

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Студеникина Александра Ивановича на диссертацию Коновалова Алексея Михайловича «Обнаружение процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре и определение его сечения на ядрах Cs и I», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Диссертационная работа А.М. Коновалова посвящена проведению комплексного исследования процесса когерентного упругого рассеяния нейтрино на атомном ядре с целью его первой в мире регистрации и измерения сечения указанного рассеяния на ядрах атомов CsI, усредненного по спектру энергий нейтрино.

Впервые возможность процессов когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах теоретически была предсказана 40 лет тому назад. При достаточно малом переданном импульсе возникают условия для интерференции амплитуд рассеяния нейтрино на нуклонах ядра, приводящей к пропорциональности полного сечения рассеяния квадрату числа нейтронов в ядре, что делает данный процесс наиболее вероятным каналом взаимодействия нейтрино низких энергий с веществом, состоящим из атомов средних и тяжелых элементов.

Исследования когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах (CEvNS, the Coherent Elastic Neutrino Nucleus Scattering) имеют **фундаментальное значение** для физики нейтрино и для физики микромира в целом. Измерение сечения таких процессов может рассматриваться как один из тестов справедливости Стандартной модели взаимодействия частиц и как эффективный способ получения ограничений на эффекты новой физики. В последние годы на основе данных по CEvNS получены значения угла Вайнберга, ограничения на электромагнитные характеристики и нестандартные взаимодействия нейтрино. Исследования CEvNS могут использоваться при поиске стерильных нейтрино и новых частиц темной материи. Экспериментальные и теоретические исследования CEvNS представляют собой эффективный инструмент для изучения структуры атомного ядра.

Практическое значение проведения исследований когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах обусловлено тем, что они приводят к существенному технологическому прогрессу в создании компактных детекторов, которые могут быть использованы для мониторинга состояния ядерных реакторов.

Актуальность выбранной тематики обусловлена тем, что в настоящее время экспериментальные исследования когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах ведутся (или планируются) в почти двух десятках лабораторий по всему миру. В том числе, такие исследования ведутся в экспериментах ν GeN и RED-100 на Калининской атомной станции.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, пяти приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 169 страниц, в ней имеется 87 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 194 наименования.

Во **Введении** содержится краткое описание сути процесса когерентного упругого рассеяния нейтрино на атомных ядрах и экспериментальных проблем, связанных с его регистрацией. В этой части диссертации также кратко обсуждается актуальность

выбранной темы, формулируется цель работы и решаемые для её достижения задачи. Во введении сформулированы результаты, выносимые на защиту, их научная новизна и значимость. Представлены обоснование достоверности результатов и их апробация, отмечен ведущий личный вклад диссертанта в получение этих результатов.

В **Главе 1** диссертации процесс CEvNS обсуждается более подробно. В ней приводится выражение для его дифференциального сечения, а также развёрнуто описывается актуальность исследования CEvNS. Этот процесс подходит для поиска нестандартных, в том числе электромагнитных, взаимодействий нейтрино с кварками. Он может быть использован для получения информации о внутренней структуре тяжёлых ядер, а также об эволюции угла электрослабого смешивания с масштабом переданного импульса. Существует потенциальная возможность создания компактных нейтринных детекторов на основе CEvNS для мониторинга состояния ядерных реакторов или научных исследований. Например, поиска стерильных нейтрино. В этой главе также приводится обзор свойств источников нейтрино, подходящих для исследования CEvNS, а также обзор экспериментов по этой тематике.

Глава 2 посвящена эксперименту COHERENT на ускорителе Spallation Neutron Source (SNS). В ней описывается процесс рождения нейтрино на SNS и их свойства – распределение по энергиям и временной профиль появления. В этой главе обсуждается экспериментальная программа COHERENT, включающая несколько установок для исследования CEvNS, неупругих взаимодействий нейтрино с ядрами, а также фоновых условий в месте проведения измерений.

