Лабораторная работа. Гамма-спектрометрия

Целью работы является изучение основных характеристик сцинтилляционного гамма-спектрометра
Задачи работы: градуировка гамма-спектрометра по энергиям, изучение статистических закономерностей при регистрации гамма-излучения, измерение образцов с естественной радиоактивностью, определение радиоактивных изотопов и их активности.
Используемое оборудование: гамма-спектрометр со сцинтиллятором CsI-Tl, ноутбук

Введение

Гамма-излучение сопровождает ядерные превращения подавляющего большинства радионуклидов. Ядро, образующееся при радиоактивном распаде, чаще всего оказывается в возбужденном состоянии (E_{ex}), при переходе из которого на уровень с меньшей энергией или в основное состояние (E_g) испускается γ - квант. Энергия квантов ($E_\gamma = E_{ex} - E_g$) определяется структурой энергетических уровней конкретного ядра и, следовательно, γ-спектр является своеобразным «паспортом» радионуклида. Поэтому гамма - спектрометрия – определение энергетического спектра γ - квантов, испускаемых исследуемым веществом, – наиболее универсальный метод идентификации радионуклидов в пробах различного состава. Гамма - спектрометрия является также важной составной частью многих инструментальных методов химического анализа. Например, γ-спектры нуклидов, образующихся при нейтронном облучении сложного по составу образца, позволяют установить содержание различных химических элементов в исследуемом веществе.

Виды ионизирующего излучения

В общем смысле ионизирующим излучением являются частицы или виды полей, способные ионизировать вещество. В общем случае удобно выделить четыре типа ионизирующего излучения.

Заряженные частицы	Нейтральные частицы
Быстрые электроны	Электромагнитное излучение
Тяжелые заряженные частицы	Нейтроны

Быстрые электроны включают в себя как бета-частицы с положительным или отрицательным зарядом, которые образуются при распаде ядер, так и электроны высоких энергий, образующиеся в других процессах. Тяжелыми заряженными частицами в данной классификации являются все высокоэнергетические ионы, имеющие одну и более атомную массу. К таким частицам относятся альфа-частицы (положительная заряженная частица идентичная ядру гелия), протоны, продукты распада и т. д. К электромагнитному излучению следует отнести рентгеновское излучение, вызванное перестройкой электронных оболочек атома, гамма-излучение, вызванное переходами в ядре. Также иногда к электромагнитному ионизирующему излучению относят ультрафиолетовое и вакуумное ультрафиолетовое излучение, но в данном учебном пособии мы их не будем рассматривать. Нейтроны, образующиеся во многих ядерных реакциях, относятся к четвертому типу ионизирующего излучения. В свою очередь, выделяются быстрые и медленные нейтроны. Энергии ионизирующего излучения лежат в диапазоне от десятков электронвольтов (эВ) до десятков мегаэлектронвольтов (МэВ). Нижняя граница обусловлена наименьшей энергией связи необходимой для ионизации материала радиацией.

Радиоактивность

Активность любого радиоизотопа определяется скоростью его распада и выражается следующим фундаментальным законом радиоактивного распада:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N,$$

где N - число радиоактивных ядер, а λ - постоянная распада, которая характеризует вероятность радиоактивного распада. Данный закон фактически означает, что число распадов − dN, произошедшее за короткий интервал времени dt, пропорционально числу атомов N в материале. Исторически единицей измерения радиоактивности являлась 1 Кюри (обозначается как Ки или Ci), значение которой составляло $3{,}8 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду и соответствует активности 1 г ^{226}Ra. В 1975 г. на Генеральной Конференции по мерам и весам была утверждена новая единица измерения радиоактивности 1 Беккерель (обозначение: Бк, Bq), значение которой определено как один распад в секунду:1 Бк = $2{,}703 \cdot 10^{-11}$ Ки.

Энергия

Традиционно для измерения энергии ионизирующего излучения используется единица энергии электронвольт (эВ). Один электронвольт равен энергии, необходимой для ускорения электрона в электростатическом поле с разностью потенциалов в 1 В. Энергия частиц ионизирующего излучения обычно измеряется в кило- и мегаэлектронвольтах. Электронвольт удобно применять и для измерения энергии заряженных частиц, так заряд альфа-частицы составляет +2 элементарных заряда, соответственно, чтобы перенести альфа-частицу в поле 500 В, потребуется энергия 1 КэВ. В системе единиц СИ основной единицей измерения энергии является джоуль (Дж). Энергия частиц ионизирующего излучения не превышает нескольких фемтоджоулей: 1 эВ = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Энергия рентгеновского и гамма-излучения связана с частотой этого излучения:

$$E = h\nu.$$

В данном выражении h постоянная Планка, равная 6,626·10−34 Дж·с или 4,135·10−15 эВ с, а ν частота.

Бета-распад

Наиболее часто в качестве источников быстрых электронов используются радиоактивные изотопы, в которых происходит реакция β^--распада:

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow ^{A}_{Z+1}Y + \beta^- + \bar{\nu}.$$

В этом выражении X и Y начальный и конечный продукты реакции, β^- - отрицательно заряженная бета-частица (электрон), $\bar{\nu}$ -- антинейтрино. Вероятность взаимодействия антинейтрино с окружением крайне мала, поэтому эти частицы не обнаруживаются в большинстве обычных экспериментов.

