

# Измерение коэффициента ослабления потока $\gamma$ -лучей в веществе и определение их энергии (5.5.1)

Манро Эйден B01-3036

**Цель работы:** с помощью сцинтилляционного счетчика измерить линейные коэффициенты ослабления потока  $\gamma$ -лучей в свинце, железе и алюминии; по их величине определить энергию  $\gamma$ -квантов.

## Теоретическая часть

Гамма-излучение относится к виду электромагнитного излучения с очень высокой энергией квантов (от десятков кэВ до нескольких МэВ). Оно возникает при переходах атомных ядер из возбужденного состояния в основное. В отличие от заряженных частиц, гамма-кванты не имеют ни массы покоя, ни электрического заряда, благодаря чему они способны проникать через значительные толщи вещества. При этом интенсивность излучения уменьшается за счёт взаимодействия фотонов с атомами вещества.

### Закон ослабления

Эксперимент показывает, что уменьшение интенсивности гамма-излучения при прохождении через вещество подчиняется экспоненциальному закону:

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

где  $I_0$  — интенсивность излучения до поглотителя,  $I$  — интенсивность после прохождения слоя толщиной  $l$ ,  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления. Для разных веществ удобнее использовать массовый коэффициент ослабления  $\mu'$ , связанный с  $\mu$  через плотность вещества  $\rho$ :

$$\mu' = \frac{\mu}{\rho}. \quad (2)$$

### Определение энергии $\gamma$ -квантов

Для экспериментального определения коэффициента ослабления измеряют число квантов  $N_0$ , падающих на образец, и число  $N$ , прошедших через него. Измеренный коэффициент вычисляется по формуле:

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N}. \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{I_0 - I_{\text{фон}}}{I - I_{\text{фон}}}. \quad (4)$$

Эквивалентная запись через массовую толщину  $m_1 = \rho l$  имеет вид

$$I = I_0 e^{-\mu' m_1}, \quad \mu' = \frac{\mu}{\rho}. \quad (5)$$

В счётной форме для числа зарегистрированных квантов  $N$  за фиксированное время:

$$-dN = \mu N dl \Rightarrow N(l) = N_0 e^{-\mu l}. \quad (6)$$

Ключевое требование - *хорошая геометрия* (узкий пучок): рассеянные кванты не должны возвращаться в пучок, иначе экспонента нарушается.

Так как значение  $\mu$  зависит от энергии гамма-квантов и типа вещества, сравнение результатов измерений с табличными данными для различных поглотителей позволяет оценить энергию излучения исследуемого источника.

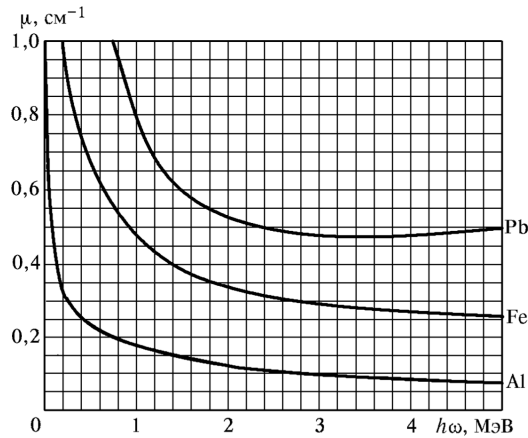


Рис. 1: Энергетическая зависимость линейного коэффициента ослабления  $\mu(\hbar\omega)$  для Pb, Fe, Al.

## Механизмы взаимодействия $\gamma$ -квантов

Основные процессы, ответственные за ослабление потока гамма-квантов:

1. **Фотоэффект** — поглощение фотона атомом с выбиванием электрона из оболочки. Вероятность велика при малых энергиях и для тяжёлых элементов.
2. **Комптоновское рассеяние** — упругое столкновение фотона с электроном, при котором часть энергии передаётся электрону, а фотон рассеивается с меньшей энергией. Это основной механизм в среднем диапазоне энергий.
3. **Рождение пар** — при энергии  $E_\gamma > 1.02$  МэВ возможна конверсия фотона в пару электрон-позитрон в поле ядра. Вероятность процесса растёт с увеличением атомного номера поглотителя.

