

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Дворникова Максима Сергеевич «**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

Диссертационная работа Дворникова М.С. посвящена изучению роли сильных магнитных полей при взаимодействии нейтрино с веществом в различных объектах – от ранней Вселенной до особенностей вспышек сверхновых и свойств сильнозамагниченных нейтронных звезд. Известно, что астрофизические нейтрино могут играть определяющую роль в процессах вспышек сверхновых, образовании нейтронных звезд и их последующей тепловой и электромагнитной эволюции. Нейтрино остается одной из наиболее загадочных элементарных частиц, свойства которого выходят за рамки Стандартной Модели и активно изучаются в различных наземных и астрофизических экспериментах. Несмотря на огромный теоретический и экспериментальный прогресс, достигнутый в области нейтринной физики и астрономии в последние десятилетия, нерешенными остаются фундаментальные проблемы происхождения и иерархии масс нейтрино и его электромагнитных характеристик, не говоря уже о нерешенной проблеме самой природы нейтрино (дираковская или майорановская частица). Свойства нейтрино получают дополнительную значимость при изучении взаимодействия нейтрино с веществом. В частности, во всех случаях природных нейтрино – от космологических до тепловых и нетепловых нейтрино при коллапсах ядер звезд и вспышках сверхновых – оно взаимодействует с окружающей плазмой, часто в присутствии сильного (или даже сверхсильного, как в нейтронных звездах) магнитного поля. С другой стороны, сама природа космических магнитных полей остается актуальной проблемой современной астрофизики. Очевидно, что для объяснения наблюдений требуется наличие «затравочного» реликтового магнитного поля, которое генерируется на ранних стадиях эволюции Вселенной. Не решена проблема и образования сверхсильного магнитного поля в нейтронных звездах. Если нейтрино обладает предполагаемыми электромагнитными свойствами (электромагнитными моментами в расширениях Стандартной Модели), на этих этапах эволюции астрофизических объектов оно может или даже должно влиять на эволюцию магнитного поля. Очевидно, для решения этих вопросов требуется провести точный теоретический анализ взаимодействия нейтрино с замагниченным веществом, что и делается в диссертации М.С. Дворникова. Таким образом, тема диссертации является **фундаментальной и актуальной проблемой современной физики нейтрино, астрофизики высоких энергий и космологии.**

В представленной диссертации проведены **новые** аккуратные расчеты элементарных процессов с участием массивных нейтрино – флейворных и спин-флейворных осцилляций в вакууме и в веществе. Автором разработан **новый подход** к расчету

нейтринных осцилляций во внешних полях, основанных на релятивистской квантовой механике с использованием современных теоретико-полевых методов. В диссертации также разработаны **новые модели** генерации магнитных полей в космологических и астрофизических средах, основанные на киральных эффектах с учетом МГД-турбулентности. Эти модели **впервые применены** для решения ряда актуальных проблем генерации космологического магнитного поля, для объяснения генерации магнитного поля в кварковом веществе, возможно, присутствующем в ядрах нейтронных звезд, а также к анализу неустойчивого роста затравочного магнитного поля при вспышках сверхновых и в магнитарах.

Диссертация Дворникова М.С. состоит из введения, трех глав, заключения, восьми приложений и списка литературы из 264 наименований. Объем диссертации – 254 стр., включая 19 рисунков.

Во введении автор обосновывает актуальность темы диссертации, формулирует проблемы и методы их решения и представляет положения, выносимые на защиту.

В первой главе развит подход к описанию динамики флейворных осцилляций нейтрино, основанный на релятивистской квантовой механике и обсуждаются границы разработанного формализма. Развитый метод обобщен для рассмотрения флейворных осцилляций нейтрино в фоновом веществе и для анализа спин-флейворных осцилляций дираковских нейтрино во внешнем магнитном поле. Решена модельная задача об осцилляциях дираковских нейтрино в расширяющейся оболочке сверхновой с однородным магнитным полем. Показано наличие резонанса перехода левых электронных в правые мюонные нейтрино при магнитной энергии порядка  $10^{-13}$  эВ. Рассмотрена возможность осцилляций в стерильные нейтрино. Исследованы осцилляции (в т.ч. спин-флейворные) массивных майорановских нейтрино во внешнем магнитном поле. Результаты применены для анализа выхода нейтрино из модельной расширяющейся оболочки сверхновой. Методами квантовой теории поля изучены переходы нейтрино в антинейтрино.

Вторая глава диссертации посвящена изучению эволюции гипермагнитных и магнитных полей в ранней Вселенной на стадиях до и после электрослабого фазового перехода. С этой целью вычислен вклад нарушающего четность взаимодействия в тензор поляризации в газе из нейтрино и антинейтрино, лептонов и антилептонов. Вычислен вклад заряженных лептонов в антисимметричный формфактор фотонов (параметр Черн-Саймонса), соответствующий взаимодействию с фоновыми нейтрино. Вычисленный поляризационный оператор применен для описания эволюции магнитных полей в плазме ранней Вселенной из-за наличия нейтринной асимметрии и получена нижняя оценка на возможную нейтринную асимметрию для генерации магнитного поля в этом механизме.

