

Внешний фотоэффект

Ветхий завет

1. В начале сотворил Бог небо и землю.
2. Земля же была безвидна и пуста, и тьма над бездною, и Дух Божий носился над водою.
3. И сказал Бог: да будет свет. И стал свет.
4. И увидел Бог свет, что он хорош, и отделил Бог свет от тьмы.
5. И назвал Бог свет днем, а тьму ночью. И был вечер, и было утро: день один.

Восточная мудрость гласит: "Сколько ни говори "халва, халва", во рту слаще не станет". Сколько ни говори: "Да будет свет!", светлее не будет. Даже если ты, — Сам всемогущий Бог. По одной простой причине: необходим источник света. Не прошло и трёх дней от начала Творения, как мудрый Бог осознал это. И, на всякий случай, создал сразу два источника света: солнце и луну.

Фотоэффект — это выбивание электронов из вещества падающим светом. Явление фотоэффекта было открыто Генрихом Герцем в 1887 году в ходе его знаменитых экспериментов по излучению электромагнитных волн.

Напомним, что Герц использовал специальный разрядник (вibrator Герца) — разрезанный пополам стержень с парой металлических шариков на концах разреза. На стержень подавалось высокое напряжение, и в промежутке между шариками проскакивала искра. Так вот, Герц обнаружил, что при облучении шариков ультрафиолетовым светом проскакивание искры облегчалось!

Опыты Столетова

Герц, однако, был поглощён исследованием электромагнитных волн и не принял данный факт во внимание. Год спустя фотоэффект был независимо открыт русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Тщательные экспериментальные исследования, проведённые Столетовым в течение двух лет, позволили сформулировать основные законы фотоэффекта.

В своих знаменитых экспериментах Столетов использовал фотоэлемент собственной конструкции. Его схема изображена на рис.

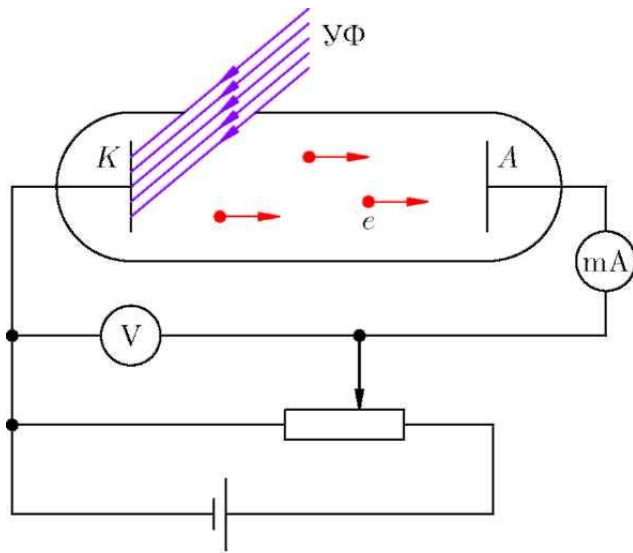


Рис. 1. Фотоэлемент Столетова

В стеклянную колбу, из которой выкачан воздух (чтобы не мешать лететь электронам), введены два электрода: цинковый катод К и анод А. На катод и анод подаётся напряжение, величину U которого можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром V.

Сейчас на катод подан «минус», а на анод — «плюс», но можно сделать и наоборот (и эта перемена знака — существенная часть опытов Столетова). Напряжению на электродах приписывается тот знак, который подан на анод. В данном случае, например, напряжение U положительно. Катод освещается ультрафиолетовыми лучами УФ через специальное кварцевое окошко, сделанное в колбе (стекло поглощает ультрафиолет, а кварц пропускает). Ультрафиолетовое излучение выбивает с катода электроны e , которые разгоняются напряжением U и летят на анод. Включённый в цепь миллиамперметр mA регистрирует электрический ток.

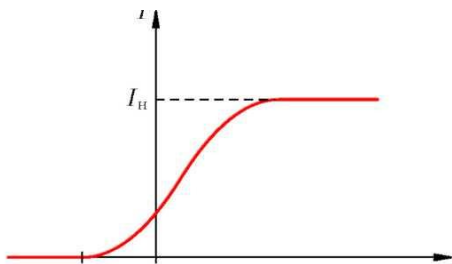
Этот ток называется фототоком, а выбитые электроны, его создающие, называются фотоэлектронами.

Зависимость фототока от напряжения

В опытах Столетова можно независимо варьировать три величины: анодное напряжение, интенсивность света и его частоту. Начнём с напряжения.

Зависимость фототока от напряжения

Меняя величину и знак анодного напряжения, можно проследить, как меняется фототок. График этой зависимости, называемый характеристикой фотоэлемента, представлен на рис.



1. Если напряжение U отрицательно и велико по модулю, то фототок отсутствует. Это легко понять: электрическое поле, действующее на электроны со стороны катода и анода, является тормозящим (на катоде «плюс», на аноде «минус») и обладает столь большой величиной, что электроны не в состоянии долететь до анода. Начального запаса кинетической энергии не хватает — электроны теряют свою скорость на подступах к аноду и разворачиваются обратно на катод. Максимальная кинетическая энергия вылетевших электронов оказывается меньше, чем модуль работы поля при перемещении электрона с катода на анод:

$$\frac{mv^2}{2} < eU.$$

Здесь $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона, $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — его заряд.

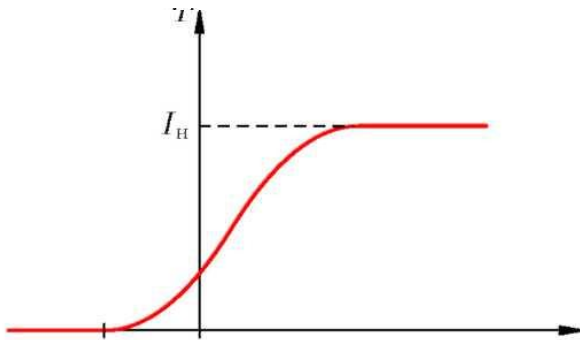
Будем постепенно увеличивать напряжение, т. е. двигаться слева направо вдоль оси U из далёких отрицательных значений. Поначалу тока по-прежнему нет, но точка разворота электронов становится всё ближе к аноду. Наконец, при достижении напряжения U_3 , которое называется задерживающим напряжением, электроны разворачиваются назад в момент достижения анода (иначе говоря, электроны прибывают на анод с нулевой скоростью). Имеем:

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

Таким образом, величина задерживающего напряжения позволяет определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.

Анализ зависимости

1. Если напряжение U отрицательно и велико по модулю, то фототок отсутствует. Это легко понять: электрическое поле, действующее на электроны со стороны катода и анода, является тормозящим (на катоде «плюс», на аноде «минус») и обладает столь большой величиной, что электроны не в состоянии долететь до анода.



2. При небольшом превышении задерживающего напряжения появляется слабый фототок. Его формируют электроны, вылетевшие с максимальной кинетической энергией почти точно вдоль оси колбы (т. е. почти перпендикулярно катоду): теперь электронам хватает этой энергии, чтобы добраться до анода с ненулевой скоростью и замкнуть цепь.

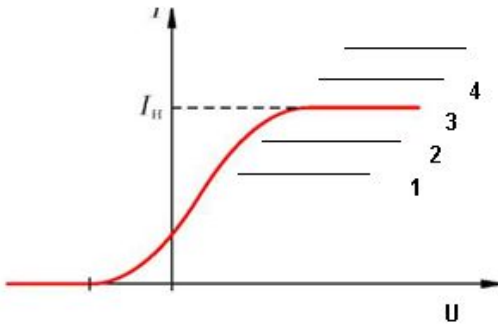
Остальные электроны, которые имеют меньшие скорости или полетели в сторону от анода, на анод не попадают.

При повышении напряжения фототок увеличивается. Анода достигает большее количество электронов, вылетающих из катода под всё большими углами к оси колбы. Обратите внимание, что фототок присутствует при нулевом напряжении!

3. Когда напряжение выходит в область положительных значений, фототок продолжает возрастать. Оно и понятно: электрическое поле теперь разгоняет электроны, поэтому всё большее их число получают шанс оказаться на аноде. ***Однако достигают анода пока ещё не все фотоэлектроны.*** Например, электрон, вылетевший с максимальной скоростью перпендикулярно оси колбы (т. е. вдоль катода), хоть и развернётся полем в нужном направлении, но не настолько сильно, чтобы попасть на анод.

