

наука
XX
века

С. Ф. РОДИОНОВ,
Е. Н. ПАВЛОВА

ПРИРОДА СВЕТА

ОБЩЕСТВО „ЗНАНИЕ“ РСФСР

Ленинградская организация

Доктор физико-математических наук

С. Ф. РОДИОНОВ

Кандидат физико-математических наук

Е. Н. ПАВЛОВА

ПРИРОДА СВЕТА

ЛЕНИНГРАД

1968

Родионов С. Ф., Павлова Е. Н.

Р-605 Природа света. Л., «Знание», 1968, 2,0 л.

(Об-во «Знание» РСФСР. Ленинградская организация). 4700 экз. Цена 5 коп.

Перед загл. авт.: С. Ф. Родионов, доктор физ.-матем. наук, Е. Н. Павлова, канд. физ.-матем. наук.

Брошюра предназначена для широкого круга лиц, желающих ознакомиться с основами теории света и физических экспериментов в этой области знаний. Авторы популярно излагают теоретические и экспериментальные основы электромагнитной теории света, рассказывают о его квантовой природе. В заключительной части изложены современные представления о корпускулярно-волновой природе света, о философском значении этого вопроса.

БЗ 19-1968 г.-30

2—3—4

535

Родионов Сергей Федорович

Павлова Елена Николаевна

ПРИРОДА СВЕТА

(БЗ 19-1968 г.-30)

Редактор издательства *А. В. Баннов*

Обложка работы *В. А. Политова*

Технический редактор *М. П. Петрова*

Корректор *Н. А. Браиловская*

М-14958 Сдано в набор 1/III-68 г. Подписано к печати 19/VII-68 г.
Печ. л. 2,0 (усл. печ. л. 1,64), уч.-изд. л. 1,5. Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага тип. № 3. Тираж 4700 экз. Цена 5 коп. Заказ № 491

Ленинградская организация общества «Знание» РСФСР.

Ленинград, Д-104, Литейный пр., 42

Типография № 4 Ленгорисполкома, г. Пушкин

Свет представляет собой форму энергии, которая переносится от источника в пространстве с большой скоростью и наблюдается в каждой точке пространства по ходу луча. Наука о свете называется оптикой.

Можно назвать четыре основных задачи оптики:

- 1) проникновение в микромир, путь в атомную физику;
- 2) проникновение в космос, изучение Вселенной;
- 3) создание оптических инструментов и, наконец, 4) самая важная задача оптики — проблема природы света.

Вопрос о природе света поставлен давно. Когда единственным «прибором», которым располагал человек, был глаз, свет представляли как невидимые «глазные лучи», которыми глаз «ощупывает» тела, давая нам возможность составить представление о свойствах тел.

Первые попытки научного объяснения природы света относятся к XVII веку. В XVIII веке и до 30-х годов XIX столетия в оптике господствовала теория истечения, предложенная Ньютоном: свет рассматривался как потоки частиц, несущихся в пространстве со скоростью около $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Движение этих частиц представлялось инерциальным, происходящим согласно первому закону Ньютона. Таким образом, для этой теории характерен взгляд, господствовавший в физике того времени. Пользуясь теорией истечения, Ньютон смог объяснить явления преломления и отражения света. Однако ряд оптических явлений (интерференция и др.) противоречил теории истечения, и по мере накопления новых экспериментальных фактов она сменилась волновой теорией света.

Волновая теория рассматривала свет как распространение волнового процесса в некоторой гипотетической упругой среде — светоносном эфире, пронизывающем все тела. Однако и в этих взглядах выявился ряд противоречий.

Во второй половине XIX века волновая теория получила совершенно новое содержание, так как Максвеллом была выдвинута гипотеза об электромагнитной природе световых волн. Математически строго обоснованное, подтвержденное блестящими опытами Герца и других физиков, учение об электромагнитной природе света превратилось в стройную теорию, представляющую собой триумф классической физики. Волновая теория

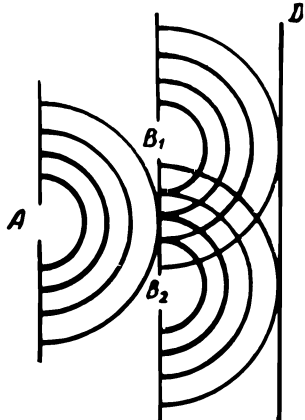


Рис. 1.

и сейчас является одним из краеугольных камней, на которых зиждутся современные воззрения на природу света.

Основными законами оптики, непосредственно следующими из опыта, можно считать два: 1) закон прямолинейного распространения света и 2) закон суперпозиции световых пучков, независимости световых воздействий.

Первый закон возник из самых элементарных представлений — наличия геометрической тени от непрозрачных тел и ограниченности видимых световых

пучков в замутненной атмосфере.

Второй закон заключается в том, что при наложении световых пучков результат не зависит от наличия других пучков; так, если стену, освещенную одной лампой, осветить второй такой же лампой, то освещенность стены удвоится.

Оба эти закона, как и все законы физики, не являются точными, а представляют собой некоторое приближение к истине; не всегда свет распространяется прямолинейно и не всегда суперпозиция световых пучков приводит к усилению освещенности — при определенных условиях световые пучки могут ослаблять друг друга. Последнее явление можно наблюдать, например, если

осветить светом от малого отверстия A (рис. 1) экран с двумя такими же отверстиями B_1 и B_2 . На экране D , расположенном в области, где свет от отверстий B_1 и B_2 перекрывается, мы будем наблюдать наряду со светлыми также темные полосы. Таким образом, опыт показывает, что при определенных условиях световые лучи, налагаясь, ослабляют друг друга. Подобные отклонения от основных законов оптики, о которых говорилось выше, объясняются волновой природой света.

Рассмотрим подробнее природу и свойства световой волны. Согласно классической электромагнитной теории,

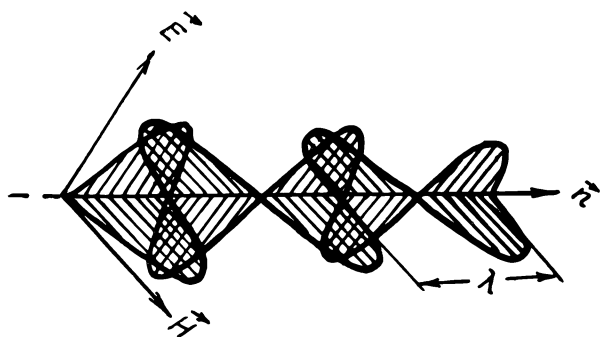


Рис. 2.

световые волны являются электромагнитными волнами, т. е. свет представляет собой распространяющееся в среде электромагнитное возмущение, скорость движения которого в пространстве зависит от свойств среды, в пустоте же равна: $c = 2,99 \cdot 10^{10}$ см/сек.

В каждой точке пространства, до которой доходит электромагнитное возмущение, возникают электрические и магнитные силы, изменяющиеся периодически во времени и составляющие вместе с направлением луча ортогональную систему векторов. Взаимно перпендикулярные векторы напряженности, электрический E и магнитный H , меняются периодически во времени, располагаясь в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения лучей — направлению вектора n (рис. 2).

