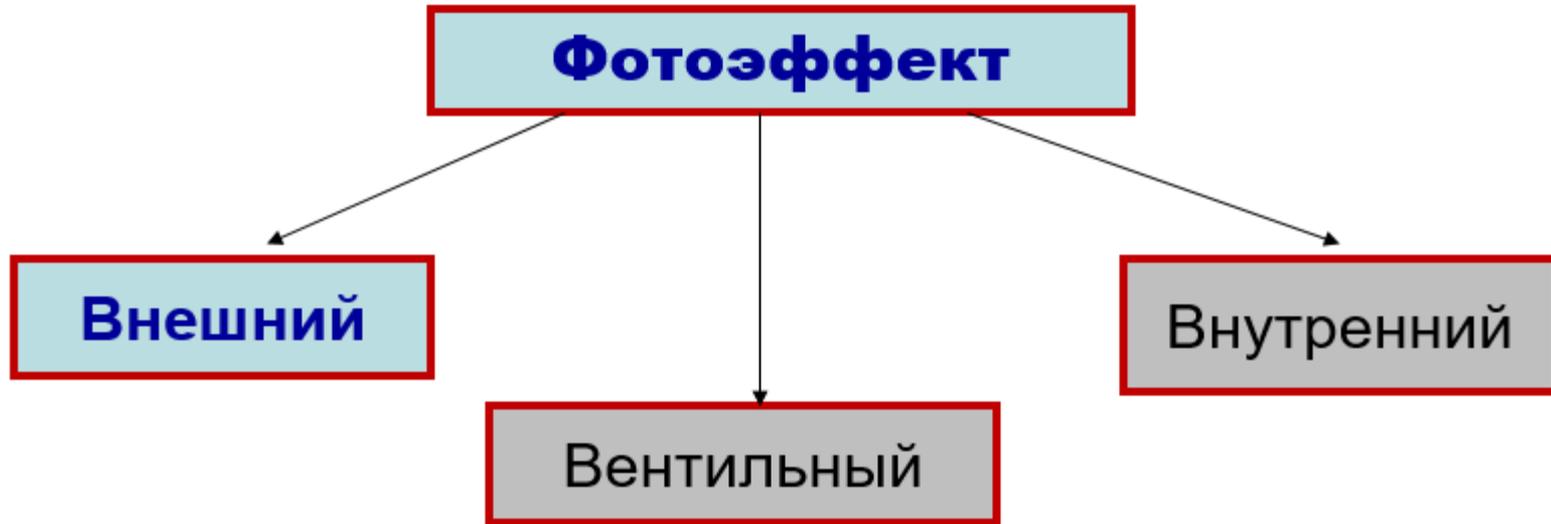
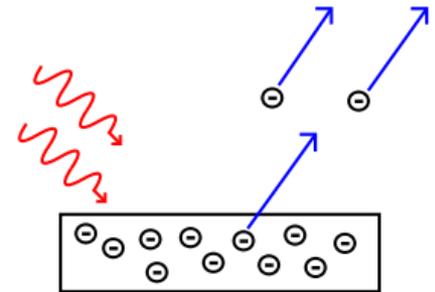


# ФОТОЭФФЕКТ. ЭФФЕКТ КОМПТОНА



**Фотоэффект** (внешний) – испускание электронов веществом под действием света.



Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются **фотоэлектронами**, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется **фототоком**.

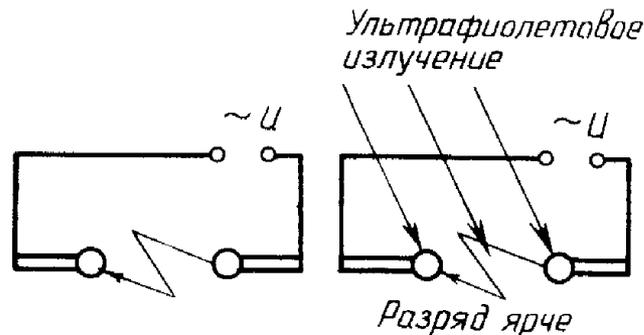
**Внутренний фотоэффект** – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

**Вентильный фотоэффект** – это возникновение эдс (фото-эдс) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля).

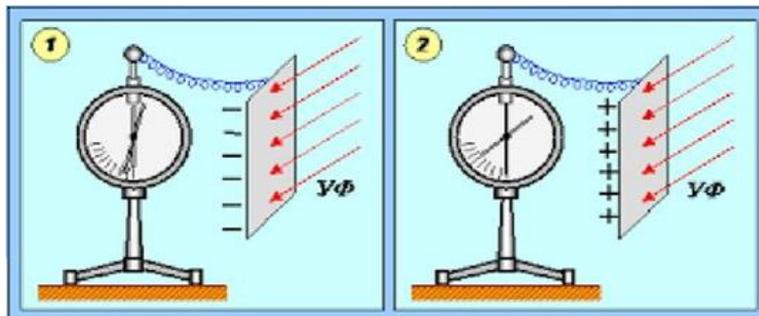


Г.Герц

Впервые явление фотоэффекта было открыто **Г.Герцем** в 1887г.



Г. Герц установил, что ультрафиолетовое излучение усиливает электрический разряд между цинковыми электродами.



Цинковую пластину, соединенную с электроскопом, заряжают отрицательно и облучают ультрафиолетовым светом. Она быстро разряжается. Если же ее зарядить положительно, то заряд пластины не изменится.

**Свет выбивает из вещества электроны**

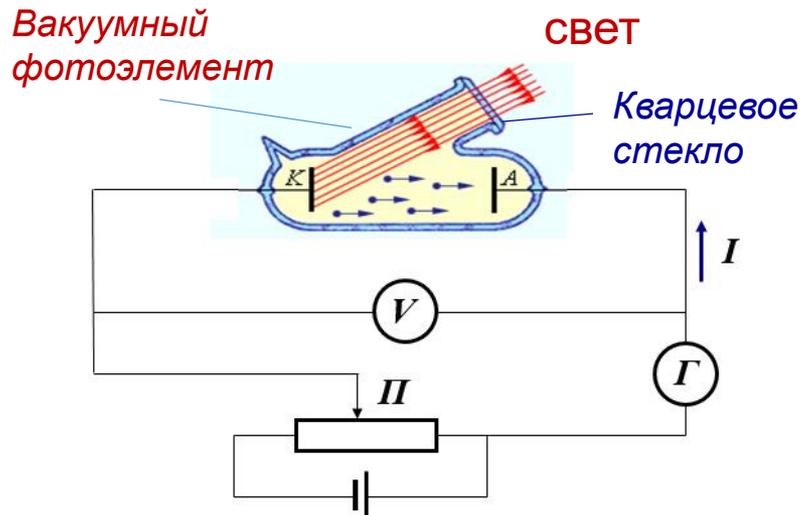


**А. Г. Столетов**

1888 – 1889 гг. - **А.Г. Столетов** детально исследовал и установил законы фотоэффекта.

*При исследовании фотоэффекта необходимо установить связь между характеристиками падающего света (интенсивность, частота) и характеристиками потока вылетающих фотоэлектронов (количество фотоэлектронов и их кинетическая энергия).*

Схема установки для изучения фотоэффекта



**К** - катод

**А** - анод

**П** - потенциометр

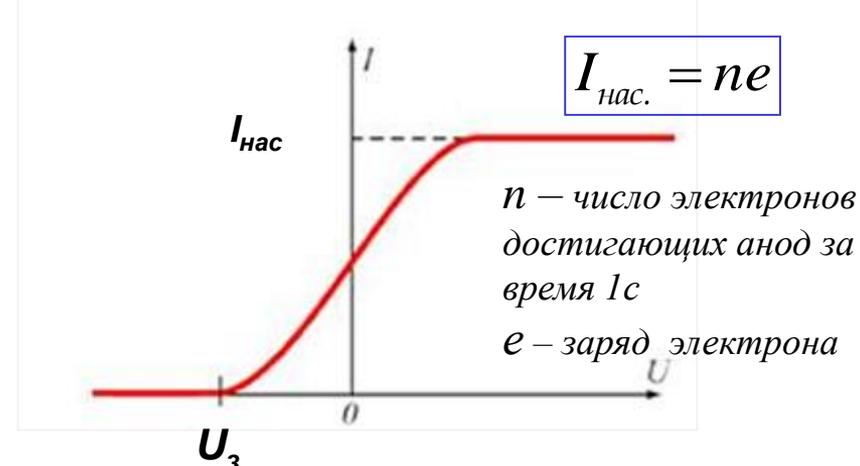
**V** - вольтметр

**Г** - гальванометр

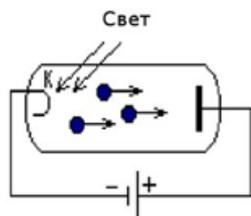
**Вольт-амперная характеристика (ВАХ)** фотоэлемента — это **зависимость фототока от напряжения между анодом и катодом**.

