



ГЛАВА 4

ОПТИКА

Оптика немного моложе, чем механика. Знание прямолинейного распространения света и понятие «луча» — древнего происхождения. Отражение и преломление также были предметом размышления уже в древности; уже тогда знали отражение вогнутым зеркалом и линзами. Роджер Бэкон (1214—1294) описал положение фокуса и обратил внимание на неточность соединения лучей света в изображении точечного источника света. Очки, повидимому, были изобретены флорентинцем Сальвино Армати в 1299 г. Закон, определяющий направление отраженного луча, принадлежит к еще более древним знаниям неизвестного происхождения. Указывают на двух авторов закона преломления: Вилброрд Снел, иначе Снеллиус (1591—1626), который, по свидетельству Гюйгенса, открыл этот закон на основе измерений, и Рене Декарт (1596—1650), который вывел этот закон из своего корпускулярного воззрения. Кеплер не вполне справился с этим; его формула имеет значение только как приближение для малого угла падения, однако она была достаточной для установления вполне применимой теории телескопа. С установлением законов отражения и преломления были полностью заложены физические основы геометрической оптики, дальнейшее развитие которой большей частью было делом рук математиков и практиков приборостроения. Такие люди, как Гамильтон и Гаусс (1777—1855), принимали участие в ее развитии, но, несмотря на все старания и остроумие, она до сих пор не получила

завершенного вида. Границы ее применимости ставятся волновой природой света; в микроскопе эти границы выражаются в том, что он не дает четких изображений двух точек, расположенных на расстоянии меньшем, чем 10^{-5} см, как это показали в 1874 г. Эрнст Аббе (1840—1905) и Герман Гельмгольц (1821—1894). Правда, эта граница снижается при применении коротковолнового ультрафиолетового света, а при помощи рентгеновских лучей, как это известно с 1912 г., можно оптически воспринять даже расстояния между атомами в твердых телах, имеющие порядок величины 10^{-8} см (гл. 12).

Большую трудность представляло для старой оптики объяснение цветов. Вторым великим деянием Исаака Ньютона было данное им в 1672 г. доказательство того, что белый свет состоит из света различных цветов и, следовательно, цветной свет имеет более простую природу, чем белый. Ничто так ярко не иллюстрирует значение этого открытия, как страстный протест против него со стороны Гете (1791—1792 и 1810). Гете ссылался на тот факт, что глаз воспринимает белый цвет как единство, в отличие от уха, которое гармонически анализирует колебания. Ньютон был вынужден заняться призмой в связи с хроматической аберрацией оптических инструментов, которую он считал неизбежной. С этим связана его конструкция зеркального телескопа (1672), в котором эта аберрация была полностью устранена. Этой точки зрения придерживались также его последователи до тех пор, пока в 1753 г. Джон Доллонд (1706—1761) не сконструировал ахроматический объектив телескопа с помощью стекол различных сортов. В 1800 г. Фридрих Вильгельм Гершель (1738—1822) указал, что границы спектра не совпадают с границами видимого света и что за красным цветом находится излучение менее преломляемое, но обнаруживаемое благодаря тепловому действию. Спустя год за фиолетовой частью спектра Иоганн Виль-

гельм Риттер (1776—1810), а также Вильям Гайд Волластон (1766—1828) обнаружили химически действующее излучение.

Проблема измерения континуума различных видов световых лучей, разделяемых призмой сообразно их природе, представляет собой проблему, аналогичную измерению времени (гл. 1). Слова «красный», «желтый» и т. д. внутри этого континуума являются слишком неточными и субъективными вехами, изменчивыми в зависимости от того или другого воспринимающего лица. Поэтому значительным шагом вперед было открытие в 1814—1815 гг. Иозефом Фраунгофером названных по его имени темных линий в солнечном спектре (он присоединил к призме спереди коллиматор, а сзади телескоп). Фраунгофер использовал эти линии как метки и смог точно измерить показатель преломления, приписав каждой линии соответствующее значение. В настоящее время так же поступают для различных технических целей. Но поставленная проблема была решена лишь в 1821—1822 гг., когда Фраунгофер получил диффракцию на решетке и Магнус Шверд (1792—1871) объяснил это явление на основе волновой теории (1835 г.). С этого времени стали измерять длину волны любого вида света по известным углу диффракции и постоянной решетки с относительной точностью до 10^{-7} . Именно с этого времени существует спектроскопия с ее огромным значением для науки и техники. Так, например, измерения Пашеном (1865—1947) длин волн для линий водорода и гелия и особенно опирающееся на эти измерения точное определение константы Ридберга имели решающее значение для атомной модели Бора (гл. 14).

