

Национальная Академия Наук Украины
Институт ядерных исследований
Специализированный совет Д016.03.01

На правах рукописи

Даневич Федор Анатольевич

ПОИСК 2β -РАСПАДА ^{116}Cd С ПОМОЩЬЮ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ
ВОЛЬФРАМАТА КАДМИЯ

Специальность 01.04.16 - физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Киев-1994



00756210 (L)

Дисертацією является рукопись
Работа выполнена в Институте ядерных исследований
НАН Украины, г. Киев

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Здесенко Юрий Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Прскопец Геннадий Александрович

кандидат физико-математических наук
Литвинский Людвиг Леонидович

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных
исследований, г.Дубна

Защита состоится 26 января 1995 г. в 14:45 на заседании
специализированного совета Д016.03.01 Института ядерных
исследований НАН Украины в зале заседаний ИЯИ НАН Украины по
адресу: 252028, г. Киев, пр. Науки, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ НАН
Украины

Автореферат разослан 26 декабря 1994 г.
Ученый секретарь специализированного совета
Д016.03.01

В.Д. ЧЕСНОКОВА

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Стандартная модель, объединяющая квантовую хромодинамику и теорию электрослабых взаимодействий, описывает практически всю совокупность наблюдаемых данных в физике частиц. Вместе с тем, в рамках этой теории нельзя ответить на целый ряд важных вопросов: о квантовании заряда, о происхождении масс кварков и лептонов, о роли и количестве поколений лептонов и природе кварк-лептонной симметрии и т. д. Во всех теориях, претендующих на более полное описание природы и являющихся расширением стандартной модели (суперсимметрии, теории великого объединения, супергравитация и т. д.) масса нейтрино является одной из ключевых величин и выбор, или исключение того или иного варианта теории, может быть сделан на пути прецизионного³ изучения свойств этих частиц. Одними из наиболее чувствительных⁶ к массе нейтрино являются опыты направленные на поиск безнейтринного двойного бета-распада атомных ядер. Не смотря на то, что в многочисленных экспериментах, проводимых на разных ядрах с помощью разнообразных методов, это явление пока не обнаружено, результаты этих исследований позволяют ограничить значение эффективной майорановской массы электронного нейтрино, параметры примесей правых токов в слабом взаимодействии, константу связи нейтрино с майороном и ряд других принципиально важных для развития теории параметров.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключалась в достижении как можно более высокой чувствительности в опыте по поиску 2β -распада ^{116}Cd ядра, являющегося одним из наиболее благоприятных, с точки зрения теоретических предсказаний вероятности этого процесса.

ДОСТОВЕРНОСТЬ результатов диссертационной работы основана на

простой и ясной методике проведения экспериментов с помощью высокочувствительных низкофонных сцинтилляционных спектрометров с кристаллами вольфрамата кадмия ($^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4). Анализ результатов на ЭВМ проводился с помощью проверенных программ и методов с учетом рекомендаций Particle Data Group по обработке данных при малой статистике. При оценке систематической погрешности определения периода полураспада ^{116}Cd по отношению к $2\nu 2\beta$ -распаду тщательно проанализированы все возможные источники ошибок.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ состоит в том, что впервые: 1) Установлен предел периода полураспада ^{116}Cd относительно $0\nu 2\beta$ -распада на основное состояние ^{116}Sn на уровне $2,9(5,4) \cdot 10^{22}$ лет (доверительная вероятность 90(68) %). Из сравнения этого результата с теорией следует ограничение на эффективную майорановскую массу нейтрино: $\langle m_\nu \rangle \leq 4,1$ eВ (одно из наиболее жестких ограничений, наряду с ^{76}Ge , ^{136}Xe , ^{150}Nd) и параметры примесей правых токов в слабом взаимодействии: $\langle \eta \rangle \leq 5,9 \cdot 10^{-8}$, $\langle \lambda \rangle \leq 5,3 \cdot 10^{-6}$. 2) В опыте наблюдается превышение скорости счета обогащенного детектора над необогащенным, которое может быть интерпретировано как двухнейтринный двойной бета-распад ^{116}Cd с $T_{1/2}^{2\nu 2\beta} = (2,7 \pm 1,0) \cdot 10^{19}$ лет. 3) Для 2β -переходов ^{116}Cd на 2^+ и два наинизших 0^+ возбужденных уровня ^{116}Sn получены ограничения на периоды полураспада отдельно для 2ν - и 0ν -каналов 2β -распада, из которых один предел ($T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 2^+, 1293,5 \text{ keV}) \geq 4,4 \cdot 10^{21}$ (90% CL)) наиболее жесткий.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ состоит в развитии методики низкофонных экспериментов с использованием сцинтилляционных детекторов с кристаллами вольфрамата кадмия, в том числе обогащенными ^{116}Cd .

