

ОТЗЫВ

официального оппонента Мартемьянова Бориса Вениаминовича о диссертационной работе **Дворникова Максима Сергеевича** «Сильные магнитные поля в физике нейтрино, космологии и астрофизике», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация состоит из Введения, 3-х глав, Заключения, 8-и приложений, а также содержит 19 рисунков и 1 таблицу. В списке литературы имеется 264 ссылки. Объем диссертации – 254 страницы текста. Материалы диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из них 24 статьи в рецензируемых научных журналах, в таких как Phys. Lett. B, Phys. Rev. D, Nucl. Phys. B, JCAP и др. Результаты работы докладывались на 24-х международных конференциях.

Во **Введении** представлен обзор ранее выполненных работ, касающихся влияния сильных внешних полей, включающих магнитное поле, на осцилляции нейтрино, проблемы генерации магнитных и гипермагнитных полей в ранней вселенной, а также моделей предсказывающих возникновение сильных магнитных полей в компактных звездах (магнитарах). Помимо этого, во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, а также представлены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** разработаны подходы для теоретико-полевого описания осцилляций нейтрино в различных внешних полях. В **разделах 1.1-1.4** описан разработанный автором подход для изучения эволюции массивных дираковских нейтрино со смешиванием во внешних полях на основе релятивистской квантовой механики. Влияние внешних полей было учтено точно, поскольку были использованы точные решения уравнения Дирака для массивных нейтрино. На этой основе были последовательно рассмотрены случаи осцилляций нейтрино в вакууме, в веществе, в магнитном поле, и, наконец, самый общий случай спин-флейворных осцилляций в веществе под

действием внешнего магнитного поля. Во всех ситуациях были получены формулы для вероятности перехода, которые согласуются с ранее выведенными выражениями для случая достаточно широких в пространстве волновых пакетов нейтрино. Кроме того, была получена поправка к стандартному квантовомеханическому описанию спин-флейворных осцилляций.

Несмотря на новизну полученных результатов (ранее теоретико-полевые методы применялись, главным образом, для исследования осцилляций нейтрино в вакууме), у меня возникло **замечание** относительно недостаточного обсуждения границ применимости разработанного метода для описания нейтринных осцилляций. Большинство формул перехода получено в пределе $L \rightarrow \infty$, где L – ширина волнового пакета нейтрино, что несомненно является приближением. Случай волновых пакетов конечной ширины фактически не исследован, в особенности при описании осцилляций нейтрино во внешних полях. Более подробное исследование предельного перехода $L \rightarrow \infty$ позволило бы получить соответствующие поправки к вероятностям перехода, дополнительные к поправкам m^2/E^2 , которые были выведены в разделе 1.4.

В **разделах 1.5 и 1.6** рассмотрено применение полученных ранее результатов для описания спин-флейворных осцилляций дираковских нейтрино в астрофизических средах. В частности, изучены нейтринные осцилляции в намагниченной расширяющейся оболочке после взрыва сверхновой и осцилляции между активными и стерильными нейтрино.

В **разделах 1.7 и 1.8** подход, основанный на релятивистской квантовой механике, обобщен на случай описания осцилляций массивных майорановских нейтрино во внешних полях. Были получены вероятности перехода, которые в предельном случае бесконечно широких волновых пакетов совпадают с найденными ранее с помощью стандартного квантовомеханического подхода. Кроме того, были исследованы осцилляции между состояниями нейтрино и антинейтрино, которые возможны, если нейтрино являются майорановскими частицами.

На страницах 79, 80 и 82 высказано утверждение, что динамика майорановских частиц может быть описана в рамках релятивистской квантовой механики (фактически в рамках классической теории поля, в которой волновые функции нейтрино являются коммутирующими c -числовыми объектами). Данное утверждение сделано на основе совпадения формул для вероятности переходов с ранее полученными результатами. Тем не менее, известно (см., например, Schechter & Valle, Phys. Rev. D **24**, 1883 (1981)), что наиболее полно динамика массивных майорановских нейтрино может быть описана либо в рамках квантовой теории поля либо с использованием классических антикоммутирующих грассмановых переменных. К **недостаткам** диссертации можно отнести тот факт, что в работе не приведено более строгого обоснования высказанного на страницах 79, 80 и 82 утверждения.

