

На правах рукописи

ДВОРНИКОВ МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ

**СИЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ФИЗИКЕ НЕЙТРИНО,
КОСМОЛОГИИ И АСТРОФИЗИКЕ**

Специальность: 01.04.02 - теоретическая физика

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени доктора
физико-математических наук

МОСКВА – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Горбунов Дмитрий Сергеевич,

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел теоретической физики, главный научный сотрудник;

Мартемьянов Борис Вениаминович,

доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Лаборатория 180, ведущий научный сотрудник;

Постнов Константин Александрович,

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга, заместитель директора.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова».

Защита состоится «_____» _____ 2018 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), расположенном по адресу: проспект 60-летия Октября, д. 7а, 117312, Москва.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИЯИ РАН по адресу: <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

член-корреспондент РАН

С. В. Троицкий.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В диссертационной работе рассмотрено влияние внешних полей, в том числе и магнитного поля, на осцилляции нейтрино, изучена эволюция сильных магнитных и гипермагнитных полей в ранней вселенной, а также разработана модель генерации магнитных полей в компактных звездах.

Физика нейтрино является одной из наиболее быстро развивающихся областей физики высоких энергий, в особенности после недавних успешных экспериментальных исследований свойств нейтрино. Одним из наиболее убедительных доказательств наличия ненулевых масс нейтрино, а также смешивания между различными нейтринными поколениями были экспериментальные наблюдения осцилляций нейтрино. Хорошо известно, что различные внешние поля, такие как взаимодействие с фоновым веществом или с внешним магнитным полем, могут существенно влиять на процесс нейтринных осцилляций. Ответ на фундаментальный вопрос о том, являются ли нейтрино дираковскими или майорановскими частицами может быть получен при исследовании спин-флейворных осцилляций в астрофизических магнитных полях из-за различия магнитных моментов данных частиц.

Космические магнитные поля проявляются на больших масштабах, сравнимых с радиусами галактик или размерами скоплений галактик. Возросший в последние годы интерес к космическим магнитным полям был вызван предсказанием нижнего предела на величину межгалактического поля $B > 10^{-16}$ G на масштабе $\Lambda_B > 1$ Мpc.¹ Предполагается, что эти галактические поля усиливаются под действием механизма динамо до нынешнего значения от некоторого затравочного магнитного поля. Происхождение этого затравочного поля, которое может быть довольно слабым, неизвестно. Не исключается возможность генерации данного поля в ранней Вселенной.

Сильные магнитные поля также важны при излучении энергии компактными звездами. Данное исследование получило дальнейшее развитие в результате наблюдений аномальных рентгеновских пульсаров (АХР) и источников повторяющегося

¹*Neronov A., Vovk I. Evidence for strong extragalactic magnetic fields from Fermi observations of TeV blazars // Science. — 2010. — Vol. 328. — Pp. 73–75.*

мягкого гамма излучения (SGR). Некоторые наблюдательные характеристики АХР и SGR отличают их от обычных аккрецирующих пульсаров в массивных рентгеновских двойных системах, и указывают на них как на отдельный класс астрофизических объектов. С точки зрения современной астрофизики данные объекты предполагаются сильно намагниченными компактными звездами, или магнитарами. Несмотря на обилие теоретических моделей магнитаров, происхождение их сильных магнитных полей все еще остается загадкой для современной физики и астрофизики.

Целью данной работы является построение теоретико-полевых подходов для описания осцилляций нейтрино во внешних полях, включающих сильное магнитное поле, а также разработка моделей генерации магнитных полей в космологических и астрофизических средах.

Для этого были решены следующие задачи:

1. Построение формализма для описания флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в вакууме и различных внешних полях основанного на релятивистской квантовой механике.
2. Разработка метода для описания флейворных осцилляций нейтрино в фоновом веществе основанного на квантовой теории поля.
3. Описание флейворных и спин-флейворных осцилляций дираковских и майорановских нейтрино в различных астрофизических средах под действием сильного магнитного поля.
4. Вычисление поляризационного оператора фотона в плазме лептонов электро-слабо взаимодействующих с нейтринным газом.
5. Описание генерации сильных магнитных полей в релятивистской плазме ранней вселенной и в сверхновой (СН) за счет нейтринной асимметрии.
6. Учет влияния магнитогидродинамической (МГД) турбулентности на эволюцию магнитных полей в ранней вселенной и в компактных звездах.

7. Рассмотрение эволюции гипермагнитных полей в ранней вселенной с учетом вкладов левых фермионов и сфалеронных переходов.
8. Описание генерации сильных магнитных полей магнитаров за счет неустойчивости поля в кварковом веществе вызванной электрослабым взаимодействием между кварками.
9. Построение модели электромагнитных вспышек магнитаров на основе мелко-масштабных флуктуаций магнитного поля за счет электрослабых взаимодействий и МГД-турбулентности в кварковом веществе.

Степень разработанности темы исследований. Исследования влияния внешних полей на осцилляции нейтрино известны с 70-х годов 20-го века.² Однако эти первоначальные работы использовали квантовомеханические методы для описания нейтринных осцилляций. В последние годы появились многочисленные исследования направленные на обоснование квантовомеханического подхода в нейтринных осцилляциях с использованием методов квантовой теории поля.³ Тем не менее, данные работы, в основном, ограничиваются рассмотрением осцилляций нейтрино в вакууме. В настоящей диссертационной работе разработаны подходы для описания осцилляций нейтрино во внешних полях основанные на теоретико-полевых методах.

Влияние абелевых аномалий⁴, неустойчивости магнитного поля за счет электрослабого взаимодействия⁵, а также турбулентного движения плазмы и кирально-го магнитного эффекта (КМЭ) на эволюцию магнитных и гипермагнитных полей

² *Wolfenstein L.* Neutrino oscillations in matter // *Phys. Rev. D.* — 1978. — Vol. 17 — Pp. 2369–2374; *Мухеев С. П., Смирнов А. Ю.* Резонансное усиление осцилляций нейтрино в веществе и спектроскопия солнечных нейтрино // *ЯФ.* — 1985. — Т. 42. — С. 1441–1448; *Cisneros A.* Effect of neutrino magnetic moment on solar neutrino observations // *Astrophys. Space Sci.* — 1971. — Vol. 10. — Pp. 87–92.

³ *Beuthe M.* Oscillations of neutrinos and mesons in quantum field theory // *Phys. Rep.* — 2003. — Vol. 375. — Pp. 105–218.

⁴ *Giovannini M., Shaposhnikov M. E.* Primordial hypermagnetic fields and triangle anomaly // *Phys. Rev. D.* — 1998. — Vol. 57 — Pp. 2186–2206.

⁵ *Boyarsky A., Ruchayskiy O., Shaposhnikov M.* Long-range magnetic fields in the ground state of the Standard Model plasma // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — Vol. 109. — P. 111602.

