

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Попова Артема Романовича  
«Осцилляции нейтрино в астрофизических магнитных полях и средах»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.3 – теоретическая физика**

Диссертация **А.Р. Попова** посвящена исследованию распространения и осцилляций нейтрино в экстремальных внешних условиях (в интенсивных внешних электромагнитных полях и в плотных средах). Результаты расчетов используются для выяснения влияния спиновых и флейворных осцилляций на потоки нейтрино, образующиеся при коллапсе сверхновых и распространяющихся в межзвездной астрофизической среде.

В настоящее время физика нейтрино является одной из наиболее динамично развивающихся областей современной физики. Последние десятилетия ознаменовались многими важными открытиями в области физики элементарных частиц и, в частности, в физике нейтрино. Экспериментально обнаружены осцилляции нейтрино, наличие масс и смешивания нейтрино уже не подвергается сомнению. Тем не менее, в современной нейтринной физике существует большое количество нерешенных проблем, требующих своего объяснения (природа нейтринного смешивания, иерархия масс нейтрино, природа массы нейтрино – дираковская или майорановская, возможные электромагнитные взаимодействия нейтрино).

Исследования в диссертации проводятся с учетом электромагнитных свойств нейтрино (диагональные и недиагональные магнитные моменты), а также с учетом наличия как дираковской, так и майорановской массы нейтрино. Исследуются весьма тонкие свойства, характеризующие осцилляции, в частности, CP-нарушение и декогеренция в нейтринных осцилляциях. Результаты, полученные в диссертации, могут быть применены для анализа

данных экспериментов, проводимых на современных нейтринных телескопах, обладающих высокой чувствительностью к астрофизическим нейтрино.

Все это говорит об **актуальности и важности** исследований, проведенных в диссертации **А.Р. Попова**.

Перейдем к содержанию диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста и заключения. Она содержит 119 страниц текста, 22 рисунка и обширный список литературы, включающий 201 наименование.

Во **Введении** сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, а также актуальность и практическая значимость проведенных исследований. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** носит вводный характер и посвящена описанию современного состояния физики нейтрино. Здесь обсуждается природа массы нейтрино, CP-нарушение в нейтринных осцилляциях, а также электромагнитные свойства нейтрино. Дается обзор астрофизических источников нейтрино. В последующих трех главах приведены оригинальные результаты автора.

В **главе 2** автор излагает разработанный в диссертации новый подход к описанию флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле. Центральное место в этом подходе занимает точное решение уравнения для дираковского массивного нейтрино с аномальным магнитным моментом в магнитном поле (формула (2.3) диссертации). Данное уравнение является обобщением уравнения Дирака, предложенным Паули (уравнение Дирака–Паули, 1941 г.). Полагаю, что было бы вполне уместно сослаться здесь на оригинальную работу Паули [*Pauli W. // Rev. Mod. Phys. – 1941. – Vol. 13. – P. 203*].

Спиновый оператор – интеграл движения, используемый при нахождении точного решения уравнения Дирака–Паули (формулы (2.11)–(2.13) диссертации), также хорошо известен. Это есть не что иное, как проекция *вектора магнитной поляризации* спина  $\boldsymbol{\mu}$  на направление магнитного поля. Вектор магнитной поляризации образован пространственными компонентами тензорного оператора спина  $\Pi^{\mu\nu}$ , введенного впервые Фрадкиным и Гудом (1961 г.) и

независимо Хильгевудом и Ваутхайзенем (1963 г.). Автор диссертации также мог бы сослаться на соответствующие оригинальные работы.

Нужно отметить, что привлечение для анализа осцилляций **точных решений** соответствующих уравнений – это несомненно правильное направление исследований. Тем не менее автор использует метод точных решений не в полной мере: используются только уровни энергии нейтрино в магнитном поле, но не используются сами волновые функции, т. е. спиновые коэффициенты, которые хорошо известны из литературных источников, цитируемых автором.

