

МОСКОВСКИЙ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.1

---

**Измерение коэффициента ослабления  
потока  $\gamma$ -лучей в веществе  
и определение их энергии**

---

Студент

Рагимов ИСЛАМ  
618 группа

Преподаватель

Григорий Евгеньевич  
ФЕДОРОРОВ



23 ноября 2018 г.

**Цель работы:** С помощью сцинтиляционного счётчика измеряются линейные коэффициенты ослабления потока  $\gamma$ -лучей в свинце, железе и алюминии; по их величине определяется энергия  $\gamma$ -квантов.

## Теоритический аспект

Гамма-лучи возникают при переходе возбуждённых ядер в более низкое энергетическое состояние. Энергия  $\gamma$ -квантов обычно порядка  $10 \div 1000$  кэВ. Заряд и масса  $\gamma$ -кванта равны нулю. Проходя через вещество, пучок  $\gamma$ -квантов ослабляется по закону:

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

или

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

где  $I, I_0$  — интенсивности прошедшего и падающего излучений,  $l$  — длина пути, пройденного пучком  $\gamma$ -лучей,  $m_1$  — масса пройденного вещества на единицу площади,  $\mu$  и  $\mu'$  — константы, зависящие от среды ( $[\mu] = \text{см}^{-1}$ ,  $[\mu'] = \text{см}^2/\text{г}$ ).  $\mu'$ , в отличие от  $\mu$ , не зависит от плотности среды. Ослабление потока  $\gamma$ -лучей в веществе связано с тремя эффектами: фотоэлектрическим поглощением, комптоновским рассеянием и генерацией электрон-позитронных пар.

### Фотоэлектрическое поглощение

При столкновении  $\gamma$ -квантов с электронами внутренних атомных оболочек может происходить поглощение квантов. Свободные (наружные) электроны не могут поглощать кванты. Вероятность  $dP_\Phi$  фотоэлектрического поглощения  $\gamma$ -квантов:

$$dP_\Phi = \sigma_\Phi n_1 dl,$$

где  $dl$  — длина пути,  $n_1$  — плотность внутренних электронов,  $\sigma_\Phi$  — поперечное сечение фотоэлектрического поглощения.

$$\mu_\Phi = \sigma_\Phi n_1,$$

$\mu_\Phi$  — коэффициент поглощения для фотоэффекта  $\mu$  из уравнения (1).

Фотоэффект является доминирующим механизмом поглощения  $\gamma$ -квантов при не очень высоких энергиях. Его вероятность зависит от энергии лучей и заряда ядер.

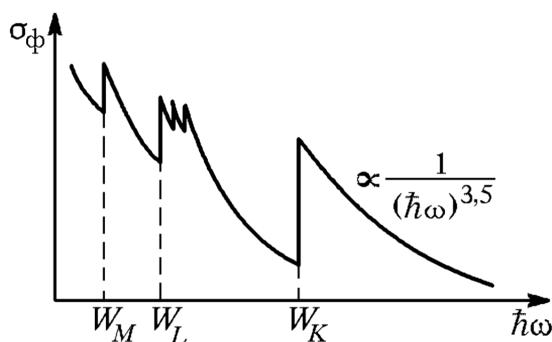


Рис. 1: Зависимость сечения фотоэффекта от энергии  $\gamma$ -квантов.

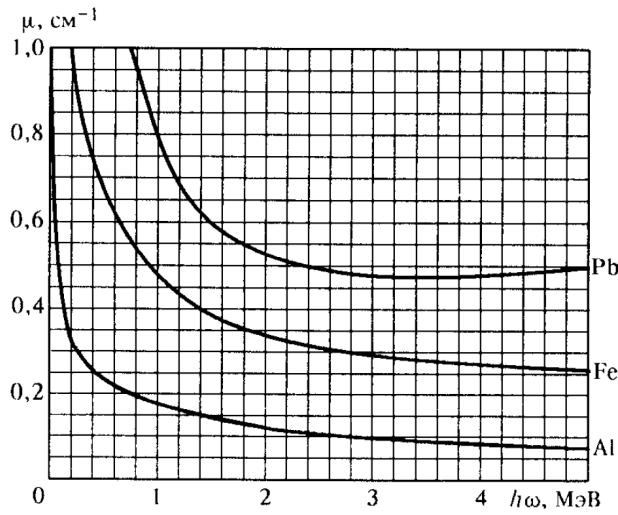


Рис. 2: Полные коэффициенты ослабления потока  $\gamma$ -лучей в алюминии, железе и свинце.

