

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.Э. БАУМАНА

И.Н. ФЕТИСОВ

ЕСТЕСТВЕННАЯ β - РАДИОАКТИВНОСТЬ

*Методические указания к выполнению
лабораторной работы Я- 67
по курсу общей физики*

Москва
2015

ВВЕДЕНИЕ

Радиоактивность – способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием частиц [1–2].

Рассмотрим кратко основные этапы изучения радиоактивности [3]. Радиоактивность была открыта в 1896 г., когда французский физик А. Беккерель обнаружил испускание ураном неизвестного проникающего излучения. Вскоре была обнаружена радиоактивность тория. В 1898 г. французские физики Мария и Пьер Кюри открыли два новых радиоактивных элемента – полоний и радий. Работами английского физика Э. Резерфорда и Кюри было установлено наличие трех видов радиоактивных излучений – α -, β - и γ -лучей. Резерфорд и английский физик Ф. Содди указали, что испускание α -лучей сопровождается превращением химических элементов, например превращением радия в радон.

В 1934 г. французские физики Ирен и Фредерик Жолио-Кюри открыли искусственную радиоактивность, т. е. радиоактивность ядер, полученных в результате ядерных реакций.

В 1940 г. советские физики К. А. Петржак и Г. Н. Флеров открыли новый тип радиоактивности – спонтанное деление ядра урана. В этом процессе тяжелое ядро разваливается на два осколка сравнимой массы с одновременным испусканием нейтронов и γ -квантов.

Цель работы – ознакомление с радиоактивностью и дозиметрией излучений; в экспериментальной части – измерения периода полураспада калия - 40, удельной радиоактивности продукта питания и содержания калия в веществе.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Спонтанные превращения атомов

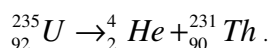
Атомы состоят из ядра и электронной оболочки. Ядра состоят из протонов и нейтронов – частиц, называемых нуклонами. Между нуклонами действуют ядерные силы притяжения. Протон имеет положительный элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а нейтрон – не заряжен. Масса нуклона примерно в 1840 раз больше массы электрона.

Химические элементы различаются количеством протонов в ядре Z (Z – зарядовое число, порядковый номер элемента). Число нуклонов в ядре называют массовым числом A . Ядро элемента X записывают в виде ${}^A_Z X$, например, ядро гелия ${}^4_2 \text{He}$. Атомы одного и того же химического элемента с различным числом нейтронов называются *изотопами*. Например, для водорода известны три изотопа: ${}^1_1 \text{H}$, ${}^2_1 \text{H}$, ${}^3_1 \text{H}$.

Распадающееся ядро называют материнским, а образующееся после распада – дочерним. Дочернее ядро может быть как стабильным, так и радиоактивным.

К основным радиоактивным превращениям относятся α - и β -распады.

Альфа-распад. При α -распаде ядро испускает ядро гелия ${}^4_2 \text{He}$, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, которое называют α -частицей. α -Распад происходит в тяжелых ядрах. Например, превращение урана в торий происходит по схеме:



В общем случае схему α -распада представляют в виде



где X и Y – символы химических элементов.

Квантовая механика объясняет α -распад туннельным эффектом – проникновением α -частицы через потенциальный барьер на поверхности ядра, образующийся под действием сил ядерного притяжения нуклонов и кулоновского отталкивания протонов.

Бета-распады. При β -распаде в ядре происходит превращение нейтрона в протон или протона в нейтрон, при этом число нуклонов в ядре не изменяется, а зарядовое число Z изменяется на ± 1 . Известны три разновидности β -распада.

1. *Электронный β^- -распад (β^- -распад).* Примером такого распада служит превращение свободного нейтрона 1_0n в протон 1_1p , электрон ${}^0_{-1}e$ и электронное антинейтрино $\tilde{\nu}_e$:

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}_e.$$

Подобные превращения нейтрона происходят во многих нестабильных ядрах, при этом электрон и антинейтрино покидают ядро. Электронный распад в ядре протекает по схеме:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}_e. \quad (1)$$

Например, ядро радиоактивного углерода превращается в ядро азота:

$${}^{14}_6C \rightarrow {}^{14}_7N + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}_e.$$

2. *Позитронный β^+ -распад (β^+ -распад).* В этом случае ядро испускает позитрон и электронное нейтрино:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu_e.$$

Например, радиоактивный изотоп фтора, испуская позитрон, превращается в кислород:

$${}^{18}_9F \rightarrow {}^{18}_8O + {}^0_{+1}e + \nu_e.$$

При позитронном распаде в ядре происходит превращение протона в нейтрон, позитрон и нейтрино:

$${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}e + \nu_e.$$

Позитрон является *античастицей* электрона, имеющей такую же массу, но противоположные по знаку электрический заряд, лептонный заряд и магнитный момент [1–2].

3. *Электронный захват.* Третий вид β^- -распада – захват ядром собственного орбитального электрона:

$${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \nu_e. \quad (2)$$

При этом в ядре протон и электрон превращаются в нейтрон и нейтрино

$${}^1_1p + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^1_0n + \nu_e.$$

Нейтрино и антинейтрино – электрически незаряженные элементарные частицы, которые различаются знаком лептонного заряда [1]. Масса покоя нейтрино (и антинейтрино) много меньше массы электрона. Нейтрино и антинейтрино настолько слабо взаимодействуют с веществом, что могут, например, свободно выходить из недр Солнца, где они образуются в ядерных реакциях. Эти частицы можно зарегистрировать только в специальных опытах [1].