4. Наконец, при достаточно больших положительных значениях напряжения ***ток достигает своей предельной величины I_n , называемой током насыщения, и дальше возрастать перестаёт.*** Дело в том, что напряжение, ускоряющее электроны, становится настолько велико, что анод захватывает вообще все электроны, выбитые из катода — в каком бы направлении и с какими бы скоростями они не начинали движение. Стало быть, дальнейших возможностей увеличиваться у фототока попросту нет — ресурс, так сказать, исчерпан

Законы фотоэффекта

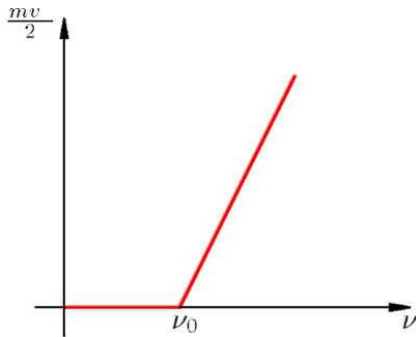


Величина I_n тока насыщения — это, по существу, количество электронов, выбиваемых из катода за одну секунду. Будем менять интенсивность света, не трогая частоту. Опыт показывает, что **ток насыщения меняется пропорционально интенсивности света.**

Первый закон фотоэффекта. Число электронов, выбиваемых из катода за секунду, пропорционально интенсивности падающего на катод излучения (при его неизменной частоте).

Будем изучать зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты и интенсивности падающего света.

Сначала меняем частоту излучения ν при фиксированной интенсивности. Получается такой график (рис)



Как видим, существует некоторая частота ν_0 , называемая красной границей фотоэффекта, разделяющая две принципиально разные области графика. Если $\nu < \nu_0$, то фотоэффекта нет. Если же $\nu > \nu_0$, то максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растёт с частотой.

Теперь, наоборот, фиксируем частоту и меняем интенсивность света. **Если при этом $\nu < \nu_0$, то фотоэффект не возникает, какова бы ни была интенсивность! Не менее удивительный факт обнаруживается и при $\nu > \nu_0$: максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов от интенсивности света не зависит.**

Второй закон фотоэффекта. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

Третий закон фотоэффекта. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта — наименьшая частота света ν_0 , при которой фотоэффект ещё возможен. При $\nu < \nu_0$ фотоэффект не наблюдается ни при какой интенсивности света.

Трудности классического объяснения фотоэффекта

Как объяснить фотоэффект с точки зрения классической электродинамики и волновых представлений о свете?

Известно, что для вырывания электрона из вещества требуется сообщить ему некоторую энергию A , **называемую работой выхода электрона**. В случае свободного электрона в металле это работа по преодолению поля положительных ионов кристаллической решётки, удерживающего электрон на границе металла. В случае электрона, находящегося в атоме, **работа выхода есть работа по разрыву связи электрона с ядром**.

В переменном электрическом поле световой волны электрон начинает совершать колебания. И если энергия колебаний превысит работу выхода, то электрон будет вырван из вещества.

Однако в рамках таких представлений невозможно понять второй и третий законы фотоэффекта.

Действительно, **почему кинетическая энергия выбитых электронов не зависит от интенсивности излучения?** Ведь чем больше интенсивность, 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.

Далее, откуда берётся красная граница фотоэффекта? Чем «провинились» низкие частоты? Казалось бы, 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.

Кроме того, неясна безынерционность фотоэффекта. Именно, при освещении катода излучением сколь угодно слабой интенсивности (с частотой выше красной границы) фотоэффект начинается мгновенно — в момент включения освещения. Между тем, казалось бы, электронам требуется некоторое время для «расшатывания» связей, удерживающих их в веществе, и это время «раскачки» должно быть тем больше, чем слабее падающий свет. Аналогия такая: чем слабее вы толкаете качели, тем дольше придётся их раскачивать до заданной амплитуды. Выглядит опять-таки логично, но опыт — единственный критерий истины в физике! — этим доводам противоречит.

