



ОГЮСТЕН ФРЕНЕЛЬ

ОГЮСТЕН ФРЕНЕЛЬ



*О черк
жизни и деятельности*





Вторая половина XVII в. ознаменовалась блестящим развитием физической науки. В это время возникла широкая система Декарта, означавшая новое научное мировоззрение, в котором важное место занимает идея передачи воздействия через посредство давления, распространяющегося в специальной среде, эфире. К той же эпохе относятся многочисленные и разнообразные исследования Гука, открывшие много фактически нового, интересные в смысле развития системы взглядов, представлявших переход от воззрений Декарта к волновой системе Гюйгенса. Исследования Гюйгенса как в области механики, так, особенно, в области оптики, где «Трактат о свете» содержит замечательные страницы о двойном лучепреломлении в исландском шпате, открытие поляризации при двойном лучепреломлении и принцип Гюйгенса, составивший базу всей волновой оптики XIX в. И, наконец, величайшие творения Ньютона, определившего в своих «Началах» основные законы макромеханики и астрономии на все времена, а в Оптике давшего образцы тончайшего оптического эксперимента и глубокого разностороннего теоретического анализа. Следует помнить, что хотя с именем Ньютона в оптике связывается корпускулярная (эмиссионная) теория, борьба против которой в XIX в. потребовала много усилий, Ньютон наделил свои корпускулы свойствами, из которых выросло в конце концов настоящее волновое мировоззрение. Идея периодичности световых явлений, высказанная Ньютоном в форме учения о световых приступах лёгкого прохождения и отражения, явилась гораздо более глубокой «волновой характеристикой» света, чем те

характеристики, которые можно извлечь из трактата Гюйгенса, писавшего: «...не нужно представлять себе, что сами волны следуют друг за другом на одинаковом расстоянии...». А представление о полярности световых частиц, выдвинутое Ньютоном для объяснения поляризации света при прохождении через исландский шпат, отметило наиболее характерную черту явления—асимметрию света по отношению к лучу, непонятную для продольных волн и получившую своё истолкование только, когда Френель и Юнг пришли к идее поперечности световых волн.

На этом блестящем фоне XVIII в. является для физика гораздо менее плодотворным. В этом столетии зародилась механика системы и получили развитие аналитические методы в механике в работах Даламбера, Эйлера и Лагранжа; усилиями Эйлера и Даниила Бернулли создавалась и развивалась гидродинамика; в работах Пристли, Кевендиша и Кулона был открыт закон взаимодействия точечных зарядов и заложены основы электростатики; Гальвани и Вольты открыли контактные явления и тем способствовали быстрому развитию учения об электрическом токе; появились первые тепловые машины, связанные с именами Ползунова, Ньюкоммена и Уатта. К XVIII в. относятся замечательные исследования Ломоносова «О причине тепла и холода» и «О теории упругой силы газа», представляющие собой развёрнутую картину кинетической теории газов. Исследования эти не получили широкой известности, да, повидимому, и не могли быть оценены современниками, как не были оценены хорошо известные исследования Д. Бернулли и Вольтера, относящиеся к тому же кругу вопросов.

Особенно мало XVIII в. дал для развития оптики. Самым крупным оптическим открытием XVIII в. явилось открытие в 1728 г. аберрации света Брадлеем. Серьёзным вкладом явилось создание фотометрии в работах Бугера и Ламберта. Большое значение имело также исправление заблуждения Ньютона, предполагавшего наличие простой связи между дисперсией и по-

казателем преломления, что делало, по его мнению, невозможным устранение хроматизма; трудами Эйлера и Долонда ошибка эта была исправлена и ахроматическая линза построена. Вот по существу и всё положительное, что принёс XVIII в. для физической оптики. Громадное большинство физиков XVIII столетия придерживалось корпускулярных представлений о свете. Ньютоновское толкование закона преломления, согласно которому скорость света в более преломляющей среде больше, чем в пустоте (воздухе), считалось более приемлемым, чем гюйгенсовское, приводящее к обратному заключению. Как известно, принцип Ферма (1661)—принцип кратчайшего времени прихода света—приводил к выводу Гюйгенса, который казался несовместимым с корпускулярной гипотезой. Сформулировав в 1744 г. свой принцип «наименьшего действия», Мопертюи нашёл возможность примирить плодотворный минимальный принцип с эмиссионной теорией света. Для отыскания истинного пути света вместо требования минимального значения интеграла $\int \frac{ds}{v}$, где v —скорость, а ds —отрезок пути, что соответствует принципу Ферма, Мопертюи требует минимума интеграла $\int v \cdot ds$, что приводит к закону преломления, согласному с корпускулярной теорией. Известно, какое значение принцип Мопертюи приобрёл для динамики, особенно в работах Эйлера и Лагранжа.

Следует отметить, что в XVIII в., несмотря на решительное господство корпускулярных представлений, волновая теория света находила сильных защитников, среди которых прежде всего надо назвать Л. Эйлера, М. В. Ломоносова и В. Франклина. Но в этот период борьба между обоими представлениями имела преимущественно спекулятивный характер. Обсуждались слабые и сильные стороны каждой точки зрения, искались более развёрнутые, детализированные объяснения известным фактам под углом зрения той или иной гипотезы, но *новых фактов* не приводилось, и экспериментальное испытание тех или иных точек зрения не имело

места. Так, установленная ещё Ремером огромная скорость света казалась противоречащей корпускулярной теории. Уже в 1800 г. Юнг в своём первом исследовании по оптике добавлял к этому, что независимость скорости корпускул от силы источника (слабая искра и яркое солнце извергают частицы одной скорости) говорит против корпускулярной теории. В свете наших теперешних знаний (β -лучи, корпускулы в космических лучах) эти возражения теряют силу. Эйлер считал корпускулярные представления несовместимыми с наблюдаемой неизменностью массы солнца, несмотря на длительное и мощное излучение. Однако и здесь новые представления о взаимосвязи энергии и массы заставляют нас признать, что излучение должно сопровождаться уменьшением массы излучающего тела независимо от гипотезы о природе света. Ломоносов и Эйлер видели преимущества волновых представлений, связанных с движением светового эфира, в возможности объяснить с помощью того же эфира и электрические и гравитационные явления. Правда, и Ньютон не отвергал пользы в представлении об эфире, который также наделялся им универсальными функциями, но природу света всё же принимал субстанциальной, корпускулярной. Можно считать важным моментом замысел Ломоносова подвергнуть гипотезу об эквивалентности световосного и электрического эфира экспериментальной проверке путём наблюдения влияния электризации тела на его показатель преломления. Повидимому, Ломоносов не осуществил этого замысла, да он бы и не мог дать в то время определённого результата ввиду малости эффекта. Юнг в 1800 г., почти через 50 лет, вновь приходит к этой мысли и сообщает, что «до сих пор я не был в состоянии наблюдать, что преломляющая способность жидкости меняется при электризации». Лишь в 1875 г. Керр установил возникновение двойного лучепреломления под действием электрического поля. Ломоносов пытался уточнить характер эфирных движений, различая поступательное, вращательное (коловратное) и колебательное (зыблющееся) движение эфира и связывая свет с этими

последними. Эйлер, как раньше Гук, настойчиво подчёркивал сходство между звуком и светом и писал: «свет в эфире—то же, что и звук в воздухе». В соответствии с этим Эйлер связывал цвет с частотой колебания, хотя не мог установить, соответствует ли красный цвет более высокой частоте, чем фиолетовый, и даже менял своё мнение по этому вопросу. Совершенно новым явилось у Эйлера объяснение цветов тел и, в частности, цветов тонких плёнок. Окрашенная поверхность или тонкая плёнка под действием падающего на неё света приходит в колебание. Однако это—не вынужденные колебания, период которых определяется частотой света, а собственные колебания, частота, а следовательно, и цвет которых зависят от свойств плёнки, в частности от её толщины. Как известно, Ньютон видел в периодичности «изначальное свойство» световых частиц, и окрашивание тонких плёнок являлось актом *сортировки*, обусловленной приступами лёгкого отражения и прохождения. Эйлер же приписывал активную роль веществу плёнки, которое *трансформировало* световой импульс, подобно тому, как это было известно для звука (знаменитое наблюдение возникновения музыкального тона при отражении шума фонтана от ступенек версальской лестницы). В этом отношении Эйлер был ближе к Гуку, который, возражая Ньютону, утверждал, что видеть в опыте разложения света призмой доказательство существования в белом свете смеси простых цветов так же неубедительно, как считать, что совокупность музыкальных тонов, издаваемых органом, заключена в воздухе, наполняющем органные меха. Одним из аргументов, которые выдвигал Франклин против корпускулярной теории света, служила неудача всех известных к тому времени попыток обнаружить давление света, которое являлось естественным следствием толчков, сообщающихся препятствию потоком несущихся частиц. Впоследствии Юнг также прибегал к этому аргументу, хотя ни Франклин, ни Юнг не имели возможности указать минимальную величину предполагаемого давления, поскольку относительно массы световых частиц нельзя

было высказать никакого суждения, и следовательно, нельзя было судить, достаточно ли была чувствительность крутильных весов, применявшихся для этих опытов. Но возражение Франклина, имевшее принципиальное значение, поскольку волновая теория развивалась как теория упругая, потеряло всякую силу после того, как Максвелл вывел необходимость светового давления с точки зрения электромагнитной волновой теории света, Бартоли установил его термодинамическую необходимость, а П. Н. Лебедев непосредственным опытом обнаружил наличие светового давления и измерил его величину в согласии с электромагнитной теорией.

Несмотря на остроумие и внутреннюю справедливость многих из этих соображений, они не были в состоянии внести перелом в умонастроения физиков XVIII в. Для этого требовались новые факты, новые открытия, новые идеи, а не только новые обсуждения старых, уже известных вещей. Начало XIX в. как раз и отмечено изобилием таких новых открытий и экспериментов в области оптики, в результате чего в высшей степени плодотворная борьба двух воззрений, разыгравшаяся в этот период, принесла решительную победу волновой теории.

Застрельщиком выступил Томас Юнг (1773—1829). Подобно Р. Майеру и Г. Гельмгольцу, Юнг был по профессии врачом, но прославился как физик. Правда, при необычной разносторонности Юнга трудно сказать, что было его профессией. Являясь практикующим врачом, он стяжал себе известность своими работами по расшифровке египетских иероглифов, был выдающимся музыкантом-исполнителем, игравшим почти на всех музыкальных инструментах, славился как один из знатоков живописи, знал до десяти языков, в том числе древнееврейский, персидский и арабский, был превосходным ботаником и вошёл в историю как физик, открывший принцип интерференции света.

Как уже упоминалось, в первой своей работе в 1800 г. Юнг выступил с общими соображениями, показывающими, по его мнению, преимущества волновой теории.

Но уже в 1801 г. он делает открытие первостепенного значения. Заимствовав у Ньютона мысль об объяснении аномальных приливов в тонкинском порте Батшам взаимодействием двух приливных потоков, втекающих через два пролива разной длины¹⁾, Юнг развивает эту мысль в принцип взаимодействия любых волновых движений, иллюстрируя её на примере водяных волн. Показав, каким образом взаимодействия двух групп одинаковых волн, не разрушая друг друга, могут приводить к различным эффектам в зависимости от того, встречаются ли гребни одной серии с гребнями или впадинами другой, Юнг пишет: «Теперь я предполагаю, что подобные эффекты имеют место, если смешиваются две порции света»²⁾. За этим следует объяснение цветов тонких плёнок, причём две группы волн, встречающиеся в глазу, предполагаются волнами, отражёнными от передней и задней поверхности плёнки. Решающий опыт, который, согласуясь с объяснениями Юнга, показывал неправильность объяснения Ньютона, по которому цвета плёнок обязаны чередованию приступов лёгкого отражения на одной (задней) поверхности плёнки, был произведён лишь в 1833 г. Эйри. Образовав систему Ньютона из металлического зеркала с положенной на него стеклянной линзой, Эйри направил на поверхность линзы под углом Брюстера свет, поляризованный перпендикулярно к плоскости падения. Таким образом, к глазу наблюдателя доходил только свет, отражённый от металлического зеркала, свет же от стеклянной поверхности, представляющей переднюю поверхность воздушной плёнки, не отражался, и образование колец не имело места; изменение плоскости поляризации падающего света приводило к образованию колец.

Юнг объяснил и важную деталь интерференционной картины; центр колец Ньютона (плёнка исчезающей

¹⁾ Н ь ю т о н, Principia, кн. III, пред. XXIV, Рус. пер. А. Н. Крылова, т. II, стр. 492.

²⁾ Th. Young, Works, т. I, стр. 202.

толщины)—чёрный, хотя между лучами, отражёнными от верхней и нижней поверхности, нет разности хода. Объяснение состояло в учёте различия условий отражения (стекло—воздух и воздух—стекло), приводящего к возникновению добавочной разности фаз в π . Налив между линзой из флинта и пластинкой из крона сассафрасовое масло, показатель преломления которого лежит между показателями крона и флинта, Юнг получил белое центральное пятно, доказав справедливость своего объяснения. Это—один из сравнительно немногочисленных случаев, когда Юнг «аргументирует новым экспериментом». Старинное наблюдение Ньютона, что кольца становятся мельче, если прослойку воздуха заменить веществом с бóльшим показателем преломления, объясняется Юнгом уменьшением длины волны в более преломляющих средах, в согласии с общим заключением гюйгенсовой теории преломления. Уже в следующем году Юнг нашёл дальнейшее применение принципу интерференции, объяснив с его помощью диффракционные полосы, возникающие в тени тонкого волоса, хорошо известные со времени Гримальди, Гука и Ньютона. Как известно, Ньютон объяснил появление внешних полос допущением, что притягательная сила, обуславливающая преломление света в веществе, действует на световые частицы уже на некотором расстоянии от поверхности тела, и оставлял без внимания существование внутренних полос. Юнг объяснил внешние диффракционные полосы интерференцией между прямыми лучами и лучами, *отражёнными* от края тела, а полосы внутри тени от узкого объекта—интерференцией лучей, загибающихся у обоих краёв предмета. И в этом случае объяснение было подтверждено опытом, имевшим большую убедительную силу: Юнг показал, что внутренние полосы исчезают, если прекратить доступ света с одной стороны волоска, приставив к нему полоску непрозрачной бумаги.

