

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы 5.5

Компьютерная сцинтилляционная γ -спектрометрия

Соболевский Федор Александрович
Старокожко Иван Георгиевич Б05-111

Декабрь 2023

Теоретические положения

Основная задача спектрометрических измерений заключается в определении энергии, интенсивности дискретных гамма-линий от различных гамма-источников и их идентификации.

Основными процессами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар. Каждый из этих процессов вносит свой вклад в образование наблюдаемого спектра. Образующиеся при этих процессах электроны испытывают большое количество неупругих соударений с молекулами и атомами среды. Неупругие соударения могут сопровождаться как ионизацией, так и возбуждением молекул или атомов среды. В промежуточных же стадиях (при переходах возбужденных молекул или атомов в основное состояние, при рекомбинации электрических зарядов и т.п.) в веществе возникают кванты света различных длин волн, присущих данному веществу.

При **фотоэффекте** кинетическая энергия электрона $T_e = E_\gamma - I_i$, где I_i — энергия ионизации i -той оболочки атома. Фотоэффект особенно существенен для тяжелых веществ, где он идет с заметной вероятностью даже при высоких энергиях гамма-квантов. В легких веществах фотоэффект становится заметен лишь при относительно небольших энергиях гамма-квантов. Наряду с фотоэффектом, при котором вся энергия гамма-кванта передается атомному электрону, взаимодействие гамма-излучения со средой может приводить к его рассеянию, т.е. отклонению от первоначального направления распространения на некоторый угол.

При **эффекте Комптона** происходит упругое рассеяние фотона на свободном электроне, сопровождающееся изменением длины волны фотона (реально этот процесс происходит на слабо связанных с атомом внешних электронах). Максимальная энергия образующихся комптоновских электронов соответствует рассеянию гамма-квантов на 2π и равна

$$E_{max} = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{m_e c^2}{2\hbar\omega}} \quad (1)$$

При достаточно высокой энергии гамма-кванта наряду с фотоэффектом и эффектом Комптона может происходить третий вид взаимодействия гамма-квантов с веществом — **образование электрон-позитронных пар**. При этом если процесс образования пары идет в кулоновском поле ядра или протона, то энергия образующегося ядра отдачи оказывается весьма малой, так что пороговая энергия гамма-кванта, необходимая для образования пары, практически совпадает с удвоенной энергией покоя электрона $E_0 = 2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ}$.

Появившийся в результате процесса образования пар электрон теряет свою энергию на ионизацию среды. Таким образом, вся энергия электрона остается в детекторе. Позитрон будет двигаться до тех пор, пока практически не остановится, а затем аннигилирует с электроном среды, в результате чего появятся два гамма-кванта. Т.е., кинетическая энергия позитрона также останется в детекторе. Далее возможны три варианта развития событий:

а) оба родившихся гамма-кванта не вылетают из детектора, и тогда вся энергия первичного гамма-кванта останется в детекторе, а в спектре появится пик с $E = E_\gamma$;

б) один из родившихся гамма-квантов покидает детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии $E = E_\gamma - E_0$, где $E_0 = m_e c^2 = 511 \text{ кэВ}$;

в) оба родившихся гамма-кванта покидают детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии $E = E_\gamma - 2E_0$, где $2E_0 = 2m_e c^2 = 1022 \text{ кэВ}$;

Таким образом, любой спектр, получаемый с помощью гамма-спектрометра, описывается несколькими компонентами, каждая из которых связана с определенным физическим процессом. Как описано выше, основными физическими процессами взаимодействия гамма-квантов с веществом являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар, и каждый из них вносит свой вклад в образование спектра. Помимо этих процессов, добавляются экспонента, связанная с наличием фона, пик характеристического излучения, возникающий при взаимодействии гамма-квантов с окружающим веществом, а также пик обратного рассеяния, образующийся при энергии квантов $E_\gamma \gg m_e c^2/2$ в результате рассеяния гамма-квантов

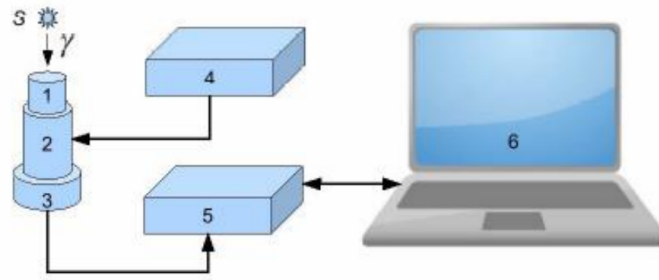


Рис. 1: Принципиальная блок-схема спектрометра. (1 – сцинтиллятор, 2 – ФЭУ, 3 – предусилитель импульсов, 4 – высоковольтный блок питания для ФЭУ, 5 – блок преобразования аналоговых импульсов с ФЭУ в цифровой код (АЦП), 6 – компьютер для сбора данных, их обработки и хранения).