в ранней вселенной⁶ активно изучается в последнее время. Данные исследования представляют важность для описания лептогенезиса и бариогенезиса во внешних магнитных и гипермагнитных полях до и после электрослабого фазового перехода (ЭСФП). В диссертационной работе был найден самый полный вид параметра Черн-Саймонса (ЧС) в e^+e^- -плазме и $\nu\bar{\nu}$ -газе, ответственный за неустойчивость магнитного поля в ранней вселенной за счет нейтринной асимметрии, аналитически получены кинетические уравнения учитывающие вклады МГД-турбулентности и КМЭ для описания эволюции магнитного поля, а также исследовано влияние асимметрий левых лептонов на бариогенезис в гипермагнитных полях до ЭСФП.

Компактные звезды обладающие сверхсильными магнитными полями, или магнитары, были обнаружены на рубеже 70-х и 80-х годов 20-го века. Несмотря на объяснение некоторых свойств магнитаров с использованием стандартных МГД-методов, происхождение ряда характеристик данных объектов до сих пор остается неясным.⁷ В последние несколько лет, для решения проблемы магнитаров были применены методы физики элементарных частиц, в частности, КМЭ.⁸ В настоящей диссертационной работе разработана модель магнитаров, основанная на обобщении КМЭ, в которой не только описывается генерация сильных крупномасштабных магнитных полей в компактных звездах, но также и объясняются электромагнитные вспышки магнитаров.

Методология и методы исследования. Основным способом учета влияния внешнего магнитного поля и фонового вещества на динамику элементарных частиц (как нейтрино, так и киральных заряженных фермионов) служит метод точных решений волновых уравнений в присутствии внешних полей. Данный метод использовался при описании осцилляций нейтрино во внешних полях, а также для исследования КМЭ в присутствии электрослабо взаимодействующего вещества. Помимо этого, для изучения влияния фонового вещества на осцилляции между нейтрино и антинейтрино, а также при вычислении члена ЧС в e^+e^- -плазме и $\nu\bar{\nu}$ -газе

⁶ *Rogachevskii I., et al. Laminar and turbulent dynamos in chiral magnetohydrodynamics. I: Theory // Astrophys. J. — 2017. — Vol. 846. — P. 153.*

⁷ *Turolla R., Zane S., Watts A. L. Magnetars: the physics behind observations. A review // Rep. Prog. Phys. — 2015. — Vol. 78. — P. 116901.*

⁸ *Sigl G. Astroparticle Physics: Theory and Phenomenology. — Paris: Atlantis Press, 2017. — 861 p.*

использовались вычисления фейнмановских диаграмм в представлении Фарри и с применением мацубаровской техники. Для описания неустойчивости магнитных полей, ведущих к росту затравочного поля, применялись методы МГД, такие как аналитический и численный анализ модифицированного уравнения Фарадея.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработан формализм для описания флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в веществе под действием внешнего магнитного поля. Сформулирована начальная задача для системы флейворных нейтрино, позволяющая проинтерпретировать эффективную квантовомеханическую волновую функцию, используемую для описания осцилляций нейтрино. Данная задача решена для широкого класса внешних полей, что дало возможность описать осцилляции дираковских и майорановских нейтрино в реальных астрофизических средах, таких как расширяющаяся оболочка после взрыва СН.
2. Описаны осцилляции между нейтрино и антинейтрино в фоновом веществе с использованием квантовой теории поля. Получена вероятность перехода, которая позволяет рассмотреть влияние плотного ядерного вещества на безнейтринный двойной β -распад ($(0\nu 2\beta)$ -распад).
3. Вычислен антисимметричный член в поляризованном операторе фотона в плазме лептонов, которые электрослабо взаимодействуют с нейтринным газом. Обнаружено, что данный член ответственен за неустойчивость внешнего магнитного поля приводящего к его росту. На этой основе изучена генерация магнитных полей за счет нейтринной асимметрии в ранней вселенной и при взрыве СН. Показано, что в этих случаях можно ожидать значительного роста затравочного поля.
4. Рассмотрено влияние асимметрий левых лептонов и хиггсовских бозонов, а также сфалеронных переходов, на эволюцию гиперзарядовых полей в ранней вселенной до ЭСФП. Используя этот результат, построены модели лептогенезиса и бариогенезиса под действием гипермагнитного поля. Исследован вклад левых лептонов, а также затравочного гипермагнитного поля, в процесс гене-

рации барионной асимметрии вселенной (БАВ).

5. Получена поправка к КМЭ за счет электрослабого взаимодействия между заряженными фермионами, которая приводит к неустойчивости магнитного поля. На этой основе построена модель генерации сильных крупномасштабных магнитных полей в кварковом веществе. В рамках данной модели показано, что характеристики генерируемых полей близки к предсказываемым в магнитарах.
6. Исследована роль массы заряженных фермионов на возникновение КМЭ в присутствии электрослабого взаимодействия с фоновым веществом. Используя метод точных решений волнового уравнения в присутствии внешних полей, а также вычисление антисимметричного вклада в поляризационный оператор фотона, показано, что ненулевая масса фермионов нивелирует появление КМЭ. Данный результат связан с нарушением киральной симметрии.
7. Рассмотрено влияние МГД-турбулентности на эволюцию магнитного поля в релятивистской плазме. Обнаружено, что данный вид турбулентности не может приводить к усилению затравочного поля. Рассмотрев, наряду с МГД-турбулентностью, вклады КМЭ и электрослабого взаимодействия между кварками в плотном веществе компактной звезды, была построена модель для описания вспышек магнитаров вызванных мелкомасштабными флуктуациями магнитного поля внутри звезды.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые осцилляции нейтрино в веществе под действием внешнего магнитного поля были описаны в рамках подхода основанного на релятивистской квантовой механике.
2. Впервые было изучено влияние фонового вещества на осцилляции между нейтрино и антинейтрино с использованием квантовой теории поля.
3. Получено новое ограничение снизу на нейтринные асимметрии в ранней вселенной необходимое для реализации сценария усиления магнитного поля за

счет нейтринной асимметрии.

4. Выведены новые уравнения для описания эволюции магнитного поля с учетом МГД-турбулентности.
5. 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 ЭСФП.
6. Разработана новая модель генерации сильных магнитных полей в магнитарах основанная на неустойчивости поля, вызванной нарушающим четность электрослабым взаимодействием в кварковом веществе.
7. Предложено новое объяснение электромагнитных вспышек магнитаров инициируемых мелкомасштабными флуктуациями магнитного поля внутри компактной звезды с учетом МГД-турбулентности и электрослабого взаимодействия между кварками.

