

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ПРОБЕГА  
 $\alpha$ -ЧАСТИЦЫ В ВОЗДУХЕ И ЕЁ ЭНЕРГИИ  
С ПОМОЩЬЮ СЧЁТЧИКА ГЕЙГЕРА**

Методические указания  
к лабораторной работе

Рязань 2014

УДК 537.226.4

Определение длины пробега  $\alpha$ -частицы в воздухе и её энергии с помощью счётчика Гейгера: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Б.С. Бобров, А.Е. Малютин, А.П. Соколов; под ред. М.В.Дубкова. – Рязань, 2014. – 8 с.

Рассмотрена теория альфа-распада, приведено описание экспериментальной установки для измерения длины пробега и энергии  $\alpha$ -частиц.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

Ил. 3. Библиогр.: 6 назв.

*Альфа-распад, длина пробега  $\alpha$ -частицы, энергия  $\alpha$ -частицы, счётчик Гейгера - Мюллера*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ (зав. кафедрой доц. М.В.Дубков)

Определение длины пробега  $\alpha$ -частицы в воздухе и её энергии  
с помощью счётчика Гейгера

Составители: Б о б р о в Борис Сергеевич

М а л ю т и н Александр Евгеньевич

Соколов Александр Павлович

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.03.14

Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,5.

Тираж 200 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**Цель работы:** определение длины пробега  $\alpha$ -частицы в воздухе при атмосферном давлении и вычисление энергии  $\alpha$ -частицы по длине её пробега.

**Приборы и принадлежности:** источник  $\alpha$ -излучения, торцевой счётчик Гейгера - Мюллера, скамья с линейкой, измерительное устройство.

### Элементы теории и метод эксперимента

*Альфа-распадом* называется процесс самопроизвольного испускания ядром частиц, состоящих из двух протонов и двух нейтронов (ядер атома гелия  ${}_2\text{He}^4$ ). В результате  $\alpha$ -распада «материнское» ядро с зарядовым числом  $Z$  и массовым числом  $A$  превращается в новое, «дочернее» ядро с зарядовым числом  $Z-2$  и массовым числом  $A-4$ . Разность энергий покоя материнского ядра и продуктов распада, равная по абсолютной величине энергии связи, выделяется в виде кинетической энергии  $\alpha$ -частицы у дочернего ядра. У всех известных  $\alpha$ -активных изотопов (свыше 200) энергия отдачи дочернего ядра не превосходит 5 % энергии  $\alpha$ -частицы, которая лежит в пределах  $4 \text{ МэВ} \leq E_\alpha \leq 9 \text{ МэВ}$  для тяжелых ядер  $Z > 82$  и  $2 \text{ МэВ} \leq E_\alpha \leq 4,4 \text{ МэВ}$  для редкоземельных элементов. В основном  $\alpha$ -распад наблюдается у тяжелых ядер с  $Z > 82$  (тяжелее свинца).

Количество нераспавшихся ядер изменяется со временем по закону

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – постоянная распада,  $N$  и  $N_0$  – число нераспавшихся ядер в начальный момент и момент времени  $t$ . Постоянная распада связана с периодом полураспада  $T$  соотношением

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}.$$

Период полураспада для известных  $\alpha$ -активных изотопов лежит в пределах  $3 \cdot 10^{-7} \text{ с} \leq E_\alpha \leq 5 \cdot 10^{15} \text{ лет}$ . Постоянная распада  $\lambda$  и энергия  $\alpha$ -частицы  $E_\alpha$  связаны эмпирическим законом Гейгера - Нэттола

$$\lg \lambda = A \lg E_\alpha + B, \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные. Чем меньше период полураспада, тем больше энергия  $\alpha$ -частицы. В большинстве случаев  $\alpha$ -частицы, вылетающие при распаде ядер данного элемента, имеют одинаковые энергии. Некоторые ядра испускают несколько типов моноэнергетических  $\alpha$ -частиц, близких по энергиям. Это имеет место в случае, когда дочернее ядро возникает в возбужденном состоянии. При этом энергия  $\alpha$ -частицы оказывается меньше наибольшей энергии на величину энергии возбужденного состояния. Избыточная энергия дочернего ядра выделяется через время  $\sim 10^{-13}$