Так на рубеже XIX и XX столетий в физике возникла тупиковая ситуация: электродинамика, предсказавшая существование электромагнитных волн и великолепно работающая в диапазоне радиоволн, отказалась объяснять явление фотоэффекта.

Объяснение фотоэффекта Эйнштейном

Первый закон фотоэффекта

Ни одна из перечисленных закономерностей фотоэффекта не находит объяснения в рамках классической электродинамики.

Исчерпывающее объяснение это явление получило в теории Эйнштейна.

Эта теория опирается на квантовую природу излучения. Согласно Эйнштейну, **излучение не только возникает в виде отдельных порций энергии, что было установлено М.Планком, но и распространяется и поглощается также в виде дискретных порций – гамма-квантов.** (Позднее этим сгусткам энергии Комптон дал название *фотоны*.)

При падении излучения на поверхность проводника, фотоны поглощаются электронами и при этом передают им свою энергию

$$E = h\nu$$

Закон сохранения энергии, записанный Эйнштейном для фотоэффекта, состоит в утверждении, что энергия фотона, приобретенная электроном, **позволяет ему покинуть поверхность проводника, совершив работу выхода. Остаток энергии реализуется в виде кинетической энергии теперь уже свободного электрона**

Первый закон фотоэффекта. Число электронов, выбиваемых из катода за секунду, пропорционально интенсивности падающего на катод излучения (при его неизменной частоте).

$$h\nu = h\nu_0 = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

«Сразу ясно, - пишет Эйнштейн, - что квантовая теория света дает объяснение фотоэлектрическому эффекту. Пучок фотонов падает на металлическую пластинку. **Взаимодействие между излучением и веществом состоит здесь из многих элементарных процессов, в которых фотон ударяется об атом и выбивает из него электрон...** Увеличение интенсивности света, на нашем новом языке, означает увеличение числа падающих фотонов. В этом случае из металлической пластинки будет вырвано большее число электронов...»

Так просто А.Эйнштейн объясняет закон Столетова – первый закон фотоэффекта.

Объяснение второго закона фотоэффекта

Наличие фототока в цепи при нулевом анодном напряжении тоже можно теперь легко объяснить.

Фотоэлектроны, покинувшие поверхность металла, обладают кинетической энергией. Этой энергии электронам достаточно, чтобы достичь анода и тем самым замкнуть цепь.

Для того чтобы прекратить течение тока в цепи, необходимо на фотоэлемент подать тормозящее запирающее напряжение. Ток исчезнет, когда

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_3$$

С увеличением частоты падающего света будет расти энергия фотонов и кинетическая энергия фотоэлектронов

$$h\nu = \hbar\omega = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

Теперь для торможения таких более энергичных электронов потребуется более высокое запирающее напряжение

$$U_3 = \frac{\epsilon_x}{e} = \frac{mV^2}{2e}.$$

Такое объяснение получает второй закон фотоэффекта.

Второй закон фотоэффекта.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

Объяснение третьего закона фотоэффекта

Обратимся к третьему закону.

Если уменьшать частоту падающего на фотокатод света, будет уменьшаться энергия фотонов и кинетическая энергия фотоэлектронов.

При некотором граничном значении частоты ν_x , кинетическая энергия фотоэлектронов станет равной нулю. Тогда

$$h\nu_x = A$$

При дальнейшем снижении частоты, энергия фотонов окажется меньше работы выхода. В результате эмиссия электронов с поверхности металла не состоится .

Для многих материалов фотокатода эта граничная частота лежит в красной области видимой части спектра. Отсюда и название этой частоты – красная граница фотоэффекта.

И, наконец, - о безинерционности фотоэффекта.

Фотоэлектроны появляются в момент включения освещения катода, так как поглощение фотона электроном происходит за время порядка $1\text{нс} = 10^{-9}$ сек.

Третий закон фотоэффекта. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта — наименьшая частота света ν_0 , при которой фотоэффект ещё возможен. При $\nu < \nu_0$ фотоэффект не наблюдается ни при какой интенсивности света.