Научная ценность и практическая значимость работы состоят в том, что полученные результаты и теоретический аппарат, изложенные в диссертации, могут использоваться при интерпретации и анализе данных в космологии и астрофизике, а также при планировании новых экспериментов в физике нейтрино.

Обоснованность и достоверность результатов. Полученные в диссертации результаты достоверны за счет использования 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. Кроме того, при получении ряда результатов диссертации использовались современные компьютерные алгоритмы символьных вычислений, что также говорит в пользу достоверности полученных результатов. Обоснованность результатов подтверждается их сопоставлением с результатами других авторов, а также с результатами экспериментов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на международных конференциях “Particle Physics and Astrophysics” (г. Москва) в 2016 и 2017 годах; на международных конференциях “Lomonosov Conference on

Elementary Particle Physics” (г. Москва) в 2005, 2015 и 2017 годах; на международных семинарах по физике высоких энергий «Кварки» в 2012 (г. Ярославль) и 2016 (г. Пушкин) годах; на международных симпозиумах “High Energy Physics” в 2009 (г. Сан-Карлос-де-Барилоче, Аргентина), 2012 (г. Сан-Паулу, Бразилия) и 2014 (г. Медельин, Колумбия) годах; на международных тематических конференциях “Elementary Particles, Astrophysics, and Cosmology” (г. Форт Лодердейл, США) в 2010 и 2011 годах; на международных конференциях “Particles and Cosmology” в 2006 (Баксанское ущелье) и 2011 (г. Троицк) годах; на международной конференции “Ginzburg Centennial Conference on Physics” (г. Москва) в 2017 году; на международной конференции “Modern Trends in Physics” (г. Баку, Азербайджан) в 2017 году; на международной конференции “Very High Energy Phenomena in the Universe” (г. Ла Тьюль, Италия) в 2017 году; на международной конференции “Strong Field Problems in Quantum Theory” (г. Томск) в 2016 году; на международной конференции “Cosmology at the Interface” (г. Калькутта, Индия) в 2015 году; на 37-й международной конференции “High Energy Physics” (г. Валенсия, Испания) в 2014 году; на международной конференции “Flavor Physics and Mass Generation” (г. Сингапур) в 2014 году; на международной конференции “European Physical Society Conference on High Energy Physics” (г. Манчестер, Великобритания) в 2007 году; на международной конференции “Lepton and Hadron Physics” (г. Тегеран, Иран) в 2006 году; на международной конференции “Hiroshima Higgs Workshop” (г. Хиросима, Япония) в 2006 году.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из них 24 статьи в рецензируемых научных журналах [1–24], 7 статей в научных изданиях [25–31], публикующих сборники трудов международных конференций, а также одна статья в коллективной монографии [32].

Личный вклад автора. Все представленные в диссертации основные результаты получены лично автором. Содержание диссертации и положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Вклад диссертанта в постановку задач, формулировку выводов и подготовку к публикации полученных результатов, проводимую совместно с соавторами, был определяющим.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех

глав, заключения, восьми приложений и списка литературы. Объем диссертации — 254 страницы, в том числе 19 рисунков. Список литературы включает 264 наименования.

Содержание работы

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** развиваются теоретические подходы для описания флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в вакууме и различных внешних полях. В **разделе 1.1** обсуждается динамика флейворных осцилляций нейтрино в вакууме, с использованием подхода основанного на релятивистской квантовой механике. Сначала формулируется задача Коши для системы флейворных нейтрино со смешиванием. Рассматривая систему двух флейворных нейтрино ν_λ , где $\lambda = \alpha, \beta$, а α и β соответствуют различным флейворам, данная начальная задача формулируется следующим образом:

$$\nu_\lambda(\mathbf{r}, t = 0) = \nu_\lambda^{(0)}(\mathbf{r}), \quad \lambda = \alpha, \beta, \quad (1)$$

где $\nu_\lambda^{(0)}(\mathbf{r})$ являются известными функциями координат. Вводя массовые состояния $\psi_a(\mathbf{r}, t)$, $a = 1, 2$, которые являются дираковскими нейтрино, путем матричного преобразования для диагонализации массовой матрицы, была получена их эволюция в виде:

$$\psi_a(\mathbf{r}, t) = \int d^3\mathbf{r}' S_a(\mathbf{r}' - \mathbf{r}, t) (-i\gamma^0) \psi_a^{(0)}(\mathbf{r}'), \quad (2)$$

где $S_a(\mathbf{r}, t)$ — функция Паули-Йордана спинорной частицы, а $\psi_a^{(0)}(\mathbf{r})$ — начальные волновые функции массовых состояний, которые целиком определяются формулой (1). При выводе формулы (2) используется точное решение волнового уравнения Дирака, в котором волновая функция имеет не операторную природу. Вычислив, используя формулу (2), волновые функции флейворных нейтрино, найдено точное решение задачи Коши для этих собственных состояний. Затем, выбрав осо-

бое начальное условие в форме,

$$\nu_{\alpha}^{(0)}(\mathbf{r}) = 0, \quad \nu_{\beta}^{(0)}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} \nu_{\beta}^{(0)}(\mathbf{k}), \quad (3)$$

где $\nu_{\alpha}^{(0)}(\mathbf{k})$ – независимый от координат нормировочный спинор, найдены вероятности перехода между различными поколениями нейтрино и показано, что они воспроизводят вероятности перехода вычисленные с помощью квантовомеханического подхода. Также были обсуждены границы применимости разработанного формализма, основанного на релятивистской квантовой механике.

В **разделе 1.2** рассмотрены флейворные осцилляции дираковских нейтрино в фоновом веществе. Для этого разработанный формализм дополнен слагаемым в лагранжиане, описывающим электрослабое взаимодействие с веществом,

$$\mathcal{L}_{\text{mat}} = - \sum_{\lambda, \lambda' = \alpha, \beta} f_{\lambda\lambda'}^{\mu} \bar{\nu}_{\lambda} \gamma_{\mu}^L \nu_{\lambda'}, \quad (4)$$

где матрица $f_{\lambda\lambda'}^{\mu}$ зависит от макроскопических характеристик вещества, таких как его плотность, химический состав, скорость и поляризация. Заметим, что недиагональные элементы этой матрицы с $\lambda \neq \lambda'$ соответствуют наличию «нестандартных» взаимодействий нейтрино с веществом. Начальная задача, соответствующая лагранжиану (4), была решена, фактически, путем нахождения аналога функции Паули-Йордана для нейтрино взаимодействующего с веществом. Отметим, что при диагонализации массовой матрицы взаимодействие с веществом стало недиагональным в массовом базисе, и соответствующие уравнения Дирака оказались зацепляющимися. Тем не менее, данная трудность была успешно преодолена в диссертации. В результате были выведены формулы для вероятности переходов согласующиеся с результатами квантовомеханического подхода, а также получено их обобщение на случай «нестандартных» взаимодействий.

