

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Лабораторная работа 5.5.1

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

Салтыкова Дарья

Б04-105

Допуск _____

Выполнение _____

Сдача _____

1 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.

2 Теоретические сведения

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 эквивалентных нормах:

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

В этих формулах I, I_0 — интенсивности прошедшего и падающего излучений, l — длина пути, пройденного пучком гамма-лучей, m_1 — масса пройденного вещества, приходящаяся на единицу площади, μ и μ' — константы, величина которых зависит от вещества, сквозь которое проходят гамма-лучи. Длину пути l обычно выражают в сантиметрах, поэтому μ имеет размерность см^{-1} ; величину m_1 измеряют в г/см^2 , так что размерность μ' равна $\text{см}^2/\text{г}$. Форма записи через массу является предпочтительной, потому что μ' , в отличие от μ , не зависит от плотности среды.

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

2.1 Фотоэлектрическое поглощение.

При столкновении гамма-квантов с электронами внутренних атомных оболочек может происходить поглощение квантов. Энергия гамма-кванта передается соответствующему электрону, а импульс делится между этим электроном и оставшимся после его вылета ионом. Свободный электрон не может поглотить гамма-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 гамма-квантов пропорциональна длине пути dl и плотности электронов в среде (в расчет должны приниматься только электроны, принадлежащие внутренним оболочкам атомов):

$$dP_{\text{ф}} = \sigma_{\text{ф}} n_1 dl, \quad \mu_{\text{ф}} = \sigma_{\text{ф}} n_1 \quad (2)$$

Здесь n_1 — плотность внутренних электронов, а $\sigma_{\text{ф}}$ — поперечное сечение фотоэлектрического поглощения. Поперечное сечение характеризует вероятность фотоэффекта, рассчитанную на один электрон. Связь между $\mu_{\text{ф}}$ и $\sigma_{\text{ф}}$ устанавливается из формулы (1) и в явном виде определяет зависимости μ от плотности среды.

Пусть в результате фотоэффекта энергия гамма-кванта передается электрону, находящемуся на i -й оболочке атома. Обозначим через W_i энергию связи этого электрона. После вылета из атома электрон приобретает кинетическую энергию $T_i = \hbar\omega - W_i$. Освободившееся после вылета электрона место заполняется затем одним из электронов с вышележащих оболочек. При таких переходах возникает характеристическое рентгеновское излучение.

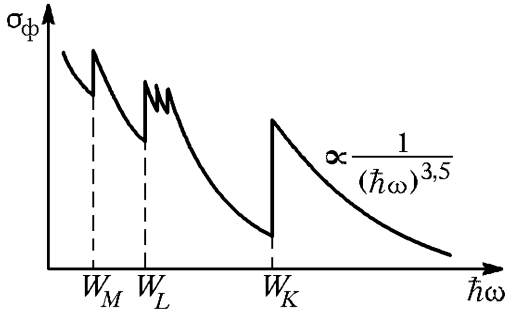


Рис. 1: Зависимость сечения фотоэффекта от энергии гамма-квантов

при энергиях гамма-квантов, лежащих в области атомных энергий связи, сечение претерпевает резкие изменения: при возрастании энергии это сечение скачкообразно возрастает, когда становится возможным выбивание электронов с очередной оболочки (на рис. 1 это скачки при энергиях W_M, W_L, W_K , соответствующих энергиям связи M, L и K -электронов). В этой области сечение фотоэффекта очень велико по сравнению с сечениями других процессов. Поэтому фотоэффект является доминирующим механизмом поглощения гамма-квантов при не очень высоких энергиях.

2.2 Комптоновское рассеяние.

Комптоновским рассеянием (или комптоновским эффектом) называется упругое столкновение гамма-кванта с электроном. При таком столкновении гамма-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.

Вероятность комптон-эффекта сложным образом зависит от энергии гамма-квантов. В том случае, когда энергия гамма-кванта много больше энергии покоя электрона, формула сильно упрощается, и выражение для сечения комптон-эффекта приобретает вид:

$$\sigma_k = \pi r^2 \frac{mc^2}{\hbar\omega} \left(\ln \frac{2\hbar\omega}{mc^2} + \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

где $r \approx 2,8 \cdot 10^{-13}$ — классический радиус электрона, m — его масса. Из формулы (4) следует, что сечение комптон-эффекта с ростом энергии фотонов падает далеко не так резко, как сечение фотоэффекта. Сечение σ_k относится к одному свободному электрону, в то время как приведенное выше сечение фотоэффекта (3) рассчитано на атом. Комптоновское рассеяние, отнесенное к атому, оказывается, естественно, в Z раз больше.

