

## О Т З Ы В

официального оппонента к.ф.-м.н. Акимова Дмитрия Юрьевича на диссертацию Ширченко Марка Владиславовича «Исследование свойств нейтрино: спиральность и магнитный момент», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Исследование свойств нейтрино является одним из сложнейших направлений современной экспериментальной физики. В связи с этим, любой полученный экспериментальный результат является очень ценным. Такие исследования в настоящее время очень актуальны и будут оставаться таковыми, по всей видимости, еще долгое время. Хочется подчеркнуть, что результаты исследований, выполненных с помощью относительно небольших экспериментальных установок, таких как в представленной диссертационной работе, имеют иногда не меньшую значимость, чем результаты полученные на мегаустановках, о которых широкому кругу известно гораздо больше.

Диссертация состоит из общего Введения и трех основных глав.

Первая глава - вводная и посвящена описанию электрослабых свойств нейтрино. Рассмотрены такие базовые моменты, как теория Ферми, спиральность и киральность нейтрино, а также возможные механизмы, изменяющие спиральность нейтрино, дан обзор экспериментов по измерению спиральности нейтрино. Отмечается, что в экспериментах с использованием распадающихся ядер, аналогичных описанному в настоящей работе, узким местом является нахождение атома отдачи в кристаллической решетке, маскирующее отдачу ядра в чистом виде, а также неизвестная и определяемая, как правило, расчетным путем величина эффективности комптоновского поляриметра гамма-квантов. Вторая часть введения посвящена другой важной характеристике нейтрино - магнитному моменту, и экспериментам, проводимым с целью выявить возможное отклонение его величины от значения, предсказываемого в рамках Стандартной Модели.

Вторая глава посвящена эксперименту по измерению спиральности нейтрино. Представленная методика измерений довольно оригинальна. В тексте диссертации убедительно показано, как величина эффективности поляриметра получается непосредственно из измерений с различными значениями магнитного поля в поляриметре. Описание идеи эксперимента и самой установки читается с большим интересом. Конечно, сама идея измерения спиральности нейтрино через измерение циркулярной поляризации гамма-квантов из последующих ядерных переходов не является новой и описана в учебниках по ядерной физике (эксперимент Гольдхабера), однако, новой является сама реализация эксперимента, позволяющая в перспективе существенно улучшить точность измерений. К сожалению, этому в тексте не уделено значительного внимания, что отражено ниже в списке замечаний. Полученный результат, подтверждающий левую спиральность нейтрино, хоть и не является рекордным, но может быть поставлен в один ряд с предыдущими экспериментами, а сам эксперимент вполне заслуживает того, чтобы попасть в учебники по ядерной физике.

Третья глава посвящена эксперименту по измерению магнитного момента реакторного антинейтрино. Эксперимент проводится на Калининской атомной электростанции (КАЭС). В диссертации представлено описание установки GEMMA и результаты, полученные в 1-й фазе эксперимента. Метод заключается в прецизионном измерении при помощи германиевого детектора энергетического спектра электрона отдачи в кэВ-ной области энерговыделений при рассеянии нейтрино на электроне и оценке величины смещения этого спектра, которая могла бы быть вызвана вкладом рассеяния, обусловленного магнитным моментом нейтрино. Основной задачей экспериментатора в таких измерениях, очевидно, является борьба с внешним радиационным фоном. Автор подробно описывает технические меры, которые позволили уменьшить фон установки

почти на шесть порядков величины, а также процедуры снижения фона нефизических сигналов при анализе экспериментальных данных. Достаточно полно и ясно описана процедура получения ограничения на величину магнитного момента реакторного антинейтрино.

Однако, диссертационная работа не лишена недочетов, причем иногда довольно существенных.

Самым серьезным является следующий. В научной новизне в одном из пунктов говорится, что достигимая точность определения спиральности нейтрино описываемым методом  $\approx 3\%$ . Эта же цифра присутствует и в Заключении: «Установка, включающая в себя поляриметр, систему управления магнитным полем и источник излучения, позволяет достичь точности измерения спиральности нейтрино – 3%». Однако, в тексте диссертации нет никакого обоснования этой цифры, кроме фразы (орфография и пунктуация сохранена): «Таким образом, наличие достаточно большой неучтенной анизотропии способно внести погрешность в окончательный результат, но она не будет существенной. Тем не менее для получение лучшего ограничения (на уровне 3-5%) необходим аккуратный расчет или точное измерение угловой корреляции исследуемого перехода.» Считаю, отсутствие обоснования этой цифры очень существенным упущением диссертанта, поскольку она вынесена в научную новизну.

