

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

5.1 Измерение коэффициента ослабления γ -лучей в веществе и определение их энергий

выполнил студент Б04-852 группы ФЭФМ

Яромир Водзяновский

Содержание

1	Цель работы	2
2	Теория	2
2.1	Фотоэлектрическое поглощение	2
2.2	Комптоновское рассеяние	3
2.3	Генерация электрон-позитронных пар	3
2.4	Полный коэффициент ослабления	3
3	Экспериментальная установка	5
4	Ход работы	5
5	Вывод	9

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 Теория

Гамма-лучи возникают при переходе возбужденных ядер из одного состояния в другое, более низкое. E_γ лежит в значениях от 10 кэВ до 1000 кэВ. При проходе через вещество, пучок ослабляется по закону:

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

$$I = I_0 e^{-\mu' m_1} \quad (2)$$

I , I_0 - интенсивности прошедшего и падающего излучений, l - длина пути, m_1 - масса пройденного вещества на единицу площади, μ и μ' - константы, зависящие от вещества. μ' не зависит от плотности вещества.

Ослабление потока γ - лучей связано тремя эффектами:

1. фотоэлектрическое поглощение
2. комптоновское рассеяние
3. генерация электрон-позитронных пар

2.1 Фотоэлектрическое поглощение

При столкновении γ - квантов с электронами внутренних атомных оболочек может происходить поглощение квантов. Энергия кванта передается электрону, а импульс делится между электроном и ионом. Наружные электроны не принимают участия в фотоэлектрическом поглощении, т.к. они почти свободные и слабо связаны с ядром.

Вероятность dP_Φ фотоэлектрического поглощения гамма-квантов пропорциональна длине пути dl и плотности электронов в среде:

$$dP_\Phi = \sigma_\Phi n_1 dl \quad (3)$$

n_1 - плотность внутренних электронов, σ_Φ - поперечное сечение фотоэлектрического поглощения, оно характеризует вероятность фотоэффекта, рассчитанную на один электрон.

Найдем связь между коэффициентом поглощения для фотоэффекта μ_Φ и сечением σ_Φ :

$$\mu_\Phi = \sigma_\Phi n_1 \quad (4)$$

Эта формула отражает зависимость μ_Φ от плотности среды в явном виде.

Пусть в результате фотоэффекта энергия γ -кванта передается электрону на i оболочке, W_i - энергия связи этого электрона. Тогда кинетическая энергия электрона:

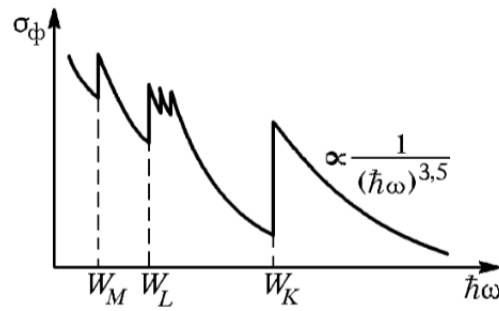
$$T_i = \hbar\omega - W_i \quad (5)$$

на вакантное место могут перейти электроны с соседних оболочек, при таких переходах возникает характеристическое рентгеновское излучение, которое, например, в РЭМ используется в режиме рентгеновской спектроскопии для определения состава образца.

Вероятность фотоэффекта сложно зависит от энергии гамма-лучей и от заряда ядер:

$$\sigma_\Phi \propto \frac{Z^5}{(\hbar\omega)^{2,5}} \quad (6)$$

Эта формула отражает такую зависимость (рис. 1)

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

Вероятность фотоэффекта быстро возрастает при переходе от легких к тяжелым элементам и резко падает с увеличением энергии гамма-квантов. При возрастании энергии сечение скачкообразно возрастает, когда становится возможным выбивание электронов с очередной оболочки. Фотоэффект является доминирующим механизмом поглощения гамма-квантов при не очень высоких энергиях.

