**Фотоэффе́кт** или **фотоэлектрический эффект** — явление взаимодействия [света](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%82) или любого другого [электромагнитного излучения](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) с веществом, при котором энергия фотонов передаётся электронам вещества. В конденсированных (твёрдых и жидких) [веществах](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D1%89%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE) выделяют внешний (поглощение фотонов сопровождается вылетом электронов за пределы тела) и внутренний (электроны, оставаясь в теле, изменяют в нем своё энергетическое состояние) фотоэффект. Фотоэффект в газах состоит в ионизации атомов или молекул под действием излучения[[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-1).

**Законы внешнего фотоэффекта**:

Формулировка **1-го закона фотоэффекта (закона Столетова)**: *Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового излучения*[[2]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-Javor-2).

Согласно **2-му закону фотоэффекта**, *максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов возрастает с частотой света и не зависит от его*[*интенсивности*](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%B0)[[2]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-Javor-2).

**3-й закон фотоэффекта**: *для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует граничная частота света, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота и соответствующая длина волны называется красной границей фотоэффекта*[[2]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-Javor-2).

Кроме того, фотоэффект обладает свойством **практической безынерционности**. Он немедленно возникает при освещении поверхности тела, при условии, что частота света выше или равна красной границе фотоэффекта и эффект существует[[2]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-Javor-2).

Теоретическое объяснение этих законов было дано в [1905 году](https://ru.wikipedia.org/wiki/1905_%D0%B3%D0%BE%D0%B4) [Эйнштейном](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%B9%D0%BD%D1%88%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD). Согласно ему, электромагнитное излучение представляет собой поток отдельных квантов ([фотонов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD)) с энергией *h*ν каждый, где *h* — [постоянная Планка](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%B0). При фотоэффекте часть падающего электромагнитного излучения от поверхности металла отражается, а часть проникает внутрь поверхностного слоя металла и там поглощается. Поглотив фотон, электрон получает от него энергию и, совершая работу выхода A, покидает металл: {\displaystyle h\nu =A+W\_{k},} где {\displaystyle W\_{k}} — максимальная кинетическая энергия, которую имеет электрон при вылете из металла.



История открытия

В 1839 году [Александр Беккерель](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%BA%D0%BA%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8C%2C_%D0%90%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D1%80) наблюдал[[3]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-3) [фотовольтаический эффект](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B0%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%22%20%5Co%20%22%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B0%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82) в электролите.

В 1873 году [Уиллоуби Смит](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BC%D0%B8%D1%82%2C_%D0%A3%D0%B8%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D1%83%D0%B1%D0%B8%22%20%5Co%20%22%D0%A1%D0%BC%D0%B8%D1%82%2C%20%D0%A3%D0%B8%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D1%83%D0%B1%D0%B8) обнаружил, что [селен](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD) является [фотопроводящим](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C)[[4]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-4)[[5]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-5).

Внешний фотоэффект был открыт в [1887 году](https://ru.wikipedia.org/wiki/1887_%D0%B3%D0%BE%D0%B4) [Генрихом Герцем](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D1%80%D1%86%2C_%D0%93%D0%B5%D0%BD%D1%80%D0%B8%D1%85_%D0%A0%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%84)[[6]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-6)[[7]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-7)[[8]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-8). При работе с [открытым резонатором](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9E%D1%82%D0%BA%D1%80%D1%8B%D1%82%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80&action=edit&redlink=1) он заметил, что если посветить [ультрафиолетом](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%82) на цинковые разрядники, то прохождение искры заметно облегчается.

В 1888—1890 годах фотоэффект систематически изучал русский физик [Александр Столетов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B2%2C_%D0%90%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D1%80_%D0%93%D1%80%D0%B8%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%8C%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%87)[[9]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-9), опубликовавший 6 работ[[10]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-10)[[11]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-11)[[12]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-12)[[13]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-13)[[14]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-14)[[15]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-15). Им были сделаны несколько важных открытий в этой области, в том числе выведен первый закон внешнего фотоэффекта[[16]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-16).

Ещё Столетов пришёл к выводу, что «Разряжающим действием обладают, если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими лучами, лучи самой высокой преломляемости, недостающие в солнечном спектре», то есть вплотную подошёл к выводу о существовании красной границы фотоэффекта. В 1891 г. Эльстер и Гейтель при изучении щелочных металлов пришли к выводу, что, чем выше электроположительность металла, тем ниже граничная частота, при которой он становится фоточувствительным.[[17]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#cite_note-17)

[Томсон](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D0%BC%D1%81%D0%BE%D0%BD%2C_%D0%94%D0%B6%D0%BE%D0%B7%D0%B5%D1%84_%D0%94%D0%B6%D0%BE%D0%BD) в 1898 году экспериментально установил, что поток электрического заряда, выходящий из металла при внешнем фотоэффекте, представляет собой поток открытых им ранее частиц (позже названных электронами). Поэтому увеличение фототока с ростом освещённости следует понимать как увеличение числа выбитых электронов с ростом освещённости.

