Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики

10-02

ITEP-10-02

В.Д. Ашитков, А.С. Барабаш, С.Г. Белогуров,
Д.Каруньо, С.И. Коновалов, Ф. Массера,
Г. Пульерин, Р.Р. Саакян, В.Н. Стеханов,
В.И. Юматов

Жидкоаргоновый ионизационный детектор для экспериментов по двойному бета – распаду

Москва 2002

УДК 539.1.074; 539.165 М-16

Жидкоаргоновый ионизационный детектор для экспериментов по двойному бета – распаду: Препринт ИТЭФ 10-02/

В.Д. Ашитков, А.С. Барабаш, С.Г. Белогуров, Д. Каруньо[1], С.И. Коновалов, Ф. Массера[2], Г. Пульерин[1], Р.Р. Саакян, В.Н. Стеханов, В.И. Юматов.

Многосекционный жидкоаргоновый ионизационный детектор был разработан коллаборацией DBA для исследования двойного бета – распада ^{100}Mo. Эксперимент был выполнен в подземной лаборатории Gran Sasso в Италии. В статье описаны конструкция и основные характеристики детектора. Приведены пределы на содержание ^{42}Ar и ^{222}Rn в жидком Ar: $\leq 4.3\times10^{-21}$ г/г и $\leq 1.2\times10^{-3}$ Бк/кг, соответственно.

The liquid-Argon ionization detector for the double-beta experiment.

V.D. Ashitkov, A.S. Barabash, S.G. Belogurov, G. Carugno, S.I. Konovalov, F. Massera, G. Puglierin, R.R. Saakyan, V.N. Stekhanov, V.I. Umatov.

A multisectional liquid argon ionization detector was designed for the double-beta decay search of the ^{100}Mo by the DBA collaboration. The experiment was performed in the Gran Sasso Underground Laboratory. The design, construction and performance of this apparatus are described. A new experimental limit on the ^{42}Ar and ^{222}Rn in the liquid Ar was found to be $\leq 4.3\times10^{-21}$ g/g and $\leq 1.2\times10^{-3}$ Bq/kg, correspondingly.

Рис.-11, список лит.-10 наим.

21
PPF : JTER
SCLJ, 2

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 2002

[1] Национальный институт Ядерной Физики, секция Падуи, ул. Ф. Марзоло 8, I-35131, Падуя, Италия.
[2] Национальный институт Ядерной Физики, секция Болоньи, 40126, ул. Берти Пикат, 6/2, Болонья, Италия.
Victor.Stekhanov@itep.ru

Введение

В настоящее время интерес к $2\beta(0\nu)$-распаду обусловлен тем, что сам факт существования этого процесса тесно связан со многими фундаментальными аспектами физики элементарных частиц [1,2,3]:

-несохранением лептонного числа, наличием у нейтрино массы и её природой,

-существованием правых токов в электрослабом взаимодействии,

-существованием майорона,

-структурой хиггсовского сектора,

-существованием лептокварков,

-существованием тяжёлого стерильного нейтрино,

-существованием составного нейтрино.

Все эти вопросы лежат вне рамок стандартной модели электрослабого взаимодействия и поэтому регистрация $2\beta(0\nu)$-распада будет означать открытие "новой физики". Основной интерес к этому процессу, конечно же, связан с проблемой массы нейтрино – если $2\beta(0\nu)$-распад будет обнаружен, то, по современным представлениям, это будет означать, что масса покоя хотя бы одного нейтрино отлична от нуля и эта масса - майорановского типа. В настоящее время экспериментально определены лишь нижние пределы на периоды полураспада по безнейтринному каналу ($T_{1/2}0\nu$) для различных ядер. Эти пределы используются для получения ограничений на величину майорановской массы нейтрино, параметры примеси правых токов, константу связи майорона с нейтрино и т.д. Однако неопределённости в расчётах ядерных матричных элементов (ЯМЭ) не позволяют получить достаточно надёжные ограничения на эти фундаментальные величины. В связи с этим, особое значение приобретает регистрация двухнейтринного двойного бета-

распада ($2\beta(2\nu)$). Жидкоаргоновый детектор [4,5] был предназначен для исследования двойного бета – распада. Для изучения были выбраны ядра элемента обладающего достаточно большой энергией $\beta\beta$ – перехода – ^{100}Mo ($E_{2\beta}$ =3033 кэВ). Экспериментальная установка была смонтирована в 1996 году в подземной лаборатории Gran Sasso в Италии. В настоящей статье приводится описание экспериментальной аппаратуры. Особое внимание было уделено конструктивным особенностям, процедуре калибровки и функционированию различных систем установки.

