

КЛАССИКИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

---

К Н И Г А    В О С Е М Н А Д Ц А Т А Я

О Г Ю С Т Е Н   Ж А Н   Ф Р Е Н Е Л Ъ

---

О С В Е Т Е

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

---

1

9

2

8





# КЛАССИКИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Под общей редакцией А. Д. Архангельского, Н. К. Кольцова,  
В. А. Костицина, П. П. Лазарева

КНИГА 18

**О.-Ж. ФРЕНЕЛЬ**

# О С В Е Т Е

М Е М У А Р

---

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ДАР

ОГЮСТЕН-ЖАН ФРЕНЕЛЬ

Дар  
**СУВОРОВА С.Г.**

Заместителя  
главного редактора журнала  
«Успехи физики»

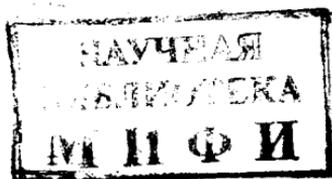
# О С В Е Т Е

535

ф 87

М Е М У А Р

Перевод под редакцией  
В. ФРЕДЕРИКС



---

---

# DE LA LUMIÈRE

*MEMOIRE*

de

AUGUSTIN FRESNEL

Типография Госиздата  
„ПЕЧАТНЫЙ ДВОР“  
Ленинград, Гатчинская, 26.  
Гиз № 22716/л. Ленингр.  
Облит № 51733. 10 л.  
Тираж 1500

23. 0. 1. 1922  
ФРК - 1/100

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В июле 1927 года исполнилось сто лет со дня смерти Огюстена-Жана Френеля. Работы знаменитого французского физика и его современников Юнга и Араго составляют основу современной оптики. Уже одно это обстоятельство должно сделать предлагаемую книгу интересной всякому, кто стремится к знакомству с этой областью физики; книга Френеля написана с дидактической целью; она проникнута стремлением убедить противников волновой теории в неправильности их взглядов, так как до Френеля господствующее место в науке занимала теория испускания Ньютона; эта книга поучительна, потому что главным доводом, которым убеждается в ней противник, служит чистый опыт.

В течение почти ста лет со дня смерти Френеля предложенная им теория считалась единственной возможной для всех оптических явлений. Но за последние несколько лет были открыты новые явления, касающиеся возникновения и распространения света; они стояли особняком от тех, к которым с неизменным успехом применялась теория, математически основанная Френелем; самым удивительным было то, что они очень просто и легко объяснялись с помощью теории световых квант, очень близкой по смыслу своему к старой ньютоновой теории. Неожиданно перед физикой еще раз встала задача, столь блестяще, казалось, уже один раз разрешенная Френелем, и читатель с особенным интересом прочтет о тех тщательных и до мелочи продуманных опытах, которые в свое время легли в основу волновой теории. Весьма замечательно, что объяснение вновь открытых явлений за самое последнее время пошло не по пути отрицания волновой теории, — что по отношению к тем явлениям, о которых говорится в настоящей

---

книге, представляло бы бесполезные трудности, — а по пути создания новой так называемой „волновой“ механики, про которую можно сказать, что она находится к старой механике в таком же отношении, как геометрическая оптика или, даже, волновая оптика Гюйгенса к оптике Френеля.

Перевод сделан с нового издания труда Френеля в серии „Классиков науки“ издательства Арман Колэн (Armand Colin) в Париже. Из этой же книжки заимствованы фотография диффракционных полос (см. стр. 25) и некоторые биографические данные, помещенные вместе с поясняющими примечаниями в конце книги. При переводе мы старались быть как можно ближе к подлиннику, но некоторые слова и выражения все же для большей ясности изложения приходилось передавать не дословно.

*В. Фредерикс*

## ПРИРОДА СВЕТА

1. Между физиками уже давно существует разногласие о природе света. Одни полагают, что свет выбрасывается светящимися телами, тогда как другие думают, что он происходит от колебаний бесконечно тонкой упругой жидкости, распространенной во всем пространстве, подобно тому, как звук происходит от колебаний воздуха. Волновой принцип, обязанный своим происхождением Декарту\* и, в выводах из него вытекающих, с большим искусством развитый Гюйгенсом,\* был принят также Эйлером,\* а в самое последнее время знаменитым доктором Томасом Юнгом,\* которому оптика обязана многими важными открытиями. Принцип испускания, или принцип Ньютона, поддерживаемый великим именем своего автора — и, я сказал бы даже, той славой непогрешимости, которую ему создал его труд „Principes“,\* — пользовался более общим признанием. Другая гипотеза казалась уже совсем оставленной, когда господин Юнг весьма любопытными опытами снова привлек к ней внимание физиков. Эти опыты являются ее поразительным подтверждением и кажутся в то же время весьма трудно совместимыми с принципом испускания.

Вновь открытые явления, по сравнению с ранее известными фактами, с каждым днем увеличивают шансы в пользу волнового принципа. Долгое время пренебрегаемый и более трудный, в смысле получения следующих из него механических выводов, чем гипотеза испускания, он, тем не менее, дает нам уже значительно более широкие средства для надобностей вычислений. Последнее является одним из наименее сомнительных признаков правильности теории. Когда гипотеза правильна,

\* См. примечания 1-е, 2-е, 3-е, 4-е и 5-е в конце книги.

---

то она должна приводить к открытию численных соотношений, связывающих весьма несходные между собой явления. Напротив, когда она неправильна, то точным образом она может представить только те явления, для которых была придумана, подобно тому, как эмпирическая формула обобщает в себе произведенные измерения лишь в тех пределах, для которых ее вычислили. С ее помощью нельзя будет открыть тайные связи, соединяющие данные явления с явлениями другого рода.

