

МОСКОВСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.1

Измерение коэффициента ослабления
потока γ -лучей в веществе
и определение их энергии

Студент
Ришат ИСХАКОВ
512 группа

Преподаватель
Лев Владиславович
ИНЖЕЧИК



5 ноября 2017 г.

Цель работы: С помощью сцинтиляционного счётчика измеряются линейные коэффициенты ослабления потока γ -лучей в свинце, железе и алюминии; по их величине определяется энергия γ -квантов.

1. Теория

Гамма-лучи возникают при переходе возбуждённых ядер в более низкое энергетическое состояние. Энергия γ -квантов обычно порядка $10 \div 1000$ кэВ. Заряд и масса γ -кванта равны нулю. Проходя через вещество, пучок γ -квантов ослабляется по закону:

$$I = I_0 e^{-\mu l} \quad (1)$$

или

$$I = I_0 e^{-\mu' m_1}, \quad (2)$$

где I, I_0 - интенсивности прошедшего и падающего излучений, l — длина пути, пройденного пучком γ -лучей, m_1 — масса пройденного вещества на единицу площади, μ и μ' — константы, зависящие от среды ($[\mu] = \text{см}^{-1}$, $[\mu'] = \text{см}^2/\text{г}$). μ' , в отличие от μ , не зависит от плотности среды. Ослабление потока γ -лучей в веществе связано с тремя эффектами: фотоэлектрическим поглощением, комптоновским рассеянием и генерацией электрон-позитронных пар.

Фотоэлектрическое поглощение

При столкновении γ -квантов с электронами внутренних атомных оболочек может происходить поглощение квантов. Свободные (наружные) электроны не могут поглощать кванты. Вероятность $dP_{\text{ф}}$ фотоэлектрического поглощения γ -квантов:

$$dP_{\text{ф}} = \sigma_{\text{ф}} n_1 dl,$$

где dl — длина пути, n_1 — плотность внутренних электронов, $\sigma_{\text{ф}}$ — поперечное сечение фотоэлектрического поглощения.

$$\mu_{\text{ф}} = \sigma_{\text{ф}} n_1,$$

$\mu_{\text{ф}}$ — коэффициент поглощения для фотоэффекта μ из уравнения (1).

Фотоэффект является доминирующим механизмом поглощения γ -квантов при не очень высоких энергиях. Его вероятность зависит от энергии лучей и заряда ядер.

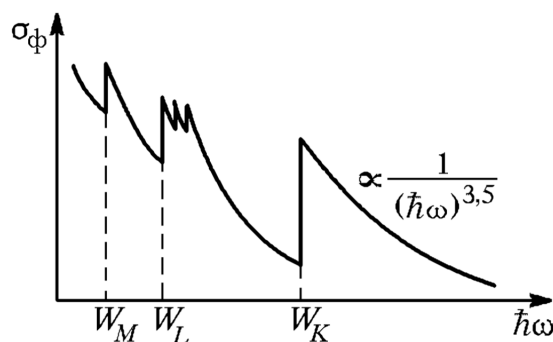


Рис. 1: Зависимость сечения фотоэффекта от энергии γ -квантов.

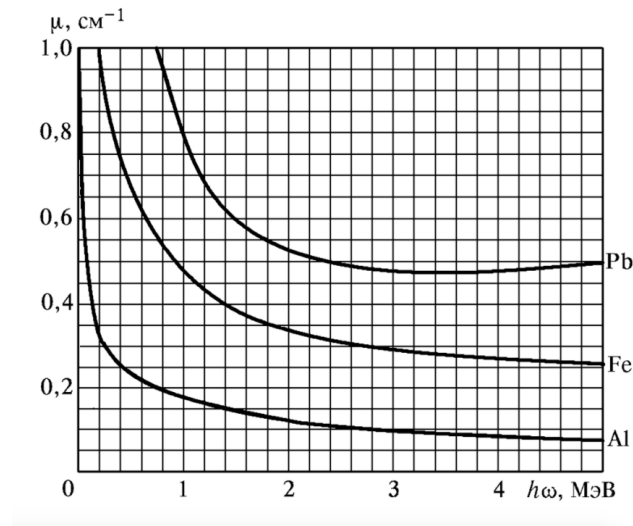


Рис. 2: Полные коэффициенты ослабления потока γ -лучей в алюминии, железе и свинце.

