

ФОТОЭФФЕКТ

МИЭТ. Кафедра ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Л.В.В

Внешний фотоэффект

(фотоэлектронная эмиссия) – *испускание электронов веществом при поглощении электромагнитного излучения.*

Внутренний фотоэффект — явления, при которых, в отличие от внешнего фотоэффекта, оптически возбужденные электроны остаются внутри освещенного вещества, не нарушая его электрической нейтральности. При этом в веществе изменяется концентрация носителей заряда, подвижность и другие свойства. Внутренний фотоэффект наблюдается в полупроводниках и диэлектриках.

Фотоэлектронная эмиссия из металла

Схема вакуумного фотоэлемента

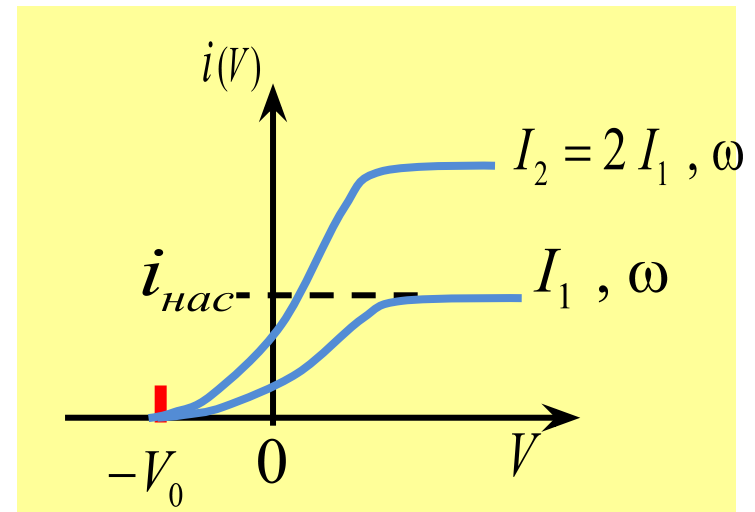
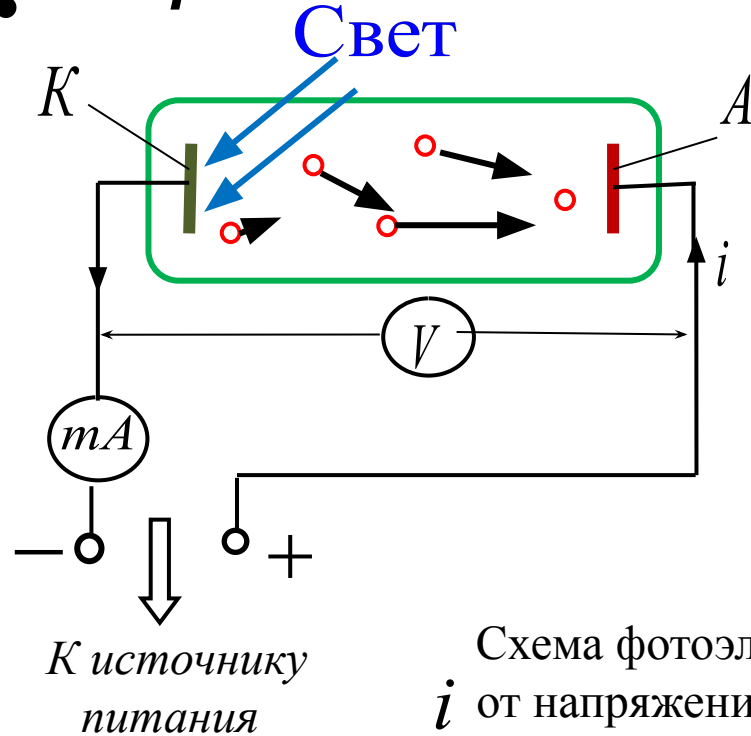
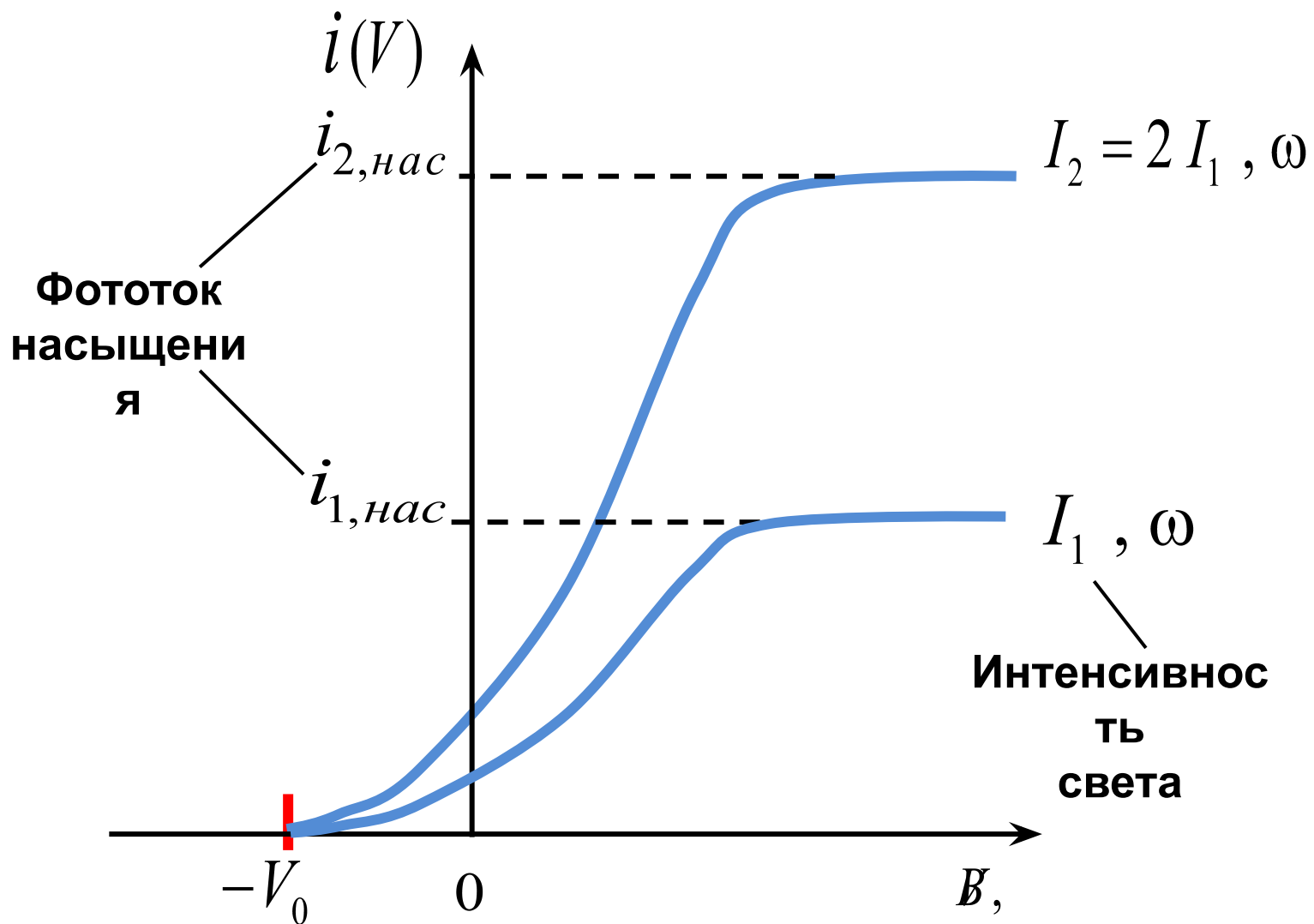


Схема фотоэлемента и зависимость фототока i от напряжения V для двух интенсивностей света I_1 и I_2 одной частоты.



Зависимость фототока i от напряжения V для двух интенсивностей света одной частоты ω .

Зависимость фототока от напряжения. Фототок насыщения. Закон Столетова.

Положительное напряжение («+» на аноде) соответствует ускоряющему электрическому полю, в которое попадают вылетающие из катода фотоэлектроны.

Чем больше интенсивность света, тем больше число фотоэлектронов, вылетающих из катода в единицу времени, тем больше фототок.

