

Лабораторная работа №3

Изучение формы β -спектра

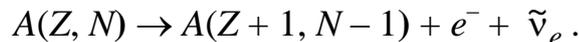
Цель работы: экспериментально изучить форму β -спектра Na-22, определить максимальную энергию бета спектра данного изотопа; построить спектр нейтрино β -распада Na-22.

УСЛОВИЯ β -РАСПАДА

Бета-распад – это процесс самопроизвольного превращения атомного ядра в ядро-изобар с зарядом, отличным на единицу ($Z \rightarrow Z \pm 1$).

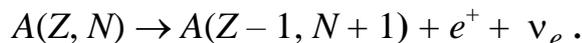
Известны три вида β - распада.

При электронном β^- -распаде один из нейтронов материнского ядра $A(Z, N)$ превращается в протон с испусканием электрона и электронного антинейтрино $\tilde{\nu}_e$:



Здесь A – массовое число; Z – заряд ядра; N – число нейтронов.

При позитронном β^+ -распаде один из протонов ядра превращается в нейтрон с испусканием позитрона и электронного нейтрино ν_e :



С β -распадом тесно связан процесс, обратный β -распаду – захват электрона с K -оболочки (K -захват), сопровождающийся испусканием электронного нейтрино:



Для того чтобы происходил какой-либо из трех видов β -распада необходимо выполнить следующие энергетические условия:

$$M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e \text{ для } \beta^- \text{ - распада;}$$

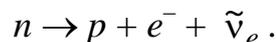
$$M(A, Z) > M(A, Z - 1) + m_e \text{ для } \beta^+ \text{ - распада;}$$

$$M(A, Z) + m_e > M(A, Z - 1) \text{ для } K\text{-захвата.}$$

Здесь m_e – масса покоя электрона; $M(A, Z)$ – масса ядра с атомным номером Z и массовым числом A .

Согласно приведенным условиям, второе неравенство автоматически предполагает выполнение третьего, поэтому при распаде соответствующего ядра β^+ -распад и K -захват являются конкурирующими процессами.

Простейшим примером β -распада может служить процесс распада свободного нейтрона:



При β^- -распаде ядра распадается связанный нейтрон и, как и при распаде свободного нейтрона, электрон и антинейтрино рождаются в процессе распада. В отличие от нейтрона, распад свободного протона невозможен ($m_n > m_p$). Распасться может только протон, связанный в ядре. В этом случае недостающая энергия восполняется за счет энергии связи ядра.

β -распад является внутринуклонным процессом и за этот процесс ответственно слабое взаимодействие. Он характеризуется широким диапазоном изменения периодов полураспада $T_{1/2}$ – от 10^{-2} с до 10^{16} лет. Такая большая вариация величин $T_{1/2}$ объясняется двумя основными причинами:

- период полураспада сильно зависит от выделяющейся при распаде энергии;
- период полураспада существенно зависит от уносимого парой $e^- + \bar{\nu}_e$ орбитального момента l . При $l = 0$ вероятность распада максимальна и такие переходы называются разрешенными. С ростом l вероятность β -распада резко уменьшается и такие переходы называются запрещенными.

β -СПЕКТР

Распределение электронов (позитронов) испускаемых ядрами при β -распаде N_k по их кинетическим энергиям E_k , называется β -спектром. Характерной особенностью β -спектра является непрерывное распределение частиц по энергиям от нуля до некоторой строго определенной энергии E_m , называемой граничной (максимальной) энергией β -спектра (рис. 1).

