



Лабораторная работа 5.5.5
Компьютерная сцинтилляционная γ -спектроскопия

Студенты:
Панченко Наталья
Исламов Сардор
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
Московский Физико-Технический Институт

8 декабря 2023 г.

Аннотация. В данной работе предполагается изучить спектр гамма-излучений для образцов ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{152}Eu найти для них пики полного поглощения и обратного рассеяния.

Теоретическое введение

Основными процессами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар.

Фотоэффект - процесс взаимодействия гамма-кванта с электроном, связанным с атомом, при котором электрону передается вся энергия гамма-кванта. При этом электрону сообщается кинетическая энергия:

$$T_e = E_\gamma - I_i \quad (1)$$

где E_γ – энергия гамма-кванта, I_i – потенциал ионизации i -той оболочки атома.

Эффект Комптона - 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

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

Процесс образования электрон-позитронных пар. Если процесс образования пары идет в кулоновском поле ядра, то энергия образующегося ядра отдачи оказывается весьма малой, так что пороговая энергия гамма-кванта E_{limit} , необходимая для образования пары, практически совпадает с удвоенной энергией покоя электрона $E_{limit} \approx 2mc^2 = 1.022 \text{ МэВ}$. Появившиеся в результате процесса образования пар частицы теряют свою кинетическую энергию на ионизацию среды.

Любой спектр, получаемый с помощью гамма-спектрометра, описывается несколькими компонентами, каждая из которых связана с определенным физическим процессом. Каждый процесс взаимодействия гамма-квантов с веществом (фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар) 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 $E_\gamma \gg mc^2$ в результате рассеяния гамма-квантов на большие углы на материалах конструктивных элементов детектора и защиты и последующего фотоэффекта в сцинтилляторе. Положение пика обратного рассеяния определяется по формуле:

$$E_{formation} = \frac{E}{1 + 2E/mc^2} \quad (3)$$

где E - энергия фотопика.

Экспериментальная установка

Энергетическим разрешением спектрометра называется величина

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i} \quad (4)$$

т.е. отношение ширины пика полного поглощения (измеренной на полувывоте) к регистрируемой энергии пика поглощения. Это значение $E_i \propto \overline{n_i}$ — числу частиц на выходе ФЭУ. При этом $\Delta E_i \propto \Delta \overline{n_i} = \sqrt{\overline{n_i}}$ — ширина пика пропорциональна среднеквадратичной флуктуации, которая равна корню из числа частиц. Таким образом, наша формула (4) примет вид

$$R_i = \frac{\text{const}}{\sqrt{E_i}} \quad (5)$$

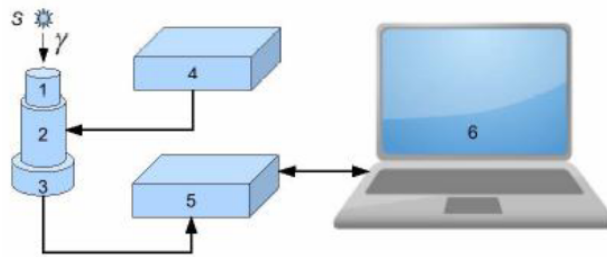


Рис. 1: Принципиальная схема экспериментальной установки

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

Ход работы

Снимем спектры излучения радиоактивных веществ: ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{152}Eu и определим для каждого из них номера каналов, отвечающие центрам пиков полного поглощения излучения. По табличным данным проведём линейную аппроксимацию зависимости энергии от номера канала (калибровку) для данного гамма-спектрометра: $E_i = aN_i + b$ (рис. 2)

Перед дальнейшим анализом спектров приведем спектр фонового шума, полученный при отсутствии образцов (рис. 3).

Используя калибровочный график, определим для всех остальных источников значения энергии пиков полного поглощения E_i , их ширины на половине высоты ΔE_i и энергетическое разрешение R_i . Результаты сведём в табл. 1.