Юнг попытался далее подойти с волновой точки зрения к вопросам двойного лучепреломления. Одним из крупнейших триумфов Гюйгенса было, как известно,

волновое объяснение двойного лучепреломления в исландском шпате. Прекрасное построение Гюйгенса для преломления необыкновенного луча странным образом не встретило признания. Ньютон описывает в Оптике свой приём решения этой задачи, который дал результат, отличный от гюйгенсова, причём Ньютон, повидимому, подтверждал измерениями своё неверное заключение¹⁾. На протяжении столетия выводы Ньютона считались правильными. Юнг, будучи убеждён в точности гюйгенсова расчёта, обратился к Волластону с просьбой заново произвести измерение показателя преломления в исландском шпате. Измерения Волластона²⁾, тщательность экспериментов которого заслужила ему у современников наименование «папы» (непогрешимого), с большой точностью подтвердили расчёты Гюйгенса и показали ошибочность заключения Ньютона, что, конечно, явилось важным результатом. Однако теории двойного лучепреломления не существовало, ибо построение Гюйгенса, будучи согласным с опытом, исходило из *опущения* существования в исландском шпате двух волн, сферической и сфероидальной, без попытки указать физическую причину этой особенности, если не считать произвольной гипотезы о существовании в исландском шпате двух сортов эфира. Поэтому большое впечатление произвело исследование Лапласа, опубликованное в 1808 г.³⁾.

Лаплас создал динамическую теорию действия молекул кристалла на световые частицы, предполагая, что действие это различно для частиц, составляющих обыкновенный и необыкновенный лучи, т. е. частиц, которые, согласно Ньютону, различно ориентированы по отношению к главному сечению кристалла. Теория Лапласа исходит из допущения, что силы, действующие на корпускулы необыкновенного луча, зависят от

¹⁾ Н ь ю т о н, Оптика, кн. III, вопр. 25, см. также прим. (160) С. И. Вавилова, изд. 2-е, М., Гостехиздат, 1954.

²⁾ Phys. Transact., т. XCII, стр. 381, 1802.

³⁾ Mem. de l'Institut., стр. 300, 1809.

угла, образованного лучом с осью кристалла, а силы, действующие на обыкновенный луч, от направления луча не зависят. Лаплас нашёл с помощью принципа наименьшего действия Мопертюи для необыкновенного луча правила, соответствующие построению Гюйгенса со сфероидом, подобно тому как сам Мопертюи в своё время для обыкновенного преломления нашёл правила, совпадающие с построением Гюйгенса со сферой, сохраняя ньютоновскую трактовку, согласно которой скорость частиц в преломляющей среде больше, чем в пустоте.

Исследование Лапласа было крупным успехом сторонников корпускулярной теории. Юнг немедленно выступил с критикой, в которой указал на искусственность и даже невероятность такой системы сил, какую предполагала теория Лапласа для объяснения явления двойного лучепреломления. Со своей стороны Юнг указал, что образование сфероидальной волны, необходимой для гюйгенсова построения, легко может быть объяснено допущением, что среда обладает по одному из перпендикулярных направлений большей сжимаемостью, чем по другому. Не довольствуясь предложением нескольких моделей такой среды, Юнг обратил внимание, что по данным Хладни скорость распространения звука в древесине шотландской сосны вдоль и поперёк волокон различна в отношении 4 : 5, т. е. что звуковая волна в древесине сфероидальна. Однако нельзя не заметить, что этот пример, как и все рассуждения Юнга, имеет малое отношение к вопросу о двойном лучепреломлении. Объясняя возможность сфероидальной волны, оно не объясняет наличия *двух* волн, распространяющихся по данному направлению с разными скоростями, обладающими разным характером поляризации. Понятно, что для продольных волн, какие имел в виду Юнг, и нельзя было дать волновой модели двойного лучепреломления. В соображениях Юнга есть, несомненно, доля истины. Анизотропия свойств, например анизотропия сжимаемости, конечно, связана с двойным лучепреломлением. И несколько лет спустя

Брюстер показал¹⁾, что односторонне сжатое стекло приобретает свойства двоякопреломляющей среды. Но лишь значительно позже Френелю удалось дать теорию двойного лучепреломления, исходя из анизотропии упругости.

Правда, Юнг пытался ещё в работе 1809 г. связать явление поляризации с неперпендикулярностью луча к поверхности сфероидальной волны, но очень скоро стал известен новый фундаментальный факт, который делал эти представления беспочвенными.

В декабре 1808 г. Малюс сообщил Академии наук о своём выдающемся открытии: он обнаружил возникновение поляризации при отражении света от прозрачных сред (стекла, воды и т. д.)²⁾. Менее чем через год Малюс нашёл, что и преломлённые лучи частично поляризованы в «противоположном смысле» (т. е. в перпендикулярном направлении); поляризация преломлённых лучей также может быть сделана полной, если воспользоваться «стопой пластинок».

Таким образом, поляризация света оказалась отделённой от явления двойного лучепреломления, и связь между поляризацией и несферичностью волн тем самым теряла всякий смысл. Присоединяясь к ньютоновскому представлению о поляризации света как проявлении асимметрии световых частичек, Малюс истолковал в этом смысле наблюдаемые им явления и ввёл самый термин «*поляризация*».

Этьен Малюс родился в 1775 г. Он принадлежал к первому выпуску Политехнической школы, окончил её в 1796 г., после чего вступил в армию. Он принимал участие в египетской кампании Наполеона, участвовал во многих сражениях, перенёс чуму, от которой погиб почти весь гарнизон Яффы, и в октябре 1801 г. вернулся во Францию, проведя в Египте свыше трёх лет; ряд лет служил в качестве военного инженера в разных

¹⁾ Phil. Trans. CV, 60, 1815.

²⁾ «Sur une propriété de la lumière réfléchie par les corps diaphanes», опубликовано в Mémoires d'Arcueil, т. II, 1809.

гарнизонах Франции и лишь в конце 1808 г. перешёл в Париж.

Открытие поляризации при отражении было по существу его первой крупной научной работой, ибо два небольших мемуара по оптике, которые он направил в 1807 г. в Академию, равно как и работа, выполненная им ещё в Египте, где он был членом Египетского института¹⁾, показывая эрудицию и талант автора, не представляли ничего примечательного.

Толчком к исследованию, приведшему Малюса к его открытию, было его участие в конкурсе на премию, объявленном Академией 4 января 1808 г. Тема была сформулирована так: «Дать подкреплённую опытами математическую теорию двойного лучепреломления, которое испытывает свет, проходя через различные кристаллические среды».

Экспериментируя с кристаллом исландского шпата, Малюс заметил, что свет, отражённый от отдалённого окна, раздваивается кристаллом на лучи неравной интенсивности. Продолжая после захода солнца эксперименты со светом свечи, отражённым от стекла, воды и т. д., Малюс завершил своё открытие. В похвальном слове, прочитанном много лет спустя после смерти Малюса, Араго сказал: «В эту ночь, которая последовала за случайными наблюдениями над солнечным светом, отражённым от окон Люксембургского дворца, Малюс создал одну из наиболее замечательных ветвей современной оптики и завоевал неоспоримое право на бессмертное имя».

Открытие Малюса произвело ошеломляющее впечатление. Говоря о нём, Араго писал: «Отражение света занимало наблюдателей ещё со времён Платона и Евклида; ...на протяжении более чем 2300 лет... никто не подозревал в нём ничего большего, как средства отклонять лучи, никто не воображал, что изме-

¹⁾ Египетский институт наук и искусств (Академия) был основан генералом Бонапартом в 1798 г. Среди членов математической секции были Бонапарт, Монж, Фурье, Малюс и др.

нение пути может быть причиной изменения природы. Поколения наблюдателей следовали одно за другим на протяжении тысячи лет, ежедневно соприкасаясь с великолепнейшими открытиями и не делая их». Академия наук присудила Малюсу премию по объявленному конкурсу, а в 1810 г., когда со смертью Жозефа Монгольфьера освободилась кафедра в Физической секции, избрала его своим членом. Он стал также членом Аркейского общества¹⁾, состоявшего из очень ограниченного числа учёных, возглавлявшихся Лапласом и Клодом Бертолле. 12 марта 1811 г. Юнг, состоявший секретарём по сношению с иностранцами Королевского общества, сообщил Малюсу, что Совет Общества присудил ему Румфордовскую медаль. Даже в этом письме Юнг выражал своё удивление по поводу нового открытия и спрашивал, не объясняется ли отсутствие отражения, наблюдаемое в определённых условиях, результатом поглощения лучей. В письме говорится: «Ваши опыты устанавливают недостаточность теории (интерференции), которую я выдвигаю, но они не доказывают её ложности». Несомненно, что Малюс, решительный приверженец теории истечения, и все многочисленные эмиссионисты испытали большое удовлетворение от признания Юнгом недостаточности теории интерференции. Малюс недолго переживал своё торжество. Туберкулёз лёгких, обнаружившийся у него в середине 1811 г. и, повидимому, нашедший благоприятную почву в организме, истощённом перенесённой чумой, свёл его в начале 1812 г. в могилу. Но толчок, данный исследованием Малюса, выдвинул вопрос о поляризации

¹⁾ Это замкнутое научное объединение (*Société d'Arcueil*) было организовано в 1807 г. по инициативе знаменитого химика Клода Бертолле и получило своё название по имени небольшого селения Аркей, вблизи Парижа, где были расположены загородные дома Лапласа и Бертолле и где собирались члены общества. Членами были: Лаплас, К. Бертолле, Био, Гей Люссак, Алекс. Гумбольдт (много лет работавший во Франции), Малюс, Араго, Дюпон, Пуассон, Тенар де Кандоль, Колле-Декотиль, А. Бертолле, Берар и Шайталь. Известны три тома трудов этого объединения—*Mémoires d'Arcueil*.

света и о двойном лучепреломлении после почти полусторазового забвения вновь на первое место. Экспериментальные открытия по поляризации и двойному лучепреломлению следуют одно за другим. В 1811 г. Араго открывает вращение плоскости поляризации в кварце; Био (1815) обнаруживает то же явление в ряде жидкостей и устанавливает закон дисперсии вращения ($\sim 1/\lambda^2$); Араго (1811) открывает явление окрашивания кристаллических пластинок, помещённых между анализатором и поляризатором (хроматическая поляризация), дающее очень тонкий, хотя и косвенный метод обнаружения двойного лучепреломления. Пользуясь им, Брюстер (1815) открывает, что односторонне сжатое стекло уподобляется двоякопреломляющему кристаллу; число кристаллов, обнаруживающих двойное лучепреломление, быстро растёт, и в 1815 г. Брюстер публикует чрезвычайно важное исследование по двойному лучепреломлению, в котором он на основании изучения свыше 150 различных кристаллов устанавливает наряду с одноосными кристаллами, подобными исландскому шпату и кварцу, к которым применимо построение Гюйгенса, новый тип кристаллов, характеризующихся двумя направлениями, не обнаруживающими двойного преломления, и получивших название двуосных кристаллов. Замечательно, что Брюстер чисто эмпирически смог установить, какие типы кристаллической симметрии относятся к двуосным, а какие к одноосным кристаллам, в полном соответствии с современным решением этого вопроса.

Новые явления, казалось, благоприятствовали позициям «эмиссионистов». Только они располагали какой-то точкой зрения на сущность поляризации и широко применяли её. Правда, для объяснения новых фактов приходилось усложнять первоначальную теорию и нагромождать новые гипотезы.

Итак, к 1815 г. положение волновой теории стало весьма неутешительным. Данное Юнгом интерференционное объяснение колец Ньютона, цветов тонких

пластинок и других аналогичных явлений могло рассматриваться как остроумное и многообещающее решение задачи; но и решению Ньютона нельзя отказать в остроумии и перспективности; теория диффракции, предложенная Юнгом, была далеко не удовлетворительна; простейший факт прямолинейного распространения света не имел объяснения в волновой теории; перед явлениями поляризации она останавливалась в полном бессилии; наконец, один из главных козырей волновой теории—построение Гюйгенса для двупреломляющих кристаллов—потерял свою убедительность после того, как открытие двусных кристаллов показало ограниченность его применения.

В этот критический момент состоялось вступление Френеля в науку. В течение 1815 г. два первых мемуара Френеля по диффракции света были направлены в Академию наук. Затем, на протяжении примерно 10 лет, открытия Френеля следуют одно за другим. Когда к концу этого десятилетия деятельность Френеля из-за болезни и смерти прекратилась,—оптика была преобразована!

Огюстен Жак Френель родился 10 мая 1788 г. в Броли, в Нормандии. Отец его был архитектором и работал на постройке одного из фортов Шербурга. Революционные события прервали эту работу, и семья Френеля уехала в их небольшое имение в селении Матье, около Кана. Мать Френеля—урождённая Мериме. Её брат, Леонор Мериме, художник, секретарь Школы изящных искусств, игравший видную роль в жизни Френеля, был отцом знаменитого французского поэта и писателя Проспера Мериме (автора Коломбы, Кармен и «Песен западных славян», принятых даже Пушкиным за записи подлинного славянского фольклора). Маленький Огюстен был слабого здоровья и не проявлял особенных способностей к учению; в восемь лет он едва умел читать. Он не имел никакой склонности к гуманитарным наукам, до конца жизни не мог даже читать по-английски. Но склонность к техническим проблемам, потребность экспериментировать, чтобы получить ясность и добиться лучших результатов, сказывались

очень рано; в то время как учителя Френеля были очень удивлены, если бы кто-нибудь предсказал Френелю судьбу великого учёного, его школьные товарищи называли его «гением» за его умение путём тщательных экспериментов находить лучшие соотношения между длиной и калибром изготовлявшихся ими игрушечных пушек или выбирать породу и способ сушки дерева для луков. В возрасте 13 лет Френель поступил в местную школу в Кане, где у него был превосходный преподаватель математики; шестнадцати с половиной лет Френель вступил (в 1804 г.) в Политехническую школу в Париже. Политехническая школа была создана решением Конвента в 1794 г. по инициативе Монжа, Фуркруа и Л. Карно и имела назначение сообщать учащимся общие принципы наук, необходимые для гражданских и военных инженеров. Через 3 года она выпускала своих питомцев как офицеров армии либо давала им возможность поступить в одну из специализированных школ, например, Школу мостов и дорог, Школу горного дела и т. д. Особенно высоко стояло в Политехнической школе преподавание математических наук.