Нобелевская премия Планка

История рождения квантовой механики свидетельствует о том, что эта новая физическая теория пробивала себе дорогу часто вопреки желанию ученых.

Макс Планк, «выпустивший джина из бутылки», написав энергию фотона $E=h\nu$ потом долгие годы пытался спасти классическую электродинамику, всячески ограничивая квантовую природу излучения.

«Будем считать, - говорил он в 1911 году на Сольвеевском конгрессе, - что все явления, происходящие в пустоте, в точности соответствуют уравнениям Максвелла и не имеют никакого отношения к константе h .»

Идею квантования излучения неизменно поддерживал и развивал Эйнштейн:

«Мы должны предположить, что однородный свет состоит из зерен энергии – «световых квантов», то есть небольших порций энергии, несущихся в пустом пространстве со скоростью света».

Против такого революционного развития квантовой теории света, вновь выступает Макс Планк:

«Мне кажется, что необходимо отказаться от предположения, будто энергия осциллятора обязательно должна быть кратна элементу энергии, и принять, что, наоборот, явление поглощения свободного излучения есть по существу непрерывный процесс...».

Зоммерфельд:

«Я думаю, что гипотезу квантов испускания нужно рассматривать как форму объяснения, а не как физическую реальность».

В 1918 году Планк получил Нобелевскую премию за квантовую гипотезу.

«в знак признания услуг, которые он оказал физике своим открытием квантов энергии».

ФОТОНЫ

Согласно Эйнштейну, **излучение не только возникает в виде отдельных порций энергии, что было установлено М.Планком, но и распространяется и поглощается также в виде дискретных порций – гамма-квантов.** Позднее этим сгусткам энергии Комптон дал название *фотоны*.

В результате исследования явлений, связанных с взаимодействием света и вещества (тепловое излучение и фотоэффект), **физики пришли к выводу, что свет состоит из отдельных порций энергии — фотонов.** Излучение света, его распространение и поглощение происходит строго этими порциями.

Фотоны обладают энергией и импульсом и могут обмениваться ими с частицами вещества (скажем, с электронами или атомами). Как вы помните, такой обмен импульсом и энергией мы называем столкновением фотона и частицы.

При упругом столкновении фотон меняет направление движения — свет рассеивается. При неупругом столкновении фотон поглощается отдельной частицей или совокупностью частиц вещества — так происходит поглощение света.

Словом, фотон ведёт себя как частица и поэтому — причислен к разряду элементарных частиц.

Энергия фотона

Выражение для энергии фотона с частотой ν мы уже знаем:

$$E = h\nu.$$

Часто бывает удобно работать не с обычной частотой ν , а с циклической частотой $\omega = 2\pi\nu$. Тогда вводят другую постоянную Планка «аш с чертой»:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Выражение для энергии фотона примет вид:

$$E = \hbar\omega.$$

Фотон движется в вакууме со скоростью света c и потому является релятивистской частицей: описывая фотон, мы должны привлекать формулы теории относительности. А там имеется такая формула для энергии тела массы m , движущегося со скоростью V :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Если предположить, что $m \neq 0$, то эта формула приводит к бессмысленному заключению: энергия фотона должна быть бесконечной. Чтобы избежать этого противоречия, остаётся признать, что масса фотона равна нулю. Формула позволяет сделать и более общий вывод: **только безмассовая частица может двигаться со скоростью света.**

Учитывая классические соотношения между частотой и длиной волны излучения можно написать

$$\nu = \frac{c}{n\lambda}$$

где h -постоянная Планка $4,13 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$

c - скорость света $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

n –показатель преломления среды

ν – частота колебаний, Гц

λ – длина волны излучения, м

Импульс фотона

Обладая энергией, фотон должен обладать и импульсом. Действительно, важнейшая формула теории относительности даёт связь энергии и импульса частицы:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Для фотона, имеющего нулевую массу, эта формула сводится к простому соотношению:

$$E = pc$$

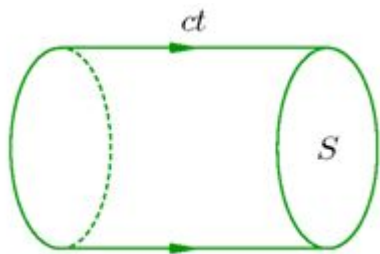
Отсюда для импульса фотона получаем:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

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

В видимом диапазоне наименьшими значениями энергии и импульса обладают фотоны красного света — у них самая маленькая частота (и самая большая длина волны). При движении в сторону фиолетового участка спектра энергия и импульс фотона линейно возрастают с частотой.

