

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Отчёт по лабораторной работе 5.5.1

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

Выполнил студент:

Сериков Василий Романович

группа: Б03-102

Москва, 2023 г.

Аннотация

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.

Теория

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

$$I = I_0 e^{-\mu l}, \quad I = I_0 e^{-\mu' m_1} \quad (1)$$

В этих формулах I, I_0 — интенсивности прошедшего и падающего излучений, l — длина пути, пройденного пучком γ -лучей, m_1 — масса пройденного вещества, приходящаяся на единицу площади, μ и μ' — константы, величина которых зависит от вещества, сквозь которое проходят γ -лучи.

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

Фотоэлектрическое поглощение. При столкновении γ -квантов с электронами внутренних атомных оболочек может происходить поглощение квантов. Энергия γ -кванта передается соответствующему электрону, а импульс делится между этим электроном и оставшимся после его вылета ионом. Свободный электрон не может поглотить γ -квант, так как при этом невозможно одновременно удовлетворить законам сохранения энергии и импульса. Фотоэффект является доминирующим механизмом поглощения γ -квантов при не очень высоких энергиях.

Комптоновское рассеяние. Комптоновским рассеянием (или комптоновским эффектом) называется упругое столкновение γ -кванта с электроном. При таком столкновении γ -квант передает электрону часть своей энергии, величина которой определяется углом рассеяния. В отличие от фотоэффекта, который может идти только на сильно связанных электронах, комптоновское рассеяние происходит на свободных или слабосвязанных электронах. Роль эффекта Комптона становится существенной только тогда, когда энергия квантов становится много больше энергии связи электронов в атоме (когда достаточно падает вероятность фотоэффекта). Атомные электроны в этом случае можно считать практически свободными, что обычно и делается при теоретическом анализе. В отличие от фотоэффекта, эффект Комптона приводит не к поглощению γ -квантов, а к их рассеянию и уменьшению их энергии.

Образование электрон-позитронных пар При энергиях γ -лучей выше $2mc^2 = 1,02$ МэВ может происходить их поглощение, связанное с образованием пар. Такое рождение происходит только в электрическом поле ядра. При энергиях больше $2mc^2$ вероятность образования пар сравнима с вероятностью комптон-эффекта, а фотоэффект уже не играет практически никакой роли.

Полный коэффициент ослабления γ -лучей

Полный линейный коэффициент μ ослабления пучка γ -квантов при прохождении через вещество равен сумме коэффициентов для всех трех рассмотренных процессов. На рис. 1 изображены графики μ для различных материалов.

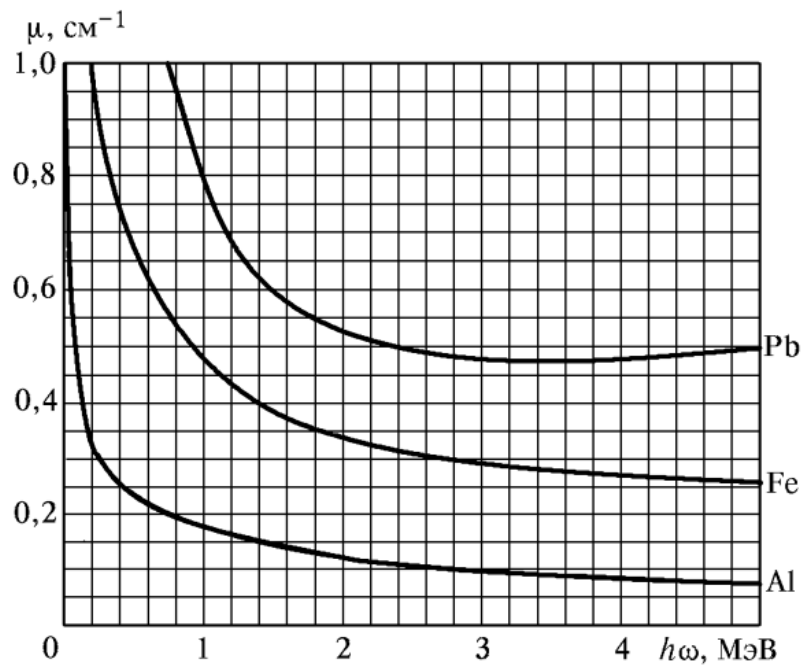


Рис. 1: Полные коэффициенты ослабления потока γ -лучей в алюминии, железе и свинце

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

Для определения коэффициента ослабления нужно измерить толщину образца l , число падающих частиц N_0 и число частиц N , прошедших через образец.