Установлено, что примеси урана концентрировались в тонкой поверхностном слое сцинтилляторов $^{116}\text{CdWO}_4$. После улавления этого слоя активность урана в обогащенных кристаллах снизилась более чем в 40 раз. Достигнутый в области $0\gamma 2\beta$ -перехода ^{116}Cd уровень фона ($\approx 0,5$ отсчетов/год \cdot кэВ \cdot кг в интервале энергий 2,7-2,9 МэВ), а также полученные оценки активности радиоактивных примесей в кристаллах $^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 (как правило, менее 10^{-5} - 10^{-3} Бк/кг) дают возможность планировать подготовку крупномасштабного эксперимента по поиску 2β -распада ^{116}Cd с чувствительностью $T_{1/2} \sim 10^{25}$ лет.

Низкий фон детекторов с кристаллами вольфрамата кадмия, хорошее энергетическое разрешение и высокая эффективность регистрации γ -квантов открывают возможность их применения для измерений малых γ -активностей радионуклидов в различных образцах (на уровне 10^{-3} - 10^{-1} Бк/кг за сутки измерений).

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены на ежегодных итоговых конференциях ИЯИ НАН Украины (в 1988, 1990, 1991 и 1994 гг.), Всесоюзном Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (в 1989 г.), Всесоюзном семинаре по теоретическим и экспериментальным аспектам проблемы 2β -распада атомных ядер (Киев, 1989 г.), Всесоюзной конференции по фундаментальным взаимодействиям элементарных частиц (Москва, 1990 г.), Международной школе "физика слабых взаимодействий при низких энергиях" (Дубна, 1990г.), Международных симпозиумах по ядерной астрофизике (Баден, Австрия, 1990 г.; Карлсруе, Германия, 1992 г.; Гран Сассо, Италия, 1994 г.), Четырнадцатой Европейской конференции по ядерной физике (Братислава, Чехословакия, 1990 г.), Международном симпозиуме по слабым и электромагнитным взаимодействиям в ядре (Дубна,

1992 г.), 27^й Мориндовской школе "Прогресс в физике атома нейтрино и гравитации" (Лес Арк, Франция, 1992 г.), Третьем международном симпозиуме по теории и феноменологии в астрофизике частиц и подземной физике (Ассерджи, Италия, 1993 г.), Международной школе по ядерной физике (Эричи, Италия, 1993 г.).

По теме диссертации опубликовано 12 работ, список которых приведен в конце автореферата.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ: Диссертация представлена на 145 страницах машинописного текста и состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 37 рисунков, 16 таблиц и 103 библиографических ссылки.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД диссертанта состоит в непосредственном участии в разработке и создании сверхнизкофоновых спектрометров с кристаллами вольфрамата кадмия для поиска и исследований двойного бета-распада атомных ядер, осуществлении количественного анализа радиоактивных примесей в сцинтилляторах, определении локализации урана в $^{116}\text{CdWO}_4$ и уменьшении его концентрации более чем в 40 раз. При участии автора проведены измерения фона $^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 , и анализ данных.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:

1) Низкофоновый сцинтилляционный спектрометр с кристаллами вольфрамата кадмия, обеспечивающий недостижимый на других существующих установках уровень чувствительности к процессу $0\nu 2\beta$ -распада ^{116}Cd .

2) Результаты анализа активности ^{40}K , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{190}Pt , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U в $^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 на уровне 10^{-3} - 10^{-9} Бк/кг, а также снижение удельной активности урана в обогащенных кристаллах более чем в 40 раз.

3) Экспериментально установленные пределы $T_{1/2}$ по отно-

шению к двух- и безнейтринным каналам 2β -переходов ^{116}Cd на основное и три низших возбужденных уровня ядра ^{116}Sn , а также значение периода полураспада ^{116}Cd по отношению к двухнейтринному 2β -распаду на основное состояние ^{116}Sn с оговоркой о возможности имитации эффекта β -распадом ^{90}Y .