В **Главе 3** подробно описана экспериментальная установка на основе сцинтилляционного кристалла CsI[Na], экспозиция которой происходила на SNS в 2015-2019 годах. Обсуждается устройство пассивной защиты установки и система сбора данных. В этой главе описаны обработка и анализ калибровочных данных с источниками ^{241}Am и ^{133}Ba . Эти данные позволили определить световой выход кристалла CsI[Na], его однородность, а также эффективность относительно CEvNS некоторых отборов, которые используются для подавления числа фоновых событий в CsI[Na].

Глава 4 посвящена первой регистрации CEvNS на основе данных CsI[Na], полученных за 2015-2017 годы на SNS. В ней обсуждаются верификация временной привязки триггера установки, подтверждение энергетической калибровки и стабильности светового выхода кристалла. Подробно описан подход к анализу данных, суть которого заключается в сравнении спектров энерговыделений и времени появления сигналов CsI[Na] в совпадении и вне совпадения с синхроимпульсом ускорителя. Результаты анализа свидетельствуют о первом в мире наблюдении сигнала от CEvNS. Значимость отклонения нулевой гипотезы составила около 7σ .

В **Главе 5** обсуждается уточнение отклика CsI[Na] на ядра отдачи низких энергий – доминирующего источника систематической неопределённости в эксперименте на SNS. В ней описаны калибровки CsI[Na] при помощи нейтронных пучков, анализ соответствующих данных и его результаты, позволившие подавить соответствующую неопределённость до уровня ниже статистической неопределённости эксперимента.

В **Главе 6** представлены результаты полной экспозиции CsI[Na] на SNS в 2015-2019 годах. В ней рассматриваются различные модификации процедуры анализа и отборов, призванные упростить оценку различных систематических эффектов и исправить ряд недочётов, присутствовавших в анализе 2017 года. Анализ полной статистики подтвердил наблюдение CEvNS, значимость отклонения нулевой гипотезы возросла до $\sim 12\sigma$. На основе этого анализа было получено сечение CEvNS на ядрах атомов CsI. Кроме того, были сделаны оценки на сечения CEvNS отдельно электронных и мюонных нейтрино

(значимость каждого менее 3σ), а также значение электрослабого угла смешивания. Результаты измерения позволили установить ограничения на нестандартные взаимодействия нейтрино с кварками.

В **Заключении** отмечены основные результаты диссертационной работы: первое в мире наблюдение УКРН и измерение сечения этого процесса на ядрах атомов CsI.

В **приложения** вынесены технические детали процедуры обработки данных, обсуждение фона от нейтронов, коррелированных с синхроимпульсом SNS, а также некоторые методологические вопросы измерения отклика CsI[Na] на ядра отдачи низких энергий, в том числе – вопрос линейности отклика использовавшегося фотоэлектронного умножителя.

Научная новизна и значимость работы состоит в том, что в ней изложены результаты по проведенной впервые регистрации процесса когерентного упругого рассеяния нейтрино на атомном ядре и измерения сечения указанного рассеяния на ядрах атомов CsI. Сформулированные в работе положения в высшей степени **обоснованы**. **Достоверность** результатов обусловлена тем, что они опубликованы автором в четырех высокорейтинговых рецензируемых изданиях, индексируемых международными базами данных (Web of Science, Scopus) и рекомендуемых ВАК. Они прошли апробацию в виде докладов на многочисленных международных и российских конференциях. **Автореферат** правильно и полностью отражает содержание диссертации.

По диссертации возникли следующие **замечания и вопросы**.

1. По используемым терминам и соответствующим сокращениям (аббревиатурам).

В большинстве англоязычных статей по теме диссертации и четырех статьях автора (в которых также на английском языке изложены основные результаты диссертации) для обозначения термина «когерентное упругое рассеяние нейтрино на ядре» (в английской транскрипции – the Coherent Elastic Scattering of Neutrino on Nucleus) используется сокращение CEvNS. В диссертации автор ввел и использует русскоязычный термин «**упругое когерентное** рассеяние нейтрино на ядрах атомов» и соответствующее сокращение УКРН. Представляется нецелесообразным: а) осуществить перестановку порядка следования первых двух слов в названии процесса и 2) отказываться от использования общепринятого термина CEvNS. Отметим, что в тексте диссертации используются многочисленные англоязычные сокращения для ряда терминов (например, SNS, ORNL, TUNL, ROI, AC ROI).

