

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

Иван Сладков

19 февраля 2022 г.

## 1 Аннотация

В данной работе проводится измерение линейных коэффициентов ослабления потока  $\gamma$ -лучей в свинце, железе и алюминии с помощью сцинтилляционного счетчика; по их величине определяется энергия  $\gamma$ -квантов.

## 2 Теоретические сведения

$\gamma$ -лучи возникают при переходе возбужденных ядер из одного энергетического состояния в другое, более низкое. Энергия  $\gamma$ -квантов обычно заключена между несколькими десятками килоэлектронвольт и несколькими миллионами электрон-вольт.  $\gamma$ -кванты не несут электрического заряда, их масса равна нулю. Проходя через вещество, пучок  $\gamma$ -квантов постепенно ослабляется. Ослабление происходит по экспоненциальному закону, который может быть записан следующим образом:

$$I = I_0 \exp(-\mu l), \quad (1)$$

где  $I$  и  $I_0$  – интенсивности прошедшего и падающего излучений,  $l$  – длина пути, пройденного пучком  $\gamma$ -лучей,  $\mu$  – константа, зависящая от вещества, с размерностью  $\text{см}^{-1}$ .

Ослабление потока  $\gamma$ -лучей, происходящее при прохождении среды, связано с тремя эффектами: фотоэлектрическим поглощением, комптоновским рассеянием и с генерацией электрон-позитронных пар.

При столкновении  $\gamma$ -квантов с электронами внутренних атомных оболочек может происходить поглощение квантов. Энергия  $\gamma$ -кванта передается соответствующему электрону, а импульс делится между этим электроном и оставшимся после его вылета ионом. Свободный электрон не может поглотить  $\gamma$ -квант, так как при этом невозможно одновременно удовлетворить законам сохранения энергии и импульса. Наружные электроны не принимают участия в фотоэлектрическом поглощении, потому что они слабо связаны в атоме, так что их практически можно считать свободными. Вероятность  $dP_{\text{Ф}}$  фотоэлектрического поглощения  $\gamma$ -квантов пропорциональна длине пути  $l$  и плотности электронов в среде (в расчет должны приниматься только электроны, принадлежащие внутренним оболочкам атомов):

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

где  $n_1$  – плотность внутренних электронов, а  $\sigma_{\text{Ф}}$  – поперечное сечение фотоэлектрического поглощения. Оно характеризует вероятность фотоэффекта, рассчитанную на один электрон. Тогда для поглощения, связанного с фотоэффектом, получаем

$$\mu_{\text{Ф}} = \sigma_{\text{Ф}} n_1.$$

Аналогично вычисляется коэффициент поглощения для эффекта Комптона:

$$\mu_{\text{К}} = \sigma_{\text{К}} n_2,$$

$$\sigma_{\text{К}} = \pi r^2 \frac{mc^2}{\hbar\omega} \left( \ln \frac{2\hbar\omega}{mc^2} + \frac{1}{2} \right).$$

Все эти эффекты сложным образом зависят от энергии  $\gamma$ -кванта, а суммарный коэффициент поглощения является суммой коэффициентов в соответствующих явлениях. Для свинца, железа и алюминия эта зависимость представлена на рис. 1.

