

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.Э. БАУМАНА
И.Н. Фетисов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РАСПАДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО
ЗАХВАТА В КАЛИИ-40

Методические указания к выполнению лабораторной работы
Я-60 по курсу общей физики
Под редакцией Г.В. Балабиной
Москва, 2007

Рассмотрены виды радиоактивных превращений, закон распада, методика измерения среднего времени жизни атомов. Для студентов 2-го курса.

Цель работы – ознакомление с радиоактивностью, определение постоянной распада и среднего времени жизни для процесса электронного захвата в калии-40.

Теоретическая часть

1. Виды радиоактивных превращений

Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов, называемых нуклонами. Протон имеет положительный элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а нейтрон не имеет электрического заряда. Масса нейтрона немного превышает массу протона. Масса нуклонов примерно в 1840 раз больше массы электрона. Между нуклонами действуют ядерные силы притяжения. Число нуклонов в ядре (массовое число) обозначают A , а число протонов (зарядовое число) - Z . Ядро химического элемента X записывают в виде A_ZX , например, ядро гелия ${}^4_2\text{He}$.

Некоторые ядра самопроизвольно (спонтанно) изменяют свой состав, соответственно изменяются числа Z и A ; при этом ядро испускает частицы. Это явление называют *радиоактивностью* (открыл А. Беккерель в 1896г.). Радиоак-

тивный распад может происходить, если он не противоречит закону сохранения полной энергии, включающей энергию покоя, т.е. если разность между массой исходного ядра и суммарной массой продуктов распада положительна.

К основным радиоактивным превращениям относятся α - и β -распады. Распадающееся ядро называют материнским, а образующееся в результате распада – дочерним.

Альфа-распад. При α -распаде ядро (обычно тяжелое) испускает ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, которое называют α -частицей. Схему распада представляют в виде ${}^A_zX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{z-2}Y$, где X и Y - символы химических элементов. Например, превращение урана в торий: ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{234}_{90}\text{Th}$.

Квантовая механика объясняет испускание α -частицы как туннельный эффект. Потенциальный барьер для α -частицы на поверхности ядра создается действием двух сил – ядерного притяжения и кулоновского отталкивания.

Бета-распад. Известны три разновидности β -распада. Во всех случаях в ядре происходит превращение нейтрона в протон или протона в нейтрон, при этом число нуклонов в ядре A не изменяется.

1. Электронный β -распад (β^- -распад). Примером такого распада служит превращение свободного нейтрона n в протон p , электрон e^- и электронное антинейтрино ν_e : $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$.

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



2. Позитронный β -распад (β^+ -распад). В этом случае ядро испускает позитрон и электронное нейтрино: ${}^A_zX \rightarrow {}^A_{z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu_e$.

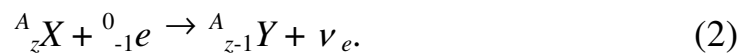
При позитронном распаде в ядре происходит превращение протона в нейтрон, позитрон и нейтрино: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$.

Позитрон является античастицей электрона, имеющей такую же массу, но положительный элементарный заряд.

Свободный протон, например, в легком изотопе водорода ${}^1_1\text{H}$, не распадается на нейтрон и позитрон, так как суммарная масса продуктов распада больше массы протона. В ядре распадающийся протон получает недостающую энергию от других нуклонов.

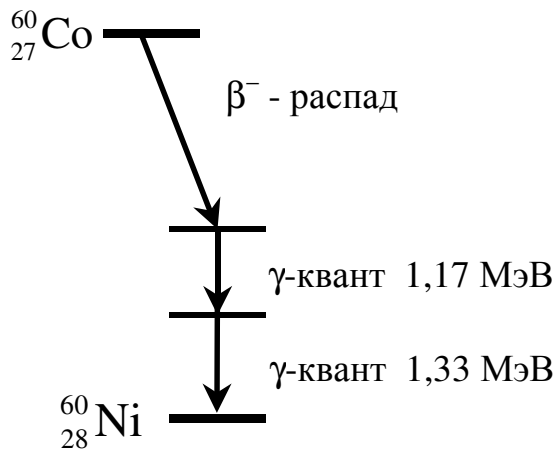
Нейтрино и антинейтрино – незаряженные элементарные частицы, масса покоя которых много меньше массы электрона. Нейтрино участвуют только в слабых и гравитационных взаимодействиях и обладают фантастической проникающей способностью в веществе (средний пробег до взаимодействия в плотном веществе $\sim 10^{15}$ км!).

3. Электронный захват. Третий вид β -распада - захват ядром собственного орбитального электрона, чаще с ближайшей K – оболочки (другое название – “ K – захват”):



При этом в ядре протон и электрон превращаются в нейтрон и нейтрино $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$.

Гамма-излучение. Атомное ядро, состоящее из двух и более нуклонов, может находиться в состояниях с различными дискретными значениями 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 состояниях. 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. Энергия γ -кванта может достигать нескольких МэВ, в то время как энергия фотонов видимого излучения составляет примерно 2 эВ. (Электрон-вольт – энергия, приобретаемая частицей с элементарным зарядом в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.)



Примером такого процесса является электронный распад кобальта-60. Дочернее ядро (никель-60) образуется во втором возбужденном состоянии и испускает последовательно два γ -кванта с энергиями 1,17 МэВ и 1,33 МэВ (рис. 1).

Рис. 1

2. Энергия распада

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

Наиболее простой случай – 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 $K = p^2 / 2m$, где m – масса частицы. Таким образом, энергия распада делится между частицами однозначно: отношение энергий α -частицы и дочернего ядра обратно отношению их масс. При распаде тяжелого ядра энергия α -частицы примерно в 50 – 60 раз больше энергии дочернего ядра.

При электронном распаде энергия делится между тремя частицами: дочерним ядром, электроном и антинейтрино. В этом случае по-прежнему дочернее ядро получает небольшую долю энергии распада. Однако деление энергии между электроном и антинейтрино неоднозначное. В результате электроны распада имеют различную энергию – от очень малой до некоторой максимальной

энергии $E_{\text{макс}}$, близкой к энергии распада. Средняя энергия электронов обычно близка к $1/3$ максимальной энергии.