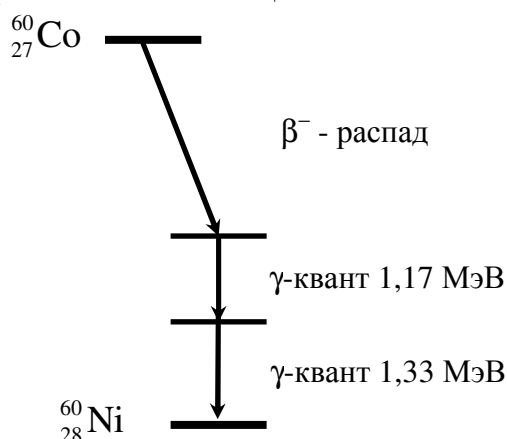


Рис. 1. Схема распада кобальта-60 с испусканием электрона и двух γ -квантов

Гамма-излучение. Атомное ядро, состоящее из двух и более нуклонов, может находиться в состояниях с различными дискретными значениями внутренней энергии. Состояние с минимальной энергией называется основным, а с большей энергией – возбужденным. Материнское ядро перед распадом находится в основном состоянии, а дочернее ядро может оказаться как в основном, так и в возбужденном состоянии. В последнем случае практически мгновенно после распада дочернее ядро переходит в основное состояние, испуская один или несколько фотонов большой энергии,

называемых γ -квантами. γ -Излучение часто сопровождает все виды распадов. Примером такого процесса является электронный распад кобальта-60 (рис. 1). Дочернее ядро (никель-60) образуется во втором возбужденном состоянии и испускает последовательно два γ -кванта с энергиями 1,17 МэВ и 1,33 МэВ. Энергия γ -кванта радиоактивного распада может достигать нескольких МэВ, в то время как энергия фотонов видимого излучения составляет примерно 2 эВ. (Электронвольт – энергия, приобретаемая частицей с элементарным зарядом в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$).

Энергия распада. При радиоактивном распаде выделяется определенная для данного нуклида энергия в интервале примерно от 20 кэВ до 17 МэВ. Эта энергия делится между продуктами распада таким образом, чтобы выполнялся закон сохранения импульса.

Рассмотрим α -распад. Материнское ядро перед распадом покоится, поэтому α -частица и дочернее ядро разлетаются в противоположных направлениях с одинаковыми по модулю импульсами p . При этом кинетическая энергия частиц (случай нерелятивистский) равна $K = p^2 / 2 m_0$, где m_0 – масса частицы. Таким образом, энергия распада делится между частицами однозначно: отношение энергий α -частицы и дочернего ядра обратно пропорционально отношению их масс. При распаде тяжелого ядра энергия α -частицы примерно в 50 – 60 раз больше энергии дочернего ядра.

При β^- -распаде энергия делится между тремя частицами: дочерним ядром, электроном и антинейтрино. При этом реализуется множество вариантов разлета трех частиц, удовлетворяющих закону сохранения импульса. В этом случае дочернее ядро, как тяжелая частица, по-прежнему получает небольшую долю энергии распада. Однако деление энергии между электроном и антинейтрино неоднозначное. В результате электроны распада имеют различную энергию – от очень малой до максимальной энергии E_{\max} , близкой к энергии распада. Средняя энергия электронов примерно равна $E_{\max} / 3$.

2. Естественная радиоактивность калия

Радионуклиды (общее число ~ 2000) подразделяют на естественные (~300) и искусственные, полученные в ядерных реакциях. Принципиального различия между ними нет. К основным естественным радионуклидам относятся радиоактивные семейства урана и тория, а также калий, рубидий и др. Радиоактивность калия обнаружили в 1906 г. Кэмпбелл и Вуд.

Природный калий состоит из смеси трех изотопов – двух стабильных (^{39}K и ^{41}K) и одного радиоактивного ^{40}K . Доля радиоактивного изотопа составляет $\delta = 1,18 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, один радиоактивный атом ^{40}K приходится на 8500 атомов калия. Период полураспада ^{40}K в несколько раз меньше возраста Земли.

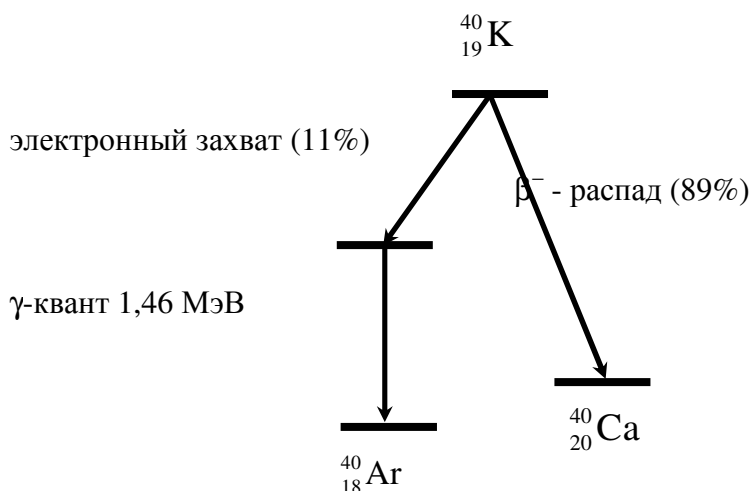
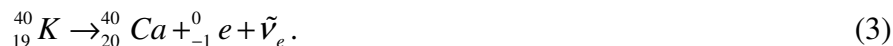


Рис. 2. Схема распада калия-40: β^- распад в 89 % случаев и электронный захват с испусканием γ -кванта в 11 % случаев.

Схема распада калия представлена на рис. 2. Калий в 89% случаев испытывает β^- -распад (см. формулу (1)), превращаясь в стабильный кальций:



В 11% случаев происходит электронный захват (см. формулу (2)):



Ядро аргона образуется в возбужденном состоянии и испускает γ -квант, переходя в основное, нерадиоактивное состояние.

Таким образом, на 100 распадов испускается в среднем 89 электронов и 11 γ -квантов. Распады первого типа регистрируют по испускаемым электронам, а распады второго типа – по γ -излучению.

