

Лабораторная работа 5

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

Цель работы: изучить методику измерения удельной γ -активности радиоактивных образцов и методику статистической обработки результатов измерений.

ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

Радиоактивность – физический процесс, при котором атомное ядро испускает одну или несколько частиц. При этом может изменяться не только заряд ядра, но и массовое число. К основным радиоактивным процессам относятся α -распад, $\beta^\pm$ -распад и γ -излучение.

Наблюдения за радиоактивными превращениями ядер показали, что распады являются стационарными случайными процессами, для которых все моменты времени равноправны, и, следовательно, радиоактивные ядра не имеют возраста. Явление радиоактивного распада, как случайный процесс, должно изучаться только статистическими методами, т.е. на языке вероятностей и средних значений.

Наблюдения за радиоактивными ядрами показали также, что вероятность распадов не зависит от агрегатного состояния вещества и в очень широких пределах не зависит от температуры, давления, электрических и магнитных полей и других внешних факторов.

Вероятность распада ядра за единицу времени λ является очень важной характеристикой радиоактивных свойств ядер. Она называется *постоянной распада* и однозначно связана со средним временем жизни ядра или периодом полураспада.

Из сказанного выше следует, что среднее число распадов $dN_{\text{я}}$ за время dt зависит только от количества радиоактивных ядер $N_{\text{я}}(t)$ в момент времени t . Это позволяет записать дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN_{\text{я}}}{dt} = -\lambda N_{\text{я}}. \quad (1)$$

Знак «минус» соответствует убыванию числа ядер в процессе распада. Так как $\lambda \neq f(t)$, решение (1) приводит к известному экспоненциальному закону радиоактивного распада:

$$\overline{N_{\text{я}}(t)} = \overline{N_{\text{я}}(0)} e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где $\overline{N_{\text{я}}(t)}$ – среднее число ядер, оставшихся к моменту времени t , т. е. не распавшихся за время t ; $\overline{N_{\text{я}}(0)}$ – среднее число ядер в момент, выбранный за начало наблюдения. В дальнейшем черту, обозначающую среднее значение, будем опускать.

Следует обратить внимание на множитель $e^{-\lambda t}$. Он имеет очевидный смысл вероятности для ядра не распасться за конечное время t .

Из уравнения (2) легко найти связь постоянной распада λ с периодом полураспада $T_{1/2}$, т. е. временем, за которое число радиоактивных ядер убывает вдвое по сравнению с $N(0)$:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda.$$

Иногда удобно пользоваться понятием среднего времени жизни ядра τ . Очевидно, что $\tau = 1/\lambda$ и, как следует из (2), это есть время, за которое число радиоактивных ядер убывает в e раз.

Знание λ и количества соответствующих радиоактивных ядер в образце $N_{\text{я}}$ позволяет оценить полное число распадов в единицу времени A :

$$A = \lambda N_{\text{я}}. \quad (3)$$

Величина A называется активностью. В отличие от λ , активность характеризует интенсивность распадов образца в целом, а не отдельного ядра. Из уравнений (2) и (3) видно, что активность убывает также по экспоненциальному закону:

$$A(t) = A(0) e^{-\lambda t}.$$

Единицей активности в системе СИ является *беккерель* (Бк). Он соответствует одному распаду в секунду: 1 Бк = 1 расп./с.

До сих пор также используется старейшая внесистемная единица активности – *кюри* (Ки): 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ расп./с.

Такую активность имеет 1г Ra. Это очень большая активность, поэтому часто используются ее доли – милли и микро:

$$1 \text{ мКи} = 10^{-3} \text{ Ки}, \quad 1 \text{ мкКи} = 10^{-6} \text{ Ки}.$$

В целом ряде ядерно-физических задач требуется знать не полную активность образца (она может быть очень большой, если образец большой по массе), а удельную, т. е. отнесенную к единице массы (Бк/кг), объема (объемная активность, Бк/м³, Бк/л) или поверхности (поверхностная активность, Бк/м²). Внесистемные единицы удельной активности – соответственно Ки/кг, Ки/м³, Ки/л и Ки/км².

В частности, после аварии на ЧАЭС в 1986 г. в окружающую среду, т. е. в атмосферу, почву и воду, а, следовательно, и в пищевые продукты, попали долгоживущие радиоизотопы Cs-137 ($T_{1/2} = 29$ л), Sr-90 ($T_{1/2} = 30$ л), Pu-239 ($T_{1/2} = 24\,000$ л) и др. Поэтому для обеспечения безопасности употребления продуктов питания (молока, мяса, рыбы, грибов, ягод и т. д.) возникла задача тщательного измерения их удельных активностей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ

При радиоактивном распаде ядер возникают частицы (α , β , γ), которые при попадании в детектор могут быть зарегистрированы, т. е. привести к отсчетам. Однако число отсчетов детектора в единицу времени отнюдь не совпадает с действительной активностью источника (образца). Даже в идеальном случае 4π -геометрии существует ряд факторов, мешающих 100 % регистрации. Кроме того, существует квантовый выход частиц на распад. Например, возможно каскадное испускание γ -квантов, что может привести к неправильной оценке соответствующей α - или β -активности. В общем же случае существует довольно сложная связь между числом отсчетов N и активностью образца:

$$n = N/t = kA, \quad (4)$$

где n – интенсивность отсчетов, или скорость счета; t – время измерения. Коэффициент k на самом деле представляет собой произведение нескольких сомножителей. Они учитывают такие, например, факторы, как геометрия эксперимента (т. е. телесный угол, под которым образец «видит» детектор); эффективность регистрации, зависящую от сорта частиц и их энергии; вероятность поглощения и рассеяния в толще образца; квантовый выход частицы и др. Отметим, что k не зависит от активности до тех пор, пока можно пренебречь мертвым временем установки. При очень больших активностях в k появится множитель, учитывающий просчеты в регистрации. Обычно коэффициент k неизвестен. Если же он известен, то активность определяется очень просто по измеренной скорости счета из выражения (4). Такой метод измерения активности называется абсолютным.

Относительный метод измерения используется без знания коэффициента k , но он требует наличия соответствующего радиоактивного источника с известной активностью (эталонного образца).

Скорость счета от эталона $n_э$ связана с известной активностью эталона $A_э$ соотношением типа (4):

$$n_э = N_э/t_э = kA_э. \quad (4')$$

Измерение неизвестной активности исследуемого образца A_x , имеющего те же размеры и плотность, что и эталон, и содержащего тот же радионуклид, следует проводить в полностью идентичных условиях, т. е. в той же геометрии эксперимента и при том же режиме работы установки, что и для эталона. Только в этом случае коэффициент k в (4'') будет равен k в (4'):

$$n_x = N_x/t_x = kA_x. \quad (4'')$$

Из (4') и (4'') получаем формулу, связывающую неизвестную активность с эталонной:

$$A_x = (n_x/n_э) * A_э. \quad (5)$$

Таким образом, относительный метод измерения активности сводится к измерению скоростей счета импульсов от эталона и исследуемого образца.

Следует иметь в виду, что в действительности все измерения активностей ($A_э$ и A_x) проводятся в присутствии фона. Фон создается в основном космическими частицами и собственными шумами детектора. И если от первых можно частично защититься экраном, то шумы в принципе неустранимы.

В формуле (5) предполагается, что число фоновых отсчетов в единицу времени $n_ф \ll n_x$ и $n_ф \ll n_э$.

При измерении малых активностей влияние фона возрастает, и пренебрежение им недопустимо, так как оно будет приводить к грубым ошибкам в оценке результатов.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе относительным методом проводятся измерения малых удельных активностей различных образцов, содержащих радиоактивный изотоп

Cs-137, испускающий электроны и далее γ -кванты ($E_\gamma = 661$ кэВ). Схема β -распада Cs-137 приводится, например, в лабораторной работе 4 и др.

Вследствие малой длины пробега электронов и наличия защитного слоя у сцинтиллятора все электроны поглотятся и не попадут в рабочий объем детектора. Таким образом, все отсчеты детектора будут связаны с регистрацией фона и γ -квантов от Cs-137.

В присутствии фона все измерения проводятся в два этапа:

1. Измерение фона, т. е. измерение числа фоновых отсчетов N_ϕ за время t_ϕ .

2. Измерение суммарного числа отсчетов от исследуемого источника и фона $N_{x+\phi} = N_x + N_\phi$ за время $t_{x+\phi}$. Такое же измерение следует провести и для эталона: $N_{э+\phi} = N_э + N_\phi$ за время $t_{э+\phi}$.

Скорость счета, связанная с регистрацией активности эталона, $n_э$, определяется, как разность двух измерений:

$$n_э = \frac{N_{э+\phi}}{t_{э+\phi}} - \frac{N_\phi}{t_\phi} = n_{э+\phi} - n_\phi. \quad (6)$$

Соответственно скорость счета, связанная с регистрацией неизвестной активности n_x , будет иметь вид, аналогичный выражению (6):

$$n_x = \frac{N_{x+\phi}}{t_{x+\phi}} - \frac{N_\phi}{t_\phi} = n_{x+\phi} - n_\phi. \quad (6')$$

Отметим, что не только $t_{э+\phi}$ и $t_{x+\phi}$ может быть разным, но и время измерения фона в выражениях (6) и (6') также может быть разным.

Таким образом, в присутствии фона формула (5) приобретает окончательный рабочий вид:

$$A_x = \frac{n_{x+\phi} - n_\phi}{n_{э+\phi} - n_\phi} A_э. \quad (7)$$

Из формулы (7) можно найти неизвестную активность A_x , если известны активность эталона $A_э$ и скорости счета $n_{э+\phi}$, $n_{x+\phi}$ и n_ϕ . Отметим, что формула (7) справедлива и для удельных активностей, если эталон и образец имеют одинаковые конфигурации, массы и плотности.

Для того чтобы оценить статистические погрешности измерений, необходимо воспользоваться некоторыми сведениями из теории оши-

бок. В частности, надо уметь находить дисперсию D функции нескольких независимых случайных величин. Так, если $Y = f(z_1, z_2, \dots, z_n)$, то

$$D_Y = \left(\frac{\partial f}{\partial z_1} \right)_{\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_n}^2 D_{z_1} + \left(\frac{\partial f}{\partial z_2} \right)_{\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_n}^2 D_{z_2} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z_n} \right)_{\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_n}^2 D_{z_n}, \quad (8)$$

где $\bar{z}_i$ – среднее значение случайной величины z_i .

Поскольку измеряемая неизвестная активность $A_x = f(n_\alpha, n_x, A_\alpha)$, из выражения (8) легко получаем относительную ошибку при определении A_x :

$$\delta_{A_x} = \frac{\sqrt{D_{A_x}}}{\bar{A}_x} = \sqrt{\delta_{n_\alpha}^2 + \delta_{n_x}^2 + \delta_{A_\alpha}^2}. \quad (9)$$

Вот эту ошибку и следует вычислить, чтобы эксперимент считать завершенным.

Для того, чтобы правильно оценить δ_n , напомним, что скорости счета n рассчитываются по измеренным числам отсчетов N , т.е. $n = N/t$. Обычно распределение отсчетов можно считать пуассоновским. Тогда $D_N = \bar{N}$ и из выражения (8) получаем:

$$D_n = D_N / t^2 = \bar{N} / t^2 = n/t, \\ \delta_n = \sqrt{D_n} / n = 1 / \sqrt{\bar{N}}. \quad (10)$$

Из формулы (10) следует очень важный вывод: относительная ошибка при измерении скорости счета определяется полным числом соответствующих отсчетов.

Принимая во внимание, что измерения проводятся в присутствии фона, из формул (6) и (6'), используя (8), получаем

$$D_{n_\alpha} = n_{\alpha+\phi} / t_{\alpha+\phi} + n_\phi / t_\phi, \quad (11)$$

$$\delta_{n_\alpha} = \frac{\sqrt{\frac{n_{\alpha+\phi}}{t_{\alpha+\phi}} + \frac{n_\phi}{t_\phi}}}{n_{\alpha+\phi} - n_\phi} \quad (12)$$

для скорости счета от эталона и аналогичные выражения для образца с неизвестной активностью:

$$D_{n_x} = n_{x+\phi} / t_{x+\phi} + n_\phi / t_\phi, \quad (13)$$

$$\delta_{n_x} = \frac{\sqrt{\frac{n_{x+\phi}}{t_{x+\phi}} + \frac{n_{\phi}}{t_{\phi}}}}{n_{x+\phi} - n_{\phi}}. \quad (14)$$

Из (12) или (14) видно, что относительную ошибку можно уменьшить, только увеличивая время измерения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Внимание! Перед началом работы проверить заземление блока сцинтилляционного детектора.

Для измерения активности спектрометр должен работать в интегральном режиме и выдавать за фиксированное время суммарное число отсчетов по всем каналам. Это достигается заданием времени измерения и нажатием клавиши «Старт» в режиме набора спектра. Кнопка «Σ» на панели спектрометра слева выдает суммарное число импульсов. ДНУ, ДВУ и напряжение питания ФЭУ подбираются таким образом, чтобы весь измеряемый спектр помещался на экране.

Для увеличения скорости счета эталонный и, соответственно, исследуемый образцы помещают в емкость специальной формы (сосуд Маринелли), максимально охватывающей сцинтиллятор.

В данной работе используются эталонный источник с известной активностью и такой же источник с неизвестной активностью. Оба заключены в сосуды Маринелли. При измерении фона также используется сосуд Маринелли, заполненный соответствующим чистым веществом.

Порядок проведения эксперимента

Включить установку в следующей последовательности: компьютер, спектрометр, далее войти в программу «Спектр». Установить рабочий режим таким, чтобы на экране помещался весь спектр от эталонного источника. Прогреть установку в течение 10–15 мин.

В данной работе используется эталонный радиоактивный источник гамма-квантов Cs-137 и идентичный во всех отношениях образец того же изотопа с неизвестной активностью.

Задание 1. Экспериментально изучить зависимость относительной погрешности измерения от времени измерения.

Провести три раза измерения фоновых отсчетов за одно и то же время, например, за 20с. Суммирование провести с помощью кнопки «Σ». Сравнить результаты и убедиться в случайной природе регистрируемого процесса.

В течение временных интервалов t_1 , t_2 , t_3 (например, 30, 60 и 100 с) провести измерение фона – суммирование по всем каналам – N_{ϕ} . В течение тех же интервалов времени провести измерения с эталоном $N_{\varepsilon+\phi}$ в присутствии фона. Поскольку в данном случае $t_{\varepsilon+\phi} = t_{\phi}$, из формулы (14) получаем

$$\delta_{n_{\varepsilon}} = \delta_{N_{\varepsilon}} = \sqrt{N_{\varepsilon+\phi} + N_{\phi}} / (N_{\varepsilon+\phi} - N_{\phi})$$

Данные, полученные в эксперименте, необходимо сохранить. Сохраненные данные запишутся на диске D. Путь, по которому можно их найти, следующий:

Диск D → папка «3 курс» → папка «Данные» → папка «Студенты» → папка с фамилией студента → номер лабораторной работы → номер задания → номер спектра.

Результаты измерений представить в виде таблицы 1.

Таблица 1

T	t_1	t_2	t_3
N_{ϕ}			
$N_{\varepsilon+\phi}$			
N_{ε}			
$\delta_{N_{\varepsilon}}$			

После заполнения таблицы из последней строки должно быть видно, что с увеличением времени измерения, т.е. с увеличением числа отсчетов N_{ε} , погрешность $\delta_{n_{\varepsilon}} = \delta_{N_{\varepsilon}}$ уменьшается.

Задание 2. Рассчитать относительную погрешность измерения скорости счета от эталонного образца.

Провести измерение числа отсчетов N_{ϕ} за время $t_{\phi} = 100$ с и найти соответствующую скорость счета $n_{\phi} = N_{\phi} / t_{\phi}$. Провести измерение $N_{\varepsilon+\phi}$ за время $t_{\varepsilon+\phi} = 200$ с и найти скорость счета $n_{\varepsilon+\phi} = N_{\varepsilon+\phi} / t_{\varepsilon+\phi}$. Результаты измерений представить в виде таблицы 2.

Таблица 2

t_{ϕ}	N_{ϕ}	n_{ϕ}	$t_{\varepsilon+\phi}$	$N_{\varepsilon+\phi}$	$\underline{n}_{\varepsilon+\phi}$

Используя формулу (12), рассчитать относительную погрешность измерения скорости счета от эталона.

Задание 3. Аналогично заданию 2 провести измерения скорости счета для образца с неизвестной активностью. Время измерения фона выбрать равным 150с, время измерений с исследуемым образцом 250с. Заполнить таблицу, аналогичную приведенной в задании 2.. По формуле (14) рассчитать относительную погрешность скорости счета от исследуемого образца.

Задание 4. Вычислить неизвестную активность образца по формуле (7). Рассчитать также удельную активность, выраженную в Бк/л и Бк/кг. Необходимые данные – активность эталона A_{ε} , его масса и объем заданы: $A_{\varepsilon} = 2 \cdot 10^3$ Бк, $m = 440$ г, $V = 0.5$ л.

Задание 5. Оценить статистическую погрешность измерения A_x по формуле (9); $\delta_{n_{\varepsilon}}$ и δ_{n_x} взять из заданий 2 и 3. Погрешность измерения эталонной активности $\delta A_{\varepsilon} = 1\%$.

Задание 6. Сравнить активности двух точечных источников Cs-137. Для этого провести измерения числа отсчетов для каждого из них за одинаковое время t (например, 100 с). Найти 95% доверительный интервал для каждого измерения: $N \pm 2\sqrt{N}$. Сделать выводы об одинаковой (интервалы перекрываются) или различной активности источников (интервалы не перекрываются).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Являются ли термины «активность» и «радиоактивность» эквивалентными?
2. В каких единицах измеряется удельная активность?
3. Как связаны единицы активности Бк и Ки?
4. Что называется постоянной распада λ ?
5. По какому закону изменяется активность радиоактивного источника во времени?