Экспериментальная установка

Эксперимент проводился в подземной лаборатории Gran Sasso, расположенной на глубине 3500 м.в.э.. Экспериментальная установка (см. рис.1) включала в себя жидкоаргоновый ионизационный детектор, помещенный в пассивную защиту из свинца, систему газообеспечения, систему антирадоновой защиты на основе паров жидкого азота и механический подъёмный кран для сборки и разборки детектора. Все оборудование было размещено на специальной бетонной платформе с габаритными размерами 4×6×0.6м. Для снижения механических вибраций бетонная платформа была размещена на листе резины. На этой платформе был смонтирован специальный “домик”, надежно предотвращающий влияние подземной влаги на оборудование. Система съёма и накопления данных для жидкоаргонового детектора находилась в отдельном “домике” на расстоянии двух метров от платформы. Для уменьшения влияния радона, содержащегося в атмосфере вокруг детектора, в пассивной защите была специально смонтирована система антирадоновой защиты на основе паров азота. Пары азота из термостата

детектора, после подогрева до темпе-ратуры 20°С в специальном электронагревателе, направлялись внутрь пассивной защиты.

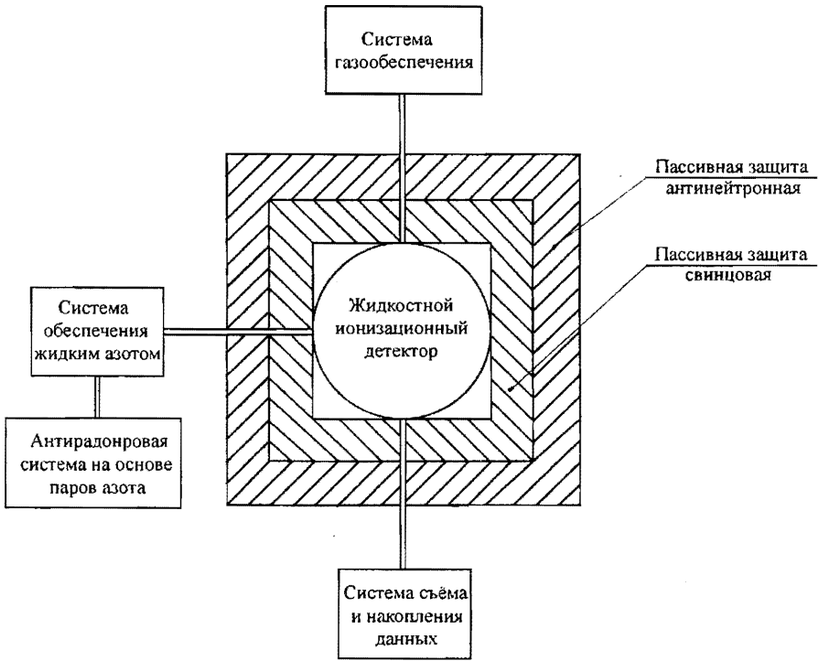

Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Жидко-аргоновый ионизационный детектор

В качестве основных конструкционных материалов детектора были использованы титан и его сплавы. Практически все изоляторы электродной системы детектора были изготовлены из фторопласта. Схема детектора приведена на рис.2. Детектор охлаждался жидким азотом, поступающим в "азотный" объём (2) из 4000-литрового сосуда дьюара. Жидкий азот подавался по трубе,

помещённой в вакуумную теплоизоляцию. Эта теплоизоляция была специаль-

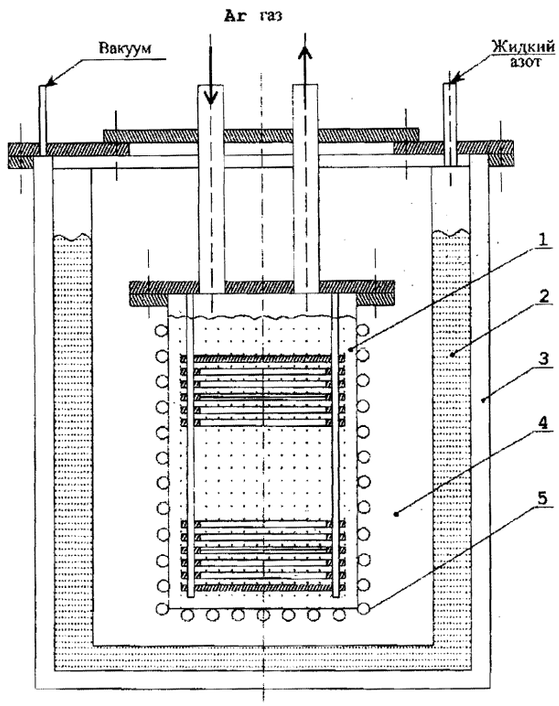

Рис.2. Схема жидкоаргонового ионизационного детектора.
1-объём, заполняемый жидким аргоном; 2 – объём термостата, заполняемый жидким азотом; 3 – вакуумный объём термостата; 4 – объём, заполняемый парами азота; 5 – система электронагревателей.

