

# Тепловое излучение

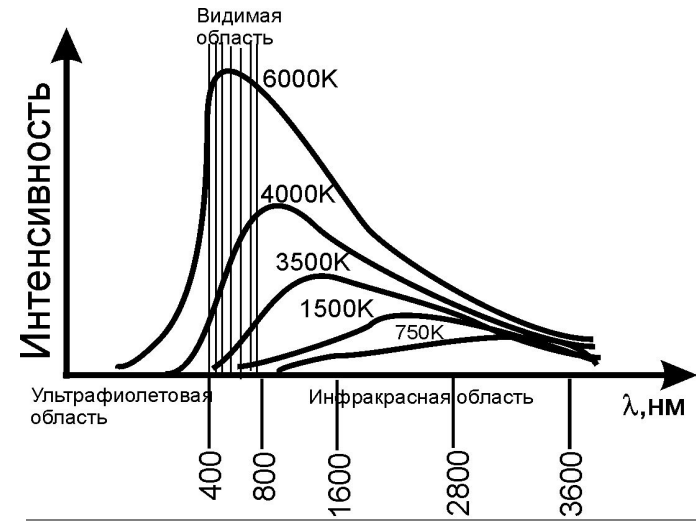
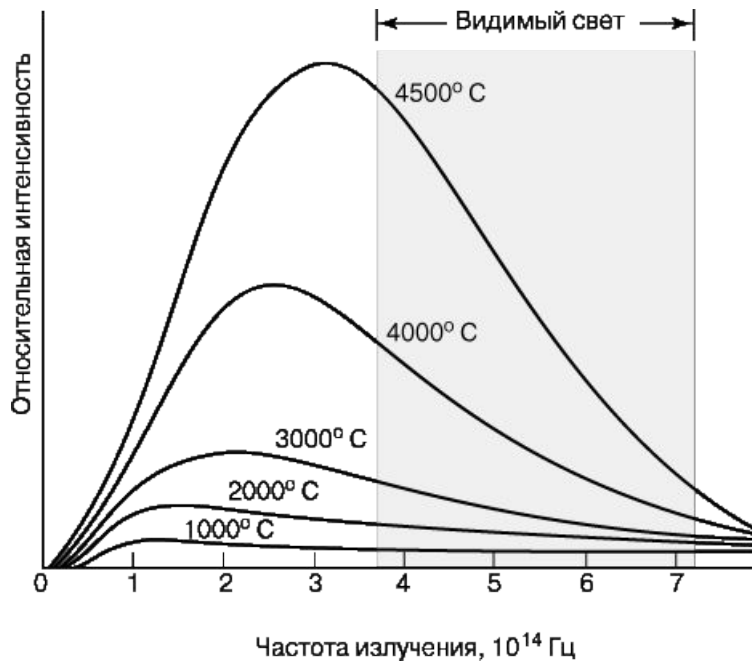
## Тепловое излучение

В зависимости от происхождения различают виды люминесценции (свечения)



- Хемилюминесценция
  - Фотолюминесценция
  - Электролюминесценция
  - Тепловое излучение
- и т.д.*

# Тепловое излучение



Тепловое излучение **обусловлено нагревом тел**, наблюдается при любой температуре.

При **уменьшении** температуры:

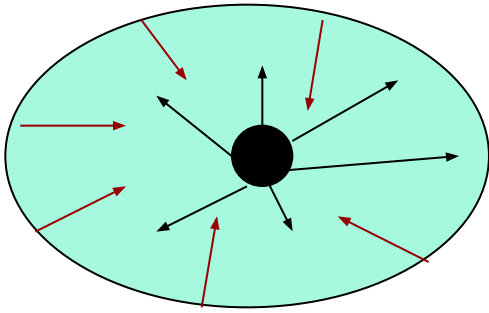
1. ***max*** сдвигается в длинноволновую сторону
2. **Уменьшается интенсивность.**

**При  $T \approx 300\text{K}$  – свечение в инфракрасной области**

# Напоминание

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\lambda}{V} = \frac{\lambda}{C}$$

## Тепловое излучение



Тепловое излучение – **равновесное**.

(распределение энергии между телом и излучением остается неизменным для каждой длины волны)

Характеристика теплового излучения – поток энергии, испускаемый с единицы поверхности – **энергетическая светимость  $R$** .

$$dR_{\omega T} = r_{\omega T} d\omega, \quad r_{\omega T} - \text{испускательная способность.}$$

$$R = \int_0^{\infty} r(\omega) d\omega$$

$d\Phi_{\omega}$  - поток энергии падающий на тело.

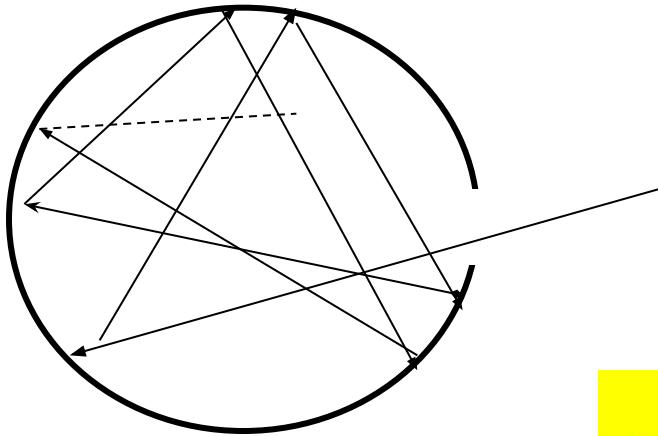
$d\Phi_{\omega}^*$  – поток энергии поглощенной телом.

$$d\Phi_{\omega}^* / d\Phi_{\omega} = A_{\omega T}$$

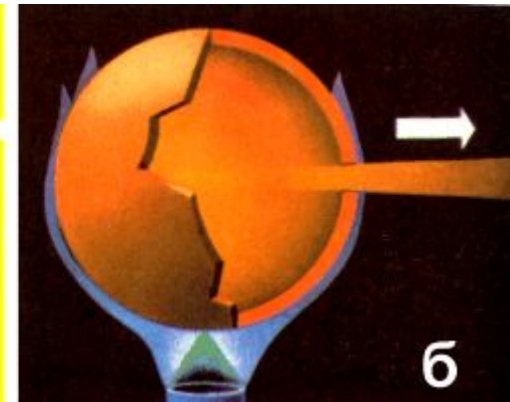
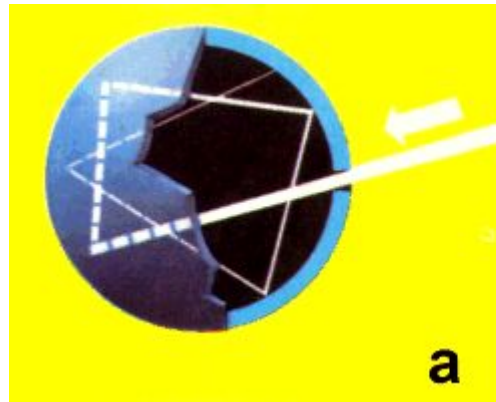
**- поглощательная способность.**

$A_{\omega T} = 1$  абсолютно черное тело (АЧТ)

Модель АЧТ

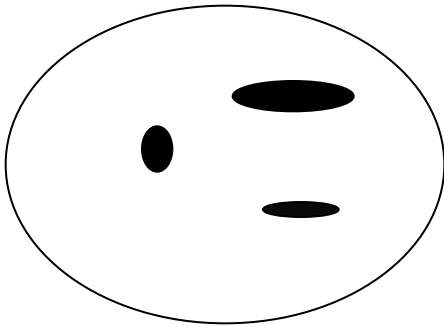


$A_{\omega T} = A_T = \text{const} < 1$  серое тело



## *Закон Кирхгофа*

Отношение испускательной способности к поглотительной способности **не зависит от природы тела**, для всех тел является **одной и той же** функцией частоты и температуры.



$$\left( \frac{r_{\omega T}}{A_{\omega T}} \right)_1 = \left( \frac{r_{\omega T}}{A_{\omega T}} \right)_2 = f(\omega T)$$