В то же время, при использовании англоязычных сокращений необходимо приводить их полную расшифровку хотя бы на английском языке (расшифровка термина ROI отсутствует в тексте).

2.

При обсуждении функции светового выхода кристалла (Глава 5) используется аппроксимация видимого светового выхода кристалла $E_{\text{вид}}$ полиномом четвертого порядка по энергии ядра отдачи $E_{\text{яо}}$. Указанный метод аппроксимации экспериментальных данных нуждается в обосновании.

3.

В комментариях к общей формуле (1.1) для сечения когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядре, которая используется для описания реального эксперимента, указано что $q^2 > 0$. Однако, нет информации об используемой сигнатуре метрики пространства-времени.

4.

В Главе 3 подробно излагается процедура калибровки детектора источником ^{241}Am , обсуждаются все возможные эффекты, влияющие на точность калибровки. Однако, как следует из содержания Главы 4, эта калибровка была предварительная, в то время как в эксперименте калибровка осуществлялась по гамма-квантам от захвата нейтронов от источника ^{252}Cf . К сожалению, процедура калибровки на этом процессе объяснена очень кратко, хотя, как кажется, она наиболее важна, поскольку выполнялась в процессе набора данных. Недостаточно подробное изложение указанной калибровки с нейтронным источником можно отнести к недостаткам диссертации.

Данные замечания и отмеченные недостатки не снижают ценности проведенного исследования и не влияют на общую высокую оценку диссертации.

Заключение

Диссертация Коновалова А.М. «Обнаружение процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре и определение его сечения на ядрах Cs и I» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Коновалов Алексей Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Официальный оппонент:

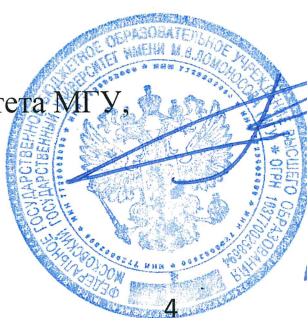
Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика», профессор кафедры теоретической физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, тел.: +7 495 9395033, e-mail.: studentik@srd.sinp.msu.ru

Студеникин Александр Иванович



2 апреля 2024 года

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор



В.В. Белокуров

Список основных работ официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Студеникина А.И. по тематике диссертации Коновалова А.М. в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Kouzakov K.A., Lazarev F.M. and Studenikin A.I., Neutrino Electromagnetic Properties in Elastic Neutrino-Proton Scattering // *Physics of Atomic Nuclei* – 2023 – Vol. 86, No.3, p. 257-265
2. Donchenko G.V., Kouzakov K.A. and Studenikin A. I., Elastic Neutrino-Atom Scattering as a Probe of Neutrino Millicharge and Magnetic Moment // *JETP Letters* – 2023 – Vol. 117, p. 879–883
3. Abusleme A., Studenikin A. et al., Sub-percent precision measurement of neutrino oscillation parameters with JUNO // *Chinese Physics C* – 2023 – Vol. 46, No. 12 p. 123001
4. Kurashvili P., Studenikin A. et al., Quantum spin-flavour memory of ultrahigh-energy neutrino // *The European Physical Journal Plus* – 2022 – Vol. 137, p. 234
5. Kurashvili P., Studenikin A. et al., Quantum witness and invasiveness of cosmic neutrino measurements // *Physical Review D* – 2021 – Vol. 103, No. 3, p. 036011
6. Popov A. and Studenikin A., Manifestations of nonzero Majorana CP-violating phases in oscillations of supernova neutrinos // *Physical Review D* – 2021 – Vol. 103, No.11, p. 115027
7. Kurashvili P., Studenikin A. et al., Coherence and mixedness of neutrino oscillations in a magnetic field // *The European Physical Journal C* – 2021 – Vol. 81, p. 323
8. Cadeddu, M., Studenikin A. et al., Potentialities of a low-energy detector based on ^4He evaporation to observe atomic effects in coherent neutrino scattering and physics perspectives // *Physical Review D* – 2019 – Vol. 100, No.7, p. 073014