но сконструирована для уменьшения расхода жидкого азота, что в условиях длительных экспериментальных сеансов имело большое

значение. “Азотный ” объём (2) детектора был теплоизолирован от окружающей среды “вакуумной” оболочкой (3), на внутренней стенке которой было намотано 12 слоёв 10-мик-ронного алюминизированного майлара. В режиме измерений расход жидкого
азота удалось сократить до величины 6 л/час. “Азотный” объём (2) был соединён с объёмом (4) (в который был помещён сосуд (1) с жидким аргоном) с помощью специальной трубки, для выравнивания давления паров азота в этих объёмах. Температура жидкого аргона регулировалась с помощью нагревателей (5), размещенных на внешней поверхности объёма (1). Система

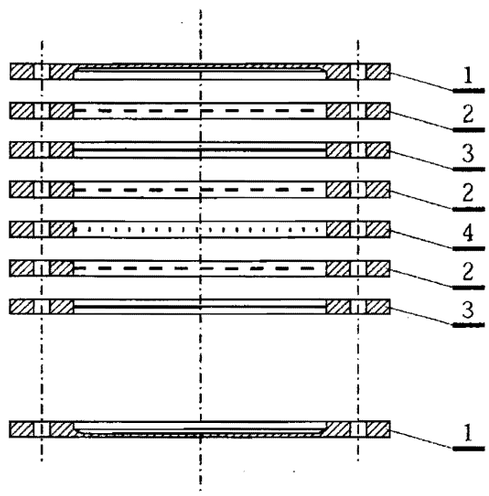

Рис. 3. Схема детектирующей части жидкоаргонового ионизационного детектора.

1 – анод сплошной из титана; 2 – сетка экранирующая; 3 – катод из молибденовой фольги; 4 – сеточный анод.

электродов, образующая чувствительный объём детектора, была помещена в сосуд (1) с внутренним диаметром 40 см и высотой 70 см. Регистрирующая часть детектора была собрана из одинаковых измерительных секций (см. рис.3). Каждая такая секция состояла из двух объединённых плоских ионизационных камер с экранирующими сетками (2) и общим катодом (3). В кольцевые рамочные катоды вставлялась фольга из исследуемого изотопа (молибдена). Диаметр чувствительного объёма был равен 30 см и его высота – 56 см. Детектор включал 14 катодов, 15 анодов и 28 экранирующих сеток. Расстояние между сеткой и анодом было 5.5 мм, а расстояние между сеткой и катодом было 14.5 мм. Аноды (4) были изготовлены в виде сеток. Экранирующие сетки и аноды были намотаны с помощью NiCr проволоки диаметром - 110 мкм и с шагом - 1 мм. Высокое напряжение, подаваемое на катоды и сетки, было равно: – 4.8 кВ и – 2 кВ, соответственно. Напряжение подавалось внутрь детектора через керамические вводы, размещенные на крышке камеры. 15 миниатюрных керамических вводов, соединенных с анодами, были также расположены на крышке камеры. Зарядово-чувствительные предусилители преобразовывали заряд, возникавший на каждом из 15 анодов, в ионизационный импульс. Верхний и нижний аноды (1) системы электродов были изготовлены в виде сплошных дисков из титана.

Изотопы

Катоды детектора были изготовлены из молибденовой фольги толщиной около 50 мг/см^2. В течение первых трёх экспериментальных сеансов (202, 238 и 313 часов измерений) исследовались 4 катода из обогащенного молибдена (98.4% ^{100}Mo). Для снижения радиоактивного фона эти катоды были размещены в центральной части электродной системы и чередовались с катодами из

натурального молибдена (содержащего 9.6% ^{100}Mo). Содержание радиоактивных примесей в образцах молибденовой фольги было меньше, чем 0.015 Бк/кг для ^{214}Bi, 0.0015 Бк/кг для ^{208}Tl и 0.04 Бк/кг для ^{234m}Pa. Общая масса ^{100}Mo, исследуемого в этом варианте, была 138.7 г. Позже количество ^{100}Mo в детекторе было увеличено до 306 г (8 катодов из изотопа ^{100}Mo). Чередование катодов из натурального и обогащённого молибдена было оптимальным для исследования $2\nu\beta\beta$ - моды "дифференциальным методом". Общее время измерения с восьмью катодами из ^{100}Mo составило 2706 часов.

Система газообеспечения

Система газообеспечения (рис.4) включала в себя 22 сорокалитровых баллона из нержавеющей стали с газообразным аргоном под давлением около 150 атм., систему очистки (3) и систему контроля чистоты газа (1). Шесть из этих баллонов были помещены в сосуды дьюара, изготовленные из нержавеющей стали, для того, чтобы использовать их как криогенный насос для удаления жидкого аргона из камеры в баллоны после завершения эксперимента. Система очистки газа от электроотрицательных примесей на основе титановой "губки" (3) была выбрана из-за низкого радиоактивного фона этого гетера. Например, системы очистки на основе "Oxisorb" или молекулярного "сита" выделяют в 100 – 1000 раз большее количество ^{222}Rn, так как содержание ^{238}U в материалах, из которых они изготовлены, в соответствующее число раз больше, чем в титане и составляет около $10^{-6} \div 10^{-7}$ г/г. Однократное пропускание газообразного аргона через титановую "губку" в реакторе при температуре 850°C обеспечивало содержание электроотрицательных примесей на уровне меньшем 1.9×10^{-9} экв. O_2 [6,7]. Содержание примесей в аргоне контролировалось с помощью двухфазного детектора электроотрица-

тельных примесей (1) [7,9]. Сосуд реактора, изготовленный из жаропрочной стали, имел форму цилиндра с диаметром 50 мм и длиной 300 мм и был заполнен титановой "губкой". Скорость пропускания аргона при очистке была около 0.6 $м^3$/час.