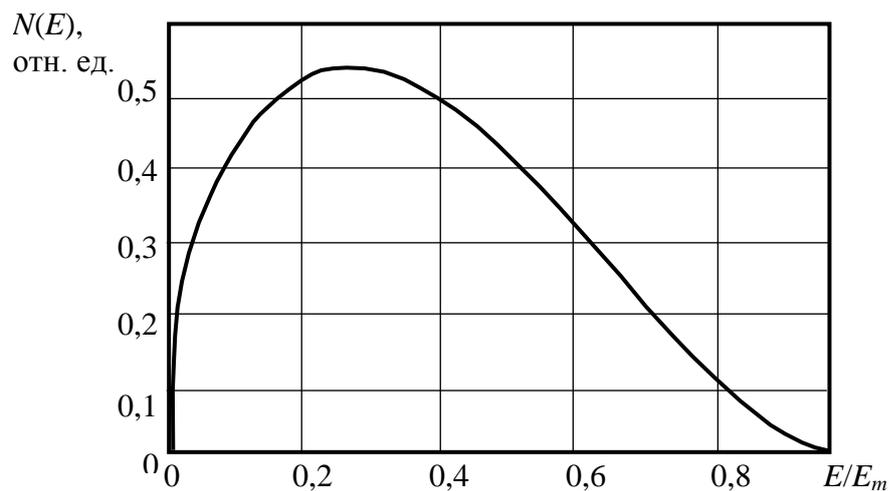


Рис. 1. Типичный β -спектр

Значения E_m могут сильно отличаться для различных радиоактивных ядер и находятся в интервале от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт.

Распределение по кинетическим энергиям вылетающих частиц может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{dN_e}{dE_k} = \frac{G_F^2}{2\pi^3 c^5 h^7} |M|^2 F(Z, E_k) (E_m - E_k)^2 \sqrt{E_k (E_k + 2m_e c^2)} (E_k + m_e c^2), \quad (1)$$

где $|M|^2$ – квадрат модуля матричного элемента β -перехода; E_k – кинетическая энергия электрона. При выводе (1) предполагалось, что масса нейтрино равна нулю и энергия отдачи конечного ядра пренебрежимо мала по сравнению с кинетической энергией электрона; G_F – постоянная Ферми; $F(Z, E_k)$ – функция Ферми, описывающая влияние заряда ядра на энергетическое распределение электронов.

Функция Ферми $F(Z, E_k)$ вводится как квадрат отношения волновых функций β -частицы, вычисленных с учетом ($Z \neq 0$) и без учета ($Z = 0$) кулоновского поля ядра в центре ($r = 0$) или на периферии ($r = R$) ядра:

$$F(Z, E) = |\Psi_e|_z^2 / |\Psi_e|_0^2.$$

Кулоновское поле ядра увеличивает вероятность вылета электронов и уменьшает вероятность вылета позитронов в области низких энергий. Это влияние растет с ростом Z и с уменьшением E_m .

Непрерывный характер β -спектра объясняется тем, что β -распад является трехчастичным процессом, т. е. кроме регистрируемого в эксперименте электрона (позитрона) при β -распаде вылетает электронное антинейтрино или нейтрино. Нейтрино (антинейтрино) имеют нулевой заряд, участвуют только в слабом взаимодействии и, как следствие, характеризуются очень слабым взаимодействием с веществом. Средняя длина свободного пробега нейтрино превышает диаметр Земли. В результате регистрация нейтрино является технически сложной задачей. С помощью учебной лабораторной установки можно зарегистрировать только электроны (позитроны). Энергия, освобождаемая при β -распаде ядра, распределяется между тремя частицами: электроном, антинейтрино и конечным ядром. Масса ядра более чем в 10^3 раз превосходит массу электрона. Как следствие энергия отдачи ядра пренебрежимо мала и можно считать, что практически вся энергия распада распределяется между электроном и антинейтрино.

Однако роль ядра принципиально важна, так как ядро, принимая на себя импульс отдачи, делает возможным произвольное соотношение между энергиями, уносимыми электроном и антинейтрино. В отсутствие импульса отдачи ядра распад был бы двухчастичным процессом и распределение энергий между вылетающими частицами определялось бы соотношением масс электрона и антинейтрино. Спектр электронов стал бы дискретным. Итак, при одиночном акте β -распада соотношение энергий электрона и антинейтрино может быть произвольным, т. е. кинетическая энергия электрона может принимать любое значение от нуля до максимально

возможной энергии E_m . При большом числе распадов одинаковых ядер в результате статистического усреднения формируется уже не случайное, а вполне определенное распределение вылетающих электронов по энергиям $N(E_k)$. Это распределение и называется спектром электронов (позитронов) β -распада или просто β -спектром.

