

5.1 Корпускулярно-волновой дуализм

5.1.1 Гипотеза М.Планка о квантах. Формула Планка

Марк Планк сделал предположение, что электромагнитная волна (ЭМ) волна распространяется не непрерывно, а частями, квантами. Как очередь из автомата. Квант – минимальная порция передаваемой энергии.

Процессы излучения и поглощения электромагнитной энергии веществом или атомом, например.

Энергия одного кванта по формуле Планка:

$$E = h\nu$$

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость распространения света в воздухе или вакууме.

Во всех остальных средах скорость распространения света будет меньше.

Постоянная Планка $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Есть n -квантов каждый с энергией E

Общая энергия излучения: $W = nE$

Мощность излучения: $N = \frac{W}{\Delta t}$

На опытах свет и микрочастицы (электроны) ведут себя то как частицы, то как волны. Дуализм-двойкость.

Свет – корпускулярно-волновой дуализм

Дуализм для микрочастиц: берём экран, делаем маленькую дырку и пускаем поток электронов в эту дырку, за дыркой электроны будут образовывать интерференционные полосы.

5.1.2 Фотон. Энергия фотона. Импульс фотона

Фотон (γ) — является элементарной частицей, квантом электромагнитного излучения.

Испуская и поглощая свет, ведет себя на подобии потока частиц с энергией, которая зависит от частоты ν .

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

Эти свойства света назвали **корпускулярными**, а саму частицу назвали **фотоном**.

Исходя из теории относительности, энергия связана с массой соотношением

$$E = mc^2.$$

Фотон не имеет массы покоя m , то есть он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу обладает скоростью c . Масса, которая определяется при помощи формулы

$$m_p = \frac{h\nu}{c^2}$$

, является массой движущегося фотона. Располагая значениями массы и скорости фотона, можно определить импульс фотона:

$$p = m_p c = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Импульс фотона направлен по световому лучу. Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем четче выражены корпускулярные свойства света.

5.1.3 Фотоэффект. Опыты А.Г. Столетова. Законы фотоэффекта

Макс Планк выдвинул гипотезу о дискретной природе света. Это явление было подтверждено исследованиями, которые проводил Генрих Герц. Такое явление получило название – явление фотоэффекта.

Изучил экспериментально и сформулировал законы фотоэффекта русский физик Александр Григорьевич Столетов.

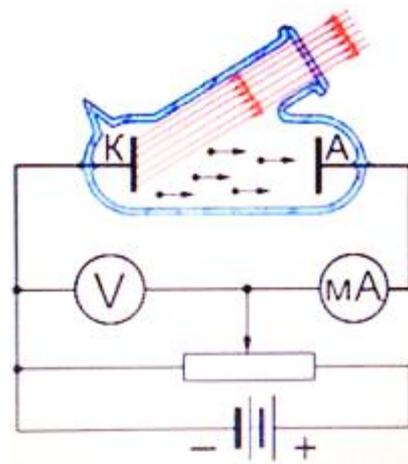
Фотоэффект – это вырывание электронов из вещества под действием света.

Внутренний фотоэффект – это эффект, при котором оторванные от своих атомов электроны остаются внутри вещества и становятся свободными. Такой фотоэффект можно наблюдать в полупроводниках и некоторых диэлектриках.

Были проведены экспериментальные исследования.

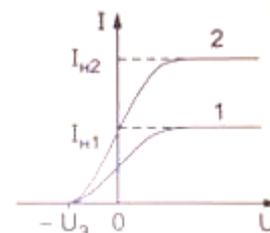
Опыт Столетова

В стеклянный баллон, из которого был выкачан воздух, помещаются два электрода. На один из электродов поступает свет через кварцевое окошко, прозрачное не только для видимого света, но и для ультрафиолетового. На электроды подается напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром. К освещаемому электроду подключают отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электроны, которые образуют электрический ток. При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода. Если, не меняя интенсивности излучения, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока возрастает. При некотором значении напряжения она достигает максимального значения, после чего перестает увеличиваться.



Ток насыщения – максимальное значение силы тока. Ток насыщения определяется числом электронов, испущенных за 1 секунду освещаемым электродом.

Изменяя интенсивность излучения, удалось установить, что сила тока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового излучения, падающего на поверхность тела. При увеличении интенсивности излучения источника света в два раза, сила тока насыщения тоже увеличивается в два раза.



Первый закон фотоэффекта:

Фототок насыщения пропорционален световому потоку, падающему на металл.

Т.к. сила тока определяется величиной заряда, а световой поток – энергией светового пучка, то можно сказать:

число электронов, выбиваемых за 1 с из вещества, пропорционально интенсивности света, падающего на это вещество.

Второй закон фотоэффекта:

Кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а зависит от его частоты.

Из опыта следовало, что если частоту света увеличить, то при неизменном световом потоке запирающее напряжение увеличивается, а, следовательно, увеличивается и кинетическая энергия фотоэлектронов. Таким образом, кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света.

Третий закон фотоэффекта:

Заменяя в приборе материал фотокатода, Столетов установил третий закон фотоэффекта: для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. существует наименьшая частота ν_{min} , при которой еще возможен фотоэффект.

При $\nu < \nu_{min}$ ни при какой интенсивности волны падающего на фотокатод света фотоэффект не произойдет. Т.к. $\lambda = \frac{c}{\nu}$, то минимальной частоте света соответствует максимальная длина волны.

Объяснить теоретически эти экспериментальные законы смог Альберт Эйнштейн, применив к ним гипотезу Макса Планка.

