

ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

Исследование редких реакций и распадов низкофоновыми газовыми детекторами в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

(По материалам докторской диссертации)

27.10.2010

Кузьминов В.В.
БНО ИЯИ РАН

Одной из основных тенденций в современной неускорительной экспериментальной ядерной физике является рост интереса к редким процессам, событиям и распадам, индуцированным слабым взаимодействием. Эти явления исследуются, в частности, при решении следующих задач:

1. Изучение характеристик нейтринного излучения Солнца.
2. Изучение свойств нейтрино, в том числе:
 - а) поиск массы нейтрино;
 - б) осцилляции нейтрино;
 - в) определение иерархии массовых состояний нейтрино;
 - г) определение типа классификации нейтрино (дираковское или майорановское);
 - д) поиск магнитного момента нейтрино.
3. Поиск двухнейтринного, безнейтринного двойного бета-распада различных изотопов.
4. Поиск слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP) и других кандидатов на «тёмную» массу Вселенной.

Изучение характеристик нейтринного излучения Солнца

Установка	Реакция, порог (МэВ)	Мишень, детектор	Эксперимент	Расчёт по ССМ
Хлор-Аргон (Хоумстейк)	$^{37}\text{Cl}(\nu, e)^{37}\text{Ar}$ 0.814	615 т C_2Cl_4 Проп. счётчик	2.55 ± 0.25 SNU	$9.5^{+1.2}_{-1.4}$ SNU
SAGE, GNO GALLEX	$^{71}\text{Ga}(\nu, e)^{71}\text{Ge}$ 0.233	Ga (50т; 30т) Проп. счётчик	$65.4^{+3.1}_{-3.0}$ SNU	128 ± 9 SNU
Super- Kamiokande	ν -e-рассеяние 6.5	22 тыс. т H_2O -//-	$(2.32 \pm 0.08) \times$ $\times 10^6 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$(5.8 \pm 1.2) \times$ $\times 10^6 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$
SNO	$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$ 5.0	1 тыс. т D_2O + + ^3He – Пр.сч.	$(5.09 \pm 0.63) \times$ $\times 10^6 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$(5.05 \pm 1.01) \times$ $\times 10^6 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$
BOREXINO	ν -e-рассеяние 0.25	300 т Ж.С. -//-	$47 \pm 7 \text{ ст.} \pm 12 \text{ си.}$ $\text{сут}^{-1} \cdot (100 \text{ т})^{-1}$	Согласуется с SSM + LMA + MSW

Миниатюрный н.ф. проп. счётчик



Объём $\sim 0.5 \text{ см}^3$

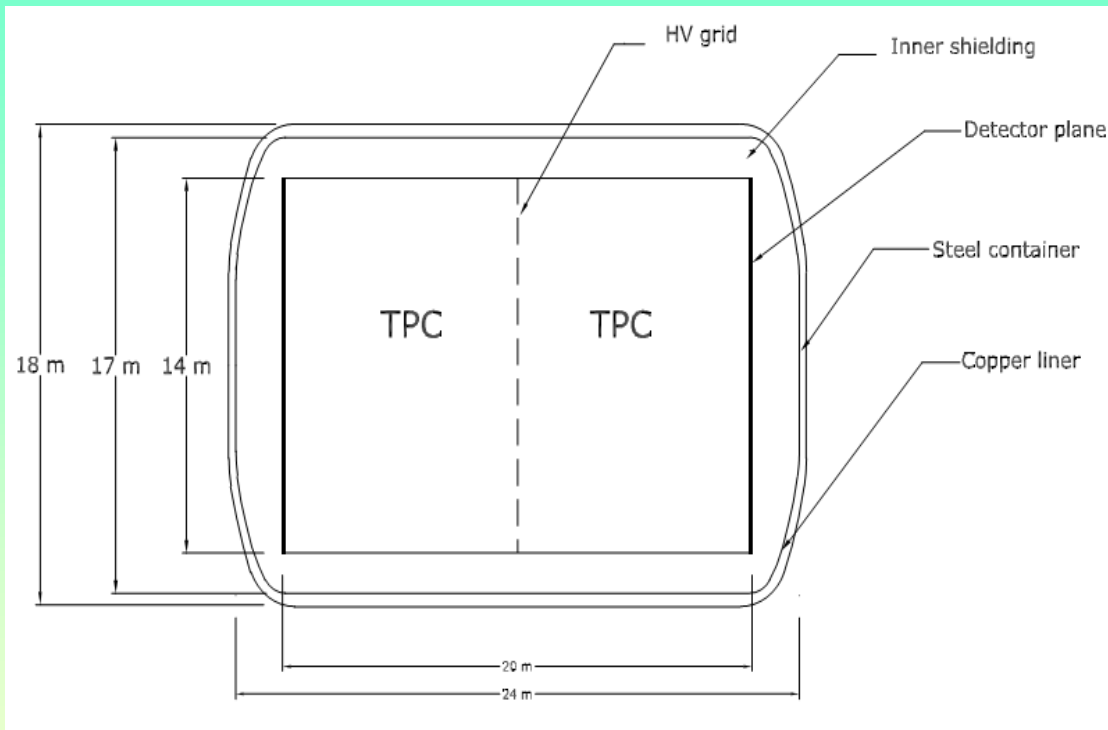
Фон: **Cl-Ar** (2.82 ± 0.36) кэВ

0.01 сут⁻¹

Ga-Ge (10.37 ± 1.80) кэВ

(0.036 - 0.020) сут⁻¹

Время-проекционная камера (ТРС) для регистрации солнечных нейтрино (Проект HELLAZ и его аналоги)



ν - e -рассеяние солнечных pp -нейтрино

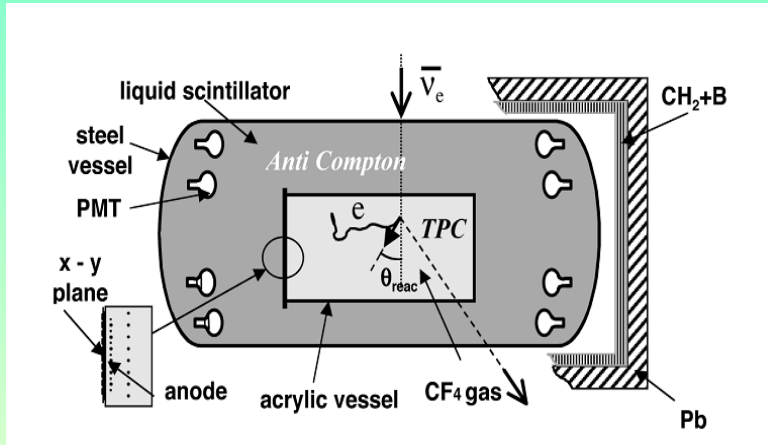
Объём ТРС $\sim 3000 \text{ м}^3$.

Заполнение He + CH₄ (~ 10 атм).

При пороге 100 кэВ в 7 т ожидается скорость
счета $(1-2) \cdot 10^3 \text{ год}^{-1}$. Фон - $\sim 150 \text{ сут}^{-1}$.

Поиск магнитного момента нейтрино

Эксперимент MUNU – TPC 1 м³ с CF₄ (давление 1-5 бар) для регистрации рассеяния реакторных антинейтрино на электронах с целью поиска магнитного момента нейтрино.



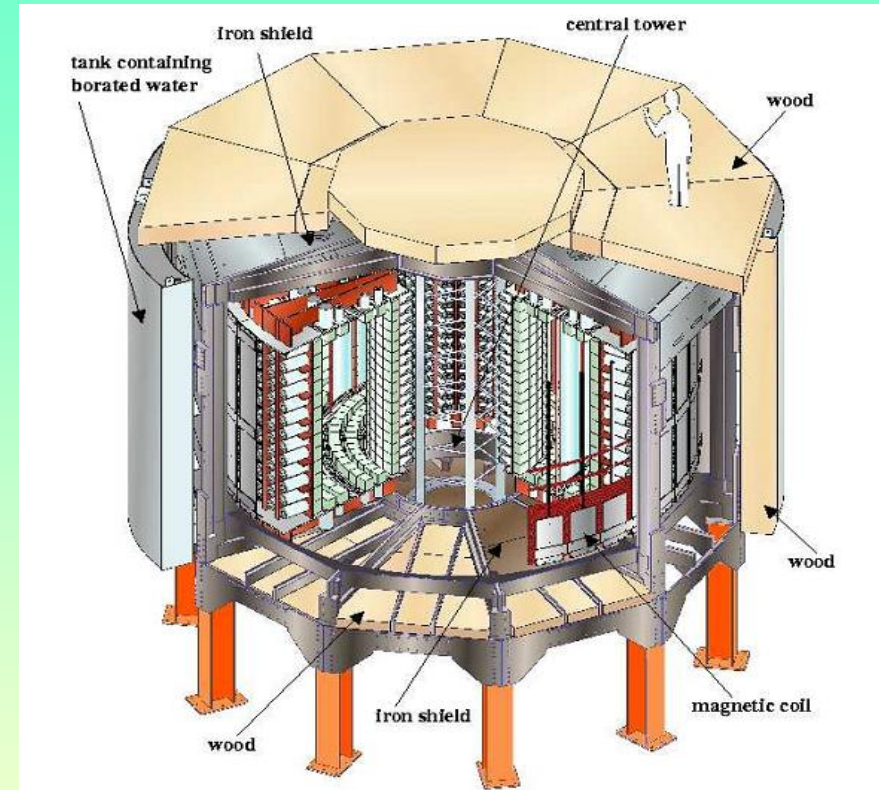
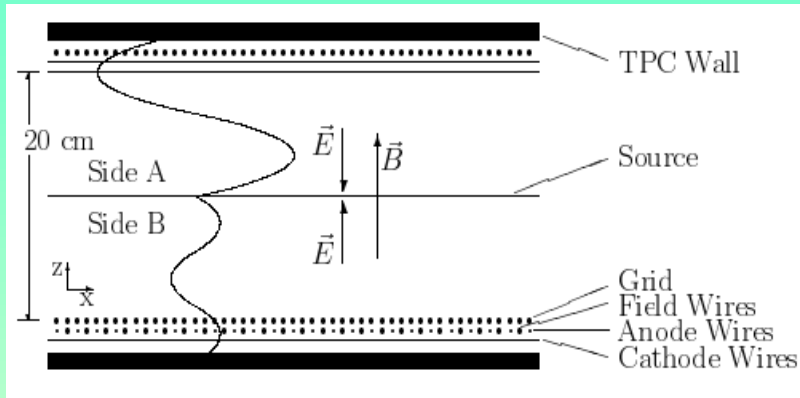
Схематический вид сечения время-проекционной камеры MUNU

Акриловый цилиндр Ø 90 см и длиной 160 см. На одном торце - катод, на другом торце – проп. камера, состоящая из плоской сетки, анодной плоскости и плоскости с (x,y)-считыванием. Наружный Ж.С. детектор (Ø =200 см, L=390 см) объемом 10 м³. Скорость счета TPC выше порога в 300 кэВ составляла 70 с⁻¹. В режиме «с АС» при угловом отборе треков фон снизился до 97 сут⁻¹ в 11 кг CF₄.

Было получено экспериментальное ограничение на величину магнитного момента антинейтрино $\mu_{\nu} \leq 9 \cdot 10^{-11} \mu_B$ (90% У.Д.), где μ_B – магнетон Бора.

Была подтверждена потенциальная возможность использования газовой TPC большого объема для регистрации низкоэнергичных солнечных pp–нейтрино.

Поиск двухнейтринного и безнейтринного двойного бета-распада различных изотопов



Схематический вид детектора NEMO-3.

Схематический вид сечения время-проекционной камеры для поиска 2ν распада ^{82}Se . Кривые линии - траектории электронов от источника.

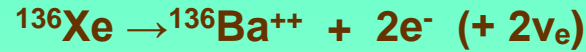
$$T_{1/2}^{2\nu} (^{82}\text{Se}) = (1,1^{+0,8}_{-0,3}) \cdot 10^{20} \text{ лет}$$

Изотоп	$Q_{\beta\beta}$, кэВ	Содержание в природе, %	$T_{1/2}$, лет	
			Эксп.	Теор.
^{48}Ca	4274	0,187	$(4,2 \pm 1,2) \cdot 10^{19}$	$6 \cdot 10^{18} \div 9 \cdot 10^{20}$
^{76}Ge	2039	7,61	$(1,74^{+0,18}_{-0,16}) \cdot 10^{21}$	$7 \cdot 10^{19} \div 6 \cdot 10^{22}$
^{82}Se	2995	8,73	$(9,2 \pm 1,0) \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{18} \div 6 \cdot 10^{21}$
^{96}Zr	3350	2,80	$(1,4 \pm 3,5) \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{17} \div 6 \cdot 10^{20}$
^{100}Mo	3034	9,63	$(7,8 \pm 0,8) \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{22}$
^{116}Cd	2805	7,49	$(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{18} \div 2 \cdot 10^{21}$
^{136}Xe	2468	8,87	$> 1,0 \cdot 10^{22}$	$1,1 \cdot 10^{20} \div 2,1 \cdot 10^{22}$

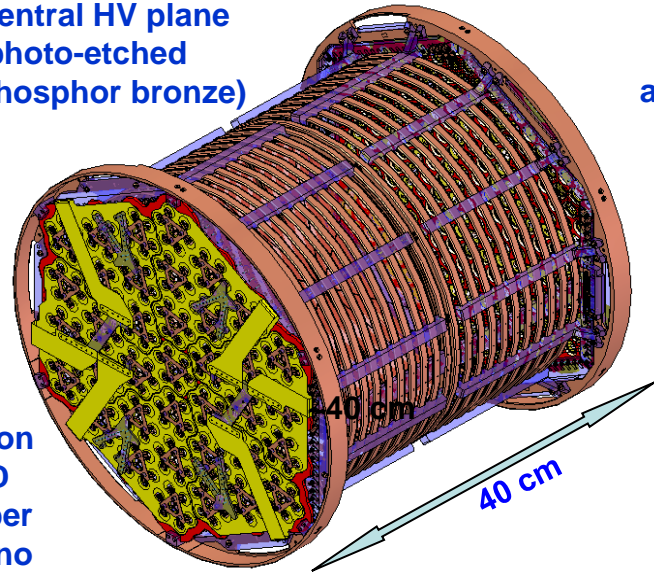
В эксперименте Гейдельберг-Москва с 11кг ^{76}Ge при статистике 71.7 кг·лет в спектре фона имеется пик, который может быть интерпретирован как $(0\nu 2\nu)$ -распад ^{76}Ge с $T_{1/2} = (1.19^{+0.37}_{-0.23}) \cdot 10^{25}$ лет.
 ??? \rightarrow $|<m_\nu >| \sim 0.4$ эВ; частично вырожд. иерарх. ???

EXO-200 (~200kg LXe TPC + Ba⁺-tagging)

Kevin O'Sullivan
TAUP 2007



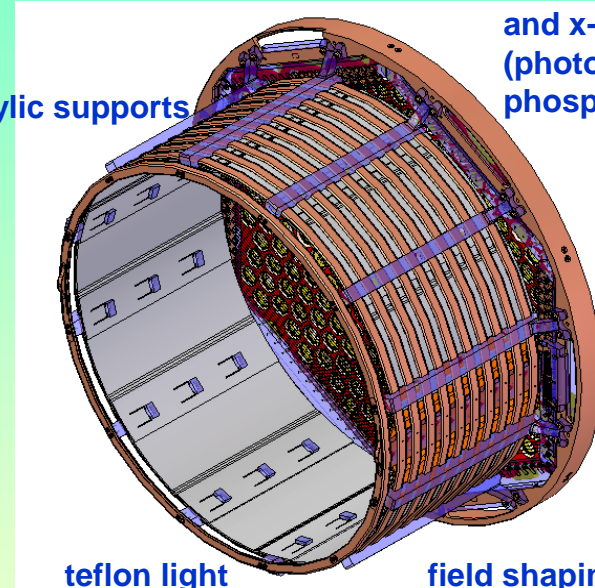
Central HV plane
(photo-etched
phosphor bronze)



flex cables on
back of APD
plane (copper
on kapton, no
glue)

acrylic supports

LAAPD plane (copper)
and x-y wires
(photo-etched
phosphor bronze)



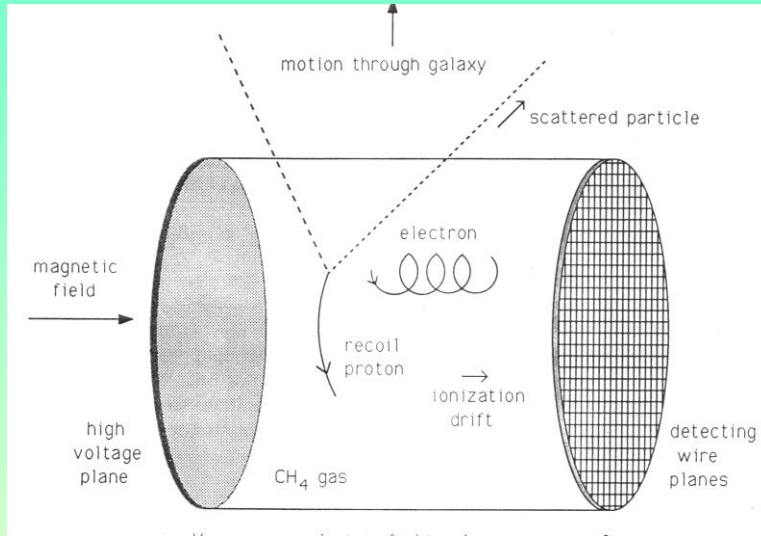
teflon light
reflectors

field shaping rings
(copper)

Case	Mass (ton)	Eff. (%)	Run Time (yr)	σ_E/E @ 2.5MeV (%)	Radioactive Background (events)	$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$ (yr, 90%CL)	Majorana mass (eV)	
							QRPA	NSM
EXO-200	0.2	70	2	1.6	40	6.4×10^{25}	0.27 [†]	0.38 [♦]

Поиск частиц ТМ детекторами с угловой чувствительностью

TPC для поиска частиц ТМ



Схематический вид TPC для поиска частиц ТМ

Предложена J. Rich, M. Spiro. 1988г.

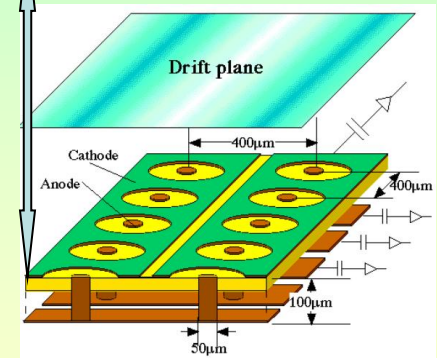
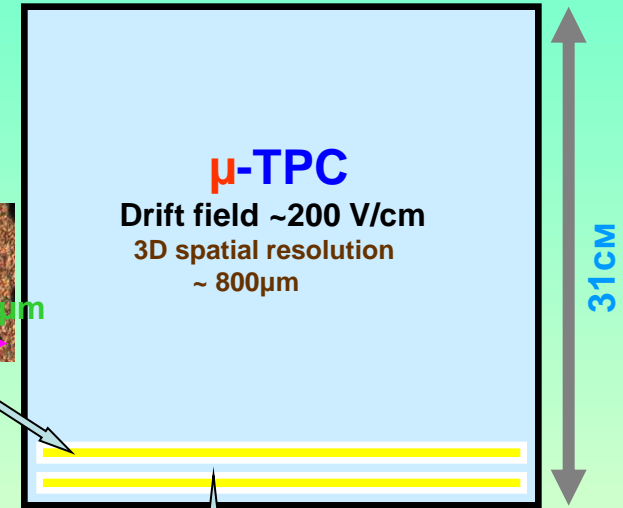
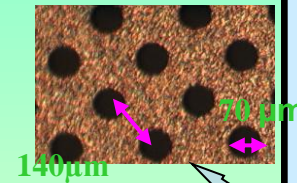
$V \sim 1000 \text{ м}^3$; CH_4 при 3 Торр $\rightarrow 2.8 \text{ кг}$;

Движение Земли через ТМ должно приводить к асимметрии направлений траекторий ядер отдачи вперед/назад. Средняя по спектру величина отношения составляет 4/1. Для больших энергий ядер отдачи (50 % полного спектра) отношение составляет 8/1.

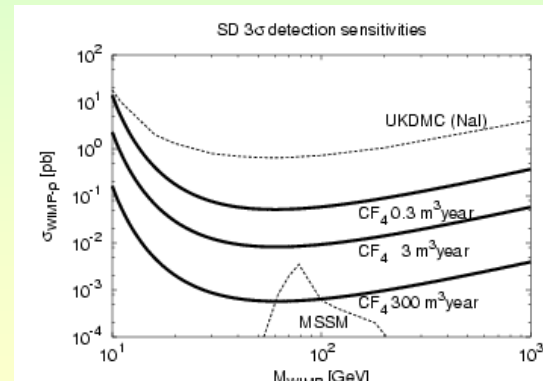
NEWAGE

Direction sensitive dark matter search

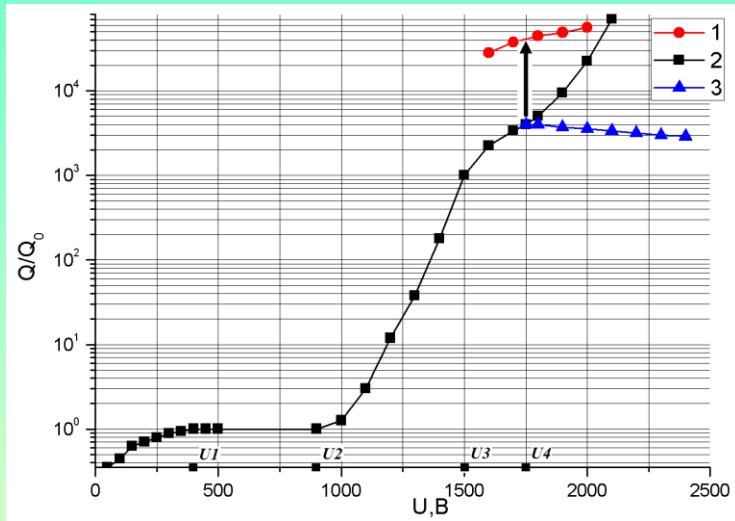
GEM: Gas gain 2



μ -PIC : Gas gain 2000
400µm pitch; 589824 pixels
 CF_4 , 0.2 bar, $E_{th} \geq 100 \text{ keV}$

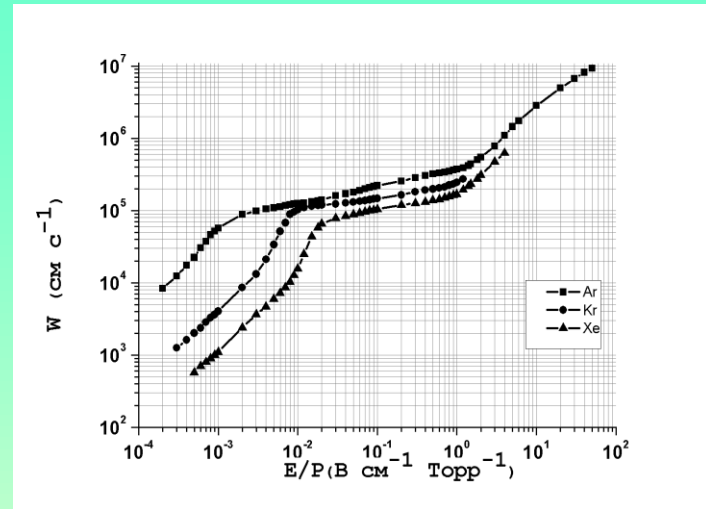


Некоторые характеристики газов

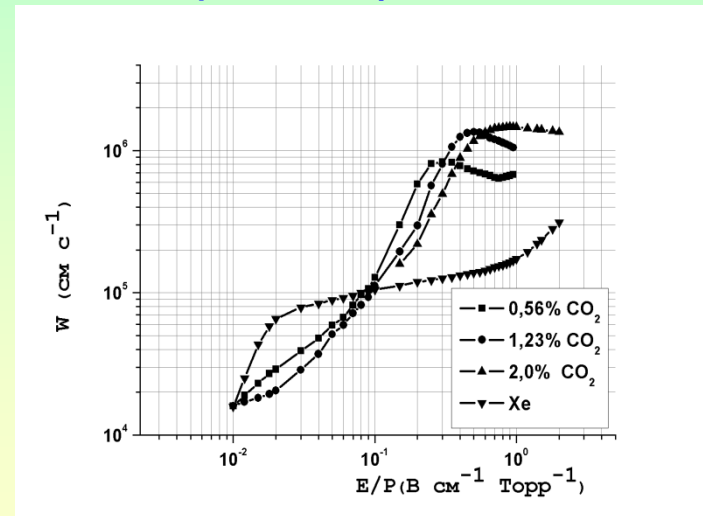


Схематическая качественная зависимость величины собираемого заряда в единицах заряда первичной ионизации от напряжения питания газоразрядного детектора.