На основе развиваемого подхода **А.Р. Попов** далее получает выражения для вероятностей флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле для случаев двух и трех ароматов нейтрино. В диссертации показано, что в вероятностях флейворных осцилляций появляются слагаемые, зависящие от напряженности магнитного поля. При определённых значениях магнитных моментов нейтрино возникает эффект модуляции вакуумных осцилляций осцилляциями на магнитной частоте.

**Глава 3** диссертации посвящена рассмотрению эффектов, возникающих в осцилляциях нейтрино в магнитном поле при наличии отличных от нуля  $CP$ -нарушающих фаз. Полученные результаты применяются для анализа осцилляций нейтрино, рождающихся при взрыве сверхновой.

В диссертации показано, что в случае майорановских нейтрино вероятности переходов между нейтрино и антинейтрино, индуцированных взаимодействием с магнитным полем, зависят от величин как дираковской, так и майорановских  $CP$ -нарушающих фаз. В частности, при определённых значениях  $CP$ -нарушающих фаз и плотности вещества может возникать новый резонанс в переходах между электронными нейтрино и тау-антинейтрино. Показано, что условия возникновения данного резонанса действительно могут реализовываться на определённых этапах взрыва сверхновой.

В **главе 4** автор исследует декогеренцию в спиновых и флейворных осцилляциях нейтрино в магнитном поле. Расчеты ведутся в рамках известного

формализма волновых пакетов. В приближении однородного магнитного поля получены общие выражения для вероятностей осцилляций нейтрино с учётом экспоненциального подавления, возникающего в результате расхождения волновых пакетов.

В диссертации вычислены длины когерентности, характеризующие масштаб, на котором наблюдается потеря когерентности. Показано, что для осцилляций на магнитных частотах они пропорциональны кубу энергии нейтрино, в отличие от случая осцилляций на вакуумных частотах, где длины когерентности растут как квадрат энергии.

Полученные результаты **А.Р. Попов** далее использует при рассмотрении осцилляций нейтрино высоких энергий и нейтрино от сверхновых, распространяющихся в межзвёздном магнитном поле. Автор показывает, что осцилляции нейтрино высоких энергий на магнитных частотах в межзвёздном магнитном поле не затухают даже на космологических масштабах. Это – безусловно новый и очень интересный результат. Показано, что взаимодействие с магнитным полем может модифицировать флейворный состав нейтрино высоких энергий, наблюдаемый в наземных экспериментах.

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации, а также сформулированы следующие из них выводы.

Представленные в диссертации научные результаты являются **новыми, обоснованными и достоверными**. Основные результаты диссертационной работы своевременно и полно опубликованы в научной литературе. Всего по теме диссертации опубликовано 10 работ в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Scopus, WoS, RSCI. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и российских конференциях.

**Достоверность и обоснованность** положений и выводов, сформулированных в диссертации, обусловлена использованием фундаментальных методов квантовой теории поля и физики элементарных частиц, а также корректностью аналитических и численных расчетов. Результаты, полученные

автором данной диссертационной работы, в предельных случаях сводятся к известным в литературе результатам и не противоречат современным экспериментальным данным.

**Теоретическая и практическая значимость** проведенных автором диссертации исследований не вызывает сомнений. В диссертации получен ряд новых теоретических результатов, а также разработан новый метод расчета вероятностей для нейтринных осцилляций, основанный на точных решениях уравнения Дирака—Паули для нейтрино во внешнем магнитном поле.

Проведенное в диссертации моделирование эволюции потоков нейтрино от астрофизических источников может быть применено для анализа данных будущих нейтринных экспериментов, в частности, для поиска проявлений электромагнитных взаимодействий нейтрино.

Диссертационная работа в целом производит благоприятное впечатление. Диссертация хорошо оформлена, снабжена большим количеством наглядных рисунков.

