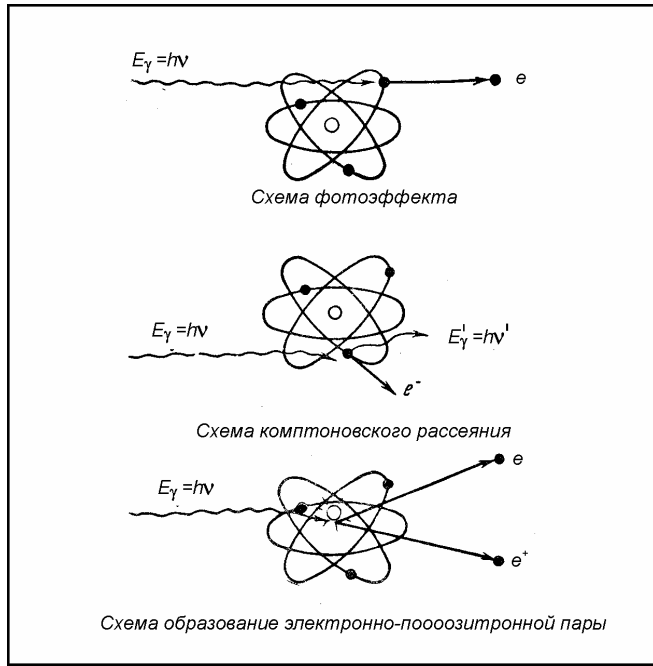


#### 4.1 Процессы поглощения гамма-излучения

Гамма-излучение обладает высокой проникающей способностью, однако взаимодействие  $\gamma$ -излучения с веществом сложнее, чем при корпускулярном излучении.



**Рис.12.** Различные механизмы взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом.

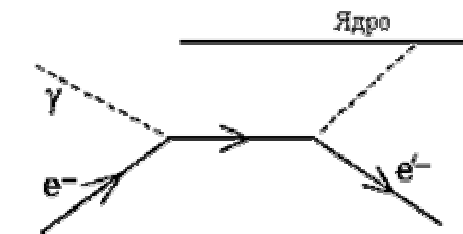
При прохождении через вещество гамма-кванты взаимодействуют с электронами и ядрами, в результате их интенсивность уменьшается. К потерям энергии  $\gamma$ -излучения приводят процессы, связанные с фотоэффектом, комптоновским рассеянием электронов в веществе и образованием электрон-позитронных пар. Вклад каждого из процесса в ослабление  $\gamma$ -излучения зависит от энергии  $\gamma$ -квантов ядерного излучения и параметра  $Z$  вещества-поглотителя.

Общая закономерность заключается в том, что вероятность потери энергии в процессе фотоэффекта и комптоновского рассеяния снижается с ростом энергии  $\gamma$ -излучения, а вероятность образования электрон-позитронных пар растет (начиная с энергии

1,02 МэВ) с повышением энергии  $\gamma$ -кванта. Вероятность потери энергии  $\gamma$ -квантов с ростом параметра  $Z$  пропорционально  $Z$  - для комптоновского рассеяния,  $Z^2$  - для процессов образования электрон-позитронных пар и  $Z^4$  - для процессов фотоэффекта. Иначе, с ростом параметра  $Z$  и энергии  $\gamma$ -излучения будет увеличиваться вероятность процессов в ряду: фотоэффект - комптоновское рассеяние - возникновение электрон-позитронных пар.

В области энергий до 10 МэВ наиболее существенными процессами являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар. При энергии гамма-квантов больше 10 МэВ превышает порог фотоядерных реакций и в результате взаимодействия фотонов с ядрами становятся возможны реакции типа  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, \alpha)$ . Сечения фотоядерных реакций в области энергий до 100 МэВ составляют 1% полного сечения взаимодействия гамма-квантов с атомом. Однако фотоядерные реакции

необходимо учитывать в процессах преобразования фотонного излучения в веществе, так как вторичные заряженные частицы, такие как протоны и альфа-частицы, могут создавать высокую плотность ионизации.



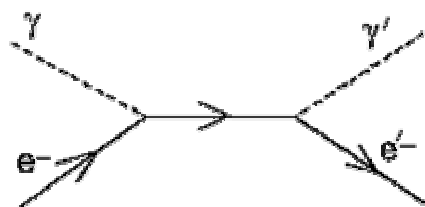
**Рис. 13.** Фотоэффект

**Фотоэффект** – явление, связанное с освобождением электронов твердого тела (или жидкости) под действием электромагнитного излучения. Различают внешний фотоэффект – испускание электронов под действием света (фотоэлектронная эмиссия),  $\gamma$ -излучения и др.; внутренний фотоэффект – увеличение электропроводности полупроводников или диэлектриков под действием света (фотопроводимость); вентильный фотоэффект – возбуждение светом эдс на границе между металлом и полупроводником или между разнородными полупроводниками.