Электроны распада имеют максимальную энергию $E_{\max} = 1,3$ МэВ, а энергия γ -кванта 1,46 МэВ.

Содержание калия в земной коре составляет 2,5%. Наиболее важные минералы – это сильвин KCl, сильвинит (K,Na)Cl и др. За счет радиоактивного распада калия Земля получает заметное количество внутреннего тепла.

Калий играет важную роль в жизнедеятельности животных и растений. В большом количестве соединения калия используются в качестве минерального удобрения.

В теле человека содержится 160 – 180 г калия. По рекомендации ВОЗ суточная норма потребления калия не менее 4 г. Калий поступает в организм человека с продуктами питания. В случае недостатка калия в пище врачи рекомендуют употреблять поваренную соль с добавкой солей калия.

Соли калия – доступный и безопасный источник слабой β^- -радиоактивности. В лабораторной работе используется хлористый калий в чистом виде, а также в виде добавки к пищевой поваренной соли.

3. Закон радиоактивного распада

Радиоактивное превращение представляют собой случайный процесс, экспоненциальный закон распада которого имеет следующее теоретическое объяснение.

Пусть в момент времени t имеется большое число N одинаковых нестабильных ядер. Вероятность распада ядра в единицу времени называют *постоянной распада* λ . Тогда за время dt распадется в среднем

$$dN = \lambda N dt \quad (5)$$

ядер. Среднее число распадов за единицу времени

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (6)$$

называется *активностью* препарата. Единица активности – *беккерель*: 1 Бк = 1 расп./с. Часто также используют внесистемную единицу активности – *кюри*, 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк (такова активность 1 г радия).

Активность единицы массы вещества называется *удельной активностью*

$$a = A / m. \quad (7)$$

Если формулу (5) записать со знаком «минус», то получим приращение числа нераспавшихся ядер за время dt :

$$dN = - \lambda N dt.$$

Интегрируя это выражение по времени, приходим к формуле

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (8)$$

где N и N_0 – соответственно, число нераспавшихся ядер в момент времени t и в произвольный начальный момент времени $t = 0$.

Соотношение (8) выражает *закон радиоактивного распада*: число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальной зависимости.

Активность A , пропорциональная числу нераспавшихся атомов N (см. формулу (6)), убывает по закону радиоактивного распада:

$$A = \lambda N = \lambda N_0 \exp(-\lambda t) = A_0 \exp(-\lambda t), \quad (9)$$

где $A_0 = \lambda N_0$ – активность в момент времени $t = 0$. Опыты подтверждают зависимость (9).

Периодом полураспада T называют время, за которое распадается половина ядер. Логарифмируя формулу (8), получаем следующее соотношение:

$$T = (\ln 2) / \lambda = 0,69 \quad (10)$$

Период полураспада связан с активностью A и числом атомов N соотношением (см. формулы (9), (10))

$$T = \frac{0,69N}{A} \quad (11)$$

Запишем закон распада через период полураспада:

$$\begin{aligned} N(t) &= N_0 \exp(-0,69 t / T); \\ A(t) &= A_0 \exp(-0,69 t / T) \end{aligned} \quad (12)$$

Убывание активности показано на рис. 3: за один период полураспада активность убывает в 2 раза, за два периода полураспада – в 4 раза и т.д. Для различных радионуклидов период полураспада изменяется от очень малой доли секунды до 10^{18} лет.

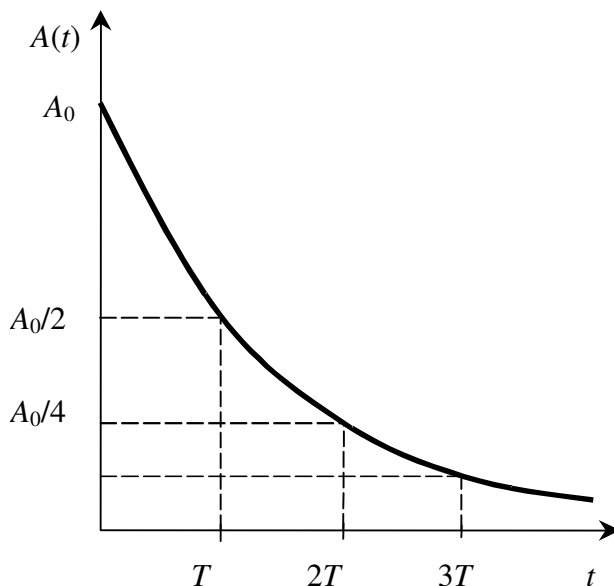


Рис. 3 Зависимость активности от времени

4. Поглощение заряженных частиц в веществе

В веществе быстрые заряженные частицы (α - , β - частицы) испытывают кулоновские взаимодействия с атомными электронами и ядрами, при которых энергия частицы теряется на ионизацию и возбуждение атомов. Такой процесс называется *ионизационным торможением*. На ионизацию одного атома в среднем затрачивается энергия в несколько десятков эВ. Частица с энергией 500 кэВ может ионизовать примерно 10^4 атомов.

Пробег частицы до остановки зависит от энергии, массы и заряда частицы, а также от вещества (его состава и плотности).

Пробег α -частицы в воздухе составляет несколько см, а в плотных веществах – не более 50 мкм. Лист обычной бумаги полностью задерживает α - частицы.

Пробег β -частицы сопоставимой энергии значительно больше, чем α -частицы. Главная причина такого различия заключается в следующем. Тяжелые α - частицы движутся медленнее и, пролетая мимо атома, дольше взаимодействуют с его электронами. Поэтому, согласно закону динамики $\Delta p = F \Delta t$, α -частицы могут сообщить электронам необходимый для ионизации импульс Δp с большего пролетного расстояния. Вследствие этого α - частицы создают больше ионов на единицу пути и быстрее тормозятся.