Так, например, господин Био, стремясь, со свойственной ему проницательностью, не уступавшей его упорству, найти законы, которым подчиняются красивые явления окрашивания, открытые господином Араго в кристаллических пластинках, нашел, что получаемые в них окраски следуют по отношению к их толщинам тем же законам, что и цветные кольца, а именно, что толщины двух однородных кристаллических пластинок, окрашенных в каких-нибудь два цвета, находятся в таком же отношении, как толщины воздушных слоев, отражающих в цветных кольцах соответственно те же самые цвета. Это соотношение, на которое указывает нам аналогия, уже само по себе весьма замечательно и важно, независимо от какой-либо теоретической идеи; но Юнг, с помощью принципа интерференций, являющегося непосредственным следствием принципа волнового, пошел еще дальше. Он открыл между этими двумя различными явлениями еще другое значительно более тесное соотношение, а именно: разность хода лучей, преломленных в кристаллической пластинке обыкновенным образом, и лучей, претерпевших преломление необыкновенное, как раз равняется разности путей, пройденных лучами, отраженными от первой и второй поверхности воздушного слоя, который дает ту же самую окраску, что и кристаллическая пластинка. Мы имеем здесь дело уже не с некоторым простым соотношением между явлениями, но с тождеством их.

Я мог бы к этому еще прибавить, что столь сложные по своему внешнему виду законы дифракции, которые напрасно старались разгадать соединенными силами опыта и принципа испускания, были показаны во всей их общности с помощью наиболее простых из принципов волновой теории. Несомненно, что и наблюдение способствовало их открытию, но с помощью

его оно не могло бы быть сделано, в то время как волновая теория по отношению к явлениям диффракции так же, как и во многих других случаях, могла предвосхитить опыт и заранее предсказывать явления со всеми их особенностями.

2. Только что указанные нами успехи волнового принципа показывают, что выбор между той или другой теорией не может быть безразличен.\* Полезность теории не ограничивается только тем, что облегчает изучение фактов, соединяя их в более или менее многочисленные группы по наиболее характерным соотношениям. Другая, не менее важная, цель всякой хорошей теории должна состоять в том, чтобы содействовать прогрессу науки открытием связующих фактов и соотношений между наиболее различными, и кажущимися наиболее независимыми друг от друга, категориями явлений.† Но ясно, что, исходя из мнимой гипотезы о природе света, нельзя достигнуть цели столь же быстро, как в случае овладения искомой тайной природы. Теория, основная гипотеза которой правильна, с каким бы трудом она ни поддавалась математическому анализу, укажет, — даже между весьма чуждыми ей по содержанию фактами, — на соотношения, которые для другой теории навсегда останутся неизвестными. Таким образом, — не говоря уже о весьма естественном и всегда должном существовать желании знать истину, — мы видим, насколько для прогресса оптики и всего, что с нею связано, — т. е. для прогресса всей физики и всей химии, — важно, чтобы было известно, устремляются ли световые молекулы от тел, нас освещающих, к нашим глазам, или же свет распространяется с помощью вибраций промежуточной жидкости, частицам которой светящиеся тела сообщают свои колебания.‡ Но пусть не думают, что это один из тех вопросов, решения которых нельзя достигнуть; и если он долгое время казался нерешенным, то не следует отсюда выводить, что его разрешить невозможно.‡ Мы думаем даже, что он уже решен, и что, внимательно рассмотрев оба принципа и те объяснения, которые они дают до настоящего времени известным явлениям, нельзя будет не признать превосходства волновой теории.

Имея в виду излагать главным образом фактическое содержание явлений, мы не можем не изложить при этом и тех

---

теоретических соображений, которые в столь сильной степени способствовали открытию управляющих ими законов. Мы полагаем, что будет весьма полезно как для преподавания, так и для прогресса науки, если станут известными наиболее существенные и наиболее плодотворные принципы теории, преимущества которой долгое время оставались не оцененными. Размеры теоретического дополнения, как и само изложение главного, нуждающегося в дополнении, предмета исследования этого труда, не позволят нам войти в детали вычислений; объяснив для каждого фактического вопроса, каким образом он становится математической задачей, мы дадим затем главные результаты анализа.

Прежде всего мы займемся диффракцией света, которая естественным образом должна быть помещена в начале всякого курса оптики, так как предметом ее изучения является наиболее простой вид отбрасываемой непрозрачными телами тени, а именно тот ее вид, когда освещающий предмет сводится к одной светящейся точке; изложению же этих явлений мы отведем столько места, сколько они по нашему мнению заслуживают, как наиболее подходящие для решения того большого вопроса, о котором мы только что говорили.

## ДИФФРАКЦИЯ СВЕТА

3. Диффракцией света называют те видоизменения, которым он подвергается, проходя около края тел.

Если через отверстие с очень маленьким диаметром впустить в темную комнату солнечные лучи, то замечают, что тени тел, вместо того, чтобы быть ясно и резко ограниченными, — как это должно было бы быть, если бы свет распространялся всегда по прямой линии, — расщепляются на своих контурах и оказываются ограниченными тремя хорошо различимыми цветными полосами, ширина которых неодинакова и идет, уменьшаясь от первой к третьей; когда промежуточное тело достаточно узко, то полосы видны даже в тени, которая кажется разделенной на отдельные темные полоски и более светлые полоски, расположенные на равных расстояниях друг от друга. Последние второго вида полосы мы назовем внутренними полосами, а первые внешними полосами.

4. Гримальди\* был первым физиком, тщательно их наблюдавшим и изучавшим. Ньютон,\*\* тоже занимавшийся диффракцией и даже посвятивший ей последнюю главу своей Оптики, повидимому, не заметил внутренних полос, хотя его исследования более поздние, чем исследования Гримальди. В самом деле, в двадцать восьмом вопросе третьей книги своей Оптики, возражая против волнового принципа, по которому световые волны должны были бы распространяться и внутри тени тела, он говорит: „Правда, лучи, проходящие вдоль тела, несколько изгибаются, как это мною и было по-

\* Grimaldi, Physico-mathesis de lumine, Болонья, 1665 г. См. также примечание 6-е в конце книги.

