

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

ГАЙНОВ Р.Р., ДУЛОВ Е.Н., БИКЧАНТАЕВ М.М.

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

2013

УДК 539.164

ББК 22.38

Печатается по решению

Редакционно-издательского совета

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Учебно-методической комиссии Института физики

Протокол № __ от __ 2013 г.

Заседания кафедры физики твердого тела

Протокол № 5 от 19 ноября 2013 г.

Авторы:

канд. физ.-мат. наук, ассистент Гайнов Р.Р.

канд. физ.-мат. наук, ассистент Дулов Е.Н.

электроник 1-ой категории Бикчантаев М.М.

Рецензент:

канд. физ.-мат. наук, с.н.с. КИББ КазНЦ РАН Манапов Р.А.

ЭФФЕКТ КОМПТОНА. Учебно-методическое пособие / Р.Р. Гайнов, Е.Н. Дулов, М.М. Бикчантаев // Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. – 24 с.: 7 илл.

Аннотация

В учебно-методическом пособии рассмотрено явление комптоновского рассеяния (эффект Комптона) гамма- и рентгеновского излучения при его прохождении через вещество, а также основные свойства данного эффекта. В пособии содержится описание лабораторной работы по изучению эффекта Комптона с использованием сцинтилляционного детектора гамма-излучения и хода ее выполнения с целью практического закрепления теоретического материала. Самостоятельная работа студентов основана на оборудовании фирмы Leybold Didactic GmbH (Германия). Пособие предназначено для студентов Института физики, изучающих общий физический практикум по курсам «Физика атомного ядра и частиц» и «Ядерная физика». Пособие будет также полезным широкому кругу студентов и аспирантов других специальностей (геология, химия, биология).

© Казанский федеральный университет, 2013

© Гайнов Р.Р., Дулов Е.Н., Бикчантаев М.М.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	4
1	Эффект Комптона и его значение в ядерной физике и технике	4
2	Процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом	4
3	Эффект Комптона в приближении Комптона-Дебая	6
4	Взаимосвязь эффекта Комптона с другими механизмами рассеяния	10
5	Сечение эффекта Комптона	11
6	Взаимосвязь коэффициента ослабления и сечения эффекта Комптона	13
7	Ход выполнения лабораторной работы	15
8	Сопроводительный материал	19
9	Вопросы для самоконтроля	21
	Литература	22

Введение

Цель настоящей работы – знакомство с явлением комптоновского рассеяния (эффект Комптона) и его закономерностями, проявляющимися при взаимодействии гамма-излучения с веществом. Практическая часть методического пособия включает работу с техникой и знакомство с методикой регистрации рассеянного излучения препарата цезия (изотоп ^{137}Cs) с использованием сцинтилляционного детектора.

1. Эффект Комптона и его значение в ядерной физике и технике

Эффект Комптона или комптоновское рассеяние – рассеяние электромагнитной волны на свободном электроны, сопровождающееся уменьшением частоты данной волны (частичной потерей энергии) [1-5]. Эффект проявляется в случае больших частот рассеиваемого электромагнитного излучения (в области ионизирующих гамма-, рентгеновского излучения). Он проявлялся уже в первых опытах по рассеянию рентгеновских лучей на свободных электронах, но впервые с требуемой тщательностью был изучен в 1922-23 годах Артуром Холи Комптоном (A. Compton), в честь которого этот эффект и был назван. С исторической точки зрения, эффект Комптона явился одним из главных свидетельств в пользу корпускулярной природы электромагнитного излучения, поскольку с позиции классической электродинамики рассеяние с изменением частоты невозможно. Необходимо отметить, что результаты расчетов Комптона стали известны еще до появления уравнения Шредингера, которое является основополагающим в квантовой теории. Вместе с тем, эффект Комптона играет очень важную роль в физике конденсированного состояния [1-3, 5] и технологиях [4], связанных с использованием ионизирующих излучений. Последнее обусловлено тем фактом, что эффект Комптона является одним из основных механизмов, определяющих потери энергии при прохождении излучения через вещество. Как следствие, знание сути эффекта Комптона и его особенностей при взаимодействии ионизирующего излучения с веществом необходимы для понимания и решения практических вопросов в области физики конденсированного состояния [1-3, 5], технологий [4] и экологии [6].

2. Процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом

Эффект Комптона относится к одному из основных механизмов взаимодействия гамма- и рентгеновского излучения с веществом. Кратко остановимся на перечислении этих механизмов и месте эффекта Комптона в этом контексте. Напомним, что *гамма-излучение* – это электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядер из возбужденного состояния в основное. Диапазон длин волн гамма-излучения условно начинается с

$\lambda \leq 2 \cdot 10^{-10}$ м (энергия соответствующих гамма-квантов E_γ порядка 1 кэВ, 1 нм соответствует 1,26 кэВ), т.е. длина волны гамма-излучения часто значительно меньше межатомных расстояний. Современные ускорители могут создавать гамма-излучение с длиной волны около 10^{-16} м, т.е. кванты с энергией порядка 20 ГэВ. Гамма-излучение плавно переходит в характеристическое рентгеновское излучение ($\lambda > 2 \cdot 10^{-10}$ м), открытое в 1895 г. В.К. Рентгеном (W. K. Roentgen). Энергия гамма-квантов превосходит энергию химической связи E_b и энергию ионизации внешних оболочек атомов (~ 10 эВ). На практике наибольший интерес вызывают гамма-кванты с энергиями от десятков кэВ до сотен МэВ.

При прохождении пучка гамма-квантов через вещество происходит два процесса: **поглощение** и **рассеяние** гамма-квантов. Это приводит к ослаблению пучка квантов, не испытавших взаимодействия, по экспоненциальному закону, подобному закону Ламберта для оптического диапазона:

$$N_\gamma(d) = N_\gamma(0) \cdot \exp(-\mu d), \quad (1)$$

где μ – коэффициент ослабления, зависящий от энергии квантов и характеристик поглощающего вещества, d – толщина слоя вещества. В зависимости от характера расчетов, толщина поглощающего слоя может иметь размерность длины (μ входит как $[\text{длина}]^{-1}$) или размерность массы/площадь (μ входит как $[\text{площадь/масса}]^{-1}$). Взаимодействие гамма-квантов с электронами и ядрами можно рассматривать как индивидуальные взаимодействия между квантом и частицей. Возможность такого подхода обусловлена тем, что эффективный радиус взаимодействия гамма-кванта с точечным зарядом соизмерим с т.н. *комптоновской длиной волны электрона* $\Lambda_e = h/(m \cdot c) = 2,426 \cdot 10^{-12}$ м, которая значительно меньше средних расстояний между частицами вещества (10^{-10} м). Процессы взаимодействия гамма-квантов с электронами вещества являются, как правило, преобладающими (исключением может служить *эффект Мессбауэра* [7]).

Процесс **поглощения** гамма-квантов включает в себя два механизма, *фотоэффект* и *образование электрон-позитронной пары*, при которых гамма-кванты полностью теряют энергию, т.е. «исчезают». Вероятность, например, фотоэффекта сильно зависит от энергии гамма-кванта E_γ и атомного номера Z . Процесс **рассеяния** включает в себя три основных механизма: *комптоновское* рассеяние (эффект Комптона), *томсоновское* рассеяние и *рэлеевское* рассеяние. В случае томсоновского и рэлеевского механизмов рассеяния длина электромагнитной волны не меняется, т.е. энергия гамма-квантов остается неизменной в процессе взаимодействия с веществом. Подобное рассеяние называется *упругим*. В случае комптоновского рассеяния, напротив, длина волны претерпевает изменение, и

происходит частичная потеря энергии гамма-квантов (*неупругое рассеяние*). В отличие от процесса поглощения гамма-кванты при комптоновском рассеянии не исчезают. Вероятность эффекта Комптона слабо зависит от E_γ и Z .

