

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук Личкунова Алексея Андреевича
на тему: «Нейтрино в теориях с аксионо-подобными частицами»
по специальности 1.3.3. Теоретическая физика**

В диссертации исследованы осцилляции нейтрино в средах, содержащих аксионо-подобные частицы, в том числе собственно аксионы и майороны — псевдоскалярные голдстоуновские бозоны, связанные со спонтанным нарушением лептонного числа. Построен эффективный гамильтониан взаимодействия нейтрино с классическим полем аксионо-подобной частицы. Получены аналитические выражения для вероятностей флейворных и спин-флейворных осцилляций нейтрино в среде майоронов с учётом вещества и магнитного поля. Выведено уравнение Редфилда для эволюции матрицы плотности нейтрино в стохастическом поле аксионо-подобных частиц и получена диссипативная матрица, характеризующая квантовую декогеренцию в нейтринных осцилляциях. Установлены ограничения на константы связи аксионо-подобных частиц с нейтрино.

Актуальность темы диссертации определяется тем, что нейтринные осцилляции являются одним из наиболее надёжно установленных проявлений физики за пределами Стандартной Модели, а аксионо-подобные частицы — одними из популярных кандидатов на роль тёмной материи. Взаимодействие между этими двумя секторами новой физики представляет значительный теоретический и экспериментальный интерес. Современные и будущие нейтринные эксперименты, такие как NOvA, JUNO, DUNE, Hyper-Kamiokande, ORCA, PINGU, а также реакторные эксперименты Daya Bay, RENO, NEOS, KamLAND, DANSS, STEREO достигли уровня точности, при котором тонкие эффекты, связанные с взаимодействием нейтрино с фоновыми полями, становятся потенциально наблюдаемыми. В частности, эффекты декогеренции в нейтринных осцилляциях, вызванные флуктуирующим полем псевдоскалярной тёмной материи, представляет собой новый и перспективный канал поиска аксионо-подобных частиц, дополняющий прямые методы их детектирования. Диссертация создаёт необходимый теоретический аппарат для анализа таких эффектов и устанавливает количественные ограничения на параметры взаимодействия нейтрино с аксионо-подобными частицами.

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

Во Введении представлен обзор современного состояния исследований, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, а также семь основных положений, выносимых на защиту. Описаны научная новизна и практическая значимость результатов.

Первая глава представляет собой обзор теоретических основ, на которых строится дальнейшее исследование. Рассмотрены механизмы генерации масс нейтрино, а также формализм нейтринных осцилляций в вакууме, веществе и магнитном поле. Отдельно описана теория аксионов и аксионо-подобных частиц: их происхождение в связи с проблемой сильного CP-нарушения, роль в качестве кандидатов на тёмную материю, а также связь майоронов со спонтанным нарушением лептонной симметрии и качельным механизмом. Глава написана кратко, но даёт читателю достаточный контекст для восприятия оригинальных результатов диссертации.

Вторая глава содержит построение эффективного гамильтониана взаимодействия нейтрино с классическим полем аксионо-подобных частиц. Для случая майоронов гамильтониан выведен из рассмотрения когерентного рассеяния нейтрино вперёд. На его основе исследованы флейворные осцилляции нейтрино в среде майоронов. Получен физически содержательный результат: майоронная среда не изменяет угол смешивания нейтрино, влияя лишь на длину осцилляций. Это означает отсутствие аналога МСВ-резонанса в майоронной среде, что принципиально отличает её от обычного вещества и является важным теоретическим выводом.

Третья глава посвящена спин-флейворным осцилляциям майорановских нейтрино при одновременном наличии вещества, магнитного поля и майоронной среды. В модельной задаче с двумя поколениями нейтрино получены аналитические формулы для вероятностей осцилляций. Исследовано влияние CP-нарушения на вероятности переходов. Демонстрируемый в главе центральный результат заключается в совокупном эффекте майоронной среды: происходит изменение плотности среды для резонансных осцилляций, подавление осцилляций в низкоэнергетической области и изменение зависимости амплитуды осцилляций от CP-нарушающих фаз.