Комптоновский коэффициент линейного ослабления μ_k связан с сечением σ_k формулой, аналогичной (2). Под n следует в этом случае понимать плотность слабо связанных электронов, т. е. практически полную плотность электронов в веществе. Отметим в заключение, что, в отличие от фотоэффекта, эффект Комптона приводит не к поглощению гамма-квантов, а к их рассеянию и уменьшению их энергии.

2.3 Образование пар

При энергиях гамма-лучей, превышающих $2mc^2 = 1,02 \text{ МэВ}$, становится возможен процесс поглощения гамма-лучей, связанный с образованием электрон-позитронных пар. Рождение пар

Вероятность фотоэффекта сложным образом зависит от энергии гамма-лучей и от заряда ядер. Для оценок можно пользоваться формулой

$$\sigma_{\phi} \propto \frac{Z^5}{(\hbar\omega)^{3,5}} \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что вероятность фотоэффекта быстро возрастает при переходе от легких элементов к тяжелым резко падает с увеличением энергии гамма-квантов. На рис. 1 показана энергетическая зависимость сечения фотоэффекта. Из рисунка видно, что

не может происходить в вакууме, оно возникает в электрическом поле ядер. Вероятность этого процесса приблизительно пропорциональна Z^2 и сложным образом зависит от энергии фотона. При энергиях больше $2mc^2$ фотоэффект даже для самых тяжелых ядер уже не играет практически никакой роли. Вероятность образования пар должна поэтому сравниваться с вероятностью комптоновского рассеяния. При энергиях, с которыми приходится иметь дело при изучении ядер, рождение пар существенно только в самых тяжелых элементах. Так, даже для свинца вероятность рождения пар сравнивается с вероятностью комптоновского эффекта только при энергии около 4,7 МэВ.

2.4 Полный коэффициент ослабления гамма-лучей

Полный линейный коэффициент μ ослабления пучка гамма-квантов при прохождении через вещество равен сумме коэффициентов для всех трех рассмотренных процессов. На рис. 2 изображены графики μ для различных материалов.

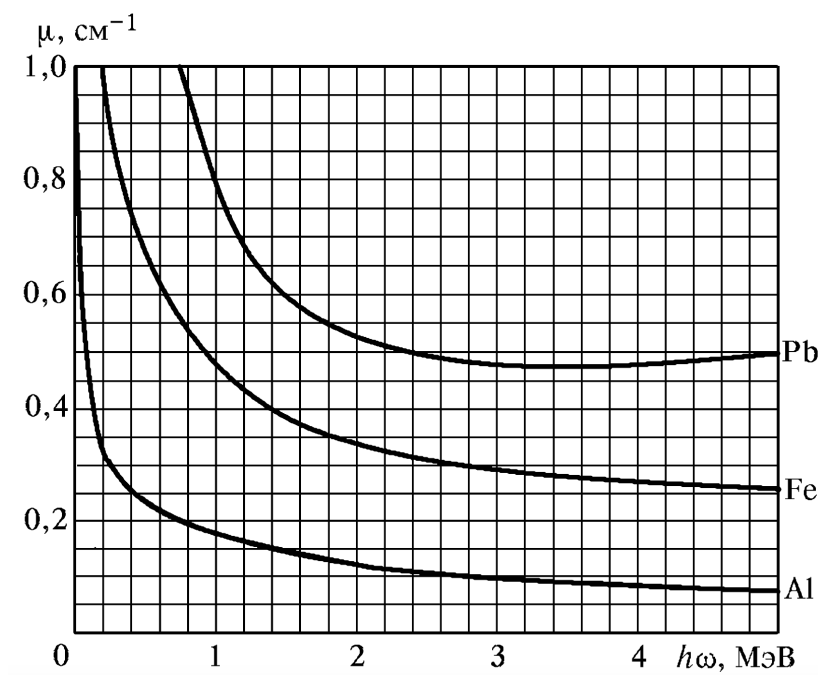


Рис. 2: Полные коэффициенты ослабления потока гамма-лучей в алюминии, железе и свинце

