

# Лабораторная работа 5.5.5

## Компьютерная сцинтилляционная $\gamma$ спектрометрия

Гаврилин Илья  
Добровольская Ксения  
Б01-110

15 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 счёта 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 счёт сцинтиллятора отнормируем по времени, получив число частиц за секунду  $N_\text{ч} = \frac{N'_\text{ч}}{t}$ . Погрешность счёта 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.

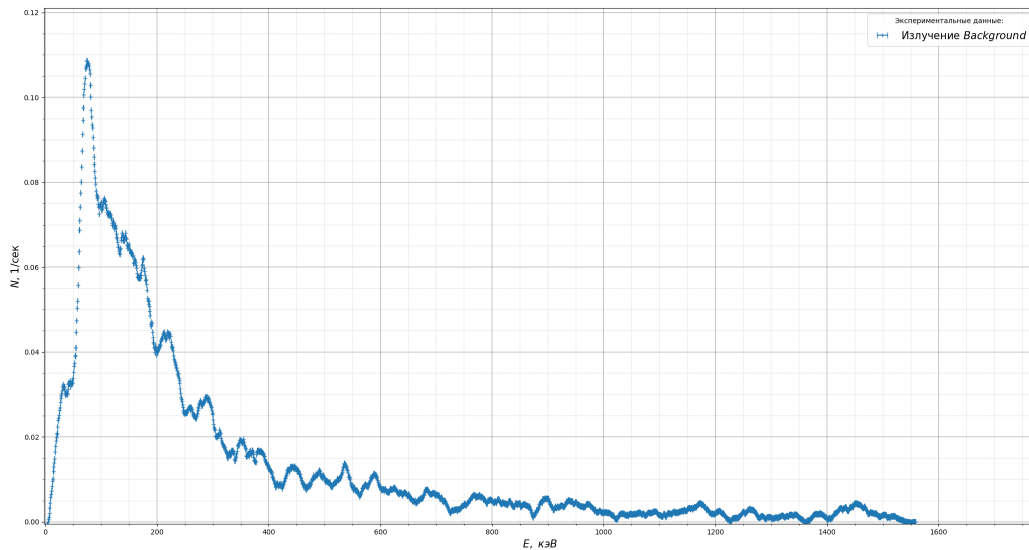


Рис. 1: Фоновое излучение

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

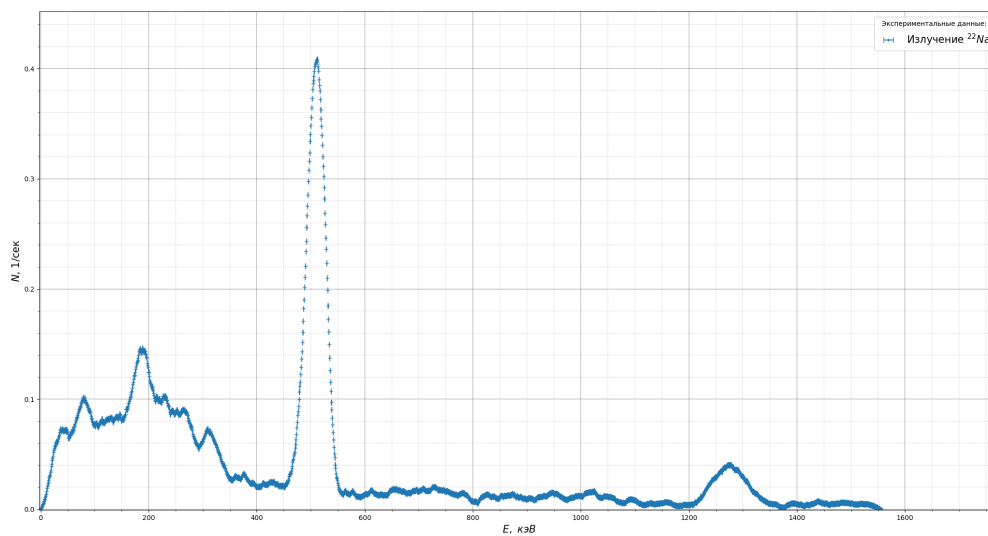


Рис. 2: Спектр  $^{22}\text{Na}$

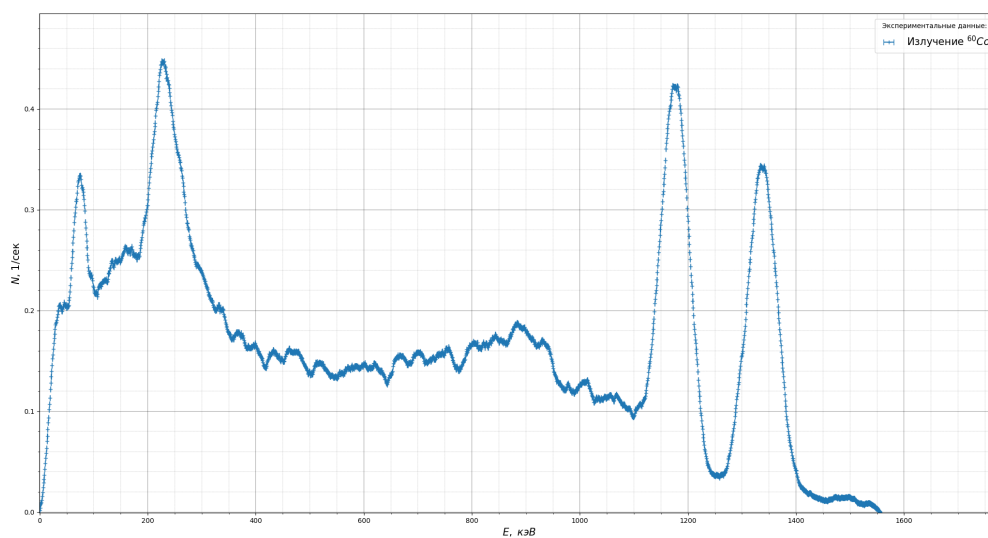


Рис. 3: Спектр  $^{60}\text{Co}$

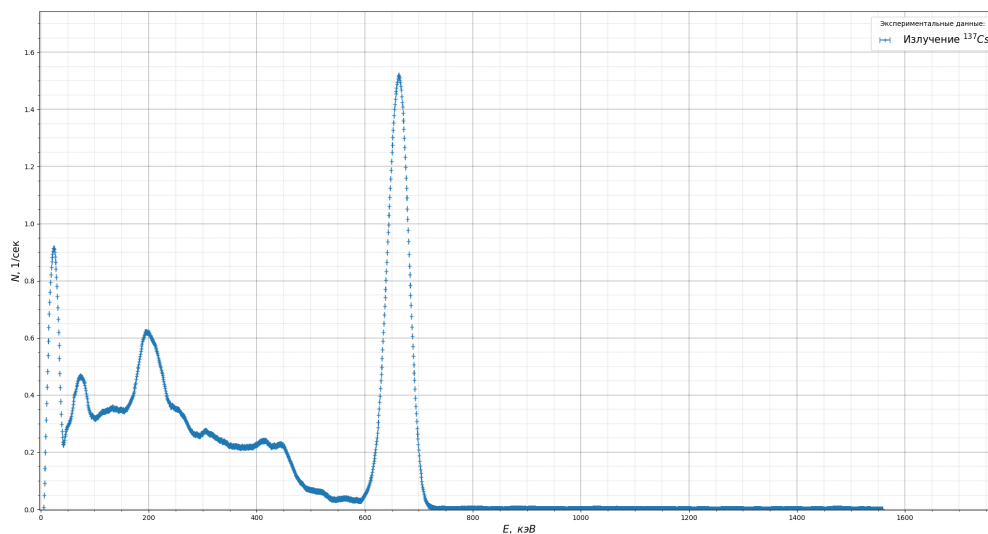


Рис. 4: Спектр  $^{137}\text{Cs}$

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 | $R_i$ | $E_{\text{теор}}$ , кэВ |
|--------------------------|--------|--------------|-------------|--------------------|-------|-------------------------|
| Натрий $^{22}\text{Na}$  | 718.1  | 42           | 508.8       | 40.2               | 0.079 | 511                     |
| Натрий $^{22}\text{Na}$  | 1695.2 | 76.6         | 1279.6      | 73.4               | 0.058 | 1275                    |
| Цезий $^{137}\text{Cs}$  | 915.3  | 47.4         | 664.2       | 45.3               | 0.069 | 661.6                   |
| Кобальт $^{60}\text{Co}$ | 1565.7 | 65.1         | 1177.0      | 62.3               | 0.053 | 1173                    |
| Кобальт $^{60}\text{Co}$ | 1767.3 | 73.3         | 1336.5      | 70.2               | 0.053 | 1333                    |

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: Комптновские 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

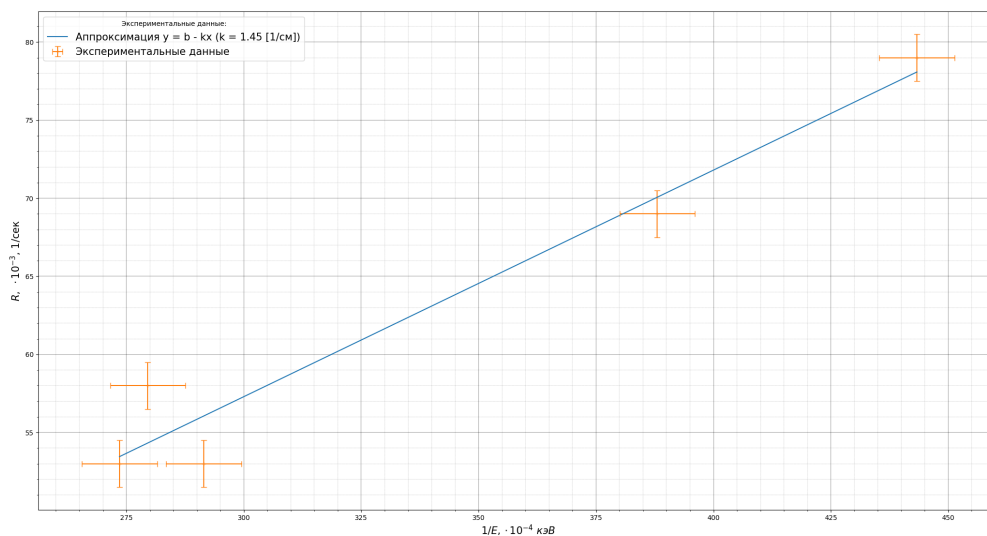


Рис. 5: Проверка формулы  $R = \frac{\text{const}}{\sqrt{E}}$

### 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.