3. Закон радиоактивного распада

Атомные ядра не стареют, а их распад представляет собой случайный процесс, подчиняющийся определенным статистическим закономерностям.

Пусть в момент времени t имеется N одинаковых радиоактивных ядер. Вероятность распада ядра в единицу времени обозначим λ , эту величину называют *постоянной распада*. Тогда за время dt распадется $dN = \lambda N dt$ ядер. Число распадов за единицу времени, равное

$$A = dN / dt = \lambda N, \quad (3)$$

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

Приращение числа нераспавшихся ядер за время dt равно $dN = - \lambda N dt$.

Интегрируя это выражение по времени, получим

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (4)$$

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

Соотношение (4) выражает *закон радиоактивного распада*: число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальному закону. Активность, пропорциональная числу нераспавшихся атомов, убывает по такому же закону:

$$A = \lambda N = \lambda N_0 \exp(-\lambda t) = A_0 \exp(-\lambda t), \quad (5)$$

где $A_0 = \lambda N_0$ – активность в момент времени $t = 0$.

Время жизни радиоактивного вещества характеризуют двумя величинами – средним временем жизни и периодом полураспада. Можно показать, что *среднее время жизни* равно

$$\tau = 1 / \lambda. \quad (6)$$

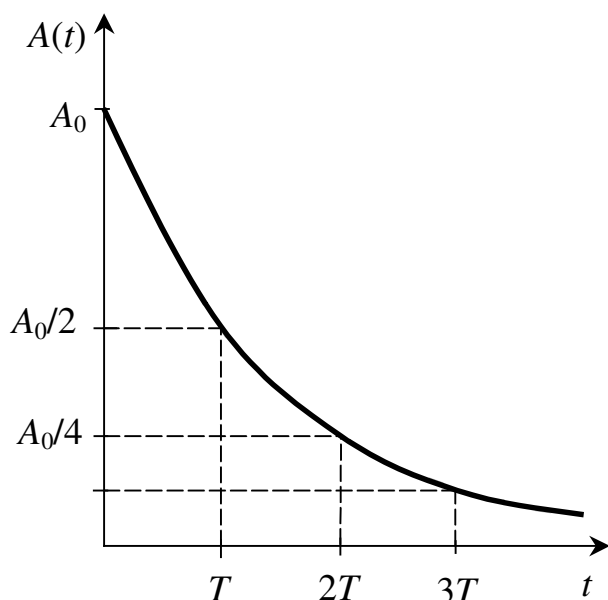


Рис. 2

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

$$T = (\ln 2) / \lambda = 0,693 / \lambda = 0,693 \tau. \quad (7)$$

Запишем закон распада через период полураспада

$$N(t) = N_0 \exp(-0,693 t / T), \quad (8)$$

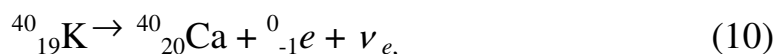
$$A(t) = A_0 \exp(-0,693 t / T). \quad (9)$$

Убывание активности со временем показано на рис. 2.

4. Радиоактивность калия

Природный калий состоит из смеси трех изотопов – двух стабильных ^{39}K и ^{41}K и одного радиоактивного ^{40}K . Доля радиоактивного изотопа составляет $\delta = 1,18 \cdot 10^{-4}$. Его период полураспада порядка возраста Земли и будет найден в данной работе.

Калий в 89% случаев испытывает β^- -распад (1)



а в 11% случаев – электронный захват (2)

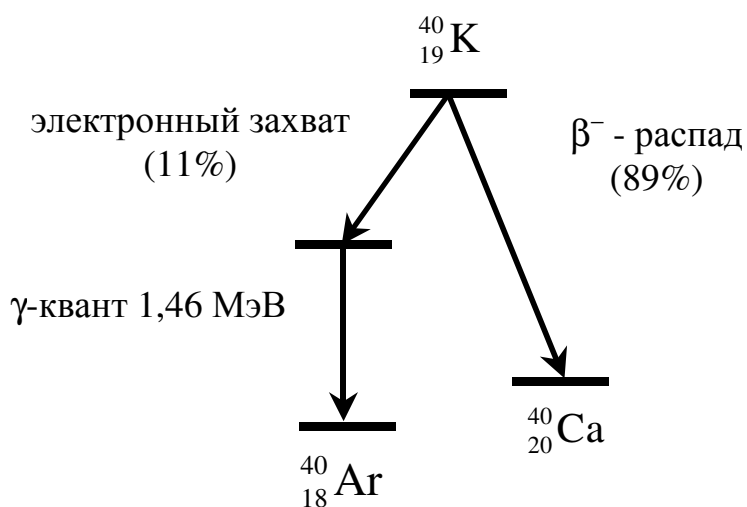
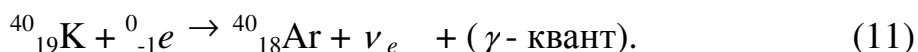


Рис. 3

Ядро аргона образуется в возбужденном состоянии и испускает γ -квант с энергией 1,46 МэВ. Электроны распада имеют максимальную энергию 1,3 МэВ. Таким образом, на 100 распадов испускается в среднем 89 электронов и 11 γ -квантов. Схема распада пока-

зана на рис. 3. Распады (10) регистрируют по испускаемым электронам, а распады (11) – по γ -излучению.

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; поэтому в почву вносят калийные удобрения. Большую часть необходимого человеку калия он получает из пищи растительного происхождения. В теле человека содержится примерно 100 г калия, его распад вносит ощутимый вклад в естественную дозу облучения.

5. Взаимодействие излучений с веществом

В веществе быстрые заряженные частицы (α - и β -частицы) теряют свою энергию на ионизацию и возбуждение атомов. Пробег α -частицы до остановки составляет всего несколько сантиметров в воздухе, а в плотном веществе – в тысячу раз меньше. Например, лист бумаги полностью задерживает α -частицы. Пробег электронов существенно больше, например, он равен 2 мм алюминия для β -частиц с энергией 1 МэВ. Причина такого резкого различия пробегов заключается в том, что при одинаковой энергии тяжелые α -частицы движутся медленнее, дольше взаимодействуют с атомными электронами, передавая им больший импульс.