### Комптоновское рассеяние

Комптоновское рассеяние — упругое столкновение  $\gamma$ -кванта с электроном. Оно может происходить на свободных/слабосвязанных электронах. Эффект Комптона становится существенным, когда энергия квантов становится много больше энергии связи электронов в атоме. В этом случае сечение комптон-эффекта:

$$\sigma_K = \pi r^2 \frac{mc^2}{\hbar\omega} \left( \ln \frac{2\hbar\omega}{mc^2} + \frac{1}{2} \right), \quad (3)$$

где  $r \simeq 2.8 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона,  $m$  — его масса.

Эффект комптона приводит не к поглощению, а к рассеянию  $\gamma$ -квантов и уменьшению их энергии.

### Образование пар

При энергиях  $\gamma$ -лучей больше 1.02 МэВ становится возможным поглощение лучей, связанное с образованием электрон-позитронных пар. Оно возникает в электрическом поле ядер. Вероятность этого процесса приблизительно пропорциональна  $Z^2$ .

### Полный коэффициент ослабления потока $\gamma$ -лучей

Полный коэффициент ослабления потока лучей равен сумме коэффициентов для трёх рассмотренных процессов.

Полный коэффициент ослабления:

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N} \quad (4)$$

В работе определяются толщина образца  $l$ , число падающих частиц  $N_0$  и число прошедших частиц  $N$ .

## Экспериментальная установка

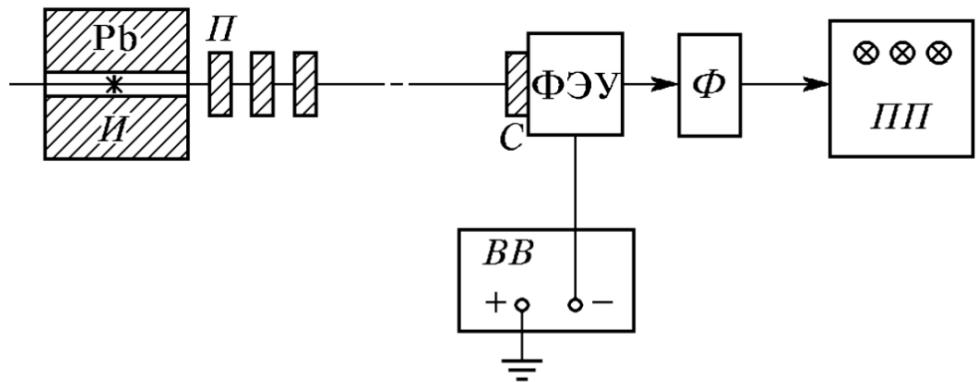


Рис. 3: Блок-схема установки, используемой для измерения коэффициентов ослабления потока  $\gamma$ -лучей; Pb — свинцовый контейнер с коллиматорным каналом; П — набор поглотителей; ПП — пересчётыный прибор; С — сцинтиллятор (кристалл  $NaI(Tl)$ ); ВВ — высоковольтный выпрямитель; Ф — формирователь-выпрямитель;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