Для β - частиц эмпирически установлена зависимость между максимальной энергией E_{max} , МэВ, и пробегом d , г / см²:

$$d = \frac{E_{max}}{1,85} - 0,133. \quad (13)$$

Данная формула справедлива для $E_{max} > 0,8$ МэВ и для веществ со средним атомным номером – алюминия, хлористого калия, биологической ткани и т.д. Из формулы (13) следует, что β -частицы

распада калия с $E_{max} = 1,3$ МэВ поглощаются алюминиевой пластиной толщиной 2 мм или биологической тканью толщиной 6 мм.

5. Счетчик Гейгера-Мюллера

Для детектирования ионизирующих излучений используются в основном два физических явления – сцинтилляция и ионизация газов.

Сцинтилляция – это разновидность люминесценции. При прохождении быстрой заряженной частицы через сцинтиллятор в нем возникает слабая вспышка света, которую регистрируют чувствительным фотоэлементом.

Газоразрядный детектор Гейгера-Мюллера (ГМ - счетчик) представляет собой баллон с двумя металлическими электродами, заполненный разреженным инертным газом со специальными добавками. На рис. 4 представлен ГМ - счетчик цилиндрической конструкции. Он состоит из тонкостенной металлической трубки с двумя изолирующими пробками. По оси трубки натянута металлическая нить. К нити и трубке прикладывают высокое напряжение U , причем «плюс» источника подключен к нити. Вследствие того, что нить тонкая, напряженность электрического поля около нити – большая.

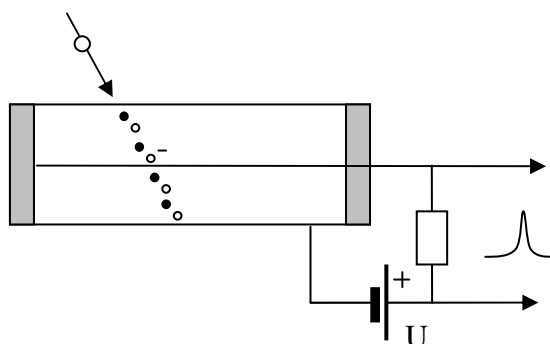


Рис. 4. Счетчик Гейгера-Мюллера

Когда быстрая заряженная частица, например β - частица, пролетает через ГМ- счетчик, она ионизирует небольшое количество атомов газа, отрывая от атомов электроны. Электроны, разгоняясь в сильном электрическом поле около нити, вызывают вторичную ионизацию атомов газа. В результате в газе возникает электрический разряд. При этом через резистор с большим сопротивлением R протекает кратковременный импульс тока, создавая на резисторе импульс напряжения. Импульсы можно считать специальным пересчетным устройством. Таким образом, каждый зарегистрированный импульс свидетельствует о прохождении заряженной частицы через ГМ- счетчик.

Сцинтилляционный или газоразрядный детектор непосредственно от γ - квантов не срабатывает, т.к. они не вызывают сцинтилляций и не ионизируют газ. Срабатывание детектора вызывают вторичные электроны или позитроны, образующиеся в следующих процессах: эффект Комптона, атомный фотоэффект и рождение электронно-позитронной пары [1–2]. Электроны имеют небольшой пробег в плотном веществе (см. формулу (13)), поэтому счетчик Гейгера-Мюллера регистрирует только те γ - кванты, которые образовали электрон (или пару электрон-позитрон) в тонком слое вещества, примыкающего к газу счетчика, или в самом газе. Взаимодействия γ - квантов в тонком слое происходят редко, поэтому ГМ - счетчик детектирует только малую часть γ -квантов, пролетевших через счетчик (порядка 1%).

Как отмечалось выше (см. рис. 2), при распадах атомов калия-40 испускаются как электроны (в 89% распадов), так и γ - кванты (в 11 % распадов). В лабораторной работе поставлена задача – регистрировать только распады с испусканием β - частицы. Это сделать нетрудно. Если препарат калиевой соли массой десятки грамм поднести к ГМ - счетчику, то он будет срабатывать почти исключительно от β - частиц, т.к. распады с испусканием γ - кванта редкие и мала вероятность их регистрации. Для регистрации только γ - излучения необходимо взять большие массы соли (несколько кг), а счетчики закрыть небольшим слоем вещества, поглощающего β - частицы.

Получили распространение портативные дозиметры ионизирующих излучений с ГМ-счетчиками. Все они регистрируют γ -излучение. Однако β -излучение могут детектировать только те приборы, в которых применяется счетчик Гейгера-Мюллера с тонкими стенками, проницаемыми для β -частиц, причем счетчик не должен быть закрыт материалом корпуса. Для регистрации β -частиц малой энергии, а также α -частиц, имеющих очень небольшой пробег в веществе, применяют специальные счетчики Гейгера-Мюллера с окошком из тонкой слюды.

6. Методика выполнения лабораторных заданий

В лабораторной работе поставлены следующие задачи: а) определить период полураспада изотопа ^{40}K и б) измерить удельную β -активность пищевой поваренной соли, содержащей добавки калия, а также содержание калия в этом продукте.

Измерение периода полураспада калия.

Если период полураспада небольшой, то с помощью ГМ-счетчика можно заметить уменьшение скорости счета импульсов, обусловленное убыванием активности препарата (см. рис. 3). Из этих измерений легко найти период полураспада по формуле (12).

Для долгоживущих ядер, таких как ^{40}K , этот метод неприемлем, поэтому воспользуемся соотношением (11):

$$T = \frac{0,69 N_{40}}{A}, \quad (14)$$

где A – активность (число распадов за 1 с), N_{40} – количество атомов калия-40 в препарате.