4) Ограничения на эффективную массу электронного нейтрино и параметры примесей правых токов в слабом взаимодействии ($\text{Cl}=90\%$): $\langle m_\nu \rangle \leq 4,1 \text{ эВ}$, $\langle \eta \rangle \leq 5,9 \cdot 10^{-8}$, $\langle \gamma \rangle \leq 5,3 \cdot 10^{-8}$

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность исследований двойного бета-распада атомных ядер и необходимость проведения опытов с разными потенциально 2β -активными ядрами. Сформулирована цель работы, описаны ее структура и содержание. Перечислены конференции и совещания, на которых были представлены основные результаты и список публикаций по теме диссертации.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ рассмотрены основные аспекты теории 2β -распада и описаны наиболее чувствительные опыты. Приведены аргументы в пользу проведения измерений с ^{116}Cd и представлены результаты оптимизации характеристик сцинтилляционных спектрометров с кристаллами вольфрамата кадмия.

Ядро ^{116}Cd было выбрано в качестве объекта исследований из-за малой величины теоретически рассчитанного произведения $T_{1/2}^{0\nu 2\beta} \cdot \langle m_\nu \rangle^2 = 4,87 \cdot 10^{23} \text{ год} \cdot \text{эВ}^2$, высоких энергии перехода ($2802 \pm 4 \text{ кэВ}$) и содержания в природной смеси изотопов кадмия ($7,49 \pm 0,09 \%$), а также возможности использования детекторов с кристаллами вольфрамата кадмия.

Приведены результаты измерений зависимости световыхода и разрешения от формы, обработки поверхности кристаллов, выбора отражателей света и фотоумножителей, постоянных фор-

мирования спектрометрических сигналов и формы световодов. В результате оптимизации характеристик сцинтилляционных детекторов с CdWO_4 получено разрешение 9,5; 7,5 и 5,5% по γ -квантам с энергиями 662 кэВ (^{137}Cs), 1332 кэВ (^{60}Co) и 2615 кэВ (^{232}Th), соответственно, с кристаллом $\phi 25 \times 17 \text{ мм}^3$.

Для повышения количества исследуемых ядер, совместно с Институтом монокристаллов НАН Украины (Харьков), был выращен кристалл вольфрамата кадмия общей массой 510 г обогащенный ^{116}Cd до 83%. После отжига при температуре 820°C в течение 20 часов световыход возрос в 1,15 раза, а энергетическое разрешение улучшилось в 1,09 раза и с лучшим образцом составило 13,0% (по γ -квантам ^{137}Cs с энергией 662 кэВ).

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ описаны измерения фона детекторов $^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 на поверхности Земли и в подземной лаборатории как без защиты, так и в различных низкофоновых установках. Приводятся результаты анализа ряда радионуклидов в кристаллах.

На поверхности Земли индекс фона CdWO_4 $\phi 25 \times 17 \text{ мм}^3$ в установке с комплексной пассивной и активной защитой в области $0,2\beta$ -распада ^{116}Cd составил 130 отсч./год·кэВ·кг, что в 230 раз меньше, чем у незащищенного детектора. Уровень фона незащищенного детектора в Солотвинской подземной лаборатории (в диапазоне энергий 0,4–3,4 МэВ) в 50–60 раз ниже, чем на поверхности. Дальнейшее снижение фона достигнуто благодаря применению различных вариантов пассивной и активной защит. Общее время фоновых измерений превысило 30 тысяч часов в 11 вариантах конструкции установок. Лучший уровень фона ($\approx 0,5$ отсч./год·кэВ·кг в интервале 2,7–2,9 МэВ) достигнут в установке с пластмассовым защитным сцинтиллятором размерами $\phi 38 \times 115 \text{ см}^3$ с активным световодом из сцинтилляционной пластмассы (длиной 51 см). Пассивная защита состоит из меди

(5 см) и свинца (22,5 см). Калибровка энергетической шкалы и контроль разрешения спектрометра осуществляется по γ -квантам ^{207}Bi и ^{232}Th . Незначительные ($\sim 1-2\%$ за неделю) смещения калибровки корректируются затем программным путем. Мертвое время детектора измеряется по светодиоду и составляет 4-5%.

