

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.Э. БАУМАНА

И.Н. Фетисов

ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ КАЛИЯ

*Методические указания к выполнению лабораторной работы Я-61
по курсу общей физики*

Под редакцией *Г.В Балабиной*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана
2008

Цель работы – ознакомление с радиоактивностью, взаимодействием излучений с веществом, дозиметрией; измерения периода полураспада, пробега и энергии β -частиц, коэффициента поглощения γ -излучения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Виды радиоактивных превращений

Атомы состоят из ядра и электронной оболочки. Линейные размеры атома $\approx 10^{-10}$ м, а ядра – на 4-5 порядков меньше. Ядра (нуклиды) 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 имеет электрического заряда. Масса нуклонов примерно в 1840 раз больше массы электрона. Химические элементы различаются количеством протонов Z (зарядовое число, порядковый номер элемента). Число нуклонов A в ядре называют массовым числом. Ядро элемента X записывают в виде A_ZX , 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: ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ и ${}^3_1\text{H}$.

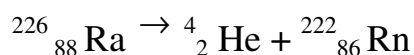
Некоторые ядра (радионуклиды) самопроизвольно (спонтанно) превращаются в другое ядро, испуская частицы, (А. Беккерель, 1896г.). Это явление получило название *радиоактивность*. Распадающееся ядро называют материнским, а образующееся после распада – дочерним. Дочернее ядро может быть как стабильным, так и радиоактивным.

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

Альфа-распад. При α -распаде ядро (обычно тяжелое) испускает ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, которое называют α -частицей. Схему α -распада представляют в виде



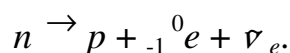
где X и Y – символы химических элементов. Например, превращение радия в радон происходит по схеме



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-распад. При таком распаде в ядре происходит превращение нейтрона в протон и электрон (электронный распад) или протона – в нейтрон и позитрон (позитронный распад), при этом число нуклонов в ядре не изменяется, а зарядовое число изменяется на ± 1 . Известны три разновидности β -распада.

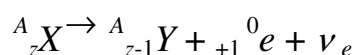
1. Электронный β -распад (β^- -распад). Примером такого распада служит превращение свободного нейтрона n в протон p , электрон ${}_{-1}^0e$ и электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$:



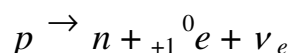
Подобные превращения нейтрона происходят во многих нестабильных ядрах, при этом электрон и антинейтрино покидают ядро. Электронный распад в ядре протекает по схеме:



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



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

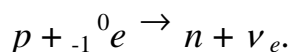


Позитрон является *античастицей* электрона, имеющей такую же массу, но противоположные по знаку электрический заряд, лептонный заряд и магнитный момент.

3. Электронный захват. Третий вид β -распада – захват ядром собственного орбитального электрона, чаще с ближайшей K – оболочки:



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



Нейтрино и антинейтрино – электрически незаряженные элементарные частицы, различающиеся знаком лептонного заряда. Масса покоя этих частиц много меньше массы электрона (вопрос о массе нейтрино – предмет современных исследований). Нейтрино и антинейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом, поэтому их можно зарегистрировать только в специальных опытах.

К радиоактивным превращениям относят также спонтанное деление тяжелых ядер - урана, плутония и др.

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

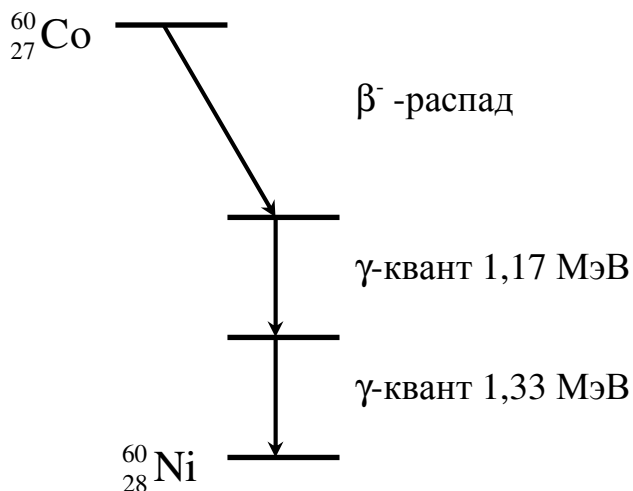


Рис. 1. Схема распада кобальта-60

после распада дочернее ядро переходит в основное состояние, испуская один или несколько фотонов большой энергии, называемых γ -квантами. Это γ -излучение часто сопровождает все виды распадов. Примером такого процесса является электронный распад кобальта-60 (см. 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. (Электрон-вольт – энергия, приобретаемая частицей с элементарным зарядом

в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В; 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.)

γ -Излучение – электромагнитное излучение, отличающееся от света значительно большей частотой ν . Электромагнитные волны имеют двойственную природу: волна – частица. В таких явлениях, как интерференция и дифракция, проявляются волновые свойства. Однако в процессах испускания и поглощения они выступают как частицы (фотоны, γ -кванты) с энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = h\nu/c$, где h – постоянная Планка. Чем выше энергия фотона, тем ярче проявляются его корпускулярные свойства и слабее волновые. Энергия γ -кванта радиоактивного распада может достигать нескольких МэВ, в то время как энергия фотонов видимого излучения составляет примерно 2 эВ.

Некоторые ядра находятся в возбужденном состоянии длительное время (до 10^6 лет). Такие состояния называются *изомерными*. Например, технеций $^{99}_{43}\text{Tc}$ переходит из возбужденного состояния в основное с периодом полураспада 6 часов, испуская γ -квант с энергией 0,14 МэВ. Изомеры являются источниками только γ -излучения. Упомянутый технеций применяется в медицинской радиоизотопной диагностике.

Энергия распада. Радиоактивный распад может происходить, если он не противоречит закону сохранения полной энергии, включающей энергию покоя $m_0 c^2$, т.е. если разность между массой исходного ядра и суммарной массой продуктов распада положительна. Суммарная масса покоя протона, электрона и антинейтрино меньше массы нейтрона, поэтому свободный нейтрон распадается, а свободный протон (ядро ^1_1H) – нет. В сложном ядре протон при превращении в нейтрон и позитрон получает недостающую энергию от других нуклонов.

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. Наиболее простой случай распределения энергии распада между частицами – это α - распад без испускания γ - кванта. Материнское ядро перед распадом практически 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 $E=p^2/2m_0$, 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.