\*\* См. примечание 7-е.

---

казано выше, но это изгибание не совершается в сторону тени; оно совершается в противоположную сторону, и только тогда, когда лучи проходят на очень близком расстоянии от тела; после этого они опять распространяются по прямой линии". Трудно понять, каким образом изгиб света во внутреннюю часть тени мог ускользнуть от столь опытного наблюдателя, в особенности, если принять в расчет, что он производил опыты с самыми узкими телами, так как он пользовался даже волосами. Можно даже подумать, что этим он был обязан своим теоретическим предубеждениям, до некоторой степени закрывавшим ему глаза на многозначные явления, сильно ослаблявшие то главное возражение, на котором он основывал превосходство своего принципа.

В виду того, что изгиб света во внутреннюю сторону тени является фактом основной важности, мы считаем особенно нужным указать на детали опыта, с помощью которого он устанавливается. Чтобы у вас при производстве его не оставалось на этот счет никаких сомнений, впустите в темную комнату луч солнца через дырочку, проделанную в ставне и покрытую вами листом оловянной бумаги, с проколотым в ней булавкой отверстием, не превосходящим одной десятой миллиметра; вместо того, чтобы заставить падать косые солнечные лучи непосредственно на отверстие, что не позволило бы проследить за их ходом в темной комнате на достаточно большом расстоянии, заставьте их падать на расположенное вне комнаты зеркало, наклонив его так, чтобы лучи отражались приблизительно в горизонтальном направлении. Затем поместите в конус лучей, образованный впущенными таким образом лучами, железную или стальную, или сделанную из какого-нибудь другого совершенно не прозрачного вещества, нить, диаметр которой был бы, например, в один миллиметр. Для большей определенности я предположу, что нить находится на расстоянии одного метра от маленького отверстия, и что белый картон, на котором вы получаете ее тень, помещен еще на два метра дальше, т. е. на расстоянии трех метров от ставен. Очевидно, что если бы маленькое отверстие было бесконечно узким, если бы светящаяся точка была математической точкой, то геометрическая тень, очерченная на картоне, должна была бы

иметь три миллиметра в ширину, причем под этим названием я понимаю тень, границы которой были бы очерчены лучами, не претерпевшими никакого изгиба.

5. Вычислим теперь, насколько ширина абсолютной геометрической тени должна уменьшиться вследствие размеров освещающего отверстия. В виду того, что последнее, по предположению, имеет диаметр в одну десятую миллиметра, крайние лучи будут исходить из точек, удаленных от центра на одну двадцатую миллиметра, а принимая во внимание, что картон находится от железной нити на расстоянии вдвое большем, чем расстояние нити от светящейся точки, геометрическая тень должна иметь в ширину одну десятую миллиметра. Таким образом, абсолютная геометрическая тень с каждой стороны не может уменьшиться больше, чем на одну десятую миллиметра, и, следовательно, будет иметь в ширину 2,8 миллиметра. Значит, если бы лучи не испытывали никакого изгиба во внутреннюю часть тени, то это пространство должно было бы быть в полной темноте. Но, внимательно его наблюдая, вы обнаружите слегка освещенные полосы, благодаря которым будут вырисовываться темные разделяющие их линии, и вы заметите, что даже в самом центре тени\* находится блестящая полоса. Из этого опыта, который так легко проверить, следует, как это было замечено Гримальди, что свет изгибается во внутренней части тени тел. Нужно сказать, что по мере того, как угол загиба увеличивается, свет очень быстро уменьшается в силе; но это быстрое уменьшение не находится ни в каком противоречии с теорией колебаний, которая очень просто объясняет его малыми размерами световых волн и которая дает даже закон, по которому это уменьшение происходит. Таким образом, Ньютон ошибался, предполагая, что свет не проникает за непрозрачные тела, и то возражение, которое он выводил отсюда против волновой теории, покоилось на неверном предположении.

6. Так как мы только что говорили о внутренних полосах, то поэтому сейчас же и опишем один остроумный опыт, про-

\* В дальнейшем я буду называть блестящей полосой всякую полосу, заключенную между двумя смежными более темными полосами, как бы ни была мала при этом ее сила света.

---

изведенный по этому вопросу господином Юнгом, и приведем то важное следствие, которое он из него вывел.\*

Прикрыв с помощью экрана весь свет, приходивший от одной из сторон узкого тела, он заметил, что все полосы, расположенные во внутренней части тени, совершенно исчезли, несмотря на то, что таким образом им устранялась только одна половина отклоненных лучей. Отсюда он вывел, что для образования полос необходимо совместное действие обоих пучков лучей, и что оно являлось результатом их действия друг на друга; в самом деле, каждый из этих двух пучков, взятый по отдельности, давал в тени один лишь непрерывный свет; и если бы они просто смешивались и не оказывали бы друг на друга никакого влияния, то их соединение тоже должно было бы дать непрерывный свет.

7. Если сделать предположение, — естественное с точки зрения принципа истечения, — что различные отклонения световых лучей вблизи тел происходят вследствие возбуждаемого телами некоторого притягательного или отталкивающего действия на световые молекулы, то можно было бы думать, что в этом опыте действие свободного края узкого тела изменялось экраном, касавшимся другого края таким образом, что утрачивалась способность образовывать внутренние полосы. Это возражение должно казаться весьма слабым уже потому, что внешние полосы, образованные свободным краем узкого тела, вовсе не меняются от соседства экрана, но господин Юнг, кроме того, и совсем устранил его, удалив экран от узкого тела настолько, что уже не могло быть основания предполагать, что он может сколько-нибудь изменить притягательные или отталкивающие силы узкого тела; экран помещался на пути одного из двух световых пучков, или как раз перед тем, как он касался края тела, или сейчас же после этого, — в том и другом случае внутренние полосы всегда исчезали.

