

УТВЕРЖДАЮ

Ректор  
Ярославского государственного  
университета им. П.Г. Демидова  
д.х.н., профессор  
Александр Ильич Русаков

---

« 14 » м а р т а 2018 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова» на диссертацию ДВОРНИКОВА Максима Сергеевича «Сильные магнитные поля в физике нейтрино, космологии и астрофизике», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

*Общая характеристика работы. Структура и содержание.*

Представленная соискателем Дворниковым М.С. диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова». Поступивший в Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова экземпляр рукописи содержит 254 страницы машинописного текста и 19 рисунков. Список цитированной автором литературы содержит 264 источника. Работа состоит из вводной части, трёх глав основного текста, заключения, 8 приложений и списка цитируемой литературы.

*Актуальность темы.* Диссертация Дворникова М.С. посвящена построению теоретико-полевых подходов для описания осцилляций нейтрино во внешних полях, включающих сильное магнитное поле, а также разработке моделей генерации магнитных полей в космологических и астрофизических средах. Физика нейтрино является одной из наиболее быстро развивающихся физических наук и лежит на стыке: 1) физики высоких энергий, где ускорительные и реакторные нейтринные эксперименты нацелены на определение параметров нейтринного смешивания и нейтринных масс; 2) астрофизики, включающей нейтринное зондирование внутренних областей Солнца и моделирование астрофизических катаклизмов типа взрывов сверхновых и слияний нейтронных звёзд и чёрных дыр с учётом решающего вклада нейтринных потоков в их энергетiku; 3) космологии ранней Вселенной, моделирование процессов в которой не может быть полным без учёта вклада

нейтрино. Безусловно, теоретические исследования как в области разработки квантово-полевого аппарата описания нейтринных осцилляций во внешней активной среде, так и в области анализа механизмов генерации сильных магнитных полей в космологических и астрофизических средах, выполненные в диссертации, являются актуальными.

*Новизна результатов диссертации.* В диссертации, в рамках подхода, основанного на релятивистской квантовой механике, впервые были описаны спин-флейворные осцилляции нейтрино в веществе под действием внешнего магнитного поля; с использованием аппарата квантовой теории поля впервые изучено влияние фонового вещества на осцилляции между нейтрино и антинейтрино. Получено новое ограничение на значения параметров нейтринных асимметрий (отношений химических потенциалов к температуре) в ранней Вселенной, необходимые для реализации сценария усиления космического магнитного поля. Выведены новые уравнения для описания эволюции магнитного поля с учетом магнитно-гидродинамической (МГД) турбулентности. Впервые учтено влияние асимметрий левых лептонов и хиггсовских бозонов, а также сфалеронных переходов, на лептогенезис и бариогенезис под действием гипермагнитных полей в ранней Вселенной до стадии электрослабого фазового перехода. Разработана новая модель генерации сильных магнитных полей в магнитарах, основанная на неустойчивости поля, вызванной нарушающим четность электрослабым взаимодействием в кварковом веществе. Предложено новое объяснение электромагнитных вспышек магнитаров, инициируемых мелкомасштабными флуктуациями магнитного поля внутри компактной звезды, с учетом МГД-турбулентности и электрослабого взаимодействия между кварками.

*Достоверность результатов диссертации.* Основные выводы диссертации основаны на использовании строгих и апробированных методов квантовой теории поля, в частности, метода точных решений волновых уравнений в присутствии внешних полей, а также методов физики элементарных частиц и магнитной гидродинамики. При получении ряда результатов диссертации использовались современные компьютерные алгоритмы символьных вычислений. Обоснованность результатов диссертации подтверждается их сопоставлением с результатами экспериментов, а также с результатами других авторов, где цитируются работы диссертанта: согласно базе данных РИНЦ, статьи, в которых опубликованы основные результаты диссертации, имеют более 170 цитирований.

*Общая характеристика диссертации.* Диссертация состоит из вводной части, трех глав, излагающих основные результаты, заключения, 8 приложений, куда вынесены некоторые детали вычислений и вспомогательного анализа, и подробного библиографического списка, включающего 264 наименования. Во *Введении* приведён обзор литературы по проблемам описания нейтринных осцилляций в различных внешних полях и анализа механизмов генерации сильных магнитных полей в космологических и астрофизических средах,