- 1 – самогасящийся стримерный разряд;
- 2 – разряд Гейгера-Мюллера;
- 3 – пропорциональный разряд на фоне стабильного коронного разряда.



Зависимость скорости дрейфа электронов от E/r для Ar, Kr и Xe.



Зависимость скорости дрейфа электронов от E/r для смеси Xe с 0,56% CO_2 ; 1,23% CO_2 ; 2,0% CO_2 .

Фон газовых детекторов

1. Космические лучи (космогенные изотопы).

Защита – толща земли.

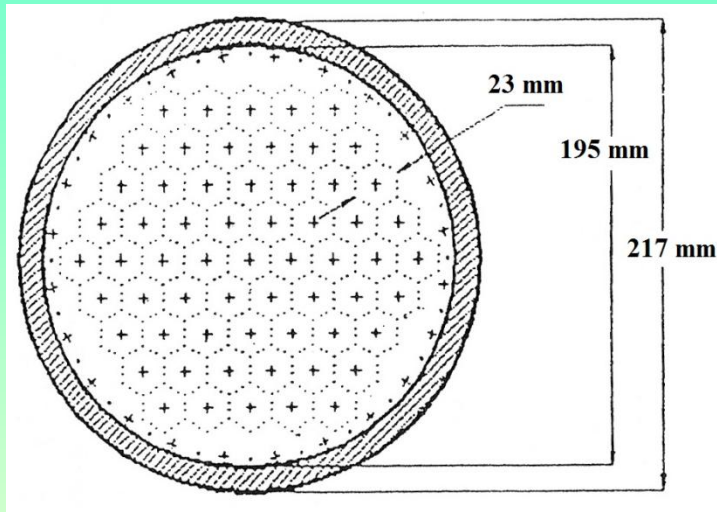
2. Долгоживущие радиоак. элементы: ^{40}K ($T_{1/2} = 1,26 \cdot 10^9$ лет; 0,0118 % в естественном калии); ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,41 \cdot 10^{10}$ лет; 100%) и д.п.р.; ^{238}U ($T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$ лет; 99,3%) и д.п.р.

Защита – слои радиоактивно-чистых материалов. **Отбор** материалов по результатам измерений γ -активности на сверхнизофоновом спектрометре с ППД, по результатам измерения поверхностной α -активности в ПС и в ИКИС.

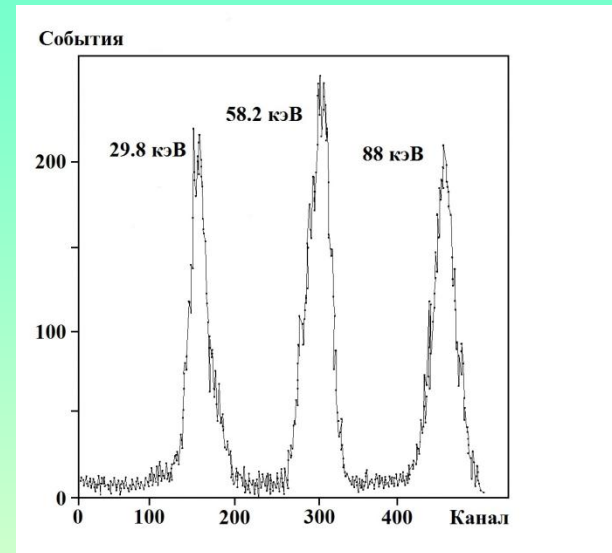
3. Радиоактивные изотопы газов: ^{39}Ar ($T_{1/2} = 269$ лет, β^- - распад, $E_{\beta\text{max}} = 565$ кэВ); ^{42}Ar ($T_{1/2} = 32,9$ лет, β^- - распад); ^{81}Kr ($T_{1/2} = 2,1 \cdot 10^5$ лет, e - захват); ^{85}Kr ($T_{1/2} = 10,76$ лет, β^- - распад, $E_{\beta\text{max}} = 670$ кэВ), ^3H (тритий, $T_{1/2} = 12,26$ лет, β^- - распад, $E_{\beta\text{max}} = 18,6$ кэВ) и ^{14}C (радиоуглерод, $T_{1/2} = 5730$ лет, β^- - распад, $E_{\beta\text{max}} = 156$ кэВ).

Защита – изотопная очистка, использование «старых» газов.

Авторские конструкции пропорциональных счётчиков. Многосекционный пропорциональный счётчик высокого давления.



Поперечное сечение многосекционного пропорционального счётчика.



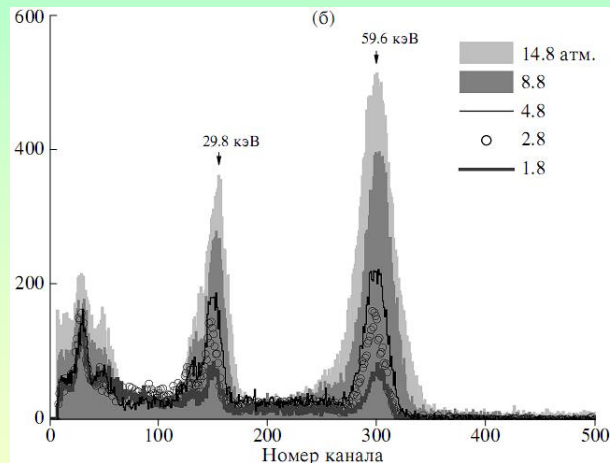
Спектр излучения ^{109}Cd от тестового счётчика с анодной нитью $d = 10$ мкм из позолоченного вольфрама. Рабочий газ – чистый ксенон при 20 атм. Энергетическое разрешение - 12,2%; 8,7% и 7,1%.

Предполагалось использовать для поиска двойного β -распада ^{136}Xe .

Рабочий объём ячеек равен 8,4 л. Полный объём газа в счётчике составляет ~13 л.

Рабочее давление ~25 ат. Исследованы характеристики работы одной ячейки.

Для проведения эксперимента по поиску 2β -распада ^{136}Xe в итоге была выбрана импульсная ионизационная камера высокого давления с однородным электрическим полем. Предложено использовать для поиска WIMP при заполнении до ~ 25 ат. CF_4 . Изучены характеристики модели, заполненной CF_4 . Газ показал плохие результаты. Было впервые обнаружено, что добавка (1-2)% Xe существенно улучшает характеристики газа: снижает в ~ 2 раза рабочее напряжение; увеличивает длину счётной х-ки до КГУ $\geq 10^4$.

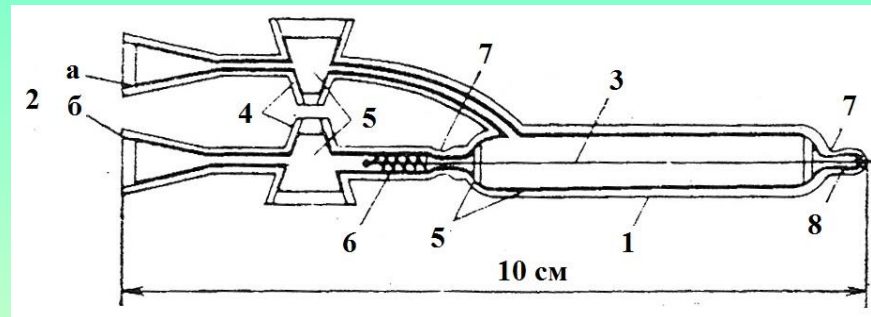


Спектры источника ^{241}Am (время набора одинаковое) при различных давлениях смеси $99\% \text{CF}_4 + 1\% \text{Xe}$.

Конкурентоспособность установки для данного направления утрачена.

Миниатюрный пропорциональный счётчик из кварцевого стекла

Первоначально разрабатывался в качестве ПС для радиохимических детекторов солнечных нейтрино. Объём 1,2 см³.

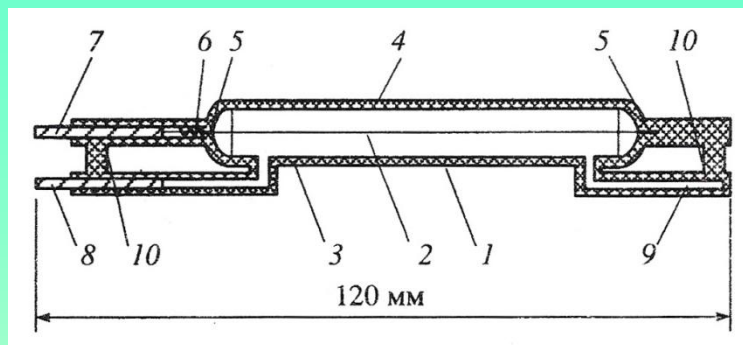


Пропорциональный счётчик из кварцевого стекла с катодом из пирографита.
1 – корпус, 2 – шлифы-гермовводы (а – ввод катода, б – ввод анода),
3 – анодная нить, 4 – химические краны-гермовводы (керны не показаны),
5 – пирографит, 6 – пружина, 7 – капиллярное сужение корпуса, 8 – распорный узелок.

Анод изготовлен из позолоченной вольфрамовой нити диаметром 20 мкм. Катод – слой пирографита. Счётчик заполнялся смесью $\text{Ar} + 10\% \text{CH}_4$ до давления 1 атм. При энергии 5,9 кэВ (^{55}Fe) при калибровке через корпус было получено разрешение ~18 %.

На базе данной конструкции В.Э. Янц разработал окончательную конструкцию ПС для ГГНТ.

Автор совместно с В.Э. Янцем разработал конструкцию **ПС** для регистрации внешнего рентгеновского излучения, возбуждаемого в пробах при проведении **РФА**.



Пропорциональный счётчик из кварцевого стекла с катодом из пирографита для регистрации внешнего рентгеновского излучения. 1 – корпус (Ø наружный 12 мм, Ø внутренний 10 мм, длина цилиндра 50-60 мм); 2 – анодная нить (вольфрам Ø 0,02 мм); 3 – плёнка пирографита; 4 – входное окно (толщина 0,15 мм, площадь ~5 см²); 5 – капиллярные сужения для центровки анода; 6 – пружина; 7 – контактный вывод анода; 8 – контактный вывод катода; 9 – капилляр вакуумного крана; 10 – упрочняющие перемычки.

ПС заполнялся специально подобранной смесью 97,8% Xe + 2,2% N₂.

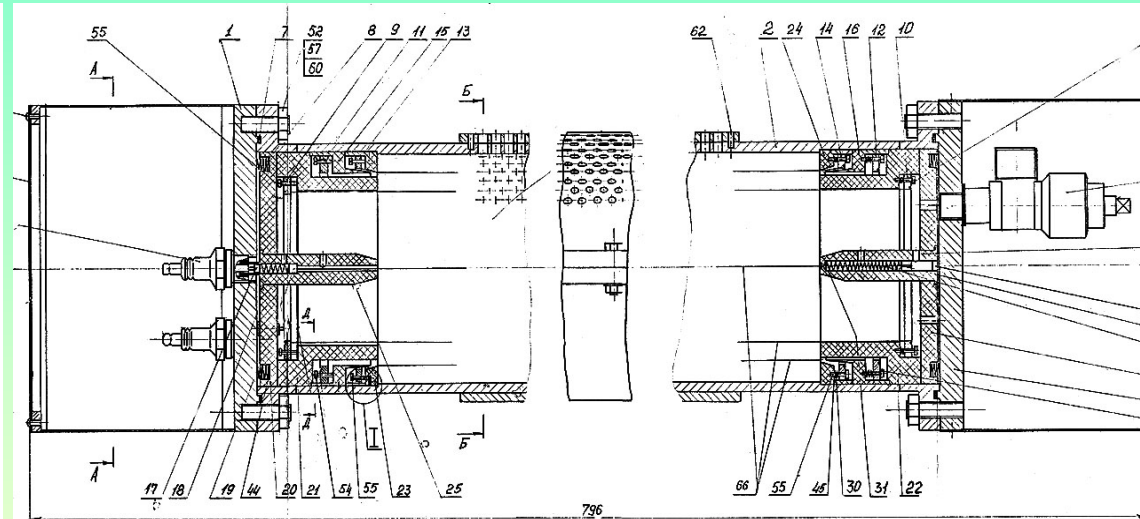
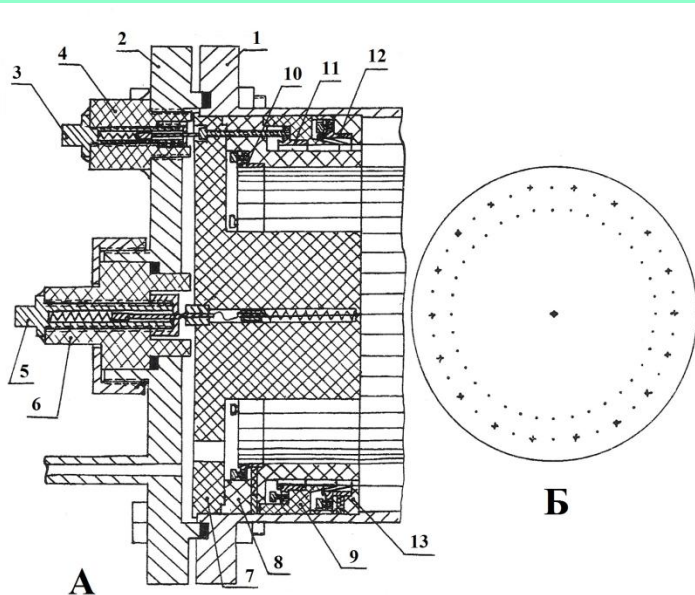
Счётчики не портятся в режиме хранения (≥ 15 лет) и при работе.

По данной технологии могут быть изготовлены шаровые счётчики и камеры.

Многонитяной бесстеночный пропорциональный счётчик для рентгеноспектрального флуоресцентного анализа

Примером использования экспериментального опыта из фундаментальных исследований для решения прикладных задач является применение многонитяного бесстеночного пропорционального счётчика для повышения чувствительности РФА.

Исследованы характеристики двойных ($x\% \text{ Ar} + y\% \text{ Хе}$) смесей в чистом виде и с добавлением $z\% \text{ N}_2$, CO_2 в качестве ускоряющей примеси.

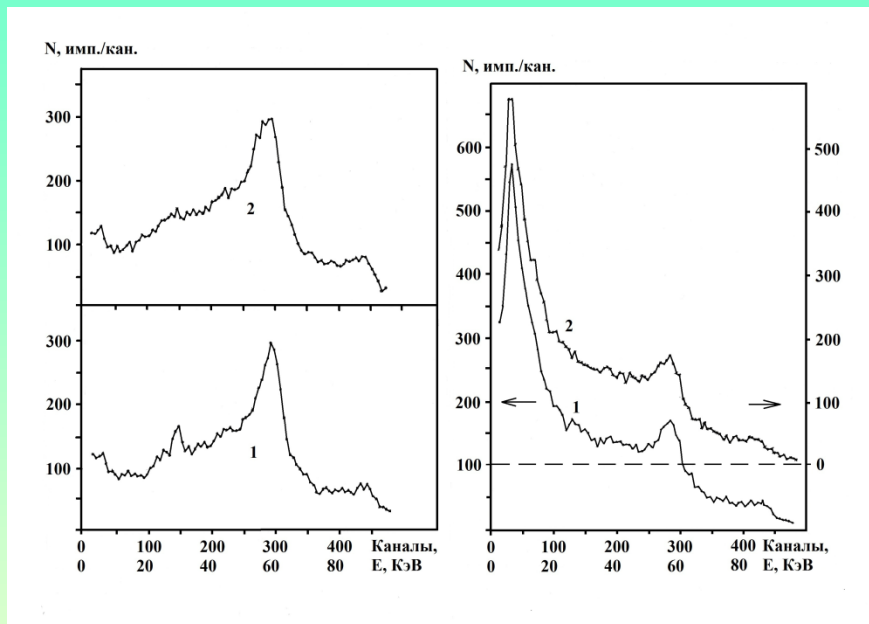


Сборочный чертёж бесстеночного многонитяного пропорционального счётчика с большой площадью входного окна.

Бесстеночный многонитяной пропорциональный счётчик с внутренним кольцевым защитным счётчиком.

«А» - конструкция крепления. Многонитяной системы: 1 – корпус счётчика (медь); 2 – фланец (медь); 3, 5 – высоковольтные выходы с пружинными контактами; 4, 6 – изоляторы (оргстекло); 7 - центральная пробка (фторопласт); 8, 9, 13 – изолирующие втулки (оргстекло, фторопласт); 10-12 – фиксирующие кольца с распорными винтами (латунь). «В» - Поперечный разрез: (·) – катод; (+) – анод.

Спектры импульсов с БМПС (с включёнными антисовпадениями) – «а» и СРПО-309 – «б».



1. Порода с 0,283% W;
2. «Пустая» порода.

Накопленный опыт работы по созданию надёжных счётчиков высокого давления с хорошими рабочими характеристиками и данные о свойствах различных газовых смесей были использованы в дальнейшем во всех проводившихся автором поисковых исследованиях редких ядерно-физических процессов.

Исследование формы β -спектра ^{14}C

В конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия наблюдался повышенный интерес высокоточным измерениям формы разрешённых β -спектров различных изотопов (^3H , ^{14}C , ^{35}S , ^{63}Ni) в связи с полученным в работе J.J. Simpson указанием на присутствие в β -спектре трития компоненты, соответствующей массе антинейтрино ~ 17 кэВ. Величина примеси к основному спектру с $m_\nu \approx 0$ оценивалась на уровне $\sim 1\%$. Заключение о наличии примеси составлялось на основании сравнения формы экспериментального спектра и расчётного, соответствующего $m_\nu \approx 0$. Форма расчётного спектра получалась из формы теоретического спектра для разрешённого перехода свёрткой с функцией отклика детектора.

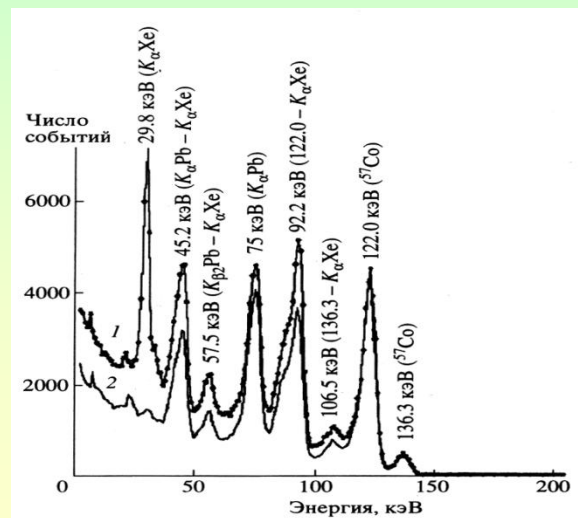
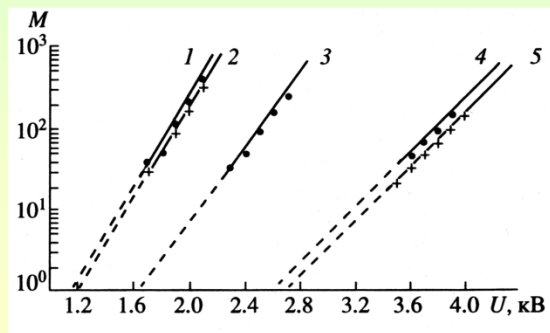
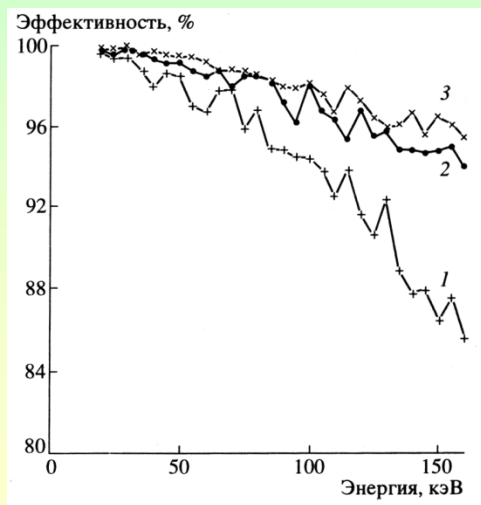
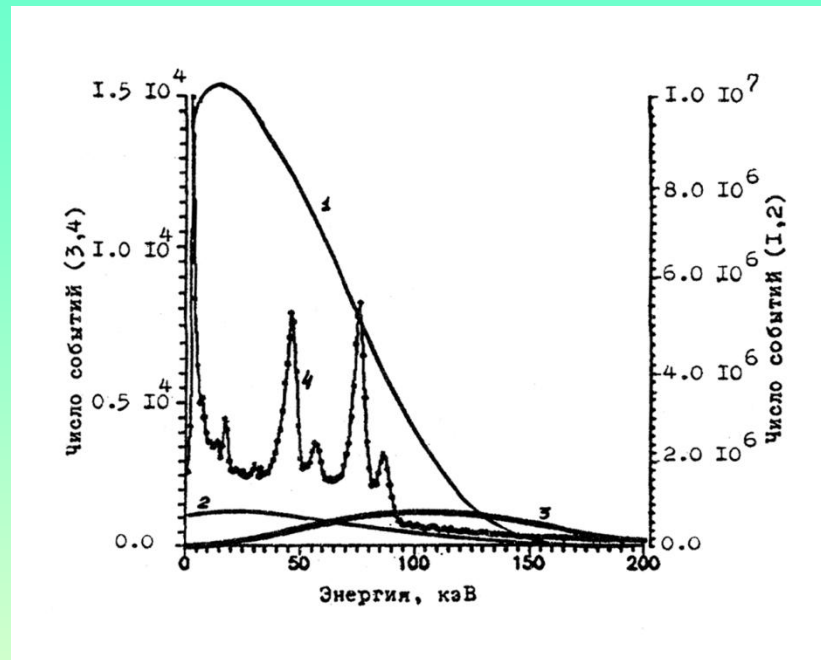
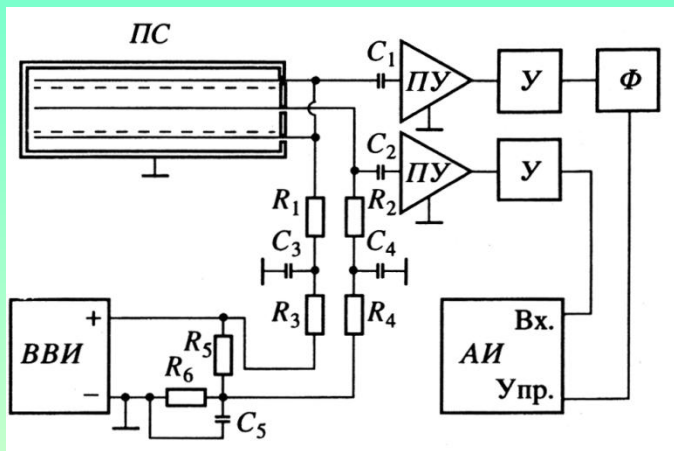
В случае с изотопом ^{14}C интерпретация результатов осложняется отсутствием однозначной общепризнанной классификации типа его β -распада $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \bar{\nu}$:

- 1) $\Delta I = 1$, чётность не меняется – по правилам Г.-Т. переход разрешённый;
- 2) Сравнительный $\lg(ft) = 9,04$ – соотв. запрещённому переходу 2-го порядка.

