



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНЫЙ ПАРК

Образовательный ресурсный центр по направлению физика

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР

Учебно-методическое пособие
(описание лабораторной работы)

№ 2

Санкт-Петербург

2018

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов СПбГУ естественно-научных направлений обучения.

Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению физика Научного парка СПбГУ (<http://researchpark.spbu.ru>).

Сцинтилляционный гамма-спектрометр

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционный метод является в настоящее время одним из наиболее распространенных способов регистрации и спектрометрии ядерных излучений. Сцинтилляционные детекторы широко используются в ядерной физике для изучения спектров излучений радиоактивных нуклидов, для измерения времен жизни возбужденных состояний атомных ядер, для исследования космического излучения как в наземных лабораториях, так и на спутниках Земли, и для решения многих других задач. С помощью сцинтилляционного метода было сделано, например, такое важное открытие, как обнаружение нейтрино. Широкое применение сцинтилляционная техника нашла и в других отраслях науки: геологии (активационный анализ, поиски полезных ископаемых, определение возраста пород), биологии, медицине, изучении свойств твердого тела. Сцинтилляционная техника нашла широкое применение и в производстве: γ -дефектоскопия, различного вида бесконтактные толщиномеры и плотномеры, сигнальные устройства и т. д. Развитие сцинтилляционного метода стимулировало изучение люминесцентных процессов. Широкое использование сцинтилляционных детекторов объясняется такими их свойствами, как:

- 1) высокая эффективность регистрации (сцинтилляционный счетчик с кристаллом NaJ регистрирует 20—40% от числа попадающих на него γ -квантов с энергией 660 кэВ, в то время как счетчик Гейгера-Мюллера в тех же условиях регистрирует лишь 0,5% попавших на него квантов);
- 2) высокая временная разрешающая способность (10^{-7} — 10^{-9} с);
- 3) способность измерять энергии частиц и квантов (с точностью до нескольких процентов);
- 4) относительная простота аппаратуры.

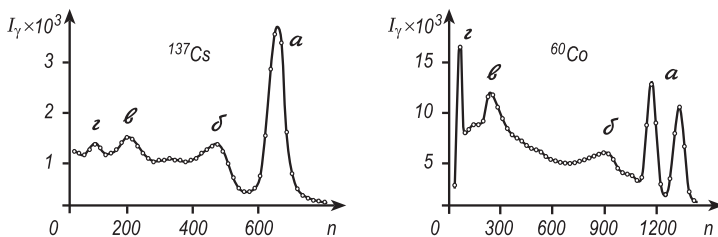


Рис. 56. Спектры γ -лучей препаратов ^{137}Cs ($E_{\gamma}=662$ кэВ) и ^{60}Co ($E_{\gamma_1}=1173$ кэВ и $E_{\gamma_2}=1332$ кэВ), измеренные с кристаллами $\text{NaJ}(\text{Tl})$ (n — номер канала, расшифровку других обозначений см. в §5)

К числу недостатков сцинтиляционного метода следует отнести сравнительно низкую разрешающую способность по энергии (8—10% при энергии γ -квантов 660 кэВ) и сложность обработки спектров, полученных на сцинтиляционном спектрометре. Даже в простейшем случае, когда нуклид излучает γ -кванты одной энергии, спектр имеет довольно сложный вид (рис. 56). Однако для решения многих научных и прикладных задач указанные недостатки не являются существенными.

§ 1. БЛОК-СХЕМА СЦИНТИЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Основными элементами простейшего однокристалльного сцинтиляционного спектрометра (см. рис. 57) являются: сцинтиллятор 1, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) 2, эмиттерный повторитель 3, спектрометрический усилитель 4,

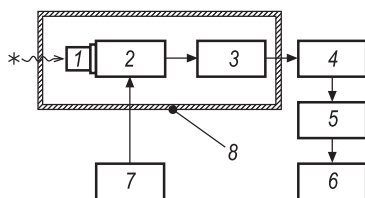


Рис. 57. Блок-схема сцинтиляционного γ -спектрометра

анализирующее 5 и регистрирующее 6 устройства. Для питания ФЭУ используется высоковольтный стабилизатор напряжения 7, обеспечивающий постоянство напряжения на электродах ФЭУ $\sim 0,1\%$. Сцинтиляционный кристалл, ФЭУ и формирователь помещаются в светонепроницаемый кожух 8.