Изучено влияние МГД-турбулентности на эволюцию магнитных полей в системе киральных частиц в рамках модельной трактовки МГД уравнений релятивистской плазмы в одножидкостном приближении. Получена и решена система уравнений, описывающая эволюцию спектров плотности магнитного поля и магнитной спиральности с учетом МГД-турбулентности и кирального магнитного эффекта. Исследована кинетика взаимодействия лептонов в присутствии гиперзарядовых полей. Изучены асимметрии левых и правых лептонов и хиггсовских бозонов с учетом и без учета гипермагнитного поля. Изучена зависимость параметра киральной аномалии от масштаба гипермагнитного поля.

В третьей главе рассматривается модель генерации магнитного поля в компактных астрофизических объектах за счет кирального магнитного эффекта и электрослабого взаимодействия между фермионами. Найдено точное решение уравнения Дирака для киральных заряженных частиц электрослабо взаимодействующих с фоновым веществом в присутствии внешнего магнитного поля и вычислен электрический ток вдоль магнитного поля, вызванный поляризационными киральными эффектами. Показано, что аномальный электрический ток вдоль внешнего поля зануляется для массивных заряженных фермионов. Высказана гипотеза, что эффект зануления электрического тока массивных фермионов связан с нарушением киральной симметрии. Рассмотрены киральные эффекты в кварковом веществе с ненарушенной киральной симметрий. Выведены и решены кинетические уравнения для спектра плотности магнитной энергии и магнитной спиральности с начальным Колмогоровским спектром магнитной энергии. Показано, что в этой модели возможно усиление крупномасштабного поля до величин  $10^{14}$ - $10^{15}$  Гс, возможно, наблюдаемых в некоторых нейтронных звездах (магнитарах). Обсуждается возможная МГД-турбулентность в кварковом веществе гибридных и странных кварковых звезд. Численно изучено влияние такой турбулентности на рост мелкомасштабного магнитного поля из-за кирального магнитного эффекта и электрослабого взаимодействия с фоновым веществом. В этой модели получен пик роста магнитного поля при достижении определенной напряженности. Эта модель применяется для объяснения наблюдаемых электромагнитных вспышек (в т.ч. гигантских вспышек) источников повторных мягких гамма-всплесков с похожей временной феноменологией. Кроме того, возможная нейтринная асимметрия при вспышке сверхновой сразу после взрыва может приводить к росту затравочного магнитного поля из-за киральных эффектов (ненулевой параметр Черна-Саймонса пропорционален нейтринной асимметрии).

В заключении сформулированы основные результаты диссертации. В приложениях А-З приведены технические детали аналитических и численных расчетов, использованных в диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Основные результаты диссертации Дворникова М.С. **опубликованы** в 32 печатных работах, из которых 24 - в рецензируемых отечественных и международных журналах, во всех из которых Дворников М.С. является единственным или первым автором, неоднократно докладывались лично автором на многочисленных международных и всероссийских конференциях и семинарах.

К диссертационной работе Дворникова М.С. следует сделать несколько **замечаний**.

1. При обсуждении применимости моделей, разработанных в диссертации, к конкретным астрофизическим источникам, следовало бы подробнее остановиться на их возможной экспериментальной верификации или опровержении. Это было бы помогло экспериментаторам при анализе и интерпретации данных наблюдений. В частности, в Главе 3, в разделе 3.7, при описании применения модели экспоненциального усиления затравочного мелкомасштабного магнитного поля в кварковой или гибридной звезде за счет КМЭ эффектов и МГД турбулентности, следовало бы обсудить вопрос о возможной повторяемости этих процессов – известно, что феноменология вспышек магнитаров показывает резкое увеличение вспышечной активности (слабых повторяющихся вспышек) в течение примерно месяца перед гигантской вспышкой. Кроме того, известны статистические зависимости временных и энергетических характеристик повторяющихся вспышек магнитаров. Из текста диссертации неясно, могут ли и если могут, то как часто, повторяться гигантские вспышки магнитаров в рамках предлагаемой модели. Такое обсуждение значительно увеличило бы возможность экспериментальной верификации предлагаемых моделей.

2. В тексте диссертации встречаются опечатки (стр. 5, 10, 18, 30, 31, 32, 35, 37, 38, 50, 56, 81, 93, 96, 112, 123, 179, 192).

Эти замечания, однако, не снижают в целом высокую научную и практическую ценность диссертационной работы Дворникова М.С., не влияют на положения, выносимые на защиту и могут быть учтены в дальнейшей работе.