Препарат приготовлен из соли KCl массой m , г. Численное значение N_{40} находим по формуле

$$N_{40} = \frac{\delta m N_A}{M}, \quad (15)$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число Авогадро, $M = 75 \text{ г/моль}$ – молярная масса соли KCl , $\delta = 1,18 \cdot 10^{-4}$ – доля радиоактивного изотопа ^{40}K в природной смеси изотопов калия.

Рассмотрим методику измерения активности A препарата. Небольшое количество соли помещают тонким слоем в чашечку, которую устанавливают под ГМ-счетчиками (рис. 5). С помощью пересчетного устройства измеряют количество импульсов N , поступающих от ГМ-счетчиков за некоторое фиксированное время измерения t .

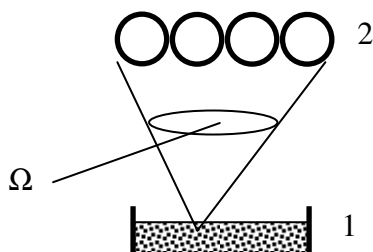


Рис. 5. Схема измерений: 1- радиоактивный источник; 2 – счетчики Гейгера-Мюллера; Ω - телесный угол

Поскольку активность препарата малая, большую помеху вносят естественное фоновое радиоактивное излучение окружающих тел и космические лучи. Убрав радиоактивный препарат от счетчиков, за то же время измерений t считают импульсы фона ($N_{\text{ф}}$). Разность

$$N_{\beta} = N - N_{\text{ф}} \quad (16)$$

– есть число зарегистрированных β - частиц препарата за время t .

Из результатов измерения N_{β} и t находят среднюю скорость счета импульсов от β - распадов препарата

$$n = N_{\beta} / t. \quad (17)$$

В лабораторной работе ГМ - счетчики регистрируют только те немногие β - частицы, которые испущены в направлении счетчиков, в небольшом телесном угле Ω (см. рис. 5). Активность A и скорость счета импульсов n связаны соотношением

$$A = \frac{n}{f} . \quad (18)$$

Коэффициент пропорциональности f , равный доле регистрируемых распадов и называемый коэффициентом регистрации, рассчитан и приведен на препарате.

Таким образом, для нахождения периода полураспада T необходимо измерить активность A (см. формулы (16) – (18)), рассчитать число радиоактивных атомов N_{40} (см. формулу (15)) и вычислить T по формуле (14).

Измерение удельной активности вещества. Во многих случаях необходимо знать удельную активность a , Бк/г (см. формулу (7)) различных веществ – почвы, строительных материалов, воды, продуктов питания и т.д. Рассмотрим методику измерения удельной активности методом сравнения с эталонным препаратом.

В этом случае сравнивают интенсивности излучения двух препаратов, один из которых с неизвестной удельной активностью a , а другой – с известной удельной активностью $a_э$. Второй препарат будем для краткости называть эталонным. При этом для обоих препаратов условия измерения интенсивности излучения должны быть как можно более одинаковыми по всем параметрам – таким, как энергия β - частиц, масса препарата, геометрические условия измерений и т.д.

Пусть за одинаковое время измерений зарегистрировано количество импульсов: N – для исследуемого препарата, $N_э$ – для эталонного препарата и N_ϕ – для фона. Тогда отношение удельных активностей

$$\frac{a}{a_э} = \frac{N - N_\phi}{N_э - N_\phi} . \quad (19)$$

В лабораторной работе в качестве эталонного источника β - излучения используется чистая соль KCl. Из формул (14), (15) получим формулу для расчета удельной активности $a_э$ соли KCl

$$a_э = \frac{A}{m} = \frac{0,693 \delta N_A}{MT} . \quad (20)$$

Подставляя в формулу (20) значение периода полураспада калия $T = 1,3 \cdot 10^9$ лет $= 4,1 \cdot 10^{16}$ с, получим $a_э = 16$ Бк/г для обоих видов распадов (с испусканием электрона и с захватом электрона) или

$$a_э = 14 \text{ Бк/г} \quad (21)$$

– для распадов с испусканием электрона.

Исходя из значения $a_э = 14$ Бк/г для соли KCl, получаем значение удельной β^- - активности чистого калия

$$a_k = 26 \text{ Бк/г}. \quad (22)$$

В лабораторной работе в качестве исследуемого на β^- радиоактивность препарата используется продукт под названием «Пищевая соль с пониженным содержанием натрия + калий, магний, йод», которая, как указано на упаковке, содержит 14% калия. В лабораторной работе предлагается измерить удельную β^- - активность a этой соли, а также определить содержание калия радиометрическим методом.

Радиометрическое определение калия. Калий – распространенный элемент в земной коре. Доля радиоактивного изотопа ^{40}K постоянна независимо от происхождения калия. Поэтому радиоактивное излучение ^{40}K используют для количественного определения калия в его солях или растворах, содержащих калий. Подобный метод, называемый радиометрическим, представляет интерес для ряда отраслей промышленности: добыча калийных солей и производство калийных удобрений, цемента и др. веществ.

В эталонном препарате KCl, удельная β^- - активность которого $a_э = 14$ Бк/г (см. формулу (21)), массовая доля калия $K_э = 52,4 \%$. Массовую долю K калия (в %) в исследуемом препарате находим из соотношения

$$K = \frac{a}{a_0} 52,4\%, \quad (23)$$

где a – удельная β - активность исследуемого препарата, $a_0 = 14$ Бк/г.

7. Статистические погрешности при измерении радиоактивности

При измерении радиоактивности случайные (статистические) погрешности измерений обусловлены самой природой распада, который является случайным событием.

Предположим, что с помощью ГМ- счетчиков измеряют интенсивность радиоактивного излучения. Интенсивность можно характеризовать, например, числом импульсов N , зарегистрированных ГМ- счетчиками за некоторое фиксированное время.

