

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ИССЛЕДОВАНИЕ  $\alpha$ -РАСПАДА РАДИОАКТИВНОГО-  
ИЗОТОПА ПЛУТОНИЯ**

*Методические указания к лабораторной работе № 40  
по курсу «Физика» для студентов всех форм обучения  
всех специальностей*

Екатеринбург  
УрФУ  
2017

УДК 621.791.76(075.8)

Составители – Н. А. Зайцева, А. Н. Филанович

Научный редактор – проф., д-р физ.-мат. наук А. А. Повзнер

Исследование альфа-распада радиоактивного изотопа плутония: методические указания к лабораторной работе № 40 / сост. Н. А. Зайцева, А. Н. Филанович. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 19 с.

Методические указания содержат сведения о свойствах альфа-частиц и механизмах взаимодействия частиц с веществом поглотителя. По величине экстраполированного пробега альфа-частиц в воздухе определяется их кинетическая энергия и ионизационная способность. Экспериментальная часть включает описание лабораторной установки, сцинтилляционного счетчика альфа-частиц, методику измерений и обработки результатов. Приведена форма отчета.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский федеральный  
университет, 2017

## Введение

При радиоактивном распаде ядер из них могут вылетать альфа-частицы, которые представляют собой ядра атомов гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Масса альфа-частицы равна  $6,644 \cdot 10^{-27}$  кг, спин и магнитный момент равны нулю. Заряд частицы равен суммарному заряду протонов, входящих в ее состав, т. е.  $+2e$ , где  $e = 1,602 \cdot 10^{-16}$  Кл. При  $\alpha$ -распаде исходное – «материнское» ядро с зарядовым  $Z$  и массовым  $A$  числами превращается в новое, «дочернее» ядро с порядковым номером  $Z-2$  и массовым числом  $A-4$ . Известно более 150  $\alpha$ -радиоактивных ядер. Подавляющее их число расположено в конце периодической системы элементов.

### 1. Время жизни и период полураспада $\alpha$ -радиоактивных ядер

(Время жизни  $\tau$  – это время, в течение которого число радиоактивных ядер уменьшается в  $e = 2,718282$  раз; период полураспада  $T$  – это время, в течение которого число радиоактивных ядер уменьшается в 2 раза).

Период полураспада  $\alpha$ -радиоактивных ядер колеблется в очень широких пределах: от  $3,04 \cdot 10^{-7}$  секунд для полония ( $^{212}\text{Po}$ ) до  $1,4 \cdot 10^7$  лет для изотопа тория ( $^{232}\text{Th}$ ). Значения кинетических энергий  $E$  альфа-частиц, испускаемых ядрами, лежат, однако, в весьма узком интервале: от 2,0 до 8,8 МэВ. Опыт показывает, что *чем меньше среднее время жизни  $\tau$  радиоактивного ядра, тем больше энергия  $E$  образующихся  $\alpha$ -частиц*. Количественно связь между этими величинами выражается законом Гейгера–Нэттола:

$$\log_{10}\tau = 148 E^{-0,5} - 53,6, \quad (1)$$

где  $\tau$  – среднее время жизни альфа-частицы (выражается в секундах);

$E$  – кинетическая энергия частицы (МэВ).

Измеряя энергию  $E$   $\alpha$ -частицы, можно оценить среднее время ее жизни  $\tau$  или период полураспада  $T = \tau \ln 2 = 0,693\tau$ .

## 2. Туннелирование альфа-частиц

Образовавшаяся внутри ядра  $\alpha$ -частица (как и нуклоны) удерживается там силами неэлектрической природы, которые действуют лишь на коротких расстояниях  $\sim 10^{-15}$  м.

