

Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)

Работа 5.5.1.

Сибгатуллин Булат, ФРКТ

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

1 Теоретическое введение

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:

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

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

1.1 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. Наружные электроны не принимают участия в фотоэлектрическом поглощении, потому что они слабо связаны в атоме, так что их практически можно считать свободными. Вероятность dP_Φ фотоэлектрического поглощения γ -квантов пропорциональна длине пути dl и плотности электронов в среде (в расчет должны приниматься только электроны, принадлежащие внутренним оболочкам атомов):

$$dP_\Phi = \sigma_\Phi n_1 dl, \quad \mu_\Phi = \sigma_\Phi n_1 \quad (2)$$

Здесь n_1 — плотность внутренних электронов, а σ_Φ — поперечное сечение фотоэлектрического поглощения. Поперечное сечение характеризует вероятность фотоэффекта, рассчитанную на один электрон. Связь между μ_Φ и σ_Φ устанавливается из формулы (1) и в явном виде определяет зависимости μ от плотности среды.

Пусть в результате фотоэффекта энергия γ -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.

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

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

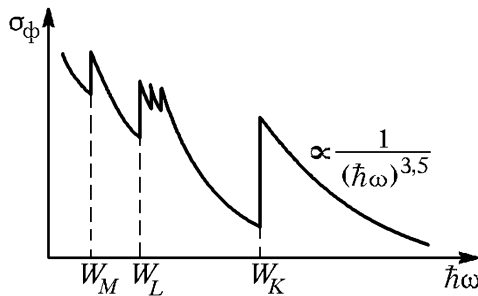


Рис. 1: Зависимость сечения фотоэффекта от энергии γ -квантов

Из рисунка видно, что при энергиях γ -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 γ -квантов при не очень высоких энергиях.

1.2 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.

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

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

где $r \simeq 2,8 \cdot 10^{-13}$ — классический радиус электрона, m — его масса. Из формулы (4) следует, что сечение комpton-эффекта с ростом энергии фотонов падает далеко не так резко, как сечение фотоэффекта. Сечение $\sigma_{\text{к}}$ 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 $\mu_{\text{к}}$ связан с сечением $\sigma_{\text{к}}$ формулой, аналогичной (2). Под n следует в этом случае понимать плотность слабо связанных электронов, т. е. практически полную плотность электронов в веществе. Отметим в за-

ключение, что, в отличие от фотоэффекта, эффект Комптона приводит не к поглощению γ -квантов, а к их рассеянию и уменьшению их энергии.

1.3 Образование пар

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

1.4 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. 2 изображены графики μ для различных материалов.

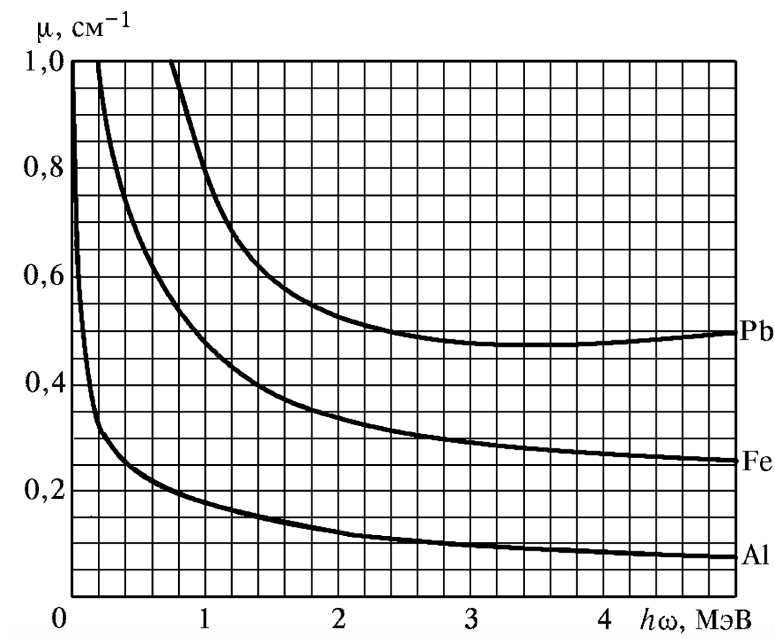


Рис. 2: Полные коэффициенты ослабления потока γ -лучей в алюминии, железе и свинце

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 γ -лучей. В этом случае не только фотоэлектрическое поглощение и генерация пар, но и комптоновское рассеяние выводит γ -кванты из пучка. Поэтому при прохождении через вещество меняется только количество, но не энергия γ -квантов в пучке, так что коэффициент μ , характеризующий поглощение γ -квантов в веществе, не зависит от длины пути. Обозначим через $-dN$ число

γ -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 γ -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 γ -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