Пассивная защита

Пассивная защита из свинца (толщина свинца – 15 см) была установлена

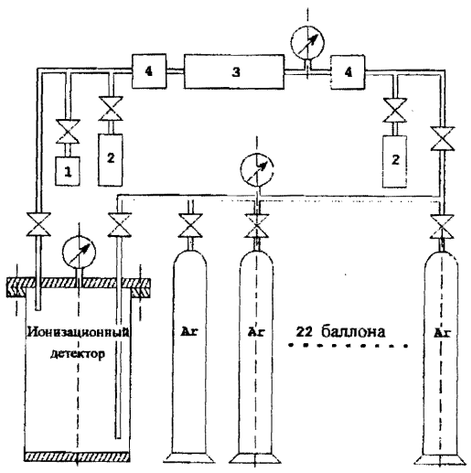

Рис. 4. Схема системы газообеспечения.

1 – система контроля чистоты газа; 2 – баллон (объём 2 л) для газа; 3 – система очистки; 4 – механические фильтры для грубой очистки газа.

на бетонной платформе. Следует отметить, что содержание радона в воздухе вокруг установки было измерено и составило около 200 Бк/м^3 (для сравнения, содержание радона в воздухе других залов подземной лаборатории Gran Sasso составляет около 40 Бк/м^3). Для уменьшения влияния радона пары азота из системы охлаждения детектора направлялись во внутренний объём пассивной защиты. Для этой же цели, во внутренний объём пассивной защиты (для его уменьшения) рядом с детектором были установлены полые блоки из оргстекла. Всё это позволило снизить фон от ^{222}Rn вблизи детектора (внутри пассивной защиты) до уровня не превышающего 2 Бк/м^3 (в первом сеансе он был около 50 Бк/м^3). Была спроектирована, изготовлена и установлена пассивная защита от нейтронов. Она включала в себя слой воды толщиной 25 см для термализации нейтронов и слой борной кислоты (H_3BO_3) толщиной около 1 см для захвата термализованных нейтронов. Предварительные вычисления показали, что такая защита может сократить влияние фона, обусловленного высокоэнергетичными гамма – квантами при захвате нейтронов в материале детектора, примерно на порядок. Экспериментальная проверка показала, что коэффициент подавления для одиночных электронов в области энергий выше 4МэВ равен приблизительно восьми.

Электроника и съём информации

Схема электроники и системы съёма информации эксперимента приводится на рис. 5. Сигналы поступали с каждого из 15 анодов. Сигнал с каждого анода выводился из детектора через керамический ввод. Керамические вводы были размещены на крышке объёма с жидким аргоном (1) (см. рис.2) и соединялись с зарядово-чувствительными предусилителями, размещёнными на верхней крышке детектора. Таким образом, каждый канал электроники состоял из

зарядово-чувствительного предусилителя, усилителя и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), с частотой преобразования 20 МГц. Были использованы 30 АЦП, поскольку в каждом канале регистрировались сигналы двух типов: сформированные ($\tau_ф$ = 3.6 мкс) и без формировки. Анализ формы импульсов

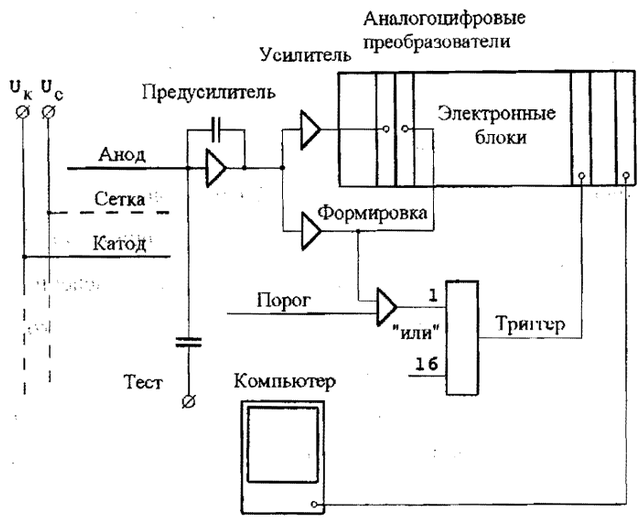

Рис. 5. Схема электроники и системы съёма информации.

без формировки давал пространственную информацию о событиях. И регистрация данных, и управление электроникой осуществлялось с помощью

компьютера Macintosh с программным обеспечением MACUA 1. Программы первичного анализа и визуализации данных были написаны в среде этого же программного обеспечения. Триггер для отбора данных вырабатывался при превышении сигналом порога в 700 кэВ хотя бы в одном из измерительных каналов. В этом случае оцифрованные сигналы всех каналов записывались на магнитную ленту. Такая схема регистрации была удобна для анализа формы импульсов, распознавания и режекции возможных фоновых сигналов.

Процедура калибровки детектора

Калибровка детектора, заполненного жидким аргоном, выполнялась с помощью радиоактивных источников ^{22}Na и ^{88}Y. Основными целями калибровки было:

– получение соответствия между энергией, выделившейся в чувствительном объёме камеры, и амплитудой сигнала, записанного считывающей электроникой;

– определение и контроль энергетического разрешения детектора.

