

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Вечернина Владимира Викторовича 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 научной специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертационная работа Самойлова Р.М. посвящена чрезвычайно актуальной физической задаче экспериментальному изучению нейтринных осцилляций и поиску стерильного нейтрино. В рамках канонической Стандартной Модели (СМ) предполагается, что, в отличие от других фермионов, у нейтрино присутствуют только левые компоненты, причем все нейтрино являются безмассовыми. Однако открытие явления нейтринных осцилляций доказало наличие масс у нейтрино, поскольку осцилляции возможны только между нейтрино с разными массами. Более того в результате нескольких дальнейших экспериментов были получены указания на то, что наблюдаемый характер нейтринных осцилляций не удается до конца объяснить в рамках теории с тремя активными нейтрино. Это привело к гипотезе о существовании еще одного (или, возможно, нескольких) стерильных нейтрино, которые являются фермионами, не взаимодействующими с калибровочными полями СМ, но смешивающимися с тремя активными нейтрино СМ.

В диссертационной работе Самойлова Р.М экспериментально изучается процесс осцилляций электронного антинейтрино в стерильное состояние в предположении о существовании стерильного нейтрино с массой ~ 1 эВ. С этой целью проведено измерений спектров реакторных антинейтрино от исследовательского реактора СМ-3 с малым размером активной зоны на различных коротких расстояниях $\sim 6-12$ метров для выявления искажений в спектрах вследствие осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние. Детектирование антинейтрино происходило через реакцию обратного бета распада, энергия антинейтрино определяется по энергии позитрона. Использовался метод относительных измерений в условиях фона на поверхности Земли.

Диссертация состоит из Введения, шести глав и Заключения. В начале главы 1 изложена теория нейтринных осцилляций с тремя активными нейтрино. В наиболее развернутом третьем разделе этой главы (1.3) изложена модель с тремя активными и одним стерильным нейтрино, а также результаты 5 экспериментов, которые не находят объяснения в рамках модели только с тремя активными нейтрино (т.н. аномалии).

Глава 2 посвящена описанию подготовки эксперимента Нейтрино-4. Здесь важно отметить, изложенный в первом параграфе, метод относительных измерений, заключающийся в сравнении измеренных в различных условиях величин, за счёт чего из анализа экспериментальных данных исключается сравнение со значениями, полученными в результате расчётов. Далее идет подробное описание детектора, порядка набора данных, места проведения эксперимента, включая описание реактора СМ-3. В пятом параграфе приведены результаты измерения фоновых условий внутри защиты. В шестом параграфе

описаны результаты борьбы с фоном, в том числе с использованием секционирования, что крайне важно для данного эксперимента.

Глава 3 содержит подробное описание детектора, используемого в эксперименте Нейтрино-4, результаты его тестирования, моделирования и калибровки. Приведена схема передвижения детектора. Анализ стабильности измерений и мониторинга фона, который является одной из наиболее важных проблем эксперимента.

В Главе 4 описана процедура анализа данных и извлечения параметров осцилляций. Для этого используется описанный выше во второй главе спектрально-независимый метод анализа данных, представляющий их в результате в виде зависимости от отношения L/E , где L - длина пробега нейтрино, а E - его энергия.

Глава 5 посвящена анализу всевозможных систематических эффектов, который включает учет фона от быстрых нейтронов. Проверку спектральной независимости используемого метода анализа данных. Анализ влияния на результаты условий измерений, зависящих от мощности реактора. Анализ влияния не одинаковой эффективности регистрации нейтринных событий различными секциями детектора. Проверка устойчивости результата при исключении данных с некоторых секций. Монте-Карло моделирование эксперимента с учётом статистической точности.

Глава 6 содержит подробное сравнение параметров осцилляции электронного антинейтрино в стерильное нейтрино с параметрами, полученными в других экспериментах.

В целом диссертация производит очень хорошее впечатление. Она написана ясным научным языком, содержит всестороннее введение в предмет. Прекрасно оформлена. Изучаемые проблемы анализируются всесторонне и тщательно.

Главным преимуществом эксперимента Нейтрино-4 по сравнению с подобными является использование реактора СМ-3, который имеет компактную активную зону при достаточно высокой тепловой мощности - 90 МВт. Это позволяет поместить детектор достаточно близко от активной зоны на различных коротких расстояниях ~6-12 метров для выявления искажений в спектрах антинейтрино вследствие их осцилляций в стерильное состояние. Близость установки к активной зоне реактора дает возможность более точно учесть геометрию осцилляций и таким образом снизить погрешности в получаемых результатах.

Однако при этом возникают проблемы, связанные с фоном, поскольку реактор СМ-3, на котором проводится исследование, находится на поверхности Земли. Этой проблеме в работе уделено особое внимание. Подавление фона осуществляется различными методами: использованием пассивной и активной защиты, отбором коррелированных событий, секционированием детектора, при этом используются геометрические параметры источника и детектора с учётом разбиения на отдельные секции.

Особо следует отметить, предложенный в работе модельно независимый анализ изменения формы спектра антинейтрино с расстоянием путем нормировки на усреднённый по всем расстояниям спектр. При этом полученные в эксперименте

отношения представляются в виде зависимости от переменной L/E , где L - расстояния между точкой рождения антинейтрино в активной зоне реактора и точкой, в которой произошла реакция обратного бета распада, а E - энергия антинейтрино. В такой форме удастся наглядно сравнивать экспериментальную зависимость с ожидаемой при различных значениях параметров осцилляций. Так из Рисунка 74 видно, что в переменных E и L эксперимент Neutrino-4 охватывает гораздо более широкую область, чем эксперименты STEREO и PROSPECT.

В результате измерений был обнаружен эффект осцилляций в стерильное состояние на уровне достоверности 2.7σ , что является очень значительным результатом, но все же не позволяет сделать окончательный вывод о существовании стерильного нейтрино с массой порядка $\sim 1\text{эВ}$. Для чего необходимо продолжить данный эксперимент.

Кроме того возникает вопрос, связанный с предложенной в работе Д. Горбунова [D.Gorbunov (INR RAS) Testing nuMSM with present and next generation experiments - 21st Lomonosov Conference, 19-25 August 2023, MSU, Moscow. <https://lomcon.ru/>] моделью, в которой в дополнение к SM вводятся не одно, а три стерильных майорановских нейтрино с массами, соответственно, порядка 10 КэВ и несколько ГэВ . Эта перспективная модель позволяет одновременно объяснить нейтринные осцилляции, барионную асимметрию Вселенной, явление темной материи. Можно ли утверждать, что если результат, представленный в диссертационной работе будет со временем, подтвержден на уровне более 5σ , то эту модель нужно будет считать закрытой? Или полученные в диссертации оценки существенно опираются на предположение о существовании только одного стерильного нейтрино $(3+1)$? Насколько являются они в этом случае модельно независимыми?

Данные замечания никоим образом не умаляют достоинств диссертационной работы, которая представляет собой цельное законченное научное исследование, содержащее новые результаты, которые имеют важное значение для физики высоких энергий и физики элементарных частиц на самых ее передовых рубежах.

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 является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для развития физики элементарных частиц и физики высоких энергий.

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.

Соискатель Самойлов Рудольф Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Член диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, ст.науч.сотр.,
профессор, Санкт-Петербургский
государственный университет

Вечернин

Вечернин В.В.

09.01.2024