При попадании частиц или γ -квантов в вещество сцинтиллятора в нем возникают световые вспышки (сцинтилляции). Сцинтилляции, с помощью фотоэлектронного умножителя преобразуются в импульсы тока. Интенсивность световой вспышки в сцинтилляторе пропорциональна энергии, потерянной частицей или γ -квантом в сцинтилляторе. Это свойство сцинтилляторов позволяет использовать их в спектрометрах заряженных частиц и γ -квантов. Анализ амплитуд импульсов на выходе ФЭУ и вместе с ним анализ энергии регистрируемых частиц и γ -квантов осуществляется *амплитудными анализаторами*.

§ 2. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС

Поглощение энергии веществом и ее последующее испускание в виде видимого или близкого к видимому излучения известно как *люминесценция*. Причинами, вызывающими люминесценцию, могут быть свет, нагревание, механические напряжения, химические реакции и воздействия заряженных частиц на вещество — люминофор. Вспышки света, вызванные заряженными частицами, обычно называют *сцинтилляциями*. В настоящее время существует много различных видов сцинтилляторов в твердом, жидком и газообразном состояниях.

Рассмотрим сцинтилляционный процесс в твердом неорганическом кристаллическом сцинтилляторе.

Под действием быстрой заряженной частицы электроны кристалла переходят из заполненной зоны в зону проводимости или на промежуточные уровни, если они существуют в данном кристалле. Возвращение электронов в основное состояние сопровождается испусканием фотонов, длина волны которых обычно лежит в интервале 100 – 700 нм, а полуширина спектральной характеристики составляет 100 нм. Спектр излучения кристалла должен перекрываться со спектральной характеристикой чувствительности применяемого ФЭУ.

В качестве сцинтилляторов берут такие кристаллы, для которых полоса поглощения лежит за пределами частот люминесцентного излучения. Обычно средняя частота основной полосы поглощения больше частоты, соответствующей средней длине волны люминесценции. В этом случае кристаллы будут прозрачны для собственного излучения. Например, сцинтилляция в кристалле

NaJ(Tl) имеет среднюю длину волны 410 нм, а спектр поглощения лежит в ультрафиолетовой области и имеет максимумы при 293 нм и 234 нм. Поэтому прозрачность кристалла NaJ(Tl) для собственного излучения (сцинтилляций) близка к 100%.

Часто в кристалл-сцинтиллятор вносят атомы примесных веществ — активаторов. Примерами таких кристаллов могут служить йодистый натрий, активированный таллием NaJ(Tl); сернистый цинк, активированный серебром ZnS(Ag) и др.

Введение активатора повышает *световыход*² кристалла. Существенной характеристикой сцинтиллятора является длительность световой вспышки. Изменение во времени числа фотонов $n_{\text{ф}}$ в сцинтилляции характеризуется быстрым нарастанием вначале и сравнительно медленным экспоненциальным спадом, поэтому длительность сцинтилляции можно определять постоянной времени затухания процесса τ , т. е. временем, в течение которого интенсивность световой вспышки уменьшится в e раз.

Кристаллы, употребляемые в качестве сцинтилляторов, должны быть флуоресцирующими, т. е. высвечивание возбужденных состояний в них должно происходить сразу после возбуждения. Обычно сцинтилляторы имеют $\tau = 10^{-7} \div 10^{-9}$ с.

Существует два широких класса кристаллических сцинтилляторов — неорганические и органические. Неорганические кристаллы представляют собой соли различных металлов, чаще всего щелочных. Активируются неорганические кристаллы атомами тяжелых металлов — Ag, Sn, Tl. Широкое применение получили галогениды щелочных металлов, активированные таллием — NaJ(Tl), CsJ(Tl). Эти кристаллы чаще всего используются для регистрации и спектрометрии γ -излучения. В процессе взаимодействия гамма-квантов с веществом сцинтиллятора в нем появляются быстрые электроны за счет фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования пар электрон-позитрон. Указанные кристаллы обладают высокой плотностью (3–5 г/см³) и большим эффективным порядковым номером $Z_{\text{эфф}}$ (от 30 до 50), поэтому сечения всех упомянутых процессов в этих кристаллах относительно велики. Эффективность регистрации³ η для

²Световыход — отношение среднего числа фотонов в одной сцинтилляции к энергии, потерянной заряженной частицей в сцинтилляторе.