Уже в Политехнической школе математические способности Френеля были оценены Лежандром. В 1806 г. Френель переходит в Школу мостов и дорог. Окончив последнюю, он в 1809 г. направляется на практическую работу по ремонту и прокладке дорог сперва в Вандею, а затем и в другие округа Франции. Эти годы были тяжёлыми годами для Френеля. Проникнутый чувством долга и требовательности к себе, Френель с исключительным вниманием и добросовестностью выполнял свои обязанности. Но он не мог не чувствовать, сколь мало соответствует порученная ему работа его внутренним возможностям. Кроме того, его особенно тяготили административные обязанности, связанные с его работой, на что он неоднократно жалуется в своих письмах: «Я не знаю ничего более тягостного,—пишет Френель дяде,—как быть вынужденным руководить людьми, и признаюсь, что я в этом ничего не понимаю».

В провинциальной глуши, далеко не удовлетворённый своей работой, Френель старается заполнить пустоту попытками научных исследований. Естественно, что он не сразу находит свою дорогу. Сначала его мысль направляется на философски-религиозные вопросы; однако скоро его интерес перемещается к техническим проблемам, также несколько случайным. В одном из писем к брату (10 февраля 1810 г.) он описывает придуманную им конструкцию гидравлической машины для подъёма воды (эта машина никогда не была осуществлена). В переписке с дядей, Леонором Мериме, он обсуждает некоторые проблемы технической химии и завязывает через посредство дяди сношения с видными химиками. Л. Мериме даже сообщает ему, что академик Тенар с похвалой отозвался о предложенном Френелем новом методе извлечения соды. Но уже к 1814 г. проблемы физики и прежде всего оптики становятся в центре внимания Френеля. Он просит брата (письмо от 15 мая 1814 г.) подписать его на *Annales de Chimie et de Physique* и прислать ему, как можно скорее, новое издание физики Аюи¹⁾.

В этот период он далёк от того, чтобы быть в курсе нового в физике. В письме к брату Леонору от 15 мая 1814 г. он пишет: «Я читал в Монитёре²⁾ несколько месяцев тому назад, что Био прочёл в Институте (Ак. Н.) очень интересный мемуар о поляризации света. Я напрасно ломал себе голову, но так и не догадался, что это такое».

В письме от 11 июля 1814 г. он снова просит: «Поставь меня в известность, что знают о поляризации света. Ты не можешь себе представить, как мне хотелось бы узнать, что это такое. Мне кажется, что Малюс сделал это открытие. Меньше года тому назад Био занимался этим. Пришли мне какой-нибудь мемуар, который бы ввёл меня в курс дела...».

¹⁾ H a ü y, *Traité élémentaire de Physique*.

²⁾ *Moniteur Universel* — журнал, основанный в 1789 г. С 1799 по 1869 г. играл роль официального журнала французского правительства.

Научные интересы Френеля всё более и более определяются. В письме от 5 июля 1814 г. он излагает брату свои сомнения по поводу объяснения аберрации света, как оно изложено в учебнике Аюи, и предлагает проект «решающего опыта», прося показать его какому-нибудь учёному. Но уже на другой день он в другом письме сам вскрывает ошибку своего замысла и даёт правильную интерпретацию аберрации света с волновой точки зрения, уже давно известную. Его мысль всё больше и больше сосредоточивается на сопоставлении корпускулярной и волновой гипотез. Признавая преимущество первой в объяснении прямолинейности света он добавляет: «Я полагаю, что того же можно достигнуть и в гипотезе колебаний, если получше присмотреться...». В то же время он отмечает, что ему кажется трудным совместить отсутствие окрашивания светил в начале и в конце затмения с предположением о различии в скорости световых частиц, соответствующих разным цветам, характерным для корпускулярной гипотезы, и добавляет: «В ожидании (разъяснение этой трудности) я признаюсь тебе, что я испытываю большой соблазн (*je suis fort tenté*) верить в колебание особой жидкости для передачи света и тепла».

В этот период научные занятия Френеля имеют отрывочный и спекулятивный характер: он пытается в свободное время размышлять над физическими проблемами. Положение радикально изменилось в 1815 г.

Известие о бегстве Наполеона с острова Эльбы застало Френеля на работе в одном из южных департаментов Франции. Френель по своим политическим симпатиям не был бонапартистом; возвращение Бурбонов ему казалось освобождением от деспотизма императора. При известии о высадке Наполеона в Каннах Френель, не задумываясь, вступил волонтёром в ряды роялистских войск.

После победы правительство Ста дней начало репрессии. Френель потерял свою должность и был подвергнут надзору полиции в Нионе, месте, где он жил. Однако с ним обошлись довольно мягко. Ввиду болез-

ненного состояния ему было разрешено направиться на жительство к матери, в Матье, и даже остановиться проездом на некоторое время в Париже, где произошла его первая встреча и личное знакомство с Араго.

Вынужденная отставка Френеля произошла в апреле 1815 г. После второй Реставрации он не сразу получил новое назначение, так что его инженерная служба возобновилась только с 3 декабря 1815 г. Эти восемь месяцев изменили всё течение его жизни. В Матье он приступил к серьёзной работе над диффракционной проблемой, причём не ограничился размышлениями и расчётами, но и провёл экспериментальное исследование. Это определило и весь дальнейший характер его работ, которые почти всегда содержали экспериментальную часть. Надо иметь в виду, что большая часть этих экспериментов проводилась в весьма неблагоприятных условиях, в отсутствии организованной лаборатории и на средства самого Френеля, что поглощало заметную часть его скромного жалованья. «Один этот опыт стоил мне 80 франков, потраченных на приборы,—пишет он брату 28 ноября 1817 г.,—ты видишь таким образом, что в физике надо покупать честь делать открытия».

Не исключено, что эта бедность обстановки лишь стимулировала природную изобретательность Френеля. Конечно, в этот период разработки совершенно новой области, когда каждый удачный шаг был чреват открытиями, многое можно было сделать со сравнительно простыми техническими средствами. Однако даже в этой обстановке поражают простота и остроумие экспериментальных приёмов Френеля и то искусство, с которым он добивался нередко превосходной точности с самыми скромными ресурсами. Поистине Френель в высшей степени обладал искусством, которого требовал от физика Бенджамин Франклин: уметь пилить надфилем и шлифовать пилой.

Но Френель обладал и другим драгоценным для физика даром, ещё более важным, чем эта экспериментальная изобретательность. Вряд ли можно указать

в истории физики другого учёного, который обладал бы в такой мере, как Френель, физической интуицией и проницательностью. Он буквально «чувствовал», где лежит истина, и угадывал её с исключительной прозорливостью.

Условиями жизни и своим образованием Френель был плохо подготовлен для занятия физикой. Политехническая школа славилась в первую очередь той высокой математической культурой, которую она прививала своим воспитанникам. Её первыми вдохновителями были знаменитые математики и механики—Лагранж, Лаплас, Монж, Лежандр. Физика, особенно в годы учения Френеля, была поставлена гораздо слабее. Профессором физики был Гассенфратц, о котором Араго в «Истории моей юности» говорит: «Гассенфратц был профессором по имени и его преподавание не могло принести никакой пользы». Учебными книгами по физике были труды авторов XVII и XVIII вв. и «Элементарный курс физики» Аюи, известного минералога и основателя учения о кристаллической решётке; но этот учебник был весьма неполным, особенно в области оптики. Лишь позже дело улучшилось. Профессура по физике перешла в руки Пти, серьёзного учёного, с чьим именем связан один из основных законов теплоёмкости твёрдых тел. Пти поставил преподавание по-новому. Появились систематические руководства, вполне на уровне своего времени, например книги Био: «*Précis élémentaire de Physique expérimentale*» и «*Traité de Physique expérimentale et Mathématique*» (Paris, 1816), во второй из которых более трети посвящено оптике.

Как уже упоминалось, Френель перед своим отъездом в Матть виделся с Араго и получил от него некоторые советы относительно существующих работ по диффракции. Были упомянуты работы Гримальди, Ньютона, Юнга и Бругема¹⁾, который в 1803 г. опублико-

¹⁾ Бругем (Henri Brougham, 1778—1863) опубликовал в свои молодые годы несколько не лишённых интереса математических работ и работ по оптике. В дальнейшем занялся политической деятельностью и в 1830 г. стал лордом канцлером.

вал крайне резкую критическую статью против Юнга, опиравшуюся главным образом на авторитет имени Ньютона. Повидимому, Араго, обращая внимание на интерес, представляемый работами Юнга, не изложил их содержания, ибо Френель в письме к нему от 23 сентября 1815 г. из Матье пишет: «Что же касается сочинения Юнга, о котором Вы мне много говорили, то я очень хотел его прочитать; но, не зная по-английски, я мог бы это сделать только с помощью моего брата¹⁾; после же того, как мы с ним расстались, книга сделалась для меня недоступной».

Как бы то ни было, но во время своей первой работы и составления мемуаров 1815 г., Френель не знал работ Юнга.

В письме 23 сентября Френель пишет Араго: «Я полагаю, что я нашёл объяснение и закон образования цветных каёмок, которые наблюдаются в тени тел, освещённых светящейся точкой. Результаты, которые мне даёт вычисление, подтверждаются наблюдением. Но я не мог ещё сделать эти наблюдения с точностью, необходимой для того, чтобы быть вполне уверенным в справедливости моей формулы». Месяц спустя он сообщает, что ему удалось сконструировать микрометр, обеспечивший необходимую точность и сделать измерения, подтверждающие теоретические формулы, выведенные им на основании теории колебаний.

Он пишет далее: «Очень простой эксперимент доказал мне, что световые лучи могут действовать друг на друга; ослабляться и даже почти совершенно погашаться, когда их колебания мешают друг другу; и, наоборот, добавляться и взаимно усиливаться, когда они колеблются согласно. На этом принципе я основываю моё объяснение диффракции». Таким образом, Френель в этот период самостоятельно открыл прин-

¹⁾ Фюльжанс Френель (F r e s n e l F u l g e a n c e, 1795—1855), впоследствии известный востоковед, член Азиатского общества и член-корреспондент Академии надписей и литературы.

ции интерференции и, как видно из дальнейшего текста письма, весьма широко употреблял его. Он пишет, что ему удалось объяснить с помощью этого принципа отражение, преломление, все случаи диффракции, ньютоновы кольца как при перпендикулярном, так и при наклонном падении, соотношение размеров колец в водяном и воздушном слое, цветные явления при отражении от испаряющейся поверхности и подобные же явления при рассматривании источника через тонкую ткань. Он показывает также, что длина волны, определённая из явлений ньютоновых колец и диффракции,—одна и та же и в два раза больше той длины, которую Ньютон принимал за интервал, необходимый для повторения «приступов».

Таким образом, плоды этой полугодовой работы, в значительной мере повторяющей то, что было сделано Юнгом на протяжении 1800—1804 гг., являются вполне самостоятельным и оригинальным творчеством Френеля. Лишь из письма Араго (8 ноября), которому Академия поручила вместе с Пуансо ознакомиться с мемуарами Френеля, он узнает, что «доктор Томас Юнг рассматривает явления методом, в общем довольно сходным с тем, которым пользуетесь и Вы». Это письмо, за которым последовал и ряд других, положило начало прочной дружбе Френеля и Араго, имевшей большое значение в жизни обоих учёных. Араго способствовал переходу Френеля в Париж и привлёк его к работе по усовершенствованию маяков вместо работ по прокладке дорог; он постоянно и энергично отстаивал интересы Френеля и в Академии наук и в научной печати. С другой стороны, самые значительные работы Араго родились в сотрудничестве с Френелем или приобрели выдающийся интерес благодаря теоретической интерпретации Френеля.

Франсуа Доминик Араго (1786—1853) был всего на 2 года старше Френеля, но его научная и академическая карьера началась очень рано. Блестяще окончив Политехническую школу, он в 19 лет занимает по настоянию Лапласа и Пуассона должность секре-

таря Обсерватории и принимает участие в важных для астрономии исследованиях по рефракции света в газах, предпринятых Био. В 1806 г. Араго вместе с Био направляется для продолжения градусных измерений во Францию и Испании. В то тревожное время экспедиция эта была весьма опасной. Действительно, в начале 1808 г. вступление французов в Испанию ознаменовалось народными восстаниями. Араго был захвачен в плен, дважды бежал и после многих трудностей вернулся во Францию в 1809 г., сохранив все результаты наблюдений. Скоро после своего возвращения он был избран (18 сентября 1809 г.) членом Академии наук на место скончавшегося астронома Лаланда; ему было тогда 23 года.

Научная деятельность Араго весьма многообразна. Он был выдающимся астрономом, геодезистом и геофизиком; с его именем связаны многочисленные исследования и открытия в области оптики. Явление увлечения магнитной стрелки вращающимся медным диском, описанное им под названием «магнетизма вращения», было первым, по существу, наблюдением электромагнитной индукции, как это выяснил несколько лет спустя Фарадей.

С 1830 г. Араго стал непременным секретарём Академии. Ему принадлежит большое количество научных биографий, которые он по обязанности секретаря Академии должен был представлять в качестве похвального слова скончавшимся учёным. Биографии эти, всегда тщательно документированные, не только представляют собою блестящие литературные произведения этого рода, но и весьма интересны как материалы по истории научной и общественной жизни Франции конца XVIII в. и первой половины XIX в. Араго принадлежал к числу радикально настроенных учёных, был с 1830 г. членом Палаты депутатов и после революции 1848 г. членом Временного правительства, в котором руководил в течение некоторого времени морским и военным министерствами. Араго умер в 1853 г.

