

Отзыв официального оппонента
доктора физико-математических наук
Пахлова Павла Николаевича
на диссертационную работу Шайхиева Артура Тагировича
«Поиск тяжелых нейтрино в распадах положительных каонов»,

представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация А.Т. Шайхиева посвящена поиску стерильных тяжёлых нейтрино в смешивании с мюонными нейтрино из распадов остановленных заряженных К-мезонов в эксперименте E949 в Брукхевенской лаборатории (США).

Во многих расширениях Стандартной модели предсказывается существование тяжёлых стерильных нейтрино, слабо смешивающихся с обычными нейтрино. Хотя на настоящий момент не существует экспериментальных доказательств существования стерильных нейтрино, привлекательность этих моделей остается предельно высокой. Синглетные (по всем калибровочным группам Стандартной модели) лептоны посредством «see-saw» механизма позволяют объяснить малые массы нейтрино и их осцилляции. Кроме того, в предложенных моделях удается описать широкий спектр известных явлений за рамками Стандартной модели, от существования тёмной материи до барионной асимметрии Вселенной, возникающей за счет лептогенезиса. Количество стерильных нейтрино в различных моделях может варьироваться, а диапазон их возможных масс остается широким, от долей до 10^{15} электронвольт. Существующие ограничения на параметры (массы и константы смешивания) из космологии и астрофизики являются лишь косвенными и модельно-зависимыми, поэтому экспериментальные поиски тяжёлых нейтрино являются важной задачей для развития теории. Таким образом, актуальность представленной работы бесспорна.

В представленной диссертации получен рекордный предел на параметр смешивания $U_{\mu n}$ в диапазоне масс тяжёлого нейтрино 175 – 300 МэВ. Прежде всего мне хотелось бы отметить решающий вклад А.Т. Шайхиева в получение представленного экспериментального результата. Автором были выполнены все необходимые аспекты работы от разработки метода и оптимизации отбора событий до вычисления окончательного значения верхнего предела параметра смешивания в зависимости от массы стерильного нейтрино.

В диссертации представлен довольно полный теоретический обзор, а также приведены существующие к моменту выполнения работы экспериментальные ограничения на параметры смешивания стерильного нейтрино (глава 1). В главе 2 подробно описан эксперимент E949 и методика работы на нём, представлены основные подсистемы детектора и даны их характеристики, описан триггер и процедура моделирования событий. В главе 3 отдельно рассмотрено вычисление эффективности регистрации мюона из сигнального процесса как функция импульса мюона. Исследование эффективности является исключительно важным аспектом работы для вычисления верхнего предела на параметр смешивания: необходимо получить достоверную картину о том, что в широком диапазоне импульсов мюона чувствительность к сигнальному процессу остается высокой. Как сильную сторону представленного анализа следует отметить, что для измерения эффективности помимо моделирования использовались данные с альтернативными условиями триггерного отбора. Четвёртая глава

посвящена калибровке импульсного разрешения детектора и исследованию фонового процесса $K \rightarrow \mu\nu(\gamma)$, являющегося одновременно калибровочным каналом для проверки эффективности и разрешения детектора. Полученные в этой главе результаты показывают достоверность основного измерения. В этой же главе приводится метод идентификации сигнального процесса и статистического анализа для получения верхнего предела.

Результаты поиска представлены в пятой главе. В импульсном спектре отобранных мюонных кандидатов отсутствуют значимые пики, соответствующие двухчастичному распаду $K \rightarrow \mu X$, на основании чего был вычислен верхний предел на параметр смешивания как функция массы тяжёлого нейтрино. Полученные значения верхнего предела на параметр смешивания $U_{\mu n}$ в диапазоне масс тяжёлого нейтрино 175 – 300 МэВ существенно ниже, чем остававшиеся лучшими в течение многих лет результаты специализированных экспериментов по поиску тяжёлого нейтрино в КЕК и ЦЕРНе.

По ходу изучения диссертации возникли следующие замечания.

- В представлении работы используется большое количество аббревиатур, принятых внутри коллаборации, но мало что говорящих внешнему читателю, таких как TRKTIM, STLAY, BAD_STC, UTC, RDUTM, TGPVCUT, TARGET, ICBIT, DCBIT, UTCQULT, COS3D, ZFRF, ZUTOUT, DELC и множество других. Убежден, что можно было построить изложение таким образом, чтобы, не теряя строгости, избежать излишне сложной терминологии.

- В работе приведен длинный список критериев отбора событий, об осмысленности применения которых можно только догадываться. Следовало расставить акценты и выделить принципиальные моменты отбора событий, а также предоставить иллюстрации к их эффективности для подавления фона (например, привести картинки эффективности для сигнала и факторы подавления фоновых процессов как функции массы нейтрино или импульса мюона).

- Гипотетически существует область больших значений $U_{\mu n}$, при которых время жизни тяжёлого нейтрино мало, и оно успевает распасться в детекторе. В этом случае искомый сигнал, возможно, отбрасывается триггером и/или критериями отбора. Строгости ради, такую возможность следовало обсудить в диссертации и показать, что полученный верхний предел действительно перекрывает всю область значений, включая аномально большие $U_{\mu n}$ и $U_{e n}$.

- Приведённый импульсный спектр мюонов на рисунке 5.1 желательнее было сравнить с ожиданиями моделирования для $K \rightarrow \mu\nu$ и $K \rightarrow \mu\nu\nu$. Это послужило бы наглядной демонстрацией того, что эффективности изучены и поняты.