Резкий подъем в фоне кристалла $^{116}\text{CdWO}_4$ объемом 19 см^3 ниже энергии 350 кэВ обусловлен β -распадом ^{113}Cd , а природа пика с энергией около 830 кэВ была выяснена в измерениях с применением схемы идентификации частиц по форме сцинтилляционной вспышки. Площадь α -пика в спектре обогащенного кристалла ($3,2 \pm 0,5$ отсч./ч) соответствует площади пика в спектре фона, измеренного в обычном режиме, а энергия, с учетом α/β -соотношения ($0,20 \pm 0,03$), позволяет приписать этот пик α -распадам ^{238}U и ^{234}U с активностью $2,8 \pm 0,5$ мБк/кг.

Колебания удельного содержания урана в пределах $0,5-4,0$ мБк/кг у пяти разных кристаллов $^{116}\text{CdWO}_4$, отколотых из одной булы, а также отличия в ширинах и положениях α -пиков позволили предположить, что примеси урана сосредоточены в поверхностном слое кристаллов. После сошлифовки кристалла $^{116}\text{CdWO}_4$ объемом 19 см^3 по поверхности на толщину $0,8-1,5$ мм удельная активность урана снизилась более чем в 40 раз.

Анализ фоновых спектров в разных энергетических интервалах позволил сделать оценки активности в кристаллах $^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 природных радионуклидов семейств ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{190}Pt , ^{40}K , а также наиболее вероятных техногенных изотопов ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs . Результаты этих оценок свидетельствуют о высокой степени чистоты сцинтилляторов $^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 (активности указанных радионуклидов, как правило, ниже $10^{-3}-10^{-5}$ Бк/кг).

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ проделаны оценки скорости протекания различ-

ных мод 2β -распада ^{116}Cd , полученные результаты сравниваются с теорией и результатами других экспериментов, а также обсуждаются возможности повышения чувствительности опытов.

Поскольку ни в одном спектре эффект $0\nu 2\beta$ -распада явно не наблюдается, задачей анализа фона является оценка количества событий эффекта, гипотезу о наличии которых можно отбросить с заданной степенью доверительной вероятности. Сумма фоновых спектров трех кристаллов $^{116}\text{CdWO}_4$ объемом 12,5, 15,2 и 16,2 см³, с индексами фона в интервале 2,7-2,9 МэВ не более 0,6 отсч./год·кэВ·кг (общее живое время измерений 5822 ч), была использована для такого анализа. Эффективность детекторов к разным каналам 2β -распада была рассчитана с помощью программы моделирования движения электронов по методу Монте-Карло. Оценки величины исключаемого эффекта были выполнены по методу максимального правдоподобия и методом наименьших квадратов. Фон на участке 2,4-3,4 МэВ аппроксимировался тремя функциями, одна из которых представляла эффект (гауссиан с центром тяжести при энергии перехода ^{116}Cd и шириной на половине высоты 189 кэВ), а две другие - фон (гауссиан, соответствующий пику ^{208}Tl из ряда ^{232}Th с энергией 2615 кэВ, а также полином (первой или второй степени), описывавший непрерывный фон). Оба метода дают для исключаемой с доверительной вероятностью 90% площади пика $0\nu 2\beta$ -распада (с учетом рекомендаций Particle Data Group) близкие значения в интервале 0,7-2,4 отсчетов. Использование верхней границы интервала приводит к пределу периода полураспада ^{116}Cd относительно $0\nu 2\beta$ -распада $\lim_{1/2}^{0\nu 2\beta} = 2,9(5,4) \cdot 10^{22}$ лет (CL=90(68) %).

В опыте процесс $2\nu 2\beta$ -распада ^{116}Cd не наблюдается явно. Вписывая смоделированное $2\nu 2\beta$ -распределение в эксперимен-

тальный спектр обогащенного кристалла объемом 15.2 см³ таким образом, чтобы последний нигде не был превышен получим: $\lim T_{1/2}^{2\nu 2\beta} = 1,8 \cdot 10^{10}$ лет (СЛ=99%). Другой подход к оценке $T_{1/2}^{2\nu 2\beta}$ основан на сравнении спектров обогащенного и необогащенного детекторов. Разность спектров $^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 (после вычитания модельных распределений, соответствующих примесям в кристаллах ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{238}U) согласуется с теоретическим $2\nu 2\beta$ -распределением ^{116}Cd при $T_{1/2} = 2,7 \cdot 10^{10}$ лет. Отношение эффект/фон в диапазоне энергий 1,2-2,5 МэВ составляет 1,1/1. Учет погрешностей в определении числа ядер, энергетической шкалы, эффективности, времени измерений, а главное, неопределенностей, связанных с оценкой загрязненности детекторов и нормировкой на объем, приводит к следующему значению $T_{1/2}$ для двухнейтринного 2β -распада ^{116}Cd на основное состояние ^{116}Sn :

$$T_{1/2}^{2\nu 2\beta} = [2,7^{+0,5}_{-0,4} (\text{стат.})^{+0,8}_{-0,6} (\text{сист.})] \cdot 10^{10} \text{ лет.}$$

