
КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Возникновение квантовой механики как науки

На стыке XVIII-XIX веков велись долгие споры о том, что же такое свет — частица или волна? Различные эксперименты доказывали и тот, и другой вариант. С одной стороны, такие явления как дифракция и интерференция доказывают волновую природу света. С другой стороны, факт того, что свет способен оказывать давление, доказывает, что это частица. Именно данный вопрос положил начало развитию **квантовой механики**.

Сформированная в XX веке теория квантовой механики базируется на «дикой» математике, причем ее основу составляют вещи гораздо сложнее «безобидных» производных и интегралов. В связи с этим «честный» разбор этой математической базы оставим для вузовской программы, а перед собой поставим задачу разобраться в квантовой механике на уровне интерпретаций и понимания того, как работают некоторые формулы.

Корпускулярно-волновой дуализм света

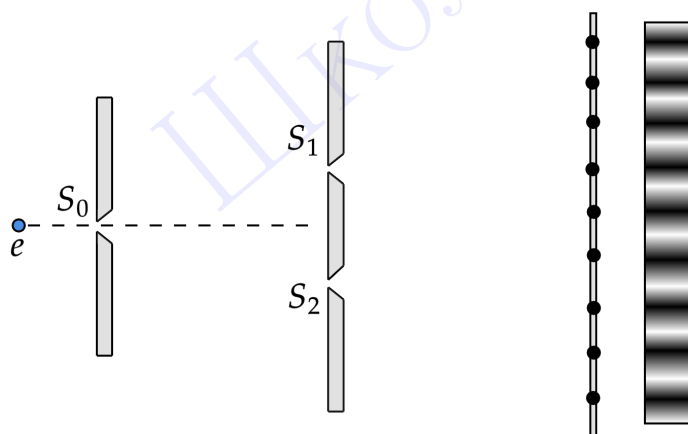
Итак, ученые пришли к выводу, что свет — это и частица, и волна.

Мы знаем, что свет распространяется как электромагнитная волна, а в вакууме его скорость равна скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Также мы знаем, что свет — это частицы, называемые фотонами, которые обладают энергией $E_{\text{ф}} = h\nu$, где h — постоянная Планка, ν — частота распространения света. В свою очередь, частота света выражается через его скорость и длину волны: $\nu = \frac{c}{\lambda}$. Фотоны имеют импульс $p_{\text{ф}} = \frac{h}{\lambda}$. То есть свет действительно является и волной, и частицей. Иными словами, свет имеет двойственную природу.

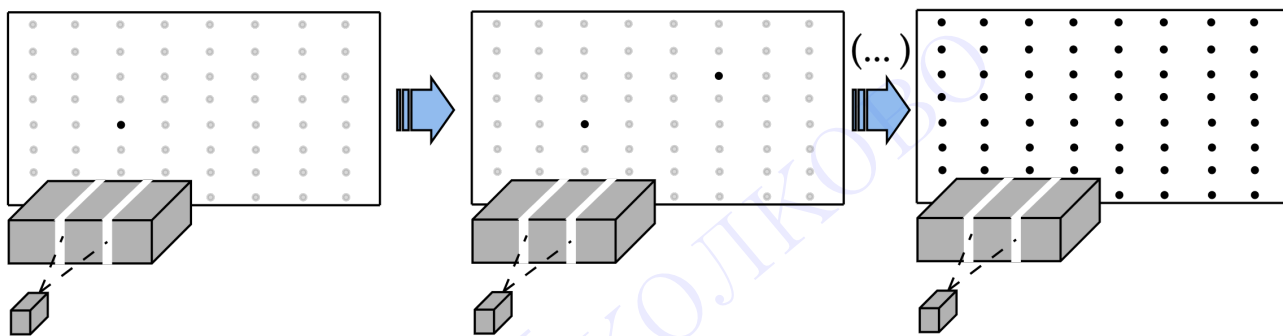
В некотором приближении можно считать, что свет **при распространении** ведет себя как **электромагнитная волна**. А в случае, когда свет **испускается** или **поглощается**, он ведет себя как **частица** (фотон).

