

4.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ α -ЧАСТИЦ ПО ВЕЛИЧИНЕ ИХ ПРОБЕГА В ВОЗДУХЕ

Васильев Денис

Цель работы: измеряется пробег α -частиц в воздухе 2-умя способами — с помощью торцового счётчика Гейгера и сцинтилляционного счётчика, — по полученным величинам определяется их энергия.

1 Теоретическая справка

При α -распаде исходное материнское ядро испускает ядро гелия (α -частицу) и превращается в дочернее ядро, число протонов и число нейтронов которого уменьшается на две единицы. Периоды полураспада α -активных ядер изменяются в чрезвычайно широких пределах. Так, например, для $^{212}_{84}\text{Po}$ он равен $3 \cdot 10^{-7}$ с, а для $^{204}_{82}\text{Pb}$ — $1.4 \cdot 10^{17}$ лет. Диапазон изменения энергии вылетающих α -частиц значительно меньше — от 4 до 9 МэВ, причём чем меньше их энергия, тем больше период полураспада. Функциональная связь между энергией E α -частицы и периодом полураспада радиоактивного ядра $T_{1/2}$ хорошо описывается формулой:

$$\lg T_{1/2} = a/\sqrt{E} + b, \quad (1)$$

полученной на основе экспериментальных данных Х. Гейгером и Дж. Нэттолом в 1911 г. (закон Гейгера-Нэттола).

Будем рассматривать только *ионизационные* потери (неупругие столкновения α -частиц, вызывающие ионизацию и возбуждение атомов). Нетрудно вывести следующее:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} \simeq 2\pi \frac{e^4 z^2}{mv^2} nZ \ln \frac{2mv^2}{\bar{I}}, \quad (2)$$

где величину dE/dx называют *тормозной способностью вещества*, \bar{I} — *средний ионизационный потенциал*, z — заряд частицы, m — масса частицы.

Зная зависимость тормозной способности данного вещества от энергии частицы, нетрудно вычислить длину пробега частицы, замедлившейся от начальной энергии E_0 до конечной E_1 . В диапазон энергий α -частиц от 4 до 9 МэВ эмпирически была найдена следующая связь:

$$R = 0.32E^{3/2} \quad (3)$$

где R — пробег α -частиц в воздухе при 15°C градусов и нормальном атмосферном давлении (выражается в см). Также пробег выражается в г/см^2 : $R' = \rho R$, где ρ — плотность вещества.

В данной лабораторной работы пробег α -частиц в воздухе определяется двумя способами:

- с помощью счётчика Гейгера
- с помощью сцинтилляционного счётчика

В качестве источника α -частиц используется ^{239}Pu с периодом полураспада $T_{1/2} = 2.44 \cdot 10^4$ лет. При той точности, которая достигается в наших опытах, можно считать энергию частиц равно ~ 5 МэВ.

2 Отчёт о работе

2.1 Исследование пробега α -частиц с помощью счётчика Гейгера

Для определения пробега α -частиц с помощью счётчика радиоактивный источник помещается на дно стальной цилиндрической бомбы (рис. 1), в которой может перемещаться счётчик Гейгера. Его чувствительный объём отделен от наружной среды тонким слюдяным окошком, сквозь которое могут проходить α -частицы. Рабочее напряжение счётчика указано на установке.

Построим график зависимости $N = N(x)$ (см. рис. 2).

По графику определяем средний ($R_{\text{ср}}$) и экстраполированный $R_{\text{экстр}}$ пробег частицы, как значение медианы в районе спада графика $N(x)$ и пересечение прямой с осью x .

$$R_{\text{ср}} = 2.90 \pm 0.07 \text{ см}, \quad R_{\text{экстр}} = 3.12 \pm 0.08 \text{ см}.$$

Также выразим пробеги $R'_{\text{ср}}$ и $R'_{\text{эксп}}$:

$$R'_{\text{ср}} = R_{\text{ср}} \rho_{\text{возд}} = (3.48 \pm 0.08) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Г}}{\text{см}^2}, \quad R'_{\text{экстр}} = R_{\text{экстр}} \rho_{\text{возд}} = (3.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Г}}{\text{см}^2},$$

$$R'_{\text{экстр}} = R_{\text{экстр}} \rho_{\text{возд}} = (3.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Г}}{\text{см}^2},$$