Другим серьезным недочетом является то, что в положениях, выносимых на защиту, сказано: «Разработан метод экспериментальной и компьютерной обработки импульсов германиевых детекторов, позволяющий снизить порог регистрации событий до рекордного низкого значения 3 кэВ», а также в Заключении: «Это позволило снизить порог регистрации событий до 3 кэВ, что является рекордным значением для германиевого детектора в подобных условиях.» Это заявление является несколько устаревшим, и здесь, конечно, не хватает фразы о применимости данного метода к современным германиевым детекторам, у которых порог регистрации уже снижен до значений меньше 0.5 кэВ. Диссертант не мог не знать эксперименты с германиевыми детекторами по регистрации упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино, в которых обеспечивается такой низкий порог: CONUS, TEXONO, v-GEN.

Отмечу выборочно некоторые другие важные на мой взгляд замечания, которые, конечно, вполне могли бы быть устраниены при своевременном внимательном редактировании текста диссертации.

Стр. 24,25. «... доплеровская форма  $\gamma$ -линии будет отражать это распределение в случае идеального поляриметра, детектора и 100%-ной отрицательной спиральности нейтрино. В этом случае она будет иметь треугольную форму, показанную на Рис. 2.3а.» На самом деле, не хватает указания для каких гамма-квантов показан закрашенный (основной) треугольник: из рисунка следует, что для правых. Но в подписи к рисунку пояснений нет.

Стр. 27. «...площади  $\gamma$ -линии ( $S_\gamma$ )...» – по-видимому, не площади, а интенсивности  $\gamma$ -линий.

Стр. 31, рис. 2.7. Показана, по-видимому, величина  $g$ , и дана она в зависимости от величины допплеровского сдвига, однако подпись к рисунку гласит: «Формы гамма-линий в зависимости от анизотропии гамма-перехода». Во-первых, все-таки, в зависимости от допплеровского сдвига, а во-вторых, под формой гамма-линии обычно понимают ее вид на энергетическом спектре (аналогичное замечание и для рис. 2.8).

Стр. 34, рис. 2.9. На рисунке показан только комптоновский поляриметр, хорошо было бы показать, где располагались германиевые детекторы.

Стр. 40. «... температурный дрифт по спецификации Canberra достигает 0.01% ...». Дрифт – жargonное слово, а при каком изменении температуры? Скорее всего на градус, но не сказано.

Стр. 40, рис. 2.13. Очень трудно судить о величине температурной зависимости. Видно, что она есть; почему нельзя было отложить положение пика от температуры непосредственно?

Стр. 46, таблица 2.3. Спины и четности состояний в гамма-переходах не соответствуют схеме, приведенной на рис. 2.1, которую диссертант, надо полагать, взял из надежного источника, кстати, ссылка не дана! Также, нет соответствия тому, что требовалось по условиям эксперимента:  $3+ \rightarrow 2+$ .

Стр. 51, рис. 2.18. «Удвоенный доплеровский сдвиг в зависимости от анизотропии гамма-перехода (для линии 2598 кэВ).» Должно быть, судя по тому, что отложено по осям: «Удвоенный доплеровский сдвиг в зависимости от спиральности К при различных значениях анизотропии гамма-перехода (для линии 2598 кэВ).

Стр. 51, рис. 2.19. «Удвоенный доплеровский сдвиг в зависимости от разрешения детектора (для линии 2598 кэВ).» Аналогично, должно быть: «Удвоенный доплеровский сдвиг в зависимости от спиральности К при различных значениях разрешения детектора (для линии 2598 кэВ).» Только семейства кривых для различных значений разрешения почему-то нет – только одна желтая кривая! Смотрим в текст: «Зависимость результатов от разрешения детектора представлена на рис. 2.19. При этом результаты вышли настолько близкими, что слились в одну линию.» (!?)

Стр. 51. Приведен основной результат по измерению спиральности:  $K = -1.01 \pm 0.20$ . Далее сразу сказано: «Это значение существенно меньше того, что ожидалось получить в эксперименте, причем наибольший вклад в увеличение ошибки дало измеренное значение эффективности комптоновского поляриметра.» По всей видимости, речь идет не о самой величине, а о значении ошибки, только она не меньше, а больше!

