

## ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В образовательном стандарте курса общей физики для физических и нефизических специальностей предусматривается уже в разделе оптики изложение свойств, принципов получения и применения индуцированного излучения. Это и понятно, так как курс современной оптики (хотя и в рамках общей физики), не включивший в себя вопросы, связанные с излучением, имеющим высокую временную и пространственную когерентность, был бы неполноценным и не отражал бы современные достижения и перспективы развития оптики. Кроме упомянутых вопросов, во всём курсе оптики широко пользуются понятиями монохроматического и немонохроматического света, спектральной линии, шириной спектральной линии и др. Для изложения этих вопросов необходимо применять закономерности и понятия, которые раньше применялись в атомной физике или в квантовой механике (постулаты Бора, энергетические переходы атомов, вероятности переходов и т. д.).

Рассматривая совокупность опытов с элементарными частицами, например, с электронами, мы видим, что в ряде случаев эти “частицы” обнаруживают волновые свойства, в ряде же – корпускулярные свойства, присущие обыкновенным макрочастицам.

Корпускулярные свойства электронов обнаруживаются во всех случаях, когда действие электронов проявляется в малой области, например, когда электроны вызывают сцинтилляцию на флюоресцирующем экране или дают следы в камере Вильсона. Наоборот, явление дифракции электронов не могут быть понятны, если представлять электроны как обычные частицы классической механики, движущиеся по определённым траекториям. Эти явления указывают на наличие у электронов волновых свойств.

Для того, чтобы объяснить эту двоякость элементарных частиц, целесообразно, по нашему мнению, рассмотреть соотношение неопределённостей Гейзенберга, согласно которому микрочастица не может иметь одновременно точных значений координаты ( $x, y, z$ ) и компонентов импульса ( $P_x, P_y, P_z$ ), причём неопределённости этих величин удовлетворяют условию:

$$\begin{aligned} \Delta x * \Delta p_x &\geq \frac{h}{2\pi}, \\ \Delta y * \Delta p_y &\geq \frac{h}{2\pi}, \\ \Delta z * \Delta p_z &\geq \frac{h}{2\pi}. \end{aligned} \quad (1)$$

В квантовой теории важна ещё одна пара канонически сопряжённых величин, для которой соотношений неопределённостей (соотношение неопределённостей для энергии и времени) имеет вид:

$$\Delta E * \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2)  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$  – соответственно неопределённости координат, импульса, энергии и времени. Соотношения неопределённостей необходимы для выяснения природы света.

Т. к. определённый набор фактов и некоторое представление об оптических явлениях было получено ещё в средней школе, то, по нашему, мнению, необходимо в начале курса показать историческое развитие на природу света, включая современные взгляды, в этом случае необходимо говорить о соотношении неопределённостей и изложить их физический и философский смысл (излагая при этом вопросы, связанные с энергией, массой и импульсом фотона), гипотезу де-Бройля и вкратце вероятностную интерпретацию волн ассоциированных с частицами). Экспериментально обосновать соотношение неопределённостей здесь ещё невозможно. Для лучшего понимания вопроса на практических занятиях по физике можно по этой теме решить несколько задач. В качестве примера мы можем предложить следующую задачу:

Электрон внутри атома, согласно классическим представлениям, имеет скорость на орбите порядка  $10^6$  м/с. Факт принадлежности электрона к атому требует, чтобы его координата была определена с точностью до атомных размеров, равных  $10^{-6}$  м. Следовательно,  $\Delta x \approx 10^{-6}$  м и по соотношению (1) допуск  $\Delta p_x$  в определении скорости оказывается равным:

$$\Delta p_x = \frac{h}{m \cdot \Delta x} \approx 6.6 * 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}$$

т. е. погрешность скорости равна самой скорости. Следовательно, в этом случае невозможно сохранить представление об орбите электрона, проходящего с определённой скоростью, т. е. классическое представление здесь неприменимо.

Корпускулярно-волновую трактовку природы света в дальнейшем можно использовать для объяснения остальных оптических явлений, в том числе и для объяснения тех явлений, которые обычно излагаются в конце курса, исходя из квантовой природы и фотонной структуры света.

При изложении современных взглядов о природе света необходимо отметить, что свет не является ни частицей, ни волной в обычном, привычном понимании. Нельзя свет считать потоком дробинки, но нельзя его считать и волной, которая переносит по всему волновому фронту равномерно распределённую энергию. Свет – нечто своеобразное, которое не подходит под классический образец передачи энергии или волнами или частицами. Как видно из формулы для длины волны де-Бройля (3), свет одновременно обладает и корпускулярными свойствами (импульс  $p$ ) и волновыми (длина волны  $\lambda$ )  $\lambda = \frac{h}{p}$  (3)

Соотношение неопределённостей показывает, чем точнее в каком-то опыте появляются корпускулярные свойства фотона, тем менее важную роль в этом опыте играют волновые свойства и наоборот. Корпускулярный и волновой способы описания перемещения фотона не только друг друга исключают, но и дополняют. Корпускулярно-волновой дуализм и соотношения неопределённостей, показывающие невозможность уточнения, являются ли перемещающийся микробъект волной или частицей, появляется как следствие применения к микробъектам привычных представлений о микрочастицах и волнах. Поэтому соотношения неопределённостей не ограничивают возможности познания природы, они только ограничивают применимость понятия о частицах и волнах к микробъектам.

По нашему мнению, изложение современных взглядов на природу света в некоторой степени подготавливает студентов к лучшему пониманию и интерпретации оптических явлений, а также создают определённую связь между волновой и квантовой оптикой и, что не менее важно, между оптикой и атомной физикой, а также между оптикой и квантовой механикой.

Введение соотношения неопределённостей, особенно (2), в начале курса оптики необходимо для объяснения монохроматичности, вернее немонохроматичности света, ширины спектральной линии и других величин. Так как в курсе оптики необходимо излагать вопросы, связанные с индуцированным излучением, люминесценцией и др., то очевидно уже в оптике необходимо дать некоторое представление о квантовой теории эмиссии, т.е. о постулатах Бора, энергетических переходах атомов, вероятностях переходов, метастабильных уровнях и др. Изложение этих вопросов в курсе оптики позволяет их применить для описания многих оптических явлений. В данном случае соотношения неопределённостей

(2) даёт возможность связать средние времена жизни  $\tau_i$  и  $\tau_k$  (неопределённость времени  $i$ -го и  $k$ -го уровня энергии с шириной этих уровней  $\Delta E_i$  и  $\Delta E_k$  (неопределённостей энергии):

$$\Delta E_i \cdot \tau_i \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (4)$$

$$\Delta E_k \cdot \tau_k \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (5)$$

$$\Delta E_i \cdot \tau_i \geq \frac{\hbar}{2}$$

Отсюда непосредственно получается известная формула для ширины спектральной линии:

$$\Delta E = \frac{\Delta E_i + \Delta E_k}{h} \geq \left( \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_k} \right) \hbar \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что энергетическому переходу между метастабильными уровнями (большее  $\tau$ ), соответствует излучение очень монохроматического света (малый  $\Delta E$ ). Т. к. индуцированное излучение соответствует переходам между метастабильными уровнями, то оно очень монохроматично. Благодаря этому и параллельности пучка, лазерное излучение получило очень широкое практическое применение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Т. И. Курс физики. Оптика и атомная физика / Т. И. Трофимова. – М : Высш. шк., 2003. – 288 с.
2. Фриш, С. Э. Курс общей физики. Том 3 / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – М. : Высш. шк., 1961. – 608 с.