

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Панасенко Любови Алексеевны

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

представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – Теоретическая физика

Открытие гравитационных волн от слияния двух черных дыр в эксперименте LIGO в 2015 году ознаменовало начало эпохи в астрофизике и космологии, открыв новые возможности в исследовании компактных объектов и ранних этапов развития Вселенной. Другим важным событием стало обнаружение характерных угловых корреляций в измерениях пульсарного тайминга, указывающих на существование гравитационно-волнового фона. Подобные измерения пульсарного тайминга позволяют существенно расширить диапазон поиска гравитационных волн на область частот порядка 1 нГц, что может быть интересно как с точки зрения изучения сверхмассивных черных дыр, так и первичных источников. В литературе обсуждаются и другие подходы к исследованию гравитационно-волнового фона; один из них основан на эффекте Герценштейна, изучению которого и посвящена значительная часть диссертационной работы Панасенко Л. А. Сущность (обратного) эффекта Герценштейна состоит в превращении электромагнитных волн в гравитационные волны и наоборот в присутствии сильного магнитного поля. Хотя данный эффект был предсказан более 50 лет назад, полноценное исследование его феноменологических приложений началось сравнительно недавно и связано напрямую с попытками выйти за пределы частотного диапазона, характерного для эксперимента LIGO. В этом смысле работа Любови Алексеевны является безусловно актуальной и востребованной. Многие результаты, изложенные в диссертации, имеют достаточно широкую область применимости, не ограничиваясь какой-то определенной областью частот или конкретным источником. Здесь стоит отметить, что при исследовании эффекта Герценштейна вычисления зачастую делаются на фоне плоского изотропного пространства и в предположении однородного магнитного поля. В данной работе сделан важный шаг вперед в этом направлении, и превращение гравитационных волн в электромагнитные рассматривается в произвольном искривленном пространстве-времени и в случае неоднородного магнитного поля, что отвечает реалистичным условиям в космологии и астрофизике. Подобный более общий подход также более самосогласован, поскольку наличие первичного магнитного поля с корреляционной длиной, сравнимой с размером космологического горизонта, необходимо приводит к анизотропии пространства. При рассмотрении конкретных феноменологических приложений основной акцент в диссертации сделан на низкочастотных гравитационных волнах, в частности, имеющих инфляционное происхождение. Это нетривиально потому, что эффект Герценштейна обычно исследуется в контексте поиска гравитационных волн с частотой, превышающей 10 кГц. Наконец, помимо эффекта Герценштейна в данной диссертации приведено интересное исследование прохождения гравитационной волны через несферическое пылевидное облако.

Достоверность результатов в данной диссертации обеспечена тем, что они получены на основе апробированных аналитических и численных методов. Результаты диссертации

были опубликованы в рецензируемых журналах (две – в ЖЭТФ), а также представлены на различных конференциях и семинарах.

В первой, вводной, главе сделан краткий обзор основных экспериментов по поиску гравитационных волн. В той же главе описан формализм для анализа первичных гравитационных волн, которые предсказываются в инфляционной теории. Кратко обсуждается основная мотивация инфляционной теории, а именно проблемы горячего Большого Взрыва.

Вторая глава начинается с краткого введения в эффект Герценштейна, указано на сходство этого эффекта с нейтринными осцилляциями.

Также описаны основные примеры магнитного поля в астрофизике и в космологии, приведены характерные значения напряженности магнитного поля и корреляционные длины.

Третья глава посвящена более детальному изучению эффекта Герценштейна: сначала в общем случае произвольного искривленного пространства-времени, а затем – в конкретном случае однородной расширяющейся Вселенной.

В четвертой главе проведен детальный анализ дифференциальных уравнений, описывающих превращение гравитационных волн в электромагнитные волны и наоборот. Выписана система из двух уравнений второго порядка, которая для частот $10^{(-18)}$ – $10^{(-11)}$ Гц численно решена методом Рунге-Кутты (п. 4.2), а для частот более $10^{(-11)}$ Гц – сведена к уравнению четвертого порядка и решена аналитически (п. 4.3). Представлены результаты численного и аналитического анализа для разных частот и приведены оценки усиления амплитуды гравитационных волн.

Пятая глава посвящена несколько другой, но близко связанной теме прохождения гравитационной волны через несферическое пылевидное облако.

Имеются небольшие замечания по тексту диссертации.