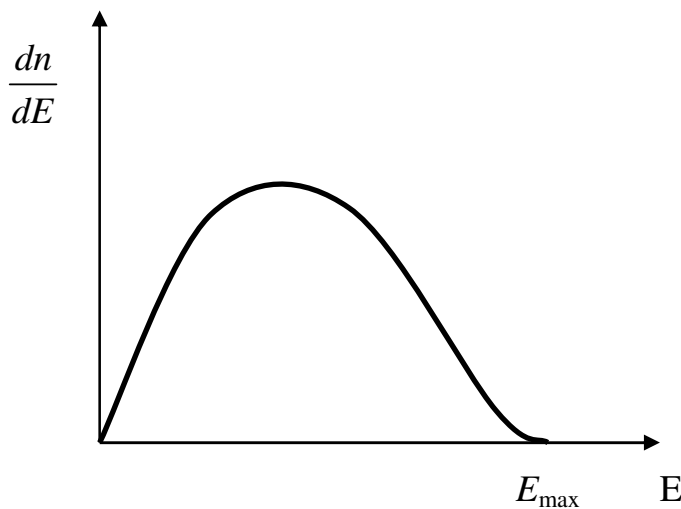


Рис. 2. Энергетический спектр электронов β -распада

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. Отсюда следует разнообразие в делении энергии распада между тремя частицами. Дочернее ядро 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 (рис. 2). Средняя энергия электронов обычно близка к трети максимальной энергии.

2. Закон радиоактивного распада

Радиоактивные превращения представляют собой случайный процесс, экспоненциальный закон распада которого имеет следующее теоретическое объяснение.

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

$$dN = -\lambda N dt \quad (3)$$

ядер. Среднее число распадов за единицу времени

$$A = dN / dt = \lambda N \quad (4)$$

называется *активностью* препарата. Единица активности – *беккерель* (Бк) соответствует одному распаду в секунду. Часто также используют внесистемную единицу активности *кюри*, равную $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ (такова активность 1 г радия). Активность единицы массы вещества, Бк/кг,

$$a = A / m \quad (5)$$

называется *удельной активностью*.

Приращение числа нераспавшихся ядер за время dt (см. (3)):

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

Интегрируя это выражение по времени, получим

$$N = N_0 \exp (- \lambda t), \quad (6)$$

где N - число нераспавшихся ядер в момент времени t ; N_0 - число нераспавшихся ядер в произвольный начальный момент времени $t=0$.

Соотношение (6) выражает *закон радиоактивного распада*: число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальной зависимости. Активность, пропорциональная числу нераспавшихся атомов, убывает по такому же закону (см. рис. 3):

$$A = \lambda N = \lambda N_0 \exp (- \lambda t) = A_0 \exp (- \lambda t), \quad (7)$$

где $A_0 = \lambda N_0$ – активность момент времени $t = 0$. Опыты подтверждают зависимость (7).

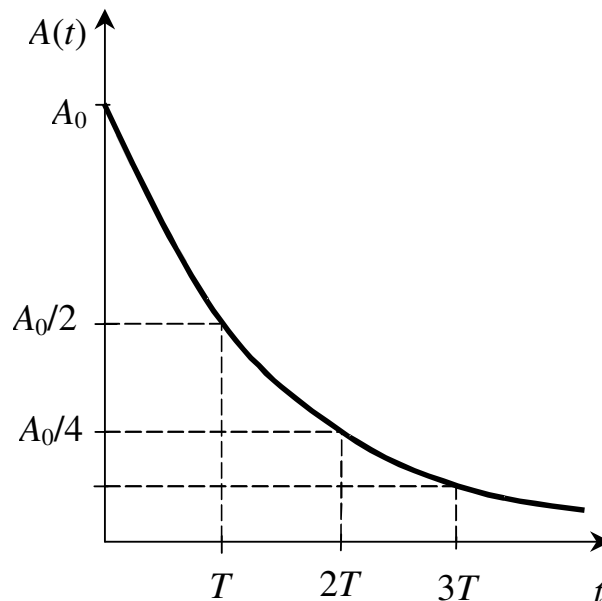


Рис. 3. Зависимость активности от времени

Время жизни радионуклида характеризуют средним временем жизни или периодом полураспада. Можно показать, что *среднее время жизни* τ , с, обратно пропорционально постоянной распада:

$$\tau = 1 / \lambda .$$

Периодом полураспада T называют время, за которое распадается половина ядер. Легко получить следующее соотношение:

$$T = (\ln 2) / \lambda = 0,693 / \lambda = 0,693 \tau . \quad (8)$$

Период полураспада связан с активностью и числом атомов соотношением (см. (7), (8))

$$T = 0,693 N / A \quad (9)$$

Запишем закон распада через период полураспада:

$$N(t) = N_0 \exp (-0,693 t / T); \quad (10)$$

$$A(t) = A_0 \exp (-0,693 t / T). \quad (11)$$

Для различных радионуклидов период полураспада изменяется от менее микросекунды до 10^{18} лет.

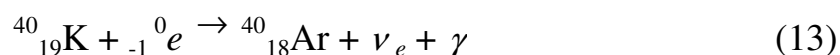
3. Радиоактивность калия

Радионуклиды подразделяют на естественные и искусственные, между которыми нет принципиального различия. К основным естественным относятся радиоактивные семейства урана и тория, а также калий. Природный калий состоит из смеси трех изотопов – стабильных ^{39}K и ^{41}K и радиоактивного ^{40}K . Доля радиоактивного изотопа составляет $\delta = 1,18 \cdot 10^{-4}$. Его период полураспада порядка возраста Земли.

Калий в 89% случаев испытывает β^- -распад (см. (1)), превращаясь в стабильный кальций:



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



где γ -- γ -квант.

Ядро аргона образуется в возбужденном состоянии и испускает γ -квант с энергией 1,46 МэВ, переходя в основное, нерадиоактивное состояние (рис. 4).

Электроны распада имеют максимальную энергию $E_{max} = 1,3$ МэВ. 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.