Комптоновское рассеяние

Комптоновское рассеяние — упругое столкновение γ -кванта с электроном. Оно может происходить на свободных/слабосвязанных электронах. Эффект Комптона становится существенным, когда энергия квантов становится много больше энергии связи электронов в атоме. В этом случае сечение комптон-эффекта:

$$\sigma_K = \pi r^2 \frac{mc^2}{\hbar\omega} \left(\ln \frac{2\hbar\omega}{mc^2} + \frac{1}{2} \right), \quad (3)$$

где $r \simeq 2.8 \cdot 10^{-13}$ см — классический радиус электрона, m — его масса.

Эффект комптона приводит не к поглощению, а к рассеянию γ -квантов и уменьшению их энергии.

Образование пар

При энергиях γ -лучей больше 1.02 МэВ становится возможным поглощение лучей, связанное с образованием электрон-позитронных пар. Оно возникает в электрическом поле ядер. Вероятность этого процесса приблизительно пропорциональна Z^2 .

Полный коэффициент ослабления потока γ -лучей

Полный коэффициент ослабления потока лучей равен сумме коэффициентов для трёх рассмотренных процессов.

Полный коэффициент ослабления:

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N} \quad (4)$$

В работе определяются толщина образца l , число падающих частиц N_0 и число прошедших частиц N .

2. Экспериментальная установка

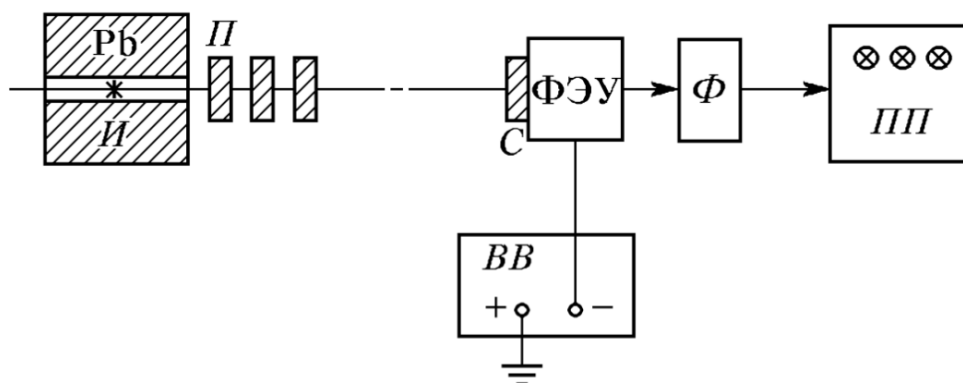


Рис. 3: Блок-схема установки, используемой для измерения коэффициентов ослабления потока γ -лучей; Рб — свинцовый контейнер с коллиматорным каналом; П — набор поглотителей, ПП — пересчётный прибор; С — сцинтиллятор (кристалл $NaI(Tl)$); ВВ — высоковольтный выпрямитель, Ф — формирователь-выпрямитель; И — источник γ -лучей