³Эффективностью регистрации называется отношение зарегистрированных детектором частиц к полному числу частиц, попавших в детектор.

γ -лучей с энергией 1 МэВ составляет $\sim 20\%$ (для кристалла высотой $h=30$ мм и диаметром $\varnothing 45$ мм).

Альфа-частицы и другие тяжелые заряженные частицы обычно регистрируются тонкими слоями микрокристаллов ZnS(Ag), ZnS(Cu), ZnO. Общим недостатком неорганических кристаллов является их относительно большое время высвечивания $\tau \sim 10^{-7}$ с и более.

Органические сцинтилляторы представляют собой ароматические углеводороды, в состав которых входят бензольные кольца. Примерами органических сцинтилляторов могут служить кристаллы антрацена, стильбена, нафталина, раствора парфенила в полистироле и др. Преимуществами органических сцинтилляторов по сравнению с неорганическими является их малое время высвечивания ($\tau \sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с) и высокая эффективность регистрации электронов. Неорганические кристаллы для регистрации электронов обычно не используются, так как электроны испытывают сильное рассеяние на поверхности кристалла и не проникают в глубь кристалла. Для органических кристаллов $Z_{\text{эфф}} \approx 6$, плотность 1,1–1,3 г/см³.

Нейтроны непосредственно не производят ионизации, однако и их можно регистрировать с помощью сцинтилляционного метода. Быстрые нейтроны регистрируются за счет ионизации, производимой протонами отдачи, которые образуются при упругом рассеянии нейтронов на водороде, входящем в состав органических сцинтилляторов. Тепловые нейтроны можно регистрировать с помощью реакций (n, γ) на ядрах Eu и Cd, которыми активируется сцинтиллятор. Возникающее при этом γ -излучение регистрируется обычным способом. Реже используются реакции типа (n, α) на легких ядрах, например на литии, входящем в состав кристалла LiJ: ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^3\text{H} + \alpha$, однако при этом велик фон от сопутствующего γ -излучения.

§ 3. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ

Фотоумножитель служит для преобразования световых вспышек сцинтиллятора в импульсы электрического тока. Основными элементами ФЭУ являются фотокатод, система ускоряющих электродов (динодов) и анод, собирающий электроны.

Сцинтиллятор с помощью специальных масел или клея, обеспечивающих оптический контакт, прикрепляется к торцу стеклянного баллона ФЭУ (см. рис. 58). Изнутри на этот торец наносится полупрозрачный металлический слой, представляющий собой фотокатод. Свет сцинтилляций вырывает из фотокатода электроны, которые фокусируются на первый динод ФЭУ. Неоднородность покрытия фотокатода сильно влияет на амплитудное разрешение ФЭУ.

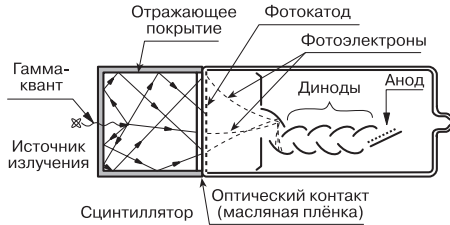


Рис. 58. Устройство ФЭУ

Попавшие на первый динод фотоэлектроны выбивают из него вторичные электроны, которые фокусируются и направляются на следующий динод. Материал динодов выбирается таким, чтобы коэффициент вторичной эмиссии был больше единицы. В этом случае происходит умножение числа электронов.

Полный коэффициент усиления ФЭУ

$$M = \Theta(\delta)^n,$$

где Θ — коэффициент, характеризующий сбор вторичных электронов динодами; n — число умножающих динодов; δ — коэффициент усиления на диноде. Коэффициент усиления ФЭУ сильно зависит от величины ускоряющего напряжения U на динодах. Эта зависимость выражается формулой

$$M = M_0 U^n,$$

где M_0 — некоторая постоянная величина для данного ФЭУ. Для поддержания постоянства M в пределах 1% требуется стабильность напряжения, подаваемого на ФЭУ, в пределах 0,01–0,1%.