Заинтересовавшись работами Френеля, Араго со свойственной ему отзывчивостью ищет возможности помочь Френелю в дальнейших исследованиях. Френель в конце 1815 г. получил, наконец, вновь назначение по Управлению мостов и дорог и отправился в Ренн, к месту своей новой службы. Но уже в начале 1816 г. он получает благодаря хлопотам Араго отпуск для проведения в Париже дополнительных опытов в соответствии с пожеланиями Комиссии, назначенной Академией для рассмотрения его мемуаров. Араго обеспечивает ему возможность работать в Лаборатории Политехнической школы и сам принимает непосредственное участие в его опытах. Этот плодотворный период длился около 10 месяцев, и лишь в декабре 1816 г. Френель возвращается в Ренн. За это время были выполнены многочисленные опыты по диффракции и интерференции и углубились теоретические представления Френеля. Результаты наиболее интересных и важных опытов были опубликованы Араго с прямым указанием на роль Френеля. Сюда относится один важный опыт, придуманный Араго, но получивший особое значение благодаря участию Френеля. Вот как пишет об этом Френель в письме к брату от 4 марта 1816 г.: «Он (Араго) придумал недавно новый опыт, о котором я не думал и результаты которого являются опять-таки подтверждением моей теории. Вместо того, чтобы прекратить доступ света с одной стороны нити с помощью непрозрачного экрана, он поместил там стекло, и внутренние каёмки исчезли. Мы вернулись ко мне, чтобы обдумать причину этого; я высказал мысль, что это произошло от запоздания, которое испытал свет, проходя с одной стороны через стекло, так что каёмки 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядка, которые только и можно хорошо наблюдать, оказались вне тени. Я предсказал, что если вместо стекла поместить очень тонкую пластинку слюды или листочек, получаемый выдуванием стекла, то может случиться, что внутренние каёмки не выйдут из тени и что их можно будет увидеть смещёнными в сторону тонкого листочка. Мы

сделали на другой день этот опыт, и всё произошло, как я предвидел; он был этим восхищён¹⁾. В этом опыте, кроме его выдающегося значения для теории диффракции, заложен метод интерференционного определения ничтожных изменений показателя преломления. Араго широко применял в дальнейшем этот метод, и его подробное описание составило содержание последнего мемуара Араго, продиктованного им незадолго до смерти²⁾.

Вторая заметка³⁾ посвящена описанию бизеркал Френеля и опытов с ними, которые были первыми интерференционными опытами, где можно было, устраняя один из пучков, ликвидировать интерференционную картину.

Ценность этих исследований для обоснования волновой теории диффракции неоспорима. Но ещё большее значение для дальнейшего развития волновой оптики имели исследования Френеля, выполненные в этот же период также с участием Араго и относящиеся к влиянию поляризации на интерференцию световых лучей.

Увлечение работой и уверенное ощущение успеха, подкрепляемое искренним одобрением Араго, сменяется у Френеля по временам состоянием упадка и апатии, обусловленным плохим физическим самочувствием, что было не редкостью при крайне слабом здоровье Френеля и напряжённой работе. В письме к брату от 25 сентября 1816 г., сообщая об отказе принять на себя обязанности репетитора при Политехнической школе, он пишет: «Я довольно охотно занимаюсь исследованиями, но мне скучно обучать. Я слишком стар уже, чтобы начинать педагогическую карьеру. К тому же здоровье—самое драгоценное из всех благ, а моё вряд ли выдержало бы подобную работу. Поэтому

¹⁾ Эти опыты опубликованы Араго в *Ann. de Chim. et de Phys.*, I, 199 (1816).

²⁾ А р а г о, *Mém. sur la méthode des interférences appliquée à la recherche des indices de réfraction*, *Oeuvres*, т. X, стр. 312.

³⁾ *Ann. de Chim. et de Phys.*, I, 332 (1816).

я решил скромно остаться инженером мостов и дорог и даже бросить физику, если обстоятельства этого потребуют. Я решусь на это с тем большей лёгкостью, что я вижу теперь, насколько глупо тратить столько труда, чтобы завоевать крохи славы, которую к тому же у вас оспаривают. Г-н Араго, который только что вернулся из Англии, говорил мне, что там рассматривают мой мемуар как комментарий к работам доктора Юнга и находят бесполезными и достаточно незначительными новые доказательства, которые я добавил к его доказательствам. Г-н Араго защищал меня с большой горячностью и заявил д-ру Юнгу, что он поместит в *Ann. de Chim. et de Phys.* маленькую заметку, определяющую роль каждого из нас. Но всё это меня не удовлетворяет. Мне противна оспариваемая слава (*Fi, d'une gloire contestée!*)».

Собственно говоря, Френель вряд ли имел основание так болезненно реагировать на известия, привезённые Араго. Посылая Юнгу свой первый мемуар, он сам писал ему (от 24 мая 1816 г.): «Я прошу Вас принять в знак моего уважения экземпляр моего мемуара о диффракций. Когда я представил его в Академию, я не знал о Ваших опытах и тех следствиях, которые Вы из них извлекли, так что я представил в качестве новых объяснения, которые Вы уже давно дали. Я выбросил их из напечатанного мемуара, который я имею честь Вам послать, и я оставил там только объяснения цветных каёмок теней, ибо я прибавил кое-что к тому, что Вы уже говорили об этом явлении...». Письмо кончается следующими фразами: «...когда думают, что сделали открытие, то не без сожаления узнают, что вас уже предварили; и я признаюсь Вам чистосердечно, что таково было и моё чувство, которое я испытал, когда г. Араго указал мне, что лишь небольшое число наблюдений является действительно новым в Мемуаре, который я представил в Академию. Но если что-либо могло меня утешить в потере права на приоритет, то это было сознание, что я встретился с учёным, который обогатил физику таким большим числом важных

открытий, и в то же время это немало способствовало повышению моего доверия к теории, которую я принял».

И действительно, когда прошло первое неприятное впечатление, Френель отнёсся к полученным известиям по-иному. В письме от 14 октября 1816 г. он пишет: «...Я довольно философски принял неприятности, пришедшие из Англии. Конечно, они оставили несколько горький осадок, но они не могут заставить меня потерять вкус к физике. Я почувствовал, что на упрёк в плагиате нужно отвечать новыми открытиями».

Возвращение в Ренн на работу по ремонту дорог было тягостно и означало перерыв в исследованиях по физике. Перерыв этот длился около года, пока осенью 1817 г. Френелю не удалось вновь получить разрешение на вторичное пребывание в Париже, на этот раз уже окончательное. И здесь помощь пришла от Араго и Лапласа. 10 апреля 1818 г. Френель пишет брату: «Г-н Бекей (новый директор Управления мостов и дорог) сказал г-ну Лапласу, который был так добр и говорил с ним обо мне, что он разрешит мне оставаться в Париже столько времени, сколько потребуется для окончания моих исследований, и что он поищет даже возможности сделать Париж местом моего постоянного пребывания». Действительно, через несколько дней Френель был причислен к управлению Уркским каналом в Парижском округе.

Поводом, побудившим парижских друзей Френеля хлопотать о переходе его в Париж, было, повидимому, следующее обстоятельство.

В начале 1817 г. Академия наук объявила в качестве темы на конкурс для получения большой премии по математическим наукам на 1819 г. вопрос о диффракции света. Среди наиболее влиятельных членов Академии были Лаплас и Био, являвшиеся убеждёнными сторонниками эмиссионной теории света. Они полагали, что новые результаты по диффракции и интерференции, опубликованные Юнгом и Френелем, могут быть интерпретированы с помощью теории истечения.

В соответствии с этим убеждением предложенная тема была формулирована следующим образом:

«Явления диффракции, открытые Гримальди и изученные затем Гуком и Ньютоном, явились в последнее время объектом исследований многих физиков, а именно Юнга, Френеля, Араго, Пуье, Био и др. Были наблюдаемы диффракционные полосы, которые образуются и распространяются вне тени тел, полосы, которые появляются в самой тени, когда лучи проходят одновременно с двух сторон очень узкого тела, и полосы, которые образуются благодаря отражению на поверхностях ограниченной протяжённости, когда свет падающий и отражённый проходит очень близко от границ этих поверхностей. Но ещё не были достаточно определены движения лучей вблизи самых тел, где имеет место изгибание лучей. Природа этих движений представляет в настоящее время в вопросе о диффракции центральный пункт (*le point de la diffraction*), который необходимо углубить наиболее полно, ибо в нём содержится секрет физического процесса, благодаря которому лучи изгибаются и разделяются на различные полосы разного направления и интенсивности. Это побуждает Академию предложить соответствующее исследование, как тему для премии, формулируя её следующим образом:

1) определить с помощью точных опытов все эффекты диффракции световых лучей, прямых и отражённых, когда они проходят одновременно или раздельно вблизи границ одного или нескольких тел, ограниченных или бесконечных, принимая во внимание расстояния между этими телами, равно как и расстояние до источника света, откуда исходят лучи;

2) с помощью математической индукции вывести из этих опытов движения лучей при их прохождении вблизи тел.

Премия будет присуждена в публичном заседании в 1819 г., но конкурс будет закрыт 1 августа 1818 г.; таким образом мемуары должны быть представлены до этого срока, с тем, чтобы опыты, в них содержащиеся,

могли быть проверены». (Выписка из протокола публичного заседания 17 марта 1817 г.)

Нетрудно видеть, что эта программа как бы пред-решала рассмотрение вопроса с точки зрения идеи о преломляющей атмосфере, которая примыкает к границам тел, идеи, положенной Ньютоном в основу объяснения явления диффракции¹⁾. Формулировка темы явно выдавала настроение авторов, её предложивших, и не могла побудить Френеля участвовать в конкурсе. Однако Араго и Ампер настояли на участии Френеля. Сохранилось письмо Леонора Мериме, где он в обычной для него полупутливой форме передаёт Френелю мнение Араго и Ампера: «...Ты должен был получить недели две тому назад письмо от твоего защитника Араго, который встретил меня после только что выдержанной им жестокой схватки с „эмиссионистами“, нашедшими повод поставить вопрос о диффракции света и предложившими премию тому, кто объяснил бы это явление наилучшим способом, следуя доктрине, которую они принимают. ...Араго, захваченный врасплох, принимает вражескую атаку, призывает своих и ему удаётся остановить вторжение, т. е. он добивается, чтобы в программе было упоминание о твоём мемуаре... Вчера я видел Ампера, который расспрашивал о тебе и настойчиво убеждал меня написать тебе, чтобы ты выступил и послал на конкурс свой мемуар с новыми наблюдениями, которые ты сделал и ещё сможешь сделать. Он наверняка получит премию,—говорил он мне; и для дела и для него лично необходимо, чтобы он участвовал в конкурсе. Я возражал, основываясь на пристрастности комиссаров, если они будут избраны из секты биотистов (сторонники Био) Ампер мне ответил, что этого не следует бояться и что генерал Араго в момент избрания комиссаров не преминет указать на недопустимость наименования людей одного цвета...». Письмо это датировано

¹⁾ См. Н ь ю т о н, Оптика, кн. III, вопр. 1—4, стр. 264, (2-е изд., стр. 257).

6 марта 1817 г. и показывает, что споры относительно формулировки темы конкурса разгорелись за несколько недель до окончательного её установления.

Под влиянием советов друзей Френель решил воспользоваться объявленным конкурсом и не только сформулировать в точной и развёрнутой форме свои представления о природе диффракции, но и усовершенствовать их, проведя ряд дополнительных опытов и развив математические методы расчёта. В этой работе ему усиленно помогал младший брат, Фюльжанс. В письме к Леонору от 3 июня 1818 г. Френель пишет: «Мой дорогой Леонор, мы с Фюльжансом трудимся без отдыха: вот почему мы тебе не пишем. Благодаря Фюльжансу, который оказывает мне огромную помощь, я смогу представить достаточно импозантное число опытов и расчётов. Я полагаю, что мне удалось разрешить все теоретические трудности диффракции. Иначе я не знаю, хватило ли бы у меня духу участвовать в конкурсе; ибо крайне скучно мучиться над такими тонкими наблюдениями и искать законы таких сложных явлений, если не руководиться теорией. Уже давно я признал, что моя первая гипотеза неточна ¹⁾ и что формулы, к которым она меня привела, являются лишь приближёнными...». В результате работы появилось окончательное и наиболее полное изложение исследований Френеля по диффракции света. После того как работа была удостоена премии, выдержки из неё были напечатаны в июльской и августовских тетрадах *An. d. Chimie et de Physique* за 1819 г. Полностью мемуар был опубликован в 1826 г. по распоряжению Академий наук в т. V её трудов, после избрания Френеля в состав Академии.

С конца 1817 г. научная деятельность Френеля идёт не прерываясь, нарастающими темпами, причём одновременно с занятиями по физике он исполняет и свои инженерские обязанности, которые, начиная с 1819 г., были связаны с работой по усовершенствованию

¹⁾ См. примечание [50] данного издания.

нию маяков. Результаты этой деятельности можно свести к следующим главным проблемам.

1. *Диффракция и интерференция* (см. I, II, III, IV и V). Хотя можно со значительным правом считать, что первые важные шаги в этих вопросах были сделаны Т. Юнгом ещё в 1802—1807 гг., тем не менее вклад Френеля чрезвычайно значителен. Не говоря уже о том, что к основным идеям—представлению о взаимодействии волн (интерференции)—Френель пришёл совершенно самостоятельно, не зная работ Юнга, целая серия его новых качественных экспериментов и особенно проведение точных количественных измерений позволили поставить теорию на вполне прочную базу. Именно благодаря этим новым опытам и измерениям Френель, разбив соответствующие методы теоретического расчёта (так называемые интегралы Френеля), мог убедиться в неудовлетворительности своих первоначальных представлений (совпадающих с представлениями Юнга) и сделать новый существенный шаг. Этим шагом является рассмотрение действия всей поверхности волны, частью прикрытой диффрагирующими экранами, т. е. использование принципа Гюйгенса в новой уточнённой формулировке, приданной ему Френелем. Недостаточность прежних представлений—результат интерференции лучей, *отражённых* от краёв экранов,—доказывается простыми и наглядными опытами, показывающими независимость диффракционной картины от характера края экрана (лезвие и обух бритвы, резко отличные в смысле своей отражающей способности, давали идентичную картину¹⁾); ещё более убедительными являются точные расчёты, сделанные Френелем, показывающие, что новая теория приводит к иным количественным соотношениям, и сравнение этих расчётов с измерениями, доведёнными до нужной степени точности.