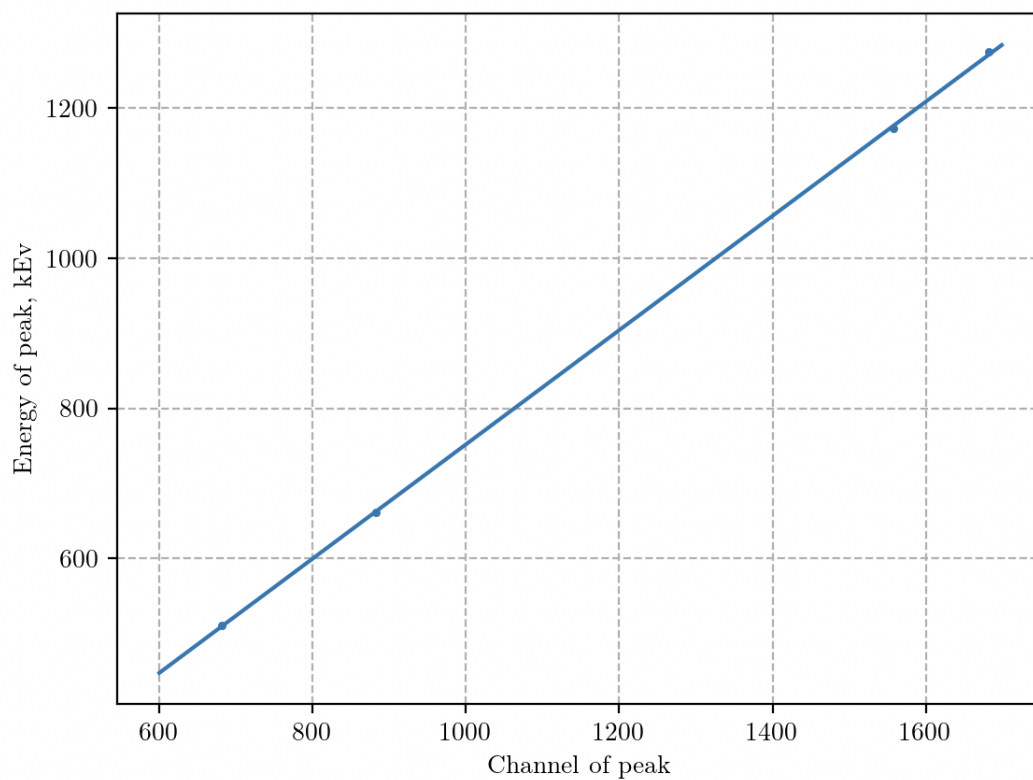


Рис. 2: Калибровочный график

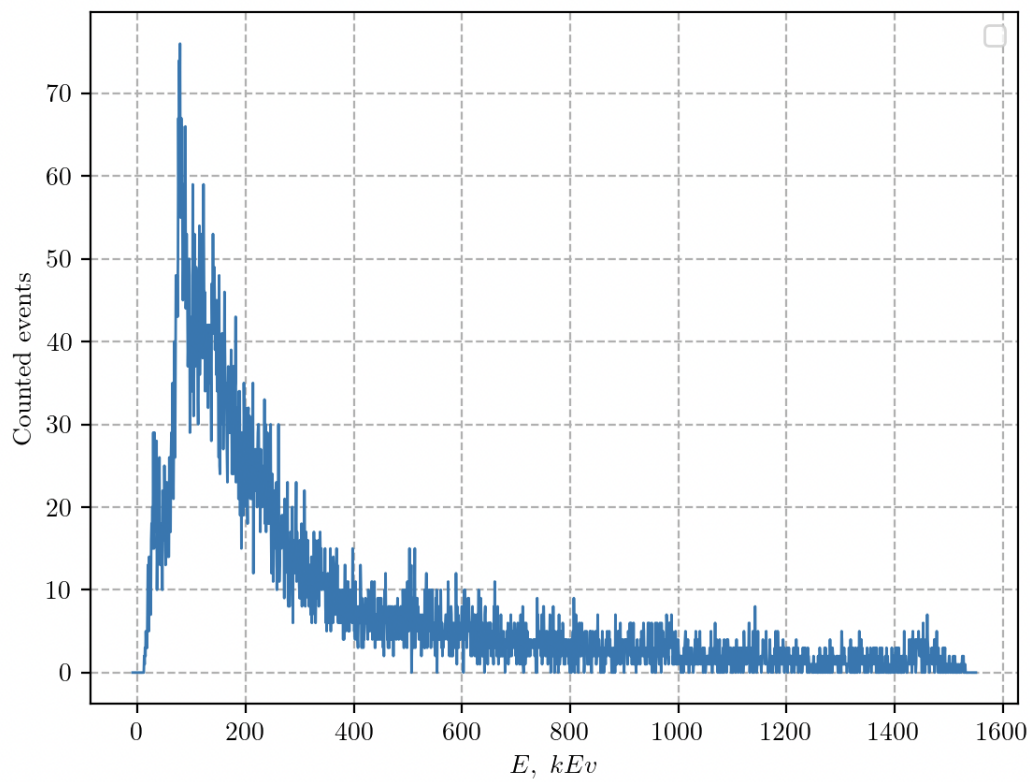


Рис. 3: Фоновый шум

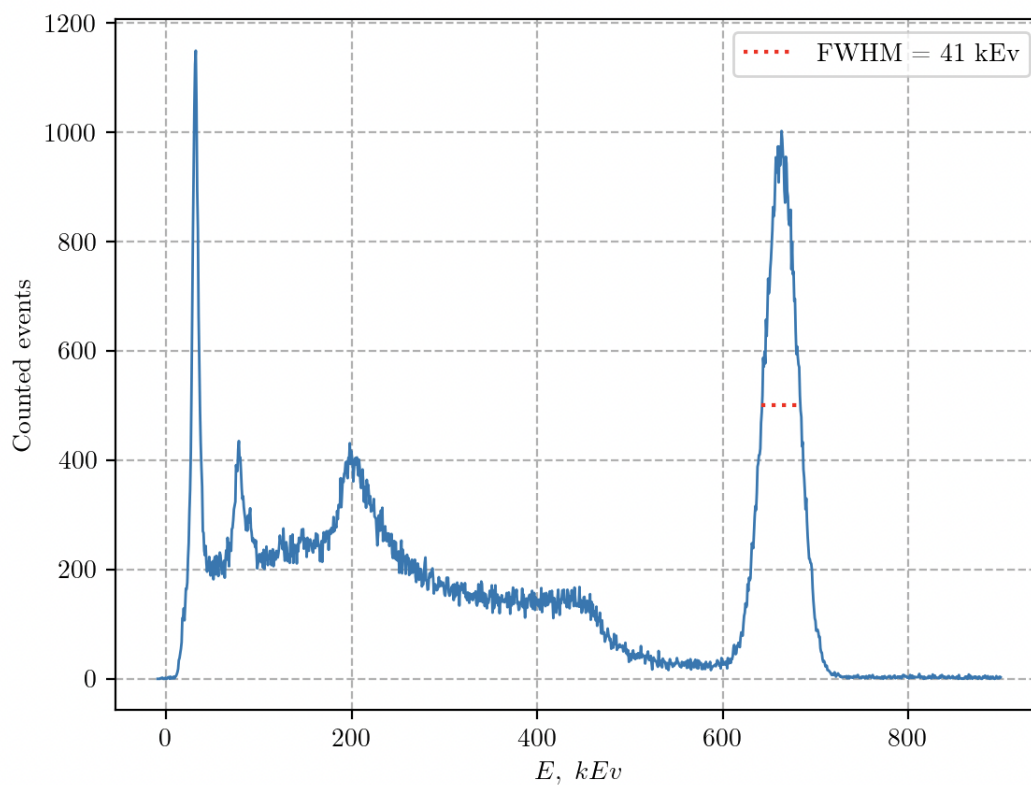


Рис. 4: Спектр источника ^{137}Cs

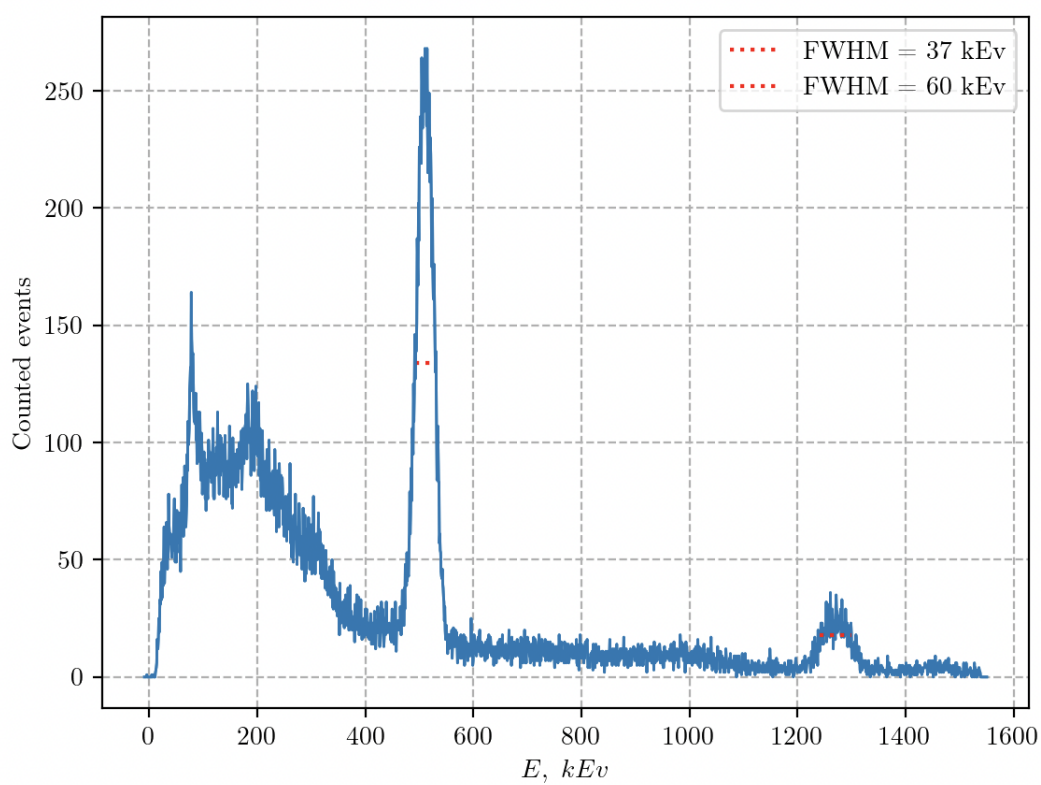


