

Лабораторная работа 5.5.5

Компьютерная сцинтилляционная γ -спектрометрия

Симанкович Александр
Б01-108

07.10.2023

Аннотация

В работе экспериментально определяются спектры γ -квантов, которые формируются при распаде Co, Cs, Na, Eu, Am. Проводится анализ спектров.

Теоретическое введение

Базовые принципы работы сцинтиллятора

При прохождении γ -квантов через среду существует три механизма взаимодействия со средой: фотоэффект, комптоновское рассеяние и образование электрон-позитронных пар. Эти эффекты приводят к образованию быстрых электронов в веществе. Быстрые электроны ионизируют и возбуждают атомы при движении через вещество за счет неупругих столкновений. При переходах атомов и молекул в основное состояние и рекомбинации излучаются фотоны, характерные для вещества сцинтиллятора.

Обратим внимание, что такие фотоны должны иметь очень небольшой шанс выйти из сцинтиллятора, поскольку их энергия совпадает с разностью энергий между уровнями. Поэтому кристалл (напр. NaI) легируется примесью (напр. Tl) с малой концентрацией (0.1%). Примесь имеет излучающий переход в запрещенной зоне кристалла. Таким образом, фотон может без потерь двигаться сквозь кристалл.

Вспышки из сцинтиллятора имеют низкую интенсивность, для усиления используется фотоэлектронный умножитель. С помощью фотоэффекта и электронной лавины сигнал усиливается, после чего передается на АЦП.

Процессы взаимодействия γ -излучения с веществом

Фотоэффект

Процесс поглощения γ -кванта связанным электроном. Электрон получает почти всю энергию γ -кванта, часть которой затрачивается на потенциал ионизации:

$$T_e = E_\gamma - I_i.$$

Более вероятен для тяжелых веществ и низкоэнергетичных фотонов.

Комптоновское рассеяние

Рассеяние фотона на свободном электроне. Электрон получает часть энергии γ -кванта. Максимальная возможная энергия электрона:

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

Образование электрон-позитронных пар

Энергия кванта идет на образование пары электрон-позитрон. Данное явление происходит в присутствии ядра или электрона, поскольку в пустоте законы сохранения для электрон-позитронной пары несовместны. Пороговая энергия:

$$E_{пор} = 2mc^2 = 1.022 \text{ МэВ}.$$

Образовавшийся электрон будет двигаться, теряя энергию на ионизацию и возбуждение атомов. Его энергия полностью останется в детекторе. Позитрон аннигилирует с электроном, излучив два γ -кванта. Один или оба γ -кванта могут покинуть детектор.

Компоненты спектра

В спектре будут наблюдаться различные составляющие:

1. *Фотопик*. Формируется при рассеянии полной энергии начального γ -кванта.
2. $E_\gamma - E_0, E_\gamma - 2E_0$. Компоненты от электрон-позитронных пар.
3. *Пик обратного рассеяния*. Формируется от рассеяния γ -квантов от стенок детектора. Положение пика:

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

4. *Комптоновский спектр*. Континуальный спектр от комптоновского рассеяния.

Энергетическое разрешение спектрометра

При поглощении частиц с одинаковой энергии, значения энергии, получаемые спектрометром, будут различаться. Это связано со статистической природой сцинтиллятора. Как следствие, пик, который должен быть δ -функцией, становится размытым.

Энергетическое разрешение спектрометра:

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i},$$

где E_i – положение пика, ΔE_i – ширина пика на половине его высоты.

Получим оценку для R_i . Энергия E_i пропорциональна среднему числу фотонов \bar{n}_i :

$$E_i = \alpha \bar{n}_i.$$

Ширина пика ΔE_i пропорциональна дисперсии $\overline{\Delta n_i}$. При этом $\overline{\Delta n_i} \approx \sqrt{\bar{n}_i}$, если приблизить форму пика гауссианом.

Тогда для R_i :

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

Методика эксперимента

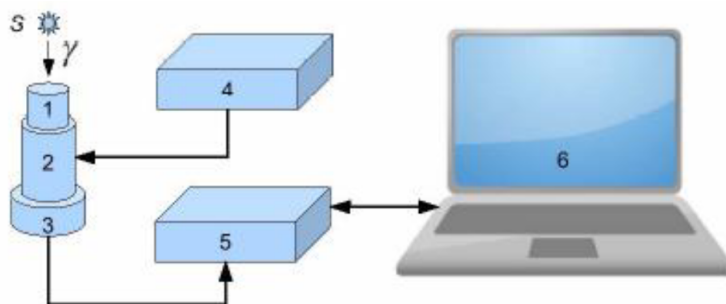


Рис. 1: Принципиальная схема спектрометра. (S - источник γ -квантов, 1 - сцинтиллятор, 2 - ФЭУ, 3 - предусилитель импульсов, 4 - блок питания ФЭУ, 5 - АЦП, 6 - компьютер для сбора и обработки данных)

Принципиальная схема приведена на рис. 1. В качестве сцинтиллятора используется кристалл NaI(Tl). Сцинтиллятор, усилитель и источник излучения находятся в защитном кожухе, предохраняющем от внешнего излучения. Сигнал с ФЭУ усиливается и подается на АЦП, после чего сохраняется на компьютере. Обработанный сигнал выводится на экран в виде графика спектра.