## Анализ ВАХ

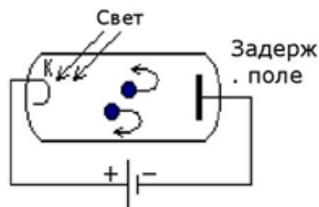
1. При  $\uparrow U$  - сила тока  $I \uparrow$  (все большее число фотоэлектронов достигает анода).
2. Максимальное значение тока  $I_{нас}$  - **фототок насыщения** (все электроны, испускаемые катодом, достигают анод).



3. При  $U=0$  сила тока  $I \neq 0$  (часть электронов имеют такую  $E_k$ , что могут достигнуть анода без внешнего поля).



4. Пологий характер **ВАХ** показывает, что электроны вылетают из катода с различными скоростями.

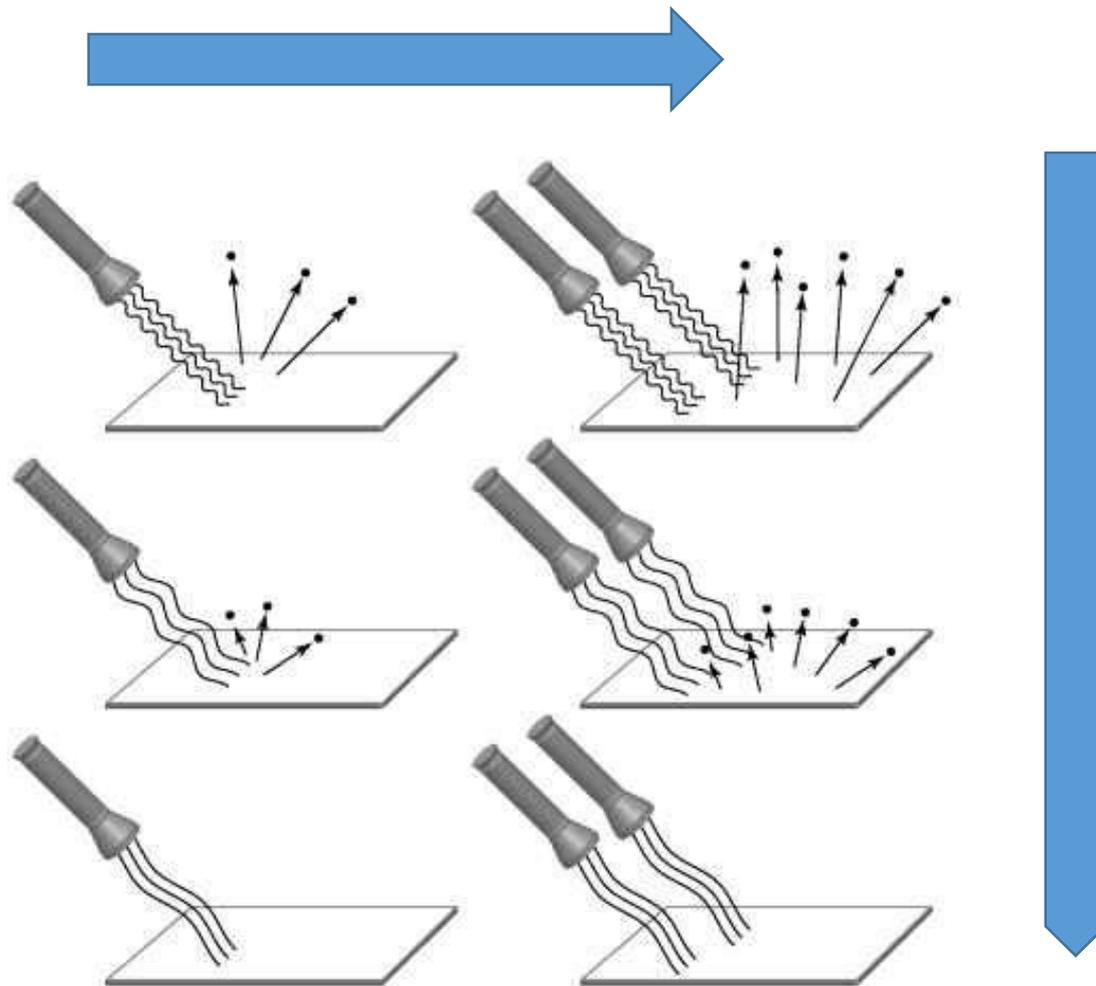


5. Для того, чтобы  $I=0$  необходимо приложить **задерживающее напряжение  $U_3$** . При  $U=U_3$  ни один из фотоэлектронов не может преодолеть задерживающего поля и достичь анода.

$$\frac{m v_{\max}^2}{2} = e U_3$$

От чего зависит фототок насыщения и задерживающее напряжение?

Увеличение интенсивности света



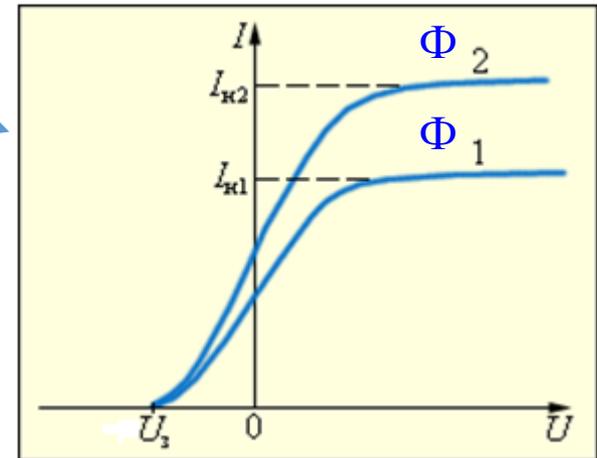
Уменьшение частоты света

# Законы фотоэффекта

$\Phi$ -световой  
поток

1. При фиксированной частоте падающего света **фототок насыщения** пропорционален **интенсивности света**.

$\nu = \text{const} (\Phi_1 < \Phi_2)$

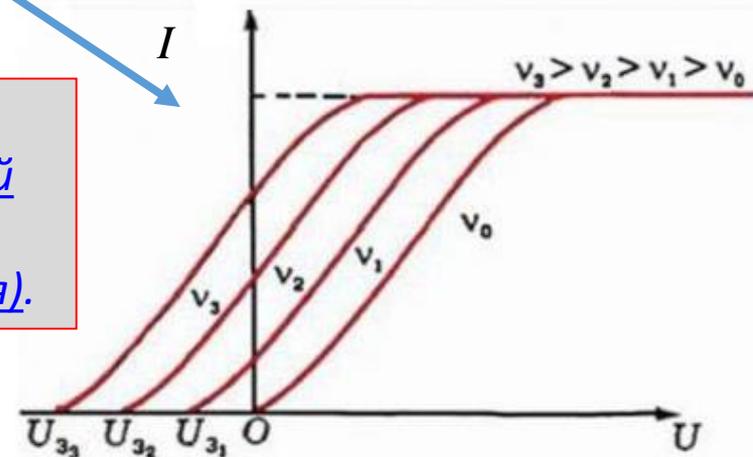


2. **Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов** пропорциональна **частоте падающего света** и не зависит от интенсивности света.

$$\frac{m\nu_{max}^2}{2} = eU_3$$

3. Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта** – минимальная частота, ниже которой фотоэффект невозможен (или максимальная длина волны, выше которой фотоэффект не наблюдается).

$\Phi = \text{const}$



4. Фотоэффект безынерционен (фототок возникает практически одновременно с освещением фотокатода).

## Трудности классического объяснения фотоэффекта

**Классическая модель фотоэффекта:** ЭМВ «раскачивает» электроны вещества. Электроны ускоряются. Некоторые из них вылетают из металла.

Однако в рамках таких представлений невозможно понять и объяснить законы фотоэффекта.

Чем больше интенсивность света, тем больше напряжённость электрического поля в электромагнитной волне, тем больше сила, действующая на электрон, тем больше энергия его колебаний, и с тем большей кинетической энергией электрон вылетит из катода. **Но эксперимент показывает иное.**

С ростом интенсивности света растёт и сила, действующая на электроны; поэтому даже при низкой частоте света электрон рано или поздно будет вырван из вещества — когда интенсивность достигнет достаточно большого значения. **Однако красная граница ставит жёсткий запрет на вылет электронов при низких частотах падающего излучения.**

Согласно классической модели вылет электронов из вещества должен происходить не мгновенно, а лишь после накопления атомом определённой энергии. **Из опыта следует, что вылет электронов с поверхности вещества происходит сразу после поглощения света веществом (примерно через  $10^{-8}$  с).**

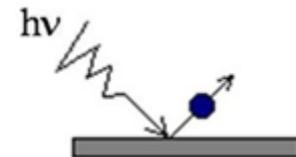
# Квантовая теория фотоэффекта

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе квантовой теории:

Свет (излучение) не только испускается отдельными порциями - квантами (Планк), но и (Эйнштейн) распространяется в пространстве, и поглощается веществом отдельными порциями - квантами, энергия которых

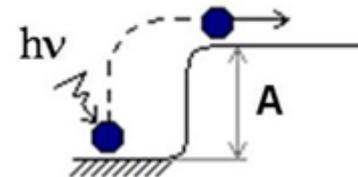
$$\varepsilon = h\nu$$

Эйнштейн: каждый квант поглощается только одним электроном.



Если энергия кванта больше чем работа выхода электрона из металла, т.е.  $h\nu \geq A_{\text{вых}}$ , то электрон может покинуть поверхность металла. Остаток энергии кванта составляет кинетическую энергию электрона, покинувшего вещество.

$$\frac{m v_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}} \quad (1)$$



$A_{\text{вых}}$  – минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы удалить его из металла. (Зависит от природы вещества и состояния поверхности).

По закону сохранения энергии:

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

- уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

(2)

$\nu$  - частота излучения

$h$  - постоянная Планка

$h\nu$  - энергия кванта

$A_{\text{вых}}$  - работа выхода электрона

$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$  - максимальная кинетическая энергия электрона

$m$  - масса электрона

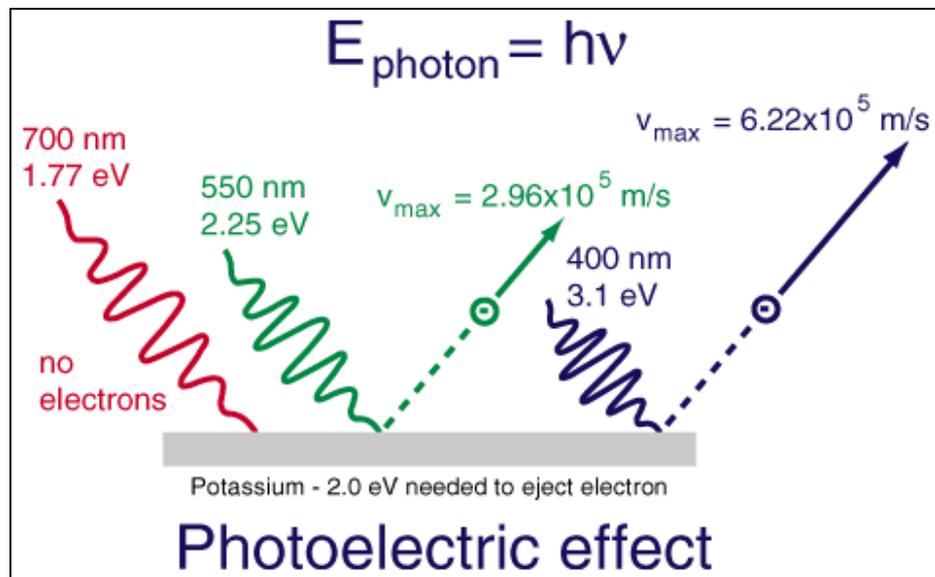
$v_{\text{max}}$  - максимальная скорость электрона

**Квантовая теория дает следующие объяснения законам фотоэффекта:**

При увеличении интенсивности монохроматического излучения растет число **поглощенных металлом квантов энергии**, а следовательно, и **число вылетающих** из него электронов, поэтому **фототок прямо пропорционален интенсивности излучения**, (**первый закон**).

Из уравнения (2) видно, что **кинетическая энергия вылетающих электронов зависит** только от рода металла ( $A_{\text{вых}}$ ) и **от частоты**  $\nu$  (или длины волны излучения  $\lambda$ ), т. е. от энергии фотонов, а от интенсивности излучения не зависит (**второй закон**).

Если  $h\nu < A_{\text{вых}}$ , то при любой интенсивности излучения электроны вылетать из металла не будут (третий закон)



$$h\nu_0 = A_{\text{вых}}$$

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

**- красная граница фотоэффекта**

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

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

**- красная граница фотоэффекта**

Фотоэффект наблюдается, если

$$\nu \geq \nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

или

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

$$1\text{эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл} \times 1\text{В} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$$

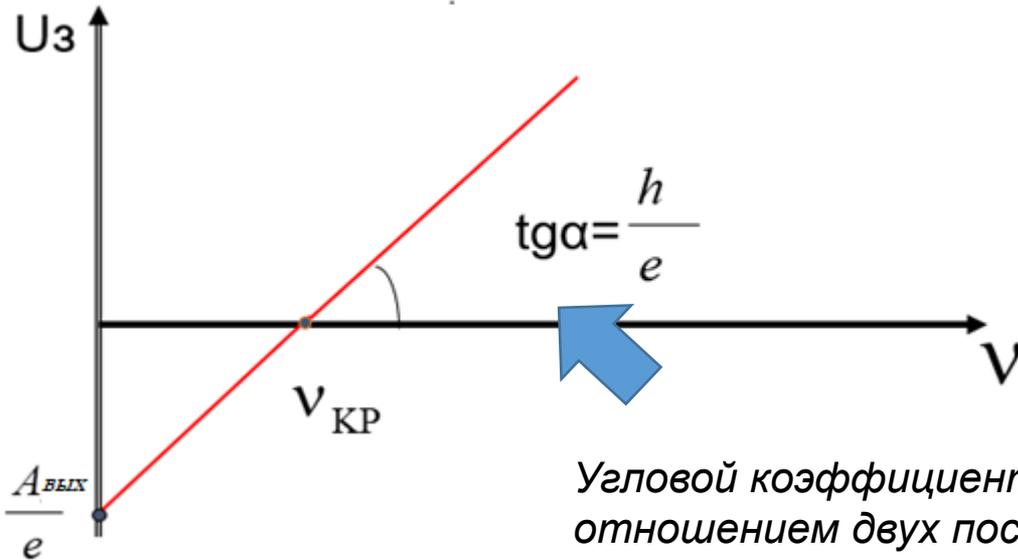
*эВ* – электрон-вольт – единица измерения энергии в атомной и ядерной физике

## Экспериментальное определение величин постоянной Планка, красной границы фотоэффекта и работы выхода фотоэлектронов с поверхности катода

Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:

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

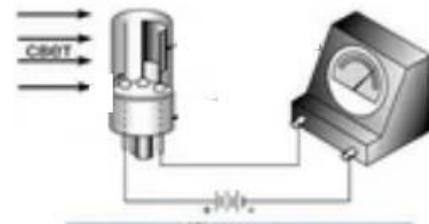
$$U_3 = f(\nu)$$



Угловой коэффициент определяется отношением двух постоянных величин: постоянной Планка  $h$  и зарядом электрона  $e$ .

# Применение фотоэффекта

На использовании внутреннего фотоэффекта основано действие **фотоэлементов** – устройств, преобразующих световую энергию в электрическую, или изменяющих свои свойства под действием падающего света.



## Вакуумные фотоэлементы



широко применяют в различных схемах автоматики для управления электрическими цепями с помощью световых пучков.



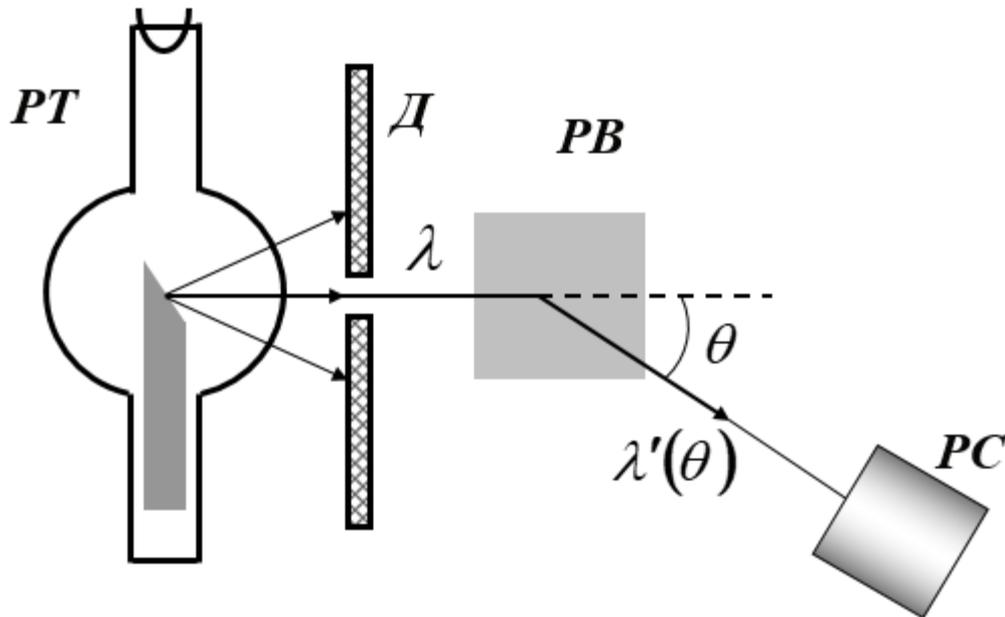
## Полупроводниковые фотоэлементы



# ЭФФЕКТ КОМПТОНА

А. Комптон изучал рассеяние рентгеновского излучения различными веществами и обнаружил в 1922г., что частота рассеянного света меньше частоты падающего света.

## Схема эксперимента



*РТ* – рентгеновская трубка

*Д* - диафрагма

*РВ* - рассеивающее вещество

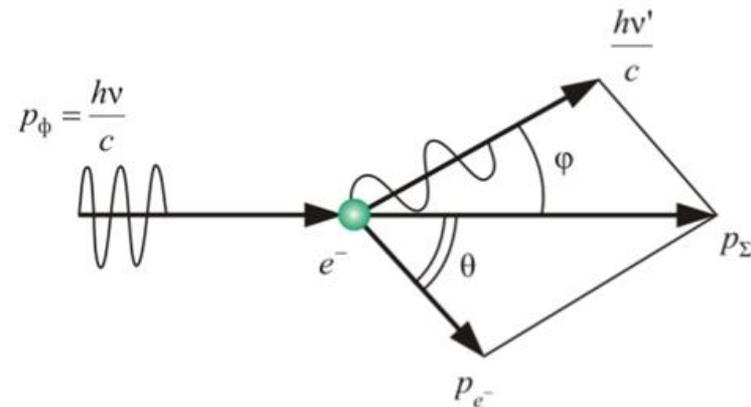
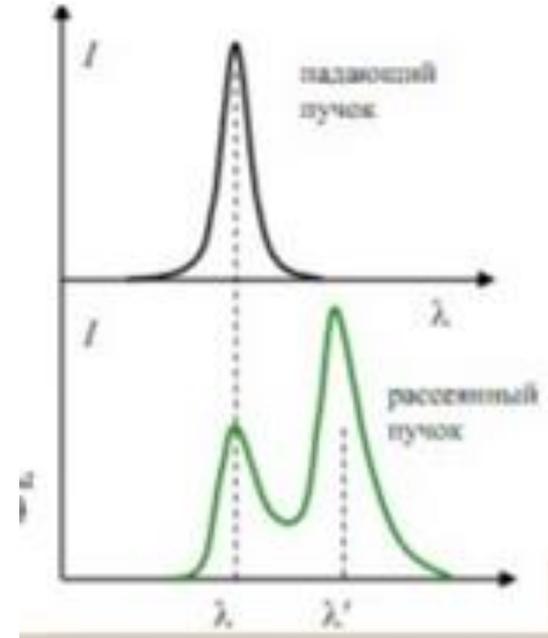
*РС* – рентгеновский спектрограф

## Результаты экспериментов:

1. В составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны  $\lambda$  наблюдается также более длинноволновое излучение  $\lambda'$ .

2. Разность  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  не зависит от длины волны падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния  $\theta$  («тэта»).