Рис. 5: Спектр источника ^{22}Na

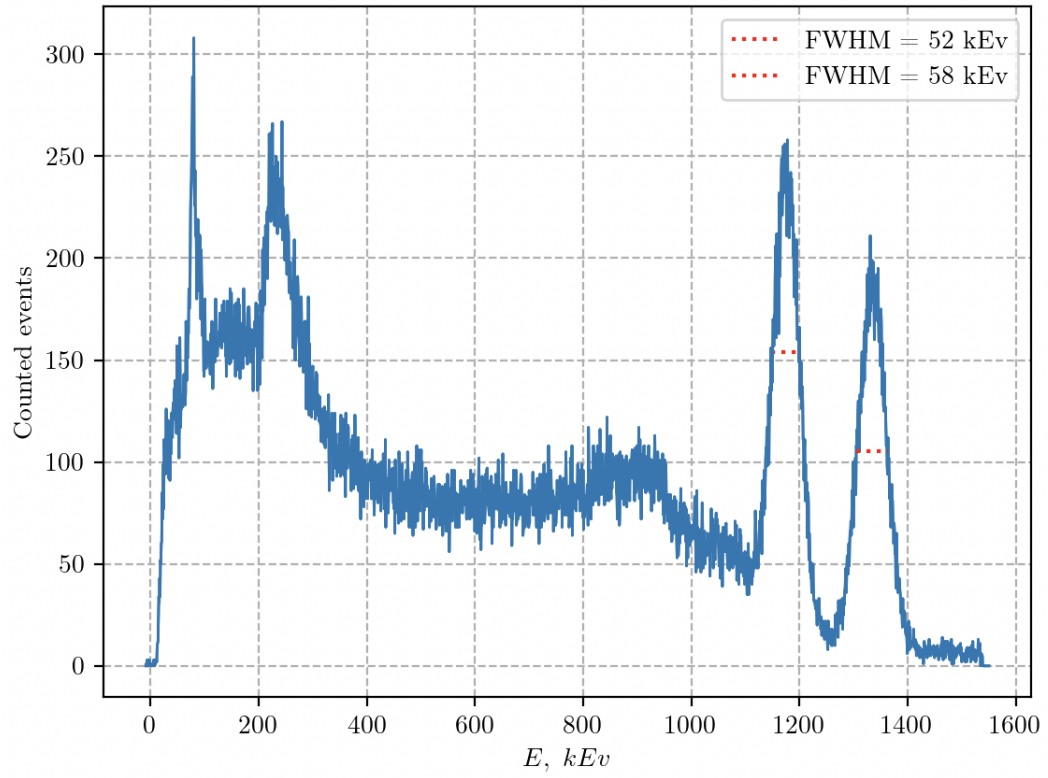


Рис. 6: Спектр источника ^{60}Co

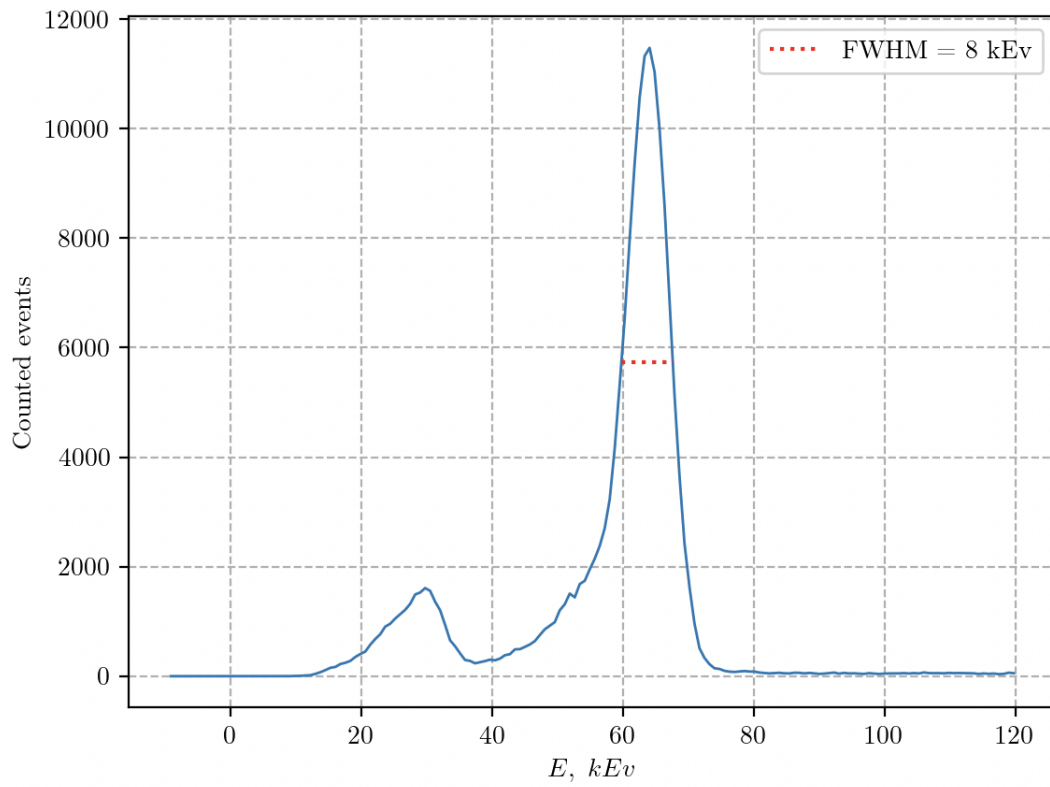


Рис. 7: Спектр источника ^{241}Am

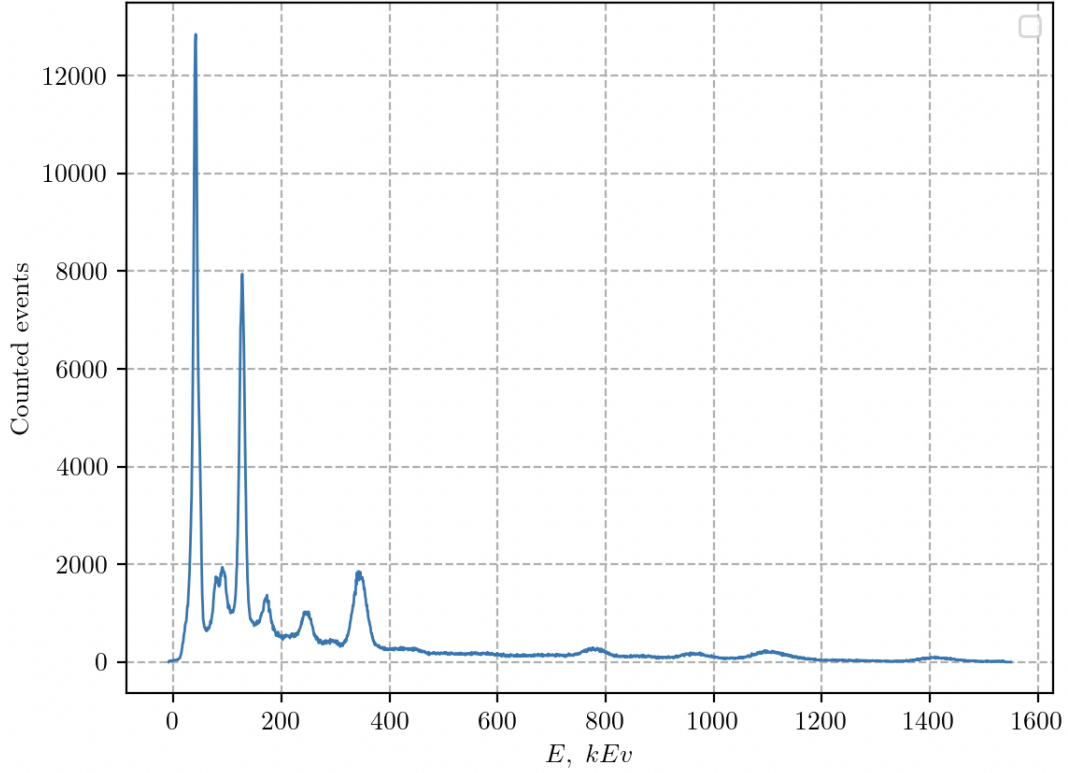


Рис. 8: Спектр источника ^{152}Eu