Распространение световых волн характеризуется в простейшем случае плоско-поляризованной волны следующим уравнением для электрической силы

$$E = E_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{u} \right), \quad (1)$$

где E — мгновенное значение электрического вектора, E_0 — амплитуда световой волны, x — расстояние от источника, $\omega = 2\pi\nu$ — частота изменения светового вектора, u — скорость света в данной среде. Для пустоты $u = c$ (мы рассматриваем только электрический вектор, так как в оптике основным является именно вектор электрической силы, определяющий явления отражения, преломления, поляризации и т. д.; магнитный вектор выступает на сцену только в явлении магнитного вращения плоскости поляризации, явлении Керра и т. п.).

Уравнение (1) дает и пространственную и временную характеристики света, световой волны. Если x остается постоянным, т. е. если мы интересуемся только тем, что происходит в данной точке пространства, то уравнение (1) означает синусоидальный закон временного изменения электрического вектора в данной точке; если постоянно t , т. е. мы рассматриваем колебания электрической силы в различных точках пространства в данный момент времени, то уравнение (1) дает нам пространственное распределение значений вектора E по закону синуса (рис. 3).

Как известно, при прохождении световых лучей через призму лучи света преломляются, т. е. отклоняются от первоначального направления. Величина этого отклонения тем больше, чем больше частота колебаний светового вектора E . Мы наблюдаем это явление, рассматривая, например, окрашенный всеми цветами радуги спектр солнечного света, прошедший через призму (больше всего отклоняются фиолетовые лучи, далее следуют синие, зеленые, желтые и, наконец, крапные).

Зависимость показателя преломления от частоты света называется *дисперсией*. Если взять две небольших призмы с одинаковыми преломляющими углами, совместить их основаниями и осветить светом от одного источника света, то световые лучи источника, преломившись в призмах, дадут освещенное поле на некотором расстоянии от призм — бипризма Френеля (рис. 4). Ка-

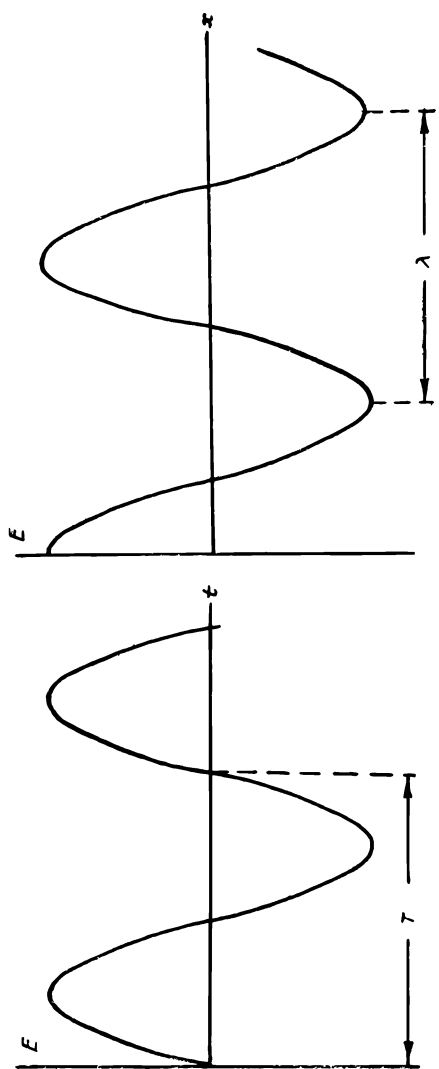


Рис. 3.

залось бы, при любых условиях мы должны получить усиление света на экране, поставленном в месте совпадения световых лучей. Однако в действительности мы будем наблюдать на экране чередующиеся светлые и темные полосы; оказывается, освещенности не только складываются, но и ослабляются. Это явление называется *интерференцией*.

Каждый может наблюдать интерференцию света, рассматривая, например, цвета тонких масляных пленок на поверхности воды: при отражении света от тонкой пленки

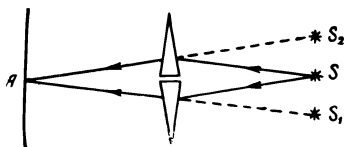


Рис. 4.

возникает совокупность двух систем волн, отраженных от передней и задней поверхностей пленки. Если толщина пленки достаточно мала, то эти волны будут интерферировать, усиливая или ослабляя друг друга.

При этом может случиться, что, например, красный свет будет отражаться с усилением, а синий с ослаблением и отраженный свет будет иметь красную окраску.

Интерференция присуща только волновому процессу, так как только две световых или, что то же, электромагнитных волны, совпав по фазе, могут усилить друг друга или ослабить в зависимости от того, какой путь они прошли. С корпускулярной точки зрения, т. е. при толковании света как потока частиц, явление интерференции было бы непонятно, так как частицам пришлось бы приписать свойство заранее «узнавать», в какое место пространства им нужно попасть, чтобы на экране, поставленном на пути лучей, образовались темные или светлые полосы. С волновой точки зрения интерференция света объясняется логически стройным и элегантным способом. Предположим, что в точке *А* (рис. 4) сошлись две волны, подобные изображенным на рис. 3. Если максимумы электрической силы, «верхушки» волн совпадают, т. е. колебания вектора *Е* находятся, как говорят, в одной фазе, — будет иметь место усиление светового потока и на экране получится светлая полоса. Если же в точке *А* совпадут максимумы и минимумы колебаний напряженности электрического поля, мы получим ослабление освещенности — темную полосу. Таким образом, эффект в точке *А* зависит от фазы приходящей волны φ ,

равной из уравнения (1) пути, пробегаемому волной, умноженному на частоту и деленную на скорость света. Если одна волна запаздывает по сравнению с другой, мы будем иметь разность фаз $\Delta\varphi$, которая обусловит усиление или ослабление освещенности. Складывая уравнение (1) для двух разных волн, мы найдем, что при разности фаз $\Delta\varphi = 2k\pi$ световые колебания будут усиливаться (*максимумы интерференции*), при $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$ колебания будут ослабляться (*минимумы интерференции*). Здесь k есть целое число, т. е. $k = 1, 2, 3 \dots$

Для всех расчетов и теоретических построений удобно ввести понятие *длины волны* λ — расстояния, которое световое возмущение проходит за время $t = T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}$, равное одному периоду колебания вектора \mathbf{E} (время, в течение которого вектор \mathbf{E} , изменяя свое значение, дважды достигнет первоначальной величины). Так как световое электромагнитное возмущение распространяется с постоянной скоростью c , то очевидно: $\lambda\nu = c$.

Постоянная разность фаз для двух одинаковых источников (источники, в которых колебания происходят с постоянной разностью фаз, называются *когерентными*) может быть выражена через так называемую *разность хода* δ , которая в случае, например, бипризмы Френеля совпадает с геометрической разностью длин интерферирующих лучей от «мнимых» источников S_1 и S_2 (см. рис. 4)

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}. \quad (2)$$

Существенной является так называемая *оптическая разность хода*, учитывающая тот, проверенный на опыте факт, что скорость света в среде (фазовая скорость) почти всегда меньше, чем в пустоте, т. е. $u = \frac{c}{n}$ (где n — показатель преломления) и, таким образом, волны «короче» в среде, чем в пустоте.

Итак, простой закон суперпозиции световых лучков, который мы отметили как один из основных законов оптики, в действительности имеет, оказывается, более сложный смысл; возникает волновое взаимодействие, приводящее к явлениям интерференции.

