

Корпускулярно-волновой дуализм

Квантовая физика — раздел физики, в котором изучаются квантово-механические и квантово-полевые системы и законы их движения.

Для объяснения световых явлений некоторые ученые во главе с И. Ньютоном считали, что свет — это поток частиц (корпускул). Другие ученые во главе с Гюйгенсом считали, что свет — это волна. Луи де Бройль впервые выдвинул идею о том, что свет имеет двойственную природу.

Свет, как поток частиц (корпускул), проявляет себя при поглощении и излучении атомов, в других явлениях (интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия) свет ведет себя как волна.

Гипотеза М. Планка о квантах

М. Планк выдвинул гипотезу о квантах: *энергия испускается телом не непрерывно, а отдельными порциями – квантами, энергия которых пропорциональна частоте колебаний*

$$E = h\nu,$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией, зависящей от частоты. Порция света оказалась неожиданно очень похожей на то, что принято называть частицей. Свойства света, обнаруживаемые при его излучении и поглощении, назвали корпускулярными. Сама же световая частица была названа фотоном, или квантом электромагнитного излучения.

Свет, как и любое другое электромагнитное излучение, представляет собой поток фотонов с энергией E .

Основные свойства фотона:

1. является частицей электромагнитного поля;
2. движется со скоростью света;
3. существует только в движении;
4. масса покоя равна нулю;
5. заряд равен нулю.

Равенство нулю массы фотона означает невозможность его нахождения в покоем состоянии. Фотон всегда движется, причем только со скоростью света.

Масса фотона: согласно теории относительности $E = mc^2, E = h\nu$

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

Энергия фотона:

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

Импульс фотона:

$$mc^2 = h\nu \Rightarrow mc = p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Фотоэффект

В 1887 году Г. Герц открыл фотоэффект. **Фотоэффект** – это явление взаимодействия света с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества.

Внутренний фотоэффект – изменение концентрации носителей заряда в веществе.

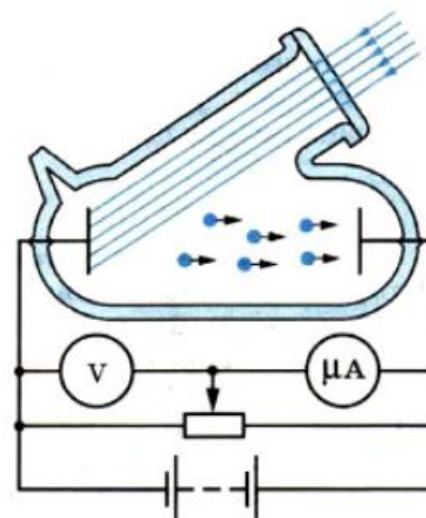
Внешний фотоэффект – явление вырывания электронов с поверхности вещества под действием падающего на него света.

Опыты А.Г. Столетова

В 1888 году российский ученый А. Г. Столетов впервые исследовал фотоэффект. Для исследования фотоэффекта он собрал установку: в стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещаются два электрода. Внутри баллона на один из электродов поступает свет через кварцевое «окошко», прозрачное для ультрафиолетового излучения.

На электроды подается напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра R и измерять вольтметром V .

К освещаемому электроду (катоду К) присоединяют отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электроны, которые при движении в электрическом поле образуют электрический ток.



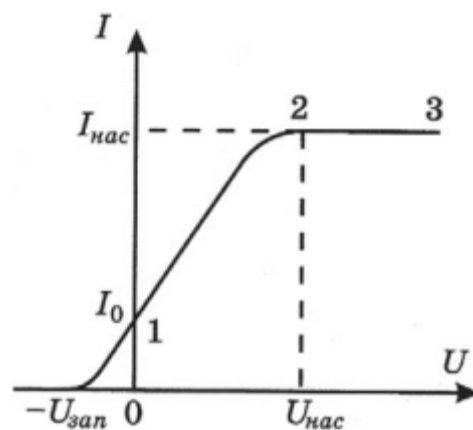
При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода (анод А). Если, не меняя интенсивности излучения, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока также увеличивается. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестает изменяться.

Вольт-амперная характеристика (зависимость силы фототока от напряжения)

1) сила фототока отлична от нуля и при отсутствии напряжения. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает анода и при отсутствии напряжения, т. е. фотоэлектроны при вылете обладают кинетической энергией;

2) при некотором значении напряжения $U_{\text{нас}}$ между электродами сила фототока перестает зависеть от напряжения и не изменяется при увеличении напряжения. Максимальное значение силы тока $I_{\text{нас}}$ называется током насыщения. Сила тока насыщения определяется числом электронов, испускаемых за 1 с с освещаемым электродом;

3) Если изменить полярность батареи, то сила тока уменьшится, и при некотором напряжении U_3 обратной полярности она станет равной нулю. Это значит, что электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод. Это напряжение называется запирающим или задерживающим напряжением (запирающее напряжение – напряжение при котором фототок прекращается).



Законы внешнего фотоэффекта

1. Количество электронов, выбиваемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света и не зависит от частоты падающего света.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения, а определяется только его частотой.

3. Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. минимальная частота света, ниже которой фотоэффект невозможен.

«Красная граница» фотоэффекта – наименьшая частота (наибольшая длина волны), при которой начинается наблюдаться фотоэффект.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Теоретическое обоснование законов фотоэффекта было дано А. Эйнштейном. Явление фотоэффекта показало, что *свет имеет прерывистую структуру: излученная порция световой энергии $E = h\nu$ сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем*. Поглотиться может только вся порция целиком. При падении на металл энергия фотона расходуется на совершение работы выхода электрона из металла и на сообщение ему кинетической энергии

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

Работа выхода - это минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы он покинул металл. Если частота световой волны равна «красной границе» фотоэффекта, то энергии фотона хватит для того, чтобы вырвать электрон с поверхности металла, но не хватит для того, чтобы сообщить электрону кинетическую энергию

$$h\nu_{\text{кр}} = A_{\text{вых}}$$

«Красная граница» фотоэффекта зависит только от работы выхода электрона из вещества. Если частота световой волны меньше «красной границы» фотоэффекта, то энергии фотона не хватит для того, чтобы вырвать электрон с поверхности металла. Фотоэффект наблюдаться не будет. Если частота световой волны больше «красной границы» фотоэффекта, то энергии фотона хватит для того, чтобы вырвать электрон с поверхности металла и сообщить ему кинетическую энергию.

Согласно теореме о кинетической энергии работа задерживающего электрического поля равна изменению кинетической энергии фотоэлектронов, значит

$$eU_3 = \frac{mv^2}{2}.$$

С учетом, того, что частота световой волны связана с длиной ее волны соотношением $\nu = \frac{c}{\lambda}$, некоторые уравнения, записанные выше можно переписать следующим образом

$$A_{\text{вых}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}}$$

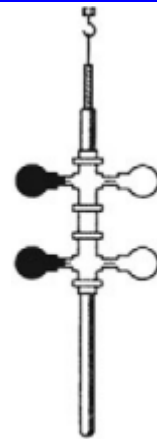
$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}.$$

Давление света

Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет должен оказывать давление на препятствия.

Для доказательства справедливости теории Максвелла было важно измерить давление света. Впервые это удалось русскому физiku Петр Николаевич Лебедев в 1900 г. Прибор Лебедева состоял из очень легкого стерженька на тонкой стеклянной нити, по краям которого были приклеены легкие крылышки. Весь прибор помещался в сосуд, откуда был выкачан воздух. Свет падал на крылышки, расположенные по одну сторону от стерженька. О значении давления можно было судить по углу закручивания нити.

Полученное значение давления совпало с предсказанным Максвеллом. Впоследствии после трех лет работы Лебедеву удалось осуществить еще более тонкий эксперимент: измерить давление света на газы.



Появление квантовой теории света позволило более просто объяснить причину светового давления. Фотоны, подобно частицам вещества, имеющим массу покоя, обладают импульсом. При поглощении их телом они передают ему свой импульс. Согласно закону сохранения импульса импульс тела становится равным импульсу поглощенных фотонов. Поэтому покоящееся тело приходит в движение. Изменение импульса тела означает, согласно второму закону Ньютона, что на тело действует сила.

Давление света, согласно электродинамике Максвелла, возникает из-за действия силы Лоренца на электроны среды, колеблющиеся под действием электрического поля электромагнитной волны. С точки зрения квантовой теории давление появляется в результате передачи телу импульсов фотонов при их поглощении

$$p = \frac{Nh\nu}{c}(1 + \rho)$$

где ρ – коэффициент отражения, N – количество всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени.

Корпускулярно-волновой дуализм

Согласно корпускулярной теории Ньютона светящиеся тела испускают мельчайшие частицы – корпускулы, которые летят прямолинейно по всем направлениям. Доказательством корпускулярной теории являются фотоэффект, излучение черного тела.

Согласно волновой теории Гюйгенса светящиеся тела вызывают в окружающей среде упругие колебания, которые распространяются в эфире подобно звуковым волнам в воздухе. Доказательством волновой теории Гюйгенса являются интерференция, дифракция, поляризация света.

Однако это не означает, что свет излучается как поток частиц, затем превращается в волну и распространяется волной, а при поглощении опять превращается в поток частиц – фотонов. Свет одновременно обладает и волновыми, и корпускулярными свойствами. Такое сочетание свойств обозначается термином **корпускулярно-волновой дуализм**. Корпускулярными характеристиками света являются энергия и импульс, волновыми – частота или длина волны.

Гипотеза де Бройля

После того как представления о двойственных свойствах света подтвердились, было высказано предположение о том, что корпускулярно-волновая двойственность свойств характерна не только для фотонов, но и для частиц вещества – электронов, протонов, нейтронов, а также атомов, молекул и атомных ядер – т. е. движение любых частиц, имеющих энергию E и импульс p , можно рассматривать с помощью теории волн. При этом движущаяся частица представляется как волна с длиной волны

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Позже эти волны получили название **волн де Бройля** в честь французского ученого Луи де Бройля, высказавшего это предположение. Корпускулярно-волновая двойственность света характерна для электромагнитного поля и имеет универсальный характер.

Дифракция электронов является опытным доказательством гипотезы де Бройля о волновых свойствах частиц.