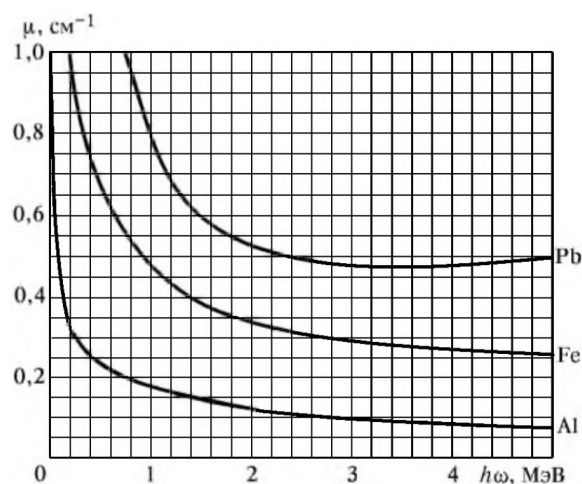


Рис. 1: Зависимость полного коэффициента поглощения от энергии  $\gamma$ -кванта

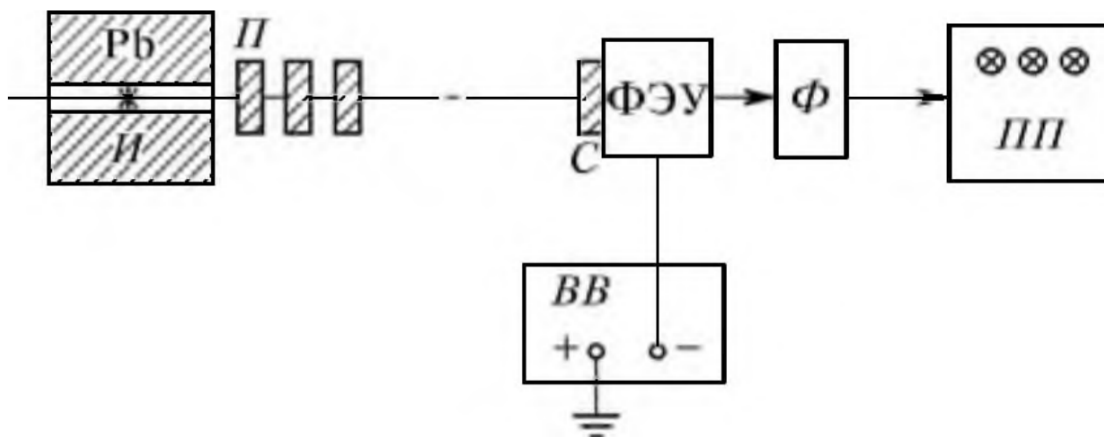


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

## 2.1 Расчётные формулы

В данной работе коэффициент ослабления  $\mu$  измеряется в хорошей геометрии, т. е. в условиях, когда исследуется прохождение сквозь вещество узкого параллельного пучка  $\gamma$ -лучей. Из формулы (1) имеем

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N}. \quad (2)$$

Энергию кванта можно определить по рис. 1.

## 3 Оборудование и инструментальные погрешности

Схема экспериментальной установки отображена на рис. 2. Свинцовый коллиматор выделяет узкий почти параллельный пучок  $\gamma$ -квантов, проходящий через набор поглотителей П и регистрируемый сцинтилляционным счетчиком. Сигналы от счетчика усиливаются и регистрируются пересчетным прибором ПП. Высоковольтный выпрямитель ВВ обеспечивает питание сцинтилляционного счетчика. Поглотители располагаются на расстоянии друг от друга во избежание многократного взаимодействия с ними  $\gamma$ -квантов.

