

(напр., смесь паров  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ). Термодинамика многокомпонентных, многофазных систем была разработана Дж. У. Гиббсом (J. W. Gibbs) в 1902.

Лит. см. при ст. Термодинамика. Д. Н. Зубарев.

**КОМПТОНА ЭФФЕКТ** (комpton-эффект, комптоновское рассеяние) — рассеяние эл.-магн. волны на свободном электроне, сопровождающееся уменьшением частоты. Эффект наблюдается для больших частот рассеиваемого эл.-магн. излучения (в рентг. области и выше). Он проявился уже в первых опытах по рассеянию рентг. лучей на свободных электронах, но впервые с требуемой тщательностью был изучен А. Комптоном (A. Compton) в 1922—23. Исторически К. э. явился одним из гл. свидетельств в пользу корпускулярной природы эл.-магн. излучения (в частности, света). С точки зрения классич. электродинамики рассеяние с изменением частоты невозможно.

Элементарная теория эффекта была дана А. Комптоном и независимо от него П. Дебаем (P. Debye) на основе представления о том, что рентг. излучение состоит из *фотонов*. Для объяснения эффекта приходилось предположить, что фотон обладает как энергией  $\epsilon_\gamma = h\nu$ , так и импульсом  $p = (h/\lambda)n$  (здесь  $\nu$  и  $\lambda = c/\nu$  — частота и длина волны света,  $n$  — единичный вектор в направлении распространения волны).

Комптон рассмотрел упругое рассеяние фотона на свободном покоящемся электроне (что является хорошим приближением для рассеяния фотонов рентг. лучей на атомных электронах лёгких атомов). При рассеянии фотон передаёт электрону часть энергии и импульса, что соответствует уменьшению частоты (увеличению длины волны) рассеиваемого света. Из законов сохранения энергии и импульса он получил ф-лу для сдвига длины волны:

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

где  $\lambda$ ,  $\lambda'$  — длины волн до и после рассеяния,  $\theta$  — угол рассеяния,  $m_e$  — масса электрона. Параметр  $h/m_e c$  наз. *комптоновской длиной волны* электрона и равен  $2,4 \cdot 10^{-10}$  см. Из кинематики процесса легко также определить энергию и импульс электрона отдачи.

Поскольку ф-ла (\*) основана только на кинематич. соображениях, она оказывается справедливой и в точной теории. Из неё следует, что относит. изменение длины волны  $\Delta\lambda/\lambda$  велико только для коротких длин волн, когда  $\lambda < h/m_e c$ .

Данная Комптоном упрощённая теория эффекта не позволяет определить все характеристики комптоновского рассеяния, в частности зависимость интен-

Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для Комптона эффекта:  $e$ ,  $\gamma$  и  $e^*$ ,  $\gamma'$  — электрон и фотон соответственно в начальном и конечном состояниях;  $e^*$  — виртуальный электрон в промежуточном состоянии.

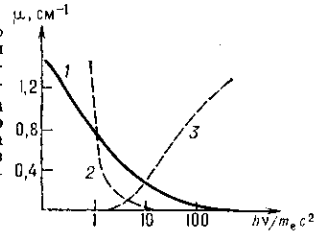


сивности рассеяния от  $\theta$  и  $\lambda$ . Точная релятивистская теория К. э. была сформулирована в рамках *квантовой электродинамики* (КЭД). Во втором порядке теории возмущений К. э. в КЭД описывается двумя *Фейнмана диаграммами*, изображёнными на рис. 1. Вычисление по этим диаграммам (с использованием *Дирака уравнения* для электрона) дифференц. сечения К. э. приводит к *Клейна — Нишины формуле*, хорошо согласующейся с опытом.

Для К. э. при высоких энергиях характерна острая направленность рассеянного излучения по направлению первичного фотона; с ростом энергии фотонов эта угл. асимметрия увеличивается. Полное эфф. сечение комптоновского рассеяния (полученное интегрированием по углам ф-лы Клейна — Нишины) падает с увеличением  $\epsilon_\gamma$  (рис. 2).