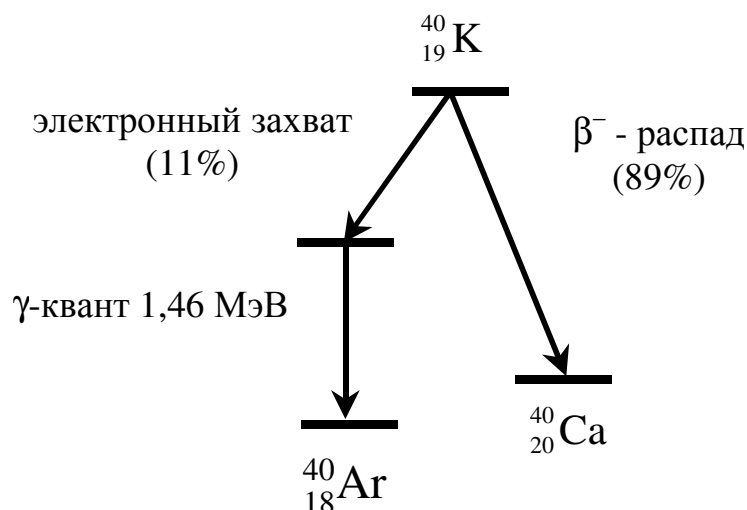


Рис. 4. Схема распада калия-40

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

Калий играет важную роль в жизнедеятельности животных и растений; поэтому в почву вносят калийные удобрения.

Соли калия – доступный и безопасный источник слабой радиоактивности, используемые в данной работе.

4. Поглощение излучений в веществе

Заряженные частицы. Скорость β -частиц близка к скорости света, а α -частиц – в несколько раз меньше. В веществе между пролетающей частицей и атомными электронами действуют кулоновские силы, в результате частица теряет энергию на ионизацию и возбуждение атомов. Такой процесс называется *ионизационным торможением*. На образование одного иона в среднем затрачивается энергия в несколько десятков эВ. Частица с энергией 500 кэВ образует 10^4 ионов.

Для целей защиты от излучений необходимо знать пробег частиц в веществе до остановки. Для этого между радиоактивным источником и счетчиком вставляют пластины и измеряют зависимость интенсивности излучения I от толщины поглотителя x (рис. 5).

Для направленного пучка α -частиц одинаковой энергии зависимость $I(x)$ показана на рис. 5, а. В этом случае все α -частицы имеют практически одинаковый пробег x_0 до остановки, который зависит от энергии и вещества. В воздухе $x_0 \approx 5$ см для $E = 5$ МэВ. Альфа-излучение поглощается листом бумаги; оно практически не способно проникнуть через наружный слой кожи, образованный отмершими клетками. Поэтому α -излучение не представляет опасности до тех пор, пока радиоактивные вещества, испускающие α -частицы, не попадут внутрь организма через открытую рану, с пищей или с вдыхаемым воздухом; тогда они становятся чрезвычайно опасными.

Для β -частиц зависимость $I(x)$ (рис. 5, б) имеет отличия. Даже тонкий слой

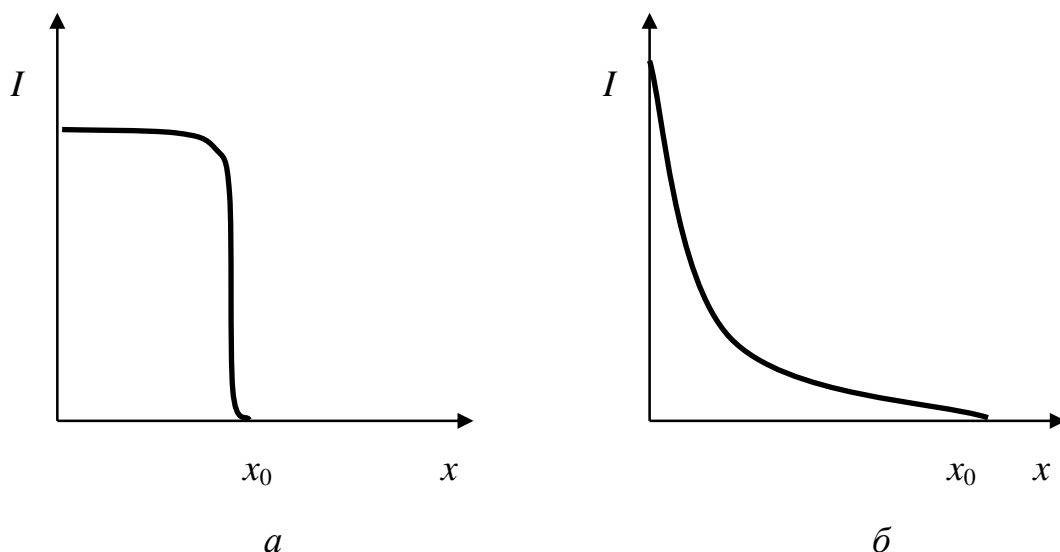


Рис. 5. Кривые поглощения в веществе: а - для α -частиц; б - для β -частиц

вещества уже ослабляет излучение. Это происходит, потому что спектр β -частиц сплошной, от E_{max} до малых энергий, а также в связи с большим рассеянием β -частиц в кулоновском поле ядер и электронов. Последнее приводит к сильной изломанности траектории. В этом случае пробегом β -частиц считают толщину поглотителя x_0 , которая практически полностью поглощает излучение.

При одинаковой энергии пробег β -частиц на три порядка больше, чем α -частиц, потому что они быстрее и их заряд меньше. α -Частицы, 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.

Толщину поглотителя можно выражать не только в сантиметрах, но и массой поглотителя на единицу площади $d_0 = \rho x_0$, где ρ , г/см³, - плотность. Для β -частиц эмпирически установлена зависимость между максимальной энергией E_{max} , МэВ, и пробегом d_0 , г/см²:

$$E_{\text{макс}} = 1,85 (d_0 + 0,133). \quad (14)$$

Формула (14) справедлива для алюминия, хлористого калия и других веществ со средним атомным номером для $E_{max} \geq 0,8$ МэВ. Согласно (14), β -излучение с энергией несколько МэВ может проникнуть в ткани организма на глубину один-два сантиметра.

Фотонное излучение. При взаимодействии фотонов большой энергии (рентгеновского или γ -излучения) с атомами происходят три основных процесса: эффект Комптона, атомный фотоэффект и рождение пары электрон-позитрон.

Эффект Комптона – упругое рассеяние фотона на свободных или слабо связанных атомных электронах, при котором часть энергии и импульса фотон передает электрону, покидающему атом. Применяя законы сохранения энергии и импульса, получена формула для энергии фотонов E , МэВ, рассеянных на угол θ :

$$E = E_0 / [1 + E_0 (1 - \cos \theta) / (m_0 c^2)],$$

где E_0 , МэВ, – энергия до рассеяния, $m_0 c^2 = 0,51$ МэВ – энергия покоя электрона. Угол рассеяния может быть любым.

Например, фотон с энергией 1 МэВ после рассеяния назад ($\theta = 180^\circ$) имеет энергию $E = 0,2$ МэВ. Разность энергий $E_0 - E = 0,8$ МэВ была передана электрону, вылетевшему из атома. Как видим, в одном акте рассеяния электрон получает значительную часть энергии кванта, в среднем половину для квантов с энергией 1 МэВ.

При *атомном фотоэффекте* фотон поглощается одним из атомных электронов, обычно из внутренних оболочек, а электрон покидает атом. Энергия вылетевшего электрона равна разности энергии фотона и энергии связи электрона в атоме.

Рождение пары электрон-позитрон. В электрическом поле атомного ядра фотон может превратиться в электрон и позитрон:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+.$$

Этот процесс происходит, если энергия γ -кванта превышает суммарную энергию покоя электрона и позитрона $E = 2 m_0 c^2 = 1,02$ МэВ. Рождение пары наглядно демонстрирует взаимосвязь массы и энергии и превращение энергии электромагнитного поля в вещество.

В отличие от заряженных частиц, которые теряют энергию часто и мелкими порциями, и поэтому замедляются постепенно, γ -квант теряет энергию редко, но крупными порциями или целиком в одном взаимодействии, причем эти процессы имеют характер случайных событий. Вследствие этого поглощение моноэнергичного γ -излучения (как и вообще фотонного излучения) следует экспоненциальному *закону Бугера* (рис. 6):

$$I = I_0 \exp (-\mu_m d), \quad (15)$$

где I_0 – интенсивность без поглотителя; I – интенсивность после прохождения слоя массовой толщины d , г/см²; μ_m , см²/г, – *массовый коэффициент поглощения*. В слое толщины $d_e = 1 / \mu_m$ γ -излучение ослабляется в $e = 2,72$ раза, а при вдвое большей толщине – в e^2 раз и т.д. Слой половинного ослабления равен

$$d_{0,5} = \ln 2 / \mu_m. \quad (16)$$

Коэффициент поглощения зависит от вещества и энергии квантов. Для поглощения γ -излучения часто используют свинец. В нем минимальное ослабление имеют кванты с энергией несколько МэВ (здесь преобладает комптонов-

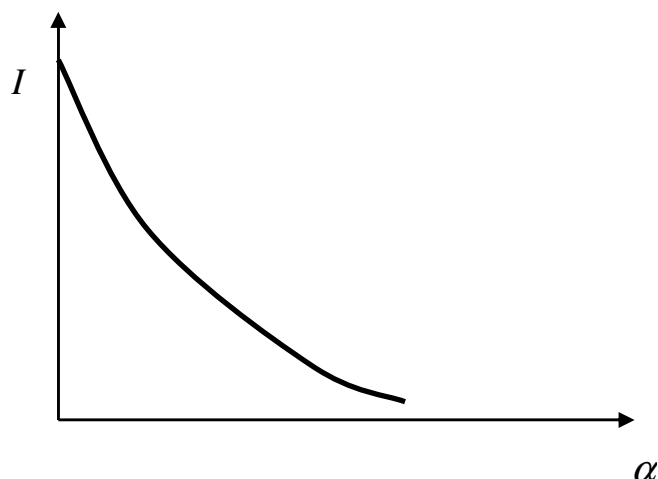


Рис. 6. Кривая поглощения γ -излучения в веществе

ское рассеяние); для них $\mu_{min} = 50 \text{ м}^{-1}$, а слой половинного ослабления $x_{0,5} = 0,014 \text{ м}$. При энергии 100 кэВ основным механизмом поглощения является фотоэффект, при этом μ_m возрастает примерно в 100 раз. При очень высоких энергиях (десятки МэВ) доминирует процесс рождения пар. Из приведенного примера видно, что проникающая способность γ -излучения очень велика; его может задержать лишь толстая пластина из свинца или бетонная плита.

Для энергий квантов 1...4 МэВ величины μ_m и $d_{0,5}$ почти не зависят от состава вещества (можно проверить в данной работе для Fe и Al). Это потому, что при таких энергиях поглощение обусловлено эффектом Комптона на атомных электронах, число которых мало отличается в железных и алюминиевых пластинах одинаковой массы.

5. Дозиметрия излучений

Для оценки биологических последствий воздействия ионизирующих излучений необходимо контролировать их дозы. *Поглощенной дозой* называют отношение поглощенной энергии излучения к массе поглощающего вещества:

$$D = E / m. \quad (17)$$

Единица поглощенной дозы - *грей*: $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} / \text{кг}$.

Однако при одной и той же поглощенной дозе биологические последствия для разных видов излучения различны. Это связано с различием потерь энергии заряженной частицей на единицу длины трека. Чем больше эти потери, тем опаснее излучение. Поэтому поглощенную дозу умножают на коэффициент K , называемый коэффициентом качества излучения. В результате получают *эквивалентную дозу*

$$H = K D. \quad (18)$$

Единица эквивалентной дозы - *зиверт* (Зв). Для β - и γ -излучений $K = 1$. При этом поглощенной дозе 1 Гр соответствует эквивалентная доза $H = 1$ Зв. Для α -излучения $K = 20$, поэтому при поглощенной дозе 1 Гр эквивалентная доза составит 20 Зв.

На человека постоянно воздействуют излучения естественных радиоактивных веществ внутри организма и вне его, а также космические лучи. В различных районах дозы могут различаться. Средняя годовая эквивалентная доза от естественных источников радиации

$$H = 2 \text{ мЗв.} \quad (19)$$

Помимо естественных источников излучения, имеются также искусственные. Вредное воздействие внешнего облучения можно уменьшить, сокращая время облучения, увеличивая расстояние до источника и применяя поглощающие экраны.

Радиоактивные вещества поступают в организм с воздухом, водой и продуктами питания. В частности, естественный калий поступает с пищей растительного происхождения. Биологическая потребность человека составляет примерно 2,5 г калия в сутки. В теле человека содержится примерно 140 г калия, его распад вносит вклад в дозу облучения (см. задание 7).

6. Счетчик Гейгера-Мюллера

В установке используются газоразрядные счетчики Гейгера-Мюллера. Они представляют собой баллон с двумя электродами, заполненный инертным газом. Счетчик β -излучения имеет окно из тонкой слюды, слабо поглощающее частицы. Для γ -квантов пригодны более простые цилиндрические счетчики, описанные ниже.

По оси металлической трубки проходит тонкая вольфрамовая нить. К нити и трубке прикладывают напряжение 400 В. Заряженная частица, пролетая через счетчик, ионизирует небольшое количество атомов газа, отрывая электроны от атомов. Электроны, разгоняясь в электрическом поле, вызывают вторичную ионизацию, и т.д. В результате происходит электрический пробой газа, а в цепи кратковременно протекает ток. Импульс тока регистрируют пересчетным устройством. Таким образом, число зарегистрированных импульсов равно числу прошедших через счетчик ядерных частиц.