При достаточно больших положительных напряжениях все фотоэлектроны достигают анода, обуславливая фототок насыщения $i_{нас}$.

Фототок насыщения пропорционален интенсивности света I :

$$i_{нас} = e N_1 \propto I \quad (\text{Закон А.Г.Столетова, обнаружен в 1888 г.})$$

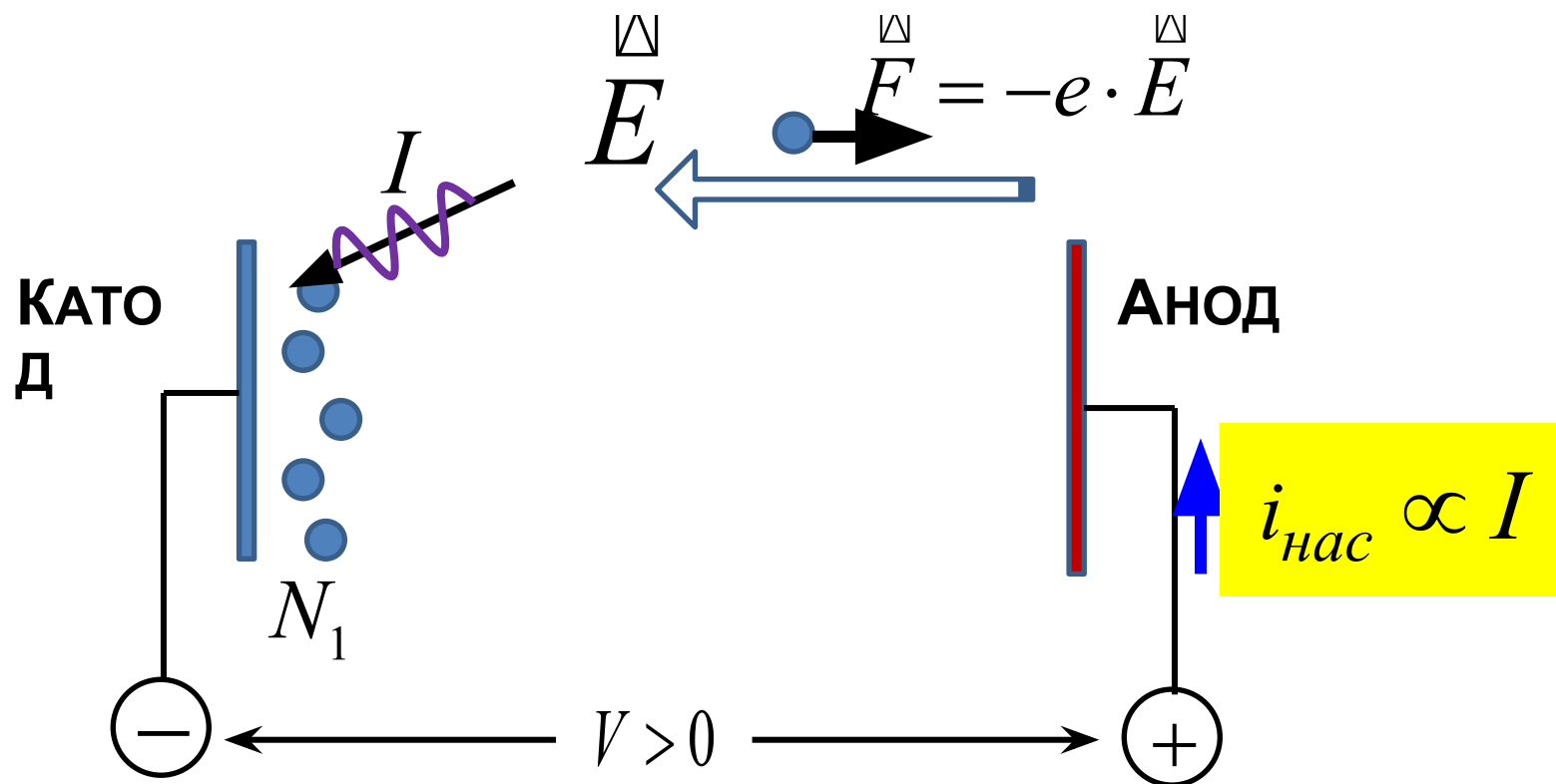
где e – элементарный заряд,

N_1 – число фотоэлектронов, вылетающих из катода в единицу времени.