Давление света



Свет оказывает давление на освещаемую поверхность. Такой вывод был сделан Максвеллом из теоретических соображений и получил экспериментальное подтверждение в знаменитых опытах П. Н. Лебедева. Если понимать свет как поток фотонов, обладающих импульсом, то можно легко объяснить давление света и вывести формулу Максвелла.

Пусть n — концентрация фотонов падающего света, то есть число фотонов в единице объёма. За время t на нашу поверхность попадают фотоны, находящиеся внутри цилиндра высотой ct . Их число равно:

$$N = nV = nSct$$

При падении света на поверхность тела часть световой энергии отражается, а часть — поглощается. Пусть r — коэффициент отражения света; величина $r < 1$ показывает, какая часть световой энергии отражается от поверхности. Соответственно, величина $1 - r$ — это доля падающей энергии, поглощаемая телом.

Мы знаем, энергия света пропорциональна числу фотонов. Поэтому можно написать, какое количество фотонов (из общего числа N) отразится от поверхности, а какое — поглотится ею:

$$N_{\text{отр}} = rN \quad N_{\text{погл}} = (1 - r)N$$

Суммарный импульс, полученный телом от N падающих фотонов, равен:

$$P = 2pN_{\text{отр}} + pN_{\text{погл}} = 2prN + p(1 - r)N = (1 + r)pN$$

На нашу поверхность S действует сила F , равная импульсу, полученному телом в единицу времени

$$F = \frac{P}{t} = (1 + r)p \frac{N}{t} = (1 + r) \frac{h\nu nSt}{c t} = (1 + r)nv nS$$

$$P_{\text{света}} = \frac{F}{S} = (1 + r)h\nu n = (1 + r)\omega$$

Корпускулярное описание[

Если рассматривать свет как поток [фотонов](#), то, согласно принципам классической [механики](#), частицы при ударе о тело должны передавать ему импульс, другими словами — оказывать давление.

Волновое описание[

С точки зрения [волновой теории света](#) электромагнитная волна представляет собой изменяющиеся и взаимосвязанные во времени и пространстве колебания [электрического](#) и [магнитного полей](#). При падении волны на отражающую поверхность электрическое поле возбуждает [токи](#) в [приповерхностном слое](#), на которые действует магнитная составляющая волны. Таким образом, световое давление есть результат сложения многих [сил Лоренца](#), действующих на частицы тела.

Двойственная природа света

В результате рассмотрения всей совокупности оптических явлений возникает естественный вопрос: что же такое свет? Непрерывно распределённая в пространстве электромагнитная волна или поток отдельных частиц — фотонов? Теория и эксперименты приводят к заключению, что оба ответа должны быть утвердительными.

Явления интерференции и дифракции света, характерные для любых волновых процессов, не оставляют сомнений в том, что свет есть форма волнового движения материи. Таким образом, мы должны признать: да, свет имеет волновую природу, свет — это электромагнитная волна.

Однако явления взаимодействия света и вещества (например, фотоэффект) указывают на то, что свет ведёт себя как поток отдельных частиц. Эти частицы — фотоны — ведут, так сказать, самостоятельный образ жизни, обладают энергией и импульсом, участвуют во взаимодействиях с атомами и электронами.

Излучение света — это рождение фотонов.

Распространение света — это движение фотонов в пространстве.

Отражение и поглощение света — это соответственно упругие и неупругие столкновения фотонов с частицами веществ.

Таким образом, свет имеет двойственную, корпускулярно-волновую природу — он может проявлять себя то так, то эдак. В одних явлениях (интерференция, дифракция) на передний план выходит волновая природа, и свет ведёт себя в точности как волна. Но в других явлениях (фотоэффект) доминирует корпускулярная природа, и свет ведёт себя подобно потоку частиц. (От латинского слова *corpusculum* — маленькое тельце, частица).