2.2 Комptonовское рассеяние

Комптон эффект - упругое столкновение гамма-кванта с электроном. Этот эффект происходит на свободных или слабосвязанных электронах в отличие от фотоэффекта. Роль эффекта Комптона становится существенной только когда энергия гамма-квантов становится много больше энергии связи электронов в атоме. Атомные электроны можно считать практически свободными.

Вероятность Комптон эффекта сложно зависит от энергии гамма-квантов. В случае, когда энергия гамма-кванта много больше энергии покоя электрона:

$$\sigma_k = \pi r^2 \frac{mc^2}{\hbar\omega} \left(\ln \frac{2\hbar\omega}{mc^2} + \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

$r \approx 2.8 \cdot 10^{-13}$ см - классический радиус электрона. Следует, что сечение комптон-эффекта с ростом энергии фотонов падает не так резко, как сечение фотоэффекта.

Сечение σ_k относится к одному свободному электрону, а сечение фотоэффекта рассчитано на атом. Значит комптоновское рассеяние становится в Z раз больше.

Комптоновский коэффициент линейного ослабления μ_k связан с сечением σ_k через плотность слабосвязанных электронов n :

$$\mu_k = \sigma_k \cdot n \quad (8)$$

Отметим, что эффект Комптона приводит не к поглощению, а к рассеянию гамма-квантов.

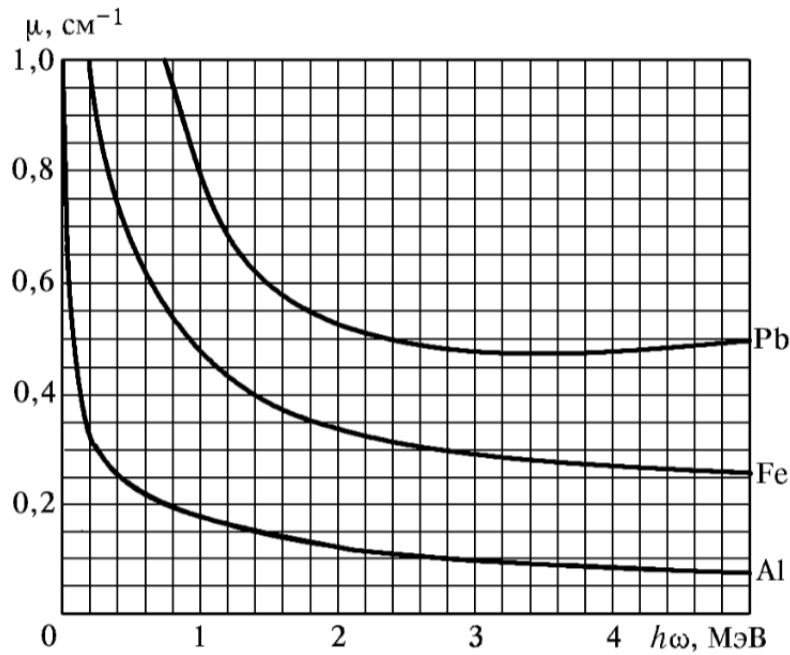
2.3 Генерация электрон-позитронных пар

При энергиях γ -лучей, превышающих $2mc^2 = 1.02$ МэВ, становится возможен процесс образования электрон-позитронных пар. Рождение пар происходит в эл. поле ядер, вероятность процесса $\sim Z^2$ и сложным образом зависит от энергии фотона.

При энергиях более 1.02 МэВ фотоэффект почти не играет роли даже для самых тяжелых ядер. Вероятность образования пар сравнительна с вероятностью комптоновского рассеяния. Рождение пар существенно только для самых тяжелых элементов. Для свинца вероятность рождения пар сравнивается с вероятностью комптоновского эффекта только при 4.7 МэВ.

