

УДК 539.165

6-85-464

НИКОЛАЙКО

Андрей Степанович

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
БЕЗНЕЙТРИННОГО ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА
 ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{76}Ge

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Институте ядерных исследований АН УССР,
Киев.

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук

Ю.Г.Здесенко

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

Ц. Вылов

Л.А.Попеко

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт ядерных исследований АН СССР, Москва

Защита диссертации состоится "____" _____ 1985 г.
в _____ час. на заседании специализированного Совета
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института
ядерных исследований, Дубна Московской области.

Автореферат разослан "____" _____ 1985 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь специализированного Совета
доктор физико-математических наук

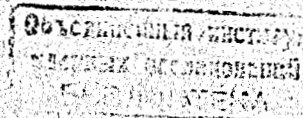
Ю.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Традиционный интерес к продолжающимся вот уже пятьдесят лет исследованиям двойного бета-распада [Goerpert-Mayer M. Phys. Rev., 1935, v.18, p. 512.] обусловлен несколькими причинами, главной из которых является взаимосвязь этого процесса со свойствами нейтрино и слабого взаимодействия. Первоначально изучение перехода $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$ рассматривалось как способ проверки тождественности нейтрино и антинейтрино, а также как источник информации о слабом взаимодействии и особенностях структуры атомных ядер.

В настоящее время повышенный интерес к проблеме 2β -распада объясняется успешным развитием теорий, объединяющих электрослабые и сильные взаимодействия элементарных частиц, в рамках которых законы сохранения барионного и лептонного зарядов не являются точными, а нарушаются при энергиях, соответствующих масштабу объединения. Вследствие этого должны происходить такие процессы, как распад протона, безнейтринный двойной бета-распад атомных ядер, распад мюонов без излучения нейтрино и ряд других. Существование 2β -распада означало бы отличие поляризации нейтрино от полной, что может быть связано с ненулевой массой нейтрино или с возможным вкладом правых лептонных токов. Во многих моделях единых калибровочных теорий предположения о ненулевой массе нейтрино и о возможной интерференции левых и правых токов в слабом взаимодействии вводятся естественным образом.

В связи с этим обнаружение $2\beta \rightarrow 0\nu$ -распада, нарушающего закон сохранения лептонного заряда, послужило бы сильным аргументом в пользу теорий "великого объединения", а доказательство его отсутствия привело бы к строгим ограничениям на некоторые параметры теорий -



константы взаимодействия заряженных и нейтральных хиггсовских бозонов с лептонами, степень несохранения лептонного заряда, постоянные, характеризующие примесь в слабом взаимодействии правых лептонных и адронных токов; масса нейтрино. Как известно, масса нейтрино имеет исключительно важное значение не только в теории элементарных частиц, но также в космологии и астрофизике, поскольку с ней связаны средняя плотность, геометрия, возраст и эволюция Вселенной, возможные осцилляции различных типов нейтрино.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность исследований двойного бета-распада и способствуют повышению их интенсивности.

Экспериментальному изучению двойного бета-распада посвящено значительное количество работ. Неоднократно появлялись сообщения об обнаружении этого явления как в прямых лабораторных опытах (^{48}Ca , ^{96}Zr , ^{82}Se , ^{124}Sn), так и в косвенных геохимических экспериментах (^{82}Se , ^{128}Te , ^{130}Te), тем не менее однозначное и достоверное доказательство его существования пока отсутствует. Сложность постановки опытов с непосредственной регистрацией продуктов распада объясняется существованием трудноустраняемых фоновых процессов, имитирующих двойной бета-распад, поэтому на современном уровне исследовано весьма ограниченное количество потенциально 2β -активных ядер. Это - ^{48}Ca ($T_{1/2} \geq 2 \cdot 10^{21}$ лет); ^{76}Ge ($T_{1/2} \geq 1,2 \cdot 10^{23}$ лет); ^{82}Se ($T_{1/2} \geq 3,1 \cdot 10^{21}$ лет); ^{130}Te ($T_{1/2} \geq 1,2 \cdot 10^{21}$ лет) и ^{150}Nd ($T_{1/2} \geq 1,2 \cdot 10^{21}$ лет). Поскольку вероятность и другие характеристики безнейтринного двойного бета-распада могут сильно зависеть от энергии перехода и свойств родительского ядра, для обнаружения 2β -процессов необходимо как расширение перечня исследуемых нуклидов, так и дальнейшее повышение чувствительности применяемых методик.

Цель работы. Исследования безнейтринного двойного бета-распада ^{96}Zr и ^{100}Mo на установке со сцинтилляционными детекторами. Разработка методики изучения $2\beta 0\nu$ -распада ^{76}Ge с помощью полупроводникового германий-литиевого детектора и исследование ее возможностей в опыте, проводимом на поверхности Земли. Расчет ограничений на параметры теоретических моделей, основанный на полученных экспериментальных данных. Создание подземной низкофоновой лаборатории и изучение возможностей повышения чувствительности прямых опытов по регистрации безнейтринного двойного бета-распада.

Метод исследования и научная новизна результатов. В работе проводилось изучение безнейтринного двойного бета-распада в прямых опознавательных экспериментах, основанных на изучении энергетического спектра излучения образца, содержащего в своем составе потенциально 2β -активные ядра и использующих характерное свойство этого процесса - постоянство суммарной энергии испускаемых электронов. Предельная скорость безнейтринного 2β -распада при отсутствии пика в области $2\beta 0\nu$ -перехода вычислялась исходя из уровня фона в соответствующем энергетическом диапазоне.