Источник	N_i	ΔN_i	E_i , keV	ΔE_i , keV	R_i , 10^{-3}
$^{22}\text{Na}_1$	683.1	66.7	510.5	37	72.4
$^{22}\text{Na}_2$	1680.2	91.6	1270.0	60	47.2
^{137}Cs	882.65	66.7	662.5	41	61.9
^{60}Co	1554.2	81.15	1174.0	52	44.3
^{60}Co	1764.2	89.03	1334.0	58	43.5
^{241}Am	96.6	23.4	63.8	8	125.4
$^{152}\text{Eu}_1$	179.7	28.8	127.1	11.1	87.3
$^{152}\text{Eu}_2$	337.1	46.4	246.9	25.5	103.2
$^{152}\text{Eu}_3$	466.1	55.4	345.2	32.4	93.8

Таблица 1: Пики полного поглощения

Проверим справедливость выражения (5), построив зависимость R^2 от величины $\frac{1}{E}$. Как видно из рис. 9, последние две точки (соответствующие пикам для ^{241}Am и $^{152}\text{Eu}_1$) не поддаются аппроксимации прямой. Это может быть связано с большой погрешностью измерений при малых значениях энергии.

Для остальных точек получаем значение $const = 1.67 \text{ keV}$.

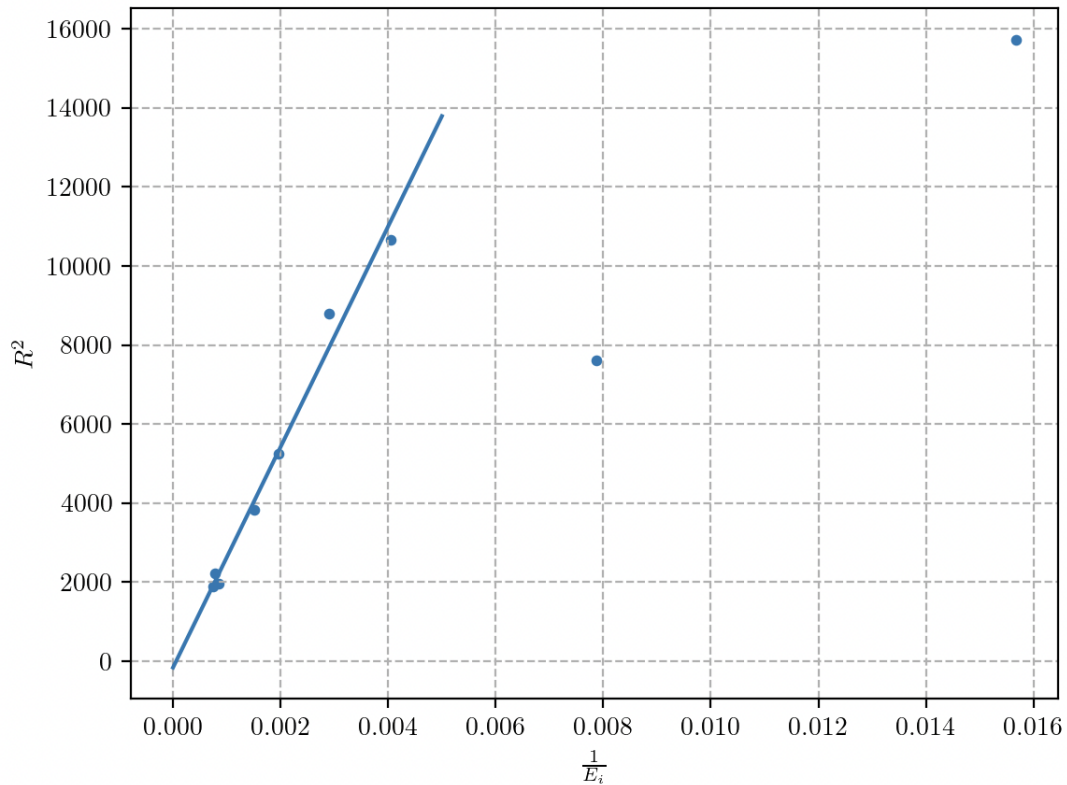


Рис. 9: Проверка выражения (5)

Занесем значения энергий обратного рассеяния в таблицу (табл. 2) и построим график ее зависимости от энергии поглощения (рис. 10).

