

## Лабораторная работа №2

### Измерение активности неизвестного образца относительным методом

**Цель работы:** изучить методику измерения  $\gamma$ -активности радиоактивных образцов, методику статистической обработки результатов измерений и определить начальную активность неизвестного изотопа

### 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  $\alpha$ -распад,  $\beta^{\pm}$ -распад и  $\gamma$ -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  $\lambda$  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  $\lambda$  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  $\tau$ . Очевидно, что  $\tau = 1/\lambda$  и, как следует из (2), это есть время, за которое число радиоактивных ядер убывает в  $e$  раз.

Знание  $\lambda$  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  $\lambda$ , 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/м<sup>3</sup>, Бк/л) или поверхности (поверхностная активность, Бк/м<sup>2</sup>). Внесистемные единицы удельной активности – соответственно Ки/кг, Ки/м<sup>3</sup>, Ки/л и Ки/км<sup>2</sup>.

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 ( $T_{1/2}=29$  лет), Sr-90 ( $T_{1/2}=30$  лет), Pu-239 ( $T_{1/2}=24\,000$  лет) 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 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), 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 4 $\pi$ -геометрии существует ряд факторов, мешающих 100 % регистрации. Кроме того, существует квантовый выход частиц на распад. Например, возможно каскадное испускание  $\gamma$ -квантов, что может привести к неправильной оценке соответствующей  $\alpha$ - или  $\beta$ -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 (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 естественной радиоактивностью, а также собственными шумами детектора. И если от первых двух источников фона можно частично защититься экраном, то шумы в принципе неустраняемы.

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 это будет приводить к грубым ошибкам в оценке результатов.

## **ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ**

В данной работе относительным методом проводятся измерения удельной активности образца, содержащего радиоактивный изотоп Ва-133, из которого за счет процесса  $K$ -захвата образуется изотоп Cs-133 в метастабильном состоянии. Переход данного изотопа из метастабильного состояния в основное сопровождается испусканием ряда  $\gamma$ -квантов с

различной энергией. Схема распада изотопа Ba-133 приведена на рисунке 1.