Закон Столетова подтверждается экспериментально при любых сколь угодно малых интенсивностях света.

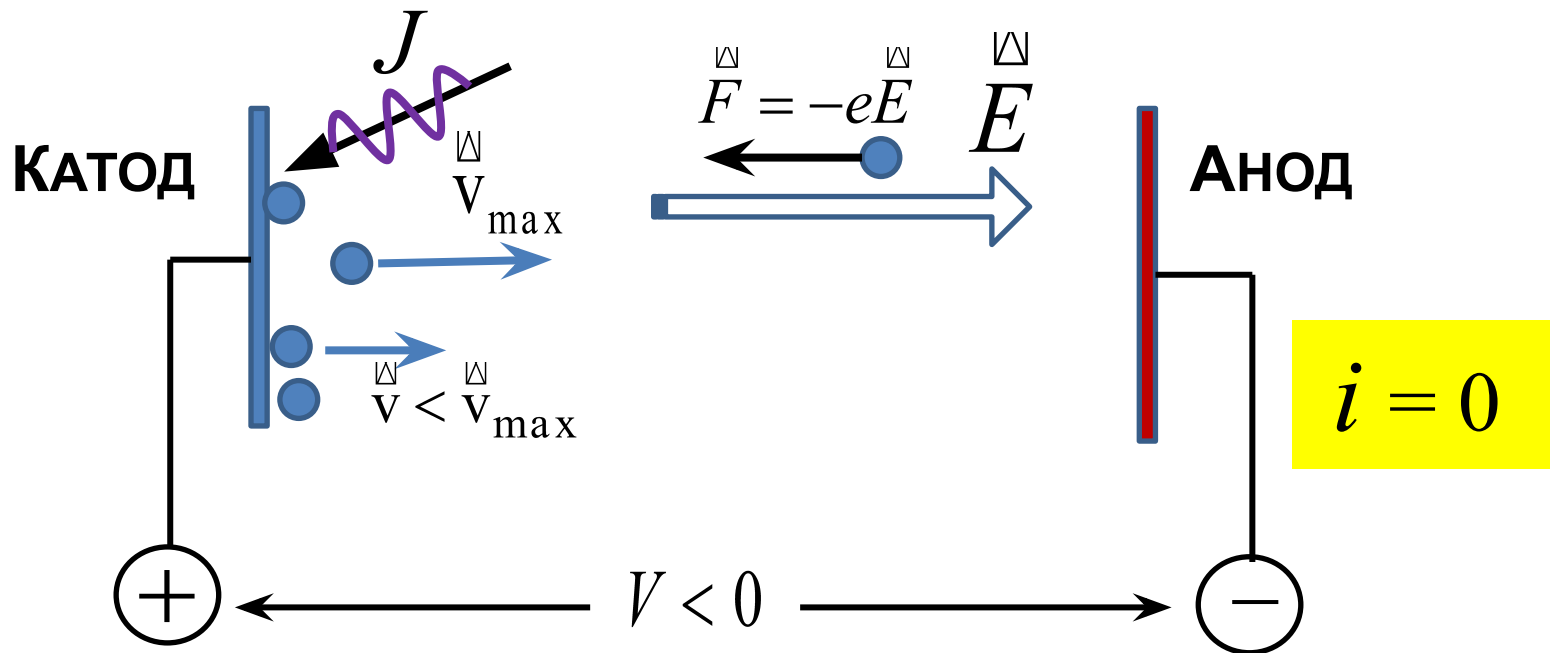
Фототок насыщения. Закон Столетова.

