

Обоснование-представление цикла работ
“Квантово-полевая теория осцилляций нейтрино”.

Коллектив авторов: Д.В. Наумов (ЛЯП), В.А. Наумов (ЛТФ), Д.С. Шкирманов (ЛТФ).
Конкурс в рамках раздела «Теоретическая физика».

Цикл работ [1–6] посвящен квантовополевой теории нейтринных осцилляций в рамках ковариантного формализма с релятивистскими волновыми пакетами в качестве асимптотически свободных начальных и конечных состояний частиц, участвующих в процессах рождения нейтрино в «источнике» и его поглощения в «детекторе», где источник и детектор являются вершинами связной фейнмановской диаграммы, соединенными пропагатором нейтрино с определенной массой. При этом флейворные превращения на макроскопических пространственно-временных расстояниях между источником и детектором трактуются как результат интерференции вкладов в полную амплитуду от макродиаграмм, содержащих виртуальные нейтрино с разными массами. Детальная теория разработана авторами в работе [1]. В работе [2] доказана теорема, расширяющая важный результат Гримуса–Стокингера об асимптотическом поведении обобщенного нейтринного пропагатора на больших пространственных расстояниях между вершинами макродиаграммы. Работы [3,4] посвящены различным аспектам теории ковариантных волновых пакетов, используемых в формализме. Первый анализ экспериментальных данных по проверке некоторых предсказаний теории был выполнен коллаборацией Daya Bay под руководством одного из авторов [5]. В работе [6] дается подробное изложение положений и следствий квантово-механического и квантово-полевого подходов к теории нейтринных осцилляций, получен ряд новых физических и математических результатов теории.

Актуальность цикла работ [1–6] связана с неполнотой и противоречивостью общепринятой теории нейтринных осцилляций, основанной на квантовомеханической плосковолновой модели. Феномен нейтринных осцилляций, чрезвычайно интересный сам по себе как пока единственный пример нарушения лептонных чисел, с высокой точностью сохраняющихся во всех остальных процессах, играет ключевую роль в измерениях фундаментальных параметров Стандартной Модели (углов смешивания и разностей квадратов масс нейтрино, фазы CP нарушения), а также в изучении физики за пределами Стандартной Модели (нестандартные взаимодействия нейтрино с веществом, стерильные нейтрино и т.д.). В сочетании с когерентным и коллективным рассеянием, нейтринные осцилляции в вакууме и веществе чрезвычайно важны для изучения потоков нейтрино из астрофизических источников (от Солнца до активных галактических ядер) и понимания динамики ряда астрофизических процессов (сверхновые, латентные источники частиц высоких энергий). Поэтому недопустимо «заметать под ковер» неувязки в плосковолновой теории нейтринных осцилляций. Развита авторами теория самосогласована, она объясняет все проблемы стандартного квантово-механического подхода и очерчивает область его применимости (достаточно широкую), а также предсказывает ряд новых эффектов, допускающих экспериментальную проверку.

Новыми результатами являются:

- I. Формализм ковариантного волнового пакета (ВП) общего вида, детальное изучение его эволюции и общих свойств, включая средние значения кинематических характеристик ВП, и свойств многопакетных состояний. Изучение асимптотического поведения ВП на больших расстояниях. Анализ простейших моделей ковариантного ВП – релятивистского гауссового и асимметричного (истинно гауссового) ВП, зависящего от «скрытых параметров» (импульсов частиц, участвующих в процессе рождения ВП). Выяснение условий квазистабильности ВП.
- II. Формула для поперечного сечения взаимодействия релятивистских волновых пакетов, упруго рассеивающихся друг на друге с ненулевым прицельным параметром. Расчет геометрического фактора подавления вероятности взаимодействия ВП при неколлинеарных столкновениях.
- III. Формулировка правил Фейнмана для рассеяния ВП и расчет связанной диаграммы достаточно общего вида с макроскопически разнесенными вершинами – «источником» и «детектором», вблизи которых рождаются заряженные лептоны.
- IV. Доказательство теоремы о факторизации адронных блоков макродиаграммы на больших расстояниях между вершинами.
- V. Доказательство расширенной теоремы Гримуса–Стокингера для обобщенного (содержащего факторы, зависящие от параметров внешних ВП) нейтринного пропагатора и предсказывающей поправки к классическому закону обратных квадратов на малых (макроскопических) расстояниях, L ; поправки получены в виде асимптотического разложения пропагатора по обратным степеням L .
- VI. Формулировка метода макроскопического усреднения квадрированных фейнмановских макродиаграмм и вывод общей формулы для числа событий в детекторе, включающей кинематические и динамические характеристики взаимодействий частиц (фазовые объемы, квадраты матричных элементов), функции распределения частиц в источнике и детекторе, а также фактор, обобщающий известное выражение для квантово-механической вероятности флейворного перехода, зависящий от пространственно-временного расстояния между вершинами макродиаграммы и содержащий как стандартный осцилляторный множитель (с небольшими поправками), так и факторы декогерентности.
- VII. Детальное изучение общих свойств тензоров перекрытия (определяющих пространственно-временные области взаимодействия внешних ВП) и получение их явного вида для основных реакций рождения и поглощения нейтрино, необходимого для практических расчетов эффектов декогерентности.
- VIII. Демонстрация дуальности свойств обобщенного пропагатора и эффективного ВП нейтрино на больших пространственных расстояниях.
- IX. Изучение зависимости эффективного 4-импульса виртуального нейтрино от передач 4-импульса в вершинах макродиаграммы в общем случае, а также в ультрарелятивистском и нерелятивистском пределах.
- X. Анализ обобщенной вероятности флейворных переходов с учетом продольной дисперсии эффективного нейтринного ВП и конечных

временных интервалов активности физических источника и детектора для синхронизированных измерений. Предсказание ряда новых потенциально наблюдаемых эффектов в наземных и астрофизических экспериментах по изучению нейтринных осцилляций, в частности, нового режима осцилляций на сверхдлинных базах. Определение условий выхода на неосцилляторный режим, как следствия сужения области перекрытия эффективных ВП нейтрино, распространяющихся с разными групповыми скоростями (из-за разных масс нейтрино).

- XI. Постановка задачи и анализ реакторных экспериментальных данных, проведенный коллаборацией Daya Bay, в результате которого были впервые получены экспериментальные ограничения на дисперсию эффективного нейтринного ВП и масштаб эффектов декогеренции, предсказанных в рамках квантово-полевой теории нейтринных осцилляций.

Практическая значимость работ [1–6] состоит в разработке самосогласованного ковариантного формализма для описания нейтринных осцилляций, учитывающего влияние кинематики взаимодействий частиц в источнике и детекторе и предсказывающего, в частности, наличие режимов подавления осцилляций при определенных экспериментальных условиях. Эти результаты позволяют очертить область применимости стандартного квантово-механического формализма и обеспечить инструмент анализа данных для прецизионного измерения фундаментальных параметров Стандартной Модели в будущих осцилляционных экспериментах. Они могут быть использованы для измерения формы волновой функции нейтрино и будут полезны при физической интерпретации результатов экспериментов с астрофизическими нейтрино высоких энергий.

Результаты работ [1–6] были широко представлены на международных и всероссийских конференциях, публичных лекциях и семинарах.

Список публикаций

1. D.V. Naumov, V.A. Naumov, A Diagrammatic treatment of neutrino oscillations. *J. Phys. G* **37** (2010) 105014; arXiv:1008.0306 [hep-ph].
2. V.A. Naumov, D.S. Shkirmanov, Extended Grimus-Stockinger theorem and inverse square law violation in quantum field theory, *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2627, arXiv: 1309.1011 [hep-ph].
3. D.V. Naumov, On the theory of wave packets, *Письма в ЭЧАЯ* **10** (2013) 1055-1070 [Phys. Part. Nucl. Lett. **10** (2013) 642-650]; arXiv: 1309.1717 [quant-ph].
4. V.A. Naumov, D.S. Shkirmanov, *Mod. Phys. Lett. A* **30** (2015) 1550110; arXiv:1409.4669 [hep-ph].
5. Feng Peng An, ..., D.V. Naumov,... (Daya Bay Collaboration), Study of the wave packet treatment of neutrino oscillation at Daya Bay, *Eur. Phys. J. C* **77** (2017) 606; arXiv: 1608.01661 [hep-ex].
6. D.V. Naumov, V.A. Naumov, Quantum Field Theory of Neutrino Oscillations, *ЭЧАЯ* **51** (2020) 5-209 [Phys. Part. Nucl. **51** (2020) 1-106].