где $\rho_{\text{возд}} = pM/RT = 1.20 \cdot 10^{-3} \text{ Г/см}^3$

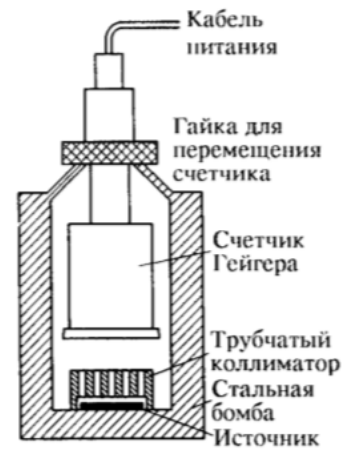


Рис. 1: Установка для измерения пробега α -частиц с помощью торцового счётчика Гейгера

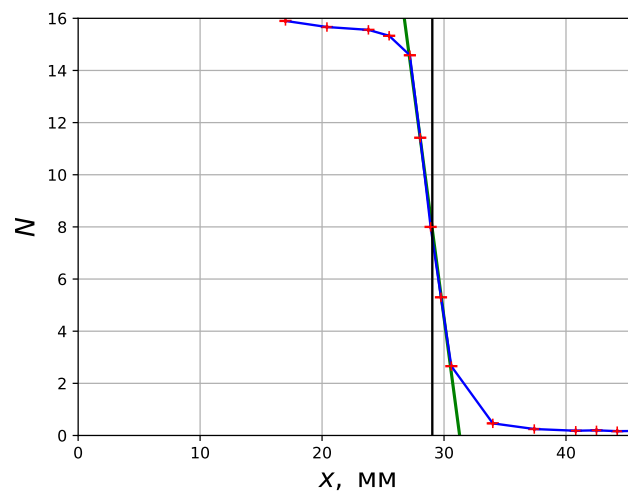


Рис. 2: График зависимости $N = N(x)$ $y = (-3.53 \pm 0.09)x + 110.3 \pm 0.1$

Приведём пробеги к величинам при стандартных условиях ($T = 15^\circ\text{C}$, $p = 760$ мм рт. ст.):

$$R_{\text{ср}} = 2.80 \pm 0.07 \text{ см}, \quad R_{\text{экстр}} = 3.02 \pm 0.08 \text{ см}.$$

С помощью формулы (3) определяем энергию α -частиц:

$$E_{\text{ср}} = 4.3 \pm 0.1 \text{ МэВ}, \quad E_{\text{экстр}} = 4.47 \pm 0.1 \text{ МэВ}.$$

Получили доверительные интервалы, не содержащие истинное значение энергии $E_{\text{ист}} = 5.15$ МэВ. Это можно объяснить тем, что часть энергии α -частиц тратится на прохождение слюдяной пластинки, прикрывающей счётчик, и плёнки, закрывающей источник.

2.2 Определение пробега α -частиц с помощью сцинтилляционного счётчика



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

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 (рис. 3). Оптический контакт ФЭУ — стекло обеспечивается тонким слоем вазелинового масла.

Сигналы с фотоумножителя через усилитель поступают на пересчетную установку. Рабочее напряжение фотоумножителя указано на высоковольтном выпрямителе. 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.

Снимем график зависимости $N = N(p)$ и по графику определим средний и экстраполированный пробег α -частиц при условиях опыта аналогично предыдущему пункту. Получили значения давления:

$$p_{\text{ср}} = (31 \pm 3) \cdot 10 \text{ мм рт. ст.}, \quad p_{\text{экстр}} = (44 \pm 4) \cdot 10 \text{ мм рт. ст.}$$

По данным значениям определим пробег, выраженный в $\text{г}/\text{см}^2$ по формуле $R' = \rho R = pM/RT$, ($R = 9$ см):

$$R'_{\text{ср}} = (4.29 \pm 0.02) \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^2}, \quad R'_{\text{экстр}} = (6.11 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$$

Приведём пробеги к величинам при стандартных условиях:

$$R_{\text{ср}} = 3.5 \pm 0.3 \text{ см}, \quad R_{\text{экстр}} = 4.9 \pm 0.4 \text{ см}$$