Интенсивность света $I = \text{const}$, $V > 0$, $i = i_{\text{нас}}$



Запирающая разность потенциалов V_0

Напряжение между анодом и катодом $V = -V_0$

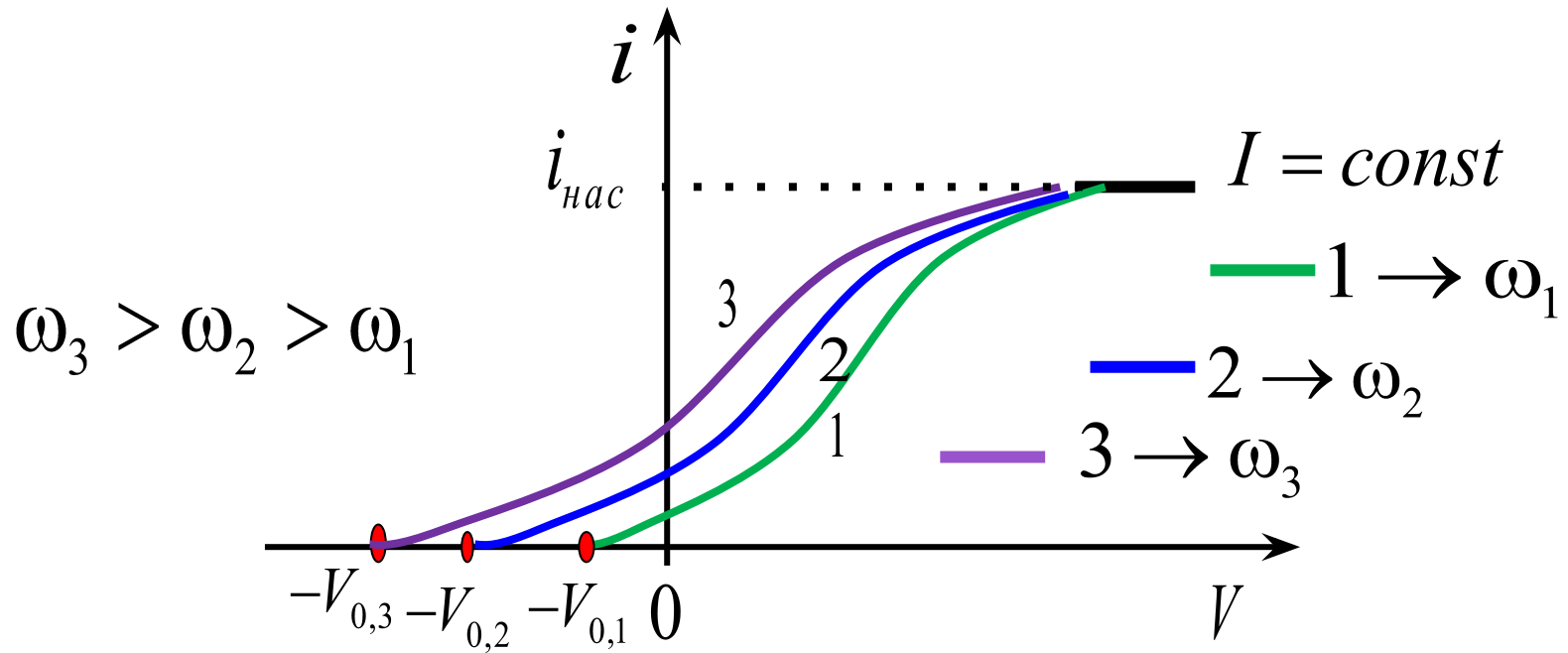


Запирающая разность потенциалов V_0 не зависит от интенсивности I .