Нами был предложен и осуществлён дополнительный эксперимент по высокоточной регистрации β -спектра ^{14}C с помощью бесстеночного пропорционального счётчика.

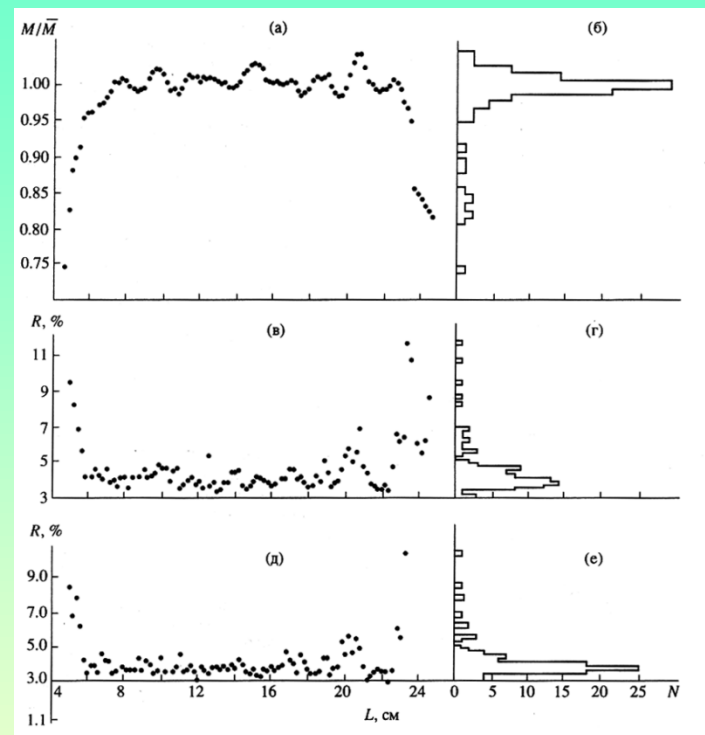
Выполнен ряд входных предварительных исследований:

- 1) определена и выбрана наилучшая нить для изготовления анода;
- 2) подобран оптимальный состав и рабочее давление смеси - [$\text{Xe} + 0.05\%(\text{CO}_2 + {}^{14}\text{CO}_2)$] при 5 атт.;
- 3) изучено влияние краевого эффекта на форму спектра и найдено практическое решение по его существенному снижению;
- 4) изучены особенности параллельной работы центрального и защитного счётчиков;
- 5) определена оптимальная активность внутреннего ${}^{14}\text{C}$;
- 6) исследованы эффекты локального «старения» анодной нити под действием избыточного излучения от точечного калибровочного источника, найден вариант устранения такого эффекта с помощью специального калибровочного источника с равномерным распределением интенсивности излучения по длине счётчика;
- 7) измерен фон счётчика;
- 8) измерена нелинейность отклика амплитудного анализатора;
- 9) определены искажения формы β -спектра ${}^{14}\text{C}$, вносимые геометрическими размерами катодных нитей на общей границе между счётчиками («непрозрачность» сетки); отличием формы реальной электрической границы между счётчиками от цилиндрической; энергетическим порогом регистрации импульсов в канале защитного счётчика (з.с.); случайными наложениями импульсов в центральном счётчике (ц.с.) и т.д.



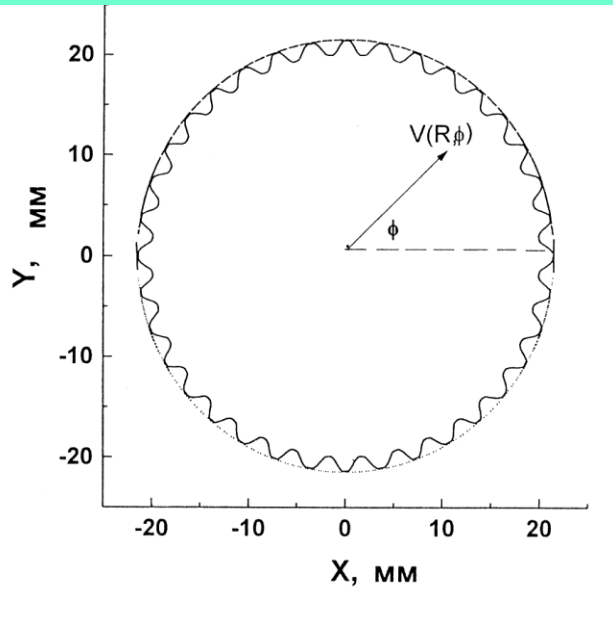
Значения подобранных рабочих параметров:

- рабочий объём ПС равен 1083 см^3 , а объёмы ЦС и ЗС – 465 и 300 см^3 ;
- рабочий газ $\text{Xe} + 0.05\%(\text{CO}_2 + {}^{14}\text{CO}_2)$ при давлении 5 ат. ;
- активность ${}^{14}\text{C}$ - в ЦС $\sim 400 \text{ с}^{-1}$, в ЗС - $\sim 600 \text{ с}^{-1}$;
- анодная нить – позолоченный вольфрам $\text{Ø}10 \text{ мкм}$;
- торцевые утолщения анода для корректировки краевого эффекта;
- энергетическое разрешение по линии 122 кэВ $\sim 5.0\%$;
- полное время измерений – 2500 ч (~ 100 суточных серий);
- накоплена статистика $\sim 3.6 \cdot 10^9$ импульсов.



Распределение коэффициента газового усиления (а,б) и энергетического разрешения (в,г – до измерения β -спектра; д,е – после измерения) по длине детектора.

Форма электрической границы между центральным и защитным счётчиками



Заключение о соответствии экспериментального и расчётного спектров составляется на основании сравнения их форм, трансформированных к единому виду. Конечный результат был получен сравнением экспериментального спектра, очищенного от фона и приведённого к равномерной шкале амплитудных каналов, а все аппаратные искажения вводились расчётным путём в разыгранное амплитудное распределение. В расчёте в качестве теоретического спектра было использовано выражение для разрешённого перехода в модели с двумя массовыми состояниями электронного антинейтрино: $dN/dE = |U_{el}|^2 \cdot dN(E, m_{\nu}=0)/dE + |U_{eh}|^2 \cdot dN(E, m_{\nu h})/dE$, где $dN(E, m_{\nu})/dE = A \cdot C(E) \cdot F(Z, E) \cdot p \cdot E \cdot (E_0 - E) \cdot [(E_0 - E)^2 - m_{\nu}^2]^{0,5}$; A – нормировочная константа; $C(E)$ – спектральный форм-фактор, учитывающий отклонение формы спектра от разрешённой; $F(Z, E)$ – функция Ферми, учитывающая

релятивистские эффекты и поправки на экранирование во взаимодействии электрона и дочернего ядра в конечном состоянии [211]; p и E – импульс и энергия электрона; E_0 – граничная энергия перехода; $|U_{eh}|^2$ – параметр смешивания (вероятность испускания нейтрино с массой $m_{\nu h} = 17$ кэВ), $|U_{el}|^2 \approx 1$, $|U_{eh}|^2 \ll 1$.

Таблица 11. Относительные вклады различных искажающих факторов в полную форму измеренного β -спектра ^{14}C .

Фактор искажения	ΔE , кэВ					
	20 – 40	40 – 80	80 – 120	120 – 160	160 – 180	180 – 200
1. Краевые эффекты	0,1026	0,0482	0,0183	0,0047	0	0
2. Двукрат. наложения	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-2}$	0,1268	0,9351	0,9767
3. Трёхкрат. наложения	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$
4. Непрзрачн. сетки	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0	0	0
5. Порог в канале ЗС	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0	0
6. Фон ест. рад.	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	53
7. Диф. нелинейность	0,0022	0,0019	0,0059	0,0006	0,0046	0,0180

Наилучшее согласие достигается, если спектральный форм-фактор вводится в виде $S(E) = 1 + \beta \cdot (E_0 - E)$ и $|U_{eh}|^2 = 0$ $\{|U_{eh}|^2 \leq 0,0022$ (90% у.д.)} для $E_0 = [156,27 \pm 0,03$ (ста.) $\pm 0,14$ (сист.)] кэВ и $\beta = (1,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$ кэВ $^{-1}$ ($\chi^2 / k \approx 1,00$).

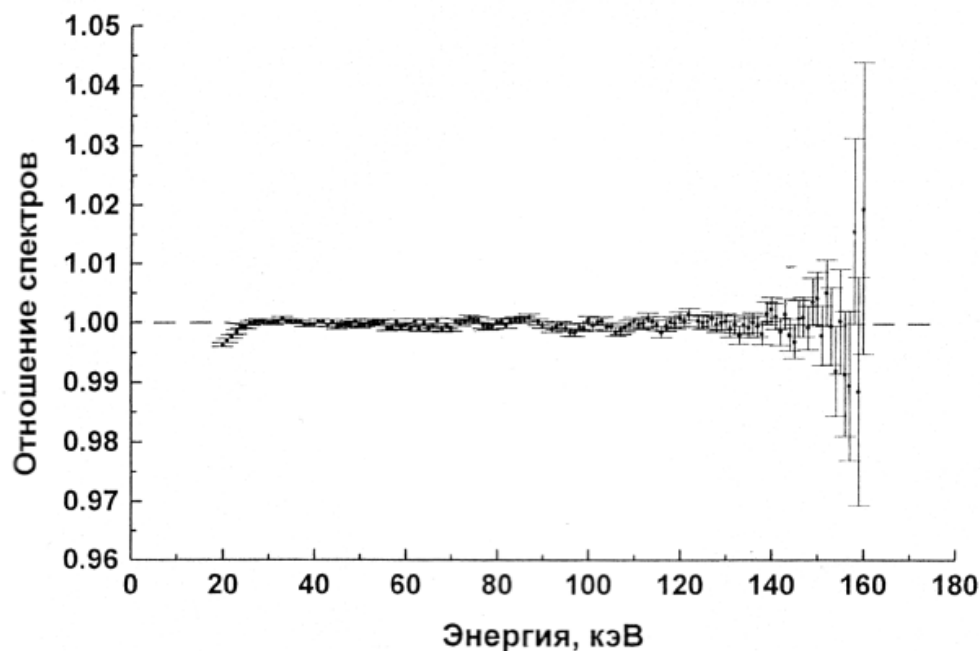


Рис. 3.21. Отношение экспериментального спектра к теоретическому ($|U_{eh}|^2 = 0$) после введения форм-фактора.

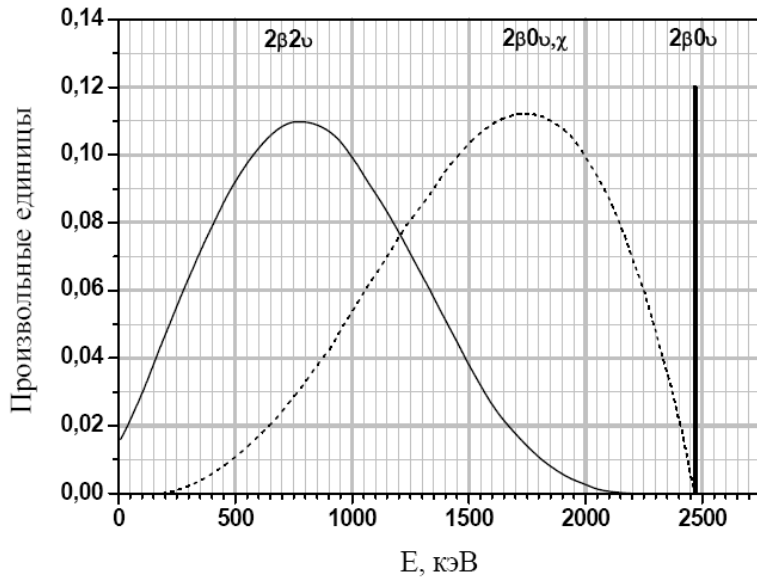
На основании полученных нами результатов по-прежнему не удаётся принять окончательное решение о виде формы β -спектра ^{14}C , поскольку нет полной уверенности, что были выявлены и учтены в расчётах все возможные искажающие факторы.

Эксперименты по поиску 2β -распада ^{136}Xe

Теоретические предсказания для разных моделей:

$T_{1/2}$ ($2\beta 2\nu$)-моды - $1,1 \cdot 10^{20}$ - $2,1 \cdot 10^{22}$ лет.

$T_{1/2}$ ($2\beta 0\nu$)-моды $\{|\langle m_\nu \rangle| = 1 \text{ эВ}\}$, $2,8 \cdot 10^{23}$ - $1,2 \cdot 10^{25}$ лет.



Полная кинетическая энергия двух испущенных электронов для различных каналов распада ^{136}Xe ($Q_{\beta\beta} = 2468$ кэВ):
($2\beta 2\nu$) – двухнейтринная мода; **($2\beta 0\nu$)** – безнейтринная мода; **($2\beta 0\nu\chi$)** – безнейтринная мода с одним майороном.

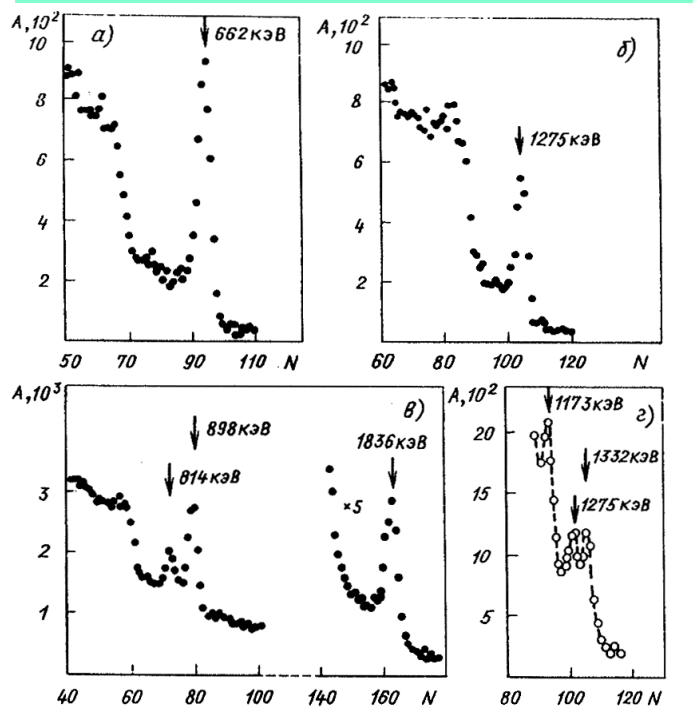
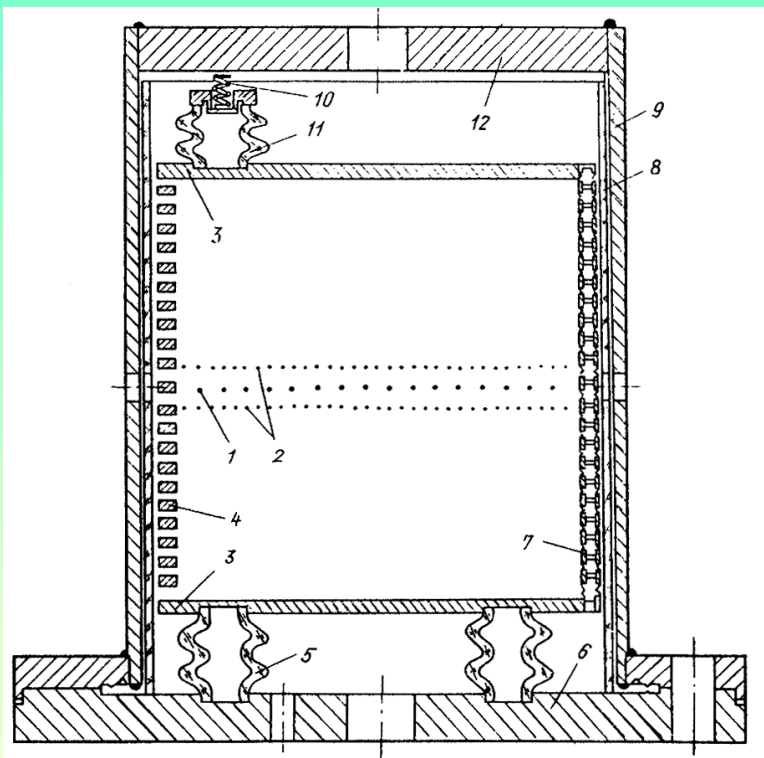
Таблица 12. Изотопный состав и объем образцов ксенона, использованных в работе.

Образец →	№1	№2	№3
Изотоп ксенона	Содержание, %		
124	0,096	$\Sigma \leq 0,1$	$\leq 0,001$
126	0,090		0,002
128	1,919		1,25
129	26,44		25,2
130	4,08		4,15
131	21,18		21,8
132	26,89	0,29	27,6
134	10,4	5,42	10,8
136	8,87	94,1	9,19
Хим. примеси	-	$\leq 0,1$	$\leq 0,007$
Объем, л (н.у.)	~ 300	372	554

Образцы ксенона

Методика ионизационной камеры высокого давления

Рабочий объём камеры между катодами равен 3,65 л, а без зазоров сетка – анод объём равен 3,14 л. Рабочее давление – 25 ат.



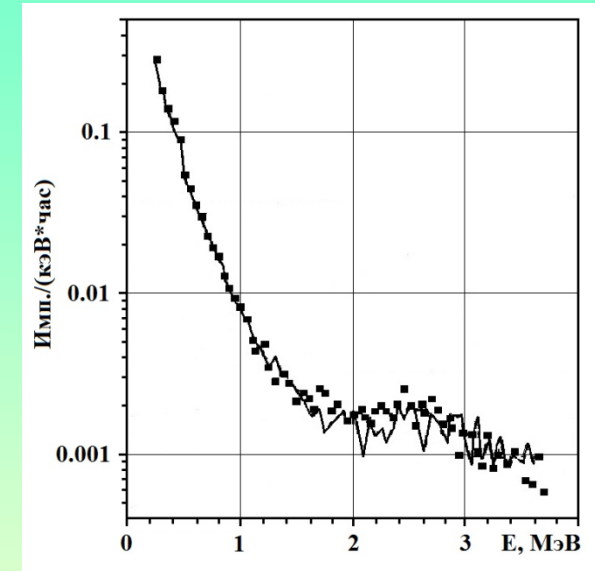
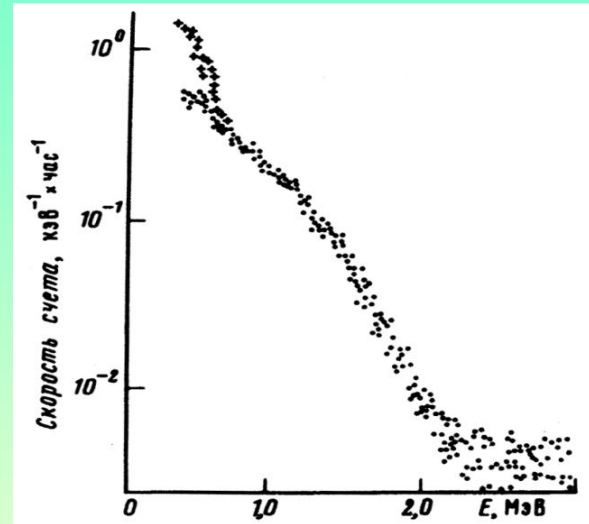
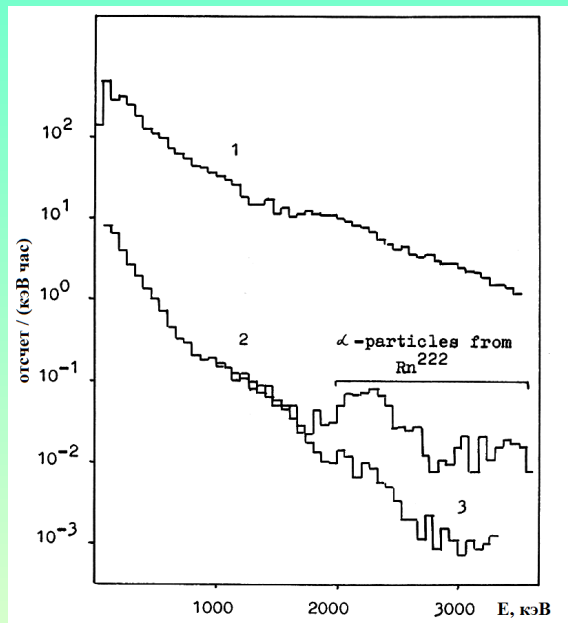
Амплитудные спектры импульсов при калибровке ионизационной камеры, заполненной $\text{Xe} + 0.8\% \text{H}_2$ до 30 атт., неколлимированным γ -излучением от различных источников: а - ^{137}Cs (662 кэВ); б - ^{88}Y (898; 1836 кэВ); в - ^{60}Co (1173, 1332 кэВ) + ^{22}Na (1275 кэВ).

Ионизационная камера высокого давления: 1 – анод; 2 – экранирующие сетки; 3 – катодаы; 4 – потенциальные кольца; 5, 7, 11 – кварцевые изоляторы; 6 – дно; 8 – кварцевая труба; 9 – корпус; 10 – пружина; 12 – крышка корпуса.

Разрешение линий 662 кэВ и 1836 кэВ составило 5.0% и 2.7%, соответственно. При энергии 2500 кэВ оценочное разрешение равно ~ 2.3%.

Фон камеры в разных условиях

Низкофоновая защита: 15 см Pb + 10 см Cu в помещении ПСТ на глубине 850 м в.э.



Спектры фона одной половины камеры:
«1» - в наземной лаборатории ($p = 30$ атт);
«2» - полный фон в подземной лаборат. в защите ($p = 25$ атт); «3» - то же, что «2», но с включённой системой дискриминации α -частиц.

Спектры фона камеры в подземной лаборатории в защите ($p = 25$ атт) с включённой системой дискриминации α -частиц: (°) – естXe (полное время набора 20 час); (•) – ¹³⁶Xe (полное время набора 243 час). (В области энергий $>0,7$ МэВ спектры практически совпадают, поэтому приводится только спектр ¹³⁶Xe).

Спектры фона модернизированной ионизационной камеры, заполненной обогащённым ксеноном (■) и ксеноном без 85Kr (линия).