Бета-распад не меняет число нуклонов в ядре *A*, но меняет только его заряд *Z*. Большинство природных изотопов бета-стабильны, но существуют источники с большим периодом полураспада, которые еще можно встретить в природе, например, изотоп ^{40}K, в котором происходит бета-минус, бета-плюс распады и электронный захват. На рисунке 1 представлена схема распада этого изотопа. Однако большинство радиоизотопов, которые используются в научных и промышленных целях, производятся путем бомбардировки стабильных материалов нейтронами, поэтому таких радиоизотопы бета-активны. Существует большое количество бета-изотопов, полученных в канале реактора. Основные бета-источники приведены в таблице 1. В большинстве случаев бета-распад приводит к заполнению возбужденного состояния ядра-продукта и последующему девозбуждению с испусканием гамма-излучения совместно с бета-частицами.

Переходы в бета-распаде характеризуются каждый своей фиксированной энергией распада или Q-значением (Q-value). Так как энергия ядра отдачи\index{ядро отдачи} практически равна нулю, то энергия распределяется между бета-частицами и «невидимыми» нейтрино. Бета-частицы таким образом обладают энергией, которая варьируется от распада к распаду. Энергетический спектр бета распада непрерывный и находится в интервале от нуля до «максимальной энергии бета-распада», которая численно равна Q-value. Спектр бета-распада представлен на рисунке 2. Отметим, что на форму спектра бета-излучения большое влияние оказывает кулоновское полем атома, которое складывается из поля ядра и электронной оболочки. Искажение, вносимое в спектр полем атома, особенно существенно в начале спектра, т.е. для бета-частиц, имеющих малую энергию. При этом центр тяжести энергетического спектра смещается в сторону малых энергий для электронов и больших энергий для позитронов. Это смещение тем больше, чем больше заряд ядра.

Таблица 1

Широко используемые β^- изотопы [2]

Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия распада, МэВ
^{3}H	12,26 лет	0,0186
^{14}C	5730 лет	0,156
^{32}P	14,28 дн.	1,710
^{33}P	24,4 дн.	0,248
^{35}S	87,9 дн.	0,167
^{36}Cl	$3{,}08\cdot10^{5}$ лет	0,714
^{40}K	$1{,}28\cdot10^{9}$ лет	1,311
^{45}Ca	165 дн.	0,252
^{65}Ni	92 г.	0,067
^{90}Sr/^{90}Y	27,7 лет/64 ч.	0,546/2,270
^{147}Pm	2,62 г.	0,224
^{204}Tm	3,81 г.	0,766

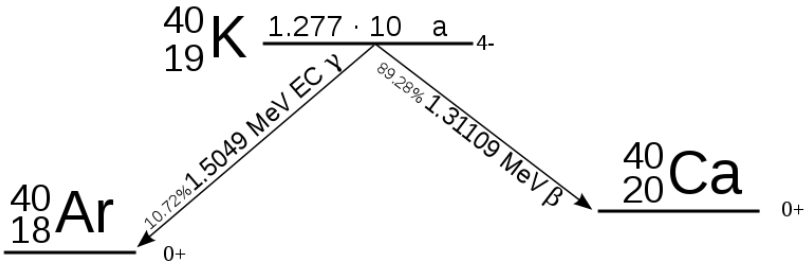


Рисунок 1. Схема распада изотопа 40-калия

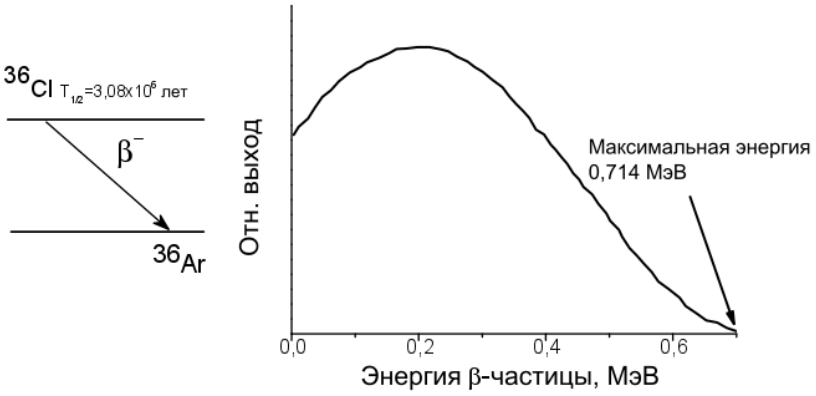


Рисунок 2. Спектр бета-излучения

Альфа-распад

Тяжелые ядра энергетически неустойчивы относительно спонтанного испускания альфа-частицы (ядро атома гелия ^{4}He). Вероятность распада определяется вероятностью проникновения альфа частицы через кулоновский барьер в ядре. Мы не будем подробно останавливаться на этом эффекте, так как он описан во многих учебниках по ядерной физике. Период полураспада источников альфа-частиц варьируется от нескольких дней до тысяч лет. Процесс распада можно схематически описать следующим образом:

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\alpha, $$

где X и Y, соответственно, начальный и конечный продукты распада.

Альфа-частицы, образованные при распаде ядра, моноэнергетичны и имеют начальную кинетическую энергию в диапазоне 1,8-15 МэВ. При движении альфа-частицы в веществе она очень быстро теряет энергию, поэтому поглощается обычным листом бумаги или даже слоем воздуха.

В таблице 2 приведены характеристики основных радиоизотопов, которые являются источниками альфа-частиц. Энергия альфа частиц от большинства источников альфа излучения лежит в интервале от 3 до 6 МэВ. Отметим, что существует взаимосвязь между энергией альфа-частицы и периодом полураспада источника -- чем выше энергия частицы, тем меньше период полураспада.

Изотопы, которые испускают альфа-частицы с энергией выше 6,5 МэВ, имеют период полураспада около нескольких дней, поэтому они имеют достаточно ограниченную сферу применения. С другой стороны, если энергия альфа-частицы ниже 4 МэВ, то вероятность ее вылета из ядра (преодоление Кулоновского барьера) довольно мала, соответственно время жизни такого изотопа значительно дольше. Активность долгоживущих изотопов также существенно ниже.

Наиболее используемыми калибровочными источниками альфа-частиц являются ^{241}Am и ^{239}Pu. Так ^{241}Am активно используется для калибровки полупроводниковых детекторов. Как было отмечено, альфа-частица быстро теряет энергию в материале, поэтому источники альфа-излучения изготавливаются в виде тонкого слоя, покрытого металлической фольгой или другим материалом для защиты источника.

Таблица 2.

Основные источники альфа-частиц [1]

Изотоп	Период полураспада	Кинетическая энергия альфа-частиц, МэВ	Доля в процентах
^{148}Gd	93 г.	3,18	100
^{232}Th	$1{,}4\cdot10^{10}$ лет	4,012	77
		3,953	23
^{238}U	$4{,}5\cdot10^{9}$ лет	4,196	77
		4,149	23
^{235}U	$7{,}1\cdot10^{8}$ лет	4,598	4,6
		4,401	56
		4,374	6
		4,365	12
		4,219	6
^{236}U	$2{,}4\cdot10^{9}$ лет	4,494	74
		4,445	26
^{230}Th	$7{,}7\cdot10^{4}$ лет	4,688	76,3
		4,62	23,4
^{234}U	$2{,}5\cdot10^{5}$ лет	4,77	72
		4,72	28
^{239}U	$2{,}4\cdot10^{4}$ лет	5,155	73,3
		5,143	15,1
		5,105	11,5
^{240}U	$6{,}5\cdot10^{3}$ лет	5,168	76
		5,124	24
^{210}Po	133 дн.	5,305	99+
^{241}Am	433 г.	5,486	85,2
		5,443	12,8
^{238}Pu	88 лет	5,499	71,1
		5,457	28,8
^{242}Cm	163 дн.	6,113	74
		6,07	26
^{253}Es	20,5 дн.	6,633	90
		6,592	6,6

Гамма-излучение

Гамма-излучение испускается из возбужденного ядра при его переходе в состояния с более низкой энергией или в основное состояние. В большинстве применяемых лабораторных источников возбужденные состояния образуются при распаде исходного изотопа. На рис.2 приведены схемы распада двух наиболее используемых источников гамма-излучения -- ^{60}Co и ^{137}Cs. В обоих изотопах бета-распад приводит к заселению возбужденного состояния в дочернем ядре. Время жизни ядра в возбужденном состоянии значительно меньше чем времени жизни исходного изотопа. Процесс девозбуждения происходит с испусканием гамма-кванта с энергией равной разнице между энергиями основного и возбужденного состояний дочернего ядра. Таким образом, энергетический спектр гамма-излучения будет иметь дискретную структуру и характеризует энергетическую структуру дочернего ядра, в то время как интенсивность излучения определяется периодом полураспада родительского ядра. Так интенсивность гамма-излучения ^{60}Co уменьшается в соответствии с распадом ^{60}Co (период полураспада 5,26 лет), но энергетический спектр (полосы 1,33 МэВ и 1,17 МэВ) характеризуют структуру ядра ^{60}Ni. По вероятностям переходов в схеме распадов можно оценить количество распадов с испусканием гамма-квантов в родительском ядре. Дискретность энергетического спектра гамма-излучения позволяет использовать ряд изотопов с качестве калибровочных источников. Перечень таких источников приведен в таблице 3.