Второй основной закон оптики — прямолинейное распространение света — также, как выясняется, имеет ограниченное применение. Если загородить источник света экраном с малым круглым отверстием, то за экраном не получится четкой тени — края тени будут размытыми; это означает, что лучи света не распространяются прямолинейно, а огибают препятствие, давая так называемую дифракционную картину — чередующиеся темные и светлые кольца, окрашенные при определенных условиях в основные цвета. Огибание светом препятствий и различные явления, при этом возникающие, называемые дифракцией, объясняются с помощью принципа Гюйгенса, сформулированного им еще в XVII веке, когда возникло представление о свете как о волновом процессе.

Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка фронта световой волны является источником новых элементарных волн. Сведя объемную задачу к плоскостной, можно, по принципу Гюйгенса, построить фронт световой волны,

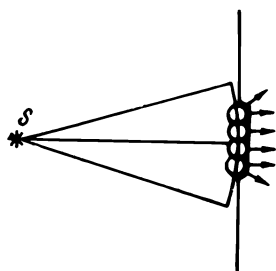


Рис. 5.

образованной элементарными волнами на поверхности падающей волны. Пусть в некоторый момент времени фронт световой волны совпадает с плоскостью малого отверстия, освещенного из точки S (рис. 5). По принципу Гюйгенса отверстие становится источником вторичных элементарных волн, обозначенных на рисунке кружками. Огибающая этих элементарных волн дает фронт волны, прошедшей через отверстие, причем в центре отверстия мы получим параллельный пучок лучей (стрелки, служащие нормалью к огибающей вторичных волн). По краям же направление лучей будет иным по отношению к экрану, т. е. световые лучи будут огибать края отверстия. Определить интенсивность света в области лучей, огибающих края препятствия, помогает метод Френеля.

Допустим, что от источника S распространяется световое возмущение (рис. 6). Нарисуем фронт волны и разобьем его на кольцевые зоны таким образом, чтобы

расстояния от краев соседних зон до точки A различались на половину длины волны

$$AB_1 - AO = AB_2 - AB_1 = AB_3 - AB_2 = \dots = \frac{\lambda}{2}.$$

Тогда колебания, приходящие в точку A от соответствующих частей соседних зон, будут иметь разность хода $\frac{\lambda}{2}$, т. е. будут приходить в точку A в противоположных фазах. Амплитуду волнового возмущения в точке A можно представить как сумму амплитуд от отдельных зон

$$a = a_0 - a_1 + a_2 - a_3 + a_4 - a_5 + \dots \pm a_k.$$

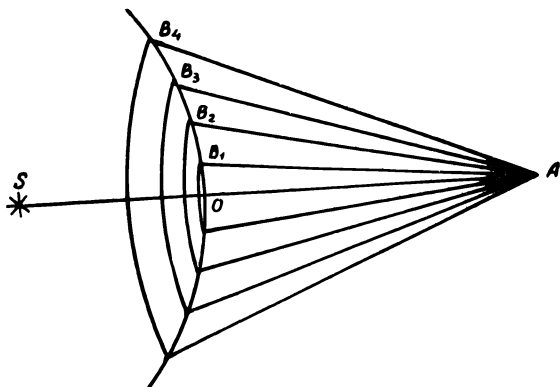


Рис. 6.

Этот ряд будет убывающим, так как при переходе к следующим зонам расстояние до точки A увеличивается. Напишем этот ряд в следующем виде

$$a = \frac{a_0}{2} + \left(\frac{a_0}{2} - a_1 + \frac{a_2}{2} \right) + \left(\frac{a_2}{2} - a_3 + \frac{a_4}{2} \right) + \left(\frac{a_4}{2} - \dots \right).$$

Так как амплитуды монотонно убывают с ростом k , то можно приближенно положить амплитуду колебаний, вызванных какой-либо k -й зоной, равной полусумме амплитуд колебаний $(k-1)$ и $(k+1)$, вызванных зонами

$$a_k = \frac{a_{k-1} + a_{k+1}}{2}.$$

Тогда все слагаемые, выделенные окобками, равны нулю и

$$a = \frac{a_0}{2},$$

т. е. амплитуда светового возмущения — освещенность в точке A — равна половине возмущения от центральной зоны. Глаз, помещенный в точке A , видит свет только от половины центральной зоны, т. е. практически точечный источник — свет — распространяется прямолинейно. Поставим теперь на пути лучей небольшой непрозрачный экран \mathcal{E} (рис. 7) такого размера, чтобы закрыть, например, нулевую и первую зоны. В этом случае амплитуда в точке A будет равна

$$a = a_2 - a_3 + a_4 - \dots = \frac{a_2}{2} + \\ + \left(\frac{a_2}{2} - a_3 + \frac{a_4}{2} \right) + \dots,$$

т. е. в точке A будет виден свет от половины второй незакрытой зоны — лучи от источника S огибают препятствие. Если в точке A поместить экран, то мы будем наблюдать на нем черную тень со светлым пятном посередине и чередующиеся светлые и темные кольца вокруг

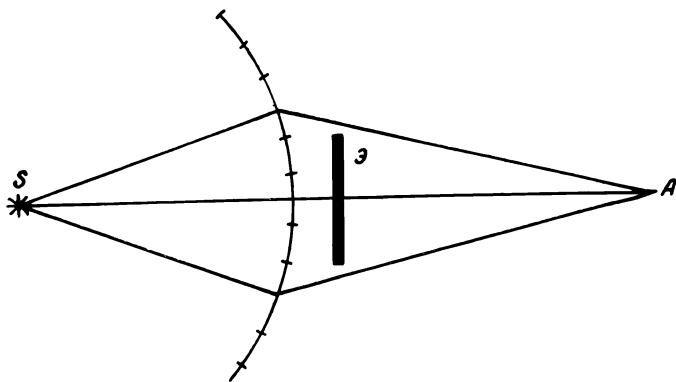


Рис. 7.

тени. Таким образом, в центре геометрической тени, независимо от размеров и положения непрозрачного экрана, всегда окажется свет, интенсивность которого зависит от числа закрытых зон Френеля.

Основным принципом геометрической оптики является принцип Ферма. Принцип Ферма утверждает, что свет, распространяясь, всегда выбирает такой путь, который занял бы наименьшее время. Для математического изображения принципа Ферма служит понятие оптической длины пути луча, представляющее собой произведение показателя преломления вещества на действительный путь света в веществе. Вариация интеграла от произведения длины пути луча на показатель преломления, взятого от точки A , от которой распространяется свет до точки B , в которую свет попадает, является математической формулировкой этого принципа

$$\delta \int_A^B n ds = 0 \quad (3)$$

(знак дельта выражает тот факт, что берется вариация от суммы элементарных оптических длин). Это есть так называемое условие *экстремальности* оптической длины пути луча, представляющее собой математическую формулировку принципа Ферма. Принцип Ферма является основным законом, управляющим явлениями геометрической оптики при длине световой волны, стремящейся к нулю, и выражает прямолинейность распространения света.

Дифракция света кладет предел применению простых соотношений геометрической оптики так же, как и применению оптических приборов большой разрешающей силы, запрещая бесконечное увеличение таких приборов, как телескопы, микроскопы и т. д.

Как мы уже говорили, электромагнитная волна характеризуется колебанием двух векторов — электрического вектора \mathbf{E} и магнитного вектора \mathbf{H} . Эти колебания происходят нормально к направлению луча — световые волны являются поперечными волнами. В так называемом естественном свете, излучаемом большинством источников, колебания каждого из векторов совершаются в различных направлениях нормально к лучу (рис. 8). Если колебания происходят только в одной плоскости, проходящей через луч (рис. 8, б), то такой свет называется *плоско-поляризованным*. При прохождении света через некоторые среды, например, кристаллы, оптически неоднородные в разных направлениях, при

отражении от зеркал под определенным углом и при рассеянии естественный свет превращается в поляризованный. Этот класс явлений называется *поляризацией света*.

