

Ш-645

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

6-2019-28
На правах рукописи

ШИРЧЕНКО
Марк Владиславович

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НЕЙТРИНО:
СПИРАЛЬНОСТЬ И МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2019

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Джелепова Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
начальник сектора

Егоров Вячеслав Георгиевич

Официальные оппоненты: **Студеникин Александр Иванович**,
доктор физико-математических наук,
профессор Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Акимов Дмитрий Юрьевич,

кандидат физико-математических наук, начальник
лаборатории ФГБУ «Институт теоретической
и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова»

Национального исследовательского центра

«Курчатовский институт»

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

Защита состоится «__» _____ 2019 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Джелепова в ОИЯИ по адресу: 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на сайте:

http://wwwinfo.jinr.ru/announce_disser.htm

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 720.001.03

доктор физ.-мат. наук

Карамышева Г.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований.

Нейтрино, будучи открытой одной из первых элементарных частиц, [1, 2] на протяжении более чем восьмидесяти лет не перестаёт удерживать внимание научного сообщества. Несмотря на интенсивнейшие исследования, многие его свойства до сих пор остаются неизвестными. Среди них не только такие фундаментальные, как масса или наличие угловых моментов, но даже сама природа частицы: майорановская или дираковская и связанный с этим вопрос о ее киральности (спиральности).

Являясь массивной частицей, нейтрино с необходимостью обладает мультипольными моментами и несохраняющейся спиральностью. В то же время в рамках Стандартной Модели эти эффекты исчезающе малы. Так магнитный момент электронного нейтрино, связанный с массовым членом, определяется выражением [3]:

$$\mu_\nu \approx 3 \times 10^{-19} \mu_B \left(\frac{m_\nu}{1\text{eV}} \right) \quad (1)$$

Это обстоятельство при современном состоянии экспериментальной техники делает невозможным его экспериментальное обнаружение (учитывая текущее ограничение на массу нейтрино). Тем не менее, в ряде работ [4, 5] указан другой механизм генерации магнитного момента при наличии у нейтрино малой массы, опирающийся на возможность существования «новой физики» при энергиях меньших пороговой энергии нарушения электро-слабой симметрии. Сам механизм при этом остается неизвестным, но для вычисления значения магнитного момента он оказывается ненужным, если ввести так называемый масштабный фактор, определяемый значением энергии, при которой возникает «новая физика». В этом случае минимальное значение магнитного момента для майорановского нейтрино оказывается даже меньшим существующих экспериментальных ограничений. Таким образом, нахождение магнитного момента позволит уверенно говорить о том, что, во-первых: нейтрино майорановское, и, во-вторых: существует неизвестная нам физика при энергиях меньших, чем типичные для Великого Объединения (~ 1 ТэВ).

Что же касается спиральности нейтрино, – ситуация здесь во многом схожа с описанной. Эффективное значение спиральности в Стандартной Модели можно оценить из соотношения массы и энергии нейтрино. Для процесса бета-распада ^{60}Co

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА
ОИЯИ

этот параметр будет составлять $\approx 10^{-7}$, что, как и в случае магнитного момента, представляет на сегодняшний день недостижимую для измерений величину. Но и в этом случае в ряде теорий возникает возможность обойти это ограничение, введением новых частиц или «новой физики» [6, 7]. Одной из таких возможностей является переворот спина в сильном магнитном поле при наличии у нейтрино заметного магнитного момента.

Для понимания дальнейшего необходимо отметить, что измеряемой в экспериментах величиной является не сама энергия нейтрино, а энергия вторичных частиц. В случае измерения спиральности это энергия отдачи ядра, а в случае измерения магнитного момента – энергия отдачи электронов кристалла в процессе упругого рассеяния нейтрино. В дальнейшем, говоря об энергии, мы будем подразумевать именно энергию отдачи – E_R .

Таким образом, из вышесказанного вытекает актуальность работы по исследованию электрослабых и спиральных (киральных) свойств нейтрино.

Цель работы. Определение магнитного момента и спиральности нейтрино, новыми, основанными на прецизионной ядерной спектроскопии, методами.

Поставленные задачи.

- Разработка нового метода и установки для измерения спиральности нейтрино с одновременным определением эффективности поляриметра и получение ограничения на отклонение спиральности электронного нейтрино от теоретического значения.
- Разработка метода и установки для измерения магнитного момента нейтрино и сечения когерентного рассеяния электронного нейтрино с веществом при низких энергиях E_R ($\approx 3 - 20$ кэВ) в условиях промышленного ядерного реактора.