с в виде  $\gamma$ -кванта. Альфа-частицы, испускаемые  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ , состоят из нескольких моноэнергетических групп ( $E_\alpha = 5,156 \text{ МэВ}$ ;  $5,143 \text{ МэВ}$ ;  $5,106 \text{ МэВ}$ ).

Как известно, протоны и нейтроны удерживаются в ядре короткодействующими ядерными силами, превосходящими силы кулоновского взаимодействия на расстояниях до  $10^{-13} \text{ см}$ , т.е. радиус ядра  $r_\text{я}$  имеет величину такого порядка.

Будем считать, что  $\alpha$ -частица существует и движется как целое в ядре еще до его распада (одночастичная модель).

Зависимость потенциальной энергии взаимодействия  $\alpha$ -частицы с ядром от расстояния между ними представлена на рис. 1.

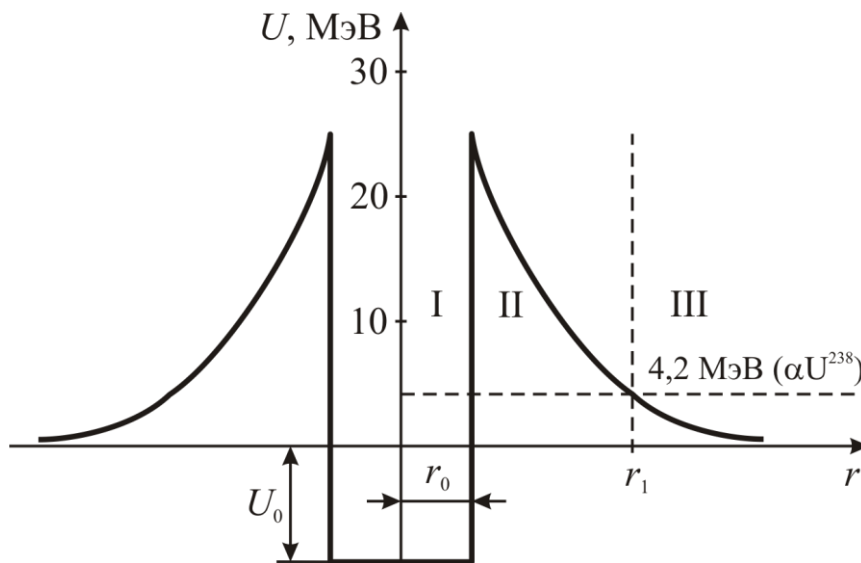


Рис. 1

При  $r < r_0$  потенциальная энергия  $\alpha$ -частицы принимается постоянной  $U_0$  (участок I). Крутой спад на границе с участком II вызывается короткодействующими ядерными силами притяжения. При  $r > r_0$ , когда на  $\alpha$ -частицу действуют только силы кулоновского отталкивания, ход потенциальной кривой описывается формулой для энергии взаимодействия точечных зарядов:

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r},$$

где  $Ze$  – заряд точечного ядра,  $2e$  – заряд  $\alpha$ -частицы. На границе ядра высота потенциального барьера, рассчитанная по этой формуле, для  ${}_{92}\text{U}^{238}$  составляет около 25 МэВ, тогда как средняя энергия  $\alpha$ -частицы 4,2 МэВ. Чтобы вылететь из ядра,  $\alpha$ -частица должна пройти область расстояний от  $r_0$  до  $r_1$ , в которой потенциальная энергия больше полной и где, согласно

законам классической механики, она не может пребывать без нарушения закона сохранения энергии. Таким образом, классическая механика не объясняет, почему  $\alpha$ -частица преодолевает при распаде потенциальный барьер, превышающий величину ее энергии.