Состояние поляризации может быть обнаружено, если поместить на пути света второе зеркало или кристалл. При определенном взаимном расположении первого и второго элементов (поляризатора или анализатора) система пропускает свет, а при повороте поляризатора или анализатора на 90° оказывается непрозрачной.

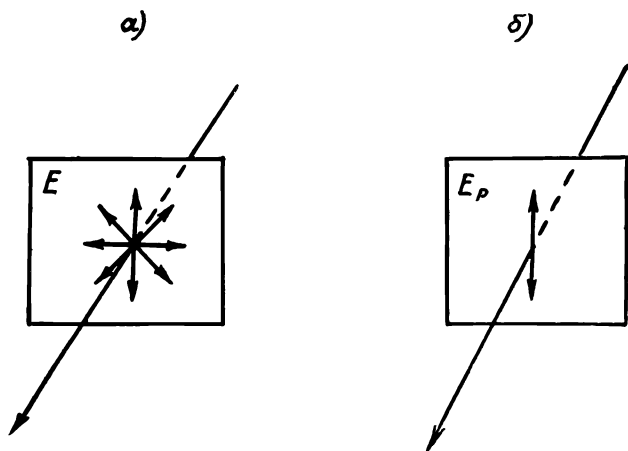


Рис. 8.

Поляризация света является прямым доказательством *поперечности* световых волн. Действительно, из всех возможных направлений вектора \mathbf{E} (рис. 8, а) кристалл пропускает, а зеркало при определенном угле падения преимущественно отражает только волны, колебания электрического вектора которых лежат в одной плоскости (рис. 8, б). Эти явления были бы совершенно необъяснимы, если бы световые волны были продольными: для таких волн положение кристалла или зеркала никак не влияло бы на их распространение.

Как ясно из сказанного, поляризация может быть объяснена только на основе волновых представлений о свете.

К этому же классу явлений относится и явление дисперсии света, заключающееся в том, что лучи разных

длин волн преломляются в веществе по-разному — красные лучи слабее, а фиолетовые сильнее. На рис. 9 дан ход лучей в стеклянной призме. Цветная полоска, т. е. видимый спектр AB , появляющийся на экране, поставленном на пути луча, в обычных условиях эксперимента занимает площадь всего несколько квадратных сантиметров. В действительности спектр электромагнитных волн простирается в сторону больших λ от видимого спектра до бесконечности и в сторону малых λ до 0. За областью, занятой в спектре красными лучами (A), идет область

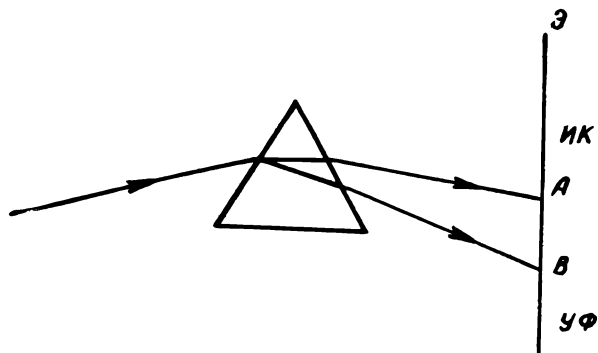


Рис. 9.

инфракрасной радиации ($ИК$), далее область радиоволн. За фиолетовыми лучами (B) в области малых длин волн следуют ультрафиолетовые ($УФ$) лучи (длина волны $0,4 \cdot 10^{-4}—10^{-6}$ см), за ними идут лучи Рентгена (длина волны порядка 10^{-8} см) и гамма-лучи, возникающие, например, при распаде атомного ядра. В стеклянной призме инфракрасные и ультрафиолетовые лучи почти нацело поглощаются стеклом, хотя и могут быть обнаружены чувствительными приемниками радиации.

Дисперсия света объясняется с помощью волновых представлений на основе электромагнитной теории света, учитывающей взаимодействие света с веществом. Влияние среды обусловлено взаимодействием света и частиц вещества. Под действием световой волны электроны, связанные в атомах и молекулах квазиупругими силами, начинают колебаться, создавая вторичные электромагнитные волны, которые распространяются в веществе с уже другой скоростью u , отличной от скорости света в пус-

тоте и равной $\frac{c}{n}$, где c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления вещества.

Можно говорить о фронте движения падающей волны, который имелся вне среды. Распространяясь в среде, этот фронт вызывает так называемую вторичную волну, образованную вторичными вынужденными электромагнитными колебаниями, возбужденными в атомах и молекулах среды. Распространяясь во все стороны и складываясь, эти волны дают вторичную световую волну,двигающуюся с запаздыванием по отношению к первичной волне. Объединяясь, падающая и вторичные волны образуют фронт преломленной волны, распространяющейся со скоростью $u < c$, где $u = \frac{c}{n}$. Показатель преломления (без учета затухания) удовлетворяет уравнению

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m \pi (\nu_0^2 - \nu^2)}, \quad (4)$$

где ν_0 — собственная частота колебания электрона в атоме или молекуле, ν — частота колебания вектора E в падающей волне, N — число молекул в единице объема.

Преломляющая среда может характеризоваться несколькими значениями ν_0 : тогда второе слагаемое правой части уравнения (4) представляет сумму членов вида

$$\frac{Ne^2}{m \pi (\nu_0^2 - \nu^2)}.$$

Учет затухания (в основном потери энергии на излучение) приводит к наличию в знаменателе дроби в уравнении (4) некоторого члена, препятствующего обращению n в бесконечность при условии $\nu = \nu_0$.

Из формулы (4) следует непосредственно, что фиолетовые лучи (частота ν большая) преломляются сильнее красных (частота ν малá). Коэффициент преломления сильно растет с уменьшением длины волны для прозрачных веществ; это явление называется *нормальной дисперсией*. В области частот, близких к собственным частотам колебания молекулы, коэффициент преломления падает с уменьшением длины волны — эта область называется областью *аномальной дисперсии*.

Все эти, как и многие другие явления, составили экспериментальную основу электромагнитной теории света и она казалась незыблемой, непреложной.

Однако в начале XX века обнаружилось, что при изучении тепловых источников радиации электромагнитная теория света вместе с термодинамикой излучения и классической статистикой оказалась бессильной решить вопрос о спектре температурных излучателей (например, так называемого «черного тела»). Известно, что спектр Солнца имеет максимум в видимой области в желтой

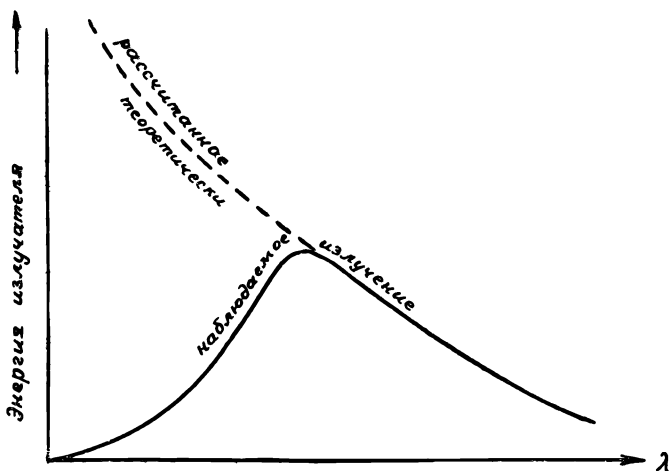


Рис. 10.