Результаты

Кобальт ^{60}Co

Кобальт $^{60}_{27}\text{Co}$ претерпевает β^- распад в $^{60}_{28}\text{Ni}$ по двум схемам. После этого излучается один или два γ -кванта. Энергии указаны на схеме (2).

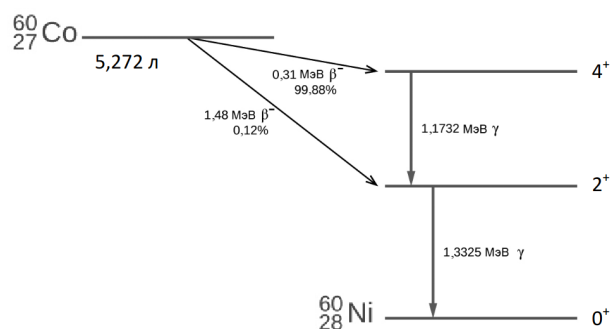
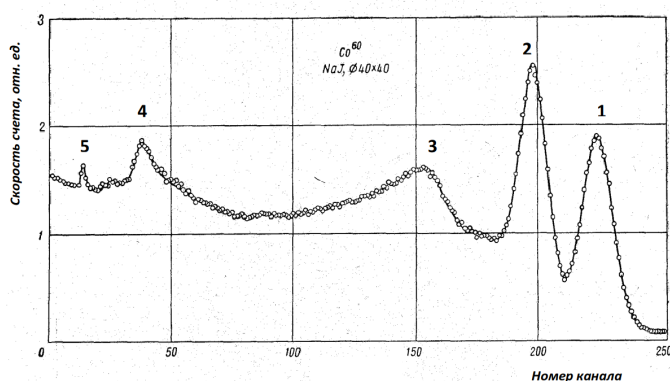


Рис. 2: Слева: спектр ^{60}Co (1,2 - фотопики, 3 - край комптоновского спектра, 4 - пик обратного рассеяния, 5 - пик характеристического излучения свинца).

Справа: схема распада ^{60}Co .

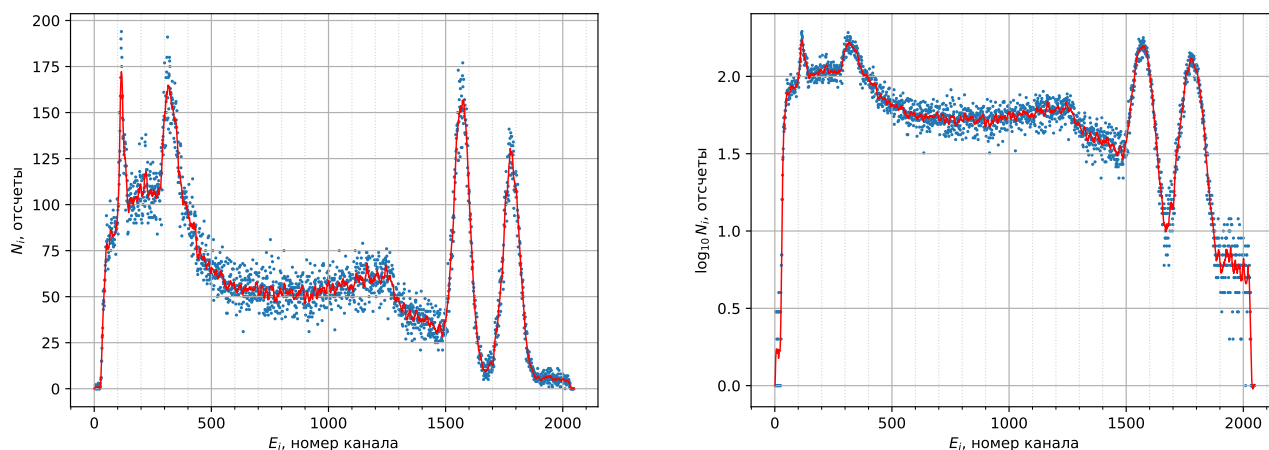


Рис. 3: Измеренный спектр ^{60}Co

Цезий ^{137}Cs

Ядро $^{137}_{55}\text{Cs}$ испытывает β^- распад, в результате которого образуется ядро $^{137}_{56}\text{Ba}$. Большинство переходов происходит на возбужденный метастабильный уровень ядра. При переходе в основное состояние излучается γ -квант.

