

# **ФОТОЭФФЕКТ**

**Открыт в 1887 году  
немецким физиком**

**Г. Герцем и в**

**1888–1890 годах**

**экспериментально**

**исследован российским**

**физиком А. Г. Столетовым**



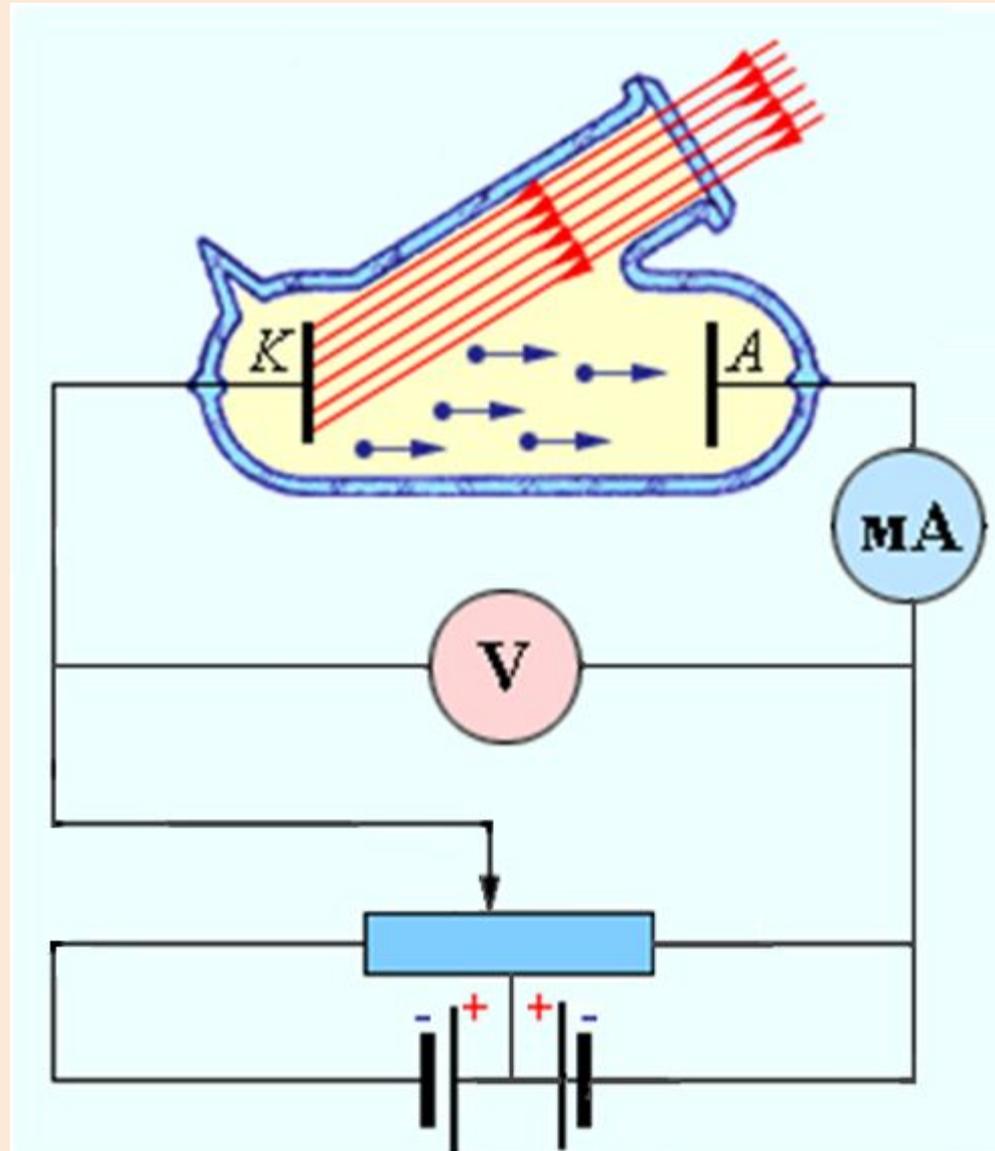
**Александр  
Григорьевич Столетов**

# **Внешний фотоэффект**

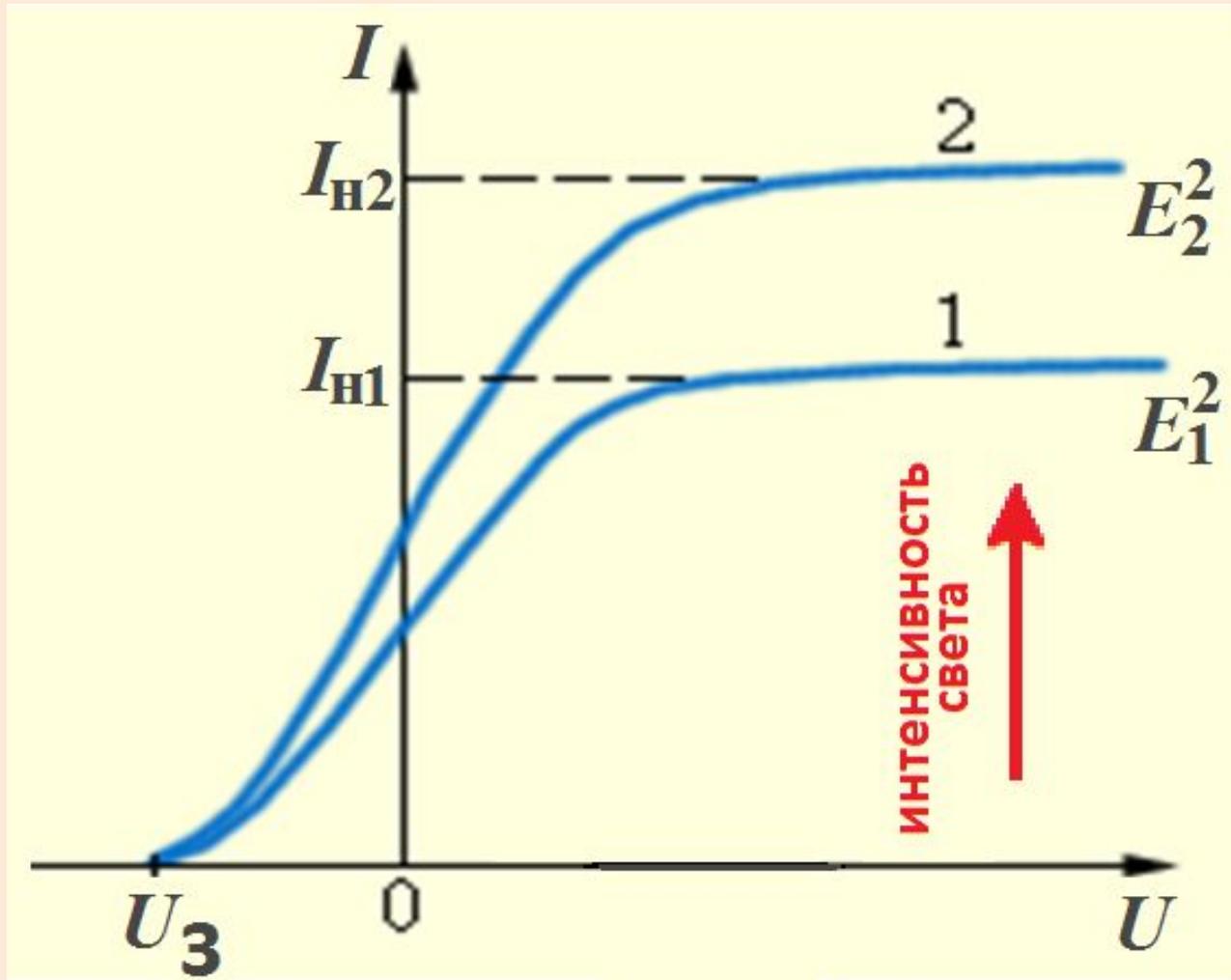
**Падая на поверхность металла и поглощаясь в нем, свет вызывает эмиссию (испускание) электронов веществом. Это явление называется фотоэлектрическим эффектом (фотоэффektом).**

**Вылетающие из вещества электроны называются фотоэлектронами, а образуемый ими электрический ток называется фототоком.**

# Схема установки для изучения внешнего фотоэффекта



# ВАХ фотоэффекта



$I_{н1}$  и  $I_{н2}$  – токи насыщения,  
 $U_3$  – запирающее напряжение.

# Законы Столетова

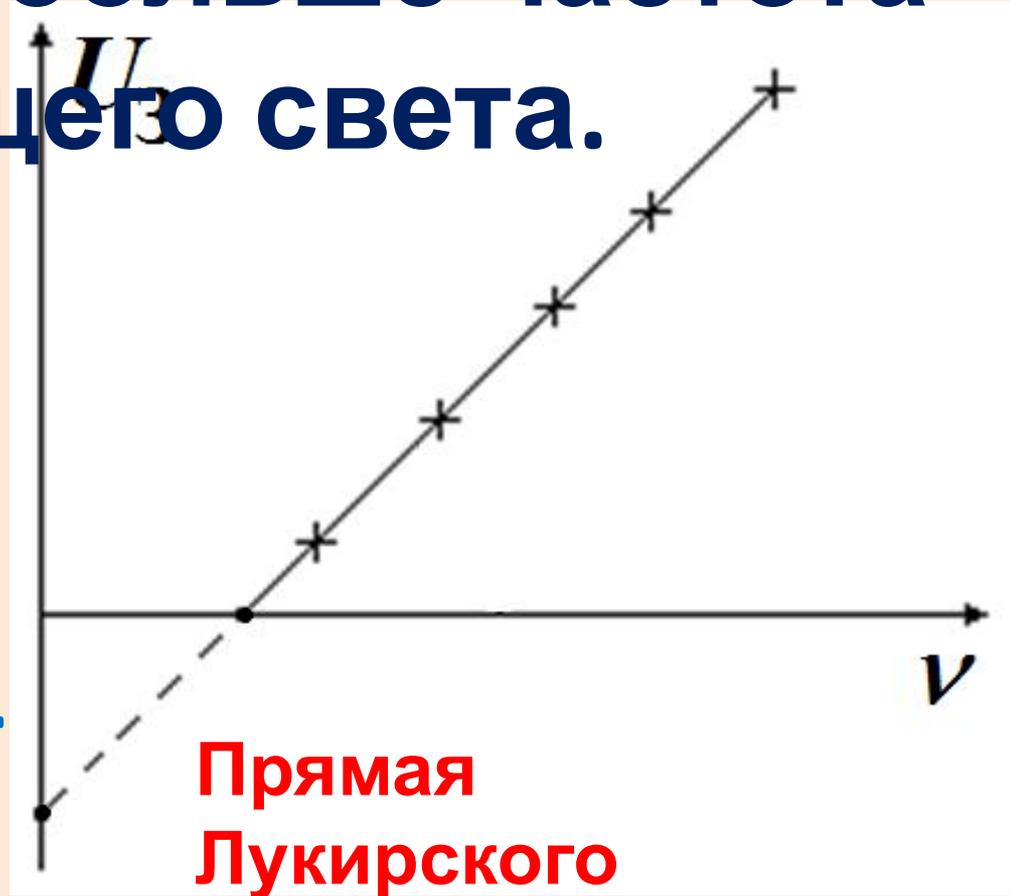
1. Фототок насыщения  $I_n$  пропорционален световому потоку, падающему на катод.

Этот ток равен  
суммарному заряду  
электронов,  
вырывааемых в единицу

2. Начальная скорость  
выбитых электронов тем  
больше, чем больше частота  
падающего света.

Это

проявляется в  
зависимости  
 $U_z$  от частоты.  
Зависимость –  
линейная!



**3. Фотоэффект наблюдается только при облучении светом с частотой, превышающей некоторую минимальную частоту. Эта минимальная частота называется красной границей фотоэффекта.**

**4. Фотоэффект безынерционен.**

Объяснение законов  
фотоэффекта в 1905 г. дал  
Эйнштейн на основе  
предложенной им гипотезы,  
что свет взаимодействует с  
веществом как поток частиц —  
квантов света или фотонов. Их  
энергия по гипотезе Планка

$$\varepsilon = h\nu$$

# Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$$

Поглощенная электроном энергия кванта идет на совершение работы выхода  $A_{\text{вых}}$  электрона из металла и приобретение электроном  $\frac{mv^2}{2}$  кинетической энергии<sup>2</sup>.

Полагая в формуле Эйнштейна  $\frac{m_0 v_0^2}{2}$ , найдем красную границу

фотоэффекта

$$v_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

или

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}$$

Если энергия фотона превышает работу выхода, то разность между ними идет на кинетическую энергию электрона

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}}$$

По закону сохранения энергии  $\frac{mv^2}{2} = eU_3$ ,

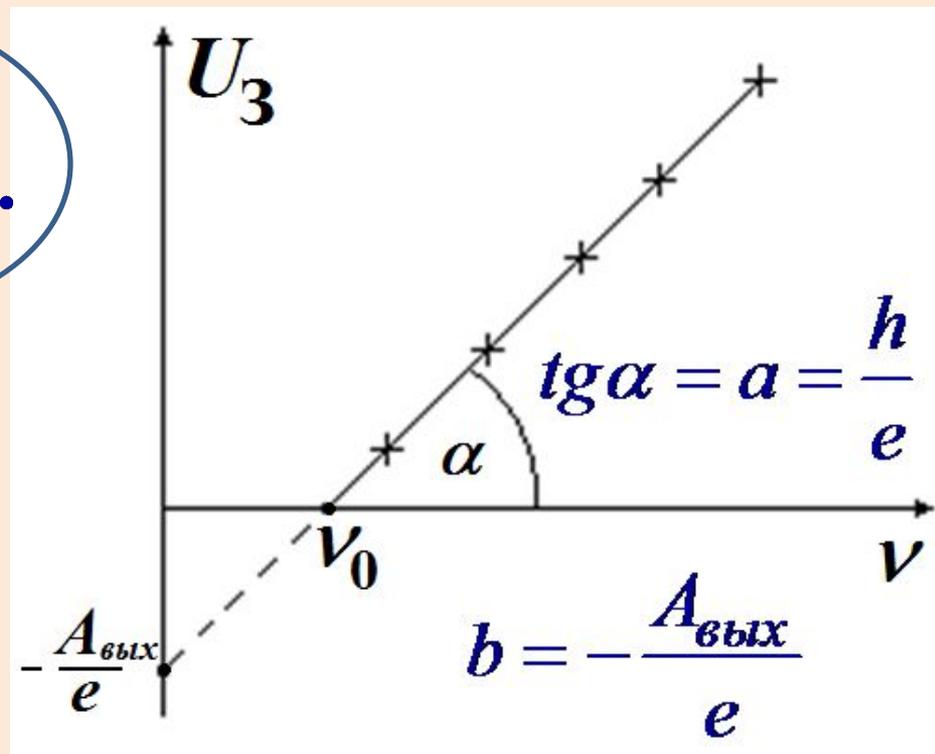
$$\text{тогда } U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A_{\text{вых}}}{e}.$$

Получили формулу прямой  
Лукирского.

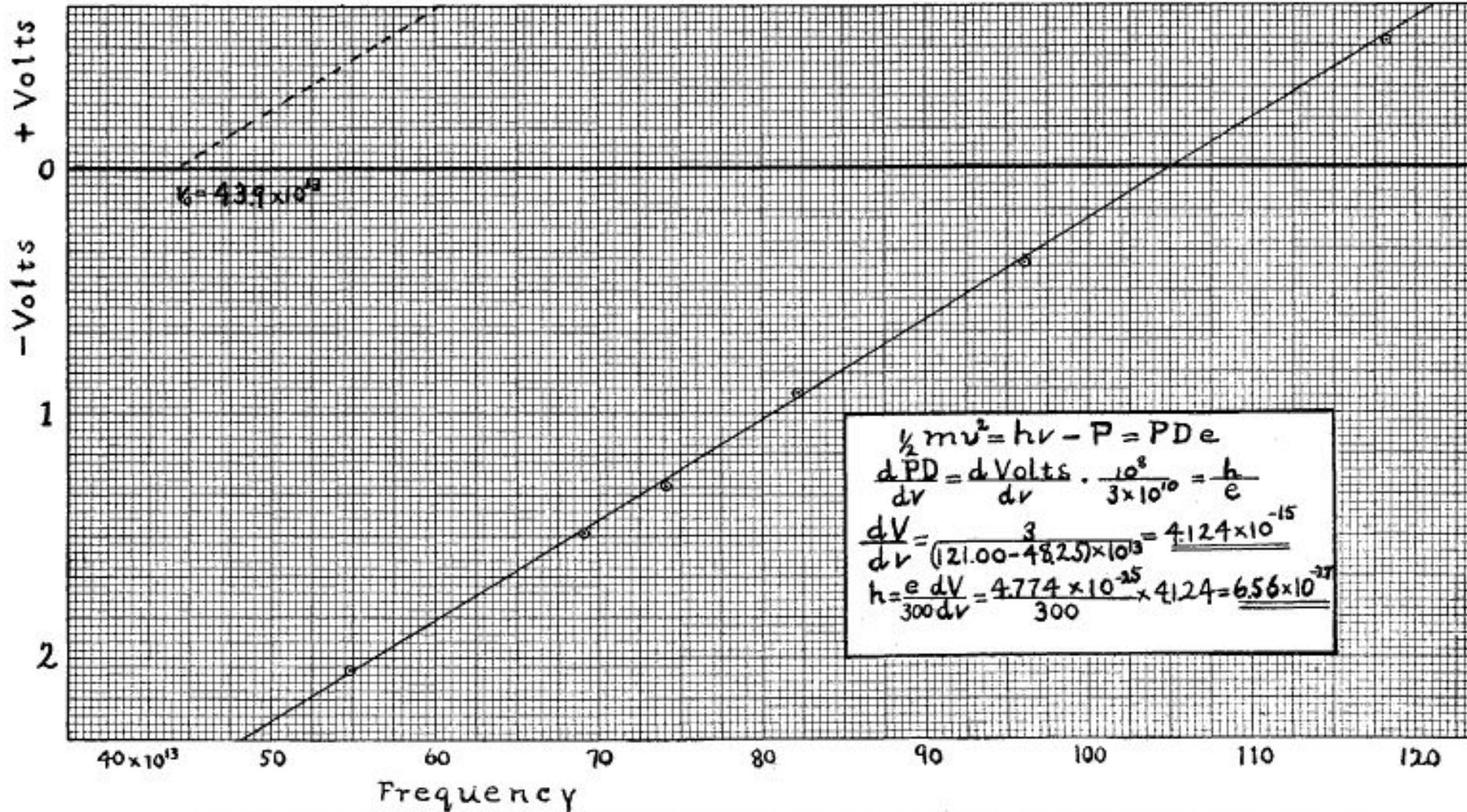
По этой прямой можно найти постоянную Планка и работу выхода.

$$U_3 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A_{\text{вых}}}{e}$$

$y = ax + b$



# Опыт Милликена



Зависимость задерживающего напряжения от частоты света (из статьи Р.Милликена, 1914 г.)

**Внутренний  
фотоэффект**  
**Заключается в увеличении  
электропроводности  
полупроводников или  
диэлектриков под действием  
света. Это явление называют  
фотопроводимостью.**

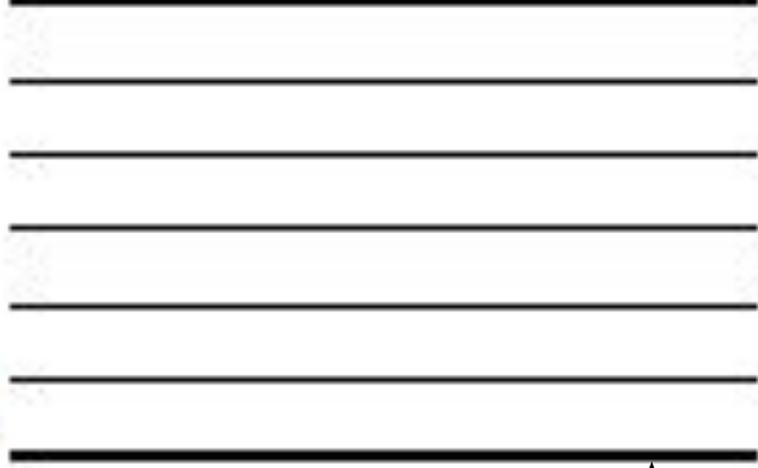
**Причиной фотопроводимости является увеличение концентрации электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне.**

**Условие внутреннего фотоэффекта: энергия фотона должна превышать энергию связи носителя заряда со своим атомом.**

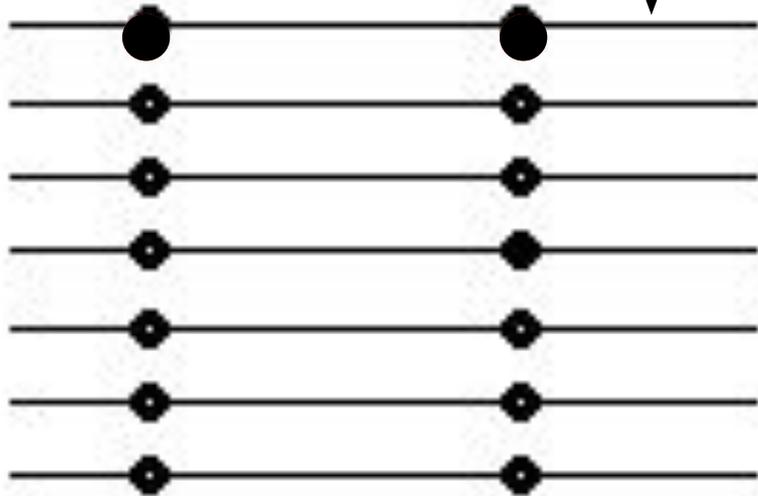
$h\nu$

$h\nu$

$W_C$



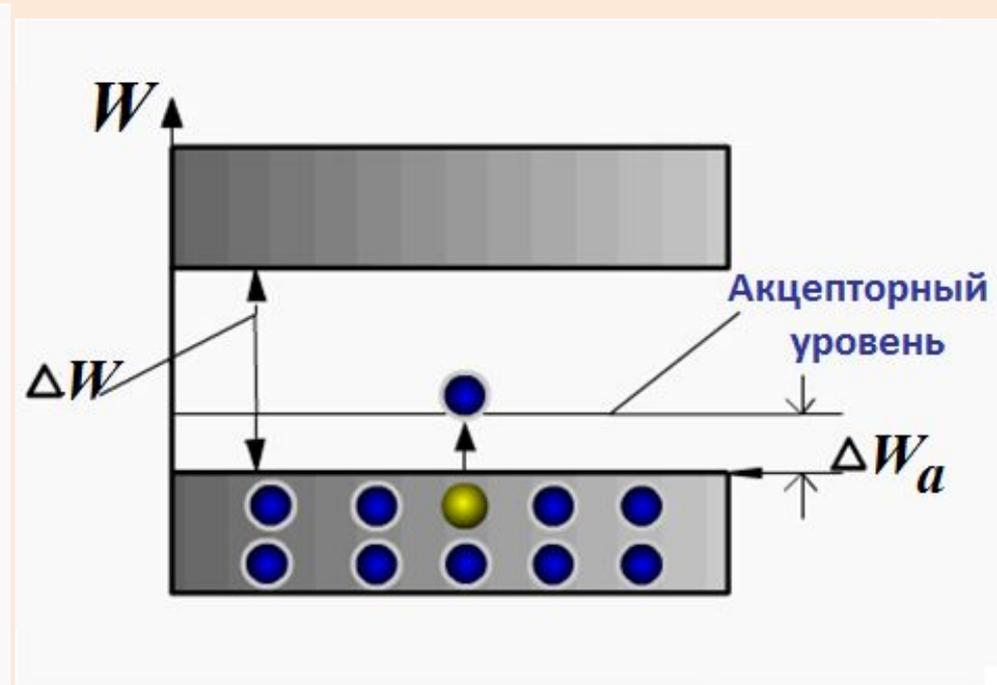
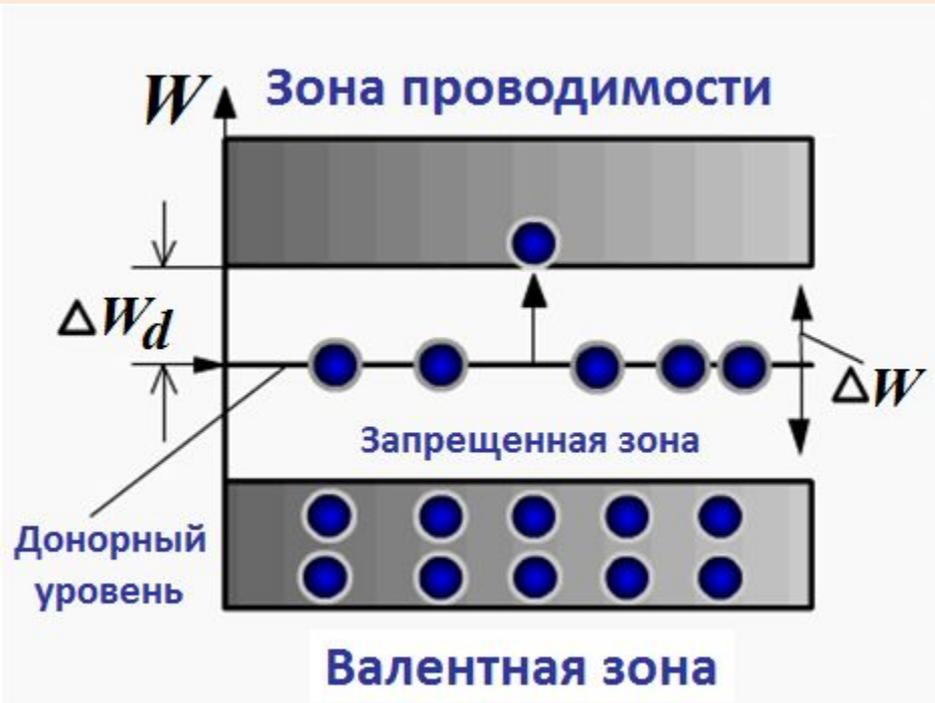
$W_V$



$h\nu \geq \Delta W$

# Донорный полупроводник

# Акцепторный полупроводник



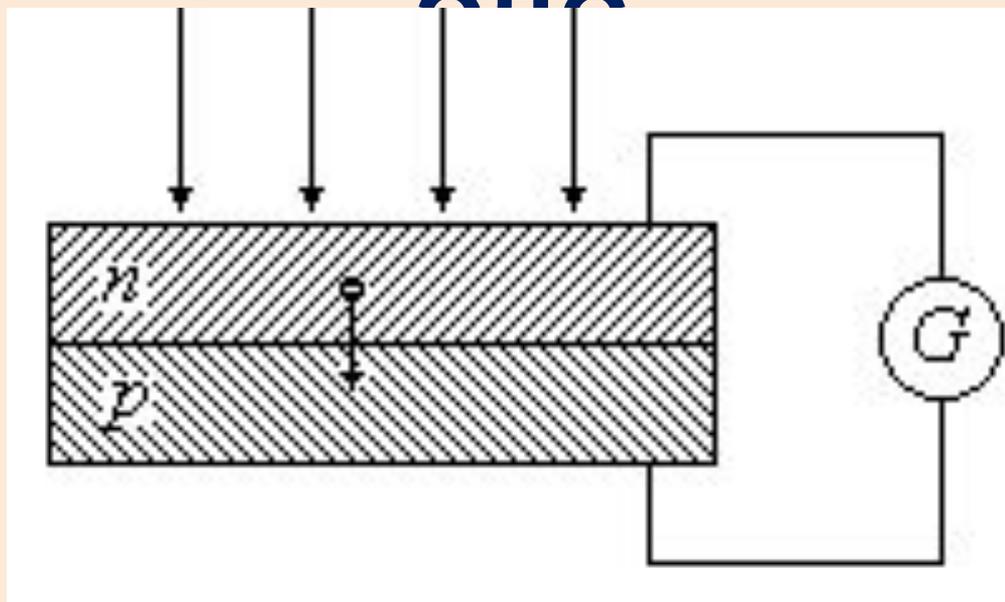
Энергетические схемы  
переходов в примесных  
полупроводниках  
(  - электроны,  - дырки).

# Вентильный

# фотоэффект

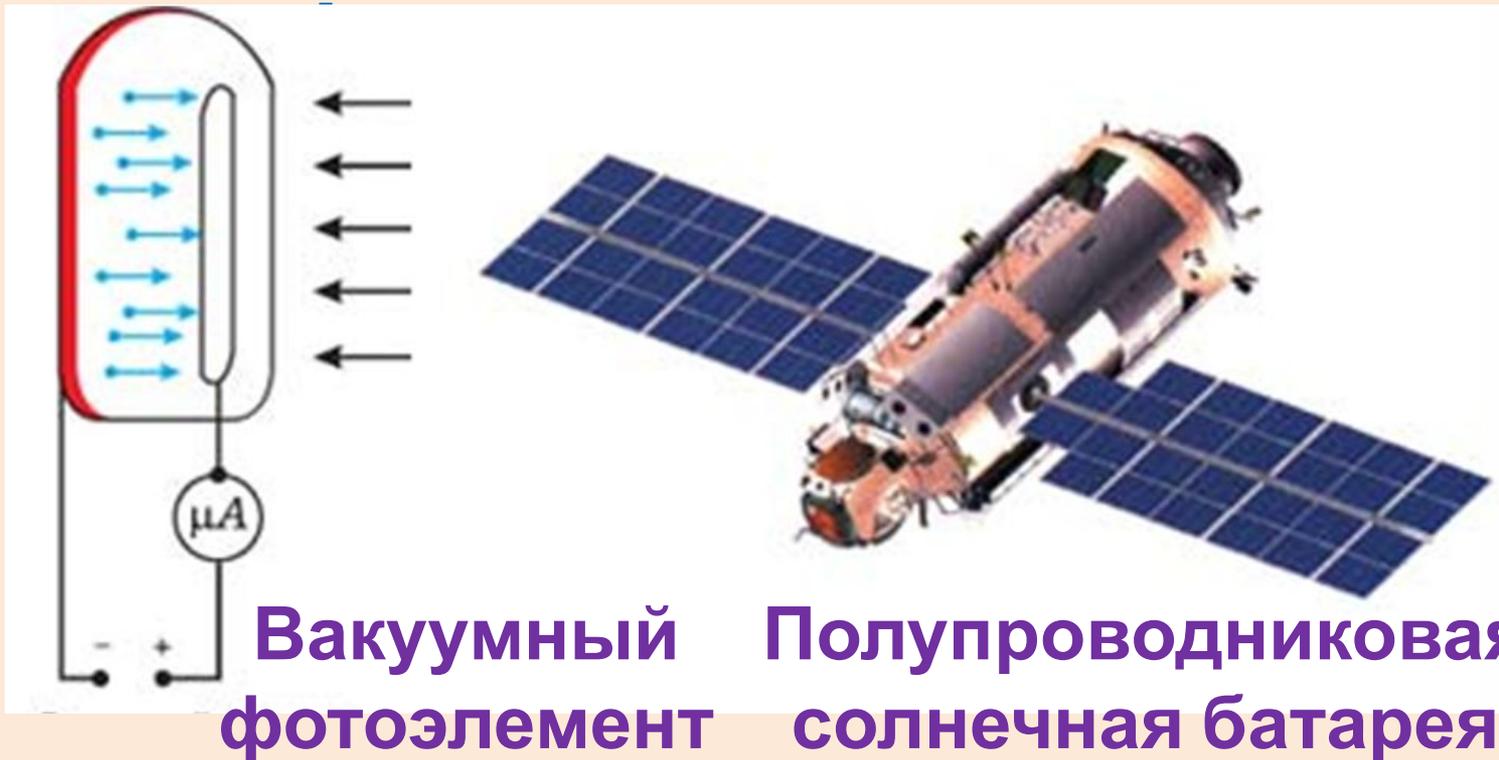
Наблюдается в области  $p-n$  перехода или на границе металл-полупроводник. За счет энергии падающего света в цепи возникает

ЭДС



# Применение фотоэффекта

Приборы, в которых фотоэффект используется для превращения энергии излучения в электрическую энергию, называются



Вакуумный фотоэлемент

Полупроводниковая солнечная батарея

**Фотоэффект широко применяется в различных областях техники (телевидение, фототелеграф, звуковое кино). Фотоэффект используется также при устройстве электронных преобразователей оптического изображения, усилителей яркости. С помощью фотоэффекта можно**

# ФОТОНЫ

Фотон - элементарная частица,  
которая движется со скоростью  
света и имеет энергию

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

# Масса фотона

Масса покоя фотона равна

нулю.

Массу движущегося фотона найдем  
из закона взаимосвязи массы и

энергии:

$$\varepsilon = mc^2$$

$$\varepsilon = h\nu$$

$$\varepsilon = \hbar\omega$$

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$$

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2}, \quad m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad m = \frac{\hbar\omega}{c^2}, \quad m = \frac{h}{\lambda c}$$

# Импульс фотона

$$p = mc, \quad p = \frac{\varepsilon}{c}, \quad p = \frac{h\nu}{c},$$

$$p = \frac{h}{\lambda}, \quad p = \frac{\hbar \omega}{c} = \hbar k$$

В векторной

$\hbar$  форме  $\hbar$

$$p = \hbar k$$

# Давление света

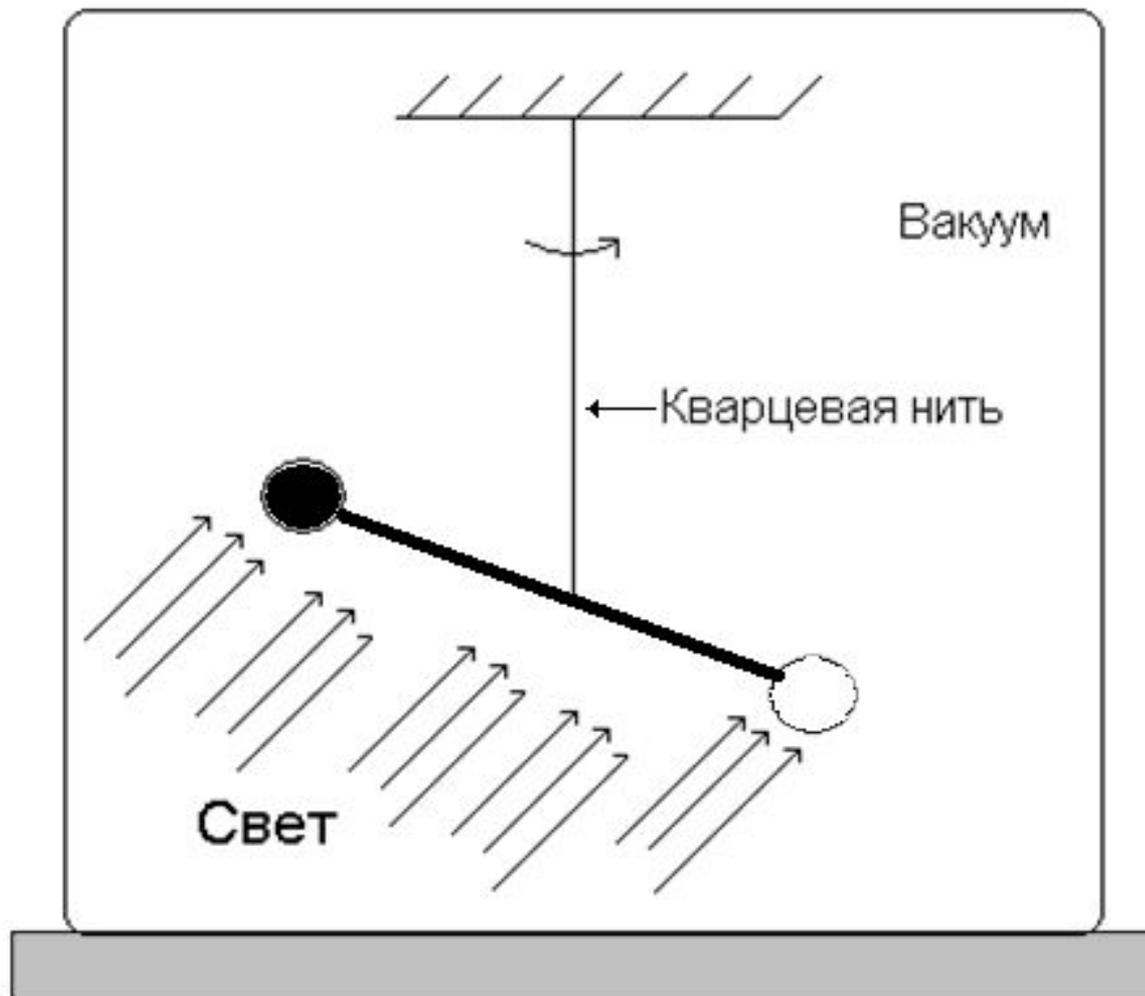


**Петр Николаевич  
ЛЕБЕДЕВ  
(1866—1912)**

**Основатель выдающейся школы физиков Московского университета. Блестящий экспериментатор. Первым измерил давление света на твердые тела, экспериментально доказав наличие импульса у электромагнитного излучения.**

**«Я всю жизнь воевал с**

# Опыт Лебедева



Если в единицу времени  
на единицу площади  
поверхности с  
коэффициентом  
отражения  $\rho$  падает  $N$   
фотонов, то  
 $\rho N$  фотонов отразится,  
а  $(1 - \rho N)$  фотонов

**Изменение импульса каждого поглощенного фотона:**

$$\Delta p_{\text{п}} = \frac{h\nu}{c}$$

**Изменение импульса каждого отраженного фотона:**

$$\Delta p_{\text{о}} = 2 \frac{h\nu}{c}$$

**Изменение импульса  $\Delta p_s$  1 кв.м поверхности за 1с равно давлению света:**

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p_s}{\Delta t \cdot \Delta S} = \Delta p_s, \text{ т.к. } \Delta t \neq 1 \text{ и } \Delta S \neq 1$$

$$p = \Delta p_s = 2 \frac{h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho N) = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N$$

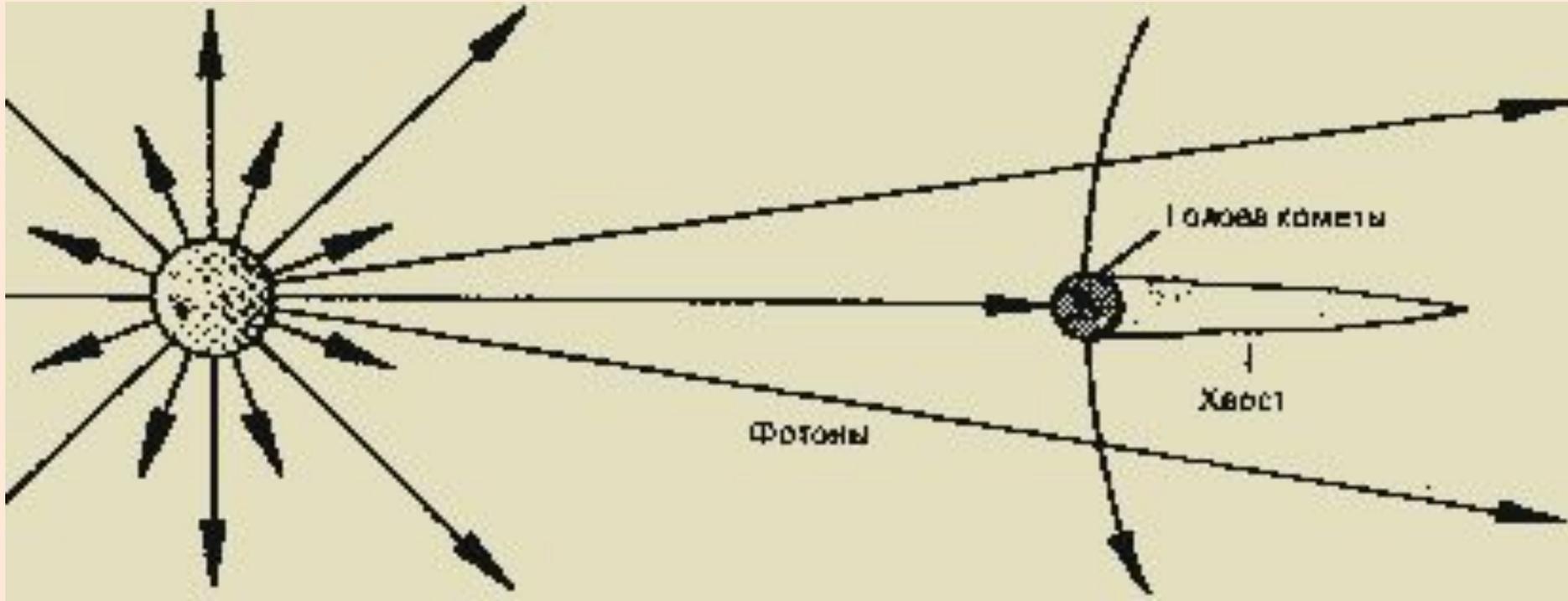
$$p = \frac{E}{c} (1 + \rho) = w (1 + \rho)$$

$E$  - энергия  $N$  фотонов, падающих на  $1 \text{ м}^2$  в  
1 с,

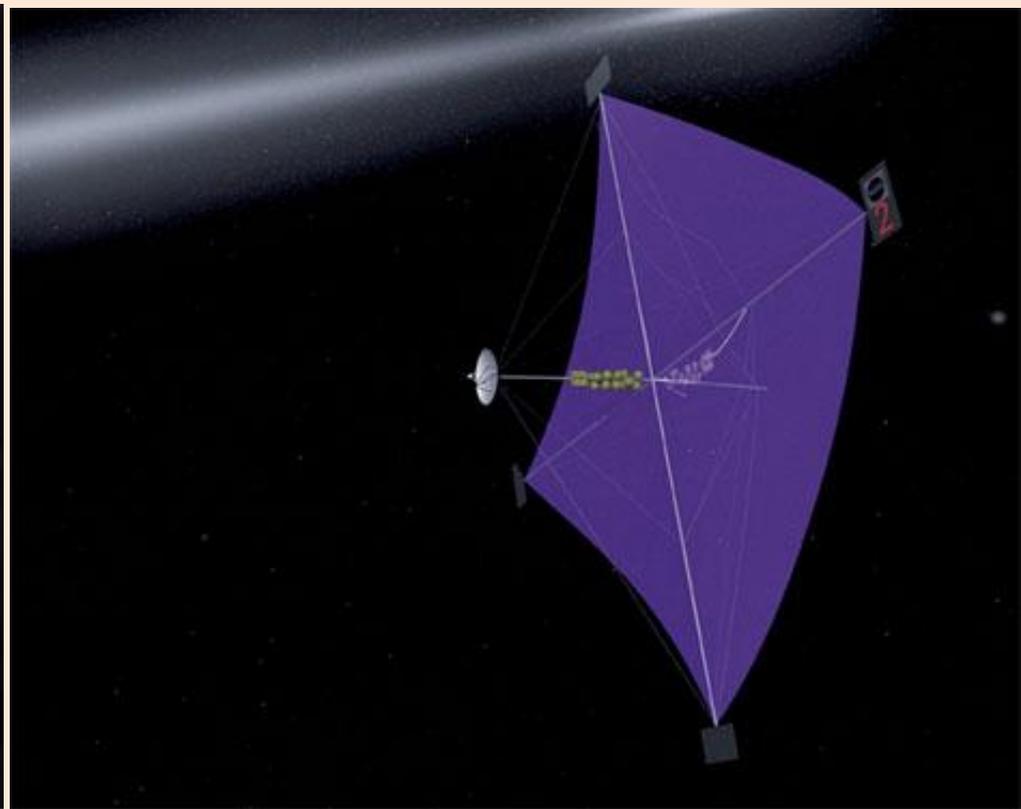
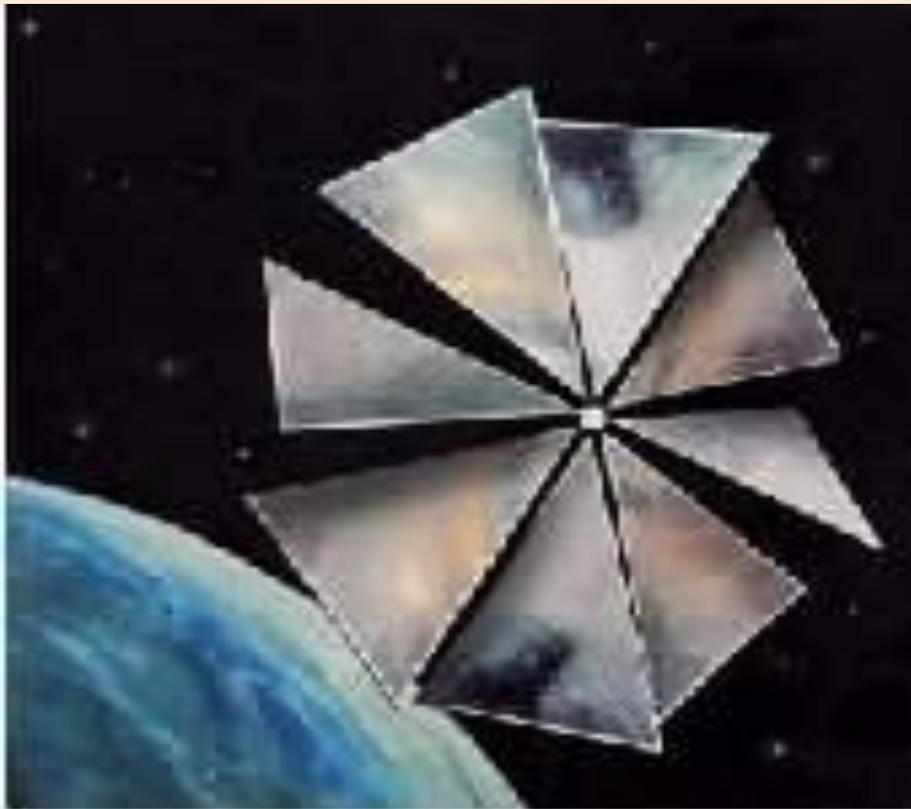
$$w = \frac{E}{c} -$$

объемная плотность энергии  
излучения.

# Давлением света объясняется форма кометных хвостов.



# Солнечный парус



# Эффект

Эффект Комптона — это увеличение

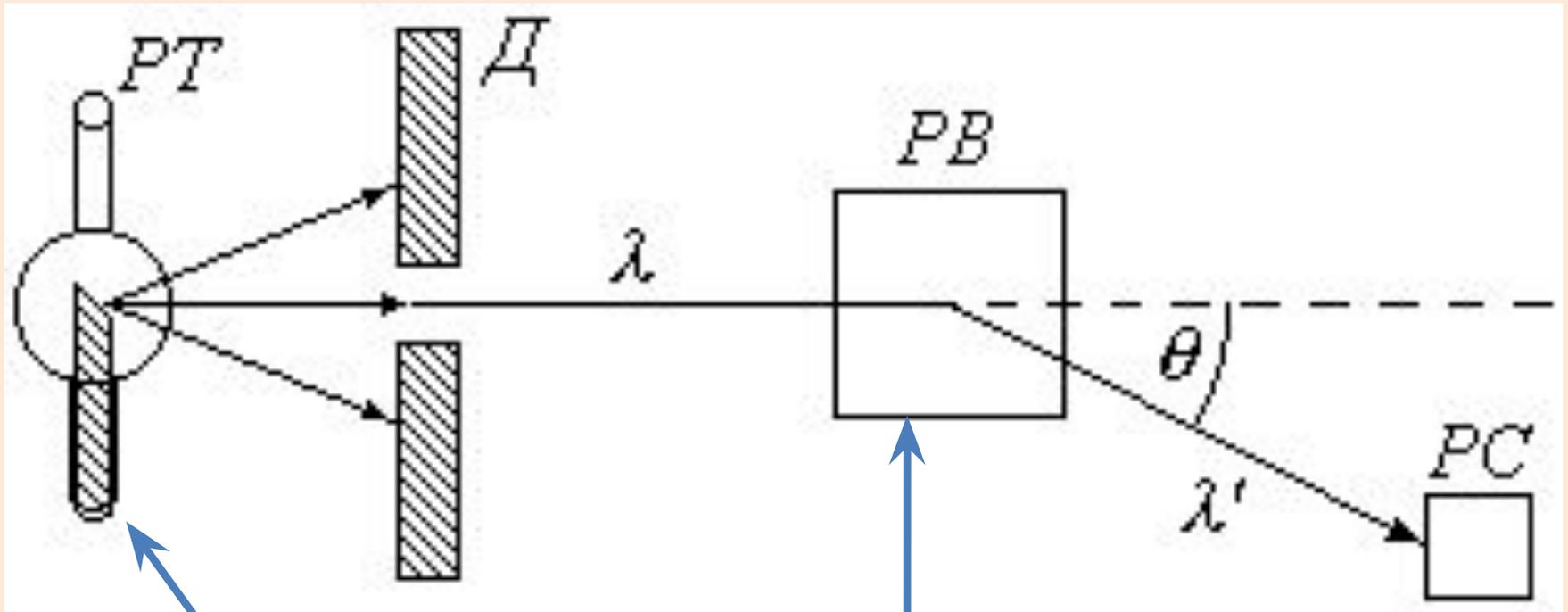
длины волны рентгеновского

излучения, рассеянного на свободных  
или слабосвязанных электронах



**Эффект Комптона можно  
объяснить только на  
основе корпускулярной  
природы света. В 1922 г. А.  
Комптон показал, что  
рентгеновский фотон и  
электрон взаимодействуют  
согласно законам упругого  
столкновения частиц.**

# Схема опыта Комптона

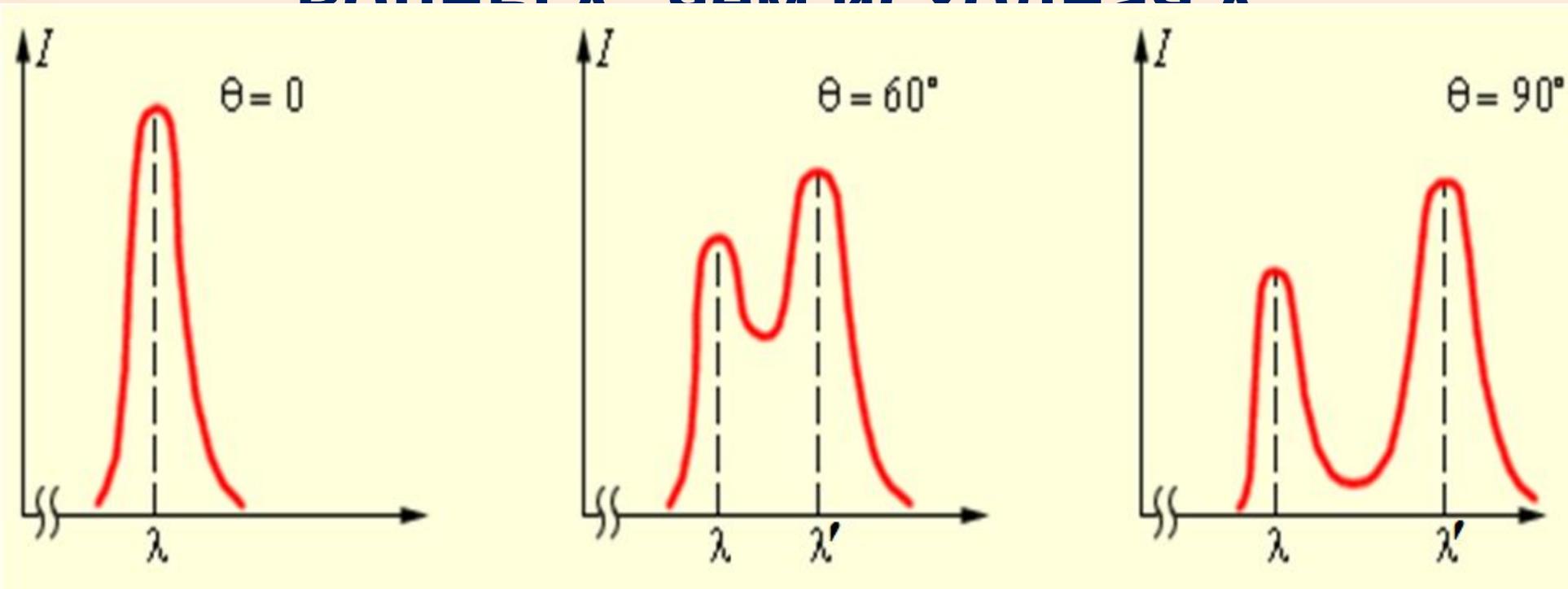


рентгеновская  
трубка

рассеивающее  
вещество

рентгеновский  
спектрограф

**Комптон обнаружил, что в  
рассеянном свете присутствует  
компонента с большей длиной  
волны  $\lambda'$  чем исходная  $\lambda$**



# Результат опыта

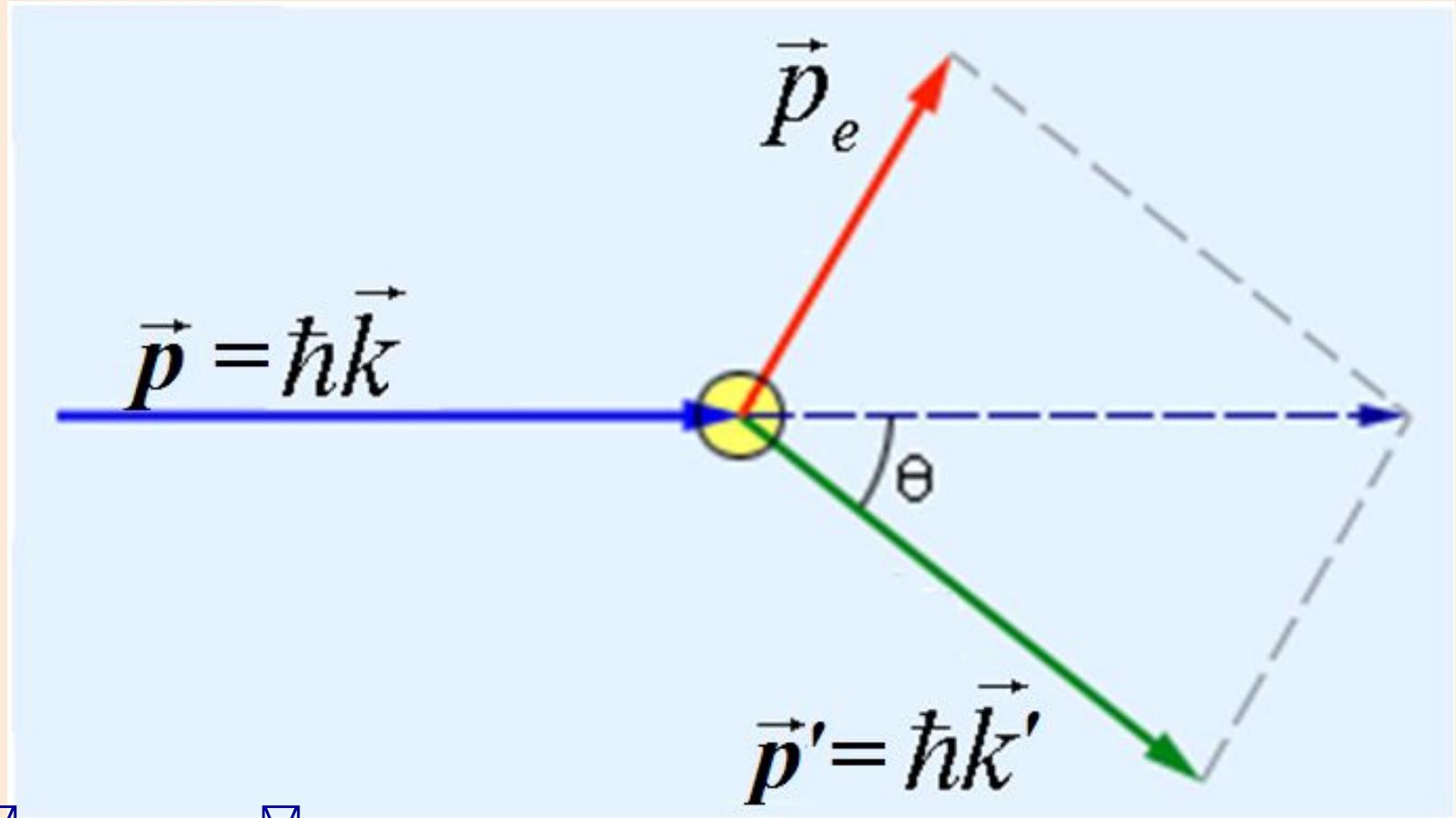
Разность длин волн рассеянного и падающего излучения  $\Delta\lambda$  зависит от угла рассеяния  $\theta$  и не зависит от вещества и длины волны.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$\lambda_c$  — КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА  
ВОЛНЫ

$$\lambda_c = 2,426 \text{ пм}$$

# Теория эффекта Комптона



$\boxtimes$   $p$  и  $\boxtimes$   $p'$  — импульсы фотонов до и после рассеяния  
 $\boxtimes$   $p_e$  — импульс электрона отдачи,  $\theta$  — угол рассеяния

Для упругого удара можно записать законы сохранения импульса и энергии в релятивистской форме.

$$\vec{k} = \vec{k}' + \vec{p}_e$$

$$\omega + m_e c^2 = \omega' + c \sqrt{p_e^2 + m_e^2 c^2}$$

**Применив законы сохранения,  
можно получить формулу  
Комптона и вычислить**

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2.426 \times 10^{-12} \text{ м}$$