части спектра ($\lambda = 0,58 \text{ мк}$). Таков же и характер спектра большинства температурных источников. Источник света рассматривался в классической теории как набор электромагнитных колебаний электрических зарядов в атомах и молекулах вещества, так называемых *осцилляторов*. Если менять температуру источника, например, нагревать абсолютно черное тело, то максимум излучения сдвигается в ультрафиолетовую часть спектра. Теоретическое рассмотрение этого вопроса средствами классической физики, начатое еще в XIX веке, приводило к так называемой «ультрафиолетовой катастрофе», т. е. к бесконечному росту энергии излучения источника с частотой в ультрафиолетовой области спектра (рис. 10).

Выход был найден Максом Планком в 1900 году. Он предположил, что световая энергия может излучаться и поглощаться осцилляторами только целыми кратными порциями определенной величины — *квантами*.

Эта новая революционная идея дала возможность получить правильную формулу для излучения абсолютно черного тела, устранив «ультрафиолетовую катастрофу». Энергия кванта оказалась равной $\epsilon = h\nu$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек — постоянная Планка, ν — частота испускаемого излучения. Планк считал, что «квантовость», т. е. прерывная структура светового потока, имеет место только при излучении и поглощении, а распространение света представляет собой непрерывный процесс. Альберт Эйнштейн в 1916 г. расширил представление о прерывности на процесс распространения света, приписав квантам свойства частиц. Кванты, или, по современной терминологии, фотоны, имеют различную энергию $\epsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ в зависимости от частоты света ν или длины волны λ (для видимых лучей $\epsilon \simeq 4 \cdot 10^{-12}$ эрг, для ультрафиолетовых $\epsilon \simeq 1 \cdot 10^{-11}$ эрг, для инфракрасных $\epsilon \simeq 2 \cdot 10^{-13}$ эрг, для рентгеновых $\epsilon \simeq 2 \cdot 10^{-7}$ эрг). Энергию одного фотона можно записать так

$$\epsilon = mc^2 = h\nu,$$

а количество движения (импульс), которое несет каждый фотон, выразить следующим образом

$$p = mc = \frac{h\nu}{c}.$$

Здесь c — скорость света в пустоте, а m — «масса» одного фотона. Масса фотона обладает замечательным свойством — она существует только тогда, когда фотон движется; в покоем состоянии масса фотона равна нулю. Действительно, согласно теории относительности Эйнштейна (а при больших скоростях, близких и равных скорости света, мы обязаны применять соотношения теории относительности), масса движущегося тела равна

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (5)$$

где m_0 — значение массы в покоящейся системе координат.

Отсюда энергия «частицы света» — фотона — равна

$$\varepsilon = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} . \quad (5a)$$

При $v \rightarrow c$ энергия частицы должна стремиться к бесконечности, что невозможно. Следовательно, для того чтобы ε осталась конечной величиной, остается положить в уравнении (5a) покоящуюся массу фотона равной нулю: $m_0 = 0$.

Таким образом, в состоянии покоя масса фотона равна нулю. При излучении света веществом фотоны рождаются, при поглощении перестают существовать как частицы.

Рассмотрим некоторые явления, составляющие экспериментальные основы квантовой оптики. Это — излучение черного тела, о котором мы уже упоминали, затем световое давление, легко объяснимое как суммарный

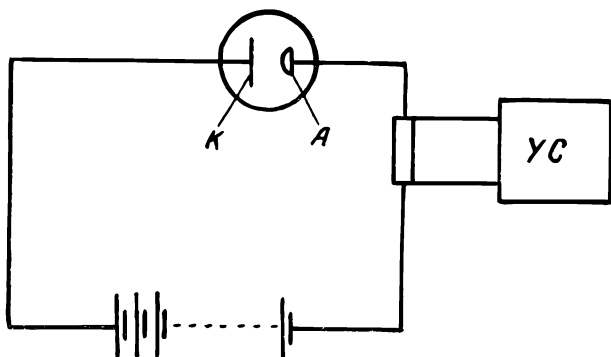


Рис. 11.

импульс фотонов, возникающий при поглощении и отражении света, и далее — фотоэффект, явление Комптона, законы фотохимических превращений и квантовые законы излучения и поглощения света атомами.

Явление *фотоэффекта* заключается в том, что при поглощении света тела заряжаются положительно, теряя отрицательные заряды — электроны. Особенно ясно это явление выступает, если видимым или ультрафиолетовым светом освещается поверхность металла. Тогда электроны, находящиеся в поверхностном слое металла (в так называемой зоне проводимости), вылетают наружу

с различными скоростями и, если пластинка металла помещена в вакуум, могут быть собраны электрическим полем, приложенным извне к пластинке (катоде) и собирающему электроду (аноду) (рис. 11). Такое устройство называется, как известно, *фотоэлементом*. В нем электроны, летящие из катода к аноду, образуют фототок $i_{\text{ф}}$. Этот фототок пропорционален интенсивности светового потока, освещающего фотокатод,

$$1) i_{\text{ф}} \sim J. \quad (6)$$

Эта зависимость была открыта А. Г. Столетовым и называется *законом Столетова*.

Что касается скорости, с которой электроны вылетают из металла, их кинетической энергии, то она зависит только от частоты облучающего света ν , возрастаая линейно с частотой. Чем больше частота света ν , тем больше скорость электронов, «выбиваемых» светом из металла. Эта зависимость, открытая Эйнштейном в 1905 г., называется *законом Эйнштейна* и выражается следующей формулой

$$2) h\nu = P + \frac{mv^2}{2}. \quad (7)$$

Здесь v — скорость электрона вне металла; ν — частота падающего на поверхность металла света; P — работа, которую нужно затратить электрону, чтобы покинуть металл.

Как видим, закон Столетова и закон Эйнштейна никак не могут быть объяснены с точки зрения классической волновой теории. Действительно, если бы электроны были связаны в металле квазиупругими силами — «на пружинках», они могли бы вылетать из металла в том случае, если их сильно раскачали, но тогда скорость их зависела бы от амплитуды световой волны, т. е. от мощности светового потока. Кроме того, требовалось бы некоторое время на «раскачивание» электрона. На самом же деле скорость их зависит только от частоты, а от мощности зависит их число.

Этот закон (7), как известно, был объяснен Эйнштейном путем предположения, что свет может поглощаться только планковскими «порциями» — квантами $\epsilon = h\nu$, энергия которых и есть энергия фотонов, составляющих световой поток. Таким образом, было введено

корпускулярное представление о свете — представление о свете, как о потоке частиц. Согласно этому представлению, свет в таких явлениях, как фотоэффект, проявляет себя как поток фотонов, летящих со скоростью c , которые, попадая в вещество, «выбивают» из него определенную часть слабо связанных электронов. При этом каждый фотон, «выбивший» электрон, им поглощается, перестает существовать, а энергия его тратится на преодоление потенциального барьера на границе твердое тело — воздух (или вакуум) и сообщение электрону кинетической энергии по формуле (7).

