

Электродинамич. теория, однако, оказалась недостаточной для описания процессов поглощения и испускания света. М. Планк (M. Planck), анализируя спектры излучения абсолютно чёрного тела, пришёл к заключению (1900), что элементарная колебат. система (атом, молекула) отдаёт волновую энергию эл.-магн. полю или получает её от него не непрерывно, а порциями, пропорциональными частоте колебаний, — квантами. Работы Планка и А. Эйнштейна (A. Einstein, 1905), к-рый приписал квантам кроме энергии также импульс и массу, вернули О. мя. черты корпускулярных представлений. Интенсивность эл.-магн. поля в квантовой О. определяет вероятность обнаружения фотона, а структура поля отражает квантовую структуру ансамбля элементарных излучателей (атомов, молекул) и распределение актов излучения во времени. Т. о., при сохранении физ. смысла поля фотоны, возникающие при актах испускания света и существующие только при движении со скоростью света, приобрели черты материальных частиц. Фотонные представления позволили Эйнштейну объяснить осн. законы *фотоэффекта*, впервые исследованные А. Г. Столетовым в 1888—90; они дают наглядное истолкование существованию КВ-границы в *тормозном излучении* электронов, *Комптона эффекту*, открытому в 1923, *стоксову сдвигу частоты излучения фотолюминесценции*, комбинац. рассеянию света [открытому в 1928 Л. И. Мандельштамом и Г. С. Ландсбергом и независимо Ч. В. Раманом (Ch. V. Raman)] и др. явлениям взаимодействия света с веществом.

В совр. О. квантовые представления не противопоставляются волновым, а сочетаются на основе *квантовой механики* и *квантовой электродинамики*. Квантовая теория позволила дать интерпретацию спектрам атомов, молекул и ионов, объяснить воздействие электрич., магн. и акустич. полей на спектры, установить зависимость характера спектра от условий возбуждения и т. д. Примером обратного влияния О. на развитие квантовой теории может служить открытие собств. механ. момента — *спина* — и связанного с ним собств. магн. момента у электрона и др. частиц, повлекшее за собой установление *Паули принципа* (1926) и истолкование *сверхтонкой структуры* спектров [В. Паули (W. Pauli), 1928].

Наиб. важное событие совр. О. — эксперим. обнаружение и создание методов генерации вынужденного излучения атомов и молекул. Вынужденно испущенный фотон дублирует фотон, вызвавший переход, и, если имеется активная среда с *инверсией населённости*, этот процесс может многократно повторяться — происходит усиление нач. светового потока. Добавление к такому квантовому усилителю оптич. обратной связи превращает его в оптич. квантовый генератор (лазер). Первые квантовые генераторы (в сантиметровом диапазоне длин волн — *мазеры*) были созданы А. М. Прохоровым, Н. Г. Басовым и Ч. Таунсом (Ch. H. Townes) в 1954. В наст. время (90-е гг.), используя разл. методы получения инверсной населённости, строят лазеры на твёрдых, жидких, газообразных и плазменных средах. Их появление стимулировало дальнейшее развитие традиц. областей О. и привело к возникновению совершенно новых научных и техн. направлений (нелинейная и параметрич. О., оптич. обработка материалов), сделало возможным практич. реализацию и широкое применение ранее высказанных идей (голография, УТС, оптич. компьютер).

Лит.: Ландсберг Г. С., Оптика, 5 изд., М., 1976; Вавилов С. И., Микроструктура света, М., 1950; Герцбергер М., Современная геометрическая оптика, пер. с англ., М., 1962; Б-орн М., Вольф Э., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; Действие излучения большой мощности на металлы, под ред. А. М. Вонч-Бруевича, М. А. Ельшенича, М., 1970; Спектроскопия оптического смещения и корреляция фотонов, под ред. Г. Каминса, Э. Пайка, пер. с англ., М., 1978; Ахманов С. А., Коротеев Н. И., Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света, М., 1981; Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В., Прикладная нелинейная оптика, М., 1982; Каров В. П., Летохов В. С., Лазерная

оптико-акустическая спектроскопия, М., 1984; Коварский В. А., Перельман Н. Ф., Авербух И. Ш., Многоквантовые процессы, М., 1985; Зельдович В. Я., Пилипенко Н. Ф., Шкунов В. В., Обращение волнового фронта, М., 1985; Лазерная аналитическая спектроскопия, под ред. В. С. Летохова, М., 1986. А. М. Вонч-Бруевич.

**ОПТИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД** — рассматривает распространение света в движущихся средах или при наличии движущихся тел. Первые опыты проводились ещё в нач. 18 в. и были связаны с обнаружением *абберации света* от звёздных источников [Дж. Брэдли (J. Bradley), 1725]. Последующие исследования привели к открытию *Доплера эффекта* (1842), явления увлечения света движущейся средой (*Физо опыт*, 1851) и доказали отсутствие мирового эфира (*Майкельсона опыт*, 1881). Однозначное объяснение этих явлений с единых физ. позиций стало возможным только после создания частной (специальной) *относительности теории* (А. Эйнштейн, 1905) и последующего применения её принципов к описанию эл.-магн. явлений в равномерно движущихся средах [Г. Минковский (H. Minkowski), 1908]. Оптич. явления во вращающихся системах отсчёта, напр. *Саньяка опыт* (1914), описываются на основе *общей теории относительности* Эйнштейна (1915) с использованием локально инерциальных систем отсчёта.

**Расчётные основы** О. д. с. Таковыми являются ур-ния электродинамики движущихся сред, записанные для электрического  $E(r, t)$  и магнитного  $H(r, t)$  векторов плоских монохроматич. волн частоты  $\omega$ :

$$E(r, t) = E_0 \exp\{i(kr - \omega t)\}, \quad (1)$$

$$H(r, t) = H_0 \exp\{i(kr - \omega t)\},$$

где  $E_0$  и  $H_0$  — комплексные амплитуды этих волн, а  $k$  — их волновой вектор. Ур-ния Максвелла для таких волн в отсутствие зарядов и токов принимают вид

$$D = [H(ck/\omega)], \quad B = [(ck/\omega)E], \quad (2)$$

$$kD = 0, \quad kB = 0,$$

где  $D$  и  $B$  — электрич. и магн. индукции для волн (1). Материальные ур-ния Минковского в однородной изотропной среде, движущейся с пост. скоростью  $u = c\beta$ , удобно представить в форме

$$D = \epsilon E + \frac{\kappa \gamma^2}{\mu} (\beta^2 E - \beta(\beta E) + [\beta B]), \quad (3)$$

$$H = \frac{1}{\mu} B + \frac{\kappa \gamma^2}{\mu} (\beta(\beta B) - \beta^2 B + [\beta E]),$$

т. к., согласно ур-ниям (2), вектор  $B$  связан с  $E$ , а вектор  $D$  — с  $H$ . Здесь  $\gamma^{-2} = (1 - \beta^2)$ ,  $\kappa = (\epsilon\mu - 1)$ , а  $\epsilon$  и  $\mu$  — диэлектрич. и магн. проницаемости движущейся среды, измеренные в системе её покоя. Для диспергирующих сред эти величины зависят от частоты  $\omega'$  в системе покоя среды, к-рая в силу эффекта Доплера связана с частотой  $\omega$  и волновым вектором  $k$  в лаб. системе координат соотношением

$$\omega' = (\omega - ku) / \sqrt{1 - u^2/c^2} = \gamma(\omega - ku). \quad (4)$$

Система ур-ний (2) и (3) для волн (1) имеет различные от нуля решения в том случае, если

$$k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} - \left( \frac{\epsilon\mu - 1}{c^2} \right) \frac{(\omega - ku)^2}{1 - u^2/c^2} = 0. \quad (5)$$

Это основное ур-ние О. д. с. — дисперсионное уравнение, связывающее волновой вектор  $k$  с частотой  $\omega$ , с параметрами среды  $\epsilon$ ,  $\mu$  и со скоростью её движения  $u$ . Первые два слагаемых в этом ур-нии имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчёта, а последнее слагаемое, согласно (4), содержит величину  $(\omega')^2$ . В системе покоя среды или при  $u = 0$  получается известное соотношение:  $k^2 = \omega^2 n_0^2(\omega) / c^2$ , где  $n_0(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)}$  — показатель преломления покоящейся среды для частоты  $\omega$ . В силу соотношений (3) условия поперечности векторов  $D$  и  $B$  в ур-ниях (2) приводят к тому, что в движущейся среде  $E_0$  и  $H_0$  в (1) перпендикулярны вектору  $\{k + u(\epsilon\mu - 1)(\omega - ku)\gamma^2 c^{-2}\}$ .