Обработка данных

Расчёт периода полураспада производится по формуле

$$T_{1/2} = (\ln 2) \cdot \varepsilon \cdot A_0 \cdot t / N_{\text{э}}, \quad \text{где}$$

ε – эффективность детектирующей системы,

A_0 – разность числа атомов ^{136}Xe в обогащённом и фоновом образцах,

t - полное время набора,

$N_{\text{э}} = (N_{\text{э+ф}} - N_{\text{ф}})$ - эффект,

$N_{\text{э+ф}}$ – число отсчётов с обогащённым образцом в исследуемом энергетическом интервале,

$N_{\text{ф}}$ – число отсчётов с фоновым образцом.

При установлении предела на период полураспада: $N_{\text{э}} = (k \cdot \sigma)$, где

k – множитель, задающий величину эффекта в единицах $\sigma = \sqrt{(N_{\text{э+ф}} + N_{\text{ф}})}$.

Результаты измерений

Скорость счёта в интервале (700-2000) кэВ - **7.64** час⁻¹ (^{136}Xe) и **7.48** час⁻¹ (естXe (№3)).

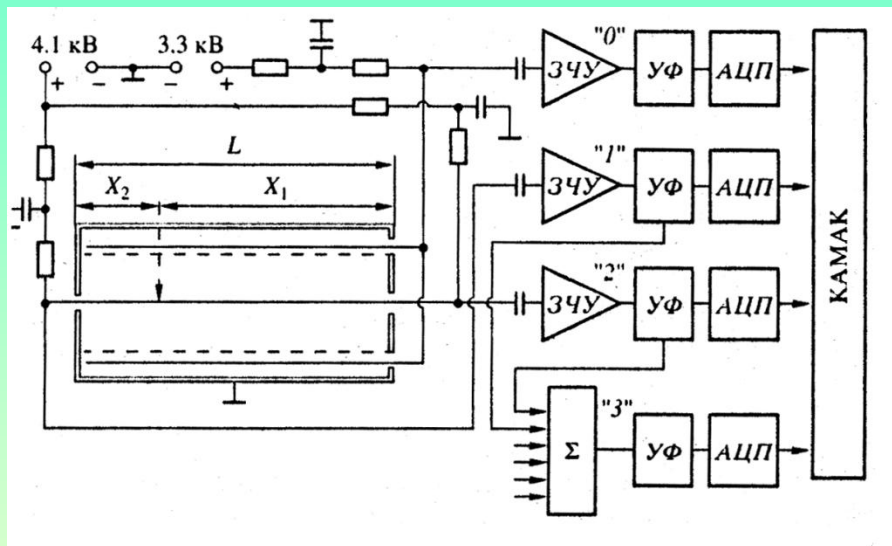
Разность: **(0.16 ± 0.18_{стат} ± 0.09_{сист})** час⁻¹. Эффективность при 20 ат: $\varepsilon = 0,50$.

Ограничение на период полураспада:

($2\beta 0\nu$)-распад ($0^+ - 0^+$ переход) - $T_{1/2} \geq 3,3 \cdot 10^{21}$ лет (68% у.д.);

($2\beta 2\nu$)-распад ($0^+ - 0^+$ переход) - $T_{1/2} \geq 2,7 \cdot 10^{20}$ лет (68% у.д.).

Методика бесстеночных пропорциональных счётчиков высокого давления (м.б.п.с.)



Полная схема подключения одного м.б.п.с. в основных измерениях. ЗЧУ – зарядочувствительный усилитель, УФ – усилитель с формировками, АЦП – амплитудно-цифровой преобразователь, Σ – сумматор сигналов в «быстром» канале «3». Конденсаторы – 0.1 мкФ, резисторы – 120 МОм; L – полная длина счётчика; X_1 , X_2 – расстояния от центра тяжести ионизационного следа до концов анодной нити. Канал з.с. обозначен цифрой «0», каналы ц.с. – «1» и «2».

Длина рабочей части ц.с. равна 588 мм, длина з.с. – 620 мм. Рабочие объёмы ц.с. и з.с. равны соответственно 4.44 л и 2.57 л. Три счётчика из титановых сплавов (№1-№3). Рабочее давление газа было выбрано равным 16.8 атт. Счётчик (№1) был заполнен очищенным в Т-реакторе естественным ксеноном №3, а два других (№1 и №3) – очищенным обогащённым ксеноном №2. Схема подключения одного из трёх счётчиков в основных, подземных, измерениях показана на рис.

Сбор данных

10 АЦП (3x3 + 1)

Сигналы: ПС1; ПС2 ($\tau_{и} = \tau_{д} = 26$ мкс); ПАС ($\tau_{и} = \tau_{д} = 11.5$ мкс);

П12 ($\tau_{и} = 0$ и $\tau_{д} = 0.75$).

События: Тип1 – (ПС1 + ПС2) + П12;

Тип2 - ПАС + (ПС1 + ПС2) + П12.

Параметры:

Координата вдоль длины анодной нити –

$$\beta = k_1 \cdot \text{ПС1} / (\text{ПС1} + \text{ПС2}).$$

Длительность фронта –

$$f = k_2 \cdot \text{П12} / (\text{ПС1} + \text{ПС2}).$$

Калибровка

Условия измерений.

Низкофоновая защита (15 см Pb + 8 см борированный полиэтилен + 11 см Cu).

Низкофоновой Лаборатории Глубокого Заложения (НЛГЗ) 4900 м в.э.

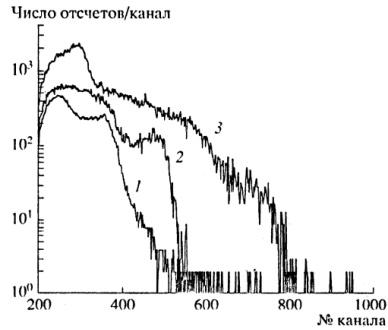


Рис. 4.10. Спектры сигналов ПС1 + ПС2 событий типа Т1 для счётчика №3 при калибровке источниками ¹³⁷Cs (1), ⁵⁴Mn (2) и ²²Na (3).

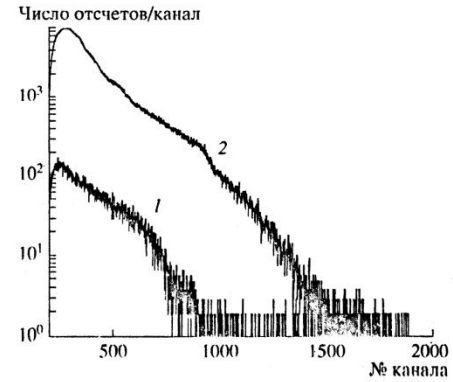
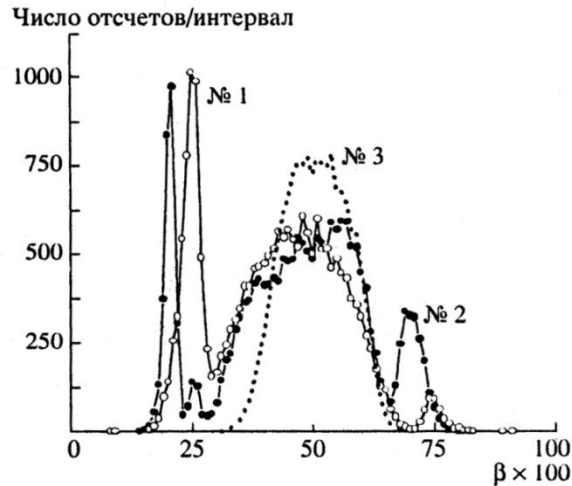
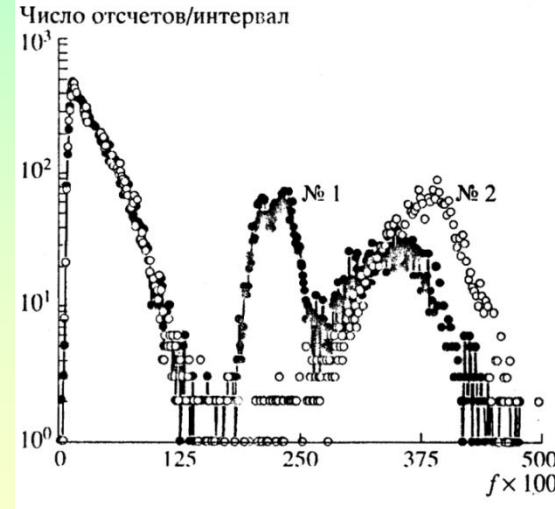


Рис. 4.11. Спектры сигналов ПС1 + ПС2 событий типа Т1 для счётчика №3 при калибровке распределёнными по длине источниками ⁴⁰K (1) и ²³²Th (2).

Определение координаты события и длины проекции ионизационного трека

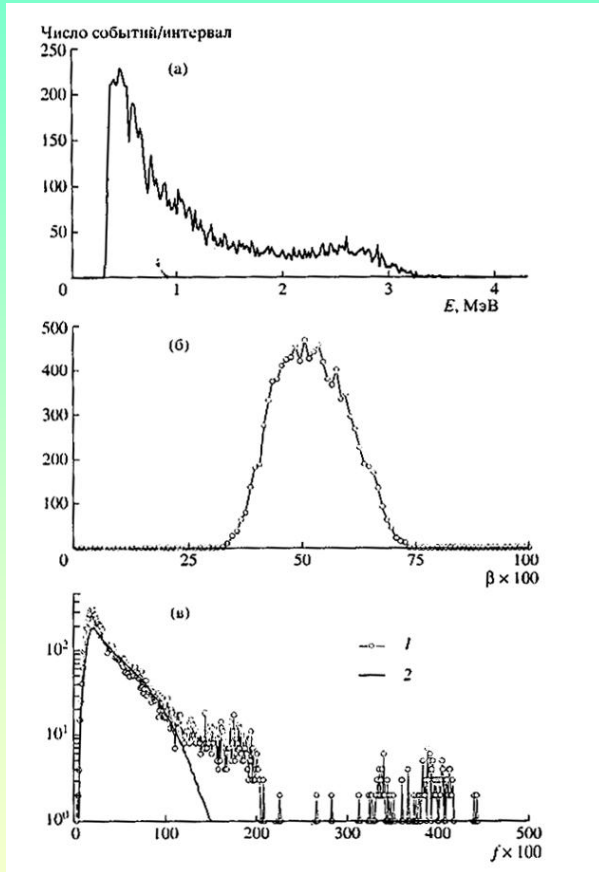


Распределение числа событий типа Т1 с энергией ≥ 600 кэВ (⁴⁰K) в счётчиках № 1-3 по величине параметра β

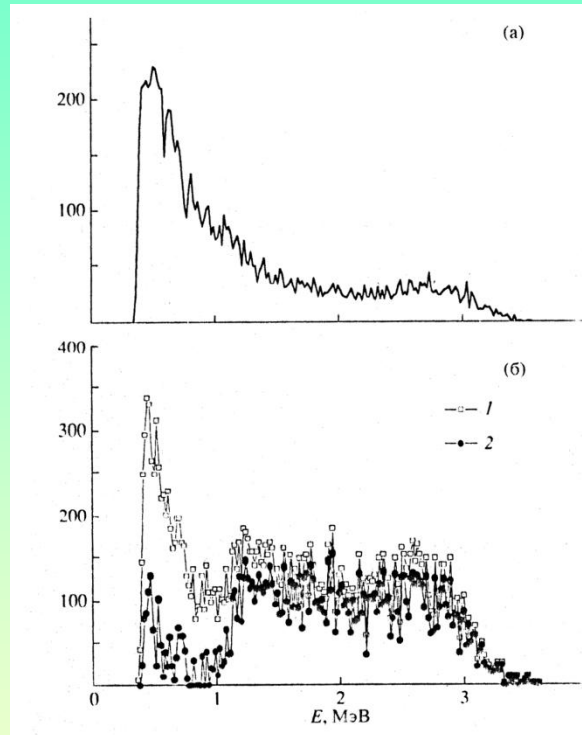


Распределение событий Т1 с энергией ≥ 600 кэВ (⁴⁰K) по величине параметра f в счётчиках №1, №2. Для счётчика №3 f -распределение лежит при $f \leq 130$ и полностью совпадает с приведёнными зависимостями

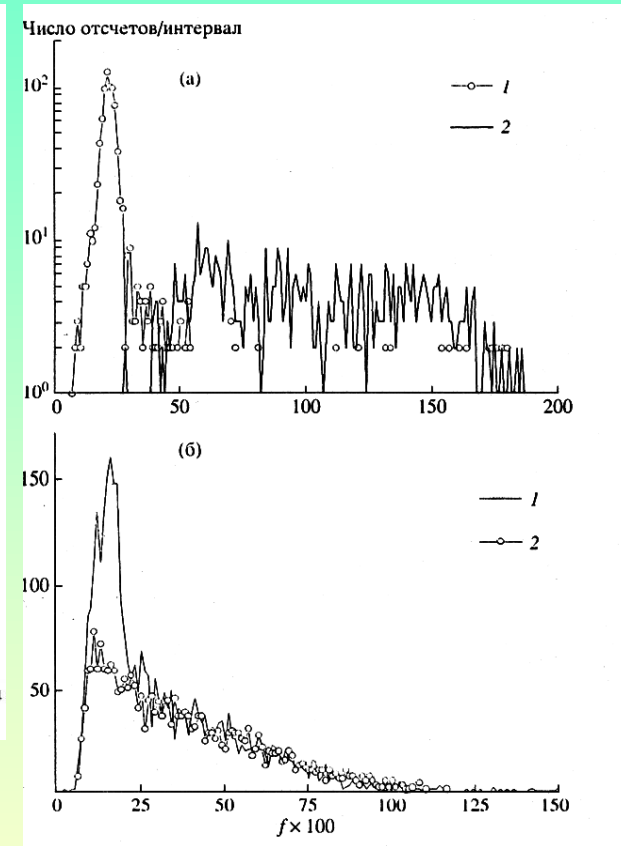
Результаты основных измерений



Распределение фоновых событий T1 (время набора 730.5 ч) в счётчике №3 по энергии (а) и значениям параметров β (б) и f (в, «1»). «2» - нормированное на фон f -распределение для спектра ^{232}Th .

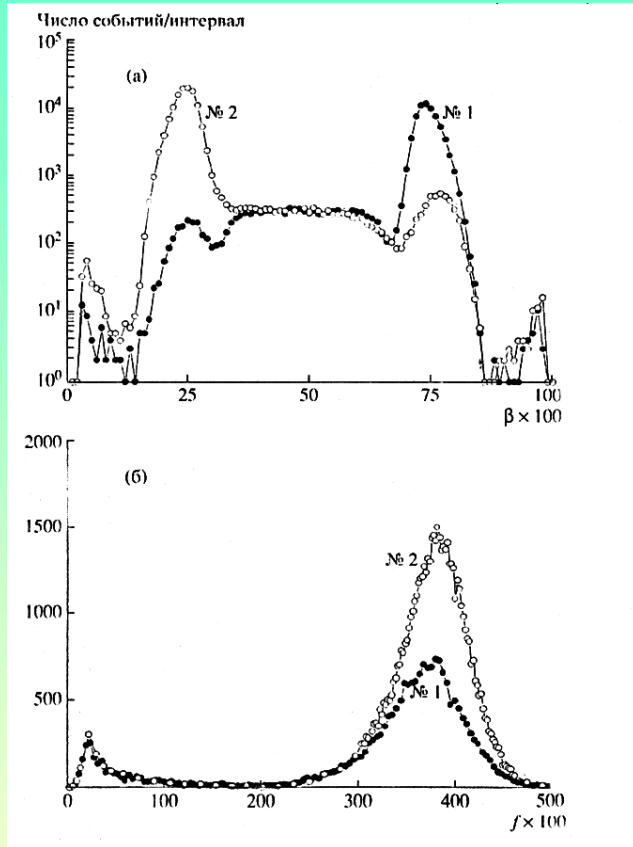


Спектры фона в счётчике №3 за 730,5 ч до (а) и после (б) введения радона (1) и их разностный спектр (2).



Распределение событий по величине f -параметра: а – для событий от распада радона в интервале энергий 1240 - 1640 кэВ (1) и 2740 – 3120 кэВ (2); б - для событий с энергиями 600 – 1160 кэВ из спектра фона (1) и источника ^{232}Th (2).

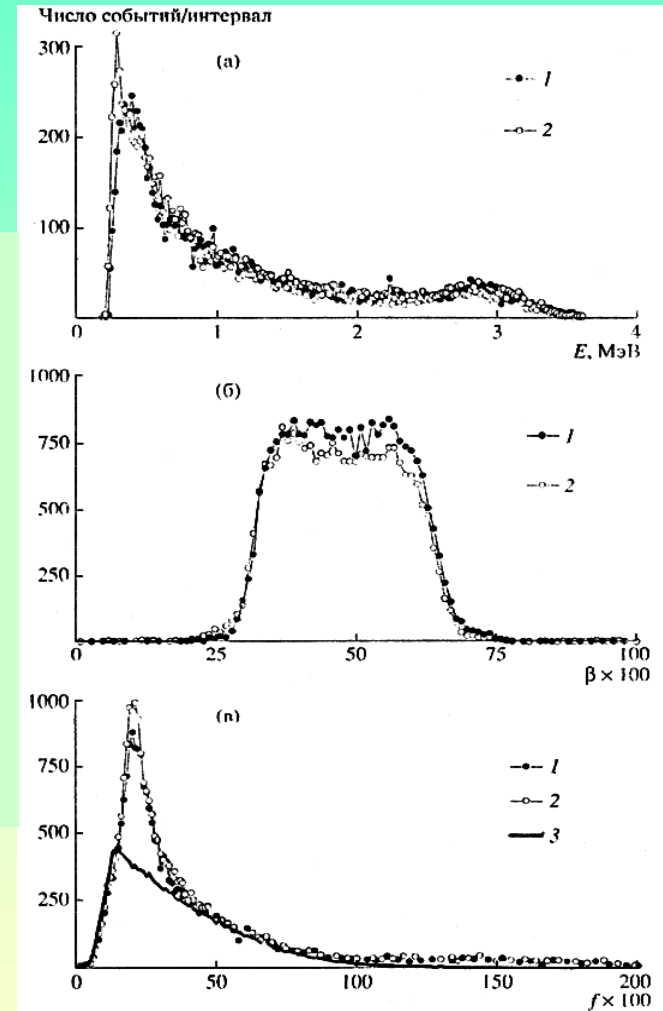
Результаты основных измерений



Распределение фоновых событий в счётчиках №1 и №2 по величине β - и f - параметров.
Время набора информации 730.5 ч

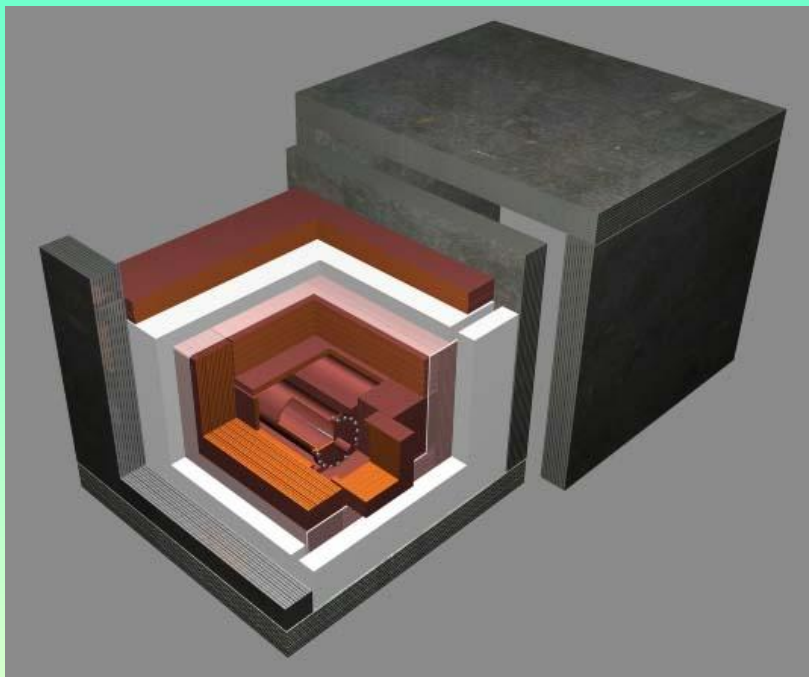
Суммарные распределения событий с параметрами $f \times 100 = 1 \div 200$:

а – суммарный спектр фона счётчиков №1 и №2 при заполнении ^{136}Xe (1) и естХе (2); б, в - β - и f -распределения событий с энергиями ≥ 700 кэВ для ^{136}Xe (1) и естХе (2), (3) - нормированное f -распределение событий с энергиями 700 – 1800 кэВ от источника ^{232}Th в счётчике №2



($2\beta 2\nu$)-распад ($0^+ - 0^+$ переход) –
 $T_{1/2} \geq 1.33 \cdot 10^{21}$ лет (68% у.д.),
 $T_{1/2} \geq 0.81 \cdot 10^{21}$ лет (90% у.д.).

