

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

**В диссертации развита теория** осцилляций нейтрино, в рамках которой были учтены эффекты квантовой декогеренции различных состояний нейтрино. Также в диссертации исследованы новые эффекты во флейворных и спин-флейворных осцилляциях нейтрино при распространении нейтрино в различных средах.

**Актуальность** исследования флейворных и спин-флейворных и осцилляций и квантовой декогеренции нейтрино обусловлена тем, что эти эффекты чувствительны к электромагнитным свойствам нейтрино, которые экспериментально еще не обнаружены, а также к физике за пределами Стандартной модели. В диссертации показано, что квантовая декогеренция может возникать как за счет электромагнитных свойств нейтрино, которые описываются в рамках минимально расширенной Стандартной модели, так и за счет взаимодействия нейтрино с гипотетическими частицами, такими как: темные фотоны и аксионоподобные частицы. Также в диссертации рассмотрены новые эффекты в осцилляциях нейтрино, возникающие за счет электромагнитных свойств нейтрино, а именно, за счет зарядового радиуса и анапольного момента. Практическая ценность диссертации заключается в том, что полученные в диссертации результаты важны для проведения анализа экспериментальных данных по потокам нейтрино от астрофизических объектов, детектирование которых будет возможно в ближайшее время в мегасайенс проектах JUNO, Hyper-Kamiokande и DUNE.

Диссертация соискателя состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Список литературы содержит 98 наименований.

Во введении диссертации приведена краткая история развития физики нейтрино, а также рассмотрены актуальность и современное состояние разработки научной темы. Кроме того, представлены цель и задачи диссертации и научная новизна проведенных исследований, а также апробации работы на научных конференциях.

В первой главе представлена физика нейтрино в рамках минимально расширенной Стандартной модели, обсуждаются электромагнитные характеристики нейтрино и их экспериментальные ограничения. Рассмотрены флейворные и спин-флейворные осцилляции нейтрино в различных средах (в вакууме, в электронной среде, а также в плотном нейтринном газе). В конце первой главы рассмотрена эволюция нейтрино с помощью теории открытых кантовых систем на основе уравнений Линдблада.

Во второй главе изложены основные результаты диссертации по исследованию квантовой декогеренции нейтрино, возникающей за счет излучения нейтрино безмассовой частицы с соответствующим переходом из тяжелого состояния в более легкое и за счет обратного перехода с поглощением безмассовой частицы. Рассмотрен конкретный механизм возникновения квантовой декогеренции, возникающий за счет радиационного распада нейтрино. Приведены численные оценки для реальных астрофизических объектов.

Третья глава посвящена исследованию новых эффектов в нейтринных осцилляциях. Рассмотрено влияние квантовой декогеренции на коллективные осцилляции нейтрино, которые возникают при взрыве сверхновой. Также в главе рассматриваются флейворные и спин-флейворные осцилляции нейтрино с учетом взаимодействия нейтрино с внешней средой через зарядовый радиус и анапольный момент нейтрино.

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

**Достоверность и новизна** полученных результатов подтверждается публикациями в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также докладами на российских и международных конференциях.

Тем не менее, работа не лишена **недостатков**, список которых приведен ниже.

1. В разделе 2.2 изучена квантовая декогеренция в процессе радиационного распада нейтрино. Соответствующие диаграммы показаны на рис. 2.2. Однако, как следует из разд. 1.1.3, электромагнитный распад нейтрино может происходить и при наличии у частицы переходного магнитного момента. В диссертации не обсуждается квантовая декогеренция в этом случае. Это является недостатком работы.

2. Основной объем диссертации посвящён изучению квантовой декогеренции и ее вкладу в осцилляции нейтрино. Однако, разд. 3.2, в котором изучается влияние анапольного момента и зарядового радиуса на спин-флейворные осцилляции, стоит особняком и слабо связан с остальной диссертацией. Данный факт можно отнести к недостаткам диссертации.

3. В упомянутых во Введении работах [16,17] действительно изучаются осцилляции нейтрино в гравитационных полях. Однако, ввиду того, что диссертация посвящена явлению декогеренции, более уместными являются ссылки на статьи Phys.Rev.D 100, 096014 (2019); JCAP 12 (2020) 022; Phys.Rev.D 104, 043018 (2021). В данных работах изучены осцилляции нейтрино в присутствии стохастических гравитационных волн. Кроме того, для многих ссылок в списке литературы, имеющих русскоязычные первоисточники, приведены переводы на английский язык (см, например, [40-42, 45, 49] и др.). Это замечания указывают на недостатки работы.

4. Работы [23,24], упомянутые в диссертации, являются ошибочными. Данный факт был установлен, например, Харлановым и Шустовым в Phys. Rev. D 103, 095004 (2021). Более того, впервые эффективный Гамильтониан, учитывающий коллективные эффекты при осцилляциях майорановских нейтрино, был получен Дворниковым в Nucl. Phys.B 855, 760-773 (2012). Данные факты являются недостатком работы.

5. В диссертации и автореферате присутствует ряд опечаток. Например, «атрофических» на стр. 10 автореферата и «массовые» в заголовке

раздела 1.1.1 диссертации, и др. Кроме того, в слагаемом  $q_\mu q/q^2$  в формуле (1.11) явно пропущена свертка с гамма-матрицами, т.е. следует писать, например,  $q_\mu q/q^2$ . Не ясно, что означает '±' в формуле (1.14)? В формулах (2.45) и (2.46) использованы два разных определения для функции распределения:  $f_x$  и  $N_x$  соответственно. Аналогичное замечание имеет место и в отношении формул (2.24) и (2.39). Я бы также отметил не совсем удачное использование термина «тауонное нейтрино». Наличие в работе подобных опечаток является её недостатком.

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,  
ведущий научный сотрудник,  
заведующий теоретическим отделом,  
ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук»

ДВОРНИКОВ Максим Сергеевич \_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Контактные данные:

тел.: 8(495)8510912, maxdvo@izmiran.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.02 – Теоретическая физика.

Адрес места работы:

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

Тел.: 8(495)8510912; e-mail: maxdvo@izmiran.ru

Подпись ведущего научного сотрудника

ФНБУН «ИЗМИРАН» М.С. Дворникова удостоверяю: