

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Титова Олега Александровича
“Теоретическое исследование электронного захвата в атомах и ионах с приложениями к
проблемам физики нейтрино”,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа Титова О.А. посвящена исследованию двух эффектов в процессах захвата атомного электрона ядром.

Первый эффект связан с зависимостью сечения захвата электрона водородоподобным ионом с ненулевым спином ядра из определенного спинового состояния электрона. Для некоторых комбинаций спиновых состояний ядра и электрона соответствующее сечение захвата сильно подавлено. Управляя спиновым состоянием электрона в ионе при помощи лазера можно получить источник нейтрино с определенной энергией. Такая задача актуальна для β -пучков, т.к. позволяет контролировать β -распады и электронные захваты ядер в ускорителе.

Второй эффект определяется нарушением пространственной четности в слабых взаимодействиях, что приводит к асимметрии вылета нейтрино относительно спина ядра. Таким образом, выстроив ядерные спины в определенном направлении можно получить асимметричное распределение импульса, покидающего объем с ядрами. В итоге, на объем будет действовать сила, которую можно измерить. Поскольку таких измерений пока что не было, эта задача имеет актуальность.

Таким образом, представленные в диссертационной работе исследования, не вызывает сомнений, актуальны.

Диссертация Титова О.А. состоит из введения, 3 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 145 наименований. Объем диссертации составляет 105 страниц, включая 5 рисунков и 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели диссертационной работы, отмечена научная новизна и практическая значимость результатов, обоснована их достоверность, перечислены выносимые на защиту положения.

В первой главе даётся обзор теории слабых низкоэнергетических лептон-нуклонных процессов, используемой для описания электронного захвата. Рассматриваются особенности электронного захвата. Перечисляются сопутствующие ему процессы, как первичные, конкурирующие с ним, так и вторичные, происходящие после него. Обсуждается распределение энергии, выделяющейся при захвате электрона, и условия, при которых этот процесс возможен. Приведены соотношения, позволяющие оценить отношение вероятностей захвата электронов с разных оболочек и отношение вероятностей электронного захвата и β^+ -распада.

Во второй главе подробно обсуждаются пучки электронных нейтрино с модулируемой монохроматической составляющей. Обсуждается роль ненулевого спина ядра для формирования сверхтонкой структуры уровней электрона в ионе и связь этого явления с вероятностью электронного захвата ядром. Приведены оценки для чисел событий

взаимодействия нейтрино от β -пучков с модулируемой монохроматической структурой спектра энергии. Сформулированы критерии отбора для возможных ядер-источников двух типов пучков электронных нейтрино: полностью монохроматических модулируемых ЕС-пучков и комбинированных β +ЕС-пучков с модулируемой монохроматической компонентой. Приведены кандидаты в соответствующие ядра-источники нейтрино.

В третьей главе обсуждается возможность наблюдения макроскопической силы отдачи от нейтринного излучения, действующей на радиоактивный источник, ядра которого поляризованы и распадаются за счёт электронного захвата. В этой главе обобщаются предыдущие результаты на случай произвольных спинов начального и конечного ядер для разрешенных переходов. Учитывается угловое распределение вылетающего нейтрино, что приводит к пропущенному в других работах множителю $1/3$. Вычисляется сила, действующая на радиоактивный образец. Рассматриваются физические задачи, которые можно решить с помощью предложенного эксперимента по измерению силы отдачи. Показано, что измерение массы нейтрино в таком эксперименте неосуществимо. Отмечается возможность проверки фундаментальных симметрий, таких как лоренц-инвариантность, определения относительных вероятностей захвата электрона с разных оболочек, а также, для изотопов, распадающихся за счёт смешанных фермиевских и гамов — теллеровских переходов, определения относительных вкладов этих переходов.

Рассматриваются перспективы дополнительного увеличения чувствительности предложенного эксперимента. Указаны возможности по повышению поляризации ядер и добротности кантилеверов.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, состоит в следующем.

В работе впервые предложено применение метода электромагнитной модуляции вероятности электронного захвата движущихся водородоподобных ионов. Предложен список ядер, водородоподобные ионы которых могут выступать в качестве источников полностью монохроматических пучков нейтрино или в качестве интенсивных источников частично монохроматических пучков нейтрино.

Впервые выполнено последовательное вычисление силы отдачи от нейтринного излучения, действующей на источник, ядра которого поляризованы и распадаются по каналу электронного захвата за счёт разрешённого ядерного перехода общего вида.

Практическая значимость заключается в следующих положениях.