Несмотря на отмеченные положительные стороны, в работе имеются некоторые **недостатки**:

1. В списке цитируемой литературы отсутствуют некоторые ссылки (детали обсуждались выше в тексте отзыва).
2. Уравнение (2.4) записано с ошибкой – неверный знак перед магнитным моментом. В результате получилось, что магнитный момент нейтрино направлен против его спина, а в действительности магнитный момент направлен *по спину нейтрино*. К сожалению, эта ошибка распространяется и на другие последующие формулы в диссертации, например, на формулу (2.10) – уровни энергии в магнитном поле.
3. Автор пишет, что в формуле (2.10) «индекс  $s = \pm 1$  нумерует стационарные состояния массивного нейтрино в магнитном поле». В действительности  $s = \pm 1$  есть спиновое квантовое число, характеризующее *проекцию спина на направление магнитного поля*.

4. Метод точных решений автор использует не в полной мере: используются только уровни энергии нейтрино в магнитном поле, но не используются спиновые коэффициенты (детали обсуждались выше).
5. В формуле (2.12) указывается, что интегралом движения в условиях данной задачи является проекция оператора  $\mathbf{S}$  на направление магнитного поля, где  $\mathbf{S}$  есть пространственная часть 4-мерного векторного оператора спина  $T^\mu$ . В действительности это не интеграл движения. При наличии аномального магнитного момента (у дираковского нейтрино) единственный интеграл движения – это проекция *вектора магнитной поляризации* спина  $\boldsymbol{\mu}$  (формула (2.11)) на направление магнитного поля. Именно этот оператор и использует автор в дальнейшем в своих расчетах.
6. По поводу формулы (2.25) автор пишет: «данные проекционные операторы образуют полную ортонормированную систему». В действительности, по-видимому, речь идет о полной ортонормированной системе векторов  $|v_i\rangle$ .
7. Ряд библиографических ссылок содержит неполные сведения, например, [25,63,64,99,130,163,180,191,198].

Подчеркнем, что высказанные замечания не являются критическими и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

В целом, можно сказать, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершенное научное исследование, имеющее важное значение для физики элементарных частиц. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Таким образом, диссертационная работа «Осцилляции нейтрино в астрофизических магнитных полях и средах» является научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание

ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Попов Артем Романович** заслуживает присуждения ему **ученой степени кандидата физико-математических наук** по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Дата: 29 мая 2024 года

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры теоретической физики  
ФГАОУ ВО «Московского  
физико-технического института  
(национального исследовательского  
университета)» (МФТИ)

**Тернов Алексей Игоревич**

Контактные данные:

тел.: 7(495)408-75-90, e-mail: ternov.ai@mipt.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.02 – «теоретическая физика»

Адрес места работы:

141701, Московская область, г. Долгопрудный,  
Институтский переулок, д. 9.  
ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)» (МФТИ),  
кафедра теоретической физики  
Тел.: 7(495)408-75-90; e-mail: theorphys@phystech.edu

Подпись профессора кафедры  
теоретической физики ФГАОУ ВО «МФТИ»  
А.И. Тернова удостоверяю:

Ученый секретарь МФТИ,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, **Евсеев Е. Г.**

**Список основных публикаций** по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Grigoriev A., Studenikin A., Ternov A. Neutrino spin operator and dispersion in moving matter // *Eur. Phys. J. C.* – 2022. – Vol. 82. – P. 287.
2. Grigoriev A., Kupcheva E., Ternov A. Neutrino spin oscillations in polarized matter // *Phys. Lett. B.* — 2019. — Vol. 797. — P. 134861
3. Grigoriev A., Lokhov A., Studenikin A., Ternov A. Neutrino spin light efficiency in Gamma-Ray Bursts // *PoS.* — 2019. — Vol. 340. — P. 928.
4. Grigoriev A., Lokhov A., Studenikin A., Ternov A. Spin light of neutrino in neutron star matter // *J. Phys. Conf. Ser.*, — 2020. — Vol. 1342. — P. 012119.
5. Grigoriev A., Ternov A., Trunina E. Matter polarization effect on neutrino spin oscillations // *PoS.*, — 2022. — Vol. 414. — P. 1153.