Опыт Юнга

Проведем мысленный эксперимент. Пусть электроны, испускаемые источником, летят в направлении экрана, в котором проделано небольшое отверстие S_0 . Пройдя через отверстие, свет доходит до второго экрана, в котором проделаны две щели S_1 и S_2 . Казалось бы, если принять электроны за частицы («шарики»), то на третьем экране должны появиться строго две полосы напротив щелей S_1 и S_2 соответственно. Однако эксперимент показал, что это не так. На экране мы видим ряд полос.

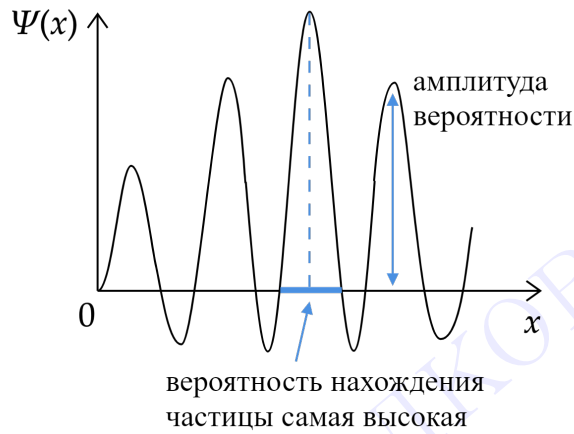


Возможно, мы пустили слишком много электронов и они, сталкиваясь друг с другом и со стенками щелей, сильно отклонились и поэтому образовали больше двух полос. Исходя из этого, попробуем «стрелять» электронами поодиночке.

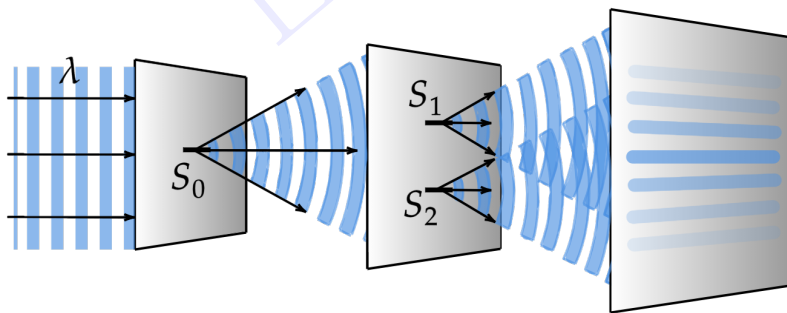


Но и в этом случае мы наблюдаем не две полосы, а ряд полос. Явление возникновения ряда полос очень напоминает интерференцию света. Но свет обладает волновыми свойствами, а электрон мы пока воспринимали как частицу.

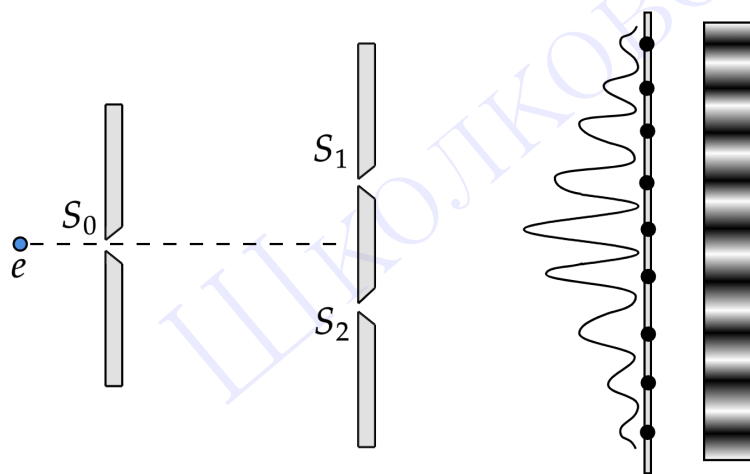
Дело в том, что нахождение электрона в той или иной области пространства описывается волновой функцией $\Psi(x, y, z, t)$, и вероятность его нахождения определяется квадратом модуля этой волновой функции.



