

одни надо описывать с помощью корпускул, а другие – с помощью волн, получили название корпускулярно-волнового дуализма. «Переводом» с корпускулярного языка на волновой служат соотношения де Бройля

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}, \quad \varepsilon = \hbar \omega. \quad (6)$$

Здесь  $\vec{p}$  и  $\varepsilon$  – импульс и энергия – характеристики движения частицы;  $\vec{k}$  и  $\omega$  – волновой вектор<sup>4</sup> и частота – характеристики волны;  $\hbar$  – знаменитая постоянная Планка ( $\hbar \approx 10^{-34}$  Дж·с).

Соотношения де Бройля (6) могут служить и для «перевода» с волнового языка на корпускулярный: для этого их надо прочесть справа налево. Каждой волне можно поставить в соответствие частицу. Часто при этом говорят не «частицу», а квазичастицу (почти, не совсем частицу), тем самым подчеркивая, что все же это не настоящая частица, а квант – порция энергии волны, равная  $\hbar\omega$ . Квант электромагнитной (световой) энергии – квазичастица *фотон*, квант звуковой энергии – *фонон*.

Введя квазичастицы, легко пользоваться законами сохранения энергии и импульса не только при столкновении частиц, но и в том случае, когда в «реакции» принимают участие волны. Простейший пример – фотоэффект. Световая волна, падающая на поверхность металла, выбивает из него электроны. Рисунок 3 показывает, как это происходит: поглотив фотон, электрон преодолевает потенциальный барьер, который держит его внутри металла. Закон сохранения

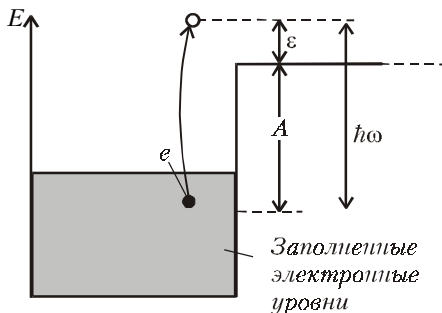


Рис.3. Поглотив фотон с энергией  $\hbar\omega$ , электрон покидает металл;  $A$  – работа выхода, т.е. наименьшая энергия, которую надо затратить, чтобы «вытащить» электрон из металла

<sup>4</sup> Волновой вектор равен по модулю,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , где  $\lambda$  – длина волны, а направлен по направлению распространения волны.

энергии в этом случае особенно прост:

$$\varepsilon = \hbar\omega - A. \quad (7)$$

Он утверждает, что энергия электрона линейно зависит от частоты. Уравнение (7) называют соотношением Эйнштейна. Эйнштейн первым применил понятие фотона (кванта света) к фотоэффекту и тем объяснил экспериментальные факты, в корне противоречившие классической физике. Импульс фотона в этом случае можно не учитывать, так как он очень мал ( $\hbar k = \hbar\omega/c$ , где  $c$  – скорость света), и воспринимается всем металлическим образцом, а не одним электроном.

Сейчас, когда квантово-механические представления прочно вошли не только в сознание профессионалов, но и всех, интересующихся физикой, трудно себе представить значение работы Эйнштейна по теории фотоэффекта. Для нас главное, что составило славу Эйнштейна, – это создание им теории относительности, изменившей наши представления о пространстве и времени. Наверное, для многих будет неожиданностью узнать, что Нобелевскую премию Эйнштейн получил «за важные физико-математические исследования, особенно за открытие законов фотоэлектрического эффекта». Это произошло в 1921 году, когда и специальная, и общая теория относительности были уже сравнительно давно построены.

### Эффект Комптона

Явление рассеяния электромагнитных волн электронами с изменением длины волны названо в честь открывшего его американского ученого А.Комптона (Нобелевская премия 1927 г.).

Согласно волновым представлениям, электромагнитная волна, частота которой  $\omega$ , заставляет электрон колебаться с той же частотой. Колеблясь, электрон излучает, естественно, электромагнитные волны той частоты, с которой он колеблется. Это и есть рассеянная волна. Тем самым частота рассеянной волны совпадает с частотой падающей на электрон волны.

Однако, если рассмотреть рассеяние как столкновение фотона с электроном и учесть, что фотон обладает энергией  $\hbar\omega$  и импульсом  $\hbar\omega/c$  (см. формулы (6)), то из законов сохранения немедленно следует, что частота

фотона должна при рассеянии уменьшаться (а длина волны увеличиваться). Действительно, поскольку электрон приходит в движение, его энергия увеличивается, а энергия фотона должна уменьшиться (на величину приобретенной электроном кинетической энергии). Записав законы сохранения энергии и импульса, можно получить

$$\lambda' - \lambda = \frac{2\pi\hbar}{m_e c} (1 - \cos\theta), \quad (8)$$

где  $\lambda$  и  $\lambda'$  – длины волн света до и после рассеяния,  $m_e$  – масса электрона, а  $\theta$  – угол рассеяния.

Величину  $2\pi\hbar/(m_e c)$  называют комптоновской длиной волны электрона. Она равна  $2,4 \cdot 10^{-12}$  м. Это очень маленькая величина. Ясно, что относительное изменение волны  $\Delta\lambda/\lambda$  заметно только в случае очень коротких волн. Поэтому Комpton-эффект фактически наблюдается при рассеянии рентгеновского и  $\gamma$ -излучений. Вывод формулы (8) – простое упражнение. Удобно считать, что электрон, с которым сталкивается фотон, покоится. Однако, учитывая, что энергичный фотон может заставить электрон двигаться достаточно быстро, надо использовать релятивистскую связь между энергией и импульсом электрона ( $\varepsilon = \sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2}$ ).

Мы настойчиво рекомендуем вывести формулу (8). Согласие экспериментально наблюдаемых фактов именно с этой формулой было первым непосредственным доказательством корпускулярных свойств электромагнитных волн, возможности введения «настоящей» частицы – фотона с полагающимися частице энергией и импульсом (1922 г.). Ваших знаний уже достаточно, чтобы вывести такую важную формулу!

### Частицы излучают волны

До сих пор, говоря о столкновениях, мы рассматривали *истинное* столкновение: до события и после события существуют две частицы. Ни тип частиц, ни их число не менялись. Но в физике термином «столкновение» часто пользуются весьма свободно. Например, на атом налетает фотон (фотон сталкивается с атомом). В результате *столкновения* фотон вовсе исчезает, а атом переходит в возбужденное состояние. Или сталкиваются ион и электрон. Результат стол-