5.1.4 Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Эйнштейн предположил:

1. Один фотон может выбить только один электрон.
2. На основании закона сохранения энергии:

$$E_{\text{фотона}} = A_{\text{выхода}} + E_{\text{кин max}}$$

$$E_{\text{фотона}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$A_{\text{выхода}} = h\nu_{\text{кр}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}}$$

$$E_{\text{кин max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_{\text{зап}}$$

Работа выхода - это характеристика материала (табличная величина). Она показывает, какую работу должен совершить электрон, чтобы преодолеть поверхностную разность потенциалов и выйти за пределы металла. Работа выхода обычно измеряется в электрон-вольтах (эВ).

5.1.5 Волновые свойства частиц. Волны де Бройля. Длина волны де Бройля движущейся частицы. Корпускулярно-волновой дуализм. Дифракция электронов на кристаллах

В 1924 году Луи де Бройль высказал предположение, что корпускулярно – волновой дуализм, возможно, проявляют и частицы вещества, в частности электроны. Это значит, что элементарную частицу можно охарактеризовать, сопоставляя частице некоторую волну, длина которой

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

Различие между формулами существенно и заключается в том, что

- 1) у фотона нет инертной массы покоя, электроны же имеют массу покоя, а масса движущегося электрона

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

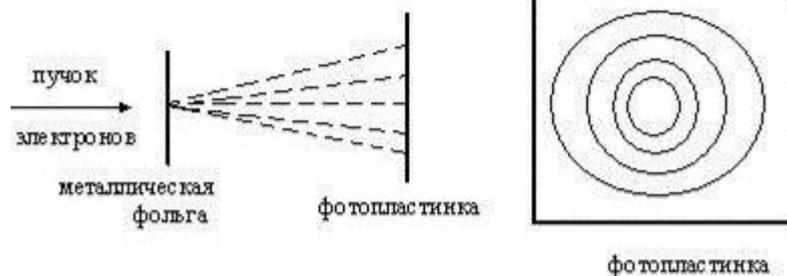
- 2) у фотонов скорость их движения в вакууме является постоянной величиной, тогда как у электронов скорость движения может быть различной.

Длина волны

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

называется длиной волны де Бройля. Волна де Бройля не представляет собой какой – либо самостоятельный колебательный процесс, а только характеризует волновые свойства частицы.

В 1927 году американские ученые Дэвиссон и Джермер подтвердили эту гипотезу опытом. Изучая рассеяние электронов на кристаллической структуре никеля, они случайно обнаружили дифракцию электронов. В этом же году Томсон и Тарковский уже специально изучали дифракцию электронов на металлической фольге.



Пучок электронов, ускоренный напряжением порядка нескольких десятков киловольт, проходил через тонкую металлическую фольгу и попадал на фотопластинку.

Оказалось, что электрон, попадая на фотопластинку, оказывает на неё такое же действие, как и фотон. Затем взяли золотую фольгу, опыт повторили - эффект оказался таким же. Отдельный электрон, пройдя фольгу (или кристалл) не дает наблюдаемой картины. Только в том случае, если через фольгу проходит много электронов, получается дифракционная картина (подобно дифракционной картине от света при наложении вторичных волн).

Позже была осуществлена дифракция нейтронов и других микрочастиц, что доказывает правоту идеи де Бройля о том, что микрочастицы вещества обладают волновыми свойствами.

5.1.6 Давление света. Давление света на полностью отражающую поверхность и на полностью поглощающую поверхность

Впервые гипотеза о существовании светового давления была высказана Иоганном Кеплером в XVII веке для объяснения явления хвостов комет при полете их вблизи Солнца.

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

Под действием электрического поля волны электроны в телах совершают колебания – образуется электрический ток. Этот ток направлен вдоль напряженности электрического поля. На упорядоченно движущиеся электроны действует сила Лоренца со стороны магнитного поля, направленная в сторону распространения волны – это и есть сила светового давления.

Для доказательства теории Максвелла необходимо было измерить давление света. Впервые давление света измерил русский физик Петр Николаевич Лебедев в 1900 году.

Прибор Лебедева состоит из легкого стержня на тонкой стеклянной нити, по краям которой прикреплены легкие крылышки. Весь прибор помещался в стеклянный сосуд, откуда был выкачан воздух. Свет падает на крылышки, расположенные по одну сторону стерженька. О значении давления можно судить по углу закручивания нити.

Один из кружочков каждой пары был блестящим с обеих сторон. У других сторон одна сторона была покрыта платиновой чернью. При этом обе пары кружочков различались толщиной.

Так давление света на твердые тела было доказано и измерено. Значение этого давления совпало с предсказанным давлением Максвелла.

Появление квантовой теории света позволило более просто объяснить причину давления света.

Опыты Лебедева можно рассматривать как экспериментальное доказательство того, что фотоны обладают импульсом. Хотя в обычных условиях световое давление очень мало, его действие может оказаться существенным. На основе давления Солнца был разработан парус для космических кораблей, который позволит перемещаться в космосе под давлением света.

Давление света, согласно теории Максвелла, возникает в результате действия силы Лоренца на электроны, совершающие колебательные движения под действием электрического поля электромагнитной волны.

С точки зрения квантовой теории давление света возникает в результате взаимодействия фотонов с поверхностью, на которую они падают.

Вычисления, которые были проведены Максвеллом, совпали с теми результатами, которые произвел Лебедев. Это ярко доказывает квантово-волновой дуализм света.