Таким образом, определяющую роль в потерях энергии при взаимодействии гамма-излучения с веществом играют три механизма: фотоэффект, комптоновское рассеяние и образование пары электрон-позитрон. Более подробное описание механизмов взаимодействия можно найти в работах [1-5].

3. Эффект Комптона в приближении Комптона-Дебая

Как было упомянуто выше, с позиции классической электродинамики рассеяние с изменением частоты невозможно, т.е. эффект Комптона существовать не должен. Элементарная теория эффекта была дана А. Комптоном и независимо от него П. Дебаем (P. Debye) на основе представления о том, что гамма- и рентгеновское излучение состоит из частиц – фотонов (гамма-квантов). С точки зрения классического подхода, гамма-излучение можно рассматривать как плоскую волну с частотой ω , волновым вектором k и интенсивностью I . С другой стороны, для объяснения рассеяния, сопровождающегося потерей энергии излучения, Комптоном и Дебаем было предположено, что фотон (гамма-квант) обладает как энергией $E_\gamma = \hbar \cdot \omega$ ($\omega = 2\pi c/\lambda$, здесь c – скорость света, λ – длина волны), так и импульсом $p = \hbar \cdot k$ ($k = 2\pi/\lambda$), а также интенсивностью I , означающей сумму энергий фотонов, пересекающих в единицу времени единичную площадку, перпендикулярную к импульсу фотона $\hbar \cdot k$. Данный подход учитывает квантовую природу электромагнитного излучения (корпускулярно-волновой дуализм).

Далее, Комптон в качестве модели рассмотрел упругое рассеяние фотона на свободном покоящемся электроне, что на практике является хорошим приближением для рассеяния фотонов гамма- и рентгеновских лучей на слабосвязанных (квазисвободных) атомных электронах легких атомов, где $E_\gamma \gg E_b$, E_b – энергия связи электрона в атоме. Согласно этой модели, при рассеянии фотон передает электрону часть энергии и импульса, что в соответствии с вышеуказанными формулами эквивалентно изменению частоты (или длины волны) рассеиваемого излучения (рис. 1).

Основываясь на перечисленных предположениях, эффект Комптона можно качественно представить следующим образом. В соответствии с законами сохранения энергии и импульса, слабо связанный с атомом электрон может получить только часть энергии фотона (гамма-кванта), и фотон не исчезает в комптоновском взаимодействии. В этом взаимодействии могут участвовать электроны с внешних электронных оболочек, которые наименее связаны с рассеивающим атомом. В процессе взаимодействия

электрон становится свободной частицей с кинетической энергией, равной разности энергии, потерянной фотоном, и энергией связи электрона. Поскольку энергия связи электрона очень мала по сравнению с энергией фотона (гамма-кванта), кинетическая энергия электрона очень близка к энергии, потерянной фотоном (гамма-квантом). Место взаимодействия покидают две частицы (рис. 1): освобожденный электрон и рассеянный фотон (гамма-квант).

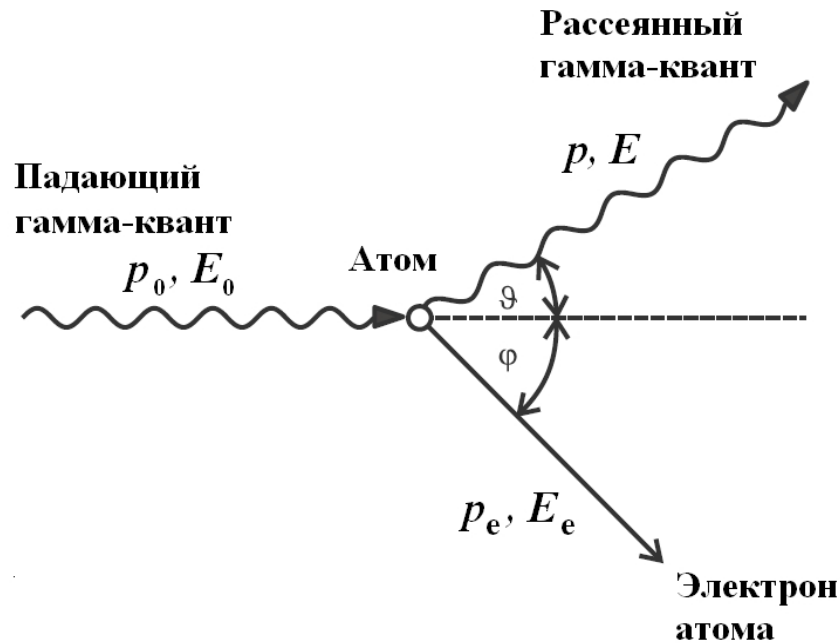


Рис. 1. Схема комптоновского рассеяния

Исходя из вышеописанных соображений, становится возможным произвести математическое описание эффекта Комптона с учетом релятивистского приближения. Рассмотрим упругое столкновение двух частиц – налетающего фотона (гамма-кванта), обладающего энергией $E_0 = \hbar \cdot \omega_0$ и импульсом $p_0 = \hbar \cdot \omega_0 / c$, с покоящимся электроном, энергия покоя которого равна $E_{e0} = m \cdot c^2 = 511$ кэВ (рис. 1). Фотон, столкнувшись с электроном, изменяет направление движения, т.е. рассеивается. Импульс фотона после рассеяния становится равным $p = \hbar \cdot \omega / c$, а его энергия $E = \hbar \cdot \omega < E_0$. Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны. Полная энергия электрона после столкновения, в соответствии с релятивистской формулой, становится равной:

$$E_e = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4}, \quad (2)$$

где p_e – приобретенный импульс электрона. Закон сохранения энергии записывается в виде:

$$E_0 + E_{e0} = E + E_e. \quad (3)$$

Выражение (3) можно переписать в следующем виде:

$$\hbar\omega_0 + mc^2 = \hbar\omega + \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4} . \quad (4)$$

Закон сохранения импульсов в векторной форме записывается следующим образом:

$$\bar{p}_0 = \bar{p} + \bar{p}_e , \quad (5)$$

который может быть переписан в скалярной форме, принимая во внимание диаграмму (рис. 1) и теорему косинусов, в виде:

$$p_e^2 = \left[\frac{\hbar\omega_0}{c} \right]^2 + \left[\frac{\hbar\omega}{c} \right]^2 - 2 \left(\frac{\hbar}{c} \right)^2 \omega_0 \omega \cos \vartheta . \quad (6)$$

Из соотношений (4) и (6), выражающих законы сохранения энергии и импульса, после преобразований и исключения импульса электрона p_e можно получить следующее соотношение:

$$(\omega_0 - \omega) \cdot mc^2 = (1 - \cos \vartheta) \cdot \hbar\omega_0 \omega . \quad (7)$$

Полученное соотношение может быть переписано в более удобной и распространенной форме, именуемой формулой Комптона для сдвига длины волны:

$$\Delta\lambda \equiv \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc} (1 - \cos \vartheta) = 2 \frac{h}{mc} \sin^2 \left(\frac{\vartheta}{2} \right) , \quad (8)$$

где $\Delta\lambda$ – сдвиг длины волны при рассеянии, $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$ и $\lambda = 2\pi c/\omega$ – длины волн до и после рассеяния, $h = \hbar/2\pi$. Параметр $h/(m \cdot c) \equiv \Lambda_e = 2,426 \cdot 10^{-12}$ м, как было упомянуто выше, называется *комптоновской длиной волны*. Формула (8) проста и показывает, что сдвиг длины волны *не зависит от свойств рассеивающего вещества*. Из формулы (8) следует, что сдвиг длины волны $\Delta\lambda$ не зависит от величины длины волны и определяется только лишь углом рассеяния фотонов ϑ , например: $\Delta\lambda = 0$ при $\vartheta = 0^\circ$ (нет рассеяния), $\Delta\lambda = \Lambda_e$ при $\vartheta = 90^\circ$ (сдвиг равен комптоновской длине волны), $\Delta\lambda = 2 \cdot \Lambda_e$ при $\vartheta = 180^\circ$ (максимальный сдвиг при рассеянии назад).