на большие углы на материалах конструктивных элементов детектора и защиты. Положение пика обратного рассеяния определяется по формуле (E — энергия фотопика):

$$E_{\text{обр}} = \frac{E}{1 + \frac{2E}{mc^2}} \quad (2)$$

Экспериментальная установка

Энергетическим разрешением спектрометра называется величина

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i} \quad (3)$$

т.е. отношение ширины пика полного поглощения (измеренной на полувысоте) к регистрируемой энергии пика поглощения. Это значение $E_i \propto \bar{n}_i$ — числу частиц на выходе ФЭУ. При этом $\Delta E_i \propto \Delta \bar{n}_i = \sqrt{\bar{n}_i}$ — ширина пика пропорциональна среднеквадратичной флуктуации, которая равна корню из числа частиц. Таким образом, наша формула (3) примет вид

$$R_i = \frac{\text{const}}{\sqrt{E_i}} \quad (4)$$

Принципиальная блок-схема гамма-спектрометра, изучаемого в данной работе, показана на рис. 1. ФЭУ со сцинтиллятором и блоком питания установлены на отдельной подставке. В нашей работе на разных установках (стендах) в качестве сцинтиллятора используются кристаллы NaI(Tl).

Результаты измерений и обработка экспериментальных данных

Перед началом работы с образцами был измерен фон, присутствующий во время каждого эксперимента. Спектр фонового излучения представлен на рис. 2. В дальнейшем мы будем из полученных для образцов результатов вычитать этот фон.

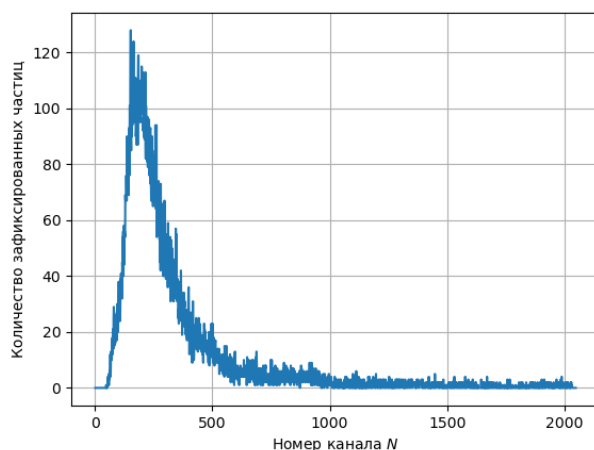


Рис. 2: Спектр фонового излучения

Были измерены спектры для следующих веществ: ^{60}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am . Графики представлены на рис. 5, 6 и 7. По этим графикам определим пики, соответствующие фотопикам ^{60}Co , ^{22}Na и ^{137}Cs (см. таблицу 1) и построим по этим данным калибровочный график $E = E(N)$ (см. рис. 3). Полученная методом наименьших квадратов зависимость и погрешности коэффициентов:

$$E = aN + b, \quad \text{где } a = (0,767 \pm 0,003) \text{ кэВ}, b = (-47,9 \pm 3,8) \text{ кэВ}. \quad (5)$$

	^{60}Co		^{22}Na		^{137}Cs
Энергия пика E , МэВ	1,173	1,332	0,511	1,274	0,662
Номер линии N	1592	1804	729	1720	926

Таблица 1: Энергии пиков, используемые для калибровки

Используя калибровочную зависимость, пересчитаем данные о положении и ширине пиков для всех спектров и вычислим для каждого значение разрешающей способности R по формуле (3).

	^{60}Co		^{22}Na		^{137}Cs	^{152}Eu			^{241}Am
Центр пика N	1592	1804	729	1720	926	114	228	512	144
Полуширина пика ΔN	81	72	54	75	60	17	16	37	13
Энергия пика E , МэВ	1,173	1,332	0,511	1,274	0,662	0,395	0,127	0,345	0,063
Полуширина ΔE , МэВ	0,062	0,055	0,041	0,057	0,046	0,013	0,012	0,028	0,010
Разрешение R	0,053	0,041	0,081	0,045	0,069	0,330	0,097	0,082	0,159

Таблица 2: Параметры пиков и соответствующие им значения разрешения спектрометра

График зависимости $R^2 = f(1/E)$ приведён на рис. 4. В целом зависимость довольно хорошо аппроксимируется линейной с одним выбросом и коэффициентом $k = (239 \pm 20) \text{ МэВ}$.

