

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертационную работу Станкевича Константина Леонидовича на**  
**тему: «Осцилляции и квантовая декогеренция нейтрино»,**  
**представленную на соискание ученой степени кандидата физико-**  
**математических наук**  
**по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика»**

Диссертационная работа посвящена развитию теории осцилляций нейтрино с учетом квантовой декогеренции, связанной с распадом нейтрино.

Диссертация Станкевича К. Л. состоит из Введения, трех глав, Заключения, Списка литературы и двух приложений. Число страниц в диссертации - 74.

Во **Введении** кратко обсуждаются объект, предмет и актуальность исследования. Также приводятся ссылки на основополагающие работы в этой области исследований. Формулируются цели и задачи диссертационной работы, а также полученные результаты и положения, выносимые на защиту. Обсуждаются научная новизна (четыре пункта) и апробация работы (выступления на 16 международных и российских конференциях).

В **Первой главе** обсуждаются: лагранжиан взаимодействия нейтрино, электромагнитные свойства нейтрино, смешивание нейтрино, осцилляции нейтрино в вакууме и в веществе с постоянной плотностью, спин-флэйворные осцилляции нейтрино в магнитном поле, коллективные осцилляции нейтрино.

Обсуждается уравнение Линдблада для эволюции квантового состояния, взаимодействующего со внешней средой. Наконец, формулируется постановка задачи настоящей диссертации.

Во **Второй главе** представлены результаты в рамках защищаемого автором подхода к описанию квантовой декогеренции нейтринного состояния в

присутствии среды, содержащей фотоны, темные фотоны или аксионы в гипотезе ненулевого взаимодействия нейтрино с соответствующими полями. Приведены результаты расчета квантовой декогеренции за счет радиационного распада в электронной среде. Сделаны оценки параметров исследуемого эффекта в условиях взрыва сверхновой. Рассмотрена квантовая декогеренция в распаде нейтрино с рождением темного фотона.

**В Третьей главе** рассмотрено явление декогеренции в нелинейном случае, когда плотности нейтрино столь велики, что становится доминирующим процесс рассеяния нейтрино на нейтрино. Обнаружено подавление биполярных коллективных осцилляций. Приведены результаты численных расчетов. Обсуждаются флэйворные и спин-флэйворные осцилляции нейтрино за счет взаимодействия нейтрино с внешним электрическим полем, предполагая ненулевые значения зарядового радиуса и анапольного момента нейтрино. Обнаружен новый резонанс в спиновых осцилляциях. Предложен метод определения анапольного момента и зарядового радиуса нейтрино.

**В Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, сформулированные в виде положений, выносимых на защиту.

**Актуальность** исследования связана с тенденцией последних лет учитывать возможную потерю когерентности квантового состояния нейтрино в анализе экспериментальных данных. Главным аргументом в пользу подобных рассмотрений являются внутренние противоречия плосковолновой теории осцилляций нейтрино, устраняемые в модели с волновым пакетом нейтрино. Формализм матрицы плотности является, в принципе, более общим подходом, что определяет актуальности темы диссертации.

**Достоверность**

В рамках сделанных явно и неявно допущений, формальные результаты автора представляются достоверными.

### **Новизна**

1. Впервые уравнение Линдблада было применено для описания распространения нейтрино в среде с учетом распада.
2. Впервые получены аналитические оценки параметров декогеренции.
3. Впервые получены условия биполярных коллективных осцилляций во взрывах сверхновых с учетом квантовой декогеренции.
4. Впервые рассмотрены флэйворные и спин-флэйворные осцилляции нейтрино с учетом взаимодействия нейтрино с внешней средой в гипотезе ненулевых значений зарядового радиуса и анапольного момента нейтрино.

### **Общее впечатление**

Тема диссертации интересная, актуальная. Доклад автора у нас в Институте вызвал оживленное обсуждение, а сам автор произвел самое благоприятное впечатление. Работа написана хорошим, ясным языком с приемлемым количеством орфографических ошибок и опечаток. В результате прочтения текста диссертации у меня возник ряд замечаний.

1. Внушительный список публикаций автора из 13 работ содержит лишь одну работу в Phys.Rev.D – журнале первого квартиля. Остальные 12 работ напечатаны в журналах четвертого квартиля.
2. Формальные математические выкладки автора выглядят правдоподобными. Идея использования матрицы плотности и уравнения фон Неймана правильная. Однако я вижу в работе ряд трудностей и проблем, не позволяющих считать это законченным научным исследованием, а предложенные эффекты наблюдаемыми. Например, является доказанным, что непротиворечивое описание

нейтринных осцилляций в модели с определенным импульсом нейтрино невозможно. Тем не менее автор рассматривает процессы распада, индуцированного поглощения и электромагнитные свойства нейтрино в плосковолновой модели.