Подобный математический подход в расчетах позволяет определить и величину энергии рассеянного фотона (гамма-кванта) в зависимости от угла рассеяния, а именно:

$$E(\vartheta) = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{mc^2} \cdot (1 - \cos \vartheta)} , \quad (9)$$

откуда видно, что энергия рассеянного фотона (гамма-кванта) $E(\vartheta)$ изменяется в пределах от минимального значения $E = \hbar\omega_0 \cdot (1 + 2\hbar\omega_0/(m \cdot c^2))^{-1}$ при $\vartheta = 180^\circ$ до максимального значения $E_0 \equiv \hbar\omega_0$ при $\vartheta = 0^\circ$. Аналогичное

соотношение можно получить и для зависимости энергии электронов от угла φ (рис. 1).

Связь углов вылета рассеянного фотона ϑ и электрона отдачи φ (рис. 1) также можно найти из закона сохранения импульса:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} \left(1 + \frac{\hbar \omega_0}{mc^2} \right)^{-1}, \quad (10)$$

откуда следует взаимосвязь углов рассеяния фотона и вылета электрона: изменение угла рассеяния фотона в диапазоне $0 \leq \vartheta \leq 180^\circ$ соответствует изменению угла вылета электрона отдачи в диапазоне $90 \geq \varphi \geq 0^\circ$. Другими словами, электроны вылетают в переднюю полусферу («вперед»), причем электроны с наибольшей энергией летят в направлении падающего фотона. Таким образом, для эффекта Комптона характерна острая направленность рассеянного излучения по направлению первичного (падающего) фотона, при этом угловая асимметрия увеличивается с увеличением энергии фотонов (рис. 2).

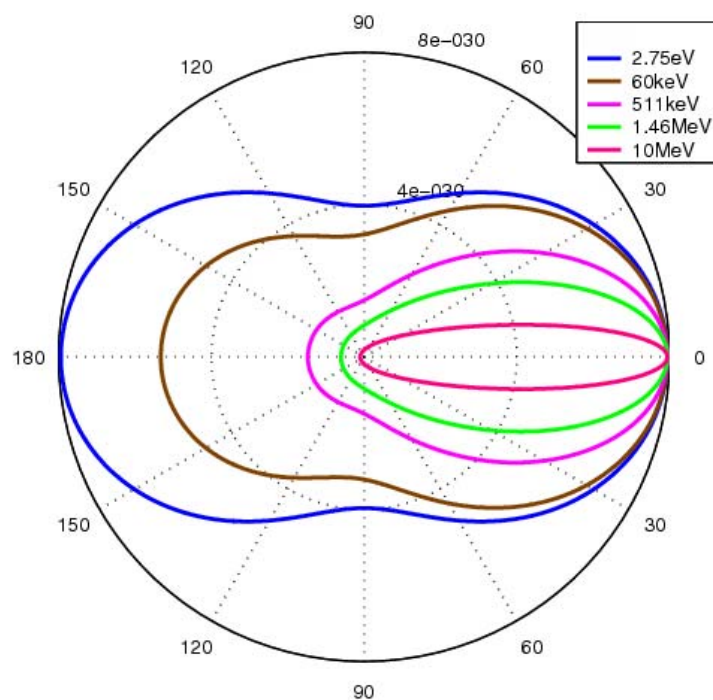


Рис. 2. Угловая зависимость эффекта Комптона. Синим цветом показана угловая зависимость сечения (вероятности) рассеяния в случае малых энергии падающих фотонов, т.е. в предельном случае томсоновского рассеяния. При повышении энергии падающих фотонов томсоновское рассеяние переходит в комптоновское рассеяние, и сечение приобретает резкую угловую зависимость.

Описанный выше теоретический расчет, основанный на квантовых представлениях, как показал опыт, соответствует экспериментальным результатам по комптоновскому рассеянию. Действительно, формулы Комптона (8) и (9) основаны только на кинематических соображениях, они оказываются справедливыми и в точной теории.

Заметим здесь, что комптоновское рассеяние происходит не только на электронах, но также и на других заряженных частицах, например, на протоне и ядрах. Однако вследствие больших масс протона и ядер (по сравнению с массой электрона) эффект слабо проявляется и заметен лишь при очень высоких энергиях гамма-квантов.

4. Взаимосвязь эффекта Комптона с другими механизмами рассеяния

Из соотношения (8) следует важное следствие. Относительное изменение длины волны $\Delta\lambda/\lambda_0$ велико (эквивалентно условию $\hbar\omega_0/(m\cdot c^2) \geq 1$) только для коротких длин волн, когда $\lambda_0 < \Lambda_e$, что соответствует диапазону гамма- и рентгеновских длин волн. В пределе малых частот (больших длин волн), комптоновское рассеяние переходит в *томсоновское рассеяние на свободных электронах*, известное из классической электродинамики. Согласно классической волновой теории, свободный электрон под действием периодического поля электромагнитной волны совершает вынужденные колебания на частоте волны и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты. Действительно, при томсоновском рассеянии изменение длины волны $\Delta\lambda/\lambda_0$ столь мало, что лежит за пределами технических возможностей эксперимента (ненаблюдаемо), т.е. длина волны при рассеянии не меняется. Другими словами, томсоновское рассеяние можно рассматривать, как частный случай эффекта Комптона в пределе больших длин волн.

Кроме того, существует механизм рассеяния излучения *на связанных электронах* (в отличие от эффекта Комптона), называемый *рэлеевским рассеянием*. В частности, как показывает опыт, при комптоновском рассеянии, наряду со смещенной линией с длиной волны λ , в соответствии с формулой Комптона наблюдается и несмещенная линия с первоначальной длиной волны λ_0 с сечением, пропорциональным λ_0^{-4} (зависимость установлена Дж.У. Рэлеем (J.W. Rayleigh) в 1871 г.). Это объясняется взаимодействием части фотонов с электронами, сильно связанными с атомами (например, из внутренних оболочек). В этом случае фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом. Из-за большой массы атома по сравнению с массой электрона атому передается лишь ничтожная часть энергии фотона, поэтому длина волны λ рассеянного излучения не отличается от длины волны λ_0 падающего излучения. Можно говорить о том, что рэлеевское рассеяние есть комптоновское рассеяние в пределе сильно связанных с атомом электронов, при котором изменение длины волны не проявляется. По схожей причине эффект Комптона не наблюдается (нет

изменения длины волны) при рассеянии видимого света, ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов излучения. Действительно, энергия фотонов оптического диапазона сравнима с энергией связи электронов с атомами, и фотоны взаимодействуют со связанными электронами, т.е. будет наблюдаться релеевское рассеяние.