- Получение ограничения на величину магнитного момента электронного нейтрино.

Научная новизна.

- Получено лучшее мировое ограничение на магнитный момент электронного антинейтрино – $3.2 \times 10^{-11} \mu_B$

- Разработан новый метод, позволяющий существенно улучшить результат измерения спиральности электронного нейтрино. Метод базируется на измерении эффективности комптоновского поляриметра непосредственно в эксперименте и использовании жидкого источника γ -излучения с рекордно высокой интенсивностью для снижения эффектов, связанных с торможением ядра в кристаллической решётке. Метод доказал свою эффективность и может быть использован в дальнейшем для исследований подобного рода. Достижимая точность $\approx 3\%$
- Разработан новый комплексный метод, позволяющий эффективно снижать фон в условиях работающей атомной станции и близкорасположенного реактора. Показано, что метод позволяет уменьшить фон в исследуемом диапазоне энергий на 6 порядков.
- Разработан метод обработки импульсов германиевых детекторов, позволяющий снизить порог регистрации событий до рекордно низкого в условиях промышленного атомного реактора значения 3 кэВ.

Научная и практическая значимость работы

Полученные результаты позволяют исключить из рассмотрения теории, для которых магнитный момент электронного нейтрино оказывается больше экспериментального установленного предела.

Ограничение на спиральность получено при одновременном измерении эффективности поляриметра, что делает полученные результаты существенно более надежными в сравнении с предыдущими работами.

Полученные результаты использованы для создания низкофоновых установок для исследования электрослабых и ядерных процессов на АЭС. Если в процессе дальнейших исследований будет получено ненулевое значение магнитного момента, это будет достаточным указанием на то, что нейтрино имеет майорановскую природу.

Разработан метод проведения рекордно низкофоновых экспериментов на атомных станциях вблизи центра активной зоны реактора с учетом специфических для таких условий источников радиоактивного фона (долгоживущие продукты деления, радиоактивные благородные газы).

На защиту выносятся следующие положения и результаты

- Разработан метод для измерения спиральности электронного нейтрино с независимым измерением эффективности и жидким источником излучения.
- Разработан метод экспериментальной регистрации и последующей обработки импульсов германиевых детекторов, позволяющий снизить порог регистрации событий до 3 кэВ, что является критически важным при измерении магнитного момента на атомных реакторах
- Получено ограничение на величину магнитного момента нейтрино на первой фазе эксперимента GEMMA – $\mu_\nu < 5,8 \times 10^{-11} \mu_B$
- Получено ограничение на величину магнитного момента нейтрино на второй фазе эксперимента GEMMA – $\mu_\nu < 3,2 \times 10^{-11} \mu_B$

Апробация работы и публикации Результаты исследований, положенные в основу диссертации, представлялись и докладывались на международных конференциях: по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Чебоксары–2009, Санкт-Петербург–2010), конференции по неускорительной физике NANP2005 (Дубна–2005), международной конференции Нейтрино-Шампань (Реймс–2008), III Международной летней школе по физике нейтрино памяти Б.Понтекорво (Алушта–2007), IX и X Международной научной конференции молодых ученых и специалистов (Дубна–2007, Дубна–2009), семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Материалы, являющиеся основой диссертации, изложены в 6 работах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Диссертация содержит 79 страниц печатного текста, 31 рисунок, 6 таблиц и список литературы из 80 наименований. Полный объем – 86 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткое описание современного состояния экспериментальной физики электронного нейтрино (антинейтрино). Подчеркивается возможность экспериментов, проведение которых не требует работы больших научных групп и создания международных коллабораций, при этом их потенциальные результаты

могут быть вполне сопоставимыми с таковыми в случае крупных экспериментов. Рассматриваются два вида таких экспериментов: исследование реакторных антинейтрино при близком расположении детектора и корреляционные эксперименты.

В первой главе приводятся теоретические обоснования выполненных исследований. Описаны электромагнитные свойства нейтрино. Хотя формально спин, а вместе с ним и спиральность, является лишь квантово-механической характеристикой, тем не менее, они очень часто связаны с электромагнитными (достаточно вспомнить хотя бы гиромагнитное соотношение), что позволяет рассматривать их совместно. Магнитный момент для массивного нейтрино в рамках Стандартной Модели связан с массой соотношением (1), поэтому любое указание на величину, превышающую это значение, будет одновременно и указанием на эффекты, выходящие за ее рамки. В случае майорановского нейтрино, когда нейтрино является собственной античастицей, его собственный магнитный момент тождественно равен нулю, как и любое квантовое число, имеющее знак. Тем не менее, и для него возможно появление так называемых *переходных моментов* [8]. В этом случае магнитный момент нейтрино возникает при изменении аромата в процессе акта взаимодействия¹. Это означает, что в матрице, описывающей осцилляции нейтрино:

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

диагональные элементы продолжают оставаться равными нулю в то время, как элементы, лежащие в стороне от диагонали, такими быть уже не обязаны. Можно показать, что при этом значение магнитного момента большее, чем $10^{-13} \mu_B$, возможно только в случае майорановского нейтрино [9], и это дает еще одну возможность исследовать природу этой частицы. До сих пор единственным осуществимым экспериментом подобного рода считался двойной безнейтринный бета-распад.

Первое измерение спиральности нейтрино было осуществлено в опыте Гольдхабера-Гродзенса-Суньяра [10]. В силу особенностей эксперимента, обусловленных главным образом тем, что нейтрино считалось безмассовой частицей, сохраняющей спиральность, точность его по современным меркам невелика и составляет около

¹Точнее – в процессе, при котором проявляются свойства аромата, то есть участвует не одно поколение массивных нейтрино.

30%. При этом самым вкладом в спиральность, связанным с наличием у нейтрино массы, можно пренебречь, так как его значение в рассматриваемом процессе $< 10^{-7}$ (десятые доли эВ к МэВ). В то же время существуют другие механизмы, при которых отклонение спиральности нейтрино от единичного значения может стать существенным. Среди них в работе приведены такие, как правые токи, существование лептокварков и переворот спина нейтрино в сильных полях.

Вторая глава посвящена созданию установки и методики для измерения спиральности электронного нейтрино с помощью комптоновского поляриметра.

Таблица 1: Результаты экспериментов по измерению спиральности нейтрино в ядрах.

ядро / тип ν	процесс	Тип перехода	Спиральность	Лит.
$^{19}\text{Ne}, \nu_e$	β^+	$\frac{1}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$	-0.90 ± 0.13	[11]
$^{152m}\text{Eu}, \nu_e$	EC	$0^- \rightarrow 1^-$	-0.72 ± 0.11	*)
			-0.86 ± 0.32	*)
			-0.66 ± 0.13	*)
			-0.93 ± 0.10	[12]
$^{56}\text{Co}, \nu_e$	EC	$4^+ \rightarrow 3^+$	-0.84 ± 0.15	[13]
$^{12}\text{C}, \nu_\mu$	(μ^-, ν_μ)	$0^+ \rightarrow 1^+$	-1.06 ± 0.11	[14]

*) В оригинальных работах приведена лишь измеренная величина циркулярной поляризации γ -излучения; соответствующее же ей значение B вычислено в работе [12].

Последующие эксперименты позволили улучшить значение, полученное группой Гольдхабера. Для электронного нейтрино такие опыты можно разделить на два типа: эксперименты с ядрами и эксперименты со свободными нейтронами, причем ограничения, полученные в последних, существенно лучше (до единиц процентов). К ним имеется целый ряд вопросов, в особенности касающихся систематических ошибок при проведении подобных исследований. В случае ядер измерение спиральности основано на ее «передаче» вторичным частицам, например, фотонам. Для измерения

их поляризации удобно использовать комптоновский поляриметр, представляющий собой ферромагнетик, в котором сквозное прохождение гамма-квантов определяется взаимной ориентацией спинов электронов железа и спинов самих фотонов. В таком случае коэффициент эффективности поляриметра обычно определяется расчетным путем, что становится слабым местом данного способа измерений. Нами разработан новый метод, который способен преодолеть упомянутые сложности.

Идея метода состоит в одновременном измерении количества γ -квантов, испускаемых при наличии поля разных знаков и полном его отсутствии. Их соотношение определяется уравнением:

$$\frac{S_+ + S_-}{2S_0} = \text{ch}(\eta) = 1 + \frac{\eta^2}{2} + o(\eta^4), \quad (3)$$

где η – коэффициент эффективности поляриметра. Саму же поляризацию γ -квантов можно получить из отношения:

$$\frac{S_+ - S_-}{S_+ + S_-} = P \text{th}(\eta) = P\eta + o(\eta^3); \quad (4)$$

За основу измерений взят процесс К-захвата в ^{56}Co , причем только случаи, когда после захвата К-электрона из основного состояния 4^+ ядра ^{56}Co и вылета нейтрино образуется ядро ^{56}Fe в 3^+ -состоянии. Изменение спинов в рассматриваемом процессе позволяет считать его практически чисто Гамов-Теллеровским, с возможной малой ($\leq 3\%$) примесью запрещенных процессов высших порядков. Так как, образовавшееся ядро находится в возбужденном состоянии, оно через некоторое время испускает гамма-квант, который, если это время достаточно мало, будет доплеровски сдвинут из-за отдачи дочернего ядра (причем импульс отдачи и, следовательно, величина сдвига δE_γ однозначно определяются направлением вылета нейтрино). В работе показано, что при любом направлении спина электрона и значении спиральности нейтрино циркулярная поляризация фотона, испущенного вдоль импульса ядра совпадает со спиральностью нейтрино.