Четвёртая глава посвящена квантовой декогеренции нейтринных осцилляций, обусловленной стохастическими флуктуациями классического поля аксионо-подобных частиц. Выведено уравнение Редфилда для эволюции матрицы плотности нейтрино. Центральным результатом является получение диссипативной матрицы, содержащей как диагональные, так и недиагональные элементы. Наличие недиагональных элементов принципиально отличает данный результат от феноменологических моделей декогеренции, широко

используемых в литературе при анализе экспериментальных данных. Выполнено разложение матрицы плотности и диссипативного оператора по генераторам группы $SU(3)$ для трёх поколений нейтрино. Для описания флуктуаций поля аксионо-подобных частиц применено рэлеевское распределение. Из экспериментальных ограничений на параметры декогеренции получены ограничения на константы связи аксионо-подобных частиц с нейтрино, что представляет собой новый метод поиска аксионо-подобных частиц.

В заключении перечислены основные результаты диссертации.

Достоверность и новизна полученных результатов подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, в том числе в Physical Review D и International Journal of Modern Physics A, а также докладами на российских и международных конференциях. К числу результатов, полученных впервые, относятся: эффективный гамильтониан взаимодействия нейтрино с майороном; выражения для вероятностей спин-флейворных осцилляций майорановских нейтрино в среде майоронов с учётом CP-нарушающих фаз; диссипативная матрица с недиагональными элементами для декогеренции нейтринных осцилляций в стохастическом поле аксионо-подобных частиц. Аналитические результаты верифицированы в предельных случаях.

Тем не менее, работа не лишена многочисленных недостатков (мелких и не очень), неполный список которых приведён ниже.

Опечатки, неточности и т.д.¹

Стр. 5: «Печчеи-Куинн» $\rightarrow$ «Печчеи-Квинн».

Стр. 19: В формуле для Δ_{ik} после (1.21) пропущен множитель L .

Стр. 20: Утверждение «Наиболее сильное ограничение на CP-нарушающую фазу δ на сегодняшний день получено коллаборацией T2K» не точно. Во-первых, эксперимент T2K установил не ограничение на фазу δ , а допустимую область её значений, т.е. получил указание на наличие CP-нарушения, пусть пока и недостаточно статистически надёжное. Во-вторых, эксперимент NOvA сделал то же самое, причём на вполне сравнимом уровне достоверности. Хотя результаты этих двух

¹ Кавычками и средне-голубым цветом выделен авторский текст. Извиняюсь, но я не классифицирую недостатки по степени их важности, а просто перечисляю по мере чтения.

экспериментов плохо согласуются, формально они друг другу не противоречат. Проведено несколько совместных статистических анализов данных NOvA и T2K.

Стр. 21: Утверждение «Вследствие того, что плотность нейтронов не входит в уравнение, она не влияет на динамику нейтрино» не вполне корректно. Плотность нейтронов не влияет на динамику нейтрино в среде лишь в том приближении, в котором записан потенциал Вольфенштейна (1.27) в диссертации. Так, плотность нейтронов входит в этот потенциал при учёте радиационных поправок или при включении смешивания со стерильными нейтрино.

Утверждение «нарушается СРТ-инвариантность ($\Delta P_{\text{эф}}^{\text{CPT}} \neq 0$)» слишком революционно, чтобы оказаться правильным. Просто величина $\Delta P_{\text{эф}}^{\text{CPT}}$ неадекватна при анализе СРТ-инвариантности в нейтринных осцилляциях в среде. Следующее предложение: «возникает эффект индуцированного СРТ-нарушения...» вполне корректно, хотя требует пояснения.

Стр. 22: Утверждение «Наиболее строгое ограничение получено в эксперименте KATRIN... $m_\nu < 0.8$ эВ» чуть устарело. В позапрошлом году опубликован более строгий предел: $m_\nu < 0.45$ эВ (90% C.L.).²

Стр. 23: Утверждение «Лучшие современные ограничения ($m_{\text{eff}} < 0.08-0.18$ эВ) получены...» тоже устарело. Более свежий результат KamLAND-Zen (2024-го года) таков: $m_{\text{eff}} < 0.028-0.122$ эВ.³

Утверждение «Однако надёжность этих результатов ограничена:...» совершенно некорректно. «Ворота» типа «0.028–0.122 эВ» учитывают, кроме прочего, так же и неопределённость в расчётах ядерных матричных элементов, что обеспечивает надёжные ограничения на m_{eff} . А предположение о майорановской природе нейтрино неизбежно при поиске $0 \nu \beta\beta$ -распада (о чём автор безусловно знает)⁴.