Интересно, что в спектре рассеянного излучения часто наблюдаются фотоны с длинами волн, меньшими длины волны падающего излучения, а не большими, как в случае обычного эффекта Комптона. Такое излучение является результатом двух актов комптоновского рассеяния: прямого и обратного. Вначале фотон длины волны λ_0 рассеивается на покоящемся электроне, порождая рассеянный фотон с длиной волны λ в соответствии с формулой Комптона. Затем же второй падающий фотон с той же длиной волны λ_0 рассеивается на электроне отдачи, который движется с существенной скоростью, сопоставимой со скоростью света. Такой эффект называется *обратным комптоновским рассеянием* и может порождать фотоны с меньшей длиной волны. Обратным этот эффект называется потому, что в данном случае «отдачу» получает именно фотон, а не электрон. Отметим, что обратный эффект Комптона является главным механизмом потерь энергии электронами, движущимися в магнитном поле космических радиоисточников, и является причиной возникновения изотропного рентгеновского космического излучения с энергией порядка 100 кэВ.

Среди других механизмов рассеяния, родственных эффекту Комптона, можно выделить еще два. Так называемый *двойной эффект Комптона* наблюдается в случае излучения не одного фотона после взаимодействия с квазисвязанным электроном (как в случае обычного эффекта Комптона), а сразу двух фотонов. Это явление было предсказано В. Гайтлером (W. Heitler) и Л. Нордхеймом (L. Nordheim) в 1934 г. Учет двойного эффекта Комптона бывает немаловажным для интерпретации данных по обычному эффекту Комптона. Так называемый *нелинейный эффект Комптона* происходит во внешнем поле интенсивной электромагнитной волны. В этом случае, при определенных условиях, может происходить как поглощение из внешнего поля, так и испускание электроном большого числа фотонов. Подобный процесс является сложной функцией внешнего электрического поля и наблюдается при очень больших напряженностях электрического поля, что достижимо, например, на поверхности сверхплотных звезд.

5. Сечение эффекта Комптона

Сформулированная Комптоном теория эффекта не позволяет определить все характеристики комптоновского рассеяния, например, интенсивность, дифференциальное и интегральное сечения (вероятности) рассеяния фотонов на электронах.

Сечение томсоновского рассеяния как предельного случая эффекта Комптона для больших длин волн (соблюдается условие $\hbar\omega_0/(m\cdot c^2) \ll 1$) определяется классической электродинамикой следующим образом (формула Томсона):

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \cdot r_e^2 = 0.665 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2, \quad (11)$$

где $r_e = e^2/(mc^2) = 2,82 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ – так называемый *классический радиус электрона*. Однако, в случае коротких длин волн, где условие $\hbar\omega_0/(m\cdot c^2) \ll 1$ не соблюдается, формула Томсона не справедлива. Приближение Комптона-Дебая (Раздел 3) также не может помочь в вычислении сечения рассеяния. В этом случае необходимо пользоваться формулой Кляйна-Нишины-Тамма (Klein-Nishina-Tamm formula), которую дает квантовая электродинамика (соотношение независимо и разными способами получено О. Кляйном, Й. Нишиной в 1928 г. и Е. М. Таммом в 1930 г.). Дифференциальное эффективное сечение эффекта Комптона $d\sigma_K/d\Omega$ имеет следующий вид:

$$\frac{d\sigma_K}{d\Omega} = \frac{1}{2} \cdot r_e^2 \left(\frac{\hbar\omega}{\hbar\omega_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{\hbar\omega_0}{\hbar\omega} + \frac{\hbar\omega}{\hbar\omega_0} - \sin^2 \vartheta \right), \quad (12)$$

где фотон рассеивается под углом ϑ в телесный угол $d\Omega$. Полное эффективное сечение эффекта Комптона можно получить, проинтегрировав $d\sigma_K/d\Omega$ по всем углам ϑ [3]. Общий вид полного сечения описывается достаточно сложной формулой, но может быть выражен следующим образом:

$$\sigma_K = \sigma_T \cdot \left(1 - f\left(\frac{\hbar\omega_0}{mc^2} \right) \right), \quad (13)$$

где σ_T – сечение томсоновского рассеяния, дающееся формулой (11), $f(\hbar\omega_0/(m\cdot c^2))$ – некоторая функция, меньшая единицы и возрастающая с увеличением энергии падающего фотона $\hbar\omega_0$. Из приведенного соотношения следует, что при малых энергиях падающих фотонов ($\hbar\omega_0/(m\cdot c^2) \ll 1$) полное сечение эффекта Комптона сводится к сечению томсоновского рассеяния. В пределе больших энергий падающего фотона, полное сечение эффекта Комптона на *одном слабосвязанном электро*не (выражение (13)) может быть переписано в виде:

$$\sigma_K = \pi \cdot r_e^2 \cdot \frac{mc^2}{\hbar\omega_0} \left(\ln\left(\frac{\hbar\omega_0}{mc^2} \right) + \frac{1}{2} \right). \quad (14)$$

При энергиях падающих фотонов $E_0 \equiv \hbar\omega_0$, существенно превышающих энергию связи электрона из *K-оболочки* атома, полное сечение эффекта Комптона в расчете на *один атом* можно считать пропорциональным числу

электронов, т.е. заряду Z ядра для нейтральных атомов (правая часть выражения (14) умножается на число Z).

Таким образом, полное эффективное сечение эффекта Комптона при больших энергиях падающих фотонов в расчете на один атом прямо пропорционально отношению Z/E_0 . С понижением энергии падающих фотонов, полное сечение эффекта Комптона на слабосвязанном электроне увеличивается и в пределе малых энергий (малых частот) стремится к томсоновскому сечению (11).

6. Взаимосвязь коэффициента ослабления и сечения эффекта Комптона

На практике выделить эффект Комптона среди других видов взаимодействия излучения с веществом (Раздел 2) представляется сложным, поэтому для расчетов используют коэффициент ослабления μ , связанный с сечением поглощения и рассеяния (в том числе, с сечением эффекта Комптона). При расчетах ослабления интенсивности (формула (1)) узкого пучка фотонов (гамма-квантов) предполагается, что любой вид взаимодействия приводит к удалению кванта из пучка, и коэффициент ослабления равен сумме парциальных коэффициентов ослабления, а именно:

$$\mu = \mu_{photoeffect} + \mu_{compton} + \mu_{pair}, \quad (15)$$

где $\mu_{photoeffect}$, $\mu_{compton}$, μ_{pair} – коэффициенты, соответствующие фотоэффекту, комптоновскому рассеянию и образованию пары электрон-позитрон.

На рис. 3 представлены графики зависимости μ (выражение (15)) для веществ с различными значениями Z (13, 29, 50 и 82) и графики $\mu_{photoeffect}$, $\mu_{compton}$, μ_{pair} для свинца ($Z = 82$). Из рис. 3 следует, например, что при энергиях падающих фотонов (гамма-квантов) в интервале 1-10 МэВ эффект Комптона дает основной вклад в ослаблении интенсивности излучения в свинце.

