

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Дубинина Михаила Николаевича
на диссертацию Личунова Алексея Андреевича
«Нейтрино в теориях с аксионо-подобными частицами»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по научной специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Диссертация А.А.Личунова посвящена расчетам новых эффектов при взаимодействии аксионов и аксионо-подобных частиц с нейтрино. Как известно, спонтанное нарушение киральной глобальной симметрии PQ (Peccei-Quinn symmetry) лагранжиана КХД стандартной модели (СМ) приводит к появлению голдстоуновского поля, известного под названием аксион. Наличие аномалии в дивергенции аксиального тока ведет к возникновению эффективного члена лагранжиана КХД, позволяющего компенсировать известный тета-член КХД и привести к решению так называемой сильной CP-проблемы. Большой интерес представляет возникновение аксионо-подобных частиц в расширениях СМ, где одним из наиболее распространенных представляется двухдублетная модель хиггсовского сектора СМ. В двухдублетной модели глобальная PQ симметрия нарушается спонтанно вакуумными средними хиггсовских изодублетов, сопровождаясь появлением WW (Weinberg-Wilczek) аксиона. Экспериментальное исключение существования "тяжелого" WW аксиона с массой порядка 10 кэВ можно обойти на пути дальнейших расширений хиггсовского сектора двухдублетной модели синглетами скаляров, что приводит к феноменологически непротиворечивым расширениям СМ, позволяющим рассматривать аксионо-подобные частицы (а также майорон), образующиеся в первичной плазме Большого взрыва за счет весьма специфических нетепловых механизмов, в качестве кандидатов на роль частиц холодной темной материи с массой порядка 10^{-6} эВ. Модели с частицами такого рода весьма сложны для экспериментального подтверждения, поэтому рассматриваемый в диссертационной работе комплекс поставленных автором вопросов, связанных с взаимодействием

аксионо-подобных частиц и нейтрино, представляет большой научный интерес для обоснования моделей “новой физики” с дополнительными симметриями и расширениями хиггсовского сектора, отличается новизной и актуальностью.

Автор диссертационной работы изучает осцилляции нейтрино в средах, содержащих аксионо-подобные частицы, в том числе майороны, а также квантовую декогеренцию нейтринных осцилляций, обусловленную флуктуациями классического поля аксионо-подобных частиц. В диссертации построен эффективный гамильтониан взаимодействия нейтрино с классическим аксионо-подобным полем и получены вероятности флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в среде майоронов, магнитном поле и веществе. Получена диссипативная матрица, описывающая квантовую декогеренцию нейтринных осцилляций в стохастическом поле аксионо-подобных частиц и установлены ограничения на константы связи аксионо-подобных частиц с нейтрино, использующие экспериментальные данные по параметрам декогеренции. Эти результаты открывают новые возможности для экспериментального поиска аксионо-подобных частиц по их воздействию на нейтринный сектор СМ и ее расширений. Кроме того, задача квантовой декогеренции нейтринных осцилляций в стохастическом поле тёмной материи является новым и перспективным направлением, позволяющим связать параметры тёмной материи с наблюдаемыми характеристиками нейтрино. Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы при анализе данных нейтринных экспериментов JUNO, Daya Bay, KamLAND, MINOS/MINOS+, NOvA и других, а также в астрофизических приложениях — при описании нейтринных потоков от сверхновых и из ранней Вселенной.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 158 наименований.

Во введении представлен обзор современного состояния области, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также семь основных положений, выносимых на защиту; охарактеризована научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе изложены необходимые теоретические сведения: описание масс и смешивания нейтрино в рамках Стандартной модели и её расширений, механизмы генерации масс нейтрино (дираковский, майорановский, seesaw механизм), формализм нейтринных осцилляций в вакууме, веществе и магнитном поле, а также обзор теории аксионов и аксионо-подобных частиц – возможных

кандидатов на роль частиц тёмной материи. Обсуждается связь майоронов с механизмом спонтанного нарушения лептонной симметрии и «качельным» (seesaw) механизмом генерации масс нейтрино. Содержание первой главы представляет собой необходимую основу для последующего оригинального исследования.

Вторая глава содержит один из центральных результатов диссертации. Построен эффективный гамильтониан взаимодействия нейтрино с классическим аксионо-подобным полем, для случая майорнов основанный на рассмотрении процесса рассеяния нейтрино вперёд. Рассмотрены флейворные осцилляции нейтрино в среде майоронов. Показано, что майоронная среда не изменяет угол смешивания нейтрино, но влияет на длину осцилляций, что является физически нетривиальным результатом, отличающим майоронную среду от обычного вещества.