Вне ядра между частицей и новым (дочерним) ядром действуют силы кулоновского отталкивания. Потенциальная энергия  $U$  такого взаимодействия имеет вид

$$U(r) = (Z - 2)e^2 / 4\pi\epsilon\epsilon_0 r.$$

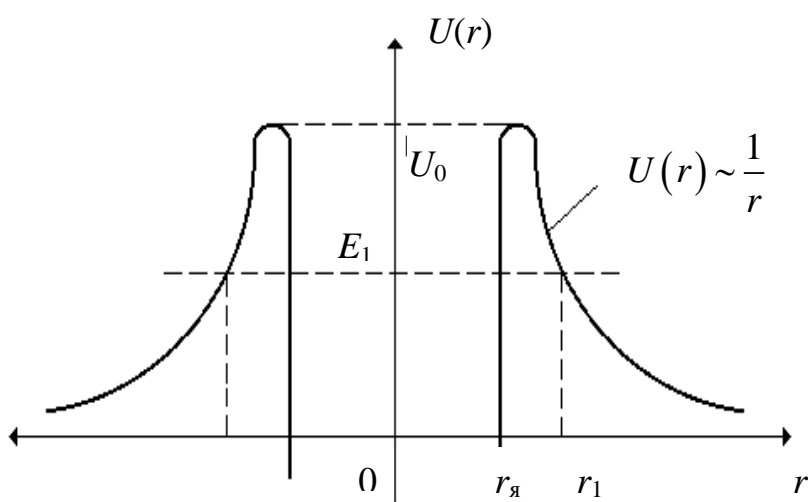


Рис. 1. Энергия взаимодействия  $\alpha$ -частицы с ядром:

$E$  – энергия  $\alpha$ -частицы;  $r_я$  – радиус ядра;

$r_1 - r_я$  – ширина барьера для энергии  $E_1$

Согласно квантово-механическим представлениям  $\alpha$ -частица туннелирует из ядра, преодолевая потенциальный барьер, форма которого схематически представлена на рис. 1.

В зависимости от величины энергии  $\alpha$ -частицы возможны три случая.

1. При  $E_1 \leq 0$   $\alpha$ -частица находится в ядре.

2. При  $E_1 \geq U_0$   $\alpha$ -частица не связана с ядром и может находиться на любых расстояниях от ядра.

3. При  $U_0 > E_1 > 0$  для  $\alpha$ -частицы существует отличная от нуля вероятность обнаружения ее вне ядра.

Явление прохождения частицы через (сквозь!) потенциальный барьер называют *туннельным эффектом*. Вероятность туннелирования  $D$  частицы массой  $m$  с энергией  $E_1$  сквозь барьер шириной  $r_1-r_я$  определяется квантово-механическим соотношением

$$D = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_{r_я}^{r_1} \sqrt{2m(U(r) - E_1)} dr \right\}, \quad (2)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка.

Согласно (2) вероятность туннелирования частицы из ядра с ростом  $E_1$  увеличивается, а время жизни  $\tau \sim D^{-1}$  ядер уменьшается.

### 3. Взаимодействие движущихся $\alpha$ -частиц с веществом

Движущаяся с большой начальной кинетической энергией  $E_1 = E_{кин} \sim 2 \div 8$  МэВ массивная положительно заряженная частица теряет энергию, взаимодействуя с электронами и ядрами вещества-поглотителя.

Возможны три вида потерь энергии быстрой заряженной частицы в веществе: а) на ионизацию и возбуждение атомов поглотителя, б) на образование ядер отдачи, в) на тормозное излучение.

#### 3.1. Ионизационные потери (основные потери)

При столкновении заряженных частиц с атомами поглотителя последним может быть передана энергия, достаточная для перехода электронов на более высокие энергетические уровни (возбуждение атомов) и даже для отрыва электронов от атомов (ионизация). Эти потери называются ионизационными. Энергия  $\alpha$ -частицы при таких взаимодействиях теряется относительно малыми порциями. Так, средний потенциал возбуждения атомов и молекул воздуха составляет 35 эВ. При прохождении  $\alpha$ -частицы в воздухе процесс ионизации идет до тех пор, пока ее энергия не станет меньше потенциала ионизации молекул вещества. После этого  $\alpha$ -частица, захватив два электрона, превращается в нейтральный атом гелия. Вслед за  $\alpha$ -частицей образуется колонка (цепочка) ионов, плотность которых к концу пу-

ти возрастает. Общее количество пар ионов можно оценить, разделив начальную энергию  $\alpha$ -частицы (4–8 МэВ) на средний потенциал возбуждения (35 эВ). Для воздуха число таких пар составляет  $\sim 10^5$ , т. е. очень велико. *В связи с этим радиационное поражение живого организма  $\alpha$ -радиоактивными препаратами представляет значительную опасность!*