¹⁾ См., например, превосходные фотографии, сделанные под руководством В. К. Аркадьева, журн. Русск. физ.-хим. об-ва, часть физическая, 44, стр. 145, 1912, рис. 16а—16d.

Юнг сначала отнёсся к результатам Френеля довольно сдержанно. Не имея ещё полного текста работы Френеля и лишь узнав о ней от Араго, он посылает последнему небольшую заметку (4 августа 1819) с просьбой опубликовать её в *Ann. de Ch. et de Ph.*, где, между прочим, говорится: «Я не отрицаю пользы расчётов г-на Френеля. Я не видел его анализа, но результаты могут быть легко получены в очень простой форме». За этим следуют рассуждения применительно к круглому отверстию. Письмо заканчивается словами: «Результат эквивалентен кажущемуся обращению волн при косвенном отражении, которое я наблюдал, но, признаюсь, не был в состоянии объяснить». Последняя фраза содержит признание ценности достигнутого Френелем результата, в теории которого отпала необходимость допускать для согласования с опытом совершенно произвольное обращение фазы волн, отражённых от края экрана. Но, сверх того, формула Юнга неверна, на что и указал ему Френель в ответном письме. Отвечая Френелю (письмо от 16 октября 1819 г.), Юнг пишет: «Я признаю, что моё небольшое письмо к Араго страдает неточностью, и надеюсь, что оно не будет напечатано: я рассмотрел проблему слишком наспех».

Привлечение принципа Гюйгенса к рассмотрению диффракционных проблем было весьма важно в принципиальном отношении. На этом пути, в частности, Френель дал объяснение с волновой точки зрения прямолинейному распространению света, т. е. устранил одно из главных возражений сторонников эмиссионной доктрины. Дальнейшее развитие теория диффракции получила именно на этом пути. Дав более строгое обоснование принципу Гюйгенса—Френеля, исходя из волновых уравнений, Кирхгоф¹⁾ (1882) освободил теорию Френеля от ряда недостатков. При этом, однако, сохранилось общее ограничение, в силу которого теория представляет собою приближение, справедливое лишь для

¹⁾ Т. Кирхгоф, *Vorlesungen über mathemat. Optik*, лекц. 5.

волн, длины которых достаточно малы по сравнению с размерами экранов и отверстий и расстояниями до точки наблюдения. В этом же приближении, как известно, можно получить результаты, согласующиеся с теорией Кирхгофа—Френеля, если рассматривать «краевую волну», т. е. волну, исходящую от края экрана, и учитывать интерференцию её с прямым светом, т. е. как бы следовать методу Юнга. Однако нельзя забывать, что это—лишь вычислительный приём, сводящийся к замене интеграла по поверхности интегралом по краю диффракционного отверстия. В соответствии с этим, если мы желаем говорить, следуя Юнгу, об отражении от края экрана, то «отражение» является очень специальным и должно быть точно определено с тем, чтобы результат совпадал с результатами теории Кирхгофа—Френеля. Рубинович¹⁾ дал интересный метод расчёта, приводящий к цели (так называемый «метод стационарной фазы»). Но, конечно, всё это рассмотрение не оправдывает первоначальной теории Юнга, где отражённая волна должна была определяться свойствами края экрана.

2. *Влияние поляризации на интерференцию световых лучей и поперечность световых волн* (см. VI и VII). Основные результаты опытов Френеля и Араго были опубликованы ими совместно в *Ann. de Chim. et de Phys.* в мартовской тетради за 1819 г., хотя самые измерения были выполнены ещё в 1816 г. Начало этим опытам положили наблюдения Френеля. В одном из вариантов мемуара «О влиянии поляризации на действие, которое световые лучи оказывают друг на друга», писавшемся в середине 1816 г., Френель говорит: «В опытах по диффракции мы с г-ном Араго искали, оказывает ли поляризация какое-либо влияние на образование внутренних каёмов теней, но ничего не заметили. Мы оставили эти опыты на несколько

¹⁾ А. Rubiłowicz, *Ann. d. Phys.*, 53, 257 (1917) и 73, 339 (1924). См. также интересные фотографии А. Калашникова, *журн. Русск. физич. общества*, т. 44, 137 (1912).

месяцев, когда новые наблюдения побудили меня к ним вернуться». Далее Френель излагает, что он тщетно пытался наблюдать интерференционные полосы при наложении друг на друга пучков, получающихся при прохождении света через двоякопреломляющий кристалл, хотя возможная значительная разность хода между этими пучками более или менее тщательно компенсировалась. «Я начал тогда подозревать возможность того, что две системы волн, возникающие в кристаллах, обладающих двойным преломлением, не оказывают никакого влияния друг на друга или, по крайней мере, их взаимное действие не может иметь видимых результатов». Эта мысль была подтверждена простым опытом, показавшим, что небольшой толщины пластинка серно-кислой извести, обладающая столь малым двойным лучепреломлением, что разность хода между обыкновенным и необыкновенным лучом составляла всего две три длины волны, не обнаруживала интерференционных цветов при прохождении через неё белого света. В данном случае взаимодействующие лучи были «... поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Отсюда нужно было заключить, что лучи, поляризованные взаимно перпендикулярно, не оказывают друг на друга того влияния, которое наблюдается для неизменённых (естественных) лучей или лучей, поляризованных в одном направлении. Я немедленно сообщил г-ну Араго этот вывод, к которому меня привели мои размышления и бесплодные попытки получить интерференционные полосы с помощью двойного лучепреломления; он высказал мысль, что было бы необходимо подтвердить этот принцип прямым опытом и установить, что интерференционные полосы при поляризации во взаимных перпендикулярных направлениях двух световых пучков будут исчезать, если в обычных условиях эти пучки образуют таковые полосы».

Исключительно важное значение этих опытов, описываемых в любом учебнике оптики, состоит, как известно, в том, что именно они заставили Юнга и Френеля выдвинуть гипотезу поперечности световых коле-

баний¹⁾, приведшую к волновому истолкованию понятия поляризации. Известно также, какое ожесточённое сопротивление встретило это предположение в кругах математиков, механиков и физиков. Даже Араго отказался следовать за Френелем в этом вопросе. Известную роль в его колебаниях играла, повидимому, всеобщая оппозиция²⁾. Однако нельзя не отметить, что в обширной статье, написанной Араго в 1824 г. для Британской энциклопедии³⁾, где весьма подробно излагаются все известные факты, включая и явления интерференции поляризованных лучей, круговой и эллиптической поляризации, автор тщательно воздерживается от волнового толкования, неоднократно упоминает о световых частицах и даже избегает вводить понятие о длине волны, прибегая, например, к такому описанию (стр. 345): «...они (лучи) испытывают поворот (плоскости поляризации) тем больший, чем сильнее их преломляемость и притом в отношении, обратном числам, которые Ньютон называет длиной приступов или,—что сводится к тому же,—в отношении, обратном тому, что мы ранее обозначили буквой *d*». Только в последнем параграфе статьи Араго, описывая свои опыты с Френелем, заключает: «Они приводят также непосредственно к решению следующего вопроса: как происходят колебания света? В направлении ли линии, вдоль которой распространяются лучи, или перпендикулярно к этой линии? Этот последний способ распространения, кажется, следует из наших опытов; однако, мне казалось настолько трудным допустить его, что я принял решение предоставить моему товарищу одному смелость этого вывода» (стр. 427). Таким образом, даже в 1824 г., когда Френель обосновал свой «смелый вывод» разнообразными новыми экспериментами, построил, опираясь на эту идею, теорию отражения и

¹⁾ См. примечание [32] данного издания.

²⁾ См. примечание [69].

³⁾ A r a g o, Notice sur la polarisation de la lumière, Oeuvres, т. VII, стр. 291—428.

преломления и теорию двойного лучепреломления, когда под влиянием этих успехов механики приступают к созданию общей теории упругости,—Араго, выступая перед широкой аудиторией, не решается присоединиться к этой идее! Повидимому, Араго сохранил свои сомнения до конца жизни. Э. Верде рассказывает, что, когда он в 1851 г. попросил Араго представить в Академию его заметку об интерференции поляризованных лучей, Араго, соглашаясь на представление, заявил, что с момента, когда Френель заговорил о поперечных колебаниях, он, Араго, не мог решиться следовать за ним. Трудности действительно были велики. Юнг, который первый опубликовал мысль о поперечности световых колебаний, ссылаясь на опыты Френеля и Араго, сопровождает свои высказывания многочисленными оговорками. Он видит в этой идее лишь приемлемую аналогию, полезную для символического представления явлений, и нигде не говорит о поперечном движении в поляризованном свете, как о реальности. В его статье «*Chromatics*» в добавлениях к Британской энциклопедии, постоянно встречается выражение «воображаемое поперечное движение» (*imaginary transverse motion*). Приводя в качестве примера поперечных волн волны на поверхности воды, возникающие под действием силы тяжести, он добавляет: «мы не можем найти аналогии этой силы в движении упругой среды». Усматривая намёк на поперечность «к общему направлению распространения» в расходящемся пучке лучей, он сам указывает, что эти поперечные движения «должны быть невероятно слабыми, даже по отношению к другим движениям, обладая амплитудой, совершенно недоступной для наших чувств; и это замечание, может быть, уменьшает вероятность теории в отношении физического объяснения фактов; но оно не уменьшает её полезности в отношении математического представления этих самых фактов, поскольку можно сделать это представление общим и подвергнуть его расчёту; и даже с физической точки зрения, если бы не было иной альтернативы, то легче было бы вообразить почти беско-

нечную чувствительность нашей способности восприятия к явлениям чрезвычайной слабости, чем принимать все те бесконечно сложные механизмы, которые приходится нагромождать, когда желают разрешить трудности, представляющиеся для эмиссионной теории во всех явлениях поляризации и цветов»¹⁾.

Путём таких рассуждений нельзя было, конечно, убедить сторонников эмиссионной теории. И Френель, который ещё в 1816 г. заметил, что «поляризованные световые волны взаимодействуют, как силы, перпендикулярные к лучам» (см. VII), не торопился с этим высказыванием. Он искал физической картины для понимания таких поперечных колебаний упругой среды, а главное — искал, подтверждают ли новые экспериментальные факты те расчёты, которые делались им, исходя из этой мысли. В конце концов существование поперечных колебаний явилось экспериментальным фактом, который нельзя было отрицать, не отрицая в то же время, что свет представляет собой волновое движение. Таким образом, вооружившись многочисленными открытиями, Френель смело поставил альтернативу: или примириться с поперечностью световых волн, или отказаться от волновой теории света. Эта смелость полностью оправдалась. Когда в заседании 19 августа 1822 г. был оглашён отчёт Комиссии по рассмотрению нового мемуара Френеля о двойном лучепреломлении, Лаплас, который в 1809 г. опубликовал по этому вопросу работу, являвшуюся важным достижением эмиссионистов, взял слово. Семидесятитрёхлетний творец «Небесной механики», самый прославленный учёный этой эпохи объявил, что он ставит эти исследования Френеля выше всего, что уже за много лет сообщалось в Академии, и поздравил автора, «которому благодаря его настойчивости и прозорливости удалось открыть закон, ускользавший от наиболее искусных». Это было блестящее признание! Признание со стороны Био пришло позже, но в ещё более опре-

¹⁾ Из статьи «Chromatics» (Miscellaneous Works, т. I, 333).

делённой форме. Леонор Френель рассказывает, что когда в 1846 г. ему пришлось беседовать с Био по поводу рукописей Огюстена Френеля, Био, задумавшись во время разговора, вдруг воскликнул: «Какую чудесную мощь интуиции проявил ваш брат в своём плодотворном представлении о поперечных колебаниях»¹⁾.

3. *Цвета кристаллических пластинок, круговая и эллиптическая поляризация, вращение плоскости поляризации как своеобразное двойное лучепреломление* (см. VII и VIII). 11 августа 1811 г. Араго доложил Академии о своих опытах по возникновению окраски, когда белый свет проходит через кристаллическую пластинку, расположенную между двумя поляризующими приспособлениями. Подробно описав явление, Араго не дал ему, однако, никакого объяснения, ограничившись указанием, что в зависимости от сорта, толщины и расположения пластинки лучи разного цвета испытывают большую или меньшую «деполяризацию», в результате чего и возникает окраска. Поэтому само явление было названо им цветной или хроматической поляризацией (*polarisation colorée*). Био, продолживший эти исследования (1812—1814), истолковал его с точки зрения эмиссионных представлений, выдвинув новую гипотезу, названную *теорией подвижной поляризации*. Теорию подвижной поляризации трудно назвать теорией в обычном смысле слова. Она представляет собой совершенно произвольное и немотивированное утверждение относительно свойств «световых полярных частиц», сформулированное таким образом, чтобы с его помощью описывались экспериментальные факты. Согласно этой гипотезе световые частицы, ориентированные в поляризованном свете в определённой плоскости, вступая в кристаллическую пластинку так, что плоскость поляризации составляет с главной плоскостью кристалла угол i , сохраняют свою ориентировку, пока

¹⁾ См. также: J. B i o t, *Mélanges scientifiques et littéraires*, т. I, стр. 155, сноска, добавленная в 1858 г. Био к его статье о Ньюtone, написанной в 1822 г.

свет не пройдёт слой кристалла толщиной l , зависящей от преломляемости лучей (цвета) и свойств кристалла; в дальнейшем ходе частицы начинают осциллировать, поворачиваясь на угол $2i$, так что принимают положение, симметричное с исходным относительно главной плоскости кристалла при прохождении слоя l и вновь возвращаясь в начальный азимут при дальнейшем продвижении на толщу l . При этом независимо от того, закончился ли цикл колебания или нет, световые частицы при выходе из кристалла всегда ориентированы в азимуте 0 (начальном) или $2i$, в соответствии с тем, куда их привело последнее из закончившихся колебаний.