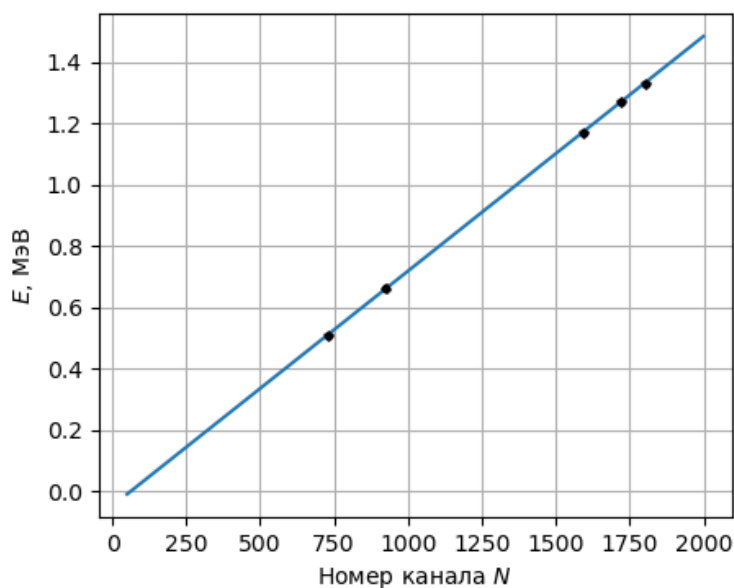


Рис. 3: Калибровочный график зависимости энергии квантов от номера канала

Вывод

Нам удалось с помощью сцинтиляционного спектрометра исследовать спектры нескольких слабо радиоактивных веществ. Полученные графики хорошо соотносятся с приведёнными в пособии, а положения пиков дают практически идеальную калибровочную прямую для дальнейших измерений. При установлении зависимости разрешающей способности от энергии γ квантов возникли погрешности из-за значений, близких к нулю, которые вносят большую ошибку при расчетах.