В **разделе 1.3** рассмотрены спин-флейворные осцилляции дираковских нейтрино во внешнем магнитном поле. Для этой цели начальный спинор $\nu_{\alpha}^{(0)}(\mathbf{k})$ в формуле (3) был выбран таким образом, что он соответствует определенной спиральности нейтрино. Взаимодействие с внешним электромагнитным полем описывается следующим лагранжианом:

$$\mathcal{L}_{\text{B}} = -\frac{1}{2} \sum_{\lambda\lambda' = \alpha, \beta} M_{\lambda\lambda'} \bar{\nu}_{\lambda} \sigma_{\mu\nu} \nu_{\lambda'} F^{\mu\nu}, \quad (5)$$

где $(M_{\lambda\lambda'})$ – матрица магнитных моментов в флейворном базисе. Магнитное поле было выбрано поперечным по отношению к импульсу нейтрино, $\mathbf{V} \perp \mathbf{k}$, и $\mathbf{E} = 0$. Соответствующая начальная задача была решена, и были получены выражения для вероятностей перехода для различных типов магнитных моментов. Заметим, что при анализе эволюции массовых состояний также возникала проблема зацепляющихся уравнений Дирака, которая также была решена.

Наконец, в **разделе 1.4** рассмотрена наиболее общая ситуация спин-флейворных осцилляций в веществе под действием внешнего магнитного поля. Для этой цели были использованы лагранжианы (4) и (5). При анализе эволюции массовых состояний применялись точные решения уравнения Дирака, которые не совпадают с состояниями соответствующими определенной спиральности. Этот факт позволил получить поправку к эффективному гамильтониану описывающему спин-флейворные осцилляции нейтрино в веществе под действием магнитного поля.

В **разделе 1.5** общий формализм для описания спин-флейворных осцилляций нейтрино был применен для описания частиц, распространяющихся в расширяющейся оболочке, образовавшейся после взрыва СН. Было найдено точное решение уравнения Шредингера с выведенным эффективным гамильтонианом для случая фонового вещества, представленного в расширяющейся оболочке в СН, под действием сильного магнитного поля. В частности, был изучен случай изоскалярного вещества соответствующего $n_e = n_p = n_n$ с плотностью $\rho = (10 - 100) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Параметры нейтрино считались равными $E = 10 \text{ MeV}$, $\delta m^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ и $\theta_{\text{vac}} = 0.6$, что соответствует осцилляциям $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$. Рассматривались дираковские нейтрино с большим переходным магнитным моментом μ . Путем аналитического решения уравнения эволюции было показано, что вероятность перехода $\nu_e^L \rightarrow \nu_\mu^R$ имеет резонансный характер и достигается при умеренном магнитном поле соответствующем магнитной энергии $\mu B \sim (10^{-12} - 10^{-13}) \text{ eV}$.

В **разделе 1.6** было продолжено изучение осцилляций дираковских нейтрино от СН в веществе под действием внешнего магнитного поля. Была рассмотрена возможность спин-флейворных осцилляций между правополяризованными электронными нейтрино и стерильными нейтрино в расширяющейся оболочке, образующейся после взрыва СН, под действием сильного магнитного поля. Было показано, что

резонансное усиление осцилляций нейтрино возможно, если учитывается поправка к эффективному гамильтониану полученная в разделе 1.4. Были рассмотрены квазивырожденные по массе дираковские нейтрино с $\delta m^2 \sim 10^{-17} \text{ eV}^2$, существование которых не исключается в различных феноменологических моделях. Было показано, что предсказанный резонанс в осцилляциях нейтрино может влиять на наблюдение потока нейтрино от СН.

В **разделе 1.7** релятивистская квантовая механика была применена для исследования осцилляций массивных смешанных майорановских нейтрино. В случае массовых состояний майорановских нейтрино, удобно использовать двухкомпонентные вейлевские спиноры η_a , которые в вакууме удовлетворяют уравнению,

$$i\dot{\eta}_a + (\boldsymbol{\sigma}\mathbf{p})\eta_a + im_a\sigma_2\eta_a^* = 0, \quad (6)$$

а не уравнению Дирака, используемому для описания дираковских нейтрино. Тем не менее, уравнение (6) было проанализировано для нейтрино распространяющихся в вакууме путем решения начальной задачи для двух типов нейтрино. В результате была найдена вероятность перехода не только для флейворных осцилляций, то также и для ситуации переходов между нейтрино и антинейтрино.

Затем, в **разделе 1.8** разработанный формализм был использован для более общего случая майорановских нейтрино, распространяющиеся в фоновом веществе и взаимодействующих с внешним магнитным полем. Для этой цели уравнение (6) было дополнено соответствующими слагаемыми. При этом было учтено, что матрица магнитных моментов для майорановских является антисимметричной в массовом базисе. Было показано, что начальная задача для массовых состояний может быть сформулирована с использованием уравнения Шредингера с эффективным гамильтонианом, который совпадает с аналогичным выражением, выведенным в рамках квантовомеханического подхода. Таким образом было продемонстрировано, что эволюция массивных майорановских нейтрино в веществе под действием магнитного поля может быть описана на основе релятивистской квантовой механике, использующей не операторные волновые функции.

В **разделе 1.9** формализм для описания спин-флейворных осцилляций майорановских нейтрино был использован для изучения распространения нейтрино в

расширяющейся оболочке после взрыва СН. Рассмотрев майорановские нейтрино с параметрами аналогичными дираковским частицам в разделе 1.5, были выведены аналитические выражения для вероятности переходов в спин-флейворных осцилляциях. Было получено, что вероятность перехода может достичь больших значений только при достаточно сильном магнитном поле, в противоположность дираковским нейтрино для которых вероятность перехода имела резонансный характер.

Наконец, в **разделе 1.10** были рассмотрены переходы между нейтрино и антинейтрино в рамках подхода основанного на квантовой теории поля. При этом особое внимание было уделено влиянию фонового вещества на процесс осцилляций. Для этой цели был использован подход, основанный на вычислении элемента S -матрицы, в котором нейтрино являются виртуальными частицами, распространяющимися между макроскопически разнесенными в пространстве «источником» и «детектором». Для учета влияния фонового вещества были использованы пропагаторы виртуальных нейтрино в представлении Фарри. Предположив, что взаимодействие с веществом близко к диагональному в массовом базисе, было найдено, что вероятность осцилляций между нейтрино и антинейтрино сильно подавлена для частиц с малыми эффективными импульсами. Данная ситуация может иметь место для гипотетических тяжелых нейтрино, существование которых не исключается некоторыми теоретическими моделями. На этой основе сделан вывод, что данные нейтрино не дают вклад в $(0\nu 2\beta)$ -распад.

