

Измерение коэффициента ослабления потока γ -лучей в веществе и определение их энергии (5.5.1)

Манро Эйден Б01-3036

Цель работы: с помощью сцинтилляционного счетчика измерить линейные коэффициенты ослабления потока γ -лучей в свинце, железе и алюминии; по их величине определить энергию γ -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 , μ — линейный коэффициент ослабления. Для разных веществ удобнее использовать массовый коэффициент ослабления μ' , связанный с μ через плотность вещества ρ :

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

Определение энергии γ -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 μ зависит от энергии гамма-квантов и типа вещества, сравнение результатов измерений с табличными данными для различных поглотителей позволяет оценить энергию излучения исследуемого источника.

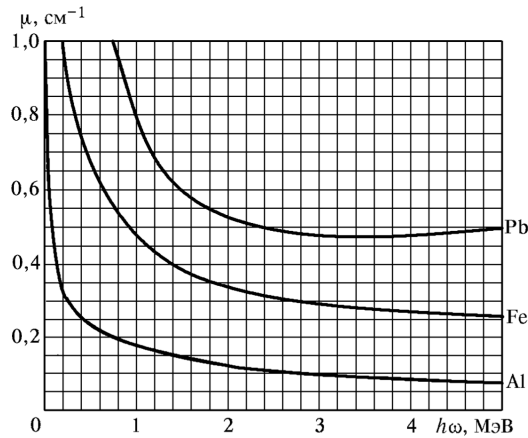


Рис. 1: Энергетическая зависимость линейного коэффициента ослабления $\mu(\hbar\omega)$ для Pb, Fe, Al.

Механизмы взаимодействия γ -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 γ -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 :

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

σ_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 .

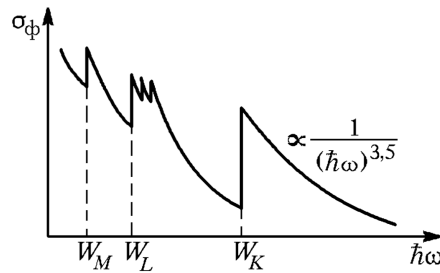


Рис. 2: Сечение фотоэффекта $\sigma_\phi(\hbar\omega)$ с К-, L-, М-краями и степенным спадом $\propto (\hbar\omega)^{-3.5}$.

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 γ -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.

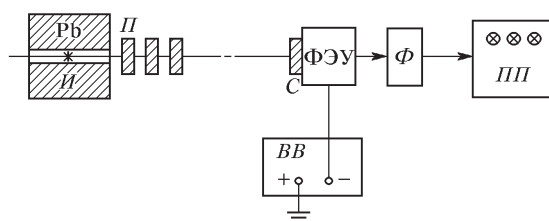


Рис. 3: Принципиальная схема: И - источник γ -лучей, Рб - свинцовый контейнер с коллиматорным каналом, П - набор поглотителей, С - сцинтиллятор, Ф - формирователь-выпрямитель.

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.

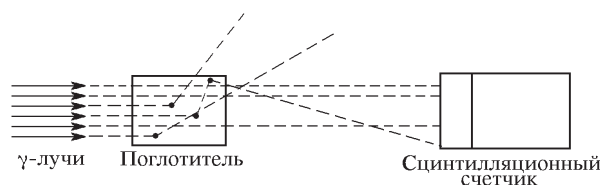


Рис. 4: Схема рассеяния γ -квантов в поглотителе.

На практике чаще всего используют неорганические сцинтилляторы, например кристалл 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 γ -кванта.

Регистрация сигналов

Электрические импульсы от фотоумножителя подаются на усилитель и счётную электронику. Так фиксируется количество зарегистрированных γ -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 μ .