Другим дискуссионным вопросом в XVII столетии был вопрос о том, конечна ли скорость света или нет. Декарт ее отрицал, Галилей утверждал, оба без опытного обоснования. Для экспериментального решения

этой проблемы не было тогда достаточно средств. Однако из наблюдений повторяющихся часто, но не строго периодически, затмений одного из спутников Юпитера Олаф Рёмер (1644—1710) вывел в 1676 г. знаменитое заключение о том, что скорость света в пустом пространстве равна $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Наблюдения Джемса Брэдли (1693—1762) над абберацией доставили в 1728 г., несмотря на сомнения картезианцев, долгожданное подтверждение того, что эта скорость в 10^4 раз больше скорости движения Земли вокруг Солнца. Экспериментальные измерения сделаны были впервые в 1849 г. Арманом Физо (1819—1896) при помощи вращающегося зубчатого колеса и в 1862 г. Леоном Фуко (1819—1868) посредством вращающегося зеркала. Эти измерения были повторены еще многими физиками, большей частью теми же самыми методами. Новейшее определение Альберта Абрагама Майкельсона (1852—1931), произведенное в 1925—1926 гг. на расстоянии 70 км от вершины Вильсона до вершины Антонио (Калифорния) и обратно, дало значение $2,99796 \cdot 10^{10}$ см/сек при вероятной ошибке в $4 \cdot 10^5$ см/сек.

Для теории света решающими были открытия интерференции, диффракции и поляризации. Первые наблюдения сделаны Франческо Гримальди (1618—1663), который в появившейся посмертно работе 1665 г. подробно описывает диффракцию на стержне и решетке. Но эти наблюдения, повторенные Ньютоном, остались без влияния на дальнейшее развитие. То же относится к открытию Робертом Бойлем (1627—1691) цветных колец в тонких слоях (1663) — колец, которые носят имя Ньютона, так как он первый исследовал зависимость цвета колец от толщины слоя. Ньютон высказался за корпускулярную теорию истечения света, правда, с некоторой сдержанностью, так как он явно придавал больше значения результатам своих опытов, чем их объяснению. В предисловии к своей

«Оптике» он так же отклоняет гипотезы, как в заключении к «Принципам». Но за эту теорию крепко ухватились его эпигоны, и она продержалась до XIX столетия. Например, Жан Батист Био (1774—1862) не сразу присоединился к волновой теории, хотя он ближайшим образом соприкасался с ее развитием. Робко уже Гримальди, а более определенно Роберт Гук (1635—1703) занимались волновой теорией. Однако датировать ее надо лишь со времени появления «Трактата о свете», представленного Христианом Гюйгенсом (1629—1695) в Парижскую Академию в 1678 г. и опубликованного в 1690 г. Из представления о движении продольных волн он вывел посредством построения огибающих прямолинейное распространение света, а также законы отражения и преломления. Последний закон он установил не только для изотропных тел, но также для исландского шпата, двойное преломление которого он объяснил из образования двух волн, причем одна из них шарообразна, как в изотропных телах, а другая представляет собой эллипсоид вращения. О спектральном разложении света работа умалчивает.