Однако нельзя исключить имитации эффекта β -спектром ^{90}Y при наличии в обогащенном кристалле ^{90}Sr с активностью $2 \cdot 10^{-3}$ Бк/кг. Окончательное заключение о наблюдении $2\nu 2\beta$ -распада ^{116}Cd в настоящем опыте можно будет сделать после прецизионного измерения количества ^{90}Sr в кристаллах.

В разделе 3.3 описаны результаты поиска 2β -переходов ^{116}Cd на 2^+ и два низших 0^+ уровня ^{116}Sn как в спектрах совпадений так и антисовпадений $^{116}\text{CdWO}_4$ с защитным сцинтиллятором. Более высокая чувствительность достигается во втором случае. Для определения эффективности полного поглощения γ -квантов в кристаллах $^{116}\text{CdWO}_4$, были использованы результаты измерений с источниками γ -квантов ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{137}Cs и ^{54}Mn с известной активностью. Оценки предельных площадей эффекта для $2\nu 2\beta$ - и $0\nu 2\beta$ -переходов на возбужденные уровни

были проделаны по методике аналогичной использованной при оценках скорости 2β -распада на основное состояние. В результате получены такие пределы $T_{1/2}$ для 2β -переходов ^{116}Cd на возбужденные уровни ^{116}Sn :

$T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 2^+, 1293,5 \text{ кэВ}) \geq 4,4 \cdot 10^{21} \text{ лет}$	СЭ=90%,
$T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, 1756,8 \text{ кэВ}) \geq 1,2 \cdot 10^{21} \text{ лет}$	СЭ=90%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, 2027,3 \text{ кэВ}) \geq 9,5 \cdot 10^{20} \text{ лет}$	СЭ=90%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 2^+, 1293,5 \text{ кэВ}) \geq 2,7 \cdot 10^{19} \text{ лет}$	СЭ=99%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, 1756,8 \text{ кэВ}) \geq 2,2 \cdot 10^{19} \text{ лет}$	СЭ=99%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, 2027,3 \text{ кэВ}) \geq 2,1 \cdot 10^{19} \text{ лет}$	СЭ=99%.

В разделе 3.4 оценки $T_{1/2}$ для разных каналов 2β -распада ^{116}Cd сравниваются с теорией и результатами других экспериментов. Используя предел $T_{1/2}^{0\nu 2\beta}$ по отношению к переходу на основное состояние ^{116}Sn и расчеты Гайдельбергской группы [Staudt A. et al./Europhys. Letters. - 1990. - Vol.13. - P.31], получим ограничения на эффективную майорановскую массу электронного нейтрино и параметры примесей правых токов в слабом взаимодействии (СЭ=90%): $\langle m_\nu \rangle \leq 4,1 \text{ эВ}$, $\langle \eta \rangle \leq 5,9 \cdot 10^{-9}$, $\langle \lambda \rangle \leq 5,3 \cdot 10^{-9}$.

Как предел $T_{1/2}$ для $2\nu 2\beta$ -распада ^{116}Cd ($T_{1/2}^{2\nu 2\beta} \geq 1,8 \cdot 10^{19}$ лет), так и положительный результат ($T_{1/2}^{2\nu 2\beta} = (2,7_{-0,7}^{+1,0}) \cdot 10^{19}$ лет) не противоречит теоретическим оценкам ($2,9 \cdot 10^{19}$ - $1,2 \cdot 10^{20}$ лет - из вышеупомянутой работы Staudt A. и др.). Измеренное значение $T_{1/2}^{2\nu 2\beta}$ хорошо согласуется с результатом японско-украинского эксперимента проделанного по другой методике на установке ELEGANTS V: $T_{1/2}^{2\nu 2\beta} = (2,6_{-0,6}^{+0,9}) \cdot 10^{19}$ лет [Ejiri H. et al./Prog. Part. Nucl. Phys. - 1994. - Vol.32. - P.119.]