- Хотя в конечном результате учитывается систематическая ошибка, процедура оценки её вклада в конечный результат не приведена в диссертации. Очевидно существуют погрешности при определении как эффективности восстановления, так и верхнего предела на число сигнальных событий, связанные с параметризацией фона, выбором интервала аппроксимации, неопределённостями в разрешении и др. Если эти ошибки малы, следовало указать и обосновать это.

- В работе не упоминается процесс смешивания тяжёлого нейтрино с электронным нейтрино, за исключением обзора предшествующих экспериментальных работ на эту тему. Сам собой напрашивающийся вопрос, почему наряду с поиском смешивания $\nu_n \leftrightarrow \nu_\mu$ не сделано попыток поиска также $\nu_n \leftrightarrow \nu_e$, так и остаётся без ответа.

Приведенные замечания, однако, не меняют общей положительной оценки диссертации, представляющей собой хорошо выполненное и законченное экспериментальное исследование. Диссертация содержит иллюстрационный материал, отражающий разнообразные аспекты экспериментальной работы, и демонстрирует хоро-

шее знание автором современных методов анализа данных и методики эксперимента.

Не вызывает сомнений новизна исследований, представленных в диссертации А.Т. Шайхиева. Как уже подчеркивалось, верхний предел на $U_{\text{дн}}$ в диапазоне масс тяжёлого нейтрино 175 – 300 МэВ был улучшен на порядок по сравнению с предыдущими измерениями. Следует отметить, что полученные значения уже близки к нижнему пределу на параметр смешивания в этом диапазоне масс, полученные из космологии.

Результаты, полученные в данной работе, имеют большое значение как для теории, так и для экспериментальных исследований в области физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. Они могут быть использованы в крупнейших мировых научных центрах, таких как Институт ядерных исследований РАН (г. Москва), Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск), Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва), Институт физики высоких энергий (г. Протвино), Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна), INFN (г. Фраскати, Италия), ЦЕРН (г. Женева, Швейцария), КЕК (г. Цукуба, Япония), СЛАК (г. Стэнфорд, США), ИНЕР (г. Пекин, Китай) и других.

Основные результаты представленной работы многократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в России и за рубежом, а также на международных конференциях и опубликованы в ведущих российских и международных журналах “Ядерная физика” и “Physical Review”. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, представленная диссертационная работа является важным законченным научным исследованием. Диссертация полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.16, а её автор, А.Т. Шайхиев, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Доктор физико-математических наук,
начальник лаборатории физики тяжёлых кварков и лептонов
НИЦ "КИ" ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ"

П.Н. Пахлов

28 мая 2015 г.

Россия, Москва, ул. Б. Черёмушкинская, 25, ИТЭФ

тел.: (499)1270558, e-mail: pakhlov@itep.ru

Подпись П.Н. Пахлова заверяю

Учёный секретарь НИЦ "КИ" ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ",

кандидат физико-математических наук В.В. Васильев

Пахлов Павел Николаевич,

Доктор физико-математических наук, начальник лаборатории физики тяжёлых кварков и лептонов (№204) НИЦ "КИ" ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ".

Основные публикации по теме защиты:

1. D. Liventsev, ..., P. Pakhlov, *et al.* (Belle Collaboration), «Search for heavy neutrinos at Belle», Phys. Rev. D87, no. 7, 071102 (2013);
2. C. Oswald, ..., P. Pakhlov, *et al.* (Belle Collaboration), «Measurement of the inclusive semileptonic branching fraction $B_s^0 \rightarrow X \ell^+ \nu$ at Belle», Phys. Rev. D87, no. 7, 072008 (2013), Phys. Rev. D90, no. 11, 119901 (2014);
3. Y. Yook, ..., P. Pakhlov, *et al.* (Belle Collaboration), «Search for $B^+ \rightarrow e^+ \nu$ and $B^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ decays using hadronic tagging», Phys. Rev. D91, no. 5, 052016 (2015);
4. Y. Miyazaki, ..., P. Pakhlov, *et al.* (Belle Collaboration), «Search for lepton flavor violating and lepton number violating $\tau \rightarrow \ell h h'$ decay modes», Phys. Lett. B719, 346 (2013);
5. I. Adachi, ..., P. Pakhlov, *et al.* (Belle Collaboration), «Evidence for $B^- \rightarrow \tau^- \nu_\tau$ with a hadronic tagging method using the full data sample of Belle», Phys. Rev. Lett. 110, no. 13, 131801 (2013);
6. O. Lutz, ..., P. Pakhlov, *et al.* (Belle Collaboration), «Search for $B \rightarrow h^{(*)} \nu \nu$ with the full Belle Y(4S) data sample», Phys. Rev. D87, no. 11, 111103 (2013);
7. J. Stypula, ..., P. Pakhlov, *et al.* (Belle Collaboration), «Evidence for $B^- \rightarrow D_s^+ K^- \ell^- \nu$ and search for $B^- \rightarrow D_s^{*+} K^- \ell^- \nu$ », Phys. Rev. D86, no. 7, 072007 (2012);
8. H. Ha, ..., P. Pakhlov, *et al.* (Belle Collaboration), «Measurement of the decay $B^0 \rightarrow \pi^- \ell^- \nu$ and determination of $|V_{ub}|$ », Phys. Rev. D83, no. 7, 071101 (2011).