С этой целью была усовершенствована существующая низкофоновая установка со сцинтилляционными детекторами, а также была разработана и создана методика для исследования двойного бета-распада с помощью полупроводникового германий-литиевого детектора.

Осуществлены эксперименты по изучению 2β -распада ^{76}Ge , ^{96}Zr и ^{100}Mo , общей продолжительностью 1833 ч, 3160 ч и 2680 ч, в которых установлены граничные значения периодов полураспада по безнейтринному каналу, равные с доверительным уровнем вероятности 68%: $0,8 \cdot 10^{21}$ лет (^{76}Ge , $0^+ \rightarrow 0^+$ переход); $0,6 \cdot 10^{21}$ лет (^{76}Ge , $0^+ \rightarrow 2^+$ переход); $2,5 \cdot 10^{19}$ лет (^{96}Zr) и $2,6 \cdot 10^{21}$ лет (^{100}Mo) соответственно. Проведен расчет ядерных матричных элементов 2β -перехода $^{100}\text{Mo} - ^{100}\text{Ru}$ в рамках оболочечной модели.

Создана подземная низкофоновая лаборатория, находящаяся в соляной шахте на глубине 430 м и обладающая оптимальными фоновыми характеристиками. Проведены измерения уровня фона различных детекторов, которые анализируются и сравниваются с результатами, полученными в других подземных лабораториях, определены пути дальнейшего повышения чувствительности экспериментальных методик по исследованию двойного бета-распада.

Научная и практическая значимость работы. В результате проведенных экспериментов установлено, что предел периода полураспада по отношению к безнейтринному двойному бета-распаду превышает: для ^{76}Ge - $0,8 \cdot 10^{21}$ лет (при переходе в основное состояние ^{76}Se); и $0,6 \cdot 10^{21}$ лет (при переходе на возбужденный уровень 559 кэВ (2^+) ^{76}Se); для ^{96}Zr - $2,5 \cdot 10^{19}$ лет; для ^{100}Mo - $2,6 \cdot 10^{21}$ лет при доверительном уровне вероятности 68%. Границы периода полураспада ^{96}Zr и ^{100}Mo на таком уровне чувствительности установлены впервые. При сравнении этих величин со значениями, рассчитанными по теоретическим моделям, получены

важные ограничения на возможное присутствие резонансов в ядрах, массу нейтрино, примесь правых токов в слабом взаимодействии, степень не-сохранения лептонного заряда, константу взаимодействия гипотетических скалярных хиггсовских бозонов с нейтрино. Развитие методики исследований позволили создать низкофоновые установки, которые, функционируя на поверхности Земли, не уступают по своим параметрам лучшим подземным образцам [АЗ, 1981, т.50, в.1, с.43-51].

Создана подземная низкофоновая лаборатория для проведения экспериментов, связанных с поиском редких процессов. Результаты изучения фона различных детекторов в условиях соляной шахты позволяют планировать дальнейшее существенное повышение чувствительности опытов.

Методические разработки и технические решения, развитые в диссертации для изучения безнейтринного 2β -распада, имеют важное значение как для поиска других редких процессов (распад протона, электрона, спонтанные переходы ядер в сверхплотное состояние, регистрация солнечных нейтрино), так и для прикладных измерений (детектирование сверхнизких концентраций радионуклидов искусственного и естественно-го происхождения в природных объектах).

Апробация работы и публикации. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (XXXI, апрель 1981 г. Самарканд; XXXII - март 1982 г., Киев; XXXIV - апрель 1984 г., Алма-Ата); Всесоюзном совещании по сцинтилляторам и люминофорам (НИИ "Монокристаллреактив", сентябрь 1982 г., Харьков), международной конференции "Нейтрино-82" (июнь 1982 г., Балатонфьред, Венгрия), изложены в материалах этих совещаний и конференций, а также опубликованы в 7 печатных работах.

Апробация диссертации осуществлялась на научных семинарах в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, 25 июня 1984 г. и 27 мая 1985 г.), Институте ядерных исследований АН УССР (Киев, 25 апреля 1985 г.)

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 85 страницах машинописного текста, иллюстрируется 52 рисунками и 20 таблицами. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы из 151 наименования на 11 страницах.

НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1. Усовершенствована методика изучения двойного бета-распада атомных ядер на низкофоновой сцинтилляционной установке, решена проблема надежного определения спектрометрических характеристик пластмассовых сцинтилляционных детекторов сложной конфигурации и их энергетической калибровки в процессе долговременных измерений, развита методика подготовки образцов для исследований двойного бета-распада.

2. Подготовлен и проведен прямой эксперимент по поиску безнейтринного двойного бета-распада ^{96}Zr . В опыте продолжительностью 3160 ч установлено, что нижний предел периода полураспада ^{96}Zr с доверительным уровнем вероятности 68% равен $2,5 \cdot 10^{19}$ лет. Это значение превышает ранее установленное ограничение на скорость безнейтринного двойного бета-распада ^{96}Zr примерно в 100 раз.

3. Исследованы возможности дальнейшего усовершенствования методики опознавательных экспериментов и осуществлен опыт по изучению двойного бета-распада ^{100}Mo общей продолжительностью 2680 ч, в результате которого впервые на современном уровне определено граничное значение периода полураспада ^{100}Mo по безнейтринному каналу, равное с доверительной вероятностью 68% - $2,6 \cdot 10^{21}$ лет. До этого опыта с такой чувствительностью исследованы только четыре ядра (^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{130}Te).