Стр. 25: Утверждение «Взаимодействие нейтрино с реальными фотонами

² M. Aker et al. (KATRIN Collaboration), *Direct neutrino-mass measurement based on 259 days of KATRIN data*, Science **388**, Iss. 6743 (2025) 180–185; arXiv:2406.13516 [nucl-ex]. Наиболее свежие результаты [Chloé Goupy, *Recent results from the KATRIN Experiment* (Les rencontres de Moriond, Electroweak Interactions & Unified Theories, March 15–22, 2026)] можно найти здесь: <https://indico.in2p3.fr/event/39055/contributions/170244/attachments/180391/155651/4_CGoupy-v1.pdf>.

³ S. Abe et al. (KamLAND-Zen Collaboration), *Search for Majorana Neutrinos with the Complete KamLAND-Zen Dataset*, Phys. Rev. Lett. **135** (2025) 262501, arXiv:2406.11438 [hep-ex].

⁴ Надёжность любого эксперимента ограничена тысячей причин, но добросовестные экспериментаторы так или иначе учитывают эти причины при оценках систематических ошибок. Это один из важных и трудных этапов обработки данных. Ошибки в этих оценках обычно находятся далеко за пределами компетенции «сторонних наблюдателей».

($q^2 = 0$) определяется четырьмя электромагнитными характеристиками: ...» вызывает недоумение: формфакторы – это ведь матрицы; даже если при $q^2=0$ они диагональны (в флейворном или массовом базисе?), числа на диагоналях не обязательно одинаковы (и даже обязательно не одинаковы). Хотя из дальнейшего изложения можно догадаться о чём идёт речь, всё это требует хотя бы кратких пояснений. Неясно, напр., к каким именно нейтрино (с определённой массой или с определённым флейвором) относятся приведённые ниже ограничения на величину заряда. Читатель безусловно может всё это раскопать в литературе, но это должен был сделать автор. Дальше по тексту имеются и другие похожие неаккуратности, не буду перечислять их индивидуально.

Стр. 27: Что такое ϵ_{jk} в (1.42)?

Стр. 28: Фраза «Глава 2 диссертации посвящена осцилляциям нейтрино с учётом взаимодействия в веществе, среде майоронов их магнитных моментов с магнитным полем» нуждается в коррекции.

Стр. 29: В (1.49) и (1.52) отсутствует знак суммы. А это важно, т.к. пределы суммирования не очевидны (напр., входит $N^0 \lambda^0$ в сумму или нет?) В дальнейшем тексте знак суммы в формулах часто опускается. Это конечно допустимо (спасибо Эйнштейну!), но, если это не лоренцевы индексы, нужно хоть единожды указать диапазон их изменения.

Имеется некоторая путаница с алгеброй Ли группы $SU(N)$ и её частным случаем — алгеброй Гелл-Манна ($N=3$). Автор выписал коммутационные соотношения (1.50) для последнего случая, забыв в нём множитель 2. Напомню: для генераторов $su(N)$ имеем $[T_j, T_k] = if_{jk} T_i$, а для матриц Гелл-Манна $\lambda_k = 2T_k$: $[\lambda_j, \lambda_k] = 2if_{jk} \lambda_i$. Формула (1.51) — вообще какая-то ерунда, хотя можно догадаться, что имелась в виду формула $Tr(T_j, T_k) = \frac{1}{2} \delta_{jk}$. На всякий случай напомню и формулу для произведения матриц: $\lambda_j \lambda_k = \frac{2}{3} \delta_{jk} + (d_{jk} + if_{jk}) \lambda_i$, где d_{jk} и f_{jk} — структурные константы алгебры $su(3)$.

Ну и далее: ур. (1.52) написано для произвольного N , но константы f_{ijk} определены (либо с опечаткой, либо не для матриц Гелл-Манна, а для генераторов T) алгеброй (1.50) лишь для случая $N=3$, что специально оговорено. К счастью, ниже только этот случай и используется.

Можно

надеясь, что указанные опечатки касаются лишь диссертации и на её

основные результаты не повлияли.

Стр. 30: Правильно я понимаю, что $\Gamma_n = \beta_{0n} = 0$ (коль скоро $D_{0n} = 0$)? Но тогда

как это согласуется с (1.56) на следующей странице?

Знаки перед Γ_k в (1.53) и Γ в (1.54–1.56) не согласуются (с учётом того, что $\Gamma_k = \Gamma$).