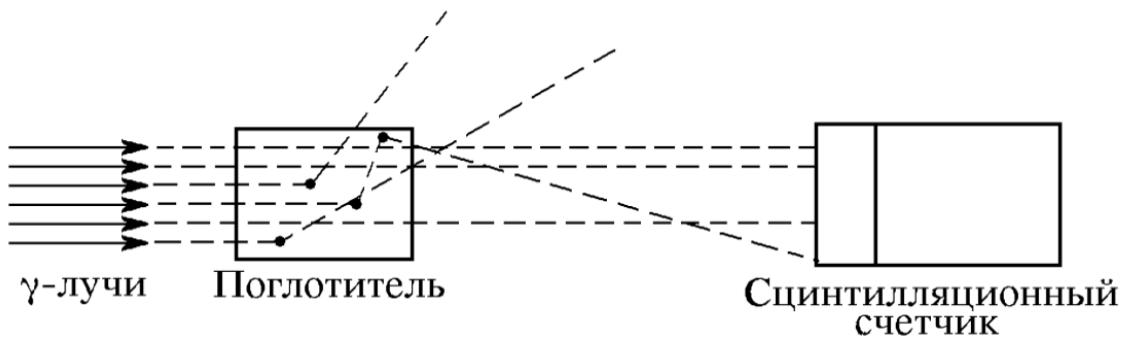


Рис. 4: Схема рассеяния  $\gamma$ -квантов в поглотителе

## Ход работы

### Вычисление фона.

При дальнейших измерениях необходимо вычитать фон, который обусловлен шумом ФЭУ и посторонними частицами: космическим излучением,  $\gamma$ -квантами от соседних источников, квантами, рассеянными на стенах комнаты и в стенках прибора, и т.д.

1. Закрыв коллиматор толстой свинцовой пробкой, проведем несколько измерений фона за время  $t = 10$  сек. и запишем их в таблицу 1:

Таблица 1: Измерение фона за промежуток времени = 10 сек.

№ измерения	1	2	3	4	5
N, частиц	106	110	123	140	100

2. Фон и погрешность фона будем считать по формулам (5) и (6) соответственно:

$$N_{\text{фон}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (5)$$

$$\sigma_N = \frac{1}{\sqrt{n \cdot (n + 1)}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_{\text{фон}} - N_i)^2} \quad (6)$$

3. Таким образом имеем следующие значения:

$$N_{\text{фон}} \approx 116$$

$$\sigma_N \approx 6$$

4. Относительная ошибка измерения составляет менее 6%. А значит полученное значение фона достаточно достоверно, чтобы мы могли учитывать его для корректировки последующих измерений.

## Измерение в отсутствие поглотителя

Проведем упомянутое измерение 3 раза и рассчитаем ошибку полученного значения по формулам (5) и (6):

В отсутствие поглотителя число частиц попадающих в счетчик за  $t = 10$  секунд составляет:

Таблица 2: Число частиц попадающих на счетчик в отсутствие поглотителя

№ эксперимента	1	2	3
$N_0$ , частиц	46584	48825	42831

$$N_0 \approx 46080 \text{ частиц}$$

$$\sigma_N \approx 1237 \text{ частиц}$$

## Исследование поглощений $\gamma$ - лучей в Алюминии

- Предварительно многократно, а именно 10 раз, проведем измерение числа частиц попадающих в счетчик за 10 секунд при наличии одного поглотителя алюминия толщиной 2 сантиметра и запишем полученные данные в таблицу 3:

Таблица 3: Количество частиц при одном поглатителе за 10 секунд

N, частиц	31235	31370	30584	30713	30781	30553	30661	30711	30310	30121
t, сек	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
l, мм	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

- Таким образом используя формулы (5) и (6) рассчитаем число частиц попавших в счетчик и сучайную ошибку проводимых экспериментов:

$$N_{10\text{сек}} \approx 30704 \text{ частиц}$$

$$\sigma_N \approx 51 \text{ частиц}$$

- Относительная ошибка такого измерения составляет  $\approx 0,17\%$ . Полученное значение ошибки заметно меньше ошибки соответствующей пуссоновскому распределению, которая составляет на данном измерении  $\approx 0,5\%$  и будет тем больше, чем меньше зарегистрированное значение частиц. Таким образом приблизится к величине  $\sigma_N$  можно было бы увеличив время регистрации частиц (подобно тому, как это происходит в случае, когда мы увеличиваем количество экспериментов по измерению один и той же величины с целью уменьшения случайной погрешности). К сожалению, такой шаг не был предпринят и теперь мы будем использовать следующую формулу для крестов погрешности:

$$\sigma_N \approx \sqrt{N_i} \text{ частиц}$$

- Проведем измерение числа частиц, попадающих в счетчик за время  $t = 10$  секунд, при различных частцах поглотителя. Полученные данные выпишем в Таблицу 4 (k - количество поглотителей, l - сумарная толщина в мм):

