

Лабораторная работа 7

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР С ОРГАНИЧЕСКИМ СЦИНТИЛЛЯТОРОМ

Цель работы: ознакомиться с типичными аппаратными спектрами при регистрации бета и гамма излучения и с методами анализа таких спектров.

При выполнении этой работы необходимо предварительно ознакомиться с содержанием главы «Спектры и спектрометры» в лабораторной работе 6.

СПЕКТРОМЕТРЫ С ОРГАНИЧЕСКИМИ СЦИНТИЛЛЯТОРАМИ

Органические сцинтилляторы являются ароматическими органическими веществами, состоящими из нескольких бензольных колец. Применяют органические сцинтилляторы как в виде монокристаллов (антрацен, стильбен и др.), так и в виде твердых или жидких растворов. Органические сцинтилляторы в виде твердых растворов характеризуются очень хорошими механическими свойствами в отличие от монокристаллов, которые весьма непрочны.

Состав вещества органических сцинтилляторов представлен только легкими элементами (водород, углерод), т. е. элементами с небольшим порядковым номером, что определяет взаимодействие частиц с этими веществами. Как известно, в таких веществах γ -кванты взаимодействуют в основном только посредством комптоновского рассеяния, так как сечения фотоэффекта и образования электрон-позитронных пар весьма малы. Обратное рассеяние β -частиц, которое усложняет процесс их регистрации, в легких веществах значительно меньше.

Плотность вещества органических сцинтилляторов невелика и лишь немного превосходит плотность воды.

Следует отметить высокое быстродействие органических сцинтилляторов поскольку постоянная времени высвечивания для них порядка 10^{-8} с.

Основным недостатком органических сцинтилляторов, как, впрочем, и неорганических, является невысокое энергетическое разрешение спектрометров, созданных на их основе.

Измерение спектров β -излучения

Рассмотрим аппаратную форму линии для спектрометров с неорганическими сцинтилляторами при регистрации бета частиц, т.е. электронов.

Как известно, электроны отдают свою энергию веществу в основном посредством ионизационных потерь, которые происходят по всей длине трека частицы. При энергиях ~ 1 МэВ электроны имеют длину трека порядка нескольких миллиметров. Если такой трек полностью укладывается внутри рабочего вещества детектора (сцинтиллятора), то электрон передает веществу всю свою энергию и величина энерговыделения ε совпадает с энергией электрона E . Если же трек полностью «не помещается» в рабочем веществе (например, из-за малых размеров сцинтиллятора), то электрон успеет отдать веществу лишь только часть своей энергии и покинет рабочий объем детектора. При этом очевидно, что энерговыделение будет меньше, чем энергия электрона.

Пусть на сцинтилляционный детектор спектрометра с достаточно большой толщиной сцинтиллятора падает пучок моноэнергетических электронов с энергией E_0 . Спектр энерговыделений ε в рабочем веществе детектора от таких частиц схематично показан на рис. 1, *a*. В целом он совпадает с энергетическим спектром регистрируемых частиц, несколько отличаясь лишь участком с $\varepsilon < E_0$. В этой области формируется непрерывный спектр неполных энерговыделений электронов в основном за счет процесса обратного рассеяния, при котором электроны изменяют направление своего движения и могут покинуть сцинтиллятор, унося с собой некоторую часть первоначальной энергии E_0 .

На рис. 1, *b* показана соответствующая АФЛ, т. е. распределение выходных импульсов детектора по амплитуде. Этот спектр в большей степени отличается от исходного распределения электронов по энергии, поскольку он как бы «размазан» за счет флуктуаций в процессе преобразования энергии ε в амплитуду сигнала V .

Степень размытия аппаратного спектра характеризуется величиной энергетического разрешения R , которое определяется отношением ши-

рины пика ΔE , взятой на уровне половины его максимальной высоты, к энергии частиц E_0 :