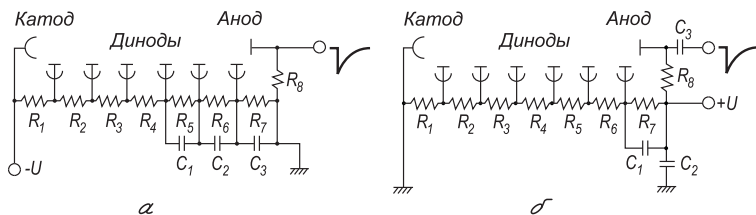


Рис. 59. Схема подачи высокого напряжения на диноды временного ФЭУ (а) и спектрометрического ФЭУ (б)

По своему применению ФЭУ делятся на спектрометрические и временные. Основным требованием, предъявляемым к спектрометрическим ФЭУ, является хорошая собственная амплитудная разрешающая способность. Например, у ФЭУ-29м, ФЭУ-С она составляет 4–5%. Лучшие временные ФЭУ характеризуются временем нарастания импульса тока $\sim 0,1 \div 2,0$ нс. Важной характеристикой ФЭУ является диаметр фотокатода. У наиболее распространенных ФЭУ диаметр фотокатода 15–45 мм. При использовании больших сцинтилляторов применяют ФЭУ, диаметр которых может достигать 290 мм.

Схема подачи высокого напряжения на диноды ФЭУ зависит от назначения ФЭУ. На рис. 59 показаны схемы включения ФЭУ, предназначенных для временного и спектрометрического режимов работы. Обычно $U \sim 600 \div 1500$ В, междинодные напряжения U_1, \dots, U_n порядка 100–200 В. Ток через делитель R_1, \dots, R_n должен быть на порядок больше, чем ток сигнала через ФЭУ.

§ 4. АНАЛИЗИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Амплитуда импульсов на выходе ФЭУ анализируется системой радиотехнических устройств, состоящей (см. блок-схему рис. 57) из усилителя-формирователя (в простейшем случае эмиттерного повторителя) 3, спектрометрического усилителя 4 и собственно анализатора 5. Формирователь 3 служит для согласования выхода ФЭУ с последующим усилителем и позволяет вынести электронную аппаратуру на значительное расстояние от источника излучения и детектирующей головки (сцинтиллятор и ФЭУ). Усилители, применяемые в сцинтилляционных спектро-

метрах, имеют сравнительно небольшой коэффициент усиления (10–100), однако к ним предъявляется ряд особых требований:

- 1) высокая стабильность коэффициента усиления;
- 2) линейность амплитудной характеристики;
- 3) достаточно широкая полоса пропускания (длительность импульса, поступающего с ФЭУ ~ 1 мкс, поэтому для передачи спектра импульсов без искажений необходима полоса пропускания до нескольких мегагерц);
- 4) способность работать без искажения спектра при больших скоростях счета (до $10^4 - 10^5$ имп/с).

Когда установка работает в режиме простого счетчика, импульсы с выхода формирователя 3 или усилителя 4 могут подаваться прямо на регистрирующее устройство. В этом случае требования 1) и 2) не являются столь существенными, как в спектрометрическом режиме.

Анализ спектра импульсов по амплитудам осуществляется специальными устройствами — *амплитудными анализаторами*. Амплитудный спектр импульсов тока на выходе ФЭУ подобен энергетическому спектру регистрируемого излучения, поэтому полученная с помощью анализатора зависимость числа импульсов от их амплитуды представляет собой зависимость числа зарегистрированных γ -квантов или частиц от их энергии.

Простейшим типом анализаторов является одноканальный анализатор (ОА). ОА регистрирует импульсы, амплитуды которых лежат в заданном интервале от v до $v + \Delta v$. Величина Δv определяет интервал амплитуд регистрируемых импульсов в данном канале и называется *шириной канала*. С выхода анализатора импульсы поступают на счетчик. В настоящее время одноканальные анализаторы не используются, а широко применяются многоканальные анализаторы (МА), осуществляющие набор информации одновременно по многим каналам ($N=1024$ и более). Обычно ширина канала в МА выбирается равной промежутку между двумя отдельными каналами.