### 3.2. Потери энергии на образование ядер отдачи

В результате взаимодействия положительно заряженных альфа-частиц с ядрами вещества поглотителя возможно упругое столкновение. В этом случае изменяется скорость частицы по направлению и по величине, а ядра смещаются из положения равновесия. Возникают так называемые *ядра отдачи*. Если вещество поглотителя представляет собой идеальный кристалл, то после прохождения  $\alpha$ -частицы в нем возникают точечные дефекты кристаллической решетки. *Для  $\alpha$ -частиц, которые движутся в воздухе, потерями энергии на образование атомов и ядер отдачи можно пренебречь по сравнению с ионизационными, поскольку вероятность столкновения  $\alpha$ -частицы с ядрами весьма мала.*

### 3.3. Радиационные потери

Как известно, ускоренное движение заряда сопровождается электромагнитным излучением, называемым тормозным излучением. Потери энергии частицы на формирование электромагнитного излучения (*радиационные потери энергии*) для  $\alpha$ -частиц в воздухе, как показывают опыт и теоретические расчеты, пренебрежимо малы по сравнению с ионизационными.

Таким образом, *для  $\alpha$ -частицы, движущейся в воздухе, потери энергии определяются процессами возбуждения и ионизации атомов и молекул.* Вследствие того, что масса  $\alpha$ -частицы превосходит массу электронов почти в 10000 раз, ее траекторию в воздухе можно считать практически прямолинейной. Она может отклониться лишь при взаимодействии с полем ядер вещества – поглотителя (редкие события).

#### 4. Кривая поглощения $\alpha$ -частицы в веществе

Путь, пройденный  $\alpha$ -частицей при замедлении ее до тепловых скоростей ( $\sim 100$  м/с), принято называть *полным пробегом*. Однако даже при равных начальных скоростях (энергиях) наблюдаются отличия в полных пробегах отдельных частиц. Это обусловлено как флуктуацией концентрации атомов вещества-поглотителя на пути частицы, так и флуктуацией энергии потерь в каждом отдельном акте ионизации атомов. В связи с этим для описания поглощения частиц в веществе вводят несколько иные параметры, имеющие размерность длины.

*Средним пробегом*  $R_{\text{ср}}$  называют толщину слоя вещества, в котором поглощается ровно половина всех частиц. Его определяют с помощью *кривой поглощения*  $N(x)$  частиц в веществе. Так называют график зависимости количества моноэнергетических частиц, фиксируемых счетным устройством за некоторое время  $t$  как функцию толщины слоя  $x$  (рис. 2).

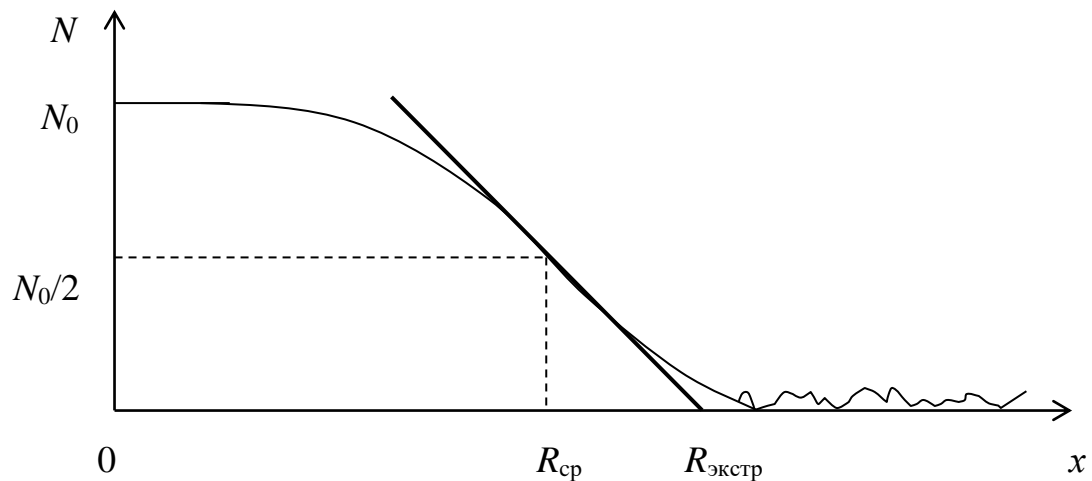


Рис. 2. Кривая поглощения частиц в веществе:

$R_{\text{ср}}$  — средний пробег;  $R_{\text{экстр}}$  — экстраполированный пробег

Определение среднего пробега как расстояния, пройденного частицами до точки, в которой интенсивность пучка уменьшается в два раза, возможно лишь для коллимированного пучка моноэнергетических частиц.

В случае нарушения этого условия заданные уменьшения интенсивности наблюдаются при меньших значениях  $x$ , что приводит к заниженным значениям  $R_{\text{ср}}$ . Поэтому для неколлимированного пучка определяют так называемый *экстраполированный пробег*  $R'_{\text{экстр}}$ , проводя касательную к кривой в точке  $R_{\text{ср}}$  (рис. 2).

## 5. Определение энергии $\alpha$ -частиц по их пробегу в воздухе

Величина полного пробега  $\alpha$ -частицы в веществе есть сложная функция скорости частицы, среднего потенциала возбуждения вещества, концентрации электронов тормозящего вещества. Эмпирическая зависимость полного (экстраполированного) пробега  $R'_{\text{экстр}}$   $\alpha$ -частиц в воздухе при нормальных условиях от их энергии  $E$  представлена на рис. 3.

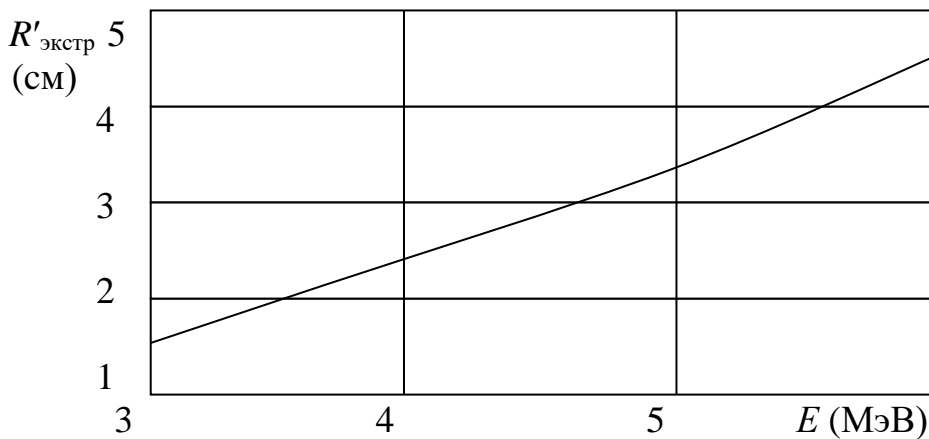


Рис. 3. Зависимость экстраполированного пробега  $\alpha$ -частиц в воздухе при нормальных условиях от их энергии  $E$  (Эмпирическая зависимость)

Для определения энергии  $\alpha$ -частиц достаточно по экспериментальной кривой поглощения  $N(x)$  найти экстраполированный пробег  $R'_{\text{экстр}}$  и с помощью графика (рис. 3) найти величину  $E$ . По формуле (1) можно оценить также время жизни  $\tau$   $\alpha$ -радиоактивного изотопа плутония  $^{238}\text{Pu}$ , используемого в настоящей работе.



## 6. Практическая часть

### Описание установки

Блок-схема экспериментальная установки приведена на рис. 4. Установка состоит из источника  $\alpha$ -частиц – 1, расположенного на препаратоводителе с микрометрическим винтом, источников электропитания – 2, сцинтилляционного счетчика 3 и электронного пересчетного прибора 4.