«при взаимодействии нейтрино может исчезать из наблюдаемой системы. Этот эффект может быть объяснён несколькими механизмами: во-первых, нейтрино может быть поглощено чёрной дырой...»
Во-первых, нейтрино может поглотиться в среде при взаимодействии заряженным током (СС). И получится неунитарная эволюция. Для неё нужно одно из трёх довольно обычных в астрофизике условий (или их комбинации): высокие энергии, протяжённая среда, плотная среда.⁵
Да, чёрные дыры тоже подойдут. Но если говорить о них всерьёз, а не для красного словца, то придётся учитывать сдвиги осцилляционных фаз и искривление траекторий нейтрино в сильном гравитационном поле, упругие (когерентные) и неупругие (СС и NC) взаимодействия нейтрино с аккреционным диском.

Стр. 32: В формуле (1.60) вместо непонятной комбинации $\arg \det M_u M_d$ должно быть $\arg \det M$, где M — массовая матрица кварков. А что такое $M_{u,d}$?

Стр. 35: «поле Хиггса» $\mapsto$ «полю Хиггса».

Стр. 35: «Аксион Ким-Шифман-Вайнштейн-Захарова» $\mapsto$ «Аксион Кима-Шифмана-Вайнштейна-Захарова»
(все четверо — мужчины).

Стр. 36: «Аксион Дине-Фишлер-Средницки-Житницкого» $\mapsto$ «Аксион Дайна-Фишлера-Средницкого/Средницки-Житницкого»
(аналогично).

Стр. 36: «Будучи бозоном, аксионы...» $\mapsto$ «Будучи бозонами, аксионы...».

⁵ Хотя даже в этом относительно простом случае потребуются обобщить уравнения Линдблада, чтобы учесть поглощение и регенерацию нейтрино в среде. Учёт только поглощения сравнительно несложен.

Стр. 37: Выражение (1.77) **не** удовлетворяет уравнению Клейна-Гордона-Фока (УКГФ). Вместо m_0 нужно подставить полную энергию. Или обсудить нерелятивистский предел ($v^2 \ll 1$), в котором (1.77) — приближенное решение УКГФ. Но в этом пределе исчезает зависимость от x , т.к. (для квазиклассической траектории, $x=vt$) имеем: $px=m_0 v^2 t \ll m_0 t$.

«...так и сверхтяжёлые, имеющие массу до 10^{30} ГэВ» — частица такой массы (1.78 тонн!) это уже чёрная дыра. Даже если такие рождались в квантово-гравитационную эру (на неё что угодно можно списать), то давно испарились.

Стр. 39: Из (1.83) можно заключить, что матрица смешивания V имеет размерность $2N \times 2N$. Или $2N \times N$? В (1.88) стоит сумма N членов. Формула (1.88) повторяется на стр.46, см. (2.27), так что вопрос переносится и на эту формулу.

Стр. 40: «В отличие от аксиона, который получает массу посредством смешивания с пионом, майорон приобретает массу за счёт взаимодействия с топологическими дефектами...»

По первой части предложения: Аксион приобретает массу за счёт взаимодействия с глюонными полями через аномалию.

По второй части: Взаимодействия с топологическими дефектами — это лишь одна из (весьма спекулятивных) возможностей, относящаяся к лёгким космологическим майоронам.⁶ Для тёмной материи в гало Галактики предпочтительны тяжёлые майороны, масса которых не связана с топологическими структурами. Да и где они в Галактике? В работах [106–108], цитируемых автором, обсуждаются именно такие, тяжёлые майороны (см. ниже).

Стр. 41: «Как было сказано в Главе 1, в рамках современных исследований физики нейтрино анализируются их электромагнитных свойств и влиянию этих характеристик на процессы осцилляций нейтрино» — это предложение нуждается в коррекции.

Стр. 47: «засчёт ... пропагатор становится пропорциональным уравнению Дирака в импульсном представлении для нейтрино i , которое действует на ν_i ». Бог бы с ним, с «засчётом», но пропагатор не может

⁶ При этом майорон получает массу от нарушения глобальной лептонной симметрии, которое может быть индуцировано гравитацией или структурой вакуума в присутствии топологических дефектов, но не от них самих.

быть пропорционален уравнению, а уравнение не может действовать. Помимо претензий к синтаксису есть и другие, а именно:

В данном разделе следовало бы указать какой диапазон масс майорона и энергий нейтрино изучается и почему. В цитируемой автором работе [106] изучаются синглетные майороны в диапазоне масс МэВ – 10ТэВ, в [107] это МэВ – 100 ГэВ, в [108] — что-то типа 100 кэВ – 1 ТэВ, а в [109] — $m_i \ll 100$ эВ. Для очень массивного майорона, например, приближение, использованное в данном разделе работает только при сверхвысоких энергиях нейтрино. Только ниже, на рис. 2.4 видим, что в расчёте использована масса майорона 1 эВ, энергия нейтрино 1 МэВ и вакуумное среднее 10^6 ГэВ. Почему взяты именно эти числа из широчайшего спектра возможностей? В каких пределах допустимо их варьировать? Что можно будет увидеть в будущих экспериментах?