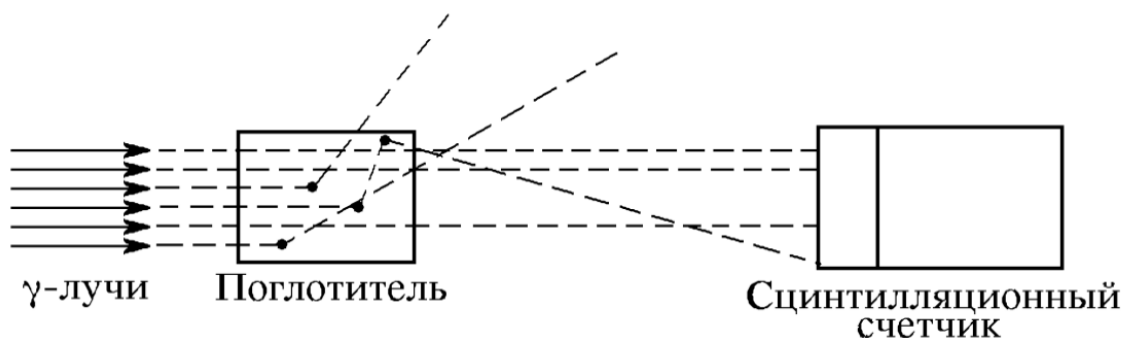


Рис. 4: Схема рассеяния γ -квантов в поглотителе

3. Ход работы

1. Исследовали поглощение γ -лучей в свинце, железе и алюминии. Для этого измерили число частиц, попадающих в счётчик за фиксированное время при различной толщине образцов (точность измерения 0.3%):

Таблица 1: Результаты измерений для свинца:

l , мм	4	8	12	16	20
N , шт.	136746	102354	105008	104325	97589
t_{Σ} , с	30	40	70	120	190

Таблица 2: Результаты измерений для железа:

l , мм	9	18	27	36	45
N , шт.	136393	100156	112720	103385	98267
t_{Σ} , с	30	40	80	130	220

Таблица 3: Результаты измерений для алюминия:

l , мм	20	40	60	80	100
N , шт.	105329	102030	110819	100716	105235
t_{Σ} , с	20	30	50	70	110

Абсолютная погрешность измерения толщины образца $\varepsilon_l = 1$ мм.

- Измерили число частиц, попадающих в счётчик за фиксированное время в отсутствие поглотителя: $N_0 = 166505$ частиц за 20 секунд (точность измерения 0,3%). Чтобы учесть фон, обусловленный шумом ФЭУ и посторонними частицами, измерили количество частиц, попадающих на счётчик за фиксированное время при закрытии коллиматора свинцовой заглушкой: $N_{\text{фон.}} = 9986$ частиц за 400 секунд (точность измерения 0,3%). Фон вычитается из всех результатов измерений.

4. Обработка данных

- Построили графики зависимости $\ln(N - N_{\text{фон.}}) = f(l)$ для всех исследуемых веществ:

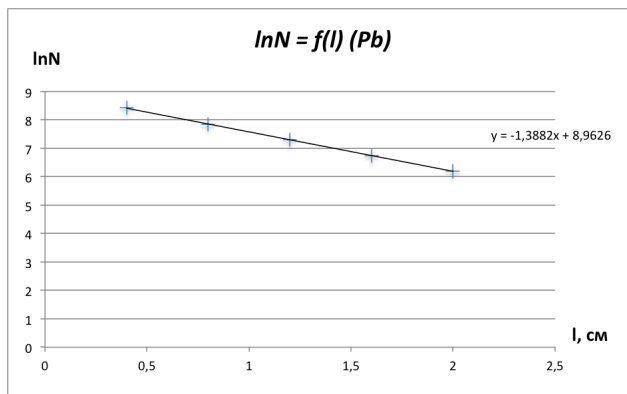


Рис. 5: График зависимости логарифма числа прошедших частиц от толщины образца для свинца

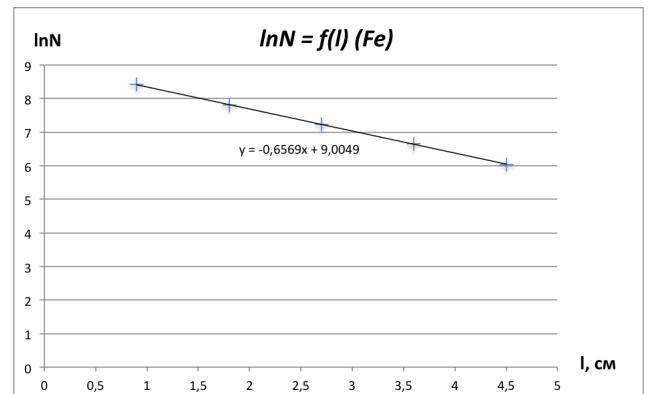


Рис. 6: График зависимости логарифма числа прошедших частиц от толщины образца для железа