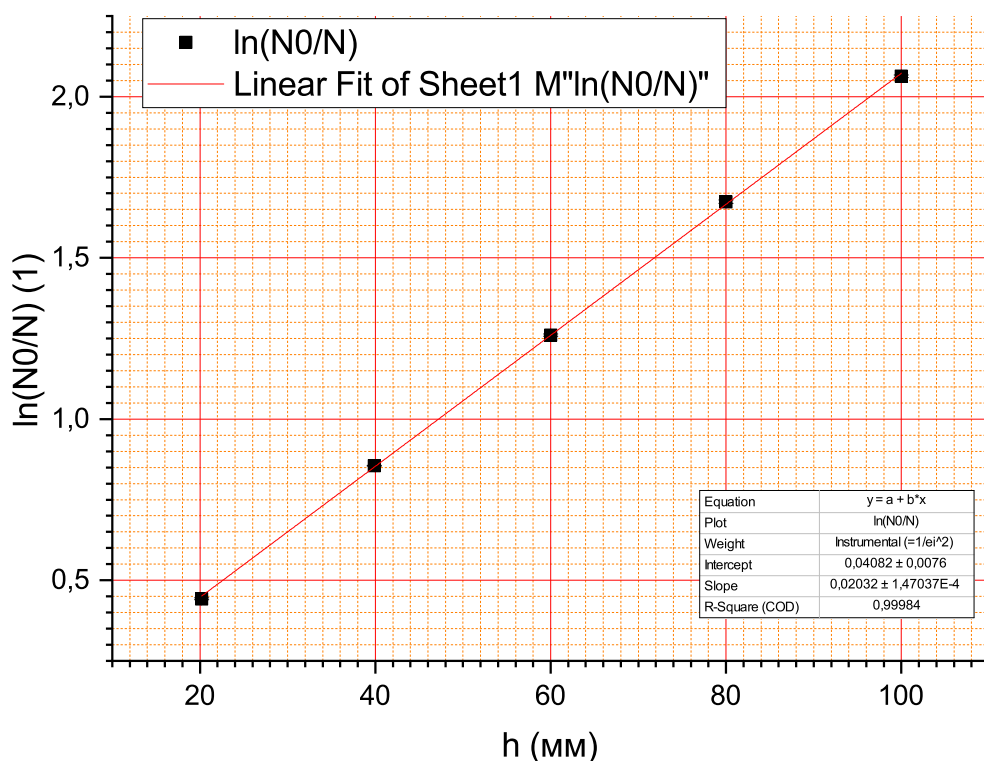
В работе используются:

**Источник  $\gamma$ -квантов со свинцовым коллиматором**

**Набор поглотителей из различных материалов**

**Сцинтилляционный счётчик**

**Пересчётный прибор**

Рис. 3: Зависимость  $\ln \frac{N_0}{N}(h)$  для алюминия

## 4 Результаты измерений и обработка данных

По результатам проведения опыта получены данные табл. 4. Далее необходимо усреднить результаты повторных опытов и найти статистические погрешности отдельного опыта. Учтём наличие фона и соответствующие погрешности. В результате получим данные для построения графиков в табл. 1. Так как требуется график вида  $\ln N_0/N(h)$ , погрешность  $\ln N_0/N$  найдём по формуле:

$$\sigma_{\log} = \sqrt{\frac{\sigma_N^2}{N^2} + \frac{\sigma_{N_0}^2}{N_0^2}} \quad (3)$$

Из графиков на рис. 3, 4, 5 найдём коэффициенты  $\mu$ :

$$\mu_{Al} = 0,0203 \pm 2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1},$$

$$\mu_{Fe} = 0,0566 \pm 1 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1},$$

$$\mu_{Pb} = 0,118 \pm 0,002 \text{ мм}^{-1}.$$

Так как при выполнении лабораторной работы не были замерены диаметры образцов поглотителей, расчёт константы  $\mu' = \mu l / m_1$  не представляется возможным.

По причине невнимательного прочтения лабника, так же был проведён прямой расчёт по формуле (2). По его результатам,

$$\mu_{Al} = 0,0211 \pm 4 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1},$$

$$\mu_{Fe} = 0,0581 \pm 7 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1},$$

$$\mu_{Pb} = 0,120 \pm 0,008 \text{ мм}^{-1}.$$

Эти значения приблизительно совпадают с полученными по методу хи-квадрат. Полного совпадения нет, так как расчёт погрешностей по формуле стандартной ошибки среднего даёт более правильный результат при большем количестве опытов.