Для АЧТ  $r_{\omega T} = f(\omega T)$

т.к.  $A_{\omega T} = 1$



При увеличении  $T$ :

- Максимум сдвигается в коротковолновую сторону
- Площадь под кривой увеличивается

Закон Стефана-Больцмана

Стефан (1879) показал, что  $R \sim T^4$

Больцман (1884) определил постоянную в этой зависимости.

$$R = \sigma T^4$$
$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ град}^4$$

*Закон смещения Вина*

Вин (1893), показал, что функция должна иметь вид:

$$f(\omega, T) = \omega^3 F(\omega / T)$$

Это соотношение позволяет определить зависимость между  $\lambda_{max}$  и  $T$ .

$$T\lambda_{max} = b$$

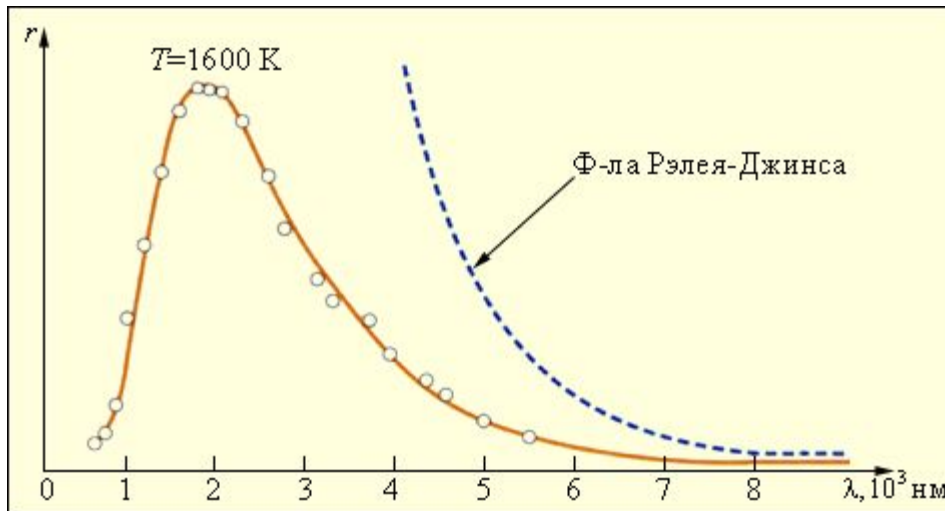
$$b = 2,9 \cdot 10^6 \text{ нм град}$$

Релей и Джинс пытались определить искомую функцию исходя из теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы.

### Формула Релея- Джинса

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT$$

$f(\omega t)$



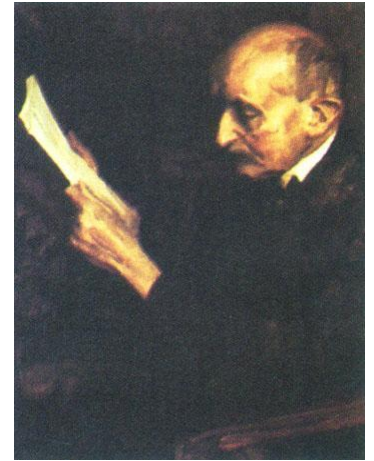
Формула Релея Джинса согласуется с экспериментом **лишь при больших длинах волн (малых частотах)**

### Ультрафиолетовая катастрофа!!

«Ультрафиолетовая катастрофа» - каждое тело, обладающее энергией для излучения, должно излучать ее практически полностью в ультрафиолетовой области и короче (при любой температуре )

Планк в 1900 году нашел выражение для  $f(\omega, T)$ , соответствующее эксперименту.