$$eV_0 = \frac{m v_{\max}^2}{2}$$

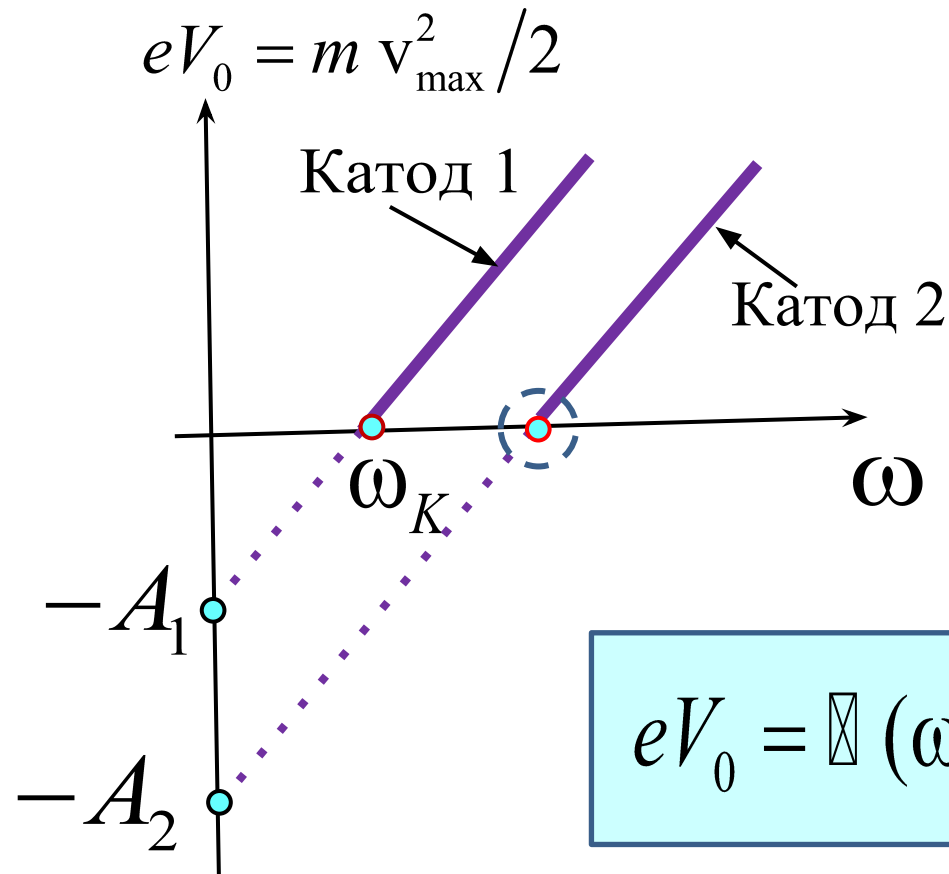
$$0 \leq v \leq v_{\max}$$

Фотоэффект при поглощении катодом света разных частот при неизменной интенсивности I .



Графики зависимостей фототока i от напряжения V между анодом и катодом при поглощении катодом излучения разных частот ω .

Зависимость $\frac{m v_{\max}^2}{2}$ от частоты излучения, падающего на катод .



Графики зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты и материала катода.

В экспериментах обнаружено:

1. Для каждого вещества катода существует своя граничная частота ω_K , такая, что

2. Скорость электронов и их кинетическая энергия с частотой фотоэффекта не вызывает.

находятся в пределах:

$$0 \leq v \leq v_{\max}$$

$$0 \leq \frac{mV^2}{2} \leq \frac{mV_{\max}^2}{2}$$

3. Максимальная кинетическая энергия и запирающая разность потенциалов связаны

соотношением:

$$eV_0 = \frac{m v_{\max}^2}{2}$$

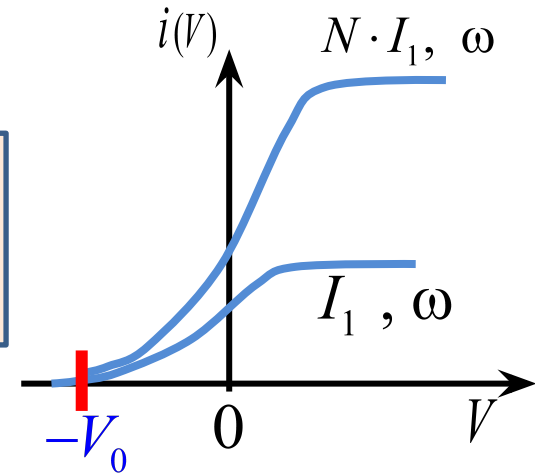
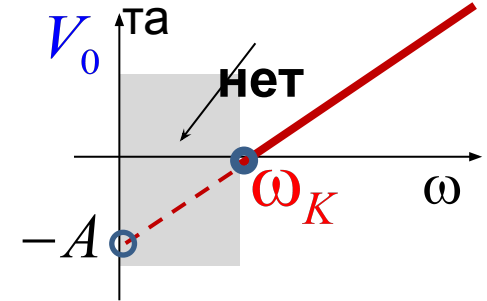
4. $\frac{m v_{\max}^2}{2}$ и V_0 имеют одно и то же

значение при любой

5. Запирающая разность потенциалов зависит от материала катода и от

частоты.