Методика больших медных пропорциональных счётчиков высокого давления



Схематический вид экспериментальной установки

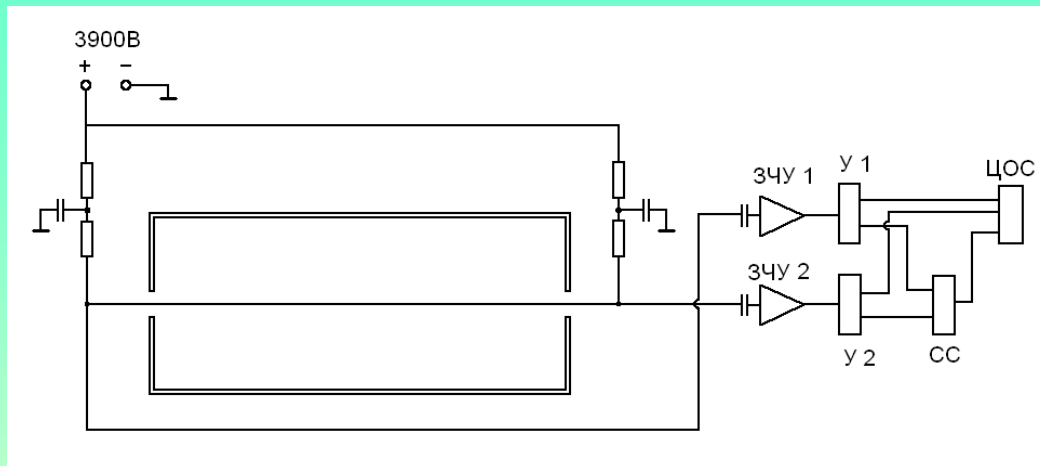
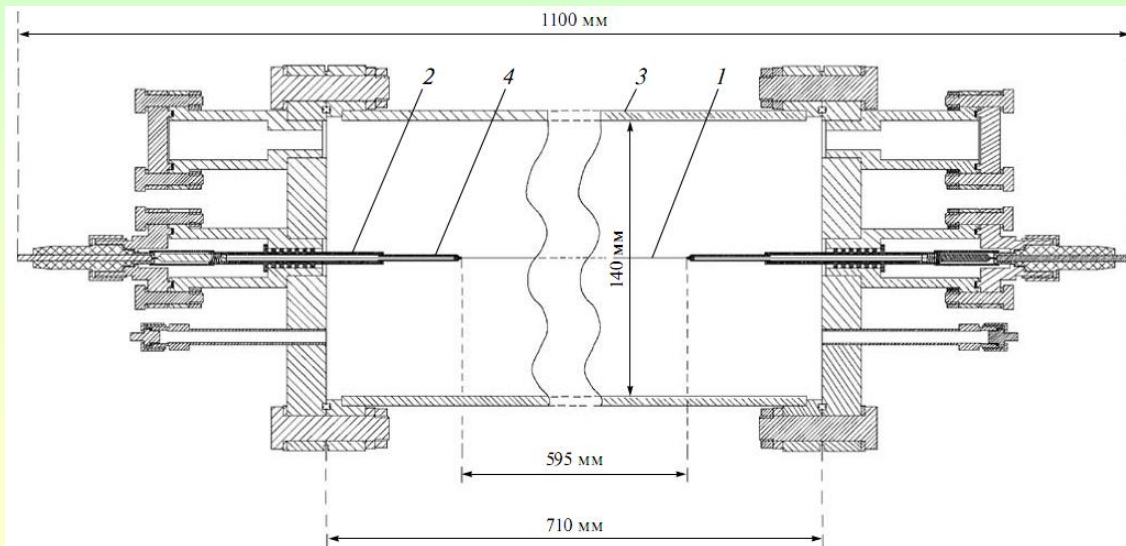
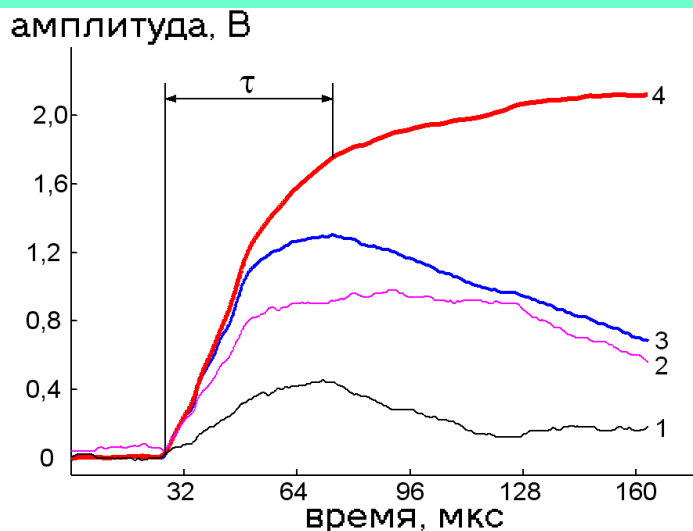


Схема включения

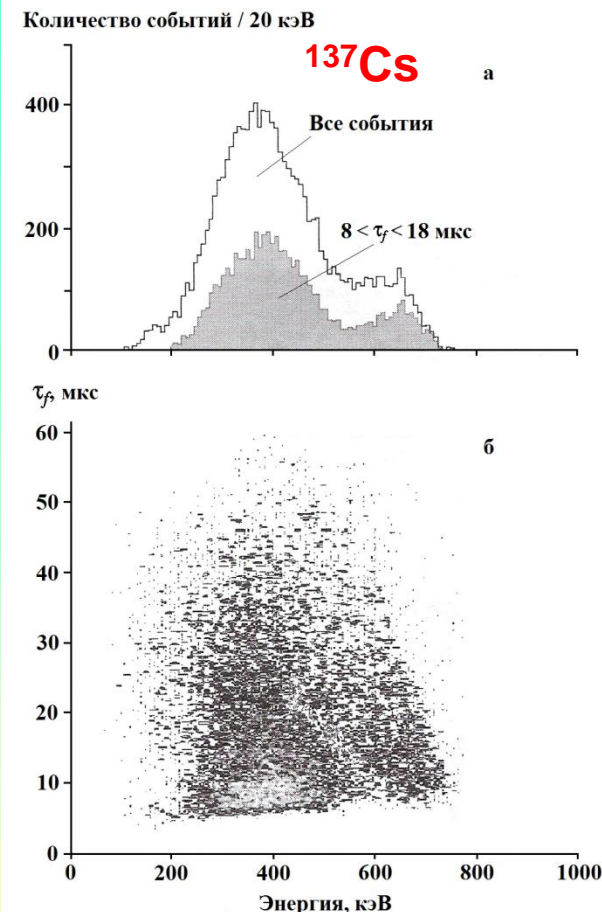
Схематический вид счётчика в разрезе



Обработка оцифрованных импульсов

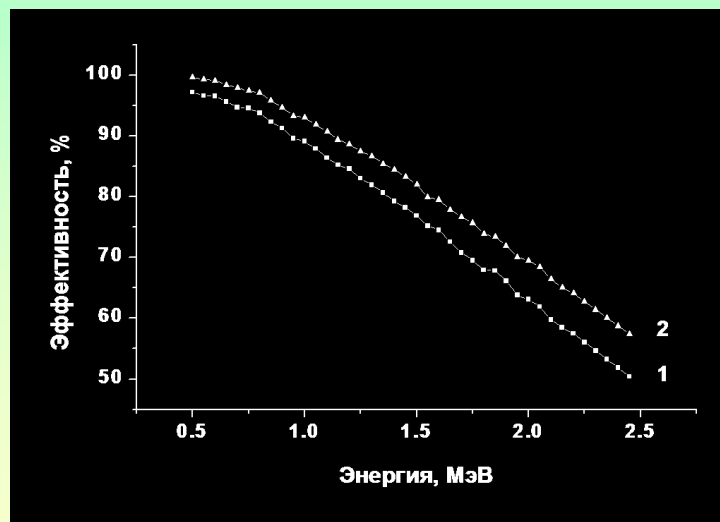


Форма совпадающих импульсов от двух ЗЧУ одного счётчика (ПС1 и ПС2), восстановленная по цифровой записи от ЦОС, и их сумма (ПС1 + ПС2)

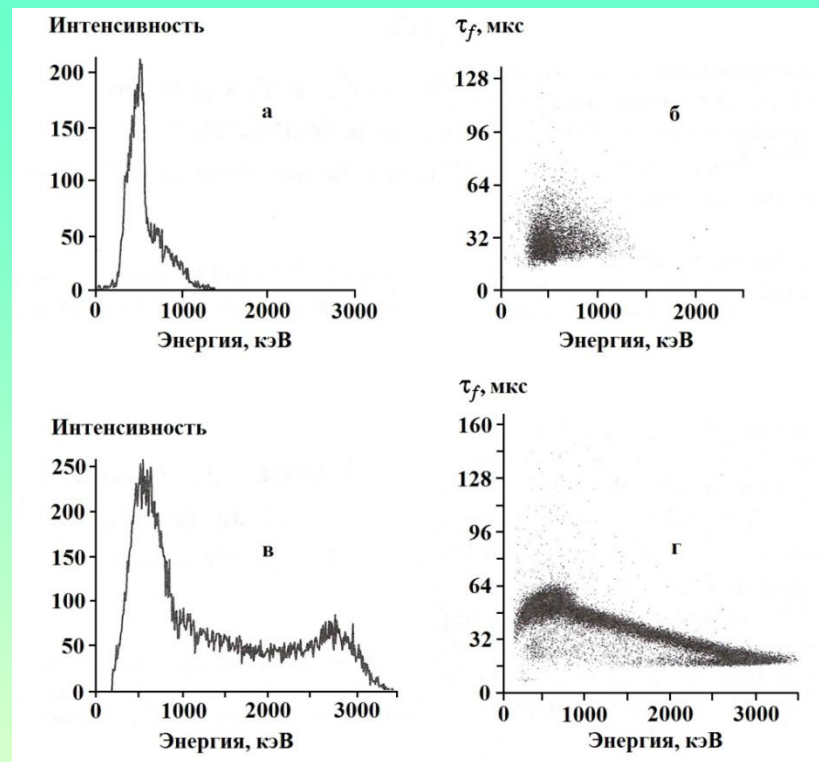
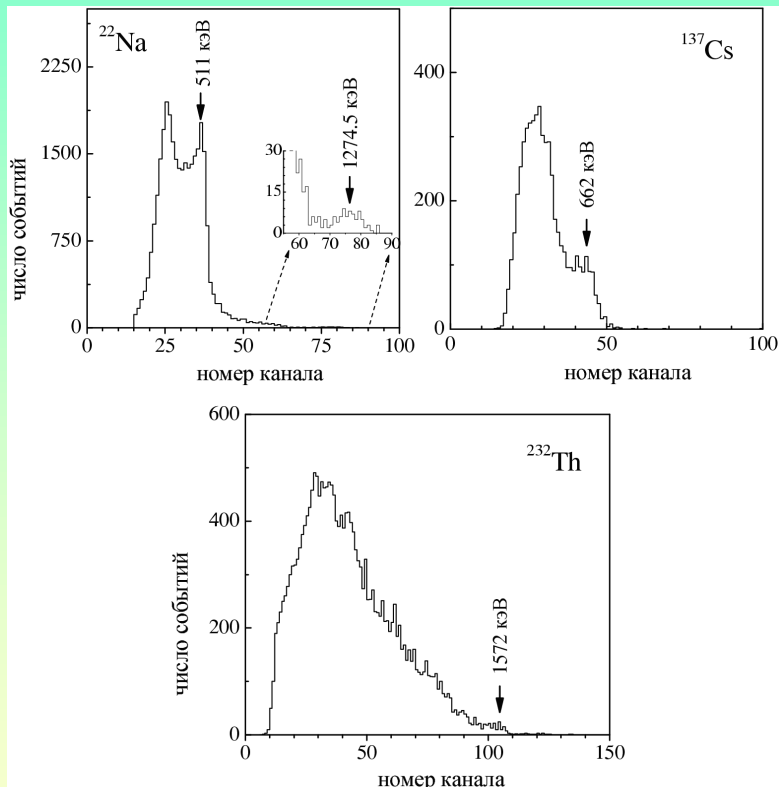


Амплитудные спектры (ПС1 + ПС2) источника ^{137}Cs (662 кэВ) - «а»: спектр (1) включает все события, спектр (2) – только события с $8 \text{ мкс} \leq \tau_\phi \leq 18 \text{ мкс}$.
Распределение интенсивности событий (плотность закрашивания) в плоскости координат $[E-t_\phi]$ - «б»

Дифференциальная эффективность регистрации событий $2\beta(2\nu)$ -распада ^{136}Xe .
Условия выхода электрона за пределы рабочей области: по радиусу: $R \geq 7.0 \text{ см}$; по длине: $Z \leq 0$ и $Z \geq 59.5 \text{ см}$. 1 – эффективность с учетом выхода электронов по R и Z; 2 – эффективность с учетом выхода электронов только по R.

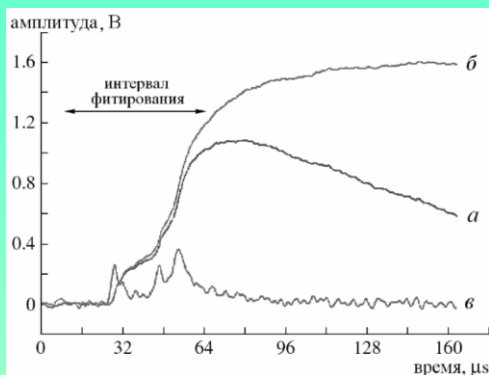


Калибровочные спектры: от ^{22}Na , ^{37}Cs и ^{232}Th

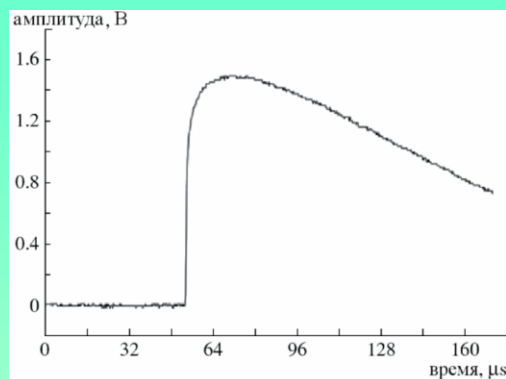


Амплитудный спектр и (A, τ_f) -распределение плотности событий от м.п.с. для калибровочного источника ^{22}Na («а» - амплитудный спектр; «б» - (A, τ_f) -распределение) и внутреннего радона («в» и «г» соотв.)

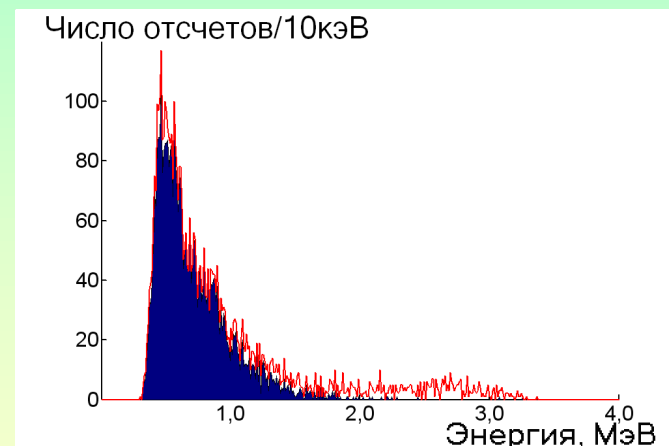
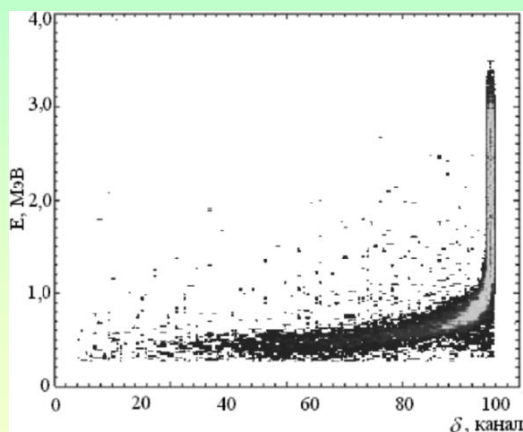
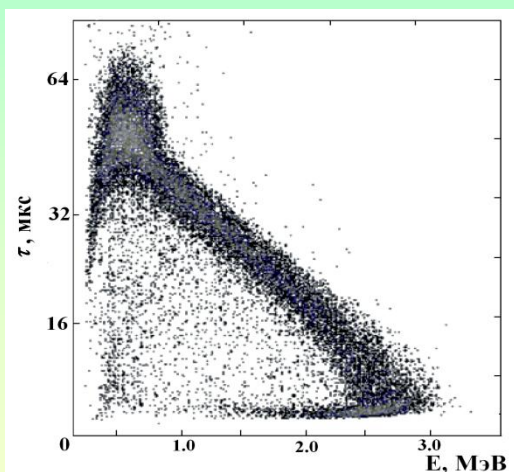
Импульс от электрона



Импульс от α -частицы



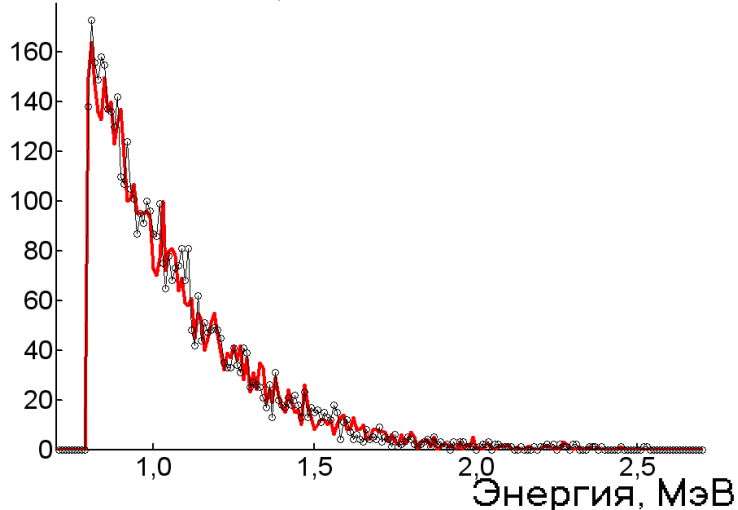
$$\delta_{\phi} = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_1^n (y_i - y_i^{\phi})^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \right)$$



$(E-\tau)$ и $(E-\delta_{\phi})$ -распределения для ^{222}Rn

Спектр фона МПС без отбора (линия) и с отбором (закрашенная область) по параметру $\delta < 100$

Число отсчетов/10кэВ



Спектры фоновых событий в МПС за 8000ч измерений (тонкая линия с кружками – суммарный спектр МПС при заполнении природным ксеноном; толстая линия с точками – суммарный спектр МПС при заполнении обогащённым ксеноном).

Эффект от $2\beta(0\nu)$ -распада в интервале энергией 2317÷2641кэВ :

$$N_{\beta} = (3+1+1+0) - (3+1+3+0) = 5-7 = -2 \pm 4.8$$

$$T_{1/2}(2\beta, 0\nu) \geq 3.1 \cdot 10^{23} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Количество событий с энергией 0.8÷2.48МэВ, зарегистрированных в МПС №1 и МПС №2 за 2000час.

№ серии	МПС №1	МПС №2
1	1681(^{136}Xe)	1108(нат Xe)
2	1734(нат Xe)	1182(^{136}Xe)
4	1316(нат Xe)	783(^{136}Xe)
5	1204(^{136}Xe)	756(нат Xe)

Эффект от $2\beta(2\nu)$ -распада ^{136}Xe :

$$N_{\beta} = (1681+1204+1182+783) - (1734+1316+1108+756) = 4850 - 4914 = -64 \pm 99 (\text{стат.}) \pm 23 (\text{сист.})$$

В стандартных ошибках эффект равен $(-0.63 \cdot \sigma_{\text{полн}})$.

В соответствии с рекомендациями PARTICLE DATA GROUP получим:

$$T_{1/2}(2\beta, 2\nu) \geq (\ln 2 \cdot t \cdot N_{\text{Xe-136}} \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2) / (1.08 \cdot \sigma_{\text{полн}}) =$$

$$= 0.693 \cdot 0.913 \cdot 3.21 \cdot 10^{24} \cdot 0.467 \cdot 0.993 / (1.08 \cdot 102) =$$

$$= 8.5 \cdot 10^{21} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Сравнительная таблица результатов основных экспериментов по поиску 2β -распада ^{136}Xe .

Эксперимент	$2\beta(2\nu)$	$2\beta(0\nu)$
Гран Сассо (МБПС)	$T_{1/2} \geq 1.6 \cdot 10^{20}$ лет (95% у.д.)	$T_{1/2} \geq 1.2 \cdot 10^{22}$ лет (95% у.д.)
GOTTARD (TRC)	$T_{1/2} \geq 3.6 \cdot 10^{20}$ лет (90% у.д.)	$T_{1/2} \geq 4.4 \cdot 10^{23}$ лет (90% у.д.)
ИЯИ РАН БНО (МБПС) 1999 г.	$T_{1/2} \geq 8.1 \cdot 10^{20}$ лет (90% у.д.)	-----
DAMA/LXe	$T_{1/2} \geq 1.0 \cdot 10^{22}$ лет (90% у.д.)	$T_{1/2} \geq 1.2 \cdot 10^{24}$ лет (90% у.д.)
Данная работа (МПС)	$T_{1/2} \geq 8.5 \cdot 10^{21}$ лет (90% у.д.)	$T_{1/2} \geq 3.1 \cdot 10^{23}$ лет (90% у.д.)

Эксперименты по поиску $2\beta^{+-}$, $e_K\beta^{+-}$ и $e_K e_K$ -процессов в ^{78}Kr и ^{124}Xe

Ряд чётно-чётных ядер может распадаться путём $2\beta^{+-}$ -распада. Одновременно эти ядра подвержены распаду через захват одного орбитального электрона (e_b) с испусканием позитрона (электрон-позитронная конверсия: $e_b\beta^{+-}$ - процесс) и захват двух орбитальных электронов (двойной электронный захват: $2e_b$ - захват):

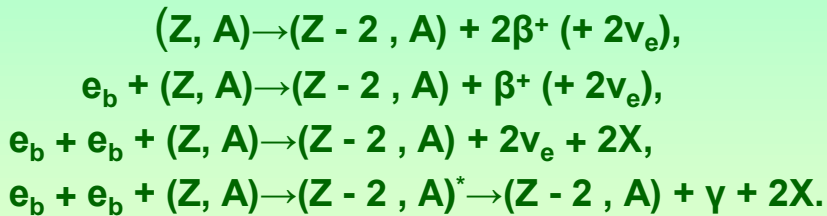


Таблица 19. Периоды полураспада изотопов ^{78}Kr и ^{124}Xe относительно $(2\nu 2e_b)$ -захвата, полученные по различным моделям.

Изотоп	Процесс	$T_{1/2}$, лет (модель)		
		pp-QRPA [247]	MCM [250]	[268]
^{78}Kr	$(2\nu 2e_b)$ -захват	$3,7 \cdot 10^{22}$	-	$6,2 \cdot 10^{23}$
	$(2\nu 2K)$ -захват	$4,7 \cdot 10^{22}$	$3,7 \cdot 10^{21}$	$7,9 \cdot 10^{23}$
^{124}Xe	$(2\nu 2e_b)$ -захват	$2,9 \cdot 10^{21}$	-	$7,0 \cdot 10^{21}$
	$(2\nu 2K)$ -захват	$3,8 \cdot 10^{21}$	$3,9 \cdot 10^{23}$	$9,1 \cdot 10^{21}$

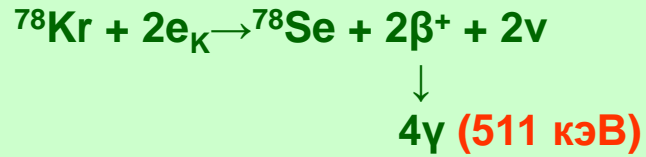
Расчёты $T_{1/2}(2\nu, 2e_b)$ по разным моделям

Таблица 16. Характеристики изотопов, испытывающих $2\beta^{+-}$ -распад. Расчётные и экспериментальные величины периодов полураспада относительно двухнейтринной моды $2\beta^{+-}$, $e_b\beta^{+-}$ и $2e_b$ -процессов.

