**Волновая теория Френеля**

Марио Льоцци

Молодой дорожный инженер Огюстен Френель (1788—1827), присоединившийся волонтером к роялистским войскам, которые должны были преградить дорогу Наполеону во время его возвращения с острова Эльба, в период Ста дней был уволен со службы и вынужден был удалиться в Матье, близ Казна. Молодой инженер, почти не сведущий в оптике, находясь в Казне, посвятил себя исследованию дифракции, имея в своем распоряжении лишь случайное и примитивное экспериментальное оборудование. Два мемуара, представленных им 15 октября 1815 г. Парижской Академии наук, были первым результатом этих трудов. Араго, которому вместе с Пуансо поручили рассмотреть их и прореферировать, нашел их настолько интересными, что добился для Френеля, который с наступлением реставрации был вновь принят на службу, приглашения в Париж для повторения своих опытов в более благоприятных условиях.

Френель начал исследовать тени, отбрасываемые небольшими препятствиями на пути лучей, и обнаружил образование полос не только снаружи, но и внутри тени, что до него уже наблюдал Гримальди и о чем умолчал Ньютон. Исследование тени, образуемой тонкой проволокой, привело Френеля ко вторичному открытию принципа интерференции. Его поразило, что, если край экрана был расположен вдоль одной стороны проволоки, внутренние полосы исчезали. Итак, подумал он сразу, раз прерывание света от одного из краев проволоки приводит к исчезновению внутренних полос, значит, для их образования необходимо совместное действие лучей, приходящих с обеих сторон проволоки."Внутренние каемки не могут образовываться от простого смешения этих лучей, потому что каждая сторона проволоки в отдельности направляет в тень только непрерывный поток света; следовательно, каемки образуются в результате перекрещивания этих лучей. Этот вывод, который представляет собой, так сказать, перевод явления на понятный язык, полностью противоречит гипотезе Ньютона и подтверждает теорию колебаний. Легко можно догадаться, что колебания двух лучей, которые скрещиваются под очень малым углом, могут действовать в противоположные стороны в тех случаях, когда узлы одних волн соответствуют пучностям других".

Идея Френеля ясна из этой цитаты, хотя ее формулировка недостаточно точна и была впоследствии исправлена самим Френелем: колебания ослабляются, когда "узлы разрежения" одной системы лучей совпадают с "узлами уплотнения" другой системы, и усиливаются, когда оба движения находятся "в гармонии". В общем, приняв принцип интерференции, Френель повторяет путь Юнга. В частности, он дает объяснение окрашиванию тонких слоев.

В Париже Френель узнал об опытах Юнга с двумя отверстиями, которые, по его мнению, были вполне подходящими для иллюстрации волновой природы света. Тем не менее для исключения всякой возможности истолкования этого явления как действия краев отверстий Френель придумал известный "опыт с двумя зеркалами", о котором он сообщает в 1816 г., а затем в 1819 г. "опыт с бипризмой", ставший с тех пор классическим методом демонстрации принципа интерференции.

В 1837 г. Хэмфри Ллойд показал, что оптическая интерференция может быть получена и с помощью одного зеркала, если заставить интерферировать прямой свет и отраженный от зеркала. Однако существенный прогресс был достигнут лишь в 1856 г., когда Жюль Жамен (1818—1886), развивая исследования Брюстера 1831 г., построил свой известный "интерференционный рефрактометр", образуемый двумя параллельными стеклянными пластинками, которые в 1867 г. Квинке предложил серебрить с внешней стороны. Как известно, в этом приборе интерференция происходит за счет разности оптических путей.

Добавим здесь, кстати, что именно опыт с двумя зеркалами подсказал в 1833 г. Джону Гершелю (1792—1871) идею аналогичной установки для исследования интерференции акустических волн, в которой использовалась двойная трубка; эта установка была усовершенствована в 1866 г. Георгом Квинке (1834—1924), в честь которого она получила название, дошедшее до настоящего времени. Применение манометрического пламени для объективных наблюдений было предложено в 1864 г. Карлом Рудольфом Кенигом (1832—1901), заменившим резиновые трубки Квинке металлическими трубками, которые могли удлиняться, как в тромбоне.