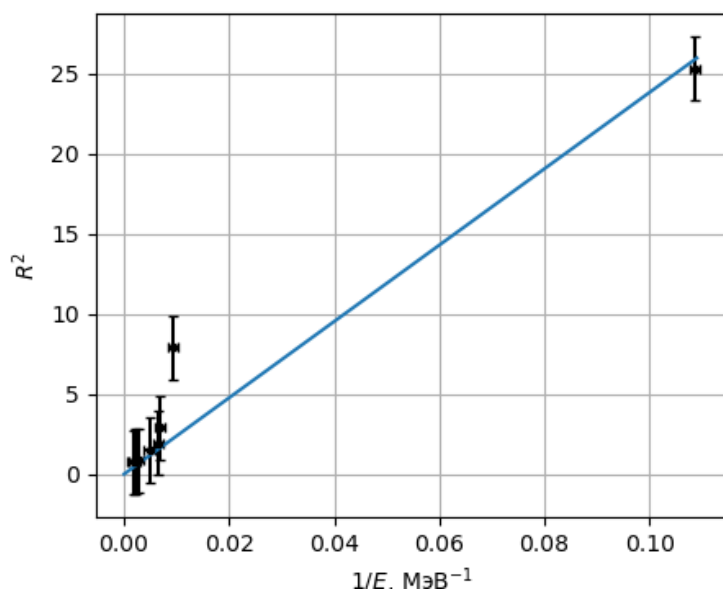


Рис. 4: График зависимости $R^2(1/E)$

Приложение

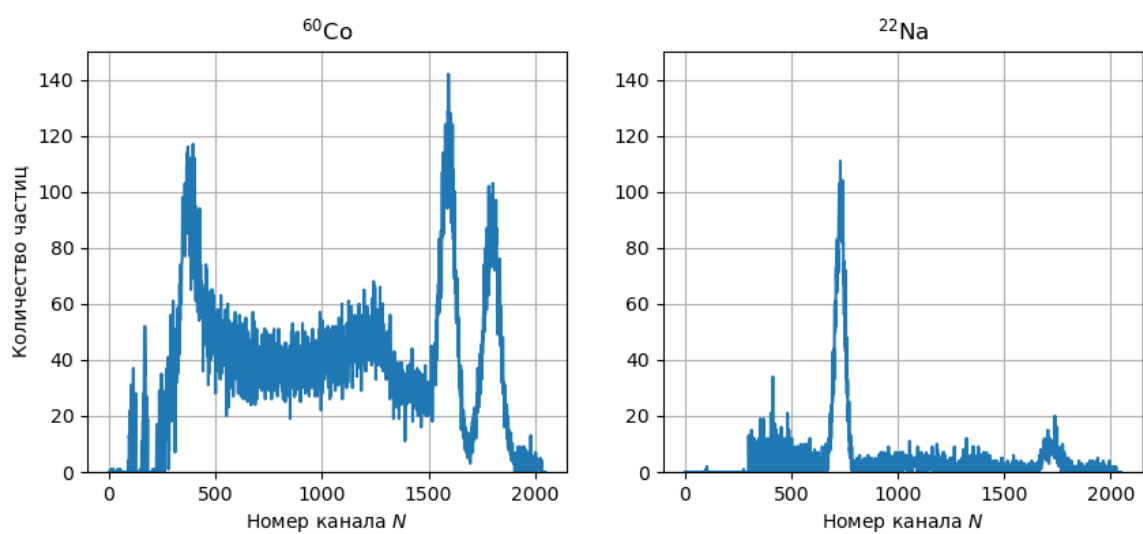


Рис. 5: Спектр излучения изотопов ^{60}Co , ^{22}Na

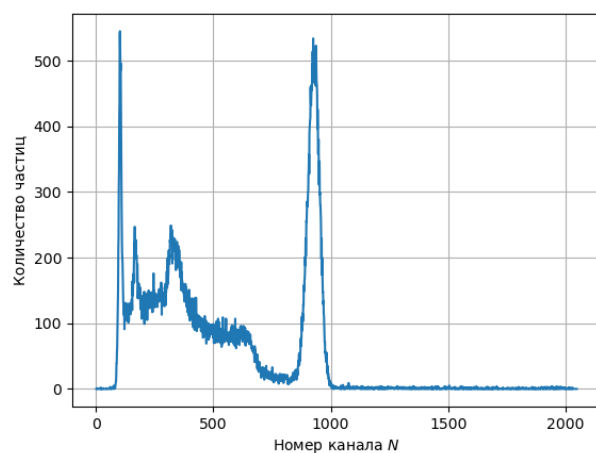


Рис. 6: Спектр излучения изотопа ^{137}Cs

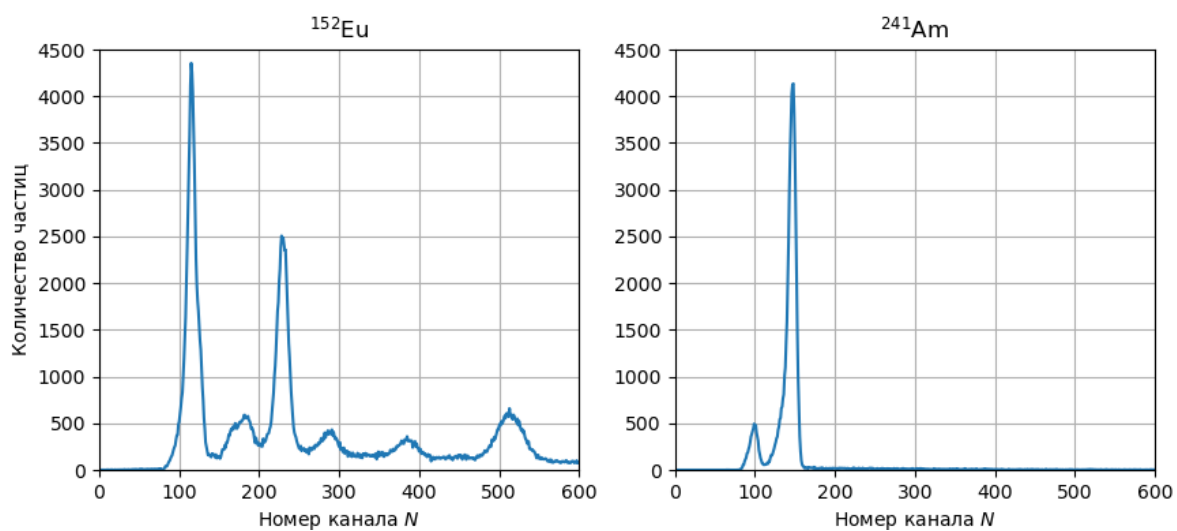


Рис. 7: Спектр излучения изотопов ^{152}Eu и ^{241}Am