Фотоэффектом называется такое взаимодействие  $\gamma$  - кванта с атомом, при котором  $\gamma$  - квант поглощается (исчезает), а из атома вырывается электрон. Одна часть энергии  $\gamma$ - кванта  $E_\gamma$  расходуется на разрыв связи электрона с ядром  $\epsilon_e$ , другая часть преобразуется в кинетическую энергию электрона  $E_{e^-}$ :

$$E_\gamma = E_{e^-} + \epsilon_e \quad (46)$$

Таким образом, при фотоэффекте часть энергии первичного гамма-кванта преобразуется в энергию электронов (фотоэлектроны и электроны Оже), а часть выделяется в виде характеристического излучения.



**Рис.14.** Эффект Комптона

После вылета фотоэлектрона в атомной оболочке образуется вакансия. Переход менее связанных электронов на вакантные уровни сопровождается выделением энергии, которая может передаваться одному из электронов верхних оболочек атома, что приводит к его вылету из атома (эффект Оже).

вылету из атома (эффект Оже).

Фотоэффект происходит только тогда, когда энергия  $\gamma$  - кванта больше энергии связи электрона в оболочке атома. Фотоэлектрон движется почти перпендикулярно направлению распространения поглощенного  $\gamma$ - кванта. Движение фотоэлектрона совпадает с направлением колебания электрической напряженности электромагнитного поля. Это показывает, что фотоэлектрон вырывается из атома электрическими силами. Фотоэлектрическое поглощение  $\gamma$ - квантов увеличивается с ростом связанности электронов в атоме. Фотоэффект практически не наблюдается на слабо связанных электронах атома. При энергии  $\gamma$  - кванта  $E_\gamma \gg \epsilon_e$  их можно считать свободными. Такой электрон не может поглощать  $\gamma$ - квант. Это следует из законов сохранения энергии и импульса:

$$E_\gamma = \frac{m_e v^2}{2}; \quad m_e v = \frac{E_\gamma}{c} = \frac{m_e v^2}{2c} \quad (47)$$

По второму уравнению свободный электрон, поглотив  $\gamma$ - квант, должен бы двигаться со скоростью, в два раза большей скорости света, чего не может быть.

Фотоэффект в основном происходит на К - и L - оболочках атомов. Линейный коэффициент ослабления фотоэффекта резко уменьшается с увеличением энергии, и при энергиях свыше 10 МэВ в свинце практически не возникают фотоэлектроны.

На слабо связанных атомных электронах происходит рассеяние  $\gamma$ - квантов, называемое **комптоном - эффектом**. Взаимодействие  $\gamma$ - кванта с электроном в комптон - эффекте представляется как столкновение двух упругих шариков с массами  $m_\gamma = \frac{E_\gamma}{c^2}$  и  $m_e$ .

**Эффект Комптона** – открытое А.Комптоном (1922) упругое рассеяние электромагнитного излучения малых длин волн (рентгеновского и  $\gamma$ -излучения) на свободных электронах, сопровождающийся увеличением длины волны  $\lambda$ . Комптона эффект противоречит классической теории, согласно которой при таком рассеянии  $\lambda$  не должно меняться. Комптона эффект подтвердил правильность квантовых представлений об электромагнитном излучении как о потоке фотонов и может рассматриваться как упругое столкновение двух частиц – фотона и электрона, при котором фотон передает электрону часть своей энергии (и импульса), вследствие чего его частота уменьшается, а  $\lambda$  увеличивается.

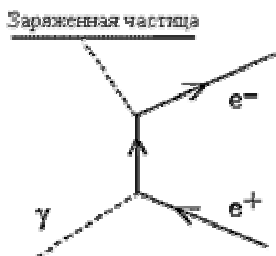
**Комптона эффект обратный** – упругое рассеяние на электронах высокой энергии, приводящее к увеличению энергии (частоты) фотонов (уменьшению длины волны).