«Таким образом,—пишет Био,—пока толщина пластинки лежит между нулём и некой основной толщиной l , частицы однородного света выходят из неё, не покидая своего положения первоначальной поляризации; при толщине от l до $2l$ они ведут себя так, как если бы они покинули это положение и приняли новое в азимуте $2i$; в конце концов, они оказываются попеременно поляризованными то в первоначальном азимуте, то в азимуте $2i$ »¹⁾. Так как величина l зависит от цвета лучей, то на этом пути можно объяснить окраску пластинки при рассматривании её в белом свете, а также тот замечательный факт, что при некоторых (периодически повторяющихся) толщинах пластинок положение плоскости поляризации монохроматического света меняется от $-i$ до $+i$. Итак, согласно Био, свет, проходя через кристаллическую пластинку умеренной толщины, поляризуется не в её главном сечении и в перпендикулярном направлении, как это имеет место в кристаллах значительной толщины, но в двух других плоскостях, из которых одна есть плоскость поляризации падающего луча, составляющая с главным сечением совершенно произвольный угол i , а другая—плоскость, симметричная с первой по отношению к главному сечению.

¹⁾ J. B i o t, *Traité de physique expérimentale et théorique*, Paris, 1816, т. IV, стр. 389.

Как ни мало мотивированы изложенные представления, они всё же могли бы представлять ценность как способ систематизации фактов, тем более, что в руках Био они успешно служили для истолкования многих явлений. Однако первоначальные предположения теории подвижной поляризации оказались недостаточными для объяснения *вращения* плоскости поляризации. Араго открыл это явление в кварце (1811), а сам Био, обнаруживший его и в некоторых жидкостях (1815), доказал, что поворот плоскости поляризации растёт пропорционально толщине активного слоя, а не меняется с этой толщиной периодически. Пришлось усложнять теорию подвижной поляризации. Однако—самое главное—опыт обнаружил, что теория эта не передавала правильно и фактов хроматической поляризации. Этот решительный удар был нанесён Френелем. Исходя из своих правильных волновых представлений, Френель предусмотрел ряд явлений, которые не вытекали из теории Био, и осуществил соответствующие опыты. Действительно, правила Био приложимы только для таких толщин пластинок, которые сообщают двум лучам разность хода в чётное или нечётное число полуволн. В других случаях результаты будут иными (частичная или, точнее, эллиптическая поляризация). В частности, выбрав азимут $i=45^\circ$ и толщину такой, чтобы разность хода соответствовала $\lambda/4$ (или $n\lambda + \lambda/4$), получают полную деполаризацию света (точнее, круговую поляризацию). Френель осуществил также очень тонкие и остроумные интерференционные опыты, показавшие, что при прохождении света через тонкую кристаллическую пластинку возникают два луча, поляризованные взаимно перпендикулярно (как и в толстом кристалле), а не в двух азимутах, составляющих случайный угол $2i$, как следует из теории подвижной поляризации. Все эти опыты решительно опровергали теорию Био.

Хотя основные результаты были изложены Френелем в мемуарах, представленных в Академию ещё в 1817 г., доклад об этих работах был сделан Араго

в Академии лишь 4 июня 1821 г. В этом докладе Араго сосредоточил своё внимание на критике Био, что повело к резкой полемике между этими учёными, поведшей к решительному охлаждению их ранее дружественных отношений. Френель оставался в стороне от этой полемики и в своих высказываниях, твёрдо отстаивая свою позицию, всегда был очень вежлив по отношению к Био и постоянно подчёркивал значение многочисленных экспериментов последнего.

Необходимо отметить, что вопрос о хроматической поляризации привлёк и внимание Юнга. Ещё в 1814 г. он указал¹⁾, что цвета кристаллических пластинок могут объясняться интерференцией обыкновенного и необыкновенного лучей, объяснив при этом, что кристаллическая пластинка толщины d эквивалентна тонкой плёнке, равной $d(\mu_1 - \mu_2)$, где μ_1 и μ_2 — показатели преломления обоих лучей. Это соотношение подтверждалось (качественно) опытом и объясняло, каким образом интерференционные цвета наблюдаются в сравнительно толстых пластинках. Несомненно, это было очень важное заключение. Френель пишет по этому поводу: «Эта идея пришла мне тотчас же, когда я стал заниматься этими явлениями (т. е. в 1816 г.), не зная тогда о заметке, опубликованной г. Юнгом по этому вопросу несколько лет до того. ...Я говорю это не для того, чтобы требовать участия в чести этого открытия, которое принадлежит целиком г-ну Юнгу, но для того, чтобы показать, насколько легко было с помощью теории волн открыть это тесное отношение между цветными кольцами и цветами кристаллических пластинок, которое ускользнуло от проницательности г-на Био, руководимого эмиссионной системой»²⁾.

Однако объяснению Юнга не хватало самого главного: какую роль в явлении играет наличие поляризатора и анализатора? Почему рассматривание кристаллической пластинки без этих приспособлений (хотя бы

1) T. Young, Quarterly Review, 1814, т. XI, стр. 42—49.

2) A. Fresnel, Oeuvres, т. I, стр. 607 (сноска).

одного из них) не даёт никаких следов окрашивания? Юнг, повидимому, не ставил себе этого вопроса, тогда как для Френеля, как мы видели, это обстоятельство было исходным пунктом, приведшим к его знаменитым опытам с Араго.

Открытие хроматической поляризации означало новый и весьма чувствительный метод обнаружения двойного лучепреломления. Правда, сам Араго, наблюдая аналогичное явление на стеклянной плёнке, полагал, что оно может быть и не связано с двойным лучепреломлением. Но, несомненно, в его опыте фигурировало «закалённое» стекло. Брюстер, который претендует на то, что он пришёл к открытию явления хроматической поляризации (в 1813 г.), не зная о результатах Араго, исследовал с помощью этого метода очень большое число кристаллических тел. Он дополнил метод весьма важными наблюдениями в сходящихся лучах, когда наблюдаются очень характерные интерференционные фигуры. Особенно важно, что Брюстеру таким путём удалось открыть (1815) существование *деуосных* кристаллов. На важность этого открытия и его значение для кризиса волновой теории мы уже указывали выше. Брюстер обнаружил цветную поляризацию и в деформированных стеклах, сделав из этого правдоподобный вывод о двойном лучепреломлении в них, хотя, конечно, никакого *раздвоения* луча непосредственно на деформированной стеклянной пластинке наблюдать было нельзя. В свете упомянутого выше замечания Араго вопрос заслуживал прямого исследования. Френель решил его крайне остроумным приёмом, обнаружив прямым опытом раздвоение лучей на комбинации деформированных и недеформированных призм¹⁾; позже он применил подобный приём для доказательства, что явление вращения плоскости поляризации есть разновидность двойного лучепреломления для циркулярно-поляризованных лучей, выяснив предварительно с полной ясностью сущность

¹⁾ См. примечание [88].

открытого им же явления эллиптической и круговой поляризации.

Мы видим, таким образом, как изолированные и чисто эмпирически найденные Араго явления окрашивания кристаллических пластинок и вращения плоскости поляризации превратились в руках Френеля в глубоко и последовательно разработанную область оптики, чрезвычайно способствовавшую торжеству волновых представлений.

4. *Теория отражения и преломления. Полное внутреннее отражение* (см. IX, X). Глубокие и разносторонние исследования свойств поляризованного света укрепили уверенность Френеля в реальности поперечных световых волн, вероятно, в гораздо большей степени, чем те общие и несколько расплывчатые соображения, с помощью которых он старался примирить поперечность колебаний со свойствами упругой среды. Последняя группа его исследований—изучение законов преломления и отражения и теория двойного лучепреломления—представляет собой попытку вывести на базе этих представлений законы взаимодействия света и вещества. Исходным пунктом исследования количественных законов отражения явилось случайное, повидимому, наблюдение Френеля¹⁾, согласно которому отражение плоско-поляризованного света от поверхности прозрачного вещества сопровождается поворотом плоскости поляризации, если только эта последняя не совпадает с плоскостью падения и не перпендикулярна к ней. Это наблюдение показало Френелю, что коэффициенты отражения для света, поляризованного в двух указанных плоскостях, должны быть различны, и, следовательно, здесь заложено объяснение великого открытия Малюса.

Разложение естественного света или света, поляризованного в произвольном азимуте, на компоненты, колебания которых лежат в плоскости падения и

¹⁾ Mémoire sur la modification, que la réflexion imprime á la lumière polarisée, представлен в Академию 10 ноября 1817 г.

в плоскости, к ней перпендикулярной, позволило свести общую задачу к этим двум сравнительно простым частным случаям.

Строгое решение задачи об отражении света в рамках теории упругого эфира представляет непреодолимые трудности. Действительно, с точки зрения теории упругости на поверхности раздела двух сред должны быть выполнены шесть граничных условий: три, соответствующие непрерывности смещений, и три, соответствующие равенству напряжений. С их помощью определяются шесть отношений амплитуд отражённых и преломлённых волн к амплитуде падающей волны, т. е. определяются три отражённых и три преломлённых волны: по две, соответствующие поперечным волнам двух взаимно перпендикулярных направлений поляризации, и по одной продольной волне. Однако опыты Френеля и Араго, установившие полное отсутствие интерференции при взаимодействии двух волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях, показали, что световые волны строго поперечны и, следовательно, продольные волны возникать не могут. Таким образом, невозможно удовлетворительно объяснить оптические явления, рассматривая эфир как упругое тело обычного типа, сопротивляющееся и сжатию, и сдвигу. Известно, что Мак-Келлог пытался (1839) найти выход из положения, рассматривая эфир как среду особого рода, потенциальная энергия которой зависит только от вращения элемента объёма. Полученные им формулы для такой квазиупругой среды формально совпадают с формулами электромагнитной оптики. Однако подобный анализ оказался возможным лишь после того, как Коши и Грин развили детальную упругую теорию, причём для устранения продольной волны требовалось ввести дополнительные условия, не вытекающие из граничных условий.

Естественно, что первый шаг, сделанный Френелем, отнюдь не содержал такого полного анализа, тем более, что теория упругости твёрдого тела ещё не существовала. Френель при решении задачи исходил из извест-

ных допущений, причём некоторые из них могли казаться более или менее произвольными. Особенно уязвимыми можно было считать следующие два. Скорость световой (поперечной) волны в упругом эфире определяется двумя параметрами—упругостью (модуль сдвига) N и плотностью ρ . Поэтому при переходе от одной среды к другой могут, вообще говоря, меняться обе эти величины. Френель принял, однако, что упругость остаётся неизменной и что различные среды характеризуются лишь различием плотностей.

Трудно сказать, чем руководствовался при этом Френель. Подкупала ли его простота решения задачи об отражении света, получаемая при этом допущении для частного случая волны, колебания которой перпендикулярны к плоскости падения, случая, с которого он начал рассмотрение проблемы ещё в 1817 г. Сыграл ли здесь роль успех, полученный им в предположении постоянства упругости при решении задачи о влиянии движения Земли на оптические явления, рассматривавшейся Френелем в 1818 г. Во всяком случае, указывая на возможность изменения N и ρ , Френель останавливается именно на допущении изменяемости ρ и неизменности N . Это тем более удивительно, что при рассмотрении явлений в кристаллах Френель объяснял различие в скорости волны при разных направлениях поляризации различием упругости по разным направлениям, ибо, конечно, плотность как скалярная величина не могла бы зависеть от направления.

Второе допущение, имеющее характер произвольного, состоит в предположении, что направление колебания в поляризованной волне перпендикулярно к плоскости поляризации. При этом плоскость поляризации определяется так, как это сделано в основоположной работе Малюса, т. е. для лучей, поляризованных отражением, плоскостью поляризации называют плоскость падения, а при поляризации двойным преломлением в исландском шпате плоскостью поляризации обыкновенного луча называют плоскость главного сечения. Допущение о направлении колебания продиктовано,

повидимому, соображением симметрии, в силу которого для обыкновенного луча, скорость коего не зависит от направления внутри кристалла, колебания должны быть перпендикулярны к оси кристалла и, следовательно, и к плоскости главного сечения. Формулы для интенсивности отражённого (и преломлённого) света, полученные Френелем в результате этих довольно несовершенных, но, повидимому, интуитивно правильно угаданных положений, были подвергнуты Френелем опытной проверке. При этом ввиду малой надёжности ограниченного числа фотометрических данных Френель остроумно использовал выполненные им измерения поворота плоскости поляризации при отражении. Вторым методом проверки явилось, до известной степени, объяснение с помощью полученных формул явлений поляризации при отражении и преломлении, причём нахождение из этих формул угла полной поляризации даёт объяснение закона Брюстера, найденного эмпирически в 1815 г.

Важный успех, достигнутый Френелем в этом вопросе, естественно, поставил перед исследователями задачу критического рассмотрения допущений, на которых основывается вывод Френеля.

Франц Нейман, стремясь установить единую точку зрения на явления отражения и на проблему кристаллооптики, положил в основу своих рассуждений требование постоянства плотности эфира в различных средах и различия в упругости. И при этом предположении ему удалось получить (1835) формулы, совпадающие с формулами Френеля, с тем лишь различием, что формула, выведенная Френелем для случая, когда колебания перпендикулярны к плоскости падения, по Нейману относится к случаю колебаний, лежащих в плоскости падения, и наоборот. Другими словами, в системе Ф. Неймана направление колебаний принимается лежащим в плоскости поляризации, а не перпендикулярным к нему, как это имело место у Френеля. Более глубоким был анализ Грина (1837 г. и след.). Грин, развивая теорию упругости твёрдого тела и сформули-

ровав граничные условия, исследовал вопрос о продольных волнах. Он пришёл к выводу, что для того, чтобы избавиться от них, надо допустить, что скорость их бесконечно велика, т. е. среды несжимаемы. Следует заметить, что Френель также допускал несжимаемость эфира, говоря о невозможности продольных световых волн. Согласно Грину, другое допущение, которое также могло бы привести к устранению продольных волн, а именно предположение, что скорость их бесконечно мала, неприемлемо, ибо оно ведёт к выводу, что сопротивление сжатию отрицательно; но в этом случае равновесие было бы неустойчивым. Впрочем, Вильям Томсон показал впоследствии (1888), что возможна такая модель среды (пенистый эфир), когда отрицательное сопротивление сжатию не обязательно влечёт за собой неустойчивость.

Формулы Грина для случая, когда колебания лежат в плоскости падения, несколько сложнее формул Френеля и совпадают с ними, когда показатель преломления не сильно отличается от 1. Для этого случая при допущении постоянства плотности (Ф. Нейман) получается результат, несогласный с опытом: наличие двух углов полной поляризации. Поэтому Грин, в согласии с допущением Френеля, принимает постоянство коэффициента упругости и различие в плотностях.

