

Лабораторная работа №5.4.1
Определение энергии α -частиц по величине их пробега в
воздухе

Рожков А. В.

25 ноября 2025 г.

Цель работы: измерить пробег α -частиц в воздухе тремя способами: с помощью торцевого счётчика Гейгера, сцинтилляционного счетчика и ионизационной камеры, - по полученным величинам определяется энергия частиц

В работе используются: счётчик Гейгера, сцинтилляционный счетчик, ионизационная камера.

1 Теоретические сведения

При α -распаде исходное родительское ядро испускает ядро гелия и превращается в дочернее ядро, число протонов и число нейтронов уменьшается на две единицы. Функциональная связь между энергией α -частицы E и периодом полураспада радиоактивного ядра $T_{1/2}$ хорошо описывается формулой

$$\lg T_{1/2} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b.$$

Экспоненциальный характер этого процесса возникает вследствие экспоненциального затухания волновой функции в области под барьером, где потенциальная энергия больше энергии частицы.

Экспериментально энергию α -частиц удобно определять по величине их пробега в веществе. Для описания связи между энергией α -частицы и ее пробегом пользуются эмпирическими соотношениями. В диапазоне энергий α -частиц от 4 до 9 МэВ эта связь хорошо описывается выражением

$$R = 0,32E^{3/2}, \quad (1)$$

где пробег α -частиц в воздухе R (при 15 °C и атмосферном давлении) выражается в см, а энергия частицы E в МэВ.

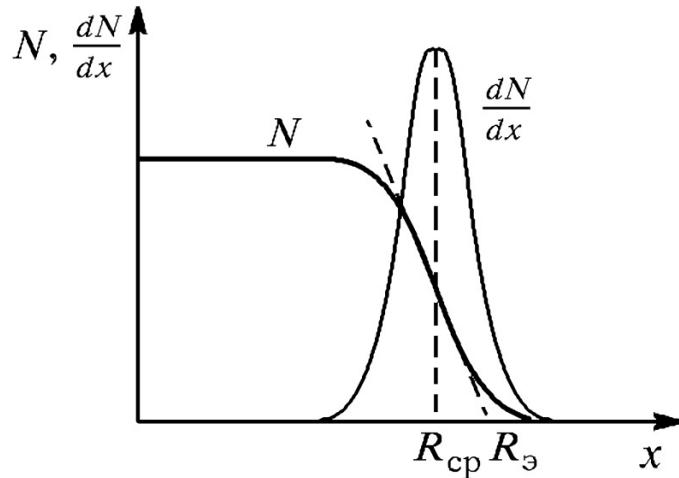


Рис. 1: Зависимость числа α -частиц от глубины их проникновения в вещество

При малых глубинах число частиц не меняется с расстоянием. В конце пути это число не сразу обрывается до нуля, а приближается к нему постепенно. Как видно из кривой dN/dx , большая часть α -частиц останавливается в узкой области, расположенной около некоторого значения x , которое называется средним пробегом R_{cp} . Иногда вместо R_{cp} измеряются экстраполированное значение R_∞ .

В силу размытия и смещения брэгговского пика из-за угловой расходимости пучков частиц, лучшей оценкой пробега оказывается экстраполированный пробег.

2 Экспериментальная установка

2.1 Счётчик Гейгера

Для определения пробега α -частиц с помощью счетчика радиоактивный источник помещается на дно стальной цилиндрической бомбы, в которой может перемещаться торцевой счетчик Гейгера.

Его чувствительный объем отделен от наружной среды тонким слюдяным окошком, сквозь которое могут проходить α -частицы.

Импульсы, возникающие в счетчике, усиливаются и регистрируются пересчетной схемой. Путь частиц в воздухе зависит от расстояния между источником и счетчиком. Перемещение счетчика производится путем вращения гайки, находящейся на крышке бомбы. Расстояние между счетчиком и препаратом измеряется по шкале, нанесенной на держатель счетчика.

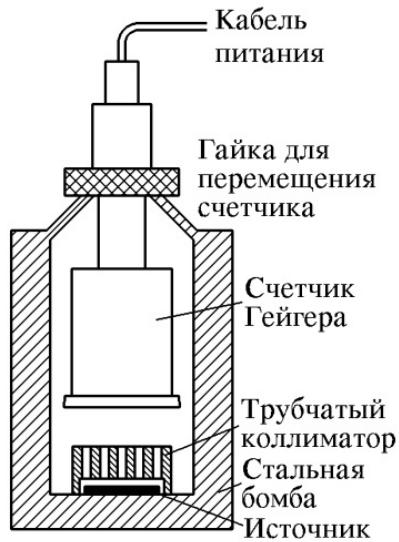


Рис. 2: Счётчик Гейгера

2.2 Сцинтиляционный счётчик

Установка состоит из цилиндрической камеры, на дне которой находится исследуемый препарат. Камера герметично закрыта стеклянной пластинкой, на которую с внутренней стороны нанесен слой люминофора. С наружной стороны к стеклу прижат фотокатод фотоумножителя. Оптический контакт ФЭУ-стекло обеспечивается тонким слоем вазелинового масла.

Сигналы с фотоумножителя через усилитель поступают на пересчетную установку. Расстояние между препаратом и люминофором составляет 9 см, так что α -частицы не могут достигнуть люминофора при обычном давлении. Определение пробега сводится к измерению зависимости интенсивности счета от давления в камере.

2.3 Ионизационная камера

Ионизационная камера – прибор для количественного измерения ионизации, произведенной заряженными частицами при прохождении через газ. Камера представляет собой наполненный газом сосуд с двумя электродами. Сферическая стенка прибора служит одним из электродов, второй электрод вводится в газ через изолирующую пробку. К электродам подводится постоянное напряжение от источника ЭДС. Заполняющий сосуд газ сам по себе не проводит электрический ток, возникает он только при прохождении быстрой заряженной частицы, которая рождает в газе на своем пути ионы. Поместим на торец внутреннего электрода источник ионизирующего излучения, заполним объем камеры воздухом.

Прохождение тока через камеру регистрируется посредством измерения напряжения на включенном в цепь камеры сопротивлении R . При небольших давлениях газа α -частицы передают часть энергии стенкам камеры. По достижении давления P_0 все они заканчивают свой пробег внутри газа, и дальнейшее возрастание тока прекращается. Для определения давления P_0 чаще всего пользуются методом экстраполяции, продолжая наклонный и горизонтальный участки кривой до пересечения.

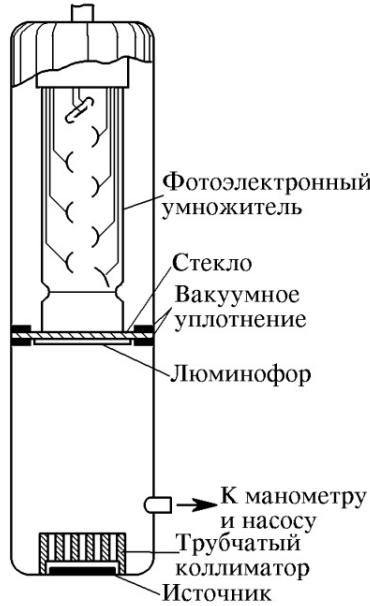


Рис. 3: Установка для измерения пробега α -частиц с помощью сцинтилляционного счетчика

Найденный таким образом пробег затем должен быть приведен к нормальному давлению 760 торр и температуре 15°C .

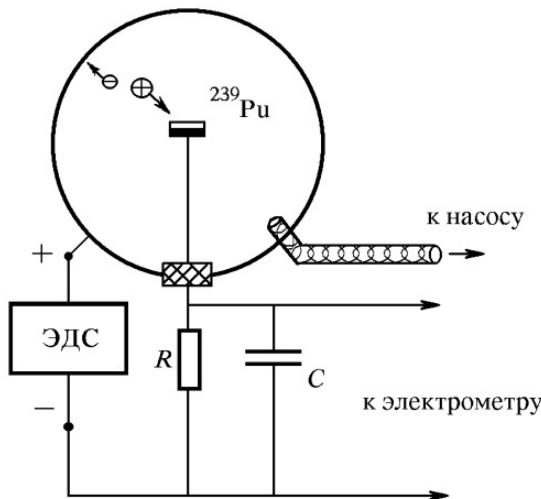


Рис. 4: Установка для измерения пробега α -частиц с помощью ионизационной камеры

3 Ход работы

В начале и в конце проведения измерений было записано атмосферное давление с 2 барометров:

Барометр	До	После
1	727.9 ± 0.1 торр	727.8 ± 0.1 торр
2	97.7 ± 0.1 кПа	97.8 ± 0.1 кПа

Таблица 1: Атмосферное давление до и после проведения измерений

В дальнейшем в работе используется среднее значение $P_{\text{атм}} = 730 \pm 2$ торр. Температуру примем равной 22°C

3.1 Измерение длины пробега α -частиц с помощью сцинтилляционного счётчика

Построим график зависимости $N(P)$ по полученным данным, где $N = N_0/t$, $\sigma_N = \sqrt{N_0}/t$:

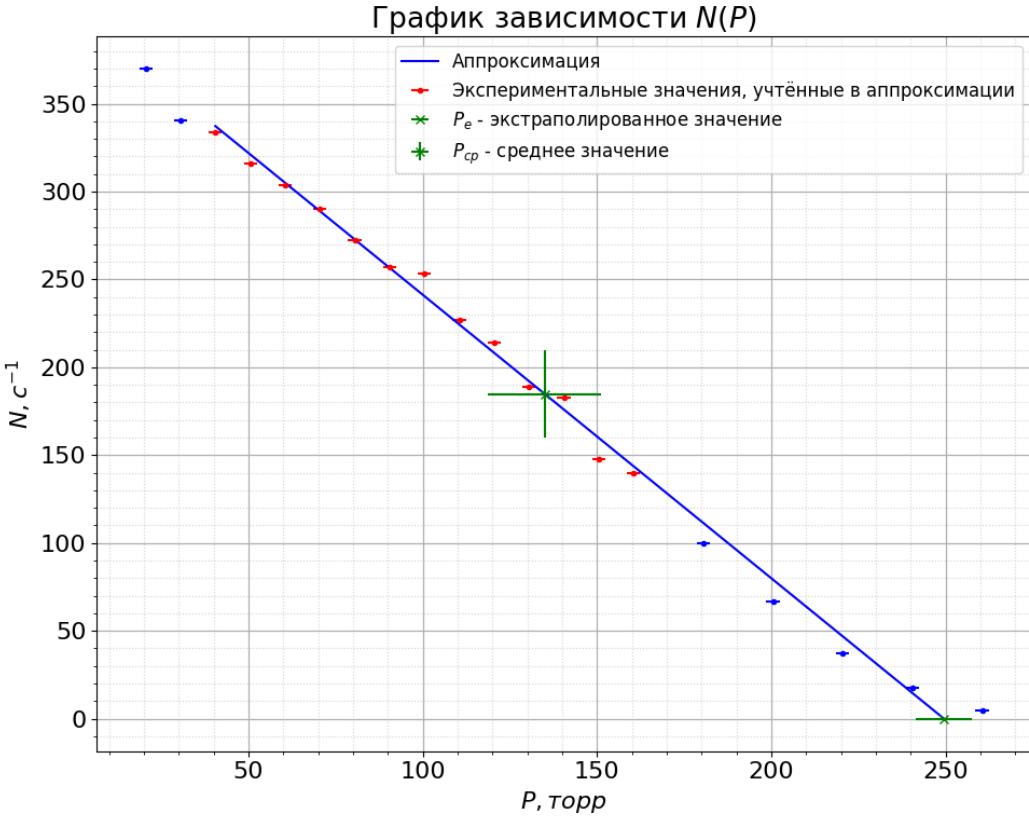


Рис. 5: График зависимости $N(P)$

Аппроксимировали функцией $y = k * x + b$. Значения коэффициентов: $k = -1.61 \pm 0.05 \text{ см}^{-1}\text{торр}^{-1}$; $b = 403 \pm 5 \text{ см}^{-1}$

Находим $N_{\text{ср}} = \frac{N_{\text{max}} + N_{\text{min}}}{2}$, где $P_{\text{min}} = 0$ торр, $P_{\text{max}} = 350 \pm 50$ торр. По нему по аппроксимированной кривой находим $P_{\text{ср}}$. Погрешность по формуле погрешности сложного измерения

Полученные значения:

$$P_{\text{ср}} = \frac{-b}{k} = 250 \pm 8 \text{ торр}$$

$$P_{\text{ср}} = \frac{N_{\text{ср}} - b}{k} = 130 \pm 20 \text{ торр}$$

Было получено давление, при котором длина свободного пробега равна расстоянию от источника для люминофора $L = 9$ см: $R = L \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T}$

$$R_{\text{ср}} = 2.88 \pm 0.09 \text{ см}, R'_{\text{ср}} = \rho R_{\text{ср}} = 1.225 \text{ кг/м}^3 \cdot R_{\text{ср}} = 3.53 \pm 0.11 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^2$$

$$R_{\text{ср}} = 1.6 \pm 0.2 \text{ см}, R'_{\text{ср}} = \rho R_{\text{ср}} = 1.225 \text{ кг/м}^3 \cdot R_{\text{ср}} = 1.9 \pm 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^2$$

Экстраполированной длине свободного пробега соответствует значение энергии $E_{\text{ср}} = 4.3 \pm 0.1 \text{ МэВ}$. Полученное значение отличается от табличного 5.15 МэВ.