4. Разработана методика изучения двойного бета-распада с помощью полупроводникового германий-литиевого детектора, возможности которой исследованы в эксперименте, выполненном на поверхности Земли в течение 1833 ч. Из анализа результатов измерений установлено, что с доверительным уровнем вероятности 68% период полураспада ^{76}Ge при переходе на основное и возбужденное состояния ^{76}Ge превышает значения $0,8 \cdot 10^{21}$ лет и $0,6 \cdot 10^{21}$ лет соответственно.

5. Из сравнения данных, полученных при изучении $2\beta 0\nu$ -распада ^{76}Ge и ^{100}Mo , с теоретическими моделями этого процесса установлены ограничения на майорановскую массу нейтрино: $\langle m_{\nu} \rangle \leq 32,9$ эВ (^{76}Ge) и $\langle m_{\nu} \rangle \leq 14,2$ эВ (^{100}Mo); параметр несохранения лептонного заряда (при $m_{\nu} = 0$) $\delta \leq 1,7 \cdot 10^{-5}$; примесь правых токов в слабом взаимодействии; вероятность присутствия Δ -резонансов в ядре ^{76}Ge ; константу взаимодействия майорона с нейтрино.

6. Создана подземная низкофоновая лаборатория в соляной шахте на глубине ~1000 мвэ, которая обеспечивает оптимальные условия для экспериментов по изучению 2β -распада. Исходя из измерений фона различных детекторов определены методы повышения чувствительности опытов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ освещено современное состояние проблемы 2β -распада и роль его исследований в углублении представлений о природе слабого взаимодействия и проверке предсказаний теорий "великого объединения".

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ рассмотрены теоретические модели 2β -распада и ожидаемые характеристики этого процесса в различных механизмах.

Систематика основных состояний атомных ядер часто приводит к ситуациям, когда ядро (A, Z) легче, чем $(A, Z+1)$, но тяжелее, чем $(A, Z+2)$. При этом энергетически выгоден переход $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2)$, который может

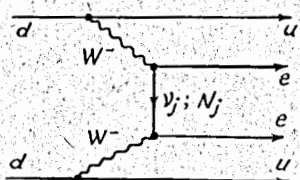


Рис. 1. Кварковая диаграмма $2\beta 0\nu$ -распада.

происходить без испускания нейтрино, т.е. с нарушением закона сохранения лептонного заряда (рис.1). Причинами этого могут являться:

- 1) отличие массы покоя нейтрино от нуля (легкое ν_j или тяжелое N_j , дираковское или майорановское нейтрино);
- 2) примесь правых лептонных или адронных токов в слабом взаимодействии;
- 3) взаимодействие с участием скалярных хиггсовых частиц с однократным или двукратным лептонным зарядом;
- 4) существование нейтрального легкого или безмассового хиггсового бозона - майорона.

Далее в главе показана зависимость характеристик 2β -переходов

от параметров теоретических моделей, приведены расчеты вероятности, угловых и энергетических распределений испускаемых электронов для различных механизмов $2\beta 0\nu$ -распада. Подчеркивается, что основная неопределенность теоретических значений $T_{1/2}(2\beta)$ заключается в расчетах ядерных матричных элементов 2β -распада. Обоснована настоятельная необходимость дальнейшей интенсификации исследований двойного бета-распада и расширения круга исследуемых нуклидов.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ проанализированы состояние и перспективы экспериментальных исследований двойного бета-распада.

Показано, что указания на существование 2β -распада, полученные в косвенных геохимических опытах, не могут являться достоверным доказательством обнаружения этого явления. Представлена полная хронологическая таблица с описанием методик и результатов прямых экспериментов по поиску 2β -распада, подробно рассмотрены опыты с наиболее высокой чувствительностью, описаны планируемые исследования 2β -распада.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ описаны установки, методика проведения и результаты экспериментов по изучению $2\beta 0\nu$ -распада ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{76}Ge .

В опытах по исследованию $2\beta 0\nu$ -распада ^{96}Zr и ^{100}Mo использована низкофоновая установка [Здесенко Ю.Г. и др. - Приборы и техн.экспер., 1979, №5 - с.47-52] с комплексной системой внутренней пассивной (80 мм ртути), "активной" (6 пластмассовых сцинтилляторов с размерами $500 \times 500 \times 200$ мм³ каждый) и внешней пассивной защиты (200 мм стали, 70 мм свинца, 160 мм полиэтилена).

Большой объем ($2000+3000$ см³), сложная форма основного детектора и опасность его радиоактивного загрязнения исключают применение источников электронов для определения спектрометрических характеристик и калибровки энергетического диапазона детектирующей системы во время измерений. Неоднородность световыходов, рассеяние в образце и материалах защиты затрудняют также калибровку при помощи гамма-источников. Для четкого выделения комптоновского края в регистрируемом спектре разработана методика регистрации γ -квантов, испытавших обратное рассеяние в исследуемом детекторе, которая позволила повысить точность определения объемных характеристик пластмассовых сцинтилляционных детекторов сложной конфигурации и производить контроль стабильности энергетической шкалы спектрометра во время измерений, длительность которых достигала нескольких тысяч часов.

