

## 5. ТОРМОЗНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.

Рентгеновские лучи возникают при бомбардировке быстрыми электронами

твёрдых мишеней-анодов (рис 1). Если между катодом и анодом создано напряжение  $U$ , то электроны, разгоняясь, получают энергию  $eU$ .

Попав в вещество анода, электроны тормозятся и излучают

электромагнитные волны.

Согласно классической физике при торможении

электрона должны возникать волны всех длин – от нуля до бесконечности.

Экспериментальные кривые распределения интенсивности тормозного излучения по длинам волн (рис.2) не подтверждают это положение: интенсивность не идет плавно к началу координат, а резко обрывается при  $\lambda_{min}$ .

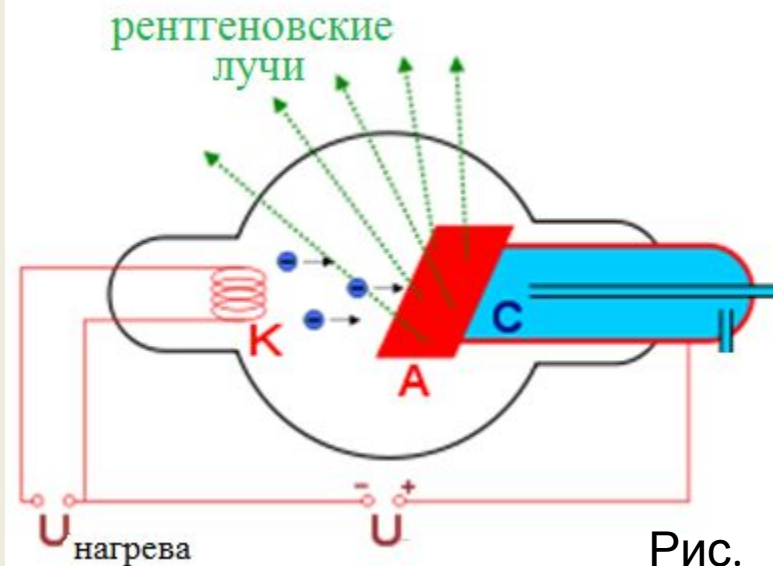


Рис. 1

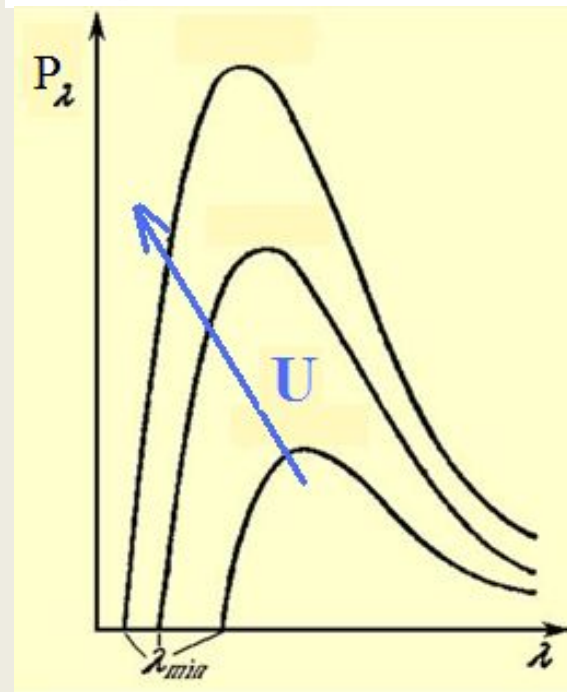


Рис. 2

Эксперимент  
показал:

$$\lambda_{\min} = \frac{b}{U}, \quad b = \text{const.} \quad (1)$$

$\lambda_{\min}$  - коротковолновая граница тормозного рентгеновского излучения.

Существование коротковолновой границы следует из квантовой природы излучения. Каждый квант излучается отдельным электроном. Поэтому энергия кванта не может превысить энергию электрона перед торможением. То есть  $h\nu \leq eU$ .

Получается, что частота излучения не может быть больше значения

$$\nu_{\max} \leq eU/h.$$

Тогда, длина волны не может быть меньше чем

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{hc}{eU}$$

Постоянная  $\frac{hc}{e}$  совпадает с полученной экспериментально постоянной  $e$

величиной  $b$  в (1).

