

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Лабораторная работа 5.5.5
« γ -спектроскопия»

Шумаков Иван Игоревич
студент группы Б01-009
3 курс ФРКТ

г. Долгопрудный
2022 г.

Цель работы: Определение энергии и интенсивности дискретных гамма-линий от различных гамма-источников и их идентификация.

В работе используются: Различные материалы, детектор.

1 Теоретические сведения

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

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

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 эксконента, связанная с наличием фона, пик характеристического излучения, возникающий при взаимодействии гамма-квантов с окружающим веществом, а также пик обратного рассеяния, образующийся при энергии квантов $\gamma \gg mc^2/2$ в результате рассеяния гамма-квантов на большие углы на материалах конструктивных элементов детектора и защиты. Положение пика обратного рассеяния определяется по формуле (E — энергия фотопика):

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

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 $\Delta E_i \propto \overline{\Delta n_i} = \sqrt{\bar{n}_i}$

— ширина пика пропорциональна среднеквадратичной флуктуации, которая равна корню из числа частиц. Таким образом, наша формула (3) примет вид

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

2 Ход работы

В ходе работы были получены спектры материалов:

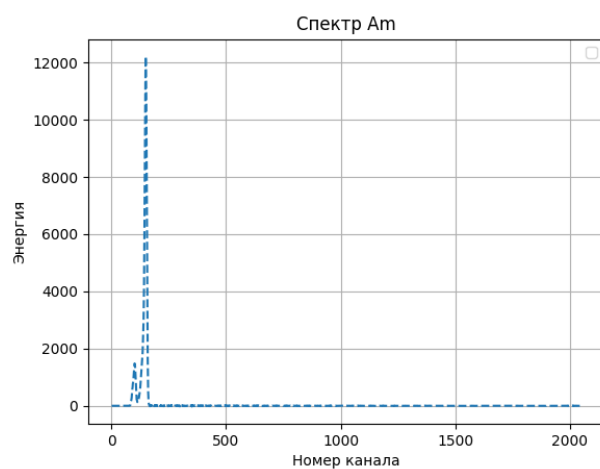


Рис. 1. Спектр Am

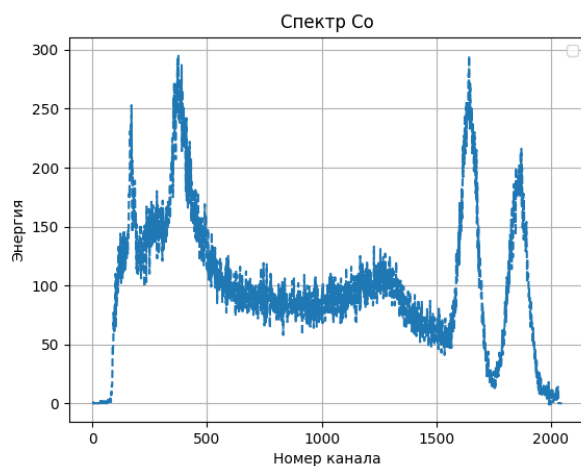


Рис. 2. Спектр Co

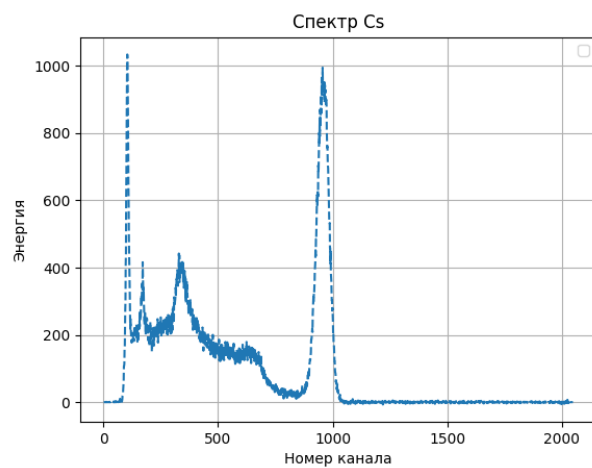


Рис. 3. Спектр Cs

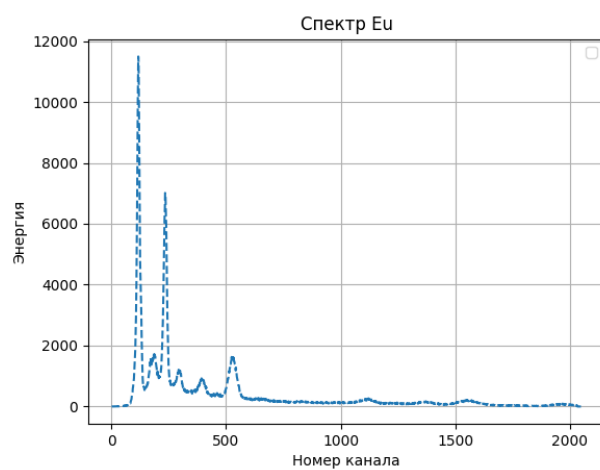


Рис. 4. Спектр Eu

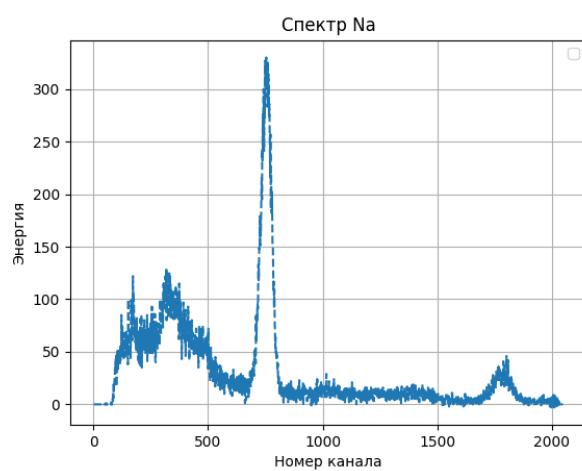


Рис. 5. Спектр Na

Am

При α -распаде америция происходит испускание мягких γ -квантов:

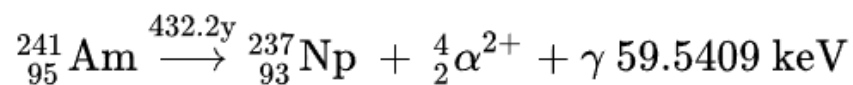


Рис. 6. Распад америция

Таким образом пику на 94 канале соответствует квант 59 кэВ.

Co

Для кобальта характерны фотопики на энергиях 1.33 мэВ и 1.17 мэВ. Им соответствуют каналы 1856 и 1638.

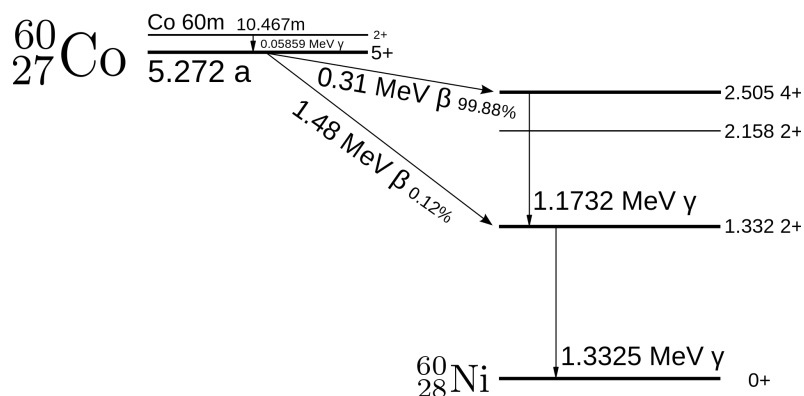


Рис. 7. Уровни кобальта

Cs

Фотопик цезия имеет энергию 0.66 мэВ. Ему соответствует 953 канал.

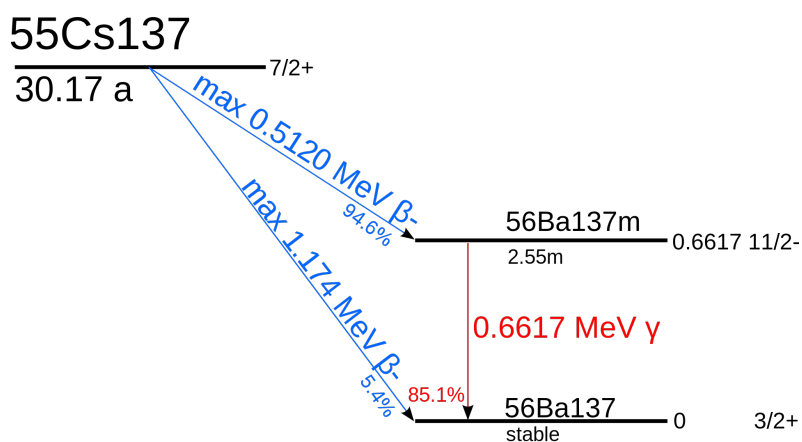


Рис. 8. Уровни цезия

Eu

У европия наблюдается много фото-пигов. Таблица, со всеми линиями спектра европия:

Gammas from ^{152}Eu (13.537 y 6)		
Eg (keV)	Ig (%)	Decay mode
121.7817 3	28.58 6	e+b ⁺
344.2785 12	26.5 4	b ⁻
1408.006 3	21.005 24	e+b ⁺
964.079 18	14.605 21	e+b ⁺
1112.074 4	13.644 21	e+b ⁺
778.9040 18	12.942 19	b ⁻
1085.869 24	10.207 21	e+b ⁺
244.6975 8	7.583 19	e+b ⁺
867.378 4	4.245 19	e+b ⁺
443.965 3	2.821 19	e+b ⁺
411.1163 11	2.234 4	b ⁻
1089.737 5	1.727 6	b ⁻
1299.140 10	1.623 8	b ⁻
1212.948 11	1.422 6	e+b ⁺

Рис. 9. Спектр цезия

Соответствия каналов и фото-пигов:

- 1965 канал - 1.41 мэВ
- 1550 канал - 1.09 мэВ
- 1362 канал - 0.96 мэВ
- 1112 канал - 0.78 мэВ

Na

Фотопик натрия соответствует энергии 1.27 мэВ. В эксперименте это был 1779 канал.

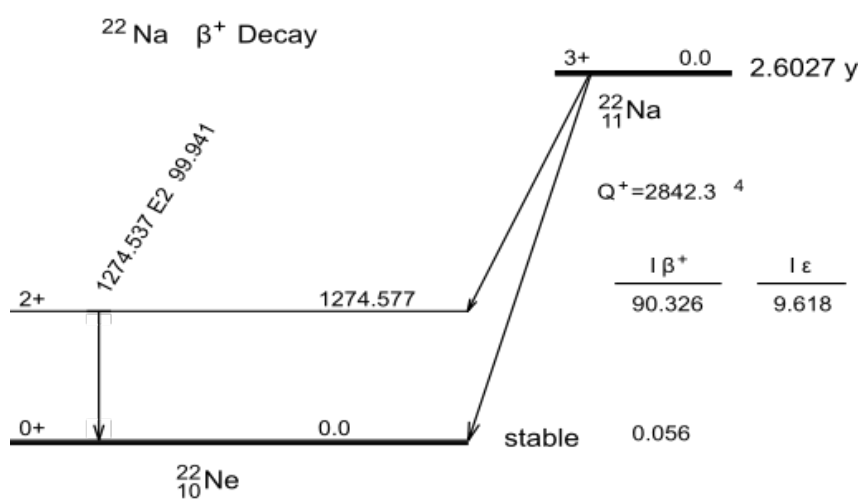


Рис. 10. Спектр натрия

Анализ данных

Фотопики каждого из элементов:

Элемент	Энергия [кэВ]	Канал
Am	59	94
Co	1330	1856
Co	1170	1638
Cs	660	953
Eu	1410	1965
Eu	1090	1550
Eu	960	1362
Eu	780	1112
Na	1270	1779

По полученным данным была построена зависимость энергии от номера канала

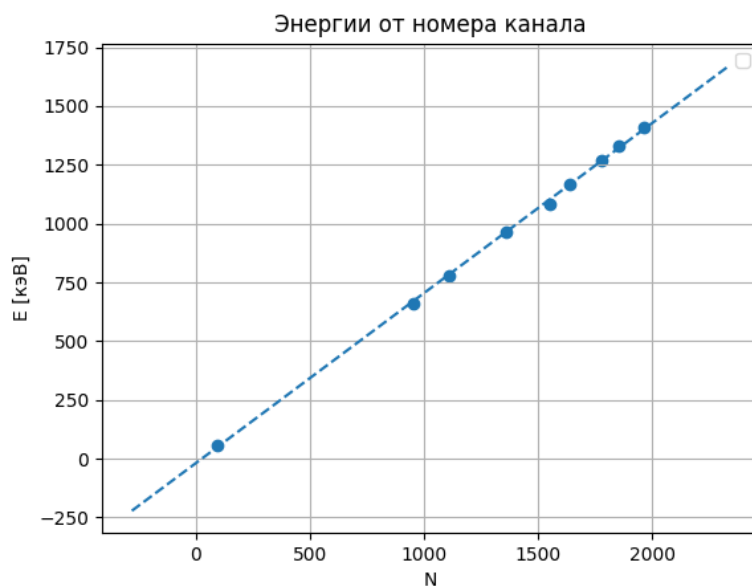


Рис. 11. Перевод номера канала в энергию

Уравнение по данным к приближению:

$$E = 72.3 * 10^{-2} * N - 19.3 \quad (5)$$

Погрешность коэффициентов этого уравнения оценим как последнюю значущую цифру $\delta \approx 0.01$.