Основными требованиями, предъявляемыми к амплитудным анализаторам, являются:

- 1) стабильность положения канала и его ширины;
- 2) быстродействие, т. е. способность работать при больших скоростях счета;
- 3) линейность амплитудной характеристики $N=f(E)$.

Современные МА включают в себя элементы ЭВМ (процессоры, микросхемы памяти, интерфейсы ввода/вывода и т. д.), позволяют более подробно и за меньшее время изучить спектр. В настоящее время разработаны весьма компактные МА, предназначенные как для работы в составе различных измерительных комплексов (блоки в конструктиве NIM и КАМАК), так и для установки в персональные компьютеры различных архитектур. Наибольшее распространение получили платы для IBM-PC совместимых компьютеров и анализаторы в конструктиве цоколя ФЭУ. В последнем случае в цоколе ФЭУ может также размещаться и высоковольтный источник напряжения.

В многоканальных анализаторах используются специальные устройства — *амплитудно-цифровые преобразователи* (АЦП). Назначение АЦП понятно из его названия — амплитуда сигнала на входе устройства преобразуется в число (обычно в двоичном коде) на выходе.

Принцип работы МА с АЦП прост. С выхода линейного усилителя на вход анализатора поступают импульсы с амплитудой до 5 В. Во входных каскадах анализатора происходит запоминание сигнала и определение момента времени, когда достигается максимальная амплитуда импульса. В этот момент происходит запуск преобразования и через некоторый промежуток времени (*время преобразования*) на выходе АЦП появляется число, соответствующее амплитуде анализируемого импульса. Это число также является номером ячейки памяти. Тогда в соответствующую ячейку памяти (*канал*) добавляется единица (импульс). Таким образом, для входных импульсов разных амплитуд будут заполняться разные ячейки памяти, т. е. разным амплитудам будут соответствовать разные каналы. После накопления достаточно большого числа импульсов производится считывание числа импульсов, зарегистрированных в каждом канале.

Для определения зависимости $N=f(E)$ обычно производят *градировку спектрометра* по γ -линиям известных нуклидов.

§ 5. ФОРМА γ -СПЕКТРА, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Взаимодействие γ -излучения с веществом сцинтиллятора складывается из трех процессов — фотопоглощения, комптонов-

ского рассеяния и образования пар электрон-позитрон. Полная передача энергии γ -кванта сцинтиллятору происходит главным образом в процессе фотопоглощения. При комптоновском рассеянии часть энергии уносится рассеянными γ -квантами, вылетающими из кристалла. При образовании пар возникающие аннигиляционные γ -кванты также могут выйти из кристалла. В обоих случаях величина вспышки уменьшается по сравнению с величиной вспышки, соответствующей полному поглощению. Таким образом, даже для монохроматического γ -излучения форма спектра имеет сложный вид. На рис. 56 показаны спектры препаратов ^{137}Cs , излучающего γ -кванты с энергией 662 кэВ и ^{60}Co , излучающего γ -кванты с энергиями 1173 и 1332 кэВ. Отчетливо видны пики полного поглощения (а). Непрерывное распределение импульсов меньших амплитуд создается электронами отдачи при комптоновском рассеянии γ -квантов в сцинтилляторе с последующим вылетом γ -квантов из кристалла (б). Согласно теории комптон-эффекта распределение электронов отдачи характеризуется возрастанием их числа вблизи граничной энергии. Это соответствует широкому максимуму в комптоновском распределении. Происхождение другого максимума («пик обратного рассеяния») связано с регистрацией γ -квантов, рассеянных на большие углы (150° – 180°) в окружающей защите (в). Из теории комптон-эффекта следует, что положение этого пика слабо зависит от энергии падающих γ -квантов и для источников γ -излучения с E_γ до 3000 кэВ положение пика обратного рассеяния соответствует энергии электронов отдачи 70–400 кэВ, в среднем ~ 140 кэВ.

При применении кристаллов NaJ и CsJ в области энергий падающих γ -квантов ниже 300 кэВ в спектре бывает виден пик вылета, связанный с выходом рентгеновских квантов йода из кристалла. Рентгеновские кванты йода образуются в результате появления вакансии на K -оболочке атома йода при фотопоглощении. Если рентгеновские кванты образовались вблизи поверхности кристалла, имеется определенная вероятность их вылета из кристалла и вспышка, соответствующая полному поглощению, ослабляется. Положение пика вылета соответствует энергии $E_\gamma - E_K$ ($E_K = 28,5$ кэВ — энергия K -рентгеновских лучей йода).