Таким образом, электроны, излучаемые каждой из щелей, как и свет, который является электромагнитной волной, интерферируют на третьем экране.



Физика пока не может объяснить, почему в данном случае мы наблюдаем дифракционную картину, она может лишь зафиксировать это как факт и описать этот процесс с помощью вероятностного подхода (то есть с помощью волновой функции).



Чем больше амплитуда на графике волновой функции, тем выше вероятность попадания электрона в соответствующую ей область. Таким образом, с большей

вероятностью электрон попадет в центральную часть третьего экрана, с меньшей вероятностью — в боковые части.

Гипотеза де Бройля

Французский физик Луи де Бройль высказал гипотезу о том, что все материальные объекты в природе обладают как корпускулярными, так и волновыми свойствами.

По гипотезе де Бройля **корпускулярно-волновой дуализм является всеобщим свойством материи**, и поэтому любая частица (электрон, протон, нейтрон и др.) обладает волновыми свойствами. При этом наличие у частицы волновых свойств принципиально изменяет характер ее движения и способ описания такого движения.

Любой материальный объект характеризуется длиной волны де Бройля:

$$\lambda_{\text{ДБ}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Для понимания вычислим длину волны де Бройля, которая описывает человека как волновой объект. Пусть масса человека $m = 66$ кг, и он движется с пешей скоростью $v = 1$ м/с:

$$\lambda_{\text{чел}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{66 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}} = 10^{-35} \text{ м}$$

Представим, что этот человек стоит перед двумя дверьми и хочет «проинтерферировать», как это делает электрон. Однако длина волны де Бройля человека настолько мала, что все возможные «полосы» группируются в одно единственное местоположение, поэтому человек не может наблюдать свои волновые свойства и оказаться в двух местах одновременно. Так что он пройдет либо через первую, либо через вторую дверь.

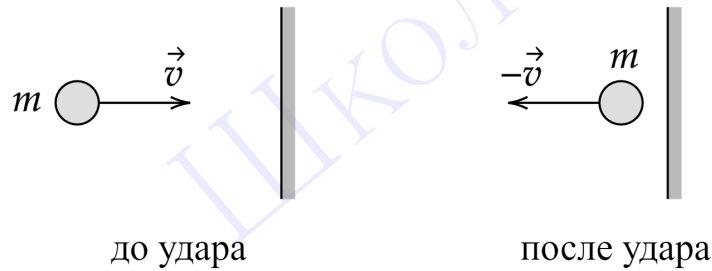
Для сравнения перейдем на атомный уровень. Для электронов с энергиями от 10 эВ до 10000 эВ длины волн де Бройля лежат в интервале 0,1 до 10^{-10} м, это более чем на 25 порядков больше длины волны де Бройля рассмотренного нами человека. Скорость и масса человека несопоставима со скоростью и массой электрона, поэтому электрон и другие элементарные частицы способны явно проявлять свои волновые свойства, а макрообъекты (к примеру, человек) нет.

Абсолютно упругий и абсолютно неупругий удар

Вернемся в мир классической механики и вспомним понятия абсолютно упругого удара и абсолютно неупругого удара.

- Абсолютно упругий удар (стена закреплена)

Пусть шарик массой m летит со скоростью v и абсолютно упруго сталкивается с закрепленной стенкой. После абсолютно упругого удара скорость шарика остается той же по модулю, но меняет свое направление.