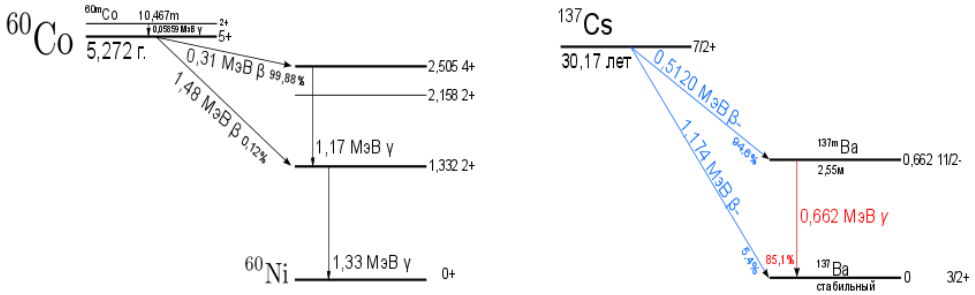


Рисунок 2. Распад изотопов 137-цезия и 60-кобальта

Энергия гамма-излучения широко применяемых гамма-источников не превышает 2,8 МэВ. При помощи изотопа ^{56}Co можно получить гамма-кванты с энергией до 3,55 МэВ, однако период полураспада данного материала составляет всего 77 дней, что ограничивает широкое применение данного изотопа. Для калибровки детекторов с большими энергиями применяется изотоп ^{16}Ni, с энергией гамма-излучения 6,13 и 7,11 МэВ, которое излучается при ,бета-распаде до ^{16}O, но время жизни ^{16}Ni составляет всего 7 секунд. Такие изотопы производятся только в реакторах или ускорителях.

Радиоактивность лабораторных калибровочных источников гамма-излучения невелика. Обычно активность изотопа не превышает нескольких микрокюри (около 10^5 Бк). Изотоп для лабораторного источника зачастую представляет собой порошок или тонкую пленку

нанесенную на пластиковый диск или стержень. В зависимости от энергии гамма-излучения такой источник помещается в специальный свинцовый контейнер определенной толщины.

На рисунке 3 приведены спектры некоторых изотопов, которые будут полезны при выполнении работы. Часть из них зарегистрирована с помощью полупроводникового детектора на основе германия, поэтому ширина пиков значительно меньше, чем при регистрации сцинтилляционным детектором.

Таблица 3. Основные источники гамма-излучения

Основные источники гамма-излучения

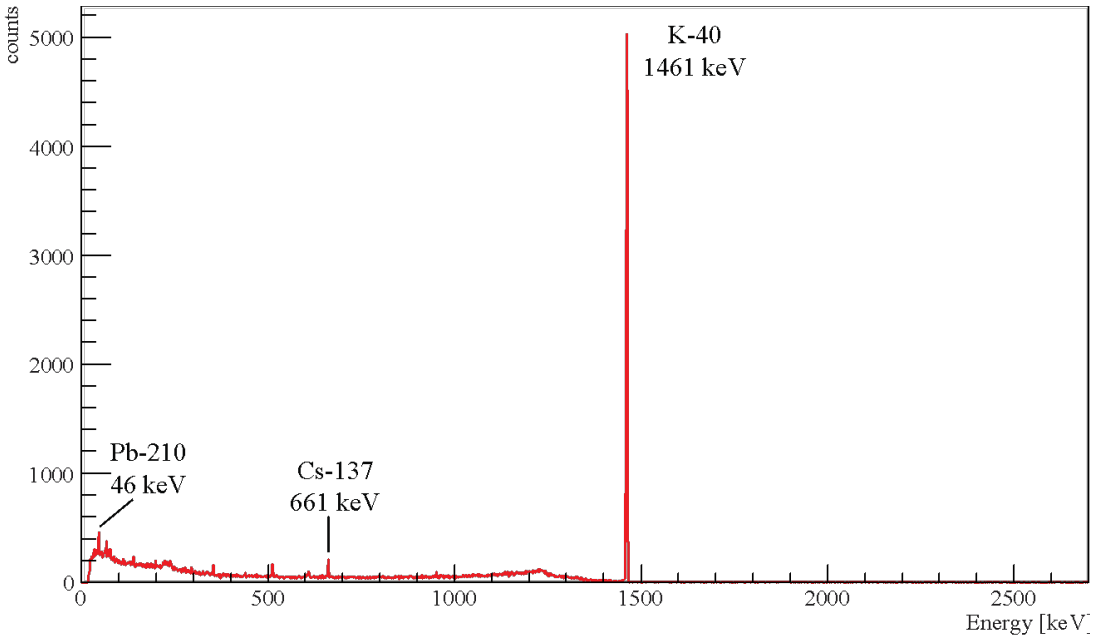
Изотоп	$T_{1/2}$	E, КэВ	I(%)
^{22}Na	2,6 г.	1274,5	99,95
^{40}K	$1{,}23 \cdot 10^9$ лет	1460	10,72
^{60}Co	5,27 лет	1173	99,88
		1332	99,98
^{133}Ba	10,5 лет	31[a]	64,5
		81	34
		302	18
		356	62
^{137}Cs	30,2 г.	32[b]	5,64
		662	85,3
^{226}Ra [c]	1600 лет	186	3,59
^{214}Pb [c]	26,8 мин	242	16
		295	42
		352	80
^{214}Bi [c]	19,9 мин	609	100
		768	10,9
		934	6,93
		1120	32,72
		1238	12,94
		1378	8,87
		1509	4,78
		1730	6,29
		1765	34,23
		1847	4,52
		2204	10,77
^{208}Tl [d]	3 мин	511	22,6
		583	84,5
		2615	99
^{212}Pb [d]	10,6 ч	239	43,3
^{228}Ac [d]	6,15 ч	338	11,3
		911	25,8
		969	15,8
^{241}Am	432 г.	59,5	36