Счетчик непосредственно от γ -квантов не срабатывает, т.к. они не ионизируют газ. Его срабатывание вызывают вторичные электроны и позитроны, образующиеся в рассмотренных выше процессах (эффект Комптона и др.). Поскольку электроны имеют небольшой пробег в плотном веществе, счетчик может зарегистрировать γ -кванты, которые провоздействовали в тонком слое вещества, примыкающего к газу счетчика, или в газе. Поскольку взаимодействия в тонком слое происходят редко, мала вероятность регистрации γ -квантов счетчиком Гейгера ($\leq 1\%$).

Если небольшой препарат калиевой соли поднести к счетчику, он будет срабатывать почти исключительно от β -частиц, т.к. распады с испусканием γ -кванта редкие (11%) и мала вероятность их регистрации. Для опытов с γ -квантами необходимы большие массы соли (несколько кг); при этом между излучателем и счетчиком помещают пластину, которая поглощает β -частицы, но пропускает γ -излучение.

7. Методика измерений

В данной работе выполняют три упражнения: 1) определяют пробег и энергию β -частиц; 2) находят период полураспада калия – 40; 3) измеряют коэффициент поглощения γ -излучения в железе и алюминии.

Схематически установки показаны на рис. 7. Радиоактивный источник β -излучения (рис. 7, а) или γ -излучения (рис. 7, б) устанавливают вблизи счетчиков Гейгера и измеряют количество срабатываний счетчиков (импульсов) N за

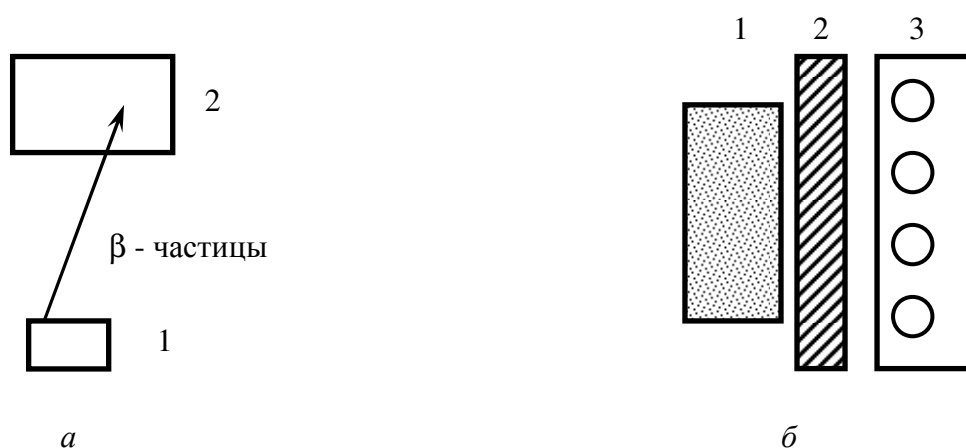


Рис.7 Схемы измерительных установок:

а – для β -излучения; 1 – источник; 2 – счетчик Гейгера;

б – для γ -излучения; 1 – источник; 2- поглотитель; 3 - счетчики

время t . Из результатов измерения находят среднюю скорость счета импульсов

$$n = N / t .$$

При измерении слабой радиоактивностью вводят поправку на фоновое радиоактивное излучение. Убрав радиоактивное вещество от счетчика, находят среднюю скорость счета импульсов фона

$$n_{\phi} = N_{\phi} / t .$$

Вычитая фон, получают исправленную скорость счета импульсов, называемую *регистрируемой активностью* препарата:

$$n_p = n - n_{\phi} = (N - N_{\phi}) / t \quad (20)$$

Величина n_p характеризует интенсивность излучения в относительных единицах. Если оба измерения выполнить за одинаковое время, то интенсивностью в относительных единицах является также величина

$$N_p = N - N_\phi \quad (21)$$

Измерение периода полураспада. Если период полураспада небольшой, то его находят по убыванию активности в процессе измерений согласно формуле (11). Для долгоживущих ядер урана, калия и др. этот метод неприемлем, поэтому воспользуемся соотношением (9):

$$T = 0,693 N_{40} / A \quad (22)$$

Здесь N_{40} - количество атомов калия-40 в препарате KCl массы m , г:

$$N_{40} = \delta N_A m / M, \quad (23)$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро; $M = 75$ г/моль – молярная масса соли, $\delta = 1,18 \cdot 10^{-4}$ – доля радиоактивного изотопа.

Период полураспада определяют по β -излучению калия, которое испускается в 89% распадов (см. (12)). Всего несколько грамм соли KCl в виде тонкого слоя, в котором поглощение β -частиц незначительное, располагают под счетчиком Гейгера (рис. 7, а). Он детектирует частицы, испущенные в направлении счетчика. Каждую секунду в источнике происходит A распадов (активность, Бк), из них счетчик регистрирует n_p распадов (см. (20)). Отношение

$$f = n_p / A \quad (24)$$

называют коэффициентом регистрации. Коэффициент f меньше единицы по нескольким причинам. Основная из них – геометрическая: только немногие частицы испущены в направлении счетчика (см. рис. 7, а). Коэффициент регистрации был рассчитан и приведен на препарате.

Для нахождения периода полураспада T необходимо измерить n_p (см. (20)); вычислить A (см. (24)), N_{40} (см. (23)) и T (см. (22)).

Измерение пробега и энергии β -частиц. Пробег d_0 , г/см², β -частиц в веществе находят *методом самоослабления*, когда частицы тормозятся в самом радиоактивном препарате. Для этого под счетчиком устанавливают препараты KCl в виде слоев различной толщины d , г/см². За одинаковое время измерения находят величину N_p , (см. (21)), которая является интенсивностью выходящего из препарата излучения. По результатам измерений строят графическую зависимость N_p от d (рис. 8). Кривая достигает насыщения при толщине слоя d_0 , которую принимаем за пробег β -частиц с максимальной энергией E_{max} .

Из результатов измерения пробега по формуле (14) находят значение E_{max} . Этот простой метод дает приближенное значение энергии. Для точных измерений используют приборы, в которых частицы отклоняются в магнитном поле.