Фотоэффект



$$eV_0 = \hbar (\omega - \omega_K)$$

Классические представления о природе света

- Классическая *волновая теория* рассматривает излучение как электромагнитные волны.
- Поглощение света – непрерывный процесс передачи энергии, в результате металл нагревается.
- Количество переданной энергии при поглощении определяется интенсивностью падающего света

$$J = \langle W \rangle c$$

$$\langle W \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$$

где $\langle W \rangle$ – плотность энергии световой волны, E_0 – амплитуда

Противоречия закономерностей фотоэффекта с классическим представлением о природе света.

Ожидаемый классический результат: При большей интенсивности света электроны поглощают больше энергии и после выхода из металла должны иметь большее значение кинетической энергии.

Передача энергии электронам определяется квадратом амплитуды электрического поля световой волны, а не частотой.

Эксперимент: 1. От интенсивности зависит только число вылетающих электронов в единицу времени, которое определяет величину тока насыщения $I_{\text{нас}}$.
2. $m v_{\text{max}}^2 / 2$ не зависит от интенсивности, а зависит только от частоты падающего света.

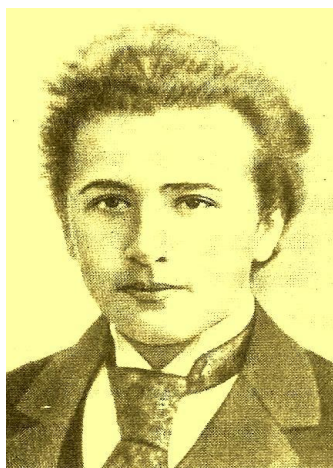
Ожидаемый классический результат: Фотоэффект должен наблюдаться при всех частотах.

Эксперимент: Существует граничная частота ω_K . При частотах $\omega < \omega_K$ фотоэффект не наблюдается при любых интенсивностях.

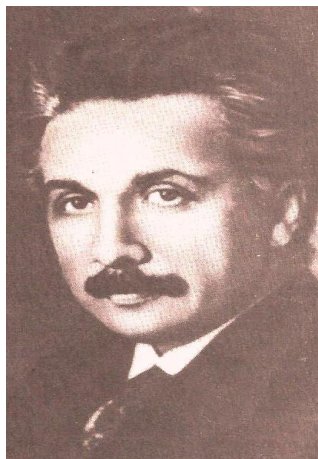
Ожидаемый классический результат: В поглощении света малой интенсивности участвуют все электроны приповерхностного слоя металла, и требуется довольно продолжительное время для того, чтобы какой-то электрон преодолел поверхностный потенциальный барьер. Такой процесс при малой температуре металла маловероятен.

Эксперимент: 1. Время задержки эмиссии электронов не зависит от интенсивности.
2. Если $\omega > \omega_K$, фотоэффект наблюдается при любой, даже самой слабой интенсивности.

Альберт Эйнштейн (1879 – 1979)



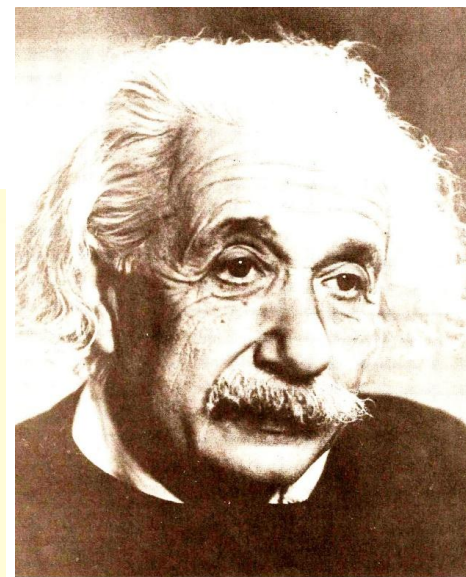
1895 г.