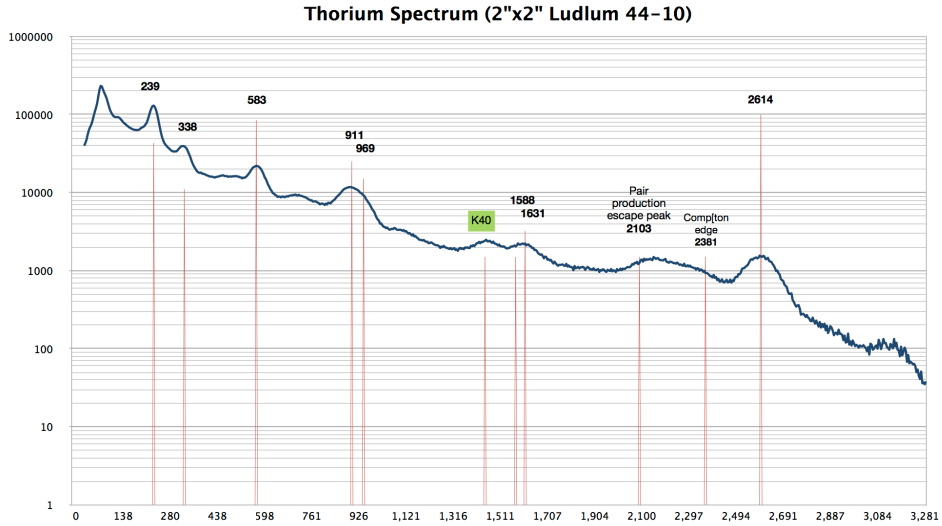
[a] Характеристическое K_α излучение ^{133}Cs.

[b] Характеристическое K_α излучение ^{137}Ba.

[c] Энергии элемента ^{226}Ra и его продукты распада в равновесии.

[d] Энергии продуктов распада ^{232}Th в равновесии.





Как было отмечено выше в природе наибольшее распространение имеют гамма-изотопы урана (238 и 235), тория-232 и 40-калия. В природе содержит 0,72% 235-урана от всего содержание урана. В отличие от другого, наиболее распространенного изотопа урана 238U, в 235U возможна самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция. Поэтому этот изотоп используется как топливо в ядерных реакторах, а также в ядерном оружии. Активность одного грамма данного нуклида составляет приблизительно 80 кБк.

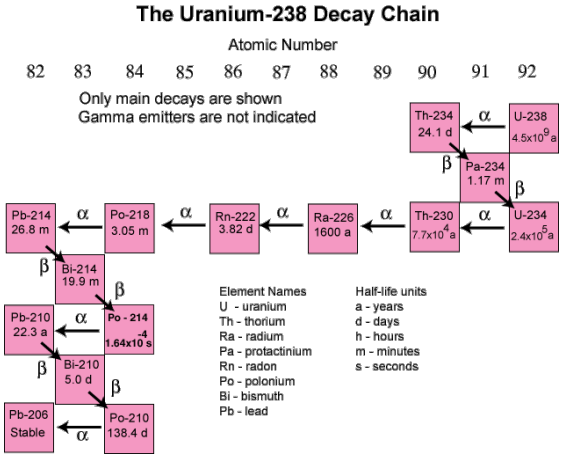


Рисунок 4. Схема распада 238-урана

Градуировка АЦП

АЦП сортирует выходные импульсы усилителя в соответствии с уровнем их напряжения, который пропорционален энергии, потерянной гамма-квантом в детекторе. Подобно соотношению между напряжением импульса и энергией гамма-кванта отношение между номером канала и энергией гамма-кванта приблизительно линейно. Это соотношение можно представить уравнением:

$$E=A*Канал+B$$

Наклон этой прямой зависит от коэффициента преобразования вспышки света в электрический импульс в ФЭУ и коэффициента усиления усилителя. Важным вопросом является определение величины B -- сдвига прямой вдоль оси X. Логично предположить, что B=0, тогда нулевому каналу соответствует нулевая энергия. Более того, точка пересечения оси E и наклон прямой могут быть отрегулированы таким образом, чтобы подогнать рассматриваемый энергетический диапазон в нужный диапазон каналов. Но для этого необходимо знать, какое значение B соответствует случаю нулевого канала с нулевой энергией. Одним словом, важным вопросом для перевода числа каналов в энергию является определение начала отсчета по шкале каналов АЦП. Особенно критичным этот вопрос становится при одновременном измерении маленьких и больших энергий, когда неправильное значение коэффициента B дает существенную ошибку при измерении одной из энергий.

Если проводится измерение в широком диапазоне энергий, то зависимость энергии от канала АЦП может быть нелинейной в области малых энергий. Это обусловлено ошибками АЦП при преобразовании сигналов малых амплитуд. Второй источник нелинейности — непропорциональность отклика детектора, что свойственно сцинтилляторам. Поэтому в общем

Существует простой метод определения градуировочной кривой. Возьмем калибровочный источник гамма-излучения, испускающий моноэнергетические гамма-кванты в широком диапазоне энергий. Часто в качестве такого источника применяют ^{226}Ra, а в области никзих энергий ^{241}Am. 241Am испускает гамма-кванты с энергиями 59,5 КэВ и 18 КэВ. Спектр источника 226Ra приведен на рис.5. Таким образом, чтобы произвести градуировку АЦП необходимо измерить спектры гамма-излучения от 241-америция и 226-радия и построить зависимость энергии пиков, определенной из таблицы 3, и номера канала, в котором находится пик. Далее необходимо подобрать наиболее подходящую градуировочную функцию, которая позволит определить энергии пиков любого неизвестного изотопа.