Стр. 48: «Благодаря тому, что тяжёлое нейтрино имеет массу порядка 10^2 ГэВ, пропагатор можно упростить». Но тяжёлых нейтрино не обнаружили, откуда же известна их масса?! Для массы (гипотетического) активного нестабильного нейтрино 4-го поколения известно ограничение LHC снизу: 80 – 100 GeV (числа немного разнятся для дираковского и майорановского случаев). Безмодельный нижний предел: 45.0 – 46.7 ГэВ (95% C.L.). Безмодельного верхнего предела нет, насколько мне известно.

Стр. 49: m_0 в (2.45) это то же самое, что m_i ? Кстати, рис. 2.1 (выше по тексту) относится к аксиону, а не к майорону?

Результаты (2.46), (2.47) и вывод после них совершенно замечательны! Конечно, это же можно сказать и о результатах (2.16), (2.21), (2.22) для аксионо-подобных частиц, но случай с майороном интересен тем, что отличается от стандартного МСВ, в котором изменяется как разность квадратов масс Δm_{ij}^2 , так и угол смешивания. В связи с этим вопрос: если Галактика заполнена газом (или классическим полем) майоронов, то мы всегда измеряем сдвинутую разность квадратов масс, а не истинную. Есть ли способ извлечь истинную (вакуумную) разность, а значит и увидеть майорон? Например, пропуская нейтрино через среду, мы увидим как изменение углов смешивания, так и дополнительные сдвиги в Δm_{ij}^2 . Кажется, что в принципе это даёт метод детектирования майоронов. Но можно ли извлечь истинные значения Δm_{ij}^2 ? Любой ответ был бы важен.

Стр. 55: Что такое Σ в (3.1)? Видимо это спиновая матрица, но кто знает?

Стр. 70: С уравнениями (4.33) и (4.34) мы возвращаемся к вопросу для стр.29.

Стр. 72: «...недиагональные элементы в диссипативной матрице могут приводить к нарушению симметрии CP и CPT соответственно». Уже обсуждалось, что речь может идти лишь об индуцированном нарушении CP и CPT.

Стр. 75: «Диссипативная матрица (4.40) соответствует случаю (4.53)». Номер (4.40) относится не к матрице, выписанной чуть выше. Но вопрос не в этом; поскольку речь идёт о грубых оценках области применимости⁷, стоило бы пояснить происхождение строгих неравенств (4.55–4.57). Более того, эти оценки получены из условий $|D_{ab}| < \Gamma$ ($a, b = 1, \dots, 8$). Требуется обоснование их применения.

Стр. 79: «(распады мезонов и каонов)». Каоны являются мезонами.

Стр. 80: «аксионо-подобных» $\longleftrightarrow$ «аксионо-подобных».

«в первом порядке теории возмущения майораны не влияют на осцилляции нейтрино»⁸. А разве сдвиг по фазе не меняет картину осцилляций? Вопрос, впрочем, терминологический.

Общие замечания:

Хотя в большей части диссертация написана неплохим языком, однако, в нескольких местах текст требует коррекции. Почти никогда не приводится вывод нетривиальных формул и важных утверждений, чего было бы естественно ожидать в диссертации. Довольно скудны численные результаты. Однако многие результаты диссертации очень интересны и несомненно будут развиваться как автором, так и другими исследователями.

В целом, даже с учётом немалого числа недостатков, 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, определённым

⁷ Особенно с учётом того, что степенная формула для функции Γ выдумана кем-то без какого либо теоретического или эмпирического обоснования.

⁸ Подобное утверждение звучало и выше в тексте.

80
пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Личкунов Алексей Андреевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
начальник сектора лаборатории теоретической физики
имени Н.Н. Боголюбова,
Объединённый институт ядерных исследований
НАУМОВ Вадим Александрович

« 6 » мая 2026 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (496) 216-23-19; e-mail: vnaumov@theor.jinr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.16 — Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Адрес места работы:

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6,
Объединённый институт ядерных исследований,
Лаборатория теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова

Подпись начальника сектора лаборатории теоретической физики
им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ В.А. Наумова удостоверяю:

Председатель Учёного совета ОИЯИ

ТРУБНИКОВ Григорий Владимирович

« 6 » мая 2026 г.