Детектор для изучения 2β -распада ^{96}Zr изготовлен из 14 отдель-

ных пластин-сцинтилляторов на основе полистирола толщиной 10 мм каждая. Диаметр детектора равен 145 мм, высота - 185 мм. Детектор соединен с фотоэлектронным умножителем ФЭУ-49Б световодом из полиметилмет-

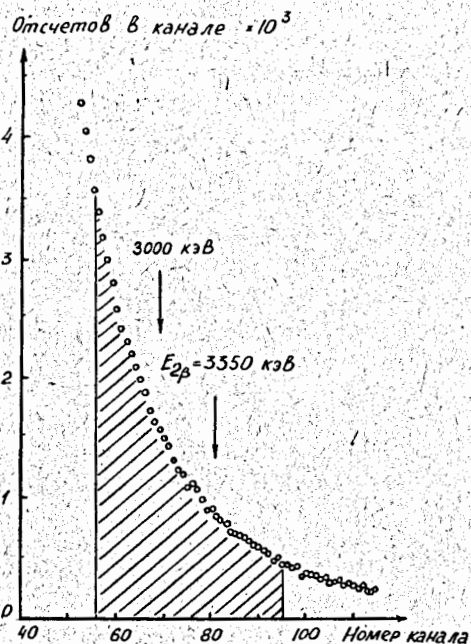


Рис.2. Участок спектра фона с образцом циркония в области предполагаемого 2β -распада ^{96}Zr .

936 ч был набран фон детектора без образца, затем в течение 2231 ч измерения проводились с образцом циркония. В спектрах (рис.2) отсутствуют какие-либо особенности, которые могли бы быть связаны с возможным безнейтринным двойным бета-распадом ^{96}Zr . В зависимости от метода статистической оценки результатов сделано заключение, что нижний предел периода полураспада ^{96}Zr находится в интервале $(1,4+6,5) \cdot 10^{19}$ лет. Ранее наибольшее предельное значение предела периода полураспада ^{96}Zr было установлено в работе [Awschalom M. Phys. Rev., 1956, v.101, № 3 - p.1041-1049]: $T_{1/2} > 5 \cdot 10^{17}$ лет.

акрилата высотой 60 мм и диаметром 145 мм. Образец из необогащенного металлического циркония, помещенный между пластинами сцинтиллятора, перед измерениями был подвергнут дополнительной очистке методом зонной плавки и прокатан в вакууме до толщины $189,5 \text{ мг/см}^2$. Его общая площадь составила $2854,4 \text{ см}^2$, вес циркония - $540,9 \text{ г}$, полезная масса ^{96}Zr - $15,2 \text{ г}$. Энергетическое разрешение детектора для энергии 1 МэВ без образца и с образцом составило 35% и 50% соответственно.

Эксперимент по изучению 2β -распада ^{96}Zr проводился с апреля 1980г. по январь 1981 г. в лаборатории, расположенной в цокольном помещении 9-этажного здания. Вначале за

В опыте по изучению 2β -распада ^{100}Mo с целью повышения концентрации исследуемых ядер была применена новая детектирующая система, общий вид которой показан на рис.3. Основной детектор представляет собой набор из 145 пластмассовых сцинтилляторов, между боковыми гранями которых находятся исследуемые образцы молибдена. Каждый отдельный детектор изготовлен в виде прямоугольного параллелепипеда из полистирола $10 \times 10 \times 85 \text{ мм}^3$, высота блока детекторов 85 мм, диаметр 148 мм. С ФЭУ-49Б сцинтилляторы соединены световодом из полиметилметакрилата $\phi 148 \times 120 \text{ мм}^2$. Энергетическое разрешение детектора в целом равно 30% (1062 кэВ, ^{22}Na) и 20% (2382 кэВ, ^{208}Tl) соответственно. Образцы в виде окисла молибдена (две партии с обогащением ^{100}Mo - 92,2% и 99,5%) предварительно были восстановлены до металлического состояния при высокой температуре в среде очищенного водорода и проверены на радиоактивную загрязненность низкофоновым детектором из

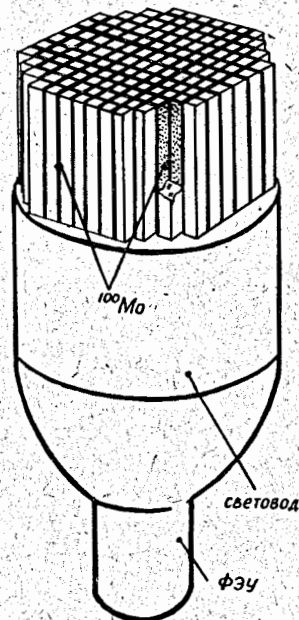


Рис.3. Детектирующая система для изучения 2β -распада ^{100}Mo . NaI(Tl) $\phi 80 \times 80 \text{ мм}^2$, помещенным в низкофоновую полость установки.

Хотя такая система обладает наилучшими фоновыми характеристиками по сравнению с известными отечественными установками, при анализе спектров фона (161 ч) и образца ^{100}Mo (121,5 ч) не выявлено эффектов, вызванных возможной гамма-активностью образца ^{100}Mo .

При подготовке эксперимента было изготовлено методом прессования под давлением 12 т/см^2 264 образца толщиной 144 мг/см^2 , обогащение 99,5%. Они были установлены внутри детектора. Кроме того, сделаны еще 56 образцов (обогащение 92,2%, толщина 158 мг/см^2), которые покрывают наружную поверхность детектирующей системы. Общая масса ^{100}Mo составила 390 г.