Экспериментальная установка

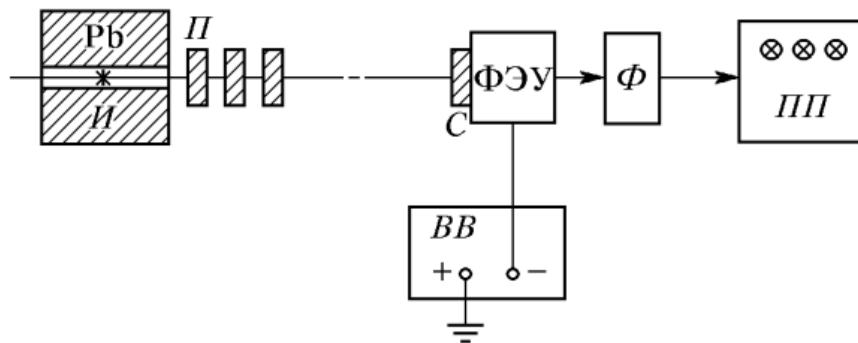


Рис. 2: Блок-схема установки, используемой для измерения коэффициентов ослабления потока γ -лучей: И — источник γ -лучей; Pb — свинцовый контейнер с коллиматорным каналом; П — набор поглотителей; С — сцинтиллятор (кристалл NaI(Tl)); ФЭУ — формирователь-выпрямитель

Схема установки, используемой в работе, показана на рис.2. Свинцовый коллиматор выделяет узкий почти параллельный пучок γ -квантов, проходящий через набор поглотителей П и регистрируемый сцинтилляционным счетчиком). Сигналы от счетчика усиливаются и регистрируются

пересчетным прибором. Высоковольтный выпрямитель ВВ обеспечивает питание сцинтилляционного счетчика.

При недостаточно хорошей геометрии в результаты опытов могут вкратиться существенные погрешности. В реальных установках всегда имеется конечная вероятность того, что γ -квант взаимодействует в поглотителе несколько раз до того, как попадет в детектор. Чтобы уменьшить число таких случаев, в данной работе сцинтилляционный счетчик расположен на большом расстоянии от источника γ -квантов, а поглотители имеют небольшие размеры.

Ход работы:

1. Измерим показания радиационного фона (число n срабатываний счетчика) в течении времени $t = 60$ с, повторив эксперимент 5 раз. Полученные данные занесем в таблицу 1.

№	1	2	3	4	5
$n_{\text{фон}}$	1521	1476	1549	1604	1552

Таблица 1: Число срабатываний счетчика при измерении радиационного фона за $t = 60$ сек

Посчитаем среднее значение $\overline{n_{\text{фон}}}$ числа срабатываний счетчика за 15 секунд

$$\overline{n_{\text{фон}}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 n_i = 385$$

$$\sigma_{\overline{n_{\text{фон}}}} = \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} \sum_{i=1}^5 (\bar{x} - x_i)^2} = 11$$

2. Измерим число n срабатываний счетчика при полностью открытом коллиматоре, а затем при коллиматоре закрытым свинцовой пробкой в течении 15 секунд, повторив эксперимент 5 раз. Результаты измерений внесем в таблицы 2, 3.

№	1	2	3	4	5
$n_{\text{откр}}$	119286	117668	115375	114351	113526

Таблица 2: Число срабатываний счетчика при открытом коллиматоре за $t = 15$ сек

№	1	2	3	4	5
$n_{\text{закр}}$	331	360	354	367	388

Таблица 3: Число срабатываний счетчика при закрытом свинцовой пробкой коллиматоре за $t = 15$ сек

Посчитаем среднее значение чисел срабатываний счетчика $\overline{n_{\text{откр}}}$ и $\overline{n_{\text{закр}}}$ по формулам из пункта 1.

$$\overline{n_{\text{откр}}} = 116041 \pm 3481$$

$$\overline{n_{\text{закр}}} = 360 \pm 10$$

3. Исследуем поглощение γ -лучей в свинце, железе, алюминии, пробке. Измерим число частиц, попадающих в счетчик за фиксированное время $t = 15$ сек. в отсутствие N_0 и присутствии N разной толщины L поглотителя. Полученные данные занесем в таблицы 4, 5, 6, 7.