Для вещества, содержащего атомы одного элемента, все три коэффициента в выражении (15) будут равными $\mu_i = \sigma_i \cdot n$, где σ_i – эффективное сечение взаимодействия фотона с атомами вещества, n – число атомов в единице объема вещества (если μ_i – линейный коэффициент ослабления) или в единице массы (при массовом коэффициенте ослабления). Для расчетов величины энергии, переданной пучком гамма-квантов поглощающей среде, необходимо также учитывать, что вклад каждого из видов взаимодействия различен: при фотоэффекте почти вся энергия кванта передается фотоэлектроном атомам среды; при комптоновском рассеянии значительная часть энергии уносится рассеянным квантом в соседние области среды или за ее пределы, часть рассеянных квантов испытывает вторичное рассеяние или поглощение; в процессах, сопровождающих рождение электронно-позитронных пар, часть энергии переносится аннигиляционными гамма-квантами.

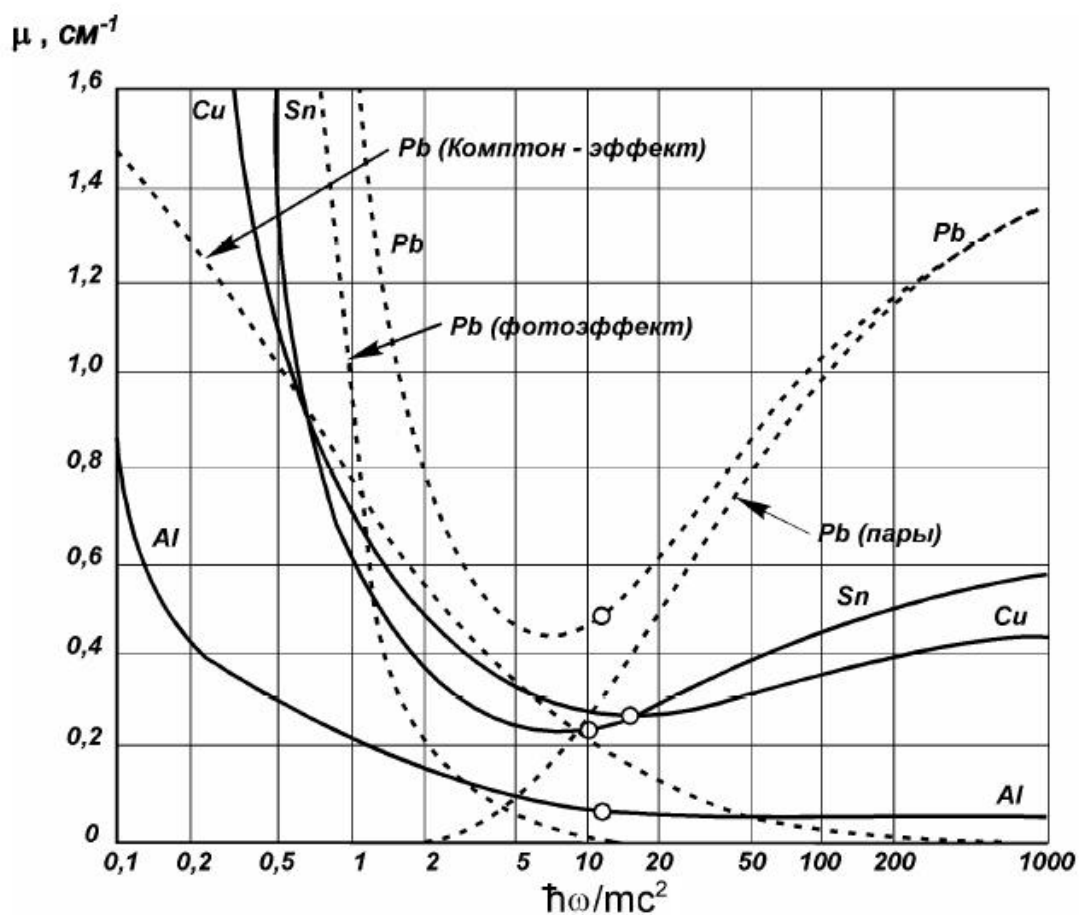


Рис. 3. Коэффициент поглощения гамма-излучения μ в зависимости от энергии фотона в единицах $\hbar\omega/(mc^2)$. Для свинца (Pb) приведено также поведение составляющих, обусловленных фотоэффектом, комптоновским рассеянием и образованием пары электрон-позитрон.

7. Ход выполнения лабораторной работы

Практическая часть работы направлена на изучение эффекта Комптона с использованием различных рассеивающих материалов и сцинтилляционного детектора гамма-квантов. В качестве первоначального источника радиоактивного излучения служит препарат цезия (изотоп ^{137}Cs). Общий внешний вид лабораторной работы представлен на рис. 4.

Внимание: До включения всех приборов изучите описанный ниже ход выполнения лабораторной работы до конца. В случае возникновения вопросов, обратитесь к лаборанту.

Внимание. Самостоятельное вскрытие или другие манипуляции с источником радиоактивного излучения запрещены и являются нарушением законодательства РФ в области радиационной безопасности. Доступ к радиоактивному источнику имеет только персонал лаборатории, относящийся к группе «А».