8. Кроме того, он доказал существование взаимодействия световых лучей, пропуская свет через два маленьких достаточно друг от друга близких отверстия; он заметил, что

\* Experiments and Calculations relative to physikal Optics (Philosophical Transactions, for 1804).

в тени промежуточной части находятся темные и блестящие линии, происходившие, очевидно, от действия этих двух пучков друг на друга, так как они немедленно исчезали, как только одно из отверстий закрывалось. \*

Полосы становятся более яркими, если вместо того, чтобы сделать два маленьких отверстия в экране, проделать в нем на расстоянии одного или двух миллиметров две параллельные щели; и в этом случае, закрыв одну из щелей, можно уничтожить внутренние полосы, хотя свет, получающийся в тени промежуточной части от другой щели, все еще будет весьма значителен. Если щели недостаточно узки или если тень рассматривается достаточно близко от экрана, то часто можно видеть полосы и после того, как один из световых пучков был загорожен; но это не те полосы, которые мы имеем в виду, и их легко отличить, если только щели значительно уже, чем отделяющий их промежуток; ибо в этом случае полосы, получающиеся от совместного действия двух световых пучков и исчезающие при уничтожении одного из них, оказываются гораздо более тонкими, чем те другие. Эти последние, значительно более широкие, получаются от действия каждой щели в отдельности, причем можно заметить, что узкие полосы возникают в средней части пространства там, где обе группы широких полос начинают смешиваться.

Мы всегда предполагали, что весь свет, которым в этих опытах пользуются, получается от одной и той же светящейся точки; если бы это было иначе, если бы два смешиваемых световых пучка не испускались бы одним и тем же источником, то только что описанные явления не имели бы больше места; с помощью волновой теории мы вскоре покажем причину этого. В настоящий момент ограничимся изучением фактов, которые с наибольшей очевидностью показывают, что в некоторых случаях световые лучи оказывают друг на друга заметное действие.

Чтобы дополнить только что нами по этому поводу сказанное, нам остается еще остановиться на другом опыте, в котором это действие обнаруживается с большою отчетливостью,

\* A Course of Lectures on natural Philosophy, lecture XXXIX, plate XXX, fig. 442.

и который имеет то преимущество, что отделяет его от явлений чистой диффракции. В этом опыте лучи, полученные от одного и того же источника света, заставляют отразиться от двух слегка наклоненных друг к другу зеркал. Но прежде чем объяснить детально все те предосторожности, которые нужно принять, чтобы обеспечить успех опыта, необходимо указать на возможные усовершенствования в способах наблюдения.

9. Вместо того, чтобы получать светящуюся точку с помощью отверстия, проколотаго булавкой в оловянной бумаге или в картоне, закрывающих дырочку в ставнях темной комнаты, гораздо удобнее вставить в эту дырочку стеклянную чечевицу с очень коротким фокусом и на нее направить солнечные лучи, отраженные горизонтально зеркалом, помещенным вне темной комнаты. Известно, что действие чечевицы состоит в том, что она соединяет параллельные лучи, падающие на ее поверхность, приблизительно в одной точке, называемой фокусом, и что этот фокус, находящийся на прямой, проходящей через середину чечевицы, оказывается тем ближе к поверхности чечевицы, чем больше ее выпуклость. Для большей определенности я предположу, что это расстояние фокуса будет равно 1 см, или 10 мм. Если солнце, подобно неподвижным звездам, не являло бы для наших глаз никакой угловой протяженности, то все его лучи, преломившись в чечевице, соединялись бы приблизительно в одной точке; но солнце охватывает собой угол приблизительно в 32 минуты, т. е. лучи, приходящие от двух взаимно противоположных точек его окружности, образуют между собой угол в 32 минуты. Но для того, чтобы определить местонахождение изображений таких двух точек в фокусе чечевицы, нужно взять те из испускаемых ими лучей, которые проходят через центр чечевицы, и, в соответствии с сделанным нами предположением о фокусном расстоянии, изображения будут находиться на продолжении этих двух лучей на расстоянии 10 мм от чечевицы. Таким образом, промежуток, их отделяющий, будет равняться хорде небольшой дуги в 32 минуты, описанной радиусом в 10 мм; это дает по вычислении 93 тысячных мм, или, приблизительно, одну одиннадцатую мм.

Таков, значит, будет диаметр маленького изображения солнца, образованного в фокусе чечевицы направленными на

ее поверхность лучами,\* которые, после пересечения в фокусе, разойдутся светящимся конусом; последний значительно пространнее, чем тот, который получается, если вводить лучи с помощью маленького отверстия. Большая величина светового конуса как раз и делает этот способ более удобным. Он мне был указан господином Араго, и с тех пор я всегда пользовался им в моих опытах.

Если необходимо, чтобы светящаяся точка была особенно неподвижна, как, например, в том случае, когда желательно измерением определить относительные положения полос, то нужно пользоваться вместо простого зеркала гелиостатом — прибором, который так называется, потому что сохраняет отраженные лучи в одном и том же постоянном направлении, несмотря на суточное движение солнца. В самом деле, ясно, что без этой предосторожности лучи отраженные, меняя направление вместе с лучами падающими, заставят слегка переместиться светящуюся точку, образованную их пересечением. Но, как мы только что сказали, абсолютная неподвижность светящейся точки необходима только тогда, когда желательно измерять полосы; строго говоря, можно было бы и тут обойтись без гелиостата, если не делать слишком много измерений сразу, не производить слишком длительных наблюдений, пользуясь при этом чечевицей с очень коротким фокусом.