В противоположность механике, в теории света в XVIII столетии был некоторый застой. «Героическая» эпоха волновой теории началась в 1800 г. и продолжалась до 1835 г. Развитие ее наблюдалось преимущественно в Англии и Франции. В 1801 г. выступил Томас Юнг (1773—1829) со своей идеей интерференции и объяснил на ее основе, как известно, ньютоновские кольца. Отсюда он первый получил приблизительные численные значения длин волн света. Он также показал различие между когерентными лучами, возникающими из одного источника света, и некогерентными лучами. Он применил эту идею к объяснению диффракции, которую рассматривал как интерференцию между светом, проходящим непосредственно через диффракционную щель, и краевыми волнами; к этому мы еще возвратимся. В 1809 г. Этьен Луи Малюс (1775—1812) открыл поляризацию, которую сам исследователь считал опровержением волновой теории. Действительно,

она несовместима с продольными волнами, о которых говорится в трактате Гюйгенса. В дополнение к этому в 1811 г. Доминик Франсуа Араго (1786—1853) описал явления цветов, наблюдаемые в кристаллах в поляризованном свете. В 1817 г. Юнг высказался в пользу поперечности волн света, несмотря на то, что подобное представление противоречило обычным воззрениям. В 1815 г. начал свою (увы, столь короткую!) научную деятельность гениальный Огюстен Жан Френель (1788—1827). Благодаря ему физика получила, кроме многих новых наблюдений над интерференцией и диффракцией, также теорию диффракции в форме построения зон (1818). Эта теория связывала принцип огибающих Гюйгенса с идеей интерференции. Френель и Араго (1819) показали, что лучи, поляризованные перпендикулярно друг к другу, не интерферируют, и окончательно укрепили положение теории поперечных колебаний. Кристаллооптика Френеля, объясняющая опыты Араго, сохранила свое значение до наших дней. И наконец в этот же период времени, в 1821—1822 гг., Фраунгофер произвел опыты по диффракции, отличающиеся от опытов Френеля, теоретически более простые, чем опыты Френеля. В 1835 г. их в некотором смысле завершил Шверд своим резюмирующим сочинением «Явления диффракции, аналитически развитые из основных законов волновой теории».

Идея интерференции, согласно которой налагающиеся волны, в противоположность корпускулярным лучам, не обязательно усиливаются, а могут также ослабляться до полного уничтожения, принадлежит с тех пор к числу ценнейших вкладов в физику. Когда встречается неизвестный вид излучения, всегда стараются получить интерференцию; если это удастся, то тем самым доказывается его волновой характер.

Итак, было установлено, что свет является поперечным волновым движением. С течением времени по мере совершенствования экспериментального искус-

ства все увеличивалось количество интерференционных аппаратов и опытов и все повышалась точность измерения. Македонио Меллони (1797—1854) в 1834 г. показал, что инфракрасное излучение в опытах с отражением, преломлением и поглощением ведет себя так же, как свет. Карл Герман Кноблаух (1820—1895) с помощью опытов по интерференции, диффракции и поляризации показал в 1846 г., что оно отличается от света только большей длиной волны. Генрих Мюллер (1809—1875) применил в 1856 г. новое искусство фотографирования к коротковолновому ультрафиолетовому излучению.

Знание спектра значительно расширилось в ноябре 1895 г. благодаря выдающемуся открытию Вильгельма Конрада Рентгена (1845—1923). Непосредственно вслед за этим открытием в 1896 г. Эмиль Вихерт (1861—1928) и Габриэль Стокс (1819—1903) заключили из способа возникновения рентгеновских лучей, что они являются световым излучением с очень короткой волной. Этот вывод полностью подтвердили в опытах по поляризации Ч. Г. Баркла и в опытах по интерференции в атомных пространственных решетках кристаллов В. Фридрих и П. Книппинг (1883—1935). Длина волны рентгеновских лучей колеблется между 10^{-7} и 10^{-9} см. В 1949 г. Дж. Дюмонд с помощью тех же методов расширил оптику до гамма-лучей, имеющих длину волны еще более короткую, чем рентгеновские лучи.

Сделала успехи и теория. Прежде всего получила поразительное подтверждение идея Юнга о краевых волнах при диффракции, когда в 1883 г. Георг Ги (1854—1926) и в 1885 г. Вильгельм Вин (1864—1928) увидели их непосредственно при диффракции света под большим углом; до тех пор они наблюдались только вблизи границы тени. Созданная Френелем гениальная теория зон была в 1883 г. обобщена в математической волновой теории Г. Р. Кирхгофа, а в 1917 г. его дело продолжил А. Рубинович, который математически доказал, например, тождество взглядов Юнга и Френеля

на явления диффракции. Но во всех этих исследованиях вынуждены были пользоваться приближенными способами. Лишь А. Зоммерфельд в 1894 г., математически строго исследовав диффракцию на прямолинейном крае, доказал правомерность этих приближений.

