

импульс (количество движения),  $\hbar$  – знаменитая постоянная Планка.<sup>5</sup> Воспользовавшись соотношениями де Бройля, запишем зависимость (13) в корпускулярных терминах:

$$\varepsilon = \sqrt{m_{\perp}^2 c^4 + c^2 p^2}, \quad m_{\perp} = \frac{\hbar k_{\perp}}{c}. \quad (16)$$

Если волна распространяется в пустоте, то из формул (6) и (15) следует равенство

$$\varepsilon = cp. \quad (17)$$

Признаюсь: это отступление написано не для того, чтобы нечто разъяснить. Оно призвано заинтересовать. Поэтому не сердитесь, если кое-что покажется «взятым с потолка». И еще. Обратите внимание: дальше некоторые слова будут напечатаны курсивом. Вы уже знаете, что таким терминам посвящены в ФЭ отдельные статьи. Но в этом разделе курсив означает нечто большее – я советую обратиться к этим статьям. Теперь можно продолжать.

Формула (17) описывает зависимость энергии фотона от его импульса в пустоте. А формула (16) описывает зависимость энергии фотона не в вакууме, а в волноводе.

<sup>5</sup> Я попытался в ФЭ найти статью о соотношениях Луи де Бройля. Я искал «де Бройля соотношения», отбросил частицу «де», добавил имя. К счастью, в 5-м томе есть Предметный указатель. Прошкнитесь уважением: он занимает 65 страниц, напечатан убористым шрифтом в четыре колонки. Предметный указатель позволил не перелистывать разные тома, пытаясь безуспешно отыскать необходимое слово. Прочитать о соотношениях Луи де Бройля можно в статье «Корпускулярно-волновой дуализм». Мне кажется, недостаток ФЭ – отсутствие Именного указателя.

Фотон – квант электромагнитной энергии, частица, корпускула, или, как принято говорить, *квазичастица* (почти, якобы частица). Фотон – частица в том смысле, что энергия электромагнитного поля частотой  $\omega$  есть сумма порций энергии величиной  $\hbar\omega$ . Энергии электромагнитного поля, меньшей  $\hbar\omega$ , не бывает.

Заметим, у фотона в вакууме если  $p = 0$ , то и  $\varepsilon = 0$ . О частицах, обладающих таким свойством, говорят, что их масса равна нулю. Таких частиц немало: кроме фотонов, есть несколько видов *нейтрино* и различные экзотические частицы, открытые в последние десятилетия при исследовании свойств *элементарных частиц*.

У фотона в волноводе, как ни странно, масса отлична от нуля. Конечно, по сравнению с электронной массой или с массой какой-либо другой более тяжелой частицы масса фотона в волноводе очень мала. Но все же отлична от нуля!

Убедиться в том, что масса фотона в волноводе (мы ее обозначили  $m_{\perp}$ ) очень мала, несложно. Из таблицы в статье «Фундаментальные физические константы» можно найти все величины, относящиеся к элементарным частицам, и постоянную Планка  $\hbar$ . Для расчета примем  $k_{\perp} = 1/R$ , где  $R$  – радиус волновода. Как вы видите, уточнять значение  $k_{\perp}$  и даже указывать, чему равен радиус волновода, нет необходимости: при любом разумном значении радиуса волновода масса фотона в волноводе во много раз меньше массы электрона.

Формула (16), если в ней заметить  $m_{\perp}$  на  $m$ , и формула (17) – обе

релятивистские. Они – следствие механики Эйнштейна (теории относительности). В классической механике Ньютона нет частиц с нулевой массой. Механика Ньютона – предельный случай механики Эйнштейна. Применима она при малых импульсах, т.е. при  $p \ll mc$ . Чаще это неравенство формулируют как признание того, что скорость частицы  $v$  мала по сравнению со скоростью света ( $v \ll c$ ).

В механике Ньютона кинетическую энергию  $\varepsilon_{\text{кин}}$  принято отсчитывать от нуля, считая, что  $\varepsilon_{\text{кин}} = 0$  при  $p = 0$ . Поэтому, желая произвести предельный переход к классическому выражению для кинетической энергии, надо в формуле (16) прежде всего слева и справа вычесть  $mc^2$  – энергию покоя:

$$\varepsilon_{\text{кин}} = \varepsilon - mc^2 = \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2} - mc^2.$$

Домножив и разделив правую часть на  $\sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2} + mc^2$ , воспользовавшись алгебраической формулой для разности квадратов и положив в знаменателе  $p = 0$  ( $p \ll mc$ ), получим привычное выражение

$$\varepsilon_{\text{кин}} = \frac{p^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}.$$

Формулы (15) и (16) – предвестники *квантовой механики*. Они сыграли важную роль: помогли Э.Шредингеру сформулировать свое знаменитое уравнение (уравнение Шредингера) – математическую основу квантовой механики (раньше ее называли волновой механикой). Но это – уже совсем другая тема...

**Дорогие читатели!**

**Мы надеемся, что вы не забудете подписаться на наш журнал на первое полугодие 2001 года. Наш подписной индекс 70465.**

**Оформить подписку можно и в помещении редакции — это избавит вас от возможных недоразумений, связанных с доставкой через почту.**

**В редакции можно также приобрести журналы «Квант» и Приложения к ним за прошлые годы.**

**Наш адрес: 117296 Москва, Ленинский проспект, 64-А, редакция журнала «Квант». Телефон: 930-56-48.**

**Мы ждем вас ежедневно с понедельника по пятницу с 11 до 16 часов. Звоните и приходите!**