В **разделе 1.9** было рассмотрено приложение полученных ранее результатов для описания спин-флейворных осцилляций майорановских нейтрино в расширяющейся оболочке после взрыва сверхновой под действием сильного магнитного поля. Было проведено сравнение динамики осцилляций со случаем дираковских нейтрино, рассмотренным ранее. В частности, было показано, что вероятность перехода для майорановских нейтрино может достигать больших значений только при очень сильном магнитном поле.

Наконец, в **разделе 1.10** были изучены осцилляции между нейтрино и антинейтрино в веществе на основе квантовой теории поля. Для этой цели была вычислена «макроскопическая» диаграмма Фейнмана. Впервые подобный метод для описания осцилляций нейтрино в вакууме был предложен в работе Кобзарева и др. (ЯФ **35**, 1210 (1982)), и впоследствии неоднократно исследовался другими авторами (Grimus & Stockinger 1996; Naumov & Naumov 2010; и др.). Тем не менее, **М.С. Дворников** впервые рассмотрел влияние вещества на нейтринные осцилляции в рамках данного подхода.

К **недостаткам** раздела 1.10 можно отнести отсутствие рассмотрения осцилляций нейтрино под действием магнитного поля в рамках квантовой теории поля. Если бы подобный процесс был также исследован в диссертации,

это сделало бы данный раздел более адекватно соответствующим заявленной теме диссертации.

Во **второй главе** были рассмотрены вопросы касающиеся генерации сильных магнитных и гипермагнитных полей в ранней вселенной.

В **разделах 2.1 и 2.2** был вычислен однопетлевой вклад в поляризационный оператор фотона (плазмона) в веществе, имеющем ненулевую температуру и химический потенциал, а также с учетом электрослабого взаимодействия между лептонами (электронами) и нейтринным газом. Было показано, что учет ненулевого вклада в антисимметричный член в поляризационном операторе $\Pi_{ij} = i\varepsilon_{ijn}k^n\Pi_2$ приводит к неустойчивости магнитного поля. На этой основе, предположив причинный сценарий, в **разделе 2.3** было получено нижнее ограничение на асимметрии нейтрино.

В качестве **недостатка** раздела 2.3 я бы отметил, что нет достоверных наблюдательных данных того, что генерация космологических полей осуществляется именно в рамках предложенного подхода. Таким образом, нижняя граница на нейтринные асимметрии, приведенная в формуле (2.21), является лишь теоретическим ограничением при условии справедливости выбранной модели генерации магнитных полей.

В **разделах 2.4 и 2.5** изучена эволюция магнитных полей в горячей киральной плазме с учетом МГД-турбулентности. Были выведены новые кинетические уравнения для магнитной спиральности и магнитной энергии в которых исправлены ошибки допущенные предыдущими исследователями (Campanelli 2007; Sigl et al. 2017). На этой основе проанализировано влияние МГД-турбулентности на эволюцию магнитного поля и кирального дисбаланса в остывающей плазме расширяющейся вселенной при различных начальных условиях.

В **разделах 2.6-2.9** была изучена эволюция гипермагнитных полей в ранней вселенной до электрослабого фазового перехода в самой общей постановке задачи, включающей анализ асимметрий как правых так и левых

лептонов, а также влияние сфалеронных переходов. Учитывая несохранение лептонного числа во внешнем гипермагнитном поле (из-за абелевой аномалии) и соотношение 'т Хоофта для лептонного и барионного чисел, было получено, что в рамках разработанной модели можно воспроизвести наблюдаемую барионную асимметрию вселенной 10^{-10} для определенных параметров затравочного гипермагнитного поля.

Третья глава диссертации посвящена проблеме генерации сильных магнитных полей в компактных звездах, называемых магнитарами. Как было отмечено во Введении, на сегодняшний день нет общепринятой МГД модели объясняющей появление полей $B > 10^{15}$ G. Поэтому в последнее время многие авторы, включая **М.С. Дворникова**, пытаются использовать методы физики элементарных частиц для решения проблемы магнитаров.

В **разделе 3.1**, используя метод точных решений уравнения Дирака во внешних полях, получена поправка к киральному магнитному эффекту за счет электрослабого взаимодействия безмассового фермиона с фоновым веществом. В **разделе 3.2** показано, что киральный магнитный эффект (включая электрослабую поправку) исчезает если киральная симметрия нарушается. Данный результат также был получен с использованием точного решения уравнения Дирака.