Обратимся вновь к формуле (1). Ее нетрудно получить из теоретических соображений. Рассмотрим опыты, поставленные в хорошей геометрии, т. е. в условиях, когда исследуется прохождение сквозь вещество узкого параллельного пучка гамма-лучей. В этом случае не только фотоэлектрическое поглощение и генерация пар, но и комптоновское рассеяние выводит гамма-кванты из пучка. Поэтому при прохождении через вещество меняется только количество, но не энергия гамма-квантов в пучке, так что коэффициент μ , характеризующий поглощение гамма-квантов в веществе, не зависит от длины пути. Обозначим через $-dN$ число гамма-квантов, выбывших из пучка на пути dl . Это число пропорционально имеющемуся их числу N и пройденному пути dl . Имеем, следовательно,

$$-dN = \mu N dl \Rightarrow N = N_0 e^{-\mu l} \quad (5)$$

т.е. то же самое, что и формула (1). В плохой геометрии, когда рассеянные под небольшими углами гамма-кванты остаются в пучке, их спектр с прохождением вещества меняется, и формула (1), вообще говоря, неприменима. Эта формула, однако, работает и в этом случае лучше, чем можно было бы ожидать. Причина хорошего согласия заключается в том, что гамма-кванты с

энергией 1 – 2 МэВ, потерявшие энергию из-за комптоновского рассеяния, быстро выбывают из пучка из-за резкого увеличения сечений $\sigma_{\text{ф}}$ и $\sigma_{\text{к}}$.

В данной работе коэффициент ослабления μ измеряется в хорошей геометрии. Из формулы (1) или (5) имеем

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N}$$

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

3 Экспериментальная установка

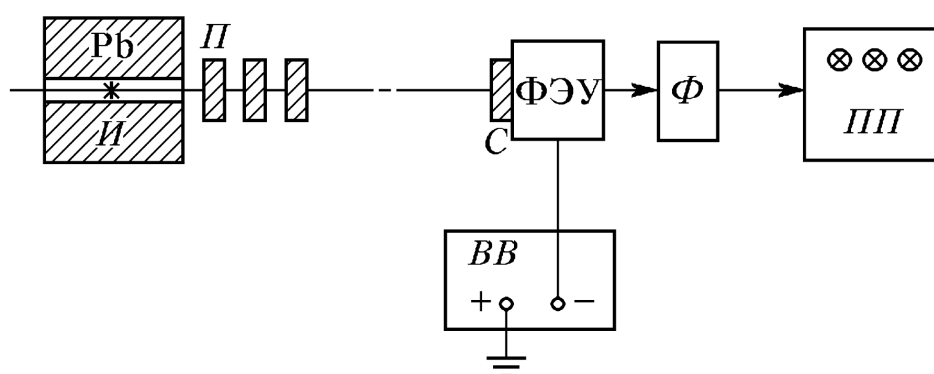


Рис. 3: Блок-схема установки, используемой для измерения коэффициентов ослабления потока гамма-лучей: И — источник гамма-лучей; Pb — свинцовый контейнер с коллиматорным каналом; П — набор поглотителей; С — сцинтиллятор (кристалл NaI(Tl)); Ф — формирователь-выпрямитель

Схема установки, используемой в работе, показана на рис. 3. Свинцовый коллиматор выделяет узкий почти параллельный пучок гамма-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.

При недостаточно хорошей геометрии в результаты опытов могут вкратиться существенные погрешности. В реальных установках всегда имеется конечная вероятность того, что гамма-квант провзаимодействует 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 гамма-квантов, а поглотители имеют небольшие размеры. Их следует устанавливать за коллиматорной щелью на некотором расстоянии друг от друга, чтобы испытавшие комптоновское рассеяние и выбывшие из прямого потока кванты с меньшей вероятностью могли в него вернуться.

4 Ход работы

1. Включим пересчетный прибор и высоковольтный выпрямитель, дадим им прогреться.
2. Убедимся, что установка чувствует γ -лучи. Для этого измерим скорость счета при полностью открытом коллиматоре, а также при коллиматоре, закрытом свинцовой пробкой. Наблюдаем резкое уменьшение скорости счета.
3. Исследуем поглощение γ -лучей в свинце, железе, алюминии и неизвестном образце при различных толщинах образцов. Таблицы с данными см. в Приложении.