Общее заключение. В диссертационной работе Дворникова М.С. получены **новые важные результаты** в области теоретической физики, космологии и астрофизики нейтрино. Впервые осцилляции нейтрино в веществе под действием внешнего магнитного поля описаны методами релятивистской квантовой механики, а осцилляции нейтрино и антинейтрино – с использованием квантовой теории поля. Изучено усиление магнитного поля в ранней Вселенной за счет нейтринной асимметрии и получены ограничения на нейтринную асимметрию. Учтено влияние асимметрий левых лептонов и хиггсовских бозонов и сфелеронных переходов на лептогенезис и бариогенезис под действием гипермагнитных полей в ранней Вселенной. Разработана новая модель генерации сильных магнитных полей в магнитарах, основанная на неустойчивости магнитного поля из-за нарушающих четность электрослабых взаимодействий в кварковом веществе. Модель применяется для объяснения вспышек магнитаров.

**Достоверность** результатов диссертации подтверждается применением строгих современных методов релятивистской квантовой механики и квантовой теории поля, физики элементарных частиц и магнитной гидродинамики, а также высокой степенью апробации публикаций в высокорейтинговых журналах и докладами диссертанта на крупных международных конференциях. По данным базы данных NASA ADS на статьи М.С. Дворникова имеется свыше 600 ссылок, h-индекс – 13, что свидетельствует о высокой публикационной активности и международном признании полученных результатов.

Результаты диссертации и разработанный теоретический аппарат могут быть **использованы** в теоретических исследованиях процессов с участием нейтрино в сильных магнитных полях, при интерпретации данных наблюдений нейтрино от космических источников, при анализе данных по тепловой эволюции нейтронных звезд и при постановке новых нейтринных экспериментов во многих отечественных и зарубежных научных центрах, университетах и обсерваториях, включая ИЯИ РАН, ОИЯИ, НИЦ Курчатовский институт, ИТЭФ, ФИАН, Физический факультет МГУ, CERN, МРА, ФТИ им. Иоффе РАН, ИКИ РАН, ГАИШ МГУ, и др. Диссертационная работа Дворникова М.С. **полностью отвечает** всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а сам автор, Дворников Максим Сергеевич, **безусловно заслуживает присуждения искомой степени доктора физико-математических наук** по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Зам. директора ГАИШ МГУ

доктор физ.-мат. наук, профессор

К.А. Постнов

10.04.2018

Подпись д.ф.-м.н. проф. Постнова К.А. заверяю.

Директор ГАИШ МГУ

академик РАН

А.М.Черепашук

Постнов Константин Александрович

119234 г. Москва, Университетский просп., д. 13, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга при МГУ им. М.В. Ломоносова, зам. директора. Тел. 8(495)9393721, pk@sai.msu.ru

## Постнов Константин Александрович

Доктор физ-мат наук, профессор

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

- 1) 1.Hubrig, S., Sidoli, L., Postnov, K., Schöller, M., Kholtygin, A., Järvinen, S., Steinbrunner, P. 2018. A search for the presence of magnetic fields in the two supergiant fast X-ray transients, IGR J08408-4503 and IGR J11215-5952. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 474, L27-L31.
- 2) Sanjurjo-Ferrin, G., Torrejon, J.M., Postnov, K., Oskinova, L., Rodes-Roca, J., Bernabeu, G. 2017. XMM-Newton spectroscopy of the accreting magnetar candidate 4U0114+65. *Astronomy and Astrophysics* 606, A145.
- 3) Sidoli, L., Israel, G.L., Esposito, P., Rodriguez Castillo, G.A., Postnov, K. 2017. AX J1910.7+0917: the slowest X-ray pulsar. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469, 3056-3061.
- 4) Postnov, K., Oskinova, L., Torrejon, J.M. 2017. A propelling neutron star in the enigmatic Be-star gamma Cassiopeia. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 465, L119-L123.
- 5) Postnov, K.A., Kuranov, A.G., Kolesnikov, D.A., Popov, S.B., Porayko, N.K. 2016. Rapidly rotating neutron star progenitors. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 1642-1650.
- 6) Postnov, K.A., Gornostaev, M.I., Klochkov, D., Laplace, E., Lukin, V.V., Shakura, N.I. 2015. On the dependence of the X-ray continuum variations with luminosity in accreting X-ray pulsars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452, 1601-1611.
- 7) Shakura, N., Postnov, K. 2015. On properties of Velikhov-Chandrasekhar MRI in ideal and non-ideal plasma. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 448, 3697-3706.
- 8) Postnov, K.A., Mironov, A.I., Lutovinov, A.A., Shakura, N.I., Kochetkova, A.Y., Tsygankov, S.S. 2015. Spin-up/spin-down of neutron star in Be-X-ray binary system GX 304-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 446, 1013-1019.
- 9) Porayko, N.K., Postnov, K.A. 2014. Constraints on ultralight scalar dark matter from pulsar timing. *Physical Review D* 90, 062008.
- 10) Postnov, K.A., Yungelson, L.R. 2014. The Evolution of Compact Binary Star Systems. *Living Reviews in Relativity* 17, 3-143.
- 11) Shakura, N., Postnov, K., Hjalmarsdotter, L. 2013. On the nature of 'off' states in slowly rotating low-luminosity X-ray pulsars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 428, 670-677.