При энергии γ -лучей больше 1022 кэВ в аппаратурном спектре появляются дополнительные пики, соответствующие вылету из кристалла одного или двух аннигиляционных γ -квантов (при

$E_\gamma > 1022$ кэВ начинается процесс образования пар электрон-позитрон). Эти пики соответствуют энергиям: $E_1 = E_\gamma - 511$ кэВ и $E_2 = E_\gamma - 1022$ кэВ.

Как правило, радиоактивные источники окружены защитой, чаще всего свинцовой. При попадании γ -излучения или заряженных частиц на материал защиты в ней возникает характеристическое рентгеновское излучение. Для свинца энергия этого излучения составляет 75 кэВ (K -рентгеновское излучение). Если не принято специальных мер, в аппаратурном спектре появляется пик, соответствующий этой энергии (z).

В спектре ^{60}Co присутствует так называемый *пик суммы*. „Энергия“ пика суммы соответствует суммарной энергии каскадно испускаемых гамма-квантов, одновременно попавших в сцинтиллятор ($E_{\text{сумм.}} = 1173$ кэВ + 1332 кэВ = 2505 кэВ). Интенсивность пика суммы заметно слабее интенсивности пиков полного поглощения.

Спектры монохроматического γ -излучения характеризуются следующими величинами:

1) *разрешающей способностью R спектрометра*, численно равной отношению ширины пика полного поглощения на полувысоте (в энергетических единицах) к энергии γ -излучения (см. рис. 25 на с. 71). Обычно для γ -лучей ^{137}Cs ($E_\gamma = 662$ кэВ) разрешающая способность составляет от 7 до 12%. Для γ -лучей с большей энергией разрешающая способность улучшается. Обычно $R \sim 1/\sqrt{E_\gamma}$;

2) *фоточастью*, численно равной отношению площади, ограничивающей пик полного поглощения, к площади всего спектра. Для увеличения площади пика полного поглощения следует брать кристаллы больших размеров;

3) *эффективностью*, численно равной отношению числа γ -квантов, зарегистрированных спектрометром к числу попавших в спектрометр γ -квантов. Эффективность зависит от энергии γ -квантов и убывает с возрастанием энергии γ -лучей. Например, для кристалла с размерами $h=30$ мм и $\varnothing 45$ мм для $E_\gamma = 662$ кэВ эффективность достигает 40%, а для $E_\gamma = 1200$ кэВ не превышает 20% (см. рис. 60 на с. 129);

Полупроводниковые детекторы излучений по своим спектроскопическим свойствам значительно превосходят сцинтилляционные кристаллы. Например, разрешение полупроводникового

Ge(Li)-детектора составляет 3–5 кэВ, что соответствует разрешающей способности 0,5–1,0% для γ -лучей с энергией 662 кэВ (^{137}Cs). Разрешающая способность лучших сцинтилляционных спектрометров для этой же энергии составляет 7–8%. Однако полупроводниковые спектрометры гораздо сложнее сцинтилляционных, так как в них необходимо использовать высокочувствительные усилители и охлаждать детекторы до температуры -180°C . Полупроводниковые спектрометры по эффективности уступают сцинтилляционным.

В табл. 10 на с. 130 приведены значения энергии E_γ и интенсивности I_γ γ -лучей радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки γ -спектрометров.

§ 6. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Работа выполняется на установке, схематично изображенной на рис. 57. Детектор (кристалл сцинтиллятора, ФЭУ и формирователь) окружен свинцовой защитой для снижения фона. В качестве анализирующего и регистрирующего устройств используется многоканальный анализатор импульсов. Измеряемые спектры отображаются на экране монитора, их можно сохранить в файле, а по окончании опыта обработать и распечатать на принтере. В каждом опыте используют несколько радиоактивных источников, из которых 2–3 являются градуировочными.

Все измерения надо производить с одними и теми же коэффициентом усиления и значением высокого напряжения.

Задание 1. Измерить спектры γ -излучения градуировочных источников и сохранить их в файлах. Затем измерить спектры нескольких исследуемых радиоактивных источников и также сохранить их. По окончании опыта повторить измерение спектров градуировочных источников.