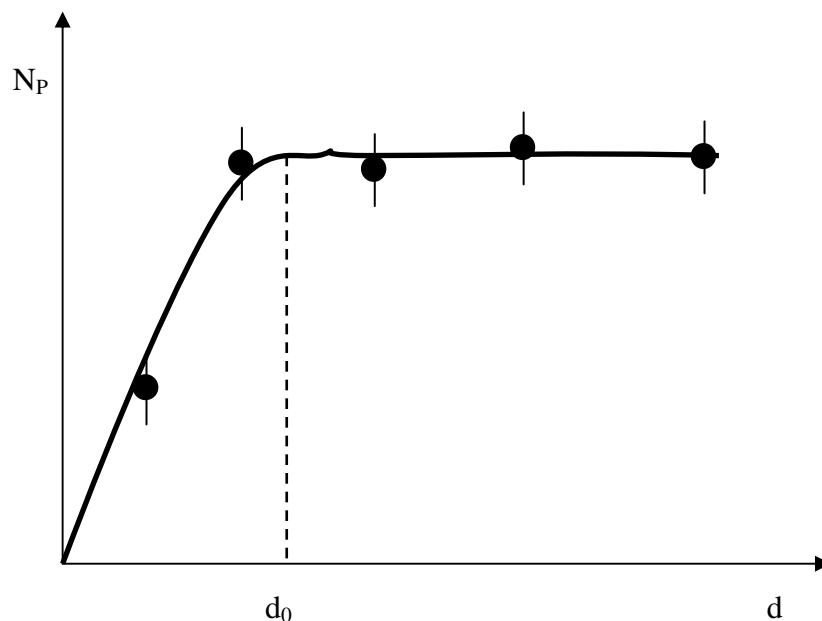


Рис. 8. Зависимость интенсивности β -излучения от толщины препарата

Измерение коэффициента поглощения γ -излучения. Коэффициент поглощения находят следующим способом. Из (15) логарифмированием получаем

$$\ln (I/I_0) = -\mu_m d. \quad (25)$$

В опыте за одинаковое время измеряют количество импульсов: N_ϕ -фона, N_0 - источника в отсутствие поглотителя и N – источника с поглотителем толщины d . Тогда отношение интенсивностей в (25) можно заменить, согласно (21), на отношение числа импульсов:

$$\ln [(N - N_\phi) / (N_0 - N_\phi)] = -\mu_m d.$$

Отсюда получаем

$$\mu_m = (1/d) \ln [(N_0 - N_\phi) / (N - N_\phi)] \quad (26)$$

8. Статистические погрешности при измерении радиоактивности

Случайные (статистические) погрешности обусловлены самой природой распада. Пусть за некоторое время счетчик зарегистрировал N_i частиц. Повторя измерения в тех же условиях, получим различные значения N_i : N_1, N_2, \dots, N_k , изменяющиеся случайным образом. Вероятность появления того или иного значения N_i дается распределением Пуассона [3]. Из него следует, что случайную погрешность можно найти из одного измерения (а не из нескольких, как для обычных измерений [4]).

Для достаточно большого числа N зарегистрированных частиц среднеквадратическая статистическая погрешность

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

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

$$N^* = (N - \sigma) \dots (N + \sigma) \text{ для } P = 0,68 \text{ или} \\ N^* = (N - 2\sigma) \dots (N + 2\sigma) \text{ для } P = 0,95.$$

Например, для $N = 100$ доверительный интервал $N^* = 90 \dots 110$ с вероятностью $P = 0,68$ или $N^* = 80 \dots 120$ с вероятностью $P = 0,95$. Если счетчик регистрировал все распады, а фоновое излучение мало, то N^* - искомое число распадов за данное время.

Относительная погрешность измерения величины N равна

$$\varepsilon = \sigma / N = 1 / \sqrt{N}.$$

С ростом N абсолютная погрешность $\sigma = \sqrt{N}$ растет, а относительная ε — уменьшается. Например, $\varepsilon = 0,1 = 10\%$ при $N = 100$ и $\varepsilon = 0,01 = 1\%$ при $N = 10^4$.

Чтобы измерить радиоактивность с малой статистической ошибкой, необходимо зарегистрировать большое число частиц.

Рассмотрим погрешности в случае, когда фоновым излучением пренебречь нельзя. Пусть за одинаковое время зарегистрировано N_ϕ импульсов фона со статистической погрешностью $\sigma_2 = \sqrt{N_\phi}$ и N импульсов от источника со статистической погрешностью $\sigma_1 = \sqrt{N}$. Погрешность измерения величины $N_p = N - N_\phi$ равна (см. [4])

$$\sigma_p = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2} = (N + N_\phi)^{1/2}. \quad (27)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ 1. β -ИЗЛУЧЕНИЕ

(суммарное время экспозиций примерно 1 час)

Порядок выполнения работы. Работа состоит из двух частей, выполняемых на различных установках одновременно двумя бригадами. В первой части изучают β -излучение, во второй — γ -излучение. После выполнения своей части бригады меняются местами.

Задание 1. Ознакомиться с установкой

Установка (рис. 9) состоит из счетчика Гейгера-Мюллера, слюдяное окошко которого обращено вниз, и блока регистрации. Под счетчиком устанавливают β -препараты из соли KCl. На передней панели блока регистрации расположены цифро-буквенный индикатор и управляющие кнопки. На задней стенке находятся сетевой выключатель и клемма заземления.

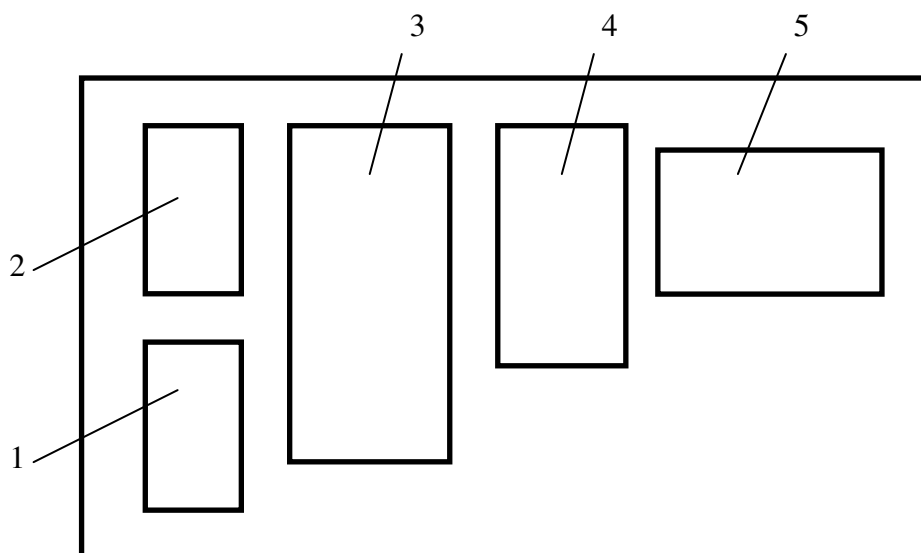


Рис. 9. Схема установки для β -излучения:

1 – препарат; 2 – счетчик Гейгера; 3 – бокс для препаратов; 4 – блок регистрации; 5 – индикатор; 6 – кнопки управления

1. Проверить наличие заземления. При отсутствии заземления обратиться к дежурному по лаборатории.