В **разделе 1.11** приведены выводы по результатам первой главы. Результаты первой главы опубликованы в работах [1–10, 25–27, 32].

Во **второй главе** рассматривается эволюция гипермагнитных и магнитных полей в ранней вселенной до и после ЭСФП, а также ряд приложений таких как генерация лептонной и барионной асимметрий и влияние турбулентности вещества на динамику киральных частиц в горячей плазме. В **разделе 2.1** вычислен вклад взаимодействия нарушающего четность в тензор поляризации в присутствии $\nu\bar{\nu}$ -газа и плазмы из заряженных лептонов l (электронов) и антилептонов \bar{l} (позитронов). Электрослабое νl -взаимодействие, нарушающее пространственную четность, было учтено в пропагаторах лептонов в приближении внешнего среднего поля. Нейтринный газ считался макроскопически неподвижным. На этой основе был получен

однопетлевой вклад в антисимметричную часть поляризаационного оператора без учета плазменных эффектов, т.е. считалось, что заряженные лептоны являются полностью виртуальными частицами. Данный формфактор оказался пропорциональным нейтринной асимметрии $\Delta n_\nu = n_\nu - n_{\bar{\nu}}$.

Прямой вклад заряженных лептонов в антисимметричный формфактор фотонов (параметр ЧС), соответствующий взаимодействию с фоновыми нейтрино, нарушающему четность, был учтен в **разделе 2.2**. Для этой цели использовалась мацубаровская техника соответствующая ненулевой температуре T и химическому потенциалу μ $l\bar{l}$ -плазмы. При выполнении вычислений масса лептонов считалась отличной от нуля, что является существенным, например, в случае классической нерелятивистской плазмы. Таким образом, не предполагалось, что лептоны являются киральными частицами. Для релятивистской плазмы использовалась эффективная масса лептона $m_{\text{eff}}(T, \mu)$, что также отличает примененный подход от метода использующего киральные частицы. Кроме того, был точно учтен закон дисперсии плазмонов в $l\bar{l}$ -плазме. В качестве иллюстрации полученных результатов, параметр ЧС был в явном виде вычислен в классической плазме низкой плотности, а также в горячей релятивистской плазме.

Затем, в **разделе 2.3** были рассмотрены некоторые применения вычисленного поляризаационного оператора для описания эволюции магнитных полей в горячей релятивистской плазме ранней Вселенной обусловленной наличием нейтринной асимметрии. Было показано, что при наличии ненулевого параметра ЧС, Π_2 , в МГД приближении $\sigma_{\text{cond}} \gg \omega$, магнитное поле удовлетворяет модифицированному уравнению Фарадея,

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{\Pi_2}{\sigma_{\text{cond}}} \nabla \times \mathbf{B} + \frac{1}{\sigma_{\text{cond}}} \nabla^2 \mathbf{B}, \quad (7)$$

где σ_{cond} – электрическая проводимость среды. Уравнение (7) может иметь неустойчивое решение,

$$B(k, t) = B_0 \exp \left(\int_{t_0}^t \frac{dt'}{\sigma_{\text{cond}}} (\Pi_2 - k) k \right), \quad (8)$$

которое описывает экспоненциальный рост затравочного поля B_0 . Предположив, на этой основе, что генерация магнитного поля в горячей релятивистской плазме ранней вселенной на момент закалки нейтрино при $T = (2 - 3) \text{ MeV}$ происходит в

рамках предложенного механизма из-за нейтринных асимметрий, было получено, что требование причинности в данном сценарии (т.е., что пространственный масштаб поля должен быть меньше размера горизонта) эквивалентно нижней границе на нейтринные асимметрии,

$$\xi_\nu \sim |\xi_{\nu_e} - \xi_{\nu_\mu} - \xi_{\nu_\tau}| > \frac{1.1 \times 10^{-6} \sqrt{g^*/106.75}}{(T/\text{MeV})}. \quad (9)$$

где $\xi_{\nu_\alpha} = 6\Delta n_{\nu_\alpha}/T^3$, а g^* – число релятивистских степеней свободы.

Далее, в **разделе 2.4** было изучено влияние МГД-турбулентности на эволюцию магнитного поля в системе киральных частиц. Для этой цели было произведено упрощение полной системы МГД уравнений релятивистской плазмы в одножидкостном приближении. При этом скорость плазмы, входящая в адвекционное слагаемое в модифицированном уравнении Фарадея, была промоделирована силой Лоренца,

$$\mathbf{v} = \frac{\tau_d}{P + \rho} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}), \quad (10)$$

где τ_d – феноменологическое время корреляции, соответствующее увлечению плазмы магнитным полем.

В **разделе 2.5** выведена система уравнений, описывающих эволюцию спектров плотности магнитного поля $\mathcal{H}_B(k, t)$ и магнитной спиральности $\mathcal{E}_B(k, t)$ с учетом МГД-турбулентности и КМЭ. Было показано, что только МГД-турбулентность не может генерировать неустойчивость магнитного поля. Таким образом, единственной причиной роста затравочного поля в рассматриваемой системе является КМЭ. Было получено численное решение кинетических уравнений для спектров, а также для кирального дисбаланса $\mu_5 = (\mu_R - \mu_L)/2$, в горячей плазме ранней вселенной после ЭСФП для различных затравочных магнитных полей и исследовано взаимное влияние МГД-турбулентности и КМЭ на эволюцию магнитного поля, магнитной спиральности и μ_5 .

В **разделе 2.6** проанализировано условие равновесия в горячей плазме ранней вселенной до ЭСФП в присутствии сильных гиперзарядовых полей. Было высказано предположение, что помимо трех химических потенциалов, соответствующих трем законам сохранения 'т Хоофта, $B/3 - L_i = \text{const}$, где $i = e, \mu, \tau$, химического потенциала правых электронов, и глобального нулевого гиперзаряда вселенной, в

присутствии гиперзарядовых полей токи левых и правых электронов не сохраняются из-за квантовых абелевых аномалий,

$$\partial_\mu j_{eL,R}^\mu = \mp \frac{g'^2 Y_{L,R}^2}{64\pi^2} Y_{\mu\nu} \tilde{Y}^{\mu\nu}, \quad (11)$$

где $Y_{\mu\nu}$ – тензор напряженности гиперзарядового поля. Помимо несохранения токов $j_{eL,R}^\mu$, оказалось необходимым учесть сфалеронные переходы, которые уменьшают левое лептонное число. Кроме того, при составлении полной системы кинетических уравнений, взаимодействие левых и правых лептонов с хиггсовским полем также становится важным.