$Z^A X \rightarrow Z^A Y$ ΔM_A , кэВ Изотопн. содерж., %	$(2\nu)2\beta^{+-}$ -распад $T_{1/2}$, лет		$(2\nu)e_b\beta^{+-}$ -конверсия $T_{1/2}$, лет		$(2\nu)2e_b$ -захват $T_{1/2}$, лет	
	Теория	Экспер.	Теория	Экспер.	Теория	Экспер.
$^{36}_{78}\text{Kr} \rightarrow ^{34}_{78}\text{Se}$ 2866(7), кэВ 0,35%	$2,3 \cdot 10^{26}$ $7,1 \cdot 10^{27}$	$(0\nu + 2\nu)$ $\geq 2,0 \cdot 10^{21}$	$6,2 \cdot 10^{21}$ $1,0 \cdot 10^{24}$	$\geq 1,1 \cdot 10^{20}$	$3,7 \cdot 10^{21} -$ $6,2 \cdot 10^{23}$	$\geq 2,0 \cdot 10^{21}$
$^{44}_{96}\text{Ru} \rightarrow ^{42}_{96}\text{Mo}$ 2719(8) 5,54	$5,8 \cdot 10^{26}$	$(0\nu + 2\nu)$ $\geq 3,1 \cdot 10^{16}$	$8,6 \cdot 10^{22}$	$(0\nu + 2\nu)$ $\geq 6,7 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^{22}$	-
$^{48}_{106}\text{Cd} \rightarrow ^{46}_{106}\text{Pd}$ 2771(8) 1,25	$4,2 \cdot 10^{26}$ $3,3 \cdot 10^{25} -$ $1,8 \cdot 10^{27}$	$(0\nu + 2\nu)$ $\geq 2,4 \cdot 10^{20}$	$8,3 \cdot 10^{20} -$ $4,4 \cdot 10^{22}$	$\geq 4,1 \cdot 10^{20}$	$1,0 \cdot 10^{20} -$ $5,5 \cdot 10^{21}$	$(2K); \geq 3,0 \cdot 10^{20}$
$^{54}_{124}\text{Xe} \rightarrow ^{52}_{124}\text{Te}$ 2865,6(2,2) 0,096	$1,4 \cdot 10^{27}$	$\geq 2,0 \cdot 10^{14}$	$8,2 \cdot 10^{22}$ $2,3 \cdot 10^{24}$	$(K\beta^+)$ $\geq 4,8 \cdot 10^{16}$	$7,0 \cdot 10^{21}$ $3,9 \cdot 10^{23}$	$(2K); \geq 1,1 \cdot 10^{17}$
$^{56}_{130}\text{Ba} \rightarrow ^{54}_{130}\text{Xe}$ 2611(7) 0,106	$1,7 \cdot 10^{29}$	\rightarrow	$2,2 \cdot 10^{23}$ $3,1 \cdot 10^{24}$	\rightarrow	$7,5 \cdot 10^{21}$ $4,7 \cdot 10^{23}$	$\rightarrow \Sigma$ все моды $(2,2 \pm 0,5) \cdot 10^{21}$ (геохим. экс.)
$^{58}_{136}\text{Ce} \rightarrow ^{56}_{136}\text{Ba}$ 2400(50) 0,185	$5,2 \cdot 10^{31}$	$\geq 1,8 \cdot 10^{16}$	$6,0 \cdot 10^{23}$	$\geq 1,8 \cdot 10^{13}$	$(3,2-5,1) \cdot 10^{21}$ $9,6 \cdot 10^{23}$	$(2K); \geq 7,0 \cdot 10^{13}$

Изотопы, испытывающие $2\beta^{+-}$ -распад

Установка с цилиндрической ионизационной камерой для исследования $2\beta^+$ - и $e_K \beta^+$ -процессов в ^{78}Kr



Камера имеет полезный объём 1,33 л.
Рабочий газ - криптон (94,1 % ^{78}Kr).
При 25 атм в объёме камеры 35,3 л
($1,024 \cdot 10^{24}$ атомов ^{78}Kr) + 0,2% H_2 .

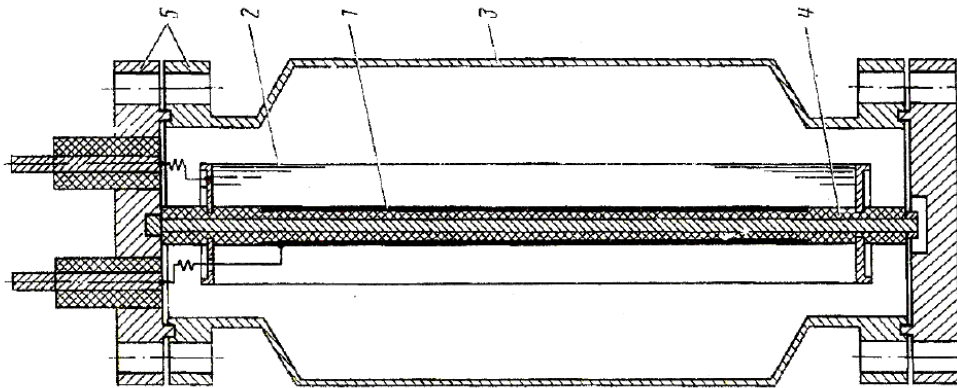
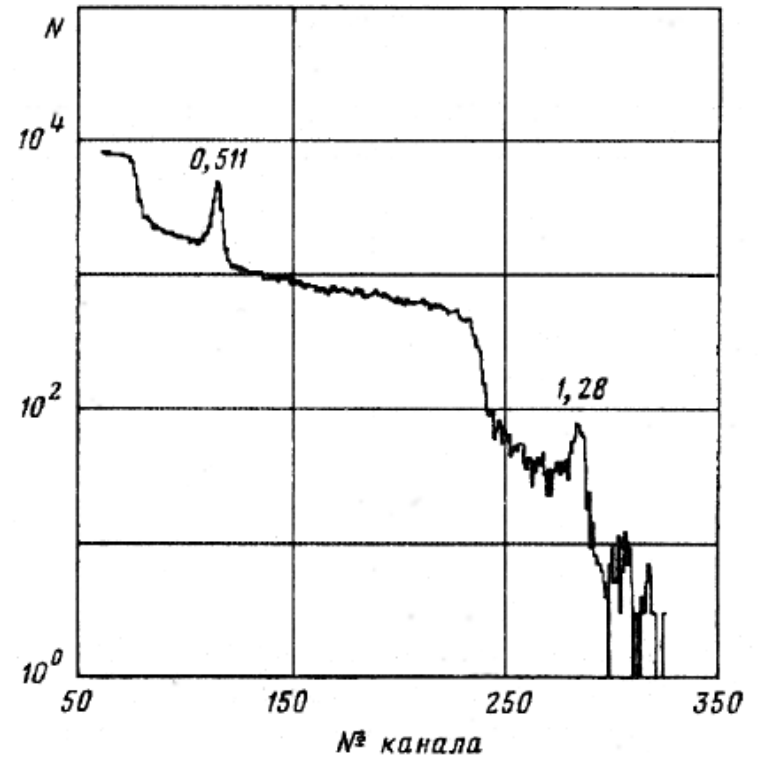
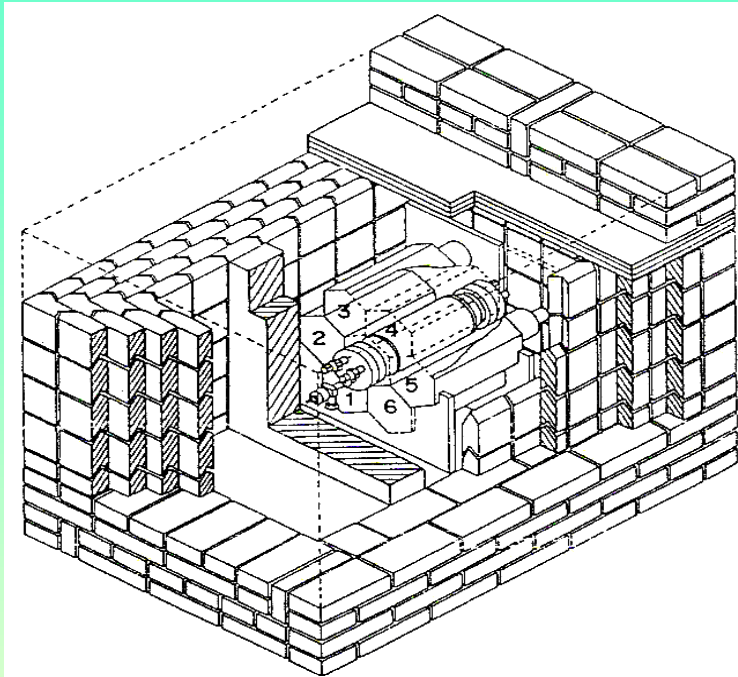


Рис. 5.1. Конструкция цилиндрической ионизационной камеры высокого давления. 1 – анод, 2 – сетка, 3 – катод (корпус), 4 – кварцевые изоляторы, 5 – фланцы.



Спектр импульсов от камеры при калибровке γ -квантами источника ^{22}Na . Энергетическое разрешение камеры составило 3,8% по линии 511 кэВ (^{22}Na); 2,4% по линии 1275 кэВ (^{22}Na) и 2,1% по линии 1840 кэВ (^{88}Y). Фон ^{85}Kr – измеренная величина ($0,206^{+0,001}_{-0,004}$) Бк / л, что в ~ 4000 раз ниже, чем в атмосферном криптоне

Экспериментальная установка



$K\beta^+$ -распад ^{78}Kr : события в окне 511 ± 27 кэВ для двух детекторов $\text{NaI}(\text{Ti})$ и в окне 1844 ± 200 кэВ для ионизационной камеры.

$$T_{1/2} (K\beta^+)_{0\nu} \geq 5,1 \cdot 10^{21} \text{ лет (68\% у.д.).}$$

2ν -мода: события с $E \geq 500$ кэВ (190 событий)

$$T_{1/2} (K\beta^+)_{2\nu} \geq 1,1 \cdot 10^{20} \text{ лет (68\% у.д.).}$$

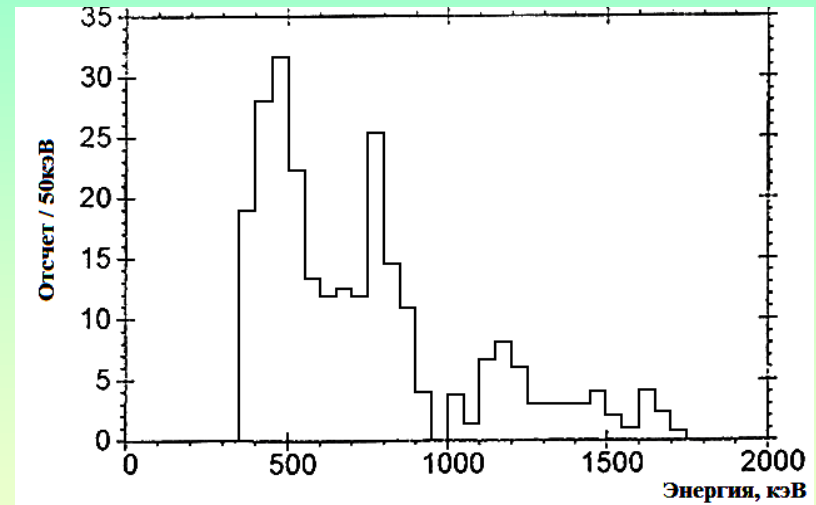
$2\beta^+$ -распад: события с четырьмя аннигиляционными γ -квантами. Их количество **0**.

$$T_{1/2} (2\beta^+)_{0\nu + 2\nu} \geq 2,0 \cdot 10^{21} \text{ лет (68\% у.д.).}$$

Эксперимент проводился в подземной низкофоновой лаборатории на глубине 675 м в.э. (г. Канфранк, Испания). Н.ф. защита – свинец 20 см

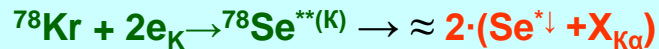
Результаты измерений

На рис. 5.5 приведён спектр импульсов ионизационной камеры, отобранный по условию совпадения с двумя γ -квантами 511 кэВ из спектра фона, накопленного за 4434,5 ч.



Спектр импульсов ионизационной камеры, совпадающий с импульсами от γ -квантов 511 кэВ в двух детекторах $\text{NaI}(\text{Ti})$. Время набора 4434,5 час.

Установка с бесстеночным пропорциональным счётчиком для исследования 2К – захвата в ^{78}Kr и ^{124}Xe



$$K_{ab} = 12.65 \text{ кэВ}, \quad 2K_{ab} = 25.3 \text{ кэВ}$$

$$K_{\alpha 1} = 11.22 \text{ кэВ} \quad (1.00)$$

$$K_{\alpha 2} = 11.18 \text{ кэВ} \quad (0.52)$$

$$K_{\beta 1} = 12.49 \text{ кэВ} \quad (0.21)$$

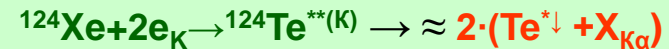
$$K_{\beta 2} = 12.65 \text{ кэВ} \quad (0.01)$$

$$\omega_K = 0.596 (x\text{-ray}), \quad \omega_e = 0.404 (e\text{-Auger})$$

$$P(2e_a) = 0.163 \quad P(e_a K) = 0.482$$

$$P(KK) = 0.355$$

Энергии и относительные интенсивности характеристических линий К-серии



$$K_{ab} = 31.81 \text{ кэВ}, \quad 2K_{ab} = 63.6 \text{ кэВ}$$

$$K_{\alpha 1} = 27.47 \text{ кэВ} \quad (1.00)$$

$$K_{\alpha 2} = 27.20 \text{ кэВ} \quad (0.53)$$

$$K_{\beta 1} = 30.99 \text{ кэВ} \quad (0.31)$$

$$K_{\beta 2} = 31.70 \text{ кэВ} \quad (0.074)$$

$$\omega_K = 0.857 (x\text{-ray}), \quad \omega_e = 0.143 (e\text{-Auger})$$

$$P(2e_a) = 0.020 \quad P(e_a K) = 0.246 \quad P(KK) = 0.734$$

Предмет поиска – «многоточечные» события от поглощения в газе двух фотонов и остаточного возбуждения дочернего атома (каскад оже-электронов).

Методика поиска - Если точки пространственно разделены в проекции на радиус ПС, то событие будет состоять из «пачки» отдельных импульсов тока. Регистрируются амплитуды

импульсов при 1) $\tau_{\text{И}} = \tau_{\text{Д}} = 26 \text{ мкс}$ (энергия – ПС1, ПС2) и

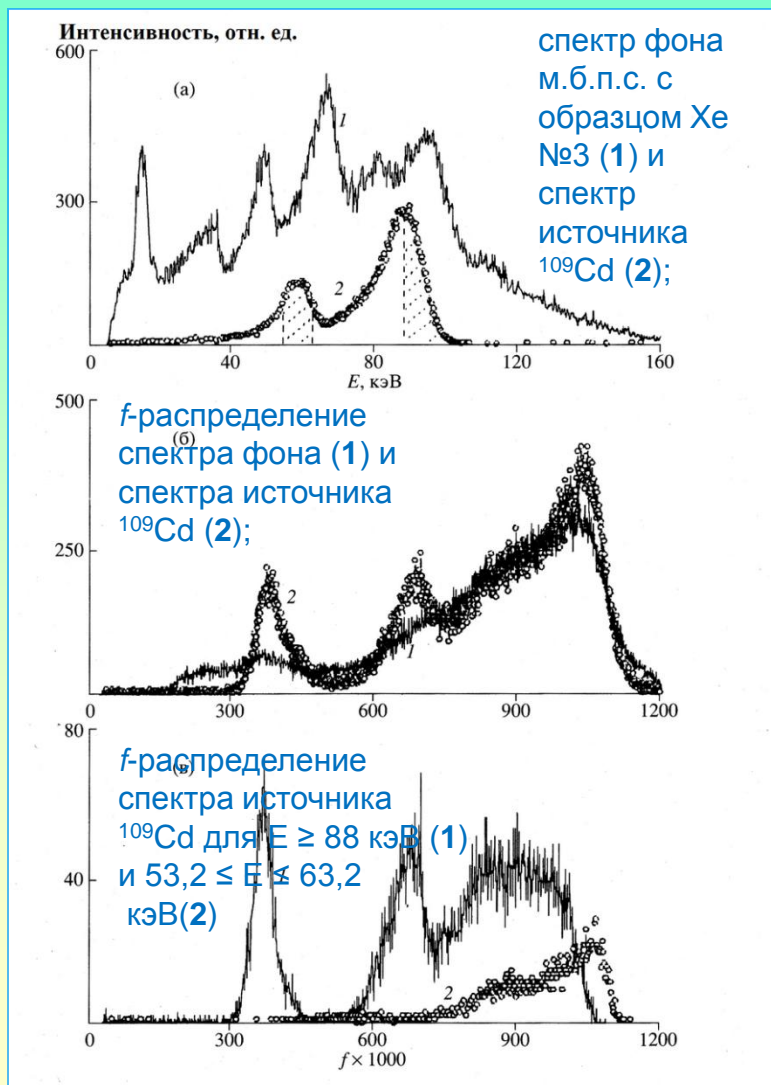
2) $\tau_{\text{И}} = \tau_{\text{Д}} = 1.5 \text{ мкс}$ (фронт – П12)

$$\beta = \text{ПС1} / (\text{ПС1} + \text{ПС2}),$$

$$f = \text{П12} / (\text{ПС1} + \text{ПС2})$$

Результаты измерений для ^{124}Xe

Использованы образцы ксенона №2 (0% ^{124}Xe) и №3 (<0.001% ^{124}Xe) (Табл.12) и образец промышленного ксенона (0.096% ^{124}Xe) с примесью атмосферного криптона (1.4 ppm). Давление 4.8 ат. (4.65 атм). Время измерения составило 1001.3 ч; 979.9 ч и 652.6 ч.



В пике вылета в область $f = 8,68 / 36,15 = 0,240$ попадает 4,3% событий T1 и 2,0% событий T2 от полного числа 2К-захватов ^{124}Xe в ц.с. Эта область f оказалась наиболее подходящей для поиска 2К-захвата ^{124}Xe . Область с центром $E = 63,62$ кэВ и $f = 0,432$ оказалась малоприспособной для поиска рассматриваемого эффекта, так как один из фоновых пиков имел похожие параметры.

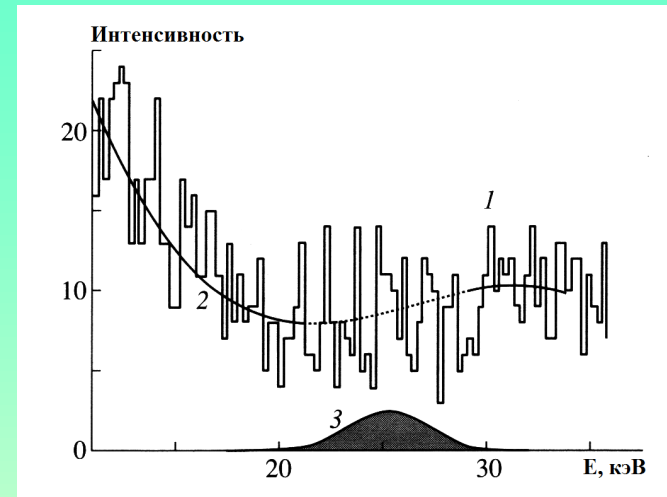
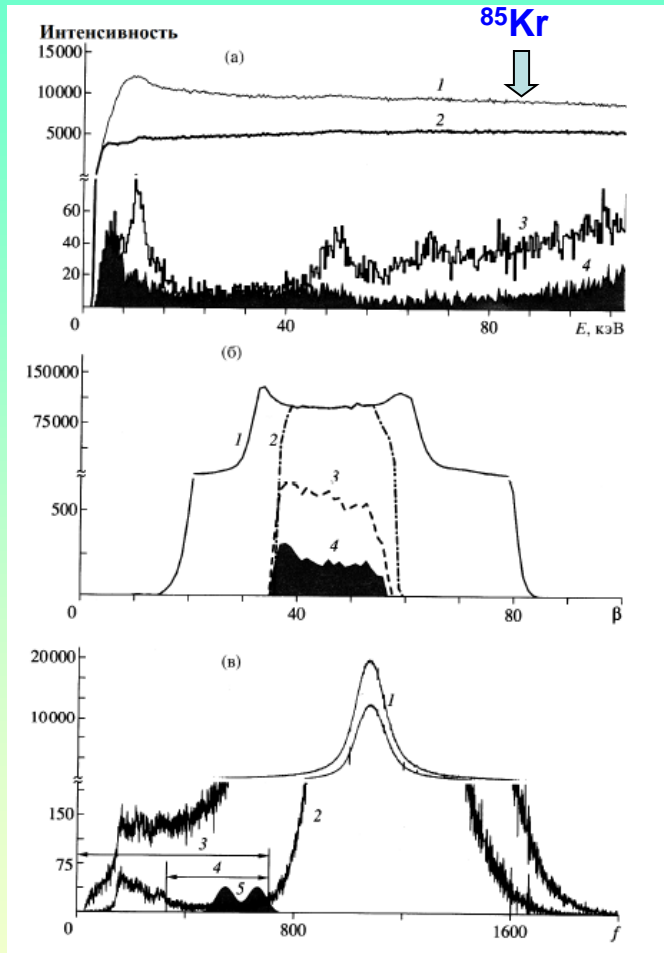
Теоретической величине $f = 0,240 \pm 1,96\sigma$ (95% выбранных событий) соответствует область $f \cdot 1000 = 320 \pm 65$. В интервал энергий $36,15 \pm 3,31$ кэВ (95% выбранных событий) для этой области f в суммарной серии измерений с образцами №2 и №3 и в серии с образцом атмосферного ксенона попало соответственно 59 и 17 событий (T1 + T2), что даёт скорости счёта $n_1 = 261 \pm 48$ год $^{-1}$ и $n_2 = 228 \pm 55$ год $^{-1}$. Разность $n_2 - n_1 = -33 \pm 73$ год $^{-1}$. Поскольку результат не превышает стандартной ошибки, последнюю можно взять в качестве верхнего предела скорости счёта. Тогда с учётом эффективности регистрации и содержания ^{124}Xe в образцах для этого изотопа можно найти

$$T_{1/2}(0\nu+2\nu,2\text{K}) \geq 1,9 \cdot 10^{17} \text{ лет (68\% у.д.)}$$

Чувствительность установки за один год измерений с образцом ксенона, обогащённым по ^{124}Xe до 100%, при данных параметрах отбора достигает $S = 9,5 \cdot 10^{20}$ лет (68% у.д.).

Результаты измерений для ^{78}Kr

Использован образец криптона с 94% ^{78}Kr при давлении 4,8 ат



Отобранный спектр фона (1);
 аппроксимационная кривая (2);
 вид спектра от ожидаемого эффекта (3).

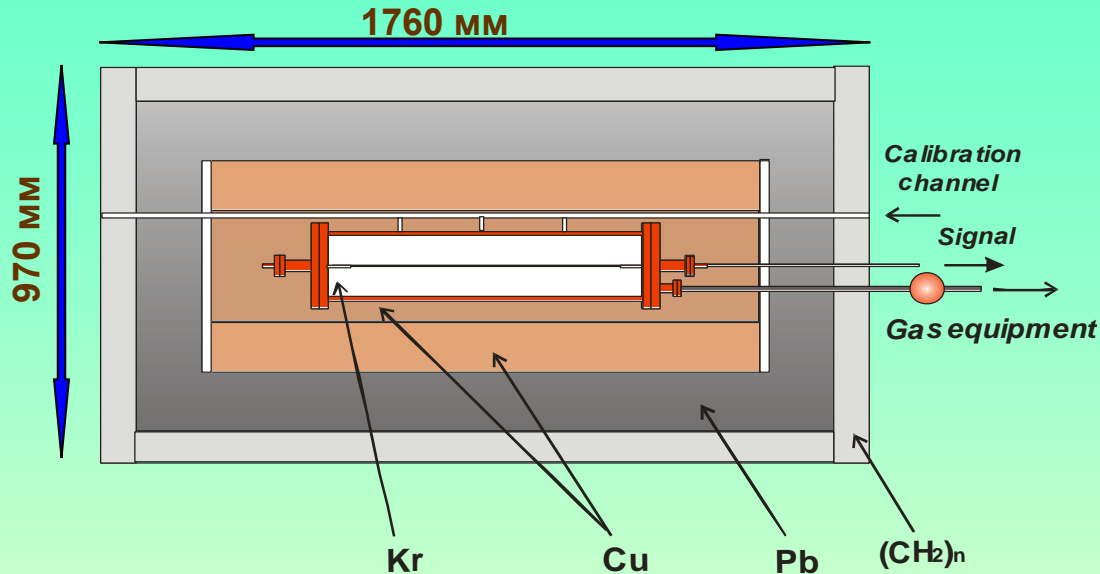
В интервал 25.3 ± 3.8 кэВ (95 % событий) попало 262 события. Фон в области пика - 266 событий.

$$\varepsilon = 0.22; L_s = 0.6 \cdot L_p.$$

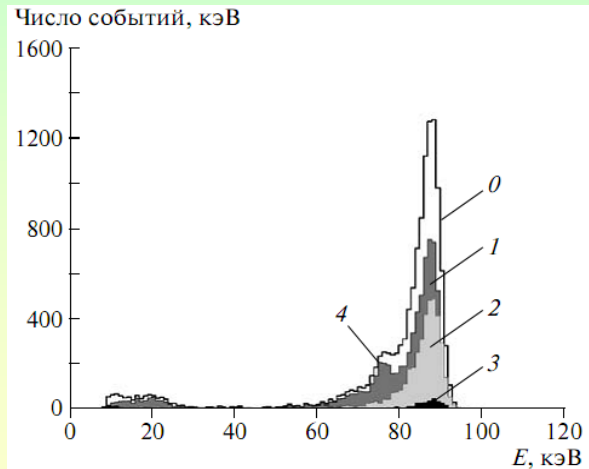
$T_{1/2} (0\nu+2\nu, 2K) \geq 2.3 \cdot 10^{20}$ лет (90% у.д.).