Верхняя граница β -спектра E_m соответствует случаю, когда электрон уносит всю энергию. Пренебрегая энергией отдачи ядра и считая нулевой массу антинейтрино, можно с хорошей точностью максимальную (граничную) энергию β -спектра определить следующим образом:

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

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

Так как энергия E_m распределяется практически между двумя частицами, то очевидно, что спектр антинейтрино тоже будет иметь непрерывный характер от нуля до E_m . Спектр антинейтрино может быть получен из наблюдаемого спектра электронов, при помощи соотношения

$$E_\nu = E_m - E_k. \quad (3)$$

Наиболее простую форму β -спектр имеет для разрешенных β -переходов. В этом случае матричный элемент перехода $|M|^2$ в спектре (1) не зависит от энергии β -частиц, и β -спектр может быть представлен в следующем безразмерном виде:

$$\frac{dN_e}{dE_k} = DF(Z, x)(x + 1)(x_0 - x)^2 \sqrt{x(x + 2)}, \quad (4)$$

где значение постоянной D определяет вертикальный масштаб спектра и для проведения качественного сравнения экспериментального и теоретического спектров можно положить D равной единице; $x = E_k/m_e c^2$, $x_0 = E_m/m_e c^2$ – кинетическая и максимальная энергии электронов соответственно, выраженные в единицах энергии покоя электрона.

В общем случае функция Ферми сложна и представляется в виде таблиц. На рис. 1 β -спектр представлен без учета кулоновского поля ядра, т. е. $F = 1$.

β -спектры запрещенных переходов могут существенно отличаться от разрешенных спектров из-за зависимости матричного элемента от энергии β -частиц.

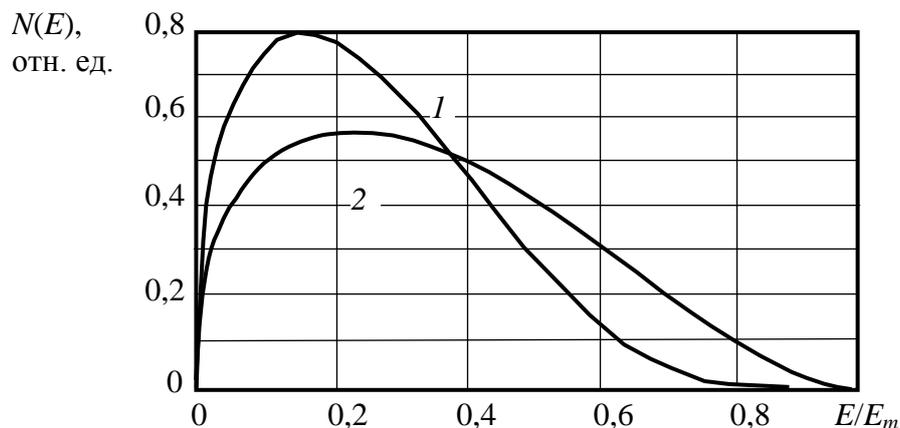


Рис. 2. Спектр электронов с учетом формфактора (1) и без учета формфактора(2)

Для запрещенных переходов в выражение для β -спектра (4) вводится множитель $S_l(x)$ (спектральный формфактор), зависящий от энергии электронов и порядка запрещения l . В результате для запрещенных переходов

$$\frac{dN_e}{dE_k} = DS_l(x)F(Z, x)(x+1)(x_0-x)^2\sqrt{x(x+2)}.$$

В общем случае функция S_l характеризуется сложной зависимостью от энергии, однако для β -перехода первого порядка запрещения, например, для Cs-137 формфактор может быть представлен простой функцией от энергии электрона:

$$S_1 = (x^2 - 1)^2 + (x_0 - x)^2. \quad (5)$$

На рис. 2 показано изменение β -спектра (4), вносимое формфактором S_l (5).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальное наблюдение спектра электронов (позитронов), вылетающих из ядра при β -распаде, осуществляется β -спектрометром, например 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 $L_e < L_{cu} < L_\gamma$ 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.

Схема распада радиоактивного изотопа Na-22 приведена на рис. 3.