Эксперимент по поиску 2β 0 ν -распада ^{100}Mo включал измерение

фона детектора (460 ч) и возможной 2β -активности ^{100}Mo (2220 ч). Информация выводилась один раз в сутки, калибровка спектрометра регулярно проводилась с источниками ^{22}Na и ^{208}Tl . Энергия возможного 2β -перехода ^{100}Mo - ^{100}Ru равна 3,032 МэВ, схема перехода и энергетический спектр детектора, измеренный с образцом ^{100}Mo , показаны на рис.4.

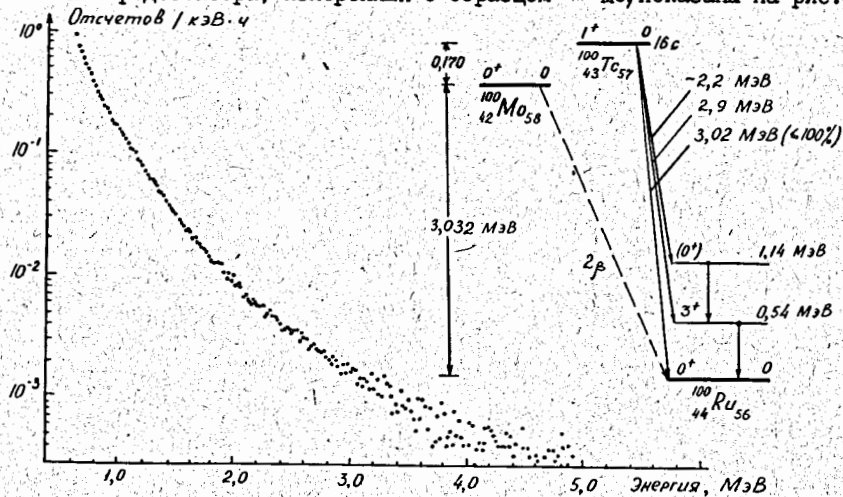


Рис.4. Схема уровней триплета ^{100}Mo - ^{100}Tc - ^{100}Ru и энергетический спектр детектора, зарегистрированный в эксперименте.

С учетом реальных характеристик детектора и образца установлено, что для 2β 0ν -распада ^{100}Mo (2ν -механизм, $m, \neq 0$) пик от искомым событий должен соответствовать энергии 2775 кэВ, полуширина - 520 кэВ, эффективность регистрации - 44%. В предположении равенства предельной скорости 2β -распада ^{100}Mo статистической точности определения интенсивности фона в выбранном энергетическом диапазоне вычислено, что:

$$T_{1/2}^{0\nu}(^{100}\text{Mo}) \geq \begin{cases} 1,6 \cdot 10^{21} \text{ лет (дов.вер.90\%)} \\ 2,6 \cdot 10^{21} \text{ лет (дов.вер.68\%)} \end{cases}$$

Для отработки методики исследования 2β 0ν -распада ^{76}Ge был создан низкофонный полупроводниковый спектрометр (рис.5), который содержит коаксиальный Ge(Li)-полупроводниковый детектор ϕ 34x38 мм² с энергетическим разрешением 2,9 кэВ (1332 кэВ ^{60}Co) в криостате из титана и меди особой чистоты, экранированный многослойной пассивной защитой из ртути (80 мм), кадмия (1 мм), свинца (100 мм) и полиэти-

лена (160 мм). Над пассивной защитой расположен скintиллятор из полиметилметакрилата (1040x1040x90 мм³), который служит для защиты от космического излучения. Порог срабатывания активной защиты - 2,5 МэВ, при этом средняя интенсивность сигналов запрета равна 200 Гц, а мертвое время спектрометра не превышает 10%.

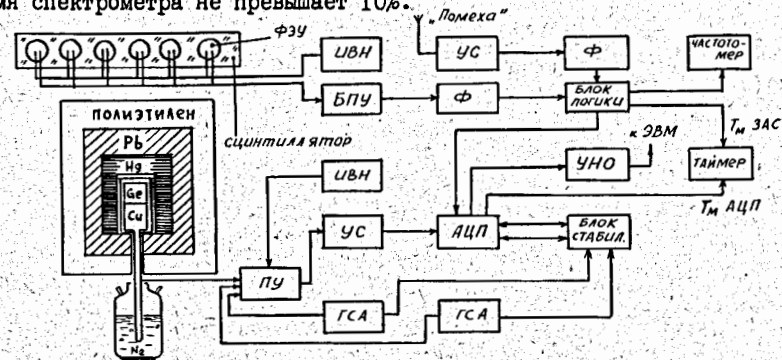


Рис.5. Низкофонный полупроводниковый спектрометр.

Основу системы накопления и обработки информации составляет ЭВМ СМ 1301, данные передаются из УНО-4096 в ЭВМ через специально разработанную плату интерфейса по каналу фотовода. К общей шине ЭВМ подключен крейт "КАМАК" с блоками "ДИНАМО-ТЕКСТ-ЦВЕТ 144.10", "ДИНАМО-ГРАФИК-ЦВЕТ 144.11" и КИ-027 для связи с цветным телевизионным дисплеем (ЭЛЕКТРОН-Ц260) и двухкоординатным самописцем (NE-230).

Измерения проводились в цокольном этаже 9-этажного здания в Киеве сериями с продолжительностью от 30 до 70 часов, спектрометр калибровался с помощью ^{226}Ra . Фоновые спектры ППД, находящегося в различных условиях, представлены на рис.6. Самый нижний спектр набирался с полной защитой и является результатом суммирования 38 отдельных измерений общей продолжительностью 1833 ч. Средняя интенсивность фона при этом в интервалах 1400-1500 кэВ и 2000-2100 кэВ составляет $(2,9 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$ и $(1,8 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$ отсчетов/кэВ·ч соответственно.