Таким образом, измеряя поляризацию фотона и зная величину эффективности поляриметра, мы тем самым измеряем и спиральность нейтрино. В реальных измерениях, необходимо учесть дополнительные факторы: корреляцию между направлением вылета γ -кванта и направлением спина ядра, функцию отклика детектора. Так как измерения проводятся длительное время, необходимо также обеспечить

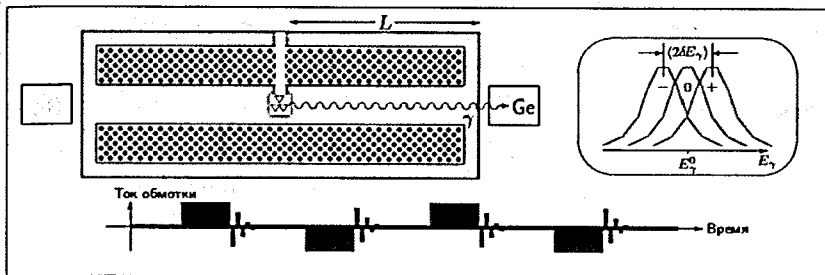


Рис. 1: Измерение спиральности нейтрино с использованием комптоновского поляриметра (идея эксперимента).

долговременную стабильность базовых напряжений аппаратуры (особенно высоковольтной части), температурную и временную стабильность, отсутствие зависимости сигналов от постоянно изменяющегося интенсивного магнитного поля.

Созданная установка состояла из комптоновского поляриметра, представляющего собой ферромагнитную систему с управляемым блоком питания электромагнитов и возможностью их переполюсовки, двух полупроводниковых германиевых детекторов, измерительной и управляющей электроники в стандартах САМАС и NIM, компьютера.

Были использованы жидкие источники ^{56}Co с рекордной активностью 1Гбк, что позволило избежать сложностей, связанных с учётом движения ядра отдачи в кристаллической решётке. В работе показано, что для перехода 2598 кэВ средняя длина пробега ядра до испускания γ -кванта составляет $1,7\text{\AA}$, а расстояние между соседними молекулами воды – $3,1\text{\AA}$, так что эффект торможения ядра отдачи можно считать малым. Вдобавок, источник излучения в отличии от твёрдого тела не находится в узле кристаллической решётки, что избавляет от необходимости учитывать его связь с соседними атомами. Также, учёт торможения ядра в нашем случае способен привести лишь к уменьшению измеренного доплеровского сдвига, то есть только улучшить полученное ограничение.

Магнитная система, представляла собой ярмо из стали марки АгмСО (рис.2), на оси которого расположен стальной стержень диаметром 70 мм и длиной 700 мм. На стержне, симметрично относительно срединного сечения расположены 8 магнитных

катушек. Катушки соединены последовательно и находятся под напряжением $U \approx 5$, что соответствует току $I = 20\text{A}$.

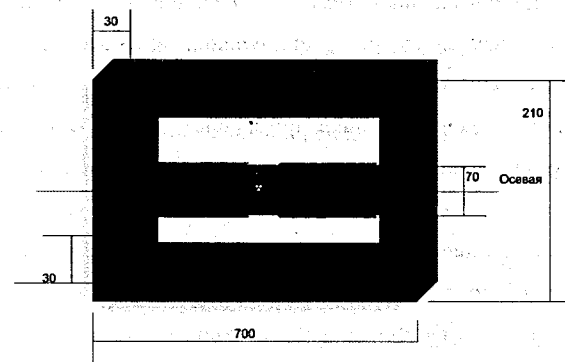


Рис. 2: Комптоновский поляриметр

Управление питанием магнита осуществлялось от компьютера с использованием специально разработанного блока в стандарте САМАС, что позволяло изменять параметры питания в широких пределах, включая изменение полярности и осуществление специального режима размагничивания поглотителя.