Источник	E_i , keV	E_{rev} , keV
^{22}Na	510.5	191.1
^{137}Cs	662.5	198.8
^{60}Co	1334.0	229.8
^{152}Eu	127.1	91.8

Таблица 2: Пики полного поглощения

Обратим внимание, что в левой части спектров каждого из образцов наблюдаются узкие пики (для ^{241}Am – низкий широкий) в районе $E_{\text{Рб}} \simeq 81$ keV. Они соответствуют энергии характеристического излучения из свинца, служащего защитой спектрометра от внешнего излучения.

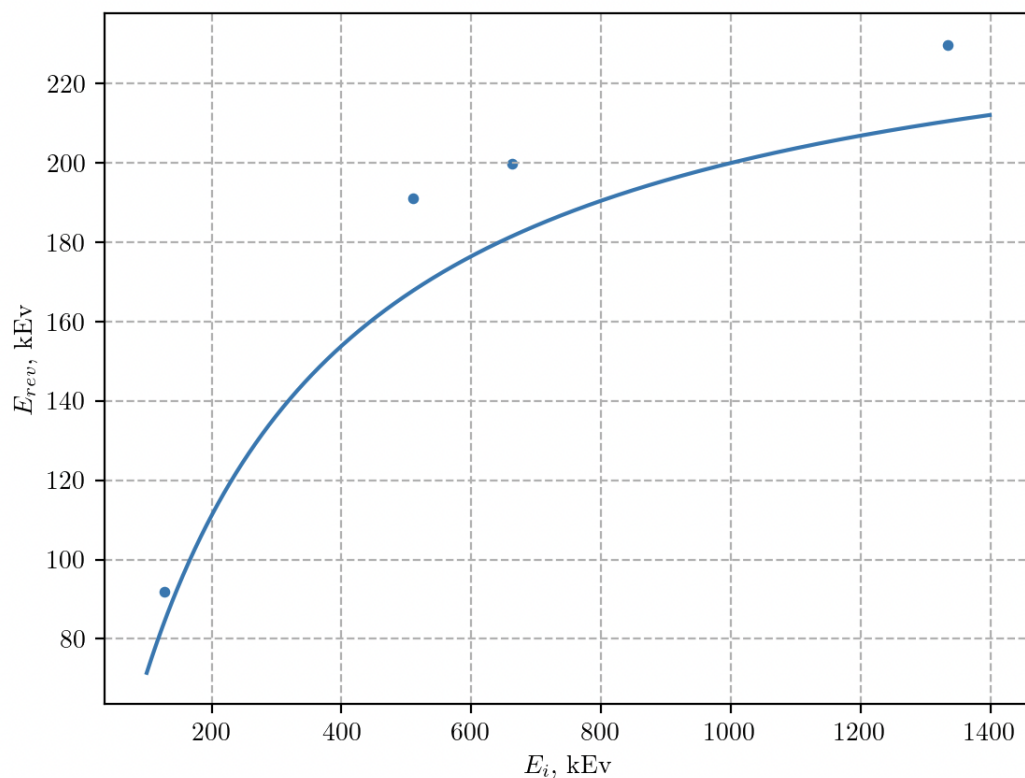


Рис. 10: Зависимость энергии обратного рассеяния от энергии поглощения

Выводы

В ходе работы были изучены спектры гамма-излучений для образцов ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{152}Eu и найдены для них пики полного поглощения и обратного рассеяния. Были подтверждены соотношения между энергиями полного поглощения и энергетическим разрешением, а также между энергиями полного поглощения и обратного рассеяния. Помимо этого, по наблюдаемым спектрам излучения образцов определена характеристическая энергия излучения из свинца.