

Работа 5.6

ИЗМЕРЕНИЕ β -СПЕКТРОВ С ПОМОЩЬЮ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ПЛАСТИКОВОГО ДЕТЕКТОРА

редакция 10 сентября 2016 года

В сцинтилляционном пластиковом детекторе световые вспышки возникают за счет взаимодействия электронов с материалом детектора. Эти электроны могут попадать в сцинтиллятор от внешнего β -активного источника, либо появляться непосредственно в материале детектора за счет взаимодействия γ -квантов от внешнего источника излучений. Такими процессами являются фотоэффект, комптоновское рассеяние и рождение электрон-позитронных пар. Рекомбинация электронов превращает их энергию в световые вспышки, яркость которых пропорциональна энергии возникающего электрона. Эти вспышки регистрируются фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Поэтому сцинтиллятор с присоединенным к нему на оптическом контакте ФЭУ служит спектрометром. Процессы взаимодействия гамма-квантов с веществом и основы сцинтилляционной спектрометрии подробно рассмотрены во введении к главе V и в Приложении II.6. учебного пособия «Лабораторный практикум по общей физике. Том 3. Квантовая физика».

Для спектрометрии гамма-излучения используется обычно неорганический кристалл NaI(Tl). На рис. 1 в качестве примера показан спектр ^{60}Co . Следует подчеркнуть, что в подавляющем большинстве случаев искусственные источники гамма-излучения являются бета-источниками, в которых после бета-распада образуется дочернее ядро в возбужденном состоянии. В данном случае мы имеем дело с бета-переходом из ^{60}Co в ядро ^{60}Ni , как это показано на рисунке. Время жизни этого гамма-источника определяется периодом полураспада ^{60}Co , равного 5,2 года, а время гамма-переходов при снятии возбуждения в ядре ^{60}Ni очень мало ($\approx 10^{-10}$ с).

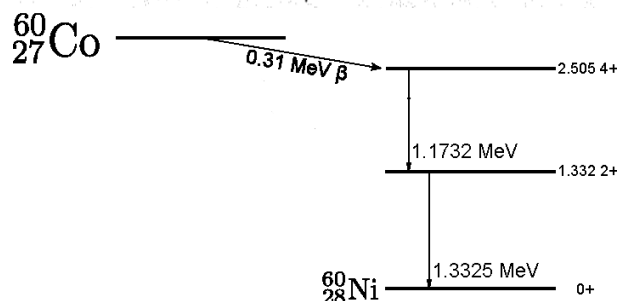
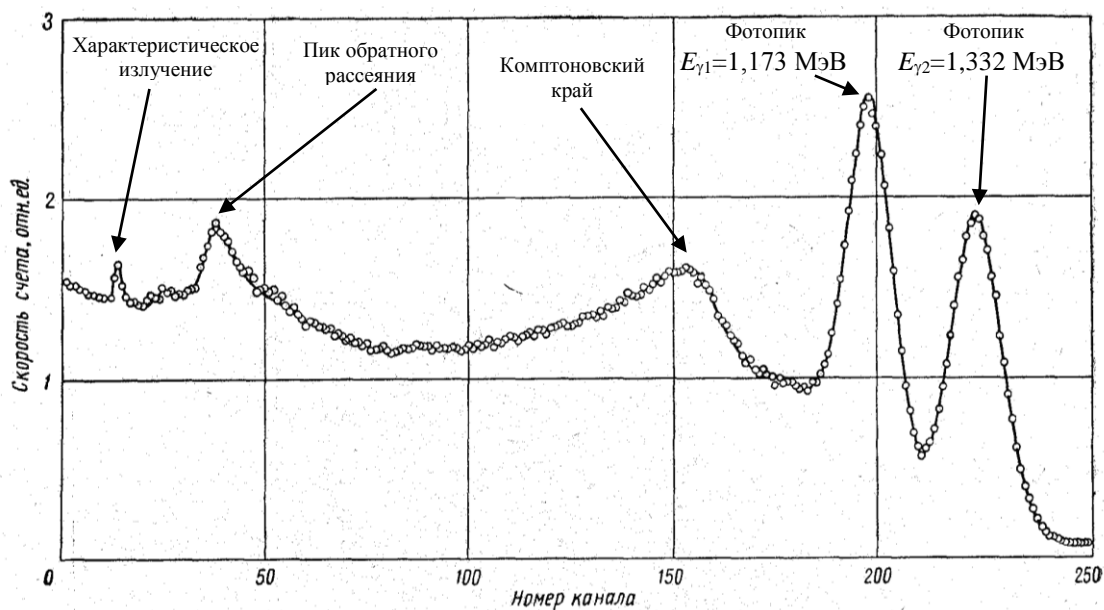


Рис.1. Гамма-спектр радиоактивного источника ^{60}Co , полученный при регистрации излучения сцинтилляционным гамма-спектрометром с кристаллом NaI(Tl) . В нижней части рисунка показана схема распада этого ядра.

При бета-распаде ^{60}Co образуется радиоактивный ^{60}Ni преимущественно в возбужденном состоянии с энергией 2,505 МэВ, либо с энергией 1,332 МэВ. Вероятность гамма-перехода определяется спином и четностью исходного и конечного состояний. В нашем случае при переходе на основное состояние должен испускаться 4^+ -квант, а на возбужденное – 2^+ (оно намного более вероятно). Поэтому в гамма-спектре наблюдаются две гамма-линии с энергиями 1,173 МэВ и 1,332 МэВ, соответствующие переходам из второго возбужденного состояния в первое и из первого в основное состояние. На рис. 1 видны два фотопика, соответствующие этим квантам. Кроме того, наблюдается непрерывное комптоновское излучение, пик обратного рассеяния и характеристическое излучение из свинца, служащего защитой детектора от космического излучения.

В редких случаях, при сочетании высокой степени подавления (большая разница в спинах уровней возбужденного и основного состояний ядра) с малой энергией перехода, могут наблюдаться гамма-активные ядра с временами жизни макроскопического порядка – гамма-изомеры. Так, например, в ядре ^{105}In основное состояние имеет характеристику $9/2^+$, а первый возбуж-

денный уровень с энергией 335 кэВ – характеристику $1/2^-$. Переход этот настолько подавлен, что время жизни возбужденного уровня оказывается равным 14,4 часа.

Пробег электронов в алюминии R_e с достаточно хорошей точностью можно рассчитывать по формуле

$$R_e \approx 0,5 E,$$

где R_e выражается в г/см², а E – в МэВ. Видно, что пробег электронов с энергией 1 МэВ равен толщине 0,5 г/см², что соответствует примерно 2 мм.

Сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) гигроскопичен и поэтому помещается во влагонепроницаемую оболочку. Тем самым внешние β -распадные электроны практически не попадают в кристалл и не регистрируются. Пластиковые кристаллы защищены очень тонкой светонепроницаемой пленкой, и с их помощью легко детектируются внешние электроны. Как было выше указано, гамма-излучению от стандартных источников всегда сопутствуют бета-распадные электроны. Если мы хотим избавиться от попадания этих электронов в сцинтиллятор, достаточно прикрыть бета-источник монеткой.

Как показано во введении к главе V учебного пособия «Лабораторный практикум по общей физике. Том 3. Квантовая физика», сечение фотоэффекта очень сильно зависит от заряда Z ядра атомов, на которых происходит внешний фотоэффект:

$$\sigma_{\text{ф}} \sim Z^5.$$

В состав неорганических кристаллов (например, NaI) входят элементы с большим атомным номером (для NaI это атомы йода) и поэтому в них ярко выражен пик полного поглощения, обусловленный фотоэффектом, как это видно из рис.1. Амплитудный спектр при регистрации гамма-квантов с использованием пластикового сцинтиллятора представляет собой непрерывное распределение, обусловленное комптоновским рассеянием. Граница комптоновского спектра соответствует гамма-квантам, рассеянным на 180°.

В отличие от неорганических кристаллов, в пластиковых сцинтилляторах, состоящих из химических элементов с малым Z , мы видим практически только электроны, возникающие при комптоновском рассеянии и рождении пар. В этих кристаллах вероятность фотоэффекта даже для гамма-квантов с энергией 50 кэВ приблизительно в 20 раз меньше вероятности комптоновского рассеяния. Для иллюстрации на рис. 2 приведен гамма-спектр гамма-квантов с энергией 4,5 МэВ, зарегистрированный органическим кристаллом – стильбеном.

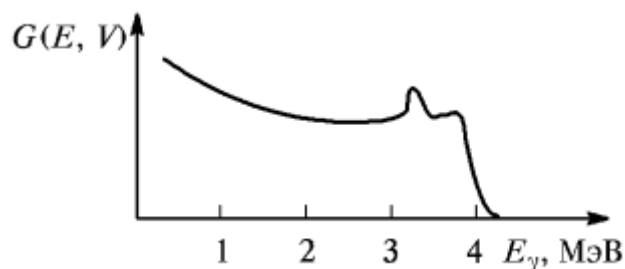


Рис. 2. Функция отклика органического кристалла (стильбена) на 4,5 МэВ гамма-кванты.

Принципиальная блок-схема гамма-спектрометра, изучаемого в данной работе, показана на рис. 3.

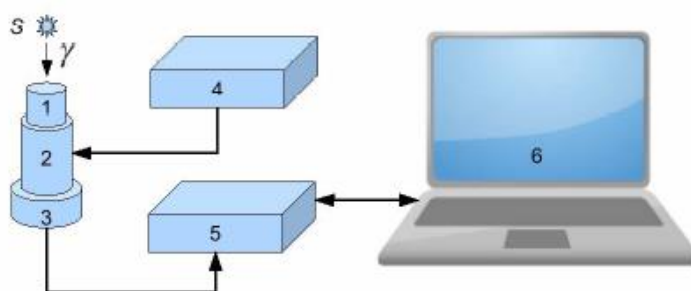











Рис. 3. Принципиальная блок-схема спектрометра

На этом рисунке: 1 – сцинтиллятор, 2 – ФЭУ, 3 – предусилитель импульсов, 4 – высоковольтный блок питания для ФЭУ, 5 – блок преобразования аналоговых импульсов с ФЭУ в цифровой код (АЦП), 6 – компьютер для сбора данных, их обработки и хранения.

Как известно, энергетический спектр электронов при β - распаде непрерывен, однако часто в спектре наблюдаются и монохроматические линии, обязанные электронам конверсии. Это дает возможность прокалибровать измеряемые амплитудные спектры по энергии. В частности, в распадном спектре ^{137}Cs энергия конверсионных электронов равна 624 кэВ.

Порядок проведения работы и обработка результатов

1. Включите компьютер и питание экспериментальной установки. Откройте под своим именем папку, в которую будете записывать полученные данные. Переписав эти данные на внешний носитель (флешку), Вы сможете дома обрабатывать полученные результаты.
2. Сначала запустите программу **Excel**, а затем программу **Прогресс** на рабочем столе компьютера.

- Установите в свинцовом блоке образец с источником ^{137}Cs . Выберите в меню пункт:  → **ПУСК**. Примерно через 300 секунд (время в секундах отображается внутри значка ) выберите в меню пункт:  → **СТОП** для остановки счета. На экране отображается спектр источника. Вертикальный масштаб отображения спектра можно менять путем перемещения указателя мыши по полю спектра при нажатой левой кнопке мыши.
- Проведите измерение фона. Для этого удалите из свинцового блока образец с источником ^{137}Cs и установите в нем пустую чистую кювету. Выберите в меню пункт  → **ОЧИСТКА**, затем  → **ПУСК**. Примерно через 10 минут остановите счет, выбрав  → **СТОП**. Убедитесь, что на полученной картине фонового спектра отсутствуют признаки наличия радиоактивных источников.
- Снова установите в свинцовом блоке образец с источником ^{137}Cs . Выберите в меню пункт:  → **ОЧИСТКА**, затем  → **ПУСК**. Примерно через 10 минут остановите счет, выбрав  → **СТОП**. Нажав на вертикальный репер (вертикальная прямая линия) левой кнопкой мыши, можно перемещать его по спектру и определять текущий номер канала. Номера каналов отображаются также на горизонтальной оси. Программа позволяет растянуть участок спектра так, чтобы интересующая область спектра была подробно прорисована на экране. Для изменения вертикального масштаба отображения спектра нажмите левую кнопку мыши и двигайте ее вверх или вниз. Для изменения горизонтального масштаба отображения спектра переместите мышью край горизонтальной полосы прокрутки, находящейся на шкале абсцисс графика. Для определения номеров канала на экране присутствуют два маркера (две вертикальные прямые линии). Их можно перемещать с помощью мыши по спектру. На рис. 4 приведена схема распада ^{137}Cs .

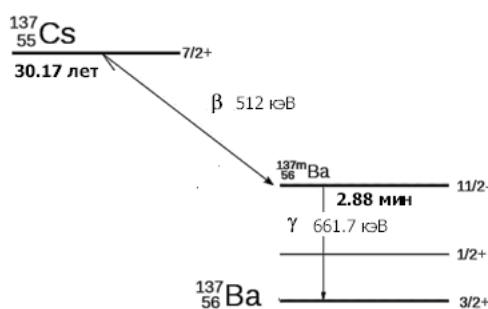


Рис. 4. Схема распада ^{137}Cs .

При распаде ядра ^{137}Cs помимо гамма-излучения с энергией 0,662 МэВ, возникают преимущественно еще электроны с граничной энергией 0,512 МэВ. Кроме того, при распаде ^{137}Cs возникают также электроны внутренней конверсии с фиксированной энергией 0,624 МэВ. Однако комптоновский край от гамма-квантов с энергией 0,662 МэВ накладывается на край распределения электронов с граничной энергией 0,512 МэВ.

Поэтому в нашем случае виден только пик, соответствующий конверсионным электронам с энергией $E_k = 0,624$ МэВ. Определите номер канала N_k , соответствующий этому пику.

Для сцинтилляционного детектора номер канала пропорционален энергии электронов. Зная номер канала N_k и энергию E_k конверсионных электронов, постройте линейный калибровочный график зависимости номера канала N_i от энергии электрона E_i : $N_i = a E_i$.

Перенесите данные полученного спектра в программу **Excel**. Для этого выберите в меню пункт **FILE** → **ПЕРЕНЕСТИ** → **В Excel** и сохраните Excel-файл на флешке.

6. Положите в кювету с источником ^{137}Cs на активную область монету и повторно снимите спектр этого источника. В полученном спектре будет присутствовать только вклад от γ -квантов с энергией 0,662 МэВ. Сохраните полученный спектр на флешке. Дома, используя калибровочный график и данный спектр, определите из него энергию края комптоновского рассеяния и сравните ее с теоретическим значением. Вычитая из спектра, полученного в п. 5 данный спектр, получите β -спектр электронов. Приблизительно определите из него максимальную (граничную) энергию электронов и сравните ее с табличным значением 0,512 МэВ.
7. Установите в свинцовом блоке образец с источником ^{90}Sr , схема распада которого приведена на рис. 5.

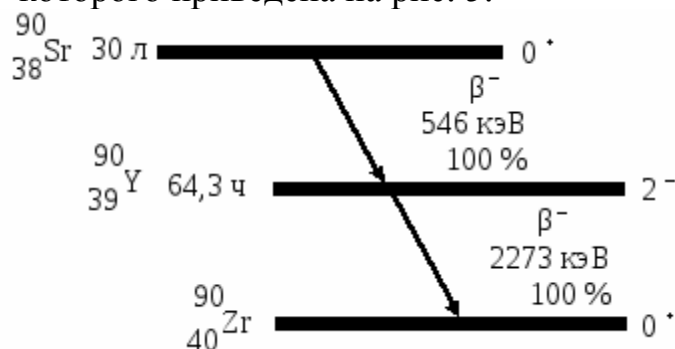


Рис. 5. Схема распада ^{90}Sr .

Как видно из этой схемы, ^{90}Sr претерпевает β^- – распад и превращается в ^{90}Y , который также испытывает β^- – распад. При этом испускаются две группы электронов с граничной энергией 0,546 МэВ и 2,273 МэВ, соответствующие распадам ^{90}Sr и ^{90}Y . На рисунке 6 приведен спектр данного источника и показано, как из него можно определить данные граничные энергии электронов.

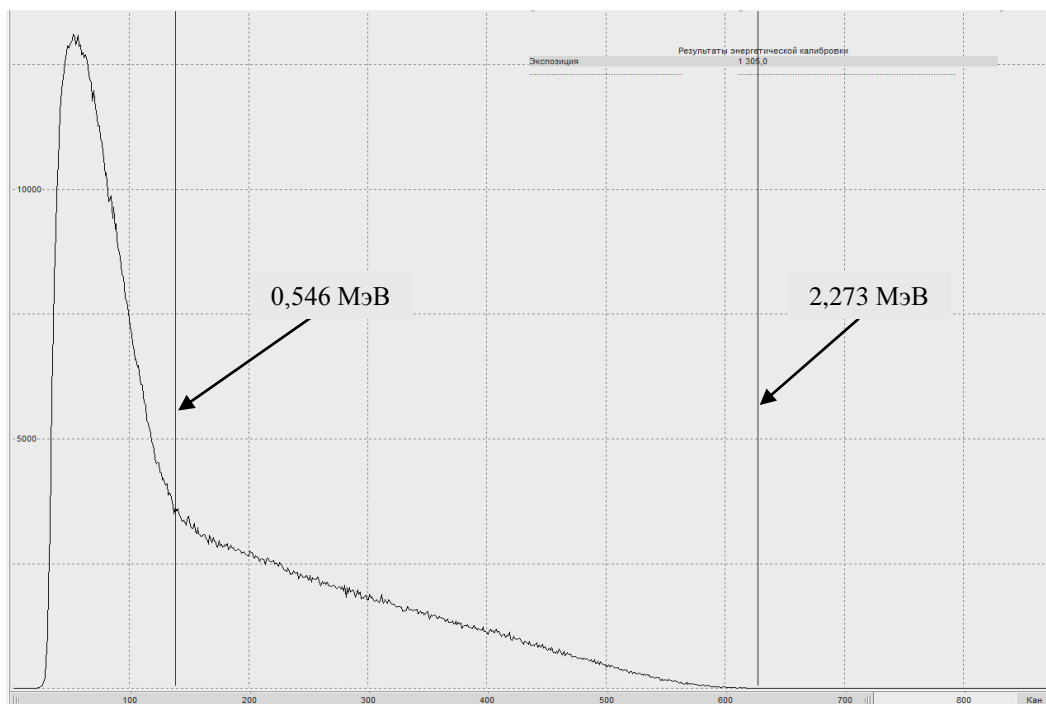


Рис. 6. Спектр ^{90}Sr .

Снимите спектр данного источника, запишите его на флешку. Дома из него определите граничные энергии электронов и сравните их с табличными значениями.

8. Проведите аналогичные измерения β -спектра (см. п. 7) для образца с источником ^{36}Cl , который испытывает β^- – распад. Найдите граничную энергию электронов и сравните ее с табличным значением (0,714 МэВ).
9. Проведите измерения с образцом ^{60}Co , схема распада которого приведена на рис. 1. Помимо гамма-квантов с энергиями 1,173 МэВ и 1,332 МэВ, при этом возникают две группы электронов с граничными энергиями 1,48 МэВ и 0,314 МэВ (см. рис. 1). Для этого источника снимите спектры без монеты и с монетой, положенной на активную область. Запишите спектры на флешку. Из полученных спектров и из их разности определите граничную энергию электронов и сравните ее с табличным значением 0,314 МэВ (доля электронов с граничной энергией 1,48 МэВ очень мала). Определите также энергию края комптоновского рассеяния для γ -квантов с энергией 1,173 МэВ и сравните ее теоретическим значением.
10. Проведите измерения с образцом ^{22}Na , схема распада которого приведена на рис. 7.

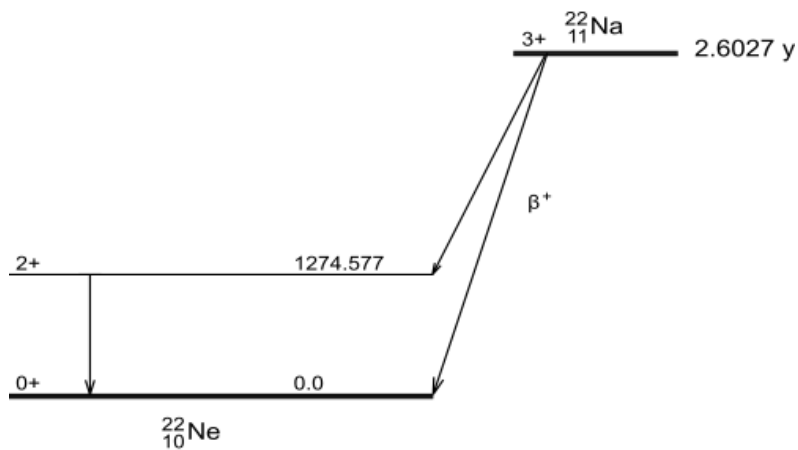


Рис. 7. Спектр ^{22}Na .

При распаде ядра ^{22}Na кроме гамма-квантов с энергией 1,275 МэВ возникают позитроны с граничной энергией 0,545 МэВ, которые при аннигиляции с электронами дают γ -кванты с энергией 0,511 МэВ. Для данного источника снимите спектры без монеты и с монетой, положенной на активную область. Запишите спектры на флешку. Из полученных спектров и из их разности определите граничную энергию позитронов и сравните ее с табличным значением. Определите также энергии краев комптоновского рассеяния для γ -квантов с энергиями 0,511 МэВ и 1,275 МэВ и сравните их с теоретическими значениями.