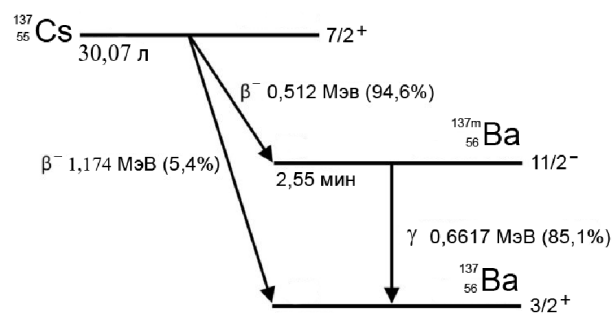
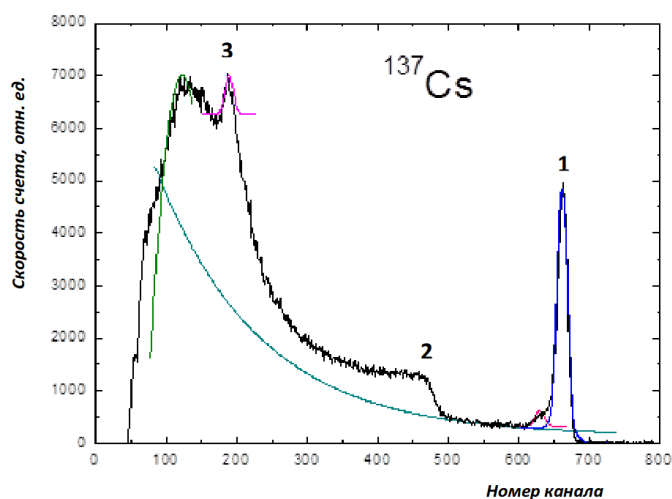


Рис. 4: Слева: спектр ^{137}Cs (1 - фотопик, 2 - край комптоновского спектра, 3 - пик обратного рассеяния). Справа: схема распада ^{137}Cs .

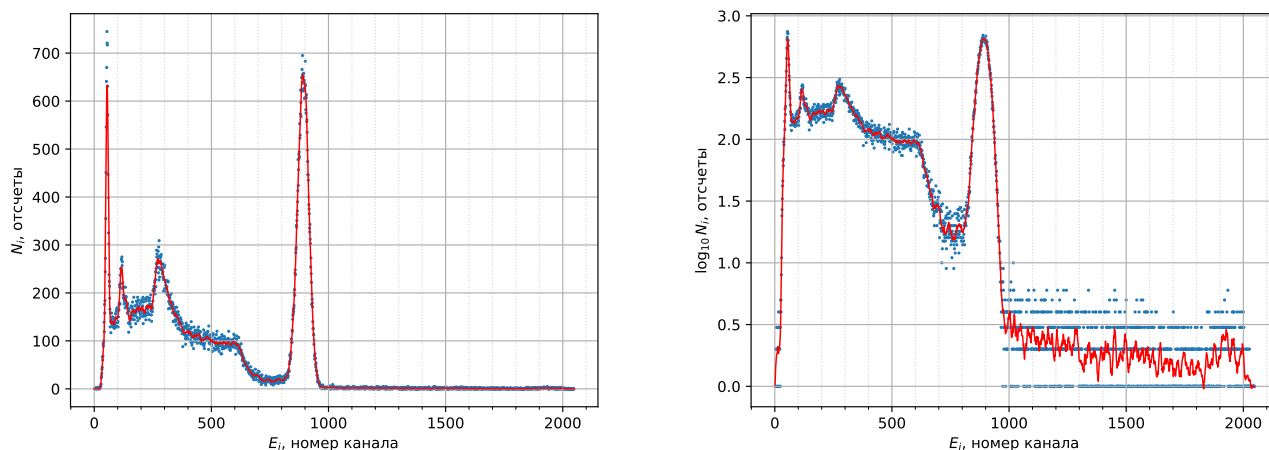


Рис. 5: Измеренный спектр ^{137}Cs

Натрий ^{22}Na

Вещество ^{22}Na подвержено, в отличие от ^{60}Co и ^{137}Cs , β^+ распаду. Позитроны аннигилируют, не долетая до сцинтиллятора, давая γ -кванты, долетающие до сцинтиллятора и дающие аннигиляционный пик 511 кэВ. Также есть фотопик от перехода в основное состояние.

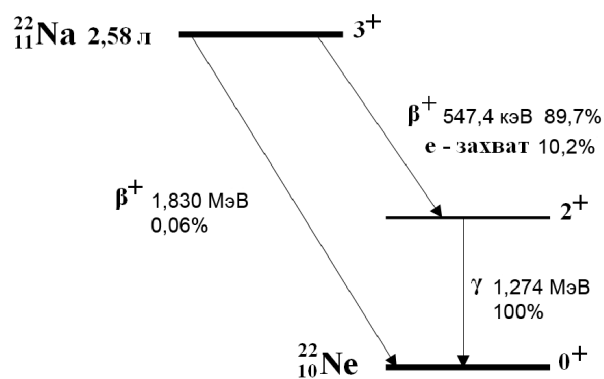
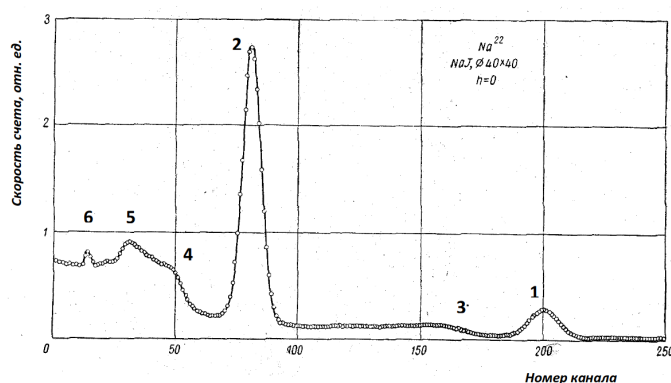