$$R = \Delta E / E_0 .$$

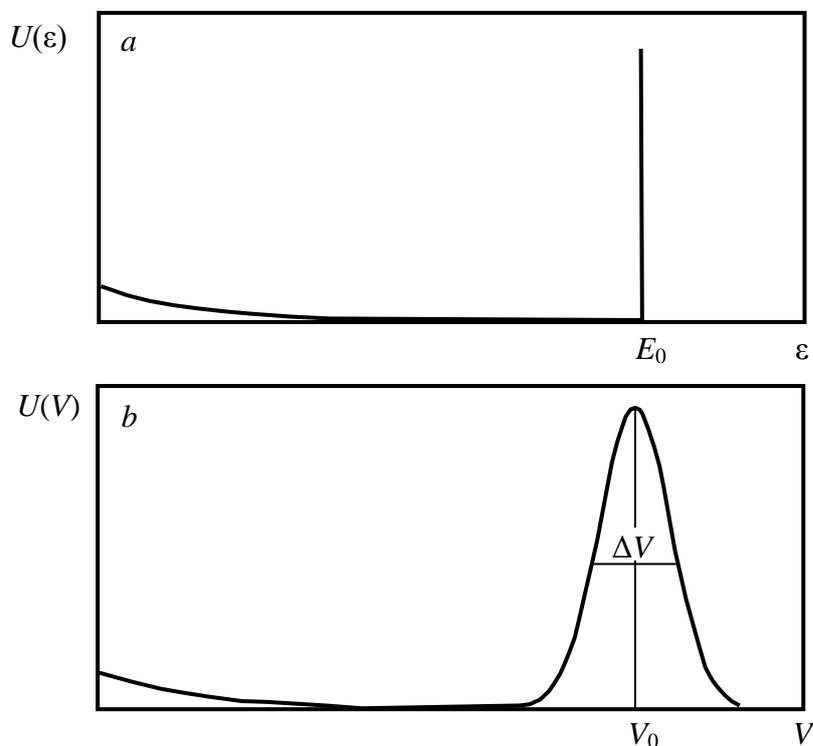


Рис. 1. Спектр энерговыделений в рабочем веществе детектора при регистрации заряженных частиц (a) и аппаратурная форма линии для заряженных частиц (b)

При этом ширину пика, выраженную в каналах ΔV , находят из аппаратурного спектра $U(V)$ и переводят в энергетические единицы ΔE .

Для перевода используют зависимость средней величины амплитуды сигнала V от энерговыделения ϵ , которое можно считать равным энергии частиц E_0 . Например, в случае линейной зависимости $V = a E_0 + b$, где a и b – некоторые постоянные, разрешение можно найти по формуле

$$R = \Delta V / a E_0 . \quad (1)$$

Чем меньше величина R , тем лучше энергетическое разрешение спектрометра и тем лучше полученный аппаратурный спектр $U(V)$ соответствует исходному спектру электронов $\Phi(E)$. При достаточно хорошем энергетическом разрешении спектрометра аппаратурный спектр в некоторой степени «подобен» энергетическому спектру электронов и неплохо отражает его основные особенности. Поэтому необходимую информацию о спектре электронов $\Phi(E)$ в ряде случаев можно получить, не

прибегая к решению интегрального уравнения 1, приведенного в лабораторной работе 6.

Измерение спектров γ -излучения

Совсем другая ситуация будет при регистрации γ -квантов детектором с органическим сцинтиллятором. Спектр энерговывделений в веществе детектора в этом случае будет определяться энергиями электронов отдачи, которые образуются при комптоновском рассеянии γ -квантов.

Энергия электрона отдачи E_e связана с энергией γ -кванта E_γ соотношением

$$E_e = E_\gamma - \frac{mc^2}{\frac{mc^2}{E_\gamma} + (1 - \cos\theta)}, \quad (2)$$

где θ – угол рассеяния γ -кванта; mc^2 – энергия массы покоя электрона.

Из формулы (2) видно, что энергия комптоновского электрона может заключаться в пределах от нуля (это соответствует углу рассеяния $\theta = 0^\circ$) до некоторой максимальной величины E_k (это соответствует углу рассеяния $\theta = 180^\circ$). Величина E_k зависит от энергии γ -квантов и соответствует краю непрерывного энергетического распределения комптоновских электронов.

Рассмотрим формирование АФЛ при регистрации γ -квантов. Пусть на сцинтилляционный детектор спектрометра падает пучок γ -квантов с энергией E_0 . Спектр энерговывделений в детекторе, который практически совпадает с энергетическим спектром комптоновских электронов, показан на рис. 2, *a*. Преобразование спектра энерговывделений в аппаратурный спектр $U(V)$ происходит с тем же «размытием» за счет флуктуаций, как и в рассмотренном ранее случае регистрации электронов. Получаемый при этом спектр $U(V)$ показан на рис. 2, *b*.

Как нетрудно установить, рассматривая рис. 2, *b*, восстановление исходного спектра γ -излучения $\Phi(E)$ по аппаратурному спектру $U(V)$ не является легкой задачей и требует, как правило, решения уравнения 1, приведенного в лабораторной работе 6. Это обстоятельство существенно ограничивает использование органических сцинтилляторов для γ -спектрометрии.

Спектрометры с органическими сцинтилляторами в основном применяются для измерения спектров электронов. При необходимости их можно использовать и для γ -спектрометрии, когда применение неорга-

нических сцинтилляторов нецелесообразно (например, при необходимости очень высокого временного разрешения).

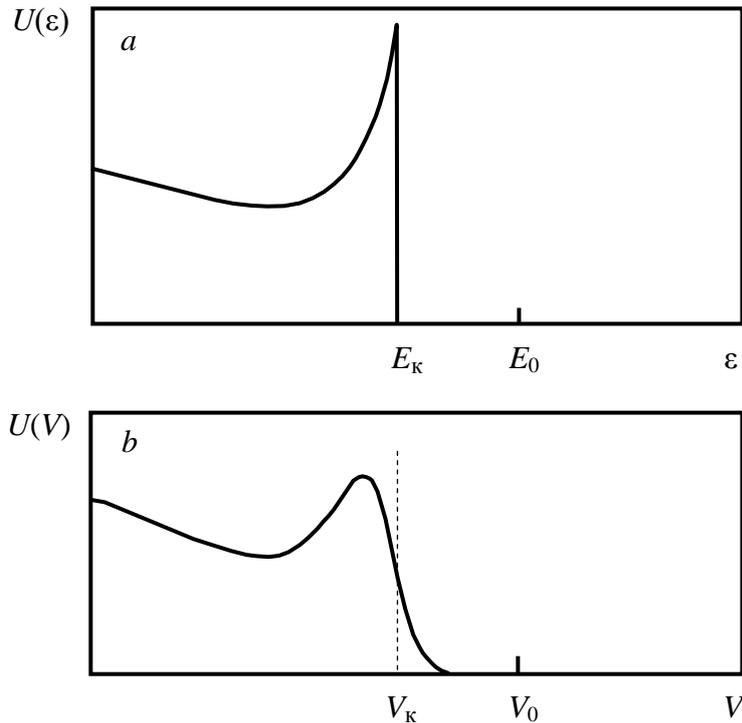


Рис. 2. Спектр энерговыделений в рабочем веществе детектора при регистрации γ -излучения (a) и аппаратная форма линии для того γ -излучения (b)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе используется сцинтилляционный спектрометр с детектором на основе органического сцинтиллятора стильбена. Детектор изготовлен из монокристалла стильбена цилиндрической формы диаметром 20 мм и высотой 10 мм. Такие размеры позволяют измерять энергии β -частиц вплоть до 3 МэВ, поскольку пробег β -частиц таких энергий может полностью укладываться в рабочем объеме детектора. Эффективность регистрации β -частиц близка к 100 %.

Этот же детектор может регистрировать и γ -кванты в указанном диапазоне энергий. Однако эффективность регистрации γ -квантов при таких размерах будет заметно ниже (порядка 1/10). Это связано с тем, что пробеги для взаимодействия γ -квантов в используемом органическом сцинтилляторе существенно превышают его размеры, и большинство γ -квантов будет проходить через сцинтиллятор без взаимодействия.

Многие источники излучений, созданные на основе радиоактивных изотопов, одновременно испускают и β - и γ -излучение. Источники только β - или только γ -излучения встречаются достаточно редко. Поэтому, как правило, приходится иметь дело со смесью спектров β - и γ -излучения. Для разделения этих спектров используется фильтр β -излучения в виде алюминиевой пластинки толщиной несколько миллиметров. Такая пластинка полностью задерживает β -излучение, не поглощая заметным образом γ -излучение. Спектр, полученный при экранировке источника такой пластинкой, практически будет совпадать с чистым γ -спектром. В качестве β -спектра источника используется разность суммарного спектра (без фильтра) и чистого γ -спектра.

Полная градуировка спектрометра, т. е. определение функции $G(V, E)$, довольно трудоемкая операция. Поэтому часто ограничиваются только нахождением зависимости среднего значения сигнала V от величины энерговыделения ϵ в рабочем веществе детектора. С хорошей точностью эта зависимость может быть представлена линейной функцией $V = aE + b$, где a и b – некоторые коэффициенты. С учетом того, что величина сигнала V измеряется в номерах каналов N , удобнее использовать связь между N и E , а не между V и E :

$$E = E_C + kN. \quad (3)$$

Параметры E_C и k определяются в процессе калибровки энергетической шкалы спектрометра. Калибровку энергетической шкалы часто дополняют нахождением зависимости энергетического разрешения спектрометра от энергии регистрируемых частиц.

Для калибровки спектрометров с органическими сцинтилляторами достаточно удобно использовать образцовые спектрометрические источники конверсионных электронов (ОСИКЭ). Также для этой цели можно использовать и образцовые спектрометрические источники γ -излучения (ОСГИ). При использовании ОСГИ приходится работать с краями комптоновских распределений для отдельных линий γ -излучения.

Перед выполнением задания необходимо изучить схемы распада радионуклидов Sr-90, Na-22, Cs-137; выяснить, какие частицы испускаются при их распаде, каковы энергии испускаемых частиц. Схемы радиоактивного распада изотопов Sr-90, Na-22 и Cs-137 приведены на рис. 3, 4, 5.

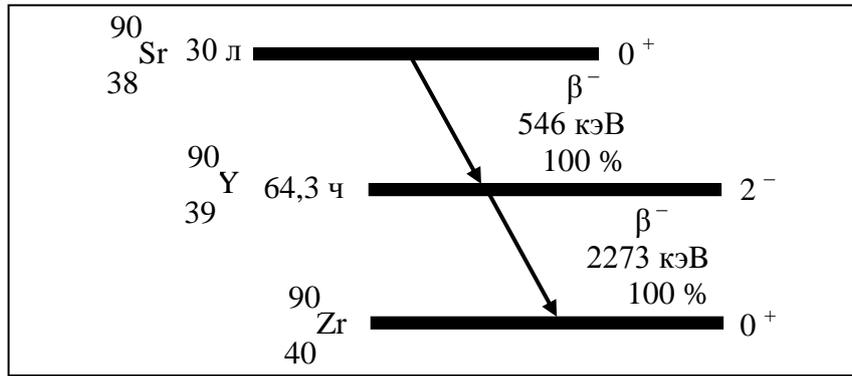


Рис. 3. Схема радиоактивного распада Sr-Y-90

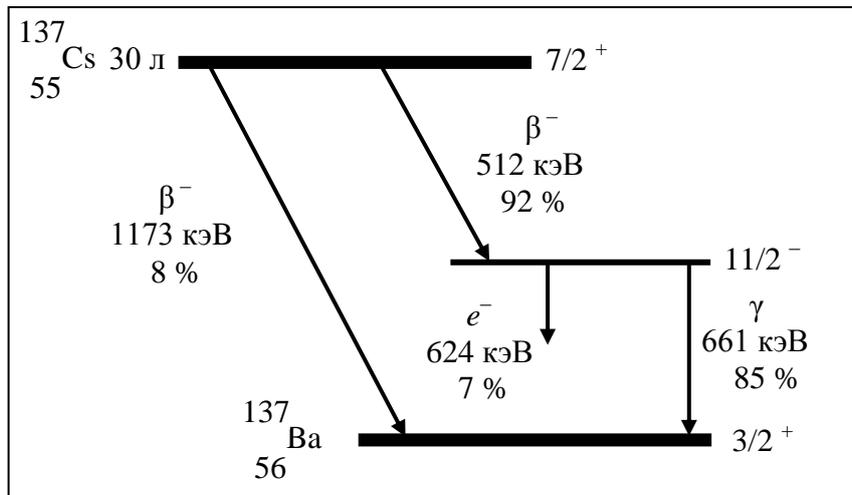


Рис. 4. Схема радиоактивного распада Cs-137

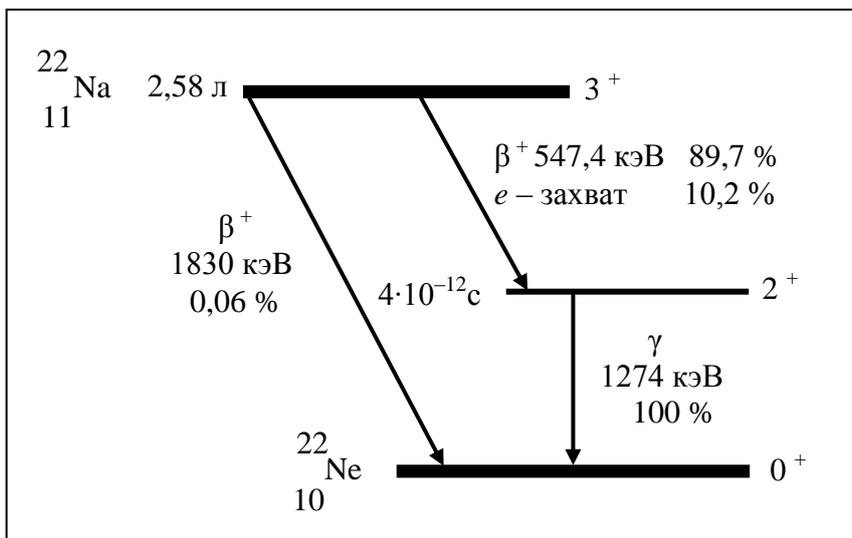


Рис. 5. Схема радиоактивного распада Na-22

Порядок проведения эксперимента и обработка результатов

Внимание! Перед тем как приступать к работе необходимо убедиться в заземлении блока сцинтилляционного детектора.

Включить компьютер. Включить блок спектрометра. Открыть программу «Спектр». После регистрации в программе «Спектр» войти в режим спектрометра и установить на его панели рабочий режим.

Напряжение питания ФЭУ и коэффициент усиления должны быть такими, чтобы граничная энергия β -спектра Sr-90 (2,27 МэВ) приходилась примерно на 900-й канал. Время измерения выбрать равным 5 мин.

Задание 1. Регистрация и анализ состава излучения изотопа Sr-90.

Получить суммарный аппаратурный спектр излучения Sr-90 без использования поглотителя β -частиц (спектр 1) и с поглотителем β -частиц (спектр 2). В качестве поглотителя использовать алюминиевую пластинку толщиной 3,6 мм. Получить спектр фонового излучения (без источника) спектрометра с органическим сцинтиллятором (спектр 3). Сравнить полученные спектры 1 и 2 со спектром фонового излучения 3 и сделать вывод о целесообразности или нецелесообразности учета фонового излучения. Сравнить спектры излучения, регистрируемые с поглотителем и без него и сделать вывод о составе излучения Sr-90.

Результаты измерений необходимо сохранять. Путь, по которому можно найти записанные данные, следующий:

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

Задание 2. Регистрация и анализ состава излучения изотопа Na-22.

Получить спектр Na-22 без поглотителя (спектр 4) и с ним (спектр 5). Сравнить эти спектры и убедиться, что кроме β -излучения регистрируется γ -излучение.

Задание 3. . Регистрация спектра излучения изотопа Cs-137.

Получить спектр Cs-137 без поглотителя (спектр 6) и с ним (спектр 7). Убедиться, что регистрируется и γ -, и β -излучение.

Задание 4. Калибровка энергетической шкалы спектрометра.

Найти положение комптоновских краев (в каналах) двух линий γ -излучения Na-22 с энергиями 511 и 1274 кэВ (спектр 5). По формуле (2) вычислить энергии, соответствующие этим краям комптоновских распределений. Рассчитать коэффициенты линейной зависимости E и N в формуле (3).

Задание 5. Определение энергии линии γ -излучения изотопа Cs-137. Найти положение комптоновского края линии γ -излучения Cs-137 (спектр 7). По калибровочной зависимости E и N определить энергию края, а потом с помощью соотношения (2) рассчитать энергию линии γ -излучения.

Задание 6. Анализ аппаратурного β -спектра Cs-137.

Выделить спектр β -излучения Cs-137 (разность спектров 6 и 7). Определить канал, соответствующий положению пика конверсионных электронов. По калибровочной зависимости E и N рассчитать энергию конверсионных электронов и сравнить с табличным значением 624 кэВ.

Задание 7. Оценка энергетического разрешения спектрометра.

Оценить ширину пика конверсионных электронов на половине высоты и рассчитать энергетическое разрешение для энергии 624 кэВ по формуле (1).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой каналы спектра?
2. Почему и как аппаратурный спектр отличается от истинного энергетического спектра?
3. Чем органические сцинтилляторы отличаются от неорганических?
4. Почему при регистрации γ -излучения органическими сцинтилляторами нет пиков полного поглощения?
5. Как находится соответствие между каналами и энергией излучения?
6. Можно ли считать, что положение края комптоновского распределения V_k пропорционально энергии γ -излучения E_γ ?
7. Как будет выглядеть аппаратурный спектр, если источник электронов имеет две различные моноэнергетические линии излучения?
8. Как будет выглядеть аппаратурный спектр, если источник γ -излучения имеет две различные по энергии линии?