"Активный" объем детектора (с учетом краевых эффектов по отношению к 2β 0ν -распаду) равен 28 см³, "полезная" масса ^{76}Ge - 11,6 г ($9,2 \cdot 10^{22}$ ядер). Предел периода полураспада ^{76}Ge по 2β 0ν -каналу был оценен двумя способами:

1. За предельное значение эффекта принималась стандартная погрешность определения интенсивности фона в области возможного 2β -пика. С уровнем доверительной вероятности 68% установлено, что:

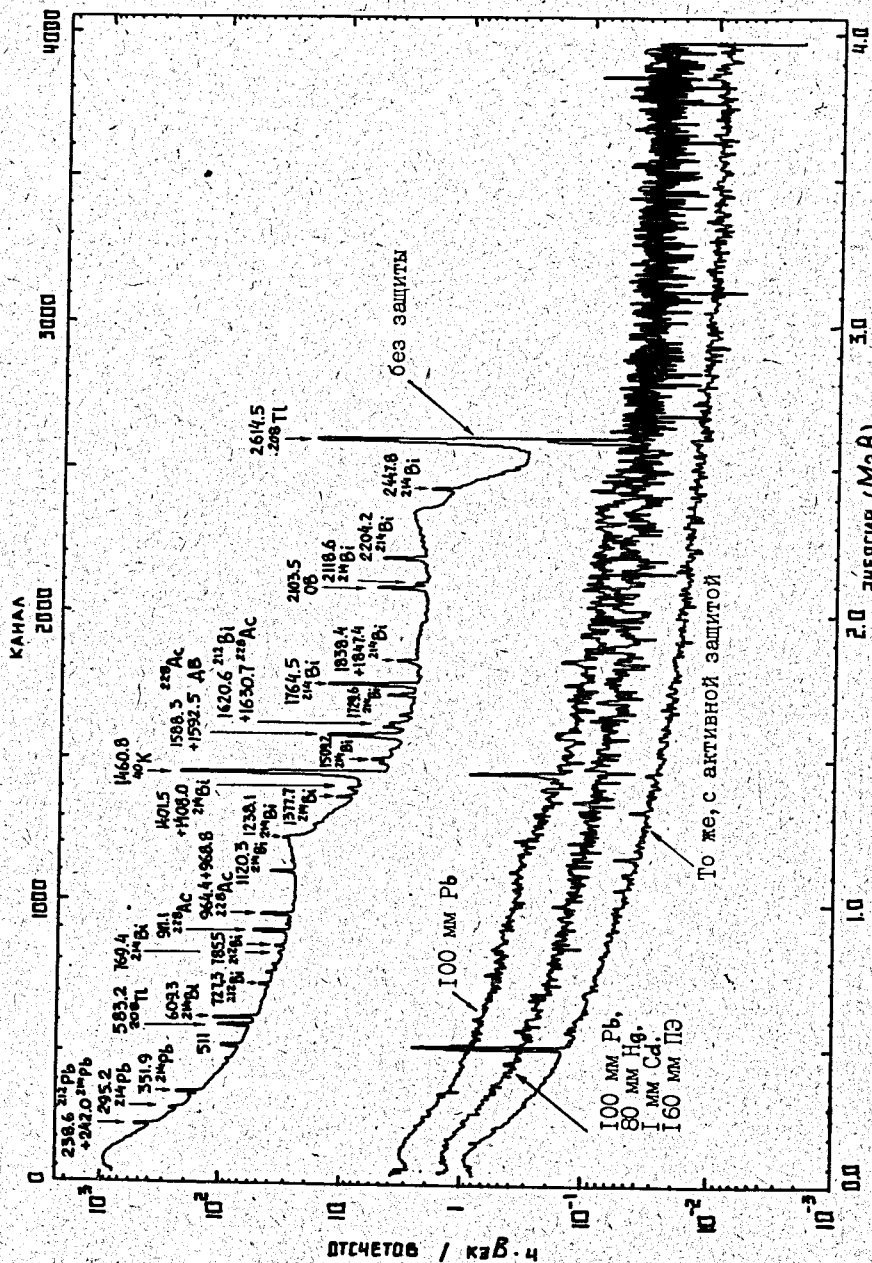


Рис. 6. Энергетические спектры, измеренные Ge(Li)-детектором с различной защитой.

$$T_{I/2}^{ov}({}^{76}\text{Ge}) \geq \begin{cases} (0,7+0,8) \cdot 10^{21} \text{ лет } (0^+ - 0^+ \text{ переход}), \\ (0,4+0,45) \cdot 10^{21} \text{ лет } (0^+ - 2^+ \text{ переход}). \end{cases}$$

2. Экспериментальные данные в интервалах 2030-2060 кэВ и 1470-1500 кэВ аппроксимировались по методу наименьших квадратов как сумма полинома второй степени (фон) и гауссиана, центр тяжести которого совпадает с энергией 2 β -перехода, а ширина на полувысоте равна 4,5 кэВ (эффект). В результате определено, что с доверительной вероятностью 68%:

$$T_{I/2}^{ov}({}^{76}\text{Ge}) \geq \begin{cases} (0,4+1,0) \cdot 10^{21} \text{ лет } (0^+ - 0^+ \text{ переход}), \\ (0,30+0,60) \cdot 10^{21} \text{ лет } (0^+ - 2^+ \text{ переход}). \end{cases}$$