определены цели проводимого исследования, перечислены полученные результаты, выносимые на защиту, выделена их научная новизна. В *Главе 1* развиваются теоретические подходы для описания флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в вакууме и различных внешних полях. Описание флейворных осцилляций нейтрино в вакууме выполнено в рамках релятивистской квантовой механики. Рассмотрены флейворные осцилляции в фоновом веществе и спин-флейворные осцилляции дираковских нейтрино во внешнем магнитном поле. Обсуждается наиболее общая ситуация спин-флейворных осцилляций в веществе под действием внешнего магнитного поля, рассмотрены некоторые астрофизические приложения. Анализ осцилляций майорановских нейтрино в вакууме, а также в веществе и магнитном поле, выполнен в рамках релятивистской квантовой механики. Полученные результаты применены для описания осцилляций майорановских нейтрино в астрофизике. Рассмотрены переходы между нейтрино и антинейтрино в рамках подхода, основанного на квантовой теории поля, при этом особое внимание уделено влиянию фонового вещества на процесс осцилляций. В *Главе 2* исследована эволюция гипермагнитных и магнитных полей в ранней Вселенной до и после электрослабого фазового перехода, а также ряд приложений, таких, как генерация лептонной и барионной асимметрий и влияние турбулентности вещества на динамику киральных частиц в горячей плазме. Получен однопетлевой вклад в антисимметричную часть поляризационного оператора фотона в среде, состоящей из лептонной плазмы и нейтринного газа. Рассмотрены некоторые применения вычисленного поляризационного оператора для описания эволюции магнитных полей в горячей релятивистской плазме ранней Вселенной, обусловленной наличием нейтринной асимметрии. Рассмотрено влияние МГД-турбулентности на динамику киральных частиц в горячей плазме ранней Вселенной. Для этой цели выводится система уравнений МГД, описывающих эволюцию спектров плотности магнитного поля и магнитной спиральности с учетом МГД-турбулентности, и приводится ее численное решение. На этой основе рассматривается эволюция гипермагнитных полей до электрослабого фазового перехода, с учетом левых лептонов, хиггсовских бозонов и сфалеронных переходов. Формулируются условия равновесия в симметричной фазе первичной плазмы, и обосновывается соответствующий набор химических потенциалов. Выведены кинетические уравнения для соответствующих асимметрий. Проанализированы законы сохранения и вычислена барионная асимметрия Вселенной. Приводятся решения системы кинетических уравнений, проанализирована эволюция параметра киральной аномалии. В *Главе 3* изучается генерация астрофизических магнитных полей за счет кирального магнитного эффекта и электрослабого взаимодействия между фермионами. Выводится выражение для аномального тока безмассовых заряженных фермионов, электромагнитно и слабо взаимодействующих с фоновым веществом, текущего вдоль внешнего магнитного поля. Исследуется влияние ненулевой массы заряженных частиц на генерацию аномального электрического тока с учетом электрослабого взаимодействия с фоновым веществом. Описывается неустойчивость магнитного поля, приводящая к его росту, в кварковом веществе компактной

звезды и обсуждается применение полученных результатов для построения модели магнитаров. Развита модель описания вспышек магнитаров. Для этой цели выведены уравнения, описывающие эволюцию мелкомасштабного магнитного поля с учетом МГД-турбулентности в кварковом веществе. Эти уравнения эволюции численно решаются, и результаты численного моделирования применены для объяснения электромагнитного излучения магнитаров. В *Заключении* приведены основные результаты диссертации. Среди результатов, представленных к защите, можно выделить: 1) разработку квантовополевого формализма для описания осцилляций майорановских нейтрино и антинейтрино в фоновом веществе и вычисление вероятности перехода, которая позволяет рассмотреть влияние плотного ядерного вещества на безнейтринный двойной  $\beta$ -распад; 2) вычисление поправки к киральному магнитному эффекту за счет электрослабого взаимодействия между заряженными фермионами, приводящей к неустойчивости магнитного поля, и построение модели генерации сильных крупномасштабных магнитных полей в кварковом веществе, характеристики которых близки к предсказываемым значениям полей в магнитарах; 3) построение модели для описания вспышек магнитаров, вызванных мелкомасштабными флуктуациями магнитного поля в плотном веществе компактной звезды, с учётом с МГД-турбулентности и вкладов кирального магнитного эффекта и электрослабого взаимодействия между кварками.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. В целом диссертация заслуживает высокой оценки. Однако она не свободна от недостатков, к которым относятся следующие:

1. Описание взаимодействия нейтрино с веществом в Главе 2 построено на использовании феноменологического внешнего аксиально-векторного поля, введённого в работах [139-141] с целью учёта возможного движения и поляризации среды. Это не выглядит оправданным, поскольку затем в нескольких местах оговаривается, что распространение нейтрино исследуется в неподвижном и неполяризованном веществе. Но для этого случая существуют более простые и физически ясные формулы, см., например: *Ф. Боум, П. Фогель. Физика массивных нейтрино. М.: Мир, 1990.*
2. Исследование осцилляций нейтрино в веществе проведено в приближении постоянной плотности, в то время как наиболее интересные эффекты нейтринных осцилляций, такие, как резонансное усиление, связаны с переменной плотностью вещества. Было бы целесообразно произвести оценки влияния переменной плотности вещества на исследованные механизмы осцилляций нейтрино.
3. Формула (1.43), определяющая дополнительное условие на начальный спинор, неточна: в операторах  $P_+$  и  $P_-$  потерян фактор  $1/2$ ; собственные значения этих операторов, по-видимому, должны быть различны ( $\pm 1$ ).
4. Имеется несоответствие: на с. 19 диссертации в п. 3 раздела "Научная новизна работы" написано: "Получено новое ограничение сверху на нейтринные асимметрии...", тогда как на с. 6 автореферата в таком же

пункте написано: "Получено новое ограничение снизу на нейтринные асимметрии...".

5. Имеется неясное место на с. 208 диссертации, где в последних строках стоит: "В соотношении (В.3) отброшены несколько малых членов порядка  $k_{1,2}L \gg 1$ ."
6. В диссертации часто используются не общеизвестные аббревиатуры, например: ЭСФП, КМЭ, ГЗ/КЗ, расшифровку которых непросто найти в тексте; для читателя было бы удобнее наличие в конце Введения списка используемых сокращений.
7. Следует отметить значительное число орфографических и пунктуационных ошибок, наличие которых, вероятно, обусловлено необходимостью обратного перевода английских текстов на русский язык.

Отмеченные выше недостатки не снижают научного значения диссертации М.С. Дворникова, которая является завершенной научной работой, а совокупность полученных новых результатов представляет существенное достижение в области теории, имеющее значение для задач физики элементарных частиц, квантовой теории поля, космологии ранней Вселенной и астрофизики. Научные положения, сформулированные в диссертации, обоснованы. Результаты и выводы диссертации выглядят достаточно достоверными.

Основные результаты диссертации своевременно опубликованы, имеется 31 публикация в высокорейтинговых журналах и изданиях, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук», утвержденный ВАК. Результаты диссертации докладывались на большом числе научных конференций и семинаров в мировых научных центрах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертации могут найти применение в исследованиях, проводимых в ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, ИЯИ РАН, ОИЯИ, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИТЭФ им. А.И. Алиханова, Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга и на Физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова, а также в других научных организациях, где ведутся работы по теоретической физике, посвященные исследованию влияния внешней активной среды, прежде всего сильных магнитных полей, на квантовые процессы; механизмов генерации сильных магнитных полей в космологических и астрофизических средах; взаимосвязи процессов в ранней Вселенной с физикой микромира.

Диссертация Дворникова Максима Сергеевича «Сильные магнитные поля в физике нейтрино, космологии и астрофизике» полностью соответствует пункту 2 «Общая теория относительности и релятивистская астрофизика. Физические свойства материи и пространства-времени во Вселенной. Классическая и квантовая космология и гравитация» (главы 2,3) и пункту 3 «Теория фундаментальных взаимодействий и квантовая теория поля. Изучение явлений на малых масштабах и при больших энергиях. Разработка

математических методов теории поля» (главы 1,3) паспорта специальности 01.04.02 – теоретическая физика. Диссертация на соискание ученой степени удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, в частности пунктам 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв подготовлен по итогам обсуждения доклада М.С. Дворникова на научном семинаре кафедры теоретической физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова 5 декабря 2017 г.

Отзыв составил  
профессор кафедры теоретической  
физики ЯрГУ им. П.Г. Демидова  
доктор физ.-мат. наук, профессор

\_\_\_\_\_ Александр Васильевич Кузнецов

Тел.:(4852)797766,  
эл. почта: avkuzn@uniyar.ac.ru

Отзыв одобрен на заседании кафедры теоретической физики ЯрГУ им. П.Г. Демидова, протокол № 5 от 14 февраля 2018 г.

