

П-55



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

6 - 10824

ПОМАНСКИЙ
Александр Александрович

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ НИЗКИХ ФОНАХ
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1977

Работа выполнена в Институте ядерных исследований
АН СССР.

Официальные оппоненты: академик Б.М.ПОНТЕКОРВО,
член-корреспондент
АН СССР П.Е.СПИВАК,
доктор физико-математических
наук Б.А.ДОЛГОШЕИН.

Ведущее предприятие: Институт физики высоких энергий.

Автореферат разослан " " 1977 года.

Защита диссертации состоится " " 1977 года

на заседании специализированного Ученого совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по адресу: Дубна, Московской
области, Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь ЛЯП ОИЯИ

к.ф.-м.н.

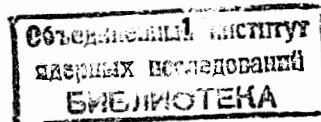
(Ю.А.БАТУСОВ).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Количество экспериментальных работ, для проведения которых требуются условия ультранизкого фона ионизирующих излучений, с каждым годом возрастает. Это работы по проблемам ядерной физики, физики космических лучей, физики элементарных частиц, астрофизики и др. В значительной части таких работ получаемые экспериментальные результаты связаны с чувствительностью установок, которая определяется радиоактивной загрязненностью вещества детекторов и окружающих их материалов. Например, важная для физики элементарных частиц проблема - проверка выполнимости закона сохранения лептонного заряда - решается в опытах по исследованию двойного бета-распада, все результаты которых пока являются предельными, что обусловлено радиоактивным фоном установок. Однако сведения о содержании радиоактивных элементов в экспериментальных установках и окружающих материалах обычно неопределенны. Поэтому защита детекторов от окружающей радиоактивности проводится большей частью интуитивно.

В настоящее время проблема снижения фона является определяющей в экспериментах с солнечными нейтрино, в опытах по поиску аномальных ядерных состояний в природе, по проверке фундаментальных законов сохранения и др.

Цель работы. Основная цель работы заключалась в разработке методов идентификации ультранизких активностей, необходимых для постановки экспериментов по нейтринной астрофизике. Накопленный опыт позволял использовать созданную технику в смежных областях.



Новизна работы. Разработаны высокочувствительные методы идентификации отдельных радиоактивных атомов благородных газов в больших количествах вещества. Чувствительность созданных установок для извлечения (и последующей регистрации распадов) изотопов радона из жидкости на три порядка величины превосходит чувствительность имевшихся установок.

Впервые показаны практические возможности реализации галлий-германиевого и литий-бериллиевого методов регистрации солнечных нейтрино.

Благодаря созданной низкофоновой методике пропорциональных счетчиков, впервые наблюдались распады изотопа криптон-81 и измерено содержание этого изотопа в атмосфере.

Предложен и осуществлен на практике наиболее экономичный способ создания низкофоновых лабораторий. Впервые исследована собственная радиоактивная загрязненность тугоплавких металлов и полупроводниковых материалов.

Научная и практическая ценность работы. Достигнутые результаты по разработке низкофоновых методов важны для постановки экспериментов по нейтринной астрофизике, по проверке законов сохранения электрического, барионного и лептонного зарядов, по поискам аномальных ядерных состояний. Они могут также быть использованы в прикладных исследованиях для измерений ультранизких активностей.

Результаты исследования изотопа ^{81}Kr важны с точки зрения физики и астрофизики космических лучей, палеомагнетизма и ядерной физики.

Защищаемые положения. I. Разработанные методы идентификации изотопов радия в веществах позволяют определять $\sim 10^{-19}$ г ^{226}Ra и $\sim 10^{-22}$ г ^{224}Ra на грамм вещества.

2. Галлий-германиевый и литий-бериллиевого методы регистрации солнечных нейтрино практически осуществимы.

3. Спектры одноэлектронных импульсов в газонаполненных пропорциональных счетчиках описываются квазиэкспоненциальным законом.

4. Концентрация долгоживущего изотопа криптон-81 в атмосфере соответствует неизменной интенсивности приходящих на Землю космических лучей за последние сотни тысяч лет.

5. Типичная загрязненность α -активными изотопами распространенных металлов и сплавов близка к величине 10^{-8} г ^{238}U на грамм вещества (в предположении, что концентрации ^{238}U и ^{232}Th относятся, как 1 и 3, а дочерние продукты семейства урана и тория находятся в равновесии с ^{238}U и ^{232}Th).

Наиболее чистыми по радиоактивности среди металлов являются тугоплавкие металлы, в частности тантал и вольфрам.

6. Экранировка низкофоновых лабораторий щебнем из ультраосновных пород является наиболее эффективным, простым и экономичным методом снижения окружающего радиоактивного фона.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и содержит 229 страниц, включая 16 таблиц, список литературы - 193 наименования, а также 47 рисунков.

Результаты выполненных исследований опубликованы в 18 работах.

Материалы диссертации обсуждались на семинарах отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики ИЯИ АН СССР, семинаре отдела слабых и электромагнитных взаимодействий Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, доложены на Всесоюзных конференциях по физике космических лучей (Ташкент, 1968 г., Москва, 1972 г.), на Международных конференциях по физике нейтрино (Венгрия - 1972 и 1975 гг.), на Международных конференциях по измерениям малых активностей (Чехословакия - 1968 и 1975 гг.).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко излагается материал диссертации и дается обоснование важности рассмотренных проблем для постановки экспериментов по нейтринной астрофизике, ядерной физике, физике элементарных частиц, физике космических лучей и для решения задач прикладного характера.

В первой главе диссертации рассказывается о современном состоянии проблемы постановки низкофоновых экспериментов. Показано, что основная трудность в их осуществлении - проблема снижения окружающего радиоактивного γ -фона до некоторого уровня. Приводятся основные каналы возникновения фоновых γ -квантов. Дан обзор ряда экспериментальных работ, для выполнения которых потребовалось значительное снижение фона. Обращается внимание на то, что электронные эксперименты по детектированию солнечных нейтрино можно проводить лишь

при снижении фона окружающей радиоактивности и собственного фона детекторов в миллионы раз, в то время как обычное снижение фона в большинстве низкофоновых экспериментов составляет лишь несколько десятков раз. Дается обзор методов снижения фона. Указывается, что часто сам детектор обладает достаточно высоким фоном. Это исключает возможность дальнейшего снижения фона даже в том случае, если экранировка от окружающей радиоактивности производится очень чистыми защитными материалами.

Обращается внимание на то, что при работе в подземных выработках особую опасность представляет занос радона, т.к. продукты распада радона, накапливаясь в помещениях, могут приводить к увеличению фона.

Показано, что при хранении различных материалов на поверхности Земли их собственный радиоактивный фон увеличивается. Это связано с активацией космическими лучами, происходящей за счет (n, γ) -реакции, M^- -захватов и реакций скалывания. Т.о., при использовании этих материалов в качестве защиты в подземных экспериментах, необходимо учитывать дополнительный источник фона за счет распада различных радиоактивных элементов, образованных при активации.

Во второй главе рассказывается о методике извлечения отдельных атомов благородных газов из больших количеств вещества. Приводятся также полученные с помощью развитой ме-

тодики результаты измерений загрязненности α -активными изотопами различных детекторов солнечных нейтрино, некоторых сцинтилляторов и конструкционных материалов.

Описана установка для извлечения радиоактивного аргона-37 из 300 литров хлорсодержащей жидкости. Эта установка явилась первым макетом будущей 3000-тонной установки Института ядерных исследований АН СССР, которая должна быть сооружена на нейтринной станции ИЯИ АН СССР. На основе опыта, приобретенного при создании указанной установки, была существенно развита методика извлечения из больших объемов жидкости и последующей регистрации в низкофоновых пропорциональных счетчиках и ионизационных камерах отдельных атомов радона и торона. Благодаря этому, чувствительность существовавших методов обнаружения изотопов радия в различных веществах была повышена на 3 порядка величины. В таблицах I и 2 приводятся результаты некоторых измерений, проведенных на установках для извлечения и регистрации радона и торона.

Из приведенных таблиц видно, что в большинстве случаев вещества являются довольно загрязненными и разработанные методы вполне пригодны для определения содержания изотопов радия в различных материалах. Чувствительность методов может быть повышена увеличением количества исследуемого вещества и использованием счетчиков с более низким собственным фоном.

Показано также, что содержание радия в жидкостях, в частности в воде, может быть значительно понижено посредством дистилляции. Причем окончательная чистота жидкости зависит

Т А Б Л И Ц А I

Предельно допустимые и измеренные концентрации α -активных изотопов в некоторых возможных детекторах солнечных нейтрино (в граммах α -изотопа на грамм мишени)

α -изотоп мишень	226Ra	228Th	
Металлический литий (электронный метод)	$5 \cdot 10^{-18}$ ($2,4 \pm 0,3$) $\times 10^{-16}$	$5 \cdot 10^{-21}$ ($2,4 \pm 1,5$) $\times 10^{-18}$	Предельно допустимая /1/ Наши измерения
Хлористый литий (радиохимический метод)	$1 \cdot 10^{-16}$ ($1,3 \pm 0,2$) $\times 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-20}$ $1,3 \cdot 10^{-19}$	Предельно допустимая /2/ Наши измерения
Перхлоратитен (радио- химический метод)	$4 \cdot 10^{-15}$ ($1,6 \pm 0,2$) $\times 10^{-17}$	$3 \cdot 10^{-19}$ $7,1 \cdot 10^{-20}$	Предельно допустимая /1/ Наши измерения
Гексофторбензол (электронный метод)	$3 \cdot 10^{-20}$ $\leq 2 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^{-22}$	Предельно допустимая /3/ Наши измерения

Согласно
/1/ расчетам А.В.Елпидинского.

/2/ -" Ю.И.Захарова.

/3/ -" И.Р.Барabanова и Г.В.Домогоцкого.

Т А Б Л И Ц А 2

Загрязненность α -активными изотопами некоторых конструктивных и сцинтиляционных материалов (в граммах α -изотопа на грамм материала). Измеряется загрязненность ^{226}Ra и ^{224}Ra . Предполагается, что ^{226}Ra находится в равновесии с ^{238}U , а ^{224}Ra с ^{232}Th .

вещество	^{226}Ra	^{238}U	^{224}Ra	^{228}Th	^{232}Th
Медь М-1	$(2,4 \pm 1,0) \cdot 10^{-16}$	$(7,0 \pm 3,0) \cdot 10^{-10}$	$\leq 2,1 \cdot 10^{-21}$	$\leq 4,0 \cdot 10^{-19}$	$\leq 3,0 \cdot 10^{-9}$
Дюраль	$(3,9 \pm 2,2) \cdot 10^{-16}$	$(1,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-9}$	$\leq 7,6 \cdot 10^{-21}$	$\leq 1,5 \cdot 10^{-18}$	$\leq 1,1 \cdot 10^{-8}$
Сталь-45	$(2,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-15}$	$(6,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-9}$	$\leq 6,9 \cdot 10^{-21}$	$\leq 1,3 \cdot 10^{-18}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-8}$
Сталь-3	$(1,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-15}$	$(4,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-9}$	$\leq 9,0 \cdot 10^{-21}$	$\leq 1,7 \cdot 10^{-18}$	$\leq 1,3 \cdot 10^{-8}$
Нержавеющая сталь	$(6,2 \pm 2,5) \cdot 10^{-16}$	$(1,9 \pm 0,7) \cdot 10^{-9}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-19}$	$\leq 2,0 \cdot 10^{-18}$	$\leq 1,5 \cdot 10^{-8}$
Мрамор	$(5,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-14}$	$(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-7}$			
Соль - NaCl	$(8,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-16}$	$(2,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-9}$	$(5,7 \pm 2,2) \cdot 10^{-21}$	$(1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-18}$	$(8,3 \pm 3,2) \cdot 10^{-9}$
Уайт-спиритовый сцинтилятор	$(8,4 \pm 1,3) \cdot 10^{-17}$	$(2,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$	$(6,0 \pm 3,6) \cdot 10^{-22}$	$(1,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-19}$	$(8,7 \pm 5,1) \cdot 10^{-10}$
NaI(Tl)-сцинтилятор	$(1,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-15}$	$(5,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-9}$	$(6,9 \pm 3,8) \cdot 10^{-21}$	$(1,3 \pm 0,7) \cdot 10^{-18}$	$(1,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$

8

от материала, из которого изготовлен дистиллятор. В табл. 3 указывается содержание ^{226}Ra в граммах на грамм воды, полученной разными методами дистилляции.

Таблица 3

Обычная водопроводная вода	$(3,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-17}$
Вода из металлического дистиллятора	$(1,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-17}$
Вода из стеклянного дистиллятора	$(2,8 \pm 0,9) \cdot 10^{-18}$
Вода из кварцевого дистиллятора	$\leq 1,7 \cdot 10^{-18}$

По-видимому, в процессе дистилляции жидкости очищаются от всех тяжелых α -активных элементов.

Третья глава посвящена новым радиохимическим детекторам солнечных нейтрино - галлий-германиевому и литий-бериллиевому.

Эти детекторы были предложены в работах В.А.Кузьмина (Препринт ФИАН-1964) и Г.Т.Зацепина и В.А.Кузьмина (Proc. Int. Cosmic Rays Conference MU-UU 36 (1965)).

Нами в 1965 и 1966 гг. (Препринт ФИАН № А-106 и № 29) были рассмотрены практические возможности использования галлия и лития в качестве детекторов солнечных нейтрино.

Предложено в качестве литиевого детектора использовать водный раствор хлористого лития в воде, а получающийся в результате реакции $\nu + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + e^-$ радиоактивный ${}^7\text{Be}$ переводить в металлоорганическое соединение бериллия и

вводить это соединение в газонаполненный пропорциональный счетчик. Это позволяет регистрировать практически все распады ${}^7\text{Be}$ и при этом, как показано в диссертации, существенно понизить фон по сравнению с гейгеровским режимом работы счетчика. В настоящее время макетная установка для извлечения отдельных атомов бериллия из водного раствора хлористого лития создана в США (Дж.К.Раули. Труды Ленинградского семинара по космофизике, ЛИЯФ, 1974). Аналогичная работа в соавторстве с нами была выполнена в МГУ (Н.П.Руденко и др. Вестник МГУ, Химия, 4, 402-1970 г.).

Рассмотрены фоновые процессы, приводящие к образованию ${}^7\text{Be}$ в литиевом детекторе. Показано, что из соотношения эффективных сечений реакций ${}^7\text{Li}(\gamma, e^-){}^7\text{Be}$ и ${}^{37}\text{Cl}(\nu, e^-){}^{37}\text{Ar}$ и реакций ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ и ${}^{37}\text{Cl}(p, n){}^{37}\text{Ar}$ следует, что для литиевого детектора можно допустить на два порядка большую интенсивность потока мюонов, чем для хлорного детектора, т.е. отношение сигнал/шум будет при любой глубине расположения установок в пользу литиевого детектора.

Показано, что извлечение микроколичеств германия из галлиевой мишени является реальной задачей. В качестве галлиевой мишени предложено использовать GaCl_2 .

Образующийся по реакции $\nu + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ радиоактивный германий предложено переводить в газообразный SeH_4 и регистрировать распады германия-71 в пропорциональном счетчике. В настоящее время практическое осуществление метода в СССР и США идет в этом направлении (Г.Т.Зацепин и др. Труды Международной конференции "Нейтрино-75", 2, 385, Будапешт, 1975).

Исследованы фоновые реакции, приводящие к образованию ${}^{71}\text{Ge}$. Показано, что наиболее опасными с точки зрения фона являются реакции, приводящие к образованию радиоактивных изотопов мышьяка: ${}^{69}\text{Ga}(\alpha, n){}^{73}\text{As}$, ${}^{69}\text{Ga}(\alpha, n){}^{72}\text{As}$ и ${}^{71}\text{Ga}(\alpha, n){}^{74}\text{As}$. Опасность этих реакций связана с тем, что все эти изотопы мышьяка распадаются посредством орбитального захвата и поэтому их распады весьма трудно отличить от распадов ${}^{71}\text{Ge}$. В то же время отделение германия от мышьяка является непростой задачей. В этой связи указано, что т.к. в галлиевой мишени за счет α -радиоактивных загрязнений всегда будет образовываться какое-то количество этих изотопов мышьяка, то при применении метода должно быть обеспечено полное разделение германия и мышьяка.

Разработан и осуществлен метод изготовления пропорциональных счетчиков с галлиевым катодом для определения α -загрязненности галлия. Проведено измерение загрязненности галлия α -активными изотопами, которая допускается условиями проведения нейтринного эксперимента в случае обеспечения разделения германия и мышьяка.

В четвертой главе излагаются результаты работы по разработке конструкции, созданию и исследованию характеристик малогабаритных низкофоновых пропорциональных счетчиков. Основная цель создания этих счетчиков - их использование в радиохимических опытах по исследованию солнечных нейтрино. Конструкция многочисленных образцов созданных счетчиков

предусматривает внутреннее наполнение их рабочим газом, содержащим продукты взаимодействия солнечных нейтрино с веществом мишени. Все счетчики вне зависимости от размера ($\varnothing = 1,5-20$ мм) имеют торцовое окно для калибровки их источником рентгеновского излучения.

Характеристики счетчиков (коэффициент газового усиления, фон, стабильность, продолжительность работы и др.) исследовались с помощью радиоактивных трития и аргона-37, вводимых внутрь счетчика. Подтвержден вывод, сделанный ранее Б.М.Понтекорво (*Helvetica Physica Acta*, 22 Suppl.III, 97), что пропорциональные счетчики могут длительно стабильно работать при предельно допустимых коэффициентах газового усиления.

Определен период полураспада ^{37}Ar . Результаты ($T_{1/2} = 36,37 \pm 0,17$ дня) совпали с наиболее точными результатами, полученными одновременно в США.

Создана наземная низкофоновая установка, включающая пассивную и активную защиту пропорционального счетчика от окружающего радиоактивного фона и фона космических лучей. измерено количество фоновых отсчетов в пропорциональном счетчике, связанных с мюонами, проходящими вне счетчика. По-видимому, эти события вызваны γ -квантами и δ -электронами, генерированными мюонами космических лучей.

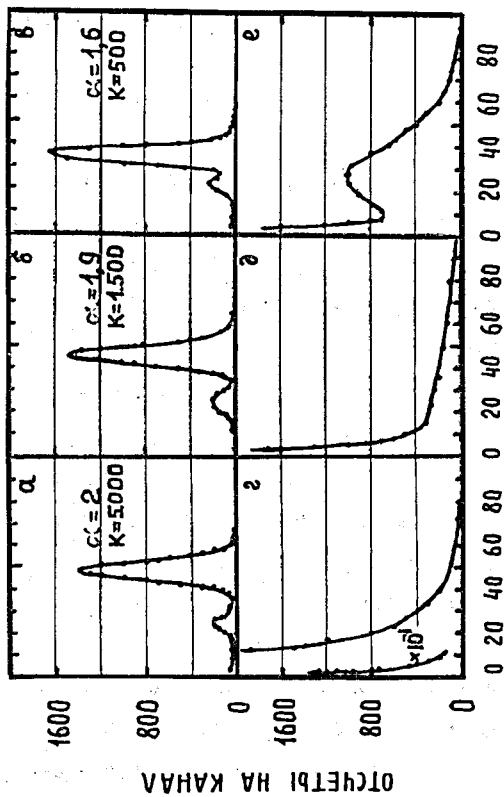
Для развития методики регистрации распадов ^7Be , образуемого по реакции $\nu + ^7\text{Li} \rightarrow ^7\text{Be} + e^-$, исследованы спектры

импульсов от одной пары ионов в пропорциональном счетчике (распады ^7Be должны приводить к образованию I-3 пар ионов).

Показано, что форма спектра одноэлектронных импульсов, определяемая развитием лавины в счетчике, близка к экспоненциальной. Это проверено с помощью калибровки счетчика, облучаемого ультрафиолетом, источником ^{55}Fe , давшим при наполнении его аргон-метановой смесью спектр в виде двух пиков с энергиями в максимуме 5,9 и 2,95 кэВ. Нерегулярности в форме спектра одноэлектронных импульсов появляются, когда отношение энергий (α) в максимуме пиков от ^{55}Fe становится меньше чем 2 (рис. I, K - коэффициент электронного усиления). Характер появления этих нерегулярностей, приобретающих вид максимума в распределении, связан с торможением лавины пространственным зарядом, что проявляется в уменьшении ионизирующей способности электронов, находящихся между электронным и ионным облаками лавины.

Показано, что пропорциональные счетчики стабильно работают в области регистрации одноэлектронных импульсов при различном составе газовой смеси (аргон-метан, криптон-метан, ксенон-метан, гелий-метан) и при различных давлениях (от 0,1 до 1 атм.).

В пятой главе диссертации накопленный опыт регистрации редких событий с малыми энерговыделениями из большого числа фоновых событий применен к исследованиям долгоживущего из-



КАНАЛЫ АНАЛИЗАТОРА
Рис. 1

Спектры импульсов от источника ^{55}Fe (а, б, в) и ультрамольбдена (г, д, е), полученные в счётчике, наполненном аргоном (90%) и метаном (10%) при давлении 600 мм Нг.

топа кrypton-81 ($T_{1/2} = 2,1 \cdot 10^5$ лет). Исследования проводились с помощью пропорционального счётчика с внутренней системой антисовпадений, так называемого бесстеночного счётчика, в котором катод основного счётчика состоял из системы вольфрамовых нитей. Это позволяло отсекал системой антисовпадений фоновое излучение относительно невысокой энергии (энергия, выделяемая при распаде ^{81}Kr , - около 14 кэВ).

Было измерено сечение реакции $^{80}\text{Kr}(n, \gamma)^{81}\text{Kr}$. До нашей работы эта реакция исследовалась дважды, причем оба раза косвенными методами. В одной работе (J. H. Reynolds, Phys. Rev. 79, 886 (1950)) было получено значение $(12,5 \pm 1,5)$ барна и в другой (J. McNamara, H. G. Thode, Phys. Rev. 30, 296 (1950) - (95 ± 15) барн. Мы облучали газообразный кrypton в потоке нейтронов от реактора с интенсивностью, близкой к $3 \cdot 10^{13}$ н/см². Интегральный поток нейтронов за время облучения (23 часа) проверялся также по известным сечениям реакций $^{36}\text{Ar}(n, \gamma)^{37}\text{Ar}$ и $^{84}\text{Kr}(n, \gamma)^{85}\text{Kr}$. Была получена величина сечения реакции $^{80}\text{Kr}(n, \gamma)^{81}\text{Kr}$, равная $(15,6 \pm 1,9)$ барна. Результаты измерений представлены на рис. 2. Следует сказать, что наша группа была первой, которая наблюдала распады изотопа ^{81}Kr прямым способом. Таким образом, нами были подтверждены результаты одной группы $(12,5 \pm 1,5)$ барна и опровергнуты результаты другой (95 ± 15) барна).

Исследовалось содержание ^{81}Kr в атмосферном криптоне. В опытах использовался газообразный кrypton "добомбового"

Отсчёты на канал за 2200 мин

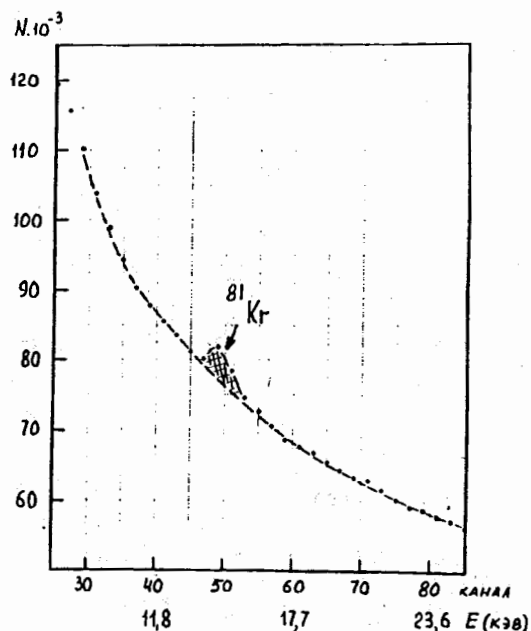


Рис.2

Спектр импульсов в центральной части многоканального пропорционального счётчика. Наполнение: аргон + метан. Введён криптон, облучённый на реакторе тепловыми нейтронами.

выпуска. Современный атмосферный криптон сильно заражен изотопом ^{85}Kr ($T_{1/2} = 10,6$ лет, $E_{\beta}^{\text{max}} \approx 670$ кэВ). ^{81}Kr в атмосфере может быть образован космическими лучами из стабильных изотопов криптона посредством реакции $^{80}\text{Kr}(n, \gamma)^{81}\text{Kr}$ и реакций скалывания $^{82}\text{Kr}(p, pn)^{81}\text{Kr}$, $^{83}\text{Kr}(p, p2n)^{81}\text{Kr}$, $^{84}\text{Kr}(p, p3n)^{81}\text{Kr}$ и $^{86}\text{Kr}(p, p5n)^{81}\text{Kr}$.

Большой период полураспада ^{81}Kr и его инертность дают возможность определить его интегральное количество, образованное в атмосфере за несколько сот тысяч лет, т.к. практически весь ^{81}Kr остается в атмосфере. Результаты измерения содержания ^{81}Kr в атмосфере, таким образом, дают сведения об интенсивности космических лучей за последние несколько сот тысяч лет и о вариациях геомагнитного поля, которое, обрезаая мягкую часть спектра первичных космических лучей, влияет на скорость образования ^{81}Kr в атмосфере. Беря наши данные о сечении реакции $^{80}\text{Kr}(n, \gamma)^{81}\text{Kr}$ и современный поток космических лучей, получаем активность ^{81}Kr в атмосфере, равную 0,04 распадов ^{81}Kr /минута.литр криптона, если сечение реакций скалывания вычислять по формулам Рудштама (Zeit für Naturforschung 21a, 1027(1966)).

Содержание ^{81}Kr в составе атмосферного криптона измерилось до нашей работы швейцарской группой (J.Geophys.Res. 75, 2895(1970)), и была получена следующая величина активности ^{81}Kr : 0,10($\pm 10\%$) распадов/мин.литр криптона. Это не согласуется с неизменной интенсивностью космических лучей, при-

ходящих на Землю в течение последних нескольких сот тысяч лет.

Мы регистрировали распады ^{81}Kr с помощью бесстеночного пропорционального счетчика объемом 0,5 л. Результат эксперимента, показанный на рисунке 3, соответствует активности $(0,05 \pm 0,01)$ расп/мин·литр криптона, т.е. согласуется с неизменным потоком космических лучей, приходящих на Землю за последние сотни тысяч лет. Пик, расположенный слева от криптонового (30-40 каналы анализатора), является K_{α} -линией меди, из которой изготовлен внешний цилиндр охранного счетчика. Хотя этот пик и является фоновым, он служил при измерениях непрерывным показателем качества работы счетчика.

Был также поставлен предел применимости формул Рудштама для вычисления скорости образования ^{81}Kr протонами при их взаимодействиях со стабильными изотопами криптона, имеющими $A > 81$. Газообразный криптон облучался протонами с энергией 600 МэВ.

Т.к. измерения проводились при наличии большого фона от распадов ^{85}Kr , то выделить пик от распадов ^{81}Kr нам не удалось. С достоверностью до одного стандартного отклонения можно заключить, что сечение реакций скалывания (не изотопах естественного криптона), приводящих к образованию изотопа ^{81}Kr , не превышает сечение, вычисленное по формулам Рудштама, более чем в 2 раза.