Задание 2. Произвести обработку спектров — определить площади, положения и ширины пиков полного поглощения и полные площади спектров.

Для калибровки использовать среднее значение положений линий, полученных из калибровочных спектров, измеренных в начале и по окончании опыта. Построить градуировочную кривую спектрометра и определить его характеристики. Коэффициенты кривой вычислить по методу наименьших квадратов.

Задание 3. По градуировочной кривой определить энергию гамма-лучей исследуемых нуклидов. По энергиям и интенсивностям гамма-линий (с учетом эффективности спектрометра) определить нуклиды (см. табл. 10).

Задание 4. По измеренным спектрам определить разрешающую способность спектрометра R . Построить график $R = f(E_\gamma)$. Проверить выполнение зависимости $R \sim 1/\sqrt{E_\gamma}$.

Кроме того, в отчете представить блок-схему установки с описанием опыта, результаты в виде таблиц и графиков (в том числе графиков спектров), характеристики спектрометра, объяснение формы спектров, выводы.

§ 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Регистрация различных ядерных излучений сцинтилляторами. Сцинтилляционный процесс.
2. Свойства сцинтилляционных детекторов. Достоинства и недостатки по сравнению с другими методами регистрации.
3. Типы сцинтилляционных кристаллов, их достоинства и недостатки.
4. Принцип действия γ -спектрометра с использованием сцинтилляционного кристалла.
5. Блок-схема сцинтилляционного гамма-спектрометра. Требования к отдельным блокам.
6. Что такое ФЭУ, принцип работы. Типы ФЭУ и схемы их включения.
7. Какие анализирующие устройства применяют в спектрометрах?
8. Характеристики сцинтилляционного гамма-спектрометра.
9. Объясните вид спектра гамма-лучей (на примере ^{137}Cs или ^{60}Co), зарегистрированный сцинтилляционным спектрометром с использованием кристалла NaJ .
10. Методика определения энергии гамма-лучей с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра. Порядок выполнения работы.

Литература

1. В.О.Сергеев, «Практикум по ядерной физике», Спб, 2006
2. Дж.Биркс, Сцинтилляционные счетчики, М., ИЛ, 1955.
3. Н.А.Соболева и др., Фотоэлектронные приборы. М., «Наука», 1965.
4. Н.А.Варганов, П.С.Самойлов. Применение метода сцинтилляционной гамма-спектроскопии. М., Физматгиз, 1964.
5. Ю.Е.Егоров. Сцинтилляционные методы спектрометрии γ -излучения и быстрых нейтронов. М., Атомиздат, 1963.
6. В.О.Вяземский, И.И.Ломоносов и др., Сцинтилляционный метод в радиометрии. М., Атомиздат, 1961.

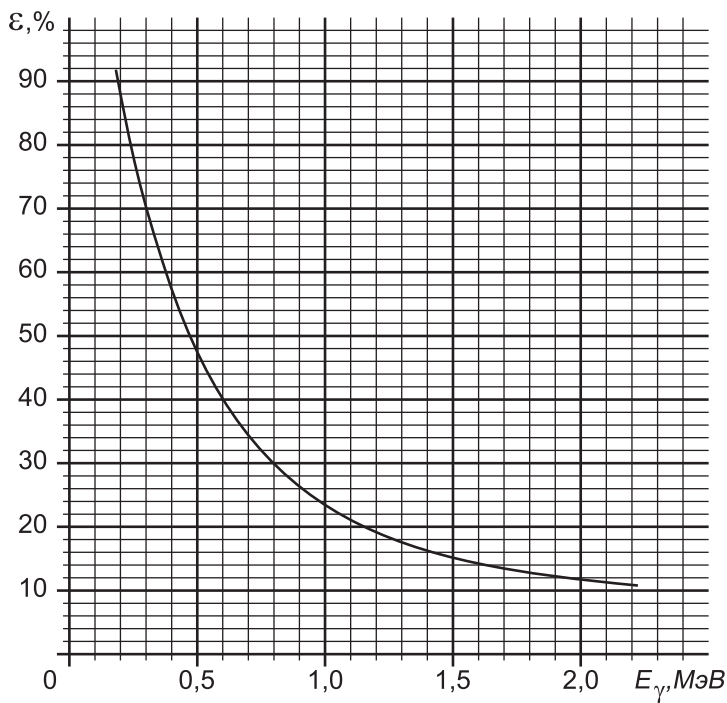


Рис. 60. Зависимость эффективности регистрации ε γ -детектора с кристаллом NaJ(Tl) (высота $h=30$ мм, диаметр $\varnothing 45$ мм) от энергии γ -лучей

Таблица 10. Нуклиды, используемые для калибровки γ -спектрометров.

