, полученные из анализа наблюдательных данных об анизотропии и поляризации реликтового излучения, параметров крупномасштабной структуры, данных о форме фотонного гало вокруг блазаров и др. [21; 25].

Напряженность магнитного поля в расширяющейся Вселенной меняется по закону $B = \frac{B_0}{a(t)^2}$, где $a(t)$ — масштабный фактор, B_0 — константа. Это означает, что при движении вспять во времени, напряженность космологического магнитного поля растет относительно современного значения. Это может приводить к достаточно большому значению коэффициента конверсии гравитационных волн в электромагнитные и, следовательно, к изменению амплитуды реликтовых ГВ. А вследствие того, что коэффициент конверсии зависит от частоты ГВ, может значительно измениться наклон спектра n_T реликтовых ГВ — один из главных параметров, по измерению которого возможна проверка теории и выбор наиболее правдоподобной модели инфляции. Поэтому учет обратного эффекта Герценштейна для реликтовых

ГВ может иметь важное значения для верной трактовки наблюдательных данных и сопоставления их с теоретическими предсказаниями.

Целью данной работы является оценка влияния на спектр реликтовых гравитационных волн эффекта их конверсии в электромагнитные волны под действием космологического магнитного поля.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Вывод уравнения распространения возмущений метрики на фоне произвольного искривленного непустого пространства-времени.
2. Вывод системы дифференциальных уравнений, в общем виде описывающей распространение связанной системы возмущений метрики и электромагнитных волн в присутствии внешнего магнитного поля на фоне произвольного непустого искривленного пространства-времени.
3. Оценка влияния петлевой поправки, происходящей из эффективно-го действия Гейзенберга-Эйлера.
4. Рассмотрение конверсии реликтовых гравитационных волн в электромагнитные волны на фоне метрики ФЛРУ в упрощающем предположении однородности космологического магнитного поля.
5. Решение системы дифференциальных уравнений для обеих поляризацій гравитационной волны на временном интервале, соответствующем стадии радиационного доминирования, в случаях параллельного и перпендикулярного распространения гравитационной волны по отношению к однородному внешнему магнитному полю.
6. Оценка влияния неоднородности космологического магнитного поля.

Научная новизна:

1. Впервые получена система дифференциальных уравнений для обратного эффекта Герценштейна на фоне произвольного пространства-времени.
2. Впервые решена система уравнений для эффекта Герценштейна на фоне метрики ФЛРУ.
3. Впервые произведена оценка изменения спектра реликтовых гравитационных волн вследствие их перехода в фотоны при взаимодействии с космологическим магнитным полем.
4. Рассмотрен эффект смешивания гравитационных волн со скалярными метрическими возмущениями при прохождении гравитационной волны через асферичное облако при формировании структур во Вселенной Фридмана.

Практическая значимость

Учет эффекта изменения амплитуды реликтовых ГВ за счет их конверсии в фотоны под действием космологического магнитного поля может

быть существенен при вычислении спектра реликтовых ГВ. Действительно, ограничения на амплитуду реликтовых гравитационных волн в момент их зарождения будут более точными, если сделать поправку на степень их изменения в более поздние этапы эволюции Вселенной. Таким образом, проделанное исследование позволяет приблизиться к решению проблемы выбора модели одного из самых ранних этапов жизни Вселенной — инфляции, а также сделать более точные предсказания детектируемости реликтовых гравитационных волн в современной Вселенной.

Задача о переходе гравитационной волны в скалярные метрические возмущения в асферичных структурах во Вселенной Фридмана показывает о возможном значительном влиянии конверсии на амплитуду гравитационных волн. Так, гравитационные волны могут распространяться на фоне анизотропной метрики не только в формирующихся «блинах» Зельдовича, но и в других физически реалистичных случаях, а сами гравитационные волны могут быть не только космологического происхождения. Например, ГВ от слияния черных дыр может распространяться вблизи центра массивной галактики. Из-за смешивания мод будет происходить изменение амплитуды начального гравитационно-волнового сигнала, возникнет эффективная масса гравитона. Учет такого эффекта имеет важное значение при анализе гравитационно-волновых сигналов, пришедших на Землю.

Еще один практически применимый результат — полученная система уравнений связанного распространения возмущений метрики и электромагнитных волн в общем виде. Система может быть использована для случая любого фонового пространства-времени и для различных значений внешнего магнитного поля произвольной природы. Например, интересна задача о конверсии гравитационных волн в электромагнитные волны при распространении первых в окрестности намагниченных объектов (магнетаров, двойных систем нейтронных звезд, намагниченных облаков и т.п.). Уже проводились качественные оценки [26] конверсии гравитационных волн в фотоны для подобных задач, но в приближении плоского фонового пространства-времени. Полученная в работе система уравнений позволяет рассмотреть фоновую метрику Шварцшильда или Керра, что дает более точное описание конверсии вблизи массивного объекта.

Методология и методы исследования

В работе использованы классические методы теории поля и теории гравитации. В частности, применен подход линейной теории возмущений в общей теории относительности с разложением возмущений метрики по спиральностям.

Дифференциальные уравнения, описывающие эффект Герценштейна, проанализированы и решены в ключевых случаях перпендикулярного и параллельного направления волнового вектора \mathbf{k} гравитационной волны относительно внешнего магнитного поля \mathbf{B} ; а также в случаях низких и высоких частот гравитационной волны. В случае низких частот система

решена численно неявной схемой Рунге-Кутты пятого порядка. В случае высоких частот составлена и аналитически решена задача Коши.