2. Вставить сетевую вилку в розетку и включить выключатель “Сеть” на задней стенке. После чего должны появиться подсветка выключателя, а на индикаторе – “*time 10.0 s*”. Эта запись означает, что время счета (экспозиция) будет 10 с. С помощью кнопок “+” и “-” можно задать экспозицию от 1 до 999 с.

3. Установить небольшую экспозицию, например 20 с. Если под счетчиком есть препарат, убрать его. Нажать и отпустить кнопку “Пуск”. При этом начинается регистрация импульсов фона. Верхняя строка индикатора показывает прошедшее время, а нижняя – число зарегистрированных импульсов (*imp.*). Показание индикатора считывают, когда секундомер остановится. Для повторения измерения нажать кнопку “Пуск”.

Задание 2. Измерить пробег и энергию β -частиц

1. Ознакомиться с методикой измерений (см. раздел 7 “Теоретической части”).

2. Подготовить табл. 1 и 2.

3. Установить экспозицию $t = 500$ с. Все измерения в заданиях 2, 3 выполнять с одинаковой экспозицией. Значение t записать в табл. 1. *Примечание:* во время длительных экспозиций необходимо обрабатывать результаты измерений (см. ниже).

4. Измерить фоновое излучение, когда под счетчиком отсутствует препарат. Нажать и отпустить кнопку “Пуск”. Когда счет прекратится, записать число импульсов фона N_{ϕ} в табл. 1.

Таблица 1

| | | | | |
|-------------|--------------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| $t = \dots$ | $N_{\phi} = \dots$ | $d_0 = \dots$ | $E_{max} = \dots$ | $\varepsilon = \dots$ |
|-------------|--------------------|---------------|-------------------|-----------------------|

Таблица 2

| | | | |
|--------------------|-----|----------------------|------------|
| $d, \text{г/см}^2$ | N | $N_p = N - N_{\phi}$ | σ_p |
| | | | |
| | | | |

Примечание: в табл. 5 строк

5. Измерить излучение препарата № 2. Толщину d слоя соли записать в табл. 2. Установить препарат под счетчиком до упора, измерить количество импульсов N , результат записать в табл. 2.

6. Повторить измерения п. 5 с препаратами № 3 – 6.

Обработать результаты измерений задания 2

1. По результатам измерений вычислить величину $N_p = N - N_{\phi}$ (см. (21)) и записать ее в табл. 2.

2. Вычислить статистическую погрешность σ_p для величины N_p (см. (27)) и записать ее в табл. 2.

3. Построить графическую зависимость N_p от d (см. рис. 8). Для каждой экспериментальной точки отметить на графике погрешность σ_p вертикальной чертой длиной σ_p в обе стороны от экспериментальной точки.

4. Через экспериментальные точки с учетом погрешностей провести плавную кривую. Толщину слоя d_0 , при которой кривая выходит на горизонтальный (или пологий) участок, принять за пробег β -частиц с максимальной энергией E_{max} . Результат измерения d_0 записать в табл. 1.

5. Вычислить E_{max} (см. (14)), результат записать в табл. 1.

6. Вычислить отклонение ε , %, результата измерения E_{max} от табличного значения 1,3 МэВ. Результат записать в табл. 1.

Задание 3. Измерить период полураспада

1. Ознакомиться с методикой измерений (см. раздел 7 “Теоретической части”).

2. Подготовить табл. 3.

Таблица 3

| | |
|--|-----------------|
| Коэффициент регистрации | $f =$ |
| Масса, г, KCl в препарате №1 | $m =$ |
| Количество атомов ^{40}K в препарате №1 | $N_{40} =$ |
| Количество импульсов | $N =$ |
| Регистрируемая активность, 1/с | $n_p =$ |
| Активность, Бк | $A =$ |
| Период полураспада (в секундах и годах) | $T =$ |
| Погрешность измерения T , % | $\varepsilon =$ |

3. Характеристики препарата №1 (m, f), приведенные на препарате, записать в табл. 3.

4. Для препарата №1 измерить количество импульсов N за 500 с, результат записать в табл. 3.

5. Выключить питание установки тумблером на задней стенке блока регистрации.

Обработать результаты измерений задания 3

1. Вычислить и записать в табл. 3 следующие величины: N_{40} (см. (23)), n_p (см. (20)); A (см. (24)); T (см. (22)).

2. Вычислить относительное отклонение полученного значения T от табличного $T_T = 1,3 \cdot 10^9$ лет: $\varepsilon = 100 \% (T - T_T) / T_T$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ 2. γ -ИЗЛУЧЕНИЕ

(суммарное время экспозиций примерно 1/2 часа)

Задание 4. Ознакомиться с установкой

Для измерения поглощения γ -излучения используется установка, состоящая из дозиметра, источника излучения и поглотителя (см. рис. 7, б). Внутри дозиметра находятся четыре цилиндрических счетчика Гейгера-Мюллера. Источником γ -излучения служит КСI массы несколько килограмм. Поглотитель вставляют между излучателем и счетчиками в трубу прямоугольного сечения. Дозиметр работает от 9-вольтового адаптера.

Счетчики обернуты свинцовой фольгой, в которой происходят взаимодействия γ -квантов с передачей энергии электрону (и позитрону). Испущенные калием β -частицы поглощаются в корпусе дозиметра и свинце, поэтому не регистрируются.

1. Включить питание дозиметра: вставить в розетку сетевую вилку, при этом должен загореться светодиод адаптера. После включения питания прибор начинает работать, а на индикаторе появляются цифры. (*Примечание.* На правой боковой стенке дозиметра имеется выключатель; нормально он должен быть включен и заклеен скотчем).