10. Указав, каким образом лучше всего получить светящуюся точку, я изложу теперь, каким образом лучше всего наблюдать полосы, следуя при этом по пути, который привел меня к моему способу наблюдения.

Желая наблюдать внешние полосы на очень близком расстоянии от непрозрачного тела, я стал отбрасывать тень тела на матовое стекло, а полосы рассматривал сзади с помощью лупы. Но я заметил, что, переводя мой глаз, вооруженный лупой, за пределы матового стекла, я продолжал видеть полосы, и даже с значительно большей ясностью, и что они

\* Необходимо, чтобы на чечевицу попадали только те лучи, которые отразились от зеркала; лучи, падающие непосредственно, должны быть диафрагмированы — в противном случае, при достаточно большом размере чечевицы, они смогут образовать вторую светящуюся точку, которая осложнит действие первой точки.

оставались совершенно сходными с теми, которые обрисовывались на матовом стекле. Отсюда я вывел, что в матовом стекле не было надобности, и что было достаточно отбрасывать свет непосредственно на лупу и рассматривать светящуюся точку, поместившись за дающим тень телом.\* Причина этого весьма проста; с помощью выпуклого стекла в глубине глаза обрисовывается то, что находится в его фокусе, независимо от того, будет ли это какой-нибудь вещественный предмет или изображение, образованное некоторой комбинацией световых лучей, лишь бы эти лучи доходили без изменения до поверхности выпуклого стекла. Окуляр телескопа действует таким же способом, когда с его помощью мы рассматриваем воздушное изображение предметов, получающееся в фокусе объектива, которое заметно также, хотя и значительно менее ясно, при рассматривании на белом картоне или на матовом стекле. Таким образом, простым рассуждением мы могли бы притти к этому же методу наблюдения, который следует предпочесть применявшемуся до тех пор, так как он имеет преимущество увеличивать размеры полосы и в то же время усиливать их яркость; это позволяет обнаружить их во многих случаях, когда, вследствие их тонкости или слабости света, это оказалось бы невозможным, получая их на белый картон.

Чтобы дать понятие о превосходстве этого метода, достаточно сказать, что с его помощью легко можно обнаружить полосы в свете всякой сколько-нибудь яркой звезды, если поместить на пути ее лучей непрозрачное тело, и что при этом

\* Для того, чтобы хорошо видеть полосы, необходимо, чтобы фокус сводимых лупой лучей попадал на середину зрачка глаза; для этого лупа помещается на таком расстоянии от глаза, чтобы вся ее поверхность казалась освещенной, когда она не находится в тени непрозрачного тела; затем, сохраняя относительные положения лупы и глаза, нужно перемещать их по направлению к тени, возле которой желают наблюдать полосы.

Если лупа находится на расстоянии от тела, как раз равном фокусному расстоянию, то края тела, находясь в самом фокусе, т. е. в положении хорошей видимости, резко ограничены, и полос не видно; но полосы сейчас же появляются, как только немного удалиться от этого положения. Они появляются также, если приблизиться к телу, переходя через фокус. Явления эти легко объясняются, но мы не будем входить в слишком подробные детали.

можно даже сделать заметными темные и блестящие полосы внутри тени тела, если оно достаточно узко и достаточно удалено от наблюдателя, в то время как даже самый зоркий глаз не мог бы различить даже тени этого тела, отброшенной на белый картон. Чтобы заметить полосы в свете звезды, нужно пользоваться лупой с большим фокусным расстоянием, как, например, у стекол обыкновенных очков с фокусом в один или два фута, так как при более выпуклом стекле свет оказывается слишком ослабленным; отсюда следует, что увеличение будет меньше, и что в этом случае нельзя наблюдать столь же тонкие полосы, как в случае более яркого света; вообще говоря, чем свет слабее, тем меньше должно быть увеличение. Если в этом опыте, который всякий легко может повторить, желают добиться успеха, то, как мы уже советовали, нужно позаботиться, чтобы световой фокус выпуклого стекла попадал в середину зрачка, что можно сделать, если держать его на расстоянии, при котором вся поверхность стекла кажется освещенной, и если затем, сохраняя относительное положение глаза и лупы, исследовать тень непрозрачного тела, полосы которого желают наблюдать.

Я счел долгом несколько распространиться об этом способе наблюдений, вследствие той легкости, с которой он позволяет изучать все диффракционные явления и с точностью их измерять. В самом деле, ясно, что для измерения ширины полос, т. е. расстояний между центрами темных или блестящих полос, достаточно пользоваться небольшой подвижной лупой в фокусе которой находится очень тонкая нить, на которую производится установка и перемещение которой можно определить с помощью нониуса или микрометрического винта; этот аппарат представляет тогда собою то, что называют микрометром. Тот, которым я пользовался во всех моих опытах и который был сконструирован господином Фортеном, несет на себе медную пластинку, которая с небольшим трением скользит между двумя неподвижными выемками; в середине ее проделано отверстие шириною в один сантиметр; на краях отверстия с одной стороны закреплена нить сурового шелка, которая должна служить для установки, а с другой стороны — небольшая трубка, несущая лупу, которую можно приближать

---

или удалять от нити до тех пор, пока она не будет находиться в ее фокусе. Пластинка, на которой закреплена вся эта система, приводится в движение микрометрическим винтом, выработанным с большою точностью. Ширина его хода точно известна, подразделения же их определяются с помощью круга, разделенного на сто частей и по которому пробегает стрелка, прикрепленная к винту. Перемещение чечевицы и нити при вращении винта может быть таким способом определено с точностью до одной сотой миллиметра. Установив это, легко понять, каким образом можно, например, измерить расстояние между центрами двух темных полос; нить последовательно приводят к центру первой полосы и затем к центру второй, каждый раз отмечая на круге деления, на которых останавливается стрелка, и считая число полных оборотов, которое, кроме того, еще указывается нониусом, разделенным на части, равные ходу винта. Так как величина хода винта известна, то легко вычислить смещение нити или интервал, заключенный между центрами двух темных полос.

