

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **20.06.2024** г. № **14/7**

О присуждении **Попову Артему Романовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «**Осцилляции нейтрино в астрофизических магнитных полях и средах**» по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика, принята к защите 28 марта 2024 года, протокол № 12/5 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Попов Артем Романович 1995 года рождения. В 2019 году соискатель окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова". В 2019 году поступил в аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова" по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» по специальности 1.3.3 – теоретическая физика. В настоящее время работает в должности научного сотрудника кафедры теоретической физики Физического факультета МГУ.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова" на Физическом факультете.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Студеникин Александр Иванович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова", физический факультет, кафедра теоретической физики, профессор.

Официальные оппоненты:

Дворников Максим Сергеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, заведующий теоретическим отделом, ведущий научный сотрудник,

Тернов Алексей Игоревич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), кафедра теоретической физики, профессор,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна

- в своем положительном заключении, подписанном старшим научным сотрудником, начальником сектора «Нейтринная физика» лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, кандидатом физико-математических наук Наумовым Вадимом Александровичем, указала, что работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого 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.

Соискатель имеет 10 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при решающем участии соискателя, либо им самостоятельно.

Список основных работ, по результатам диссертационного исследования:

1. A.Popov, A.Studenikin. Neutrino eigenstates and flavour, spin and spin-flavour oscillations in a constant magnetic field // The European Physical Journal C. – 2019. – Vol.79 – 144.
2. A.Popov, A.Studenikin. Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos // Physical Review D. – 2021. – Vol.103 – 115027.
3. Попов А.Р., Студеникин А.И. Декогеренция осцилляций нейтрино в магнитном поле вследствие расхождения волновых пакетов // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2024. – Том 2 – 2420101.
4. A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Interplay of neutrino spin and three-flavour oscillations in a magnetic field // Proceeding of science. - 2022. – Vol. 398 – 197.
5. A.Popov, A.Studenikin. Effects of nonzero Majorana CP phases on oscillations of supernova neutrinos // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. – Vol. 2156 – 012226.
6. A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Neutrino oscillations in a magnetic field: the three-flavor case // Proceeding of science. - 2021. – Vol. 390 – 208.
7. A.Popov, A.Lichkunov, A.Studenikin. Neutrino eigenstates and oscillations in a magnetic field // Proceeding of science. - 2021. – Vol. 364 – 415.
8. A.Popov, A.Studenikin. Oscillations and exact states of neutrinos in a magnetic field // Proceeding of science. - 2019. – Vol. 340 – 926.
9. A.Popov, P.Pustoshny, A.Studenikin. Neutrino motion and spin oscillations in magnetic field and matter currents // Proceeding of science. - 2018. – Vol. 314 – 643.

10. A.Popov, P.Pustoshny, A.Studenikin. Neutrino spin precession and oscillations in transversal matter currents // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. – Vol. 1342 – 012126.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация обладает внутренним единством, содержит важные физические и методические результаты, имеющие большое научное значение и практическую ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г.

Отмечены следующие критические замечания и пожелания:

- В главе 3, при изучении осцилляций нейтрино от сверхновой, рассмотрен случай майорановских нейтрино. Не совсем ясно, как учитывался переходный магнитный момент нейтрино при расчете соответствующих вероятностей. По всей видимости, использовался стандартный квантовомеханический подход. Таким образом, данный раздел стоит особняком по отношению к остальной части диссертации, где использовалась релятивистская квантовая механика. Кроме того, в диссертации не упомянуты предыдущие работы (например, Dvornikov & Maalampi, Phys.Rev.D 79, 113015 (2009)), в которых использовался теоретико-полевой подход для описания спин-флейворных осцилляций майорановских нейтрино.
- В главе 4 рассмотрены спин-флейворные осцилляции нейтрино в галактическом магнитном поле. При этом предполагается, что магнитное поле имеет регулярную структуру. Однако, на практике космические магнитные поля являются стохастическими. Картина осцилляций нейтрино в таких полях может коренным образом отличаться от осцилляций частиц в когерентном внешнем поле.
- Одним из применений результатов главы 4 является рассмотрение спин-флейворных осцилляций нейтрино в нашей галактике. В качестве источника

нейтрино предложена сверхмассивная черная дыра в центре галактики. Однако, сама по себе черная дыра не испускает нейтрино. Видимо, имеются в виду нейтрино, возникающие при аккреции вещества на черную дыру. Тем не менее, центр нашей галактики не является активным. Поэтому поток нейтрино будет чрезвычайно малым. Не ясно насколько приведенные оценки по эффектам изменения спиральности нейтрино соотносятся с возможностью их экспериментального обнаружения.