Основные закономерности  $\alpha$ -распада были объяснены советским ученым Гамовым в 1928 году на основе квантовой теории. Квантовая механика показывает, что при любой конечной высоте потенциального барьера падающая на него заряженная частица, полная энергия которой положительна, имеет малую, но конечную вероятность «просочиться» через барьер («туннельный эффект»).

Состояние микрочастицы в квантовой механике описывается волновой функцией  $\psi(r)$ , квадрат которой характеризует плотность вероятности нахождения частицы в данном месте. Рассмотрим движение  $\alpha$ -частицы, которая последовательно проходит области I, II, III (рис. 1) слева направо, и оценим вероятность того, что она пройдет в область III, т.е. покинет ядро.

Волновая  $\psi$ -функция находится из решения уравнения Шредингера. Фактически в ядре существует некоторое динамическое равновесие, при котором  $\alpha$ -частицы непрерывно возникают и распадаются.

В области I ( $r < r_0$ ) волновая функция представляет собой волну де Бройля:

$$\psi_I = \exp\left(\frac{ir}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 + E_\alpha)}\right).$$

Попадая внутрь барьера, волна быстро затухает, и в области II  $\psi$ -функция для барьера прямоугольной формы имеет вид

$$\psi_{II} = \exp\left(-\frac{r}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E_\alpha)}\right).$$

Вне барьера в области III волновая функция выражается как

$$\psi_{III} = \exp\left(\frac{ir}{\hbar} \sqrt{2mE_\alpha}\right).$$

Вероятность просачивания частицы сквозь барьер  $D$  определяется отношением

$$D = \frac{|\psi_I|^2}{|\psi_{III}|^2}.$$

Это отношение называется коэффициентом прозрачности. В соответствии с моделью Гамова для  $\alpha$ -распада вероятность прохождения  $\alpha$ -частицей барьера с произвольной формой  $U(r)$  за одно столкновение, т.е. прозрачность  $D$ , определяется соотношением

$$D = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_{r_0}^{r_1} \sqrt{2m[U(r) - E_\alpha]} dr \right\}.$$

Пределы интегрирования определяются пересечением потенциальной кривой с прямой, соответствующей энергии  $\alpha$ -частицы ( $U(r_1) = E_\alpha$ ). Из этого выражения видно, что прозрачность барьера  $D$  в основном определяется его толщиной, которая в свою очередь зависит от энергии  $\alpha$ -частицы  $E_\alpha$ . Чем больше  $E_\alpha$ , тем тоньше барьер (см. рис. 1), а следовательно, и больше прозрачность  $D$ . Подставив в это выражение  $U(r)$  и проинтегрировав его, получим

$$D \approx \exp \left\{ -\frac{Ze^2}{2\hbar\epsilon_0} \sqrt{\frac{2m}{\epsilon_\alpha}} \right\}, \quad U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r}.$$

Имея скорость  $v$ ,  $\alpha$ -частица в ядре радиусом  $r_0$  в среднем  $v = \frac{v}{2r_0}$

раз в секунду подходит к границе ядра. При каждом подходе вероятность выхода из ядра равна  $D$ . Поэтому произведение частоты колебаний  $\alpha$ -частицы внутри ядра  $v$  на  $D$  даст вероятность  $\alpha$ -распада данного ядра за одну секунду, т.е. постоянную распада

$$\lambda = vD = \frac{v}{2r_0} \exp \left\{ -\frac{Ze^2}{2\hbar\epsilon_0} \sqrt{\frac{2m}{\epsilon_\alpha}} \right\}. \quad (3)$$

Формула (3) обуславливает чрезвычайно резкую зависимость вероятности  $\alpha$ -распада от энергии  $\alpha$ -частицы. Так, изменение энергии  $\alpha$ -частицы на 10 % приводит к изменению вероятности  $\alpha$ -распада примерно в 1000 раз.