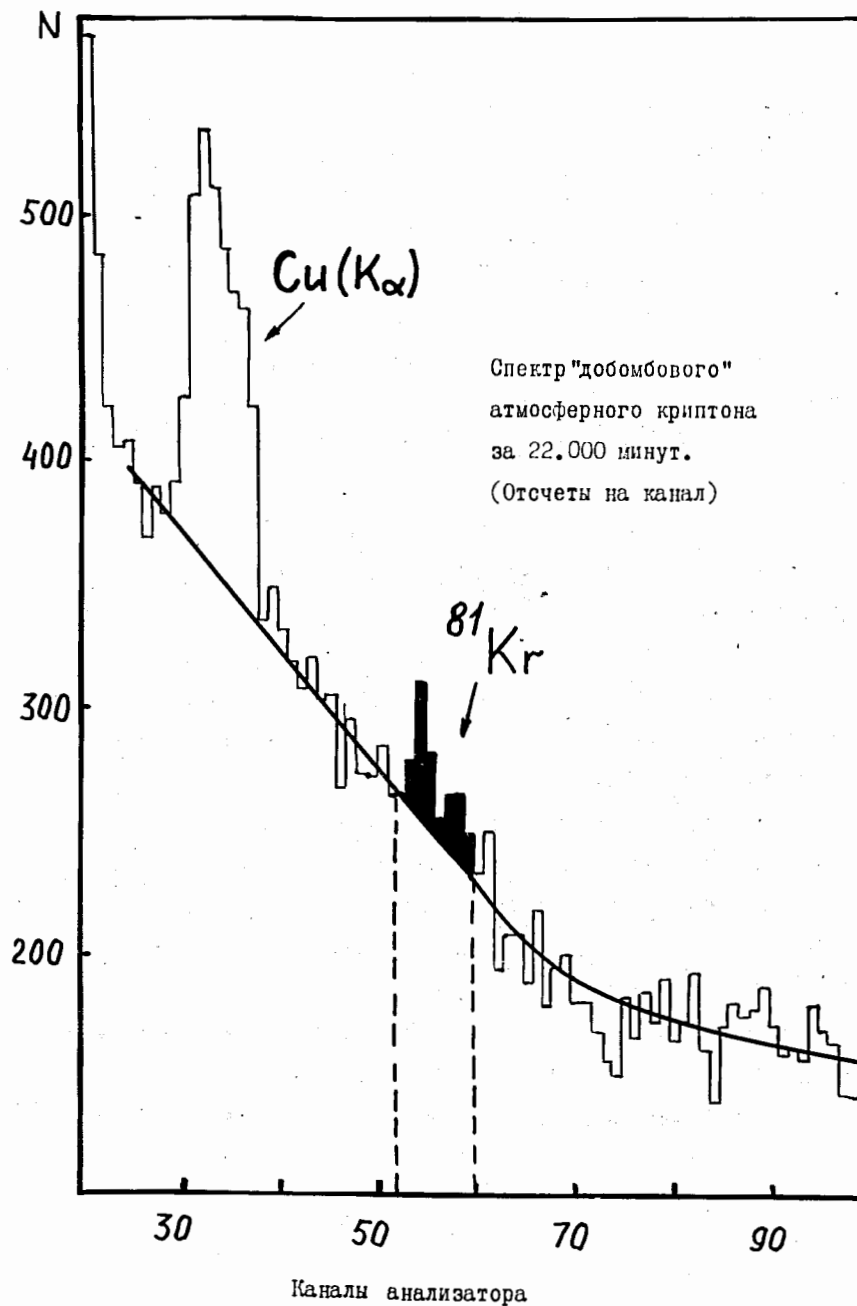


Рис. 3

Шестая глава диссертации посвящена подземной низкофоновой камере, которая была создана на Нейтринной станции Института ядерных исследований АН СССР. Подробно анализируются источники γ -фона, идущего из горных пород. Приведены экспериментальные данные, из которых следует, что спектр γ -квантов, связанных с естественной радиоактивностью, простирается вплоть до 10 МэВ, а возможно, и до 20 МэВ.

Приводятся результаты измерений γ -фона сцинтилляционными детекторами (органическим и NaI(Tl)) при различной экранировке детекторов от окружающей радиоактивности, а также результаты измерений γ -фона различных горных пород. Эти измерения подтвердили правильность выбора ультраосновных пород (дунитов) для экранировки подземной камеры от окружающей радиоактивности.

Использован метод экранировки помещения низкорadioактивным бетоном, состоящим из дунитов и обычного цемента, в результате чего получено 15-кратное снижение γ -фона в большом подземном помещении.

Применен новый метод снижения радиоактивного фона окружающей среды - экранировка чистым дунитовым щебнем. В результате получено примерно такое же снижение γ -фона, как после бетонирования низкорadioактивным бетоном. Общее снижение γ -фона в большом подземном помещении составило ~ 300 раз.

Схематический вид подземной низкофоновой камеры и результаты измерения γ -фона представлены на рис. 4, 5.

Если оценивать фон и загрязненность материалов в едини-

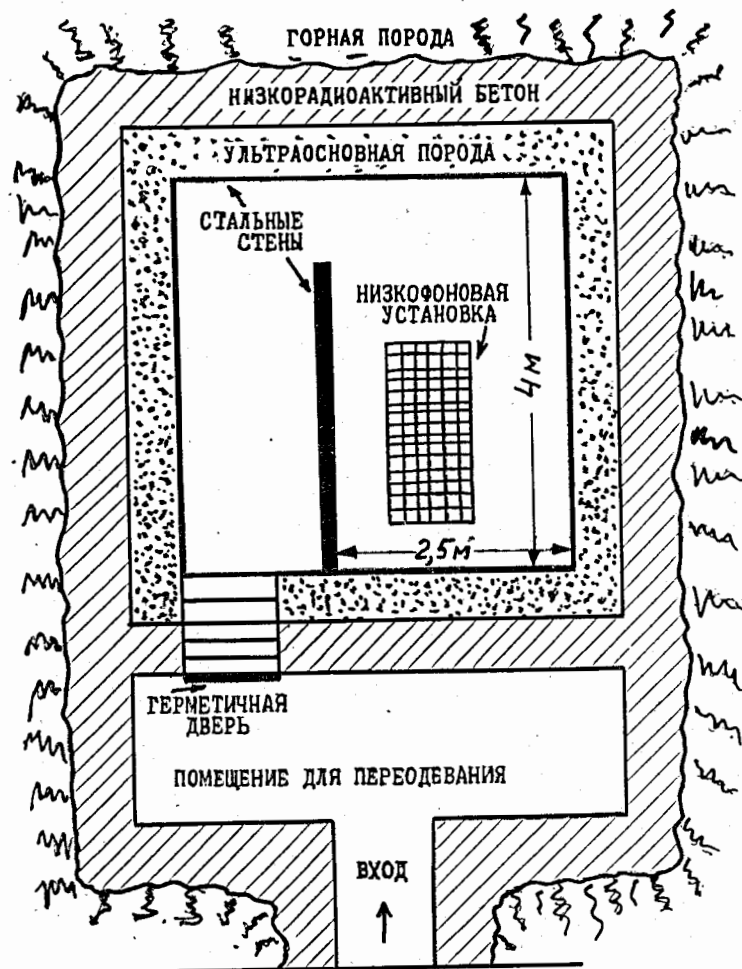


Рис. 4. Общий вид первого этажа низкофоновой камеры.