Коаксиальные HPGe детекторы большого объёма располагались по оси поляриметра с обеих его сторон. В конструкцию детекторов были внесены конструктивные изменения для минимизации воздействия на их спектрометрические характеристики рассеянного магнитного поля поляриметра. Стоящая в стандартном предусилителе катушка индуктивности была заменена на две, установленные перпендикулярно внешнему полю, чтобы при перемагничивании или размагничивании суммарная индуктивность оставалась прежней. Дополнительно к этому были установлены ферритовые магнитные экраны.

Рабочий объём детекторов был экранирован двойными фильтрами из пермаллоя для снижения влияния магнитного поля и комбинированного γ -фильтра для защиты от внешнего излучения и понижения суммарной загрузки. Последнее было связано с тем, что в результате использования источника большой активности гамма-кванты от распада ^{56}Co рассеивались на близлежащих конструктивных элементах и большая их часть попадала в чувствительный объём детектора. Для уменьшения числа

фоновых гамма-квантов на два порядка, магнит был окружен свинцовой защитой толщиной ≈ 20 см, а на детекторах были установлены γ -фильтры.

В ядре ^{56}Co имеются несколько гамма-переходов с требуемой мультипольностью ($\Delta I = \pm 1$). Наиболее перспективным для изучения оказался переход 2598 кэВ. В этом случае обеспечивается одновременно достаточно малое время жизни уровня и значительная разница в энергии γ -пика при разных направлениях магнитного поля, и наиболее высокая эффективность поляриметра. Для фитирования пика были выбраны часовые экспозиции, поскольку за это время не происходит существенного изменения параметров установки. Периоды, в которые эти условия не выполнялись, были исключены из обработки. Полученные данные затем усреднялись. Для этого было использовано совместное фитирование пиков при разном направлении поля, для уменьшения числа независимых параметров при обработке гамма-перехода. При этом параметры, соответствующие аппроксимации фона, а также разрешению детектора и интенсивности пиков должны быть одинаковыми, что позволяет уменьшить их число до 7 и тем самым улучшить точность измерения.

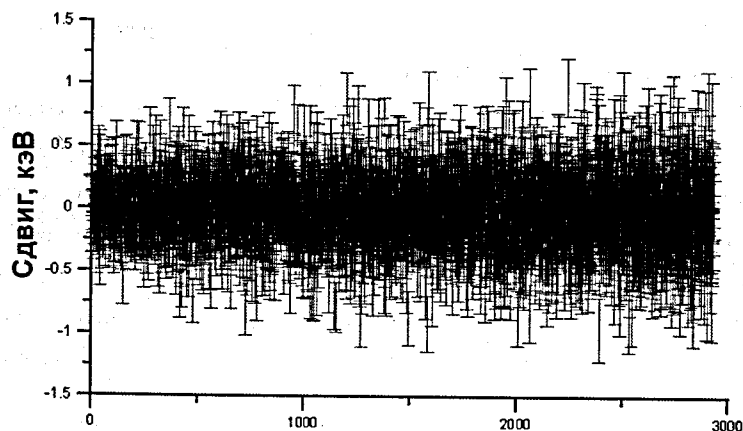


Рис. 3: Доплеровский сдвиг центра тяжести пика 3202 кэВ в зависимости от времени измерения. Видно, что погрешность растет по мере распада источника.

Экспериментально измеренное значение доплеровского сдвига для линии 2598 кэВ равно 6.12 ± 1.23 эВ, что приводит к следующему значению спиральности элек-

тронного нейтрино: $K = -1.01 \pm 0.20$ в соответствии с формулой:

$$2M = \eta \times D_{\text{MAX}} \times (1 - K) = \eta \times D_{\text{MAX}} \times \vec{K}, \quad (5)$$

где M – измеренный, а D_{MAX} – максимально возможный доплеровский сдвиг, а η – эффективность поляриметра.

Ошибка этой величины оказалась больше ожидаемой, причем вклад в ее увеличение дало как меньшее, по сравнению с планируемым, значение эффективности комптоновского поляриметра, так и отсутствие более мощного источника излучения. Вместе с тем, следует отметить, что метод доказал свою состоятельность и при улучшении характеристик поляриметра, увеличении времени экспозиции и активности источника позволяет получить значение спиральности электронного нейтрино с ошибкой не превышающей 3%. Также представляется полезным учет поправки на эффективность поляриметра результатов предыдущих экспериментов.