а – спектры фона событий T1 за 1817 ч;
 б – f-распределения; в – β -распределения: (1) $1 \leq \beta \cdot 100 \leq 100$, $1 \leq f \cdot 1000 \leq 2000$; (2) $36 \leq \beta \cdot 100 \leq 58$, $1 \leq f \cdot 1000 \leq 2000$; (3) $36 \leq \beta \cdot 100 \leq 58$, $1 \leq f \cdot 1000 \leq 710$; (4) $36 \leq \beta \cdot 100 \leq 58$, $330 \leq f \cdot 1000 \leq 710$;
 (5) ожидаемое f-распределение от 2K-захвата ^{78}Kr

Установка с медным пропорциональным счётчиком высокого давления для исследования 2К – захвата в ^{78}Kr и ^{124}Xe .

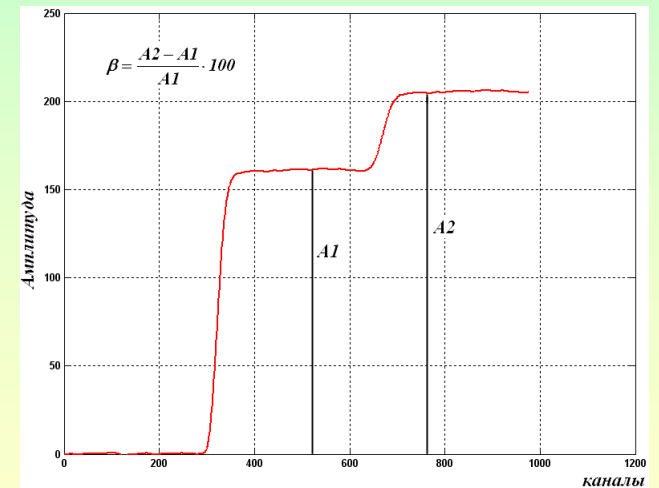
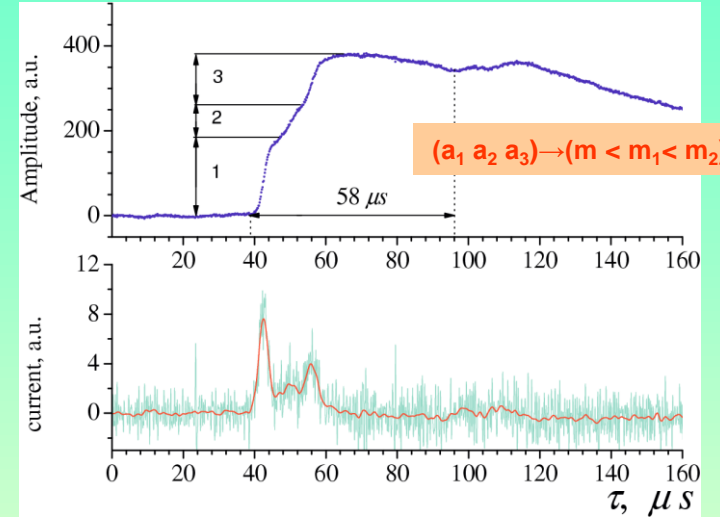


Защита: 15 см Pb + 8 см б.п. + 18 см Cu

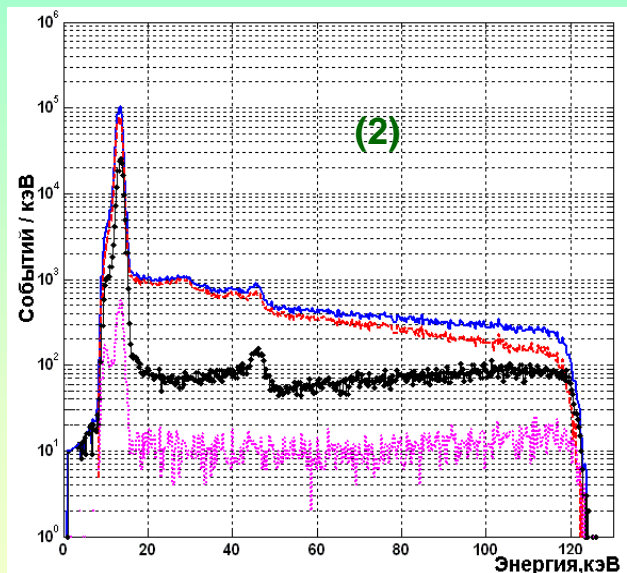
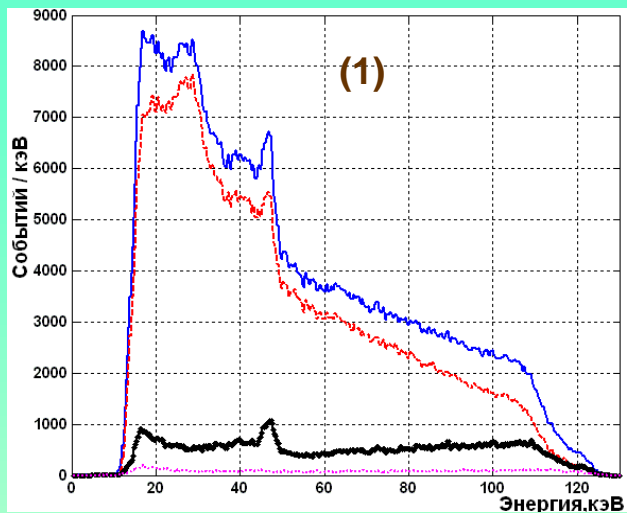


Спектр импульсов всех событий от источника ^{109}Cd (0), одно-точечная (1), двух-точечная (2) и трёх-точечная (3) компоненты. (4) – пик вылета линии 88 кэВ.

Пример реального импульса



Восстановленный импульс

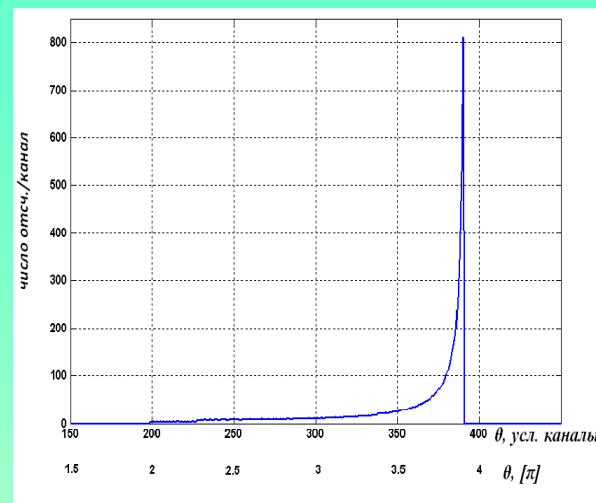


(1).

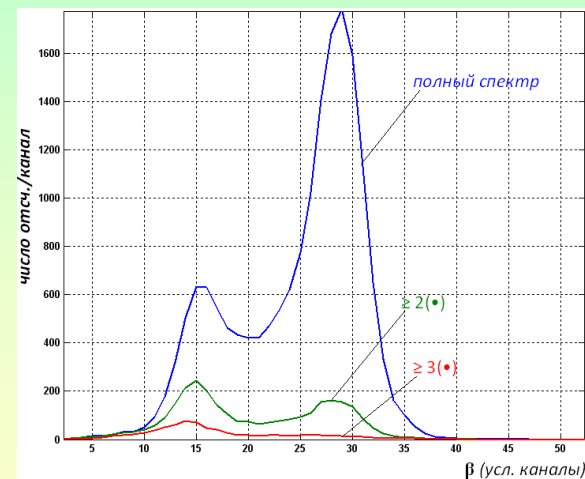
Фон м.п.с. с образцом Кг за 6700 час.
 Фон м.п.с. с естественным криптоном за

1000 час. (2).

(-) – все события; (--) – одно-точечные события; (*) – двух-точечные события; (...) – трёх-точечные события.

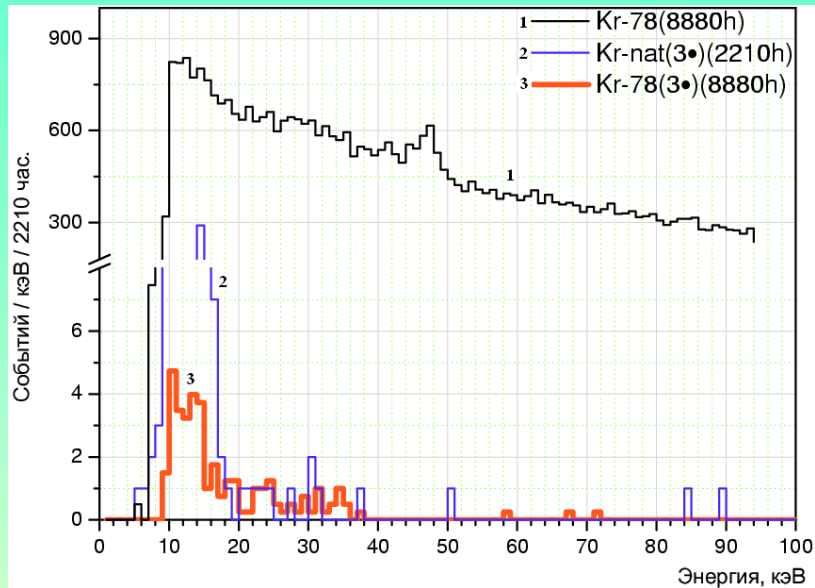


Плотность распределения величины телесного угла, под которым видна внутренняя поверхность катода из точек, равномерно распределенных по длине анодной нити.



Распределение по параметру β событий разной кратности для криптона, обогащенного по $^{78}\text{Kг}$.

Результаты измерений



1 - полный спектр фона м.п.с. с ^{78}Kr ;
2 - спектр трёх-точечных событий в $^{\text{nat}}\text{Kr}$;
3 - спектр трёх-точечных событий в ^{78}Kr .

События спектров 2 и 3 отобраны по условиям
 $2.0 \text{ кэВ} \leq m \leq 6.0 \text{ кэВ}$; $m1/m2 \geq 0.6$; $\beta > 22$

$$N_3 = (11.8 \pm 5.2) \text{ год}^{-1} = 2.3\sigma \leq 3\sigma \rightarrow$$

$$\rightarrow N_3 \leq (11.8 + 2 \cdot 5.2) = 22.2 \text{ (95\% у.д.)}$$

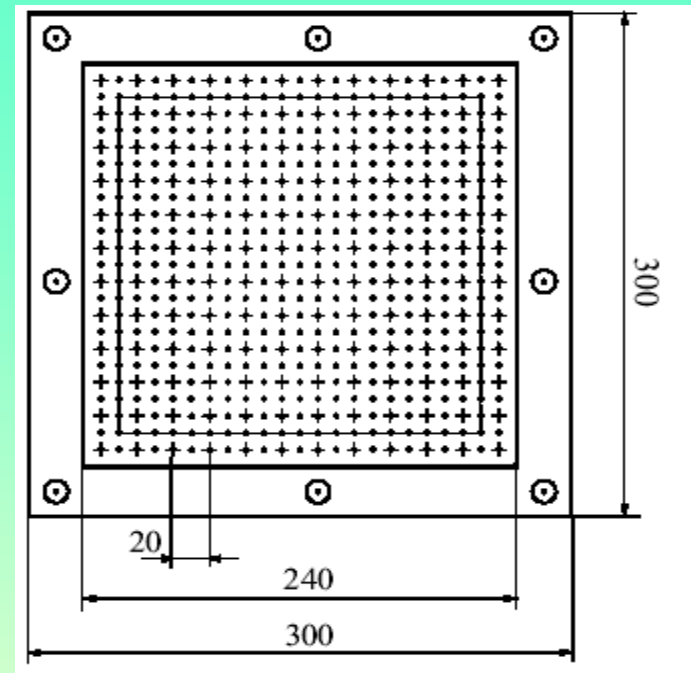
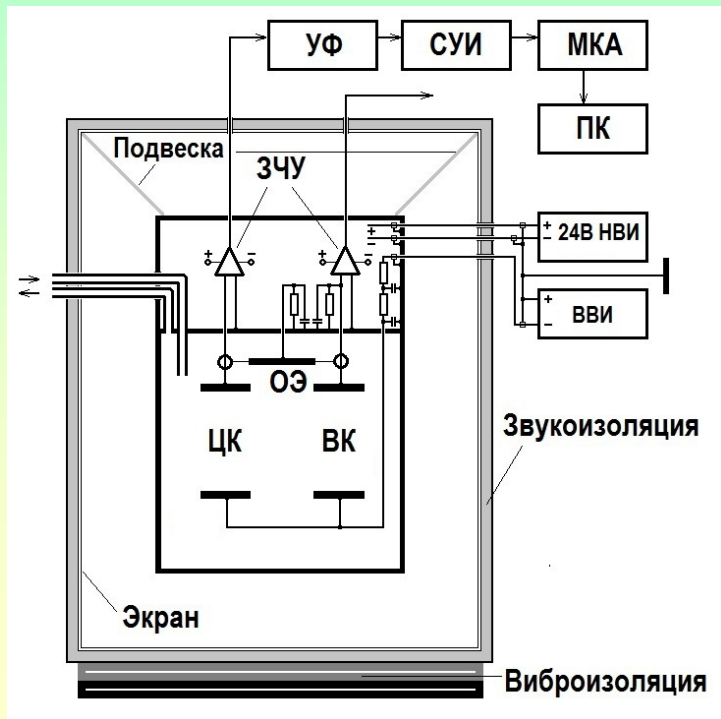
$$T_{1/2}(0\nu+2\nu, 2K) \geq 3.4 \cdot 10^{21} \text{ лет (95\% у.д.)}$$

Импульсные ионные ионизационные камеры

Прямая регистрация α -частиц от распадов ^{222}Rn возможна только импульсной ионной камерой с воздушным наполнением.

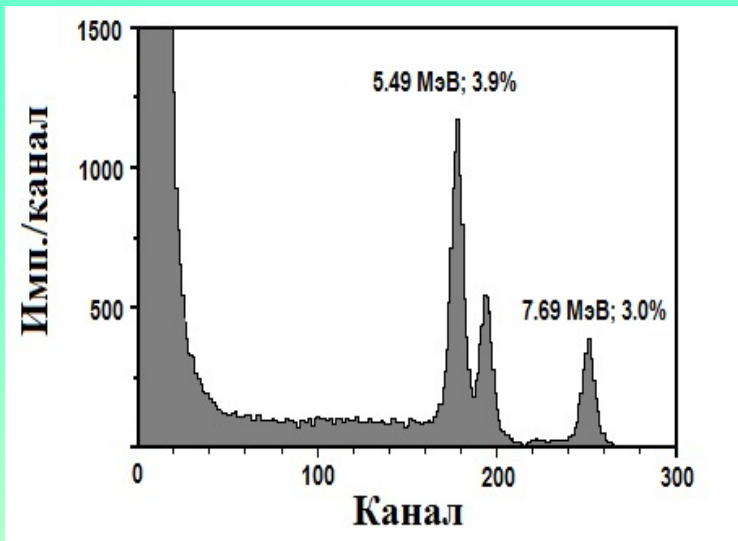
Импульсная ионная ионизационная камера для прямой регистрации содержания радона и торона в воздухе

Расчётное время дрейфа отрицательного иона кислорода в аксиальном электрическом поле от поверхности катода радиусом 10 мм на анодную нить диаметром 0,05 мм, находящуюся под потенциалом 1000 В, равно 3,8 мс.



Поперечное сечение импульсной ионной ионизационной камеры: (·) – катодные нити; (+) – анодные нити; (---) – граница между центральной (16,8 л) и пристеночной (8 л) камерами.

Схема включения ВИИИК: ЗЧУ – зарядочувствительный предусилитель; УФ – усилитель - формирователь; СУИ – схема укорачивания импульсов; МКА – многоканальный анализатор амплитуд импульсов; ПК – персональный компьютер; НВИ – низковольтный источник питания; ВВИ – высоковольтный источник питания; ЦК - центральная камера; ВК – вспомогательная защитная камера; ОЭ – охранные электроды; Экран – экран из пермаллоя; Подвеска – эластичная подвеска; Виброизоляция; Звукоизоляция.

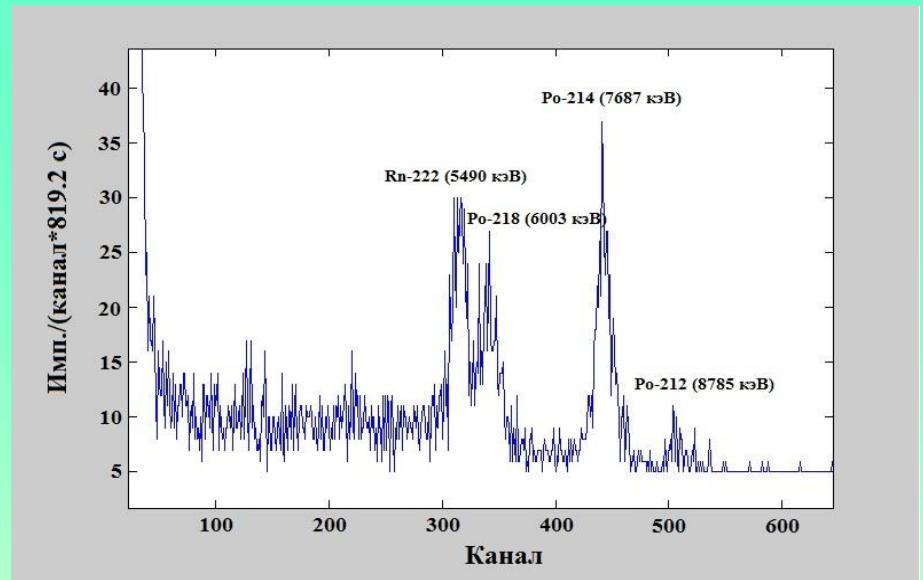


Спектр α -частиц распада радона и его д.п.р. ВИИИК подвешена на эластичных растяжках из трубчатой силиконовой резины внутри ящика, обшито звукопоглощающими материалами и установлено на амортизаторы + фиксация нитей на поверхности изоляторов парафином + пермалоевый магнитный экран

Измерения содержания радона в наземной лаборатории

Чувствительность ВИИИК стат. точность не хуже 10% за 10^3 с при измерениях о.а. радона 10 Бк/м³.

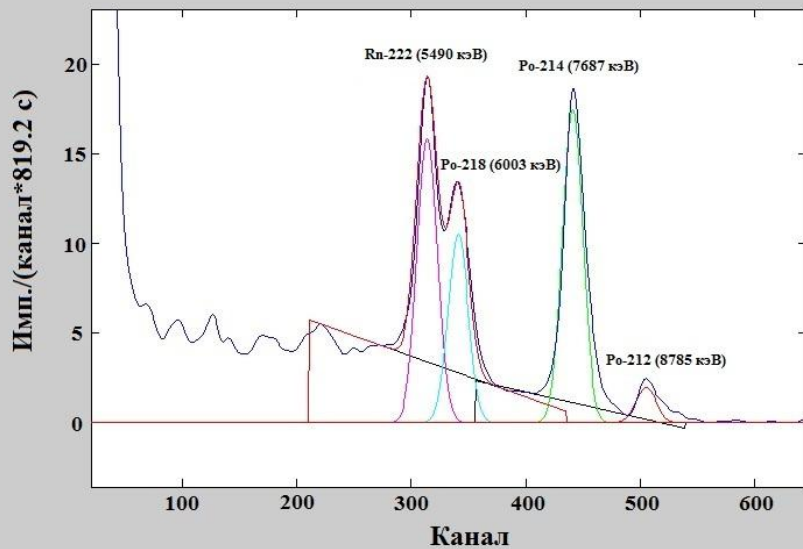
Блок автоматической продувки: 1) включение и выход воздуходувки на режим – 30 с; 2) продувка ВИИИК – 180 с; 3) выключение, выдержка паузы – 120 с; 4) измерение с набором спектра в МКА – 819.2 с; 5) передача информации из МКА в память ПК - 75 с.



Пример спектра, накопленного за 819.2 с, при измерении с помощью ВИИИК содержания радона в воздухе наземного лабораторного помещения.

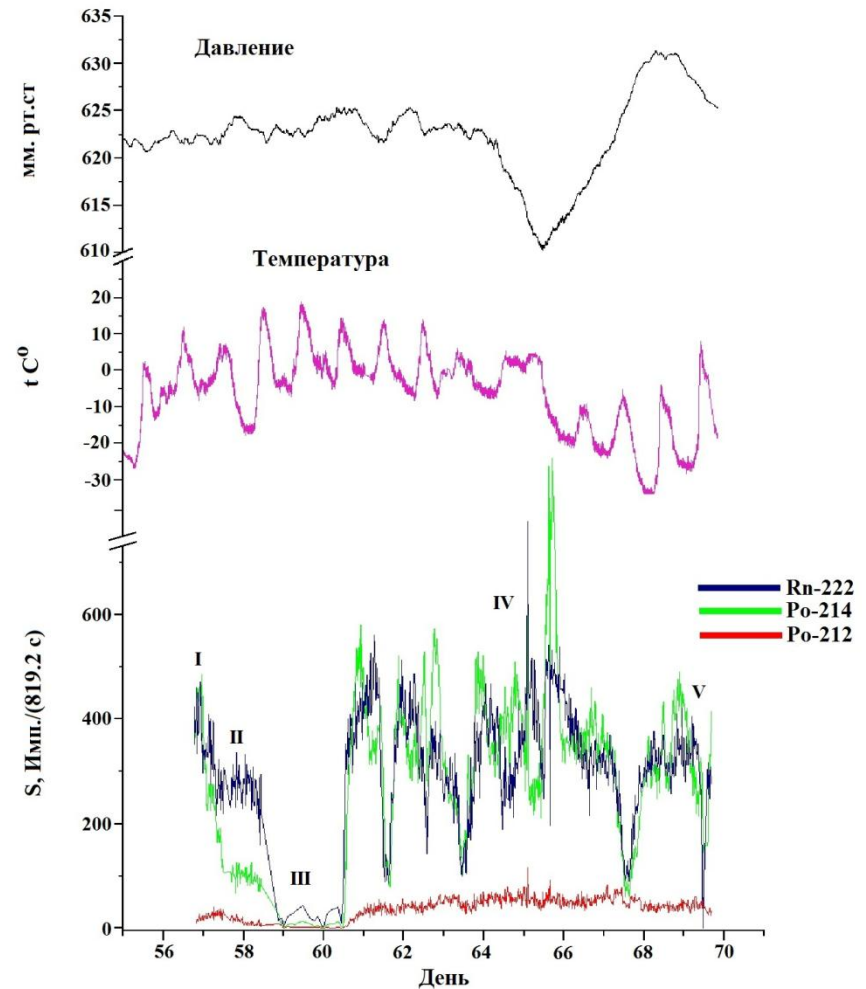
Площадь пика 5,49 МэВ (S) и объемная активность радона (A, Бк/м³) при атмосферном давлении 620 мм.рт.ст. связаны соотношением

$$A = 0,091 S$$



Сглаженный спектр α -частиц с наложенными на него гауссианами.