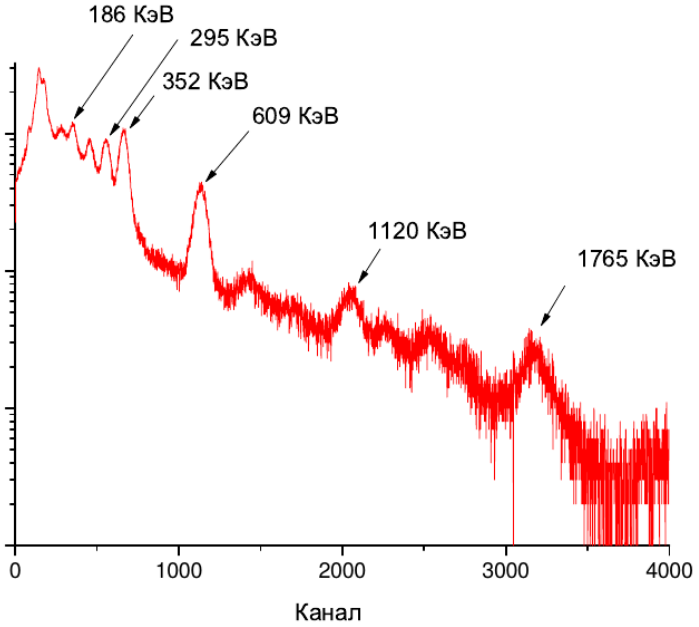


Рисунок 5. спектр изотопа радия-226

Для градуировки по радию используйте пики 609,352, 295, 242 и 186 КэВ.