Вернемся к работам Френеля. Взяв на вооружение принцип интерференции, волновая теория располагала теперь тремя принципами: принципом элементарных волн, принципом огибающей и принципом интерференции. Это были три отдельных принципа, которые Френель гениально решил слить воедино. Таким образом, для Френеля огибающая волн не просто геометрическое понятие, как для Гюйгенса. В произвольной точке волны полный эффект представляет собой алгебраическую сумму импульсов, создаваемых каждой элементарной волной; полная сумма всех этих импульсов, складывающихся согласно принципу интерференции, может быть, в частности, равна нулю. Френель произвел такой расчет, хотя и не вполне строгим способом, и пришел к выводу, что влияние сферической волны во внешней точке сводится к влиянию небольшого сегмента волны, центр которой находится на линии, соединяющей источник света с освещенной точкой; остальная часть волны дает в сумме нулевой эффект в рассматриваемой точке.

Тем самым было преодолено препятствие, стоявшее в течение веков на пути утверждения волновой теории — согласование прямолинейного распространения света с его волновым механизмом. Каждая точка вне волны получает свет лишь от очень небольшой ее области, прилегающей к точке, ближайшей к рассматриваемой; все происходит так, как если бы свет распространялся по прямой линии от источника к освещенной точке. Действительно, волны должны огибать препятствия, но это утверждение не следует понимать грубо качественно, поскольку отклонение волны за препятствием зависит от длины волны. Зная длину волны, можно рассчитать, как и насколько отклонится свет за препятствием. Рассматривая явление дифракции, Френель произвел такой расчет, и его результаты прекрасно совпали с экспериментальными данными. Первые статьи Френеля о дифракции вследствие их недостаточной математической строгости были неодобрительно встречены Лапласом, Пуассоном и Био, утонченными аналитиками, для которых математическая строгость была культом.

После нескольких лет перерыва в исследованиях Френель вновь излагает свою теорию в обширном мемуаре о дифракции, представленном в 1818 г. на конкурс Парижской Академии наук. Этот мемуар рассматривался комиссией, состоявшей из Лапласа, Био, Пуассона, Араго и Гей-Люссака. Трое первых были убежденные ньютонианцы, Араго был настроен в пользу Френеля, а Гей-Люссак, по существу, не был компетентен в рассматриваемом вопросе, но был известен своей честностью. Пуассон заметил, что из теории Френеля можно вывести следствия, находящиеся как будто в явном противоречии со здравым смыслом, поскольку из расчета следует, что в центре геометрической тени непрозрачного диска надлежащих размеров должно наблюдаться светлое пятно, а в центре конической проекции небольшого круглого отверстия на определенном легко вычисляемом расстоянии должно наблюдаться темное пятно. Комиссия предложила Френелю доказать экспериментально выводы из его теории, и Френель блестяще это выполнил, доказав, что "здравый смысл" в этом случае ошибается. После этого по единодушному предложению комиссии Академия наук присудила ему премию, а в 1823 г. он был избран ее членом.

После установления теории дифракции Френель перешел к исследованию явления поляризации. Корпускулярная теория, вынужденная для интерпретации многочисленных явлений, открытых в первое пятнадцатилетие XIX века, вводить одну за другой различные гипотезы, совершенно необоснованные и порой противоречивые, к этому времени невообразимо усложнилась. В своем опыте с двумя зеркалами, расположенными под углом, Френель получил с помощью одного источника света два мнимых источника, всегда строго когерентных. Он попытался также видоизменить этот прибор, используя два луча, получающихся при двойном лучепреломлении одного луча, и компенсируя надлежащим образом разность оптических путей обоих лучей. Однако ему никак не удавалось добиться интерференции этих поляризованных лучей.

В сотрудничестве с Араго он продолжал экспериментально исследовать возможность интерференции поляризованного света, и им удалось установить, что два луча света, поляризованные в параллельных плоскостях, всегда интерферируют, а два луча света, поляризованные перпендикулярно, никогда не интерферируют (в том смысле, что не гасят друг друга). Как объяснить этот факт? Как объяснить все остальные явления поляризации, не имеющие никакой аналогии в акустике?

Тот факт, что луч, поляризованный при отражении, обладает двумя плоскостями симметрии, ортогональными друг другу и проходящими через луч, мог натолкнуть на мысль о том, что колебания эфира происходят в этих плоскостях перпендикулярно направлению луча. Эта идея была высказана Френелю Ампером еще в 1815 г., но Френель не воспользовался ею. Юнгу, едва лишь он узнал об опытах Френеля и Араго с поляризованным светом,, тоже пришла мысль о поперечных колебаниях, однако то ли из-за неуверенности, то ли из благоразумия он говорил об этом как о "воображаемом поперечном движении", т. е. как о понятии чисто фантастическом,— столь бессмысленными с механической точки зрения представлялись ученым того времени поперечные колебания эфира.

