

Лабораторная работа №4

Измерение коэффициента внутренней конверсии

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

ЯВЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ

Как известно, верхняя граница β -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 β -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 β -распаде существует вероятность образования конечного ядра в возбужденном состоянии с последующим переходом в основное состояние путем испускания γ -кванта, энергия которого E_γ 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 β -спектра, так как в таком случае наряду с граничной энергией, определяемой формулой (1) будет наблюдаться β -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 γ -кванта, существует еще один механизм снятия возбуждения конечного ядра – испускание электронов внутренней конверсии. В этом случае энергия возбуждения ядра непосредственно (без промежуточного испускания γ -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 γ -кванта, если последний не запрещен правилами отбора. Отношение числа испущенных конверсионных электронов N_k к числу испущенных γ -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 γ -излучения. Наряду с электронами и γ -квантами, конверсионные электроны вносят вклад в формирование сложного спектра, регистрируемого детектором в реальном эксперименте.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

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

Для получения чистого β -спектра необходимо вычесть γ -спектр из наблюдаемого суммарного спектра γ -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 γ -кванты. Кроме того, если толщина поглотителя намного меньше длины поглощения γ -квантов, можно с хорошей точностью пренебречь изменением интенсивности и спектральных характеристик потока γ -квантов при прохождении через поглотитель.

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

корректного выделения β -спектра необходимо провести поканальное вычитание γ -спектра из суммарного спектра.

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

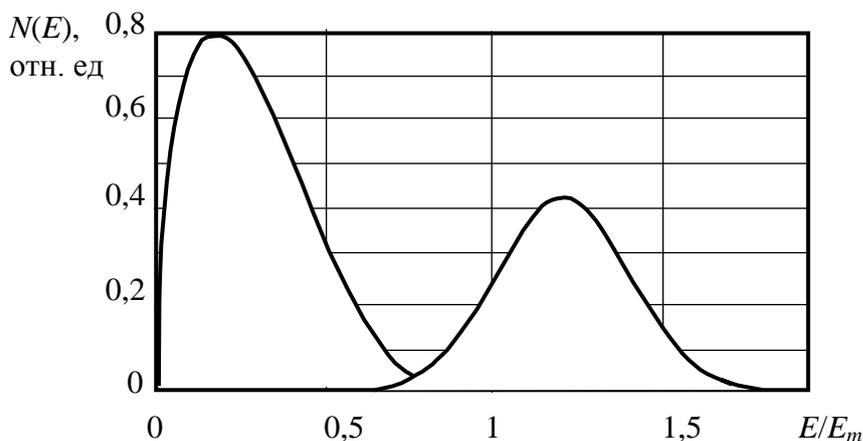


Рис. 1. Аналитический спектр электронов источника Cs-137

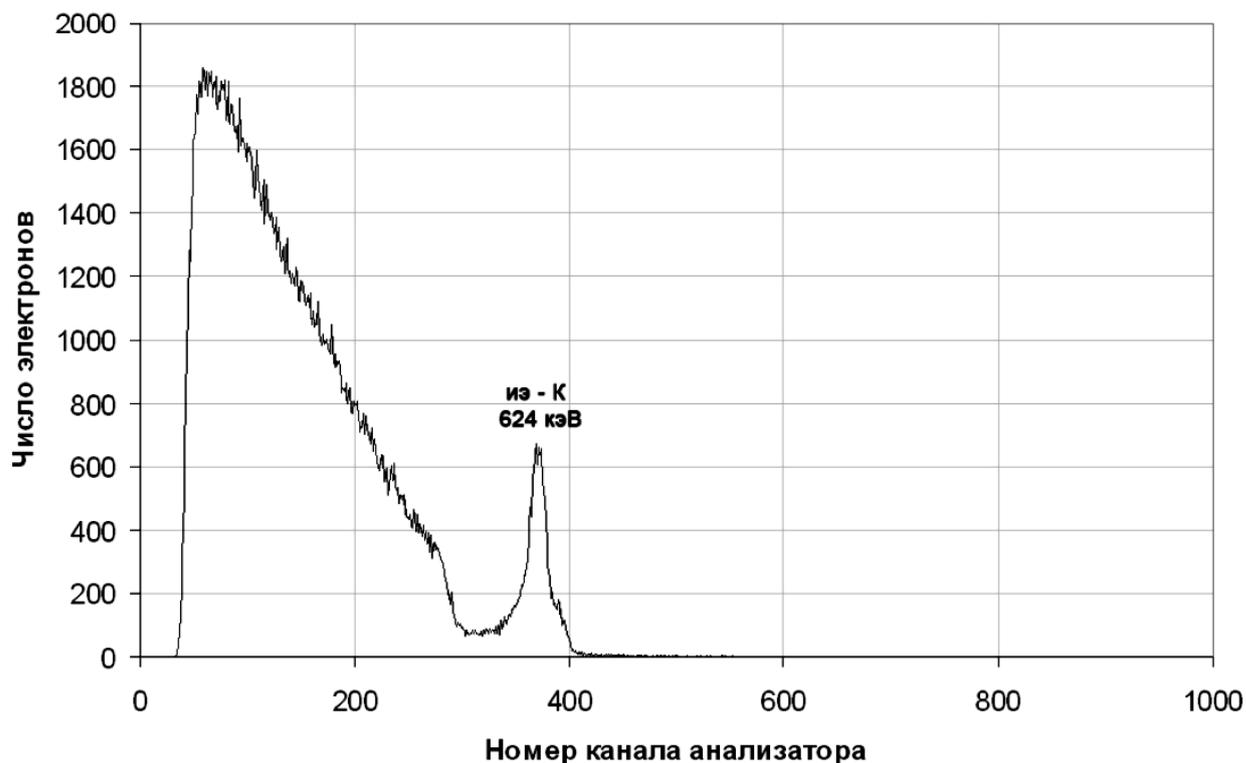


Рис. 2: β -спектр Cs-137. Пик на графике соответствует энергии конверсионных электронов Ba-137, полученный с помощью полупроводникового спектрометра.

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

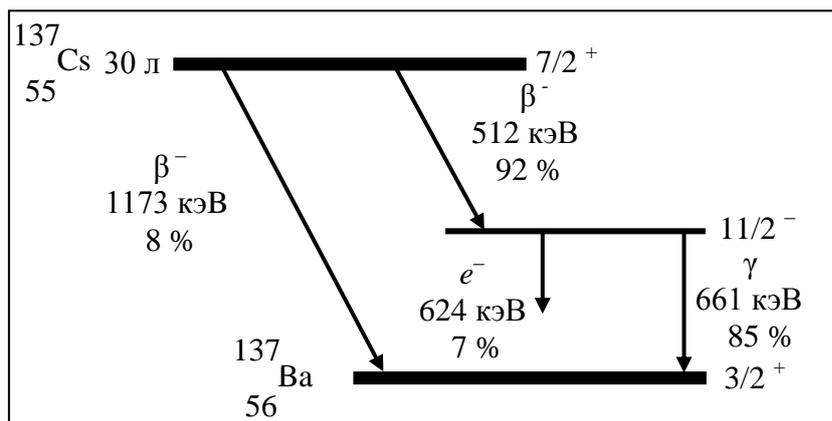


Рис. 3. Схема распада радиоактивного изотопа Cs-137

В данной работе в качестве спектрометра бета-излучения используется сцинтилляционный детектор на основе сцинтилляционного пластика. Детектор расположен в одном корпусе с усилителем импульсов и аналого-цифровым амплитудным анализатором-преобразователем, формирующим цифровой сигнал на основании аналоговых импульсов, поступающих с усилителя, подключенного к выходу детектора. В итоге на выходе блока детектирования формируется цифровой сигнал, поступающий по USB кабелю к компьютеру. На компьютере установлена специальная программа набора и обработки данных SpectraLineBG, позволяющая записывать данные, поступающие с детектора, в виде спектров, а также проводить их первичную обработку.

Порядок проведения эксперимента

Внимание! Запрещается приступать к работе, не ознакомившись с правилами безопасности при работе на установке «Спектрометр бета-излучения БЕТА-1С». Эксперимент проводится только под непосредственным контролем лаборанта или преподавателя.

1. Включить компьютер, дождаться загрузки рабочего стола, вставить электронный ключ №1 в USB порт компьютера. Открыть программу SpectraLineBG с помощью ярлыка в папке «Бета спектрометр», находящейся на рабочем столе. В открывшемся окне программы, во вкладке «Анализатор» выбрать команду «Открыть». Должно открыться окно анализатора импульсов (см. рис. 4).

2. Установить источник излучения Cs-137 в измерительную кювету спектрометра бета-излучения

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.

3. Очистить память анализатора с помощью команды F2 или нажатием на кнопку очистки (см. рисунок 4).

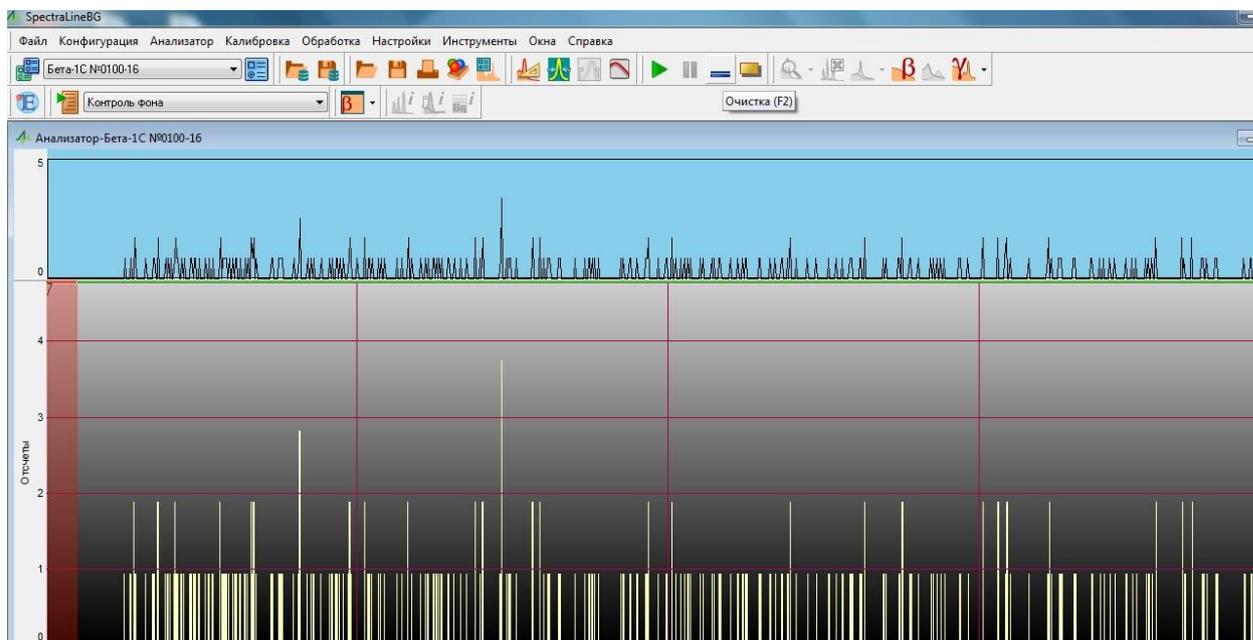


Рис.4. Окно анализатора импульсов и кнопка очистки памяти анализатора.

4. Запустить набор спектра нажатием клавиши F3 или нажатием на кнопку в виде зеленой стрелки на панели инструментов программы набора и обработки спектров. Не внося изменений в появившееся окно свойств набираемого спектра, нажать кнопку «Ок», в следующем появившемся окне установить режим набора «По живому времени», и выставить время набора спектра 600 секунд. Данный спектр является суммарным спектром бета и гамма излучения, поскольку набор происходил без использования поглотителя между источником излучения и детектором.

5. Окончание набора спектра происходит автоматически по завершении установленного времени. Сохранить набранный спектр в папку «Р2. Измерение коэффициента конверсии» на рабочем столе с помощью команды «Сохранить как» во вкладке «Файл». При сохранении выбрать формат файла GBS с расширением «.spe».

6. Поместить между источником и детектором поглотитель, толщина которого больше, чем длина пробега электронов β -спектра Cs-137 в веществе поглотителя ($L_{\text{погл}} = 0,8$ мм). В этом случае детектор будет регистрировать только γ -кванты. Не изменяя геометрию эксперимента и режима работы, набрать и записать спектр γ -квантов. Перед началом записи нового спектра очистить память анализатора с помощью команды F2.

Внимание! Время набора спектра γ -квантов должно быть таким же как время набора суммарного спектра (см. п. 4).

7. После завершения набора необходимо получить калибровочное соотношение бета-спектрометра, связывающее линейной зависимостью

(два блока информации в начале и конце файла) и число набранных импульсов в каждом канале анализатора. Каждому следующему каналу соответствует следующая строка в файле спектра. Количество строк с данными об отчетах спектрометра соответствует числу каналов спектрометра (1024). (см. рис. 6).

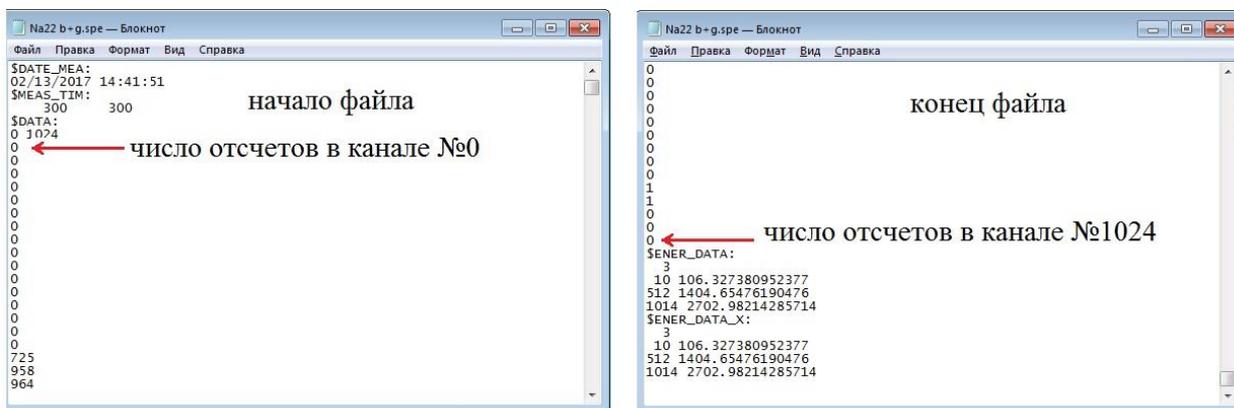


Рис.6. Чтение данных из сохраненного файла спектра.

Определить номер канала как ранжированную переменную i , изменяющуюся, как правило, от 0 до $i_{\text{макс}}$. Построить β -спектр Cs-137 (CsE), проведя поканальное вычитание γ -спектра из суммарного спектра:

$$CsE_i = CsS_i - CsG_i \text{ или } CsE = CsS - CsG$$

где CsE – вектор, содержащий число отсчетов от электронов бета-распада в каналах спектрометра; CsS – вектор экспериментальных данных суммарного спектра; CsG – то же для γ -спектра.

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 β -спектр Cs-137 путем вычитания из спектра электронов, полученного в задании 1, спектра конверсионных электронов, найденного в задании 2.

Задание 4. Сгладить β -спектр Cs-137, используя встроенную функцию medsmooth.

Задание 5. Определить характеристики экспериментального β -спектра Cs-137. Найти по графику канал, соответствующий максимальной интенсивности в экспериментальном β -спектре. В силу линейной зависимости номера канала спектрометра от энергии позитронов найденный канал соответствует наиболее вероятной энергии β -спектра. Определить по

графику $i_{\text{макс}}$ – канал, соответствующий максимальной (граничной) энергии β -спектра. Используя калибровочное соотношение спектрометра, вычислить значение максимальной энергии бета спектра позитронов источника Cs-137. Определить также полное число электронов β -спектра, суммируя отсчеты по каналам спектра, полученного в задании 3.

Задание 6. Определить интегральное число γ -квантов, сопровождающих β -распад как разность между полным числом электронов β -спектра (задание 5) и числом конверсионных электронов (Задание 2).

Задание 7. Используя определение коэффициента внутренней конверсии (см. формулу 3), найти его экспериментальное значение и сравнить с теоретическим.

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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