Стр. 53. «Сечение взаимодействия нейтрино с ЭЛЕКТРОНАМИ можно разложить на несколько компонентов (рис. 3.1): слабое, электромагнитное, когерентное» и далее идут три формулы сечения, последняя из которых относится к УПРУГОМУ когерентному (а не просто к когерентному) рассеянию на ЯДРЕ, причем в самой формуле вместо  $m_{\text{nuc}}^{-1} T_{\text{nuc}}$  должно быть  $m_{\text{nuc}} x T_{\text{nuc}}$ , иначе не проходит по размерности. И еще, углом Вайнберга назван  $x = \sin \Theta_W$ , а не  $\Theta_W$ !

Стр. 53, 54. «Заметим, что когерентное сечение в области энергий до 0.5 кэВ не играет существенной роли, так как максимальная передаваемая нейтрино ядру энергия, не может превышать следующего значения:» Далее согласно формуле 3.4 сделана оценка максимальной передаваемой энергии 100 эВ. Можно только догадаться, что это сделано для усредненной по спектру энергии реакторного антинейтрино  $E_\nu \sim 2$  МэВ. Тем не менее отсюда как раз следует, что играет существенную роль, значит должно было быть «...в области энергий выше 0.5 кэВ...»

Стр. 57. «Поэтому для такой защиты был использован археологический свинец. Он представляет собой части обшивки затонувших кораблей. В виду долгого нахождения под водой, а затем в низко-фоновой лаборатории, в условиях практически полностью исключающих экспонирование космическим излучением, этот свинец оказывается радиационно чистым, так как радиоактивные изотопы в нём уже распались, а наработки новых не происходит.» Здесь, к сожалению, полное непонимание того, почему в установке использовался именно археологический свинец. Дело в том, что хотя наработка космогенного изотопа в свинце идет примерно таким же темпом, как и в других материалах (образуется  $^{202}\text{Pb}$ ), однако, его период полураспада составляет  $5.25 \cdot 10^4$  лет, что намного больше, чем для других космогенных изотопов, для которых характерны периоды полураспада порядка месяцев или лет, см. Susana Cebrián, Cosmogenic activation of materials. International Journal of Modern Physics A, Vol. 32, No. 30, 2017, 1743006. Вследствие этого вклад этого изотопа в фон пренебрежимо мал. Причина использования такого свинца в том, что в современном свинце присутствует  $^{210}\text{Pb}$  с периодом

полураспада 22.3 года, являющийся конечным продуктом распада  $^{238}\text{U}$  цепочки, и который удалить переплавкой невозможно.

Стр. 58. Приводится неправильная цифра суммарного потока нейтрино реактора ВВЭР-1000 с тепловой мощностью 3 ГВт  $3 \times 10^{20} \text{ с}^{-1}$ . Должно быть в 2 раза больше, хотя дальше (на стр. 74) цифра потока нейтрино в месте расположения установки приведена правильная.

Более мелкие замечания.

Стр. 62 «~2 МэВ/гр»! Должно быть 2 МэВ/гр/см<sup>2</sup> – это потери, отнесенные к плотности.

Стр. 64, 65 У Рис. 3.5, 3.6 отсутствуют подписи.

Стр. 70 В тексте нет ссылки на рис. 3.10.

Считаю, что все приведенные замечания, даже выделенные как достаточно серьезные, простительны автору, проделавшему такую гигантскую работу. Они в большей степени относятся к представлению и оформлению полученных результатов и в целом не снижают научной ценности и практической значимости диссертации. Основные результаты работы были доложены на международных конференциях и опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Обширный список благодарностей автора коллегам и семье впечатляет и однозначно говорит о серьезности данной работы.

Диссертация «Исследование свойств нейтрино: спиральность и магнитный момент» соответствует требованиям Положения ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор работы Ширченко Марка Владиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 01.04.16 — Физика ядра и элементарных частиц.

Отзыв составил

официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения

"Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

г. Москва, ул. Большая Черемушкинская, д. 25, 117218, тел. (499) 789-64-06,

e-mail: akimov\_d@itep.ru

Акимов Дмитрий Юрьевич

07.06.2019

Подпись Акимова Дмитрия Юрьевича заверяю,

Заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

Голубев Александр Александрович

07.06.2019

