

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Кондратьева Валерия Петровича на диссертацию Самойлова Рудольфа Михайловича на тему « Детектирование осцилляций реакторных антинейтрино и поиск стерильного нейтрино в эксперименте Нейтрино-4», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Первые проблемы в нейтринном секторе Стандартной модели были связаны с дефицитом электронных нейтрино, долетающих до Земли от Солнца, доля которых оказалась в три раза меньше предсказанной Стандартной солнечной моделью. Для объяснения этого факта был предложен механизм нейтринных осцилляций, описывающий превращение нейтрино трех известных типов друг в друга, существование которого было подтверждено экспериментально. Однако в ряде нейтринных экспериментов были обнаружены аномалии, для объяснения которых была выдвинута гипотеза о существовании четвертого типа нейтрино, названного **стерильным**, так как по предположению эти частицы не участвуют в слабых взаимодействиях, а проявляют себя только через осцилляции с тремя типами активных нейтрино. С целью подтверждения этой гипотезы были предприняты новые эксперименты, такие как MiniBooNE (Booster Neutrino Experiment) и BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions). И хотя эти эксперименты дали положительный результат, его статистическая достоверность оказалась невысокой. Существует также ряд экспериментов, не согласующихся с гипотезой о стерильном нейтрино, к числу которых относится MicroBooNE с высокой статистической значимостью полученных результатов. В связи с этим **актуальность** темы диссертационной работы Р.М. Самойлова, посвященной поиску осцилляций реакторных электронных антинейтрино в стерильное состояние, определяется тем, что такого рода исследования должны либо опровергнуть, либо подтвердить проявление новой физики, не укладывающейся в Стандартную модель. Более того, результаты таких поисковых экспериментов имеют большую **научную значимость** для космологических теорий, так как стерильное нейтрино, если оно существует, может претендовать либо на роль темной материи, если его масса порядка сотен электронвольт и выше, либо на заметный вклад в

темную материю в случае легких нейтрино с массой в несколько электронвольт.

Диссертация Самойлова Р.М. состоит из шести глав.

**В первой главе** представлен обзор нейтринных экспериментов, результаты которых указывают на возможные осцилляции активных нейтрино через стерильное состояние, если допустить, что массовая разница  $\Delta m^2$  между стерильным и активными нейтрино составляет порядка  $1 \text{ эВ}^2$ . На основании этого делается вывод о возможности поиска легкого стерильного нейтрино в реакторных экспериментах, наблюдая быстрые осцилляции на сравнительно близких расстояниях от интенсивного источника нейтрино.

**Вторая и третья главы** посвящены описанию экспериментальной установки Нейтрино-4 и экспериментальным методикам измерений. Предложен метод относительных измерений, позволяющий сравнивать измеренные нормированные потоки нейтрино с ожидаемыми, которые определяются только параметрами осцилляций. Подробно рассмотрена конструкция детектора и его систем, которые позволяют проводить относительные измерения спектра реакторных антинейтрино на разных расстояниях от исследовательского реактора, регистрируя антинейтрино в реакции обратного бета-распада при существенном фоне от космического излучения и самого реактора. Рассмотрены различные методы подавления как фона случайных совпадений, связанных с гамма-излучением и тепловыми нейтронами, так и коррелированного фона, обусловленного быстрыми нейтронами. Убедительно показано, что установка пассивной защиты и применение активной защиты наряду с различными критериями отбора событий, связанными с выбором энергетических и временных порогов и секционированием детектора, позволяет получить соотношение сигнал/фон на уровне 50%.

**В четвертой главе** представлены результаты модельно-независимого анализа данных, полученных в сеансах измерений, проведенных с участием автора на установке Нейтрино-4. Выполненное МК моделирование позволило автору разработать схему выделения процесса осцилляций в виде зависимости от отношения пройденного антинейтрино расстояния  $L$  к его энергии  $E$ . Для усиления эффекта автором предложен метод когерентного сложения измерений для разных значений  $L$  и  $E$  с одинаковым отношением  $L/E$ . Оптимальные параметры осцилляций были найдены путем сравнения измеренной осцилляционной зависимости от параметра  $L/E$  с ожидаемой, полученной с помощью МК расчёта. Методом  $\Delta\chi^2$  установлено, что на уровне

достоверности  $2.9\sigma$  существует область параметров, соответствующая гипотезе осцилляций в стерильное состояние.

В **пятой** главе проведен исчерпывающий анализ возможных систематических ошибок, связанных как с флуктуациями коррелированного фона, так и с температурной нестабильностью регистрирующей аппаратуры и неоднородностью детектора. Особо следует отметить проведенную автором корректировку оценки уровня достоверности осцилляционной гипотезы, основываясь на теореме Уилкса и многократном Монте-Карло моделировании эксперимента с учетом фоновых условий. На основании полученных результатов делается **статистически обоснованный** вывод о том, что в эксперименте Нейтрино-4 осцилляции реакторных антинейтрино в стерильное состояние наблюдаются с уровнем достоверности  $2.7\sigma$ .

В **шестой** главе результаты эксперимента Нейтрино-4 сравниваются с ограничениями на параметры стерильного нейтрино, полученными в ряде других экспериментов. Несмотря на то, что есть эксперименты, не согласующиеся с гипотезой о стерильном нейтрино, результат Нейтрино-4 коррелирует с результатами трех галлиевых экспериментов BEST, SAGE и GALLEX, в которых наблюдается эффект осцилляций. Более того, выполненный автором совместный анализ результатов этих экспериментов и эксперимента Нейтрино-4 позволил поднять уровень достоверности полученных параметров осцилляций до величины  $5.8\sigma$ . Однако не обсуждается, насколько последние результаты эксперимента MicroBooNE, отрицающего эффект осцилляций, закрывают область предсказаний эксперимента Нейтрино-4, а также насколько полученные результаты согласуются с космологическими ограничениями на сумму масс всех типов нейтрино.

Несмотря на **высокий научный** уровень диссертационной работы, есть замечания к ее оформлению. Вторая глава перегружена избыточными техническими деталями, что заметно увеличило ее объем. Кроме того, текст содержит много пунктуационных ошибок и опечаток, например, "квадратное отклонение" от среднего значения (стр.137).

С учетом всего вышесказанного полагаю:

Содержание диссертации Самойлова Рудольфа Михайловича на тему: «Детектирование осцилляций реакторных антинейтрино и поиск стерильного нейтрино в эксперименте Нейтрино-4» соответствует научной специальности

1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертация Самойлова Р.М. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития физики атомных ядер и элементарных частиц.

Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук соискателем ученой степени мною не установлено. Диссертация **соответствует** критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете» и рекомендована к защите в СПбГУ.

Член диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
профессор кафедры ядерно-физических  
методов исследования физического  
факультета Санкт-Петербургского  
государственного университета

Кондратьев В.П.

20 декабря 2023 г.



20.12.2023



Текст документа размещен  
в открытом доступе  
на сайте СПбГУ по адресу  
<http://spbu.ru/science/expert.htm>