

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор —

проректор по научной деятельности

Федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего

образования «Казанский (Приволжский)

федеральный университет»

Д. А. Таюрский

август 2026 г



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ) на диссертацию Панасенко Любови Алексеевны «Исследование влияния эффекта Герценштейна на спектр реликтовых гравитационных волн», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика

Диссертационная работа Панасенко Л. А. посвящена изучению влияния эффекта перехода гравитационных волн в электромагнитные под действием космологического магнитного поля — эффекта Герценштейна — на спектр реликтовых гравитационных волн. Ключевой особенностью работы является рассмотрение эффекта не на фоне плоского пространства-времени Минковского, а на фоне метрики Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера, описывающей расширяющуюся Вселенную. В диссертации рассмотрено также влияние на амплитуду реликтовых гравитационных волн эффекта перехода гравитационных волн в скалярные метрические возмущения при прохождении асферичного коллапсирующего облака при формировании структур во Вселенной.

Новизна исследования заключается в получении системы уравнений для эффекта Герценштейна на фоне произвольного искривленного непустого пространства-времени и в решении этой системы на фоне метрики Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера (ФЛРУ), тогда как в работах других авторов система уравнений строилась на фоне плоского пространства-времени с метрикой Минковского. Впервые выполнена оценка влияния данного эффекта на спектр реликтовых гравитационных волн. Кроме того, впервые

рассмотрено изменение амплитуды реликтовых гравитационных волн вследствие конверсии гравитационных волн в скалярные возмущения метрики при прохождении через асферичное коллапсирующее облако на этапе формирования структур во Вселенной. В предшествующих работах других авторов явление смешивания тензорных и скалярных возмущений метрики рассматривалось только в случаях анизотропной космологии в целом, в то время как в данной работе не требуется отступления от общепринятой космологической модели Λ CDM.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты позволяют уточнить ограничения на амплитуду реликтовых гравитационных волн, приблизиться к выбору модели инфляции и повысить точность предсказаний их детектируемости. Полученная система уравнений для эффекта Герценштейна на фоне произвольного пространства-времени может быть применена для анализа конверсии в окрестности астрофизических объектов (магнетаров, нейтронных звезд, черных дыр), что позволит оценить возможность регистрации фотонов и тем самым экспериментально обнаружить сам эффект Герценштейна, до сих пор не наблюдавшийся.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов не вызывает сомнений, поскольку они получены с использованием общепринятых и хорошо проверенных методов физики элементарных частиц и эйнштейновской теории гравитации, а исследуемые уравнения в предельных случаях совпадают с результатами, ранее полученными другими авторами. Кроме того, материалы диссертации опубликованы в рецензируемых изданиях и неоднократно обсуждались на семинарах и конференциях.

Диссертационная работа Панасенко Л. А. изложена на 161 странице машинописного текста, содержит 25 рисунков и 3 таблицы. Диссертационная работа состоит из введения, двух глав литературного обзора и трех глав с оригинальным исследованием, заключения, пяти приложений и списка цитируемой литературы, состоящего из 145 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, характеризуется степень разработанности темы, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, приводятся положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов, описывается личный вклад соискателя, а также представлены сведения об апробации работы.

Первая глава посвящена литературному обзору. В ней приводится история и формализм гравитационно-волновой теории, рассматриваются основные эксперименты по регистрации гравитационных волн и современный статус гравитационно-волновых

наблюдений. Изложена концепция инфляционной теории, предсказывающей рождение первичных скалярных и тензорных возмущений метрики (реликтовых гравитационных волн), отпечаток которых на поляризации и анизотропии реликтового излучения до сих пор не обнаружен. Приведено современное ограничение на отношение мощности тензорных возмущений к скалярным ($r < 0,028$), которое не согласуется с предсказаниями простейших инфляционных моделей со степенным потенциалом. В диссертации предлагается альтернативный подход: проверить гипотезу о возможном подавлении амплитуды реликтовых гравитационных волн вследствие эффекта Герценштейна под действием космологического магнитного поля.