Построим кривые зависимости логарифма числа сосчитанных частиц от толщины образца для всех исследуемых веществ.

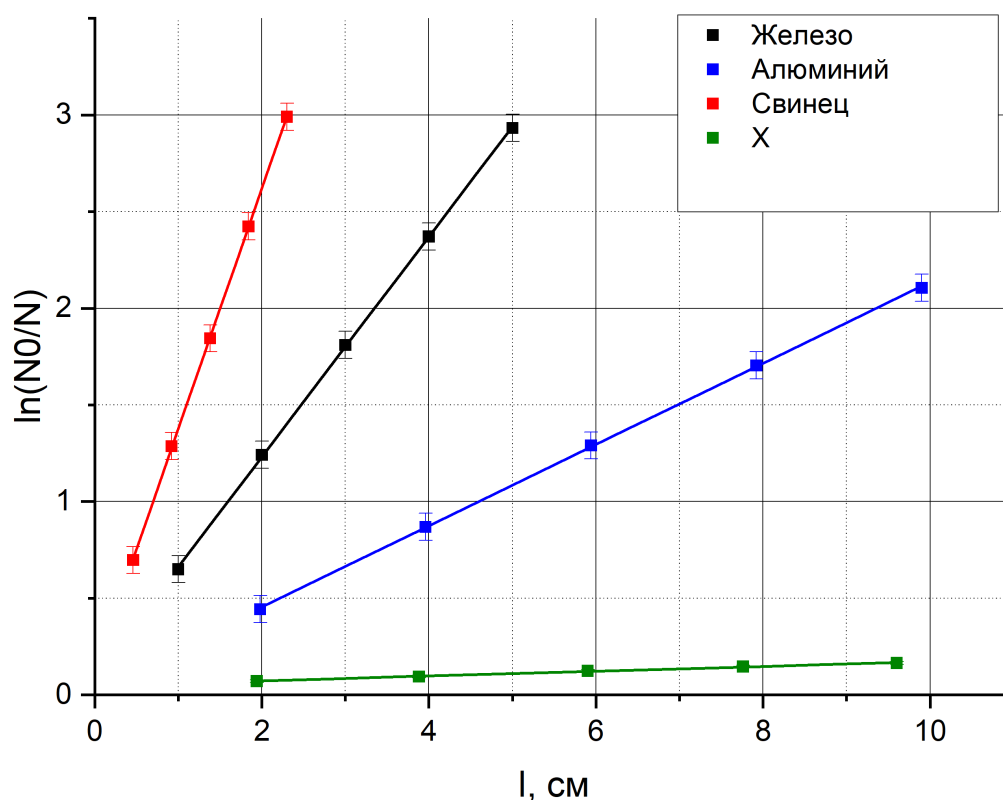


Рис. 4: Зависимости логарифма числа сосчитанных частиц от толщины образца для исследуемых веществ

Найдем графически коэффициенты ослабления (по коэффициентам наклона прямых), а также рассчитаем μ' .

Образец	μ , см ⁻¹	σ_μ , см ⁻¹	ρ , г/см ³	μ' , см ² /Г	$\sigma_{\mu'}$, см ² /Г
Алюминий	0,2101	0,0014	2,7	0,077815	0,0005
Железо	0,5694	0,0036	7,874	0,072314	0,0005
Свинец	1,2443	0,0054	11,34	0,109727	0,0005
X	0,0124	0,0005	-	-	-

Таблица 1: Коэффициенты μ и μ'

4. Используя найденные коэффициенты ослабления по графику (Рис. 2) и табличным данным из Лабораторного практикума (Рис. 5) определим среднюю энергию γ -лучей, испускаемых источником.