Суммарный коэффициент ослабления складывается из вкладов всех трёх механизмов:

$$\mu = \mu_\phi + \mu_\kappa + \mu_\pi. \quad (7)$$

## Фотоэлектрическое поглощение

Фотоэффект — поглощение  $\gamma$ -кванта электроном внутренних оболочек с выбиванием фотоэлектрона; кинетическая энергия фотоэлектрона с  $i$ -й оболочки

$$T_i = \hbar\omega - W_i, \quad (8)$$

где  $W_i$  — энергия связи. Вероятность процесса на пробеге  $dl$ :

$$dP_f = \sigma_f n_{\text{вн}} dl, \quad \mu_f = \sigma_f n_{\text{вн}}, \quad (9)$$

$\sigma_f$  — сечение фотоэффекта (на электрон),  $n_{\text{вн}}$  — плотность «внутренних» электронов. Для атомного сечения удобно пользоваться оценкой зависимости от  $Z$  и энергии:

$$\sigma_{\text{ph}} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^\varepsilon}, \quad \varepsilon \simeq 3.5 \text{ вблизи К-порога, } \varepsilon \rightarrow 1 \text{ при } E_\gamma \gg I_K. \quad (10)$$

Вблизи краёв поглощения (К-край и др.) наблюдаются разрывы в  $\sigma_{\text{ph}}(E)$  и, соответственно, в  $\mu(E)$  для тяжёлых элементов. На практике для энергий порядка сотен кэВ–МэВ часто достаточно аппроксимации

$$\sigma_{\text{ph}} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^{3.5}}, \quad (11)$$

что объясняет резкий рост вероятности фотоэффекта при понижении энергии кванта и сильную зависимость от  $Z$ .

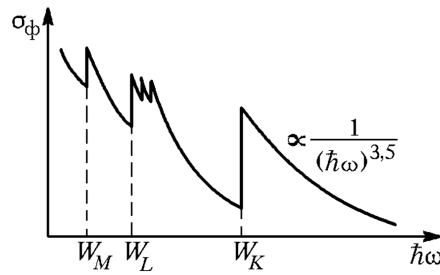


Рис. 2: Сечение фотоэффекта  $\sigma_\phi(\hbar\omega)$  с К-, L-, M-краями и степенным спадом  $\propto (\hbar\omega)^{-3.5}$ .

## Комптоновское рассеяние

Комптоновское упругое рассеяние на слабо связанных/свободных электронах меняет энергию кванта и уводит его из пучка. При  $E_\gamma \gg m_e c^2$  интегральное сечение на электрон удобно оценивать формулой Кляйна–Нишины (логарифмическая аппроксимация)

$$\sigma_k \simeq \pi r_e^2 \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \left[ \ln \left( \frac{2E_\gamma}{m_e c^2} \right) + \frac{1}{2} \right], \quad (12)$$

где  $r_e$  — классический радиус электрона. Комптоновский вклад в ослабление выражается как  $\mu_k = \sigma_k n_e$ .

## Рождение электрон-позитронных пар

При  $E_\gamma > 2m_e c^2 \simeq 1.022$  МэВ в поле ядра возможна конверсия  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$  с полным поглощением кванта. В данной работе этот канал не регистрируется и в обработке не учитывается (энергии источника/геометрия подобраны так, что вклад пар отсутствует или пренебрежимо мал); он приведён здесь исключительно для понимания общей картины процессов.

## Полный коэффициент

Полный коэффициент ослабления складывается из вкладов:

$$\mu(E_\gamma, Z) = \mu_f + \mu_k + \mu_p, \quad (13)$$

где при наших условиях существенны первые два слагаемых.