Рис. 6: Слева: спектр ^{22}Na (1 - фотопик, 2 - аннигиляционный пик, 3,4 - края комптоновских спектров, 5 - пик обратного рассеяния, 6 - пик характеристического излучения свинца).

Справа: схема распада ^{22}Na .

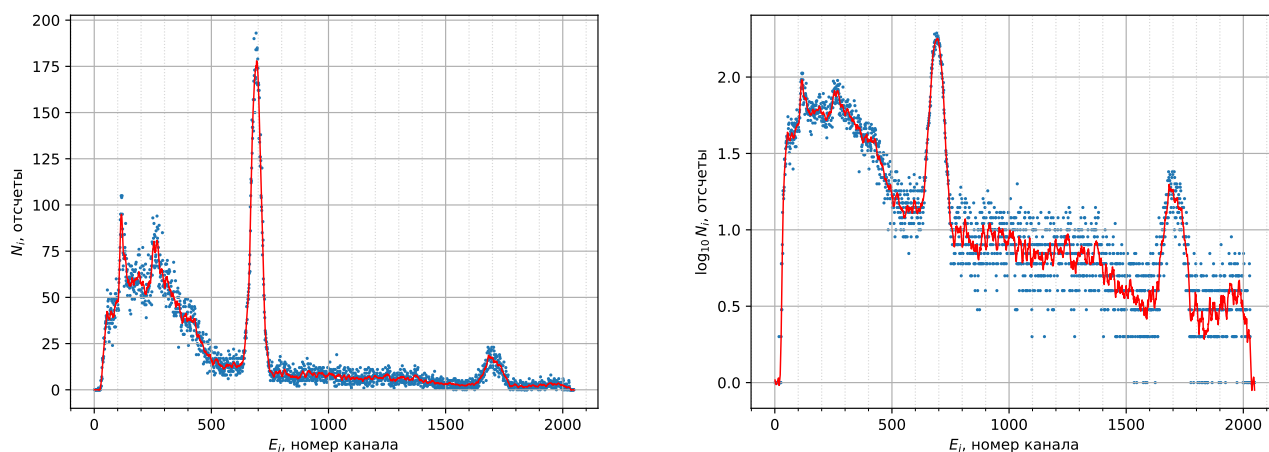


Рис. 7: Измеренный спектр ^{22}Na

Европий ^{152}Eu

