

# Лабораторная работа 5.5.1

## Измерение коэффициента ослабления потока $\gamma$ -лучей в веществе и определение их энергии

Гаврилин Илья  
Добровольская Ксения  
Б01-110

8 ноября 2023 г.

**Цель работы:** В данной работе предполагается изучить спектр гамма-излучений для образцов  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , найти для них пики полного поглощения и обратного рассеяния.

### 1 Теоретическое введение

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  $2\pi$  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  $0 = 2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ}$ .

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  $= \gamma - E_0$ , где  $0 = m_e c^2 = 511 \text{ кэВ}$ ;

в) оба родившихся гамма-кванта покидают детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии  $= \gamma - 2E_0$ , где  $2_0 = 2m_e c^2 = 1022 \text{ кэВ}$ ;

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  $\gamma \gg mc^2/2$  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):

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

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  $E_i \propto \overline{n_i}$  — числу частиц на выходе ФЭУ. При этом  $\Delta E_i \propto \overline{\Delta n_i} = \sqrt{\overline{n_i}}$  — 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

Проведем измерения гамма-спектров для  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , а также измерение фона. Получаем зависимость счета на сцинтилляторе  $N'_\text{ч}$  от номера канала  $N$ .

$$N_{Na\_1} = 718.1, \quad N_{Na\_2} = 1695.2 \quad (5)$$

Мы знаем, что этим пикам соответствуют табличные значения энергии 511, 1275 кэВ соответственно. Тогда проведем калибровку спектрометра, построив линейную зависимость энергии гамма-кванта от номера канала  $E_j = f(N_j)$ . Результат калибровки:

$$E_j = (-57.690 + 0.789N_i) \text{ кэВ} \quad (6)$$

С помощью полученной зависимости переведем все полученные значения каналов в энергии, а счет сцинтиллятора отнормируем по времени, получив число частиц за секунду  $N_\text{ч} = \frac{N'_\text{ч}}{t}$ . Погрешность счета подсчитаем по формуле

$$\sigma_{N_\text{ч}} = N_\text{ч} \frac{\sqrt{N'_\text{ч}}}{N'_\text{ч}} = \frac{\sqrt{N'_\text{ч}}}{t} \quad (7)$$

С помощью ПО компьютера экспериментальной установки получим значения пиков полного поглощения и их ширины.

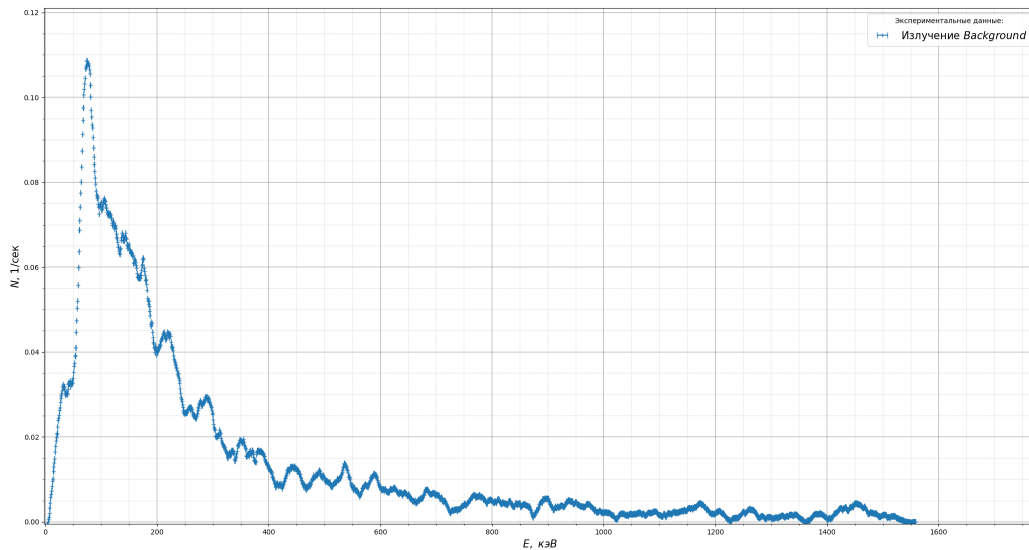


Рис. 1: Фоновое излучение

Получив спектр фонового излучения, в дальнейшем будем вычитать его из спектров образцов. Построим спектры изучаемых образцов.