Линейность отклика электроники проверялась с помощью генератора импульсов напряжения, и интегральная нелинейность составила величину < 1% по всему динамическому диапазону. Для калибровки были выбраны два источника γ - квантов: ^{22}Na ($T_{1/2}$ = 2.6 года, E_γ = 1275 кэВ) и ^{88}Y ($T_{1/2}$ = 106.6 дней, E_γ= 1836 кэВ). Поскольку вероятность фотоэффекта сильно зависит от заряда ядра ($P_{ph} \sim Z^5$), а заряд ядра аргона сравнительно мал (Z= 18), то практически невозможно использовать фотоэффект для калибровки жидкоаргонового детектора. Но спектр комптоновских электронов может быть использован для этой цели при условии, что интенсивность источников

будет достаточна для фитирования высокоэнергетичного края комптоновского спектра с последующим его дифференцированием.

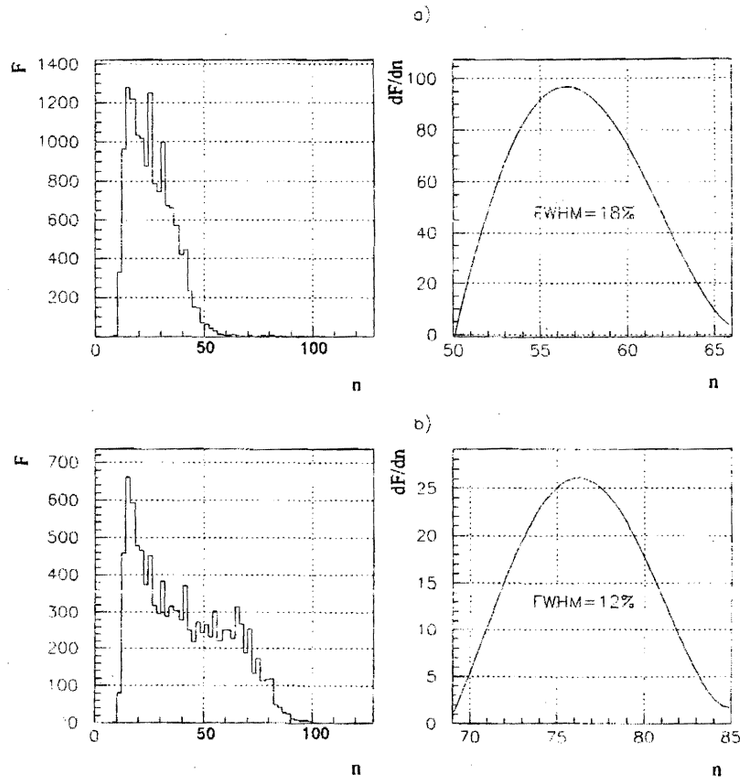

Рис. 6. Калибровочные спектры.

а) калибровочный спектр для ^{22}Na, б) – калибровочный спектр для ^{88}Y.

dF/dn – производная калибровочного спектра; F(n) – число отсчётов в канале;

n – номер канала.

Этот подход и был использован в настоящей работе. Первая производная этой части спектра имеет форму параболы и её максимум соответствует максимуму кинетической энергии комптоновских электронов. Эта энергия для ^{22}Na и ^{88}Y составляет 1063 кэВ и 1610 кэВ, соответственно. Калибровка проводилась для каждого канала независимо. Типичные калибровочные спектры от радиоактивных источников ^{22}Na и ^{88}Y для одного канала показаны на рис.6. Полная ширина на полувысоте распределения составила около18% для энергии 1063 кэВ (^{22}Na) и - 12% для энергии 1610 кэВ (^{88}Y) для третьего канала электроники детектора. Энергетическое разрешение других каналов было очень близко к этим величинам. Электрическая ёмкость каждой ионизационной секции была около 500 пф. Следует отметить, что относительное энергетическое разрешение уменьшалось с энергией как 1/E. Из этого следует, что главный вклад в энергетическое разрешение был связан с емкостным шумом самого детектора и микрофонным эффектом. Энергетическое разрешение детектора при энергии двойного бета – распада ^{100}Mo (3033 кэВ) составило около 6%. Для контроля стабильности внутренних параметров детектора процедура калибровки повторялась через каждые 300 часов во время эксперимента и за всё время набора статистики не было замечено никаких отклонений от получаемых величин. Типичный вид регистрируемых одиночных событий приведён на рис.7. В качестве событий-кандидатов на двойной бета–распад отбирались так называемые “двойные” события, когда сигналы наблюдались только в двух соседних каналах (рис.8), а в остальных 13 каналах при этом сигналы отсутствовали. Допустимый временной интервал между максимумами двух совпадающих сигналов (в соседних каналах) был выбран равным 0.6 мкс. На рис.9 приведены спектры событий, когда регистрирова-лись два электрона в со-седних каналах (842.2кг×час - для ^{100}Mo и 592.9 кг×час - для натурального молибдена).