Для торможения быстрых частиц в воздухе одна пара ионов образуется на каждые 35 эВ энергии, теряемой частицей. Немного меньшая доля энергии тратится на возбуждение атомов вещества. Альфа-частица, обладающая энергией в несколько мегаэлектронвольт, образует громадное количество ионов ( $\sim 10^5$ ), теряя на это свою энергию, после чего присоединяет два электрона, превращаясь в атом гелия. Полный путь, проходимый  $\alpha$ -частицей до потери ею энергии, называется ее пробегом. Длина этого пути зависит от плотности среды и начальной энергии частицы.

Удельная потеря энергии заряженной частицей на ионизацию пропорциональна квадрату ее заряда, концентрации электронов в среде и некоторой функции ее скорости. Взаимодействуя с электронами среды,  $\alpha$ -частица мало отклоняется от первоначального направления, поэтому ее пробег измеряют по прямой, соединяющей источник частиц с точкой ее остановки.

Длину пробега  $\alpha$ -частицы в воздухе определяют, измеряя число частиц  $N$ , достигших детектора  $\alpha$ -частиц, в зависимости от расстояния до радиоактивного источника  $h$ . Поскольку  $\alpha$ -частицы вылетают из ядра с одинаковой энергией, то можно бы ожидать, что все они имеют одинаковый пробег и число частиц, зарегистрированных счетчиком, резко оборвется при расстояниях, больших пробега  $\alpha$ -частицы.

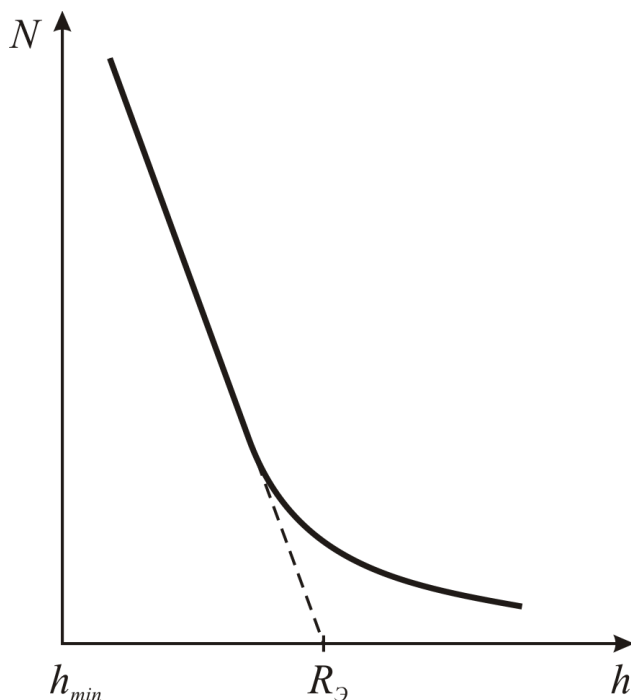


Рис. 2

Однако обычные экспериментальные зависимости имеют вид, показанный на рис. 2, несовпадающий с ожидаемым.

Причина связана как с тем, что большинство  $\alpha$ -источников испускает  $\alpha$ -частицы с несколькими значениями энергий, так и со статистическими флуктуациями процессов, в которых  $\alpha$ -частица теряет энергию.

Во-первых, из-за конечной толщины  $\alpha$ -источника имеет место потеря энергии  $\alpha$ -частиц в самом источнике у частиц, испускаемых из глубины; во-вторых,  $\alpha$ -частицы могут захватывать один или два электрона, что ведет к уменьшению потерь энергии на тех участках пути, которые частица проходит, обладая уменьшенным зарядом; в-третьих, частицы, вылетевшие в направлении, перпендикулярном к поверхности счётчика, достигают его с большим значением энергии, чем вылетевшие под острым углом, а следовательно, имеют большую вероятность регистрации.