В последней главе диссертации в качестве приближенной теории нелинейного коллапса пылевого облака применена теория Зельдовича.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В модели однородного, адиабатически изменяющегося космологического магнитного поля с современной напряженностью 1 нГс эффект Герценштейна к концу эпохи доминирования релятивистского вещества для h_{\times} -поляризации при $\mathbf{k} \perp \mathbf{B}$ приводит к усилению в 10 раз амплитуды реликтовых гравитационных волн с частотами 10^{-10} Гц $\lesssim k < 10^{-7}$ Гц и к усилению в 300 раз для волн с частотами $k \gtrsim 10^{-7}$ Гц;
2. В модели стохастического магнитного поля с длиной когерентности, соответствующей современному значению ≥ 10 Мпк, оценки, которые получены в модели однородного космологического магнитного поля, остаются верными;
3. Реликтовые гравитационные волны любой поляризации и направления волнового вектора относительно \mathbf{B} , вследствие наличия космологического магнитного поля, приобретают эффективную массу, из-за чего их амплитуда увеличивается относительно получаемой в космологии Фрийдмана без учета магнитного поля. К концу эпохи доминирования излучения усиление составляет порядка 0.01% для частот $10^{-18} \leq k \leq 10^{-14}$ Гц, порядка 0.1% для $10^{-13} \leq k \leq 10^{-12}$ Гц и порядка 0.5% для $k = 10^{-11}$ Гц;
4. Прохождение гравитационной волны с частотой 10^{-13} Гц через одно коллапсирующее анизотропное облако с параметрами для скопления галактик в эпоху доминирования нерелятивистского вещества, приводит к изменению амплитуды гравитационной волны на доли процента. Этот эффект обусловлен смешиванием тензорной и скалярной моды метрических возмущений на фоне анизотропного пространства. В диапазоне $10^{-9} - 10^{-6}$ Гц влияние одного облака масштаба скопления галактик оказывается практически нулевым: $\sim 10^{-9}$.

Достоверность полученных результатов основана на использовании общепринятых методов получения уравнений в теории гравитации и в физике элементарных частиц. Исследуемые уравнения в предельных случаях совпадают с результатами, ранее опубликованными другими авторами. В частности, система уравнений для эффекта Герценштейна, полученная для произвольной фоновой метрики, в случае плоского пространства-времени переходит в систему, полученную в работах [10; 11; 15; 16]. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых изданиях, неоднократно обсуждались на семинарах и конференциях.

Апробация работы

Основные результаты работы опубликованы в семи статьях и были представлены на следующих конференциях и школах: The 20st Lomonosov conference on elementary particle physics (2021), Hot topics in Modern Cosmology SPONTANEOUS WORKSHOP XV (2023), The XXVII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (2023), VI Международная зимняя школа-семинар по гравитации, астрофизике и космологии «Петровские чтения – 2023» (2023), Moscow International School on Physics (2024), МНСК-2024 (2024), Hot topics in Modern Cosmology SPONTANEOUS WORKSHOP XVI (2024).

Личный вклад

Автор самостоятельно производила вывод систем уравнений, их анализ и численное решение, принимала непосредственное участие в получении аналитического решения системы дифференциальных уравнений, описывающих эффект Герценштейна на фоне метрики ФЛРУ, самостоятельно выполняла все необходимые оценки влияния различных эффектов на окончательный результат. Соискатель участвовала в обсуждениях результатов с соавторами и в подготовке публикаций по теме диссертационной работы, презентовала устные и стендовые доклады на конференциях.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в семи статьях в рецензируемых научных изданиях, четыре из которых индексируются в базах Web of Science и относятся к первому, второму и четвертому квартилям.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и пяти приложений. Полный объем диссертации — 161 страниц текста с 25 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 145 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена обзору истории и формализма гравитационно-волновой теории, а также рассмотрению основных экспериментов по регистрации гравитационных волн и современного статуса гравитационно-волновых наблюдений.

Далее в главе описана концепция инфляционной теории. Данная теория позволяет решить проблемы теории горячего Большого взрыва и предсказывает рождение первичных скалярных и тензорных возмущений

метрики. Инфляционные тензорные возмущения метрики являются реликтовыми гравитационными волнами¹, которые, наряду со скалярными неоднородностями, должны были оставить отпечаток на фоне реликтового излучения. На сегодняшний день этот отпечаток не обнаружен.

После обзора литературы с результатами анализа данных об измерениях поляризации и анизотропии реликтового излучения в конце главы приведено современное ограничение на отношение мощности первичных тензорных возмущений к мощности скалярных

$$r = \left(\frac{\mathcal{A}_T}{\mathcal{A}_S} \right)^2 < 0,028, \quad (1)$$

где \mathcal{A}_S , \mathcal{A}_T — амплитуды первичных скалярных и тензорных возмущений метрики соответственно.

Наиболее простые модели инфляции со степенным потенциалом предполагают большее значение r . Это несоответствие теоретических предсказаний и наблюдений можно решить с помощью разработки более сложных моделей инфляции.

В диссертации предлагается рассмотреть вопрос с другой стороны: проверить гипотезу о возможном подавлении амплитуды реликтовых гравитационных волн вследствие эффекта Герценштейна под действием космологического магнитного поля.