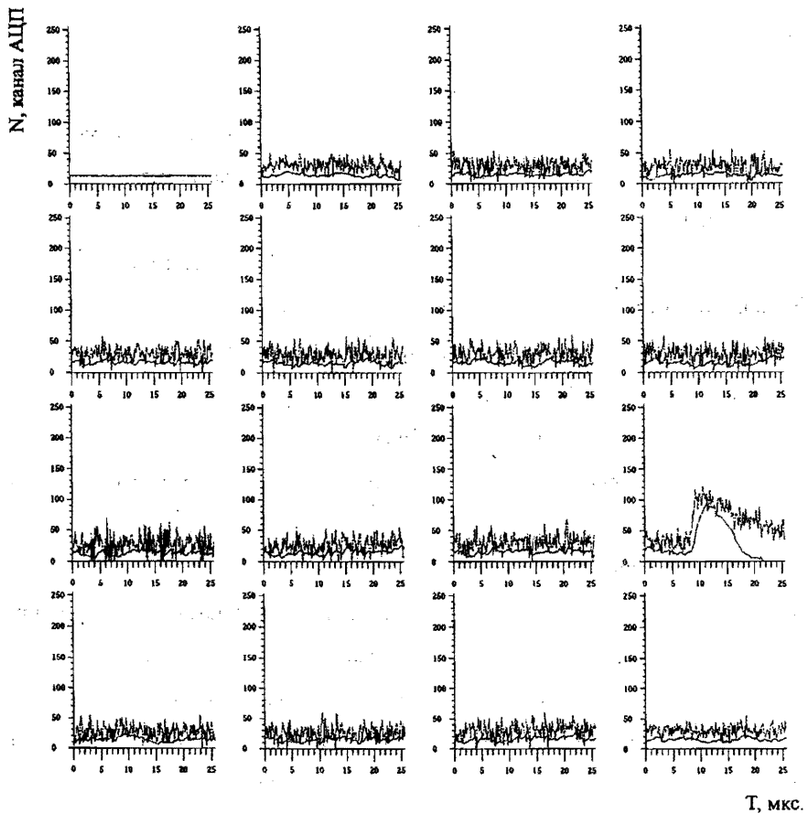

Рис. 7. Одиночное событие.

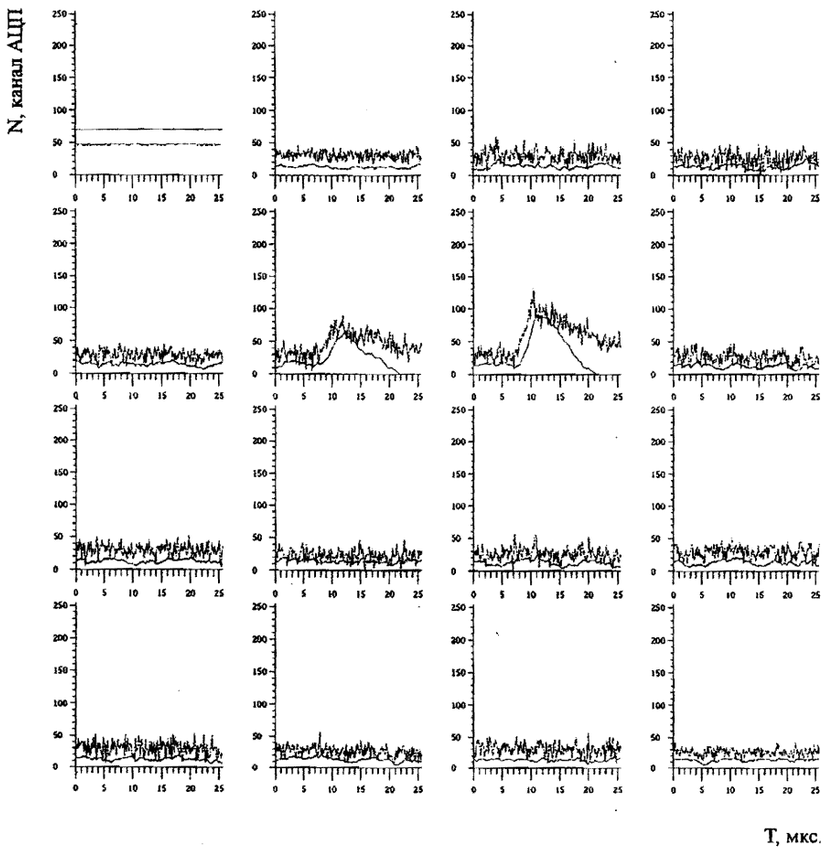

Рис. 8. Событие-кандидат на 2β-распад.

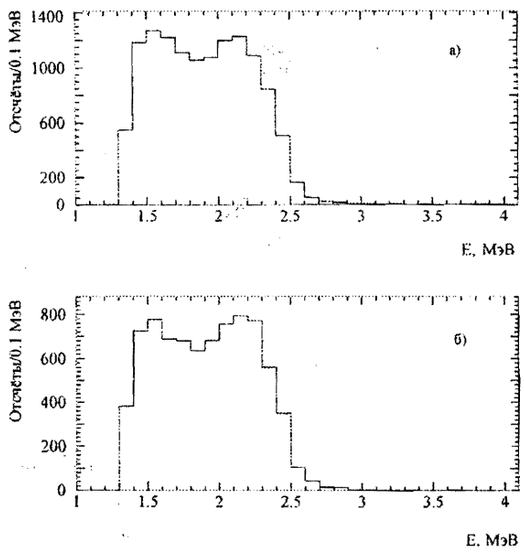

Рис. 9. Суммарные спектры событий с испусканием двух электронов

а) в случае с обогащённым (842.2 кг×час) молибденом;

б) в случае с натуральным (592.9 кг×час) молибденом.