С помощью формулы (3) определяем энергию α -частиц:

$$E_{\text{ср}} = 4.9 \pm 0.3 \text{ МэВ}, \quad E_{\text{экстр}} = 6.2 \pm 0.3 \text{ МэВ}$$

Интервал $E_{\text{ср}}$ содержит истинное значение энергии $E_{\text{ист}} = 5.15$ МэВ

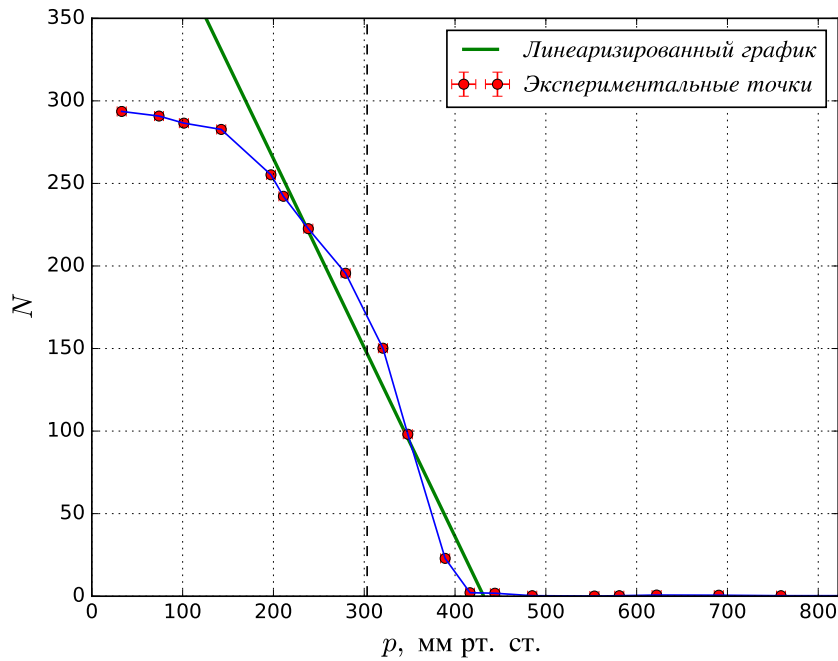


Рис. 4: График зависимости $N = N(p)$

2.2.1 Количество α -частиц

Телесный угол $\Omega = 0.04$, $\tau = 2,44 \cdot 10^4$, $\lambda = \ln 2/\tau = 9 \cdot 10^{-13} \text{ с}^{-1}$,
 $v = 4\pi/0.04 N_{\text{max}} = 95000 \text{ шт/с}$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} = -\lambda N \quad (5)$$

$$N = -\frac{v}{\lambda} = 1,06 \cdot 10^{17} \text{ шт} \quad (6)$$

2.2.2 Толщина слюды

Из сравнения результатов 1 и 2 опыта рассчитаем толщину слюды. Оценим толщину пластинки:

$$\delta = \frac{R'_{\text{сцинт}} - R'_{\text{Гейгер}}}{1.2} = (2.01 \pm 0.06) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Г}}{\text{см}^2}$$

2.3 Определение пробега α -частиц с помощью ионизационной камеры

Ионизационная камера — прибор для количественного измерения ионизации, произведенной заряженными частицами при прохождении через газ. Камера представляет собой наполненный газом сосуд с двумя

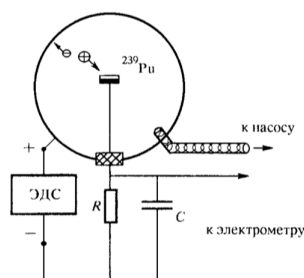


Рис. 5: Схема устройства ионизационной камеры

электродами (схема камеры приведена на рис. 5).

Если поместить на торец внутреннего электрода источник ионизирующего излучения, заполнить объём камеры воздухом и постепенно увеличивать разность потенциалов, то ток, протекающий через камеры, вначале будет резко возрастать, а затем, начиная с некоторого напряжения станет постоянным. При небольших давлениях газа α частицы передают часть энергии стенкам камеры. По достижении давления $P_{\text{экстр}}$ все они заканчивают свой пробег внутри газа, и дальнейшее возрастание тока прекращается.