В случае, если энергия 2 β -распада имеет значение 2040,7 кэВ [Ellis R. Phys. Letters, 1984, v.I36B, № 3 - p.146-148], предел периода полураспада ${}^{76}\text{Ge}$ равен (уровень доверительной вероятности 68%):

$$T_{I/2}^{ov}({}^{76}\text{Ge}) \geq \begin{cases} 0,8 \cdot 10^{21} \text{ лет } (0^+ - 0^+ \text{ переход}), \\ 0,6 \cdot 10^{21} \text{ лет } (0^+ - 2^+ \text{ переход}). \end{cases}$$

Результаты проведенных опытов представлены в таблице совместно с данными других прямых экспериментов, в которых установлены наиболее высокие пределы периодов полураспада:

Работа, год	Нуклид	Масса образца, г	Глубина расположения установки, мВэ	Время измерения, ч	$\lim T_{I/2}^{ov}(2\beta)$, лет
Колумбийский университет, 1970	48Ca	10,6	1500	1750	$2 \cdot 10^{21}$
Миланский университет, 1984	${}^{76}\text{Ge}$	48,6+ +57,8	4200+ 5000	14500+ +4741	$1,2 \cdot 10^{23}$
Колумбийский университет, 1975	${}^{82}\text{Se}$	26,0	1500	1300	$3,1 \cdot 10^{21}$
ИИИ АН УССР, Киев, 1980	${}^{130}\text{Te}$	343,0	0	3350	$1,2 \cdot 10^{21}$
ИИИ АН СССР, Москва, 1984	${}^{150}\text{Nd}$	50,0	660	3000	$1,2 \cdot 10^{21}$
Настоящая работа	${}^{76}\text{Ge}$	11,6	0	1833	$0,8 \cdot 10^{21}$
	${}^{96}\text{Zr}$	15,2	0	3167	$2,5 \cdot 10^{19}$
	${}^{100}\text{Mo}$	390,0	0	2680	$2,6 \cdot 10^{21}$

При расчете ядерных матричных элементов 2 β -переход ${}^{100}\text{Mo} \rightarrow {}^{100}\text{Ru}$ рассматривался в рамках одночастичной оболочечной модели с потенциалом Вудса-Саксона как переход двух нейтронов с уровня $1g_{7/2}$ ${}^{100}\text{Mo}$ в два протона на уровне $1g_{9/2}$ ${}^{100}\text{Ru}$. Вычисленные значения матричных элементов равны: $M_S = 0,0228 \text{ фм}^{-1}$, $M_V = -0,4385 \text{ фм}^{-1}$, $M_T = -0,1462 \text{ фм}^{-1}$.

При экспериментально установленном пределе $T_{1/2}^{ov} ({}^{100}\text{Mo}) \geq 2,6 \cdot 10^{21}$ лет граничное значение массы нейтрино $\langle m_\nu \rangle \leq 14,2$ эВ и параметра несохранения лептонного заряда $\delta \leq 1,73 \cdot 10^{-5}$. Сравнение экспериментального значения $T_{1/2}^{ov} ({}^{76}\text{Ge}) \geq 0,8 \cdot 10^{21}$ лет с теоретическими моделями 2β -распада приводит к ограничениям на величину массы нейтрино $\langle m_\nu \rangle \leq 32,9$ эВ, параметра примеси правых токов $\eta \leq 6,66 \cdot 10^{-5}$, вероятности присутствия Δ -резонансов в ядре ${}^{76}\text{Ge}$ $P(\Delta) \leq 3,37 \cdot 10^{-3}$ и константы взаимодействия майорона M^0 с нейтрино $g_{M^0\nu} \leq 1,06 \cdot 10^{-3}$.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА содержит описание подземной низкофоновой лаборатории и результаты измерения фона различных детекторов в условиях соляной шахты /7/.

Для дальнейшего повышения чувствительности методик изучения 2β -распада за счет снижения фона космического излучения местом расположения низкофоновой лаборатории была выбрана действующая соляная шахта в г. Солотвина Закарпатской обл. Толщина слоя соли в зоне лаборатории равна ~ 400 м, а общая мощность пассивной защиты от поверхности Земли — примерно 1000 мвэ. Полезная площадь, на которой может быть установлено экспериментальное оборудование, составляет около 1000 кв. метров. Для уточнения природы фонового излучения в подземной лаборатории и определения методов снижения его интенсивности были проведены измерения фонов полупроводникового и сцинтилляционных детекторов без защиты и с дополнительной защитой из ртуты, свинца, кадмия и полиэтилена.

Перемещение детектора $\text{NaI}(\text{Tl})$ ϕ 80x80 мм² с поверхности Земли в лабораторию на глубине 1000 мвэ привело к почти равномерному подавлению фона в 30+40 раз в диапазоне энергий от 0,1 до 3,0 МэВ. После окружения детектора дополнительной защитой (70 мм ртуты, 100 мм свинца, 80 мм полиэтилена) суммарное снижение фона по отношению к измеренному на поверхности Земли составляет 400 в диапазоне энергий 20+1500 кэВ, превышает 200 в интервале 1500–2800 кэВ и уменьшается до 25 при энергиях 2800–3200 кэВ.