Упомянутый выше эффект Комптона заключается в том, что в спектре рассеянных рентгеновых лучей обнаруживаются лучи с длиной волны, большей длины волны падающего на вещество света, причем явление наблюдается наиболее интенсивно для веществ с малым атомным весом, в которых электроны связаны слабо. Интенсивность комптоновского рассеяния возрастает с увеличением угла рассеяния так же, как и величина смещения рассеянной длины волны. Эффект Комптона можно объяснить и количественно описать также только с корпускулярной точки зрения, т. е. представления о свете, как о потоке частиц фотонов с энергией $\epsilon = h\nu$ и количеством движения $p = \frac{h\nu}{c}$, которые сталкиваются со свободными электронами вещества как упругие шарики. При ударе часть энергии фотона передается электрону, и поэтому частота, соответствующая столкнувшемуся фотону, будет уже меньше, т. е. длина волны света, рассеянного веществом, станет больше — в спектре рассеянного света обнаружатся смещенные линии, соответствующие большей длине волны. Так как часть энергии фотона передалась электрону, то электрон получит дополнительный импульс и будет рассеян под некоторым углом. Так возникают электроны отдачи, которые могут быть обнаружены по отклонению их траектории в камере Вильсона.

Последними по счету из явлений квантовой оптики мы поставили *фотохимические превращения*, т. е. химические реакции, происходящие под действием света. Однако они являются не «последними», а с общей точки зрения даже существеннейшими в ряде важных для человека явлений природы.

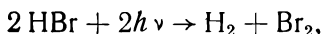
Фотохимические превращения подчиняются двум основным законам — закону Бунзена — Роско и закону Эйнштейна.

Первый гласит, что масса прореагировавшего под действием света вещества пропорциональна количеству поглощенной световой энергии I и времени облучения t

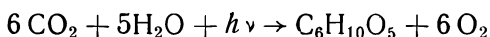
$$m = f(I, t) = kIt \quad (8)$$

(если же в результате активности получившихся продуктов реакции идут вторичные реакции, то они не подчиняются этому закону).

Второй закон представляет собой распространение квантовых представлений о природе света на область химических превращений. Сформулированный впервые Эйнштейном, он гласит: на каждую прореагировавшую молекулу приходится один поглощенный фотон. Например, фотохимическая реакция разложения бромистого водорода — первая химическая реакция с участием света, изученная количественно,



или фотосинтез крахмала, протекающий в зеленых частях растений с разложением углекислоты и выделением молекулярного кислорода



идут так, что каждому фотону, поглощенному реагирующей молекулой, соответствует один элементарный акт реакции. Поскольку на разрыв связей в молекуле (или на активацию) требуется определенная работа A , то энергия фотона должна удовлетворять условию: $h\nu \geq A$, и соответствующая частота ν должна быть не меньше некоторого определенного граничного значения: $\nu_0 = \frac{A}{h} \geq \nu$.

Таким образом, для каждой фотохимической реакции существует «длинноволновая граница»: $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$; при $\lambda \geq \lambda_0$ ($\nu \leq \nu_0$) реакция не идет.

Большинство химических реакций, осуществляемых в лаборатории, происходит только под действием коротковолновых — ультрафиолетовых — лучей, при этом, естественно, необходимо, чтобы свет поглощался реагирующей молекулой. Поглотив свет, молекула приходит в

особое активное состояние («возбужденное состояние») и может вступать во взаимодействие с партнером реакции.

Осуществляющаяся в природе реакция фотосинтеза, столь важная для жизни человечества, идет в зеленых листьях растений под действием видимого света — красных лучей солнечного спектра. Вещество листьев поглощает красные лучи, а пропускает и отражает зеленые, поэтому мы и видим листву окрашенной в зеленый цвет.

Неполный перечень квантовых оптических явлений мы закончим указанием на общие процессы поглощения и излучения. Испускание и поглощение света свободными атомами и молекулами происходит не так, как об этом говорит классическая теория с ее осцилляторами, могущими излучать и поглощать световую энергию любыми порциями. Например, атомные спектры испускания состоят в основном из набора спектральных линий определенных частот, соответствующих квантовым переходам излучающих атомных систем с более высокого (возбужденного) энергетического уровня на более низкий. Дискретный характер энергетических уровней проявляется через дискретность испускаемых или поглощаемых квантов излучения. Таким образом, процессы излучения и поглощения света атомами и молекулами являются также существенно квантовыми и свидетельствуют о корпускулярной природе света.

Для наглядности сопоставим в одной таблице явления, в которых свет проявляет свою корпускулярную природу (корпускулярность и прерывность светового потока в современной теории оптических явлений имеет очень мало общего с ньютоновскими корпускулами света, обладавшими чисто механическими свойствами), с явлениями, хорошо описываемыми волновой теорией света, изображающей распространение света и взаимодействие его с веществом как волновой процесс.

Сопоставление оптических явлений волновой и корпускулярной природы

<i>Волновые эффекты</i>	<i>Квантовые эффекты</i>
Интерференция света	Излучение абсолютно черного тела
Дифракция света	Давление света
Поляризация света	Фотоэффект
Дисперсия света	Эффект Комптона
Молекулярное рассеяние	Фотохимические превращения
	Поглощение и испускание света атомами и молекулами

Как уже отмечалось, корпускулярные свойства света особенно проявляются при малой длине волны в видимой и особенно в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. В видимой и инфракрасной областях (а также в области радиочастот) проявляются все волновые свойства света, описываемые, как мы видели, классической электромагнитной теорией. Отсюда следует, что на опыте свет проявляет себя то как поток частиц — фотонов, то как последовательность волн, в которой колеблющимся объектом является вектор напряженности электрического (и магнитного) поля. В действительности приходится, таким образом, принять, что свет обладает и корпускулярными и волновыми свойствами, т. е. в самой природе света заключен непосредственно присущий ему дуализм.

Дальнейшее развитие квантовой механики и эксперименты в области рассеяния электронов (опыты Девиссона — Джермера, П. С. Тартаковского и других) показали, что волновые свойства присущи и потоку любых других частиц, а не только фотонов. Так, пучок электронов, отраженный от тонкой металлической фольги, дает на экране картину дифракционных кругов. Аналогичная картина получается и при опытах с молекулярными и атомными пучками. При этом длина волны, соответствующая пучку электронов, летящих со скоростью v , связана с импульсом $p = mv$ соотношением: $\lambda = \frac{h}{p}$.

Волновые свойства присущи и отдельной микрочастице. Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм свойствен частицам материи вообще. Следует только помнить о кардинальном различии между световыми волнами и волнами, например, соответствующими движению электронов. В то время как первые имеют электромагнитную природу, вторые представляют собою волны вероятности; их амплитуда определяет вероятность нахождения электрона в данной области пространства.

Когда был установлен корпускулярно-волновой дуализм в вопросе о природе света, полагали, что не может быть эксперимента, в котором проявлялись бы и корпускулярные и волновые свойства света одновременно. Считалось, что свет «ведет себя» подобно упавшей монете, которая всегда поворачивается или той или другой сто-

роной, или «орлом», или «решкой». Эта альтернатива в некоторых книгах по квантовой механике считается одной из формулировок «принципа дополнительности» Бора. Между тем *утверждение о том, что не может быть эксперимента, в котором проявлялись бы и корпускулярные и волновые свойства света, неверно*. Подобный эксперимент может быть осуществлен в области, которая рассматривает *флуктуации* (колебания) светового поля.