Далее, в **разделе 2.7** была выведена полная система кинетических уравнений, в присутствии гиперзарядовых полей, для асимметрий правых и левых лептонов (электронов и нейтрино), с учетом сфалеронных переходов, а также для хиггсовских бозонов. В качестве лептонного поколения были выбраны частицы с самой малой массой в фазе с нарушенной симметрией (электроны), поскольку процессы с изменением киральности для них входят в равновесие в остывающей расширяющейся вселенной в самую последнюю очередь. Таким образом, в используемой модели с исходными правыми электронами, появление асимметрии левых электронов и нейтрино, взаимодействующих со сфалеронами, не приводит к уменьшению БАВ из-за дефицита оставшегося времени до момента ЭСФП. В качестве конфигурации гипермагнитного поля была выбрана волна ЧС: $Y_x = Y(t) \sin k_0 z$, $Y_y = Y(t) \cos k_0 z$, $Y_z = Y_0 = 0$, которая соответствует максимальной положительной спиральности, и для которой величина $Y_{\mu\nu} \tilde{Y}^{\mu\nu}$ в формуле (11) отлична от нуля. Данные кинетические уравнения были записаны в безразмерных переменных и на этой основе была вычислена БАВ, которая целиком определяется численным решением этих уравнений, для различных масштабов гипермагнитного поля $\Lambda_Y \sim 1/k_0$.

В **разделе 2.8** были исследованы асимметрии левых и правых лептонов и хиггсовских бозонов с учетом и без учета вклада гипермагнитного поля. Если гипермагнитное поле не учитывается, то оказалось возможным решить полную систему кинетических уравнений аналитически. При учете гипермагнитного поля были найдены данные асимметрии на основе численных решений кинетических уравнений и проанализирована их зависимость от масштаба гипермагнитного поля.

В **разделе 2.9** особое внимание было уделено эволюции параметра киральной аномалии $\sim (n_R - n_L)$. Данное исследование представляет интерес поскольку различные модели лепто- и бариогенезиса после ЭСФП оказываются существенно зависимыми от величины кирального дисбаланса на момент ЭСФП. Параметр киральной аномалии был вычислен как аналитически, в упрощенной модели, так и численно, путем решения полной системы кинетических уравнений. Была также изучена его зависимость от масштаба гипермагнитного поля.

В **разделе 2.10** приведены выводы по результатам второй главы. Результаты второй главы опубликованы в работах [11–15, 29].

В **третьей главе** изучается генерация астрофизических магнитных полей за счет КМЭ и электрослабого взаимодействия между фермионами. В **разделе 3.1** найдено точное решение уравнения Дирака для киральных заряженных частиц, электрослабо взаимодействующих с фоновым веществом под действием внешнего магнитного поля. На этой основе был вычислен электрический ток вдоль магнитного поля, который оказался отличным от нуля,

$$\mathbf{J} = \frac{e^2}{2\pi^2} (\mu_5 + V_5) \mathbf{B}, \quad (12)$$

где $V_5 = (V_L - V_R)/2$, а $V_{R,L}$ – эффективные потенциалы взаимодействия правой и левой киральных проекций с фоновым веществом. Было показано, что выражение для тока (12) целиком определяется поляризационными эффектами на нулевом уровне Ландау.

Затем, в **разделе 3.2** было исследовано влияние ненулевой массы заряженных частиц на генерацию аномального электрического тока с учетом электрослабого взаимодействия с фоновым веществом. Было найдено точное решение уравнения Дирака для массивного заряженного фермиона в рассматриваемых внешних полях. На этой основе было показано, что ток таких частиц вдоль внешнего поля равен нулю. Указано, что КМЭ для безмассовых фермионов связан с асимметрией движения таких заряженных частиц, находящихся на нулевом уровне Ландау, вдоль внешнего магнитного поля. Было продемонстрировано, что подобная асимметрия исчезает для массивных частиц. Было также показано, что помимо точного решения уравнения Дирака, эффект исчезновения аномального тока следует из вы-

числения антисимметричного вклада в поляризационный оператор фотона распространяющегося в электрослабом веществе. Высказано предположение, что зануление электрического тока массивных фермионов связано с нарушением киральной симметрии для подобных частиц.

В разделе 3.3 была разработана модель генерации магнитного поля в плотном кварковом веществе с ненарушенной киральной симметрией. Восстановление киральной симметрии в подобном веществе, которое может встречаться в некоторых компактных звездах, следует из ряда уравнений состояния кваркового вещества. Неустойчивость магнитного поля (см. формулу (8)) происходит благодаря наличию аномального тока (12) для u и d кварков. Были выведены кинетические уравнения для спектра плотности магнитной спиральности и магнитной энергии, а также для киральных дисбалансов двух типов кварков. В данной системе было учтено изменение спиральности кварков при их столкновениях. В качестве начальных условий для спектров был выбран колмогоровский спектр магнитной энергии. Постановка задачи не исключала возможности исследовать затравочные магнитные поля с произвольной спиральностью: от нулевой до максимальной.

В разделе 3.4 было найдено численное решение уравнений, выведенных в разделе 3.3, из которого следовало, что магнитное поле может достигать напряженностей $(10^{14} - 10^{15})$ G и быть крупномасштабным с $10^2 \text{ m} < \Lambda_B < 10 \text{ km}$. Время роста магнитного поля составляло от нескольких минут до нескольких часов. Температура кваркового вещества принималась равной $(10^8 - 10^9)$ K. Данные параметры говорят в пользу того, что разработанный механизм может быть реализован для объяснения происхождения сильных магнитных полей в компактных звездах называемых магнитарами. Заметим, что наряду с генерацией сильного крупномасштабного магнитного поля, в данной системе также генерировалась магнитная спиральность.

В разделе 3.5 была разработана модель эволюции относительно мелкомасштабного магнитного поля в кварковом веществе за счет одновременного влияния КМЭ, электрослабого взаимодействия с фоновым веществом, а также МГД-турбулентности. Сначала была обсуждена справедливость применимости модели МГД-турбулентности в кварковом веществе. Для этой цели были оценены соот-

ветствующие числа Рейнольдса. Далее, используя результаты разделов 2.5 и 3.3, была выведена система кинетических уравнений для спектров магнитной спиральности и плотности энергии, а также для киральных дисбалансов, с учетом МГД-турбулентности. Были также зафиксированы начальные условия для этой системы и обсуждена их справедливость. При выводе кинетических уравнений, в основном рассматривались случаи гибридной звезды, состоящей из u и d кварков с концентрациями $n_d = 2n_u$, и странной звезды, состоящей из u , d и s кварков с концентрациями $n_u = n_d = n_s$.

