

## Лабораторная работа №4

### Измерение коэффициента внутренней конверсии

**Цель работы:** экспериментально изучить форму  $\beta$ -спектра Cs-137, определить максимальную энергию бета спектра и коэффициент внутренней конверсии данного изотопа.

### ЯВЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ

Как известно, верхняя граница  $\beta$ -спектра  $E_m$  соответствует случаю, когда электрон уносит всю энергию (см. описание работы «Изучение формы бета спектра»). Пренебрегая энергией отдачи ядра и считая нулевой массу антинейтрино, можно с хорошей точностью определить максимальную (граничную) энергию  $\beta$ -спектра следующим образом:

$$E_m = [M(A, Z + 1) - M(A, Z) - m_e]c^2, \quad (1)$$

т. е.  $E_m$  равна разности энергий покоя начального и конечного ядер и энергии покоя электрона.

При  $\beta$ -распаде существует вероятность образования конечного ядра в возбужденном состоянии с последующим переходом в основное состояние путем испускания  $\gamma$ -кванта, энергия которого  $E_\gamma$  равна энергии возбуждения конечного ядра  $E^*$ . Энергия  $E^*$  определяется разностью энергий возбужденного и основного состояний ядра.

Возможность распада в возбужденное состояние дочернего ядра необходимо учитывать при определении граничной энергии  $\beta$ -спектра, так как в таком случае наряду с граничной энергией, определяемой формулой (1) будет наблюдаться  $\beta$ -спектр с граничной энергией, равной

$$E_m = [M(A, Z + 1) - M(A, Z) - m_e]c^2 - E^* = [M(A, Z + 1) - M(A, Z) - m_e]c^2 - E_\gamma \quad (2)$$

Кроме излучения  $\gamma$ -кванта, существует еще один механизм снятия возбуждения конечного ядра – испускание электронов внутренней конверсии. В этом случае энергия возбуждения ядра непосредственно (без промежуточного испускания  $\gamma$ -кванта) передается одному из орбитальных электронов, который покидает атом. Ненулевая возможность такого механизма следует из существования конечной области перекрытия волновых функций ядра и атомного электрона. Очевидно, энергия таких электронов будет определяться разностью между энергией возбуждения конечного ядра  $E^*$  и потенциалом ионизации данной электронной оболочки  $I$ . С наибольшей вероятностью процесс внутренней конверсии идет для электронов  $K$ -оболочки, т.е.

$$T_k = E^* - I_k,$$

где  $T_k$  – кинетическая энергия конверсионного электрона.

Процесс испускания конверсионных электронов является конкурентным по отношению к излучению  $\gamma$ -кванта, если последний не запрещен правилами отбора. Отношение числа испущенных конверсионных электронов  $N_k$  к числу испущенных  $\gamma$ -квантов называется коэффициентом внутренней конверсии:

$$\alpha = N_k / N_\gamma \quad (3)$$

Коэффициент внутренней конверсии зависит от энергии перехода между ядерными состояниями, атомного номера, типа оболочки, из которой выбивается электрон, от энергии и мультипольности  $\gamma$ -излучения. Наряду с электронами и  $\gamma$ -квантами, конверсионные электроны вносят вклад в формирование сложного спектра, регистрируемого детектором в реальном эксперименте.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальное наблюдение спектра электронов, вылетающих из ядра при  $\beta$ -распаде, осуществляется  $\beta$ -спектрометром на основе сцинтилляционного детектора. Если  $\beta$ -распад сопровождается вылетом  $\gamma$ -кванта, детектор будет регистрировать наряду с электроном и  $\gamma$ -квант, т. е. в эксперименте будет наблюдаться суммарный спектр  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов. Длина пробега  $\gamma$ -квантов в веществе  $L_\gamma$  много больше, чем длина пробега  $\beta$ -электронов сравнимых энергий  $L_e$ . Вследствие этого в  $\beta$ -спектрометре используют органические сцинтилляторы с  $L_e < L_{\text{сц}} < L_\gamma$  для увеличения относительной эффективности регистрации электронов по сравнению с  $\gamma$ -квантами.

Для получения чистого  $\beta$ -спектра необходимо вычесть  $\gamma$ -спектр из наблюдаемого суммарного спектра  $\gamma$ -квантов и электронов. Для этого воспользуемся соотношением  $L_e \ll L_\gamma$ . Очевидно, что если между детектором и радиоактивным источником поместить поглотитель, толщина которого превосходит  $L_e$ , то сцинтилляционный детектор будет регистрировать только  $\gamma$ -кванты. Кроме того, если толщина поглотителя намного меньше длины поглощения  $\gamma$ -квантов, можно с хорошей точностью пренебречь изменением интенсивности и спектральных характеристик потока  $\gamma$ -квантов при прохождении через поглотитель.

Даже моноэнергетические  $\gamma$ -кванты, взаимодействуя с веществом сцинтиллятора, приводят к формированию сложного спектра, внося определенный вклад в каждый из каналов спектрометра. Следовательно, для

корректного выделения  $\beta$ -спектра необходимо провести поканальное вычитание  $\gamma$ -спектра из суммарного спектра.

При возможном испускании конверсионных электронов спектр, полученный в результате поканального вычитания, будет состоять не только из истинного  $\beta$ -спектра, но и из спектра конверсионных электронов (см. рисунки 1 и 2).

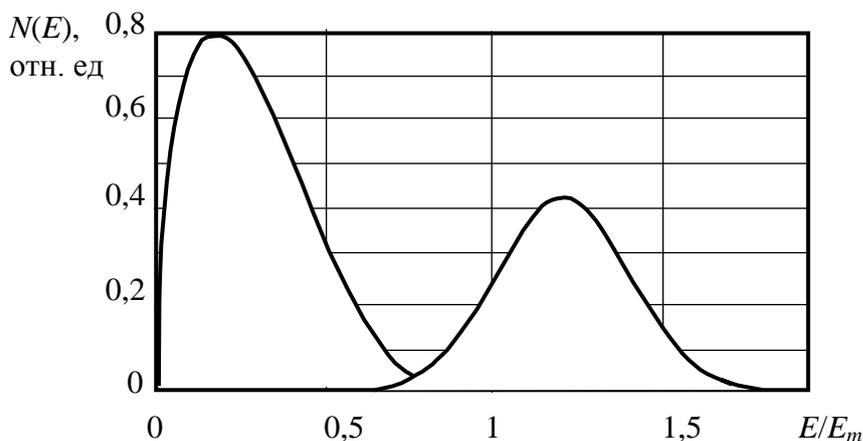


Рис. 1. Аналитический спектр электронов источника Cs-137

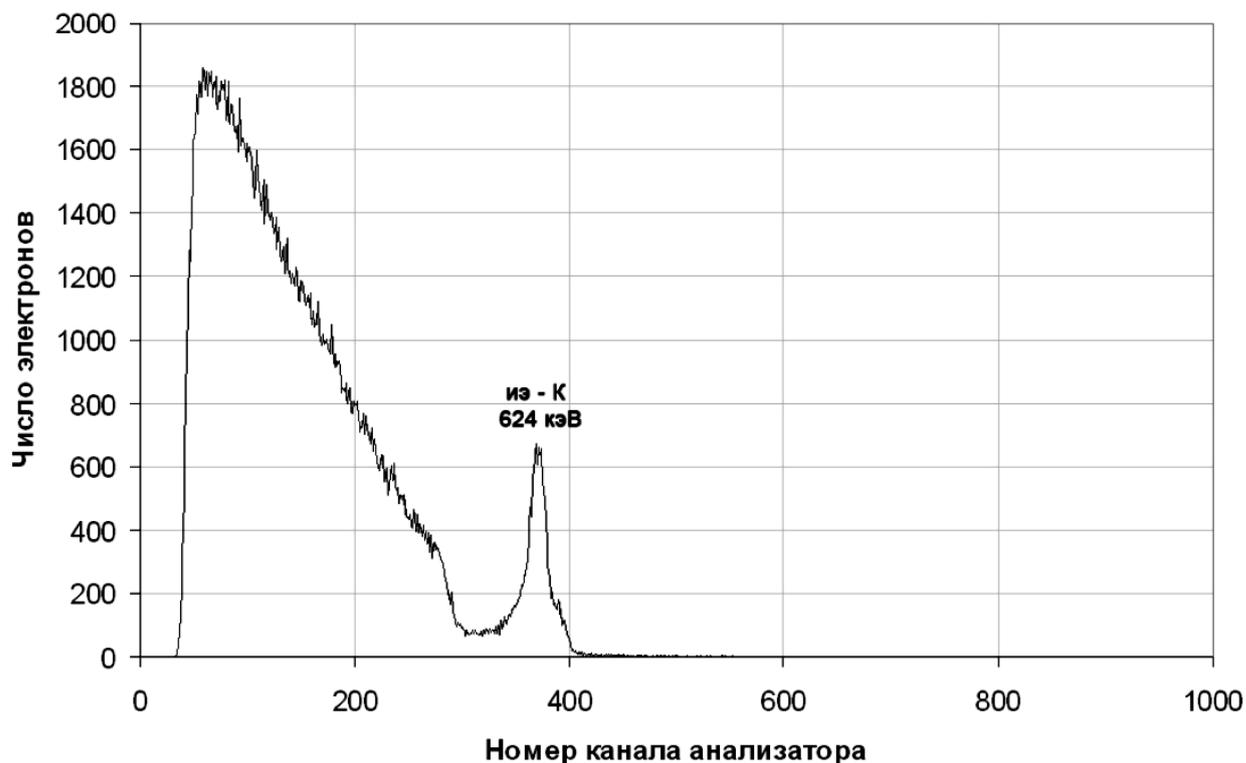


Рис. 2:  $\beta$ -спектр Cs-137. Пик на графике соответствует энергии конверсионных электронов Ba-137, полученный с помощью полупроводникового спектрометра.

Схема распада радиоактивного изотопа Cs-137 приведена на рис. 3.

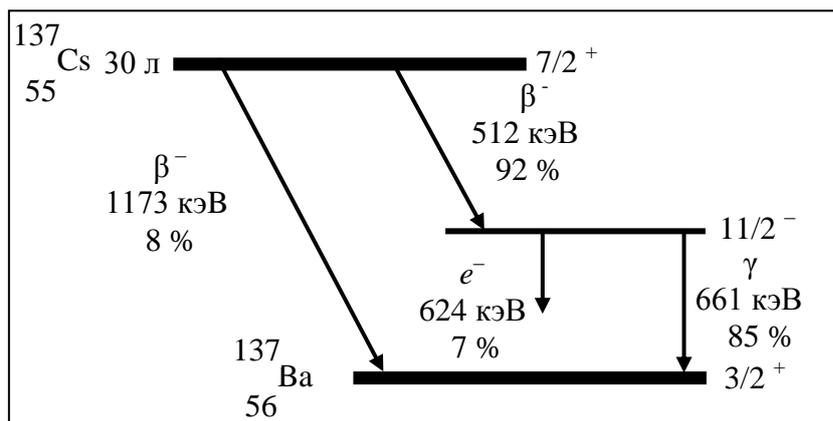


Рис. 3. Схема распада радиоактивного изотопа Cs-137

В данной работе в качестве спектрометра бета-излучения используется сцинтилляционный детектор на основе сцинтилляционного пластика.

Фотография лабораторного стенда приведена на рисунке 4.

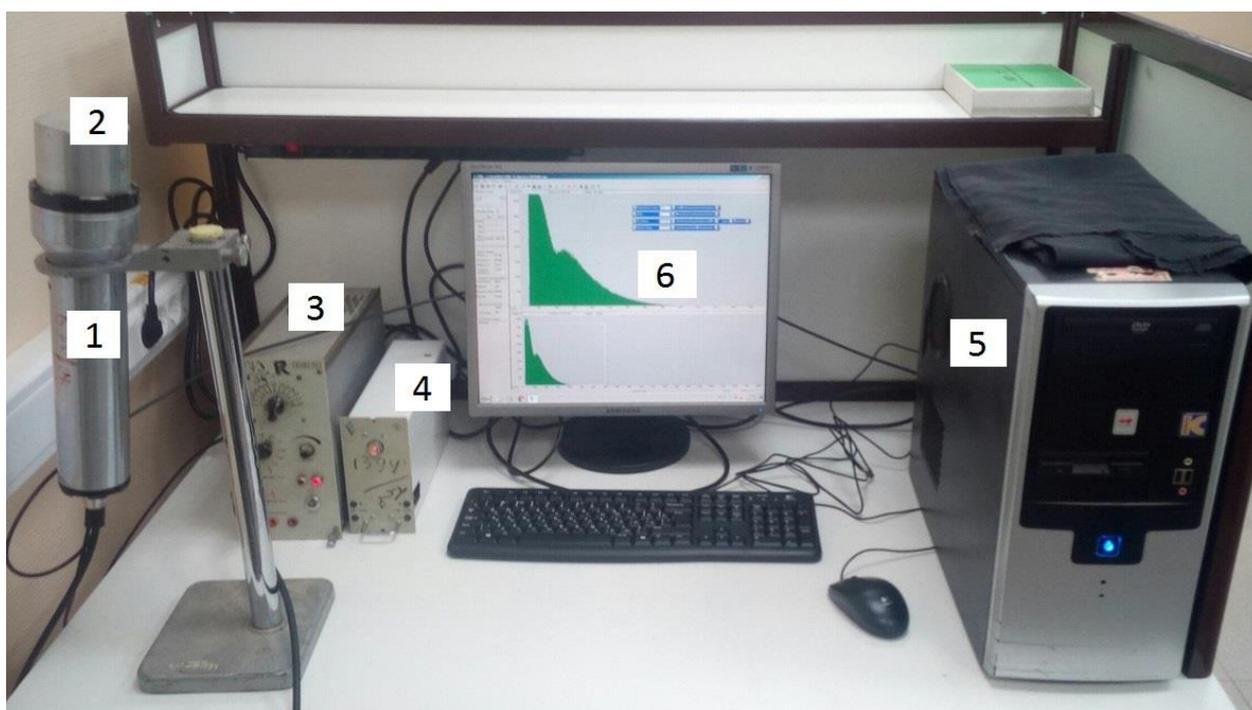


Рис.4. Лабораторный стенд по изучению формы бета-спектра. 1- сцинтилляционный детектор; 2-место установки источника излучения; 3- высоковольтный источник питания детектора; 4-низковольтный источник питания устройства согласования детектора; 5-персональный компьютер с установленной платой обработки сигналов, поступающих с детектора; 6-окно программы набора и обработки данных.

Детектор излучения представляет собой сцинтиблок, с возможностью замены кристалла сцинтиллятора. Описание устройства сцинтилляционного

детектора см. в описании к работе №2. Данный сцинтиблок рассчитан на работу при напряжении от 1400 Вольт отрицательной полярности.

Возможность установки различных сцинтилляторов в корпус детектора, позволяет модифицировать характеристики детектора для работы в определенных условиях. В данной работе, для регистрации бета-излучения, в сцинтилляционный детектор установлен органический сцинтиллятор (пластик), который обладает невысокой эффективностью регистрации гамма-квантов, что позволяет использовать его для регистрации заряженных частиц в поле гамма-излучения.

Источник излучения устанавливается под металлической крышкой, которая закрепляется на корпусе детектора резьбовым соединением.

Сигналы с детектора поступают на вход платы анализатора импульсов, установленной в персональном компьютере. Данный анализатор импульсов представляет собой устройство, позволяющее разделять поступающие на него импульсы по их амплитуде. Для наглядного представления анализатор импульсов можно изобразить в качестве шкалы с пустыми пронумерованными ячейками (1,2,3...n). Каждой из этих ячеек соответствуют импульсы разной амплитуды, поступающие с детектора. В первую ячейку попадают импульсы с самой маленькой амплитудой, и далее при увеличении номера ячейки, увеличивается и амплитуда импульсов, которые могут в неё попасть. Амплитуда импульсов, поступающих от детектора, в свою очередь, зависит от энергии частиц, которые в детектор попадают. Чем большую энергию частица потеряет в детекторе, тем больше будет амплитуда импульса на выходе из детектора. Таким образом, производится запись *аппаратурного спектра* излучения. Аппаратурный спектр излучения – распределение числа зарегистрированных импульсов в зависимости от их энергии. Связь номера ячейки, или номера канала спектрометра с энергией частицы, вызвавшей образование импульса, попавшего в данный канал, выражается так называемым калибровочным соотношением спектрометра. Обычно данное соотношение является линейной зависимостью номера энергии от номера канала.

$$\text{Energy} = a \cdot n + b$$

где Energy – энергия зарегистрированной частицы, n – номер канала спектрометра (номер ячейки, в которую попал импульс от регистрации частицы), (a, b) – коэффициенты линейной зависимости, устанавливаемые для каждого спектрометра экспериментальным путём.

Для работы с платой анализатора импульсов предназначена программа набора и обработки данных eSBS-7x. Данная программа позволяет визуализировать набираемые спектры и проводить их первичную обработку.

## Порядок проведения эксперимента

**Внимание!** Запрещается приступать к работе, не ознакомившись с правилами безопасности при работе на установке «Сцинтилляционный спектрометр бета-излучения». Эксперимент проводится только под непосредственным контролем лаборанта или преподавателя.

1. 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 1400 вольт).

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

3. Проверить подключение сигнального кабеля от выхода детектора (разъем с надписью «сигнал») ко входу платы анализатора импульсов в персональном компьютере.

4. Включить в сеть высоковольтный источник питания детектора. 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 (1400 вольт). Дать прогреться установке в течение 10-15 минут.

5. Включить компьютер, дождаться загрузки рабочего стола. Открыть программу eSBS с помощью ярлыка на рабочем столе. Отказаться от предложения поднять высокое напряжение. Нажать кнопку «настройки» со значком  на панели инструментов, в открывшемся окне выбрать команду «загрузить», после чего загрузить файл настроек с наименованием «настройки бета-спектр 1», находящийся на рабочем столе.

6. Установить время автоматического завершения набора спектра, нажав кнопку со значком , и установив значение «по живому времени» 900 секунд.

7. Установить источник излучения Cs-137 под металлическую крышку детектора.

*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.*

8. Запустить набор спектра нажатием клавиши со значком  на панели инструментов программы. Должен начаться набор суммарного

спектра гамма и бета излучения установленного источника. В случае, если набор спектра по каким-то причинам не начинается, обратитесь к преподавателю или инженеру, сопровождающему выполнение работы. Данный спектр является суммарным спектром бета и гамма излучения, поскольку набор происходил без использования поглотителя между источником излучения и детектором. По оси «икс» находятся каналы спектрометра, соответствующие различной амплитуде регистрируемых импульсов. По оси «игрек» находится число импульсов, попадающих в данные каналы. Впоследствии, используя калибровочное соотношение спектрометра, можно будет установить связь между номером канала спектрометра и энергией частиц, регистрируемых детектором.

9. Окончание набора спектра происходит автоматически по завершении установленного времени. Сохранить набранный спектр в папку «Р4. Измерение коэффициента электронной конверсии» на рабочем столе с помощью команды «Сохранить спектр» во вкладке «Файл». При сохранении выбрать формат файла с расширением «.spe».

10. Поместить между источником и детектором поглотитель, толщина которого больше, чем длина пробега электронов  $\beta$ -спектра Na-22 в веществе поглотителя ( $L_{\text{погл}} = 0,6$  мм). В этом случае детектор будет регистрировать только  $\gamma$ -кванты. Не изменяя геометрию эксперимента и режима работы, набрать и записать спектр  $\gamma$ -квантов.

*Внимание!* Время набора спектра  $\gamma$ -квантов должно быть таким же как время набора суммарного спектра (см. п. 6).

11. Калибровочное соотношение спектрометра можно увидеть нажав на кнопку со значком  на панели инструментов программы. Откроется окно энергетической калибровки спектрометра, в котором и будет находиться калибровочное соотношение. Данное соотношение необходимо перезаписать себе.

12. Записанные спектры в формате .SPE можно открыть с помощью текстового редактора. На рисунке 5 показано, из чего состоит данный файл.



Задание 2. Аппроксимировать пик конверсионных электронов нормальным распределением  $CsK$  и найти интегральное число конверсионных электронов:

$$CsK = \sum_i CsK(i),$$

где  $CsK(i)$  – найденное нормальное распределение, описывающее спектр конверсионных электронов.

Задание 3. Построить  $\beta$ -спектр Cs-137 путем вычитания из спектра электронов, полученного в задании 1, спектра конверсионных электронов, найденного в задании 2.

Задание 4. Определить характеристики экспериментального  $\beta$ -спектра Cs-137. Найти по графику канал, соответствующий максимальной интенсивности в экспериментальном  $\beta$ -спектре. В силу линейной зависимости номера канала спектрометра от энергии позитронов найденный канал соответствует наиболее вероятной энергии  $\beta$ -спектра. Определить по графику  $i_{\text{макс}}$  – канал, соответствующий максимальной (граничной) энергии  $\beta$ -спектра. Используя калибровочное соотношение спектрометра, вычислить значение максимальной энергии бета спектра позитронов источника Cs-137. Определить также полное число электронов  $\beta$ -спектра, суммируя отсчеты по каналам спектра, полученного в задании 3.

Задание 5. Определить интегральное число  $\gamma$ -квантов, сопровождающих  $\beta$ -распад как разность между полным числом электронов  $\beta$ -спектра (задание 4) и числом конверсионных электронов (Задание 2).

Задание 6. Используя определение коэффициента внутренней конверсии (см. формулу 3), найти его экспериментальное значение и сравнить с теоретическим.

*Замечание:* требование к обработке спектров в среде Microsoft Excel носит рекомендательный, но не обязательный характер. Для обработки данных также можно использовать среду Mathcad, Origin и др.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сколько видов  $\beta$ -распадов наблюдается в природе?
2. Каковы энергетические условия  $\beta$ -распада?
3. Чем объясняется непрерывный характер  $\beta$ -спектра?
4. Объясните смысл явления внутренней конверсии.
5. Как влияет кулоновское поле ядра на форму  $\beta$ -спектра?
6. Укажите причины, вызывающие отличие экспериментально полученного коэффициента внутренней конверсии от теоретического.