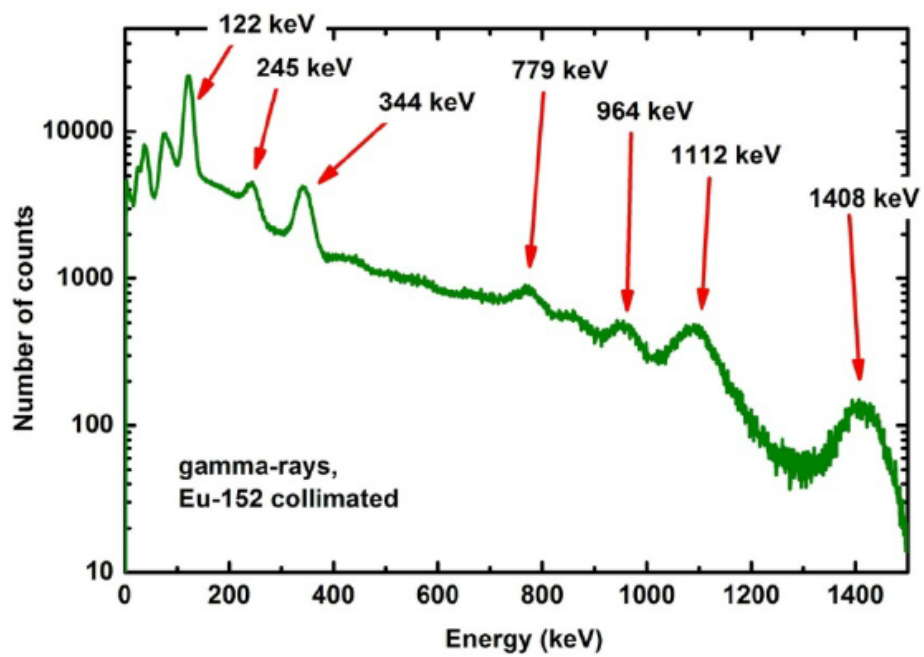


Рис. 8: Спектр ^{152}Eu

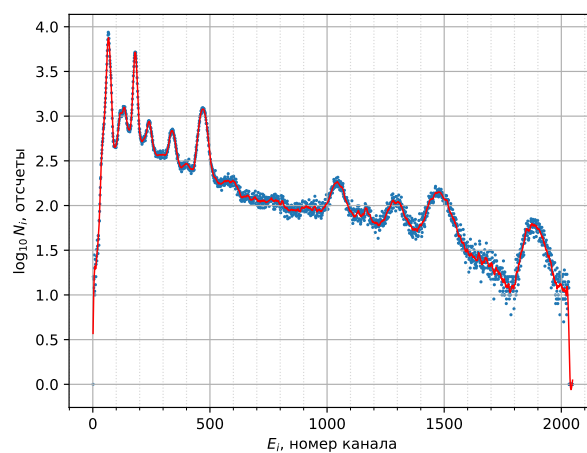
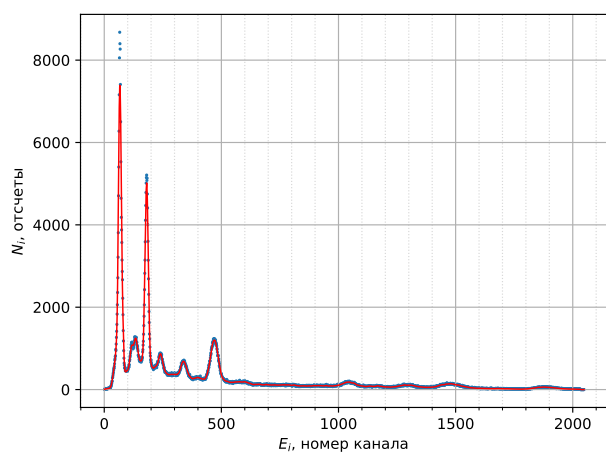


Рис. 9: Измеренный спектр ^{152}Eu

Америций ^{241}Am

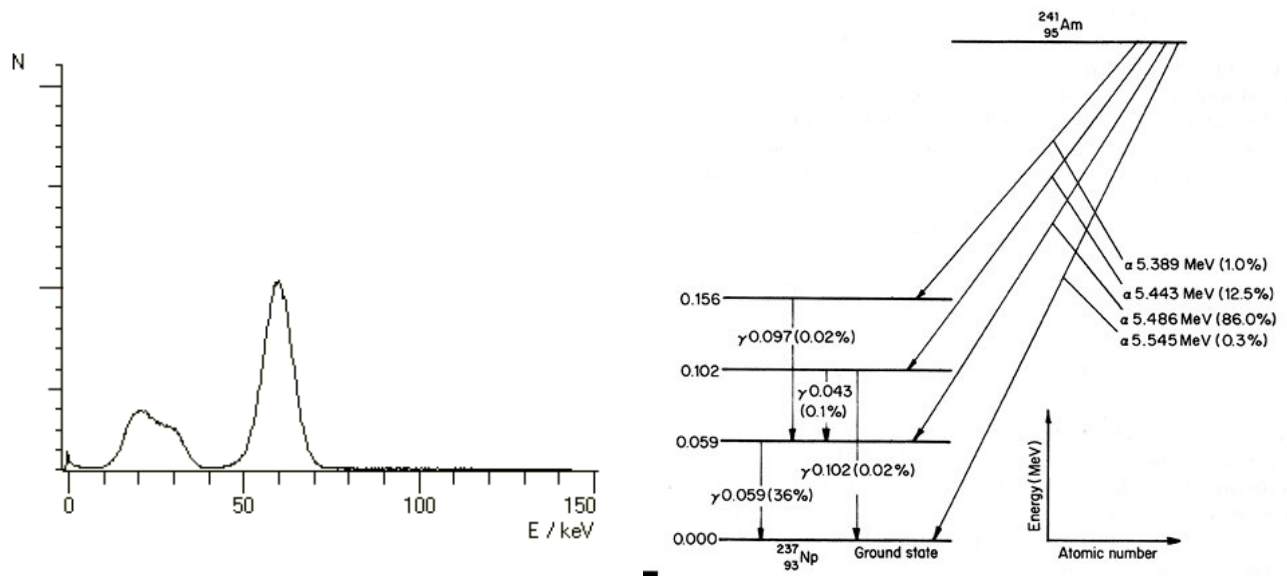


Рис. 10: Слева: спектр ^{241}Am . Справа: схема распада ^{241}Am .