Во **второй главе** выполнен обзор работ, посвященных изучению эффекта Герценштейна. В статьях других авторов данный эффект рассматривался только на фоне плоского пространства-времени Минковского и не в космологическом контексте. Например, в работе [11] с использованием действия Максвелла

$$\mathcal{A}_{\text{Max}} = -\frac{1}{4} \int d^4x \sqrt{-g} (F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} + A_\mu J^\mu) \quad (2)$$

и уравнений Эйнштейна получена следующая система дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \ddot{h}_{xy} - h''_{xy} &= -4B_0 b_y, \\ \ddot{b}_y - b''_y &= h''_{xy} B_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где g — определитель фонового метрического тензора, $F_{\alpha\beta}$, A_μ — тензор и потенциал электромагнитного поля, J_μ — ток, h_{xy} — компонента тензора метрических возмущений, B_0 — фоновое магнитное поле, b_y — компонента генерируемого магнитного поля. Система показывает рождение электромагнитной волны гравитационной волной, которая распространяется во внешнем, в данном случае однородном, магнитном поле.

¹В спектр реликтовых гравитационных волн могли дать вклад также гипотетические фазовые переходы первого рода. В работе рассматриваются только гравитационные волны инфляционного происхождения

В рассматриваемой в диссертации задаче напряженность космологического магнитного поля растет при движении вспять во времени, а при высоких напряженностях магнитного поля могут становиться значимыми петлевые поправки рассеяния света на свете. С целью дальнейшей оценки влияния этих поправок на эффект конверсии в разделе 2.1.1 приведено эффективное действие Гейзенберга-Эйлера

$$\mathcal{A}_{\text{HE}} = \int d^4x \sqrt{-g} C_0 \left[(F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta})^2 + \frac{7}{4} (\tilde{F}_{\alpha\beta} \tilde{F}^{\alpha\beta})^2 \right], \quad (4)$$

где $C_0 = \frac{\alpha^2}{90m_e^4}$, α — постоянная тонкой структуры, $\tilde{F}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2\sqrt{-g}} \epsilon_{\alpha\beta\mu\nu} F^{\mu\nu}$ — дуальный тензор электромагнитного поля, $\epsilon_{\alpha\beta\mu\nu}$ — тензор Леви-Чивиты. Это действие описывает поправку к действию Максвелла из бокс-диаграммы с четырьмя фотонными линиями и электрон-позитронной петлей для напряженности поля $B \ll m_e^2$.

Оставшаяся часть второй главы посвящена обзору моделей генерации космологического магнитного поля, а также его влияния на наблюдаемые космологические параметры: анизотропию и поляризацию реликтового излучения, спектр крупномасштабной структуры Вселенной, распространенность первичных химических элементов, форму гало вокруг активных ядер галактик. Приведены ограничения на современную напряженность межгалактического магнитного поля на основе наблюдательных данных и теории:

$$10^{-16} \text{ Гс} < B < 10^{-12} - 10^{-9} \text{ Гс}. \quad (5)$$

В последнем разделе второй главы на примере работы [27] кратко разобрана одна из моделей генерации стохастического первичного магнитного поля при фазовом переходе первого рода.

С **третьей главы** начинается основная часть диссертации.

В разделе 3.1 показана малая изученность уравнения распространения гравитационных волн на фоне произвольного искривленного пространства-времени, так как в подавляющем большинстве работ рассмотрено плоское либо конформно-плоское фоновое пространство.

Отмечено, что есть исследования для неизотропных пространств (например, пространств Бьянки), но в таких случаях изучается эволюция тензора метрических возмущений целиком — на тензорные, скалярные и векторные моды его не раскладывают.

По этим причинам автором было выведено уравнение распространения метрических возмущений на фоне произвольного пространства-времени с произвольной поправкой к фоновому тензору энергии-импульса:

$$\begin{aligned} D^2 h_{\mu\nu} - 2h^{\alpha\beta} R_{\alpha\beta\mu\nu} - (h_{\alpha\mu} R_{\nu}^{\alpha} + h_{\alpha\nu} R_{\mu}^{\alpha}) + h_{\mu\nu} R - g_{\mu\nu} \left(h^{\alpha\beta} R_{\alpha\beta} + \frac{1}{2} D^2 h \right) \\ = -16\pi G T_{\mu\nu}^{(1)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $D^2 = D_\mu D^\mu$, D_μ — ковариантная производная, $h_{\mu\nu}$ — тензор возмущения метрики, $R_{\alpha\beta\mu\nu}$, $R_{\mu\nu}$, R — тензор Римана, Риччи и скалярная кривизна соответственно, $T_{\mu\nu}^{(1)}$ — возмущение первого порядка над фоновым тензором энергии-импульса.

В диссертационном исследовании оценка влияния эффекта Герценштейна на спектр реликтовых гравитационных волн осуществляется в модели однородного космологического магнитного поля. Из-за такого упрощения появляется анизотропия фонового пространства. Так как первичные тензорные возмущения генерировались до момента зарождения магнитного поля, вполне законно рассматривать тензорную моду отдельно от скалярной. Целесообразно это и с точки зрения трактовки наблюдательных данных, так как тензорная и скалярная мода по-разному влияют на спектр реликтового излучения. Однако смешивания гравитационных волн и скалярных возмущений метрики в такой постановке задачи избежать не удастся.