В **разделах 3.3 и 3.4** разработана модель генерации сильного крупномасштабного магнитного поля в плотном кварковом веществе компактной звезды. При этом предполагалось, что плотность вещества достаточна для восстановления киральной симметрии за счет эффектов КХД. Было получено, что в данной системе генерируются крупномасштабные поля, $10^2 m < \Lambda_B < 10 km$, с напряженностью $B(10^{14} - 10^{15})G$, что близко к предсказываемым в магнитарах значениям.

В **разделах 3.5-3.7** была исследована эволюция мелкомасштабного магнитного поля в кварковом веществе компактной звезды с учетом кирального магнитного эффекта, дополненного вкладом электрослабого

взаимодействия, и МГД-турбулентности. В качестве модели МГД-турбулентности использовался подход, ранее развитый в разделе 2.4. Было найдено, что флуктуация магнитного поля эволюционирует во времени подобно наблюдаемому сигналу при электромагнитных вспышках магнитаров. При этом, меняя один параметр в модели – пространственный масштаб затравочного поля – можно воспроизвести практически весь спектр наблюдаемых вспышек: от коротких до гигантских. Высказано предположение, что генерируемые флуктуации магнитного поля могут приводить к возбуждению термопластической волны, которая, в свою очередь, инициирует вспышку магнитара.

Наконец, в **разделе 3.8** предложен альтернативный механизм генерации магнитного поля в магнитарах за счет мощного нейтринного излучения в момент взрыва сверхновой. В этом разделе используются результаты расчета параметра Черн-Саймонса, выполненные в разделах 2.1 и 2.2. Было показано, что на временах $t < 0.3$ s в протонейтронной звезде возникают условия достаточные для генерации сильных магнитных полей за счет нейтринной асимметрии.

В **Заключении** кратко перечислены результаты всех глав.

Помимо отмеченных выше замечаний, в качестве общего **недостатка** диссертации я бы отметил некоторую небрежность в написании текста, в котором присутствуют многочисленные грамматические опечатки.

Несмотря на перечисленные недостатки, полученные в диссертационной работе результаты имеют высокую научную значимость. Решение многих задач в диссертации основано на методе точных решений волновых уравнений во внешних полях. Помимо этого активно использовалась мацубаровская техника для вычисления фейнмановских диаграмм в присутствии фонового вещества с ненулевой температурой и химическим потенциалом. При рассмотрении различных космологических и астрофизических приложений **М.С. Дворников**

применял методы МГД, в том числе с использованием компьютерного моделирования.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Дворников Максим Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник ИТЭФ

доктор физ.-мат. наук

Б.В. Мартемьянов

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Лаборатория 180.

117218 Россия, Москва ул. Большая Черемушkinsкая, д. 25.

Тел. +7-(903)-531-84-62, e-mail: martemja@itep.ru

Подпись д.ф.-м.н. Мартемьянова Б.В. заверяю:

Ученый секретарь ИТЭФ

В.В. Васильев

19.02.2018

Мартемьянов Борис Вениаминович

доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Список публикаций:

1. V. G. Bornyakov, D. L. Boyda, V. A. Goy, E.-M. Ilgenfritz, **B. V. Martemyanov**, A V. Molochkov, A. Nakamura, A. A. Nikolaev and V. I. Zakharov, *Dyons and Roberge - Weiss transition in lattice QCD*, EPJ Web of Conferences **137**, 03002 (2017).
2. V. G. Bornyakov, E.-M. Ilgenfritz, **B. V. Martemyanov** and M. Müller-Preussker, *Dyons near the transition temperature in lattice QCD*, Phys. Rev. D **93**, 074508 (2016).
3. V. G. Bornyakov, E.-M. Ilgenfritz, **B. V. Martemyanov** and M. Müller-Preussker, *Dyon structures in the deconfinement phase of lattice gluodynamics: Topological clusters, holonomies, and Abelian monopolesm*, Phys. Rev. D **91**, 074505 (2015).
4. E.-M. Ilgenfritz, **B. V. Martemyanov** and M. Müller-Preussker, *Topology near the transition temperature in lattice gluodynamics analyzed by low lying modes of the overlap Dirac operator*, Phys. Rev. D **89**, 054503 (2014).
5. **B. V. Martemyanov** et al., *Measurement of the $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ Dalitz plot distribution*, Phys. Rev. C **90**, 045207 (2014).
6. V. G. Bornyakov, E.-M. Ilgenfritz, **B. V. Martemyanov**, V.K. Mitrjushkin, M. Müller-Preussker, *Topology across the finite temperature transition studied by overimproved cooling in gluodynamics and QCD*, Phys. Rev. D **87**, 114508 (2013).