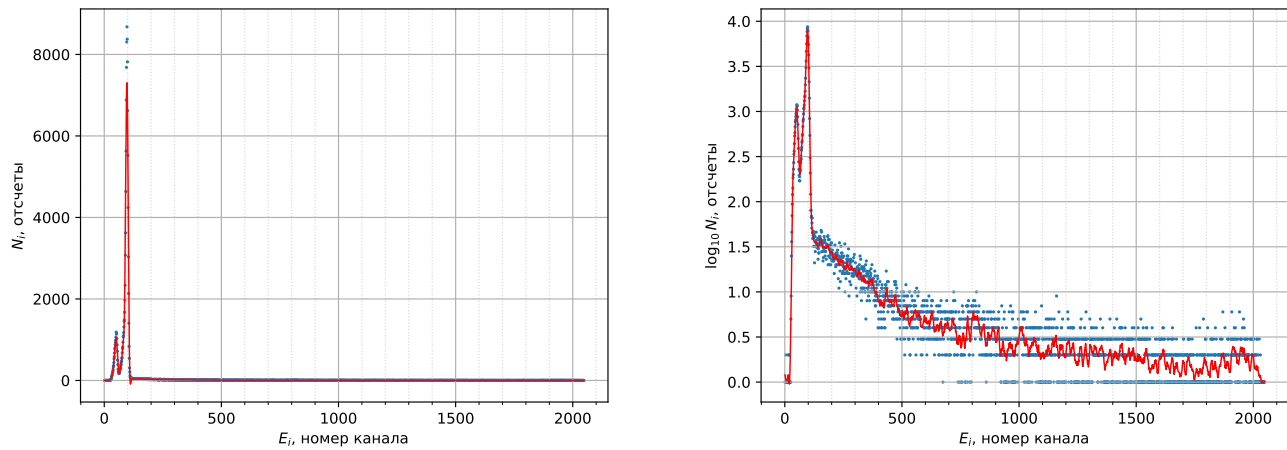


Рис. 11: Измеренный спектр ^{241}Am

Калибровка каналов спектрометра

Откалибруем спектрометр по известным нам энергиям некоторых пиков.

Источник	E_i , кэВ	N_i
Co 1	1332	1776
Co 2	1173	1577
Cs	662	889
Na (анниг)	511	693
Na	1274	1683

Таблица 1: Пики для калибровки

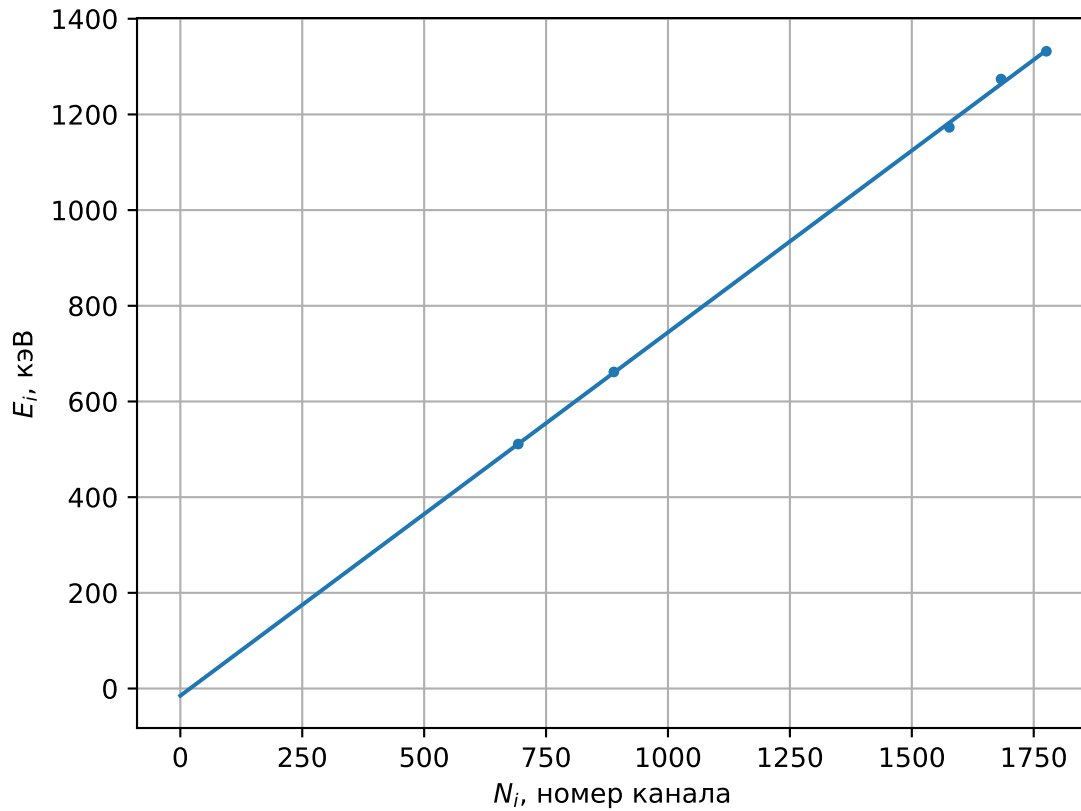


Рис. 12: Калибровочная прямая

Фотопики

С помощью калибровки пересчитаем значения положений фотопиков и их ширины.