Описание экспериментальной установки

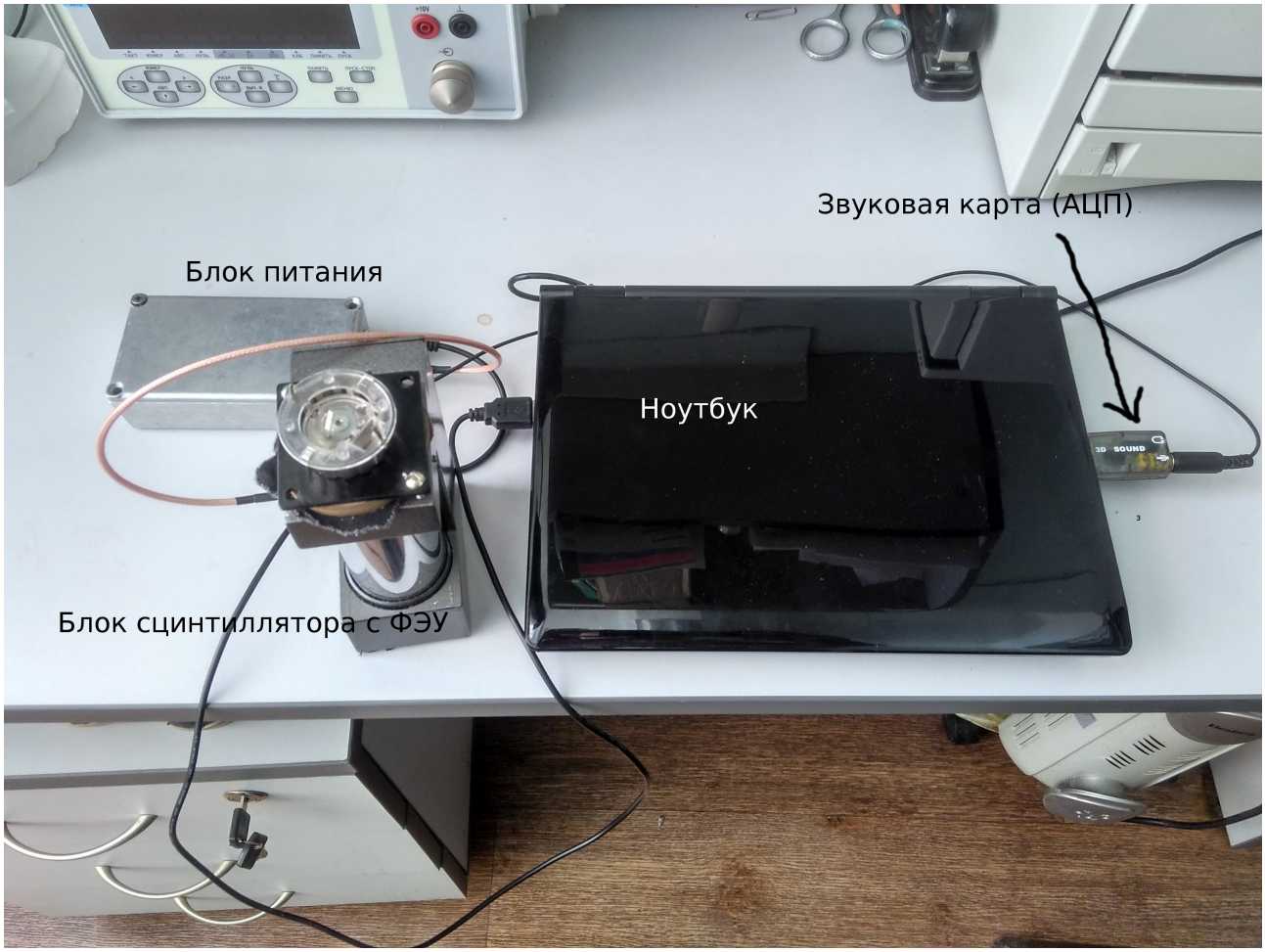
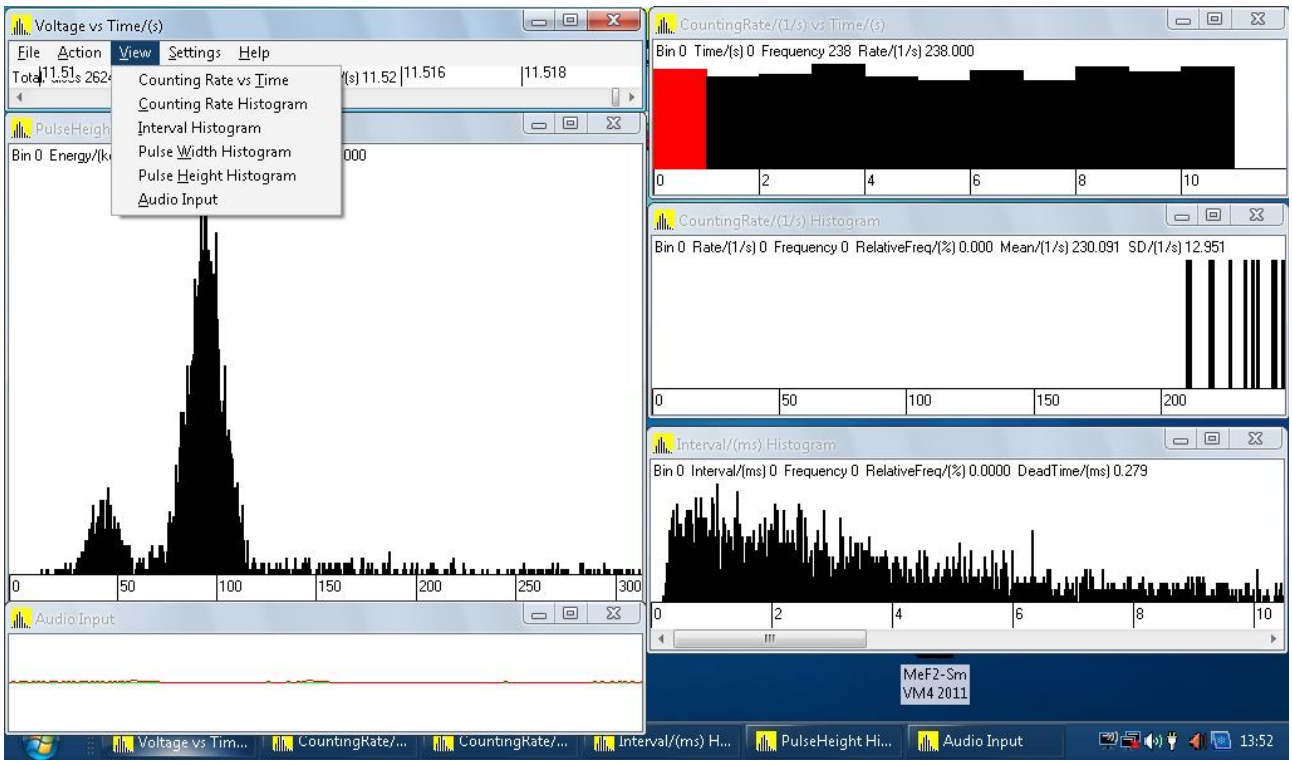
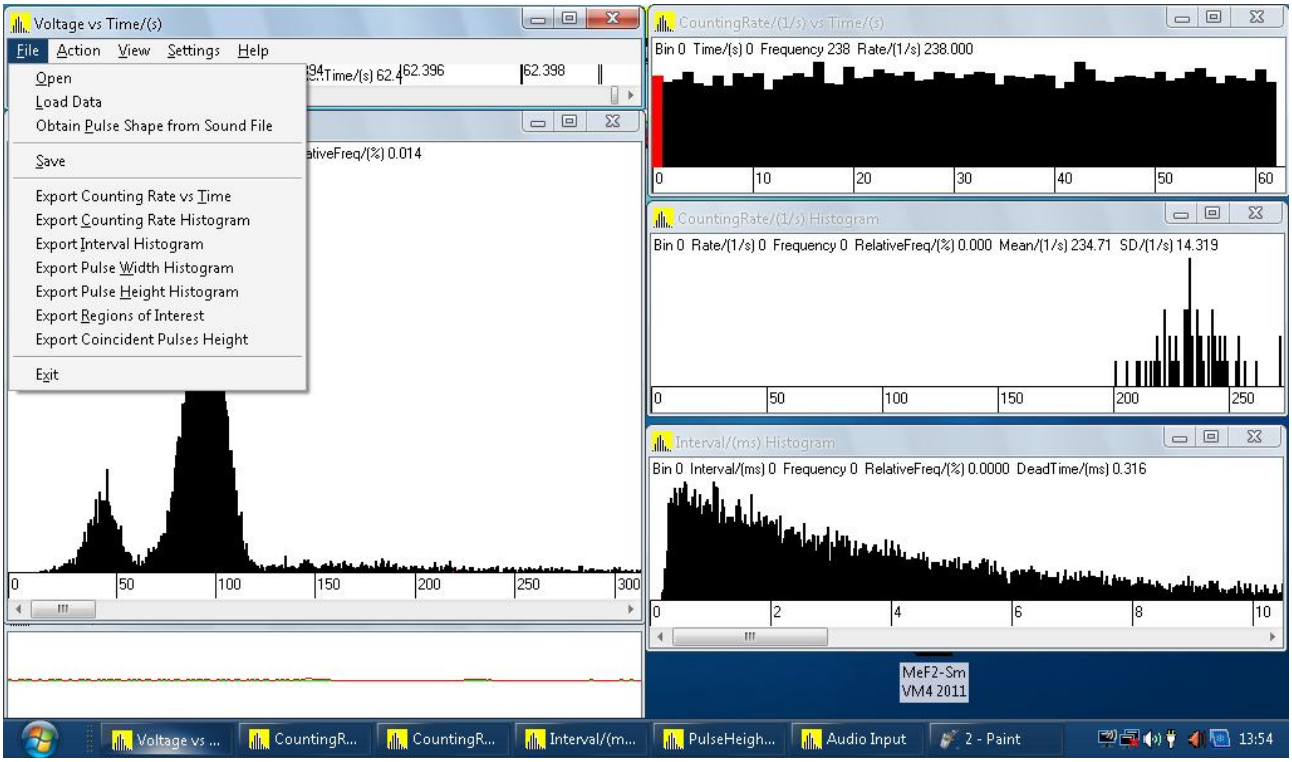