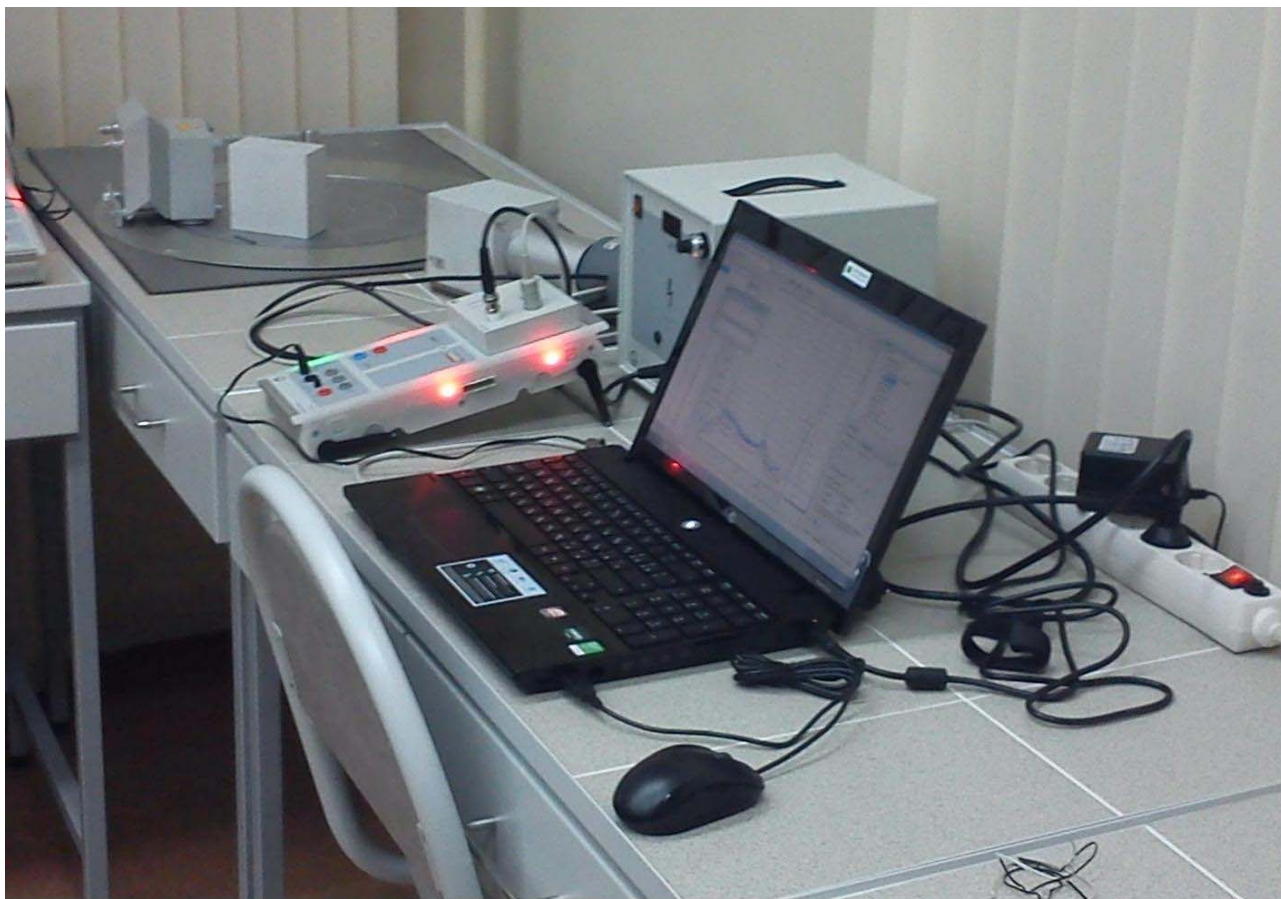


Рис. 4. Внешний вид Лабораторной работы по изучению эффекта Комптона

1. Проверить состав и количество устройств, необходимых для проведения лабораторной работы. На рис. 5а и рис. 5б представлены различные компоненты и узлы лабораторной установки. На рабочем столе нанесена сетка углов (1). Радиоактивный источник ^{137}Cs ,

испускающий поток гамма-квантов, находится в свинцовой защите (2) и располагается на сетке углов. Излучение гамма-квантов направляется в центр сетки углов, где находится стержень (3) на котором происходит рассеяние гамма-квантов. Внутри сетки углов размещен дополнительный свинцовый кирпич (4), необходимый для перекрытия прямого пучка гамма-квантов из источника в детектор для некоторых экспериментов. Сцинтилляционный детектор установлен в свинцовую защиту (5), которая позволяет регистрировать гамма-кванты, рассеянные только на стержне. Возможность изменять положение детектора по сетке углов (точное положение направления контролируется направляющим тонким стержнем, прикрепленным к свинцовой защите детектора) позволяет снять спектры излучения под разными углами. Сцинтилляционный детектор подключен к высоковольтному блоку (6). Узел сенсора CASSY2 (7) обрабатывает сигналы, поступающие с сцинтилляционного детектора, которые подаются на компьютер (8), предназначенный для запуска измерений, записи и обработки полученных спектров.

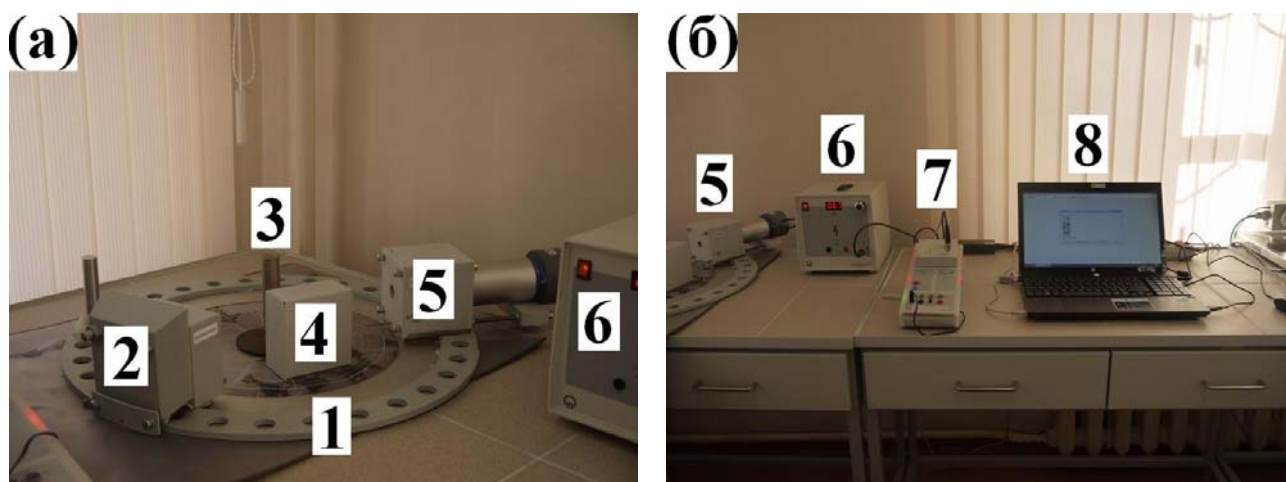


Рис. 5. Изображения различных узлов и компонент Лабораторной установки по изучению эффекта Комптона, сделанные с различных позиций (рисунки а и б).

2. Включить в сеть ноутбук.
3. Включить блок Sensor CASSY2 и убедиться, что индикатор USB горит зеленым цветом.
4. Включить высоковольтный блок и убедиться, что высокое напряжение установлено равным 650 вольт.
5. Запустить на ноутбуке программное обеспечение (ПО) CASSY Lab 2.

6. Выбрать в окне ПО узел «MCA box» и кликнуть по нему, в результате чего должен загореться зеленый индикатор справа на узле Sensor CASSY 2 (возле MCA box).
7. Выбрать в окне ПО клавишу Close и кликнуть по ней.
8. Установить детектор на линии прямого пучка радиоактивного источника (0 градусов на сетке углов), при этом стержень с рассеивающим материалом (3) должен быть убран с позиции центра сетки углов.
9. Запустить измерение, нажав клавишу F9 на ноутбуке, либо выбрав в окне ПО меню measurement и нажать клавишу start/stop measurement.
10. Выполнять измерения (калибровка) в течение 1-5 минут.
11. Остановить измерение так же, как в пункте 9 через меню measurement (start/stop measurement).
12. Нажатием правой кнопки мыши вызвать меню действий над спектром, далее выбрать Fit Function – Gaussians with equal widths, затем зажав левую кнопку мыши, выделить меню ^{137}Cs (662 кэВ).
13. Изучить (прочитать) результаты обработки в строке внизу окна Cassy Lab 2 (обратить внимание на значение μ), определить ширину линии.
14. В меню ПО Settings произвести калибровку энергетической шкалы спектра выполнив следующие действия:
 - выбрать в дереве Settings пункт Cassy – InputA₁ (MCA box, 524058) – Channel n_a,
 - в Group box с именем Energy Calibration установить галочку «Global for all ...» и ввести две калибровочные точки: первая – канал 0, энергия 0, вторая – канал μ (ввести μ), энергия 662 кэВ (можно выбрать из выпадающего меню линию 661,66 кэВ изотопа ^{137}Cs).
 - выбрать в дереве Setting пункт CASSY – Display – Standard – N_a(n_a), после чего выбрать обозначение E_a по оси X вместо n_a. Спектр должен появиться в энергетической шкале, на этом калибровка завершена.
15. Сохранить калибровочный спектр в формате *.labx.
16. Поставить стержень (3) (рис. 5a), на котором будут рассеиваться гамма-кванты, в центр сетки углов.
17. Установить детектор в положение 10 градусов по сетке углов.
18. Установить дополнительный свинцовый кирпич (4) (рис. 5a) так, чтобы в детектор не попадал прямой пучок от радиоактивного источника.