В третьей главе описаны разработанный метод и установка по измерению магнитного момента электронного антинейтрино с использованием в качестве источника частиц промышленного ядерного реактора². Возможность подобного рода исследований базируется на двух факторах. Во-первых, реактор является сверхмощным источником антинейтрино с интегральным потоком $3 \times 10^{20} \text{ с}^{-1}$, а, во-вторых, с поведением сечения взаимодействия нейтрино в области малых (1 – 100 кэВ) энергий. На рисунке 4 приведено соотношение двух основных составляющих его компонентов. Видно, что в области исследуемых энергий вклад электромагнитной части в общее сечение становится значительным, а, возможно, и преобладающим (это зависит от значения магнитного момента). Таким образом, сравнивая фон при работающем и заглушенном реакторе, можно оценить вклад нейтрино в общий радиоактивный фон.

При этом само сечение остается малым ($\approx 10^{-45} \text{ см}^2 \text{ МэВ}^{-1} \text{ эл-н}^{-1}$), потому вопрос понижения фона становится критически важным для эксперимента. Нами был разработан метод решения данной проблемы, включающий несколько этапов. Вначале HPGe-детектор, выбранный из соображений высокого энергетического разрешения в упомянутом выше диапазоне, был окружен активной защитой – скинтил-

²В данном случае не совсем верно говорить об измерении момента электронного нейтрино, так как определенные мультипольные моменты существуют только у массовых состояний нейтрино. Здесь мы следуем общепринятой терминологии.

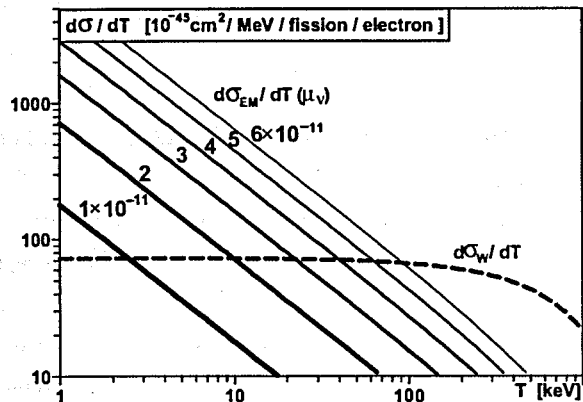


Рис. 4: Сечение взаимодействия антинейтрино с электронами. Показано поведение слабого и электромагнитного сечений в зависимости от возможного значения магнитного момента антинейтрино [15].

ляционным детектором из NaI в виде перевернутого колодца, затем несколькими слоями пассивной защиты из меди (в силу радиационной чистоты наиболее близко расположенной к детектору) и свинца. В ходе эксперимента было установлено, что нейтронный фон вблизи реактора был существенно меньше ожидаемого и равен естественному. Это позволило обойтись без обычного в таких случаях слоя борированного полиэтилена и сделало защиту более компактной. Из-за удачного расположения детектора под реактором, последний сам явился хорошей защитой от адронного компонента космического излучения. Показано, что поток вторичных частиц (в основном нейтронов) составляет до 20% от общего фона, и для его уменьшения было создано активное мюонное веет в виде пластин сцинтиллятора, расположенных сверху и с торцов установки. Совместное использование пассивной и активной защиты позволило уменьшить фон до ≈ 2 соб кэВ $^{-1}$ кг $^{-1}$ день $^{-1}$ в исследуемой области 3 – 50 кэВ.

На втором этапе установка была размещена под вторым блоком Калининской атомной электростанции на расстоянии 14 м от центра активной зоны реактора, что позволило получить поток нейтрино $\approx 2.7 \times 10^{13}$ $\bar{\nu}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$.

Получаемый от детектора импульс был распараллелен на пять сигналов: три с

разным временем формирования (2, 4 и 12 мкс), четвертый с меньшим усилением и большим энергетическим диапазоном (расширенным до 2.8 МэВ), пятый сигнал использовался для подавления выбросов обратной полярности при утечке высокого напряжения. Использование трех сигналов с разной формировкой позволило применить простейший Фурье-анализ для подавления высокочастотных наводок сети питания (50 Hz) и низкочастотных микрофонных шумов. Если построить график, по осям которого отложить энергию, оцифрованную с усилителей с разным временем формирования сигнала, то истинные события будут расположены вдоль диагональной полосы с шириной, соответствующей разрешению детектора, а ложные события будут лежать во основном вне этой полосы (рис. 5).