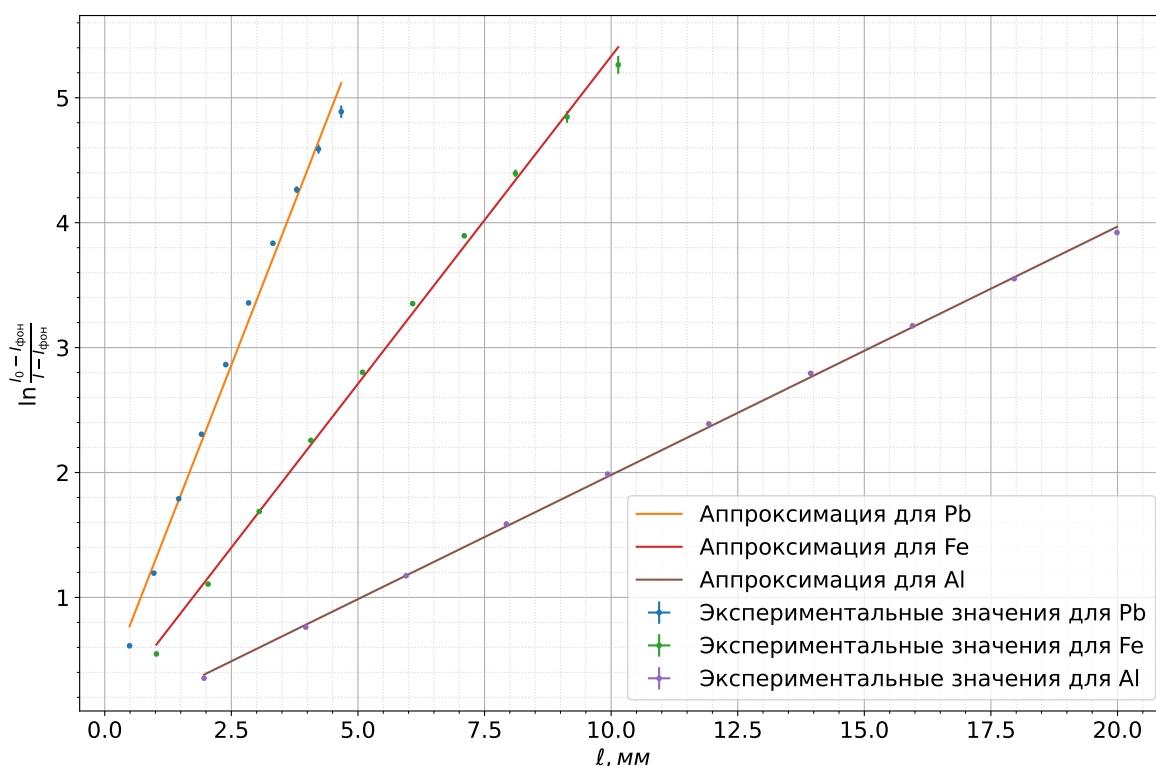


Рис. 5: Зависимости $\ln(I_0/I')(l)$ для Pb, Fe и Al.

Были получены следующие значения коэффициентов ослабления:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{Pb}} &= (1.04 \pm 0.03) \text{ см}^{-1} \\ \mu_{\text{Fe}} &= (0.52 \pm 0.01) \text{ см}^{-1} \\ \mu_{\text{Al}} &= (0.199 \pm 0.001) \text{ см}^{-1}\end{aligned}$$

Для определения энергии γ -излучения полученные экспериментальные значения μ 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:

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

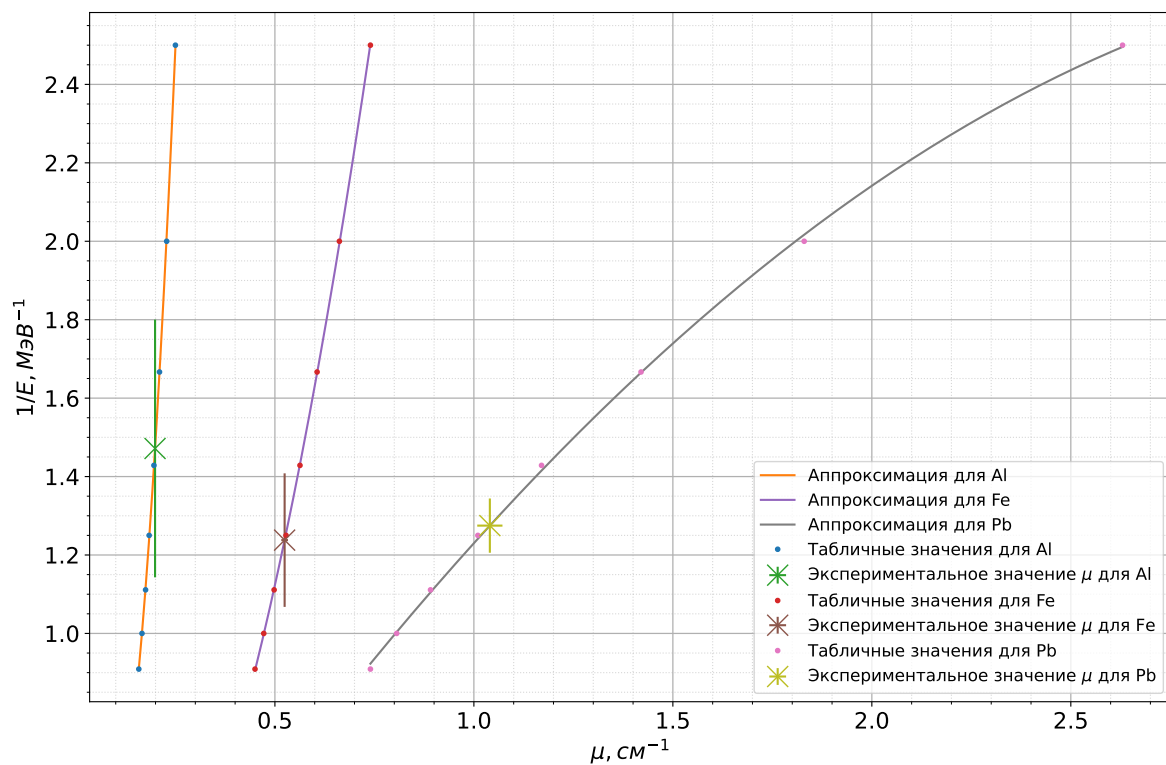


Рис. 6: Аппроксимация зависимости $\frac{1}{E}(\mu)$ по табличным значениям.

Выводы

В ходе работы были экспериментально измерены линейные коэффициенты ослабления узкого пучка γ -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 γ -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 γ -излучения изотопа ^{137}Cs , используемого в работе.