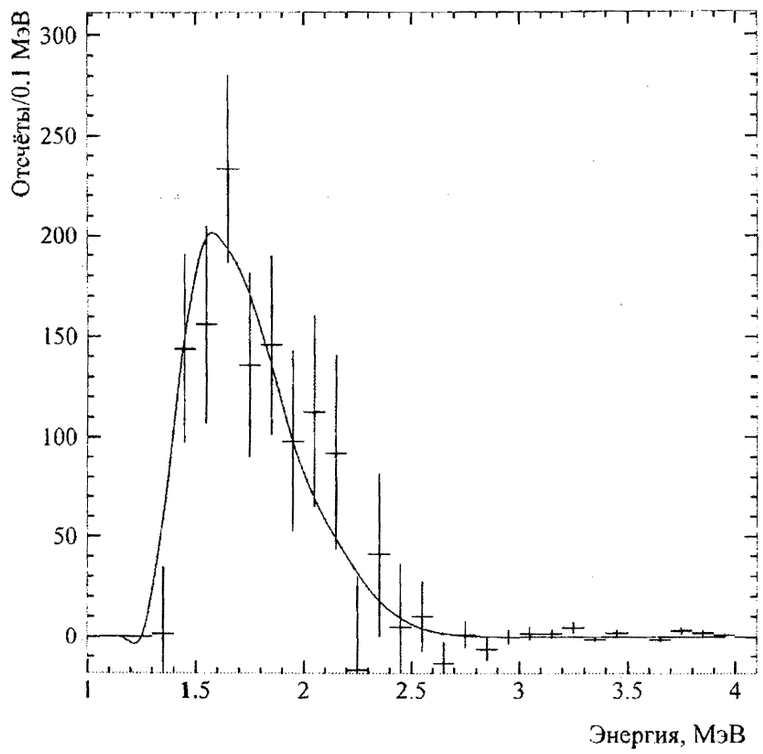

Рис.10. Разность спектров двухэлектронных событий обогащённого и натурального молибдена. Кривая – расчётный спектр 2β(2ν)-событий от ^{100}Mo для $T_{1/2} = 7.2\times10^{18}$ лет.

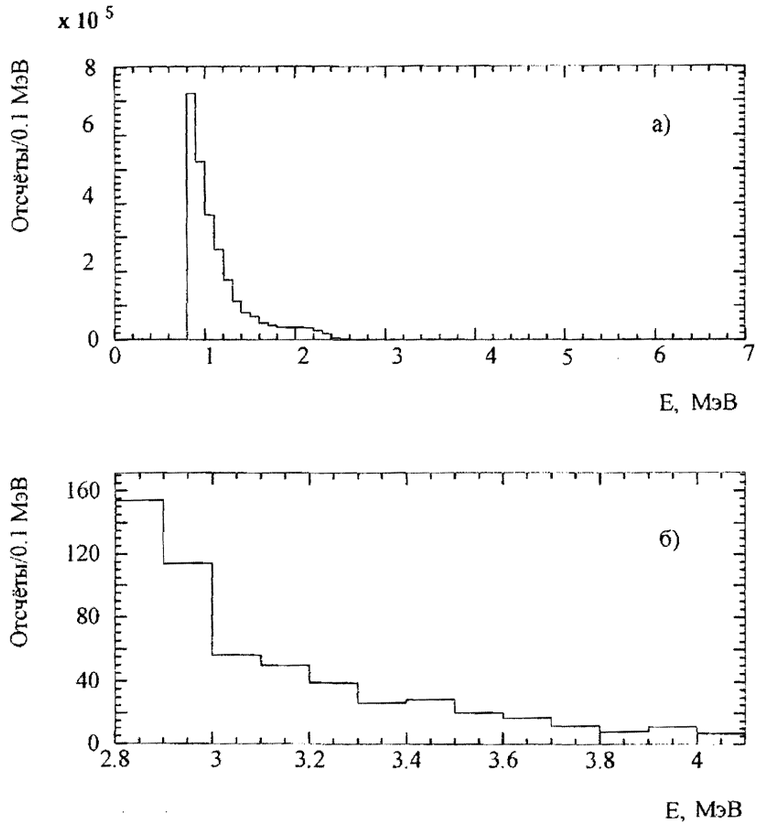

Рис. 11. Спектр событий с испусканием одного электрона в случае с натуральным Mo.

а) в интервале энергий от 0 до 7 МэВ; б) в интервале энергий от 2.8 МэВ до 4.1 МэВ.