Таблица 4: Поглотитель – алюминий,  $t = 10$  секунд.

k, штук	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
l, мм	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
N, частиц	30704	18042	11295	7166	4472	2845	1878	1242	813	553	376
N - N <sub>фон</sub> , частиц	30588	17926	11179	7050	4356	2729	1762	1126	697	437	260

- Выведем формулу для посчетов крестов погрешности в данном эксперименте; Для логарифма справедливо:

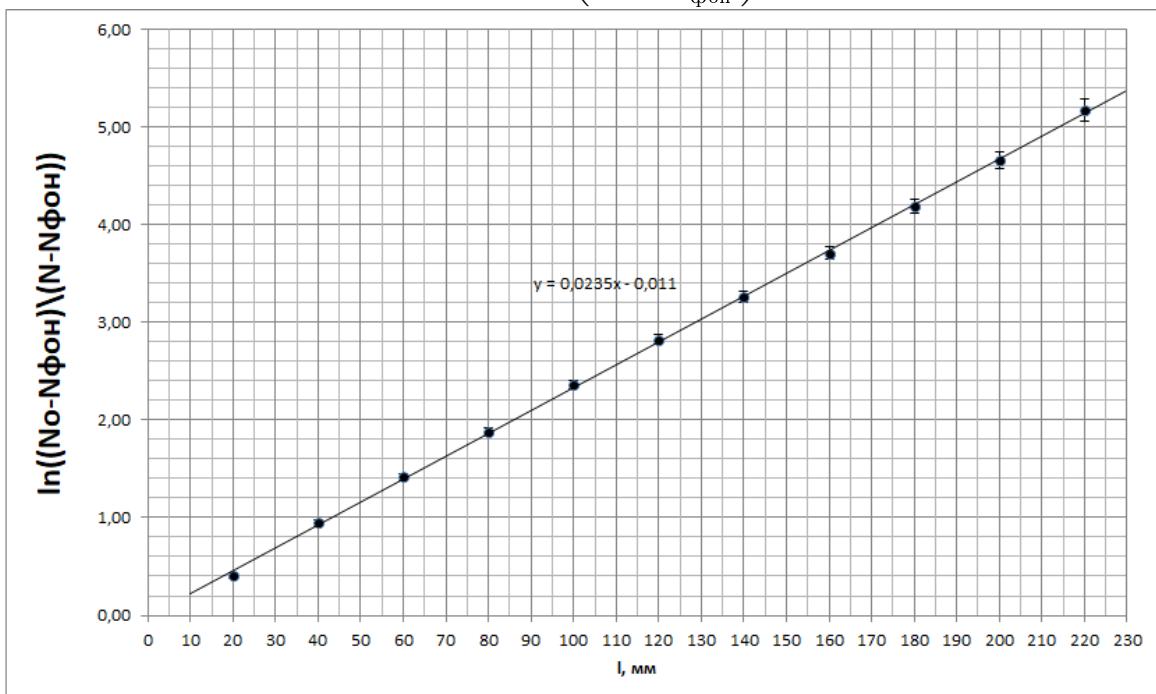
$$\begin{aligned}
& \delta y = \ln(x) - \ln(x - \delta x) \\
& \quad \downarrow \\
& \delta y = \ln\left(\frac{x}{x - \delta x}\right) = \ln\left(1 + \frac{x}{x + \delta x}\right) \\
& \quad \downarrow \\
& \delta y \approx \ln(1 + \varepsilon(x)) \approx \varepsilon(x) \\
& \quad \downarrow \\
& \sigma_{ln} = \varepsilon\left(\frac{N - N_{\text{фон}}}{N_0 - N_{\text{фон}}}\right) = \varepsilon(N - N_{\text{фон}}) + \varepsilon(N_0 - N_{\text{фон}}) \\
& \quad \downarrow \\
& \sigma_{ln} = \frac{\sigma_N + \sigma_{N_{\text{фон}}}}{N - N_{\text{фон}}} + \frac{\sigma_{N_0} + \sigma_{N_{\text{фон}}}}{N_0 - N_{\text{фон}}} \tag{7}
\end{aligned}$$

6. По полученным данным построим кривую зависимости логарифма числа сосчитанных частиц от толщины для алюминия.

Таблица 5: Данные для построения граффика. Алюминий

$\ln\left(\frac{N_0 - N_{\text{фон}}}{N - N_{\text{фон}}}\right)$	0,41	0,94	1,42	1,88	2,36	2,83	3,26	3,71	4,19	4,66	5,18
l, мм	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
$\sigma_{ln}$	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11

Рис. 5: График зависимости  $\ln\left(\frac{N_0 - N_{\text{фон}}}{N - N_{\text{фон}}}\right)$  от l образца для Al



7. Полученная зависимость аппроксимируется прямой вида  $y = 0,0235 + 0,011$ .
8. Наши точки аппроксимируются данной зависимостью с достоверностью выше 90% по методу  $\phi^2$
9. Найдем ошибку вычисления коэффициента наклона ( $k$ ) кривой по методу наименьших квадратов:

$$k = (2,35 \pm 0,05) * 10^{-2}$$

$$\varepsilon \approx 2\%$$

10. По полученным данным коэффициента наклона, найдем линейный коэффициента ослабления:

$$\mu_{Al} = (0,235 \pm 0,005) \text{ см}^{-1}$$

$$\varepsilon(\mu) \approx 2\%$$

11. Используя линейный коэффициент ослабления железа выражим коэффициент  $\mu'$ . Из формул (1) и (2) следует:

$$\mu l = \mu' m_1,$$

где  $m_1 = \rho \cdot l$ . Отсюда:

$$\mu' = \frac{\mu_1}{\rho}, \quad (8)$$

где  $\rho = 2,6989 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$

$$\mu'_{Al} = 0,087 \frac{\text{см}^2}{\Gamma}$$

12. Относительная прогрешность в таком случае будет сохраняться, а значит:

$$\mu'_{Al} = (8,7 \pm 0,2) * 10^{-2} \frac{\text{см}^2}{\Gamma}$$

## Исследование поглощений $\gamma$ - лучей в Свинце

1. Проведем измерение числа частиц, попадающих в счетчик за время  $t = 10$  секунд, при различных частичках поглотителя. Полученные данные выпишем в Таблицу 6 ( $k$  - количество поглотителей,  $l$  - суммарная толщина в мм):

Таблица 6: Поглотитель – свинец,  $t = 10$  секунд.

$k$ штук	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l$ мм	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$N$ частиц	26872	13490	6783	3482	1784	1074	644	393	231
$N - N_{\text{фон}}$	26766	13384	6677	3376	1678	968	538	287	125