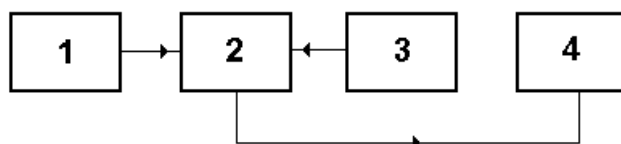


Рис. 4. Блок-схема установки:

1 – измерительная ячейка с источником  $\alpha$ -частиц (рис. 5); 2 – источники электропитания; 3 – сцинтилляционный счетчик; 4 – пересчетный прибор

На рис. 5 изображена конструкция измерительной ячейки, представляющей собой массивный свинцовый контейнер 2, внутри которого (сверху) на подвижном штоке 3 закреплена «таблетка» с нанесенным на ее поверхность небольшим количеством радиоактивного элемента. Перемещение штока осуществляется с помощью винта 4. Положение  $\alpha$ -радиоактивного препарата, относительно сцинтилляционного счетчика 1, отмеряется с помощью миллиметровой линейки 5. Диаметр «таблетки» – 30 мм, диаметр сцинтиллятора – 60 мм.

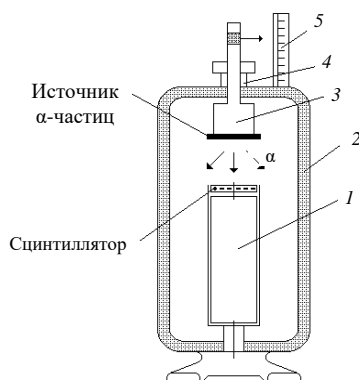


Рис. 5. Конструкция измерительной ячейки: 1 – сцинтилляционный счетчик; 2 – свинцовый контейнер; 3 – подвижный шток с источником  $\alpha$ - частиц; 4 – винт-гайка; 5 – линейка

## Принцип действия сцинтилляционного счетчика

Счетчик частиц является важнейшим элементом установки. Схему счетчика иллюстрирует рис. 6.

При попадании  $\alpha$ -частицы от радиоактивного источника И на сцинтиллятор С в нем образуется световая вспышка. В результате фотоэффекта из фотокатода ФК фотоумножителя вырывается один или несколько фотоэлектронов, которые под действием ускоряющего электрического поля приобретают дополнительную энергию и попадают на первый электрод (первый динод  $D_1$ ). При соударении электронов с поверхностью динодов из них выбиваются вторичные электроны. Напряжение на фотоумножитель ( $U = 1500$  В) подается таким образом, что от диода к диоду потенциал постепенно повышается (через 100–150 В). Форма и расположение динодов выбирается так, чтобы электрическое поле не только ускоряло, но и фокусировало электроны на следующий динод. Количество электронов нарастает от динода к диоду, и на выходе фотоумножителя – аноде – появляется мощный электрический импульс, который регистрируется пересчетным прибором. Фотоумножитель является малоинерционным прибором, поэтому число световых вспышек строго пропорционально числу импульсов, регистрируемых прибором.

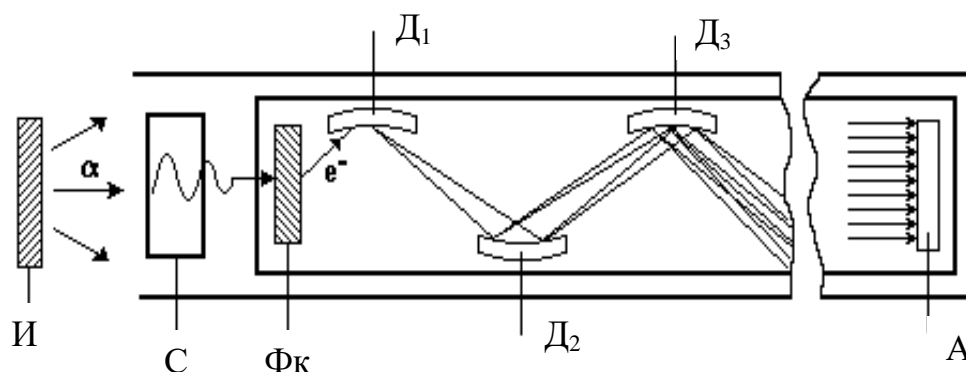


Рис. 6. Схема сцинтилляционного счетчика:


И – источник  $\alpha$ -частиц; С – сцинтиллятор; ФК – фотокатод;  
 $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  – диноды; А – анод

В настоящее время источники радиоактивного излучения извлечены из лабораторных установок и работа выполняется на установ-

ках-симуляторах. Установки подключены к компьютеру с помощью многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В работе используется программа измерений, выполненная в среде LabVIEW (рис. 7).