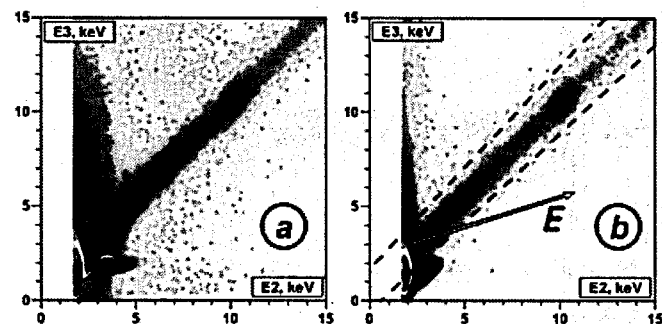


Рис. 5: Пример анализа с помощью частотной обработки сигнала. Время формирования сигнала для двух усилителей, различающихся временем формировки сигнала – соответственно 4 и 12 мкс. График (а) сделан до, а (б) после радиочастотной коррекции.

Наибольший вклад в состав наблюдаемого фона дают долгоживущие продукты деления (^{137}Cs , ^{134}Cs и ^{60}Co), естественная радиоактивность уранового и ториевого рядов, а также ^{40}K . В спектре также присутствуют линии от активации германия быстрыми и медленными нейтронами, среди которых особенно выделяется линия 10.367 кэВ, лежащая в области, используемой для последующего анализа.

Спектр, измеренный при включенном реакторе, представляет собой сумму фонового спектра с добавлением событий от слабого и электромагнитного взаимодействия нейтрино: $S_{ON}(E) = S_{OFF}(E) + S_W(E) + S_{EM}(E, X)$, где $X = (\mu_n u / 10^{-10} \mu_B)$.

Для удобства обработки исследуемый диапазон (3–61 кэВ) был разбит на три интервала: 3.0–9.2, 11.2–44.0 и 48.0–61.3 кэВ для того, чтобы исключить из рассмотрения пики 10.37 и 46.5 кэВ (рис. 6). Шаг разбиения был равен 0.1 кэВ, что давало 526 значений величины X . Полученные значения представляют собой гауссово распределение величины магнитного момента со средним значением, лежащим в отрицательной (нефизической) области. Для того, чтобы получить ограничение на величину магнитного момента, в соответствии с рекомендациями Particle Data Group [16] нам нужно ограничиться лишь той областью, которая лежит левее точки, где интеграл под положительной ее частью становится равным 90%.

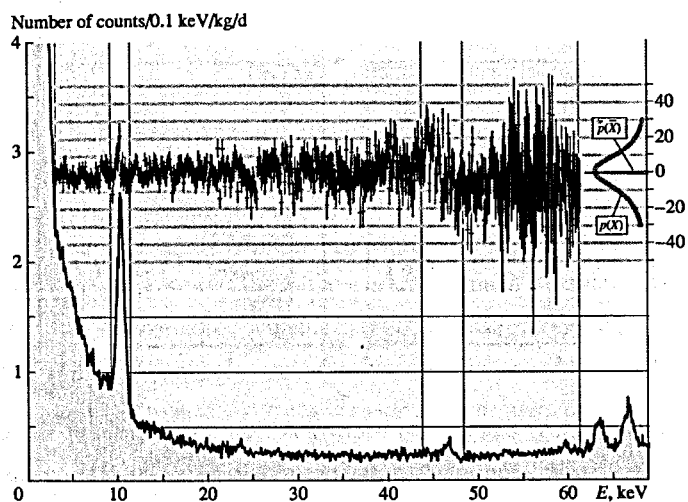


Рис. 6: Распределение среднего значения X , соответствующего квадрату магнитного момента, выраженного в единицах магнетона Бора, в диапазоне 3–61.3 кэВ

В результате обработки была получена величина магнитного момента нейтрино $\mu_\nu < 5.8 \times 10^{-11} \mu_B$, улучшенная впоследствии до $\mu_\nu < 3.2 \times 10^{-11} \mu_B$ за счёт увеличения накопленной статистики и использования аппроксимации фона в виде гладкой кривой, что на момент проведения эксперимента являлось рекордным ограничением. Таким образом, был создан метод, доказавший свою состоятельность и использованный в дальнейшем для получения ещё более строгого ограничения на значение указанной величины, а также в целом для ряда экспериментов на промышленных