2. Ознакомиться с работой дозиметра и его индикатором (рис. 10). Прибор

0.007

00.30

работает в автоматическом циклическом режиме. При каждом срабатывании счетчиков издается звуковой щелчок, а электрический импульс поступает в пересчетное устройство. В течение 18 с прибор считает импульсы, при этом положение десятичной точки на индикаторе показано на рис. 10, а. По окончании счета прибор издает звуковой сигнал, а на индикаторе в течение нескольких секунд высвечивается результат измерения (рис. 10, б). Затем результат сбрасывается и начинается новый цикл.

Данный прибор предназначался для измерения мощности дозы γ -излучения в микрозивертах в час (мкЗв/ч). При использовании в данной работе число на индикаторе необходимо увеличить в сто раз (т.е. отбросить десятичную точку), тогда получим число пар зарегистрированных импульсов. В таком виде результат записывают.

Задание 5. Измерить фон и γ -излучение источника

1. Подготовить табл. 4, в которой i - порядковый номер отсчета на индикаторе дозиметра. Во всех столбцах таблицы 4 число измерений должно быть одинаковым и равным 15 (или больше).

Таблица 4

| i | Фон | Источник | Fe, $x = \dots$ см | Al, $x = \dots$ см |
|-----|--------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| | $N_{\phi} = \dots$ | $N_0 = \dots$ | $N = \dots$ | $N = \dots$ |
| | | $N_0 - N_{\phi} = \dots$ | $N - N_{\phi} = \dots$ | $N - N_{\phi} = \dots$ |

Примечание: в таблице $i = 1 - 15$.

2. Измерить фоновое излучение. Убрать контейнер с солью на расстояние больше полуметра от дозиметра. Записать во второй столбец табл. 4 пятнадцать показаний дозиметра (десятичную точку отбрасывать).

3. Вычислить суммарное количество импульсов фона $N_{\phi} = 2 \sum N_i$. Результат записать в табл. 4. *Примечание:* умножаем на два, т. к. на индикаторе число пар импульсов.

4. Установить контейнер с KCl вплотную к трубе, в которой не должно быть поглощающих пластин. Если контейнер в плане не квадратный, то к счетчикам должна быть обращена узкая сторона. Повторить измерения п. 2, результаты записать в третий столбец табл. 4. Вычислить количество импульсов $N_0 = 2 \sum N_i$. Разность $N_0 - N_{\phi}$ равна интенсивности γ -излучения калия в относительных единицах.

Задание 6. Измерить поглощение γ -излучения в железе и алюминии

1. Три железных пластины толщины примерно по 6 мм сложить вместе и измерить суммарную толщину x , результат записать в табл. 4. Вставить все пластины в трубу. Результаты 15 измерений записать в четвертый столбец табл. 4. Вычислить $N = 2 \sum N_i$. Разность $N - N_{\phi}$ равна интенсивности прошедшего через железо γ -излучения в относительных единицах.

- Взять пластину из алюминия толщины 16 – 18 мм, измерить толщину x . Повторить измерения п. 1, результаты записать в табл. 4.
- Выключить установку.

Обработать результаты измерений задания 6

- Подготовить табл. 5.
- Вычислить массовую толщину $d = x \cdot \rho$, где ρ , г/см³, x , см. Вычислить μ_m для железа и алюминия (см. (26)). Вычислить $d_{0,5}$ (см. (16)). Результаты записать в табл. 5.
- Объяснить, почему значения μ_m и $d_{0,5}$ для железа и алюминия мало различаются.

Результаты измерения коэффициента поглощения

Таблица 5

| Поглотитель | ρ , г/см ³ | x , см | d , г/см ² | μ_m , см ² /г | $d_{0,5}$, г/см ² |
|-------------|-------------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Железо | 7,8 | | | | |
| Алюминий | 2,7 | | | | |

Задание 7. Вычислить дозу облучения

В теле человека присутствует калий, распад которого дает вклад в дозу облучения. Удельная активность калия a_0 , Бк/г, (см. (5), (15), (16)):

$$a_0 = A / m = 0,693 \delta N_A / (M T), \quad (28)$$

где $M = 39$ г/моль – молярная масса калия. Из (28) для табличного значения $T = 1,3 \cdot 10^9$ лет получаем $a_0 = 31$ Бк/г.

- Для массы калия в теле человека $m_k = 140$ г вычислить активность калия $A_k = m_k a_0$. Результат записать в табл. 6.

Дозиметрия калия

Таблица 6

| | | |
|--------------------------------------|-----------|--|
| Активность калия в теле человека, Бк | $A_k =$ | |
| Поглощенная энергия, Дж | $E =$ | |
| Поглощенная доза, Гр | $D_k =$ | |
| Эквивалентная доза, Зв | $H_k =$ | |
| Доля годовой дозы | H_k / H | |

- Вычислить энергию E , Дж, поглощенную в теле человека за год. Принять, что при одном распаде поглощается энергия 0,5 МэВ. Результат записать в табл. 6. *Примечание:* 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

- Вычислить годовую поглощенную дозу D_k (см. (17)) и эквивалентную дозу H_k (см. (18)). Считать, что калий равномерно распределен по всему телу и его излучение поглощается массой человека. Результаты записать в табл. 6.

4. Вычислить отношение H_k/H , где H – средняя годовая доза естественного излучения (см. (19)). Результат записать в табл. 6. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните процесс распада нейтрона.
2. Из какого места атома вылетает электрон при β^- -распаде?
3. Что такое электронный захват?
4. Какая схема распада калия-40?
5. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
6. Что такое постоянная распада, среднее время жизни, период полураспада и какая связь между ними?
7. Что такое активность и в каких единицах она измеряется?
8. Какие измерения необходимо выполнить, чтобы найти период полураспада в случаях малого и большого времени жизни?
9. Как устроен и работает счетчик Гейгера-Мюллера?
10. Какие процессы приводят к торможению заряженных частиц в веществе?
11. Какие взаимодействия испытывает γ -квант в веществе?
12. Каковы абсолютная и относительная статистические погрешности измерения скорости счета, если за некоторое время t (точно) зарегистрировано 400 импульсов?

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. Иродов И.Е. Квантовая физика. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 – 272 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. Мет. указ. к лаб. работе М-1. – М.: МВТУ, 1984.
6. Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 79.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Виды радиоактивных превращений
2. Закон радиоактивного распада
3. Радиоактивность калия
4. Поглощение излучений в веществе
5. Дозиметрия излучений
6. Счетчик Гейгера-Мюллера
7. Методика измерений

8. Статистические погрешности при измерении радиоактивности

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ 1. β -ИЗЛУЧЕНИЕ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ 2. γ -ИЗЛУЧЕНИЕ

Контрольные вопросы

Список литературы

ОГЛАВЛЕНИЕ