Энергетическое разрешение

С помощью этого уравнения была посчитана ширина пиков на полу-высоте и энергетическое разрешение измерителя:

Элемент	E [кэВ]	ΔE [кэВ]	R
Am	59	8.6	0.150
Co	1330	65	0.048
Co	1170	58	0.049
Cs	660	43	0.065
Eu	1410	-	-
Eu	1090	-	-
Eu	960	-	-
Eu	780	-	-
Na	1270	54	0.043

По этим данным был построен график зависимости $R^2 f(1/E)$:

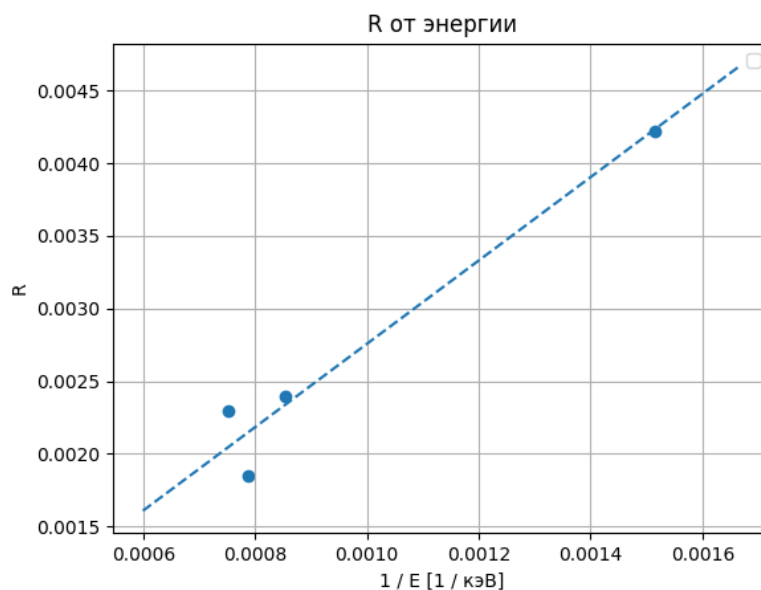


Рис. 12. Энергетическое разрешение

Линейное приближение хорошо отображает зависимость и график проходит через ноль. Таким образом можно сделать вывод, что энергетическое разрешение зависит от энергии как:

$$R = \frac{const}{\sqrt{E}} \quad (6)$$

Пик обратного рассеяния

В результате фотоэффекта излучение происходит во все стороны, поэтому рядом с фотопиком присутствует пик обратного рассеяния, обусловленный отражением излучения от среды. Фотопики также присутствуют и на маленьких энергиях. Рядом с ними пики обратного рассеяния видны четко, поскольку в этой области энергетическое разрешение детектора выше.

Пики обратного рассеяния и соответствующие им фотопики:

Элемент	$E_{\text{фото}}$ [кэВ]	$E_{\text{обр}}$ [кэВ]
Am	61	27
Co	1329	240
Cs	660	195
Eu	124	87
Na	511	184

График зависимости энергии пика обратного рассеяния от энергии фотопика:

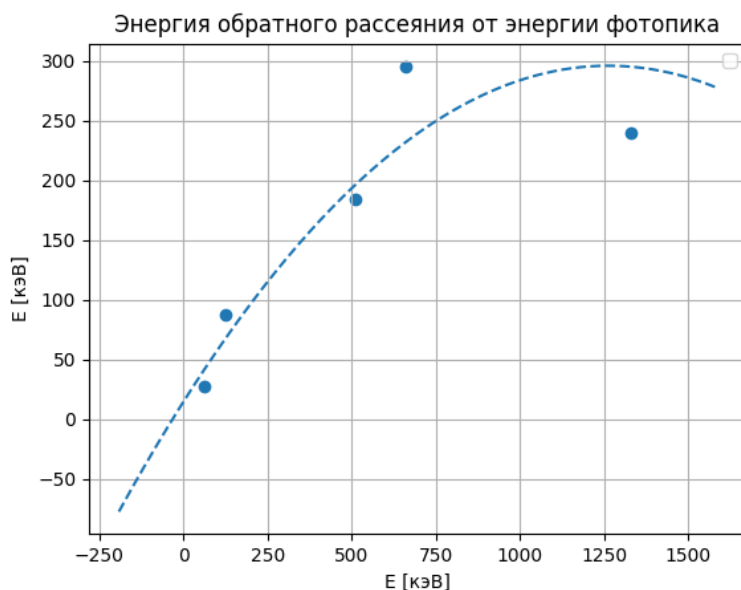


Рис. 13. Обратное рассеяние

Данная зависимость примерно соответствует теоретической:

$$E_{\text{обр}} = \frac{E}{1 + 2E/mc^2} \quad (7)$$

3 Вывод

В данной работе были проверены зависимости энергетического разрешения от энергии пика и энергии пика обратного рассеяния от фотопика. Обе зависимости выполнялись с достаточной точностью. Также определение энергии пиков по номеру канала имело точность более одного процента.