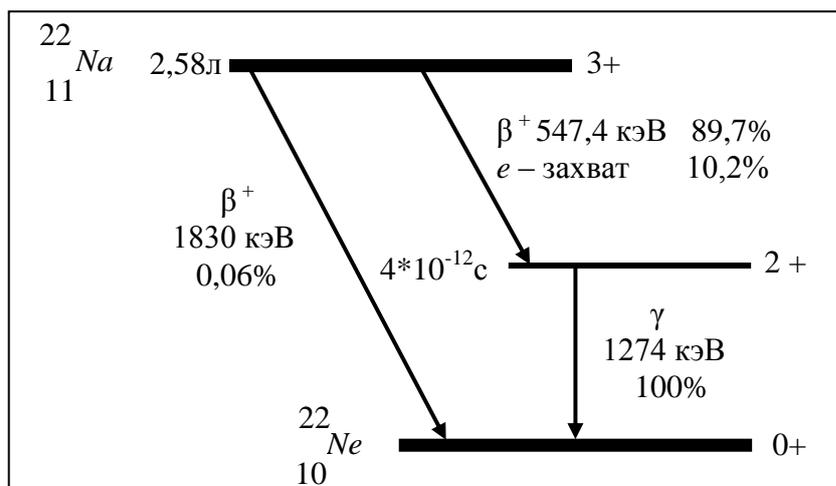


Рис. 3. Схема распада радиоактивного изотопа Na – 22

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 Na-22 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).

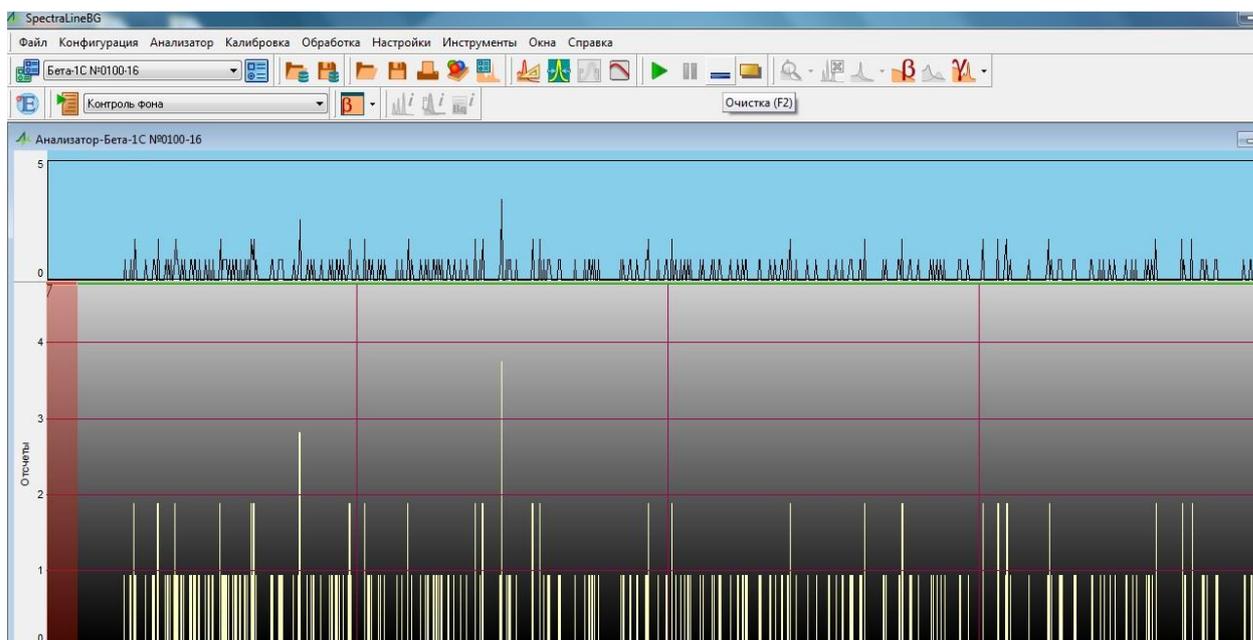


Рис.4. Окно анализатора импульсов и кнопка очистки памяти анализатора.