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{e^{\hbar \omega / kT} - 1}$$



М.Планк (1864-1909)

Свет излучается в виде отдельных порций энергии - квантов, величина которых пропорциональна частоте  $E = h\nu = \hbar \omega$ .

$$h = 2\pi \hbar = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж сек}$$

- **Формула согласуется с экспериментом**
- **При малых частотах (больших  $\lambda$ ) переходит в формулу Р-Д.**
- **Согласуется с законом Вина**

$$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ дж сек}$$

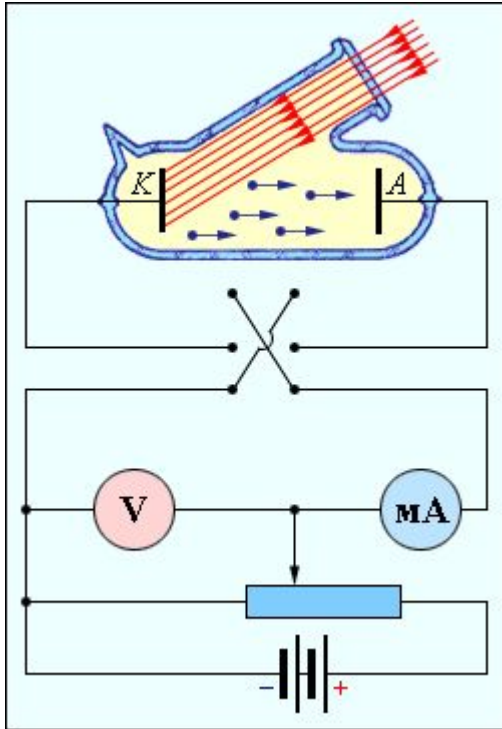
$$\text{Дж} = \text{Нм} = \text{кгм}^2/\text{с}^2$$

$$\text{Мvr} = \text{кгм}^2/\text{с}$$

$$\text{Дж с} = \text{кгм}^2 \text{ с}/\text{с}^2 = \text{кгм}^2/\text{с}$$

## Квантовые свойства света

### Фотоэффект



Испускание электронов веществом под действием света. Открыт Герцем в 1887 году.

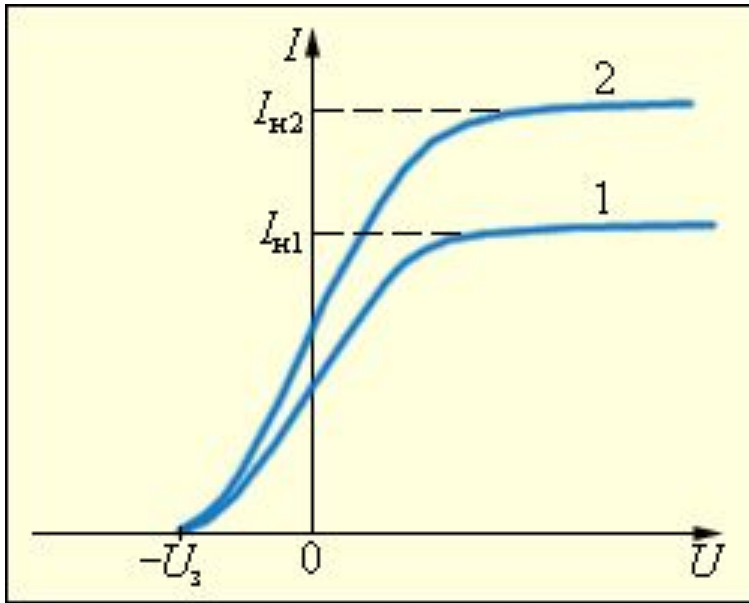
Изучался Столетовым 1888-89 гг , Ленардом и Томсоном 1898

**Обнаружены св-ва:**

- 1. « — » знак заряда**
- 2. Ультрафиолет более эффективен**
- 3. Величина заряда ~ поглощенной энергии**
- 4. Определен удельный заряд – подтверждается, что электроны.**

## Фотоэффект

## Квантовые свойства света



1. При  $U = 0$   $I \neq 0$
2. Есть насыщение
3.  $I_{н} \sim \Phi$  – 3-н Столетова
4.  $eU_3 = 1/2(mV_{max}^2)$

По классической теории должна быть пороговая (минимальная) **интенсивность**, есть пороговая **частота**.