При взаимодействии γ -квантов с атомами происходят следующие процессы: эффект Комптона, атомный фотоэффект и рождение пары электрон-позитрон. Эти процессы изображены схематически на рис. 4 (на рис. 4, а – до взаимодействия).

Эффект Комптона – это упругое рассеяние γ -кванта на свободных или слабо связанных атомных электронах, при котором часть энергии и импульса квант (фотон) передает электрону, покидающему атом (рис. 4, б). В одном акте

комптоновского процесса электрон получает значительную часть энергии кванта, составляющую в среднем 45 % для квантов с энергией 1 МэВ.

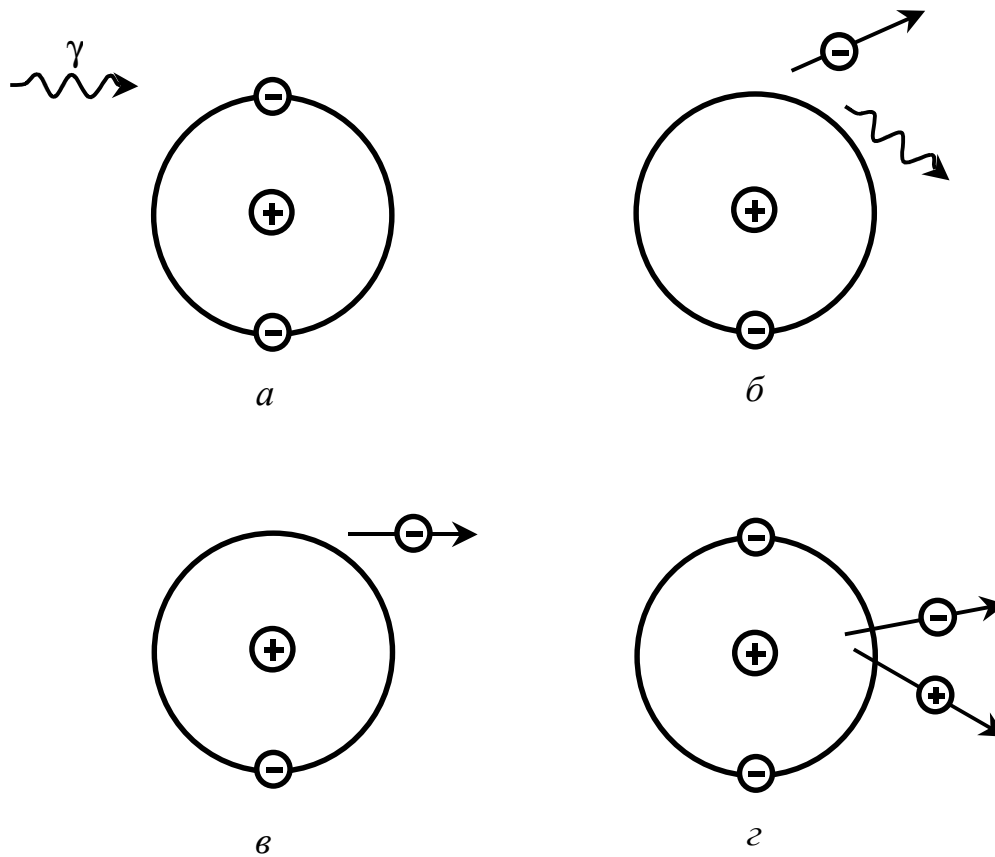


Рис. 4

При *атомном фотоэффекте* фотон высокой энергии поглощается одним из атомных электронов, обычно из внутренних оболочек, и выбивает его из атома (рис. 4, в). 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: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$ (рис. 4, г). Для этого процесса энергия γ -кванта должна превышать суммарную энергию покоя электрона и позитрона, равную примерно 1 МэВ.

В отличие от ионизационного торможения заряженных частиц, которые теряют энергию мелкими порциями, γ -квант передает энергию электрону (и позитрону) либо полностью в одном взаимодействии (фотоэффект, рождение пары), либо крупными порциями в комптоновском процессе. γ -Квант может

пролететь значительное расстояние, не испытав ни одного взаимодействия, например, сотни метров в воздухе. Энергия, переданная квантом электрону, тратится на ионизацию на малой длине пробега.

Узкий пучок γ -квантов ослабляется в веществе по экспоненциальному закону Бугера. Излучение с энергией квантов 1 МэВ ослабляется в $e = 2,72$ раза в слое 15 см воды или 1 см свинца.

6. Сцинтилляционный детектор излучений

В некоторых веществах, называемых сцинтилляторами, под действием отдельных быстрых заряженных частиц возникают слабые вспышки света – сцинтилляции (разновидность люминесценции). Например, яркое свечение экрана электронно-лучевой трубки телевизора обусловлено сцинтилляциями большого потока быстрых электронов.

Сцинтилляционный детектор γ -квантов схематически показан на рис. 5.