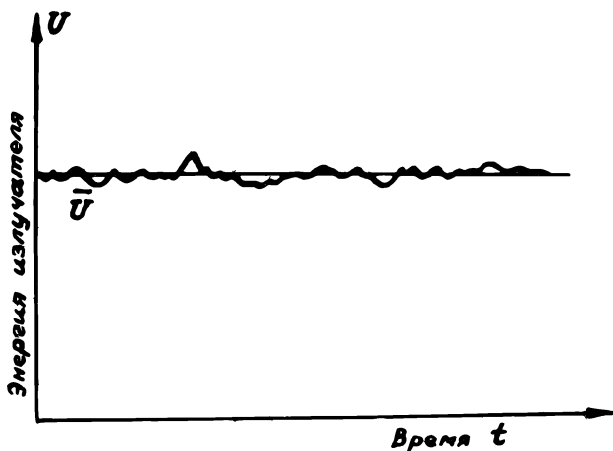


Рис. 12.

Как известно, прерывность физических процессов ведет к флуктуациям физических величин, т. е. к малым хаотическим колебаниям их около некоторого среднего значения. Мерой флуктуации является среднее квадратичное отклонение, называемое на языке математики дисперсией.¹ Если в потоке излучения выделить некоторый объем v , в котором заключается радиация, то световое поле, как и другие физические величины, будет флуктуировать, т. е. энергия U радиации, заключенной в объеме v , будет все время колебаться вокруг среднего значения \bar{U} (рис. 12). Мерой этих флуктуаций будет дисперсия $D = (U - \bar{U})^2$, величина, равная среднему квадрату разности между истинной величиной энергии U и средним значением энергии \bar{U} .

¹ Не следует путать с явлением дисперсии света.

Излучение, содержащееся в объеме v , флуктуирует по двум причинам, причем одна из них имеет корпускулярную природу, другая волновую. Первая определяется тем, что кванты излучения — фотоны — испускаются источником статистически, т. е. число их в единицу времени распределено во времени по законам случайности, поэтому величина энергии U претерпевает флуктуации благодаря статистичности светового потока. Но, с другой стороны, как мы знаем, свет — это система волн. При этом световые колебания даже в случае монохроматического света (т. е. света определенного цвета), характеризующегося на опыте одной длиной волны, представляют собой на самом деле сложное колебание, состоящее из бесчисленного множества косинусоид, подобных изображенным на рис. 3. (Строго монохроматическим может быть только волновой процесс, не имеющий ни начала, ни конца). Поэтому радиация, находящаяся в выделенном объеме v , будет заключена в некотором интервале частот $\Delta\nu$. Налагаясь, волны с различными фазами дадут картину флуктуаций светового поля. Эйнштейном получена полуклассическая формула для флуктуаций светового потока

$$D = \bar{U} h \nu + \frac{c^3}{8 \pi \nu^2 \Delta \nu} \frac{\bar{U}^2}{\nu}. \quad (9)$$

В этом соотношении, как нетрудно видеть, проявляются одновременно как корпускулярные (первый член, зависящий от энергии кванта $h\nu$), так и волновые свойства света. Измерив $D = (U - \bar{U})^2$ на опыте (что возможно осуществить, например, в области малых световых потоков) и построив кривую $D = f(\bar{U})$, можно убедиться в справедливости соотношения (9), т. е. обнаружить на опыте одновременно как корпускулярный, так и волновой члены.

Таким образом, опытные данные приводят к выводу, что свет является синтезом частиц и волн.

Попытаемся выяснить теперь, каким образом двойственная природа света предстает перед нами в количественных представлениях современной теории света — так называемой квантовой электродинамике. Форму этого синтеза, о котором сказано выше, можно представить себе с помощью одного из важнейших законов микромира — соотношения неопределенностей.

Из экспериментального факта — наблюдения дифракционной картины при рассеянии электронных и атомных пучков — следует непосредственно важнейшее соотношение, описывающее мир микрочастиц, к которым мы можем теперь причислить и фотон, — соотношение неопределенностей, полученное впервые Гейзенбергом.

Представим себе, что на экран со щелью шириной d падает пучок электронов, летящих со скоростью v . На экране, поставленном за щелью (рис. 13), они дадут дифракционную картину, причем распределение «интенсивностей» будет таким же, как при дифракции света от щели (измерить его можно, передвигая в плоскости экрана в направлении оси ox , например, счетчик Гейгера). Распределение это изображено на рисунке пунктирной кривой.

Расчет по методу Френеля показывает, что первый минимум получается при угле φ , удовлетворяющем условию,

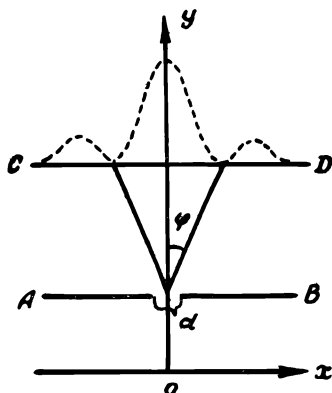


Рис. 13.

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{a}, \quad (10)$$

а максимум нулевого порядка при $\varphi = 0$.

С корпускулярной же точки зрения электроны — частицы — летят в направлении щели, имея составляющую импульса в направлении оси ox , равной нулю, до прохождения щели и отличной от нуля после прохождения щели. При этом в момент прохождения щели положение частицы в направлении оси ox определено с точностью до ширины щели d , т. е. с неточностью Δx , равной d : $\Delta x = d$. При прохождении щели вследствие дифракции меняется направление скорости электронов. Для электронов, попадающих в центральный максимум, проекция импульса на ось ox , ранее равная нулю, будет иметь величину, лежащую в пределах

$$0 \leq p_x \leq \sin \varphi.$$

Следовательно, импульс электронов, проходящих через щель, будет определен с неточностью

$$\Delta p_x \simeq p \sin \varphi$$

или, согласно (10),

$$\Delta p_x \simeq p \frac{\lambda}{d}.$$

Но, как указано выше,

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

где h — постоянная Планка, откуда $\Delta p_x \simeq \frac{h}{d}$, а так как $d = \Delta x$, то окончательно

$$\Delta p_x \Delta x \simeq h. \quad (11)$$

Это соотношение может быть обобщено на все три координаты электрона. Оно называется *соотношением неопределенностей* и представляет собой один из основных законов квантовой механики и квантовой электродинамики.

Физический смысл принципа неопределенности заключается в том, что координата и импульс частицы не могут быть одновременно определены точно. Микрочастица может быть охарактеризована с помощью величин, свойственных классической механике лишь приближенно. Так, например, можно лишь приближенно говорить об орбитах электрона в атоме.

Соотношение неопределенности не является в какой-либо мере границей нашего познания микромира, а свидетельствует лишь об ограниченной применимости моделей и понятий классической физики.

Соотношение неопределенности относится не только к паре величин импульс — координата. Имеются и другие пары величин, которые не могут быть определены одновременно с одинаковой точностью (так называемые канонически сопряженные переменные). Так, для энергии и времени соотношение неопределенности имеет вид

$$\Delta U \Delta t \simeq h. \quad (12)$$

Здесь ΔU есть точность в определении энергии. Это уравнение может описывать энергетическое состояние

частицы: тогда Δt есть время, в течение которого частица может обладать энергией $U \pm \Delta U$.

Уравнение (12) может быть применено также к процессам излучения и поглощения света. Тогда ΔU есть точность в определении энергии данного уровня (т. е. «ширина» уровня), а Δt — так называемое «время жизни» уровня, т. е. время пребывания системы в состоянии с энергией U . Величина Δt может интерпретироваться как время затухания.