2.4 Полный коэффициент ослабления

Полный линейный коэффициент μ равен сумме коэффициентов для всех трех рассмотренных процессов. На рис. 2

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

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. 3: Полные коэффициенты ослабления потока γ - лучей в разных веществах

Получим формулу (1). Рассмотрим опыты в хорошей геометрии, когда γ - кванты выводит из пучка фотоэлектрическое поглощение, комптоновское рассеяние и генерация пар.

При прохождении через вещество меняется количество, а не энергия квантов в пучке, значит коэффициент μ не зависит от длины пути. Пусть $-dN$ число гамма-квантов, выбывших из пучка на пути dl , это число пропорционально имеющемуся их числу N и пройденному пути dl :

$$-dN = \mu N dl \quad (9)$$

Интегрируем от нулевой толщины до заданной:

$$N = N_0 e^{-\mu l} \quad (10)$$

Получили ф-лу (1).

В плохой геометрии, когда рассеянные под небольшими углами кванты остаются в пучке эта формула не применима, однако, хорошо работает :).

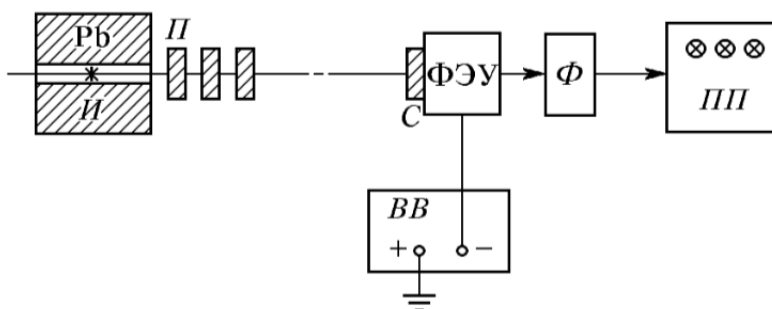
Причина хорошего согласия в том, что гамма-кванты с энергией 1-2 МэВ, потерявшие энергию из-за комптоновского ослабления, быстро выбывают из пучка из-за резкого увеличения сечений σ_f и σ_k . В данной работе коэффициент ослабления μ измеряется в хорошей геометрии:

$$\mu - \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N} \quad (11)$$

3 Экспериментальная установка

Схема установки показана на рис. 4. Свинцовый коллиматор выделяет узкий параллельный пучок гамма-квантов, проходящий через набор поглотителей П. Сигналы от счетчика усиливаются и регистрируются пересчетным прибором ПП.

При недостаточно хорошей геометрии в результате опытов могут быть погрешности. В реальности всегда имеется вероятность, что гамма-квант взаимодействует в поглотителе несколько раз до того, как попадет в детектор (рис. 5). Чтобы этого избежать, сцинтилляционный счетчик расположен на большом расстоянии от источника гамма-квантов, а поглотители имеют небольшие размеры, также поглотители следует размещать на небольшом расстоянии друг от друга.



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

Рис. 4

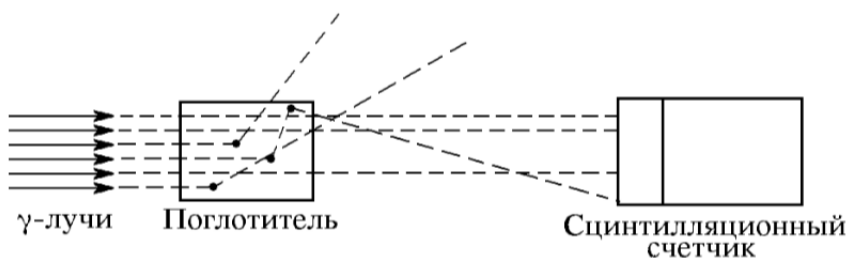


Рис. 5: Схема рассеяния гамма-квантов в поглотителе

4 Ход работы

1. Включим пересчетный прибор и высоковольтный выпрямитель. Прогреем их.
2. Измерим скорость счета с свинцовой пробкой и без, она резко увеличилась как только убрали свинцовую пробку. Данные занесем в таблицу на рис.6