## Экспериментальная установка

Для измерения коэффициента ослабления гамма-излучения используется сцинтиляционный счётчик. Источник  $\gamma$ -квантов устанавливается перед набором поглотителей различной толщины. За ними располагается детектор, регистрирующий прошедшее излучение. Таким образом можно определить, как изменяется интенсивность гамма-лучей при прохождении через вещество, и по этим данным вычислить коэффициент ослабления.

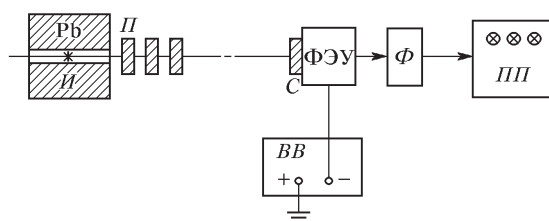


Рис. 3: Принципиальная схема: И - источник  $\gamma$ -лучей, Рб - свинцовый контейнер с коллиматорным каналом, П - набор поглотителей, С - сцинтиллятор, Ф - формирователь-выпрямитель.

## Сцинтилляционный счётчик

Принцип действия сцинтилляционного счётчика основан на том, что при поглощении гамма-кванта в кристалле-сцинтилляторе возникают высокоэнергетические электроны. Они передают свою энергию атомам кристалла, в результате чего появляются короткие вспышки света — сцинтилляции. Яркость этих вспышек пропорциональна энергии, поглощённой в кристалле.

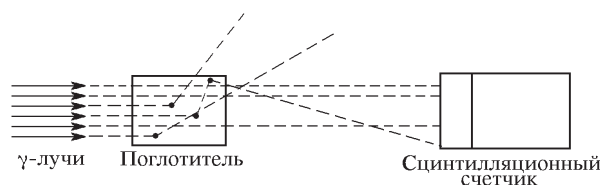


Рис. 4: Схема рассеяния  $\gamma$ -квантов в поглотителе.

На практике чаще всего используют неорганические сцинтилляторы, например кристалл  $\text{NaI(Tl)}$ . Для регистрации света сцинтиллятор оптически связан с фотоумножителем (ФЭУ). Фотоны сцинтилляции выбивают электроны из фотокатода ФЭУ, которые затем последовательно усиливаются системой динодов. В результате на выходе фотоумножителя возникает электрический импульс, амплитуда которого соответствует энергии зарегистрированного  $\gamma$ -кванта.

## Регистрация сигналов

Электрические импульсы от фотоумножителя подаются на усилитель и счётную электронику. Так фиксируется количество зарегистрированных  $\gamma$ -квантов за заданное время. Изменяя толщину поглотителя между источником и детектором, можно исследовать закон ослабления потока и определить линейный коэффициент ослабления для разных веществ.

## Ход работы

Перед началом измерений был измерен фон. Для этого перед детектором была установлена свинцовая защита, полностью исключающая прямое излучение от источника. В результате было получено число импульсов  $N_{\text{фон}}$ . Разделив его на время измерения, рассчитали среднюю скорость счёта фона  $I_{\text{фон}}$ . Полученное значение оказалось невелико, однако его необходимо вычитать из всех последующих измерений.

После измерения фона свинцовая защита была убрана, и проведено измерение числа импульсов  $N_0$  от источника. С учётом поправки на фон была определена интенсивность падающего на детектор излучения  $I_0$ .

Основная часть работы заключалась в исследовании ослабления излучения в веществе. Для этого использовался набор пластин (поглотителей) из свинца (Pb), железа (Fe) и алюминия (Al). Для каждого материала была экспериментально определена зависимость интенсивности прошедшего излучения от толщины поглотителя, и по формуле (4) рассчитаны линейные коэффициенты ослабления  $\mu$ .