Эффективности регистрации для каждой моды распада рассчитывались методом Монте Карло с помощью программы GEANT 3.21 [8]. При итоговом анализе были использованы результаты всех сеансов измерений: 842.2 кг×час - для ^{100}Mo и 592.9 кг×час - для натурального молибдена. Порог по энергии для регистрации первого электрона был выбран равным 0.8 МэВ, а для регистрации второго электрона – 0.5 МэВ. Разностный спектр двухэлектронных событий для обогащённого и натурального молибдена, приведённый на рис.10, соответствует 2β(2ν)-распаду ^{100}Mo с $T_{1/2} = 7.2\times10^{18}$ лет.

На рис.11 приведены спектры одноэлектронных событий за 2706 часов. Они были использованы для оценки фона в фольгах катодов из Mo, определения содержания изотопов ^{222}Rn и ^{42}Ar в жидком аргоне. Так, число событий в интервалах 3.0 - 3.3 и 3.0 – 3.5 МэВ составило 145 и 201, соответственно. Вклад "подложки" оценивался в аналогичных интервалах справа. Таким образом, возможный вклад от ^{222}Rn и ^{42}Ar составил 70 событий и 127 событий, соответственно. Эффективность регистрации полезных событий была рассчитана по методу Монте Карло как в предположении, что продукты распада равномерно распределены в жидком аргоне, так и для случая, когда они осаждаются на электродах. Различие в полученных величинах для этих двух случаев не превысило 10%. Эффективность регистрации полезных событий в этих интервалах составила 0.025% для ^{222}Rn и 1% для ^{42}Ar. На основании этих данных были получены ограничения на содержание ^{222}Rn и ^{42}Ar в жидком Ar: $\leq1.2\times10^{-3}$ Бк/кг (90% CL) и $\leq4.3\times10^{-21}$ г/г (90% CL), соответственно.

Заключение

Детектор был собран, протестирован и продемонстрировал хорошие рабочие характеристики. Была получена высокая степень чистоты жидкого

аргона (1.9×10^{-9} экв.O_2), необходимая для работы детектора. Разработанная и изготовленная система съёма данных позволила обеспечить отбор достоверных событий двойного бетараспада и выделить их из многочисленных фоновых событий. Два экспериментальных сеанса проведённых в течение 2000 года показали, что (H_2O)/(H_3BO_3) антинейтронная пассивная защита позволила снизить фон в чувствительном объёме детектора в области энергий выше 4 МэВ почти в 8 раз. За период с 1996 по 2000 год получены следующие результаты:

1) зарегистрирован $2\nu\beta\beta$ – распад ^{100}Mo с периодом полураспада [7.2±0.9(stat)±1.8(syst)] $\times10^{18}$ лет [5];

2) ограничения на период полураспада для 0ν и $0\nu\chi^0$ – каналов составили 8.4(4.9)$\times10^{21}$ и 4.1(3.2)$\times10^{20}$ лет, соответственно (доверительная вероятность 68%(90%)) [5];

3) получен новый экспериментальный предел на содержание ^{42}Ar в атмосфере Земли $\leq1.2\times10^{-3}$ Бк/кг (90% CL) (предварительный результат был опубликован в [10]);

4) получено экспериментальное ограничение на содержание ^{222}Rn в жидком Ar ионизационного детектора $\leq4.3\times10^{-21}$ г/г (90% CL).

Благодарности

Мы выражаем нашу глубокую признательность М. Балата за бесперебойное обеспечение жидким азотом системы охлаждения установки и плодотворные обсуждения технических проблем в работе этой системы. Мы также очень благодарны Л. Маррелли, Б. Ромуальди, А. Ротилио и Е. Татанани за частую и своевременную техническую помощь.

Список литературы

[1]. Клапдор-Клайнгротхаус Г.В. и Штаудт А., Неускорительная физика элементарных частиц. Москва: Наука. Физматлит.1997 (перевод с немецкого языка выполнен В.А. Бедняковым).

[2]. H.V.Klapdor-Kleingrothaus, // Prog. Part. Nucl. Phys. 1998. V.40, P.265.

[3]. Faessler A., Šimkovich F. // J.Phys.G. Nucl. Part. Phys.1998. V.24. P.2139-2178.

[4]. Барабаш А.С., Болоздыня А.И., Стеханов В.Н.. М., Препринт ИТЭФ, 1986, № 154.

[5]. Ашитков В.Д. и др. // Письма в ЖЭТФ, 2001, Т.74, Вып. 11, Стр.601-604.

[6]. Barabash A.S., Stekhanov V.N. // Nucl. Inst. Meth. A.1992. V.316. P.51.

[7]. Barabash A.S., Stekhanov V.N. // Nucl. Inst. Meth. A.1993. V.327. P.168.

[8].GEANT 3.21, Detector Description and Simulation Tool, CERNLIB, 1994.

[9]. Барабаш А.С. и Болоздыня А.И. // Жидкостные ионизационные детекторы. Москва. Энергоатомиздат. 1993.

[10]. Ashitkov V.D. et al. // Nucl. Inst. Meth. A.1998. V.416. P.179-181.

Подписано к печати 29.05.02 Формат 60x90 I/16
Усл.-печ.л. 1,25 Уч.-изд.л.09 Тираж 92 экз. Заказ 10
Индекс 3649

Отпечатано в ИТЭФ, 117259, Москва, ул. Б. Черёмушкинская, 25