При абсолютно упругом ударе изменение импульса:

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_k - \vec{p}_0 = -m\vec{v} - m\vec{v} = -2m\vec{v}$$

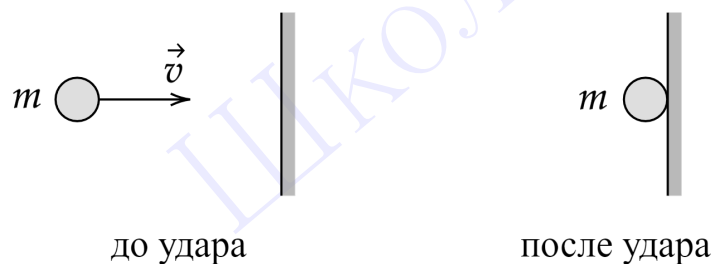
Модуль изменения импульса:

$$|\Delta \vec{p}| = |-2m\vec{v}| = |-2m| \cdot |\vec{v}|$$

$$\Delta p = 2mv = 2p_0$$

- Абсолютно неупругий удар (стена закреплена)

Пусть шарик массой m летит со скоростью v и абсолютно неупруго сталкивается с закрепленной стенкой. После абсолютно неупругого удара скорость шарика равна нулю.



При абсолютно неупругом ударе изменение импульса:

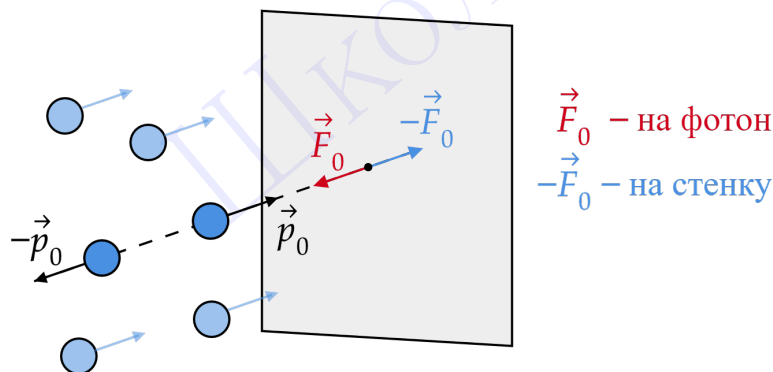
$$\Delta \vec{p} = \vec{0} - m\vec{v} = -m\vec{v}$$

Модуль изменения импульса:

$$\Delta p = mv$$

Давление света

Пусть на зеркальную поверхность падает поток фотонов. Рассмотрим фотон с импульсом \vec{p}_0 , который абсолютно упруго ударяется о зеркальную поверхность и летит в обратную сторону с импульсом $-\vec{p}_0$. Абсолютно упругий удар обеспечивается зеркальностью, которая позволяет поверхности отражать фотоны.



Фотон отражается от стенки, поскольку на него со стороны этой стенки действует некоторая сила \vec{F}_0 . В свою очередь, по 3 закону Ньютона на стенку со стороны фотона действует сила $-\vec{F}_0$.

Запишем 2 закон Ньютона в импульсной форме для одного фотона:

$$\vec{F}_0 = \frac{\Delta \vec{p}_0}{\Delta t}$$

С учетом того, что удар фотона о стену абсолютно упругий, запишем модуль силы:

$$F_0 = \frac{2p_0}{\Delta t}$$

На стенку летит не один, а N фотонов. Совместно они действуют на поверхность с общей силой:

$$F_{\text{стен}} = NF_0$$

Давление по определению:

$$P = \frac{F_{\text{стен}}}{S} = \frac{N \cdot 2p_0}{S\Delta t}$$

С учетом того, что импульс фотона $p_0 = \frac{h}{\lambda}$, найдем давление света:

$$P = \frac{2Nh}{S\Delta t\lambda}$$

Обратите внимание, что этой формулы **нет в кодификаторе**, поэтому ее вывод необходимо запомнить.

Давление света очень мало и в атмосфере не чувствуется, его можно ощутить только в вакууме.