

# Уравнение фотоэффекта и законы Столетова

Выполнила учащаяся группы 12 СЮ 9  
Прыгунова Елизавета

# Фотоэффект

---

**Фотоэффе́кт** — это испускание электронов веществом под действием света (и, вообще говоря, любого электромагнитного излучения). В конденсированных веществах (твёрдых и жидких) выделяют внешний и внутренний фотоэффект.

□ **Законы фотоэффекта:**

- **Формулировка 1-го закона фотоэффекта:** *Сила фототока прямо пропорциональна плотности светового потока.*
- **Согласно 2-му закону фотоэффекта,** *максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.*
- **3-й закон фотоэффекта:** *для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота света (или максимальная длина волны  $\lambda_0$ ), при которой ещё возможен фотоэффект, и если фотоэффект уже не происходит.*



# История открытия

В 1839 году Александр Беккерель наблюдал явление фотоэффекта в электролите.

В 1873 году Уиллоуби Смит обнаружил, что селен является фотопроводящим. Затем эффект изучался в 1887 году Генрихом Герцем. При работе с открытым резонатором он заметил, что если посветить ультрафиолетом на цинковые разрядники, то прохождение искры заметно облегчается.

Исследования фотоэффекта показали, что, вопреки классической электродинамике, энергия вылетающего электрона всегда строго связана с частотой падающего излучения и практически не зависит от интенсивности облучения.

В 1888—1890 годах фотоэффект систематически изучал русский физик Александр Столетов. Им были сделаны несколько важных открытий в этой области, в том числе выведен первый закон внешнего фотоэффекта.

Фотоэффект был объяснён в 1905 году Альбертом Эйнштейном (за что в 1921 году он, благодаря номинации шведского физика Карла Вильгельма Озеена, получил Нобелевскую премию) на основе гипотезы Макса Планка о квантовой природе света. В работе Эйнштейна содержалась важная новая гипотеза — если Планк в 1900 году предположил, что свет *излучается* только квантованными порциями, то Эйнштейн уже считал, что свет и *существует* только в виде квантованных порций. Из закона сохранения энергии, при представлении света в виде частиц (фотонов), следует формула Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = \varphi + \frac{mv^2}{2} \quad \text{где } \varphi \text{ — работа выхода}$$

электрона — максимальная кинетическая энергия вылетающего

— частота падающего фотона с энергией  $h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка

- Из этой формулы следует существование красной границы фотоэффекта, то есть существование наименьшей частоты (энергии фотона уже недостаточно для того, чтобы «выбить» электрон из металла. Суть формулы заключается в том, что энергия фотона расходуется на ионизацию атома вещества и на работу, необходимую для «вырывания» электрона, а остаток переходит в кинетическую энергию электрона.
- Исследования фотоэффекта были одними из самых первых квантовомеханических исследований.

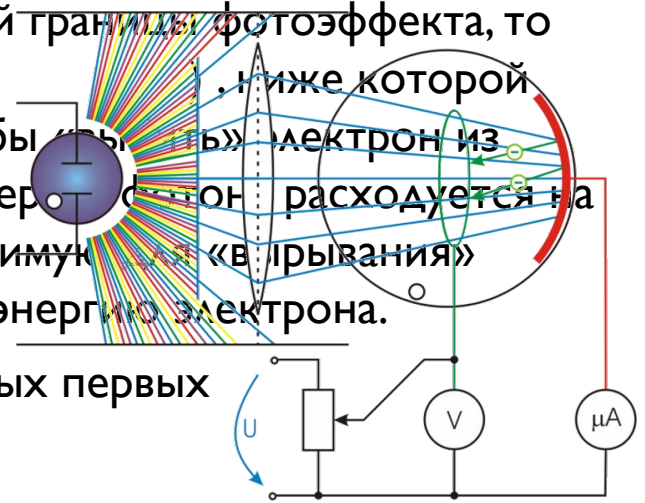
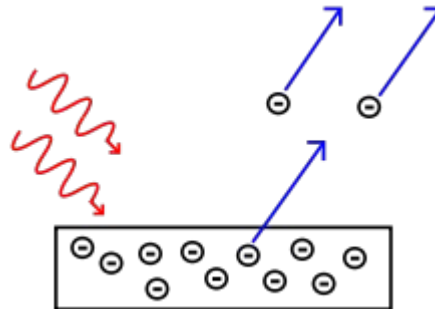


Схема эксперимента по исследованию фотоэффекта. Из света берётся узкий диапазон частот и направляется на катод внутри вакуумного прибора. Напряжением между катодом и анодом устанавливается энергетический порог между ними. По току судят о достижении электронами анода.

# Внешний фотоэффект

- **Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией)** называется испускание электронов веществом под действием электромагнитных излучений. Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются *фотоэлектронами*, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется *фототоком*.
- **Фотокатод** — электрод вакуумного электронного прибора, непосредственно подвергающийся воздействию электромагнитных излучений и эмитирующий электроны под действием этого излучения.
- Зависимость спектральной чувствительности от частоты или длины волны электромагнитного излучения называют спектральной характеристикой фотокатода.
- **Законы внешнего фотоэффекта**
- Закон Столетова: при неизменном спектральном составе электромагнитных излучений, падающих на фотокатод, фототок насыщения пропорционален энергетической освещённости катода (иначе: число фотоэлектронов, выбиваемых из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности излучения):  
и
- Максимальная начальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой.
- Для каждого вещества существует *красная граница* фотоэффекта, то есть минимальная частота света (зависящая от химической природы вещества и состояния поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.



# Теория Фаулера


---

- Основные закономерности внешнего фотоэффекта для металлов хорошо описываются теорией Фаулера<sup>[2]</sup>. Согласно ей, после поглощения в металле фотона его энергия переходит электронам проводимости, в результате чего электронный газ в металле состоит из смеси газов с нормальным распределением Ферми — Дирака и возбуждённым (сдвинутым на ) распределением по энергиям. Плотность фототока определяется формулой Фаулера:

$$j = \begin{cases} B_1 T^2 \exp\left(\frac{h\nu - h\nu_{\min}}{kT}\right), & h\nu \leq h\nu_{\min} - 2kT, \\ B_2 T^2 \left(\frac{(h\nu - h\nu_{\min})^2}{k^2 T^2} + B_3\right), & h\nu > h\nu_{\min} + 2kT, \end{cases}$$

где  **$B_1, B_2, B_3$**  — постоянные коэффициенты, зависящие от свойств облучаемого металла. Формула справедлива при энергиях возбуждения фотоэмиссии, не превышающих значения работы выхода металла более чем на несколько электронвольт. Теория Фаулера верна только в случае падения света по нормали к поверхности.

---



# Квантовый выход

---

Важной количественной характеристикой фотоэффекта является квантовый выход  $\gamma$  — число эмитированных электронов в расчёте на один фотон, падающий на поверхность тела. Величина  $\gamma$  определяется свойствами вещества, состоянием его поверхности и энергией фотонов. Квантовый выход фотоэффекта из металлов в видимой и ближней УФ-областях  $\gamma < 0,001$  электрон/фотон. Это связано прежде всего с малой глубиной выхода фотоэлектронов, которая значительно меньше глубины поглощения света в металле. Большинство фотоэлектронов рассеивает свою энергию до подхода к поверхности и теряет возможность выйти в вакуум. При энергии фотонов вблизи порога фотоэффекта большинство фотоэлектронов возбуждается ниже уровня вакуума и не даёт вклада в фотоэмиссионный ток. Кроме того, коэффициент отражения в видимой и ближней УФ-областях велик и лишь малая часть излучения поглощается в металле. Эти ограничения частично снимаются в дальней УФ-области спектра, где  $\gamma$  достигает величины  $0,01$  электрон/фотон при энергии фотонов  $E > 10$  эВ.



# Внутренний фотоэффект

---

- **Внутренним фотоэффектом** называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твёрдых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. Он проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению *фотопроводимости* или *вентильного фотоэффекта*.
  - Фотопроводимостью называется увеличение электрической проводимости вещества под действием излучения.
  - **Вентильный фотоэффект**
  - **Вентильный фотоэффект** или **фотоэффект в запирающем слое** — явление, при котором фотоэлектроны покидают пределы тела, переходя через поверхность раздела в другое твёрдое тело (полупроводник) или жидкость (электролит).
- 





# Фотовольтаический эффект

---

**Фотовольтаический эффект** — возникновение электродвижущей силы под действием электромагнитного излучения



# Ядерный фотоэффект

---

- При поглощении гамма-кванта ядро получает избыток энергии без изменения своего нуклонного состава, а ядро с избытком энергии является составным ядром. Как и другие ядерные реакции, поглощение ядром гамма-кванта возможно только при выполнении необходимых энергетических и спиновых соотношений. Если переданная ядру энергия превосходит энергию связи нуклона в ядре, то распад образовавшегося составного ядра происходит чаще всего с испусканием нуклонов, в основном нейтронов. Такой распад ведёт к ядерным реакциям  $(\gamma, p)$  и  $(\gamma, n)$ , которые и называются **фотоядерными**, а явление испускания нуклонов (нейтронов и протонов) в этих реакциях — **ядерным фотоэффектом**
- 



# Современные исследования

---

- Как показали эксперименты в национальном метрологическом институте Германии Physikalisch-Technische Bundesanstalt, результаты которых опубликованы 24 апреля 2009 года в Physical Review Letters, в мягком рентгеновском диапазоне длин волн при плотности мощности на уровне нескольких петаватт ( $10^{15}$  Вт) на квадратный сантиметр общепринятая теоретическая модель фотоэффекта может оказаться неверной.
  - Сравнительные количественные исследования различных материалов показали, что глубина взаимодействия между излучением и веществом существенно зависит от структуры атомов этого вещества и корреляции между внутренними электронными оболочками. В случае с ксеноном, который использовался в экспериментах, воздействие пакета фотонов в коротком импульсе приводит, по всей видимости, к одновременной эмиссии множества электронов с внутренних оболочек
- 