11. Я бы мог указать на способ наблюдения с лупой с самого начала, прежде чем описывать первоначальные опыты с диффракцией; но я боялся, что даваемые ими важные результаты останутся под некоторым сомнением, если их опытное обоснование ставить некоторым образом в зависимость от большего или меньшего доверия, с которым можно было бы вначале относиться к новому способу наблюдений; поэтому я описал эти опыты так, как их производили Гримальди и господин Юнг, получая полосы на белый картон. Дело здесь не в какой-либо трудности убедиться рассуждением, что пользование лупой ничего не меняет в этих явлениях; для того, чтобы, кроме того, убедиться в этом и на опыте, достаточно даже просто сравнить полосы, обрисовавшиеся на экране, с полосами, видимыми через лупу, фокус которой находится на том же расстоянии от непрозрачного тела, как и картон; окажется, что они совершенно подобны друг другу, с одной лишь разницей в увеличении и яркости, даваемых лупой; и если их измерить, то ширина их будет одинакова. Но было полезно *a priori* и неоспоримым образом доказать существование проникновения света в тень и взаимодействие лучей друг на друга; и я счел поэтому нужным изложить новый

способ наблюдений лишь после того, как он оказался необходимым для новых опытов, о которых мне нужно было говорить.

12. Мы можем объяснить теперь опыт с двумя зеркалами, в котором, при соединении двух пучков, правильно отраженных от зеркальных поверхностей, получают поразительнейшие явления, свидетельствующие о взаимодействии световых лучей. Чтобы избежать вторичных отражений, усложняющих явления, не следует употреблять стекол, покрытых с обратной стороны зеркальным слоем, но следует пользоваться стеклами, зачерненными с обратной стороны; металлические зеркала еще более удобны. Поместив сначала оба зеркала рядом друг с другом так, чтобы их края точно соприкасались между собою, их вращают затем до тех пор, пока они не окажутся почти в одной и той же плоскости, но все же еще образуют между собой слегка входящий угол, так что дают сразу два изображения одной светящейся точки. О величине этого угла можно судить по расстоянию, которое разделяет изображения; для того, чтобы полосы имели достаточную ширину, нужно, чтобы это расстояние было маленьким. Но больше всего внимания нужно обратить на то, чтобы зеркала не выступали по линии контакта одно над другим, ибо, если одно из них выступало на одну или две сотых миллиметра, то это часто бывало достаточным для того, чтобы помешать появлению полос. Выполнение этого условия достигается постепенными пробами, причем то из двух зеркал, которое кажется наиболее выступающим, понемногу вдавливают в мягкий воск, с помощью которого оба зеркала прикреплены к общей подставке; ощупыванием или, еще лучше, пытаясь обнаружить полосы с помощью лупы, можно судить о том, выполнено ли условие или нет. Конечно, можно придумать механизм, с помощью которого можно было бы по желанию менять угол между обоими зеркалами, избегая при этом всякого выступания одного над другим; но для этого нужно было бы, чтобы этот механизм был построен с большой тщательностью. Если указанный мною способ, вследствие требуемой им работы ощупью, оказывается более длинным, то он имеет, по крайней мере, то преимущество, что не требует других аппаратов,

---

кроме двух маленьких металлических зеркал или черного стекла, благодаря чему он является доступным всякому.

13. В этом опыте, так же как и в опытах с диффракцией, следует пользоваться светом только одной светящейся точки; для того, чтобы полосы были достаточно четкими, нужно, чтобы светящаяся точка была тем дальше и тем тоньше, чем уже оказываются полосы. Наклон системы соединенных зеркал по отношению к падающим лучам не имеет никакого значения. Чтобы обнаружить полосы, нужно немного отойти от зеркал, а отраженные от них лучи направить на короткофокусную лупу, за которой должен находиться глаз, помещенный таким образом, чтобы вся поверхность лупы казалась освещенной. Затем полосы ищутся в той части пространства, в которой соединяются лучи, отраженные от обоих зеркал, и которую легко отличить от остального светлого пространства, так как оно кажется более ярким.

Эти полосы представляют собой ряд блестящих и темных полос, параллельных между собой и на равных расстояниях друг от друга. В белом свете они оказываются окрашенными в самые яркие цвета, \* в особенности же те из них, которые ближе к середине; по мере того, как расстояние от центра их увеличивается, они становятся постепенно все слабее и, наконец, в восьмом порядке исчезают. В более однородном свете, как, например, в свете, полученном с помощью призмы или с помощью окрашенного в красный цвет стекла, замечается значительно большее число полос, представляющих собой простое чередование темных и светлых полос, окрашенных в один и тот же цвет. Если пользоваться по возможности более однородным светом, то явление сводится к своему наиболее простому виду. Мы сначала разберем этот частный случай. После этого нам будет легко объяснить наблюдаемые в белом свете явления, если мы наложим друг на друга блестящие и темные полосы, получаемые в отдельности для каждого рода цветных лучей, входящих в состав белого света.

\* Для того, чтобы хорошо различать эти цвета, нужно сделать полосы достаточно широкими; это достигается сближением обоих изображений светящейся точки.

Направление этих полос всегда перпендикулярно к прямой линии, соединяющей два изображения светящейся точки, во всяком случае в той части пространства, которая освещается правильно отраженным светом, причем направление этой прямой линии по отношению к краям соприкасающихся зеркал может быть каким угодно. Этим вполне доказывается, что полосы не являются результатом действия крайних частей зеркал на проходящие близ них световые лучи. Кроме того, можно, увеличив угол между зеркалами, настолько удалить оба изображения светящейся точки друг от друга, что образующие полосы лучи будут находиться на таком расстоянии от соприкасающихся частей зеркал, что уже не может оставаться оснований предполагать какого-нибудь действия со стороны этих крайних частей.

