

## Лабораторная работа №3

### Изучение формы $\beta$ -спектра

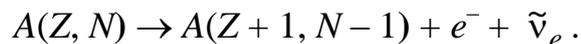
**Цель работы:** экспериментально изучить форму  $\beta$ -спектра Na-22, определить максимальную энергию бета спектра данного изотопа; построить спектр нейтрино  $\beta$ -распада Na-22.

#### УСЛОВИЯ $\beta$ -РАСПАДА

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

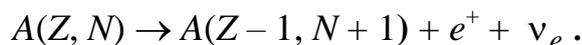
Известны три вида  $\beta$  - распада.

При электронном  $\beta^-$ -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  $\beta^+$ -распаде один из протонов ядра превращается в нейтрон с испусканием позитрона и электронного нейтрино  $\nu_e$ :



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



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

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

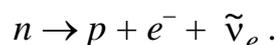
$$M(A, Z) > M(A, Z - 1) + m_e \text{ для } \beta^+ \text{ - распада;}$$

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

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  $\beta^+$ -распад и  $K$ -захват являются конкурирующими процессами.

Простейшим примером  $\beta$ -распада может служить процесс распада свободного нейтрона:



При  $\beta^-$ -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.

$\beta$ -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  $\beta$ -распада резко уменьшается и такие переходы называются запрещенными.

### $\beta$ -СПЕКТР

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

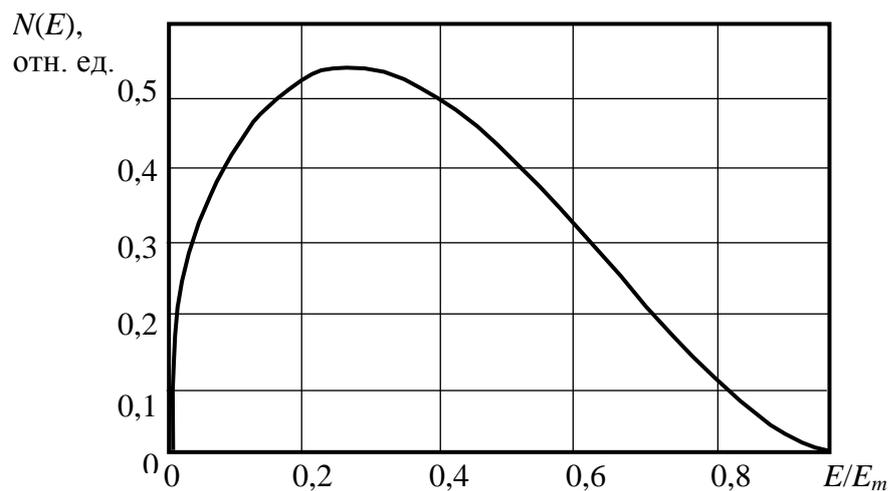


Рис. 1. Типичный  $\beta$ -спектр

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  $\beta$ -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  $\beta$ -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  $\beta$ -спектра объясняется тем, что  $\beta$ -распад является трехчастичным процессом, т. е. кроме регистрируемого в эксперименте электрона (позитрона) при  $\beta$ -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  $\beta$ -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  $\beta$ -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)  $\beta$ -распада или просто  $\beta$ -спектром.

Верхняя граница  $\beta$ -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  $\beta$ -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  $\beta$ -спектр имеет для разрешенных  $\beta$ -переходов. В этом случае матричный элемент перехода  $|M|^2$  в спектре (1) не зависит от энергии  $\beta$ -частиц, и  $\beta$ -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  $\beta$ -спектр представлен без учета кулоновского поля ядра, т. е.  $F = 1$ .

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

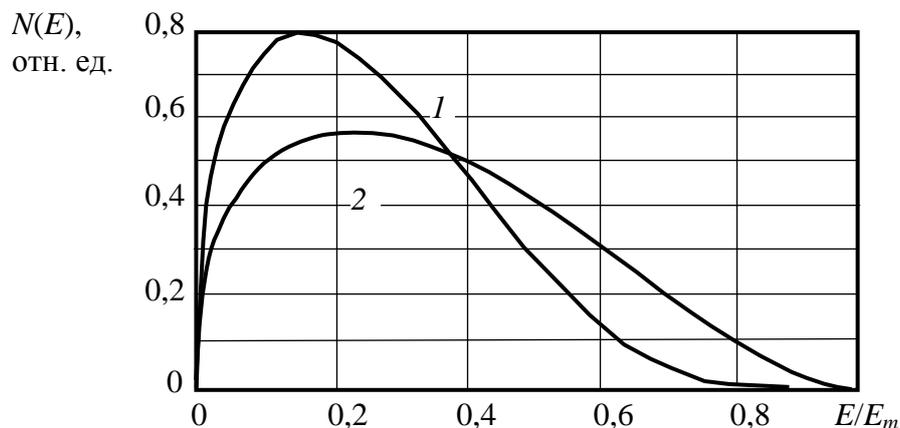


Рис. 2. Спектр электронов с учетом формфактора (1) и без учета формфактора(2)

Для запрещенных переходов в выражение для  $\beta$ -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  $\beta$ -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  $\beta$ -спектра (4), вносимое формфактором  $S_l$  (5).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