Полный анализ этого вопроса в рамках теории упругости принадлежит Стоксу и Релею. Релей провёл вычисления в предположении изменяемости N и ρ и показал, что допущение изменяемости обоих параметров так же, как и предположение об изменяемости одной упругости, противоречит экспериментальным данным, относящимся к рассеянию частицами, мало отличающимися по показателю преломления от окружающей среды. На это обстоятельство указал и Стокс. Стокс показал также, что к такому же выводу приводят наблюдения над диффракцией под большими углами плоско-поляризованного света на диффракционной решётке. Таким образом, вопреки довольно распространённому мнению, что в рамках упругой теории нет возможности

выбора между допущениями Френеля и допущениями Ф. Неймана, положение оказывается иным. «Неприемлема ни одна из форм упругой теории,—говорит Релей,—за исключением той, в которой колебания предполагаются перпендикулярными к плоскости поляризации и различие между средами сводится только к различию в плотности»¹⁾.

Конечно, необходимость введения дополнительных предположений, устраняющих продольные волны, делает теорию упругого эфира несовершенной. Окончательное решение проблемы об отражении и преломлении мы находим в электромагнитной теории света, которая приводит к формулам Френеля, причём направление френелевых колебаний совпадает с направлением электрического вектора. Но значение достижения Френеля в этом вопросе трудно переоценить. И мы сохраняем название формул Френеля для «достойных удивления законов, которые установил проникновенный гений Френеля 80 лет тому назад на основе далеко несовершенных механических представлений»²⁾ (В. Томсон, 1904 г.).

В тех же работах Френель рассмотрел и явления полного внутреннего отражения. С редким искусством он установил эффекты «деполяризации» света, сопровождающие это явление, и вскрыл в дальнейшем, что эта «деполяризация» означает новый вид поляризации, эллиптической и круговой, и ввёл эти термины, разъяснив механический смысл этих типов поляризации. Теоретическое истолкование наблюдаемых явлений Френель нашёл в своих формулах, интерпретировав получающееся в этом случае мнимое значение амплитуды как проявление сдвига фазы на $\frac{\pi}{2}$ между двумя

¹⁾ Р е л е й, Волновая теория света, стр. 145. См. также On the Scattering of Light by small Particles, Релей, Труды, т. I, стр. 104.

²⁾ W. T h o m s o n (Kelvin), Балтиморские чтения. Немецкий перев. Vorlesungen über Molekulardynamik und die Theorie des Lichtes, гл. XVII, § 81 и 81'.

взаимно перпендикулярными колебаниями, лежащими в плоскости падения и в плоскости, к ней перпендикулярной. Интерпретация Френеля нередко подвергалась критике как произвольная, и Ф. Нейман решил ¹⁾ задачу о полном внутреннем отражении, не прибегая к мнимым величинам. Метод Френеля представляет, однако, то преимущество, что он трактует задачу о полном отражении как специальный случай задачи об отражении вообще, используя принцип сохранения энергии. Его рассуждение «...может быть, и не было проведено вполне строго, но нет никакого сомнения, что оно по существу правильно» (Релей, Волновая теория света, стр. 155). Использование при решении задач о колебаниях комплексных экспоненциальных функций, введённое Коши ²⁾ и ныне широко применяемое, делает френелеву интерпретацию мнимой амплитуды самоочевидной. Действительно, так как $\sqrt{-1} = e^{i\pi/2} = \cos\pi/2 + i\sin\pi/2$, то умножение амплитуды на $\sqrt{-1}$ означает добавление к фазе $\pi/2$: $\sqrt{-1} \cdot \text{Re}^{i(\omega t - kx)} = \text{Re}^{i(\omega t - kx + \pi/2)}$.

5. *Кристаллооптика* (см. X). В работах Френеля по кристаллооптике, пожалуй, больше, чем во всех других его исследованиях, проявилась безошибочная физическая интуиция Френеля. Несмотря на недостаточность, а иногда даже на ошибочность некоторых утверждений, которыми аргументирует Френель и которые отмечены в примечаниях Э. Верде, воспроизводимых и в нашем издании, Френель в вопросе исключительной трудности приходит к сложным и совершенно верным результатам. Как и в других своих работах, Френель не только использует многочисленные экспериментальные данные других авторов, прежде всего Био и Брюстера, но и сам проводит эксперименты. Особенно следует отметить несложные по выполнению, но остроумные по замыслу опыты Френеля с топазом, позволившие ему установить, что в двуосных кристал-

¹⁾ Annal. der Phys. Ch., 40 (1837).

²⁾ C. R., 2 (1836).

лах ни один из лучей не является обыкновенным. Это важное для теории заключение ускользнуло от Брюстера, открывшего существование двуосных кристаллов и много сделавшего для их изучения.

Теория двойного преломления неразрывно связана с теоретическими представлениями о сущности поляризации, поэтому до работ Френеля только «эмиссионисты» могли пытаться рассматривать эту проблему (мемуар Лапласа, 1809 г.). Мы видели, что попытка Юнга учитывать различие упругости по разным направлениям анизотропной среды привела лишь к объяснению *необыкновенного* преломления, т. е. преломления, не подчиняющегося закону Декарта—Снелля, но не могла дать никакого представления о *двойном преломлении*, поскольку Юнг ещё рассматривал световые волны как продольные. Тот факт, что вообще имеются две скорости для одного волнового фронта, доказывает, что скорость зависит от направления колебания. Это положение Френель и сделал исходным в своей теории двойного лучепреломления.

Поверхность волны для одноосных кристаллов была известна благодаря успеху Гюйгенса, давшего правила построения обыкновенного и необыкновенного луча в исландском шпате. Эта поверхность состоит из сферы и эллипсоида, имеющих один общий диаметр. Доказанное Френелем отсутствие обыкновенного луча в двуосных кристаллах показывало, что у этих кристаллов отделение одной из волновых поверхностей в виде сферы невозможно, и, следовательно, вся проблема отыскания волновой поверхности становилась очень сложной. Эта поверхность должна быть двуполостной, так как она соответствует наличию двух преломлённых лучей; изыскание единого уравнения, порядка не ниже четвёртого, которое представляло бы эту поверхность, казалось неопределённой и почти неразрешимой задачей. Необычайно счастливой мыслью Френеля было соображение, что в теории двойного преломления главной задачей является определение двух скоростей, с которыми распространяются плоские волны при

заданном направлении нормали, а вовсе не задача определения формы волновой поверхности. Отыскание этой последней не необходимо, хотя практически оно удобно, так как давало сжатую сводку законов и даже, как оказалось впоследствии, позволило предусмотреть новые явления. Во всяком случае эта поверхность может быть разыскана путём более или менее сложных математических операций, после того как решена главная задача.

Для одноосного кристалла, для которого волновая поверхность известна, Френелю легко удалось найти простое и замечательное геометрическое соотношение между скоростями распространения двух волн: они оказались обратными длинам осей эллиптического сечения, проведённого параллельно плоскости волнового фронта через некий эллипсоид вращения, ось которого совпадает с оптической осью кристалла, а длина полуосей просто связана с двумя главными скоростями необыкновенного луча; при этом плоскость поляризации каждой волны определяется направлениями осей этого эллиптического сечения. Таким образом, все свойства одноосного кристалла, который обычно характеризовался с помощью волновых поверхностей Гюйгенса и правил поляризации, могли быть представлены посредством простой единой поверхности — эллипсоида вращения. Естественным обобщением для двуосных кристаллов казалась характеристика их подобным же эллипсоидом, но с тремя неравными осями, причём скорость и поляризация световых волн должна определяться при помощи этого эллипсоида согласно правилам, изложенным выше.

Конечно, к такой концепции Френель пришёл не сразу, а путём рассмотрения упругих свойств кристаллической структуры, которая, выражаясь современным языком, сводилась к выражению упругости в виде тензора II ранга. Однако все эти обоснования не выдерживают серьёзной критики, и, в конце концов, можно было бы признать, что все эти достижения являются результатами гениальной догадки Френеля.

Получив основную вспомогательную поверхность, Френель вывел из неё и уравнения волновой поверхности для двуосного кристалла. Вывод этот также не является математически строгим; однако окончательный результат получился правильным. Все следствия, которые вытекают из найденного Френелем вида волновой поверхности, подтверждаются опытом. Особенно замечательным было сделанное в 1832 г. Гамильтоном заключение, что вид указанной Френелем волновой поверхности двуосного кристалла должен вести к особой форме преломления, получившей название конической рефракции. Вывод Гамильтона был в том же году подтверждён на опыте Ллойдом¹⁾. В последующем нестрогий френелевский вывод уравнения волновой поверхности был заменён безупречными с математической стороны вычислениями и притом разнообразными методами. Первое такое вычисление было сделано Ампером в 1828 г.²⁾.

Как известно, современная кристаллооптика целиком базируется на идеях Френеля, хотя и получивших более строгое обоснование и освобождённых от дефектов и математического несовершенства. Кроме введённых самим Френелем двух связанных между собою вспомогательных поверхностей,—поверхности упругости (ныне называемой овалом Френеля) и эллипсоида Френеля, удобных для нахождения поверхности нормалей и поверхности лучевой,—теперь для тех же целей нередко применяют ещё и другие поверхности, также связанные друг с другом: эллипсоид индексов (индикатриса) и овалом индексов. Однако всё это многообразие не имеет принципиального значения и служит лишь для удобства вычисления.

Между теорией отражения Френеля и его кристаллооптикой имеется известное противоречие, ибо в первой принимается неизменность упругости, а вторая построена на допущении различия упругости по разным напра-

¹⁾ См. примечание [144].

²⁾ См. примечание [134].

влениям кристалла. Поскольку исследования Стокса и Релея выяснили, что в рамках упругой теории следует признавать упругость разных сред неизменной, возникает стремление сохранить это допущение и в кристаллооптике. Однако не имеет смысла рассматривать плотность зависящей от направления. Релей¹⁾ (1871) показал, что удовлетворительный результат можно получить, если принимать упругость неизменной, а для объяснения зависимости инерции от направления учитывать различие в сопротивлении среды по разным направлениям. Это приводит к изменению эффективной плотности (массы), подобно тому как движение диска в жидкости соответствует различной эффективной массе (плотности) в зависимости от того, движется ли диск по направлению своей нормали или параллельно своей плоскости.

Современная электромагнитная теория света не знает всех этих затруднений упругой теории, и оптика анизотропной среды получается по схеме Френеля путём введения тензора диэлектрической постоянной и установления линейной связи между вектором электрической индукции и вектором электрической напряжённости.

Своими замечательными исследованиями по кристаллооптике Френель не только завершил победу волновой теории, вызвав восторженное одобрение такого опасного противника, каким был Лаплас. Его работы послужили сверх того стимулом для развития новой отрасли науки — теории упругости. Первые работы Навье, Коши и Грина — признанных основоположников теории упругости — самым тесным образом связаны с исследованиями Френеля и имели своей непосредственной задачей разрешение поставленных Френелем вопросов.

6. *Влияние движения Земли на оптические явления* (см. XI). Поводом к этой работе послужила просьба

¹⁾ Phil. Mag. (4), XII, стр. 519 (1871). Ещё ранее эту мысль высказывали Стокс (Trans. Camb. Phil. Soc., VIII, стр. 105, 1843) и Равкин (Phil. Mag. (4), 1, стр. 441, 1851).

Араго рассмотреть с волновой точки зрения вопрос о влиянии движения тела на преломление в нём света, идущего от источника, не принимающего участия в движении. Вопрос этот поднимался и ранее. Так, Мичел¹⁾, считая, что свет от звёзд преломляется иначе, чем свет от земных источников, старался найти этому объяснение. Робиссон и Вильсон²⁾ полагали, что фокусное расстояние линзы должно быть различным в зависимости от того, приближается или удаляется линза к звезде, ибо скорость света в стекле при этом меняется.

Араго подверг вопрос экспериментальному изучению. В его опытах измерялась разность зенитных расстояний звезды, наблюдаемой непосредственно и через призму. Для различных звёзд, к которым Земля приближается и от которых удаляется, эти отклонения должны были бы быть различны, если бы ожидаемый эффект имел место. По расчётам Араго максимальное расхождение между отклонениями разных звёзд должно было бы достигать для одной серии наблюдений 12"; наблюдение (включая ошибки наблюдения) давало разброс значений до 13". В другой серии наблюдений (с другой призмой) ожидаемый эффект мог достигать 28", наблюдения дали отклонения, не превышающие 10"; правда, эта серия—довольно короткая.

На основании своих опытов Араго пришёл к выводу, что ожидаемого влияния нет и что свет, идущий от звезды, ведёт себя при преломлении совершенно так же, как если бы звезда была расположена там, где она кажется расположенной вследствие аберрации света, а призма находилась бы в покое; таким образом, кажущаяся (с учётом аберрации) рефракция в движущейся призме равна абсолютной рефракции в неподвижной призме³⁾.

¹⁾ Michell, Phil. Trans. XXIV, стр. 35 (1784).

²⁾ Robisson a. Wilson, Trans. Roy. Soc., Edinburgh I, стр. 30.

³⁾ См. примечание [157],

Приводимые выше цифры показывают, что точность опытов Араго едва ли была достаточна для полной убедительности его утверждений; однако последующие опыты и, в частности, опыт Эйри (1871)¹⁾ подтвердили результаты Араго.

Анализ, произведённый Френелем в настоящей работе, весьма глубок, и сделанные им заключения имеют более широкое значение, чем простое объяснение опытов Араго. Введённое Френелем понятие о «частичном увлечении» эфира явилось одной из самых плодотворных идей в оптике и электродинамике движущихся сред. С его помощью непринуждённо объясняются результаты всех оптических и электродинамических опытов, в которых проявляется явление движения среды в величинах первого порядка (по отношению к $\beta = \frac{w}{c}$, где w — скорость среды и c — скорость света в пустоте). На нём базируется общая теорема Г. А. Лорентца, согласно которой движение относительно эфира не оказывает влияния ни на какие оптические и электродинамические явления с точностью до второго порядка относительно $\frac{w}{c}$ (принцип относительности 1-го порядка). В теории Лорентца, в которой движение среды есть движение молекул и электронов в неподвижном эфире, коэффициент увлечения получается в результате учёта движения зарядов по отношению к эфиру²⁾. В теории относительности Эйнштейна коэффициент увлечения есть следствие кинематической теоремы о сложении скоростей.