1910 г.



1916 г.



A. Einstein

В детстве Эйнштейна считали недалёким ребёнком. Он начал говорить только в 4 года, в 7 лет с трудом выводил буквы. Учителя и родители полагали, что из него явно не вырастет гений ...

Гипотеза А.Эйнштейна о квантовании энергии излучения.

При столь явном противоречии приходится пересматривать представления о природе электромагнитного излучения. Существует **два способа передачи энергии**: либо **посредством волн**, либо **посредством частиц**.

Экспериментальные факты по фотоэффекту склоняют к корпускулярному механизму передачи световой энергии.

Гипотеза А. Эйнштейна (1905г.): Электромагнитное излучение не непрерывно, а состоит из квантов энергии. Оно испускается и поглощается веществом дискретно, квантами, и распространяется в виде неделимых квантов, локализованных в пространстве.

Позднее, в 1926г, частицы излучения были названы **фотонами**. Идею квантов излучения Эйнштейн применил к теории фотоэффекта.

Эйнштейн распространил идею Планка о квантовании атомных осцилляторов на электромагнитное излучение.

Объяснение закономерностей фотоэффекта.

Излучение состоит из локализованных в пространстве неделимых квантов – фотонов с энергией $\hbar\omega$.

При облучении фотокатода реализуется корпускулярный механизм передачи энергии электронам в металле.

Поскольку энергия поступает порциями, она может быть передана целиком одному электрону, который оказывается в состоянии вылететь из металла.

Процесс поглощения фотона и передачи его энергии электрону имеет вероятностный характер.

Если электрон, получивший энергию, находился на поверхности металла, и для преодоления потенциального барьера ему необходима энергия, равная работе выхода, то после вылета его энергия будет максимальной.

Уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$\hbar\omega = A + \frac{\text{или } mV_{\max}^2}{2}$$

$$\hbar\omega = A + eV_0$$

Эти уравнения следуют из закона сохранения энергии, если пренебречь потерями энергии при столкновениях на пути к поверхности.

Квантовая эффективность Q фотоэлектронной

ЭМИССИИ определяется как отношение числа фотоэлектронов, испускаемых катодом, к числу падающих фотонов за секунду.

Учитывая, что $N_{\text{нас}} = I_{\text{нас}} / e$ и $\Phi_{\omega} = \frac{P_{\omega}}{h\nu_{\omega}}$, где P_{ω} - поглощенный катодом поток излучения частоты ω , квантовая эффективность равна

$$Q = \frac{N_1}{\Phi_{\omega}} = \frac{I_{\text{нас}}}{e} \cdot \frac{h\nu_{\omega}}{P_{\omega}}$$

$$\frac{I_{\text{нас}}}{P_{\omega}}$$

- Отношение называется спектральной **фоточувствительностью** катода (чувствительностью к монохроматическому излучению).
- **Квантовая эффективность для щелочных металлов**, таких как калий, натрий, равна $Q \approx 0,1$
- **для большинства остальных металлов** $Q \ll 0,1$
- Если на катод падает всего лишь один фотон, то невозможно точно предсказать, будет ли он поглощен или нет. Можно только говорить о **вероятности поглощения**.
- При слабом потоке фотонов величина Q имеет смысл вероятности.

Многофотонный внешний фотоэффект.

- В рассмотренном выше явлении фотоэлектронной эмиссии электрон получает энергию от одного фотона. Такие процессы называются *однофотонными*.
- При достаточно большой интенсивности лазерного излучения возможно рождение фотоэлектрона вследствие поглощения не одного, а сразу нескольких N фотонов с энергией $\hbar\omega$.
- В этом случае **многофотонный** аналог уравнения Эйнштейна запишется в виде

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = N\hbar\omega - A$$

и явление может наблюдаться за красной границей $\omega_K = A/\hbar$.

Нижняя частотная граница **многофотонного фотоэффекта** уменьшается до значения

$$\omega_K^* = A/N\hbar = \omega_K / N$$

Впервые многофотонный (двухфотонный) внешний фотоэффект наблюдался в 1964г в натрии.