№ Опыта	С заслонкой пустой	Без заслонки
1	193	238075
2	187	232385
3	179	228955
4	194	225600
5	211	224726
6	203	222983
7	204	221243
8	182	
9	168	
Ср. Значение	191	227709,6
Станд. Ошибка	14	5893

Рис. 6: Измерение с и без свинцовой пробки

3. Исследуем поглощение гамма-лучей в свинце, железе и алюминии, данные занесем в таблицы на рис. 7, 8, 9

№ Опыта	1 алюминий	2 алюминий	3 алюминий	4 алюминий	5 алюминий	6 алюминий	7 алюминий	Толщина, см
1	123319	72217	44432	27325	17681	11347	7651	2
2	124294	73290	44835	27641	17773	11477	7755	2,02
3	123905	73398	44731	27715	17600	11613	7733	2,01
4	124131	73503	45387	27990	17954	11572	7738	1,98
5	125614	73406	45318	28517	17590	11834	7526	2,01
6	123863	74672	45177	27718	17885	11616	7797	2,01
7	123663	74246	45426	28247	17933	11668	7542	2,03
Ср. Значение	124112	73533	45043	27879	17773	11589	7677	2
Станд. Ошибка	733	778	381	402	154	152	107	0,01574

Рис. 7: Алюминий

№ Опыта	1 железо	2 железо	3 железо	4 железо	5 железо	6 железо	7 железо	Толщина, см
1	104168	52081	27021	14763	7884	4319	2332	1,005
2	106817	51931	26895	14713	8054	4274	2412	1,010
3	106068	51798	27726	14619	8225	4379	2458	1,010
4	106574	52201	27724	14542	8105	4419	2388	1,005
5	106176	52053	28043	14834	8189	4448	2442	1,000
6	106712	53340	27629	14893	8190	4449	2362	1,005
7	107323	52943	27732	14902	7982	4416	2404	1,035
Ср. Значение	106262	52335	27538	14752	8090	4386	2399	1
Станд. Ошибка	1014	576	419	137	125	67	44	0,0115

Рис. 8: Железо

№ Опыта	1 свинец	2 свинец	3 свинец	4 свинец	5 свинец	6 Свинец	7 свинец	Толщина, мм
1	108587	52213	27742	15313	8363	4422	2596	4,7
2	107312	53174	27716	15299	8562	4449	2580	4,7
3	107553	52987	27843	15486	8491	4530	2495	4,6
4	108204	52994	28143	15762	8340	4473	2590	4,4
5	108161	53651	27900	15659	8567	4685	2585	4,9
6	107992	53591	27979	15696	8600	4603	2627	5
7	107402	53966	28428	15701	8673	4582	2672	4,9
Ср. Значение	107887	53225	27964	15559	8513	4535	2592	5
Станд. Ошибка	475	578	251	193	123	94	54	0,2070

Рис. 9: Свинец

4. Для каждого вида поглотителей построим зависимость $\ln N(l) = \ln N_0 - l \cdot \mu$ на рис. 10, 11, 12:

Откуда получим линейный коэффициент μ как тангенс угла наклона:

$$\mu_{Al} = 0.237 \pm 0.004 (\pm 1.7\%) [\text{см}^{-1}]$$

$$\mu_{Pb} = 1.272 \pm 0.020 (\pm 1.6\%) [\text{см}^{-1}]$$

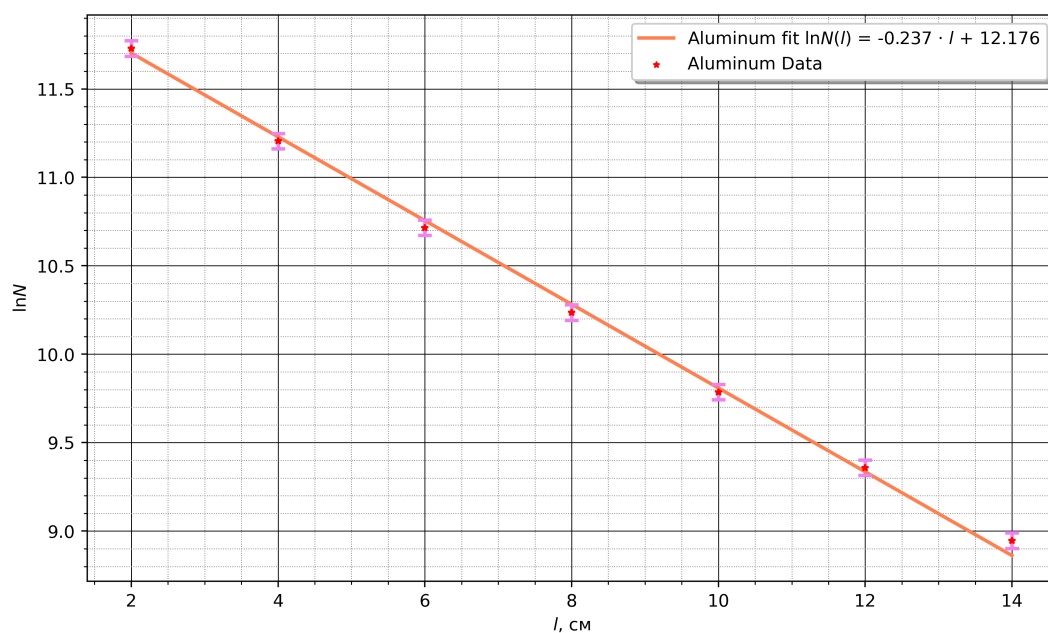
$$\mu_{Fe} = 0.634 \pm 0.008 (\pm 1.3\%) [\text{см}^{-1}]$$