19. Выполнить измерения по алгоритму, описанному в пунктах 9-11 данного хода работы, и сохранить полученный спектр (в названии сохраняемого файла можно указать величину угла).
20. Повторить измерения по алгоритму, описанному в пунктах 17-19, для углов от 20 до 120 градусов с шагом 10 градусов.
21. Определить величину энергии $E(\vartheta)_{\text{экс}}$ поглощенных детектором гамма-квантов, основываясь на экспериментальных спектрах, полученных при выполнении пунктов 16-20. При анализе этих спектров используйте Раздел 8.
22. Определить величину энергии $E(\vartheta)_{\text{расчет}}$ поглощенных сцинтилляционным детектором гамма-квантов, основываясь на формуле Комптона (9) Раздела 3. При расчетах используйте данные из Раздела 8.
23. Полученные экспериментальные и теоретические данные занесите в сводную таблицу:

ϑ , градусы	$E(\vartheta)_{\text{экс}}$, кэВ	$E(\vartheta)_{\text{расчет}}$, кэВ
0		
10		
20		
....		
120		

24. По приведенным в таблице данным постройте графики зависимости $E(\vartheta)_{\text{экс}}$ и $E(\vartheta)_{\text{расчет}}$ от угла ϑ .
25. Сопоставьте экспериментальные и теоретические зависимости, сделайте выводы о совпадении/несовпадении данных зависимостей, дайте им интерпретацию.
26. Оформите письменный отчет с указанием постановки задачи, кратким описанием выполнения работы, сделанными выводами.
27. *Внимание:* в письменных отчетах необходимо указать все экспериментальные значения посредством таблиц и графиков, таблицы и графики должны содержать все необходимые пояснения (подписи к осям, единицы измерений и т.д.). Письменные отчеты, составленные на нескольких страницах, должны быть надежно скреплены скобами (не скрепками). Письменные отчеты должны также содержать информацию об исполнителе (ФИО, номер группы, дата выполнения и сдачи работы).

8. Сопроводительный материал.

Для эксплуатации радиоактивного источника с изотопом цезия ^{137}Cs необходимо знать его основные характеристики. На рис. 6 показана схема распада изотопа ^{137}Cs .

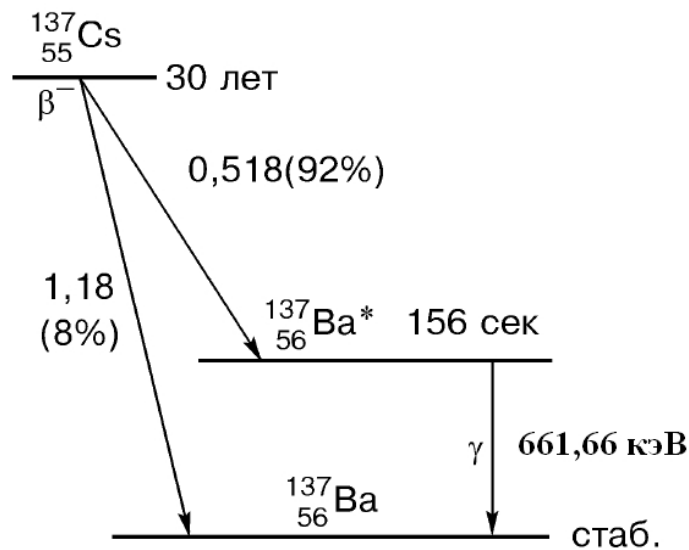


Рис. 6. Схема распада радиоактивного изотопа цезия ^{137}Cs [8].

Видно, что распад ^{137}Cs сопровождается одновременно испусканием бета-частиц и гамма-квантов. Точная величина энергии испускаемых гамма-квантов составляет 661,66 кэВ.

На рис. 7 показан типичный спектр гамма-квантов моноэнергетического источника гамма-излучения радиоактивного изотопа цезия ^{137}Cs .

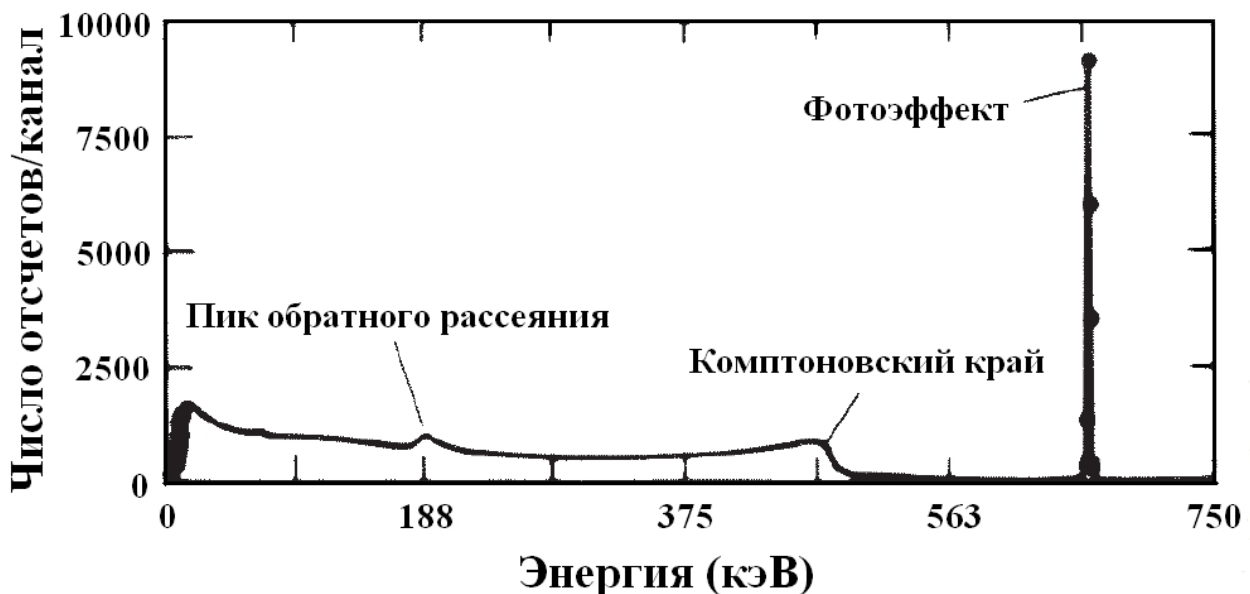


Рис. 7. Типичный спектр высокого разрешения изотопа ^{137}Cs , на котором показаны пик полного поглощения (фотоэффект), комптоновский край и пик обратного рассеяния для гамма-кванта с энергией 662 кэВ.

Спектр, подобный рис. 7, должен наблюдаться и в случае регистрации сцинтилляционным детектором гамма-квантов, излучаемых изотопом ^{137}Cs и рассеянных материалом стержня (3) (Раздел 7, рис. 5a).

Пик полного поглощения, рис. 7, при 662 кэВ образован взаимодействиями, в которых падающий гамма-квант теряет всю свою энергию в детекторе, либо в результате однократного фотоэффекта (поглощение кванта материалом детектора), либо в результате серии комптоновских рассеяний (в материале детектора), за которыми следует фотоэффект. Именно по этому пику энергия падающих гамма-квантов может быть определена с наибольшей точностью. Спектр зарегистрированных событий, находящихся ниже пика фотоэффекта, обусловлен событиями комптоновского рассеяния, в которых гамма-квант теряет в детекторе только часть своей энергии. Ступенька в области 470 кэВ, называемая комптоновским краем, соответствует максимальной энергии, которая может быть передана электрону материала детектора гамма-квантом с энергией 662 кэВ в результате единичного акта комптоновского рассеяния. Небольшой пик в области 188 кэВ называется пиком обратного рассеяния. Пик образуется, когда гамма-квант претерпевает рассеяние на большой угол ($\approx 180^\circ$) в материале, окружающем детектор, и затем поглощается в детекторе. Сумма энергий пика обратного рассеяния и комптоновского края равна энергии падающего гамма-кванта.