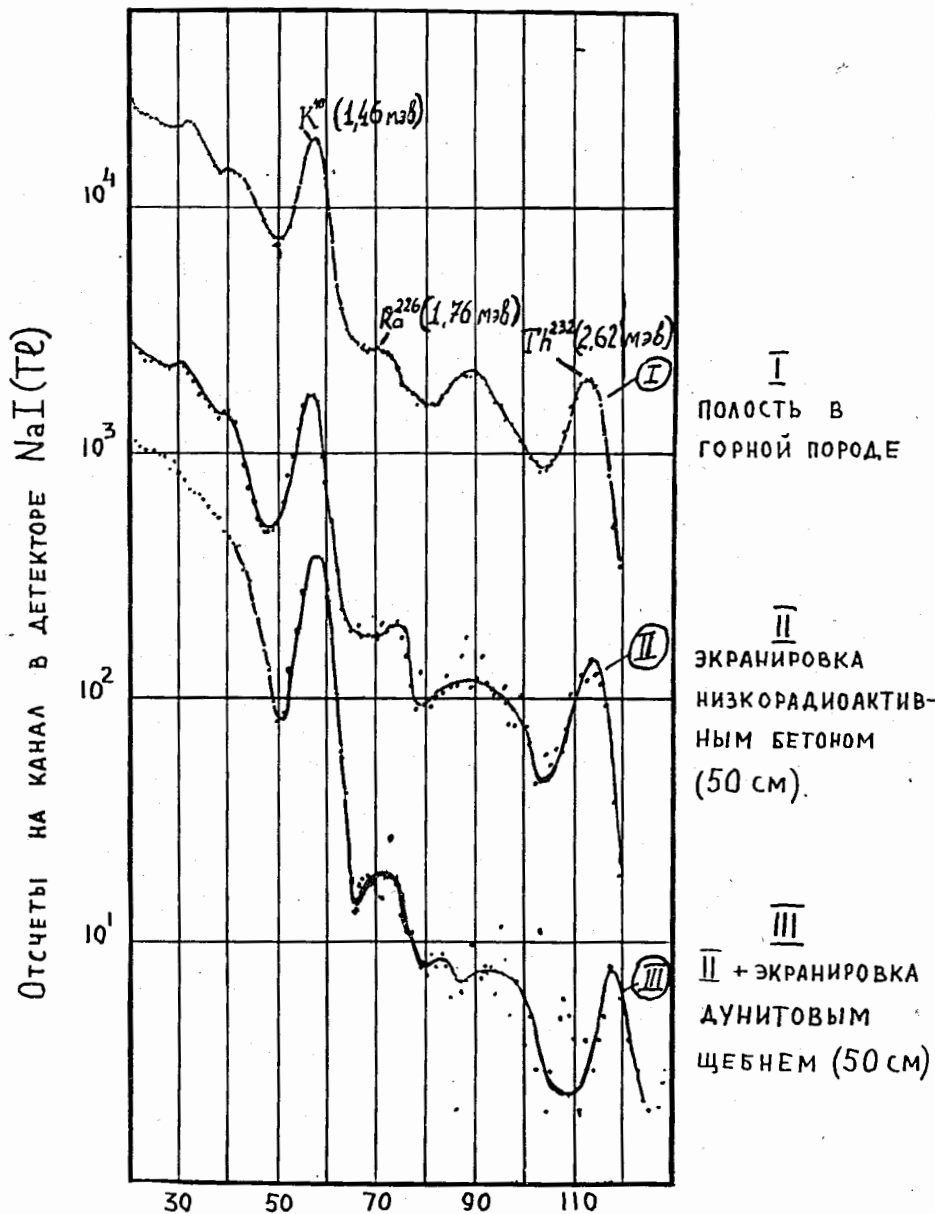


Рис. 5. Спектры γ -излучения в подземной камере.

цах грамм ^{238}U на грамм вещества и считать, что атомов ^{238}U в среднем в 3 раза больше, чем ^{238}U , а элементы семейств U и Th находятся в равновесии с ^{238}U и ^{232}Th , то можно сказать, что фоновая обстановка в камере соответствует 10^{-8} г ^{238}U /г по сравнению с $3 \cdot 10^{-6}$ г ^{238}U /г в неэкранированной подземной полости.

Внутри подземной камеры создана низкофоновая установка, в которой в качестве основного защитного материала используется вольфрам. Внутри низкофоновой установки γ -фон снижен еще на порядок величины. Это показывает малую радиоактивную загрязненность вольфрама.

Создание комплекса низкофоновой камеры позволило измерить собственный фон некоторых сцинтилляционных детекторов и открыло уникальные возможности для постановки ряда экспериментов по проверке фундаментальных законов сохранения, по поиску аномальных ядерных состояний и др.

Исследована загрязненность α -активными изотопами многих проводящих материалов. Показано, что среди металлов наименее загрязненными α -радиоактивными изотопами являются тугоплавкие металлы. Наиболее чистым веществом из всех исследованных является полупроводниковый кремний, загрязненность которого близка к 10^{-10} г ^{238}U на г Si.

Предложен способ определения содержания изотопов радия в твердых веществах по коррелированным α -импульсам в пропорциональных счетчиках, катодом которых является исследуемое вещество.