Вторая глава также носит обзорный характер. В ней выполнен обзор работ по эффекту Герценштейна, который ранее рассматривался только на фоне плоского пространства-времени Минковского. Приведена система уравнений, описывающая конверсию гравитационной волны в электромагнитную во внешнем магнитном поле. Далее рассмотрены модели генерации космологического магнитного поля и его влияние на анизотропию и поляризацию реликтового излучения, крупномасштабную структуру Вселенной, первичный нуклеосинтез и гало активных ядер галактик. Приведены наблюдательные ограничения на современную напряженность межгалактического магнитного поля. В последнем разделе разобрана модель генерации стохастического первичного магнитного поля при фазовом переходе первого рода.

В третьей главе автором выведено уравнение распространения метрических возмущений на фоне произвольного пространства-времени с произвольной поправкой к тензору энергии-импульса, что обусловлено малой изученностью этого случая в литературе. В модели однородного космологического магнитного поля возникает анизотропия фона, что приводит к смешиванию мод возмущений метрики. Тем не менее, автор подчеркивает целесообразность разложения возмущений метрики по спиральностям, поскольку и теоретический анализ реликтовых гравитационных волн и скалярных возмущений, и их экспериментальная регистрация основаны именно на спиральных компонентах. Получена система уравнений для связанного распространения гравитационной и электромагнитной волн во внешнем магнитном поле произвольной конфигурации на фоне произвольного искривленного пространства-времени, а также выполнена оценка вклада петлевых поправок (эффективное действие Гейзенберга–Эйлера). Показано, что на интервале масштабного фактора, где напряженность магнитного поля превышает 10^{13} Гс, учет поправок возможен только численно, а в области $a \geq 3 \times 10^{-11}$ подавление амплитуды гравитационных волн за счет этих поправок незначительно, что позволяет ими пренебречь. В заключительной части главы система уравнений для эффекта

Герценштейна записана в пространстве-времени ФЛРУ, заполненном однородным магнитным полем.

В четвертой главе представлены результаты исследования эффекта Герценштейна для двух ключевых случаев ориентации волнового вектора гравитационной волны относительно направления космологического магнитного поля: перпендикулярно ($k \perp B$) и параллельно ($k \parallel B$). Показано, что для случая $k \perp B$ эффект влияет только на амплитуду $h_{\times}$ -поляризации, тогда как для h_{+} -поляризации при той же ориентации происходит генерация электромагнитной волны и скалярных возмущений метрики без изменения амплитуды исходной гравитационной волны. Для обеих поляризаций при $k \parallel B$ и для h_{+} при $k \perp B$ возникает эффективная масса, однако соответствующая поправка к амплитуде не превышает 0,5 % даже на максимальной рассмотренной частоте $k = 10^{-11}$ Гц, а для низких частот ($10^{-18} \leq k \leq 10^{-14}$ Гц) составляет всего 0,01 %, что слишком мало, чтобы повлиять на интерпретацию наблюдательных ограничений для скалярно-тензорного отношения из данных по реликтовому излучению. Основной результат главы получен для $h_{\times}$ -поляризации при $k \perp B$: аналитическое решение системы уравнений демонстрирует усиление амплитуды гравитационной волны в триста раз для частот $k \gtrsim 10^{-10}$ Гц при напряженности магнитного поля, соответствующей современному значению 1 нГс, и более чем на три порядка при напряженности 10 нГс. Рассмотрено влияние длины когерентности стохастического магнитного поля: показано, что для современных длин когерентности $\geq 10 Mpc$ оценки, полученные в модели однородного поля, остаются справедливыми, однако в общем случае эффект может усредняться при прохождении большого числа доменов. В конце главы отмечено, что не учтенное в исследовании взаимодействие фотонов с первичной плазмой, даже если оно уменьшит эффект усиления, может оставить характерный след на спектре реликтовых гравитационных волн, что требует дальнейшего исследования.

В пятой главе решена задача об изменении амплитуды гравитационной волны при прохождении через анизотропное коллапсирующее пылевое облако. В приближении неизменного контраста плотности энергии в модели нелинейного коллапса Зельдовича получена система уравнений, описывающая смешивание гравитационной волны со скалярными возмущениями метрики. Решение в приближении постоянных коэффициентов показывает, что изменение амплитуды гравитационной волны с частотой 10^{-13} Гц при прохождении одного эллипсоидального облака с реалистичными параметрами составляет доли процента. В диапазоне чувствительности эксперимента РТА ($10^{-9} - 10^{-6}$ Гц) влияние одного облака масштаба скопления галактик оказывается практически нулевым ($\sim 10^{-9}$).