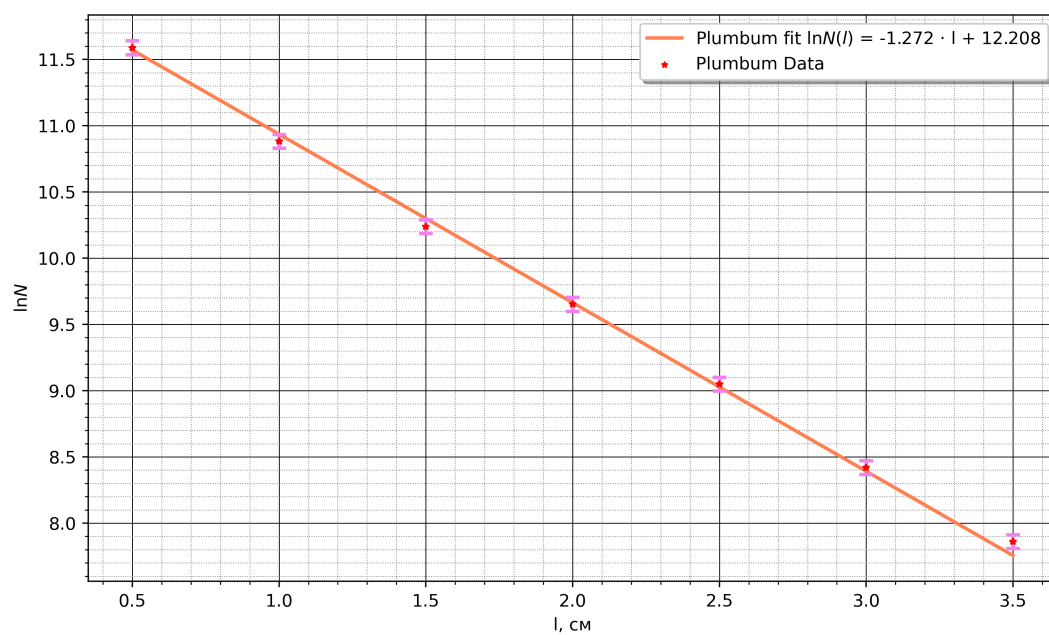
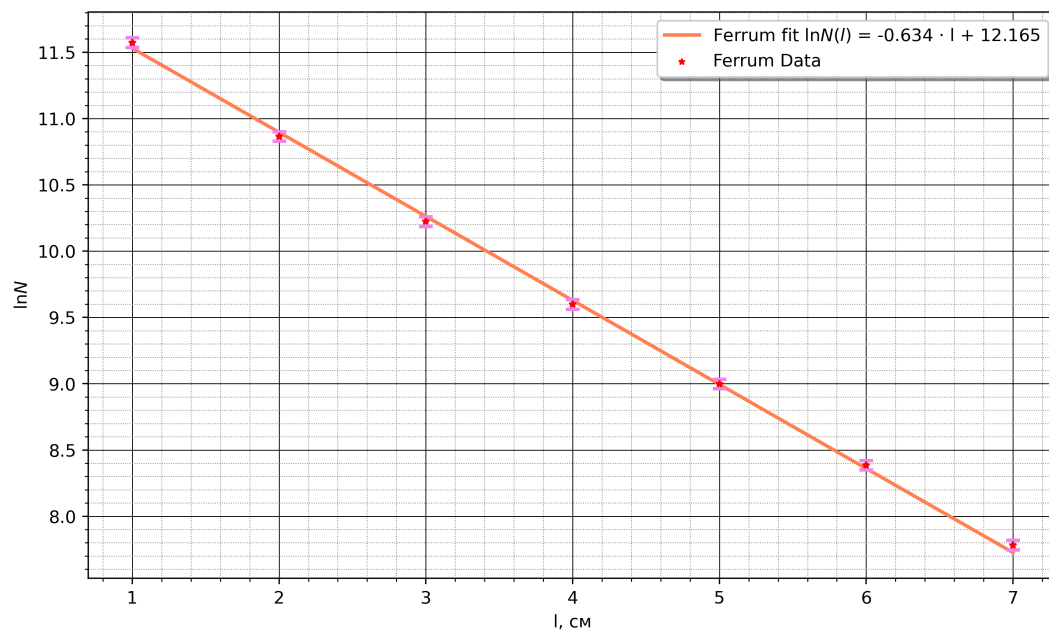
По линейным коэффициентам рассчитаем коэффициенты μ' по ф-ле (1) следует, что: $\mu' = \frac{\mu \cdot l}{m_1}$

$$\mu'_{Al} = 0.087 \pm 0.002 (\pm 1.9\%) [\text{см}^2/\text{г}]$$

$$\mu'_{Pb} = 0.112 \pm 0.005 (\pm 4.4\%) [\text{см}^2/\text{г}]$$

$$\mu'_{Fe} = 0.081 \pm 0.001 (\pm 4.3\%) [\text{см}^2/\text{г}]$$

Рис. 10: Зависимость $\ln N(l) = \ln N_0 - l \cdot \mu$ для алюминия

Рис. 11: Зависимость $\ln N(l) = \ln N_0 - l \cdot \mu$ для свинцаРис. 12: Зависимость $\ln N(l) = \ln N_0 - l \cdot \mu$ для железа

5. Определим среднюю энергию гамма-квантов по графику с рис. 2 и таблице с рис. 3.

$$\overline{E_\gamma} \approx 0.55 \pm 0.06 (\pm 10.5\%) [\text{МэВ}]$$

5 Вывод

В данной работе мы с помощью сцинтиляционного счетчика измерили линейные коэффициенты ослабления потока γ - лучей в свинце, железе и алюминии; определили среднюю энергию гамма-лучей, излучаемых источником.