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

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

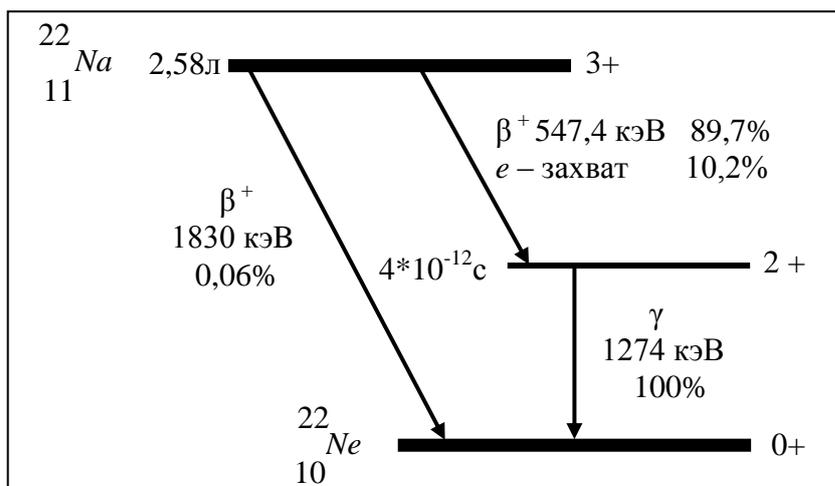


Рис. 3. Схема распада радиоактивного изотопа Na – 22

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

Фотография лабораторного стенда приведена на рисунке 4.

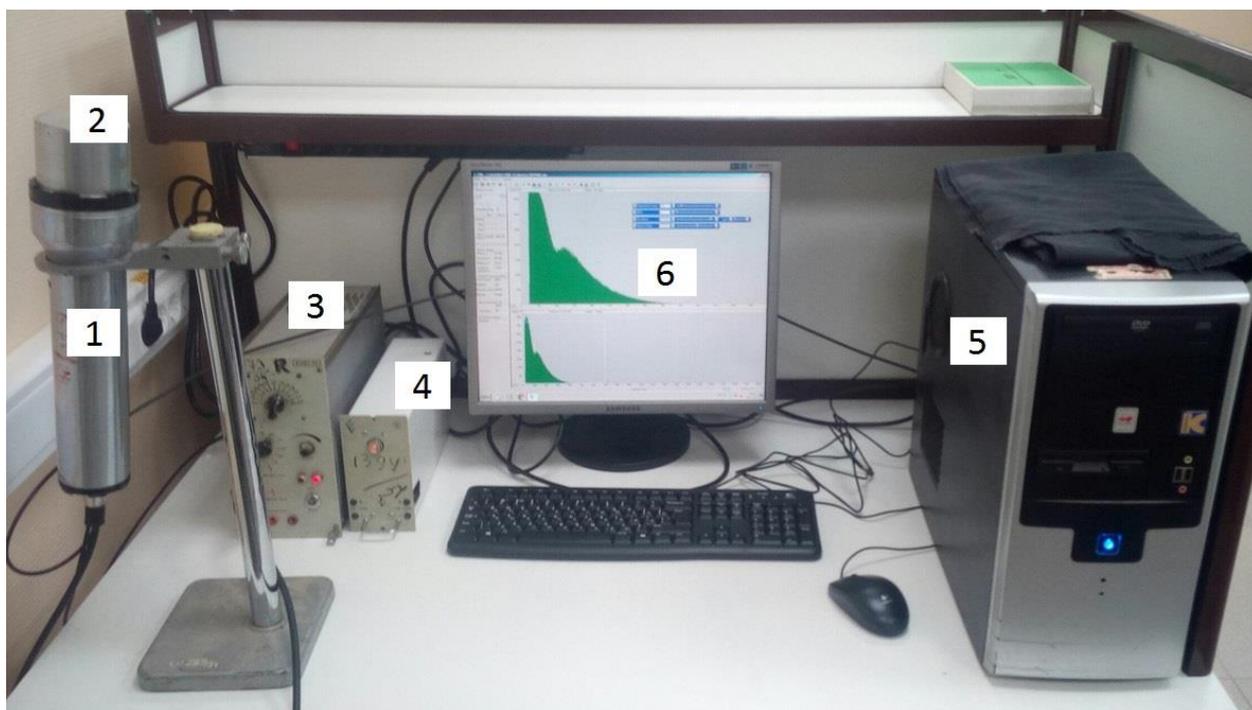


Рис.4. Лабораторный стенд по изучению формы бета-спектра. 1-сцинтилляционный детектор; 2-место установки источника излучения; 3-высоковольтный источник питания детектора; 4-низковольтный источник питания устройства согласования детектора; 5-персональный компьютер с установленной платой обработки сигналов, 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 включения установки и 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 Na-22 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 «РЗ. Изучение формы бета-спектра» 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



## Обработка результатов

### Изучение спектра позитронов $\beta^+$ -распада Na-22

Задание 1. Ввести в Excel данные, полученные при наборе суммарного спектра, и построить данный спектр в виде зависимости числа зарегистрированных частиц от их энергии. Для перевода номера канала в энергию воспользоваться калибровочным соотношением спектрометра. Присвоить ему имя векторной переменной, описывающей суммарный спектр, например  $NaS$ . Осуществить аналогичные действия для блока данных, полученных при наборе гамма спектра (присвоить столбцу данных имя  $NaG$ ).

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

$$NaB_i = NaS_i - NaG_i \text{ или } NaB = NaS - NaG$$

где  $NaB$  – блок данных, содержащий число отсчетов от регистрации позитронов в каналах спектрометра;  $NaS$  – блок экспериментальных данных суммарного спектра;  $NaG$  – то же самое для  $\gamma$ -спектра.

Задание 2. Определить характеристики экспериментального  $\beta$ -спектра Na-22. 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 Na-22.

Сравнить полученные значения с табличными величинами максимальной и наиболее вероятной энергии бета-частиц.

Задание 4. Построить спектр нейтрино  $\beta^+$ -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 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. Как влияет кулоновское поле ядра на форму  $\beta$ -спектра?
5. Каковы особенности взаимодействия позитронов с веществом?