№	1	2	3	4	5	L, мм	$\overline{n^{\text{Pb}}}$	$\varepsilon_{\overline{n^{\text{Pb}}}}, \%$
n_1^{Pb}	63341	63249	62866	62804	62988	4,5	63050	0,35
n_2^{Pb}	35296	35328	34727	34980	35192	9,5	35105	0,67
n_3^{Pb}	20833	21217	21028	21237	20855	14	21052	0,86
n_4^{Pb}	13159	12879	13223	12799	12901	19	12992	1,34
n_5^{Pb}	7409	7414	7568	7594	7323	24	7462	1,44
n_6^{Pb}	4114	4210	4182	4104	4173	29	4157	1,03

Таблица 4: Число срабатываний счетчика при наличии свинцовых пластин толщины L ($\sigma_L = 0,1$ мм) за $t = 15$ сек

№	1	2	3	4	5	L, мм	$\overline{n^{\text{Fe}}}$	$\varepsilon_{\overline{n^{\text{Fe}}}}, \%$
n_1^{Fe}	60490	60496	60721	60765	60821	10,3	60659	0,24
n_2^{Fe}	34326	34083	34643	34649	34601	20,5	34460	0,68
n_3^{Fe}	20032	20017	20216	11920	20224	30,5	20081	0,62
n_4^{Fe}	11672	11747	11814	11738	11826	40,6	11750	1,48
n_5^{Fe}	6812	6807	6865	6921	6819	50,8	6844	0,65
n_6^{Fe}	4089	4143	4137	4322	4073	61,2	4153	2,2

Таблица 5: Число срабатываний счетчика при наличии железных пластин толщины L ($\sigma_L = 0,1$ мм) за $t = 15$ сек

№	1	2	3	4	5	L, мм	$\overline{n^{\text{Al}}}$	$\varepsilon_{\overline{n^{\text{Al}}}}, \%$
n_1^{Al}	73609	73753	73311	72419	72784	22	73175	0,72
n_2^{Al}	47980	48101	48151	47688	48021	40,1	47988	0,35
n_3^{Al}	32223	31937	33051	31711	31897	60,2	32163	1,8
n_4^{Al}	21359	21585	21423	21572	21698	80,3	21527	0,50
n_5^{Al}	14755	14832	14976	14733	14855	100,5	14830	0,60

Таблица 6: Число срабатываний счетчика при наличии алюминиевых пластин толщины L ($\sigma_L = 0,1$ мм) за $t = 15$ сек

№	1	2	3	4	5	L, мм	$\overline{n^{\text{Cork}}}$	$\varepsilon_{\overline{n^{\text{Cork}}}}, \%$
n_1^{Cork}	112080	109474	109393	109608	109132	24,7	109937	1,04
n_2^{Cork}	105602	106388	105002	106197	105960	44,4	105829	0,48
n_3^{Cork}	103133	103245	102893	103591	102547	64,4	103081	0,35
n_4^{Cork}	100900	101702	102039	101557	101004	82,7	101440	0,44

Таблица 7: Число срабатываний счетчика при наличии пробковых пластин толщины L ($\sigma_L = 0,1$ мм) за $t = 15$ сек

4. По полученным данным построим графики зависимости логарифма числа зафиксированных частиц от толщины пластин с учетом фонового числа частиц.