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N} \quad (6)$$

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

2 Экспериментальная установка

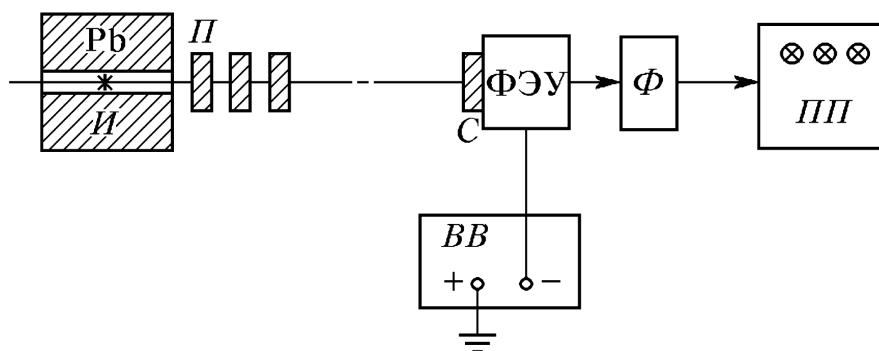


Рис. 3: Блок-схема установки, используемой для измерения коэффициентов ослабления потока γ -лучей: И – источник γ -лучей; Pb – свинцовый контейнер с коллиматорным каналом; П – набор поглотителей; С – сцинтиллятор (кристалл NaI(Tl)); Ф – формирователь-выпрямитель

Схема установки, используемой в работе, показана на рис. 3. 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 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 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. Их следует устанавливать за коллиматорной щелью на некотором расстоянии

друг от друга, чтобы испытывшие комптоновское рассеяние и выбывшие из прямого потока кванты с меньшей вероятностью могли в него вернуться.

3 Задание

1. Включим пересчетный прибор и высоковольтный выпрямитель.
2. Убедимся в том, что установка «чувствует» γ -лучи. Для этого подадим напряжение, указанное на установке. Измерим скорость счета при полностью открытом коллиматоре, а затем при коллиматоре, закрытом свинцовой пробкой. Скорость счета должна резко уменьшиться.
3. Исследуем поглощение γ -лучей в свинце, железе и алюминии. Для этого измерим число частиц, попадающих в счетчик за фиксированное время в отсутствие (N_0) и в присутствии (N) поглотителя. Измерим поглощение γ -лучей при различных толщинах образцов.

Построим кривые зависимости логарифма числа сосчитанных частиц от толщины образца для всех исследуемых веществ. По линейным коэффициентам ослабления рассчитаем коэффициенты μ' по формуле (1)

4. Используя найденные коэффициенты ослабления в свинце, железе и алюминии, по графику (2) и Таблице V.4 из Приложения V определим среднюю энергию γ -лучей, испускаемых источником.

4 Выполнение

1. Вычислим фон, который обусловлен фоноф ФЭУ и посторонними частицами:

Номер измерения	Количество частиц фона
1	142
2	155
3	138

Рис. 4: Таблица 1: измерение фона.

Найдем среднее значение, оно равно $N_{\text{ф}} = 145$. При дальнейшей работы будем вчитать из полученных значений количество частиц в фоне.

2. Измерим поглощение γ -лучей при различных значениях толщин образцов для алюминия, железа и свинца. Запишем результаты измерения в таблицы.
3. Вычислим поглощение γ -лучей N_0 в отсутствии поглотителя.
Получим среднее значение равное $N_0 = 128356$.
4. По усредненным значениям из таблиц построим графики зависимости $\ln(N/N_0)$ от l . По формуле 5 поймем, что в данных графиках угловой коэффициент наклона $a = -\mu$.

Алюминий					
N	I, мм	N - N _ф	N	I, мм	N - N _ф
82358	20	82213	10133	120	9988
83384	20	83239	9884	120	9739
84703	20	84558	9737	120	9592
52819	40	52674	6183	140	6038
52461	40	52316	6431	140	6286
52533	40	52388	6189	140	6044
33446	60	33301	4032	160	3887
33579	60	33434	4046	160	3901
33521	60	33376	4111	160	3966
21998	80	21853	2738	180	2593
21758	80	21613	2722	180	2577
22094	80	21949	2808	180	2663
14170	100	14025	1787	200	1642
14291	100	14146	1803	200	1658
14456	100	14311	1947	200	1802

Рис. 5: Таблица 2: данные для алюминия.

Свинец					
N	I, мм	N - N _ф	N	I, мм	N - N _ф
90424	5	90279	8986	24,5	8841
86066	5	85921	8878	24,5	8733
82881	5	82736	5602	28,9	5457
79905	5	79760	5576	28,9	5431
54348	9,5	54203	5755	28,9	5610
51712	9,5	51567	3164	33,8	3019
51005	9,5	50860	3271	33,8	3126
33214	14,2	33069	3085	33,8	2940
32743	14,2	32598	2023	38,4	1878
31854	14,2	31709	2043	38,4	1898
15972	19,3	15827	2113	38,4	1968
16159	19,3	16014	1267	43,2	1122
16097	19,3	15952	1269	43,2	1124
8976	24,5	8831	1322	43,2	1177

Рис. 6: Таблица 4: данные для свинца.