# Фотоэлектрический эффект – явление выбивания светом электронов с поверхности проводника (Эйнштейн)

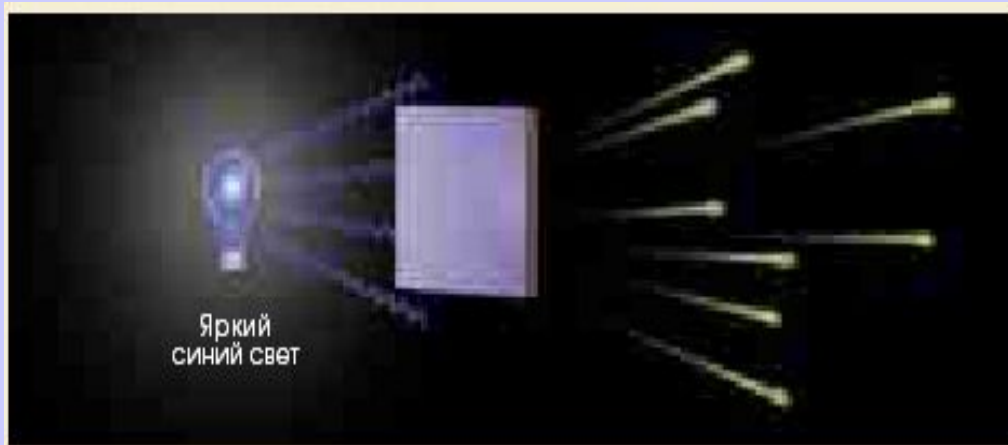
1.



2.



3.



4.



$$h\nu = \frac{1}{2}mV^2 + A \quad (A=e\varphi)$$

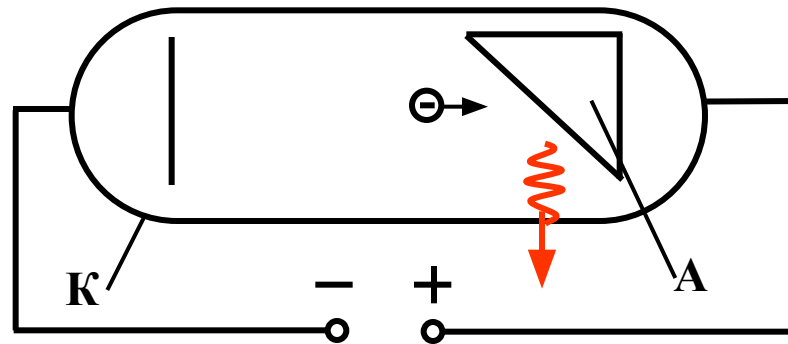
*Уравнение Эйнштейна*

$$h\nu_{\min} = e\varphi -$$

*красная граница фотозффекта*

Рентген – э-м излучение с  $\lambda \leq 100\text{нм}.$

Возникает при бомбардировке быстрыми электронами  
твердых мишеней.



**$U$  до 50 кВ**

# РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Два вида:

- **Характеристическое**- вызвано возбуждением внутренних электронных оболочек.
- **Тормозное** –при попадании электрона в твердое тело он тормозится - энергия переходит в тепло и в **рентгеновское излучение**.