### Порядок выполнения работы

1. Включить компьютер и запустить программу измерений, щелкнув левой кнопкой мыши ярлык «Работа №40».

2. Вращая винт-гайку 4, расположенную на вершине контейнера 2 (рис. 5), придвинуть  $\alpha$ -препарат вплотную к сцинтиллятору ( $x = 0$ ). Включить работу программы, нажав кнопку  на экране монитора. Программа проведёт серию из 5 опытов и предложит изменить расстояние  $x$ .

3. После проведения пяти опытов, записать результаты измерений  $N(x)$ , увеличить расстояние  $x$  на 2 мм **на панели программы и на установке** (с помощью винта-гайки 4) и нажать кнопку ПРОДОЛЖИТЬ ИЗМЕРЕНИЯ.

4. По окончании измерений для всех расстояний (с шагом 2 мм до достижения 30 мм + измерение фона при  $x=40$  мм) перейти на вкладку ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ и переписать в отчёт содержание таблиц и графических зависимостей.

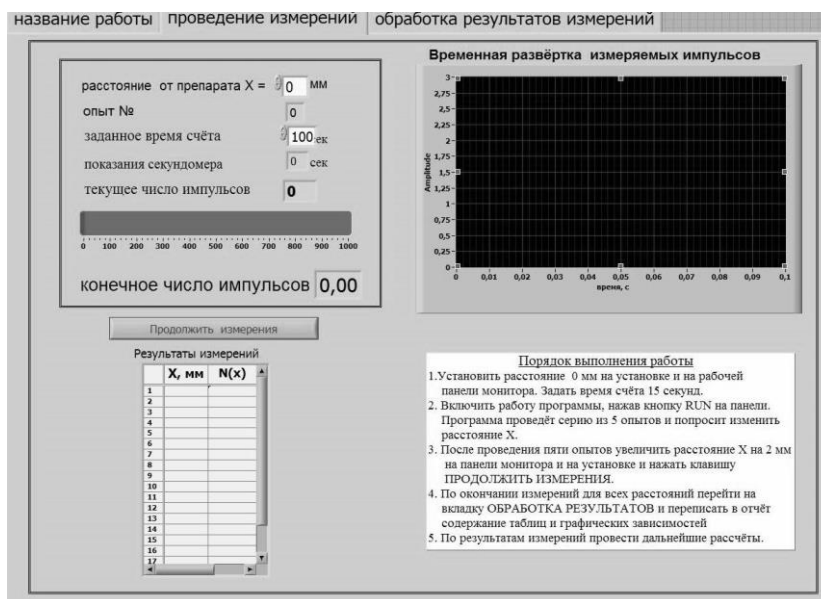


Рис. 7. Панель программы сбора и обработки данных эксперимента

## **Оценка экстраполированного пробега $R_{\text{экстр}}$ и среднего пробега $R_{\text{ср}}$**

Для каждого положения препарата  $x$  рассчитать разность  $N_{\text{ср}} - N_{\text{ф}}$ , а также величину  $(N_{\text{ср}} - N_{\text{ф}})/\Omega$  ( $\Omega$  – параметр установки – поправка, учитывающая уменьшение телесного угла при возрастании расстояния между  $\alpha$ -источником (таблеткой диаметром 30 мм) и сцинтиллятором диаметром 60 мм). По рассчитанным значениям построить график для коллимированного пучка  $f(x) = (N_{\text{ср}}(x) - N_{\text{ф}})/\Omega$ : отметить на графике экспериментальные точки, после чего по ним **провести сглаженную кривую**. Оценить по этому графику величины экстраполированного пробега  $R_{\text{экстр}}$  и среднего пробега  $R_{\text{ср}}$   $\alpha$ -частиц в воздухе (см. рис. 2).