Заведующий кафедрой  
теоретической физики  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

\_\_\_\_\_ Александр Яковлевич Пархоменко

Контактная информация:  
Полное официальное наименование учреждения: ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»  
Адрес: 150003, г. Ярославль, ул. Советская, д.14  
Тел: +7 (4852)72-82-56, 79-77-02,  
факс: +7 (4852)25-57-87  
эл. почта: rectorat@uniyar.ac.ru

**Сведения о ведущей организации**  
 по диссертации **Дворникова Максима Сергеевича**,  
 на тему «Сильные магнитные поля в физике нейтрино, космологии и  
 астрофизике» на соискание ученой степени доктора физико-  
 математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая  
 физика

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова, ЯрГУ им. П.Г.Демидова, ЯрГУ
Почтовый индекс, адрес организации	150003, Ярославль, ул. Советская, д.14
Веб-сайт	<a href="http://www.uniyar.ac.ru">http://www.uniyar.ac.ru</a>
Телефон	+7 (4852) 79-77-02
Адрес электронной почты	rectorat@uniyar.ac.ru
Сведения о руководителе организации	Ректор ЯрГУ, д.х.н., проф. Русаков Александр Ильич
Сведения о составителе отзыва	Д.ф.-м.н., проф. Кузнецов Александр Васильевич e-mail: avkuzn@uniyar.ac.ru
Наименование структурного подразделения, составляющего отзыв	Кафедра теоретической физики
<p>Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет (не более 15).</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Кузнецов А. В., Михеев Н. В. Нейтринный триггер магниторотационного механизма толчка новорожденного пульсара // Ядерная физика. 2013. Т. 76. Вып. 10. С. 1305-1310.</li> <li>2. Румянцев Д. А. Резонансный механизм рождения <math>e^+ e^-</math> пар в сильном магнитном поле // Ядерная физика. 2013. Т. 76. № 12. С. 1605-1609.</li> <li>3. Аникин Р. А., Михеев Н. В. Радиационный распад нейтрино в сильном магнитном поле // Ядерная физика. 2013. Т. 76. № 12. С. 1610–1614.</li> <li>4. Kuznetsov A. V., Mikheev N. V. Electroweak processes in external active media (Series: Springer Tracts in Modern Physics. V. 252). Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. 282 p.</li> </ol>	

5. Dobrynina A. A., Mikheev N. V., Raffelt G. G. Radiative decay of keV-mass sterile neutrinos in a strongly magnetized plasma // *Phys. Rev. D*. 2014. V. 90. No. 11. P. 113015 (1-9).
6. Добрынина А. А., Михеев Н. В. Собственно-энергетический оператор массивного нейтрино во внешнем магнитном поле // *ЖЭТФ*. 2014. Т. 145. Вып. 1. С. 65-76.
7. Кузнецов А. В., Михеев Н. В. Нейтринные процессы во внешней активной среде // *Письма в ЖЭТФ*. 2014. Т. 99, вып. 11. С. 771-781.
8. Михеев Н. В., Румянцев Д. А., Чистяков М. В. Фоторождение нейтрино на электроде в плотной замагниченной среде // *ЖЭТФ*. 2014. Т. 146, вып. 2 (8). С. 289-296.
9. Kuznetsov A. V., Romyantsev D. A., Savin V. N. Creation of electron-positron pairs at excited Landau levels by a neutrino in a strong magnetic field // *Int. J. Mod. Phys. A*. 2014. V. 29. No. 26. P. 1450136 (1-16).
10. Гвоздев А. А., Осокина Е. В. Процессы нейтринного рождения плазмы гипер-аккреционным сильно замагниченным диском керровской черной дыры // *Теор. и мат. физ.* 2015. Т. 184. Вып. 2. С. 338-351.
11. Kuznetsov A. V., Romyantsev D. A., Shlencev D. M. Generalized two-point tree-level amplitude  $j f \rightarrow j' f'$  in a magnetized medium // *Int. J. Mod. Phys. A*. 2015. V. 30. No. 11. P. 1550049 (1-23).
12. Kuznetsov A. V., Okrugin A. A., Shitova A. M. Propagators of charged particles in an external magnetic field, expanded over Landau levels // *Int. J. Mod. Phys. A*. 2015. V. 30. No. 24. P. 1550140 (1-15).
13. Chistyakov M. V., Romyantsev D. A., Shlencev D. M. Photon splitting in a strongly magnetized, charge-asymmetric plasma // *EPJ Web of Conferences*. 2016. V. 125. P. 04017 (1-11).
14. Kuznetsov A. V., Okrugin A. A., Shitova A. M. Neutrino decay to electron and  $W$  boson in a superstrong magnetic field in the Early Universe // *EPJ Web of Conferences*. 2017. V. 158. P. 05002 (1-9).
15. Румянцев Д. А., Шленев Д. М., Ярков А. А. Резонансы в комптоноподобных процессах рассеяния во внешней замагниченной среде // *ЖЭТФ*. 2017. Т. 152, вып. 3 (9). С. 483-494.

Ректор университета \_\_\_\_\_

А.И. Русаков

«\_\_\_» марта 2018 г.