Рассмотрение изменения спектра реликтовых гравитационных волн в эпоху доминирования излучения признано нецелесообразным, поскольку в ранней Вселенной гравитационная волна находится внутри анизотропной структуры слишком малый период времени. Автор предполагает, что более значительный эффект может возникать для астрофизических гравитационных волн в окрестностях объектов с сильно анизотропной метрикой (пульсары, вращающиеся черные дыры) или внутри массивных асферичных скоплений галактик, где эффективная масса гравитона может изменять изначальные характеристики излучения, что важно учитывать при анализе сигналов детекторов нового поколения.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования. Отмечено, что полученное в упрощенной задаче значительное усиление коротковолновых реликтовых гравитационных волн указывает на необходимость продолжения исследований влияния эффекта Герценштейна на спектр реликтовых гравитационных волн. Если после учета взаимодействия фотонов с первичной плазмой результат останется неизменным, это повлечет пересмотр ожидаемого современного спектра реликтовых гравитационных волн и будет говорить о возможности их детектирования с помощью космических интерферометров и точного тайминга массива пульсаров PTA.

Таким образом, результаты диссертации полностью обоснованы и подтверждены приведенными в работе теоретическими выкладками. К работе нет замечаний принципиального характера, которые бы повлияли на общую положительную оценку диссертации. Тем не менее, при прочтении возникло несколько вопросов и замечаний:

1. В диссертации подробно исследованы два предельных случая ориентации волнового вектора гравитационной волны относительно направления крупномасштабного магнитного поля: $k \perp B$ и $k \parallel B$. Однако в реальной космологической ситуации реликтовые гравитационные волны приходят со случайных направлений, а стохастическое магнитное поле также не является однородным. В работе не обсуждается, каким образом полученные оценки для этих двух частных случаев могут быть обобщены на случай произвольного угла между векторами, и как это отразится на наблюдаемых характеристиках спектра — например, на поляризационных зависимостях или на угловом распределении сигнала. Следует отметить, что сам автор указывает на оценочный характер полученных результатов, подчеркивая, что рассмотрение лишь ключевых ориентаций позволяет сделать оценку влияния эффекта Герценштейна на спектр реликтовых гравитационных волн «сверху». Тем не менее, представляется полезным в будущем провести более детальный анализ угловой зависимости

эффекта, чтобы перейти от оценки сверху к точным предсказаниям для конкретных наблюдательных данных, включая ожидаемый сигнал в детекторах нового поколения — космических интерферометрах и массивах точного тайминга пульсаров (РТА).

2. В разделе 4.4 диссертации проведен детальный анализ влияния длины когерентности стохастического магнитного поля на усреднение эффекта при прохождении гравитационной волны через большое число доменов, и показано, что для современных длин когерентности $\gtrsim 10$ Мпк приближение однородного поля остается справедливым как в эпоху радиационного доминирования, так и в эпоху доминирования материи. Вместе с тем, за рамками рассмотрения остается вопрос о возможном вкладе мелкомасштабных магнитных полей внутри галактик и скоплений галактик, где напряженность поля достигает 1–10 мкГс (и даже 30–70 мкГс в центрах скоплений). Хотя такие структуры являются существенно неоднородными, их гравитационные потенциалы могут влиять на распространение гравитационных волн, а сильные локальные поля — давать дополнительные каналы конверсии для волн соответствующих частот. Было бы интересно оценить, может ли прохождение гравитационной волны через отдельное скопление или галактику приводить к наблюдаемому эффекту, не усредняющемуся до нуля, особенно в контексте детекторов нового поколения, чувствительных к более высоким частотам. Кроме того, в работе не приводится количественной оценки того, как конкретная модель эволюции длины когерентности (например, модели с различной начальной спиральностью, рассмотренные в разделе 2.2.6) влияет на итоговое изменение спектра реликтовых гравитационных волн — этот вопрос остается модельно зависимым, что справедливо отмечено самим автором в заключении главы 4. Дальнейшее уточнение этих аспектов позволило бы сделать предсказания более определенными.
3. В диссертации отсутствует прямое сравнение полученных результатов с работой [Dolgov and Ejlli 2012], в которой эффект Герценштейна для реликтовых гравитационных волн оценивался на фоне плоского пространства-времени Минковского с последующим пересчетом напряженности поля по закону $B \propto a^{-2}$. В упомянутой работе, в отличие от диссертации, рассматривается произвольный угол между k и B , учитывается взаимодействие фотонов с первичной плазмой (коэффициенты преломления, матрица плотности, вероятность перехода). Однако следует отметить, что в указанной работе основное внимание уделено условиям, при которых вероятность конверсии достигает максимальных значений, и не