Источник	N_i	ΔN_i	E_i , кэВ	ΔE_i , кэВ	R_i , %
Co 1	1776	75.0	1334	57.0	4.3
Co 2	1577	75.0	1183	57.0	4.8
Cs	889	56.0	660	42.5	6.4
Na	1683	60.0	1263	45.6	3.6
Eu 3	181	12.0	122	9.1	7.4
Eu 5	337	25.0	241	19.0	7.9
Eu 6	471	34.0	343	25.8	7.5
Eu 7	1044	57.0	778	43.3	5.6
Eu 8	1283	62.0	959	47.1	4.9
Eu 9	1474	86.0	1105	65.3	5.9
Eu 10	1874	90.0	1408	68.4	4.9
Am	97	13.0	59	9.9	16.9

Таблица 2: Характеристики фотопиков

Проверим зависимость (3). Построим $R_i^2 = f(1/E_i)$.

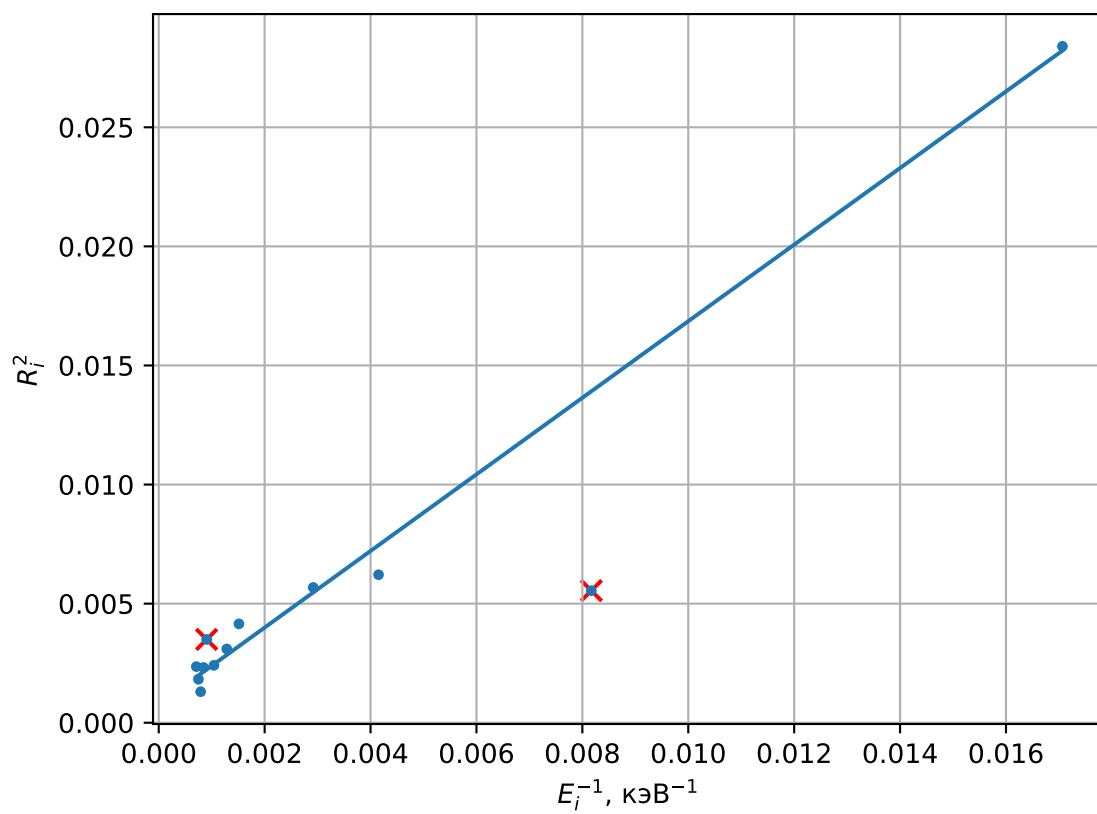


Рис. 13: Линеаризация разрешения R_i от энергии E_i

Обратное рассеяние

Некоторые пики на спектре вызваны обратным рассеянием. Построим таблицу для всех пиков:

Источник	N_i	E_i , кэВ	E_{back}^{theory} , кэВ
Co (<i>back</i>)	315	224	119
Co (<i>photo</i>)	1577	1183	210
Co (<i>photo</i>)	1776	1334	214
Cs (<i>peak</i>)	55	27	24
Cs (<i>pb</i>)	116	73	57
Cs (<i>back</i>)	270	190	109
Cs (<i>photo</i>)	889	660	184
Na (<i>pb</i>)	116	73	57
Na (<i>back</i>)	269	189	109
Na (<i>annih</i>)	693	511	170
Na (<i>photo</i>)	1683	1263	213
Eu 1	67	36	31
Eu 2 (<i>back</i>)	134	87	65
Eu 3 (<i>photo</i>)	181	122	83
Eu 4	240	167	101
Eu 5 (<i>photo</i>)	337	241	124
Eu 6 (<i>photo</i>)	471	343	146
Eu 7 (<i>photo</i>)	1044	778	192
Eu 8 (<i>photo</i>)	1283	959	202
Eu 9 (<i>photo</i>)	1474	1105	208
Eu 10 (<i>photo</i>)	1874	1408	216
Am 1	50	23	21
Am (<i>photo</i>)	97	59	48

Таблица 3: Характеристики всех пиков

Пики вызванные обратным рассеянием обозначены как (*back*), фотоэффектом – (*photo*), аннигиляцией – (*annih*), характеристическое излучение свинца – (*pb*).