**Комптоновская длина волны** – величина, имеющая размерность длины и указывающая область проявления релятивистских квантовых эффектов. Название связано с тем, что через комптоновскую длину волны электромагнитного излучения при эффекте Комптона. Для частицы массы  $m$  комптоновская длина волны  $\lambda_0 = \hbar/mc$ , где  $\hbar$  – постоянная планка,  $c$  – скорость света. Для электрона  $\lambda_0 = 3,86 \cdot 10^{-11}$  см, для протона  $\lambda_0 = 2,10 \cdot 10^{-14}$  см.

**Оже эффект** – эффект автоионизации атома, протекающий в два этапа: 1) образование вакансии в одной из внутренних оболочек атома при его облучении (например, быстрыми электронами); 2) заполнение этой вакансии электроном одной из вышележащих оболочек этого же атома и одновременный вылет другого электрона (оже-электрона) с этой или с еще более высоколежащей оболочки. По энергии оже-электронов можно установить электронную структуру участвующих в оже-эффекте атомов.

В случае эффекта Комптона, часть энергии  $\gamma$ -кванта преобразуется в кинетическую энергию электронов отдачи, а часть энергии уносит рассеянный фотон. Вероятность рассеяния  $\gamma$ -квантов в случае эффекта Комптона зависит от плотности атомных электронов  $n_e \sim Z$ , то вероятность Комpton-эффекта определяется порядковым номером вещества  $Z$ . Рассеяние  $\gamma$  - квантов происходит главным образом на слабосвязанных электронах внешних оболочек атомов. Линейный коэффициент ослабления комптон - эффекта пропорционален отношению  $Z/E_\gamma$ . Поэтому с увеличением энергии доля рассеянных  $\gamma$  - квантов уменьшается.

В случае тяжелых ядер комптон-эффект начинает преобладать над фотоэффектом в области энергий  $E_\gamma > 2 - 3$  МэВ (В свинце комптон-эффект начинает преобладать над фотоэффектом при энергиях выше 0,5 МэВ). Комптон-эффект слабее зависит от энергии  $E_\gamma$  по сравнению с фотоэффектом. Поэтому им можно пренебречь лишь в области энергий  $E_\gamma > 10$  МэВ, где становится существенным эффект образования электрон-позитронных пар (При энергиях выше 50 МэВ комптон-эффектом всегда можно пренебречь).



Гамма - квант в поле ядра может образовать пару частиц: электрон и позитрон (**Рис.15**). Вся энергия  $\gamma$  - кванта преобразуется в энергию покоя электрона и позитрона  $2m_e c^2$  и их кинетические энергии  $E_{e^-}$  и  $E_{e^+}$ .

**Рис.15.** Эффект образования электрон-позитронных пар

В случае **образования электрон-позитронных пар** баланс энергии имеет следующий вид (закон сохранения энергии):

$$E_\gamma = 2m_e c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} \quad (48)$$

где  $E_{e^-}$  и  $E_{e^+}$  кинетические энергии электрона и позитрона

В случае эффекта образования электрон-позитронных пар энергия первичного фотона преобразуется в кинетическую энергию электрона и позитрона и в энергию аннигиляции  $2m_e c^2$ . Пара частиц возникает только в том случае, если энергия  $\gamma$  - кванта превышает удвоенную массу покоя электрона, равную 1.02 МэВ. Вне поля ядра  $\gamma$  - кванту запрещено превращаться в пару частиц, так как в этом случае нарушается закон сохранения импульса. Это следует, например, из предельного условия образования пар. Гамма - квант с энергией 1.02 МэВ энергетически может породить электрон и позитрон. Однако их импульс будет равен нулю, тогда как импульс  $\gamma$  - кванта равен  $E/c$ . В поле ядра импульс и энергия  $\gamma$  - кванта распределяются между электроном, позитроном и ядром без нарушений законов сохранения энергии и импульса. Масса ядра несравненно больше массы электрона и позитрона, поэтому оно получает пренебрежимо малую долю энергии. Причем вся энергия  $\gamma$  - кванта в энергию электрона и позитрона.

Линейный коэффициент ослабления образованием пар пропорционален  $z^2/\ln E_\gamma$ . Этот эффект заметен в тяжелых веществах при больших энергиях. Коэффициент становится отличным от нуля при пороговой энергии  $E_\gamma = 1.02$  МэВ. В области энергий  $E_\gamma > 10$  МэВ основную роль в ослаблении пучка  $\gamma$  - квантов играет эффект образования пар, при этом основное поглощение  $\gamma$  - квантов происходит в поле ядра.

Таким образом, во всех трех процессах взаимодействия первичного фотона с веществом часть энергии преобразуется в кинетические энергии электронов и позитронов, а часть - в энергию вторичного фотонного излучения.