- 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.
- 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.
- Метод точных решений автор использует не в полной мере: используются только уровни энергии нейтрино в магнитном поле, но не используются спиновые коэффициенты.
- 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^μ . 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.
- 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 $|v_i\rangle$.

- Очевидно в условии адиабатичности (стр. 66, ф-ла (3.46)) перепутан знак неравенства: вместо \gg стоит \ll . В самом деле, параметр адиабатичности (левая часть неравенства) становится бесконечным при постоянной плотности.
- На стр. 86, перед ф-лой (4.21) пишется «Поскольку время распространения нейтрино от источника к детектору t не является измеримой величиной, выполним интегрирование по нему, чтобы получить окончательное выражение для вероятностей осцилляций нейтрино...». Но интеграл от безразмерной функции (4.19) – величина размерности времени, т.е. не вероятность. Для получения вероятности требуется усреднить (4.19) по t , а не просто проинтегрировать и результат будет, вообще говоря, зависеть от интервала усреднения, например, от времени экспозиции детектора. Поэтому происхождение формулы (4.21) требует пояснений.
- При оформлении диссертации допущен ряд небрежностей. Например, в ссылках [25,63,64,191] приведены не полные выходные данные.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, но не лишена небольшого количества опечаток, грамматических и стилистических ошибок. Соискатель Попов А.Р. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и согласился с замечаниями.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1) С использованием развитого нового подхода к описанию нейтрино в магнитном поле показано, что в общем случае вероятности флейворных осцилляций нейтрино в магнитном поле являются комбинацией осцилляций на вакуумных и магнитных частотах. В частности, показано, что спиновые осцилляции могут модифицировать флейворный состав потоков нейтрино, наблюдаемый экспериментально.

2) Впервые вычислены вероятности осцилляций майорановских нейтрино в магнитном поле и веществе с учётом возможности наличия ненулевых майорановских CP-нарушающих фаз и показано, что могут возникать новые резонансы в осцилляциях нейтрино при условиях, которые характерны для взрывов сверхновых звёзд.

3) Впервые вычислены длины когерентности для случая осцилляций нейтрино в магнитном поле. Рассмотрены осцилляции нейтрино в галактическом магнитном поле. Получен диапазон возможных флейворных составов потоков нейтрино высоких энергий от точечного источника, наблюдаемых наземными нейтринными телескопами, с учётом возможных эффектов взаимодействия нейтрино с космическим магнитным полем.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1) Разработан новый подход для описания флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле и веществе, основанный на использовании спинового оператора, который является интегралом движения для нейтрино в магнитном поле.

2) Рассмотрены осцилляции дираковских и майорановских нейтрино в веществе и магнитном поле с учётом наличия ненулевых CP-нарушающих фаз как дираковского, так и майорановского типа. Показано, что взаимодействие нейтрино с магнитным полем может приводить к наблюдаемому в экспериментах изменению состава потока нейтрино от сверхновой.

3) Разработан подход к описанию осцилляций нейтрино в магнитном поле с использованием волновых пакетов. Впервые исследована когерентность флейворных и спиновых осцилляций нейтрино в магнитном поле.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что рассмотренные в диссертации эффекты важны для моделирования потоков нейтрино от сверхновых. Полученные в диссертации результаты важны и могут быть использованы, в том числе, для анализа данных от нейтринных телескопов JUNO, Hyper-Kamiokande, IceCube, Baikal-GVD с целью изучения электромагнитных характеристик нейтрино.

Оценка достоверности результатов выявила, что результаты диссертации получены с использованием апробированных методов теоретической физики. Полученные соискателем выражения в частных случаях сводятся к достоверным и хорошо известным в литературе результатам. Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на международных и российских конференциях. Таким образом, результаты диссертации обоснованы и достоверны.

Личный вклад соискателя состоит в получении выносимых на защиту результатов. Вклад соискателя во всех опубликованных работах был определяющим.

На заседании 20 июня 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Попову Артему Романовичу ученую степень кандидата физико-математических наук за вклад в разработку теоретического описания осцилляций нейтрино в сильных магнитных полях и плотных средах.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **22** человек, из них **6** докторов наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – **18**, против – **2**, недействительных бюллетеней – **2**.

Председатель

диссертационного совета 24.1.163.01

доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

_____ Кравчук Л.В.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01

кандидат физ.-мат. наук

_____ Демидов С.В.

20.06.2024 г.

М.П.