

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Панасенко Любови Алексеевны

**«Исследование влияния эффекта Герценштейна на спектр
реликтовых гравитационных волн»,**

**представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика**

Актуальность исследования

Исследование гравитационных волн космологического происхождения является одной из ключевых задач современной теоретической физики и астрофизики. Несмотря на успешную регистрацию гравитационных волн от астрофизических источников, реликтовые гравитационные волны, предсказываемые инфляционными моделями, до сих пор не обнаружены. Анализ анизотропии и поляризации реликтового излучения накладывает жёсткие ограничения на отношение тензорных и скалярных возмущений (r), что стимулирует поиск новых физических механизмов, способных генерировать соответствующий спектр первичных гравитационных волн. Диссертация Л.А. Панасенко посвящена теоретическому исследованию одного из таких механизмов — обратного эффекта Герценштейна (конверсии гравитационных волн в электромагнитные) — в присутствии крупномасштабного космологического магнитного поля на фоне расширяющейся Вселенной. Переход реликтовых гравитационных волн в фотоны может приводить к изменению их амплитуды и наклона спектра, что влияет на интерпретацию наблюдательных ограничений на параметры инфляции. Учитывая активное развитие экспериментов по точному таймингу пульсаров (РТА) и планируемых космических обсерваторий, уточнение теоретических моделей спектра первичного гравитационно-волнового фона становится критически важным для корректной интерпретации будущих наблюдательных данных. Кроме того, оценка вклада космологических магнитных полей в эволюцию метрических возмущений открывает новые возможности для проверки инфляционных моделей и более глубокого понимания ранних этапов эволюции Вселенной. Таким образом, тема диссертации является современной и актуальной.

Достоверность исследования

В диссертации изложены все этапы вывода и анализа системы дифференциальных уравнений, описывающих связанное распространение гравитационных и электромагнитных волн на фоне метрики Фридмана–

Леметра–Робертсона–Уокера (ФЛРУ) в присутствии однородного космологического магнитного поля. Достоверность результатов обеспечивается использованием общепринятых методов общей теории относительности и теории поля. В предельном случае плоского пространства-времени полученные уравнения переходят в известные результаты Герценштейна и других авторов. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах Web of Science, и прошли апробацию на российских и международных конференциях (Lomonosov 2021, Spontaneous Workshop 2023–2024, Петровские чтения – 2023 и др.). Таким образом, можно сделать вывод о достоверности исследования и высокой степени обоснованности научных результатов, представленных в диссертации.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертации не вызывает сомнений: впервые получена система дифференциальных уравнений, описывающая обратный эффект Герценштейна на фоне произвольного искривлённого пространства-времени; впервые решена система уравнений для этого эффекта на фоне метрики ФЛРУ; впервые выполнена количественная оценка изменения спектра реликтовых гравитационных волн за счёт их конверсии в фотоны при взаимодействии с космологическим магнитным полем; рассмотрено смешивание тензорных и скалярных метрических возмущений при прохождении гравитационных волн через асферичные коллапсирующие облака в модели Зельдовича.

Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные поправки к амплитуде реликтовых ГВ позволяют уточнить ограничения на параметры инфляционных моделей. Система уравнений, выведенная автором, применима для анализа конверсии гравитационных волн в электромагнитные волны вблизи намагниченных астрофизических объектов (нейтронных звёзд, магнетаров, чёрных дыр) на фоне метрик Шварцшильда или Керра.

Диссертационная работа, выполненная Любовью Алексеевной Панасенко, является теоретическим исследованием в области космологии и теории гравитационных волн, имеющим важное значение для уточнения моделей инфляции и интерпретации данных будущих наблюдательных экспериментов по регистрации реликтового гравитационно-волнового фона. Диссертация

имеет объём 161 страницу, состоит из введения, пяти глав, заключения и пяти приложений. Первые две главы являются литературным обзором, третья и четвёртая главы содержат основные результаты по выводу уравнений и их решению для эффекта Герценштейна на фоне расширяющейся Вселенной, пятая глава посвящена изучению смешивания тензорных и скалярных мод при прохождении гравитационной волны через анизотропные структуры. Работа содержит 25 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 145 наименований.

Первая глава содержит обзор истории и формализма гравитационно-волновой теории, инфляционной космологии и современных ограничений на параметры первичных возмущений.

Вторая глава посвящена обзору эффекта Герценштейна, эффективного действия Гейзенберга–Эйлера для оценки петлевых поправок, а также моделям генерации космологического магнитного поля и наблюдательным ограничениям на его современную напряжённость.

С третьей главы начинается основная часть диссертации. Автором выведено уравнение распространения метрических возмущений на фоне произвольного пространства-времени, а также система дифференциальных уравнений, описывающая связанное распространение гравитационной и электромагнитной волн во внешнем магнитном поле на фоне произвольного искривлённого пространства-времени. Показано, что петлевые поправки от действия Гейзенберга–Эйлера пренебрежимо малы. В конце главы система уравнений записана для метрики ФЛРУ, заполненной однородным космологическим магнитным полем.

Четвёртая глава посвящена решению полученной системы для двух ключевых случаев: $k \perp B$ и $k \parallel B$ на стадии радиационного доминирования. Показано, что эффект Герценштейна влияет только на h_x -поляризацию при $k \perp B$. Для этой поляризации получено возрастание амплитуды: для частот 10^{-10} Гц $\leq k < 10^{-7}$ Гц — в 10 раз, для частот $k \geq 10^{-7}$ Гц — в 300 раз. Для низких частот (10^{-18} – 10^{-14} Гц) возрастание составляет порядка 0,01%. Рассмотрено также влияние неоднородности магнитного поля: при длине когерентности, соответствующей современному значению ≥ 10 Мпк, оценки, полученные в модели однородного поля, остаются верными.