Повторяя измерения в тех же условиях, получают различные значения N , изменяющиеся случайным образом. Вероятность появления того или иного значения N дается распределением Пуассона [4]. Из него следует, что случайную (статистическую) погрешность можно найти из одного измерения, а не из нескольких, как для обычных измерений [5].

Для достаточно большого числа N зарегистрированных частиц среднеквадратическая статистическая погрешность измерения величины N

$$\sigma = \sqrt{N}.$$

Следовательно, с доверительной вероятностью P искомая величина N , которую обозначим N^* , находится в доверительном интервале

$$N^* = (N - \sigma) \dots (N + \sigma) \text{ для } P = 0,68$$

или

$$N^* = (N - 2\sigma) \dots (N + 2\sigma) \text{ для } P = 0,95.$$

Например, было зарегистрировано $N = 100$ импульсов. Тогда искомая величина N^* находится в доверительном интервале

$$N^* = 90 \dots 110 \text{ с вероятностью } P = 0,68$$

или в доверительном интервале

$$N^* = 80 \dots 120 \text{ с вероятностью } P = 0,95.$$

Обычно используют записи результатов измерений в следующей форме:

$$N^* = 100 \pm 10, P = 0,68; \text{ или } N^* = 100 \pm 20, P = 0,95.$$

Если счетчик зарегистрировал все распады, а фоновое излучение было пренебрежимо малым, то N^* – искомое число распадов за данное время.

С доверительной вероятностью $P = 0,68$ относительная погрешность ε измерения величины N есть отношение абсолютной погрешности σ к измеренной величине N :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (24)$$

Из формулы (24) видно, что с ростом N относительная погрешность ε уменьшается. Например, при $N = 100$ погрешность $\varepsilon = 0,1 = 10\%$, а при $N = 10^4$ – погрешность $\varepsilon = 0,01 = 1\%$. Следовательно, для уменьшения относительной статистической погрешности необходимо зарегистрировать большое число частиц (импульсов).

Погрешность σ_β измерения величины $N_\beta = N - N_\phi$ (см. формулу (16)) складывается из погрешностей $\sigma_1 = \sqrt{N}$ для величины N и $\sigma_2 = \sqrt{N_\phi}$ – для N_ϕ . По правилам сложения погрешностей [5], получаем

$$\sigma_\beta = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{N + N_\phi}. \quad (25)$$

Относительную статистическую погрешность ε_β измерения величины $N_\beta = N - N_\phi$ находим из следующего выражения

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{\sigma_{\beta}}{N_{\beta}} = \frac{\sqrt{N + N_{\phi}}}{N - N_{\phi}}. \quad (26)$$

8. Дозы облучения

Ионизирующие излучения оказывают вредное воздействие на живые организмы и их потомства. Для оценки биологических последствий воздействия ионизирующих излучений необходимо контролировать их дозы [6, 7].

Поглощенной дозой называют отношение поглощенной энергии излучения к массе поглощающего вещества:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (27)$$

Единица поглощенной дозы – *грэй*: 1 Гр = 1 Дж / кг.

Экспериментально установлено, что при одинаковой поглощенной дозе различного вида излучения оказывают неодинаковые по степени тяжести биологические последствия. Более вредными являются такие ионизирующие частицы, которые теряют больше энергии на единицу длины трека. К ним относятся α - частицы и протоны отдачи при прохождении быстрых нейтронов через вещество.

Этот фактор учтен в *эквивалентной дозе*, которую получают умножением поглощенной дозы на коэффициент K , зависящий от ионизирующей способности излучения и называемый коэффициентом качества излучения:

$$H = K D. \quad (28)$$

Единица эквивалентной дозы – *зиверт* (Зв). Для α - излучения $K = 20$, поэтому при поглощенной дозе $D = 1$ Гр эквивалентная доза $H = 20$ Зв. Для β - излучения, а также для фотонного излучения (рентгеновского и γ - излучений), $K = 1$; при этом поглощенной дозе 1 Гр соответствует эквивалентная доза $H = 1$ Зв.

Кроме того, следует учесть, что разные органы и ткани имеют различную чувствительность к облучению [6]. Поэтому была введена *эффективная эквивалентная доза* – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент радиационного риска, учитывающий разную чувствительность различных тканей и органов к облучению. Эффективная эквивалентная доза также измеряется в зивертах.

Согласно официальному документу [7], максимально допустимые эффективные эквивалентные дозы радиации для населения от природных источников – 5 мЗв в год и от техногенных источников – 1 мЗв в год. Дозы облучения в медицинских целях (диагностика, лечение) регламентируются отдельно.

В различных районах земного шара дозы могут различаться. Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации [6]. Средние годовые эффективные эквивалентные дозы (далее – дозы) составляют: 2 мЗв от естественных источников, 0,4 мЗв – от медицинской рентгеновской диагностики и намного меньше – от радиоактивных осадков ядерных испытаний в атмосфере и работы атомных электростанций.

Естественными источниками радиации являются радионуклиды земного происхождения и космические лучи. Средние годовые эффективные эквивалентные дозы составляют 0,3 мЗв от космических лучей и 1,7 мЗв – от радионуклидов земного происхождения [6].

Естественные радиоактивные вещества могут находиться как вне, так и внутри тела человека [6]. Доза от естественного внутреннего облучения в несколько раз превышает дозу внешнего облучения. Основной вклад во внутреннее облучение дают продукты распада радиоактивного газа радона [6, 8].

Заметный вклад в дозу внутреннего облучения дает калий. Ниже приведен расчет годовой дозы от распада калия, находящегося в теле человека.

При расчете дозы мы исходим из следующих допущений: масса калия $m_K = 180$ г, средняя энергия β - частиц $\langle E_{\beta} \rangle = 0,43$ МэВ = $7 \cdot 10^{-14}$ Дж, удельная β - активность калия $a_K = 26$ Бк/г (см. формулу (22)), масса тела человека $m = 80$ кг.

