САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНЫЙ ПАРК

Образовательный ресурсный центр по направлению физика

Торилов С.Ю.

РАДИОАКТИВНОСТЬ ВОЗДУХА

Учебно-методическое пособие
(описание лабораторной работы)

№9

Санкт-Петербург
2021

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов СПбГУ младших курсов естественно-научных направлений обучения. Оно может быть полезно также учащимся и преподавателям средних и средне-специальных учебных заведений.

Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению физика Научного парка СПбГУ (http://researchpark.spbu.ru).

© Научный парк СПбГУ

Содержание

Введение 4

1 Распад радиоактивных ядер 6

2 Методика проведения эксперимента 20

2.1 Описание экспериментальной установки 20

2.2 Постановка эксперимента. Методика и техника измерений 23

2.2.1 Работа с пересчётным устройством 23

2.2.2 Работа с бета-спектрометром 24

2.2.3 Работа с аспиратором 26

3 Техника безопасности при работе с приборами 28

4 Порядок выполнения лабораторной работы. 28

5 Обработка результатов эксперимента 31

6 Контрольные вопросы 32

Приложение. 34

Введение

Как и положено уважающему себя маньяку, убийца не знал пощады и не оставлял следов, даже отпечатков пальцев, хотя в средние века их на месте преступления и не искали. Отличительной особенностью преступника были лишь жертвы — он убивал только шахтеров и только из определенных шахт.

Работа шахтера всегда была сопряжена с риском, особенно в далеком прошлом. Плохая вентиляция, тяжелые условия работы, загрязненность воздуха продуктами добываемых полезных ископаемых, не говоря уже об опасности затопления или разрушения шахты — вот неполный список опасностей данной работы. Стоит ли удивляться, что ранняя смертность среди людей этой профессии была достаточно высокой? Однако серебряные рудники, расположенные в окрестностях городов Шнееберг и Яхимов, даже на этом фоне заслужили изрядно дурную репутацию. Смертность там приближалась к 70 процентам для возраста порядка 40 лет. Что же убивало рабочих? Разрешить эту загадку пытался даже знаменитый средневековый врач и алхимик Парацельс. Поскольку уже в то время было понятно, что болезнь связана с органами дыхания, он посчитал что ее источник — ядовитая пыль добываемой руды. Гораздо позже выяснилось, что сама болезнь носит, как сказали бы сейчас, онкологический характер. Но что конкретно было ее причиной, приводящей к гибели шахтеров именно в данном месте, долго оставалось загадкой.

Решение было найдено только в начале прошлого века. Именно из яхимовской руды Мария и Пьер Кюри выделили два новых элемента — полоний и радий. Вскоре была обнаружена «эманация радия» — то, что мы сейчас называем радоном, и Резерфорд сумел показать, что это благородный газ. Все перечисленные элементы радиоактивны. То, что ионизирующее излучение оказывает сильное влияние на человека, выяснилось достаточно быстро, и, вскоре, стала очевидна его связь с возникновением онкологических заболеваний. Именно это и позволило обнаружить «убийцу» шахтеров. Им ока-

зался радон. Точнее говоря, порождаемое им радиоактивное излучение. Сам газ радон химически инертен, но продукты его распада образуют радиоактивные аэрозоли[1]. Попадая в верхние дыхательные пути и оседая на них, они приводят к облучению окружающих клеток.

Удивительно, но Резерфорд уже в самом начале развития ядерной физики понял, какую опасность несет присутствие радиоактивных ядер в атмосфере. Еще в 1907 году он указал на это: «Мы все должны осознавать, что постоянно вдыхаем эманации радия и тория, их продукты и ионизированный воздух. Надо полагать, что наличие радиоактивной материи и ионизированного воздуха может играть некоторую роль в физиологических процессах».

Кажется, нам удалось выявить опасного преступника? Однако дадим слово адвокату. Уже упомянутый Парацельс утверждал, что все есть яд, вопрос только в дозе. Так получилось и с радоном. Тот же самый Яхимов веками славился своими целебными ваннами. Их лечебный эффект достигался за счет присутствия ... радона! На сегодняшний день радоновые ванны являются важным элементом бальнеотерапии (лечения с помощью водных процедур). Сердечно-сосудистые заболевания, болезни нервной системы и органов дыхания, проблемы с опорно-двигательным аппаратом — вот далеко не полный перечень показаний к лечению с помощью радоновых ванн. (В скобках заметим, что далеко не все врачи придерживаются такого мнения. Однако исследовательская работа в этом направлении активно продолжается.)

Кроме медицины, радон применяют в материаловедении и дефектоскопии. С его помощью проводится контроль герметичности и контроль качества протекания самых различных процессов (например, производство стекла и стали). Радон играет важную роль в геофизических исследованиях. Его содержание в воздухе позволяет сделать выводы о плотности и

[1] Аэрозо̀ль — дисперсная система, состоящая из взвешенных в газовой среде (дисперсионной среде), обычно в воздухе, мелких частиц (дисперсной фазы).

газопроницаемости пород. Прекрасный обзор по теме применения радона можно найти в лекциях [1].

Строго говоря, на сегодняшний день нет полной определенности относительно вклада излучения радона в картину онкологических заболеваний, как нет и однозначного мнения о существовании пороговой (безопасной) дозы, что в данном случае просто парафраз высказывания Парацельса. Например, существует мнение, что курение десятикратно увеличивает опасность радона за счет дополнительного сорбирования радионуклидов. К тому же радон — не единственный источник излучения, особенно принимая в расчет техногенные загрязнения. Однако при отсутствии техногенных загрязнений радон уверенно удерживает первое место по вкладу в радиационный фон жилых помещений. Это требует периодического контроля радиационной обстановки. В данной работе Вам предоставлена возможность экспериментально зарегистрировать продукты распада присутствующего в помещении лаборатории радона, и, на их примере, убедиться в выполнении закона радиоактивного распада.

1. Распад радиоактивных ядер

Пусть в нашем распоряжении имеется образец, содержащий N радиоактивных ядер. Вспомним основные закономерности радиоактивного распада. Замечательным фактом этого процесса является то, что мы можем говорить только о вероятности распада конкретного ядра в некотором интервале времени, и этот распад никак не влияет на вероятность распада оставшихся ядер. Это приводит к достаточно простому закону: число распадов в единицу времени пропорционально числу радиоактивных ядер в образце. Более точно:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \tag{1}$$

где слева скорость распадов (убывание числа ядер со временем), а λ — **постоянная** распада, величина, характеризующая его скорость. Иногда ее определяют как вероятность рас-

пада в единицу времени. Это дает хорошее представление о происхождении данной величины, но следует соблюдать осторожность в аналогиях — значение λ может быть больше единицы. Минус указывает, что число ядер со временем убывает. Это уравнение нетрудно разрешить, что приводит к хорошо известному выражению для экспоненциальной зависимости:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \tag{2}$$

Здесь $N(t)$ — зависимость числа ядер в образце от времени, а N_0 — число ядер в момент времени $t = 0$. Это **закон радиоактивного распада**.

Отметим, что рассмотренная выше закономерность имеет простую и интуитивно понятную аналогию с описанием «классических» случайных процессов. Допустим, у нас есть N_0 игральных кубиков. Будем считать, что выпадение на данном кубике заданной цифры приводит к «распаду» (кубик изымается из игры). Вероятность такого события, как очевидно, $p = 1/6$. После первого броска число кубиков становится[2]:

$$N_1 = N_0 \left(1 - p\right).$$

После второго броска:

$$N_2 = N_1 \left(1 - p\right) = N_0 (1 - p)^2.$$

И так далее. После n бросков, число кубиков составляет:

$$N_n = N_0 (1 - p)^n.$$

Используя натуральный логарифм, последнюю формулу можно переписать в виде:

$$N_n = N_0 e^{n \ln(1-p)}.$$

Эта формула похожа на формулу (2), если номер броска считать аналогом времени (скажем, производится один бросок в секунду), а величину постоянной распада взять в виде

[2]Речь идет о величине математического ожидания.

$\lambda = -\ln(1-p)$, что для кубика, как нетрудно убедиться, составляет примерно 0.18. Таким образом, число «выживших кубиков» будет подчиняться экспоненциальному закону.

Посредством такой простой модели можно имитировать и более сложные процессы, как, например, рассмотренные в данной работе цепочки распада.

На практике, однако, мы обычно имеем дело не с числом оставшихся ядер, а с измеряемой величиной, называемой **активностью** — числом распадов в образце за единицу времени (скоростью распадов). Обозначим зависимость активности от времени как $I(t)$. Дифференцируя по времени уравнение (2) получаем:

$$I(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t) \tag{3}$$

или, что еще проще:

$$I(t) = I_0 e^{-\lambda t} \tag{4}$$

где $I_0 = \lambda N_0$ — активность в начальный момент времени.

Работать с величиной λ не всегда удобно, поэтому вводятся еще две величины для характеристики ядерных распадов — **среднее время жизни** τ и **период полураспада** $T_{1/2}$.

Среднее время жизни, согласно определению математического среднего, можно определить следующим образом:

$$\tau = \lambda \int_{t=0}^{\infty} t e^{-\lambda t} dt, \tag{5}$$

так что в итоге получаем:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \tag{6}$$

Подставив полученный результат в формулу (2) можно убедиться, что τ — время, за которое число радиоактивных ядер в образце уменьшится в e раз.

Однако это тоже не очень удачная для интуитивного понимания величина, поэтому чаще пользуются понятием периода полураспада — временем, за которое число ядер в образце уменьшится вдвое. Подставляя в (2) $N(t) = {}^{N_0}/_2$ получаем:

$$T_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda} = ln2 \cdot \tau. \tag{7}$$

Зависимость числа радиоактивных ядер от времени и положение величин τ и $T_{1/2}$ показаны на рисунке 1

Совершенно очевидно, что когда радиоактивные ядра, называемые **родительскими**, распадаются, то их число убывает, а число образующихся **дочерних**, соответственно, возрастает.

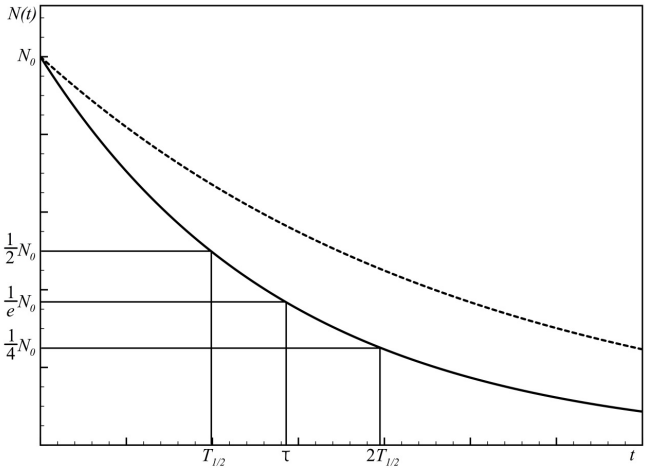


Рис. 1 — Зависимость числа радиоактивных ядер от времени. Пунктиром показан закон распада для ядер с меньшей величиной λ.

Теперь усложним задачу. Пусть имеется образец, содержащий ядра A, в результате распада которых образуются ядра B, причем, тоже нестабильные. Их распад, в свою очередь, приводит к образованию стабильных ядер C. Схематически этот процесс изображен на рисунке 2.

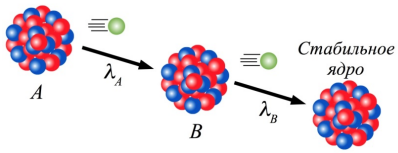


Рис. 2 — Цепочка распада из трех ядер.

В этом случае, вместо дифференциального уравнения (1) мы получаем систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A \\ \dfrac{dN_B}{dt} = -\lambda_B N_B + \lambda_A N_A. \end{cases} \tag{8}$$

Второе слагаемое в правой части второго уравнения соответствует увеличению числа ядер B, образующихся при распаде ядер A. Решение системы уравнений (8) можно записать в виде:

$$\begin{cases} N_A(t) = N_{A_0} e^{-\lambda_A t} \\ N_B(t) = \dfrac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A_0}(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_{B_0} e^{-\lambda_B t}. \end{cases} \tag{9}$$

Величины N_{A_0} и N_{B_0} задают количество ядер A и B, соответственно, в момент времени $t = 0$, так что если в начальный момент времени в образце содержались только ядра A, то $N_{B_0} = 0$.

Рассмотрим подробнее один важный частный случай для такой системы. Пусть $\lambda_A < \lambda_B$ (т.е. $T_{1/2A} > T_{1/2B}$). По прошествии достаточно большого промежутка времени ($t >> T_{1/2B}$), во втором уравнении системы (9) можно пренебречь слагаемыми, содержащими величину $e^{-\lambda_B t}$. Тогда уравнение для $N_B(t)$ из (9) можно записать в виде:

$$N_B(t) \approx \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A_0} \cdot e^{-\lambda_A t} \tag{10}$$

Так что для дочернего ядра B наблюдается распад с такой же постоянной распада, как и у ядра A. Соответственно, соотношение активностей оказывается постоянной величиной. Действительно, из выражений (3) и (4) имеем $I_A(t) = \lambda_A N_A(t)$ и $I_B(t) = \lambda_B N_B(t)$, так что:

$$\frac{I_A(t)}{I_B(t)} \approx \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\lambda_B}. \tag{11}$$

Итак, в этом случае определяемый в эксперименте период полураспада дочернего ядра приближается к значению, имеющему место для материнского, а активности этих двух ядер пропорциональны. Иногда говорят, что в этом случае достигается **переходное равновесие**. Важным частным случаем такой ситуации является **вековое равновесие (радиоактивное равновесие, секулярное условие)**. Оно достигается, когда $\lambda_A \ll \lambda_B$, так что, пренебрегая в уравнении (11) величиной λ_A по сравнению с λ_B получаем:

$$I_A(t) \approx I_B(t). \tag{12}$$

Как видно, по истечении большого промежутка времени, скорость увеличения количества дочерних ядер становится равной скорости уменьшения их количества по причине распада, так что число дочерних ядер практически перестает меняться. Данное выражение можно получить и из системы уравнений (8), положив, что скорость изменения числа ядер B равна нулю. Обратите внимание, что в этом случае активность I_B равна $\lambda_B N_B$, а не $\frac{dN_B}{dt}$, так как последнее, очевидно, включает и родительские ядра (см. уравнение (8)). Расчет активностей в общем случае будет приведен ниже.

Как можно видеть из системы уравнений (9), картина зависимости числа дочерних ядер от времени, по сравнению с предыдущим случаем, описываемым формулой (2), совсем иная. Число ядер B сперва увеличивается, а потом убывает. На рисунке 3 показано несколько частных случаев для активностей системы из трех ядер. Разумеется, в общем случае, начальное количество дочерних ядер может быть и ненулевым.

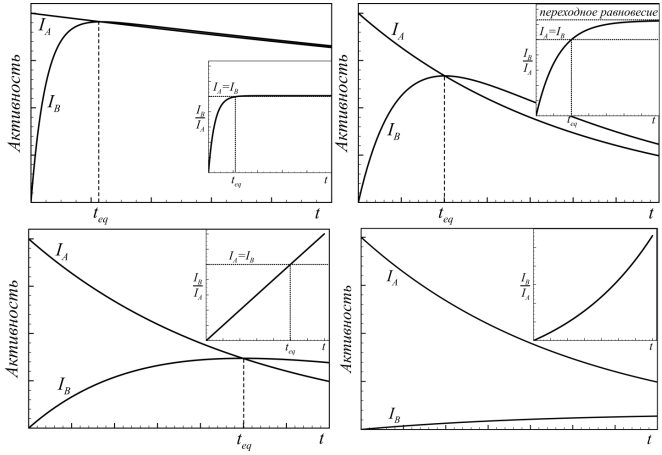


Рис. 3 — Зависимости активностей от времени для различных соотношений постоянных распада родительского и дочернего ядер. На вставках показано отношение I_B/I_A, а также случаи достижения векового и переходного равновесия.

В реальности ситуация может быть гораздо сложнее, чем показано на рисунке 2. Ядер, переходящих друг в друга, может быть достаточно много, так что цепочка становится гораздо длиннее. В общем случае имеем:

$$X_1 \xrightarrow{\lambda_1} X_2 \xrightarrow{\lambda_2} X_3 \xrightarrow{\lambda_3} \ldots\ X_i \xrightarrow{\lambda_i} \ldots \xrightarrow{\lambda_{n-1}} X_n (\text{стабильно}). \quad (13)$$

Получим общее решение для цепочки (13). Система уравнений для скоростей распада выглядит следующим образом (для определенности, указано, что число частиц — функция

времени):

$$
\begin{aligned}
\frac{dN_1(t)}{dt} &= -\lambda_1 N_1(t) \\
\frac{dN_2(t)}{dt} &= -\lambda_2 N_2(t) + \lambda_1 N_1(t) \\
\frac{dN_3(t)}{dt} &= -\lambda_3 N_3(t) + \lambda_2 N_2(t) \\
&\vdots \\
\frac{dN_{n-1}(t)}{dt} &= -\lambda_{n-1} N_{n-1}(t) + \lambda_{n-2} N_{n-2}(t) \\
\frac{dN_n(t)}{dt} &= \lambda_{n-1} N_{n-1}(t).
\end{aligned}
$$

Предположим, первоначально присутствовали только ядра X_1, так что $N_i(0) = 0$ при $i > 1$. Решением этой системы является так называемое уравнение Бейтмена:

$$
\begin{aligned}
I_j(t) &= \lambda_j N_j(t) \\
&= N_1(0)(C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_j e^{-\lambda_j t}) \\
&= N_1(0) \sum_{m=1}^{j} C_m e^{-\lambda_m t}. \qquad (14)
\end{aligned}
$$

Где коэффициенты C_m равны:

$$
C_m = \frac{\prod_{i=1}^{j} \lambda_i}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{j} (\lambda_i - \lambda_m)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_j}{(\lambda_1 - \lambda_m)(\lambda_2 - \lambda_m) \dots (\lambda_j - \lambda_m)}
$$

и в знаменателе исключены множители с $i = m$. Это общий случай вычисления активности для произвольной цепочки.

Наблюдаются ли такие длинные цепочки в природе? Не считая нестабильные ядра созданные человеком, в природе существует более десятка ядер, чье время жизни сравнимо или превышает возраст Земли (4.54×10^9 лет), или даже возраст Вселенной (13.8×10^{14} лет). Это «выжившие» ядра с момента образования Солнечной системы (4.6×10^9 лет). Боль-

шинство из них распадается в стабильные дочерние ядра. Однако три ядра — ^{232}Th, ^{238}U и ^{235}U распадаются в нестабильные дочерние ядра, которые, в свою очередь, тоже распадаются в нестабильные и т.д. Говорят, что каждое из этих трех ядер образует **радиоактивный ряд (семейство, серия)** — последовательность радиоактивных ядер, образующихся в результате альфа- или бета-распада. Для достижения стабильного дочернего ядра в каждом семействе требуется 10 и более распадов (получающиеся стабильные ядра — ^{208}Pb, ^{206}Pb и ^{207}Pb, соответственно). На рисунках 4, 5 и 6 приведены составляющие эти три ряда ядра с указанием типов распада (наиболее вероятных) и периодов полураспада. В литературе их принято называть по именам характерных элементов ряда: ториевый ряд, уран-радиевый (или просто радиевый) ряд и уран-актиниевый (или просто актиниевый) ряд. Строго говоря, еще существует нептуниевый ряд, начало которому дает ядро ^{237}Np. Но оно относительно короткоживущее (по сравнению с родоначальниками других рядов), так что природный нептуний к настоящему моменту уже распался. Конечным ядром для нептуниевого ряда является ^{209}Bi. Отметим значительные колебания для периодов полураспада (миллиарды лет и доли секунды). Для рассмотренных четырех рядов существует интересная классификация, основанная на том, что при альфа-распаде массовое число изменяется на 4 (при бета-распаде массовое число не меняется). Тогда все массовые числа ядер ряда можно представить в виде $4n$, плюс число от 0 до 3. Таким образом, изотопы ториевого ряда можно обозначить как $4n$, нептуниевого — $4n + 1$, радиевого — $4n + 2$, а актиниевого — $4n + 3$.

Теперь можно вернуться к материалу, обсуждавшемуся во Введении. Как можно видеть из рисунков, радон встречается в каждом ряду, но с разными массовыми числами. Радон с массовым числом 222 и периодом полураспада 3.8 суток образуется в ряду ^{238}U. Радон с массовым числом 220 и периодом полураспада 55 с образуется в ряду ^{232}Th. И радон с массовым числом 219 и периодом полураспада 3.9 с образуется в

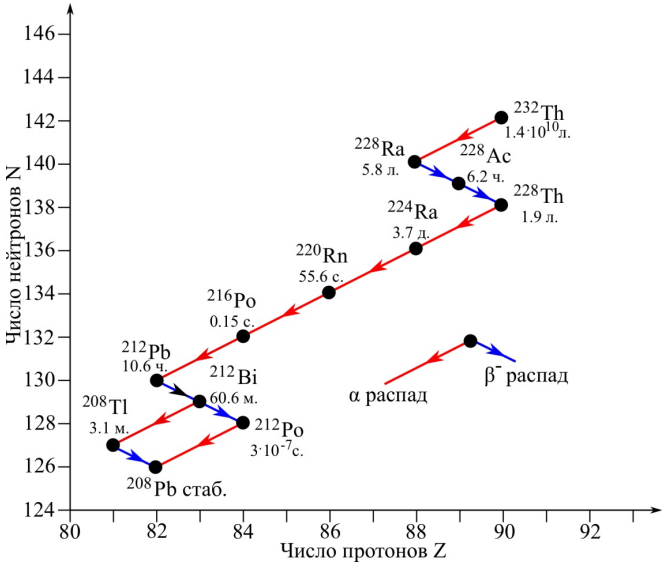


Рис. 4 — Ториевй ряд.

ряду ^{235}U. Изотоп ^{222}Rn встречается в природе в 20 раз чаще, чем ^{220}Rn, а содержание ^{219}Rn и вовсе ничтожно. (Подумайте, почему? Обратите внимание на различия во времени жизни изотопов различных семейств, приводящих появлению радона.) Поэтому, говоря о радоновом загрязнении, мы будем иметь в виду ^{222}Rn и, соответственно, его продукты распада (радиевый ряд, рисунок 5).

В таблице 1 представлены характеристики ядер, соответствующих наиболее вероятной ветви радиевого ряда, с выделением участка, интересующего нас в данной работе. Радон образуется при распаде радия, содержащегося в почве, воде и строительных материалах. Зонами повышенной опасности можно считать регионы с большим содержанием гранита и сейсмически опасные зоны. Обладая большой способностью к диффузии, радон сквозь трещины в горных породах и почве поднимается на поверхность земли. Попадая в атмосферу, он может подниматься на высоту до одного километра. Однако, так как радон тяжелее воздуха, он предпочтительнее накап-

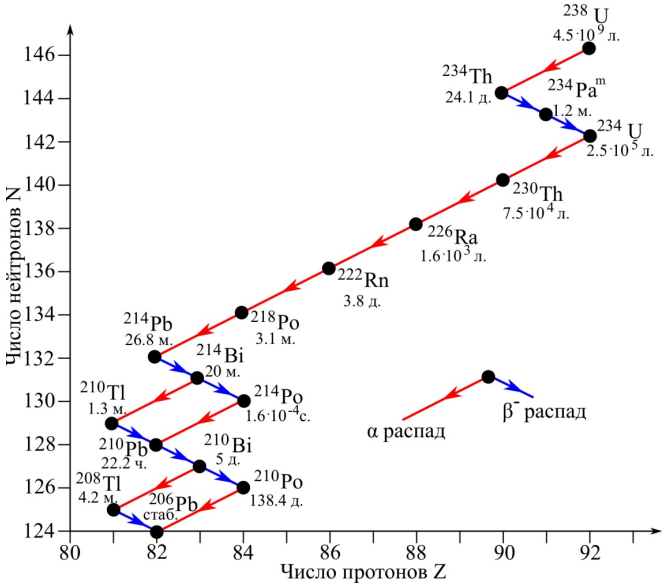


Рис. 5 — Радиевый ряд.

ливается в подвальных помещениях, попадая через трещины фундамента и вентиляцию.

В основном выделяют три источника радона в помещении:

1. Наружный воздух.

2. Грунтовое основание здания.

3. Строительные материалы.

Небольшой дополнительный вклад вносят вода (особенно в случае, если она поступает в систему из глубинных скважин) и сжигаемое топливо.

Как можно оценить активность присутствующего в воздухе радона? Как видно из таблицы, мы можем регистрировать возникающие в результате распада альфа- и бета-частицы, или регистрировать гамма-кванты, поскольку продукты распада часто остаются в возбужденном состоянии. Поскольку

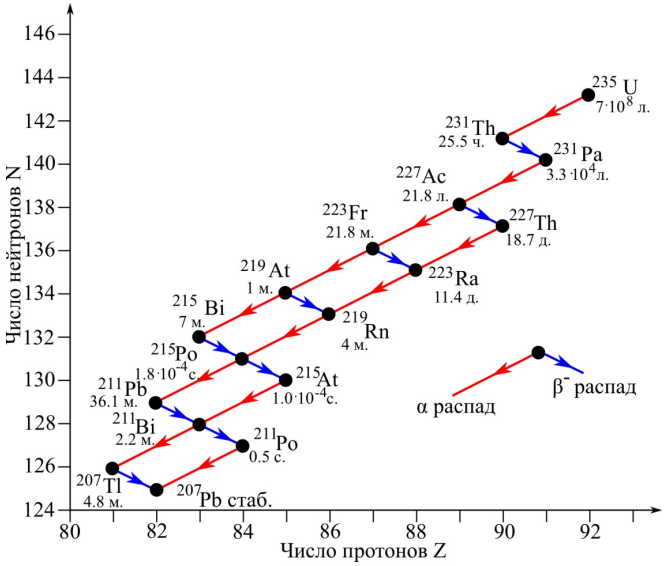


Рис. 6 — Актиниевый ряд.

каждый изотоп элемента имеет свою систему уровней возбужденных состояний, последний метод позволяет наиболее надежно различать вклады от распадов, отвечающих различным семействам. Например, для выделения канала, соответствующего распаду именно ^{222}Rn (радиевого ряда), очень удобно использовать гамма-кванты, возникающие при распаде ^{214}Bi в возбужденное состояние ^{214}Po. Почти 50 % гамма квантов имеют энергию 609 кэВ. Это основной пик в соответствующем гамма-спектре.

В данной работе Вы будете регистрировать продукты бета-распада, т.е. электроны, от ядер, представляющих собой часть радиевого ряда (см. табл. 1) — ^{214}Pb и ^{214}Bi. Продукты распада являются металлами и не имеют отношения к группе инертных газов. Размеры свободных атомов металла составляют единицы нанометров и они не могут долго находиться в атмосфере в виде взвеси. При соприкосновении с не радиоактивными аэрозолями (частицами пыли, дыма, капельками тумана и т.п.) они образуют радиоактивные аэрозоли. Отли-

чительной чертой рассматриваемого в работе типа распада (обусловленного, в отличие от альфа-распада, слабым взаимодействием) является непрерывный спектр. Типичный вид спектра электронов представлен на рисунке 7

При анализе получаемого спектра необходимо помнить, что мы имеем неразличимую суперпозицию двух бета-распадчиков (^{214}Pb и ^{214}Bi), и распады осуществляются не только в основное состояние, но и в возбужденные, причем с различной интенсивностью (см. Приложение). Все это конечно сказывается на форме получаемого спектра. К тому же присутствует загрязнение от элементов, принадлежащих другим семействам (особенно ^{212}Pb и ^{212}Bi из ториевого ряда), хотя этим, в подавляющем большинстве случаев, можно пренебречь. Тем не менее, спектр все же отдаленно похож на рисунок 7.

Вашей задачей в данной работе является:

1) Убедиться, что в воздухе содержатся радиоактивные вещества, отвечающие природной (не техногенной) составляющей радиационного фона, которые осаждаются на фильтре, что приводит к росту его активности. (Подумайте над тем, что легкие человека, по сути, тоже являются неплохим аб-

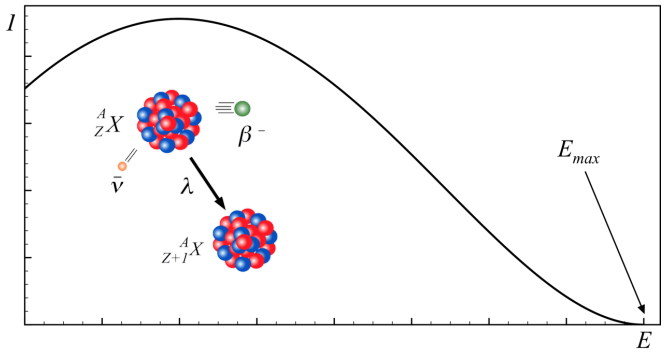


Рис. 7 — Спектр электронов от бета-распада.

Таблица 1

Ядро	Канал распада	Период полураспада $T_{1/2}$	Постоянная распада λ
^{238}U	α	$4.47 * 10^9$ лет	
^{234}Th	β^-	24.1 день	
^{234}Pa	β^-	6.7 часов	
^{234}U	α	2.46×10^5 лет	
^{230}Th	α	7.54×10^4 лет	
^{226}Ra	α	1.60×10^3 лет	
^{222}Rn	α	3.82 дня	1.26×10^{-4} мин.$^{-1}$
^{218}Po	α	3.1 мин.	0.224 мин.$^{-1}$
^{214}Pb	β^-	27.1 мин.	0.026 мин.$^{-1}$
^{214}Bi	β^-	19.9 мин.	0.035 мин.$^{-1}$
^{214}Po	α	1.64×10^{-4} с	
^{210}Pb	β^-	22.2 года	
^{210}Bi	β^-	5.01 дней	
^{210}Po	α	138.4 дня	
^{206}Pb	Стабильно	—	—

сорбирующим фильтром).

2) Убедиться в верности экспоненциального закона распада (2).

Полученный результат можно подогнать суммой активностей ядер ^{214}Pb и ^{214}Bi. Из системы (9) с учетом определения активности (3) для активности всего образца можно получить (попробуйте вывести это выражение самостоятельно):

$$I^{\text{набл}}(t) \approx I_A(t) + I_B(t)$$
$$\approx \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} I_{A_0}(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + I_{A_0} e^{-\lambda_A t} + I_{B_0} e^{-\lambda_B t}. \quad (15)$$

Здесь A и B обозначают ядра ^{214}Pb и ^{214}Bi, соответственно.

2. Методика проведения эксперимента

2.1. Описание экспериментальной установки

Как было сказано в предыдущей части, в данной работе Вам предстоит измерить зависимость интенсивности распадов от времени. Для того чтобы накопить требуемое количество радиоактивных ядер, Вам необходимо прокачать достаточное количество воздуха через фильтр, способный задерживать содержащиеся в воздухе аэрозоли. Улавливание аэрозольных частиц волокнистым фильтром — сложный процесс, включающий несколько механизмов. Осаждение частиц происходит из тонкого слоя газа, прилегающего к волокну фильтра, за счет броуновской диффузии, касания, инерции, электростатического притяжения. Коснувшись поверхности волокна, частица прочно удерживаются на нём. Приборы, позволяющие выполнить данную процедуру, называются **аспираторы**, они позволяют проводить отбор проб воздуха для дальнейшего анализа. Сфера их применения, разумеется, не ограничивается оценкой радиоактивной загрязненности. Современные аспираторы допускают высокую скорость прокачки воздуха — выше 200 литров в минуту (однако не стоит думать, что обязательно, чем быстрее — тем лучше) и высокую

точность определения объема прошедшего воздуха — лучше 5 %. На рисунке 8 показан аспиратор, применяемый в данной работе.

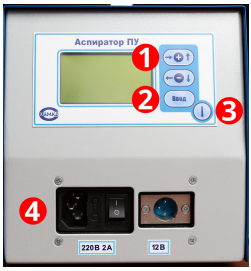


Рис. 8 — Аспиратор ПУ-3Э. 1 — клавиши переключения позиций, 2 — клавиша выбора, 3 — включение аспиратора (перевод в активный режим), 4 — включение питания.

В качестве фильтра, на котором происходит осаждение исследуемых загрязнений воздуха, применяются фильтрующие материалы типа ФПП (фильтрполотно Петрянова). Фильтры Петрянова, в отличие от традиционных пористых, не просеивают, а улавливают частицы. В этих фильтрах расстояние между нитями в сотни и тысячи раз больше, чем диаметр частиц, и частицы прилипают к нитям в результате действия сил межмолекулярного взаимодействия и электрического притяжения. Материал ФПП представляет собой слой ультратонких волокон со средним размером 1,5 мкм нанесенных на марлевую подложку. Поскольку в данной работе мы интересуемся именно радиоактивными аэрозолями, то используются фильтры АФА-РМП-20 (аналитические аэрозольные фильтры на основе перхлорвиниловых волокон, цифра обозначает площадь рабочей поверхности в см^2).

После прокачки воздуха через фильтр и, соответственно, накопления радиоактивных аэрозолей, Вам предстоит измерение активности. В лаборатории для этой цели имеются установки двух типов — спектрометр и пересчетное устройство. Несмотря на разную процедуру для выполнения работы, эти устройства имеют одинаковый принцип детектиро-

вания электронов от бета-распада, основанный на явлении сцинтилляции.

Сцинтилляция (от лат. scintillatio мерцание, сверкание) — кратковременная световая вспышка, возникающая при прохождении заряженной частицы через некоторые люминесцирующие вещества, называемые **сцинтилляторами**. Причина вспышки — возбуждение атомов или молекул сцинтиллятора за счет энергии, теряемой заряженной частицей и последующий обратный переход в нормальное состояние, сопровождаемый излучением света.

Типичная схема такого детектора изображена на рисунке 9.

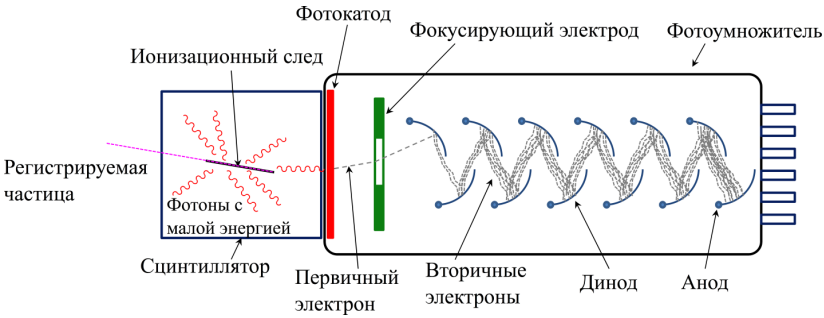


Рис. 9 — Сцинтилляционный детектор. Показан процесс образования фотонов малой энергии при регистрации частицы в сцинтилляторе с последующим образованием вторичных электронов в фотоумножителе.

Сцинтилляторы можно разделить на сконструированные из органических и неорганических материалов. Процессы преобразования энергии от частицы в свет для них, вообще говоря, различны, однако, в конце концов, все сводится к появлению в среде сцинтиллятора вспышки света. Количество света крайне мало, поэтому для его регистрации применяют фотоэлектрический умножитель (ФЭУ). Образовавшиеся вдоль траектории заряженной частицы в сцинтилляторе фотоны, отражаясь на стенках, попадают на очень чувствительный фотокатод, в результате чего внутрь вакуумной трубки

излучается несколько электронов. Эти электроны, ускоренные высоким напряжением, попадают на специальный электрод (динод), из которого выбивают еще большее количество электронов. Эта группа попадает на следующий электрод, выбивая еще больше электронов и т.д. Такая система может содержать более 10 ступеней, усиливая сигнал до 10^{11} раз, в зависимости от величины коэффициента вторичной эмиссии динодов. Результирующий сигнал — интеграл импульса тока, который может быть пропорционален энергии, выделенной заряженной частицей в сцинтилляторе. Далее сигнал учитывается пересчётным устройством или сохраняется для накопления спектра. Более полную информацию по использованию ФЭУ в эксперименте можно найти в [4].

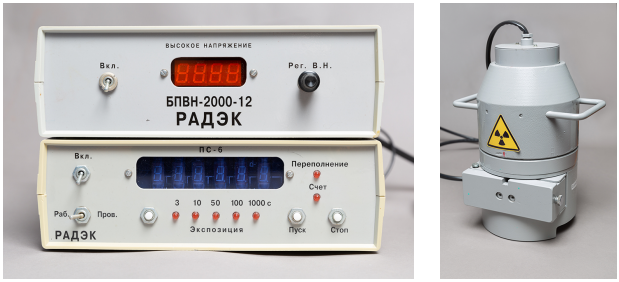
2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений

Как было сказано выше, в данной работе Вам предстоит провести измерение бета-активности фильтра. Работа может быть выполнена двумя способами, в зависимости от предоставленной в Ваше распоряжение установки.

2.2.1. Работа с пересчётным устройством

Установка показана на рисунке 10. По результатам измерений Вы получаете только число зарегистрированных электронов, т.е. интеграл от всего распадного бета-спектра (за вычетом порога регистрации).

Фильтр помещается в выдвижную камеру блока детектора. После чего выбирается требуемое значение экспозиции и нажимается кнопка «Пуск» (суммарное время рекомендуется выбрать порядка 200–300 с.). По окончании времени набора (гаснет светодиод «Счет») Вам необходимо записать число событий.



(a) *(b)*

Рис. 10 — а) пересчетное устройство, б) блок детектора

2.2.2. Работа с бета-спектрометром

В данном варианте Вам предлагается провести измерения бета-спектра и проинтегрировать его самостоятельно, выбрав наиболее подходящую для этого область. Спектрометр показан на рисунке 11.

Информация о спектре выводится на дисплей, поэтому вначале Вам нужно включить компьютер (по имеющемуся у Вас паролю), после загрузки системы активировать программу ASW. На экране появится поле для спектра. В данном варианте работы процедуры для измерения фона и снятия спектра несколько различны.

Рис. 11 — Бета-спектрометр. Справа видна выдвижная камера с находящимся в ней фильтром.

А) Измерение фона.

1. Выбрать в окне «Анализаторы» слева сверху пункт «Бета». Рядом откроется панель с пунктами «Об изм. спектре», «Автомат» и «Устройство»

2. В пункте «Устройство» установите требуемое время экспозиции (если Вам не даны другие указания, рекомендуется выбрать 600 секунд).

3. В пункте «Об изм. спектре» введите имя файла для записи фона и путь, куда файл будет сохранен. (Рекомендуется создать отдельную папку).

4. Убедитесь, что в пункте «Автомат» отсутствует галочка в строке «Включать» (снимите ее, если она была ранее).

5. Поместите чистый фильтр в выдвижную камеру спектрометра (см. рис. 11) и нажмите на верхней панели кнопку Старт.

6. Сохраните полученный спектр.

Б) Измерение спектра.

1. Выбрать в окне «Анализаторы» слева сверху пункт «Бета». Рядом откроется панель с пунктами «Об изм. спектре», «Автомат» и «Устройство»

2. В пункте «Устройство» установите требуемое время экспозиции (если Вам не даны другие указания, рекомендуется выбрать 600 секунд).

3. В пункте «Автомат» установите галочку в строке «Включать». Задайте шаблон для имени файла. (Если, предположим, Вы задали шаблон filename, то записанные файлы будут выглядеть как filename_1.asw, filename_2.asw и т.д.).

Далее, задайте число итераций – сколько раз будет проведено измерение. (Рекомендуется 10). Задайте паузу между измерениями. (Рекомендуется 60 с).

Задайте путь для записи файла. (Туда, где Вы сохраняли файл фона).

4. Поместите фильтр из аспиратора в выдвижную камеру спектрометра и нажмите на верхней панели кнопку Старт.

При желании, Вы можете сохранить спектр в формате txt для дальнейшей обработки дома. Для этого выберите справа от спектра вкладку «Параметры». Наведите курсор на кнопку с тремя точками (в конце имени файла). Выберите вариант сохранения в формате txt. Нажмите «Сохранить». Это сохранит только введенное расширение txt. Для записи на диск, нажмите на изображение дискеты на верхней панели.

2.2.3. Работа с аспиратором

На рисунке 8 показан используемый в работе аспиратор. На рисунке 12 показана задняя панель аспиратора и крепящиеся к ней держатели фильтров.

(a) *(b)*

Рис. 12 — а) Задняя панель аспиратора с фиксирующими гайками для установки фильтродержателя, б) фильтродержатели — обод с опорной сеткой.

После измерения фона от чистого фильтра необходимо получить пробу, прокачивая через него воздух.

1. Раскрутив фильтродержатель (см. рис. 12b), поместите фильтр на опорную сетку и закрутите фиксирующий обод, стараясь его не перекосить. Обод должен плотно прилегать к фильтру, вместе с тем, чрезмерное усилие при его закручивании может повредить резьбу.

2. Установите держатель на задней панели аспиратора и затяните фиксирующую гайку.

3. Если аспиратор выключен, включите аспиратор и переведите в активный режим (см. рис. 8). На экране должно отображаться меню режима «Отбор» с указанием актуальной скорости, времени отбора, прокачанного объема (в начале работы – нулевой), температуры, давления и влажности. Если Вы не хотите изменять скорость или время прокачки, переходите к пункту 6.

4. Клавишами выбора позиции выберите установку времени отбора пробы. Нажмите «Ввод» и этими же клавишами выставите время. Рекомендуется 10-20 минут. Снова нажмите «Ввод».

5. Аналогично установите расход (по умолчанию — в первом канале). Рекомендуемая скорость — 100–200 л/мин. Учтите, что желательно прокачать объем порядка 2000 литров.

6. Перейдите в пункт «Отбор» и нажмите «Ввод».

Если все сделано правильно, должна начаться откачка. На табло начнется отсчет времени откачки, появится значение актуальной скорости, которое должно быть близко к заданной Вами, и прокачанный объем.

После завершения откачки табло вернется в исходное состояние с указанием прокачанного объема воздуха. Запишите его. Снимите фильтродержатель и достаньте фильтр, стараясь его не переворачивать и не трясти.

3. Техника безопасности при работе с приборами

Запрещается изменять напряжение пересчетного прибора.

Не включайте аспиратор без закрепленного фильтродержателя с фильтром.

При закреплении обода фильтродержателя и фиксирующей гайки аспиратора не нужно прилагать чрезмерных усилий, но, в то же время, конструкция должна быть закреплена достаточно плотно.

4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Выясните, с какой установкой Вам предстоит работать.
2. Получите у лаборанта фильтр.
3. Измерьте значение фона в установке с чистым фильтром (см. соответствующий пункт раздела 2).
   3.1. Для пересчётного устройства: измерьте фон 2–3 раза за рекомендованное время.
   3.2. Для спектрометра: сохраните и проинтегрируйте спектр (см. ниже).
4. Осуществите прокачку воздуха через фильтр в аспираторе.
5. Когда прокачивание завершится, запишите с экрана аспиратора время прокачивания и суммарный объем. Выберите время, которое вы примете за «ноль» в измерении графика распада. Зависит ли определяемая Вами из эксперимента величина постоянной распада от выбора нулевой точки отсчета?
6. Поместите фильтр в установку.
   6.1. Для пересчётного устройства снимайте показания счетчика для группы измерения (чтобы суммарное время составляло Δt 200–300 с.), стараясь не допускать больших пауз между отдельными измерениями. Запишите суммарное значение числа отсчетов. После этого сделайте паузу 3–5 минут. Снимите новую группу измерений. Сделайте паузу. И т.д., пока Вы не вый-

дите на значения активности, примерно соответствующие фону. Если на Вашем пересчётном устройстве будет режим экспозиции 200 с, то группа будет состоять только из одного измерения.

Не забывайте всякий раз записать соответствующее время начала измерения очередной группы, отсчитанное от нуля (см. предыдущий пункт) t_{start}. Впоследствии вычислите время, соответствующее полученному суммарному значению группы (например, как $t_n = t_{\text{start}} + {}^{\Delta t}/_{2}$). В результате у Вас должна получиться таблица вида:

Таблица 2

Номер измерения n	Число отсчетов I	Сумма — фон $\Sigma I - I_{\text{фон}}$	Время t_n, мин.
1	2222 2222 2222	66666	10
2	3333 3333 3333	33333	20
...	...	...	...

6.2. Для спектрометра, после нажатия кнопки Старт, снимите первый спектр. После выбранной Вами паузы, прибор начнет снимать второй спектр. Вам нужно открыть первый, снятый Вами, файл (в уже открытой Вами программе ASW). Спектр будет отдаленно напоминать рисунок 7 (помните про искажения). Вам необходимо выбрать пределы интегрирования, опираясь на следующие положения. Нужно исключить малые каналы (примерно с 0 по 10), где очень велик

фон и из-за его наложения спектр не убывает при малых энергиях. Вам нужно исключить большие каналы, где спектр уже приближается к своим фоновым значениям. Выбрав пределы интегрирования, установите курсор на канал, с которого Вы начинаете интегрирование и ведите до канала, на котором вы хотите закончить интегрирование, удерживая левую клавишу мышки. Выделенная область спектра потемнеет. Отпустите клавишу. Появится окно, в котором будет информация о проинтегрированной области. Проверьте, правильно ли указаны пределы интегрирования. Вам понадобится значение «Площадь области пика S:». Запишите его. Проделайте аналогичную работу для всех получаемых спектров (по мере их записи), включая фон. Разумеется, пределы интегрирования должны быть одинаковы! По результатам составьте таблицу, аналогичную табл. 2 (в этом варианте работы во втором столбце будет по одному значению I для каждого измерения). Время Δt будет соответствовать выбранному Вами времени набора. Величину t_{start} можно взять из времени создания данного файла на компьютере.

5. Обработка результатов эксперимента

1. Составьте таблицу по результатам измерений.

2. Постройте график зависимости активности фильтра от времени. Для всех точек должны быть указаны погрешности.

3. Аппроксимируйте полученный график уравнением на основании формулы (4).

4. Определите эффективную постоянную распада (с погрешностью). Сравните ее с табличными данными. Убедитесь, что она не равна средней арифметической постоянных распада для ядер ^{214}Pb и ^{214}Bi.

5. Аппроксимируйте полученные результаты уравнением (15) с условиями:

   А) Равенства $I_{A_0} = I_{B_0}$. Найти постоянные распада ^{214}Pb и ^{214}Bi. Сравнить полученные результаты с табличными значениями (табл. 1).

   Б) Подставить в уравнение (15) табличные значения постоянных распада и найти I_{A_0} и I_{B_0}. Хорошо ли выполнено предположенное в предыдущем пункте условие равенства?

6. Контрольные вопросы

1. Что такое постоянная распада, среднее время жизни, период полураспада?

2. Что такое радиоактивный ряд?

3. Что такое вековое равенство?

4. Выведите уравнение (15)?

5. Какому графику на рисунке 3 будет соответствовать цепочка ^{220}Rn–^{214}Pb (пренебрежем Po)?

6. Какому графику на рисунке 3 будет соответствовать цепочка ^{214}Pb–^{214}Bi?

7. Чему равна активность образца с N_0 распадающимися в стабильное состояние ядрами? А если распад происходит в нестабильное ядро, как на рис. 2?

Список литературы

[1] И.Н. Бекман. Радон: враг, врач и помощник. http://profbeckman.narod.ru/rad.files/Rad2SS.pdf

[2] Новикова Г.И. Введение в ядерную физику. Москва-Ижевск 2005

[3] Бопп Ф. Введение в физику ядра, адронов и элементарных частиц. Мир 1999

[4] Сергеев В.О. Практикум по ядерной физике. Санкт-Петербург 2006

Приложение

Таблица 3 — Таблица энергий для распада ^{214}Pb *на возбужденные состояния* ^{214}Bi.

Энергия (кэВ)	E_{max} **(кэВ)**	**Интенсивность (%)**
48.3	180	2.75 %
143.1	485	1.04 %
205.5	667	45.9 %
225.6	724	40.2 %
334.9	1019	11.0 %

Среднее значение энергии 223 кэВ.

Таблица 4 — Таблица энергий для распада ^{214}Bi *на возбужденные состояния* ^{214}Po *(даны значения для интенсивностей больше 1%).*

Энергия (кэВ)	E_{max} **(кэВ)**	**Интенсивность (%)**
248.2	788	1.244 %
260.9	822	2.78 %
352.1	1066	5.60 %
385.1	1151	4.345 %
424.6	1253	2.450 %
427.1	1259	1.431 %
433.5	1275	1.177 %
474.9	1380	1.588 %
492.0	1423	8.14 %
525.3	1505	16.96 %
539.4	1540	17.57 %
615.4	1727	3.12 %
683.7	1892	7.35 %
1268.8	3270	19.10 %

Среднее значение энергии 642 кэВ.