

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук Чухновой Александры**  
**Владимировны**  
**на тему: «Квантовополевое описание влияния вещества и**  
**электромагнитного поля на распространение нейтрино»**  
**по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика»**

Диссертация А.В.Чухновой посвящена активно развивающейся теме нейтринных осцилляций и взаимодействию нейтрино со средой.

Главным элементом является развитие и применение квантовополевого подхода к проблеме, который, в отличие от квантовомеханического феноменологического подхода, является непротиворечивым и позволяет описать и ранее неизвестные эффекты. Такой подход был предложен в работах А.Е. Лобанова, который является научным руководителем диссертанта, и развит в их совместных публикациях. Он характеризуется последовательностью и строгостью вывода всех основных формул. Следует отметить существование в литературе различных вариантов квантовополевого описания нейтринных осцилляций, которые пока что не находятся в соответствии друг с другом, но все воспроизводят квантовомеханические формулы для нейтринных осцилляций в ультрарелятивистском пределе. Критическим моментом было бы наблюдение эффектов, где проявляется отличие квантоволевых подходов от феноменологического, однако при существующем уровне точности эксперимента этого пока достичь не удаётся. Тем не менее, развитие формализма и его применение для описания поведения нейтрино является важной частью и исследований по выяснению природы нейтрино, которые сейчас ведутся повсеместно как в экспериментальной, так и в теоретической области.

Диссертация состоит из 5 глав основного содержания. Основы используемой квантовополевой модели даны в **главе 1**. Принципиальным является использование мультиплетов, в котором объединены фермионы с одинаковыми электрослабыми квантовыми числами, что открывает возможность построения состояний, описываемых суперпозицией волновых функций состояний с различными массами. Это позволяет построить пространство Фока для нейтрино определенного флейвора, и далее для описания нейтрино использовать стандартный формализм квантовой теории поля. В рамках этого подхода для такого 12-плета нейтрино выводится эффективное уравнение, определяющее волновую функцию нейтрино, взаимодействующего со средой. Далее это волновое уравнение обобщается на случай взаимодействия с веществом и электромагнитным полем. Главным результатом данной главы является получение квазиклассического уравнения эволюции нейтрино, позволяющее описать как флейворные осцилляции, так и поворот спина нейтрино в веществе и электромагнитном поле.

**В главе 2** в модели двух флейворов получены вероятности спин-флейворных переходов для нейтрино, взаимодействующего только со средой. Показано, что в произвольном случае осцилляции и поворот спина нейтрино не могут рассматриваться независимо, ибо существуют корреляции между ними. Найдено выражение для угла между скоростью нейтрино и скоростью среды, при котором поворот спина будет наиболее существенным. Получено ограничение на значение амплитуды поворота спина для сред, движущихся медленнее нейтрино. Обнаружены корреляции между поворотом спина и осцилляциями нейтрино в плотной среде в модели двух флейворов. Выявлена зависимость вероятностей спин-флейворных переходов от начального флейвора нейтрино.

**Глава 3** посвящена распространению нейтрино в электромагнитном поле в модели двух флейворов. Учитываются диагональные и переходные магнитные моменты. Изучено поведение вероятности поворота спина

нейтрино в магнитном поле. Показано, что для нейтрино ультрарелятивистских энергий полная амплитуда отличается от единицы только когда скорость нейтрино направлена вдоль магнитного поля или в противоположном направлении. Исследовано распространение нейтрино в однородном электромагнитном поле в приближении двух флейворов с учетом переходных магнитных моментов. Выявлена зависимость вероятностей спин-флейворных переходов в электромагнитном поле от начального флейвора нейтрино. Обнаружено, при некоторых значениях внешнего поля в начальный момент времени возможно резонансное изменение вероятности флейворных переходов нейтрино.