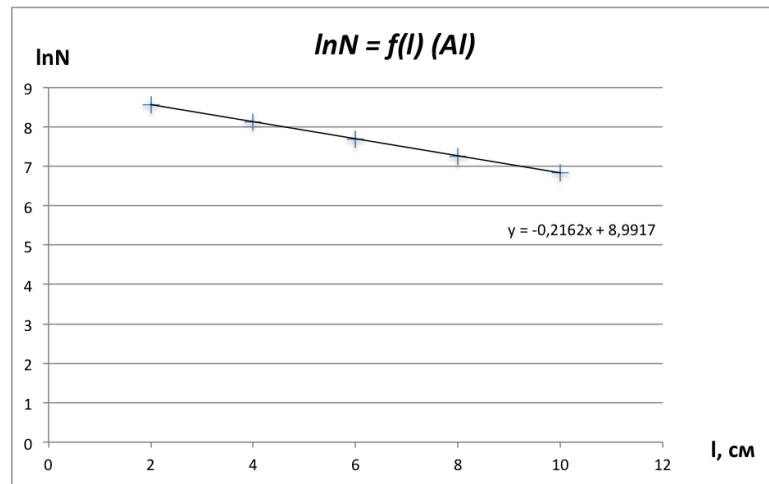


Рис. 7: График зависимости логарифма числа прошедших частиц от толщины образца для алюминия

2. С помощью графиков определили линейные коэффициенты ослабления для всех трёх веществ:

$$\mu_{Pb} \approx 1,388 \text{ см}^{-1}$$

$$\mu_{Fe} \approx 0,657 \text{ см}^{-1}$$

$$\mu_{Al} \approx 0,216 \text{ см}^{-1}$$

3. По линейным коэффициентам ослабления нашли коэффициенты μ' по формулам (1) и (2):

$$\text{Из (1) и (2)} \Rightarrow \mu l = \mu' m_1 \quad (5)$$

Отсюда:

$$\mu'_{Pb} \approx 0,122 \frac{\text{см}^2}{\text{г}}$$

$$\mu'_{Fe} \approx 0,084 \frac{\text{см}^2}{\text{г}}$$

$$\mu'_{Al} \approx 0,079 \frac{\text{см}^2}{\text{г}}$$

4. Используя найденные коэффициенты ослабления и табличные данные, определили среднюю энергию γ -лучей, испускаемых источником:

$$E_\gamma \sim 0,5 \div 0,6 \text{ МэВ}$$

5. Рассчитали погрешности измерений:

- (а) Погрешность построенных графиков, рассчитанная методом наименьших квадратов ($y = ax + b$):

$$\frac{da_1}{a_1} \approx 0,005 = 0,5\%$$

$$\frac{da_2}{a_2} \approx 0,004 = 0,4$$

$$\frac{da_3}{a_3} \approx 0,003 = 0,3$$

(b) С учётом погрешностей:

$$\mu_{Pb} = 1,388 \pm 0,007 \text{ см}^{-1}$$

$$\mu_{Fe} = 0,657 \pm 0,003 \text{ см}^{-1}$$

$$\mu_{Al} = 0,216 \pm 0,001 \text{ см}^{-1}$$

5. Вывод

Исследовали поглощение γ -лучей в свинце, алюминии и железе. Получили линейные зависимости логарифма прошедших частиц от толщины образцов и по ним определили линейные коэффициенты ослабления μ и μ' , а также среднюю энергию γ -лучей, испускаемых источником. Полученное значение составило $E_\gamma \sim 0,5 \div 0,6$ МэВ. Погрешности измерений не превысили 1%.