Длина пробега характеризуется или средним пробегом  $R_{cp}$ , который может быть определён с помощью трековых детекторов, или экстраполированным пробегом  $R_э$ , который находится продолжением прямолинейного участка (рис. 2), где наблюдается быстрый спад, до пересечения с осью абсцисс. Величины этих пробегов близки друг другу.

Средний пробег моноэнергетических частиц в воздухе при нормальных условиях определяют по эмпирической формуле

$$R_э = 0,32 E_\alpha^{3/2}, \quad (4)$$

где  $R_э$  выражается в сантиметрах, а  $E_\alpha$  — в мегаэлектронвольтах.

Зная пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе и плотность воздуха  $\rho_в$ , можно рассчитать пробег  $\alpha$ -частицы  $R$  в веществе с плотностью  $\rho$ :

$$R = \frac{R_в \rho_в}{\rho}.$$

Пробег в воздухе составляет несколько сантиметров, в биологических тканях – десятки микрометров; расчеты показывают, что один лист бумаги из тетради задерживает  $\alpha$ -частицы.

В настоящей работе измеряется пробег  $\alpha$ -частицы изотопа  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$  в воздухе при нормальных условиях, а затем по формуле (4) рассчитывается энергия  $\alpha$ -частицы.

### Описание экспериментальной установки

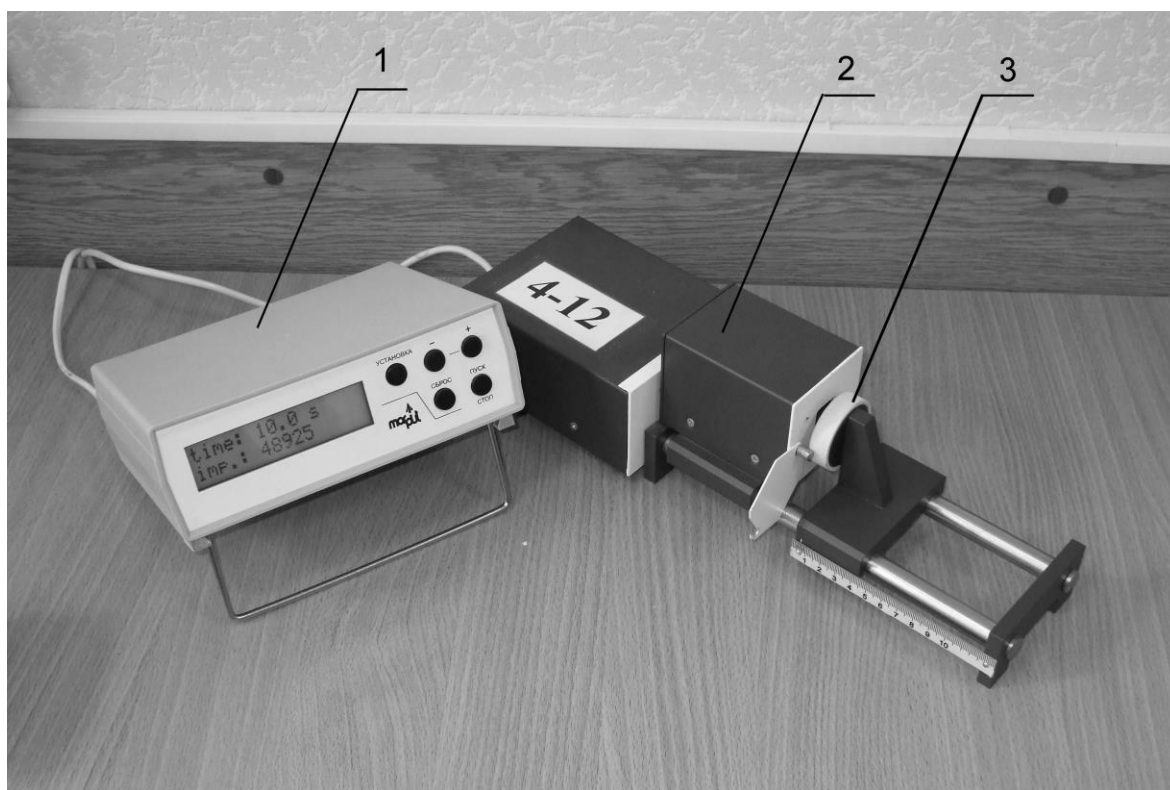


Рис. 3

Установка для определения длины пробега  $\alpha$ -частицы (рис. 3) включает в себя радиоактивный препарат  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ , размещённый в держателе 3 торцевого счётчика Гейгера - Мюллера с блоком питания 2, и измерительное устройство 1. Рабочая поверхность торцевого счётчика закрыта защитной шторкой. Тумблер включения находится на задней панели измерительного устройства.



## Порядок выполнения работы

1. Установить источник  $\alpha$ -излучения на скамью счётчика согласно рис. 3 и открыть защитную крышку окна счётчика (при этом и в дальнейшей работе соблюдайте осторожность, чтобы не повредить рабочую поверхность счетчика).

2. Включить установку выключателем «Сеть» на задней панели измерительного устройства.

3. Нажать на передней панели измерительного устройства кнопку «УСТАНОВКА» и кнопками «+» и «-» установить время измерения 10 с.

4. Нажать кнопку «Сброс», при этом во всех разрядах должны индигироваться нули.