Активность калия

$$A = m_K a_K = 4\,700 \text{ Бк.}$$

Таким образом, в теле человека каждую секунду происходит 4 700 распадов атомов калия с испусканием β - частиц, энергия которых поглощается телом. Найдем поглощенную дозу за время $t = 1 \text{ год} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$:

$$D = \frac{E}{m} = \frac{\langle E_{\beta} \rangle A t}{m} = 0,13 \text{ мГр.}$$

Эквивалентную дозу находим по формуле (28) для $K = 1$

$$H = K D = 0,13 \text{ мЗв.}$$

Следовательно, доза от внутреннего облучения за счет распада калия составляет примерно 8% от средней годовой дозы 1,7 мЗв от всех радионуклидов земного происхождения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для регистрации β -лучей включает в себя (рис. 6):

- * блок с четырьмя счетчиками Гейгера-Мюллера типа СБМ-20;
- * прибор *Universal Counter* (универсальный счетчик) фирмы *PHYWE*;
- * исследуемые радиоактивные препараты;
- * секундомер.



Рис. 6. Лабораторная установка для изучения β - активности

В лабораторной работе *Universal Counter* (рис. 7) служит источником высокого напряжения для ГМ- счетчиков, а также устройством для счета электрических импульсов, поступающих от них.

Рассмотрим назначение кнопок в приборе *Universal Counter*, используемых в данной лабораторной работе.

При нажатой кнопке *Function* последовательно загораются светодиоды, отображающие различные режимы работы прибора. В данной работе используется режим счета импульсов (*Imp*). При этом на дисплее будет отображено «*I*», где «*I*» – обозначает импульсы, «*0*» – счетчик «обнулен».

Нажатием кнопки *Start* начинается процесс счета импульсов.

Для прекращения счета импульсов нажимают кнопку *Stop*. Число зарегистрированных импульсов будет отображено на цифровом дисплее.

Для сброса показаний дисплея нажимают кнопку *Zero*.

Группа из трех кнопок *Reset* используется для контроля и установки высокого напряжения на ГМ- счетчиках. При нажатой кнопке *Set* на дисплее будет показано напряжение на ГМ- счетчиках. Его можно изменять кнопками «+» и «-». Рабочее напряжение должно быть 400 В.

Крайняя правая кнопка предназначена для включения динамика, который будет издавать щелчок при каждом срабатывании ГМ- счетчика.

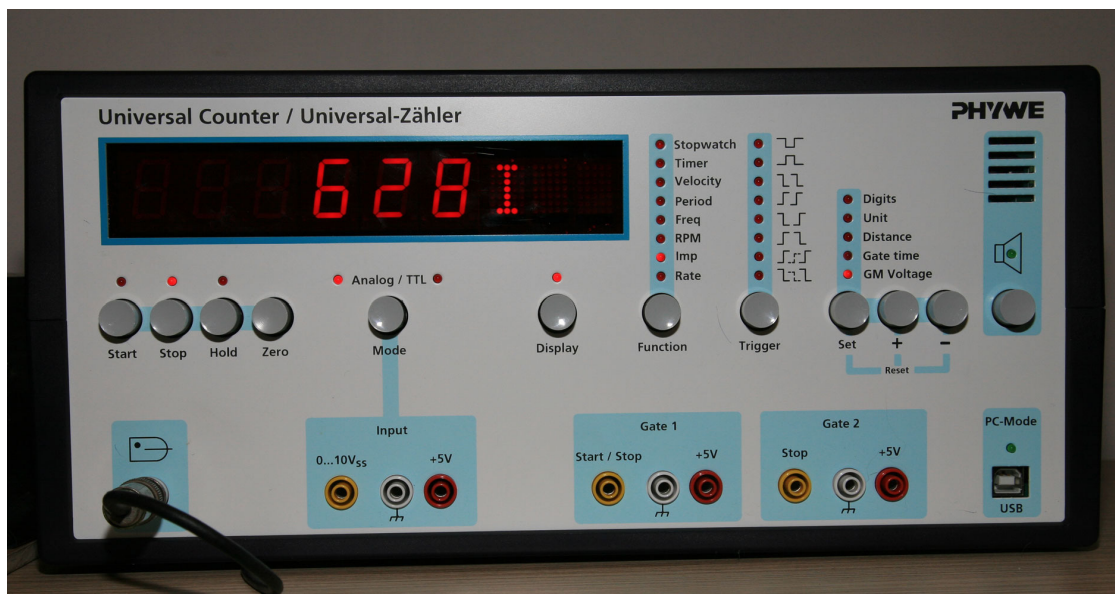


Рис. 7. Universal Counter

Для выполнения лабораторной работы приготовлены три препарата, радиоактивность которых обусловлена распадами изотопа ^{40}K . Препарат № 1 используется для определения периода полураспада изотопа ^{40}K , а препарат № 2 – эталонный; оба препарата содержат х. ч. соль KCl .

В препарате № 3 используется продукт под названием «Пищевая соль с пониженным содержанием натрия + калий, магний, йод» (см. рис. 6), которая, как указано на упаковке, содержит 14% калия. В лабораторной работе предлагается измерить удельную активность этой соли, а также определить содержание калия (в %) радиометрическим методом.

2. Выполнение лабораторной работы

Задание 1. Подготовить прибор *Universal Counter* к работе

Порядок выполнения задания.