В разделе 3.6 было найдено численное решение системы уравнений, выведенной в разделе 3.5 для компактных звезд с различным химическим составом, различной температурой, $T = (10^8 - 10^9)$ К, и различными пространственными масштабами магнитного поля, $\Lambda_B = (1 - 5 \times 10^3)$ см). Для случаев относительно мелкомасштабного поля с $\Lambda_B \sim (1 - 10^2)$ см) отчетливо наблюдалось влияние МГД-турбулентности на динамику магнитного поля, выражающееся в возникновении пика во временной эволюции поля. Данный пик возникал при достижении магнитным полем определенной напряженности. До этого момента рост поля, в основном, определялся КМЭ и электрослабым взаимодействием с фоновым веществом.

В разделе 3.7 модель эволюции магнитного поля, разработанная в разделе 3.6, была использована для объяснения электромагнитных вспышек магнитаров. Для этой цели был выбран механизм вспышек, в основе которого лежит генерация термопластической волны (ТПВ) во внутренних частях компактной звезды. Однако, физический механизм, за счет которого возбуждается ТПВ, до сих пор неясен. Было выдвинуто предположение, что он связан с флуктуацией магнитного поля с соответствующими характеристиками во внутренней коре или во внешнем ядре звезды. Далее была рассмотрена генерация флуктуаций магнитного поля во внешнем ядре компактной звезды, где может присутствовать кварковое вещество с ненарушенной киральной симметрией. Были изучены поведение во времени подобной флуктуации и ее свойства, такие как пространственный масштаб и напряженность магнитного поля. Для этой цели была рассмотрена эволюция мелкомасштабных полей в разработанной модели, на основе численного моделирования произведенного в разделе 3.6. Было показано, что МГД-турбулентность, наряду с КМЭ и электро-

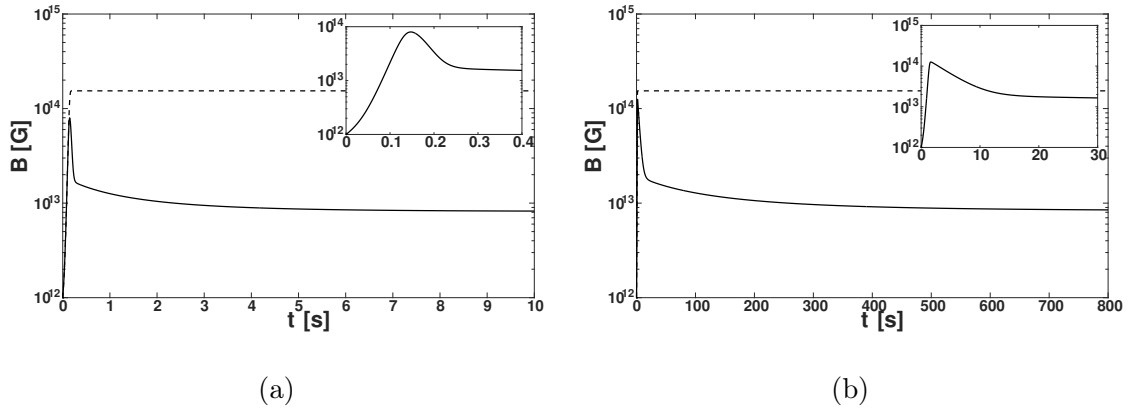


Рис. 1: Эволюция флуктуации магнитного поля во внешнем ядре магнитара, представляющего собой гибридную звезду, состоящую из u и d кварков, для различных пространственных масштабов. (a) $1 \text{ cm} < \Lambda_B < 10 \text{ cm}$ и (b) $10 \text{ cm} < \Lambda_B < 10^2 \text{ cm}$. Вставки на рисунках демонстрируют поведение магнитного поля на малых временах эволюции. Штриховые линии отображают эволюцию магнитного поля без учета МГД-турбулентности.

слабым взаимодействием, имеет решающее значение для объяснения наблюдательных данных для вспышек магнитаров. На рис. 1 отражена временная эволюция мелкомасштабной флуктуации магнитного поля в гибридной звезде на основе численного моделирования в рамках разработанной модели. Сравнивая поведение поля на рис. 1(a) и 1(b) с результатами наблюдений коротких⁹ и гигантских¹⁰ вспышек магнитаров, соответственно, видно хорошее согласие между предсказаниями разработанной теоретической модели и наблюдательными данными.

Наконец, в **разделе 3.8** была рассмотрена возможность усиления магнитного поля в компактной звезде, вызванного неустойчивостью поля за счет ненулевого члена ЧС, выведенного в разделах 2.1 и 2.2. Для этой цели было исследовано излучение нейтрино во время взрыва СН и взаимодействие этих нейтрино с вырожденной релятивистской плазмой электронов. Был найден явный вид параметра ЧС, который пропорционален нейтринной асимметрии Δn_ν . Известно, что сразу после взрыва СН излучаются, в основном, ν_e , что дает $\Delta n_\nu \neq 0$. Таким образом, магнит-

⁹Huppenkothen D., et al. Quasi-periodic oscillations and broadband variability in short magnetar bursts // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 768. — P. 87.

¹⁰Feroci M., et al. The giant flare of 1998 August 27 from SGR 1900+14. I. An interpretive study of BeppoSAX and Ulysses observations // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 549. — Pp. 1021–1038.

ное поле в данной системе оказалось неустойчивым (см. формулу (8)). Величина n_{ν_e} , а также концентрация электронов, от которой зависит электрическая проводимость плазмы, были оценены исходя из условия β -равновесия в плотном веществе протонейтронной звезды. На основе модифицированного уравнения Фарадея (7) было получено характерное время магнитной диффузии, которое оказалось много большим, чем время излучения нейтрино. Исходя из этого был сделан вывод, что данный механизм генерации магнитных полей может быть реализован для объяснения, например, сильных полей магнитаров.

В **разделе 3.9** приведены выводы по результатам третьей главы. Результаты третьей главы опубликованы в работах [16–24, 28, 30, 31].

В **заключении** сформулированы основные результаты представленные в диссертации. В **приложении А** изложен метод решения обыкновенных дифференциальных уравнений, возникающих при описании осцилляций нейтрино в веществе и магнитном поле. В **приложении Б** проанализированы приближения, сделанные при выводе эффективного гамильтониана в рамках подхода основанного на релятивистской квантовой механике. В **приложении В** вычислен элемент S -матрицы, соответствующий $(0\nu 2\beta)$ -распаду с учетом взаимодействия виртуального майорановского нейтрино с фоновым веществом. В **приложении Г** выведен пропагатор электрона, электрослабо взаимодействующего с нейтринным газом. В **приложении Д**, исходя из модифицированного уравнения Фарадея, выведена общая система уравнений эволюции для спектров плотности спиральности и плотности магнитной энергии. В **приложении Е** изучен вклад МГД-турбулентности в кинетические уравнения для спектров плотности спиральности и плотности магнитной энергии. В **приложении Ж** вычислены скорости изменения спиральности при столкновениях частиц в вырожденном кварковом веществе. В **приложении З** произведен расчет времени увлечения элемента вырожденного кваркового вещества силой Лоренца.