проводится систематического анализа изменения спектра реликтовых гравитационных волн в широком частотном диапазоне. Таким образом, диссертация восполняет этот пробел, предлагая последовательный космологический расчет эволюции спектра. Было бы интересно в ходе дальнейших исследований сопоставить результаты двух подходов — расчета в приближении плоского пространства-времени с последующим пересчетом напряженности поля и реалистичного космологического решения на фоне метрики Фридмана — чтобы понять, насколько учет расширения Вселенной и эволюции поля изменяет итоговые предсказания для спектра реликтовых гравитационных волн, а также оценить, в какой степени различия обусловлены именно учетом космологического расширения, а не выбором конкретных значений параметров модели.

4. В диссертации проведен детальный вывод системы уравнений для эффекта Герценштейна с учетом эффективного действия Гейзенберга–Эйлера, и для интервала масштабного фактора $a \geq 3 \times 10^{-11}$, где поправка может быть вычислена аналитически, показана ее пренебрежимая малость (разность амплитуд составляет $\sim 10^{-12}$ для волн с частотой 10^{-16} Гц и доли процента для частот порядка 1 нГц). Автор также четко оговаривает пределы применимости используемого приближения: $B \ll m_e^2 (\lesssim 10^{13} \text{ Гс})$, за которыми эффективное действие Гейзенберга–Эйлера становится неприменимым, а учет поправок требует численных методов. Вместе с тем, в работе остается открытым вопрос о поведении системы в области $a < 3 \times 10^{-11}$, где напряженность магнитного поля превышает 10^{13} Гс и петлевые поправки потенциально могли бы давать существенный вклад, однако аналитическое рассмотрение там невозможно. Автор справедливо указывает, что в рамках диссертационного исследования этот режим не рассматривается. Следует отметить, что в последних работах [Karbstein 2019, 2024; Franchino-Viñas, Quevillon and Saviot 2025] предприняты попытки продвинуться в описании непертурбативного режима сильных полей — получены всепетлевые результаты для сильнополевого предела эффективного действия Гейзенберга–Эйлера, в том числе в рамках $1/N$ -разложения и метода ковариантного разложения по производным. Представляется перспективным в будущем сопоставить эти новые результаты с системой уравнений для эффекта Герценштейна, чтобы окончательно оценить, не может ли учет непертурбативных поправок в самой ранней эпохе повлиять на итоговый спектр реликтовых гравитационных волн, особенно в высокочастотной области, где эффект Герценштейна без учета поправок даст наибольшее усиление.

Представленные замечания не снижают ценности и не затрагивают основные результаты представленной диссертационной работы. Работа соответствует п. 2 «Свойства материи и пространства-времени во Вселенной. Классическая и квантовая космология и гравитация. Свойства вакуума, темная энергия. Общая теория относительности и ее расширения» паспорта специальности 1.3.3 теоретическая физика. Текст автореферата диссертации по своей структуре и полноте полностью соответствует тексту диссертации.

Диссертационная работа **Панасенко Любови Алексеевны «Исследование влияния эффекта Герценштейна на спектр реликтовых гравитационных волн»**, полностью соответствует пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Панасенко Любовь Алексеевна, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Диссертационная работа была обсуждена 23 июня 2026 г. на семинаре кафедры теории относительности и гравитации Института физики КФУ, протокол №12.

Отзыв подготовил:

доктор физико-математических наук

(специальность 01.04.02 – Теоретическая физика)

заведующий кафедрой теории относительности и гравитации

Института физики КФУ

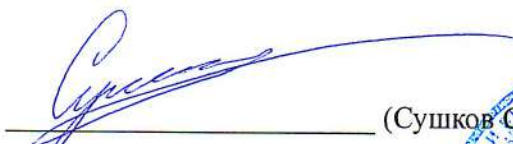
Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 16а,

телефон: +79600326021

E-mail: sergey.sushkov@kpfu.ru, sergey_sushkov@mail.ru

Сушков Сергей Владимирович

Я, Сушков Сергей Владимирович, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку в соответствии с требованиями Минобрнауки РФ.


«27» августа 2026 г

(Сушков С.В.)