В этом же разделе продемонстрировано смешивание мод возмущений метрики в простом случае пространства Бьянки, где

$$ds^2 = dt^2 - b(t)dx^2 - a(t)(dy^2 + dz^2), \quad a(t) \neq b(t). \quad (7)$$

Автор акцентирует внимание на том, что задачи с отклонением метрики от изотропной и одновременным разложением метрических возмущений на моды могут быть интересны. В качестве примера приведена задача о прохождении реликтовых гравитационных волн через «блины» Зельзовича, образующиеся при сферически не симметричном коллапсе материи при формировании крупномасштабной структуры Вселенной. Так как законы эволюции тензорных и скалярных возмущений от масштабного фактора различны, переход гравитационных волн в скалярные возмущения может приводить к изменению амплитуды изначальной гравитационной волны. Подробное изучение этого вопроса остается за рамками диссертации. Упрощенная задача о прохождении гравитационной волны через одно коллапсирующее пылевидное облако решена в главе 5.

В разделе 3.2 получена система уравнений для связанного распространения гравитационной и электромагнитной волн во внешнем магнитном поле произвольной конфигурации на фоне произвольного искривленного пространства-времени². Здесь же выполнена оценка вкладов в уравнения от эффективного действия Гейзенберга-Эйлера.

В работе рассматривается задача об эффекте Герценштейна в магнитном поле, меняющемся по закону $B \propto 1/a^2$, и напряженность которого соответствует современному значению 1 нГс. Решается система уравнений на интервале $a \in [10^{-12}, 10^{-4}]$.

Показано, что на интервале масштабного фактора $10^{-12} \leq a < 3 \times 10^{-11}$ петлевая поправка может быть получена только численными

²Ввиду громоздкости системы дифференциальных уравнений для эффекта Герценштейна из главы 3 в автореферате приводиться не будут

методами, так как для напряженности магнитного поля более 10^{13} Гс необходимо учитывать вклады петель высшего порядка.

В рамках представленного исследования учет петлевой поправки может быть осуществлен только для значений $a \geq 3 \times 10^{-11}$, когда напряженность магнитного поля $B \leq 10^{12}$ Гс. Решение системы уравнений на данном интервале показывает, что подавление амплитуд ГВ, получаемых к моменту $a = 10^{-4}$ с учетом и без учета эффективного действия Гейзенберга-Эйлера, составляет величину порядка 10^{-12} для волн с частотой 10^{-16} Гц и доли процента для волн с частотой 1 нГц. Эти значения незначительны, поэтому в рассматриваемой задаче автор пренебрегает петлевыми поправками рассеяния света на свете.

В разделе 3.3 система уравнений, описывающая эффект Герценштейна, записана в пространстве-времени ФЛРУ, заполненном однородным магнитным полем.

В четвертой главе рассматриваются два ключевых случая распространения начальной ГВ относительно магнитного поля: $\mathbf{k} \perp \mathbf{B}$ и $\mathbf{k} \parallel \mathbf{B}$. Сделаны следующие качественные выводы:

- эффект Герценштейна оказывает влияние только на амплитуду h_{\times} -поляризации гравитационной волны, распространяющейся перпендикулярно магнитному полю (см. ниже уравнение (9));
- для поляризации h_{+} при $\mathbf{k} \perp \mathbf{B}$ присутствует генерация электромагнитной волны и скалярных возмущений метрики без изменения амплитуды изначальной гравитационной волны. Это демонстрирует система дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\partial_t^2 + 3H\partial_t + \left(\frac{k^2}{a^2} + \frac{8\pi G B_0^2}{a^4} \right) \right] h_{+} = \frac{16\pi G B_0}{a^2} (ikfy - \frac{B_0}{a^2} \Psi), \\ \left[\partial_t^2 + 3H\partial_t + \frac{k^2}{a^2} \right] fy = -\frac{ikB_0}{2a^4} [h_{+} + \Phi - \Psi], \\ ikH(\Phi + \Psi) = -\frac{4\pi G B_0}{a^2} fy, \\ \Psi = -h_{+} + \frac{ika^2}{B_0} fy, \end{array} \right. \quad (8)$$

где H – параметр Хаббла, $\partial_t = \frac{\partial}{\partial t}$, fy – y -компонента вектор-потенциала генерируемой электромагнитной волны, Φ , Ψ – скалярные моды возмущения метрики, B_0 – напряженность космологического магнитного поля в современной Вселенной;

- для обеих поляризаций гравитационной волны при $\mathbf{k} \parallel \mathbf{B}$ и для h_{+} поляризации при $\mathbf{k} \perp \mathbf{B}$ присутствует эффективная масса $\propto \frac{B}{m_{\text{pl}}}$ из-за наличия однородного космологического магнитного поля. Однако показано, что данная поправка для частот $10^{-18} \leq k \leq 10^{-11}$ дает слабое усиление амплитуды реликтовых ГВ к концу эпохи РД: порядка 0.01% для частот $10^{-18} \leq k \leq 10^{-14}$ Гц, порядка 0.1% для $10^{-13} \leq k \leq 10^{-12}$ Гц и порядка 0.5% для $k = 10^{-11}$

Гц. По анизотропии и поляризации реликтового излучения определяют отношение мощности скалярных возмущений к мощности тензорных. Это отношение определяют для масштаба 0.05 Мпк^{-1} ($k = 5 \times 10^{-16} \text{ Гц}$) с точностью до третьего знака после запятой, а не до четвертого. Следовательно, рассчитанный эффект от слагаемого $8\pi GB^2$ слишком слаб, чтобы его можно было обнаружить экспериментально. Таким образом, рассматриваемый эффект не приводит к новой трактовке современных наблюдательных ограничений на скалярно-тензорное отношение, полученное из анализа анизотропии и поляризации реликтового излучения.