### **Оценка приведенного экстраполированного пробега $R'_{\text{экстр}}$**

Используемый в данной работе радиоактивный препарат плутония покрыт защитной пленкой рутила ( $\text{TiO}_2$ ). Прежде чем попасть в воздух, частица проходит слой пленки толщиной  $l_0$ . В связи с этим, при определении энергии  $\alpha$ -частицы с помощью графика (рис.3), используется величина  $R'_{\text{экстр}}$ , называемая **приведенным экстраполированным пробегом** и равная  $R'_{\text{экстр}} = R_{\text{экстр}} + 3400 \cdot l_0$ , где  $l_0 = 2 \div 8$  мкм.

(Данные о толщине пленки  $l_0$  находятся на рабочем месте; коэффициент 3400 равен отношению плотности рутила к плотности воздуха при нормальных условиях).

### **Определение энергии $E_{\text{эксп}}$ $\alpha$ -частиц**

Энергия  $E_{\text{эксп}}$   $\alpha$ -частиц определяется по графику зависимости  $R'_{\text{эстр}}$  от  $E$  (рис. 3).

Погрешность определения энергии  $\Delta E_{\text{эксп}}$  обусловлена в основном ошибками в определении длины пробега ( $\Delta x$ ). В данном методе  $\Delta x \approx 0,4$  см:

$$\Delta E = \frac{E_2 - E_1}{2},$$

где  $E_1$  – энергия, определяемая по графику (рис. 3) для  $R'_1 + \Delta x$ ;  $E_2$  – энергия, определяемая для  $R'_1 - \Delta x$ .

Оценка энергии  $E$   $\alpha$ -частиц по формуле Гейгера–Нэттола (1)

$$\log_{10}\tau = 148 E^{-0,5} - 53,6.$$

Энергию  $\alpha$ -частицы (в МэВ) можно оценить по известному значению периода полураспада  $T_{1/2} = 87,75$  лет, предварительно выразив время жизни  $\tau$  (в секундах) через период полураспада ( $\tau = T/\ln 2$ ).

### Число пар ионов от одной $\alpha$ -частицы

Число пар ионов, образовавшихся при торможении одной  $\alpha$ -частицы в воздухе до превращения ее в атом гелия, определяется формулой

$$N_{\text{ион}} = E/U_{\text{иониз}},$$

где  $U_{\text{иониз}} = 35$  эВ – средняя энергия ионизации молекул воздуха.

### Контрольные вопросы

1. Что представляет собой  $\alpha$ -частица?
2. Как зависит вероятность туннелирования частицы от ее энергии  $E$ ?
3. Как зависит период полураспада  $\alpha$ -радиоактивных ядер от энергии  $E$ ?
4. Какие основные виды потерь энергии имеют место при прохождении заряженной  $\alpha$ -частицы через вещество? В какой атом превращается она в конце пути?
5. Сколько пар ионов образует частица при торможении ее в воздухе?
6. Что такое средний пробег, экстраполированный пробег и приведенный экстраполированный пробег? Почему при оценке среднего пробега  $\alpha$ -частицы следует вводить поправку на телесный угол? Как влияет толщина защитной пленки на величину пробега частицы в воздухе?

7. Каков принцип работы сцинтилляционного счетчика и фотоэлектронного умножителя?
8. Каков порядок выполнения работы?

**УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра физики**

**О Т Ч Е Т**

по лабораторной работе № 40

**ИССЛЕДОВАНИЕ  $\alpha$ -РАСПАДА РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТО-  
ПА ПЛУТОНИЯ**

Студент(ка) \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

1. Расчетная формула Гейгера–Нэттола:

$$\log_{10}\tau = 148 E^{-0,5} - 53,6,$$

где  $\tau$  – \_\_\_\_\_;  
 $E$  – \_\_\_\_\_.