3. Мне представляется, что в подходе автора к декогеренции нейтринного состояния за счет учета распадов и поглощения частиц фотона (темного фотона, аксиона) есть концептуальная трудность. Такие процессы обязательно связаны с изменением энергии и импульса нейтрино. Разница импульсов начального и конечного нейтрино приведет почти сразу к некогерентности этих состояний. Стало быть, нейтрино в конечном состоянии не будет в когерентной смеси с исходным состоянием. При этом когерентность выживших нейтрино не изменится. Поэтому для полного описания эволюции нейтрино с учетом распада необходимо учитывать изменение энергии нейтрино при распаде, т. е. рассматривать потоки нейтрино с непрерывным энергетическим спектром. С самого начала автор, вводя матрицу плотности, не обсуждает, что это должна быть бесконечно-мерная матрица со всеми возможными энергиями нейтрино. Напротив, например в Разделе 2.2, нейтрино  $\nu_i$  обладает определенной энергией  $E_i$ , что делает матрицу плотности неполной. Как следствие, важнейшие теоремы о свойствах матрицы плотности могут не выполняться.
4. Стр.11 – “Экспериментальное доказательство существования флейворных осцилляций нейтрино” следует переписать как “Первое экспериментальное доказательство...”, поскольку осцилляции нейтрино наблюдались и в других экспериментах.
5. Стр.12 – Утверждение “Тем не менее экспериментально получить значение массы нейтрино не удалось” не точно. Значение любой экспериментально измеряемой величины приводится внутри доверительного интервала. Наблюдение осцилляций нейтрино

позволяет заключить, что масса второго массивного состояния нейтрино лежит в интервале  $0 < m_2 < 0.01$  эВ. Масса самого тяжелого нейтрино находится в интервале  $0 < m < 0.05$  эВ.

6. Стр.18 – Пожалуй, слова “самопроизвольно” в фразе “флейвор нейтрино при распространении самопроизвольно меняется” неточно.
7. Стр.19 – Фрагмент “Когда расстояние от источника нейтрино до детектора значительно больше размеров источника, то необходимо усреднить вероятность осцилляций нейтрино 1.20. В этом случае второй член зануляется. В этом случае фаза не будет влиять на вероятность флейворных осцилляций. Поэтому CP-нарушающую фазу возможно детектировать только в короткобазовых нейтринных экспериментах” не верен.
8. Стр.19 – Формула (23) это не весь гамильтониан, а лишь его малая часть. Основная, отброшенная автором часть, не влияет на осцилляции нейтрино, поскольку одинакова для всех флейворных состояний нейтрино.
9. Обсуждение в 1.2.2 относится к случаю среды с постоянной плотностью, что автором не указано.
10. Из текста не понятно, является ли материал раздела 1.2.5 авторским, или это обзор литературы, поскольку никаких ссылок не приводится.
11. В формулах (2.23) приведены полученные операторы, определяющие квантовую декогеренцию нейтринного состояния в результате распада более тяжелого нейтрино на легкое плюс фотон (темный фотон, аксион). В пояснении к формуле указано, что соответствующие ширины зависят от энергии фотонов. Как тогда понимать уравнения (2.23)? Никаких энергий в нем не указано.
12. Что такое  $f$  в (2.38)?
13. Непонятно, как можно было сделать конкретное вычисление ширины на рис. 2.3, не указав константу связи нейтрино с фотоном.

14. Дано недостаточное объяснение предела для вероятности осцилляций флейворных нейтрино при бесконечно большом времени.
15. Автор не указал, где во Вселенной могут быть реализованы условия, при которых предложенные эффекты, учитывая существующие ограничения, могут быть наблюдаемыми.

Вместе с тем указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. 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 Станкевич Константин Леонидович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук

заместитель директора по научной работе

Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований»

Наумов Дмитрий Вадимович \_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Контактные данные:

тел.: 7 (49621) 6-59-12; e-mail: [dmitryvnaumov@gmail.com](mailto:dmitryvnaumov@gmail.com)

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Адрес места работы:

141980, Московская обл., Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6,

Международная межправительственная организация Объединенный  
институт ядерных исследований

тел.: 7 (49621) 6-59-12; e-mail: [dmitryvnaumov@gmail.com](mailto:dmitryvnaumov@gmail.com)

Подпись заместитель директора по научной работе  
ОИЯИ Д. В. Наумова удостоверяю: