

“Исследование комптоновского рассеяния гамма-квантов детектором NaI(Tl)”

Цель работы - демонстрация воздействия эффекта Комптона на энергетический спектр гамма излучения от радиоактивного гамма-источника. Демонстрация производится посредством детектора NaI(Tl) фирмы ORTEC, системы съема, визуализации и обработки спектров MAESTRO, радиоактивных источников ^{137}Cs и ^{60}Co . Результаты эксперимента однозначно показывают, что несмотря на отсутствие массы – гамма-кванты обладают моментом.

Основные положения: Единица измерения кэВ (кило-электрон Вольт) используется в частности для определения энергии спектральной линии гамма-излучения от радиоактивных источников. По определению, 1 эВ (электро-Вольт) эквивалентен количеству кинетической энергии, приобретаемой свободным электроном в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 Вольт. Соответственно, 1 эВ равен $1.602 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Энергия фотона зависит от его длины волны λ (или от частоты колебаний f электромагнитного поля фотона) в соответствии с формулой Планка

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Где $h=6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж•сек – постоянная Планка, $c=3 \cdot 10^8$ м/сек – скорость света в вакууме. Соответственно длина волны фотона в нанометрах составляет

$$\lambda[\text{nm}] \approx \frac{1,240[\text{eV} \cdot \text{nm}]}{E[\text{eV}]}$$

Для примера: длина волны излучения от ^{137}Cs с энергией 662 кэВ составляет $\lambda=1.87 \cdot 10^{-12}$ м.

Часто студенты, впервые измеряя спектр излучения от гамма-радиоизотопа, в котором присутствует только одна дискретная линия излучения, бывают удивлены, увидев на измеренном спектре кроме

ожидаемой линии излучения много других энергий излучения. Например, для источника ^{137}Cs известны две дискретные линии излучения – 30 и 662 кэВ. Однако в действительности на измеренном энергетическом спектре видны и другие характеристические энергии, в частности видно плато, которое распространяется до энергии 480 кэВ и пик на энергии 180 кэВ (смотри Рис.1).

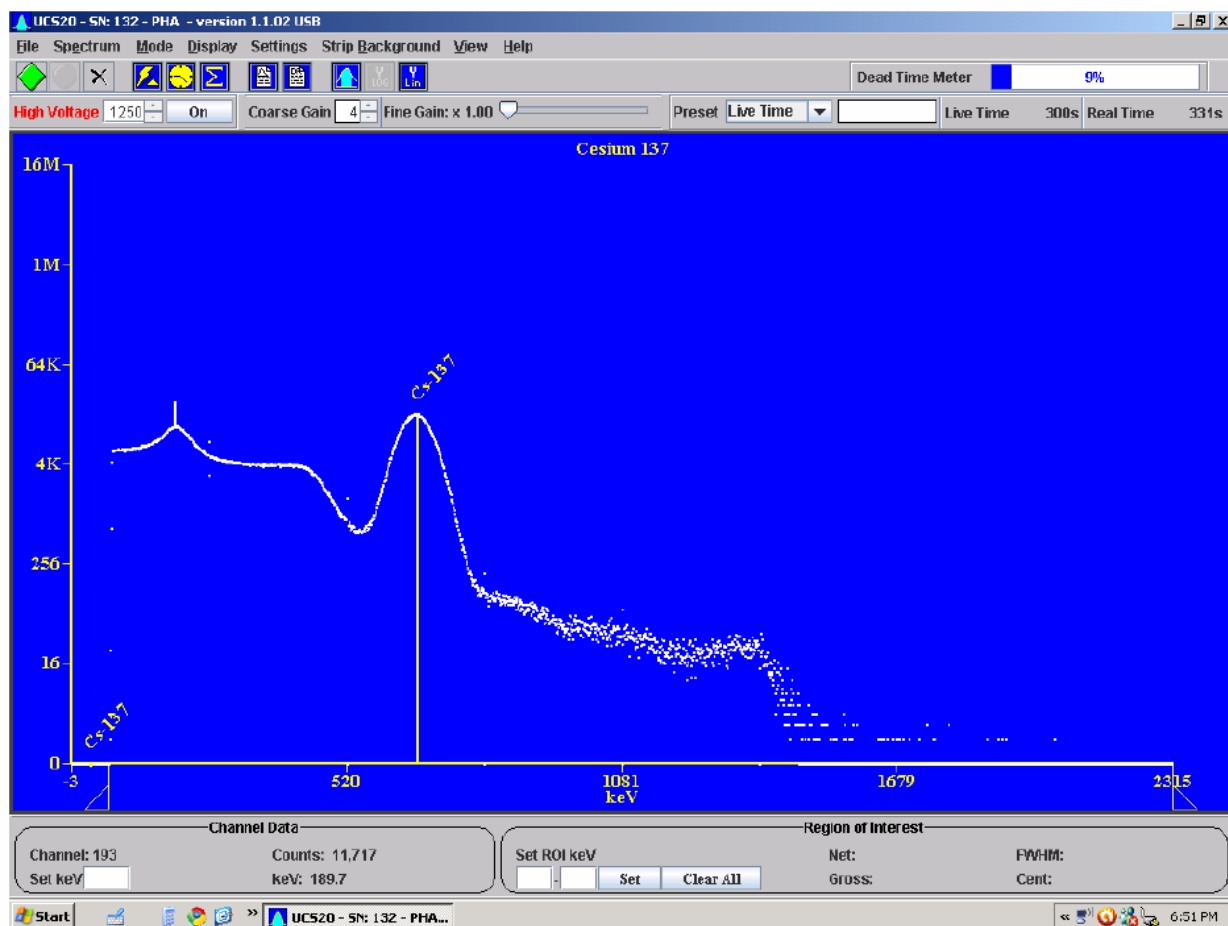


Рис. 1. Вид энергетического спектра от Cs137, измеренного детектором NaI(Tl).

Для объяснения этого экспериментально измеренного спектра нужно обратиться к очень важному эксперименту, проведенному в 1923 году профессором Артуром Комптоном в университете имени Вашингтона в Сент-Луис. В этом эксперименте свет (а именно – поток гамма-квантов) взаимодействовал с виртуально-свободными электронами. Классическая физика предсказывала, что электрон поглотит энергию гамма-кванта и затем излучит ее обратно с той же энергией (частотой). В действительности эксперимент Комптона показал, что гамма-кванты

отскакивают от электронов с уменьшением энергии, как будто гамма кванты представляли собой поток частиц, соударяющихся с электронами. Фактически следовало, что гамма-кванты способны передать часть своего импульса другим частицам. За это новое понимание природы частиц света (в данном случае – гамма-квантов) Комптон в 1927 году удостоился Нобелевской премии по физике.

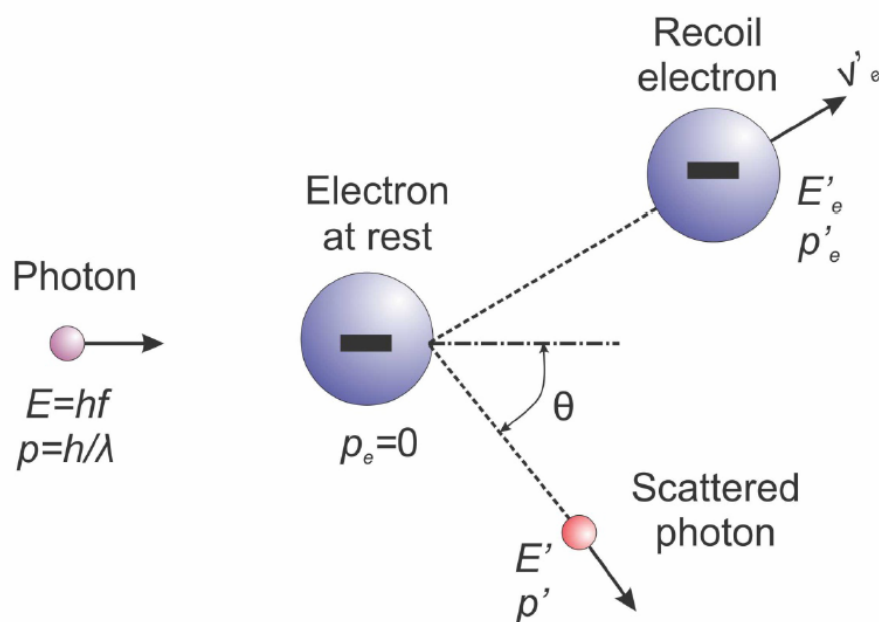


Рис. 2. Комптоновское рассеяние.

Рассмотрим геометрию Комптоновского рассеяния (смотри Рис. 2). Фотон с частотой f соударяется с электроном, находящимся в покое. До взаимодействия энергия фотона определяется формулой Планка

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

где $h=6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж•сек – постоянная Планка, а f - частота фотона.

В результате столкновения фотон отскакивает от электрона, передавая ему часть своей энергии, в результате чего электрон приобретает дополнительный момент. Однако фотон с уменьшением энергии не может уменьшить скорость движения – она всегда равна c – поэтому уменьшается частота фотона f и соответственно связанная с ней энергия фотона $E=hf$.

Как видим, фотон потерял после столкновения с электроном часть своей энергии, при этом отскочил от электрона под углом θ с новой энергией E' и импульсом p' . При этом длина волны фотона до взаимодействия равна λ , а после взаимодействия - λ' .

Импульс фотона составляет

$$p_{\text{photon}} = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Так что если изменение длины волны фотона составляет

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$$

то электрон приобретает дополнительный импульс в той части, которую потерял фотон. При массе электрона $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг имеем

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta))$$

Максимальное изменение длины волны фотона произойдет в случае максимального изменения момента электрона. Это соответствует случаю $\cos(\theta) = -1$. Максимальное изменение длины волны при этом составляет

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - (-1)) = \frac{2h}{m_e c} = \frac{2 \times (6.626 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}])}{9.1 \times 10^{-31} [\text{kg}] \times 3 \times 10^8 [\text{m} / \text{s}]} = 4.86 \times 10^{-12} \text{ m}$$

Из условия $\cos(\theta) = -1$ следует, что отдача фотона должна состояться под углом 180° (обратное рассеяние). Необходимо принять во внимание, что это является максимальным смещением по частоте и энергии. В действительности большая часть фотонов отразится на значительно меньшие значения углов.

Эксперимент. В качестве детектирующей системы используется детектор на основе кристалла NaI(Tl) фирмы ORTEC. Размеры кристалла составляют 3x3 дюйма.

Детектор на основе NaI(Tl) фирмы ORTEC Гамма-кванты, взаимодействуя с веществом сцинтиллятора, вызывают световую вспышку, которая преобразуется в электрический импульс посредством

фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). ФЭУ состоит из фотокатода, фокусирующего электрода и 10 или более динодов, умножающих число электронов, падающих на каждый динод. Цепочка резисторов, обычно расположенных в виде делителя на разъеме ФЭУ, обеспечивает потенциалы на динодах и аноде. Таким образом, детектор в комплекте состоит из сцинтиллятора и ФЭУ.

Требования, предъявляемые к таким детекторам – хорошая прозрачность, возможность изготовления больших размеров, и самое главное – максимально большой выход света пропорционально энергии гамма-квантов. Несколько материалов обеспечивают такие параметры – активированный таллием йодид натрия NaI(Tl) и йодид цезия CsI(Tl), а также некоторые пластические сцинтилляторы. CsI(Tl) и пластические сцинтилляторы обладают намного лучшими временными параметрами по сравнению с NaI(Tl) и поэтому часто применяются при необходимости получения лучшего временного разрешения.

Высокий Z йода в NaI(Tl) приводит к высокой эффективности регистрации гамма-квантов.

Энергетическое разрешение кристалла NaI(Tl) диаметром 3 дюйма и длиной 3 дюйма составляет около 7% для ^{137}Cs и немного ухудшается с увеличением размеров.

Временное разрешение кристалла NaI(Tl) составляет примерно 0.23 мксек. Типовой зарядово-чувствительный предусилитель переводит сигнал с ФЭУ в импульс напряжения с временем нарастания переднего фронта около 0.5 мксек. Быстрое совпадение при таких параметрах невозможно, особенно при низких энергиях.

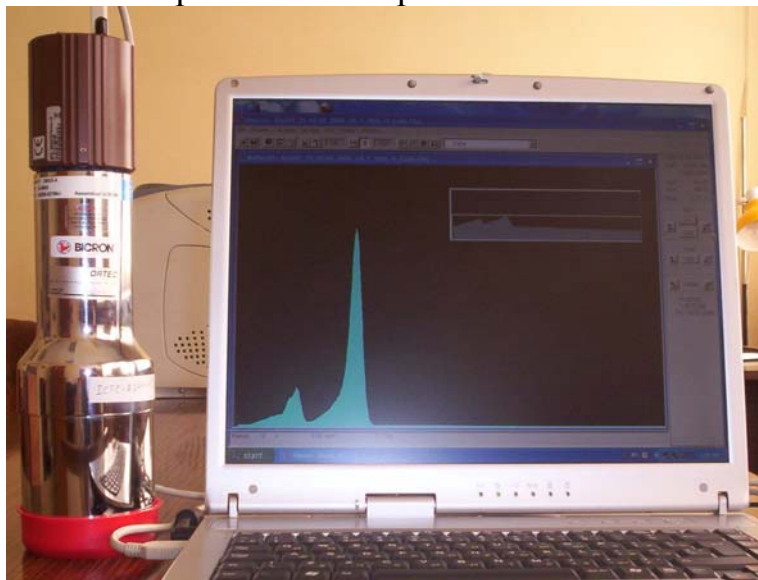


Рис. 3. Детектор на основе NaI(Tl) фирмы ORTEC

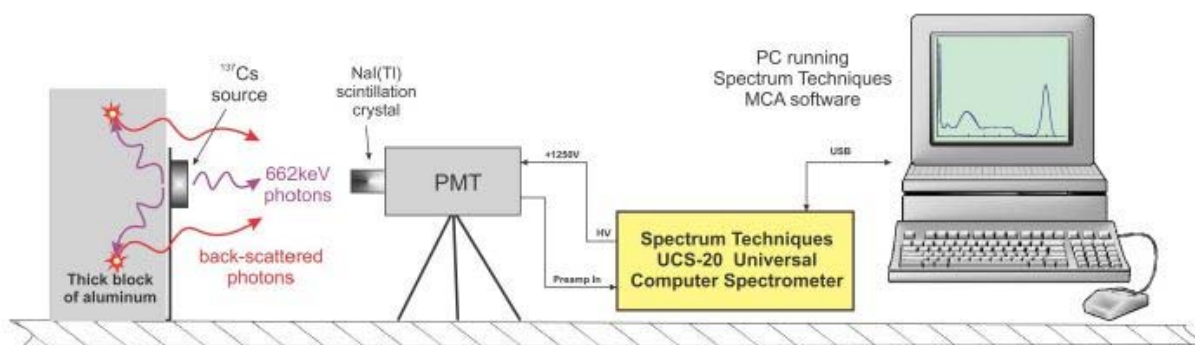


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Лабораторная работа

Подключение детектора

1. Включить компьютер
2. Подключить разъем детектора к входу USB компьютера
3. Открыть программу MAESTRO
4. Убедиться, что в окне Buffer высвечивается детектор 001USER-PC22MCB130. Если другое – обратиться к руководителю.
5. Нажать “Acquire – MCB Properties”
6. High Voltage – ON
7. Установить напряжение на детекторе 590 Вольт, если не установлено.

Калибровка детектора радиоактивными источниками ^{241}Am и ^{137}Cs

1. Достать из сейфа контейнер с радиоактивным источником ^{241}Am , извлечь источник из контейнера.
2. Установить радиоактивный источник ^{241}Am перед окном детектора.
3. Установить время набора спектра, для этого Acquire – MCB Properties – Preset – Real time – 500 секунд.

4. Начать набор спектра кнопкой “Go” – погаснет зеленая индикация “Go”, загорится красная индикация “Stop”.
5. Контролировать показатель мертвого времени набора “Dead Time” в правом верхнем окне – должен быть не более 10%.
6. По завершении набора загорится индикация “Go” .
7. На экране высвечивается энергетический спектр от радиоактивного источника ^{241}Am .
8. Передвижением курсора стрелками влево-вправо установить курсор на пиковое значение спектра.
9. С нижней части экрана считать значение номера канала под названием “Marker”.
10. “Calculate – Calibration – Destroy calibration”
11. Установить значение энергии излучения от ^{241}Am в окне энергии, для ^{241}Am это значение составляет 59.54 КэВ.
12. Удалить ^{241}Am в контейнер, спрятать в сейф.
13. Достать из сейфа контейнер с радиоактивным источником ^{137}Cs , извлечь источник из контейнера.
14. Установить радиоактивный источник ^{137}Cs перед окном детектора.
15. Повторить пункты 3-10 для ^{137}Cs .
16. Установить значение энергии излучения от ^{137}Cs в окне энергии, для ^{137}Cs это значение составляет 661 КэВ.
17. ОК – завершить калибровку, выйти из окна калибровки.

Измерение спектра от цезия¹³⁷

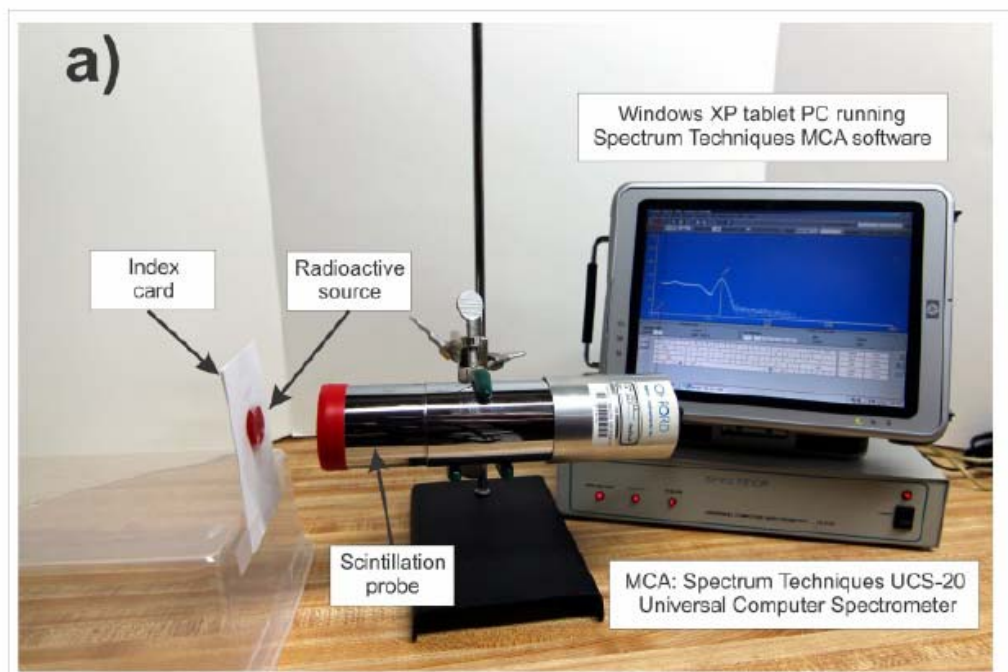


Рис. 5. Установка измерения спектра от ^{137}Cs (из литературных источников).



Рис. 6. Реальная лабораторная установка в комнате 109 отдела изотопов.

1. Набрать спектр излучения от ^{137}Cs аналогично пунктам 3-8 параграфа “Калибровка”. По завершении набора измерить и записать измеренные значения пиковой энергии от ^{137}Cs и значение (приблизительно) комптоновского края (E_e на рисунке 7).

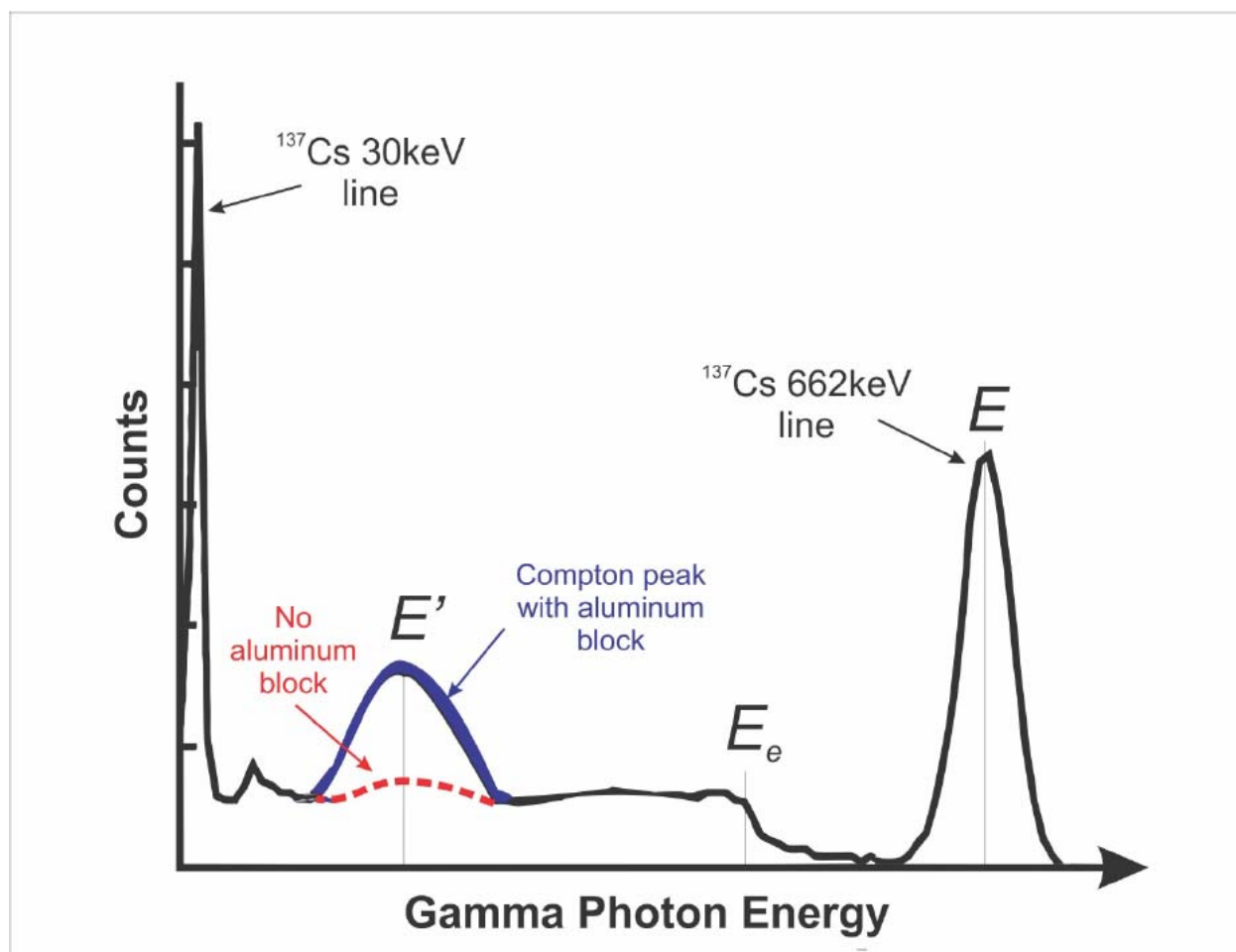


Рис. 7. Типичный спектр комптоновского рассеяния.

2. Сохранить измеренный спектр “File – Save As”, выбрать свою директорию (для каждого студента создана своя индивидуальная директория) “My Documents_LabWork_Compton_Students_StudentName” (StudentName=Andranik, Armine, Anush or Mher), в двух расширениях – Integer ChN и ASCII SPE, под названием Cs137.

3. Установить 2 блока алюминия за радиоактивным источником (смотри Рис. 6).
4. Измерить энергетический спектр от ^{137}Cs с эффектом Комптона (процедура измерения - аналогично п. 3 данного параграфа). По завершении набора измерить и записать измеренные значения пиковой энергии от ^{137}Cs , значение (приблизительно) комптоновского края (E_c на рисунке) и значение энергии комптоновского пика (E' на рис. 7).
5. Сохранить измеренные спектры в той же директории, что и спектр под названием Cs137, но уже под названием Cs137&Al.

Измерение спектра от кобальта ^{60}Co

1. Удалить предыдущий радиоактивный источник, уложить в контейнер и поместить в сейф.
2. Извлечь из сейфа радиоактивный источник ^{60}Co , установить его перед окном детектора.
3. Повторить пункты 3-7 предыдущего параграфа. Спектры сохранить под названиями ^{60}Co и $^{60}\text{Co}\&\text{Al}$, соответственно.

Обработка результатов, сравнение с предсказанием

1. Значения пиковой энергии от источника, комптоновского края и комптоновского пика занести в таблицу

| Source | Expected E(keV) | Predicted E' (keV) | Predicted Compton Edge (keV) | Measured E(keV) | Measured E'(keV) | Measured Compton Edge (keV) |
|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|
| ^{137}Cs | 662 | 180 | 482 | | | |
| ^{60}Co | 1170 | 204 | 966 | | | |
| | 1330 | 208 | 1122 | | | |

2. Сравнить результаты измерений с предсказанными данными.