- 1) Список литературы выглядит несколько неполным. Как уже было отмечено выше, исследование приложений эффекта Герценштейна – это одно из перспективных научных направлений на данный момент, и данной теме посвящено достаточно много статей, часть из которых имело бы смысл упомянуть. Например, у Валери Домке (Valerie Domcke), Асуки Ито (Asuka Ito) и их коллег есть исследования эффекта Герценштейна в первичных магнитных полях, в магнитных полях пульсаров, в галактических магнитных полях и т.д. Также в литературе имеются предложения по поиску гравитационных волн в наземных условиях с использованием магнитных полей, созданных в лаборатории, которые аналогичны поиску аксионов и аксионоподобных частиц; им тоже посвящено достаточно много литературы. Тем не менее хочу отметить, что расширение литературы носит скорее рекомендательный характер: как уже упоминалось выше, в диссертации Любови Алексеевны в основном изучаются низкочастотные гравитационные волны, а в литературе эффект Герценштейна обычно обсуждается в контексте высокочастотных гравитационных волн.

- 2) В диссертации не хватает детального и самосогласованного анализа коэффициента преломления электромагнитной волны при ее прохождении через первичную плазму. В какой-то степени исследуется поправка в коэффициент преломления света за счет петлевой поправки Эйлера-Гейзенберга, но мало внимания уделено исследованию рассеяния фотонов на свободных электронах (которые точно присутствовали в первичной плазме до эпохи рекомбинации). Тут стоит отметить, что автор поднимает вопрос о необходимости подобного исследования в разделе 4.5, но указывает, что учет рассеяния на электронах требует отдельного деликатного анализа.
- 3) Указано, что при больших магнитных полях, характерных для ранней Вселенной, поправка Эйлера-Гейзенберга становится очень большой и необходим учет высших поправок. Я бы сказал, что в данном случае весь эффективный подход становится неприменим и необходимо работать в рамках квантовой электродинамики, в которой явно выписаны фермионные поля, описывающие электроны и позитроны.
- 4) Помимо преломления, электромагнитные волны также испытывают поглощение в плазме. Такой эффект тоже необходимо учитывать для корректной оценки эффекта Герценштейна. Например, при температуре выше 1 МэВ в первичной плазме низкочастотный фотон может выбыть из плазмы за счет аннигиляции с тепловым фотоном в электрон-позитронную пару.
- 5) Исследование, проведенное в диссертации, не всегда “прозрачное”. Было бы полезно продемонстрировать усиление низкочастотных гравитационных волн в первичной плазме на основе качественных оценок, прежде чем решать дифференциальное уравнение четвертого порядка.
- 6) Не очень ясны феноменологические последствия усиления амплитуды инфляционных гравитационных волн в 300 раз для частот $k > 10^{(-7)}$ Гц. Какой эксперимент был бы чувствителен к подобному усилению? Мне этот вопрос кажется релевантным, потому что космологические эксперименты типа Planck чувствительны к существенно более низким частотам. Возможно, в этом контексте стоит обратить внимание на эксперимент будущего LISA.
- 7) Помимо вакуумных флуктуаций, усиленных во время инфляционного расширения, в литературе активно обсуждаются другие источники гравитационных волн: космические струны, фазовые переходы первого рода и т.д. Мне кажется, стоило бы кратко обсудить подобные источники.
- 8) Стоит отметить, что в диссертации опечаток мало, но в автореферате они встречаются чаще. Например, в формуле 7 автореферата масштабные факторы $a(t)$ и $b(t)$ должны быть в квадрате. Ниже на той же странице допущена опечатка в фамилии Зельдовича.

Тем не менее, указанные замечания не снижают общую научную ценность работы, достоверность и важность полученных автором результатов. В заключение стоит отметить, что диссертация Панасенко Любови Алексеевны выполнена на высоком

профессиональном уровне, она хорошо мотивирована, содержит новые научные результаты в интересной области исследований, посвященной поиску гравитационных волн. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений.

Считаю, что диссертационная работа Панасенко Любови Алексеевны «Исследование влияния эффекта Герценштейна на спектр реликтовых гравитационных волн» является цельным научным исследованием, 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.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук

по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика,

ведущий научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования

Московского Государственного Университета им. М. В. Ломоносова,

Институт теоретической и математической физики

(ИТМФ МГУ)

119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1.

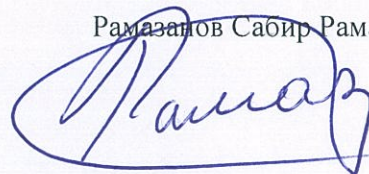
Телефон: +7 (985) 082-47-77

Адрес электронной почты: ramazanov@itmp.msu.ru

Я, Рамазанов Сабир Рамазанович, даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета Д 24.2.306.01, и их дальнейшую обработку.

25.08.2026

Рамазанов Сабир Рамазанович



Подпись Рамазанова С.Р. заверяю

Заместитель директора
ИТМФ МГУ