Среднее содержание радона в воздухе лабораторного помещения оказалось равным ~ 35 Бк/м³



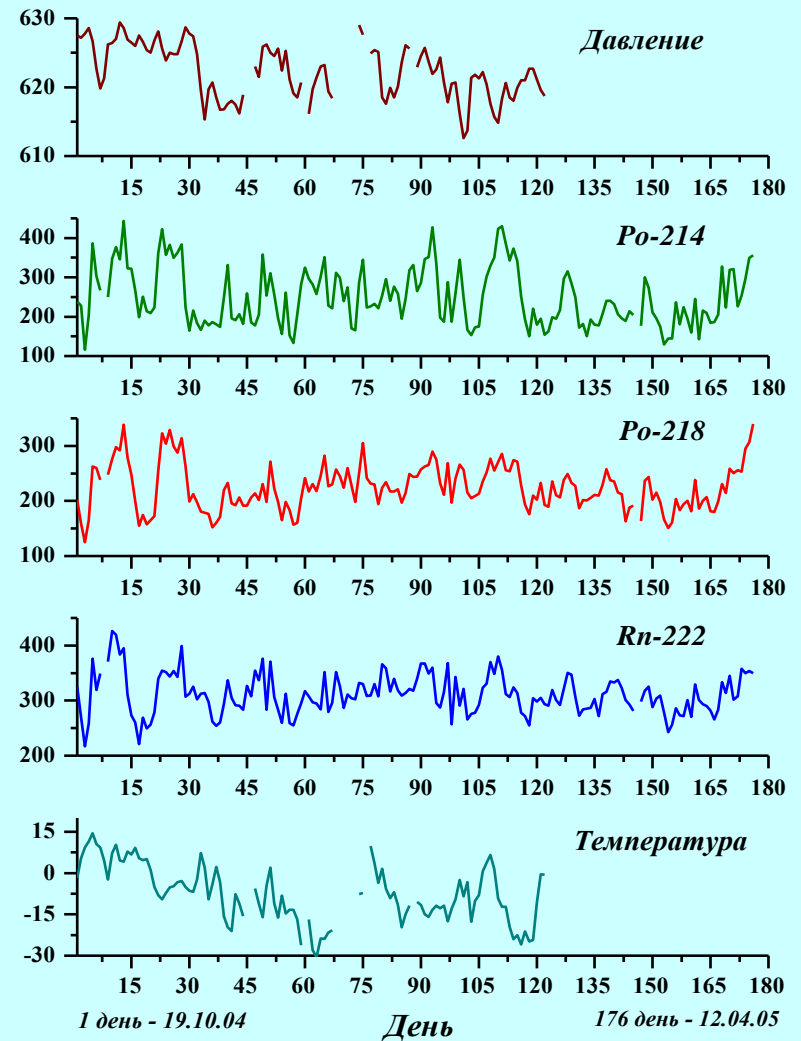
Изменения активности радона (S – площадь соответствующего α -пика), ^{214}Po и ^{212}Po в воздухе в период с 26 февраля по 9 марта 2004 г. Вариации атмосферного давления и температуры за этот же период.

Измерения содержания радона в подземной лаборатории

В радоновых данных заметна примесь периодической компоненты с периодом ~27 дней, связанная с приливными эффектами от вращения Луны вокруг Земли.

Средняя объемная активность радона в воздухе в зимний период составила ~29 Бк/м³. С наступлением теплого времени года активность начала повышаться (в летний период она составила ~42 Бк/м³).

Данные, усредненные за сутки и приведенные к одному 20^{ти} минутному интервалу.

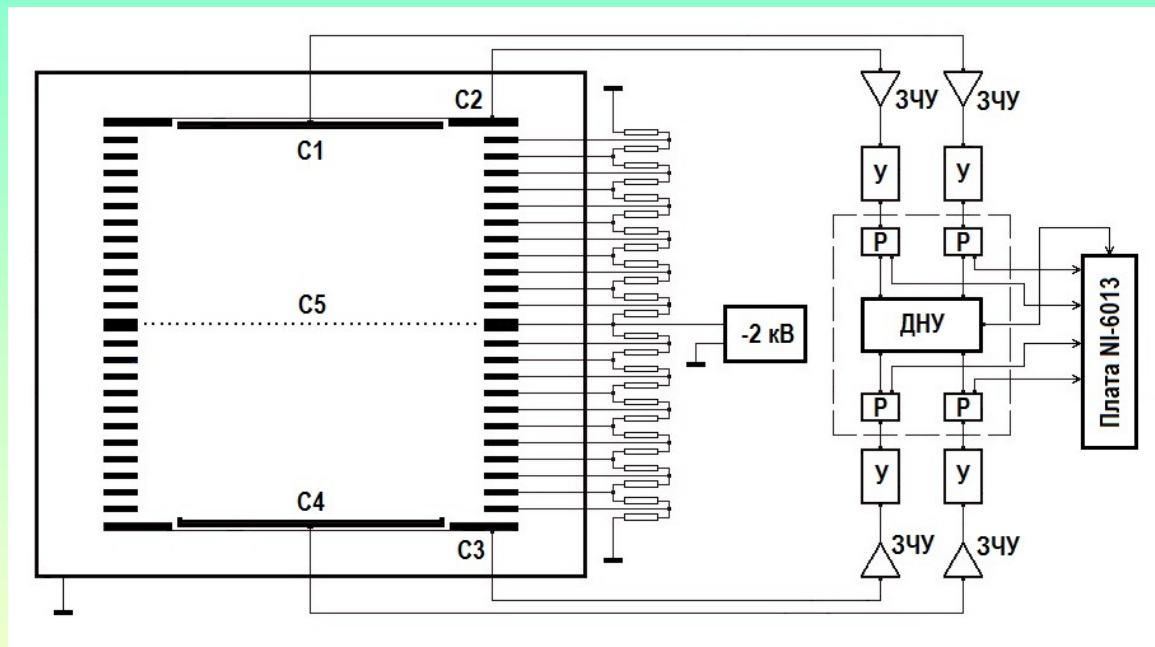


Импульсная ионная ионизационная камера для измерения поверхностной α -активности.

Использование режима собирания ионов позволяет решить задачу измерения ПАА, возникающую при исследовании радиоактивной загрязнённости различных материалов.

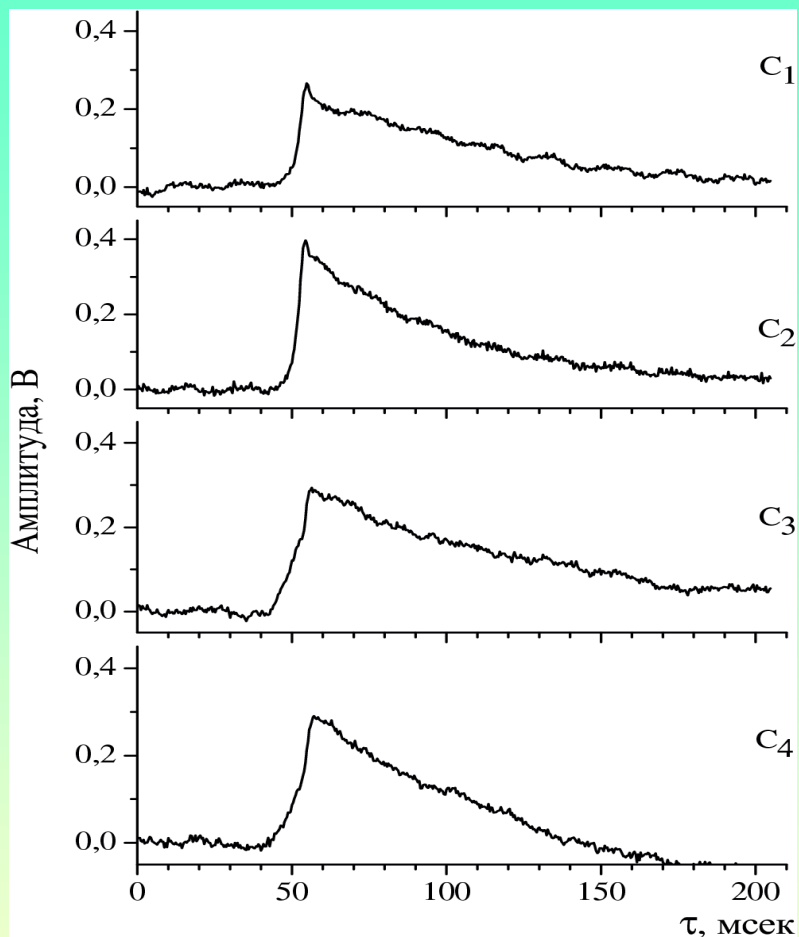
Конструкция камеры.

В состав камеры входят две одинаковые соосные секции.

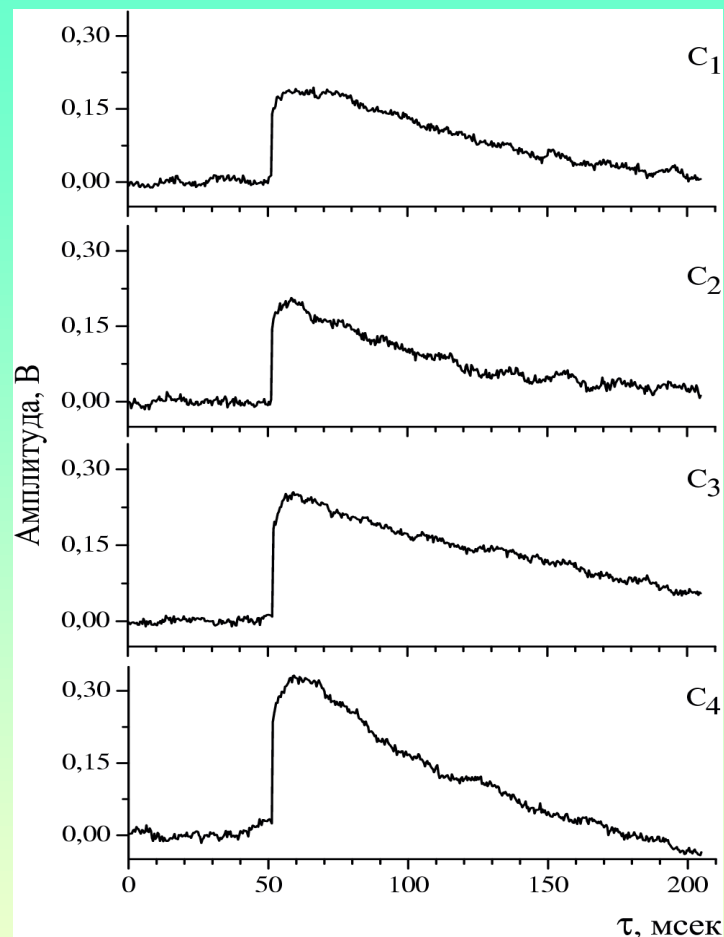


Схематический поперечный разрез и схема подключения ИКИС: С1– верхний центральный анод; С2–верхний кольцевой анод; С3–нижний кольцевой анод; С4–нижний центральный анод; С5–катод.

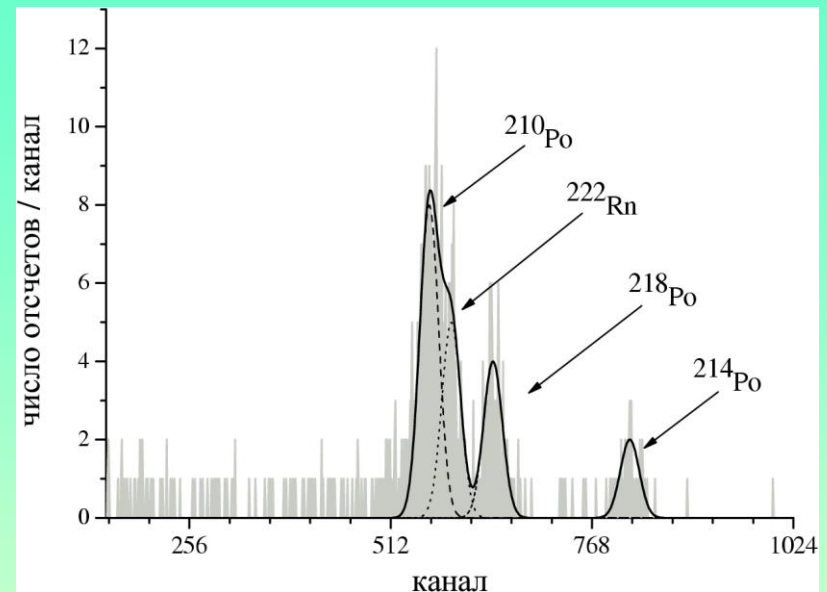
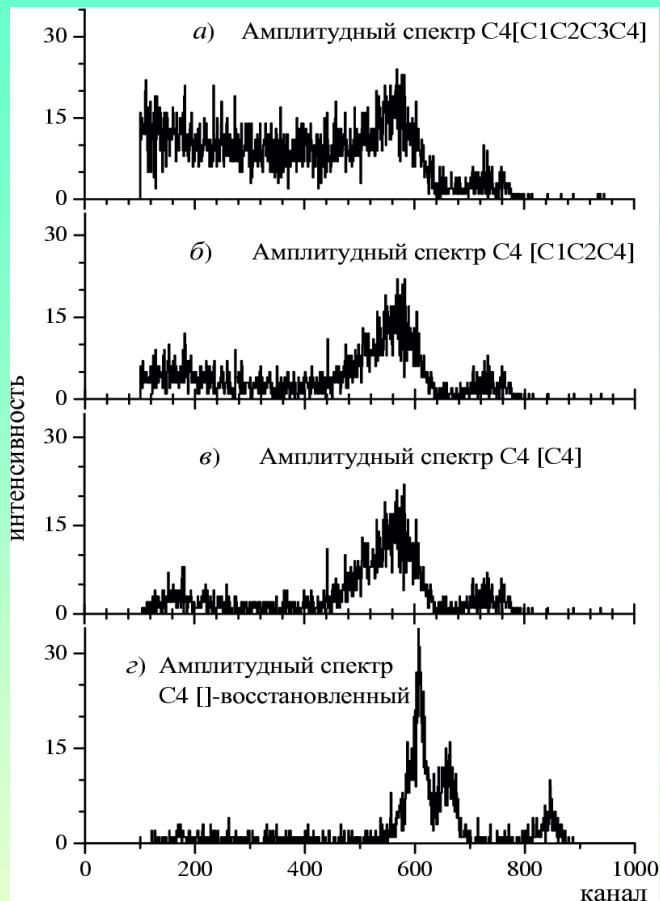
Полный диаметр дрейфового промежутка равен 126 мм, высота – 74 мм, диаметр электрода – 91 мм. Диаметр и глубина выборки для образца составляет 84 мм и 3 мм, соответственно. Геометрическая площадь образца равна 55,4 см². Плотность ионизации в начале и конце трека α -частицы отличаются в два раза, поэтому распределение плотности ионизации по длине треков влетающей и вылетающей α -частиц при одном и том же энерговыделении в газе будут существенно отличаться. Эти отличия находят отражения в форме импульса тока. Возможна дискриминация фоновых событий по этим признакам.



Пример события, в котором α -частица пересекла все четыре чувствительные области (камера заполнена воздухом).



Пример события, в котором α -частица пересекла все четыре чувствительные области камеры, заполненной азотом.



Спектр амплитуд импульсов от Си, накопленный за 316 час, с поправкой на разряд и микрофонный шум (продувка парами жидкого азота).

Спектр фона образца меди: а) - секция C4 + секции C1C2C3 в любой комбинации; б) - секция C4 + секции C1C2 в любой комбинации; в) – спектр секции C4 без сопровождающих импульсов в других секциях; г) - восстановленный спектр секции C4.

Таблица 23. Концентрация радиоактивных изотопов в образцах, измеренная с помощью ИКИС и HPGe – детектора.

Образец, время измерения	Активность [мБк/кг] / Концентрация [г/г]		Метод
	^{238}U ^{a)}	^{232}Th ^{a)}	
Cu Ø83 мм, h = 3 мм, 316 ч	$\leq 490 / \leq 4,0 \cdot 10^{-8}$	$\leq 860 / \leq 2,1 \cdot 10^{-7}$	Поверхностная α -активность (ИКИС)
VM 2000 Ø83 мм, h = 0,07 мм, 429 ч	$\leq 1200 / \leq 9,7 \cdot 10^{-8}$	$\leq 2100 / \leq 5,2 \cdot 10^{-7}$	
VM 2000 m = 372 г, 552 ч	$\leq 7,9 /$	$\leq 9,0 /$	γ -спектрометр (HPGe-детектор)
Нержавеющая сталь AISI 321 m = 4,2 кг; 1219,2 ч	$\leq 1,0 /$	$\leq 1,4 /$	

^{a)} при расчете содержания конкретного изотопа по измеренной α -активности образца вся ПАА приписывалась либо ^{238}U либо ^{232}Th .

Чувствительность ИКИС может быть повышена в 100 и более раз.

Основные результаты:

1. Разработаны и созданы методические и аппаратные ресурсы для осуществления исследований редких реакций и распадов низкофоновыми газовыми детекторами в подземных условиях БНО ИЯИ РАН.

2. С целью отбора наилучших выполнены измерения радиоактивной загрязнённости различных материалов и металлов методами γ -спектрометрии и контроля поверхностной α -активности. Определён список наиболее чистых по радиоактивным примесям материалов, пригодных для изготовления низкофоновых детекторов и защит.

3. Разработаны, изготовлены и исследованы различные варианты низкофоновых пропорциональных счётчиков. Отобраны наиболее удачные конструкции. Впервые предложена и реализована конструкция низкофонового миниатюрного кварцевого счётчика с катодом из пирографита для регистрации излучений от внутренних и внешних источников.

4. Исследованы фоновые, временные, амплитудные характеристик различных рабочих газов и их смесей. Впервые установлено, что газовая смесь (1-2)% Xe + CF₄ относится к классу метастабильных Пеннинговских смесей. Пропорциональные счётчики с таким газом обладают удлинённой рабочей характеристикой; сниженным в ~2 раза рабочим напряжением; в десятки раз большей величиной предельного коэффициента газового усиления по сравнению с чистым CF₄.

5. Разработана методика, создана установка с многонитяным бесстеночным пропорциональным счётчиком и выполнены высокоточные измерения формы β -спектра ^{14}C . В результате обработки данных установлено, что форма экспериментального спектра, очищенная от всех выявленных искажающих факторов, отличается от формы теоретического спектра для разрешённого перехода. Отличие устраняется при умножении теоретической формы на корректирующий множитель $C(E) = 1 + \beta(E_0 - E)$, где $\beta = (1.24 \pm 0.04) \text{ МэВ}^{-1}$.

Получено ограничение на примесь «тяжёлого» нейтрино с массой 17 кэВ к нормальному состоянию с $m_\nu \approx 0$: $|U_{eH}|^2 < 0.0022$ (90% у.д.).

6. С помощью плоскопараллельной ионизационной камеры с сеткой и двух разновидностей больших пропорциональных счётчиков проведён с возрастающей чувствительностью ряд поисковых исследований 2β -распада ^{136}Xe . Установлен наилучший до настоящего времени для экспериментов разностного типа предел на период полураспада изотопа ^{136}Xe относительно $(2\beta 2\nu)$ -распада:

$T_{1/2} \geq 8.5 \cdot 10^{21}$ лет (90% у.д.).

Результат достигнут с применением разработанных новых методов регистрации импульсов от пропорционального счётчика цифровым осциллографом и анализа полной формы импульсов.

7. В совместной с испанскими физиками работе по поиску $2\beta^+$ - и $e\beta^+$ -распадов изотопа ^{78}Kr с помощью цилиндрической сеточной ионизационной камеры, окружённой сцинтилляционными детекторами $\text{NaI}(\text{TI})$, для этих процессов установлены наилучшие до настоящего времени пределы на периоды полураспада:

$$T_{1/2} (2\beta^+)(0\nu + 2\nu) \geq 2.0 \cdot 10^{21} \text{ лет (68\% у.д.)},$$

$$T_{1/2} (K\beta^+)2\nu \geq 1.1 \cdot 10^{20} \text{ лет (68\% у.д.)},$$

$$T_{1/2} (K\beta^+)0\nu \geq 5.1 \cdot 10^{21} \text{ лет (68\% у.д.)}.$$

8. В серии экспериментов по поиску $2K$ -захвата изотопов ^{78}Kr и ^{124}Xe , выполненных с возрастающей чувствительностью на двух разных типах больших пропорциональных счётчиков, установлены наилучшие до настоящего времени пределы:

$$T_{1/2} (0\nu+2\nu, 2K) \geq 1.9 \cdot 10^{17} \text{ лет (68\% у.д.) для } ^{124}\text{Xe},$$

$$T_{1/2} (0\nu+2\nu, 2K) \geq 3.4 \cdot 10^{21} \text{ лет (95\% у.д.) для } ^{78}\text{Kr}.$$

Последний результат получен путём отбора полезных событий по итогам анализа формы записанных в цифровом виде импульсов, выявленной при обработке с применением оригинального нового метода на основе вейвлет-преобразований.

9. В результате целевых исследований разработана конструкция импульсной ионной ионизационной камеры большого объёма для измерения содержания радона в пробах воздуха, заполняющего камеру в качестве рабочего газа.

Разработана и изготовлена специальная регистрирующая аппаратура. Энергетическое разрешение камеры при энергии α -частиц 5.5 МэВ достигает 3.9%. Изготовленный детектор обладает наивысшей чувствительностью среди приборов, предназначенных для прямой регистрации распадов радона в воздухе. С помощью камеры за время 10^3 с достигается статистическая точность не хуже 10% при регистрации распадов радона с объемной активностью в воздухе 10 Бк/м³.

10. Разработана и изготовлена импульсная ионная ионизационная камера для регистрации низких уровней поверхностной α -активности образцов различных материалов с площадью поверхности до 55.4 см². Разработана и реализована методика регистрации импульсов длительностью ~ 10 мс с помощью цифрового осциллографа. Энергетическое разрешение камеры при энергии α -частиц 5.5 МэВ достигает 4.3%. Предложенная конструкция камеры потенциально обладает чрезвычайно высокой чувствительностью. При увеличении полезной площади для размещения образцов до 400 см² чувствительность метода определения содержания радиоактивных элементов по их поверхностной α -активности достигает ~ 0.7 мБк/кг по ²³⁸U и ~ 1.2 мБк/кг по ²³²Th за время измерений 500 ч с медным образцом.