Система дифференциальных уравнений для конверсии h_{\times} -поляризации гравитационной волны в случае $\mathbf{k} \perp \mathbf{B}$ имеет вид

$$\begin{cases} \left[\partial_t^2 + 3H\partial_t + \left(\frac{k^2}{a^2} + \frac{8\pi GB_0^2}{a^4} \right) \right] h_{\times} = -\frac{ik16\pi GB_0}{a^2} f^x, \\ \left[\partial_t^2 + 3H\partial_t + \frac{k^2}{a^2} \right] f^x = \frac{ikB_0}{2a^4} h_{\times}, \end{cases} \quad (9)$$

где f^x — x -компонента вектор-потенциала генерируемой электромагнитной волны.

В разделе 4.3 система (9) решена аналитически. На рис. 1 показаны графики аналитического решений системы (9) и, для сравнения, аналитического решения для свободно распространяющейся ГВ

$$\tilde{h}_{\text{free}} = \tilde{h}_0 \cdot \cos k\eta = \tilde{h}_0 \cos \sqrt{\gamma}x \quad (10)$$

при различных k . Все графики нормированы на начальную амплитуду ГВ \tilde{h}_0 .

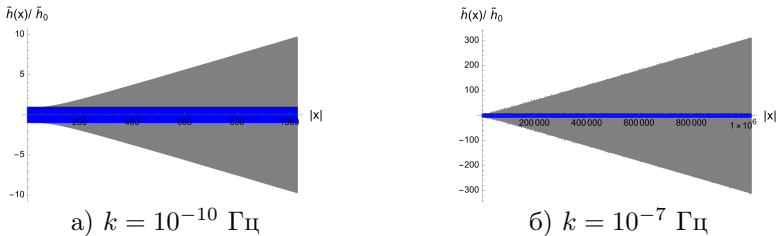


Рисунок 1 — Зависимость амплитуды ГВ от $x = 3 \cdot 10^{-3} k\eta(a)$ на интервале $a \in [10^{-12}, 10^{-4}]$ для $B_0 = 1 \text{ нГс}$: серый — аналитическое решение уравнения распространения ГВ с учетом эффекта Герценштейна; синий — аналитическое решение для свободно распространяющейся гравитационной волны. Амплитуда нормирована на начальную амплитуду ГВ \tilde{h}_0 . Высоочастотные колебания не различимы

Почти такая же картина, как на правой панели рис. 1, получается для всех частот $k > 10^{-7}$ Гц: усиление амплитуд ГВ в триста раз к концу эпохи доминирования излучения.

Для более реалистичных моделей магнитное поле в эпоху радиационного доминирования спадает быстрее, чем $1/a^2$. Поэтому для оценки качественного результата в таких моделях, было получено усиление для напряженности магнитного поля 10 нГс. Оно составило величину более трех порядков для частот $k \gtrsim 10^{-10}$ Гц (см. рисунок 2).

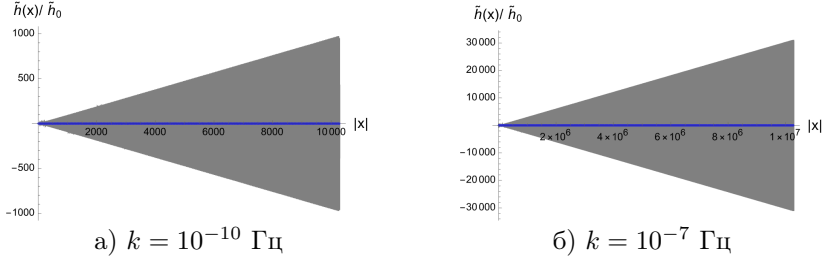


Рисунок 2 — Зависимость амплитуды ГВ от $x = 3 \cdot 10^{-2} k \eta(a)$ на интервале $a \in [10^{-12}, 10^{-4}]$ для $B_0 = 10$ нГс: серый — аналитическое решение уравнения распространения ГВ с учетом эффекта Герценштейна; синий — аналитическое решение для свободно распространяющейся гравитационной волны. Амплитуда нормирована на начальную амплитуду ГВ \dot{h}_0 . Высокочастотные колебания не различимы

На основе вышесказанного сделан вывод, что эффект Герценштейна приводит к значительному увеличению амплитуды реликтовых гравитационных волн h_{\times} -поляризации ($\mathbf{k} \perp \mathbf{B}$) с частотами $k \gtrsim 10^{-10}$ Гц для рассматриваемых напряженностей магнитного поля.

Немаловажную роль играет длина когерентности первичного магнитного поля и ее эволюция в модели стохастического магнитного поля. Когда гравитационная волна будет преодолевать характерное расстояние, на котором напряженность магнитного поля может считаться постоянной, направление магнитного поля будет случайным образом меняться. Это будет приводить к изменению направления вынуждающей силы в правой части уравнений (9). В результате усиление гравитационной волны будет сменяться ослаблением, и в среднем эффект изменения амплитуды на большом количестве пройденных длин когерентности обратится в ноль.