Нуклид	$T_{1/2}$	E_{γ} , кэВ	I_{γ} , % от числа распадов
^{22}Na	2,66 (2)* года	1274,53 (2) 511,0034 (14)	99,937 (15) 179 (2)
^{24}Na	14,659 (4) час.	1368,598 (6) 2753,995 (14)	100 99,944 (5)
^{51}Cr	27,704 (4) дн.	320,084 (6)	98,3 (14)
^{54}Mn	312,20 (7) дн.	834,826 (11)	99,975 (2)
^{60}Co	5,271 (1) года	1173,237 (4) 1332,501 (5)	99,90 (2) 99,9824 (5)
^{65}Zn	244,1 (2) дн.	511,0034 (14) 1115,528 (22)	2,92 (3) 50,75 (10)
^{88}Y	106,61 (2) дн.	898,065 (17) 1836,077 (18)	92,71 (7) 99,35 (1)
^{95}Nb	34,97 (3) дн.	765,789 (9)	99,79 (1)
^{109}Cd	1,2665 (11) года	88,034 (11)	3,6 (1)
^{114}In	49,51 (1) дн.	190,28 (3) 558,43 (10) 725,24 (12)	15,4 (3) 4,4 (3) 4,3 (3)
^{137}Cs	30,0 (2) года	661,660 (2)	85,21 (7)
^{198}Au	2,6935 (4) дн.	411,8045 (10)	95,50 (10)
^{203}Hg	46,60 (2) дн.	279,188 (3)	81,5 (5)
^{207}Bi	32,2 (13) года	569,150 (19) 1063,10 (2) 1769,71 (4)	97,8 (4) 74,9 (15) 6,85 (20)

* — в скобках указана погрешность: 2,66(2) означает $2,66 \pm 0,02$

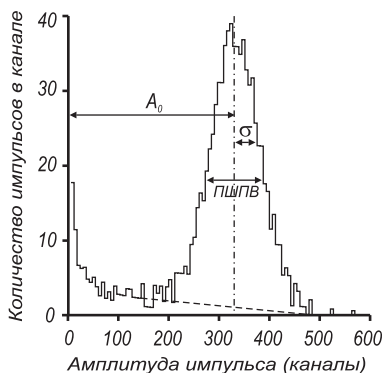


Рис. 25. К определению разрешающей способности:
ПШПВ — полная ширина на полувысоте; $\sigma = \text{ПШПВ}/2,36$ — стандартное отклонение; A_0 — амплитуда импульса в максимуме распределения; σ/A_0 — относительное разрешение; $R = \text{ПШПВ}/A_0$ — разрешающая способность

Задание 2. Определить параметры α -линий в калибровочных спектрах, в том числе положения максимумов линий $N_i^{(max)}$. За окончательное положение линии принять среднее двух значений, полученные из калибровочных спектров. Найденные величины $N_i^{(max)}$ сопоставить энергиям α -линий, определить зависимость номера канала от энергии $N=f(E)$ и построить градуировочный график спектрометра. Коэффициенты уравнения градуировочной кривой определить по методу наименьших квадратов.

Задание 3. Определить положения максимумов α -линий $M_i^{(max)}$ в спектрах исследуемых нуклидов. Используя градуировочный график определить энергии α -линий в спектрах. С помощью табл. 7 на с. 74 по значениям энергий идентифицировать неизвестные нуклиды.

В отчете представить блок-схему экспериментальной установки, измеренные спектры, градуировочный график спектрометра, значения энергий α -линий калибровочного и неизвестных нуклидов (с погрешностями), полученные из градуировочного графика, их идентификацию, значение цены канала в единицах «кэВ/канал» и разрешение спектрометра (в кэВ), выводы.