## 6. Эффект Комптона.

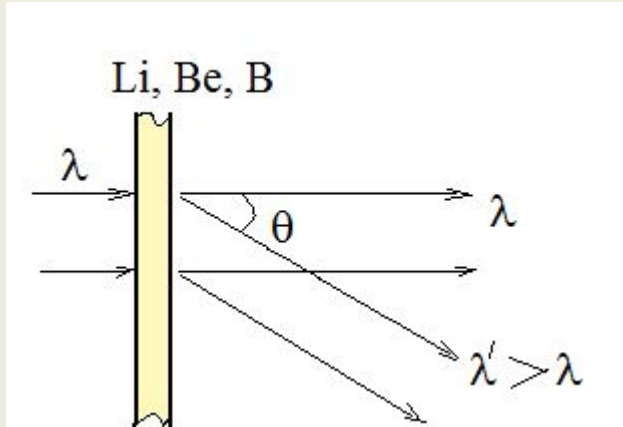


рис.  
1

Эффект Комптона состоит в том, что при рассеянии рентгеновского излучения веществом, содержащим легкие атомы (Li, Be, B), часть рассеянного излучения меняет длину волны и направление распространения (рис. 1).

Экспериментально полученное соотношение:

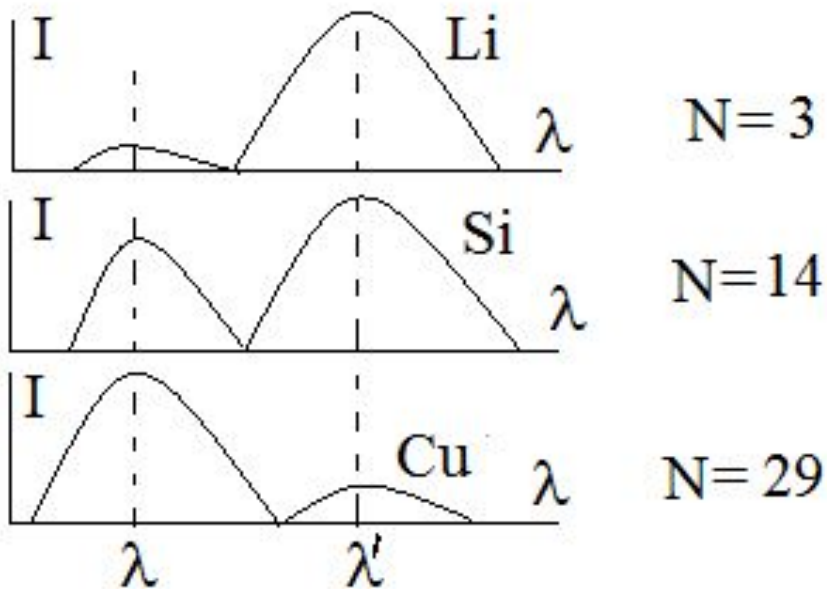
$$\lambda' - \lambda = \lambda_0 (1 - \cos \theta) \quad ,$$

где  $\lambda$  — длина волны несмещенного

$\lambda'$  — <sup>излучения</sup> длина волны смещенного

$\theta$  — <sup>излучения</sup> угол  
рассеяния.

$$\lambda_0 = \text{const.}$$



На рис. 2 схематически приведены экспериментально полученные распределения интенсивностей смещенной (для  $\lambda'$ ) и несмещенной (для  $\lambda$ ) компонент рассеянного излучения разными веществами.

При рассеянии на легких атомах большая часть рассеянного излучения имеет смещенную длину волны;

При рассеянии на тяжелых – наоборот.

рис.

Все особенности эффекта Комптона можно объяснить если рассматривать

рассеяние как **упругое столкновение рентгеновских фотонов с**

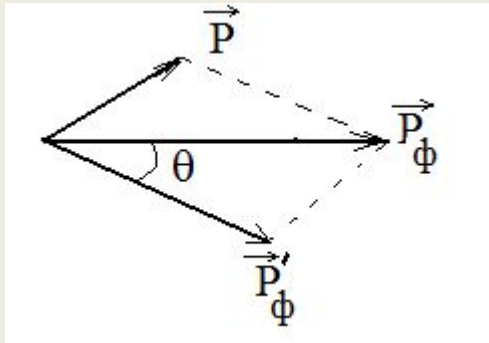
**практически свободными** валентными электронами, энергия связи

которых значительно меньше той энергии, которую фотон передает

электрону при столкновении.

При упругом столкновении выполняются законы сохранения энергии и импульса системы, в данном случае **системы фотон - электрон.**

Поскольку энергия рентгеновского фотона  $h\nu = 0,01 - 1$  МэВ, а энергия покоя электрона  $E_0 = 0,51$  МэВ, нужно использовать релятивистские выражения для энергии и импульса электрона.