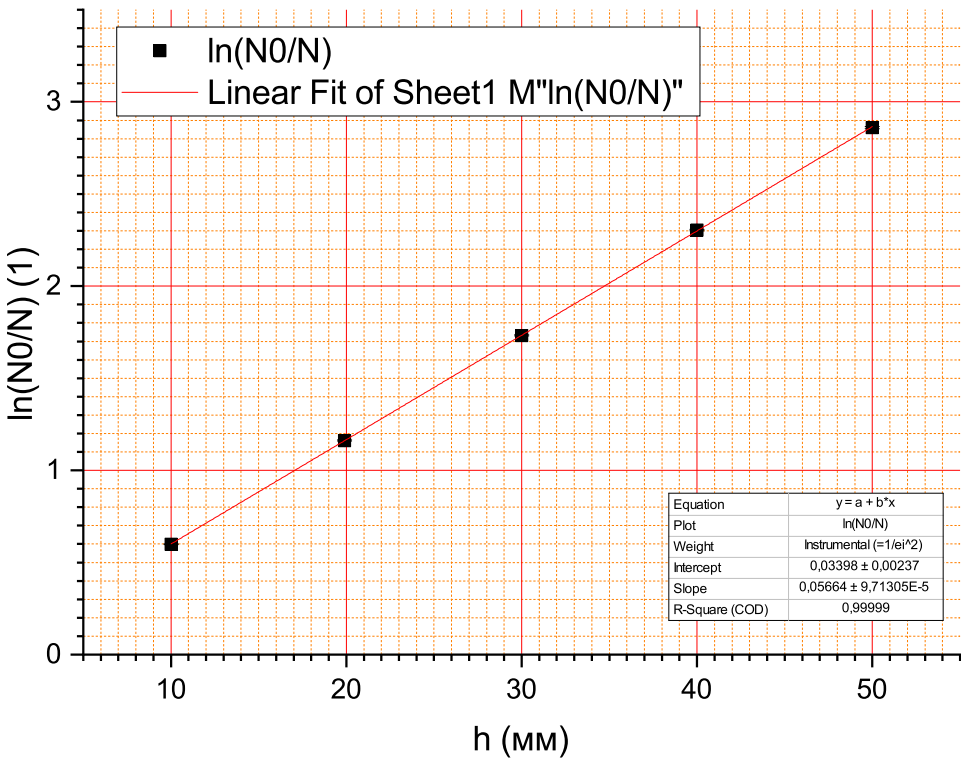
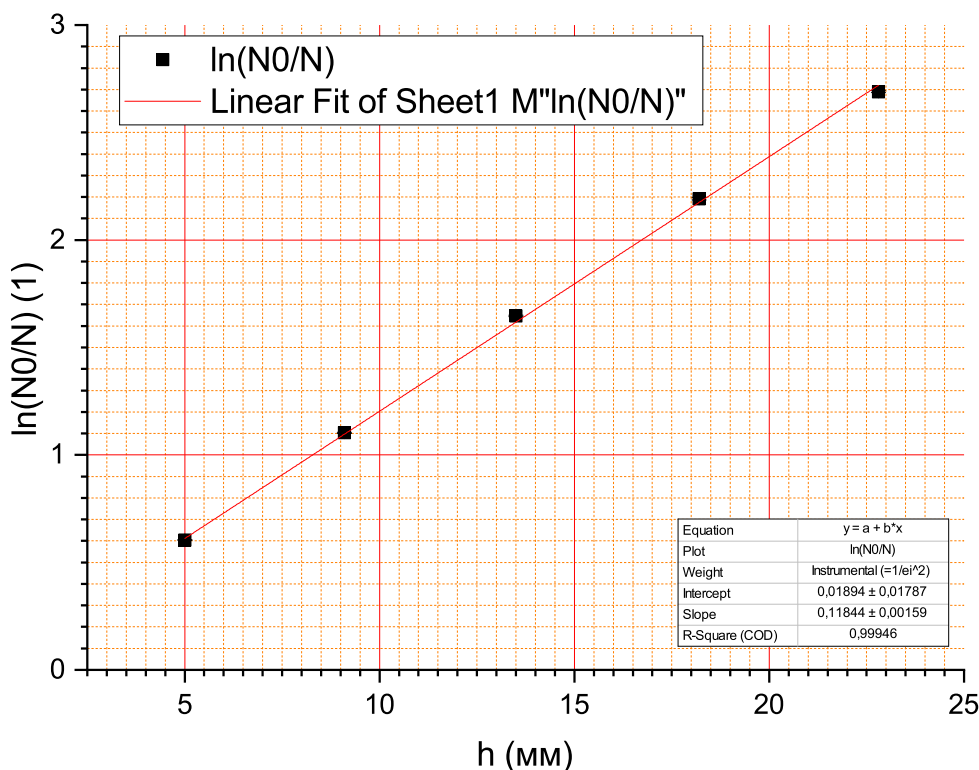