Большинство пиков для европия предполагаются

Комптоновский спектр

Пересчитаем значения энергии на краях комптоновских спектров (E_k). Также рассчитаем края комптоновских спектров исходя из (1) (E_k^{theory}).

Источник	N_i	N_k	E_i , кэВ	E_k , кэВ	E_k^{theory} , кэВ
Co	1577	1263	1183	944	973
Cs	889	614	660	451	476
Na	693	431	511	312	341
Na	1689	1376	1268	1030	1055

Таблица 4: Края комптоновских спектров

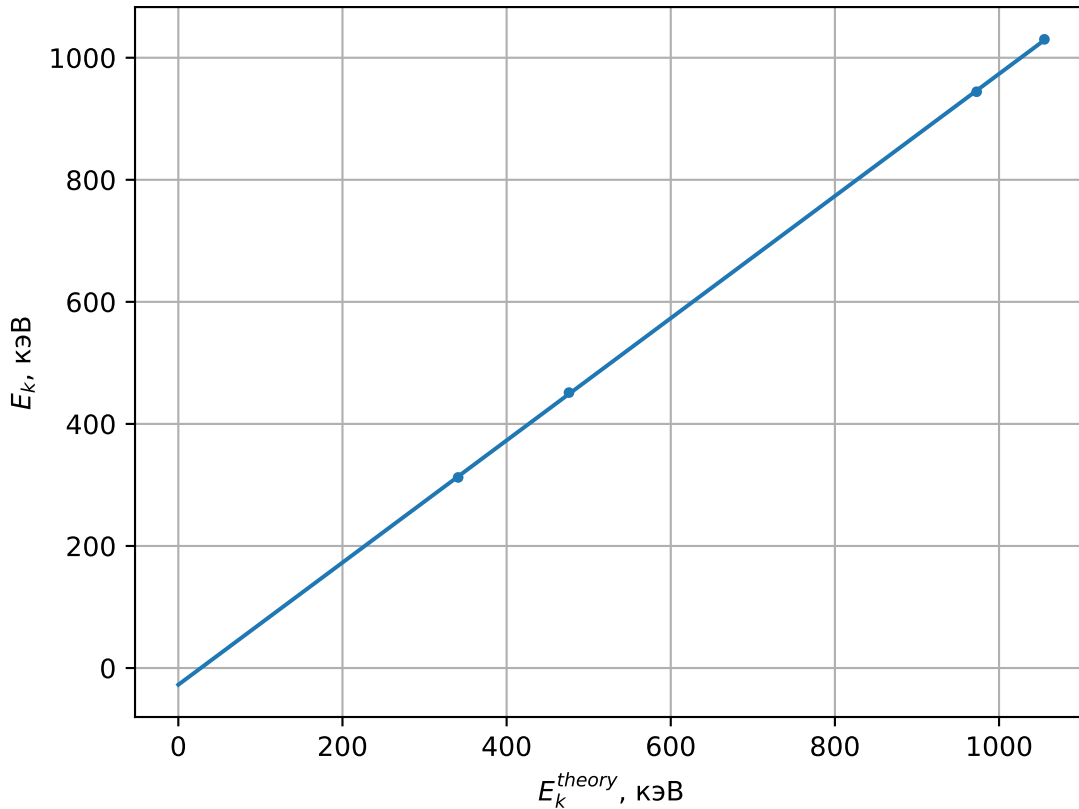


Рис. 14: Зависимость E_k от энергии E_k^{theory}

Как можно видеть, теоретические значения хорошо описывают экспериментальные данные.

Характеристическое излучение свинца

Для Co, Cs, Na на графиках можно наблюдать характеристическое излучение свинца.

Источник	N_{pb}	E_{pb} , кэВ
Co	116	73
Cs	116	73
Na	116	73

Таблица 5: Характеристическое излучение свинца

С учетом ширины пиков получим:

$$E_{pb} = (116 \pm 10) \text{ кэВ}$$

Заключение и выводы

В работе экспериментально получены спектры γ -квантов, образующихся при распаде Co, Cs, Na, Eu, Am. Проведен анализ спектров. Вычислено значение энергии характеристического излучения свинца $E_{pb} = (116 \pm 10)$ кэВ. Проверена зависимость края комптоновского излучения от энергии фотопика.

В качестве улучшения работы можно провести более тщательный анализ пиков, поскольку некоторые из них имеют неизвестное происхождение.