Ранее поиски 2β -переходов ^{116}Cd на возбужденные состояния ^{116}Sn предпринимались с помощью полупроводниковых герма-

ниевых детекторов [Fierke A. et al./Nucl. Phys. A. - 1994. - v.577 - p.497.]. В настоящем эксперименте впервые получены ограничения отдельно для разных мод распада. При этом оценка для $0\nu 2\beta$ -перехода на 2^+ возбужденный уровень превышает остальные результаты.

Возможности повышения чувствительности опыта с ^{116}Se обсуждаются в разделе 3.5. Увеличив количество ядер до 10^{26} (около 60 кг ^{116}Se), уже при достигнутом уровне фона и энергетическом разрешении, за три года измерений может быть получен предел $T_{1/2} \sim 2 \cdot 10^{24}$ лет ($\langle m_\nu \rangle \sim 0,6$ эВ). Дальнейшее повышение чувствительности возможно за счет снижения уровня фона до 0,03 отсч./год·кэВ·кг (используя кристаллы $^{116}\text{SeWO}_4$ с тем же уровнем радиоактивных примесей, как в настоящее время) при условии использования более качественных активной и пассивной защит, определения формы сигналов, временного анализа событий. Это позволит за 5 лет экспозиции наблюдать эффект, или установить предел $T_{1/2}$ на уровне 10^{25} лет, что соответствует эффективной майорановской массе нейтрино 0,2 эВ. Успешные результаты опыта с использованием SeWO_4 в качестве боллометрического детектора позволяют планировать эксперимент с чувствительностью, труднодостижимой в обозримом будущем с другими ядрами (кроме, возможно, ^{136}Xe).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований, выполненных в процессе диссертационной работы, следующие:

- 1) В результате оптимизации формы кристаллов и световодов, характера обработки поверхности сцинтилляторов, подбора материалов отражателей и оптического контакта, выбора фотомножителей и параметров спектрометрического тракта разрабо-

таны сцинтилляционные спектрометры с кристаллами вольфрамата кадмия, удовлетворяющие требованиям низкофонового эксперимента по поиску 2β -распада ^{110}Cd .

2) В процессе усовершенствования конструкции защиты, фон детектора с кристаллами $^{110}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 снижен до $\approx 0,5$ отсч./год·кэВ·кг, что сравнимо с уровнем фона лучших низко-фоновых полупроводниковых детекторов из гиперчистого германия. Отработана методика проведения длительных измерений, обеспечивающая надежность и достоверность экспериментальных данных.

3) Из анализа спектров фона обогащенных и обычных кристаллов вольфрамата кадмия получены оценки содержания в них радионуклидов ^{40}K , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{190}Pt , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U на уровне 10^{-3} - 10^{-5} Бк/кг.

4) Примеси урана концентрировались в тонком поверхностном слое сцинтилляторов $^{110}\text{CdWO}_4$, после удаления которого активность урана в кристаллах снизилась более чем в 40 раз.

5) На основании анализа измеренных фоновых спектров установлены пределы $T_{1/2}$ по отношению к двух- и безнейтринным каналам 2β -переходов ^{110}Cd на основное и три низших возбужденных уровня ядра ^{110}Sn :

$T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, \text{осн. сост.}) \geq 2,9 \cdot 10^{22}$ лет	CL=90%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, \text{осн. сост.}) \geq 1,8 \cdot 10^{20}$ лет	CL=99%,
$T_{1/2}^{0\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 2^+, 1293,5 \text{ кэВ}) \geq 4,4 \cdot 10^{21}$ лет	CL=90%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, 1756,8 \text{ кэВ}) \geq 1,2 \cdot 10^{21}$ лет	CL=90%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, 2027,3 \text{ кэВ}) \geq 9,5 \cdot 10^{20}$ лет	CL=90%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 2^+, 1293,5 \text{ кэВ}) \geq 2,7 \cdot 10^{20}$ лет	CL=99%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, 1756,8 \text{ кэВ}) \geq 2,2 \cdot 10^{20}$ лет	CL=99%,
$T_{1/2}^{1\nu 2\beta}(0^+ \rightarrow 0^+, 2027,3 \text{ кэВ}) \geq 2,1 \cdot 10^{20}$ лет	CL=99%,

а также значение периода полураспада ^{110}Cd по отношению к

двухнейтринному 2β -распаду на основное состояние ^{116}Sn :

$$T_{1/2}^{2\nu 2\beta} = \{2 \cdot T_{0,4}^{+0,0}(\text{стат.}) \cdot T_{0,8}^{+0,0}(\text{сист.})\} \cdot 10^{12} \text{ лет.}$$

Однако нельзя исключить возможности имитации эффекта β -распадом ^{90}Y при активности ^{90}Sr в, обогащенном кристалле $2 \cdot 10^{-3}$ Бк/кг.