**В главе 4** исследуется распространение нейтрино в медленно меняющемся электромагнитном поле. Рассмотрено распространение нейтрино в переменном электромагнитном поле в адиабатическом приближении. Показано, что поведение вероятностей спин-флейворных переходов для нейтрино в этом случае при учете переходных магнитных моментов может носить резонансный характер, причем наличие и выраженность резонанса зависят от начальной поляризации нейтрино. И хотя переходные магнитные моменты на несколько порядков меньше диагональных, их учет принципиально важен при исследовании случая распространения нейтрино для полей, превышающих резонансное значение или близких к ним. Обнаружено, что наличие резонанса зависит от поляризации нейтрино, причём существенным является значение угла между направлением спина и магнитного поля. Максимально ярко резонанс выражен при направлении спина по полю, вообще отсутствует при направлении спина нейтрино против поля, а при распространении перпендикулярно полю ослаблен в два раза по сравнению с резонансным случаем. Получены приближенные аналитические решения уравнения эволюции и соответствующие вероятности переходов. При этом впервые рассмотрен случай переменного поля в модели трех флейворов. Отдельно

рассматривается случай поля диполя, для которого получены точные решения.

**В главе 5** рассматривается взаимодействие нейтрино одновременно с веществом и электромагнитным полем. В случае, когда нейтрино взаимодействует со средой только через нейтральные токи, а с электромагнитным полем только за счет диагональных магнитных моментов, получено точное решение задачи как для модели двух, так и для модели трех флейворов. Показано, что в модели двух флейворов в вероятностях спин-флейворных переходов появляется слагаемое, нарушающее  $T$ -инвариантность. Этот результат является принципиально новым и оказывается возможным вследствие наличия корреляций между осцилляциями нейтрино и поворотом спина. Исследование модели трех флейворов для тех же внешних условий дает тот же результат: нарушающие  $T$ -инвариантность слагаемые в вероятностях определяются вещественной частью четверного произведения элементов матрицы смешивания и влиянием внешних условий. В этом состоит отличие от хорошо известных  $T$ -нечётных эффектов связанных с мнимой частью матрицы смешивания. Тем самым обнаружено, что вероятности спин-флейворных переходов нейтрино в среде из частиц и антинейтрино в среде из античастиц при наличии того же электромагнитного поля отличаются знаком  $T$ -нарушающего вклада даже в случае вещественной матрицы смешивания и являются следствием влияния внешних условий. Показано, что в присутствии электромагнитного поля поведение левого нейтрино в среде из частиц и правого антинейтрино в среде из античастиц различно.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации. Они являются достоверными и своевременно опубликованы в ведущих журналах. Автореферат правильно, хотя излишне коротко, отражает содержание диссертации.

В целом диссертация А.В.Чухновой представляет собой законченное исследование, в ней последовательно рассмотрены эффекты взаимодействия нейтрино с внешней средой, которые могли бы иметь экспериментальное подтверждение. К сожалению, эти эффекты численно очень малы вследствие малости массы и магнитных моментов нейтрино и пока что не доступны проверке. Это относится и к эффектам нарушения Т-инвариантности во взаимодействии со средой. В этом состоит слабое место диссертации, она несколько оторвана от современного эксперимента. В частности непонятно, как можно соотнести предложенный квантовополевой подход с подходами других авторов, какие могли бы быть ключевые эксперименты по проверке полученных формул. Впрочем, в защиту диссертации можно сказать, что те же замечания относятся и к конкурирующим подходам. Хотелось бы также отметить то, что некоторые утверждения автора носят излишне категоричный характер. Так во Введении утверждение, что «доказано, что нейтрино и антинейтрино не являются тождественными частицами» не верно в общем контексте, так как все имеющиеся эксперименты равно описываются в теории с майорановскими нейтрино, для которых нейтрино и антинейтрино тождественны. Или что «осцилляции нейтрино не описываются Стандартной моделью электрослабых взаимодействий даже в ее минимально расширенном варианте, включающем правый синглет массивных нейтрино. Такой процесс невозможно описать с помощью фейнмановских диаграмм, соответствующих взаимодействиям Стандартной модели.» Это может быть справедливо в контексте данного квантовополевого подхода, но, вообще говоря, не так.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3. – «теоретическая физика» (по физико-математическим

наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель **Чухнова Александра Владимировна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор

Казаков Дмитрий Игоревич

31.03.2023

Контактные данные:

тел.: 7(916)1151387, e-mail: kazakovd@theor.jinr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 01.04.02 – Теоретическая и математическая физика

Адрес места работы:

141980, г.Дубна, ул.Жолио-Кюри, д. 6,

Объединённый институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики

Тел.: 849621 62295; e-mail: bltp@theor.jinr.ru

Подпись сотрудника ЛТФ ОИЯИ Казакова Д.И удостоверяю:

Учёный секретарь ЛТФ ОИЯИ

А.В. Андреев