7. *Работы по созданию новой системы маячного освещения* (см. XII). Последним достижением Френеля уже в области практической оптики явилось создание новой системы маячного освещения. С ростом развивающегося судоходства к началу XIX столетия ясно обнаружилась неудовлетворительность маячной службы

¹⁾ См. примечание [159].

²⁾ Г. А. Л о р е н т ц, Теория электронов, § 160—163, М., 1953.

как во Франции, так и в других странах. В 1811 г. во Франции была создана правительственная комиссия для реформы этого дела, и председателем исследовательской части её был назначен Араго. К 1819 г., когда выяснилась необходимость радикального улучшения самой системы маячного освещения, Араго постарался заручиться помощью Френеля.

Основной работой Френеля, связанной с регулярной оплатой, являлась его служба в Управлении мостов и дорог. Благодаря вмешательству Араго, обратившего внимание Управления на исключительные заслуги Френеля в области оптики, администрация ввела Френеля в комиссию по маякам, и скоро работа над созданием новой системы маяков стала главным занятием Френеля в Управлении. Эта работа принесла блестящие технические результаты. Уже после смерти Френеля, когда маяки его системы получили распространение, даже англичане признавали, что Франция превзошла все другие нации в конструкции и управлении маяками. Однако работа эта отнимала у Френеля много времени и сил. В письме к Юнгу от 16 сентября 1823 г. он пишет: «После долгого молчания ($1\frac{1}{2}$ года) я хотел бы иметь возможность сообщить Вам о каких-либо новых оптических наблюдениях: к сожалению, я уже довольно давно непрерывно занят служебными делами и всякими мелочами, связанными с освещением маяков. Я провёл почти весь июль в Кордуанской башне, в устье Жиронды, устанавливая там линзовый или диоптрический аппарат с вращающимися огнями. Так как со мной были только неопытные рабочие, я был вынужден входить в мельчайшие детали этой установки и часто сам выполнял обязанности рабочего. Яркость света, которую даёт новый прибор, удивила моряков...». К этому времени Френель уже был избран в Академию, однако, как видим, условия его работы отнюдь не стали благоприятными. Год спустя, когда здоровье Френеля резко ухудшилось, он уже не был в состоянии сочетать свои научные исследования с этой инженерной работой и вынужден был отдавать последней все свои силы.

«Мне рекомендовали старательно избегать всякого умственного напряжения,—пишет он Юнгу в январе 1825 г.—В результате этого длительного бездействия я очень отстал в моих *обязательных* занятиях; поэтому, когда я чувствую себя способным немного работать, я должен именно им посвящать по преимуществу эти короткие моменты».

Лишь в начале 1827 г. Френель добился разрешения привлечь себе в помощь своего брата Леонора, который скоро стал преемником скончавшегося в том же году учёного.

Когда успех новой системы маяков уже определился, Брюстер выступил с заявлением, что он имеет право считать себя автором этого изобретения, ибо ещё в 1811 г. в статье в Энциклопедии он писал о рациональности изготовления ступенчатых линз из отдельных кусков стекла. Араго ответил на это резкой статьёй, указав, что *прочитать* о таком предложении можно было ещё в 1788 г. в похвальном слове Кондорсе, посвящённом памяти Бюффона, изобретателя ступенчатых (эшелонированных) линз. Заслуга заключалась в том, чтобы *сделать и использовать* такие линзы. И эта заслуга целиком принадлежит Френелю, который выполнил все нужные расчёты, придумал технологию и организовал изготовление нужных оптических деталей, сконструировал аппаратуру, провёл все необходимые опыты как по улучшению осветительных ламп, так и по созданию законченной системы.

На фоне исключительных заслуг Френеля в развитии теоретической оптики работы по маякам кажутся бледными. Однако нельзя забывать о том громадном значении, которое имеет увеличение безопасности мореплавания. И заслуги Френеля в прогрессе этой области и в преодолении трудностей при решении технической проблемы были весьма значительными.

Этот краткий очерк главных достижений Френеля показывает всю широту и глубину достигнутых им результатов. Следует прибавить, что на протяжении

всего XIX столетия оптические исследования многочисленных крупнейших теоретиков и искуснейших экспериментаторов установили, что к результатам Френеля можно кое-что добавить, что их можно уточнить или более строго обосновать, но что в них ничего не надо менять! И только в XX в. создание теории относительности и теории квантов образовало новую базу физики и, следовательно, физической оптики¹⁾.

Признание важности работ Френеля его современниками не заставило себя ждать. Если два первых мемуара Френеля, относящихся к 1815 г., рассматривались как несущественные дополнения к работам Юнга, то уже его работы 1816 и 1817 гг. оказали решительное влияние на выяснение вопроса о природе поляризации, мемуар 1818 г. о диффракции был удостоен премии Академии наук, мемуар 1821 г. по двойному лучепреломлению заслужил самую высокую оценку Лапласа, а работа 1823 г., обосновавшая законы отражения, объяснила смысл открытия Малюса. И всё же официальное признание исключительных заслуг Френеля, выразившееся в избрании его в Академию наук, не обошлось без заминки.

На заседании 27 января 1823 г. из двух имевшихся кандидатов—Френеля и Дюлона—был выбран Дюлон, работы которого «имели большую давность (*l'ancienneté*)». Это обстоятельство, повидимому, несколько задело Френеля. В письме к Юнгу весной 1823 г. он, между прочим, писал: «... Все эти мемуары, которые я за последнее время один за другим представил в Академию наук, не открыли, однако, мне её дверей. На вакантное место в секции физики был избран г. Дюлон... Вы видите, волновая теория не принесла мне удачи; но это не отбивает у меня вкуса к ней: я утешаюсь в этом несчастье, занимаясь оптикой с новым жаром».

¹⁾ Интересный анализ работ Френеля с этой точки зрения можно найти в статье М. Brillouin, *Fresnel et son oeuvre*, написанной по поводу столетия со дня смерти Френеля (*Ann. de Physique*, IX, стр. 5—34, 1927).

Через три месяца, когда смерть Шарля открыла новую вакансию в секции физики, Френель был выбран единогласно на заседании 12 мая 1823 г.

Скоро последовало признание и из Англии. В середине 1825 г. Френель был избран членом Королевского Общества, высшего научного учреждения Англии, а 18 июня 1827 г. Юнг известил Френеля о присуждении ему Румфордовской медали. Но этот последний знак внимания застал Френеля уже на смертном одре, и 14 июля 1827 г. гениальный учёный скончался.

Короткая жизнь и ещё более короткая научная карьера Френеля оборвалась... Он прожил всего 39 лет и из них менее 9 (с 1815 по 1824 г.) работал над физическими проблемами. Но, несмотря на эту краткость, именно Френелю обязана оптическая наука своим блестящим и плодотворным расцветом. И если славу экспериментальных открытий разделяют с Френелем Малюс, Араго, Био и Брюстер, то всё глубокое содержание, которое вложила в эти открытия волновая оптика, есть создание Френеля.

Нередко наряду с именем Френеля ставят имя Томаса Юнга. Действительно, Юнг, начавший работать на пятнадцать лет раньше Френеля, почти во всех вопросах был впереди Френеля, но и неизмеримо ниже его. И, как ни парадоксально это звучит, но не Юнг оказал какое-либо влияние на Френеля, а, наоборот, влияние Френеля на Юнга было чрезвычайно велико.

Конечно, неотъемлемой заслугой Юнга является формулировка принципа интерференции и объяснение с его помощью большого круга оптических явлений. Но, как уже упоминалось, Френель на 15 лет позже Юнга совершенно самостоятельно пришёл к этим же открытиям и, следовательно, не формально, а по существу ничем не был обязан трудам Юнга. Больше того, мы знаем, что к 1815 г. Юнг был явно разочарован возможностями волновой теории. Мы уже упоминали, как в письме к Малюсу Юнг признавал, что опыты Малюса ставили волновую теорию в затруднительное положение. Ещё определённое Юнг высказывал свои

сомнения в 1815 г. Брюстеру: «Что касается моих основных гипотез о природе света, я с каждым днём всё менее и менее расположен занимать ими свои мысли по мере того, как всё большее число фактов, вроде тех, которые открыл Малюс; доходит до моего сознания: ибо если эти гипотезы и не несовместимы с этими фактами, во всяком случае они не могут оказать нам никакой помощи, чтобы найти объяснение»¹⁾). Наоборот, Френель сделал данные о поляризации исходным пунктом своих исследований и, ставя новые опыты, вскрывая более глубокий смысл наблюждённых фактов, всё шире и шире раскрывал дорогу волновым представлениям. Формально Юнг на 10 лет раньше Френеля дал волновую теорию диффракции, но мы видели, что теория эта в том виде, как она была дана Юнгом, не верна и не согласуется с точными опытами. Юнг первый заговорил об интерференционном объяснении цветов кристаллических пластинок, но в его объяснении нет самого главного—оценки роли поляризации, и по существу догадка Юнга—отнюдь не объяснение. Юнг, узнав об опытах Френеля и Араго, немедленно высказал идею о поперечности световых колебаний, но мы видели, какими оговорками сопровождает он эти высказывания и как мало физического содержания в его рассуждениях. Френель не торопится с формулировкой своей догадки, но вынашивает её, проводит, руководствуясь ею, ряд экспериментов, и в его руках идея поперечности волн, ему принадлежащая, становится исключительно плодотворным орудием дальнейшего прогресса оптики. Юнг ещё в 1809 г., правильно критикуя лапласову теорию двойного лучепреломления, говорит о роли анизотропии упругости. Но и здесь в его рассуждениях вопрос о двойном лучепреломлении даже не поднимается, и из них можно только получить объяснение существования необыкновенного преломления. В руках Френеля анизотропия упругости в сочетании с поперечностью волн послужила основой

¹⁾ Т. Young, Miscellaneous Works, т. I, стр. 361.

для создания всей кристаллооптики, причём важным исходным моментом явился опыт Френеля, показавший отсутствие обыкновенных лучей в двуосных кристаллах. В проблеме отражения света у Юнга есть правильная формула для коэффициента отражения при *нормальном* падении $\left(\frac{\mu-1}{\mu+1}\right)^2$. Но именно этот частный случай, который, конечно, заключён и в общих формулах Френеля, не представляет никакого интереса, ибо объяснение сущности поляризации при отражении лежит в неравенстве коэффициентов отражения для разных ориентаций плоскости поляризации, а при нормальном падении это различие отсутствует. И опять успех Френеля начинается с нового эксперимента—наблюдения поворота плоскости поляризации при отражении. Даже в волновом истолковании аберрации света Юнг предшествоует Френелю, указав ещё в 1804 г., что надо исходить из гипотезы неувлекаемости эфира при движении тел. Но Юнг ограничился этим замечанием, а Френель, продумывая теорию опыта Араго, пришёл к идее «о частичном увлечении» эфира, опередив тем самым почти на столетие учение об оптике и электродинамике движущихся сред.

Огромный талант Юнга позволил ему повсюду высказывать почти правильные мысли. Но сделать эпоху в науке ему помешали недостаток физической интуиции и, повидимому, недооценка того могучего средства исследования, которым является планомерно проводимый эксперимент.

Несколько важных и удачных опытов Юнга по интерференции и диффракции имели, несомненно, большое значение для успеха его именно в этих вопросах. Во всём же дальнейшем Юнг ограничивался попыткой истолкования чужих опытов. Но в тот период, когда теория ещё нащупывала пути, роль эксперимента, направляемого теорией и направляющего её, была особенно важна. Френель широко и исключительно успешно пользовался этим средством. Сверх того, он никогда не ограничивался общей идеей. Он ясно понимал, что

теория состоит из идеи и расчёта, и только количественные выводы, подвергнутые экспериментальной проверке, имеют неоспоримую силу убедительности.

Несомненно, однако, что обилие удачных высказываний Юнга оставляло, особенно у его соотечественников, впечатление приоритета Юнга. Повидимому, и сам Юнг был склонен к такой точке зрения. Френель во всех своих мемуарах и официальных высказываниях всегда с большой готовностью подчёркивал права Юнга на приоритет. Однако он не мог не сознавать их относительного значения. И однажды, задетый дошедшим до него высказыванием, где Юнг сравнивает себя с деревом, а Френеля с яблоком, которое произвело это дерево, Френель пишет Юнгу исполненное горечи письмо (26 ноября 1824 г.), где, жалуясь на необъективность англичан по отношению к французской науке вообще, легко доказывает, что «яблоко выросло без дерева».

Письмо было написано в эпоху физического и морального истощения тяжело больного Френеля. Через несколько месяцев, немного оправившись, он просит Юнга сжечь это письмо, написанное в минуту раздражения.

Нельзя без тяжёлого чувства читать об обстоятельствах жизни Френеля, которые окончательно подорвали его некрепкое здоровье. При исключительной нетребовательности Френеля, который не был женат и вёл крайне замкнутую жизнь, скромное жалованье инженера—его единственный регулярный доход—обеспечило бы его существование. Но ему нужны были средства для покрытия расходов на свои научные исследования. Это вынудило Френеля принять на себя с 1821 г. обязанности нештатного экзаменатора при Политехнической школе, оказавшиеся для него крайне тягостными. Его попытка получить гораздо менее утомительную и лучше оплачиваемую должность экзаменатора в Морском училище не увенчалась успехом, и Френель, будучи уже академиком, вынужден был изнурять себя экзаменационной работой. Осенние экзамены

1824 г. привели к катастрофе. Крайнее переутомление после двухнедельной сессии вызвало тяжёлое кровохарканье и обострение туберкулёза. Это было началом конца. Силы Френеля больше уже не восстанавливались. Последние три года Френель лишь с трудом справлялся со своими обязательными занятиями по службе, и 14 июля 1827 г. прекратилась жизнь «гения, который составил честь Франции и своего века» ¹⁾).

Г. С. Ландсберг

¹⁾ Из письма Джона Гершеля к Сенармону, 17 марта 1862 г.