После того как в течение многих лет Френель пользовался языком теории продольных колебаний, в 1821 г. он, не найдя другого пути интерпретации поляризационных явлений, решился принять теорию поперечности колебаний. В том же году он пишет: "Лишь несколько месяцев тому назад, размышляя с большим вниманием по этому поводу, я признал весьма вероятным, что колебательные движения световых волн осуществляются только в плоскости волн как для простого, так и для поляризованного света... Я постараюсь показать, что гипотеза, которую я представляю, не содержит ничего физически невозможного и что она уже может служить для объяснения основных свойств поляризованного света…".

То, что эта гипотеза может объяснить основные свойства поляризованного света, было детально показано Френелем; что же касается того, что в этой гипотезе нет ничего физически невозможного,— это уже совсем другое дело. Из поперечности колебаний следовало, что эфир, будучи тончайшим и невесомым флюидом, должен одновременно быть наитвердейшим телом, тверже стали, ибо только твердые тела передают поперечные колебания. Эта гипотеза представлялась исключительно смелой, почти безумной. Араго, физик явно не склонный к предрассудкам, тот самый Араго, который был другом, советчиком и защитником Френеля во всех случаях, не нашел возможным разделить ответственность за эту странную гипотезу и отказался подписать представленную Френелем статью.

Таким образом, с 1821 г. Френель продолжал свой путь в одиночку, и это был путь, полный побед. Гипотеза о поперечности колебаний позволила ему построить свою механическую модель света. Основой ее является эфир, заполняющий всю Вселенную и пронизывающий все тела, причем эти тела вызывают изменение механических характеристик эфира. Из-за этих изменений, когда упругая волна переходит из свободного эфира в эфир, содержащийся в веществе, на поверхности раздела часть волны поворачивает обратно, а часть проникает в вещество. Тем самым было дано механическое объяснение явления частичного отражения, остававшегося в течение нескольких веков тайной для физиков. Выведенные Френелем формулы, носящие теперь его имя, сохранили свой вид до наших дней. Скорость распространения колебаний в среде зависит от длины волны, а при заданной длине волны тем меньше, чем более преломляющей является среда. Отсюда вытекают как следствие преломление света и его дисперсия. В изотропных средах волны имеют сферическую форму с центром в точечном источнике излучения; в анизотропных средах форма волны описывается, вообще говоря, поверхностью четвертого порядка. В теории Френеля все сложнейшие явления поляризации интерпретируются в удивительном согласии с экспериментальными данными и предстают как частные случаи общего закона сложения и разложения скоростей.

Исследование двойного лучепреломления повлекло за собой анализ сил, возникающих в упругой среде благодаря малым молекулярным перемещениям. В результате этого исследования Френель сформулировал ряд теорем, которые, как заметил Эмиль Верде (1824—1866), редактор трудов Френеля, легли в основу новой отрасли науки — общей теории упругости, развитой вскоре после появления трудов Френеля работами Коши, Грина, Пуассона и Ламе.

В период с 1815 по 1823 г. благодаря Френелю было воздвигнуто величественное здание волновой оптики, которое, как, впрочем, все творения человека, не было свободно от недостатков. Молодой инженер подходил к различным проблемам и разрешал их, полагаясь больше на свою могучую интуицию, нежели на математический расчет. Поэтому иной раз он допускал ошибки, а чаще всего лишь давал схему решения. Но все же его идеи, несмотря на противодействие старых физиков, очень быстро увлекли молодежь, восхищенную наглядностью и простотой теоретической модели. Джордж; Эйри (1801—1892), Джон Гершель (1792—1871), Франц Нейман (1798— 1895) и многие другие физики упорядочили и скорректировали теорию Френеля и вывели из нее ряд следствий.

С 1823 г. Френель, уже больной, начинает по долгу службы заниматься исследованием маяков (университетской кафедры ему не удалось получить). Эти исследования, которые он проводил до самой смерти, наступившей в 1827 г., привели его к изобретению ступенчатых линз и существенному усовершенствованию мигающих маяков.