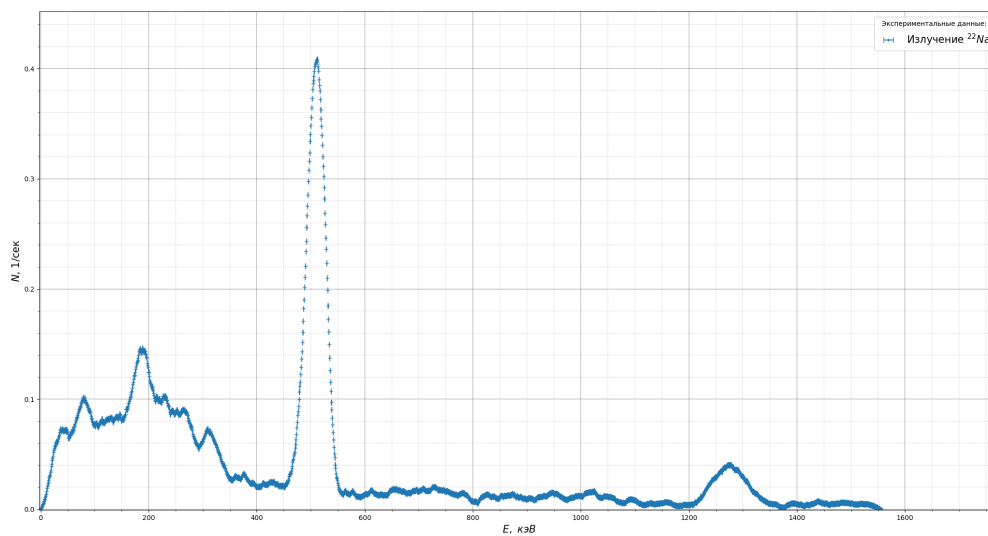


Рис. 2: Спектр  $^{22}\text{Na}$

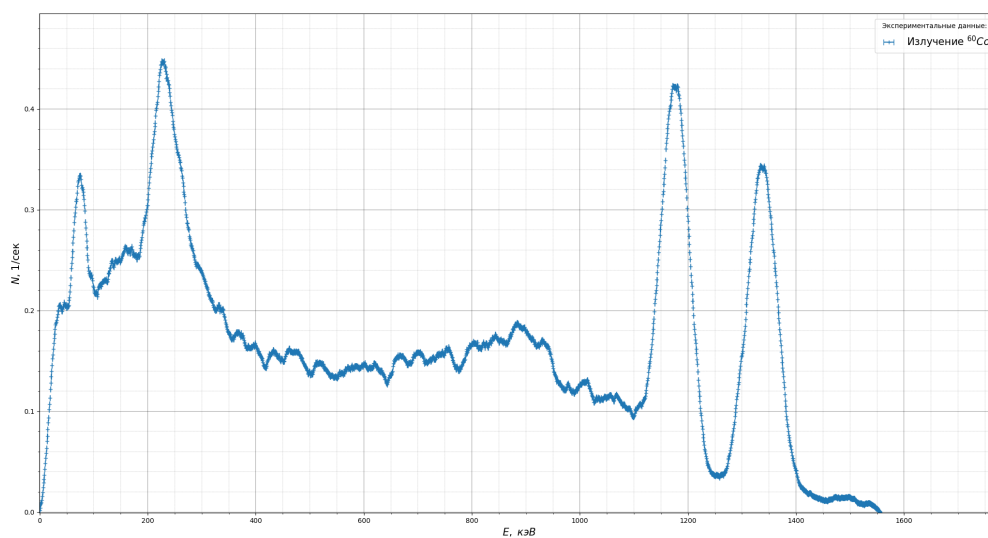


Рис. 3: Спектр  $^{60}\text{Co}$

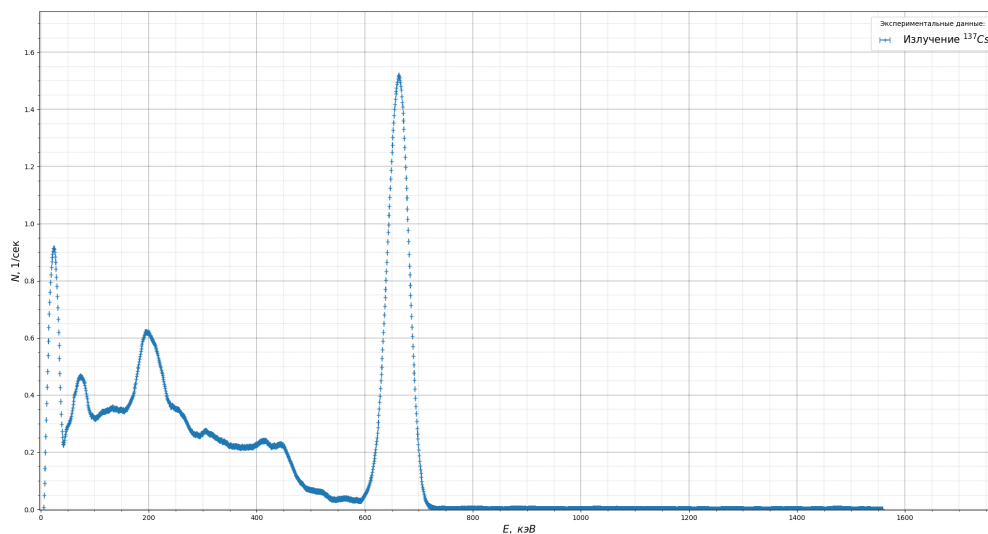


Рис. 4: Спектр  $^{137}\text{Cs}$

Найдем пики прямого поглощения для изучаемых образцов. При помощи наложения нормального распределения с помощью цифровых средств найдем максимум в номере отсчета и переведем его в энергию по полученной ранее формуле.

Образец	$N_i$	$\Delta N_i$	$E_i$ , кэВ	$\Delta E_i$ , кэВ	$R_i$
Натрий $^{22}\text{Na}$	718.1	42	508.8	40.2	0.079
Натрий $^{22}\text{Na}$	1695.2	76.6	1279.6	73.4	0.058
Цезий $^{137}\text{Cs}$	915.3	47.4	664.2	45.3	0.069
Кобальт $^{60}\text{Co}$	1565.7	65.1	1177.0	62.3	0.053
Кобальт $^{60}\text{Co}$	1767.3	73.3	1336.5	70.2	0.053

Таблица 1: Пики прямого поглощения

Образец	$E_i$ , кэВ	$E_c$ , кэВ	$E_c$ , кэВ
Натрий $^{22}\text{Na}$	508.8	320.2	341.
Цезий $^{137}\text{Cs}$	664.2	483.2	477.2
Кобальт $^{60}\text{Co}$	1177.0	973.3	960.9