1. Вставить вилку в сетевую розетку напряжением 220 В. Включить питание прибора выключателем на задней стенке прибора.
2. При этом на дисплее будет отображено «0I», что обозначает: установлена функция «Imp» – счета импульсов (I), а счетчик обнулен (0). *Примечание:* если на дисплее указана другая функция, установить кнопкой *Function* режим измерения импульсов, как описано выше.
3. Проверить напряжение на ГМ- счетчиках. Для этого нажать кнопку *Set* и посмотреть на дисплей. Напряжение должно быть 400 В. Если напряжение другое, выставить напряжение кнопками «+» и «-».
4. Проверить работоспособность установки. Нажать кнопку *Start*, при этом должен происходить счет импульсов, что видно на дисплее.
5. Нажать кнопку *Stop*. Число зарегистрированных импульсов будет отображено на дисплее.
6. Сбросить показания дисплея кнопкой *Zero*. Установка готова к работе.

Задание 2. Измерить фоновое излучение

Порядок выполнения задания.

1. Получить секундомер у инженера лаборатории.
2. Все измерения (фоновое и с препаратами) следует выполнять за одинаковое время счета импульсов $t = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$. Полное время измерений составит 40 мин.
3. Убрать препараты от ГМ- счетчиков.
4. Измерить число фоновых импульсов $N_{\text{ф}}$. Для этого одновременно нажать кнопку *Start* универсального счетчика и запустить секундомер. Через 600 с нажать кнопку *Stop*, записать результаты измерения $N_{\text{ф}}$ в табл. 1.

Результаты измерения фонового излучения

Время измерения t , с	600
Число импульсов $N_{\text{ф}}$	

Задание 3. Измерить период полураспада ^{40}K

Порядок выполнения задания.

1. Записать в табл. 2 численные значения массы m препарата № 1 и коэффициента регистрации f , которые приведены на препарате.

Таблица 2

Данные для препарата № 1 и результаты измерения периода полураспада

Коэффициент регистрации β - частиц	$f =$
Масса KCl , г	$m =$
Количество атомов ^{40}K	$N_{40} =$
Количество зарегистрированных импульсов N за время $t = 600$ с	$N =$
Скорость счета β - частиц, с^{-1}	$n = (N - N_{\text{ф}}) / t =$
Активность, Бк	$A =$
Период полураспада (в секундах и годах)	$T =$
Погрешность измерения T , %	$\varepsilon =$

2. Поставить препарат № 1 под ГМ- счетчиками и измерить количество импульсов N за 600 с. Результат измерения записать в табл. 2.
3. По формуле (15) вычислить количество атомов N_{40} изотопа ^{40}K , содержащихся в препарате. Результат вычисления записать в табл. 2.
4. Вычислить скорость счета β - частиц $n = (N - N_{\text{ф}}) / t$. Результат вычисления записать в табл. 2.
5. Вычислить активность по формуле (18). Результат вычисления записать в табл. 2.
6. По формуле (14) вычислить период полураспада изотопа ^{40}K . Результат вычисления в секундах и годах записать в табл. 2.
7. Вычислить отклонение полученного результата для периода полураспада от табличного значения $T_{\text{табл}} = 1,3 \cdot 10^9$ лет по формуле

$$\varepsilon = 100 \% (T - T_{\text{табл}}) / T_{\text{табл.}}$$

Результат вычисления значения ε записать в табл. 2. Сделать выводы.

Задание 4. Измерить удельную β - активность и содержание калия в препарате № 3

Порядок выполнения задания.

1. Поставить препарат № 3 под ГМ- счетчиками и измерить количество импульсов N за 600 с. Результат измерения записать в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерения удельной активности и содержания калия в препарате № 3

N	N_3	a , Бк/г	$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a}$	K , %

2. Поставить препарат № 2 (эталонный) под ГМ- счетчиками и измерить количество импульсов N_3 за 600 с. Результат измерения записать в табл. 3.
3. Вычислить по формуле (19) удельную β - активность a препарата № 3. Удельная β - активность эталонного препарата $a_3 = 14$ Бк/г. Результат вычисления записать в табл. 3.

4. Вычислить относительную погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta a}{a}$ измерения удельной β -активности a препарата № 3 по формуле (см. аналогичную формулу (26))

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} = \frac{\sqrt{N + N_{\phi}}}{N - N_{\phi}}.$$

Результат вычисления записать в табл. 3. *Примечание:* в данной формуле пренебрегается небольшой статистической погрешностью измерения активности эталонного препарата.

5. Вычислить по формуле (23) содержание калия K (в %) в препарате № 3. Результат вычисления записать в табл. 3.
6. Полученное в лабораторной работе значение K (в %) сравнить со значением $K = 14\%$ по заявке изготовителя соли. Сделать выводы.

Контрольные вопросы и задания

1. Объяснить процесс распада нейтрона.
2. Из какой части атома вылетает электрон при β^- -распаде?
3. Что такое электронный захват?
4. Нарисуйте схему распада калия-40.
5. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
6. Что такое постоянная распада, период полураспада? Какая связь между ними?
7. Что такое активность и в каких единицах она измеряется?
8. Какие измерения необходимо выполнить, чтобы найти большой период полураспада?
9. Какие процессы приводят к торможению заряженных частиц в веществе?
10. Как устроен и работает счетчик Гейгера-Мюллера?
11. Объяснить радиометрический метод определения калия.
12. Что такое поглощенная доза и эквивалентная доза? В каких единицах они измеряются?
13. Чему равна средняя годовая доза облучения от естественных источников радиации?
14. Чему равна максимально допустимая доза радиации для населения от природных источников?

Список литературы

1. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 496 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики в 3 т. М.: Наука, 1988. т. 3. 496 с.
3. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия. 1983. – 928 с.
4. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985
5. Савельева А.И., Фетисов И.Н. Обработка результатов измерений при проведении физического эксперимента: метод. указания к выполнению лабораторной работы М-1 по курсу общей физики / – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 28 с.
6. Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 79 с.
7. Нормы радиационной безопасности НРБ – 99/2009.
8. Фетисов И.Н. Естественная радиоактивность воздуха. Мет. указ. к лаб. работе Я-65. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.