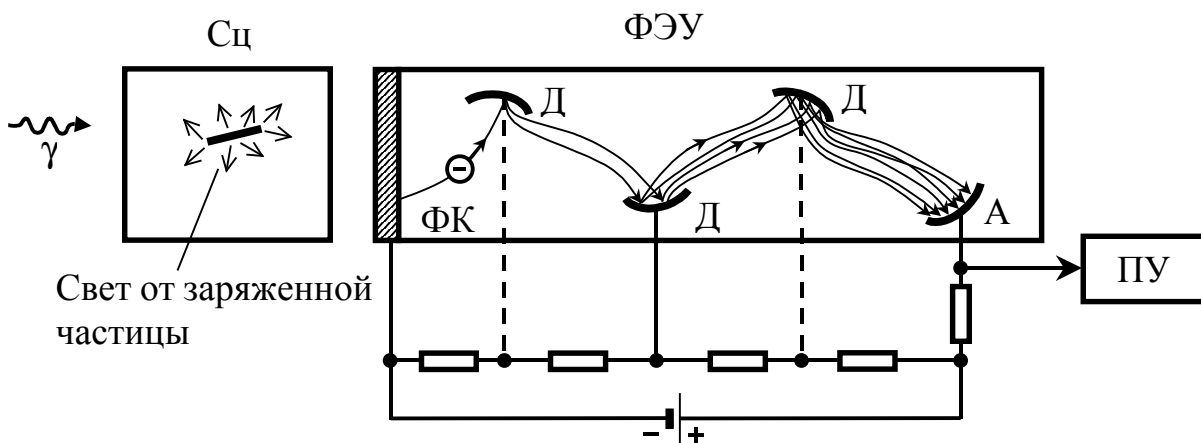


Рис. 5

Сцинтиллятором (СЦ) служит кристалл NaI с небольшой добавкой таллия размером несколько сантиметров. В результате рассмотренных выше процессов γ -квант передает энергию заряженным частицам (электрону, позитрону) в самом сцинтилляторе. Сцинтилляция производится заряженной частицей.

Слабая световая вспышка регистрируется чувствительным приемником света - фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). На стеклянный торец трубки ФЭУ с внутренней стороны нанесен тонкий слой вещества с малой работой выхода электронов, который служит фотокатодом ФК. Фотоны сцинтилляции-

онной вспышки выбивают из ФК электроны (внешний фотоэффект). Поскольку этих электронов очень мало, их размножают, прежде чем они достигнут анода А и создадут в его цепи ток. Для этого между фотокатодом и анодом расположено до 10-15 промежуточных электродов Д, называемых динодами. Высокое напряжение (до 1500 В) с помощью делителя на резисторах подается на диноды и анод. Положительный потенциал каждого последующего электрода возрастает примерно на 100 В. Испущенные фотокатодом электроны разгоняются электрическим полем и фокусируются на первом диноде. Они выбивают из динода вторичные электроны, число которых в несколько раз больше числа падающих электронов (это явление называют вторичной электронной эмиссией). Испущенные первым динодом электроны направляются на второй динод, повторяя процесс размножения, и т.д. В результате количество электронов может увеличиться в 10^8 раз. Лавина электронов достигает анода и создает в его цепи значительный электрический импульс, который регистрируется пересчетным устройством ПУ. Каждый импульс соответствует одному зарегистрированному γ -кванту (или быстрой заряженной частице фонового космического излучения).

7. Измерение постоянной распада и среднего времени жизни

Для различных радионуклидов среднее время жизни (или период полураспада) изменяется в огромных пределах – примерно от микросекунды до 10^{16} лет. Если период полураспада небольшой, то его измеряют по убыванию активности в процессе измерений, согласно формуле (9).

Для долгоживущих ядер этот метод неприемлим, поэтому воспользуемся соотношением (3): $A = \lambda N$. Следовательно, постоянная распада равна

$$\lambda = A / N, \quad (12)$$

среднее время жизни (6)

$$\tau = 1 / \lambda = N / A, \quad (13)$$

а период полураспада (7) $T = 0,693 \tau$.

Количество нераспавшихся ядер N изотопа калий-40 найдем, исходя из массы m в кг соли калия (KCl):

$$N = \delta N_A m / M, \quad (14)$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро (число молекул в одном моле), $M = 0,075$ кг/моль – молярная масса соли, $\delta = 1,18 \cdot 10^{-4}$ – доля радиоактивного изотопа.

Как отмечалось выше ((10), (11)), калий-40 распадается в 89% случаях с испусканием электрона, а в 11% - путем захвата орбитального электрона. В последнем случае дочернее ядро излучает γ -квант. Каждый вид распада характеризуют своей постоянной распада: λ_e – для испускания электрона и λ_γ – для захвата электрона и испускания γ -кванта. Отношение этих постоянных равно $\lambda_e / \lambda_\gamma = 89/11 = 8,1$. Следовательно, $\lambda_e = 8,1 \lambda_\gamma$, а полная постоянная распада равна

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_\gamma = 9,1 \lambda_\gamma. \quad (15)$$

В данной работе сцинтилляционный счетчик регистрирует отдельные γ -кванты, испускаемые в процессе электронного захвата. Распады с излучением электрона не регистрируются, так как электроны поглощаются в самой соли и в стенках счетчика. Поэтому в данной работе мы измеряем непосредственно характеристики распада, относящиеся только к процессу электронного захвата: гамма-активность A_γ (число распадов в секунду с испусканием γ -кванта), соответствующие ей постоянную распада λ_γ и среднее время жизни τ_γ :

$$\lambda_\gamma = A_\gamma / N, \quad (16)$$

среднее время жизни

$$\tau_\gamma = 1 / \lambda_\gamma \quad (17)$$

Тогда полная постоянная распада может быть найдена по формуле (15).

Рассмотрим методику измерения гамма-активности A_γ , разработанную автором методических указаний [3]. Для повышения точности измерений препарату калиевой соли массой до нескольких килограмм придана специальная

форма – в виде половины сферического слоя (рис. 6). Центр сцинтиллятора совпадает с центром сферического слоя.

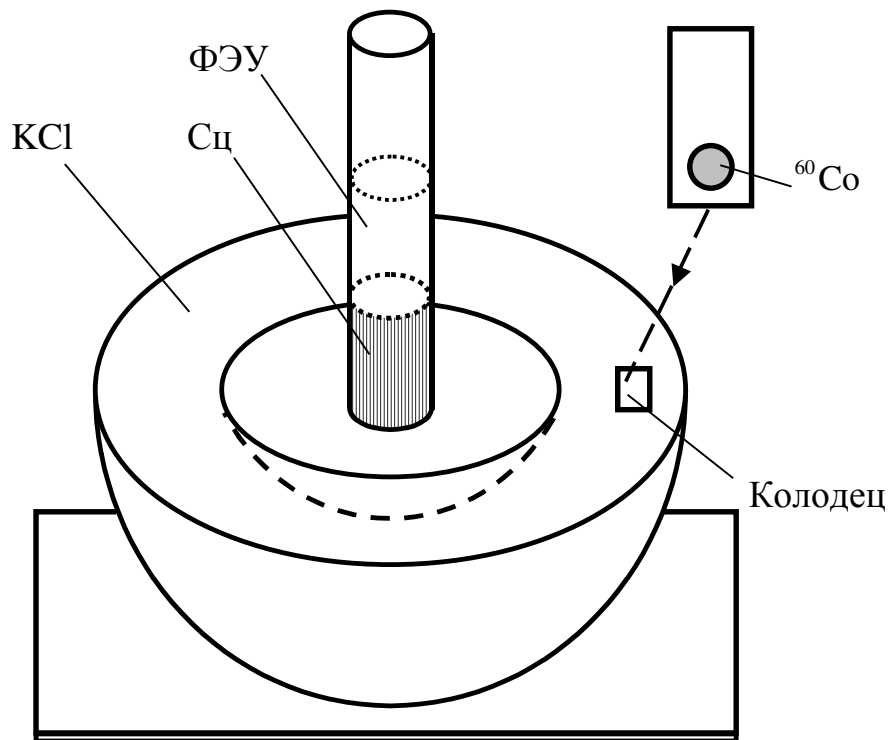


Рис. 6

Сначала измеряют фоновое излучение, когда радиоактивный препарат находится вдали от детектора, а детектор срабатывает главным образом от высокоэнергичных частиц космического излучения. Хотя это излучение незначительное, но его необходимо учитывать, так как изучаемое излучение калия также очень слабое. В результате измерений получают среднюю скорость счета импульсов на выходе ФЭУ под действием фонового излучения: $n_{\text{ф}} = N_{\text{ф}} / t$, где $N_{\text{ф}}$ – число зарегистрированных импульсов за время измерения t .

Затем калиевый источник устанавливают в рабочее положение под детектором и аналогичным образом находят скорость счета $n_{\text{к,ф}}$, которая равна сумме скоростей счета от калия $n_{\text{к}}$ и фона: $n_{\text{к,ф}} = n_{\text{к}} + n_{\text{ф}}$. Отсюда получают скорость счета от излучения калия $n_{\text{к}} = n_{\text{к,ф}} - n_{\text{ф}}$. Величина $n_{\text{к}}$ – это среднее число γ -квантов калия, регистрируемых детектором за 1 с. При этом препарат испускает за одну секунду $A \gamma$ квантов. Отношение

$$f = n_{\text{к}} / A \gamma \quad (18)$$

называют *коэффициентом регистрации* γ -квантов. Коэффициент регистрации $f \ll 1$ по двум основным причинам: 1) кванты, испускаемые во всех направлениях, редко попадают в небольшой сцинтиллятор, 2) некоторые кванты при пролете через сцинтиллятор не передают энергию электронам (позитронам), поэтому нет и световой вспышки.

Для нахождения численного значения f выполняют вспомогательный опыт - калибровку установки. В нем используется дополнительный источник γ -излучения типа К-3А с изотопом кобальт-60 небольшой известной активности $A_{\text{коб}}$. Ядро $^{60}_{27}\text{Co}$ распадается с испусканием электрона и двух γ -квантов со средней энергией 1,25 Мэв, мало отличающейся от энергии γ -квантов при распаде калия (рис. 1). Радиоактивный кобальт находится внутри стальной герметичной капсулы диаметром 3 см. Стенки капсулы полностью поглощают β -излучение и прозрачны для γ -излучения.

При выполнении калибровки источник кобальт-60 опускают в “колодец” – углубление, находящееся в середине толщины калиевого препарата (рис. 6), и измеряют скорость счета $n_{\text{коб,к,ф}}$, которая равна сумме скоростей счета кобальта, калия и фона: $n_{\text{коб,к,ф}} = n_{\text{коб}} + n_{\text{к}} + n_{\text{ф}}$. Отсюда получаем

$$n_{\text{коб}} = n_{\text{коб,к,ф}} - (n_{\text{к}} + n_{\text{ф}}) = n_{\text{коб,к,ф}} - n_{\text{к,ф}}.$$

Из результатов измерений находят коэффициент регистрации

$$f = n_{\text{коб}} / (2 A_{\text{коб}}). \quad (19)$$

Коэффициент 2 учитывает, что кобальт при одном распаде испускает два γ -кванта.

Детальный анализ условий измерения показывает [3], что коэффициенты регистрации излучения калия (18) и кобальта (19) примерно одинаковые.

Теперь из результатов измерений можно найти характеристики распада с испусканием γ -излучения: активность A_{γ} из формулы (18), постоянную распада λ_{γ} и среднее время жизни τ_{γ} по формулам (16) и (17).

8. Случайные погрешности при измерениях радиоактивности

Встречаются измерения, в которых подсчитывается число событий, происходящих случайно, например, число радиоактивных распадов или вызовов в телефонной сети. Результат подобных измерений выражается целым числом, а методика оценки случайной погрешности имеет особенности.

Пусть при измерении радиоактивности счетчик зарегистрировал N_i частиц за время t , малое по сравнению с периодом полураспада. Повторяя измерения в тех же условиях, получим различные значения N_i : N_1, N_2, \dots, N_k , изменяющиеся случайным образом, что отражает вероятностный характер процесса распада. Из результатов большого числа k измерений найдем среднее число зарегистрированных частиц за время t $\langle N \rangle = \sum N_i / k$.