Список публикаций по теме диссертации

- [1] *Dvornikov M.* Evolution of coupled classical fields // *Phys. Lett. B.* — 2005. — Vol. 610. — Pp. 262–269.
- [2] *Dvornikov M.* Evolution of coupled fermions under the influence of an external axial-vector field // *Eur. Phys. J. C.* — 2006. — Vol. 47. — Pp. 437–444.
- [3] *Dvornikov M., Maalampi J.* Evolution of mixed Dirac particles interacting with an external magnetic field // *Phys. Lett. B.* — 2007. — Vol. 657. — Pp. 217–227.
- [4] *Dvornikov M.* Neutrino oscillations in matter and in twisting magnetic fields // *J. Phys. G.* — 2008. — Vol. 35. — P. 025003.
- [5] *Dvornikov M., Maalampi J.* Oscillations of Dirac and Majorana neutrinos in matter and a magnetic field // *Phys. Rev. D.* — 2009. — Vol. 79. — P. 113015.
- [6] *Дворников М. С.* Эволюция смешанных частиц, взаимодействующих с классическими источниками // *ЯФ.* — 2009. — Т. 72. — С. 122–134.
- [7] *Дворников М. С.* Описание спин-флейворных осцилляций дираковских нейтрино в рамках релятивистской квантовой механики // *ЯФ.* — 2012. — Т. 75. — С. 249–261.
- [8] *Dvornikov M.* Canonical quantization of a massive Weyl field // *Found. Phys.* — 2012. — Vol. 42. — Pp. 1469–1479.
- [9] *Dvornikov M.* Evolution of a dense neutrino gas in matter and electromagnetic field // *Nucl. Phys. B.* — 2012. — Vol. 855. — Pp. 760–773.
- [10] *Dvornikov M., Gitman D. M.* Canonical quantization, path integral representations, and pseudoclassical description of massive Weyl neutrinos in external backgrounds // *Phys. Rev. D.* — 2013. — Vol. 87. — P. 025027.
- [11] *Dvornikov M., Semikoz V. B.* Leptogenesis via hypermagnetic fields and baryon asymmetry // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* — 2012. — Vol. 02. — P. 040.

- [12] *Dvornikov M., Semikoz V. B.* Lepton asymmetry growth in the symmetric phase of an electroweak plasma with hypermagnetic fields versus its washing out by sphalerons // *Phys. Rev. D.* — 2013. — Vol. 87. — P. 025023.
- [13] *Dvornikov M., Semikoz V. B.* Instability of magnetic fields in electroweak plasma driven by neutrino asymmetries // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* — 2014. — Vol. 05. — P. 002.
- [14] *Dvornikov M.* Impossibility of the strong magnetic fields generation in an electron-positron plasma // *Phys. Rev. D.* — 2014. — Vol. 90. — P. 041702.
- [15] *Dvornikov M., Semikoz V. B.* Influence of the turbulent motion on the chiral magnetic effect in the early Universe // *Phys. Rev. D.* — 2017. — Vol. 95. — P. 043538.
- [16] *Dvornikov M., Semikoz V. B.* Magnetic field instability in a neutron star driven by the electroweak electron-nucleon interaction versus the chiral magnetic effect // *Phys. Rev. D.* — 2015. — Vol. 91. — P. 061301.
- [17] *Dvornikov M.* Galvano-rotational effect induced by electroweak interactions in pulsars // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* — 2015. — Vol. 05. — P. 037.
- [18] *Dvornikov M., Semikoz V. B.* Generation of the magnetic helicity in a neutron star driven by the electroweak electron-nucleon interaction // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* — 2015. — Vol. 05. — P. 032.
- [19] *Dvornikov M., Semikoz V. B.* Energy source for the magnetic field growth in magnetars driven by the electron-nucleon interaction // *Phys. Rev. D.* — 2015. — Vol. 92. — P. 083007.
- [20] *Дворников М. С.* Релаксация кирального химического потенциала в плотном веществе нейтронной звезды // *Изв. вузов. Физика* — 2016. — № 11. — С. 132–140.
- [21] *Дворников М. С.* Релаксация кирального дисбаланса и генерация магнитных полей в магнитарах // *ЖЭТФ.* — 2016. — Т. 150. — С. 1113–1126.

- [22] *Dvornikov M.* Role of particle masses in the magnetic field generation driven by the parity violating interaction // *Phys. Lett. B.* — 2016. — Vol. 760. — Pp. 406–410.
- [23] *Dvornikov M.* Generation of strong magnetic fields in dense quark matter driven by the electroweak interaction of quarks // *Nucl. Phys. B.* — 2016. — Vol. 913. — Pp. 79–92.
- [24] *Dvornikov M.* Magnetic fields in turbulent quark matter and magnetar bursts // *Int. J. Mod. Phys. D.* — 2017. — DOI: 10.1142/S021827181750184X.
- [25] *Dvornikov M.* Classical description of neutrino flavor oscillations // *Soryushiron Kenkyu.* — 2006. — Vol. 113. — Pp. F22–F25.
- [26] *Dvornikov M.* Evolution of coupled scalar and spinor particles in classical field theory // Proceedings of the IPM School and Conference on Lepton and Hadron Physics / Ed. by Y. Farzan. — 2007. — eConf C0605151. — hep-ph/0609139.
- [27] *Dvornikov M.* Neutrino flavor oscillations in background matter // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2008. — Vol. 110. — P. 082005.
- [28] *Dvornikov M.* Creation of large scale strong magnetic fields in matter with parity violation // *Nucl. Part. Phys. Proc.* — 2015. — Vol. 267–269. — Pp. 94–100.
- [29] *Dvornikov M.* Generation of cosmic magnetic fields in electroweak plasma // *Nucl. Part. Phys. Proc.* — 2016. — Vol. 273–275. — Pp. 2342–2344.
- [30] *Dvornikov M.* Relaxation of the chiral imbalance in dense matter of a neutron star // *Eur. Phys. J.: Web of Conf.* — 2016. — Vol. 125. — P. 03017.
- [31] *Dvornikov M.* Generation of strong magnetic fields in hybrid and quark stars driven by the electroweak interaction of quarks // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2017. — Vol. 798. — P. 012051.
- [32] *Dvornikov M.* Field theory description of neutrino oscillations // Neutrinos: Properties, Sources and Detection / Ed. by J. P. Greene. — New York: Nova Science Publishers, 2011. — Pp. 23–90.

Подписано в печать 28.12.2017 г.

Формат А5

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Тираж 85 Экз. Заказ № 132322-12-17

Типография ООО “МДМпринт”

(Печатный салон МДМ)

119146, г. Москва, Комсомольский пр-кт, д.28

Тел. 8-495-256-10-00