Колебания света рассматривались сначала (как могло быть иначе?) как упругие волны, подобные поперечным колебаниям в твердых телах. Среду, которая должна была переносить их через пустое пространство, называли эфиром. Со времени получения Е. Торричелли и О. Герике (гл. 2) безвоздушного пространства стали думать, что свет, в отличие от звука, не нуждается в материи для своего распространения. Правда, было трудно объяснить, почему в эфире имеют место поперечные, а не продольные волны. В жидкостях и газах возможны только продольные, но не поперечные колебания. Никакая теория упругости не может объяснить появление поперечных волн в подобных средах. Проблема отражения и преломления также не находила полного математического решения. Но вот в 1865 г. Дж. К. Максвелл (1831—1879) вывел из своей теории электричества и магнетизма (гл. 5) математическое заключение о возможности электромагнитных волн, которые распространяются со скоростью света, и тотчас же занялся светом как примером таких волн. Электромагнитная теория света удовлетворяла опыту лучше, чем упругая, поскольку она допускает только поперечные волны и сводит трудности, связанные с представлением о механических свойствах эфира, к более общей проблеме механического объяснения электродинамики вообще. Она привела к простому, у многих тел эмпирически наблюдающемуся отношению между показателем преломления и диэлектрической постоянной. Кроме того, она содержит в себе, как показал в 1875 г. Гендрик Антон Лорентц (1853—1928), полную теорию для предложенных уже Френе-

лем формул интенсивности при отражении и преломлении; последние только экспериментально подтверждались, но не могли быть объяснены теорией упругости. Несмотря на ее преимущества, этой теории пришлось сражаться за свое признание три десятилетия — так велика была сила старых теорий, опирающихся на общее механистическое мировоззрение. После того как в 1888 г. Генрих Герц (1857—1894) обнаружил электромагнитные волны и показал, что они имеют все свойства света: преломление, отражение, интерференцию, дифракцию, поляризацию и ту же скорость распространения, что и у света, — новая теория одержала победу. Старый спор о том, происходят ли световые колебания в плоскости поляризации, как полагал Френель, или они, согласно Францу Нейману (1798—1895), перпендикулярны к ней, был решен теорией отражения Лорентца, а также опытом Отто Генриха Винера (1862—1927) со стоячими световыми волнами, показавшим, что колебания электрического поля совершаются перпендикулярно к плоскости поляризации, а колебания магнитного поля — в самой этой плоскости. Это вполне естественное соединение до этого совершенно независимых теорий света и электродинамики является, может быть, крупнейшим из тех событий, на которые указывалось во введении, как на доказательство истинности физического знания.

Теория Максвелла в своей первоначальной форме хорошо представила распространение света в пустом пространстве, но не дала анализа оптических свойств материи. Особенно не хватало объяснения зависимости показателя преломления от длины волн. Электронная теория Джозефа Лармора (1857—1942) и Антона Лорентца объяснила не только нормальную, но также открытую в 1871 г. Августом Кундтом (1839—1894) аномальную дисперсию, связанную с избирательным поглощением, как явление резонанса способных к колебаниям атомных образований. Величайшим триумфом электронной теории было открытие Питером Зеemanом (1865—1943) в 1896 г. расщепления спектральных

линий в магнитном поле; в 1897 г. Лорентц дал объяснение этого так называемого эффекта Зеемана. В тесной связи с этим явлением стоит найденное уже в 1845 г. Фарадеем вращение плоскости поляризации под влиянием магнитного поля.

Так развилась теория, охватывавшая все явления распространения света и не уступавшая в завершенности механике. Но уже к 1900 году обнаружилось, что она не в состоянии объяснить явления поглощения и испускания света. Об этом будет речь в главах 13 и 14.

