

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона. Американский физик А. Комптон (1892—1962), исследуя в 1923 г. рассеяние монохроматического рентгеновского излучения веществами с легкими атомами (парафин, бор), обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны λ наблюдается также излучение более длинных волн λ' . Опыты показали, что разность $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не зависит от длины волны падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только величиной угла рассеяния θ :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2(\theta/2), \quad (1)$$

где λ' — длина волны рассеянного излучения, λ_c — комптоновская длина волны.

(при рассеянии фотона на электроне $\lambda_c = 2,426$ пм).

Эффектом Комптона называется упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны. Этот эффект не укладывается в рамки волновой теории, согласно которой длина волны при рассеянии изменяться не должна: под действием периодического поля световой волны электрон колеблется с частотой поля и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты.

Объяснение эффекта Комптона дано на основе квантовых представлений о природе света. Если считать, как это делает квантовая теория, что излучение имеет корпускулярную природу, т. е. представляет собой поток фотонов, то **эффект Комптона — результат упругого столкновения рентгеновских или γ - фотонов со свободными электронами** вещества (для легких атомов электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их можно считать свободными). В процессе этого столкновения фотон передает электрону часть своих энергии и импульса в соответствии с законами их сохранения.

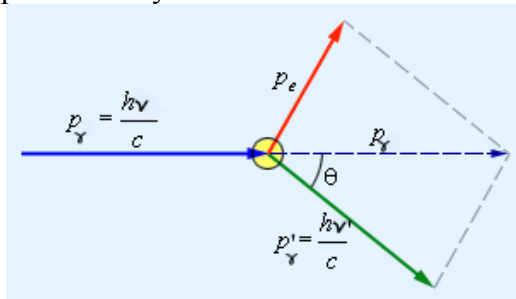


Рис. 1. Закон сохранения импульса при рассеянии фотона на свободном электроне

Рассмотрим упругое столкновение двух частиц (рис.1) — налетающего фотона, обладающего импульсом $p_\gamma = \frac{h\nu}{c}$ и энергией $E_\gamma = h\nu$, с покоящимся свободным электроном, энергия покоя которого $W_0 = m_0c^2$, где m_0 — масса покоя электрона. Фотон, столкнувшись с электроном, передает ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается). Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны рассеянного излучения. Пусть импульс и энергия рассеянного фотона равны

$$p'_\gamma = \frac{h\nu'}{c}, E'_\gamma = h\nu'. \quad (2)$$

Электрон, ранее покоившийся, приобретает импульс $p_e = m\nu$, энергию $W = mc^2$ и приходит в движение — испытывает отдачу. При каждом таком столкновении выполняются законы сохранения энергии и импульса.

$$W_0 + E_\gamma = W + E'_\gamma, \quad (3)$$

$$p_{\gamma} = p_{\gamma}' + p_e \quad (4)$$

Подставив в выражении (3) значения величин и представив (4) используя теорему косинусов, в соответствии с рис. 1, получим

$$m_0 c^2 + h\nu = mc^2 + h\nu', \quad (5)$$

$$(mv)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu\nu' \cos \theta. \quad (6)$$

Перепишем равенство (5) в виде

$$mc^2 = m_0 c^2 + h\nu - h\nu',$$

$$\text{и возведем его в квадрат} \quad m^2 c^4 = m_0^2 c^4 + h^2 \nu^2 + h^2 \nu'^2 - 2h^2 \nu \nu' + 2hm_0 c^2 (\nu - \nu') \quad (7)$$

Вычитая из равенства (7) равенство (6), умноженное на c^2 , получим

$$m^2 c^4 - m^2 \nu^2 c^2 = m_0^2 c^4 + h^2 \nu^2 + h^2 \nu'^2 - 2h^2 \nu \nu' + 2hm_0 c^2 (\nu - \nu') - h^2 \nu^2 - h^2 \nu'^2 + 2h^2 \nu \nu' \cos \theta \quad (8)$$

Масса электрона отдачи связана с его скоростью соотношением

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \nu^2 / c^2}}, \text{ или } m^2 (c^2 - \nu^2) = m_0^2 c^2. \quad (9)$$

Учитывая (9), на основании (8) запишем

$$m_0 c^2 (\nu - \nu') = h\nu' \nu (1 - \cos \theta). \quad (10)$$

Поскольку $\nu = \frac{c}{\lambda}$, $\nu' = \frac{c}{\lambda'}$, $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$, получим $m_0 c^2 \left(\frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda'}\right) = h \frac{c^2}{\lambda \lambda'} (1 - \cos \theta)$, или, окончательно

$$\Delta\lambda = (\lambda' - \lambda) = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

Выражение (11) есть не что иное, как полученная экспериментально Комптоном формула. Подстановка в нее значений h, m_0, c дает комптоновскую длину волны электрона $\lambda_C = 2,426$ пм.