Если энергия падающих гамма-квантов отлична от 662 кэВ, вид спектра на рис. 7 останется неизменным. Тем не менее, очевидно, некоторые изменения все же будут. Например, спектр будет «сжиматься» в область низких энергий в случае уменьшения энергии падающих гамма-квантов.

9. Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте определение эффекту Комптона (комптоновскому механизму рассеяния).
2. Каково значение эффекта Комптона в физике и ядерной технике?
3. Чем отличается эффект Комптона от фотоэффекта и явления образования пары электрон-позитрон?
4. Чем отличается эффект Комптона от томсоновского и релеевского механизмов рассеяния?
5. Выведите формулы Комптона для сдвига длины волны при рассеянии и зависимости энергии рассеиваемого излучения от угла рассеяния.
6. Какова угловая зависимость рассеиваемого фотона по отношению к направлению падающего фотона?
7. Для каких длин волн (частот) падающего излучения эффект Комптона проявляется наиболее ярким образом?
8. Почему в оптическом диапазоне длин волн эффект Комптона не наблюдаем?
9. Оцените сдвиг длины волны при комптоновском рассеянии для энергии падающих гамма-квантов 1 кэВ и 1 МэВ.
10. Перечислите механизмы рассеяния, родственные эффекту Комптона.
11. Укажите смысл понятия сечения рассеяния, и от чего оно зависит в случае эффекта Комптона.
12. Какова взаимосвязь между сечениями томсоновского и комптоновского механизмами рассеяния?
13. Укажите, какому закону подчиняется поведение пучка фотонов при его прохождении через вещество? В чем смысл коэффициента ослабления, и из каких составляющих он зависит? Какова взаимосвязь между коэффициентом ослабления и сечением комптоновского рассеяния?
14. Опишите схему распада радиоактивного изотопа ^{137}Cs .
15. Опишите и объясните типичный вид спектра гамма-квантов изотопа ^{137}Cs , регистрируемых сцинтилляционным детектором.

Литература

1. Капитонов, И.М. Введение в физику ядра и частиц [Текст]: учебное пособие / И.М. Капитонов // Москва: УРСС, 2002. – 383 с.
2. Колпаков, П.Е. Основы ядерной физики [Текст]: учебное пособие для пед. инс-тов / П.Е. Колпаков // Москва: Просвещение, 2001. – 401 с.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т.5. Атомная и ядерная физика. [Текст]: учебное пособие для вузов / Д.В. Сивухин // Москва: Физматлит МФТИ, 2002. – 784 с.
4. Reilly, D. Passive nondestructive assay of nuclear materials. Ch.2. Gamma-ray interactions with matter [Text] / D. Reilly, N. Enslinn, H. Smith, S. Kreiner // Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1991. – 700 p. (на англ. яз.)
5. Чистяков, В.А. Практикум по ядерной физике [Текст]: учебное пособие / В.А. Чистяков, Э.К. Садыков, Н.Г. Ивойлов, Е.Н. Дулов, М.М. Бикчантаев // Казань: Изд-во физ. фак-та Казанск. гос. ун-та, 2004. – 152 с.
6. Зарипова, Л.Д. Физические основы дозиметрии. Радиационная безопасность [Текст]: учебно-методическое пособие / Л.Д. Зарипова // Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. – 42 с.
7. Воронина, Е.В. Мёссбауэровская спектроскопия [Текст]: учебно-методическое пособие для студентов Института физики / Е.В. Воронина, А.В. Пятаев // Казань: Изд-во Казанск. фед. ун-та, 2013. – 31 с.
8. Шавинский, Б.М. Краткое введение в радиоиндикаторные методы анализа [Текст]: методические указания / Б.М. Шавинский // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 24 с.

**Выписка из протокола № 5 заседания кафедры физики твердого тела
от 19.11.2013г.**

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

зав. каф. д.ф.-м.н., проф. Тагиров Л.Р.; д.ф.-м.н., проф. Парфёнов В.В.; д.ф.-м.н., проф. Садыков Э.К.; д.ф.-м.н., проф. Петухов В.Ю.; д.ф.-м.н., доц. Воронина Е.В.; к.ф.-м.н., доц. Вагизов Ф.Г.; к.т.н., доц. Салахов А.М.; к.ф.-м.н., доц. Храмов А.С.; к.ф.-м.н., асс. Болтакова Н.В.; к.ф.-м.н. асс. Гайнов Р.Р.; к.ф.-м.н., асс. Дулов Е.Н.; асс. Пятаев А.В.; зав. лаб. Закиров Р.Х.; зав. лаб. Халабуда Ю.Э.; эл-ник Бикчантаев М.М.; к.ф.-м.н., с.н.с. Усеинов Н.Х.; асп. Петухов Д.

Слушали ассистента Гайнова Р.Р. о разработанном учебно-методическом пособии по комптоновскому рассеянию (эффекту Комптона). Данное пособие предназначено для студентов 3-го курса Института физики, обучающихся по специальностям и направлениям «Астрономия», «Астрономогеодезия», «Физика» и студентов 2-го курса Института физики очно-заочной (вечерней) формы обучения. После обсуждения было принято решение рекомендовать представленное пособие к публикации.

ПОСТАНОВИЛИ:

1. Рекомендовать учебно-методическое пособие «Эффект Комптона» (авторы Гайнов Р.Р., Дулов Е.Н., Бикчантаев М.М.) к публикации.

Секретарь

Болтакова Н.В.

Заведующий кафедрой ФТТ

Тагиров Л.Р.

РЕЦЕНЗИЯ
на учебно-методическое пособие
Гайнова Р.Р., Дулова Е.Н., Бикчантаева М.М.
«Эффект Комптона»

Рецензируемое учебно-методическое пособие «Эффект Комптона» разработано авторами в рамках общефизического лабораторного практикума к лекционным курсам «Ядерная физика», «Физика ядра и частиц» и «Атомная и ядерная физика», читаемых на третьем году обучения студентов.

Пособие начинается с обзорной вводной части, в которой даются физические основы комптоновского рассеяния (эффекта Комптона). Затем следует часть с описанием экспериментальной лабораторной установки, в которой показаны основные узлы и их назначение. Далее приводится описание порядка выполнения работы, даются рекомендации по анализу и представлению экспериментальных результатов.

В пособии последовательно изложен материал, необходимый для понимания и применения эффекта Комптона в решении практических задач. Подробно рассматриваются многие явления и эффекты, необходимые как для работы с оборудованием, так и для анализа результатов.

Практическая часть задания с использованием сцинтилляционного детектора даёт наглядное представление об Эффекте Комптона и физических процессах, происходящих при регистрации рассеянного гамма-излучения, содержит все необходимые элементы для получения навыков работы на экспериментальных установках, в том числе на современном спектроскопическом оборудовании.

Рецензируемое пособие актуально и представляет несомненный интерес для преподавателей и студентов, сталкивающихся со спектроскопией ионизирующих излучений в учебной работе.

Считаю, что учебно-методическое пособие Гайнова Р.Р., Дулова Е.Н., Бикчантаева М.М. «Эффект Комптона» может быть рекомендовано в качестве учебно-методического пособия для студентов.

С.н.с. КИББ КазНЦ РАН,
к.ф.-м.н. Манапов Р.А.



Манапов

Манапова Р.А. завершено

от действующего : Дав (Бикчантаева И.И.)