Третья глава посвящена спин-флейворным осцилляциям майорановских нейтрино в среде, содержащей одновременно вещество, магнитное поле и майороны. Получены аналитические выражения для вероятностей осцилляций в приближении двух поколений нейтрино. Исследовано влияние CP-нарушающих фаз — дираковской и майорановской — на вероятности переходов. В третьей главе получены важные результаты, описывающие влияние среды майоронов на резонансные осцилляции нейтрино. Установлено, что присутствие майоронной среды приводит к изменению значения плотности среды, при котором реализуются резонансные осцилляции, подавлению осцилляционной активности в низкоэнергетической области, а также трансформации вида зависимости амплитуды осцилляций от CP-нарушающих фаз.

Четвёртая глава посвящена теме, представляющей наибольший интерес с точки зрения связи физики нейтрино и тёмной материи — квантовой декогеренции нейтринных осцилляций в стохастическом классическом поле аксионо-подобных частиц. Получено кинетическое уравнение Редфилда (A.Redfield) для случая эволюции матрицы плотности нейтрино во флуктуирующем поле аксионо-подобных частиц. Получена диссипативная матрица, характеризующая декогеренцию, которая в общем случае содержит как диагональные, так и недиагональные элементы. Наличие недиагональных элементов является принципиальным отличием от феноменологических моделей декогеренции, обычно рассматриваемых в литературе, и представляет собой теоретически значимый результат. Выполнено разложение матрицы плотности и диссипативного оператора по генераторам группы $SU(3)$ для случая трёх поколений нейтрино. Предложено использование рэлеевского распределения для описания флуктуаций поля аксионо-подобных частиц. На основе

экспериментальных данных по параметрам декогеренции установлены ограничения на константы связи аксионо-подобных частиц с нейтрино. Результаты четвертой главы формируют новый подход к экспериментальному поиску аксионо-подобных частиц, используя их влияние на когерентность нейтринных осцилляций.

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

Достоверность и новизна полученных результатов подтверждается публикациями в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, в том числе в журналах Physical Review D и International Journal of Modern Physics A, а также докладами на российских и международных конференциях. Ряд результатов диссертации получен впервые: эффективный гамильтониан взаимодействия нейтрино с классическим полем аксионо-подобных частиц, аналитические выражения для вероятностей спин-флейворных осцилляций майорановских нейтрино в среде майоронов с учётом CP-нарушающих фаз, а также диссипативная матрица с недиагональными элементами для декогеренции в стохастическом поле аксионо-подобных частиц. Отметим, что основные выводы основаны на аналитических формулах, следствия которых в предельных случаях согласуются с известными результатами.

Затрудняют восприятие результатов диссертационной работы недостатки формы изложения и представления результатов, к которым относится нестандартная в ряде случаев терминология автора, например, определение правокиральных майорановских спиновых полей, взаимодействующих в результате seesaw-смешивания, как “правосторонних” полей на стр. 56, нестандартное определение реализации механизма seesaw типа I в начале главы 3, стр. 53, как “подхода, основанного на распаде”, отсутствие в тексте определений для используемого обозначения “флейворы”, количество которых определяет размерность массовой матрицы майорановских нейтрино в различных главах диссертации. Была бы весьма желательна более детальная информация о возможностях и результатах упоминаемых в тексте глав «по касательной» экспериментов KamLAND, JUNO, DUNE, KamioKande, NOVA, PTOLEMY и др, не ограничиваясь только ссылками в библиографии, при использовании ограничений или сравнения с ними полученных результатов.

Подводя итоги, заключаем, что диссертация А.А. Личкунова отвечает всем требованиям, установленным МГУ им. М.В. Ломоносова к кандидатским

диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3. — «теоретическая физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Работа оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автор диссертации Личкунов Алексей Андреевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. — «теоретическая физика».

Дубинин Михаил Николаевич

доктор физико-математических наук
и.о. заведующего отделом теоретической
физики высоких энергий института ядерной физики
им.Д.В.Скобельцына МГУ им.М..В.Ломоносова

Подпись М.Н.Дубинина заверяю:
Ученый секретарь НИИЯФ МГУ

Е.А. Сигаева

3 мая 2026 г.

Контактные данные оппонента:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.23 — Физика высоких энергий.

Адрес места работы оппонента:
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2,
НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова,
Отдел теоретической физики высоких энергий