6) Из сравнения предела $T_{1/2}^{0\nu 2\beta}$ ($0^+ + 0^+$) с теорией получены (с доверительной вероятностью 90%) ограничения на эффективную майорановскую массу нейтрино и параметры примесей правых токов в слабом взаимодействии: $\langle m_{\nu} \rangle \leq 4,1$ эВ, $\langle \eta \rangle \leq 5,9 \cdot 10^{-8}$, $\langle \lambda \rangle \leq 5,3 \cdot 10^{-6}$.

7) На основании данных о высокой степени чистоты (относительно радионуклидов) кристаллов $^{116}\text{CdWO}_4$ и CdWO_4 , а также достигнутого уровня фона и энергетического разрешения сделаны выводы о возможностях повышения чувствительности эксперимента до $T_{1/2}^{0\nu 2\beta} \sim 10^{25}$ лет ($\langle m_{\nu} \rangle \sim 0,2$ эВ).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1) Даневич Ф. А., Здесенко Ю. Г., Николайко А. С., Бурачас С. Ф., Нагорная Л. Л., Рыжиков В. Д., Батенчук М. М. Сцинтилляторы CdWO_4 , ZnSe , ZnWO_4 в исследованиях 2β -процессов // Приборы и техника эксперимента. - 1989. - № 5. - С. 80-84.

2) Даневич Ф. А., Здесенко Ю. Г., Николайко А. С., Третяк В. И. Поиск 2β -распада ^{116}Cd с помощью сцинтиллятора $^{116}\text{CdWO}_4$ // Письма в ЖЭТФ. - 1989. - Т. 49, вып. 6. - С. 417-420.

3) Василенко В. В., Даневич Ф. А., Жук Н. А., Здесенко Ю. Г., Кропивянский Б. Н., Куц В. Н., Николайко А. С., Третяк В. И. Низкофонная установка для изучения редких процессов распада атомных ядер // Приборы и техника эксперимента. -

1990. - Т.1. - С.61-68.

4) Бухнер Е., Вишнеvский И.Н., Даневич Ф.А., Здесенко Ю.Г., Клапдор Х.В., Кропивянский Б.Н., Куц В.Н., Пипке А., Третьак В.И., Хойсер Г., Шнайдер Ю., Штреккер Х. Редкие распады ядер ртути//Ядерная физика. - 1990. - Т.52, вып.2. - С.305-311.

5) Alessandrello A., Brofferio C., Camin D.V., Cremonesi O., Danevich F.A., de Marcillac P., Fiorini E., Giuliani A., Kouts V.N., Nikolayko A.S., Pavan M., Pessina G., Previtali E., Vignoli C., Zanotti L., Zdesenko Yu.G. Bolemetric measurement of the beta spectrum of ^{113}Cd /Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) - 1994. - V.35. - P.394-396.

6) Бондаренко О.А., Гарькуша Г.Н., Даневич Ф.А., Жук Н.А., Здесенко Ю.Г., Костеж А.Б., Кропивянский Б.Н., Куц В.Н., Музалевский В.В., Николайко А.С., Третьак В.И. Радиоактивная загрязненность материалов для низкофоновых установок //Препринт ИЯИ АН УССР: № 85-27. - Киев. - 1985. - 40 с.

7) Бурачас С.Ф., Даневич Ф.А., Здесенко Ю.Г., Рыжиков В.Д., Третьак В.И. О возможности поиска 2β -распада ^{180}Gd с помощью сцинтилляторов GSO//Препринт ИЯИ АН Украины: № 93-2. - Киев. - 1993. - 12 с.