Радиоактивный распад подчиняется определенным статистическим закономерностям – т.н. распределению Пуассона [4]: вероятность $P(N)$ того, что счетчик зарегистрирует N частиц при среднем $\langle N \rangle$, равна

$$P(N) = \langle N \rangle^N \exp(-\langle N \rangle) / N!.$$

В качестве примера на рис. 7, а приведено распределение Пуассона для $\langle N \rangle = 0,8$. В этом случае с наибольшей вероятностью результат измерения будет равен 0 или 1. При малых $\langle N \rangle$ распределение асимметрично. Однако по мере увеличения $\langle N \rangle$ распределение становится симметричным, а его огибающая стремится к распределению Гаусса, которое характерно для распределения ре-

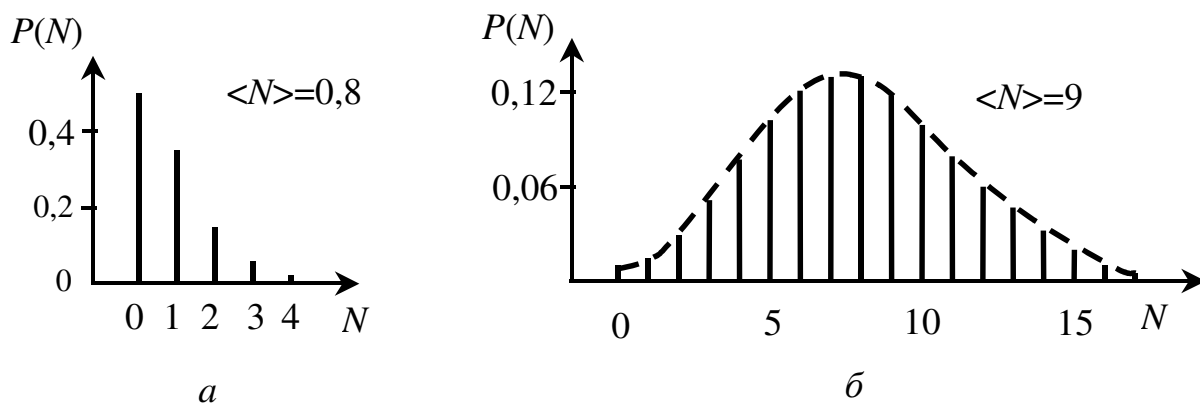


Рис. 7

зультатов измерения непрерывно изменяющихся величин [5]. Это видно на рис.

7, б, где вертикальными линиями показано распределение Пуассона для $\langle N \rangle = 9$, а пунктирной кривой – соответствующее распределение Гаусса.

Из теории вероятности следует простое правило для оценки случайной погрешности при измерении радиоактивности. Если за некоторое время измерений счетчик зарегистрировал достаточно большое число частиц N ($N > 100$), то доверительный интервал может быть получен из одного измерения. Искомая (истинная) величина с доверительной вероятностью $P = 0,68$ лежит в доверительном интервале от $N - \sqrt{N}$ до $N + \sqrt{N}$.

Относительная погрешность измерения равна $\varepsilon = \sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N}$.

Например, пусть счетчик зарегистрировал $N = 100$ распадов. Тогда можно утверждать, что с вероятностью $P = 0,68$ истинное (среднее) число распадов за это время лежит в интервале от 90 до 110. Кроме того, если счетчик зарегистрировал 100 частиц (“импульсов”), то в повторном измерении за то же время это число скорее всего будет другим, с большой вероятностью находясь в интервале от 90 до 110.

С ростом N абсолютная погрешность \sqrt{N} растет, а относительная – уменьшается. Например, относительная погрешность равна $\varepsilon = 0,1 = 10\%$ при $N=100$ и $\varepsilon = 0,01 = 1\%$ при $N = 10\,000$.

9. Дозиметрия излучений

Для оценки биологических последствий воздействия излучений необходимо контролировать дозы ионизирующих излучений.

Поглощенной дозой называют отношение поглощенной энергии излучения к массе поглощающего вещества

$$D = E / m. \quad (20)$$

Единица поглощенной дозы называется *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 удельных потерь энергии заряженной частицей (энергией на единицу длины трека). Чем больше эти потери, тем опаснее излучение. Поэтому поглощенную дозу необ-

ходимо умножать на коэффициент K , называемый коэффициентом качества излучения. В результате получают величину, называемую *эквивалентной дозой*

$$H = K D. \quad (21)$$

Единица эквивалентной дозы - *зиверт* (Зв). Для излучений с минимальной удельной потерей энергии (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 20 Зв.

Человек постоянно облучается частицами космического излучения и естественными радиоактивными веществами внутри организма (основной фактор) и вне его. В различных географических районах годовая доза естественного облучения составляет 0,2 ...2 мЗв.

Дозу H в мЗв от γ - источника активности A в Бк за время облучения t в часах на расстоянии r в м можно рассчитать по формуле

$$H = \Gamma A t / r^2. \quad (22)$$

Для γ - источника кобальт-60 коэффициент пропорциональности равен $\Gamma = 4,14 \cdot 10^{-10}$ мЗв м² час⁻¹ Бк⁻¹.

Вредное воздействие внешнего облучения можно уменьшить, сокращая время облучения, увеличивая расстояние до источника и применяя поглощающие экраны.

Экспериментальная часть

1. Выполнение эксперимента

Задание 1. Ознакомиться с установкой и подготовить ее к работе.

1. Ознакомиться с составом и назначением устройств установки.

Установка (рис. 8) состоит из гамма-радиометра СРП-88 и пересчетного прибора ПСО2-5.

Сцинтилляционный детектор 2 содержит сцинтиллятор СЦ, ФЭУ и преобразователь низкого напряжения в высокое для питания ФЭУ. Пульт 3 – электронный прибор для связи блока детектора с пересчетным прибором, его индикатор не используется в данной работе.

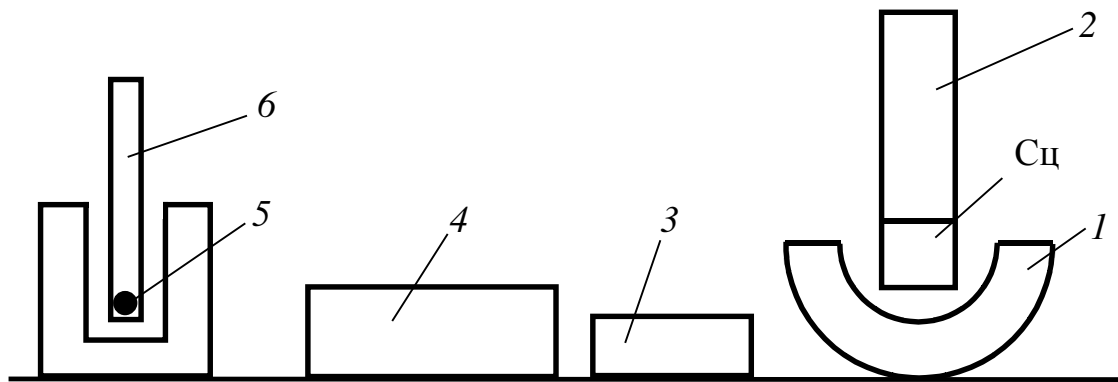


Рис. 8

Пересчетный прибор 4 предназначен для счета электрических импульсов, возникающих в анодной цепи ФЭУ при каждом детектировании γ -кванта (или частицы фонового излучения). Индикатор прибора показывает число зарегистрированных импульсов. В приборе имеется таймер, с помощью которого можно задать различное время счета (экспозицию), по окончании которого регистрация прекращается.

К установке прилагаются калиевый препарат 1 в виде полусферы и калибровочный источник 5 γ -излучения ^{60}Co активностью менее 1 мкКи; источник снабжен держателем и в нерабочем состоянии должен находиться в свинцовом контейнере 6.

2. Убрать радиоактивные источники – калиевый препарат на расстояние не менее 0,5 м от детектора, а кобальт-60 должен находиться в свинцовом контейнере.

Примечание. Блок детектора можно немного приподнять за корпус, нельзя тянуть кабель.

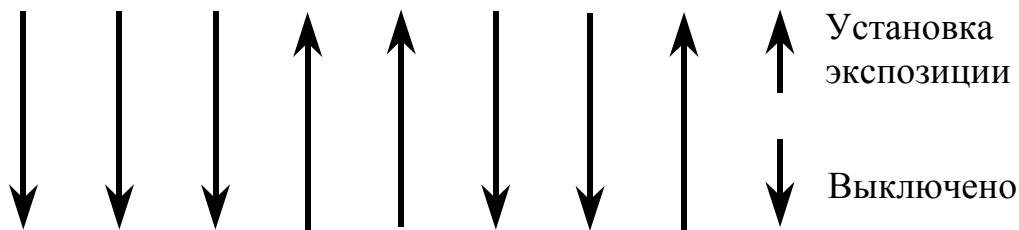


Рис. 9

3. На панели пересчетного прибора имеется девять переключателей, с помощью которых задают необходимый режим работы. Установить переключатели в положение, показанное на рис. 9.
4. Пульт 3 радиометра будет в рабочем режиме, если его верхний переключатель установлен в положение “ИЗМ.”, а нижний – в любом положении.
5. Включить питание установки. Для этого вставить сетевую вилку в розетку и нажать красную кнопку “ВКЛ” на задней стенке пересчетного прибора. При этом должно появиться свечение его индикатора.
6. Ознакомиться с устройством установки экспозиции. На корпусе прибора под цифровым индикатором обозначены возможные значения экспозиции всекундах: 0,1; 1; 10; 100 и 1000. На цифровом индикаторе имеется светящаяся точка – указатель установленной экспозиции. Например, если точка находится напротив числа 100, то время счета будет 100 с. Это в том случае, если светодиод “х 3” слева от индикатора не горит. Если он светится, то экспозиция будет в три раза больше.
7. Для установки экспозиции необходимо переключатель “УСТ. ЭКСП.” (крайний правый) перевести на короткое время в положение от себя. При этом светящаяся точка на индикаторе начинает быстро пробегать “по кругу” все возможные значения экспозиции от 0,1 до 3000 с. Выключить переключатель в нужный момент. Для приобретения навыка установить, например, экспозицию 30 с, при этом светодиод “х 3” должен гореть. Установить экспозицию 10 с (светодиод – не горит).

8. После установки небольшой экспозиции (например, 10 с) нажать последовательно кнопки “СБРОС” и “ПУСК”, после чего начинается счет импульсов с детектора. Через 10 с счет остановится. На индикаторе будет целое число зарегистрированных частиц фонового излучения.

Задание 2. Измерить скорость счета фонового излучения.

1. Установить экспозицию 300 с. Нажать кнопки “СБРОС” и “ПУСК”. Пока идут измерения, подготовить табл. 1 для записи результатов.
2. Результаты двух измерений фона за 300 с каждое ($N_{\phi 1}$ и $N_{\phi 2}$) записать в табл. 1 и просуммировать. Вычислить среднюю скорость счета фона за 600 с.

Результаты измерений

Таблица 1

Число импульсов за 300 с
Средняя скорость счета, с^{-1}
Фон $N_{\phi 1} =$ $N_{\phi 2} =$
$N_{\phi} = N_{\phi 1} + N_{\phi 2} = n_{\phi} = N_{\phi} / 600 =$
Калий $N_{\text{к},\phi 1} =$ и фон $N_{\text{к},\phi 2} =$
$N_{\text{к},\phi} = N_{\text{к},\phi 1} + N_{\text{к},\phi 2} = n_{\text{к},\phi} = N_{\text{к},\phi} / 600 =$ Калий $n_{\text{к}} = n_{\text{к},\phi} - n_{\phi} =$
Кобальт, $N_{\text{коб},\text{к},\phi 1} =$
калий и фон $N_{\text{коб},\text{к},\phi 2} =$
$N_{\text{коб},\text{к},\phi} = N_{\text{коб},\text{к},\phi 1} + N_{\text{коб},\text{к},\phi 2} = n_{\text{коб},\text{к},\phi} = N_{\text{коб},\text{к},\phi} / 600 =$
Кобальт $n_{\text{коб}} = n_{\text{коб},\text{к},\phi} - n_{\text{к},\phi} =$

Задание 2. Измерить гамма-излучение калия.

1. Препарат калиевой соли в виде полусферы установить под блоком детектора так, чтобы оси препарата и детектора совпадали, а центр сцинтиллятора, отмеченный на блоке детектора чертой, был на уровне верхнего среза препара-

та. Для выравнивания препарата по высоте используйте подходящую подкладку.

Примечание. Блок детектора можно немного поднять, держась за корпус, а не за кабель.

2. При экспозиции 300 с зарегистрировать два раза количество срабатываний детектора (от калия и фона). Результаты измерений $N_{к,ф1}$ и $N_{к,ф2}$ записать в табл. 1.

3. Вычислить среднюю скорость счета $n_{к,ф}$. Из полученного результата вычесть фон и получить скорость счета квантов от калия $n_к = n_{к,ф} - n_ф$. Результат записать в табл. 1.

Задание 3. Выполнить калибровку установки.

В данном задании находят коэффициент регистрации f , равный доле регистрируемых γ -квантов (см. формулы (18) и (19)).

1. Источник γ -излучения кобальт-60, находящийся в свинцовом контейнере, вставить в углубление прямоугольной формы (“колодец”) в калиевом препарате (рис. 5).

2. При экспозиции 300 с зарегистрировать два раза количество срабатываний детектора, регистрирующего суммарное излучение кобальта, калия и фона. Результаты измерений $N_{коб,к,ф1}$ и $N_{коб,к,ф2}$ записать в табл. 1.

3. Вычислить среднюю скорость счета $n_{коб,к,ф}$.

4. Из полученного результата вычесть скорость счета калия и фона и получить скорость счета γ -излучения кобальта $n_{коб} = n_{коб,к,ф} - n_{к,ф}$. Результат записать в табл. 1 и 2.

5. На держателе кобальтового источника указана его активность A_0 в прошлом, на дату поверки. Записать эти данные в табл. 2.

6. По формуле (9) вычислить активность кобальта $A_{коб}$ на дату выполнения работы. Период полураспада кобальта $T = 5,27$ лет = 63,24 месяца. Результат записать в табл. 2.

7. По формуле (19) вычислить коэффициент регистрации, результат записать в табл. 2.

Таблица 2

Скорость счета γ - квантов кобальта $n_{\text{коб}} =$
Дата выполнения работы
Дата поверки кобальта
Время, прошедшее с поверки, в месяцах $t =$
Активность кобальта на дату поверки $A_0 =$
Активность кобальта на дату выполнения работы $A_{\text{коб}} =$
Коэффициент регистрации $f =$

Задание 4. Определить постоянную распада и время жизни калия.

1. Подготовить таблицу 3.

Таблица 3

Масса препарата KCl $m =$
Количество атомов ^{40}K в препарате $N =$
Гамма-активность калия $A_{\gamma} =$
Постоянная распада для электронного захвата $\lambda_{\gamma} =$
Среднее время жизни для электронного захвата $\tau_{\gamma} =$
Полная постоянная распада $\lambda =$
Среднее время жизни (для обоих видов распада) $\tau =$
Период полураспада (для обоих видов распада) $T =$
Относительная погрешность измерения периода полураспада $\varepsilon =$

2. Записать в табл. 3 массу калиевого препарата, указанную на самом препарате.

Примечание: все вычисляемые ниже величины записать в табл. 3.

3. Вычислить по формуле (14) количество атомов N изотопа ^{40}K .

4. Вычислить по формуле (18) гамма-активность калия A_{γ} .

5. Для процесса электронного захвата вычислить по формуле (16) постоянную распада λ_{γ} , а по формуле (17) – среднее время жизни τ_{γ} в секундах и годах.

6. Вычислить по формуле (15) полную постоянную распада (для обоих видов распада).
7. Вычислить по формулам (6) и (7) среднее время жизни и период полураспада калия (для обоих видов распада) в секундах и годах.
8. Сравнить полученный результат с известным табличным значением $T_{\text{табл}} = 1,3 \cdot 10^9$ лет. Вычислить относительное отклонение (в %) полученного результата от табличного $\varepsilon = 100 (T - T_{\text{табл}}) / T_{\text{табл}}$.

Задание 5. Оценить дозу излучения кобальта-60.

1. Исходя из условий опыта и используя формулу (22), оценить порядок величины дозы, полученной за время выполнения работы от источника кобальт-60. Результаты расчета представить в таблице 4.

Таблица 4

Активность источника на день выполнения работы, Бк $A_{\text{коб}} =$
Время облучения, час $t =$
Расстояние от источника до человека, м $r =$
Доза, мЗв $H =$

Задание 6. Вычислить дозу внутреннего излучения калия.

Цель данного задания – самостоятельно оценить по порядку величины годовую дозу, получаемую человеком в результате распада калия во всем его теле. В расчете принять следующие исходные данные: масса калия 100 г, молярная масса 40 г/моль; при одном распаде в теле поглощается энергия электронов, равная в среднем 0,5 МэВ. Постоянную распада взять из результатов данной работы. Результаты расчета привести в табл. 5.

Таблица 5

Активность, Бк $A =$
Число распадов за год
Поглощенная энергия за год, МэВ и Дж $E =$

Поглощенная доза $D =$
Эквивалентная доза $H =$

Полученные дозы сравнить с годовой дозой естественного облучения (см. раздел “Дозиметрия излучений”).

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
2. Что такое постоянная распада, среднее время жизни и период полураспада? Какая связь между ними?
3. Что такое активность и в каких единицах она измеряется?
4. Из какой части атома вылетает электрон при β^- -распаде?
5. Объясните процесс распада нейтрона.
6. Что такое электронный захват?
7. По каким схемам распадается изотоп калий-40?
8. Как устроен и работает сцинтилляционный детектор?
9. Чем отличается эквивалентная доза от поглощенной дозы?
10. Какова абсолютная и относительные погрешности измерения скорости счета, если за 100 с (точно) зарегистрировано 1000 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. Фетисов И.Н. Определение большого периода полураспада в учебной лаборатории // Изв. вузов. Физика. 1987. - № 8.
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. – М.: МВТУ, 1984.