Блок данных по энергетической калибровке приведен в конце файла спектра. Значениям номеров каналов в левом столбце (10, 512, 1014) приводятся в соответствие значения энергий в кэВ в правом столбце (106,3273..., 1404,6545..., 2702,9821...). Энергетическая калибровка шкалы спектрометра представляет собой линейную зависимость номера канала n и энергии E_γ в единицах кэВ. Соответственно, используя данные, приведенные в файле спектра, необходимо построить зависимость, описываемую уравнением вида

$$n = a \cdot E_\gamma + b \quad (6)$$

Впоследствии, данная зависимость позволит для любого номера канала сказать о энергии бета-частиц, импульс от регистрации которых, попал в данный канал спектрометра.

Обработка результатов

Изучение спектра позитронов β^+ -распада Na-22

Задание 1. Ввести в Mathcad файлы данных со спектрами: суммарным и присвоить ему имя векторной переменной, описывающей суммарный спектр, например NaS , и γ -спектром – NaG .

Данные извлечь из сохраненных файлов спектров с расширением «.spe» открыв их в текстовом редакторе (блокнот). Информация в файле представляет собой характеристику набранного спектра (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 отсчетах спектрометра соответствует числу каналов спектрометра (1024) (см. рис. 6).

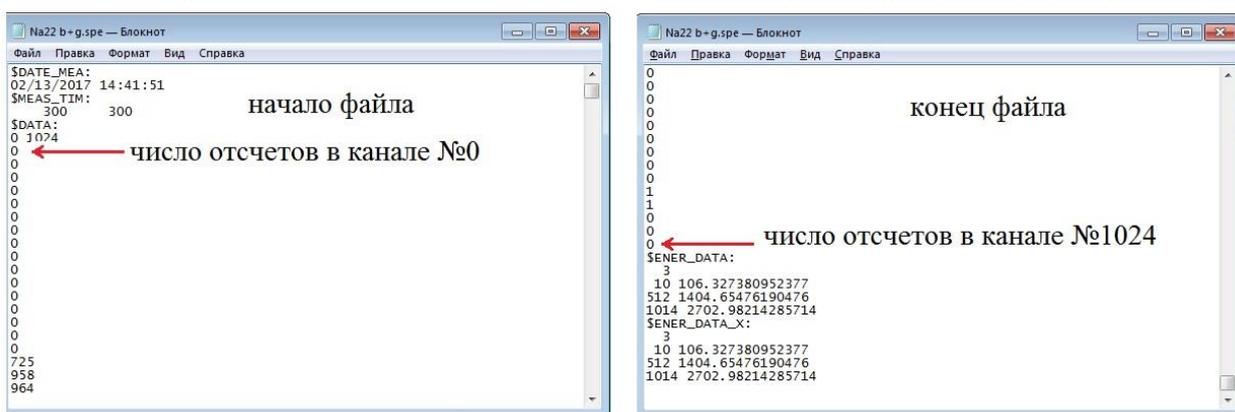


Рис.6. Чтение данных из сохраненного файла спектра.

Определить номер канала как ранжированную переменную i , изменяющуюся, как правило, от 0 до $i_{\text{макс}}$. Построить β -спектр Na-22 (NaE), проведя поканальное вычитание γ -спектра из суммарного спектра:

$$NaE_i = NaS_i - NaG_i \quad \text{или} \quad NaE = NaS - NaG$$

где NaE – вектор, содержащий число отсчетов от регистрации позитронов в каналах спектрометра; NaS – вектор экспериментальных данных суммарного спектра; NaG – то же для γ -спектра.

Задание 2. Сгладить полученный спектр позитронов, используя встроенную функцию `medsmooth`.

Задание 3. Определить характеристики экспериментального β -спектра Na-22. 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 Na-22.

Задание 4. Построить спектр нейтрино β^+ -распада, учитывая, что каждому позитрону в канале i (с энергией E_e) соответствует нейтрино в канале $i_{\text{макс}} - i$, т. е. с энергией $E_m - E_e$ (см. формулу 3). Следовательно, правило построения спектра нейтрино можно записать, например, в виде

$$NaV_j = NaE_{i_{\text{макс}} - j},$$

где j изменяется от 0 до $j_{\text{макс}} = i_{\text{макс}}$.

Задание 5. Повторить задание 3 для спектра нейтрино и сравнить характеристики спектра позитронов и нейтрино.

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. Как влияет кулоновское поле ядра на форму β -спектра?
5. Каковы особенности взаимодействия позитронов с веществом?