E_γ , МэВ	Al	Cu	Fe	Pb	Вода	Бетон	NaI
0,1	0,456	4,117	2,928	62,03	0,171	0,397	6,055
0,2	0,329	1,409	1,149	10,68	0,137	0,291	1,196
0,3	0,281	1,000	0,787	4,275	0,119	0,251	0,602
0,4	0,250	0,839	0,740	2,495	0,106	0,224	0,428
0,5	0,228	0,745	0,661	1,724	0,0966	0,204	0,343
0,6	0,210	0,679	0,605	1,349	0,0896	0,189	0,298
0,8	0,184	0,588	0,526	0,982	0,0786	0,166	0,246
1,0	0,166	0,526	0,471	0,798	0,0706	0,149	0,214
1,5	0,135	0,430	0,382	0,581	0,0575	0,121	0,172
2,0	0,117	0,377	0,337	0,518	0,0493	0,105	0,152
5,0	0,076	0,285	0,246	0,483	0,0301	0,067	0,127

Рис. 5: Линейные коэффициенты поглощения γ -лучей в различных веществах (с см^{-1})

Видим, что полученные экспериментально значения лежат в диапазоне энергий от 0,6 до 0,8 МэВ. Средняя энергия γ -лучей, испускаемых источником составляет $E_\gamma = 0,7$ МэВ.

5. В работе мы устанавливали поглотитель вплотную к приемнику. Оценим влияние фона в случае, когда поглотитель и приемник находятся на некотором расстоянии: при слое поглотителя толщиной ≈ 10 см (алюминий) влияние фона составляет 56%.

Рассмотрим также случай, когда приемник расположен под углом 90 градусов к источнику. Тогда на расстоянии 5,5 см $N = 19438$, при 37 см $N = 5619$. Влияние фона в данном случае составляет 71%.

6. Изучим установку с точки зрения радиационной безопасности. Измерения дозиметром показывают следующие результаты:

	Показания дозиметра, мкЗв/ч	Показания дозиметра, мкЗв/год	Т, дни
Вход в аудиторию	0,16	1401,6	260
Слой алюминия 10 см	6,52	57115,2	7
Рассеяние без заслонки	1,36	11913,6	31
Рассеяние, 10 см алюминия	0,58	5080,8	72

Учитывая, что годовая норма составляет 1000 мкЗв/год, рассчитаем сколько времени нужно находиться в данных местах и условиях, чтобы ее получить. Результаты также занесем в таблицу.

5 Вывод

В ходе работы было изучено ослабление потоков гамма-квантов в четырех различных веществах: алюминии, железе, свинце и неизвестном веществе, внешне похожем на пробку. Экспериментально с помощью сцинтилляционного счетчика получены коэффициенты ослабления этих веществ. Также с помощью табличных данных была определена средняя энергия гамма-квантов - 0,7 МэВ.

6 Приложение

Алюминий					
N	t, с	l, см	σ_l , см	$\ln(N_0/N)$	$\sigma_{\ln(N_0/N)}$
242478	60	1,98	0,20	0,443449	0,007
159065	60	3,96	0,30	0,869348	0,008
105084	60	5,94	0,35	1,290357	0,007
70146	60	7,92	0,40	1,704089	0,007
47584	60	9,9	0,50	2,105953	0,007

Таблица 2: Поглощение при различных толщинах образца для алюминия

Железо					
N	t, с	l, см	σ_l , см	$\ln(N_0/N)$	$\sigma_{\ln(N_0/N)}$
197558	60	1	0,20	0,65019	0,007
110198	60	2	0,30	1,241953	0,007
63292	60	3	0,35	1,81004	0,006
36961	60	4	0,40	2,371063	0,006
21926	60	5	0,50	2,932581	0,007

Таблица 3: Поглощение при различных толщинах образца для железа

Свинец					
N	t, с	l, см	σ_l , см	$\ln(N_0/N)$	$\sigma_{\ln(N_0/N)}$
188557	60	0,46	0,22	0,697303	0,007
105464	60	0,92	0,36	1,286678	0,007
61225	60	1,38	0,38	1,844327	0,007
35165	60	1,84	0,41	2,423752	0,007
20801	60	2,3	0,50	2,9906	0,007

Таблица 4: Поглощение при различных толщинах образца для свинца

Неизвестный образец					
N	t, с	l, см	σ_l , см	$\ln(N_0/N)$	$\sigma_{\ln(N_0/N)}$
350907	60	1,94	0,20	0,071314	0,007
342912	60	3,88	0,33	0,094493	0,007
332916	60	5,9	0,47	0,12425	0,007
325554	60	7,76	0,48	0,146746	0,007
319857	60	9,6	0,53	0,164509	0,007

Таблица 5: Поглощение при различных толщинах для неизвестного образца