В разделе 4.4 диссертации приведены эти качественные соображения, а также графики, изображенные на рисунках 3 и 4. Они для закона $\lambda \propto a$ показывают, при каких длинах когерентности космологического магнитного поля в современной Вселенной эффект Герценштейна будет оставлять отпечаток на спектре реликтовых гравитационных волн как в эпоху радиационного доминирования, так и в эпоху доминирования пыли.

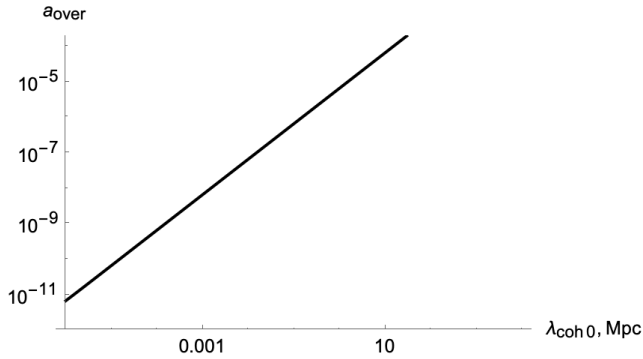


Рисунок 3 — Значение масштабного фактора при первом пересечении длины когерентности космологического магнитного поля фронтом ГВ для эпохи доминирования излучения как функция длины когерентности в современной Вселенной. Зависимость получена в предположении, что магнитное поле зародилось в момент $a_1 = 10^{-12}$

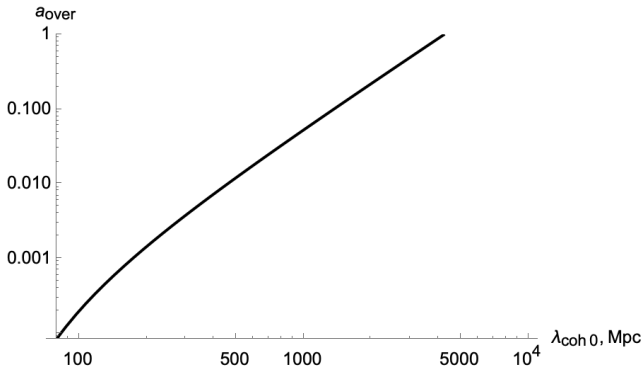


Рисунок 4 — Значение масштабного фактора при первом пересечении длины когерентности космологического магнитного поля фронтом ГВ для эпохи доминирования пыли как функция длины когерентности в современной Вселенной. Рассматривается первое пересечение от момента $a_1 = 10^{-4}$

Так, в модели с длиной когерентности, соответствующей современному значению ≥ 10 Мпк, оценки, полученные в модели однородного магнитного поля, остаются верными.

Тем не менее, в данном случае модельную зависимость невозможно исключить, так как нет ни достоверных измерений напряженности межгалактического магнитного поля, ни измерений его длины когерентности.

В конце четвертой главы также получена система уравнений с учетом взаимодействия фотонов с первичной плазмой. Данный вопрос требует

дальнейшего исследования. Отмечено, что такое взаимодействие, даже если оно уменьшит эффект усиления реликтовых гравитационных волн с частотами $k \gtrsim 10^{-10}$ Гц, может оставить характерный след на спектре реликтовых гравитационных волн.

В **пятой главе** решена задача об изменении амплитуды гравитационной волны при прохождении анизотропного коллапсирующего пылевого облака.

В приближении неизменного контраста плотности энергии в модели нелинейного коллапса Зельдовича получена система уравнений

$$\begin{aligned} \ddot{h}_+ + (H_x + H_y + H_z) \dot{h}_+ + \left[\frac{k_z^2}{a_z^2} + 2(H_y - H_z)(H_x - H_y) \right] h_+ &= 0, \\ \ddot{\Phi} + (H_x + H_y + H_z) \dot{\Phi} + \frac{k_z^2}{a_z^2} \Phi &= \frac{H_y^2 - H_x^2}{2} h_+, \end{aligned} \quad (11)$$

где a_z — масштабный фактор вдоль оси z , меняющийся согласно модели нелинейного коллапса Зельдовича, H_i — параметры Хаббла вдоль соответствующих осей координат, k_z — волновое число гравитационной волны, распространяющейся вдоль оси z , Φ — скалярное возмущение метрики.

Решение в приближении постоянных коэффициентов показывает, что изменение амплитуды ГВ с частотой 10^{-13} Гц и поляризацией h_+ на доли процента при прохождении одного эллипсоидального облака с реалистичными параметрами структур во Вселенной в эпоху доминирования нерелятивистского вещества. В диапазоне чувствительности эксперимента по точному таймингу пульсаров, $10^{-9} - 10^{-6}$ Гц, влияние одного облака масштаба скопления галактик оказывается практически нулевым: $\sim 10^{-9}$.

В перспективе планируется найти численное решение системы уравнений с учетом зависимости коэффициентов дифференциальных уравнений от времени.

Планируется также исследование вопроса о суммарном эффекте после прохождения гравитационной волной большого количества асферичных структур. Это не тривиальная задача, так как уравнение для квадрата эффективной массы гравитона имеет вид

$$m_{\text{eff}}^2 = \frac{2(\alpha_x - \alpha_y)(\alpha_y - \alpha_z)}{\left(\alpha_x \delta - \frac{10}{3} \left(\frac{t}{t_1}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \left(\alpha_z \delta - \frac{10}{3} \left(\frac{t}{t_1}\right)^{\frac{2}{3}}\right)}. \quad (12)$$

Здесь $\delta = \delta\rho/\rho_b$, α_i — параметры начальной анизотропии эллипсоида.