В работе показано, что за счёт сверхтонкого эффекта можно модулировать монохроматическую компоненту нейтринного пучка. Модулируемые пучки с монохроматической составляющей могут быть использованы в будущих нейтринных экспериментах с длинной базой, направленных на поиск CP-нарушения в лептонном секторе, определение иерархии масс нейтрино и измерение углов смешивания. Также эти пучки могут быть использованы для исследования процессов взаимодействия нейтрино с ядрами, в том числе реакции когерентного упругого рассеяния. Кроме того, в перспективе такие пучки могут быть применены для изучения строения Земли и нейтринных коммуникаций.

Предложенный в работе способ измерения силы отдачи от нейтринного излучения в перспективе может быть использован для проверки фундаментальных симметрий, таких как лоренц-инвариантность, определения относительных вероятностей захвата электрона с

разных оболочек, а также определения ядерных матричных элементов в смешанных фермиевских и гамов — теллеровских переходах.

Полученные результаты с высокой степенью достоверны. Результаты получены с использованием общепринятого математического аппарата теоретической физики. Все выводы работы согласуются с современными научными представлениями о физике элементарных частиц и фундаментальных взаимодействиях.

Апробация результатов происходила на тематическом семинаре в НИЦ «Курчатовский институт» «Физика нейтрино» (Москва, 2015 г.), международной конференции по физике частиц и астрофизике (Москва, 2015, 2016, 2018 гг.), зимней школе ИТЭФ (Москва, 2016 г.), международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Дубна, 2016 г.), Курчатовской молодежной научной школе (Москва, 2014, 2016, 2017 гг.), международной школе «Ядерная физика и астрофизические приложения» (Дубна, 2017 г.), научной конференции МФТИ (Москва, 2017, 2018 гг.), международной конференции по нейтринной физике и астрофизике (Гейдельберг, 2018 г.). Таким образом, представленные к защите положения были всесторонне обсуждены на соответствующих тематике форумах.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации в высокой степени обоснованы.

По диссертационной работе можно сделать некоторые замечания.

1. Автор неоднократно на страницах своей диссертации пишет про массу электронного нейтрино. Это неточность, поскольку у флэйворных состояний нейтрино нет определенной массы.
2. В первой главе, в которой вводятся элементы теории слабых взаимодействий, используется устаревшая метрика, в которой присутствует матрица γ_4 .
3. Там же правила написания ковариантного суммирования игнорируются. Эта небрежность допустима для академика, но нежелательна в кандидатской диссертации.
4. Во второй главе, на стр. 30 написано “и невозможен, точнее, сильно подавлен, с уровня $F = 3/2$ ”. “Сильно подавлен” не количественное утверждение. Насколько сильно?
5. На стр.54 есть неточность в обсуждении когерентного рассеяния. Нейтрино и антинейтрино не совсем одинаково рассеивается когерентным образом на ядре. Есть разница в знаке аксиальной константы g_A .
6. Там же утверждается, что когерентное сечение на 1-2 порядка больше сечения ОБР. Это зависит от ядра и числа нейтронов в нем.
7. Там же говорится, что энергия отдачи ядра меньше 1 кэВ. Энергия отдачи ядра зависит от энергии нейтрино и может быть больше 1 кэВ.
8. На стр. 55 ссылка на работу 112 в связи со степенью когерентности не верно отражает существо дела. Авторы работы по ссылке 112 ошибочно отождествили диагональные члены в квадрате амплитуды с некогерентными, а недиагональные с когерентными. Последовательное описание когерентного и некогерентного режимов можно найти, например, в работе **Phys.Rev. D98 (2018) no.5, 053004**.

Отмеченные недостатки не меняют в целом **положительной оценки** диссертационной работы Титова О.А.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК Российской Федерации. Результаты работы представляют интерес для ряда лабораторий и центров, в нашей стране - ИЯИ РАН (Москва), НИЦ «Курчатовский институт» (Москва), НИЦ КИ ПИЯФ (С.-Петербург), НИЦ КИ ИТЭФ (Москва) и НИЦ КИ ИФВЭ (Протвино).

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Уровень квалификации автора работы соответствует уровню кандидата физико-математических наук. Работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Титов О.А. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,
Заместитель директора ЛЯП ОИЯИ по научной работе,
доктор физико-математических наук



Д.В. Наумов

Подпись Д.В. Наумова заверяю:
Ученый секретарь ЛЯП ОИЯИ,
кандидат физико-математических наук



И.В. Титкова

01 марта 2019 г.

Дмитрий Вадимович Наумов, доктор физико-математических наук, заместитель директора ЛЯП ОИЯИ по научной работе.

Адрес: 141980 Московская область, г. Дубна, ул. Жоли-Кюри 6, ОИЯИ.
телефон: +7(49621)65912; e-mail: dnaumov@jinr.ru