Железо					
N	I, мм	N - N _ф	N	I, мм	N - N _ф
88278	10,1	88133	7678	50,6	7533
84150	10,1	84005	4383	60,5	4238
82293	10,1	82148	4304	60,5	4159
42734	20,3	42589	4388	60,5	4243
42799	20,3	42654	2468	70,7	2323
42363	20,3	42218	2463	70,7	2318
22682	30,4	22537	2460	70,7	2315
23044	30,4	22899	1421	80,9	1276
23102	30,4	22957	1513	80,9	1368
13396	40,5	13251	1464	80,9	1319
13374	40,5	13229	879	91	734
13429	40,5	13284	910	91	765
7527	50,6	7382	872	91	727
7468	50,6	7323			

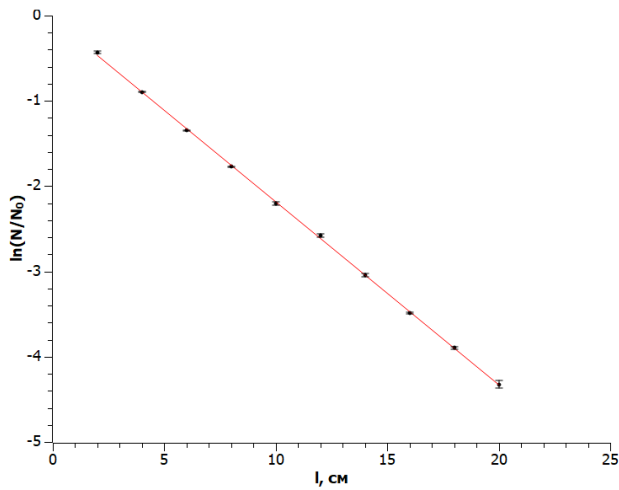
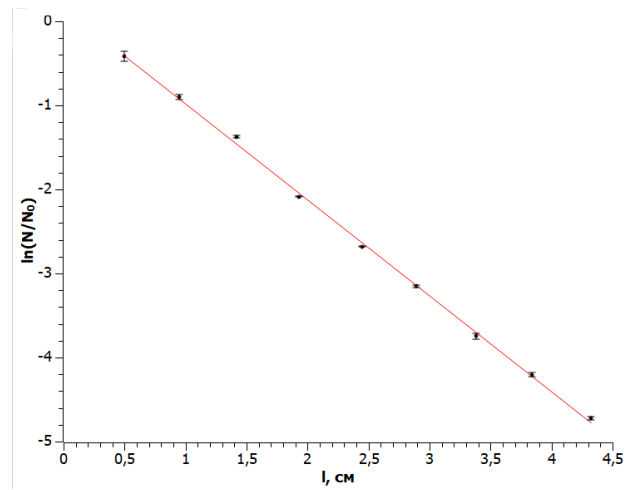
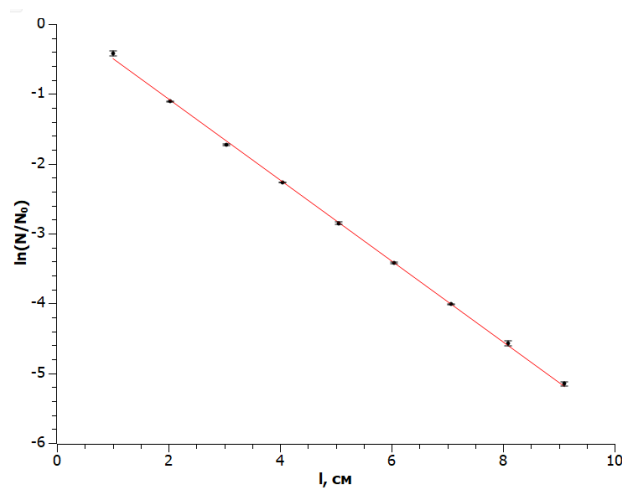
Рис. 7: Таблица 4: данные для железа.

N ₀	N ₀ - N _ф
128188	128043
128612	128467
128703	128558

Рис. 8: Таблица 5: поглощение γ -лучей в отсутствии поглотителя.

5. Получим зависимости вида $y = a \cdot x + b$. Запишем угловой коэффициент a для различных металлов.

	Алюминий	Свинец	Железо
a	$-0,215 \pm 0,001$	$-1,14 \pm 0,01$	$-0,579 \pm 0,005$

Рис. 9: Зависимость натурального логарифма N/N_0 от l для алюминия.Рис. 10: Зависимость натурального логарифма N/N_0 от l для свинца.Рис. 11: Зависимость натурального логарифма N/N_0 от l для железа.

6. Следовательно для коэффициента μ получаем:

	Алюминий	Свинец	Железо
μ	$0,215 \pm 0,001$	$1,14 \pm 0,01$	$0,579 \pm 0,005$

Что соответствует энергии γ -лучей для алюминия: 0,6 МэВ, а для свинца и железа: 0,6 - 0,8 МэВ.

5 Вывод

В этой работе мы изучили ослабление потоков γ -лучей в трех различных веществах: свинце, железе и алюминии. Также подтвердили, что пробка (дерево) не рассеивает γ -лучи.

По результатам измерений и данными из Таблицы 4, лабораторного практикума, нами была определена энергия γ -лучей испускаемых установкой: 0,6 - 0,8 МэВ.