Наличие в составе рассеянного излучения несмещенной линии (излучения первоначальной длины волны) можно объяснить следующим образом. При рассмотрении механизма рассеяния предполагалось, что фотон соударяется лишь со свободным электроном. Однако если электрон сильно связан с атомом, как это имеет место для внутренних электронов (особенно в тяжелых атомах), то фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом. Так как масса атома по сравнению с массой электрона очень велика, то атому передается лишь ничтожная часть энергии фотона. Поэтому в данном случае длина волны рассеянного излучения практически не будет отличаться от длины волны падающего излучения.

Из приведенных рассуждений следует также, что эффект Комптона не может наблюдаться в видимой области спектра, поскольку энергия фотона видимого света сравнима с энергией связи электрона с атомом, при этом даже внешний электрон нельзя считать свободным.

Эффект Комптона наблюдается не только на электронах, но и на других заряженных частицах, например протонах, однако из-за большой массы протона его отдача просматривается лишь при рассеянии фотонов очень высоких энергий. Как эффект Комптона, так и фотоэффект на основе квантовых представлений обусловлены взаимодействием фотонов с электронами. В первом случае фотон рассеивается, во втором — поглощается. Рассеяние происходит при взаимодействии фотона со свободным электроном, а фотоэффект — со связанными электронами. Можно показать, что при

столкновении фотона со свободным электроном не может произойти поглощения фотона, так как это находится в противоречии с законами сохранения импульса и энергии. Поэтому при взаимодействии фотонов со свободными электронами может наблюдаться только их рассеяние, т. е. эффект Комптона.

На рис. 2 показаны экспериментальные результаты по наблюдению комптоновского рассеяния на мишени из графита, имеющего электрон, слабо связанный с ядром атома. С увеличением угла θ все более отчетливо проявляется сигнал (правый на рисунке), связанный с комптоновским рассеянием.

Левый пик соответствует длине волны падающего фотона (в данном случае так называемая K_α - линия молибдена). Это те фотоны, которые без изменения рассеиваются на электронах внутренних оболочек. На первом графике комптоновское рассеяние отсутствует, $\theta=0^\circ$. На втором при $\theta=60^\circ$ появляется пик, связанный с комптоновским рассеянием, далее, с ростом угла рассеяния при $\theta=90^\circ$ пик сдвигается по горизонтальной оси пропорционально увеличению длины волны (согласно формуле), что соответствует его лучшей разрешимости.

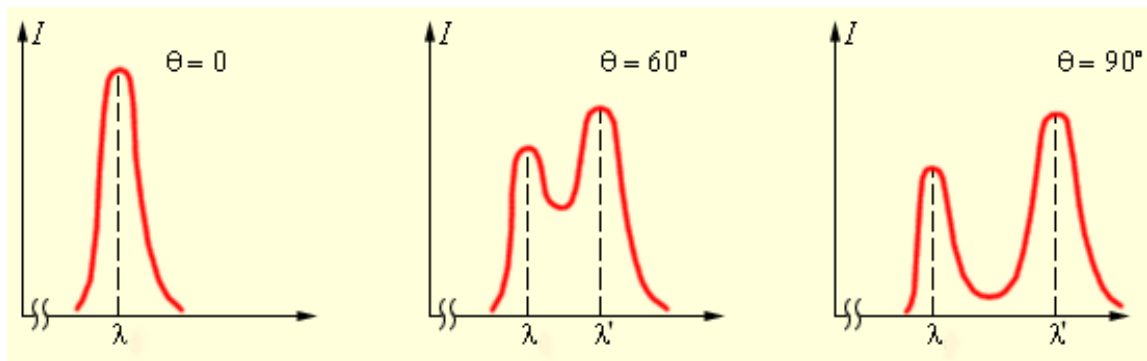


Рис.2

Очевидно, что для наблюдения эффекта необходимо выполнение двух условий

1. Длина волны рассеиваемого излучения должна быть сравнима с комптоновским сдвигом (у нас $\lambda=0,71 \text{ \AA}$, а $\Delta\lambda=0,02 \text{ \AA}$, $1 \text{ \AA}=10^{-10} \text{ м}$). Этому условию удовлетворяет излучение рентгеновского диапазона

2. Рассеяние должно происходить на электронах минимально связанных с ядрами атомов мишени, то есть на электронах, максимально удаленных от ядра атома. Для выполнения этого условия экспериментаторами выбирались характерные вещества-мишени.