Центральная полоса — полоса блестящая — такая же, как для полос, пересекающих тень узкого тела, или для тех полос, которые получаются с помощью экрана с проделанными в нем двумя параллельными, очень тонкими и достаточно близкими друг к другу, щелями. Если, как мы предполагаем, пользоваться светом приблизительно однородным, то эта блестящая полоса оказывается помещенной между двумя самыми темными полосами; за каждой из последних следует блестящая полоса, за которой следует опять темная, и так далее. В полосах второго и третьего порядка темные полосы все еще очень темны; но, по мере того как расстояние от центра увеличивается, они становятся все менее резкими, что происходит вследствие того, что употребляемый свет никогда не бывает вполне однороден.

Достаточно сравнить темные полосы первого, второго и третьего порядка со светом, даваемым одним зеркалом, чтобы убедиться в том, что их освещение значительно слабее и что в тех местах, которые они занимают, прибавление лучей, отраженных от одного зеркала, к лучам другого, вместо того, чтобы дать более интенсивный свет, производит темноту. Это сравнение легко сделать, если по очереди смотреть на темные полосы и на те части светового поля, которые находятся по левую и правую сторону от части, вдвойне освещенной и вмещающей полосы. Если опасаться, что контраст бле-

---

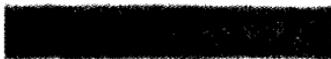
стящих полос с примыкающими к ним темными полосами может в этом отношении ввести в некоторое заблуждение, то будет достаточно поместить нить микрометра сначала в середину одной из самых темных полос, а затем в часть светового поля, освещенную одним только зеркалом; в самом деле, эту нить можно будет различить значительно легче в ее втором положении, чем тогда, когда она будет по середине темных полос первого и второго порядка, в особенности если темная комната хорошо закрыта, и если были приняты все необходимые предосторожности для того, чтобы на нить попал свет только от двух зеркал.

Таким образом, вполне доказано, что в некоторых случаях свет, прибавленный к свету, производит темноту. Этот основной факт, который не ускользнул от Гримальди, но который, повидимому, все же был неизвестен Ньютону, был за это последнее время в достаточной степени доказан опытами господина Юнга; но тот опыт, который я только что описал, выдвигает его, быть может, еще в большей степени, так как наблюдаемые в нем темные полосы, вообще говоря, более темны, чем полосы в чисто дифракционных явлениях, и так как этот опыт исключает всякую возможность дифрактивного действия, которое могло бы расширить световые пучки в одном месте, сжав их в другом, ибо наблюдаемое здесь явление получается с помощью правильно отраженных лучей.

В этом случае, так же как и в опытах господина Юнга, легко видеть, что полосы возникают вследствие взаимодействия встречающихся лучей; в самом деле, если экраном, помещенным у одного из зеркал, закрыть все лучи, отраженные зеркалом или на него падающие, то эти полосы исчезнут совершенно, хотя пространство, ими занимаемое, будет по-прежнему освещено другим зеркалом; останутся заметными только бледные и неравномерно размещенные полосы, ограничивающие тень экрана. Если экраном закрыть только половину зеркала, с тем, чтобы полосы исчезли лишь на половину их длины, то можно будет очень удобно сравнить оставшуюся часть наиболее темных полос со смежной частью пространства, в которой свет от одного из зеркал загражден экраном, и, таким образом, еще раз убедиться, что эта часть освещена



1



3



5



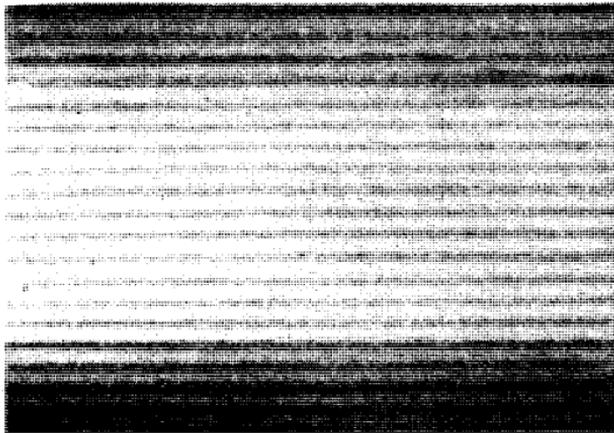
2



4



6



7



сильнее, чем середина каждой из темных полос, в которой все же сходятся лучи, отраженные от двух зеркал. Значит, в ней эти лучи, в силу некоторого действия их друг на друга, взаимно нейтрализуются.

14. Взаимодействие световых лучей, которое мы только что установили с помощью нескольких опытов, подтверждается также большим числом других оптических явлений и представляется теперь одним из наиболее доказанных принципов физики. Мы выбрали сначала те факты, которые ставили его вне всякого сомнения; мы вернемся затем к тем из них, которые представляют собой его самое важное подтверждение. Но сначала нам необходимо изучить закон, по которому действует это замечательное свойство света.

Если вычислить разности путей, проходимых лучами, которые дают каждую из темных и блестящих полос, то прежде всего окажется, что середина блестящей центральной полосы соответствует равным путям, и что если обозначить через  $d$  разность путей, пройденных лучами тех пучков, которые соединяются в середине следующей, расположенной или слева или справа, светлой полосы, то середины других блестящих полос будут соответствовать разностям пройденных путей, равным  $2d, 3d, 4d, 5d, 6d$  и т. д., в то время как середины темных полос, начиная с тех, которые граничат с центральной блестящей полосой, и до самых отдаленных, будут последовательно соответствовать разностям пройденных путей, равным  $\frac{1}{2}d, \frac{3}{2}d, \frac{5}{2}d, \frac{7}{2}d$  и т. д.