Коэффициент подавления фона детектора на основе полиметилметакрилата ϕ 60x60 мм² при размещении его в подземной лаборатории равен 30+35 в диапазоне энергий от 0 до 2500 кэВ, увеличивается до 100 в области 2500–2800 кэВ и превосходит 10^3 при энергиях выше 2800 кэВ.

При измерениях фона с $\text{Ge}(\text{Li})$ — ППД ϕ 34x38 мм² коэффициент подавления фона равен 50+60 (400–2600 кэВ) и превышает 80 в диапазоне более 2600 кэВ. Из сравнения полученных результатов с данными

других работ сделаны выводы: уровень естественной радиоактивности в созданной подземной лаборатории в 30+90 раз ниже, чем в лабораториях, расположенных на поверхности Земли; снижение потока космического излучения превышает $5 \cdot 10^3$; дальнейшее снижение фона может быть достигнуто при использовании тщательно сконструированной пассивной защиты, защиты на антисовпадениях, конструкционных материалов и собственно детектора с минимальным содержанием радиоактивных загрязнений.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Усовершенствована методика изучения двойного бета-распада атомных ядер на сцинтилляционной низкофоновой установке, решена проблема надежного определения спектрометрических характеристик пластмассовых сцинтилляторов сложной формы, их энергетической калибровки во время длительных измерений, развита методика подготовки образцов для изучения $2\beta_{0\nu}$ -распада.

2. Подготовлен и проведен прямой эксперимент по поиску $2\beta_{0\nu}$ -распада ${}^{96}\text{Zr}$ общей продолжительностью 3167 ч, в которой установлено, что предел периода полураспада ${}^{96}\text{Zr}$ превышает с уровнем достоверной вероятности 68% — $2,5 \cdot 10^{19}$ лет.

3. Исследованы возможности усовершенствования методики опознавательных экспериментов и в опыте общей продолжительностью 2680 ч впервые определено граничное значение предела периода полураспада ${}^{100}\text{Mo}$ по безнейтринному каналу, равное $2,6 \cdot 10^{21}$ лет (68% дов.вероятность).

4. Создана методика изучения 2β -распада с полупроводниковым $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором, в предварительном эксперименте, выполненном на поверхности Земли в течение 1833 ч, установлены пределы периода полураспада ${}^{76}\text{Ge}$ на основное и возбужденное состояния ${}^{76}\text{Se}$, равные при достоверном уровне вероятности 68%: $0,8 \cdot 10^{21}$ лет и $0,6 \cdot 10^{21}$ лет.

5. Рассчитаны ядерные матричные элементы 2β -перехода ${}^{100}\text{Mo}$ — ${}^{100}\text{Ru}$ и из сравнения полученных экспериментальных данных с теоретическими моделями 2β -распада вычислены ограничения на майорановскую массу нейтрино, параметр несохранения лептонного заряда в слабом взаимодействии, вероятность присутствия Δ -резонансов в ядре ${}^{76}\text{Ge}$, константу взаимодействия майорона с нейтрино.

6. Создана подземная низкофоновая лаборатория в соляной шахте на глубине 1000 мвэ, которая обеспечивает оптимальные фоновые условия для проведения экспериментов по изучению 2β -распада атомных ядер.

Исследованы фоновые характеристики сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов в подземной лаборатории и намечены пути повышения чувствительности экспериментальных методик.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. Д.Г.Здесенко, В.Н.Куц, И.А.Мыцык, А.С.Николайко. Низкофоновая установка для изучения двойного бета-распада. - Приборы и техника эксперимента, 1975, № 5, - с. 47-52.

2. Д.Г.Здесенко, В.Н.Куц, И.А.Мыцык, А.С.Николайко. Поиск безнейтринного двойного бета-распада ^{96}Zr . - Изв. АН СССР, сер. физ., 1981, т. 45, № 10 - с. 1856-1860.

3. Д.Г.Здесенко, В.Н.Куц, И.А.Мыцык, А.С.Николайко. Изучение двойного β -распада ^{100}Mo . - Изв. АН СССР, сер. физ., 1983, т. 47, № 10 - с. 839-844.

4. Д.Г.Здесенко, В.Н.Куц, И.А.Мыцык, А.С.Николайко. Блоки и устройства, повышающие надежность и упрощающие эксплуатацию установки для изучения двойного бета-распада. - Приборы и техн. эксперимента, 1982, № 5 - с. 77-80.

5. Д.Г.Здесенко, И.А.Мыцык, В.Н.Куц, А.С.Николайко. Измерение фона сцинтилляционных детекторов в различных условиях. - Тез. докладов Всес. совещания по сцинтилляторам и люминофорам (Харьков, 16-20 сентября 1982 г.), "Наукова думка", Киев, 1982, с.81.

6. Д.Г.Здесенко, Б.Н.Кропивянский, А.Б.Костеж, В.Н.Куц, И.А.Мыцык, А.С.Николайко. Низкофоновый полупроводниковый спектрометр. - Тезисы докладов XXXIV Всес. совещ. по ядерной спектроскопии и структуре ат. ядра (Алма-Ата, 16-20 апреля 1984 г.), "Наука", Л., 1984, с.494.

7. Д.Г.Здесенко, А.Б.Костеж, В.Н.Куц, Б.Н.Кропивянский, А.С.Николайко, В.И.Третьяк. Предварительные результаты исследования безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge . - Изв. АН СССР, сер. физ., 1985, т. 49, № 5 - с. 862-867.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 июня 1985 года