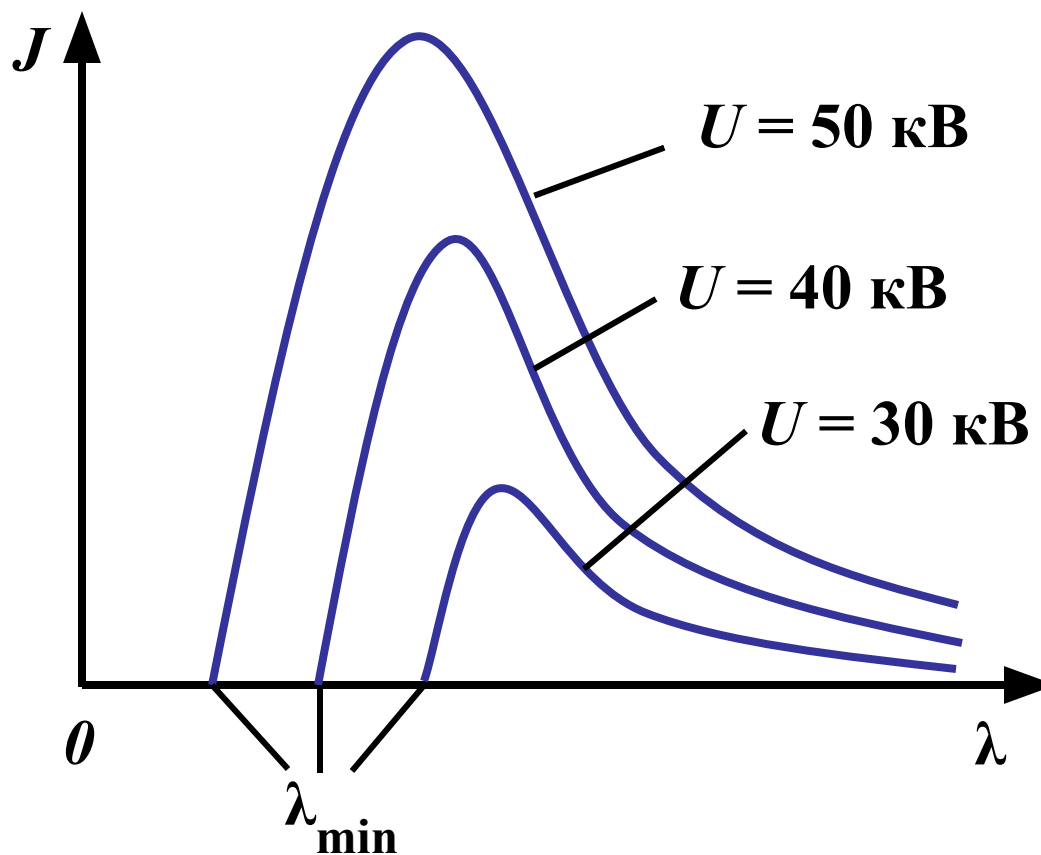
Согласно **классической** теории должны возникать волны с **любой  $\lambda$** ,

**$\lambda_{\max}$**  должна смещаться в коротковолновую сторону при увеличении  $U$  (Энергия электрона =  $eU$ )

Эксперимент показывает наличие ***коротковолновой границы***.