В заключении диссертации приводятся следующие основные выводы:

1. Впервые в СССР созданы установки для извлечения отдельных атомов благородных газов из больших количеств вещества. Достигнутые результаты по измерению наименьшей концентрации изотопов радия-226 и -224 в различных материалах (соответственно $\leq 2 \cdot 10^{-19}$ и $\leq 2,5 \cdot 10^{-22}$ грамма изотопа радия на грамм вещества) на три порядка величины по чувствительности превышают результаты, известные из мировой литературы. Измерено содержание изотопов радия в возможных детекторах солнечных нейтрино.

2. Показана практическая осуществимость литий-бериллиевого (1966 г.) и галлий-германиевого (1965 г.) методов детектирования солнечных нейтрино, если в качестве вещества мишени использовать хлористые соединения (LiCl и GaCl_3). Предложено (1965 г.) извлеченный из галлиевой мишени германий превращать в моногерман и наполнять им пропорциональный счетчик. В настоящее время эти предложения практически реализуются в СССР и США. Показано, что в галлиевом детекторе за счет радиоактивных загрязнений будет образовываться большое количество радиоактивных изотопов мышьяка, распады которых трудно отличить от распадов германия-71. В связи с этим указано, что при осуществлении метода должно быть обеспечено абсолютное разделение германия и мышьяка.

3. С целью создания пропорционального счетчика для регистрации ${}^7\text{Be}$ -продукта взаимодействия солнечных нейтрино с ${}^7\text{Li}$ - исследованы характеристики спектров одноэлектронных импульсов в пропорциональных счетчиках при различных газовых смесях.

Показано, что спектры одноэлектронных импульсов в пропорциональных счетчиках описываются квазиэкспоненциальным законом. Обращено внимание на целесообразность использования пропорционального счетчика вместо гейгеровского при регистрации распадов ${}^7\text{Be}$.

4. Впервые непосредственно наблюдался распад долгоживущего изотопа криптон-81 в пропорциональном счетчике. Измерено его содержание в составе атмосферного криптона. Показано, что количество ${}^{81}\text{Kr}$ в атмосфере согласуется с неизменной интенсивностью потока космических лучей в последние сотни тысяч лет.

Измерно сечение реакции ${}^{80}\text{Kr}(n,\gamma){}^{81}\text{Kr}$. Полученное значение - $(15,6 \pm 1,9)$ бари - оказалось близким к одному из двух ($12,5$ бари), измеренных ранее в США, и резко отличается от другого (95 бари).

5. Исследована загрязненность α -активными элементами большого числа различных конструкционных материалов. Показано, что их типичная загрязненность близка к $10^{-8}\text{г } {}^{238}\text{U}$ на грамм материала, если считать, что уран и торий находятся в обычном соотношении (1:3) между собой и в равновесии со своими дочерними элементами.

Показано, что наиболее чистыми с точки зрения содержания радиоактивных примесей являются тугоплавкие металлы и полупроводниковые материалы. Наиболее чистым из исследованных материалов оказался полупроводниковый кремний.

6. Разработана конструкция и создана подземная низкофоновая камера с уникальными характеристиками. Предложен и осуществлен на практике наиболее экономичный простой способ создания низкофоновых условий в больших рабочих помещениях: засыпка стен помещения щебнем из низкоактивных - ультраосновных пород. В результате γ -фон в лабораторном помещении снижен в несколько сот раз и соответствует 10^{-8} г ^{238}U на граммы окружающих материалов.

7. Создана подземная низкофоновая установка, внутри которой радиоактивный фон от элементов уран-ториевых рядов соответствует $\sim 10^{-9}$ г ^{238}U , а фон мюонов космических лучей $\sim 10^{-8}$ м/см²с. Это уже позволило определить собственный фон некоторых возможных нейтринных детекторов и открыло уникальные возможности в постановке ряда экспериментов, требующих ультранизкого фона.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. И.Р.Барабанов, В.Б.Вешников, А.А.Поманский. ПТЭ № 2, 109 (1967).
2. А.А.Поманский, С.А.Северный. ПТЭ № 3, 51 (1968).

3. В.Н.Гаврин, И.А.Калиникова, А.А.Поманский, С.А.Северный. Космические лучи № 10, 20 (1969).
4. И.Р.Барабанов, В.Б.Вешников, А.А.Поманский. Атомная энергия 26, 299 (1969).
5. А.А.Поманский, С.А.Северный, Е.П.Трифорова. Атомная энергия 27, 36 (1969).
6. А.А.Поманский, С.А.Северный, Е.П.Трифорова. Атомная физика 9, 382 (1969).
7. А.А.Поманский, С.А.Северный. Атомная энергия 29, 305 (1969).
8. А.А.Поманский. Космические лучи № 10, 95 (1969).
9. И.Р.Барабанов, В.Б.Вешников, А.А.Поманский. Космические лучи № 10, 12 (1969).
10. I.R.Barabanov, A.A.Pomansky. Proc."Neutrino-72" Conference 1, 363 Budapest, 1972.
11. И.Р.Барабанов, А.А.Поманский, В.Г.Рясный. Письма ЖЭТФ 15, 643 (1972).
12. И.Р.Барабанов, В.Н.Гаврин, А.А.Голубев, А.А.Поманский. Изв. АН СССР, сер. физ. № 6, 1186 (1973).
13. А.А.Поманский, С.А.Северный. атомная энергия 38, 39 (1975).
14. И.Р.Барабанов, А.А.Голубев, А.А.Поманский. Геоматнетизм и эрономия 14, 924 (1974).
15. A.A.Pomansky, A.I.Sevastjanov. Proc."Neutrino-75" Conference 2, 383. Budapest, 1975.
16. Г.Т.Зацепин, Е.Л.Ковальчук, В.В.Кузьминов, А.А.Поманский. Краткие сообщения по физике № 6, 20 (1975).
17. А.А.Поманский. Краткие сообщения по физике № 2, 39 (1976).

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июля 1977 года.