Исследования фотоэффекта [Филиппом Ленардом](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B5%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%B4%2C_%D0%A4%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%BF%D0%BF) в 1900—1902 годах показали, что, вопреки классической [электродинамике](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0), [энергия](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) вылетающего [электрона](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD) всегда строго связана с [частотой](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B0) падающего [излучения](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) и практически не зависит от интенсивности [облучения](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5).

Схема эксперимента по исследованию фотоэффекта. Из света берётся узкий диапазон частот и направляется на [катод](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B4) внутри вакуумного прибора. Напряжением между катодом и анодом устанавливается энергетический порог между ними. По току судят о достижении электронами анода.

Фотоэффект был объяснён в [1905 году](https://ru.wikipedia.org/wiki/1905_%D0%B3%D0%BE%D0%B4) [Альбертом Эйнштейном](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%B9%D0%BD%D1%88%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD%2C_%D0%90%D0%BB%D1%8C%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82) (за что в [1921 году](https://ru.wikipedia.org/wiki/1921_%D0%B3%D0%BE%D0%B4) он, благодаря номинации шведского физика [Карла Вильгельма Озеена](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B7%D0%B5%D0%B5%D0%BD%2C_%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%BB_%D0%92%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%B3%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BC), получил [Нобелевскую премию](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D1%8F_%D0%BF%D0%BE_%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B5)) на основе [гипотезы Макса Планка](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B8%D0%BF%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B0_%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%B0) о квантовой природе света. В работе [Эйнштейна](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%B9%D0%BD%D1%88%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD) содержалась важная новая гипотеза — если [Планк](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA) в [1900 году](https://ru.wikipedia.org/wiki/1900_%D0%B3%D0%BE%D0%B4) 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](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD)), следует формула Эйнштейна для фотоэффекта:{\displaystyle h\nu =A+{\frac {mv^{2}}{2}}}

где A — т. н. [работа выхода](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0_%D0%B2%D1%8B%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0) (минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из вещества), {\displaystyle {\frac {mv^{2}}{2}}} — максимальная [кинетическая энергия](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) вылетающего электрона, {\displaystyle \nu } — частота падающего фотона с энергией {\displaystyle h\nu }, *h* — [постоянная Планка](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%B0). Из этой формулы следует существование [красной границы фотоэффекта](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0_%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B0) при T = 0 K, то есть существование наименьшей частоты ({\displaystyle {h\nu }\_{\min }=A}), ниже которой 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.

В 1906—1915 годах фотоэффект изучал Милликен. Он смог установить точную зависимость запирающего напряжения от частоты (действительно оказавшуюся линейной) и на его основании смог вычислить постоянную Планка. «Я потратил десять лет моей жизни на проверку этого эйнштейновского уравнения 1905 г., — писал Милликен, — и вопреки всем моим ожиданиям я вынужден был в 1915 г. безоговорочно признать, что оно экспериментально подтверждено, несмотря на его несуразность, так как казалось, что оно противоречит всему, что мы знаем об интерференции света». В 1923 году Милликен был удостоен Нобелевской премии в области физики «за работы по определению элементарного электрического заряда и фотоэлектрического эффекта».

Исследования фотоэффекта были одними из самых первых квантовомеханических исследований.

Внешний фотоэффект

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](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA), 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 фотоэффет**

1. Закон Столетова: при неизменном [спектральном](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80) составе электромагнитных излучений, падающих на фотокатод, фототок насыщения пропорционален энергетической освещённости [катода](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B4) (иначе: число фотоэлектронов, выбиваемых из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности излучения):
{\displaystyle I\_{n}~E\_{e}}  {\displaystyle n\_{\rm {cek}}~E\_{e}}
2. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой.
3. Для каждого вещества существует *красная граница* фотоэффекта, то есть минимальная частота света {\displaystyle \nu \_{0}} (зависящая от химической природы вещества и состояния поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

**Теория Фаулера**

Основные закономерности внешнего фотоэффекта для металлов хорошо описываются теорией Фаулера[[18]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%22%20%5Cl%20%22cite_note-18). 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](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8_%E2%80%94_%D0%94%D0%B8%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B0) и возбуждённым (сдвинутым на {\displaystyle h\nu }) распределением по энергиям. Плотность фототока определяется формулой Фаулера:

{\displaystyle j={\begin{cases}{{B}\_{1}}{{T}^{2}}\exp \left({\frac {h\nu -h{{\nu }\_{\min }}}{kT}}\right),&h\nu \leqslant {{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}}}{\displaystyle B\_{1}}, {\displaystyle B\_{2}}, {\displaystyle 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 Y — число эмитированных электронов в расчёте на один фотон, падающий на поверхность тела. Величина Y определяется свойствами вещества, состоянием его поверхности и энергией фотонов.

Квантовый выход фотоэффекта из металлов в видимой и ближней УФ-областях Y < 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 Y достигает величины 0,01 электрон/фотон при энергии фотонов E > 10 эВ.