Из-за равномерного распределения пропорций у асферичных структур на пути ГВ два верхних множителя в уравнении (12) дают попеременно то положительные значения, то отрицательные. При большой статистике прохождений через облака эффект изменения амплитуды ГВ усреднялся бы к нулю. Однако в выражении присутствует также знаменатель, который

уже не обеспечивает такого очевидного результата. Здесь нужно говорить о некоторых характерных значениях параметров анизотропии эллипсоида и о значениях контраста плотности энергии. Эти параметры будут отличаться для облаков разного масштаба и, к тому же, зависят от рассматриваемого интервала времени на протяжении эволюции Вселенной. Подробному решению такой задачи будет посвящено будущее исследование, выходящее за рамки диссертационного.

Сложно сказать, каким будет усредненный эффект после прохождения гравитационной волны большого количества асферичных облаков. Все, что можно сделать в рамках упрощенной задачи, — оценить изменение амплитуды после прохождения одного облака и выяснить качественную зависимость эффекта от параметров эллипсоида.

Рассмотрение изменения спектра реликтовых гравитационных волн в эпоху доминирования излучения видится нецелесообразным в силу того, что в ранней Вселенной контрасты плотности усиливаются для структур небольших масштабов. Таким образом, ГВ будет находиться внутри анизотропной структуры слишком малый период времени, чтобы эффект был значительным. Ведь результаты показывают, что даже для структур с масштабами скоплений галактик эффект остается слабым: $\sim 10^{-3}$ для $k \sim 10^{-13}$ Гц.

Автор предполагает, что в некоторых задачах при прохождении астрофизических гравитационных волн в окрестностях объектов с сильно анизотропной метрикой (например, около пульсаров или вращающихся черных дыр) или внутри массивных асферичных скоплений галактик, может возникать значительная эффективная масса у гравитона из-за смешивания со скалярными и векторными модами возмущений метрики. Эта эффективная масса может изменить изначальные характеристики гравитационного излучения, и потому должна учитываться при анализе гравитационных сигналов, зарегистрированных интерферометрами Майкельсона. Этот аспект станет особенно важным для нового поколения детекторов гравитационных волн в рамках проверки теорий массивной гравитации.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационного исследования.

Выводы о значительном усилении коротковолновых реликтовых гравитационных волн в рассмотренной упрощенной задаче указывают на необходимость продолжения исследований. Если после учета взаимодействий фотонов с первичной плазмой результат останется неизменным, он повлечет за собой необходимость пересмотра ожидаемого современного спектра реликтовых гравитационных волн. Это важно, так как значительный рост амплитуды гравитационных волн с частотами выше одного наногерца будет говорить о возможности детектирования реликтовых гравитационных волн с помощью космических интерферометров и в эксперименте по точному таймингу пульсаров Pulsar Timing Array (PTA).

Публикации автора по теме диссертации

1. *Arbuzova E. V.* On Graviton Propagation in Curved Space-Time Background / E.V. Arbuzova, A.D. Dolgov, L.A. Panasenko // *J. Exp. Theor. Phys.* — 2022. — Vol. 135, no. 3. — P. 304–311. — DOI: 10.1134/S1063776122090126. — arXiv: 2011.07594 [gr-qc].
2. *Panasenko L.* Gravitational Waves over Arbitrary Background / L. Panasenko // *Moscow Univ. Phys. Bull.* — 2022. — Vol. 77, no. 2. — P. 336–337. — DOI: 10.3103/S0027134922020746.
3. *Dolgov A.D.* Graviton to Photon Conversion in Curved Space-Time and External Magnetic Field / A.D. Dolgov, L.A. Panasenko, V.A. Bochko // *Universe.* — 2024. — Vol. 10, no. 1. — P. 7. — DOI: 10.3390/universe10010007. — arXiv: 2310.19838 [gr-qc].
4. *Arbuzova E. V.* Opening of New Windows to the Early Universe by Means of Multi-Messenger Astronomy (Brief Review) / E.V. Arbuzova, K.A. Dolgikh, A.D. Dolgov et al. // *JETP Lett.* — 2024. — Vol. 119, no. 7. — P. 485–494. — DOI: 10.1134/S0021364024600629.
5. *Панасенко Л.А.* Конверсия гравитационных волн в электромагнитные под действием космологического магнитного поля на фоне вселенной Фридмана / Л.А. Панасенко, А.Д. Долгов // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия.* — 2023. — С. 13.
6. *Panasenko L.* Relic Gravitational Wave Conversion into Photons in the Cosmological Magnetic Field / L. Panasenko // *Physics of Particles and Nuclei Letters.* — 2024. — Aug. — Vol. 21. — P. 590–592. — DOI: 10.1134/S1547477124700675.
7. *Panasenko L.A.* Conversion of high-frequency relic gravitational waves into photons in cosmological magnetic field / L.A. Panasenko, A.O. Chetverikov // *Eur. Phys. J. Plus.* — 2024. — Vol. 139, no. 12. — P. 1087. — DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05882-w. — arXiv: 2409.07063 [gr-qc].