$$\lambda_{\min} = 1239/U$$

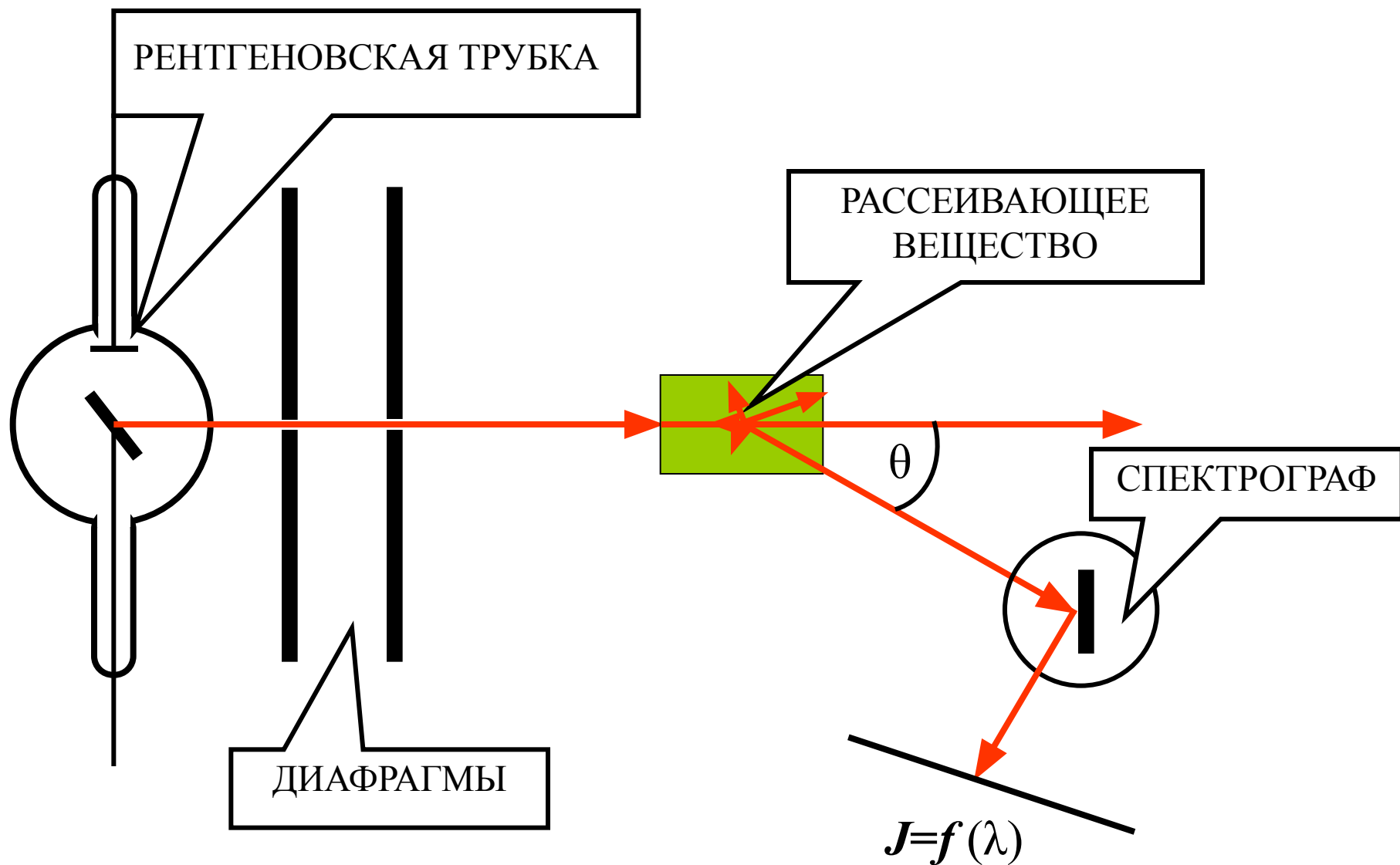
# Тормозное рентгеновское излучение



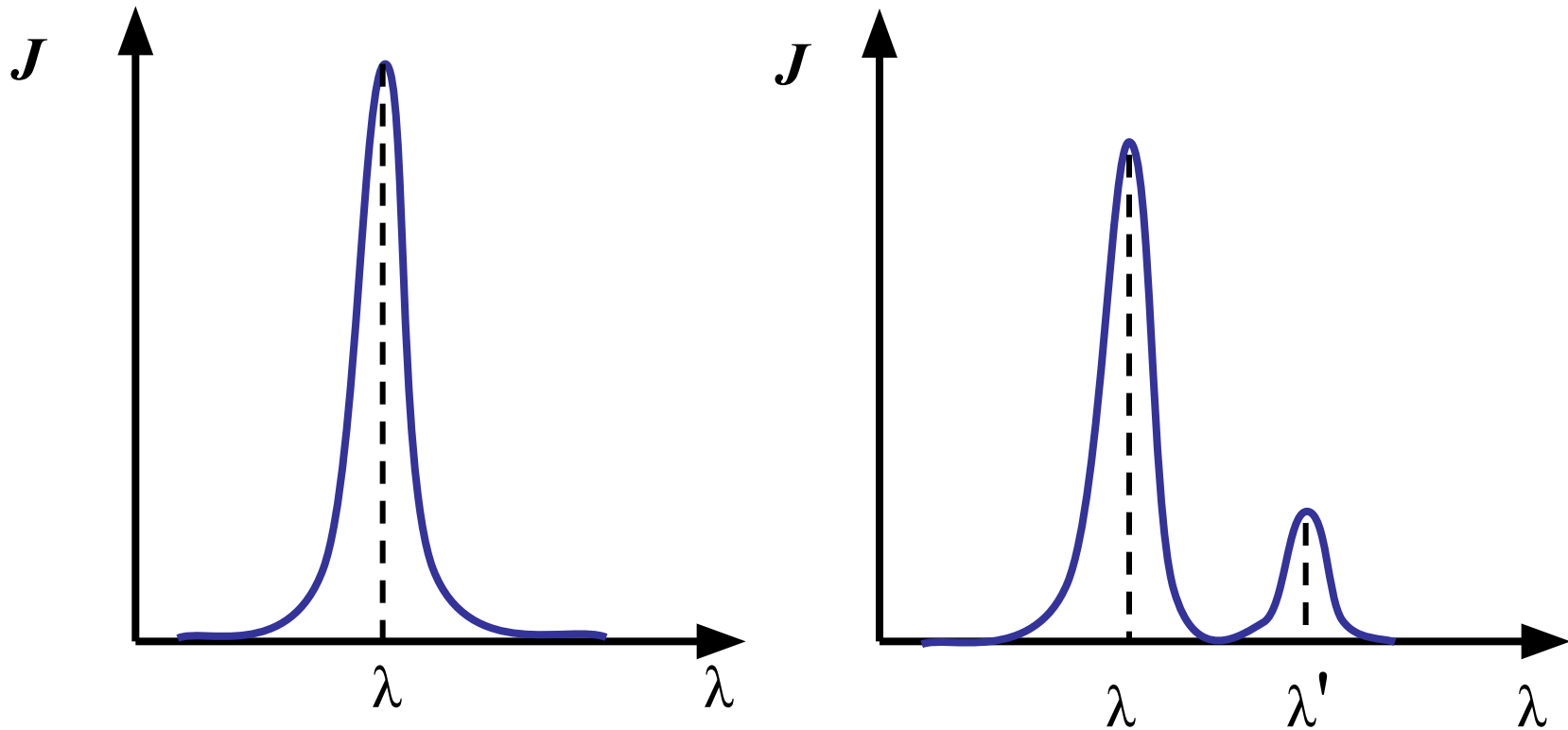
$$h\nu_{\max} = eU$$

$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{eU} = \frac{1239}{U} \text{ нм}$$

# ЭФФЕКТ КОМПТОНА (1922г)



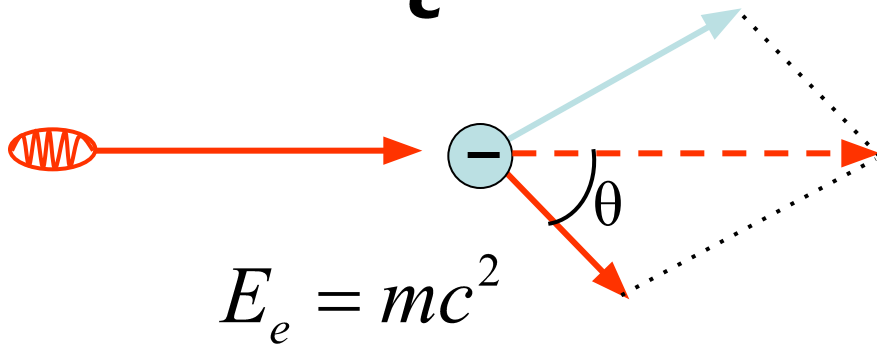
# ЭФФЕКТ КОМПТОНА



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \Lambda(1 - \cos\theta)$$

# Законы сохранения при взаимодействии фотона и электрона

$$E_{\phi} = h\nu \quad p_{\phi} = \frac{h\nu}{c}$$



$$E_e = mc^2$$

$$p_e = mV; \quad E_e = \sqrt{p_e^2 c^4 + m^2 c^4}$$

$$p_{\phi} = \frac{h\nu'}{c}; \quad E_{\phi} = h\nu'$$



## Законы сохранения при взаимодействии фотона и электрона

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + \sqrt{p_e^2c^4 + m^2c^4} \quad \leftarrow \quad \text{З-н сохр. энергии}$$

$$\frac{h\vec{\nu}}{c} = \vec{p}_e + \frac{h\vec{\nu}'}{c} \quad \leftarrow \quad \text{З-н сохр. импульса}$$

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

## Законы сохранения при взаимодействии фотона и электрона

$$mc^2 (v - v') = hvv' (1 - \cos \theta)$$

Или учитывая связь длины волны и частоты –  $v = c/\lambda$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

$$\frac{h}{mc} = \lambda_e \leftarrow \text{Комтоновская длина волны электрона.}$$