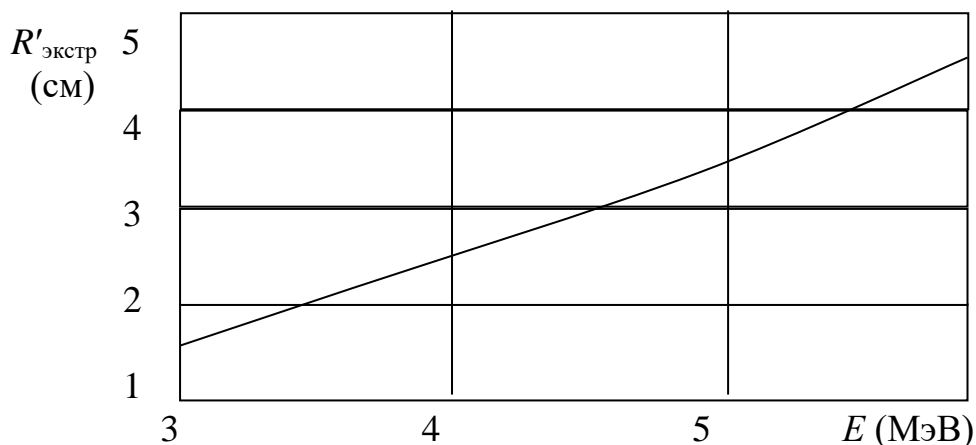
2. Средства измерений и их характеристики

Наименование средств	Предел измерений	Цена деления	Предел основной погрешности
Пересчетное устройство			
Секундомер			
Линейка			

3. Таблица результатов измерений числа  $\alpha$ -частиц:

$X$ , мм	$\Omega$	$N(x)$					$N_{cp}$	$N_{cp} - N_{\phi}$	$\frac{N_{cp} - N_{\phi}}{\Omega}$
		1	2	3	4	5			
0	0,500								
2	0,462								
4	0,426								
6	0,395								
8	0,366								
10	0,328								
12	0,300								
14	0,274								
16	0,250								
18	0,229								
20	0,211								
22	0,194								
24	0,179								
26	0,164								
28	0,149								
30	0,135								
40 (фон)									





Зависимость экстраполированного пробега  $\alpha$ -частиц в воздухе при нормальных условиях от их энергии  $E$  (эмпирическая зависимость)

4. Построение графика для коллимированного пучка  $f(x) = (N_{cp}(x) - N_{\phi})/\Omega$  (прилагается к отчёту).

Оценка величины среднего пробега  $R_{cp}$   $\alpha$ -частиц в воздухе.

$$R_{cp} = \quad \text{см.}$$

Оценка значения экстраполированного пробега:

$$R_{\text{экстр}} = \quad \text{см.}$$

5. Значение приведенного экстраполированного пробега:

$$R'_{\text{экстр}} = R_{\text{экстр}} + 3400 \cdot l_0, \quad \text{где } l_0 = \quad \text{мм.}$$

$$R'_{\text{экстр}} = \quad \text{см.}$$

6. Значение энергии  $\alpha$ -частицы, найденной по пробегу в воздухе

$$E_{\text{эксп}} = \quad \text{МэВ.}$$

7. Погрешность определения энергии  $\Delta E$ , обусловленная ошибками в определении длины пробега (для  $\Delta x = 0,4$  см):

$$\Delta E = \frac{E_2 - E_1}{2},$$

где  $E_1$  – энергия, определяемая по графику для  $R'_{\text{экстр}} + \Delta x$ ;  $E_2$  – энергия, определяемая для  $R'_{\text{экстр}} - \Delta x$ .

$$\Delta E =$$

8. Расчет  $E_{\text{теор}}$  по формуле Гейгера-Нэттола по известному значению периода полураспада  $T_{1/2} = 87,75$  лет ( $\tau = T_{1/2} / \ln 2$ , выразить в секундах).

$$E_{\text{теор}} =$$

9. Относительная погрешность определения энергии

$$\gamma = \frac{E_{\text{теор}} - E_{\text{эксп}}}{E_{\text{теор}}} \cdot 100 \% ; \quad \gamma =$$

10. Число пар ионов, образовавшихся при торможении  $\alpha$ -частицы в воздухе до превращения ее в атом гелия.  $N = E/U_{\text{иониз}}$ , где  $U_{\text{иониз}} = 35$  эВ – средняя энергия ионизации молекул воздуха.

$$N =$$

11. Используя формулу кинетического закона радиоактивного распада  $N = N_0 \exp(-t/\tau)$ , где  $N$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ,  $N_0$  – начальное число ядер в момент времени  $t=0$ , подсчитать, через сколько лет останется 1/8 часть радиоактивного препарата плутония (ниже привести выкладки).

12. Выводы.