Закон сохранения энергии:

$$h\nu + E_0 = h\nu' + E \quad (1)$$

$E$  = полная энергия электрона после соударения.  
Закон сохранения

импульса:

$$\vec{p}_\phi = \vec{p}'_\phi + \vec{p} \Rightarrow \vec{p} = \vec{p}_\phi - \vec{p}'_\phi \Rightarrow$$

$$p^2 = p_\phi^2 - 2p_\phi p'_\phi \cos \vartheta + p'^2_\phi. \quad (2)$$

Здесь

$$p_\phi = \frac{h\nu}{c}, \quad p'_\phi = \frac{h\nu'}{c} \quad (3), (4)$$

Связь полной энергии электрона и его кинетической энергии:

$$E = T + E_0$$

Связь полной энергии электрона и его импульса:

$$p^2 c^2 = E^2 - E_0^2 \Rightarrow p^2 c^2 = T(T + 2E_0) \quad (5)$$

Составим систему из уравнений (1) –

(5) :

$$h\nu + E_0 = h\nu' + E$$

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

$$p^2c^2 = T(T + 2E_0)$$

$$h\nu - h\nu' = T$$

$$p^2c^2 = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2h\nu h\nu' \cos\theta$$

$$p^2c^2 = T(T + 2E_0)$$

$$(h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2h\nu h\nu' \cos\theta = (h\nu - h\nu') [h(\nu - \nu') + 2E_0] \cdot \frac{1}{h^2} \Rightarrow$$

$$\nu^2 + \nu'^2 - 2\nu\nu' \cos\theta = (\nu - \nu')^2 + \frac{2E_0}{h}(\nu - \nu') \Rightarrow$$

$$2\nu\nu' \cos\theta = 2\nu\nu' - \frac{2E_0}{h}(\nu - \nu') \Rightarrow \frac{E_0}{h}(\nu - \nu') = \nu\nu'(1 - \cos\theta) \Rightarrow$$

$$\frac{(\nu - \nu')}{\nu\nu'} = \frac{h}{E_0}(1 - \cos\theta) \Rightarrow \frac{1}{\nu'} - \frac{1}{\nu} = \frac{h}{E_0}(1 - \cos\theta) \Rightarrow$$

$$\frac{1}{v'} - \frac{1}{v} = \frac{h}{E_0}(1 - \cos\theta) \Rightarrow \text{Учтем } \lambda = \frac{c}{v}, \frac{1}{v} = \frac{\lambda}{c}. \quad \longrightarrow$$

$$\frac{\lambda'}{c} - \frac{\lambda}{c} = \frac{h}{E_0}(1 - \cos\theta) \Rightarrow \lambda' - \lambda = \frac{hc}{E_0}(1 - \cos\theta) = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) \quad (6)$$

Постоянная  $\lambda_0 = \frac{h}{m_0c}$  называется комptonовской длиной волны  $\lambda_0$

и численно совпадает со значением  $\lambda_0$ , полученным экспериментально.

При рассеянии фотонов на электронах, связь которых с атомом велика, обмен энергией и импульсом происходит с атомом как целым. Поскольку масса атома намного превосходит массу электрона:  $M_{\text{ат}} \gg m_0$ , комptonовское смещение  $(\lambda' - \lambda)$  в (6) ничтожно мало:  $\ll \lambda$ . По мере роста номера атома увеличивается относительное число электронов с сильной связью, чем и объясняется ослабление интенсивности смещенной линии на рис.2 для более тяжелых веществ.

## **Выводы.**

**Опыты Комптона означали окончательное утверждение квантовых идей в физике.**

**Стало**

**понятно, что пока энергия кванта мала**  
**(**

**), излучение ведет себя как волна**  
**(например, при тепловом излучении). На высоких частотах**  $\hbar\omega \ll kT$  **, когда наблюдается эффект Комптона,**

$\hbar\omega \geq kT$  **происходит корпускулярное взаимодействие**

**рентгеновского излучения со свободными или**

**связанными в атоме электронами,**

**объясняющее**  
 $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  **сдвиг длины волны рассеянного излучения**

**(**



# 7. Корпускулярно-волновой дуализм света

Свет по своей природе дуалистичен:

с одной стороны он проявляет ярко выраженные **волновые свойства** ( при интерференции, дифракции, поляризации, дисперсии), а с другой проявляет себя, как **поток частиц – фотонов** ( в явлениях теплового излучения, фотоэффекте, давлении света, эффекте Комптона) .

При больших  $\lambda$  ярче проявляются волновые свойства излучения, по мере уменьшения  $\lambda$  все больше проявляется корпускулярная природа света.