Натрий $^{22}\text{Na}$	1279.6	1075.0	1062.3

Таблица 2: Комптовские спектры

Образец	$E_i$ , кэВ	$E$ , кэВ
Натрий $^{22}\text{Na}$	508.8	190
Цезий $^{137}\text{Cs}$	664.2	205
Кобальт $^{60}\text{Co}$	1336.5	230

Таблица 3: Пики обратного рассеяния

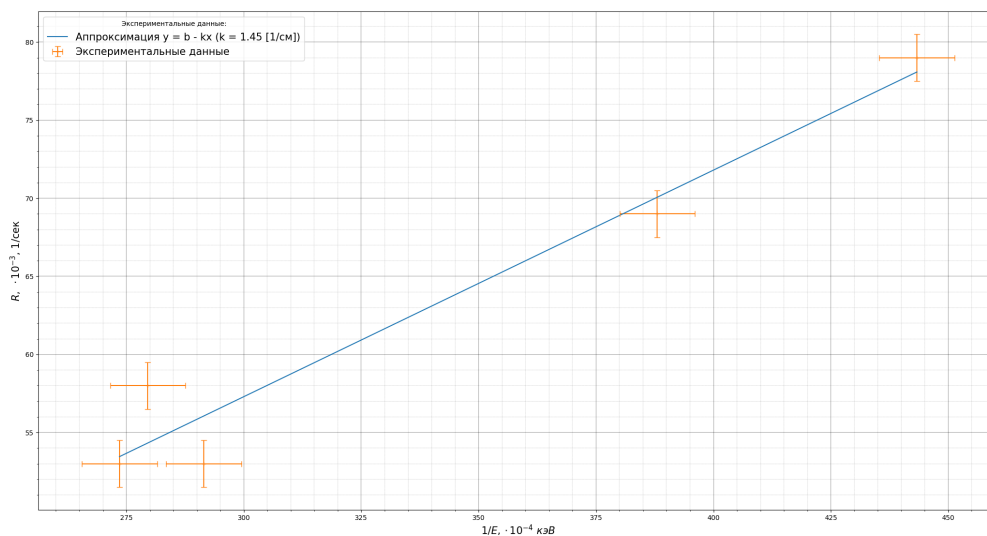


Рис. 5: Проверка формулы  $R = \frac{\text{const}}{\sqrt{E}}$

### 3 Вывод

В ходе работы после калибровки прибора были сняты спектры образцов  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . В спектрах были исследованы пики, соответствующие следующим взаимодействиям гамма-квантов с веществом:

- фотоэффект (пики полного поглощения)
- эффект Комптона (характерное распределение энергий в спектре, оканчивающееся комptonовским краем)
- обратное рассеяние (пики обратного рассеяния)
- аннигиляция позитронов (пик 511 кэВ в спектре натрия, по которому проводилась калибровка)

Все значения энергии, определённые по спектрам, практически совпадали с табличными и расчётными.