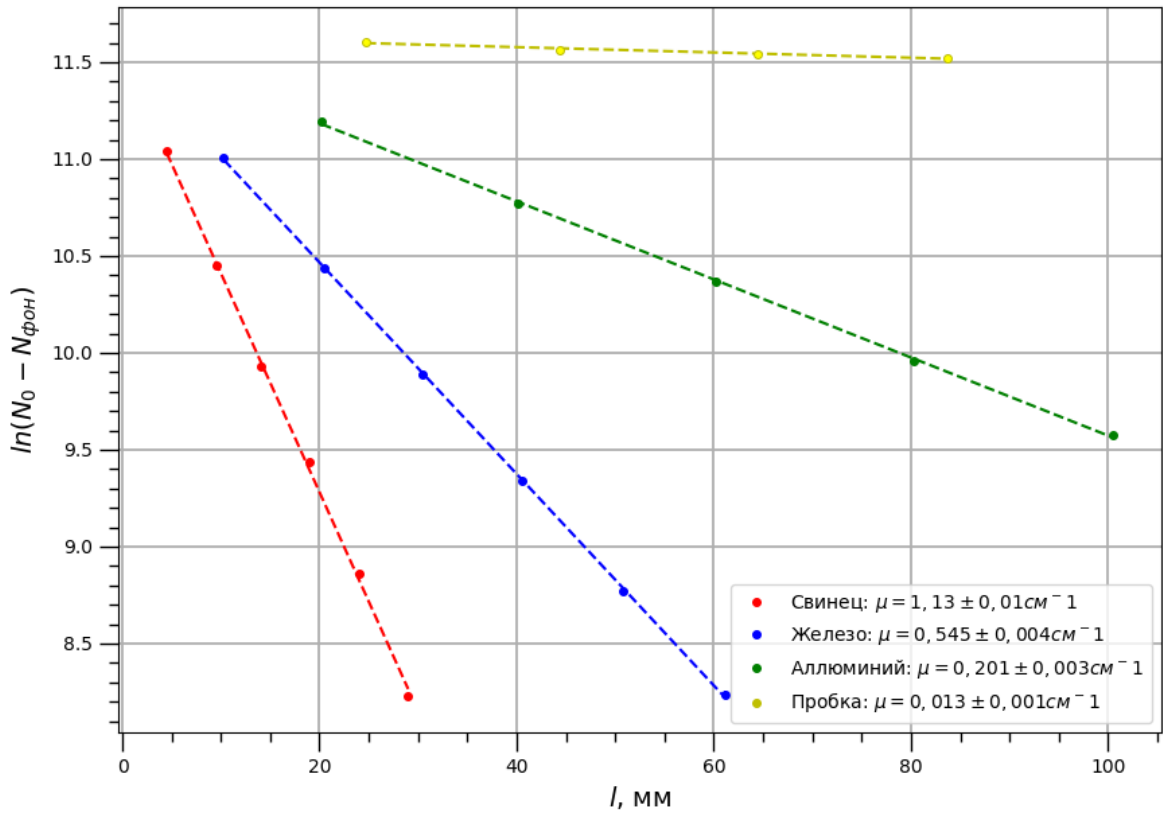


Рис. 3: График зависимости логарифма числа зафиксированных частиц от толщины пластин

Погрешность вычисления коэффициента поглощения в точке задается следующей формулой:

$$\sigma_{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{N-N_0}}{l(N-N_0)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{N-N_0} \ln(N-N_0)}{l^2}\right)^2}$$

Погрешность МНК задаются формулой:

$$\sigma_{\mu}^{\text{МНК}} = \frac{1}{\sqrt{i}} \sqrt{\frac{\langle \ln(N - N_0)^2 \rangle - \langle \ln(N - N_0) \rangle^2}{\langle l^2 \rangle - \langle l \rangle^2}} - \mu^2$$

Тогда полная погрешность коэффициента поглощения:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\mu}^2 + (\sigma_{\mu}^{\text{МНК}})^2}$$

5. По таблице соответствия коэффициентов поглощения энергиям определим среднюю энергию γ -лучей, испускаемых источником.

- 1) $1,13 \pm 0,01 \text{ см}^{-1} \rightarrow 0,7 \text{ МэВ}$ - для свинца
- 2) $0,545 \pm 0,004 \text{ см}^{-1} \rightarrow 0,7 \text{ МэВ}$ - для железа
- 3) $0,201 \pm 0,003 \text{ см}^{-1} \rightarrow 0,7 \text{ МэВ}$ - для алюминия

6. Рассчитаем коэффициенты μ' по формуле:

$$\mu' = \mu / \rho, \text{ где } \rho - \text{плотность материала пластин}$$

Все полученные значения занесем в таблицу 8

	$\mu, \text{ см}^{-1}$	$\mu', \text{ см}^2/\text{г}$
Pb	$1,13 \pm 0,01$	$0,098 \pm 0,001$
Fe	$0,545 \pm 0,004$	$0,068 \pm 0,001$
Al	$0,201 \pm 0,003$	$0,074 \pm 0,001$
Cork	$0,0136 \pm 0,0004$	$0,029 \pm 0,001$

Таблица 8: Итоговые данные для коэффициентов ослабления

Обсуждение результатов и выводы:

В ходе данной работы мы исследовали ослабление потока γ -квантов в различных веществах. Определили коэффициенты поглощения для каждого материала. По табличным данным и результатам эксперимента определили энергию γ -квантов (0,7 МэВ).

Полученные результаты согласуются с табличными данными в пределах погрешности. Вклад в ошибку дают погрешности среднего значения числа зарегистрированных частиц и погрешность измерения длины пластин. Ошибку можно уменьшить, если набирать большее количество данных.