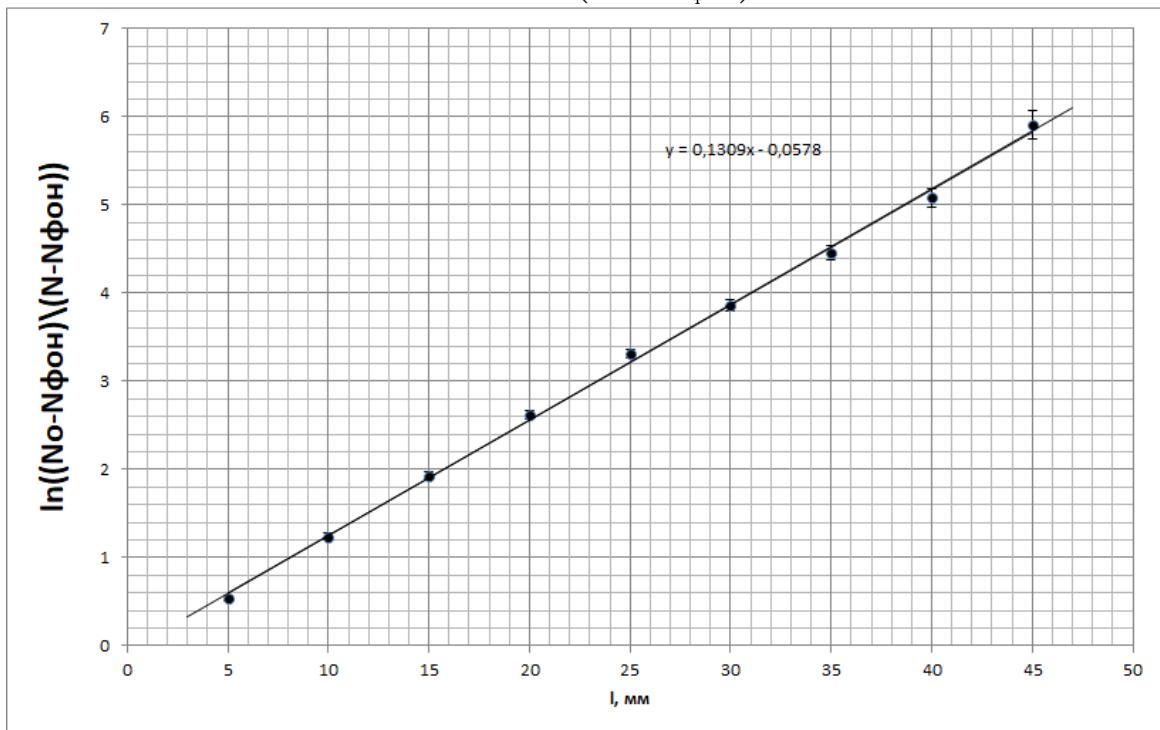
2. Высчитывая кресты погрешности по формуле (7), получим данные для построения графика зависимости:

Таблица 7: Данные для построения граффика. Свинец.

$\ln\left(\frac{N_0 - N_{\text{фон}}}{N - N_{\text{фон}}}\right)$	0,54	1,24	1,93	2,61	3,31	3,86	4,45	5,08	5,91
$l, \text{мм}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$\sigma_{ln}$	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,07	0,08	0,11	0,16

3. По данным таблицы 7 построим график прямой аппроксимирующей, полученные значения:

Рис. 6: График зависимости  $\ln\left(\frac{N_0 - N_{\text{фон}}}{N - N_{\text{фон}}}\right)$  от  $l$  образца для Pb



4. Полученная зависимость аппроксимируется прямой вида  $y = 0,131 + 0,059$ .
5. Наши точки аппроксимируются данной зависимостью с достоверностью выше 90% по методу  $\phi^2$
6. Найдем ошибку вычисления коэффициента наклона ( $k$ ) кривой по методу наименьших квадратов:

$$k = (1,31 \pm 0,03) * 10^{-1}$$

$$\varepsilon \approx 2,3\%$$

7. По полученным данным коэффициента наклона, найдем линейный коэффициента ослабления в свинце:

$$\mu_{Pb} = (1,31 \pm 0,03) \text{см}^{-1}$$

$$\varepsilon(Pb) \approx 2\%$$

8. Используя линейный коэффициент ослабления железа и тот факт, что  $\rho = 11,3415 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$  выразим коэффициент  $\mu'$  по формуле (8)

$$\mu'_{Pb} \approx 0,116 \frac{\text{см}^2}{\Gamma}$$

9. Относительная погрешность в таком случае будет сохраняться, а значит:

$$\mu'_{Pb} = (1,16 \pm 0,026) * 10(-1) \frac{\text{см}^2}{\Gamma}$$

## Исследование поглощений $\gamma$ - лучей в Железе

1. Проведем измерение числа частиц, попадающих в счетчик за время  $t = 10$  секунд, при различных частичках поглотителя. Полученные данные выпишем в Таблицу 10 ( $k$  - количество поглотителей,  $l$  - суммарная толщина в мм):

Таблица 8: Поглотитель – железо,  $t = 10$  секунд.