8) Danevich F.A., Kropivnyanski B.N., Kuts V.N., Tretyak V.I., Vishnevsky I.N., Zdesenko Yu.G., Buchner E., Heusser G., Klappdor H.V., Piepke A., Schneider J., Strecker H. Rare decays of mercury// Nucl. In Cosmos: Proc. Int. Symp. on Nucl. Astrophysics, Baden/Vienna, Austria, June 18-22, 1990. - Preprint Max-Planck-Institut fur Physik und Astrophysik: N MPA/P4. - 1990. - P.301-307.

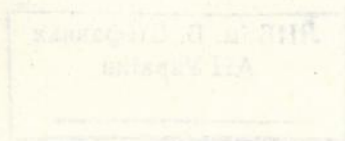
9) Danevich F.A., Kobychев V.V., Kouts V.N., Tretyak V.I., Zdesenko Yu. New limits $T_{1/2}$ for double β -decay of

^{116}Cd and $0\nu\beta^+$ /electron capture of ^{105}Cd // Progress in Atomic Physics, Neutrinos and Gravitation: Proc. 27th Rencontre de Moriond, Les Arcs, Savoie, France, Jan. 25 - Feb. 1, - 1992. - Ed. Frontieres, 1992. - P.183-187.

10) Danevich F.A., Kobychev V.V., Kouts V.N., Tretyak V.I., Zdesenko Yu. New limits of half-lives for 2β processes in Cd and W isotopes//WEIN-92: Proc. of III Int. Symp. on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei, Dubna, Russia, June 16-22, 1992. - World Scientific Publ. Co., 1993. - P.575-581.

11) Danevich F.A., Kobychev V.V., Kouts V.N., Tretyak V.I., Zdesenko Yu. New limits $T_{1/2}$ for double β -decay of ^{116}Cd and $0\nu\beta^+$ /electron capture of ^{105}Cd //Nuclei in Cosmos: Proc. Int. Symp. on Nucl. Astrophys., Karlsruhe, Germany, July 6-10, 1992. - IOP Publishing, 1993. - P.429-432.

12) Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychev v.v., Kropivyanaki B.N., Kouts V.N., Nicolaiko A.S., Tretyak V.I., Zdesenko Yu. The research of 2β -decay of ^{116}Cd with enriched $^{116}\text{CdWO}_4$ crystal scintillators//Nuclei in Cosmos: Abstract Booklet of 3-rd Int. Symp. on Nucl. Astrophys., Gran Sasso, Italy, July 8-13, 1994. - 1994. - P.22.



Даневич Ф.А. Пошук 2β -розпаду ^{116}Cd за допомогою сцинтиляторів вольфрамату кадмію.

Дисертація (рукопис) на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра і елементарних часток, Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, 1994.

Захищаються результати експериментальних досліджень різних каналів подвійного бета-розпаду ^{116}Cd на основний та три найнижчі збуджені рівні ^{116}Sn за допомогою низькофонового сцинтиляційного спектрометра з кристалами вольфрамату кадмію. Встановлена границя періоду напіврозпаду відносно $0\nu 2\beta$ -розпаду: $\lim T_{1/2}^{0\nu 2\beta} = 2,9 \cdot 10^{22}$ років (довірча ймовірність 90%), звідки випливає обмеження на ефективну майоранівську масу нейтрино $\langle m_{\nu} \rangle \leq 4,1$ еВ.

Danevich F.A. The research of ^{116}Cd with the help of the cadmium tungstate scintillators.

The dissertation (manuscript) on degree Candidate of physical and mathematical sciences on a specialties 01.04.16 - the physics of nucleus and elementary particles, Institute for Nuclear Research of the Ukrainian National Academy of Sciences, Kyiv, 1994.

The results of the investigations of various channels of ^{116}Cd double beta decay to a ground and three lowest excited states of ^{116}Sn with the help of the low background cadmium tungstate crystals scintillation spectrometer is defended.

A lower limit $\lim T_{1/2}^{0\nu 2\beta} = 2,9 \cdot 10^{22}$ y (90% CL) has been set for neutrinoless 2β decay which restricts the Majorana neutrino mass $\langle m_{\nu} \rangle \leq 4.1$ eV.

Ключові слова: подвійний бета-розпад, сцинтиляційний спектрометр, радіоактивний фон, нейтрино

Подписано к печати 12.12.1994 г.

Бумага тип. Офсетная печать. Усл. печ. лист 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ 53

ИЯИ НАН Украины, 252028 Киев 28, пр. Науки, 47

456737

AB 31.658

AB 31.658