К. э. является одним из осн. механизмов, определяющих потери энергии при прохождении  $\gamma$ -излучения через вещество. Абс. сечение К. э., а также его соотношение с сечениями *фотоэффекта* и *рождения пар электрон-позитрон* в реальных веществах сильно зависят от ат. номера  $Z$ . На рис. 2 показано соотношение указанных процессов в свинце. В пределе нулевых частот полное сечение К. э. на отд. электроне переходит в сечение классич. (томсоновского) рассеяния  $\sigma_T = \frac{8}{3} \cdot \pi r_0^2$ , где  $r_0 = e^2/m_e c^2 = 2,8 \cdot 10^{-13}$  см — т. н. классич. радиус электрона. При этом  $\sigma_T = 6,65 \times 10^{-26}$  см<sup>2</sup>. Как видно из рис. 2, при энергиях  $\epsilon_\gamma$  в интервале 0,5—5 МэВ К. э. даёт осн. вклад в потери

Рис. 2. Зависимость полного сечения  $\sigma$  в свинце от энергии фотона в единицах энергии покоя электрона  $m_e c^2$  для Комптона эффекта (1), фотоэффекта (2), рождения пар  $e^+e^-$  (3); по оси ординат отложена величина линейного поглощения фотонов  $\mu = N\sigma$  ( $N$  — концентрация атомов вещества).



энергии фотонами в свинце (в воздухе соответствующий интервал составляет 0,1—20 МэВ).

Если электрон, на к-ром рассеивается фотон, не покоится, а является ультрарелятивистским с энергией  $K \gg \epsilon_\gamma$ , то при столкновении электрон торяет, а фотон приобретает энергию и длина волны света при столкновении уменьшается (частота увеличивается). Такое явление наз. *обратным комптонов-эффектом*. Если направления скоростей нач. фотонов распределены изотропно, то ср. энергия рассеянных фотонов  $\epsilon_{\gamma, \text{расс}}$  при обратном К. э. определяется соотношением

$$\epsilon_{\gamma, \text{расс}} = \frac{4}{3} \epsilon_\gamma \frac{K}{m_e c^2}.$$

Обратный К. э. является гл. механизмом потерь энергии электронами, движущимися в магн. поле космич. радиоисточников. Он является также причиной возникновения изотропного рентг. космич. излучения с энергией  $\epsilon_\gamma \approx 50$ —100 кэВ, представляющего собой фотоны отдачи при рассеянии релятивистских электронов на изотропном микроволновом космич. фоновом излучении.

В процессе рассеяния электрон может поглотить один, а излучить в конечном состоянии не один (как в случае обычного К. э.), а два фотона. Это явление наз. *двойным комптон-эффектом*. Оно было теоретически исследовано В. Гайтлером (W. Heitler) и Л. Нордхеймом (L. Nordheim) в 1934. Возможен также процесс *n*-кратного К. э., когда в конечном состоянии излучается *n* фотонов. Его сечение, вообще говоря, подавлено фактором  $(1/137)^{n-1}$ . Но в случае, когда излучаемые фотоны являются мягкими и непосредственно не регистрируются, такой процесс неограничен от обычного К. э. и имеет большое сечение. Поэтому учёт поправок от *n*-кратного К. э. важен для интерпретации данных по обычному К. э.

Если К. э. происходит во внеш. поле интенсивной эл.-магн. волны [где в каждом конечном интервале частоты ( $\nu$ ,  $\nu + \Delta\nu$ ) содержится много фотонов], то возможен процесс, в к-ром происходит как поглощение из внеш. поля, так и испускание электроном большого числа фотонов. Такой процесс является сложной ф-цией напряжённости внеш. электрич. поля  $E$  и наз. *нелинейным комптон-эффектом*. Он происходит с заметной вероятностью при  $E \geq 137 E_0$ , где  $E_0$  имеет масштаб полей на электронной орбите атома водорода. Такие напряжённости электрич. поля