$k$ штук	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l$ , мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$N$ , частиц	26005	12953	6611	3388	1853	1004	611	390	255	205
$N - N_{\text{фон}}$	25899	12847	6505	3282	1747	898	505	284	149	99

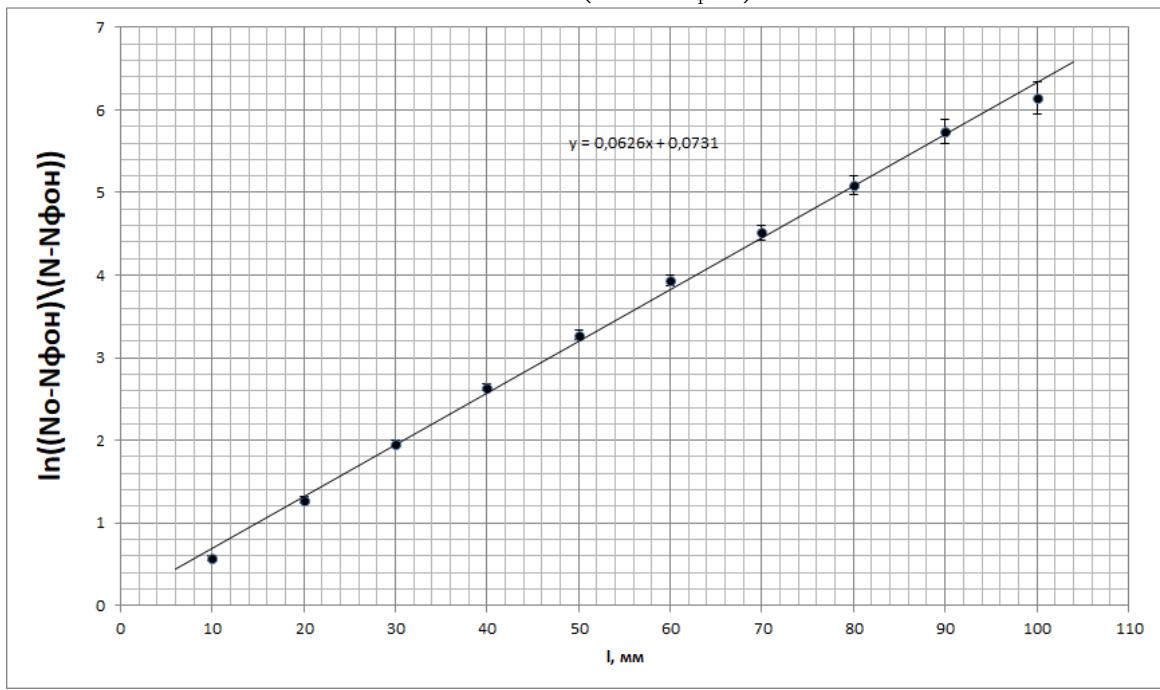
2. Высчитывая крести погрешности по формуле (7), получим данные для построения графика зависимости:

Таблица 9: Данные для построения графика. Железо.

$\ln\left(\frac{N_0 - N_{\text{фон}}}{N - N_{\text{фон}}}\right)$	0,58	1,28	1,96	2,64	3,27	3,94	4,51	5,09	5,73	6,14
$l$ , мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\sigma_{ln}$	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,07	0,08	0,11	0,15	0,19

3. По данным таблицы 11 построим график прямой аппроксимирующей, полученные значения:

Рис. 7: График зависимости  $\ln\left(\frac{N_0 - N_{\text{фон}}}{N - N_{\text{фон}}}\right)$  от 1 образца для Fe



4. Полученная зависимость аппроксимируется прямой вида  $y = 0,131 + 0,059$ .
5. Наши точки аппроксимируются данной зависимостью с достоверностью выше 90% по методу  $\phi^2$
6. Найдем ошибку вычисления коэффициента наклона ( $k$ ) кривой по методу наименьших квадратов:

$$k = (6,26 \pm 0,23) * 10^2$$

$$\varepsilon \approx 3,7\%$$

7. По полученным данным коэффициента наклона, найдем линейный коэффициента ослабления железа:

$$\mu_{Fe} = (0,626 \pm 0,023) \text{ см}^{-1}$$

8. Используя линейный коэффициент ослабления и знание о том, что  $\rho = 7,874 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$  железа выразим коэффициент  $\mu'$  по формуле (8)

$$\mu'_{Fe} \approx 0,0795 \frac{\text{см}^2}{\Gamma}$$

9. Относительная прогрешность в таком случае будет сохраняться, а значит:

$$\mu'_{Fe} = (7,95 \pm 0,03) * 10^{-2} \frac{\text{см}^2}{\Gamma}$$

## Измерение средней энергии $\gamma$ - лучей

- Выпишем полученные значения  $\mu$  и  $\mu'$

	Al	Pb	Fe
$\mu, \text{cm}^{-1}$	$0,235 \pm 0,005$	$1,31 \pm 0,03$	$0,626 \pm 0,023$
$\mu', \frac{\text{cm}^2}{\Gamma}$	$0,087 \pm 0,002$	$0,116 \pm 0,003$	$0,0795 \pm 0,0003$

- Сопоставляя полученные данные с теми, что приведены в наших лабораторных практикумах:

**Таблица V.4. Линейные коэффициенты поглощения  $\gamma$ -лучей в различных веществах (в  $\text{см}^{-1}$ )**

$E_\gamma, \text{МэВ}$	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

Получаем, что энергия  $\gamma$  - квантов  $E_\gamma \in [0,5; 0,6]$  МэВ

- Полученный результат также можно подтвердить с помощью Рисунка 2 теоритического аспекта.

## Дополнительное задание

- Проведем серию экспериментов по измерению прошедших сквозь поглотители частиц в зависимости от их расположени.
- Соберем необходимые данные и запишем их в таблицы:

Свинец у щели	25454	25304	24996	24712	24910
Свинец ближе к источнику	26474	26400	26118	26291	25718

Алюминий у щели	30771	30354	30230	30384	30484
Алюминий ближе к источнику	31044	30443	30506	30554	30363

6. Таким образом значение частиц попавших на счетчик (преодолев свинец), рассчитанное по формулам (5) и (6) будет составлять:

у щели:  $25075 \pm 110$ ;

у источника:  $26200 \pm 110$ ;

Железо у щели	25188	24785	24954	25251	24815
Железо ближе к источнику	25121	25658	25264	25445	25212

7. Таким образом значение частиц попавших на счетчик (преодолев железо), рассчитанное по формулам (5) и (6) будет составлять:

у щели:  $24999 \pm 78$ ;

у источника:  $25340 \pm 78$ ;

8. Таким образом значение частиц попавших на счетчик (преодолев алюминий), рассчитанное по формулам (5) и (6) будет составлять:

у щели:  $30445 \pm 75$ ;

у источника:  $30582 \pm 97$ ;

## Вывод

Исследование поглощения  $\gamma$ -лучей в свинце, алюминии и железе позволили нам подтвердить теорию изложенную в данном лабораторном практикуме, так как достоверность аппроксимации зависимости логарифма отношения прошедших частиц ко всем от толщины частицам прямой линией составляла выше 90% во всех трех случаях. К сожалению, погрешности измеряемых величин в некоторых измерениях превышает 0,3%. Это связано с нашим упущением в определении времени сбора данных. Так же были получены такие значения как  $\mu$  и  $\mu'$ , с помощью которых, нам удалось определить среднюю энергию  $\gamma$ -лучей, испускаемых источником. Полученное значение составило  $E_\gamma \sim 0,5 \div 0,6$  МэВ.

Более того в рамках дополнительного эксперимента была выявлена следующая закономерность: Количество частиц, регистрируемых датчиком в случае, когда поглотитель стоит ближе к источнику, превышает данное значение при расположении поглотителя ближе к датчику. Это может быть связано со следующим явлением: Частицы проходя некоторое расстояние до поглотителя возможно рассеиваются на этом пути на атомах воздуха, таким образом чем дальше путь до поглотителя, тем выше вероятность рассеивания на этом

пути. Так и теряется некоторая незначительная доля частиц, которая вообще говоря не превышает погрешности измерения всех частиц выходящих из источника.