Уменьшение частоты указывало на потерю энергии. Комптон показал, что обнаруженный им эффект можно объяснить на основе фотонной теории света, т.е. соударением налетающих фотонов со свободными электронами вещества.



Применяя к столкновениям фотонов и электронов законы сохранения энергии и импульса, получают:

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

- изменение длины волны рентгеновского излучения при рассеянии фотонов на электронах

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,4 \times 10^{-12} \text{ м} - \text{комптоновская длина волны электрона}$$

$\lambda_0$  - длины волны падающего излучения

$m_e$  - масса электрона

$\lambda$  - длины волны рассеянного излучения

$h$  - постоянная Планка

$\theta$  - угол рассеяния фотона

$c$  - скорость света

Эффект Комптона является одним из доказательств корпускулярных свойств излучения и подтверждает существование фотонов.

# Фотон - квант электромагнитного излучения

Некоторые свойства фотонов

1. Не имеют заряда
2. Двигутся со скоростью света
3. Существуют только в движении
4. Энергия фотонов

$$\varepsilon = h \nu$$

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

5. Масса фотонов

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

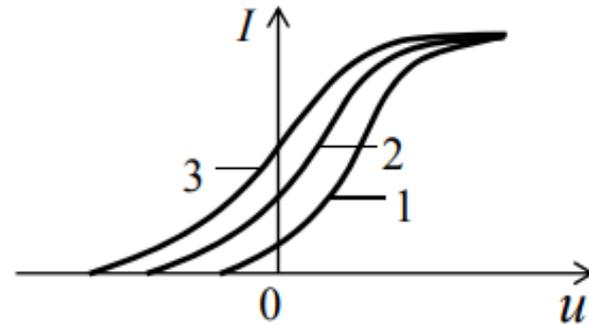
6. Импульс фотонов

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

7. Оказывают давление на вещество

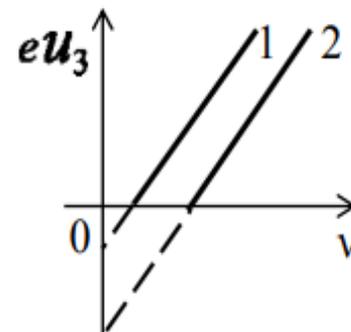
## ТЕСТЫ

- 1) Из графика зависимости силы фототока от приложенного напряжения для некоторого металла следует, что число фотоэлектронов, образованных при этом ...



- 1)  $n_1 > n_2 > n_3$
- 2)  $n_1 = n_2 = n_3$
- 3)  $n_1 < n_2 < n_3$
- 4)  $n_1 > n_2 < n_3$

- 2) Из графика следует, что работа выхода электрона для двух различных веществ при фотоэффекте ...



- 1)  $A_1 > A_2$
- 2)  $A_1 = A_2$
- 3)  $A_1 < A_2$
- 4) по этому графику работу выхода оценить нельзя

3) Величина задерживающего напряжения при фотоэффекте зависит от ...

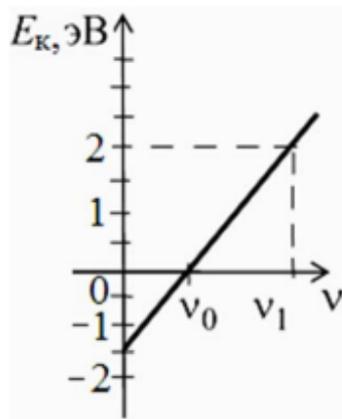
- 1) интенсивности светового потока
- 2) частоты света
- 3) интенсивности светового потока и частоты света
- 4) материала катода и интенсивности светового потока

4) Минимальная частота фотона, вызывающего фотоэффект определяется формулой ...

- 1)  $\frac{hc}{A_{\text{ВЫХ}}}$
- 2)  $\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{hc}$
- 3)  $\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{hc}$
- 4)  $\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}$

5) График показывает зависимость кинетической энергии электронов от частоты падающих на катод фотонов. Из графика следует, что для частоты  $\nu_1$  энергия кванта равна ... эВ.

- 1) 0,5
- 2) 3,5
- 3) 2,0
- 4) 3,0



6)

Работа выхода электрона с поверхности некоторого металла  $4,7$  эВ. Из приведенного графика зависимости фототока от напряжения следует, что энергия фотона, вызывающего фотоэффект, равна ... эВ.