Рисунок 6. Измерительная установка.

Регистрация амплитудных спектров импульсов проводится с помощью установки представленной на рисунке 6. В блоке питания находится преобразователь напряжения 5 В, которое подается с usb-порта ноутбука, в напряжение 700 В, которое по коаксиальному кабелю подается на фотоумножитель (ФЭУ), на котором помещен сцинтиллятор CsI-Tl. Сигнал с ФЭУ передается по этому же кабелю и усиливается усилителем на основе эммитерного повторителя. Усиленный импульс передается на звуковую карту, подключенную к USB-порту.

Сигнал со звуковой карты обрабатывается с помощью программы PRA. На рисунке 7 приводятся скриншоты программы. Для выполнения работы необходимо открыть в программе следующие окна: Counting rate vs Time, Counting rate histogram, Interval Histogram, Pulse height histogram, Audio input. Данные окна можно выбрать во вкладке View главного меню. Чтобы запустить измерение необходимо войти во вкладку Action и нажать Start Data Acquision. После окончания накопления спектра необходимо сохранить данные в текстовый файл, для этого нужно нажать пункт Stop data Acquision в меню Action, далее перейти во вкладку File и выбрать Export нужных графиков.





Ход работы:

1) Отградуировать шкалу спектрометрического АЦП. Для этого произвести накопление амплитудного спектра импульсов от изотопов 226Ra, 241Am. Построить зависимость амплитуды импульса от энергии. В каких областях наблюдается наибольшее отклонение от линейности с чем это связано?

2) После того как шкала отградуирована можно приступать к измерению материалов, содержащих радиоактивные изотопы. Измерьте амплитудные спектры импульсов минерала, содержащего минерал настуран, чароит, куска соли. Сравните спектры различных веществ,

определите радиоактивные изотопы, содержащиеся в них. Определите родительский изотоп, нарисуйте схему распада, найдите в ней обнаруженные дочерние продукты.
3) Сравните активности измеренных изотопов. Активность какого из них можно оценить наиболее точно относительно 241Am, если известно, что его активность 0,8 мкКюри
4) Постройте распределение интервалов между импульсами (Interval Histogram), определение наиболее вероятный интервал между импульсами, как он зависит от расстояния от источника до сцинтиллятора. Определите величину мертвого времени, как мертвое время зависит от расстояния от источника до сцинтиллятора?
5) Постройте частотное распределение импульсов (Counting rate histogram). По какому закону распределены частоты импульсов?

Контрольные вопросы:

1) Каким образом можно отличить природный и обогащенный в лаборатории уран.
2) Объясните, каким образом можно измерить радиоактивность вещества
3) Назовите наиболее распространенные в природе радиоактивные изотопы. Какие из них наиболее опасны для человека
4) Назовите преимущества и недостатки сцинтилляционного детектора по сравнению со счетчиком Гейгера и другими методами регистрации ионизирующих излучений.

Литература:

1. Р. Ю. Шендрик Введение в физику сцинтилляторов-1, ИГУ, 2013, 105 с.
2. Р. Ю. Шендрик, Е. А. Раджабов, Введение в физику сцинтилляторов-2, ИГУ, 2014, 95 с