Список литературы

- [1] *Einstein A.* Die Feldgleichungen der Gravitation / A. Einstein // *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin.* — 1915. — P. 844–847.
- [2] *Einstein A.* On gravitational waves / A. Einstein, N. Rosen // *Journal of the Franklin Institute.* — 1937. — Vol. 223. — P. 43–54.

- [3] *Abbott B.P.* Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott // *Phys. Rev. Lett.* — 2016. — Vol. 116. — P. 061102.
- [4] *Starobinsky A.A.* Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe / A.A. Starobinsky // *JETP Lett.* — 1979. — Vol. 30. — P. 682–685.
- [5] *Linde A.D.* Inflationary Cosmology / A. D. Linde // *Lect. Notes Phys.* — 2008. — Vol. 738. — P. 1–54.
- [6] *Горбунов Д.* Введение в теорию ранней Вселенной / Д. Горбунов, В. Рубаков. — М.: URSS, 2009. — 456 с.
- [7] *Galloni G.* Updated constraints on amplitude and tilt of the tensor primordial spectrum / G. Galloni, N. Bartolo, S. Matarrese [et al.] // *JCAP.* — 2023. — Vol. 2023. — P. 062.
- [8] *Starobinsky A.A.* A New Type of Isotropic Cosmological Models Without Singularity / A.A. Starobinsky // *Phys. Lett. B.* — 1980. — Vol. 91. — P. 99–102.
- [9] *Kallos R.* Universality class in conformal inflation / R. Kallos, A. Linde // *JCAP.* — 2013. — Vol. 2013. — P. 002.
- [10] *Gertsenshtein M.E.* Wave resonance of light and gravitational waves / M. E. Gertsenshtein // *Sov. Phys. JETP.* — 1962. — Vol. 14. — P. 84–85.
- [11] *Palessandro A.* A simple derivation of the Gertsenshtein effect / A. Palessandro, T. Rothman // *Physics of the Dark Universe.* — 2023. — Vol. 40. — P. 101187.
- [12] *Macedo P.G.* Propagation of gravitational waves in a magnetized plasma / P.G. Macedo, A.H. Nelson // *Phys. Rev. D.* — 1983. — Vol. 28. — P. 2382–2392.
- [13] *Fargion D.* Prompt and delayed radio bangs at kilohertz by SN 1987A / D. Fargion // *Gravit. Cosmol.* — 1995. — Vol. 1. — P. 301.
- [14] *Cruise A.M.* The potential for very high-frequency gravitational wave detection / A.M. Cruise // *Class. Quantum Grav.* — 2012. — Vol. 29. — P. 095003.
- [15] *Ejlli D.* Graviton-photon mixing / D. Ejlli, V.R. Thandlam // *Phys. Rev. D.* — 2019. — Vol. 99. — P. 044022.
- [16] *Dolgov A.D.* Conversion of relic gravitational waves into photons in cosmological magnetic fields / A.D. Dolgov, D. Ejlli // *JCAP.* — 2012. — Vol. 2012. — P. 003.

- [17] *Govoni F.* Magnetic fields in clusters of galaxies / F. Govoni, L. Feretti // Int. J. Mod. Phys. D. — 2004. — Vol. 8.
- [18] *Wolfe A.M.* Magnetic Fields in Damped LY alpha Systems / A. M. Wolfe, K. M. Lanzetta, A. L. Oren // Astrophys. J. — 1992. — Vol. 388. — P. 17.
- [19] *Clarke T.E.* A New radio-X-ray probe of galaxy cluster magnetic fields / T.E. Clarke, P.P. Kronberg, H. Boehringer // Astrophys. J. Lett. — 2001. — Vol. 547. — P. L111–L114.
- [20] *Xu Y.* A Faraday Rotation Search for Magnetic Fields in Large-scale Structure / Y. Xu, P. Kronberg, S. Habib [et al.] // Astrophys. J. — 2006. — Vol. 637. — P. 19–26.
- [21] *Yamazaki D.G.* The search for a primordial magnetic field / D. G. Yamazaki, T. Kajino, G. J. Mathews [et al.] // Phys. Rept. — 2012. — Vol. 517. — P. 141–167.
- [22] *Hanasz M.* Building the Fast Galactic Dynamo / M. Hanasz, R. Kosinski, H. Lesch // Astrophys. Space Sci. — 2004. — Vol. 289. — P. 303–306.
- [23] *Rieder M.* A small-scale dynamo in feedback-dominated galaxies / M. Rieder, R. Teyssier // MNRAS. — 2016. — Vol. 457. — P. 1722–1738.
- [24] *Grasso D.* Magnetic fields in the early universe / D. Grasso, H.R. Rubinstein // Phys. Rept. — 2001. — Vol. 348. — P. 163–266.
- [25] *Neronov A.* Evidence for strong extragalactic magnetic fields / A. Neronov, I. Vovk // Science. — 2010. — Vol. 328. — P. 73–75.
- [26] *Dolgov A.* Electromagnetic radiation accompanying gravitational waves from black hole binaries / A. Dolgov, K. Postnov // JCAP. — 2017. — Vol. 2017, no. 09. — P. 018.
- [27] *Ellis J.* Intergalactic Magnetic Fields from First-Order Phase Transitions / J. Ellis, M. Fairbairn, M. Lewicki [et al.] // JCAP. — 2019. — Vol. 09. — P. 019.

Панасенко Любовь Алексеевна

Исследование влияния эффекта Герценштейна на спектр реликтовых
гравитационных волн

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____