Считая, что эффективность счёта α -частиц равно 100%, оценим по известному периоду полураспада количество вещества в препарате. Телесный угол, под которым виден источник равен 0.04 ср

$$\nu = A \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = N_{\text{max}} * \frac{4\pi}{0.04 \text{ ср}} \cdot \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = 370 \text{ см}^{-1} \frac{4\pi}{0.04 \text{ ср}} \cdot \frac{24400 \text{ лет}}{\ln 2} = 2.1 * 10^{-7} \text{ моль}$$

$$m = M\nu = 273 \text{ г/моль} * 2.1 * 10^{-7} \text{ моль} = 58 \text{ мкг}$$

3.2 Измерение длины пробега α -частиц с помощью ионизационной камеры

Построим график зависимости $I(P)$ по полученным данным:

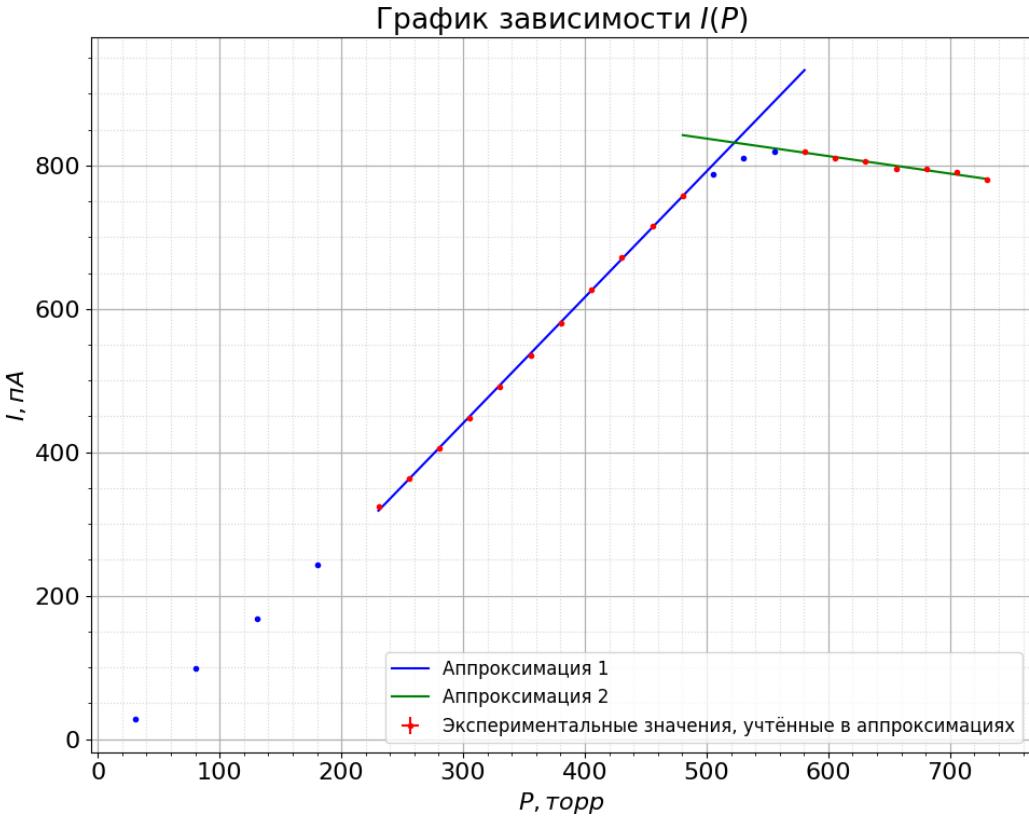


Рис. 6: График зависимости $I(P)$

С помощью аппроксимационных прямых определяем давление, при котором начинается область насыщения. Это давление соответствующее точке пересечения прямых. Погрешности по формуле погрешности сложного измерения. Коэффициенты прямых:

$$k_1 = 1.756 \pm 0.011 \text{ пA/торр} \quad b_1 = -86 \pm 4 \text{ пA}$$

$$k_2 = -0.24 \pm 0.02 \text{ пA/торр} \quad b_2 = 960 \pm 10 \text{ пA}$$

$$P = \frac{b_1 - b_2}{k_2 - k_1} = 523 \pm 10 \text{ торр}$$

Это давление, при котором длина свободного пробега равна расстоянию между внутренним и внешним электродами $L = (10 - 0.5)/2 = 4.75$ см (10 см – диаметр внешнего диска, 0.5 см – внутреннего). Пересчитаем длину свободного пробега для нормальных условий:

$$R_s = L \frac{P}{P_0} = 3.19 \pm 0.06 \text{ см}, R' = \rho R = 1.225 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot R_s = 3.91 \pm 0.07 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^2$$

Этой длине свободного пробега соответствует значение энергии $E = 4.63 \pm 0.08$ МэВ.

Для данной энергии рассчитаем толщину бумажного листа, достаточного, чтобы остановить α -частицу.

$$d = R_{бумага} = \frac{R'}{\rho_{бумага}} = \frac{3.91 * 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^2}{0.8 \text{ г}/\text{см}^3} = 0.05 \text{ мм}$$

4 Заключение

Двумя различными способами был измерен свободный пробег в воздухе α -частиц с энергией 5.15 МэВ. В качестве источника радиоактивных частиц был использован ^{239}Pu .

В результате экспериментов были получены следующие значения энергии α -частиц: с помощью сцинтилляционного счётчика $E_s = 4.3 \pm 0.1$ МэВ, с помощью ионизационной камеры $E_s = 4.63 \pm 0.08$ МэВ.

Полученные значения являются заниженными по сравнению с теоретическим (5.15 МэВ) по следующим причинам: источник частиц покрыт слюдянной пленкой, что приводит к замедлению α -частиц; пучки частиц обладают конечными размерами, что приводит к угловой расходимости и заметно искажает брэгговский пик, из-за чего зависимости являются более размытыми.

Проведена оценка количества вещества и массы ^{125}Pu в установке с сцинтилляционным счётчиком $-\nu = 2.1 * 10^{-7}$ моль, $m = 58$ мкг.

Также для источника с такой энергией α -частиц достаточно листа бумаги толщиной примерно 0.05 мм, чтобы их остановить.

5 Приложение

$P_{\text{изм}}$, торр	t , с	N_0	$N, \text{с}^{-1}$	P , торр
-710	10	3697	369.7	20 ± 2
-700	10	3406	340.6	30 ± 2
-690	10	3337	333.7	40 ± 2
-680	10	3157	315.7	50 ± 2
-670	10	3035	303.5	60 ± 2
-660	10	2901	290.1	70 ± 2
-650	10	2725	272.5	80 ± 2
-640	10	2569	256.9	90 ± 2
-630	16	4054	253.375	100 ± 2
-620	20	4544	227.2	110 ± 2
-610	15	3208	213.867	120 ± 2
-600	20	3779	188.95	130 ± 2
-590	15	2741	182.733	140 ± 2
-580	20	2960	148.0	150 ± 2
-570	20	2793	139.65	160 ± 2
-550	30	2988	99.6	180 ± 2
-530	40	2668	66.7	200 ± 2
-510	70	2586	36.943	220 ± 2
-490	100	1777	17.770	240 ± 2
-470	100	491	4.910	260 ± 2

Таблица 2: Результаты измерений для эксперимента со сцинтилляционным счётчиком

$P_{\text{изм}}$, торр	P , торр	I , пА
-700	30 ± 2	28
-650	80 ± 2	98
-600	130 ± 2	168
-550	180 ± 2	243
-500	230 ± 2	324
-475	255 ± 2	363
-450	280 ± 2	405
-425	305 ± 2	447
-400	330 ± 2	491
-375	355 ± 2	535
-350	380 ± 2	580
-325	405 ± 2	627
-300	430 ± 2	672
-275	455 ± 2	715
-250	480 ± 2	758
-225	505 ± 2	787
-200	530 ± 2	810
-175	555 ± 2	820
-150	580 ± 2	820
-125	605 ± 2	810
-100	630 ± 2	806
-75	655 ± 2	795
-50	680 ± 2	795
-25	705 ± 2	790
0	730 ± 2	780

Таблица 3: Результаты измерений для эксперимента с ионизационной камерой