

ОТЗЫВ

официального оппонента Дворникова Максима Сергеевича
на диссертационную работу 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.

В диссертации А.Р. Попова развивается теория взаимодействий и осцилляций нейтрино в сильных электромагнитных полях и плотных средах. В работе рассмотрены возможные проявления ряда свойств нейтрино, таких как магнитные моменты, CP-нарушение и майорановская масса, в астрофизике. О значимости и актуальности проведённых исследований говорит большое количество экспериментов по детектированию нейтрино астрофизического происхождения, а также значительное количество теоретических работ по данной тематике.

Диссертация А.Р. Попова состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Полный объем текста диссертации составляет 119 страниц. Список литературы содержит 201 наименование.

Во **Введении** сформулированы цели и задачи работы. Описаны использованные в диссертации методы исследования. Сформулированы выносимые на защиту положения. Обоснована научная новизна полученных в работе результатов.

В **первой главе** кратко обсуждаются отдельные вопросы физики нейтрино, которым посвящена диссертация. Рассмотрены дираковское и майорановское массовые слагаемые нейтрино. Дано введение в теорию электромагнитных взаимодействий нейтрино. Рассмотрены основные источники нейтрино в астрофизике.

Во **второй главе** диссертации рассмотрена задача осцилляций нейтрино в магнитном поле. Разработан подход к описанию осцилляций нейтрино во внешнем магнитном поле с применением спинового оператора, являющегося интегралом движения. Рассмотрены спиновые и флейворные осцилляции дираковских нейтрино в магнитном поле. Вычислены вероятности флейворных и спиновых осцилляций нейтрино. Показано, что в случае осцилляций нейтрино в магнитном поле возникают гармоники как на вакуумных, так и на магнитных частотах.

В **третьей главе** автор рассматривает CP-нарушающие эффекты в осцилляциях нейтрино в магнитном поле и веществе для случая как дираковских, так и майорановских нейтрино. Рассмотрена возможность возникновения резонансного усиления осцилляций нейтрино при различных значениях CP-нарушающих фаз. Показано, что в случае майорановских нейтрино при определённых значениях майорановских CP-нарушающих фаз возникает резонансное усиление переходов между электронными нейтрино и тау антинейтрино. Данный резонанс возникает при доле электронов равной примерно $1/2$ и может повлиять на флейворный состав потока нейтрино от сверхновой.

В **четвёртой главе** диссертации рассмотрены флейворные осцилляции астрофизических нейтрино высоких энергий в галактическом магнитном поле. При рассмотрении распространения нейтрино на галактических масштабах становится значимым эффект потери когерентности за счёт расхождения волновых пакетов. В диссертации было получено решение уравнения эволюции волнового пакета нейтрино в магнитном поле.

Вычислены вероятности флейворных осцилляций нейтрино в однородном магнитном поле с учётом экспоненциального затухания на больших расстояниях. Получены выражения для длин когерентности осцилляций на вакуумных и на магнитных частотах. Обнаружено, что для осцилляций на магнитных частотах они пропорциональны третьей степени энергии нейтрино. Получены возможные флейворные составы нейтрино высоких энергий после распространения от центра Галактики до наземного детектора. Показано, что для достаточно больших величин магнитных моментов нейтрино флейворный состав может значительно отличаться от предсказанного в модели осцилляций нейтрино в вакууме.

В Заключении кратко изложены полученные в диссертационной работе результаты.

Изложенные в диссертации результаты безусловно обладают **научной новизной**. Были впервые получены аналитические выражения для вероятностей флейворных и спиновых осцилляций нейтрино для случая трёх флейворов. Впервые рассмотрены осцилляции майорановских нейтрино в веществе и магнитном поле с учётом майорановских CP-нарушающих фаз. Показано, что при определённых значениях этих фаз может возникать новый резонанс в осцилляциях. Впервые рассмотрена декогеренция в осцилляциях нейтрино в магнитном поле, возникающая за счёт конечной ширины волновых пакетов нейтрино. Показано, что длины когерентности осцилляций на магнитных частотах зависят от куба энергии нейтрино. Рассчитаны возможные флейворные составы нейтрино высоких энергий после распространения от центра Галактики до наземного детектора.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии.

Апробация результатов работы и публикации. Основные результаты диссертации отражены в 10 научных публикациях, которые изданы в журналах рекомендованных ВАК. Результаты диссертации докладывались на международных и российских конференциях.

Однако, диссертация не лишена **недостатков** среди которых необходимо отметить следующие:

1. В главе 3, при изучении осцилляций нейтрино от сверхновой, рассмотрен случай майорановских нейтрино. Не совсем явно, 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. Это является **недостатками** диссертации.
2. 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. Этот факт не был учтен в диссертации, что является ее **недостатком**.
3. 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 ввиду 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. Это является **недостатком** работы.

4. При оформлении диссертации допущен ряд небрежностей. Например, в ссылках [25,63,64,191] приведены не полные выходные данные. Данный факт является **недостатком** диссертации.

Несмотря на имеющиеся замечания, данная работа заслуживает высокой оценки.

Заключение. Диссертация А.Р. Попова является законченным научным исследованием. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация А.Р. Попова на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук** по специальности 1.3.3 - теоретическая физика.

Дата: 16 мая 2024 года

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник,
заведующий теоретическим отделом
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

_____ М.С. Дворников

maxdvo@izmiran.ru, 8 (495) 851-09-12

108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4 , ИЗМИРАН

Подпись М.С.Дворникова удостоверяю

Ученый секретарь ИЗМИРАН
кандидат физ.-мат. наук

Рез А.И.

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

1. Дворников М.С. Neutrino spin oscillations in a magnetized Polish doughnut // JCAP, 2023. – № 09. – 039.
2. Дворников М.С. Neutrino Spin and Flavor Oscillations in Gravitational Fields // Phys.Part.Nucl.Lett., 2023. – № 77. – 439-441.
3. Дворников М.С. Neutrino Oscillations in Gravitational Fields and Astrophysical Applications // Moscow Univ.Phys.Bull., 2023. – № 20. – 461-465.
4. Дворников М.С. Gravitational scattering of spinning neutrinos by a rotating black hole with a slim magnetized accretion disk // Class.Quant.Grav., 2023. – № 40. – 015002.
5. Дворников М.С. Interaction of supernova neutrinos with stochastic gravitational waves // Phys.Rev.D, 2021. – № 104. – 043018.
6. Дворников М.С. Impact of hypermagnetic fields on relic gravitational waves, neutrino oscillations and baryon asymmetry // Int.J.Mod.Phys.D, 2023. – № 32. – 2250141.
7. Дворников М.С. Neutrino scattering off a black hole surrounded by a magnetized accretion disk // JCAP, 2021. – № 04. – 005.
8. Дворников М.С. Flavor ratios of astrophysical neutrinos interacting with stochastic gravitational waves having arbitrary spectra // JCAP, 2020. – № 12. – 022.
9. Дворников М.С. Spin oscillations of neutrinos scattered off a rotating black hole // Eur.Phys.J.C, 2020. – № 80. – 474.
10. Дворников М.С. Spin effects in neutrino gravitational scattering // Eur.Phys.J.C, 2020. – № 5. – 056018.