Рис. 4: Зависимость  $\ln \frac{N_0}{N}(h)$  для железа

Материал	Толщина h	Среднее число $\gamma$ -квантов, $N$	Погрешность среднего, $\sigma_N$
Алюминий	20.2	6,65E+4	2E+2
	39.9	4,40E+4	6E+1
	60.0	2,93E+4	9E+1
	80.0	1,94E+4	1E+2
	100.0	1,31E+4	5E+1
Железо	10.0	5,68E+4	1E+2
	19.9	3,24E+4	8E+1
	30.0	1,83E+4	5E+1
	40.0	1,03E+4	4E+1
	50.0	5,92E+3	4E+1
Свинец	5.0	5,66E+4	1E+2
	9.1	3,43E+4	9E+1
	13.5	1,99E+4	7E+1
	18.2	1,16E+4	7E+1
	22.8	7,02E+3	3E+1

Таблица 1: Данные для построения графиков

Рис. 5: Зависимость  $\ln \frac{N_0}{N}(h)$  для свинца

Из табл. на стр. 480 [3], средняя энергия  $\gamma$ -квантов достигала

$$E \approx 0.6 \div 0.8 \text{ МэВ.}$$

Эти значения подтверждают точность полученных данных, так как  $\mu_{Al}$ ,  $\mu_{Fe}$  и  $\mu_{Pb}$  соответствуют этой энергии.

#### 4.1 Оценка погрешностей

В данной лабораторной по возможности производился учёт всех доступных погрешностей, вне зависимости от их значения. Расчёт наилучшей прямой по методу хи-квадрат с учётом погрешности по обеим осям проведён в *OriginLab*. Расчётные формулы для погрешностей косвенных измерений найдены аналитически в пакете *Wolfram Mathematica* по общей формуле

$$\sigma_u^2 = f_x'^2 \sigma_x^2 + f_x''^2 \sigma_x^2 + \dots$$

## 5 Вывод

По результатам лабораторной работы получили с хорошей точностью линейные коэффициенты затухания потока  $\gamma$ -квантов в различных поглотителях; приблизительно оценили среднюю энергию одиночного  $\gamma$ -кванта.

## А Необработанные результаты опытов

Число $\gamma$ -квантов	270	291	287	287	257	239	304	276	285	281
-------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Таблица 2: Оценка фона

Число $\gamma$ -квантов	103578	103663	103895	103753	103895
-------------------------	--------	--------	--------	--------	--------

Таблица 3: Оценка числа падающих  $\gamma$ -квантов без учёта фона

Материал	Толщина h	Число $\gamma$ -квантов				
Алюминий	20.2	66630	66799	66902	67231	66185
	39.9	44415	44323	44348	44040	44250
	60.0	29521	29463	29566	29974	29583
	80.0	19515	19842	19389	19758	19882
	100.0	13533	13480	13465	13254	13374
Железо	10.0	57257	57187	56841	56771	57318
	19.9	32497	32432	32786	32821	32696
	30.0	18527	18480	18517	18696	18695
	40.0	10654	10713	10454	10637	10595
	50.0	6122	6259	6301	6123	6205
Свинец	5.0	56924	56927	56663	57145	56567
	9.1	34639	34559	34534	34404	34963
	13.5	20302	20349	20240	20197	19946
	18.2	11890	11837	12046	11680	11712
	22.8	7221	7286	7395	7325	7283

Таблица 4: Результат эксперимента (сырые данные)

## Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 5*, 1989
- [2] Фаддеев М. А., Чупрунов Е. В. *Лекции по атомной физике*, 2008
- [3] Игошин Ф. Ф., Самарский Ю. А., Ципешок Ю. М. *ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ. Квантовая физика: Учеб, пособие для вузов*; Под ред. Ципенюка Ю.М.