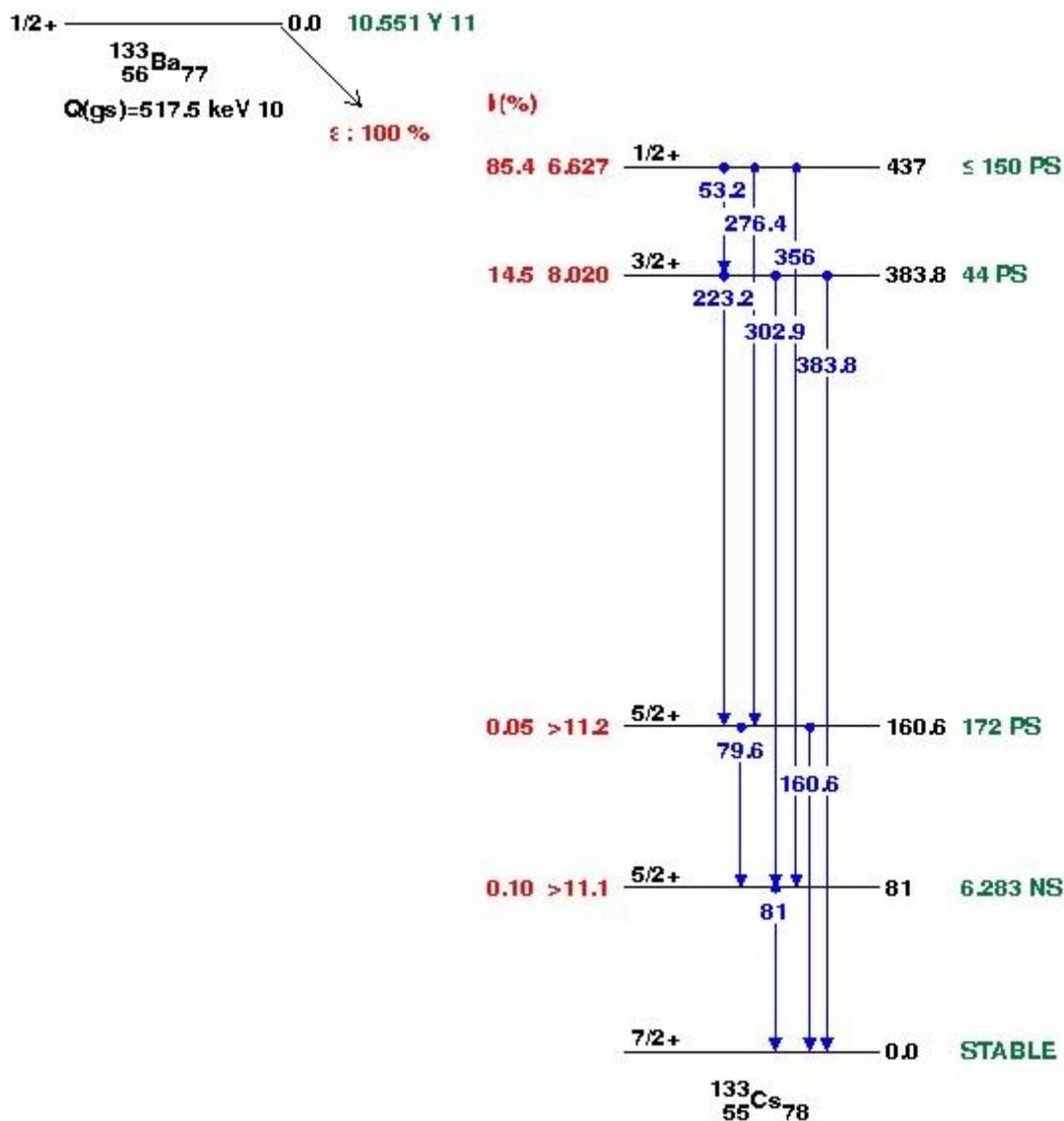


Рис.1. Схема распада изотопа Ba-133

Вследствие наличия защитного экрана у сцинтилляционного детектора, все отсчеты детектора будут связаны только с регистрацией фона и  $\gamma$ -квантов от Cs-133 (электроны и прочие заряженные частицы не будут вносить вклад в скорость счета детектора).

В присутствии фона все измерения проводятся в два этапа:

1. Измерение фона, т. е. измерение числа фоновых отсчетов  $N_{\phi}$  за время  $t_{\phi}$ .

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:  $N_{\varepsilon+\phi} = N_{\varepsilon} + N_{\phi}$  за время  $t_{\varepsilon+\phi}$ .

Скорость счета, связанная с регистрацией активности эталона,  $n_{\varepsilon}$ , определяется, как разность двух измерений:

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

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  $t_{\varepsilon+\phi}$  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:

$$A_x = \frac{n_{x+\phi} - n'_{\phi}}{n_{\varepsilon+\phi} - n_{\phi}} A_{\varepsilon}. \quad (7)$$

Из формулы (7) можно найти неизвестную активность  $A_x$ , если известны активность эталона  $A_{\varepsilon}$  и скорости счета  $n_{\varepsilon+\phi}$ ,  $n_{x+\phi}$  и  $n_{\phi}$ . Отметим, что формула (7) справедлива и для удельных активностей, если эталон и образец имеют одинаковые конфигурации, массы и плотности. Следует помнить, что в формуле (7) активность эталона берется на момент измерений, т.е. с учетом того, что часть препарата уже успела распасться с момента его изготовления.

Для того чтобы оценить статистические погрешности измерений, необходимо воспользоваться некоторыми сведениями из теории ошибок. 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  $A_x$ :

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

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

Для того, чтобы правильно оценить  $\delta_n$ , 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:

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

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!** Запрещается приступать к работе, не ознакомившись с правилами безопасности при работе на установке «Однокристалльный сцинтилляционный детектор гамма-излучения».

*Описание установки.*

Фотография стенда с однокристалльным сцинтилляционным детектором гамма-излучения приведена на рис. 2.

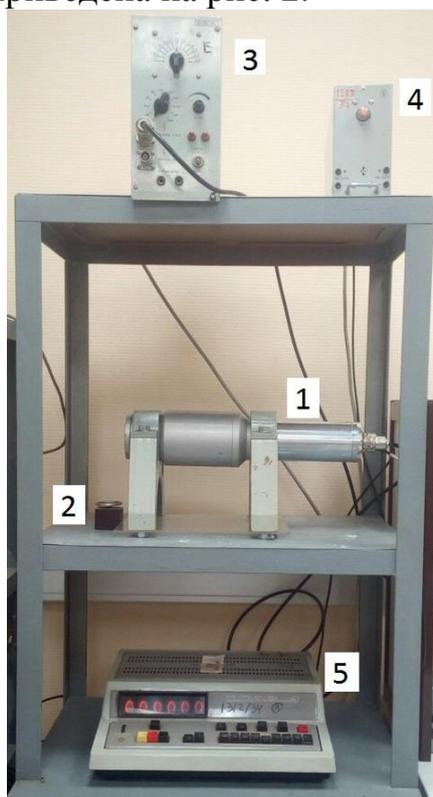


Рис. 2. Схема однокристалльного сцинтилляционного детектора: 1 - сцинтилляционный детектор, 2 – точка расположения источника излучения; 3 – источник высокого напряжения; 4 – источник низкого напряжения; 5 – устройство обработки сигналов, поступающих с детектора (пересчетный прибор).

Фотоны от стандартных закрытых источников излучений регистрируются спектрометрическим сцинтилляционным детектором 1 с кристаллом сцинтиллятора  $NaI(Tl)$ , размером 60x80 мм. Высокое напряжение для питания на сцинтилляционный детектор подается от источника питания 3. В данной работе используется сцинтилляционный детектор с напряжением питания 1200 В положительной полярности.

Детектор 1 представляет собой, так называемый, сцинтилляционный блок, структурная схема которого показана на рисунке 3.

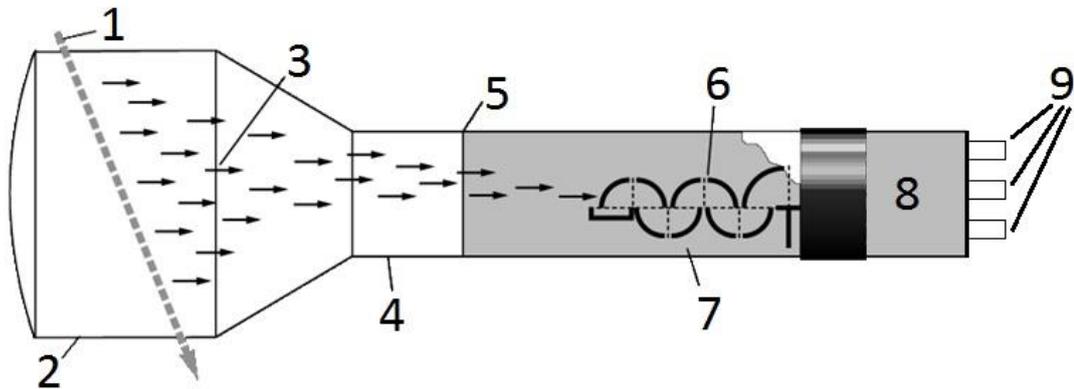


Рис.3. Структурная схема сцинтилляционного блока. 1-гамма квант или заряженная частица; 2-сцинтиллятор (в данном случае кристалл  $NaI(Tl)$ ); 3-фотоны света; 4-световод; 5-фотокатод; 6-система динодов; 7-фотоумножитель (ФЭУ); 8-делитель напряжения и согласующее устройство; 9-выходные разъемы: разъем высокого напряжения для динодов ФЭУ, разъем для низкого напряжения усилителя, разъем для выходного сигнала.

Импульс света, возникающий в кристалле сцинтиллятора при прохождении через него гамма кванта или ионизирующей частицы, регистрируется с помощью фотоэлектронного умножителя, состоящего из фотокатода, анода и динодов. Попадая сквозь прозрачное окно на фотокатод ФЭУ, кванты света вырывают из светочувствительного слоя некоторое количество электронов. Фотоэлектроны ускоряются электрическим полем и ударяют о специальные электроды, называемые динодами. На динодах происходит умножение электронов. Последний динод является анодом.

Наиболее важной частью ФЭУ является фотокатод, который изготавливают из щелочных металлов с малой работой выхода. Основными требованиями к фотокатоду являются: высокая спектральная чувствительность, равномерная по всей поверхности катода, соответствие спектральной чувствительности фотокатода спектральному составу люминесценции сцинтиллятора; минимальная термоэмиссия при рабочей температуре (минимальный шум), стабильность в работе (минимальное “утомление”).

Диноды изготавливаются из металлов с малой работой выхода, способных при бомбардировке электронами испускать вторичные электроны в количестве, превышающем число первичных в несколько раз.

Согласующее устройство служит для согласования высокого выходного сопротивления ФЭУ с низким волновым сопротивлением кабеля, соединяющего детектор с регистрирующим прибором. Согласующее устройство питается от источника низкого напряжения 4 (величина напряжения 12 Вольт отрицательной полярности).

Для регистрации импульсов, поступающих с детекторов, служит пересчетный прибор 5 типа ПСО-2. Прибор осуществляет подсчет импульсов определенной амплитуды, поступающих на его вход, за определенное время, которое можно выставить с помощью кнопок на панели прибора.

**При включении установки необходимо соблюдать следующую последовательность действий.**

Убедиться в том, что источник питания детектора отключен от сети переменного тока. Проверить подключение сцинтилляционного детектора к источнику питания. Посмотреть на значение регулятора высокого напряжения на лицевой панели источника питания, убедиться, что на источнике питания выставлено значение напряжения меньше рабочего (не более 1200 вольт).

Проверить подключение источника низковольтного питания ко входу блока детектирования. Выход источника питания с надписью «-» должен быть подключен ко входу детектора с надписью «низкое».

Проверить подключение сигнального кабеля от выхода детектора (разъем с надписью «сигнал») ко входу пересчетного прибора ПСО-2.

Включить в сеть высоковольтный источник питания детектора. Включить пересчетный прибор нажав на кнопку с надписью «сеть». Убедиться в том, что низковольтный источник питания функционирует (горит лампочка). Далее включить источник питания детектора, переключив тумблер на лицевой панели блока питания в положение «вкл». При подаче высокого напряжения будет слышен непрерывный высокочастотный звуковой сигнал. С помощью ручки регулировки напряжения **плавно** выставить рабочее напряжение детектора (1200 вольт). Дать прогреться установке в течение 10-15 минут.

Количество импульсов, поступивших с детектора на вход пересчетного устройства будет отображаться в информационном окне данного прибора.

В данной работе используются эталонный источник типа ОСГИ (образцовый спектрометрический гамма источник) с известной активностью и аналогичный источник с неизвестной активностью. Следует сохранять геометрию расположения эталонного и неизвестного источника относительно детектора при проведении измерений. Измерение фона производится при отсутствии источников в непосредственной близости рядом с детектором.

Активность эталонного источника Ва-133 на момент его изготовления составляла 117 кБк. Дата изготовления эталонного источника 31.12.2001 года. Расчет активности эталонного источника на момент измерения провести, используя основной закон радиоактивного распада.

## **Порядок проведения эксперимента (эксперимент проводится только под непосредственным контролем лаборанта или преподавателя)**

Ознакомиться с установкой по описанию, усвоить правила работы на установке. Включить установку в соответствии с инструкциями в описании.

В данной работе используется эталонный радиоактивный источник гамма-квантов  $Ba-133$  и идентичный во всех отношениях образец того же изотопа с неизвестной активностью.

Снятие данных с помощью установки проводится в следующем порядке.

Установить определенное значение времени набора, нажав на панели пересчетного устройства соответствующую кнопку.

Запустить набор данных. По окончании установленного промежутка времени набор данных автоматически прекратится.

Далее, для уменьшения статистической погрешности, необходимо повторить измерения в том же порядке еще несколько раз. Полученные данные следует занести в таблицу 1.

*Напоминание: при работе с источниками ионизирующего излучения запрещается подвергать их разрушающим воздействиям, брать незащищенными руками, подносить к глазам, забирать с собой или как-либо еще использовать не по назначению.*

**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. Сравнить результаты и убедиться в случайной природе регистрируемого процесса.

В течение временных интервалов  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  (10, 30, и 100 с) провести измерение фона  $N_\phi$ . В течение тех же интервалов времени провести измерения с эталоном  $N_{\text{э}+\phi}$  в присутствии фона. Поскольку в данном случае  $t_{\text{э}+\phi} = t_\phi$ , из формулы (14) получаем

$$\delta_{n_\text{э}} = \delta_{N_\text{э}} = \sqrt{N_{\text{э}+\phi} + N_\phi} / (N_{\text{э}+\phi} - N_\phi).$$

Данные, полученные в эксперименте, необходимо записать в заранее подготовленную таблицу (в качестве примера можно воспользоваться таблицей 1).

Таблица 1

$T$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
$N_\phi$			
$N_{\text{э}+\phi}$			
$N_\text{э}$			
$\delta_{N_\text{э}}$			

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

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

Провести измерение числа отсчетов  $N_\phi$  за время  $t_\phi = 100\text{с}$  и найти соответствующую скорость счета  $n_\phi = N_\phi / t_\phi$ . Провести измерение  $N_{\text{э}+\phi}$  за время  $t_{\text{э}+\phi} = 300\text{с}$  и найти скорость счета  $n_{\text{э}+\phi} = N_{\text{э}+\phi} / t_{\text{э}+\phi}$ . Результаты измерений представить в виде таблицы 2.

Таблица 2

$t_\phi$	$N_\phi$	$n_\phi$	$t_{\text{э}+\phi}$	$N_{\text{э}+\phi}$	$n_{\text{э}+\phi}$

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 100с, время измерений с исследуемым образцом 300 с. 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).

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

Задание 6. Используя полученное значение активности неизвестного источника, определить активность источника на момент его изготовления, считая, что дата изготовления источника 01.11.2013 года, а период полураспада Ва-133 составляет 3862 суток.

## 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?
5. По какому закону изменяется активность радиоактивного источника во времени?