5. Для измерения скорости счёта нажать кнопку «Пуск/стоп», после чего должны появиться и нарастать показания количества частиц и секунд. По истечении установленного времени (10 с) измерение должно автоматически прекратиться. На индикаторе должны зафиксироваться значение «10.0 s» и некоторое число, соответствующее количеству подсчитанных частиц. Нажать кнопку «Сброс».

6. Изменяя расстояние между источником и счетчиком, провести серию аналогичных измерений через 1 мм до того момента, пока дальнейшее увеличение расстояний не будет изменять скорость счета.

7. Построить график зависимости  $N = f(h)$  и определить экстраполированный пробег  $\alpha$ -частиц с наибольшей энергией  $R_3$ .

8. По формуле (4) определить наибольшую энергию  $\alpha$ -частицы  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ .

9. По окончании работы необходимо нажать кнопку «Сброс», после чего выключить питание установки выключателем «Сеть», закрыть рабочую поверхность счетчика защитной шторкой (соблюдайте осторожность!), снять со скамьи держатель источника с источником  $\alpha$ -излучения и сдать его на хранение.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. Каковы основные закономерности и особенности  $\alpha$ -распада?
2. Как связаны период полураспада  $\alpha$ -активных изотопов и энергия  $\alpha$ -частиц?
3. Что такое пробег  $\alpha$ -частиц и как, зная пробег  $\alpha$ -частиц в воздухе, определить их пробег в любом веществе?
4. В чем причина разброса пробегов  $\alpha$ -частиц?
5. Какие из закономерностей  $\alpha$ -распада нельзя объяснить с точки зрения классической физики?
6. Объяснить ход экспериментальной зависимости числа  $\alpha$ -частиц от расстояния между источником  $\alpha$ -частиц и детектором.
7. Устройство и принцип работы счетчика Гейгера - Мюллера.

### **Библиографический список**

1. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. Пособие: в 3 т. Т. 3. – СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – § 68–70.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие – М.: Высш. шк., 2003. – § 254–257.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. шк., 2002. – § 45.4, 45.5.
4. Курс физики: учеб. для вузов: в 2 т. Т. 2 / под ред. В.Н. Лозовского. – СПб.: Изд-во «Лань», 2001. – § 4.72.
5. Практикум по ядерной физике / И.А. Антонова, А.Н. Бояркина, Н.Г. Гончарова и др. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988.
6. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. – М.: Наука, 1980. – Гл. VI, § 4; гл. IX, § 4.