Пятая глава посвящена смешиванию тензорной и скалярной мод метрических возмущений при прохождении гравитационной волны через анизотропное коллапсирующее пылевое облако в приближении теории

Зельдовича. Получена система уравнений для связанной эволюции $h_{+,\times}$ и скалярного возмущения Φ . Показано, что для частоты 10^{-13} Гц изменение амплитуды при прохождении одного облака с параметрами, характерными для скоплений галактик, составляет доли процента. В диапазоне чувствительности пульсарного тайминга (10^{-9} – 10^{-6} Гц) эффект практически нулевой ($\sim 10^{-9}$).

В заключении подытожены основные результаты работы.

Наиболее важными и новыми научными результатами диссертации являются:

1. Впервые получена система дифференциальных уравнений для обратного эффекта Герценштейна на фоне произвольного искривлённого пространства-времени.
2. Впервые решена система уравнений для эффекта Герценштейна на фоне метрики ФЛРУ с учётом космологического расширения и адиабатического изменения напряжённости магнитного поля.
3. Впервые произведена количественная оценка изменения спектра реликтовых гравитационных волн вследствие их конверсии в фотоны при взаимодействии с космологическим магнитным полем. Показано, что для $h_{\times}$ -поляризации при $k \perp B$ к концу эпохи радиационного доминирования амплитуда гравитационных волн с частотами 10^{-10} Гц $\leq k < 10^{-7}$ Гц возрастает в 10 раз, а для частот $k \geq 10^{-7}$ Гц — в 300 раз.
4. Описано смешивание тензорных и скалярных метрических возмущений при прохождении гравитационной волны через анизотропное коллапсирующее пылевое облако в приближении теории Зельдовича; показано, что для частоты 10^{-13} Гц изменение амплитуды составляет доли процента.

По существу работы замечаний не имею, но отмечу несколько недостатков.

1) Диссертация написана на высоком научном уровне и грамотно с точки зрения русского языка, однако при чтении текста замечены отдельные опечатки и стилистические недочёты, не влияющие на основные результаты. В частности, на странице 10 в названии конференции указано «The 20st Lomonosov conference», что является ошибкой (должно быть «20th»). Также образованные от фамилий прилагательные должны писаться со строчных букв, например, «сахаровские» (стр. 52) и «альфвеновские» (стр. 54). В формуле (2.11) на стр. 47 степень в знаменателе поставлена не там, где должно.

2) При оформлении данных о публикациях по материалам диссертации допущена ошибка: в публикации под номером 5 неверно указаны год и страницы и отсутствуют данные о номере выпуска. Верные данные: 2024, вып. 1(46), С. 84-89.

3) В работе для оценки влияния космологического магнитного поля на спектр реликтовых гравитационных волн (ГВ) эффективно используется приближение однородного или упрощенного стохастического магнитного поля. Вместе с тем, реальные космологические магнитные поля обладают сложной топологией и пространственной структурой, формирующейся в процессе эволюции Вселенной. Представляло бы интерес обсуждение того, насколько критичными для полученных результатов (в частности, для коэффициента конверсии ГВ в электромагнитные волны) являются допущения о стационарности и однородности магнитного поля на промежуточных масштабах. Было бы полезно дополнить работу анализом применимости полученных решений для случаев магнитных полей с более выраженной мелкомасштабной неоднородностью.

4) В диссертации рассматривается взаимодействие ГВ с плазмой (раздел 4.5), что является важным аспектом задачи. Однако влияние обратного воздействия генерируемых электромагнитных волн на состояние плазмы (обратные магнитогидродинамические эффекты) затронуто лишь частично. Дальнейшее развитие представленных в работе подходов в направлении самосогласованного учета обратной связи между конвертированным электромагнитным излучением и плазменной средой могло бы существенно уточнить предсказания амплитуд ГВ, особенно для диапазонов частот, чувствительных к эффектам диссипации, что открыло бы новые возможности для интерпретации данных будущих гравитационно-волновых детекторов.

Приведенные замечания не имеют принципиального характера и не снижают общую высокую оценку работы.

Автореферат и опубликованные статьи достаточно полно отражают содержание диссертации. Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях в журналах, входящих в список ВАК и индексируемых в Web of Science, и прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Судя по опубликованным работам, Любовь Алексеевна Панасенко проявила себя как сформировавшийся высококвалифицированный исследователь, способный формулировать и решать задачи фундаментального характера в области теоретической физики и космологии.

Таким образом, диссертация Панасенко Любови Алексеевны является законченной научной работой, соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, и её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – Теоретическая физика.

Я, Арбузов Андрей Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Панасенко Любови Алексеевны, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

А.В. Андреев 01.09.2026

Арбузов Андрей Борисович,
доктор физико-математических наук (специальность 01.04.02 –
теоретическая физика),
начальник сектора №5 Отдела теории фундаментальных взаимодействий
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова,
Международная межправительственная научно-исследовательская
организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
Адрес: 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6
E-mail: arbuzov@jinr.ru

Подпись Арбузова А. Б. заверяю:

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ

А.В. Андреев

А.В. Андреев
(подпись)

« 1 » 09 2026 г.
(дата)