Нам представляется не требующим пояснения то, что свет подчиняется принципу неопределенности так же, как электроны и, вообще, любые микрочастицы. Однако формула (11) для фотона не является удобной.

Дело заключается в том, что понятие «координата фотона» не имеет простого физического смысла. Фотон, частица, обладающая нулевой массой покоя, движущаяся с предельной скоростью $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек, является до некоторой степени странным членом в семье элементарных частиц. Указанные особые свойства фотона затрудняют его локализацию в пространстве; трудно говорить о «положении» или «вероятности положения» фотона.

Так, фотону с точно заданным импульсом $\frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ следует сопоставить волну с точно заданной частотой (монохроматический свет). Такой волной может быть только волна бесконечная во времени и пространстве — т. е. положение фотона совсем не будет определено.

Формула (12) соотношения неопределенности более иллюстративна в отношении фотона и сводится после подстановки $\nu = \frac{U}{h}$ к выражению

$$\Delta \nu \Delta t \simeq 1. \quad (13)$$

Корпускулярно-волновой дуализм в вопросе о природе света проявляется с особенной ясностью в выражении принципа неопределенности через канонические переменные — число фотонов N и напряженность E поля волны.

Основные идеи современной квантовой теории света, стремящейся к синтезу волновых и корпускулярных представлений, приводят в общих чертах к следующей картине. Несомые фотонами энергия и импульс локализируются в тех местах, где движутся фотоны, но распреде-

ление фотонов в пространстве зависит от волн. Это последнее обстоятельство обеспечивает расчет пространственного распределения энергии (интенсивности) в соответствии с волновыми представлениями.

Количественные соотношения между напряженностью E поля и числом фотонов N возникают в квантовой электродинамике в общих чертах следующим образом. В классической электромагнитной теории для энергии U и импульса \vec{G} в области пространства объема v существуют уравнения

$$U = \int_v \frac{E^2 + H^2}{8\pi} dv; \quad \vec{G} = \int_v \frac{[\vec{E}, \vec{H}]}{4\pi c} dv. \quad (14)$$

Здесь \vec{E} и \vec{H} — векторы напряженности электрического и магнитного полей.

В классической теории \vec{E} и \vec{G} могут принимать любые значения.

В квантовой электродинамике уравнения (14) сохраняют свою форму, но величины \vec{E} и \vec{H} заменяются их операторами. Количественно эти операторы входят в картину светового поля в виде дискретных рядов своих так называемых собственных значений. Так осуществляется квантование поля. Эти собственные значения определяют величины U и \vec{G} в квантовой теории

$$\left. \begin{aligned} U &= \sum_n \hbar \nu_n N_n + U_0, \\ \vec{G} &= \sum_n \hbar \mathbf{k}_n N_n. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

В уравнениях (15) ν_n — частота, \mathbf{k}_n — так называемый волновой вектор, величина которого $k_n = \frac{2\pi}{\lambda_n}$ обратно пропорциональна длине волны, N_n есть число фотонов с частотой ν_n и длиной волны λ_n , n принимает значения $n=0, 1, 2, 3, \dots$; U_0 есть так называемая нулевая энергия электромагнитного поля, или энергия физического вакуума, существующая даже в отсутствие фотонов. Очевидно, $\sum_n N_n = N$ и равно общему числу фотонов.

Вышеприведенные соотношения относятся к так называемому свободному полю электромагнитных волн. Взаимодействие света с веществом требует более сложного описания. Все эти соображения приводят к соотношению неопределенности в виде

$$\Delta N \Delta E \simeq E. \quad (16)$$

Величины N и E представлены здесь в виде так называемых операторов, т. е. математических объектов квантовой теории, характеризующих состояние системы не просто числом, а совокупностью математических операций, учет которых в конечном итоге приводит к измеримым численным величинам.

Смысл уравнения (16) заключается в том, что если ΔN будет близким к нулю, т. е. мы будем говорить об определенном числе фотонов, то напряженность поля станет неопределенной; эта ситуация будет соответствовать корпускулярной картине. Наоборот, если E известно с высокой точностью, ΔN велико и мы имеем волновую картину.

Если воспользоваться уравнением (1) и вместо E ввести фазу волны $\varphi = \omega\left(t - \frac{x}{u}\right)$, положив $E = \sqrt{N} \sin \varphi$, (что естественно, так как энергия пропорциональна как числу фотонов, так и квадрату электрического вектора), то соотношение неопределенности примет вид

$$\Delta N \Delta \varphi \simeq 1. \quad (17)$$

Здесь альтернативность обеих картин особенно ясна. При точно заданном числе фотонов фаза совершенно неопределенна (корпускулярная картина). При определенной же фазе не имеет смысла говорить о числе фотонов.

Следует указать, однако, что приведенная формула (17) принципа неопределенности не получается так просто, как это казалось еще несколько лет тому назад. В частности, оператор фазы не может быть введен так просто, как указывалось выше. Это обстоятельство, как и ряд других, свидетельствует о многочисленных еще не разрешенных трудностях квантовой электродинамики.

Экспериментально область учения о природе света далеко еще не исчерпана. Прогресс оптического эксперимента за последнее десятилетие привел к некоторым чрезвычайно интересным результатам. Мы имеем в виду опыты Брауна и Твисса по установлению так называемой временной корреляции фотонов.

Два очень ослабленных когерентных луча попадают в два связанных чувствительных приемника света (счетчики фотонов), регистрирующих одновременные попадания в них двух фотонов (так называемые совпадения). Фотоны излучаются, согласно квантовой теории, по зако-

нам случайности. Оказалось, что число экспериментально наблюдаемых совпадений в 1 сек (скорость счёта) значительно превышает число случайных совпадений. Отсюда сделан вывод, что имеется временная корреляция фотонов, согласующаяся с классической электромагнитной волновой теорией даже в случае отдельных фотонов. Ведь понятие корреляций свойственно волновой теории, в рамках которой само понятие когерентности основано на полном временном подобии всех характеристик электромагнитного поля. С квантовой точки зрения такая корреляция должна была бы отсутствовать в силу случайности актов испускания фотонов.

Изучая современную физику, мы должны мыслить посредством сложных категорий и понятий, помня, однако, что, несмотря на видимую сложность, картина мира является познаваемой.

Современную теоретическую физику легкомысленные люди иногда обвиняют в том, что выводы ее «выходят за пределы здравого смысла». Что же, «здравый физический смысл» — это всего лишь только концентрированный опыт прошлого, т. е. иногда довольно опасный руководитель на пути истинного научного прогресса.

Современная физика требует решительного перехода от мышления представлениями к мышлению понятиями. Как известно, в замечаниях на книгу А. Рея «Современная философия» В. И. Ленин подчеркнул и отметил знаком *NB* («хорошо заметить») слова автора о том, что новая физика — «это физика *понятий* в противоположность механистической или образной физике».¹ В этом свете, например, понятие наглядности предстает в совершенно иной форме: отсутствие наглядности не является «философским преступлением».

Заканчивая наш краткий очерк, укажем, что мы взяли на себя задачу дать лишь самое общее понятие о проблеме природы света.

Мы будем считать эту задачу выполненной, если у читателя возникнет желание дальнейшего изучения этой богатой области физики.

¹ В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 29 («Философские тетради»), стр. 487.

Цена 5 коп.