Снимем зависимость $I = I(p)$. По этой зависимости снимем экстраполированный пробег, который определяется по пересечению двух прямых.

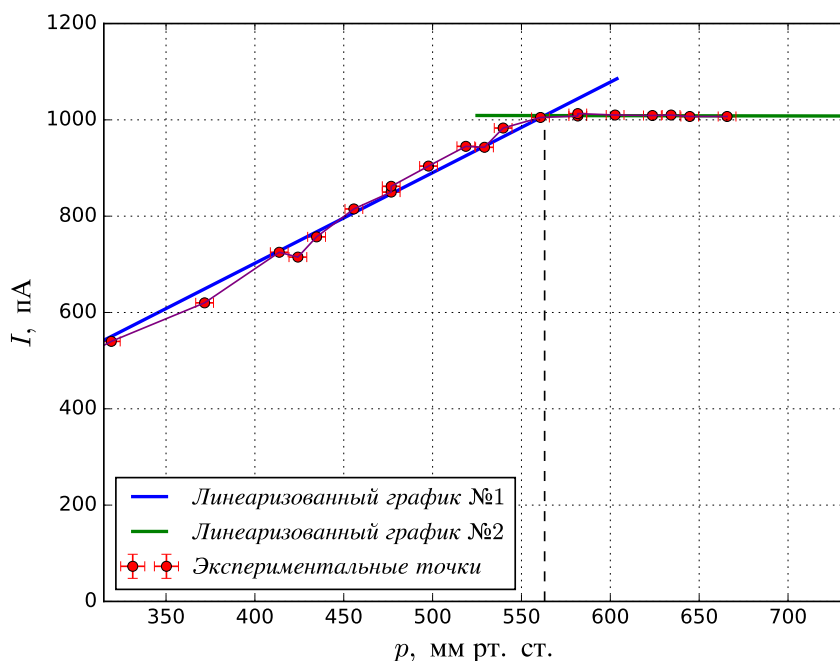


Рис. 6: График зависимости $I = I(p)$

Получили значение давления:

$$p_{\text{экстр}} = (56 \pm 1) \cdot 10 \text{ мм рт. ст.}$$

По данным значениям определим пробег, выраженный в $\text{г}/\text{см}^2$ по формуле $R' = \rho R = pM/RT R$, ($R = 5 \text{ см}$):

$$R'_{\text{экстр}} = (4.43 \pm 0.02) \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$$

Приведём пробеги к величинам при стандартных условиях:

$$R_{\text{экстр}} = 3.61 \pm 0.07 \text{ см}$$

С помощью формулы (3) определяем энергию α -частиц:

$$E_{\text{экстр}} = 5.03 \pm 0.07 \text{ МэВ}$$

Двойной интервал $E_{\text{экстр}}$ содержит истинное значение энергии $E_{\text{ист}} = 5.15 \text{ МэВ}$.

3 Вывод

Таблица 1: Результаты

	$R_{\text{экстр}}, \text{ см}$	$R_{\text{ср}}, \text{ см}$	$R'_{\text{экстр}}, \text{ г}/\text{см}^2 \cdot 10^{-3}$	$R'_{\text{ср}}, \text{ г}/\text{см}^2$	$E_{\text{экстр}}, \text{ МэВ}$	$E_{\text{ср}}, \text{ МэВ}$
Гейгера	3.12 ± 0.08	2.90 ± 0.07	3.7 ± 0.1	3.48 ± 0.08	4.47 ± 0.1	4.3 ± 0.1
Сцинт.	4.9 ± 0.4	3.5 ± 0.3	6.11 ± 0.03	4.29 ± 0.02	6.2 ± 0.3	4.9 ± 0.3
Камера	3.61 ± 0.07	—	4.43 ± 0.02	—	3.61 ± 0.07	—

В данной лабораторной работе был измерен пробег α -частиц 2-умя способами — с помощью торцового счётчика Гейгера и сцинтилляционного счётчика, — по полученным величинам была определена их энергия. Все результаты с учётом погрешностей совпали с истинными.