атомных реакторах.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты исследований, обоснованы перспективы дальнейших экспериментов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- Разработан новый метод и создана установка для независимого от расчетов эффективности поляриметра определения спиральности электронного нейтрино. Использование жидкого источника позволило избежать сложностей учёта эффектов движения ядра отдачи в кристаллической решётке. Установка, включающая в себя поляриметр, систему управления магнитным полем и источник излучения, позволяет достичь точности измерения спиральности нейтрино – 3%
- Получено независимое от теоретических расчетов значение спиральности электронного нейтрино -1.01 ± 0.20 .
- Разработан новый комплексный метод и создана установка для определения магнитного момента нейтрино. При этом большое внимание уделено понижению фона и фильтрации помех, создаваемых микрофонным и высокочастотными шумами. Это позволило снизить порог регистрации событий до 3 кэВ, что является рекордным значением для германиевого детектора в подобных условиях.
- Получено ограничение на величину магнитного момента на уровне $\mu_\nu < 3.2 \times 10^{-11} \mu_B$.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

- 1 Бруданин В.В., ... Ширченко М.В. и др. «Измерение спиральности нейтрино с помощью комптоновского поляриметра. Проект эксперимента.» Препринт ОИЯИ
- 2 Бруданин В.В., ... Ширченко М.В. и др. «Измерение спиральности нейтрино с помощью комптоновского поляриметра.» тезисы Международного конференции ЯДРО-2010.
- 3 Беда А.Г., ... Ширченко М.В. и др. «Первый результат по измерению магнитного момента нейтрино на установке GEMMA» // Ядерная физика, 2007 Т. 70. С 1925-1935

4 Beda, A. G., ... Shirchenko, M. V. et al. "Gemma experiment: Three years of the search for the neutrino magnetic moment" // Physics of Particles and Nuclei Letters 2010, Vol. 6, P. 406-409

5 Beda, A. G., ... Shirchenko, M. V. et al. The Results of Search for the Neutrino Magnetic Moment in GEMMA Experiment // Advances in High Energy Physics, 2012, ID 350150

Список литературы

1. Detection of the Free Neutrino: a Confirmation / C. L. Cowan [и др.] // Science. — 1956. — Т. 124, № 3212. — С. 103–104.
2. *By Ц., Мошковский С.* Бета-распад. — М. Атомиздат, 1970.
3. *Kayser B.* Neutrino Properties // Proc. of "The Neutrino 08". — Christchurch New Zealand, 2008.
4. How Magnetic is the Dirac Neutrino? / N. F. Bell [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Окт. — Т. 95, вып. 15. — С. 151802.
5. *Kouzakov K. A., Studenikin A. I., Voloshin M. B.* Neutrino electromagnetic properties and new bounds on neutrino magnetic moments // Journal of Physics: Conference Series. — 2012. — Т. 375, № 4. — С. 042045.
6. *Hardy J. C., Towner I. S.* Superallowed $0^+ \rightarrow 0^+$ nuclear β decays: A new survey with precision tests of the conserved vector current hypothesis and the standard model // Phys. Rev. C. — 2009. — Май. — Т. 79, № 5. — С. 055502.
7. *Buchmller W., Rckl R., Wyler D.* Leptoquarks in lepton-quark collisions // Physics Letters B. — 1987. — Т. 191, № 4. — С. 442–448. — ISSN 0370-2693.

8. *Giunti C., Studenikin A.* Neutrino electromagnetic properties // Physics of Atomic Nuclei. — 2009. — Дек. — Т. 72, № 12. — С. 2089. — ISSN 1562-692X.
9. Model independent bounds on magnetic moments of Majorana neutrinos / N. F. Bell [и др.] // Physics Letters B. — 2006. — Т. 642, № 4. — С. 377—383. — ISSN 0370-2693.
10. *M. Goldhaber, L. Grodzins, A. W. Sunyar.* Helicity of neutrinos // Phys. Rev. — 1958. — Т. 109. — С. 1015.
11. Test of Time-Reversal Invariance in The Beta Decay of Ne^{19} / F. P. Calaprice [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 1967. — Май. — Т. 18, № 21. — С. 918—921.
12. *Вылов Ц., Бруданин В.* // Изв. Акад. Наук (сер. физ.) — 1984.
13. Investigation of spin-neutrino correlation in decay of polarized ^{56}Co nuclei / V. G. Egorov [и др.] // Nuclear Physics A. — 1991. — Т. 524, № 3. — С. 425—440. — ISSN 0375-9474.
14. Direct measurement of the helicity of the muonic neutrino / L. Roesch [и др.] // American Journal of Physics. — 1982. — Окт. — Т. 50, № 10. — С. 931.
15. First result for the neutrino magnetic moment from measurements with the GEMMA spectrometer / A. G. Bada [и др.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2007. — Нояб. — Т. 70, № 11. — С. 1873—1884. — ISSN 1562-692X.
16. *Group P. D.* // J. Phys. G. — 2006. — С. 1.

Получено 13 мая 2019 г.