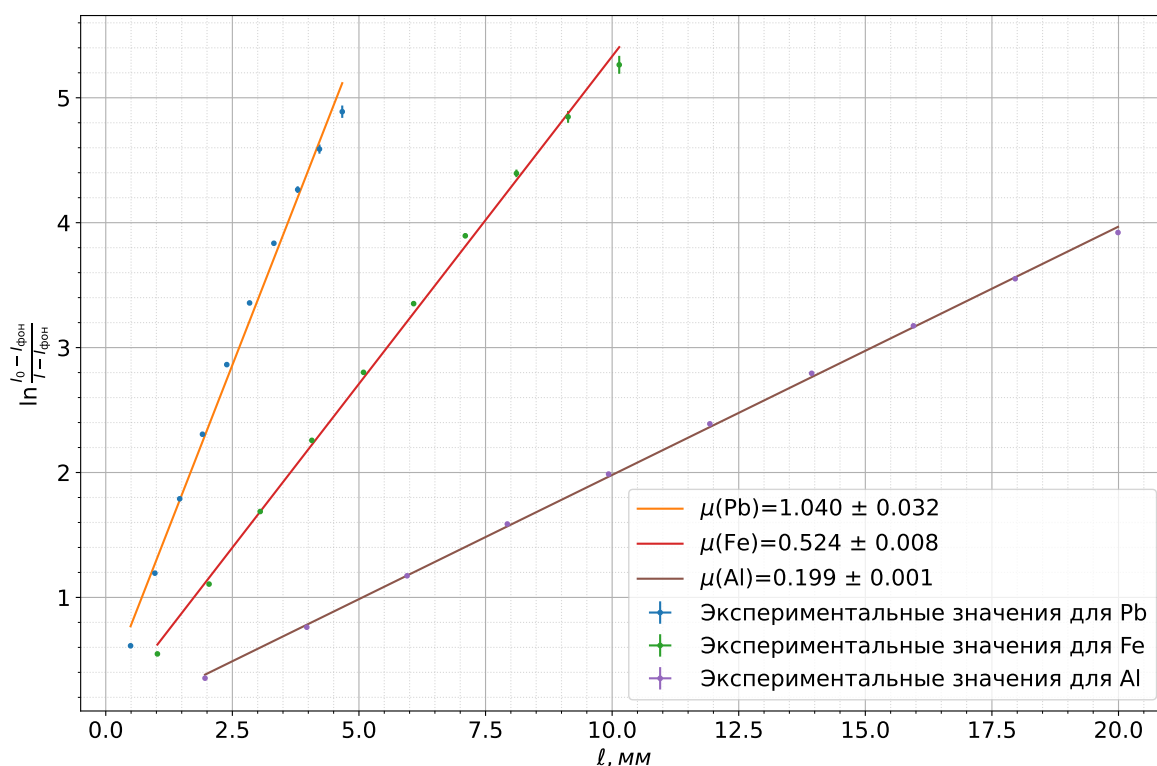


Рис. 5: Зависимости  $\ln(I_0/I')(l)$  для Pb, Fe и Al.

Были получены следующие значения коэффициентов ослабления:

$$\mu_{\text{Pb}} = (1.040 \pm 0.032) \text{ см}^{-1}$$

$$\mu_{\text{Fe}} = (0.524 \pm 0.008) \text{ см}^{-1}$$

$$\mu_{\text{Al}} = (0.199 \pm 0.001) \text{ см}^{-1}$$

Для определения энергии  $\gamma$ -излучения полученные экспериментальные значения  $\mu$  были сопоставлены с табличными данными  $\mu(E)$ , приведёнными в справочных материалах. Чтобы уменьшить погрешность, по нескольким табличным точкам была построена аппроксимирующая функция  $\mu(1/E)$  в виде полинома. По этой функции рассчитано среднее значение энергии:

$$E_{\gamma} = (0.76 \pm 0.11) \text{ МэВ}$$

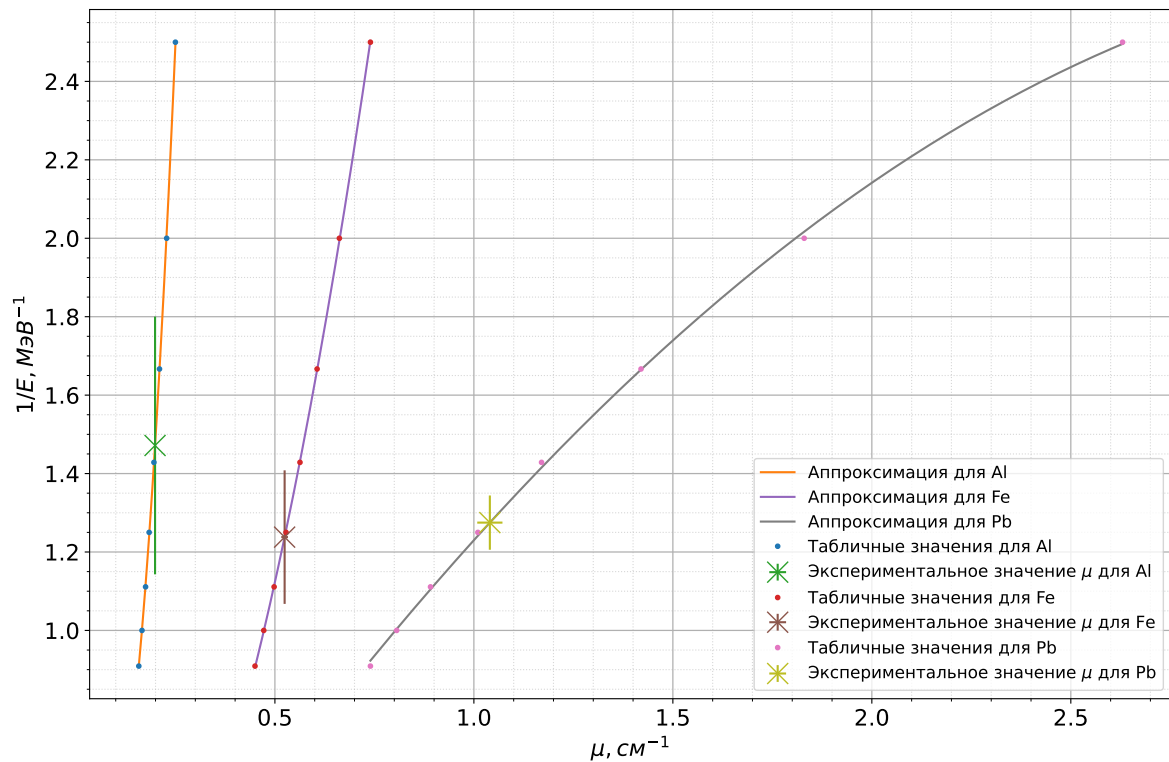


Рис. 6: Аппроксимация зависимости  $\frac{1}{E}(\mu)$  по табличным значениям.

## Выводы

В ходе работы были экспериментально измерены линейные коэффициенты ослабления узкого пучка  $\gamma$ -излучения для свинца, железа и алюминия. Измерения проводились в условиях «хорошей геометрии», а из результатов каждой серии измерений вычитался фоновый счёт, что обеспечило высокую достоверность полученных данных.

Наблюдается ожидаемая зависимость коэффициента ослабления от атомного номера вещества: наибольшее значение получено для свинца ( $Z = 82$ ), меньшее — для железа ( $Z = 26$ ) и наименьшее — для алюминия ( $Z = 13$ ). Эта закономерность качественно согласуется с теорией, согласно которой сечение фотоэффекта — основного механизма поглощения в данном энергетическом диапазоне — сильно зависит от  $Z$ .

Для количественного анализа по измеренным коэффициентам ослабления была определена энергия  $\gamma$ -квантов. Независимое определение энергии через табличные зависимости ( $E$ ) для трёх разных материалов дало согласующиеся результаты. Среднее значение энергии  $E_\gamma = (0.76 \pm 0.11)$  МэВ хорошо совпадает со справочным значением для линии  $\gamma$ -излучения изотопа  $^{137}\text{Cs}$ , используемого в работе.