Отсюда следует, что соединение лучей производит максимум света, если разность пройденных ими путей равна  $0, d, 2d, 3d, 4d, 5d$  и т. д., и что, напротив того, они взаимно нейтрализуют друг друга и производят темноту, когда эта разность равна  $\frac{1}{2}d, \frac{3}{2}d, \frac{5}{2}d, \frac{7}{2}d, \frac{9}{2}d, \frac{11}{2}d$  и т. д. Таков общий закон периодических действий, возбуждаемых световыми лучами друг на друга.

Если оба световых луча имеют одинаковую интенсивность, как в только что описанном опыте, то в середине темных полос оказывается полное отсутствие света, во всяком случае,

для полос первого, второго и даже третьего порядка, если только употребляемый свет в достаточной степени однороден; но так как он никогда не бывает совершенно однородным, то и оказывается, что эта, столь резкая для первых полос, разница в освещении светлых и блестящих полос постепенно уменьшается по мере удаления от центра и, в конце концов, на некотором расстоянии, всегда становится незаметной. Причину этого легко найти; применяемый свет, как бы он ни был упрощен разложением в призме или прохождением через окрашенное стекло, всегда будет состоять из разнородных лучей, цвет и физические свойства которых всегда будут хоть и мало различны, но для которых период  $d$  все же не будет иметь в точности одну и ту же длину; но отсюда следует, что темные и блестящие полосы, положение которых этим периодом определяется, не будут разделены одинаковыми промежутками. Правда, ширины полос, образованных разнородными лучами, будут тем менее отличаться друг от друга, чем более применяемый свет будет приближаться к полной однородности; но, как бы эта разность ни была мала, легко понять, что, повторенная большое число раз, она, в конце концов, изменит положение полос настолько, что блестящие полосы одного рода лучей совпадут с темными полосами другого рода лучей; таким образом, на достаточном расстоянии от средней линии, „соответствующей равным путям“, темные и блестящие полосы различного рода лучей применяемого света, смешавшись, сгладят друг друга и дадут однообразную окраску.

Чем более будет упрощен свет, тем дальше от центра будет находиться точка, в которой имеет место эта полная компенсация, и тем большее число полос будет, следовательно, заметно. Если пользоваться белым светом, т. е. самым сложным, то число видимых полос будет самым маленьким, и их будет видно только по семи с каждой стороны от центра. Они представляются окрашенными так же, как цветные кольца, и причина их окраски точно такая же. Если бы длина  $d$  была одинакова для лучей различных цветов, то ширина их полос (т. е. расстояние между серединами двух последовательных блестящих или темных полос) была бы также одинакова, и наблюдалось бы полное совпадение между их точками, как

самыми темными, так и самыми светлыми; различные лучи, составляющие белый свет, находясь тогда повсюду в одинаковом соотношении, дали бы ряд черных и белых полос, не имеющих и следа какой-нибудь окраски. Но это не так:  $d$  сильно меняется для лучей, различным образом окрашенных, и почти удваивается от одного конца солнечного спектра к другому; поэтому и длина их полос меняется в таком же отношении, и, таким образом, их темные и блестящие полосы не могут больше накладываться друг на друга; местоположение их будет тем более различно, чем дальше они будут от средней линии. Таким образом, должно оказаться, что блестящая полоса лучей некоторого определенного цвета будет соответствовать темной полосе лучей другого рода; отсюда следует, что первые лучи будут преобладать над вторыми. Мы видим, что полосы представляют собою последовательность оттенков, которые будут меняться в соответствии с теми количествами, в которых будут смешиваться лучи, входящие в состав белого света.

Средняя линия центральной полосы всегда белая, так как ей всегда соответствует разность пройденных путей, равная нулю; она соответствует максимуму блеска для всех родов лучей, какова бы ни была длина  $d$ . С каждой стороны этой светлой полосы свет начинает постепенно окрашиваться; начиная от второй полосы и далее, в третьей и в четвертой полосах цвета становятся очень яркими; но затем они ослабевают, и за восьмой полосой, вследствие более полного смешивания темных и блестящих полос всех цветов, они совершенно исчезают, что дает однообразную белую окраску.

Если только что нами описанный опыт произвести с семью главными цветами, которые Ньютон различает в солнечном спектре, и если с помощью микрометра, о котором было сказано выше, измерить ширину полос, то легко понять, что отсюда можно вычислить соответствующие значения  $d$ ; но этот опыт был проделан тщательно с одним только в достаточной степени однородным красным светом, который пропускается некоторыми стеклами, вставляемыми в щелках. Для преобладающих лучей этого света, которые находятся в конце солнечного спектра, длина  $d$  равна 0,000638 мм, если взять за

единицу одну тысячную часть метра. Отсюда можно вывести значение  $d$  для лучей семи главных родов, если воспользоваться опытами Ньютона над цветными кольцами. Для этого достаточно помножить на 4 длины того, что Ньютон называет приступами легкого отражения или легкого прохождения световых молекул. \* Таким способом была вычислена следующая таблица:

Пределы главных цветов	Крайние значения в мм	Главные цвета	Средние значения $d$ в мм
Крайний фиолетовый .	0,000406	Фиолетовый . . . . .	0,000423
Фиолетовый индиго . .	0,000439	Индиго . . . . .	0,000449
Индиго-синий . . . . .	0,000459	Синий . . . . .	0,000475
Сине-зеленый . . . . .	0,000492	Зеленый . . . . .	0,000512
Зелено-желтый . . . . .	0,000532	Желтый . . . . .	0,000551
Желто-оранжевый . . .	0,000571	Оранжевый . . . . .	0,000583
Оранжево-красный . .	0,000596	Красный . . . . .	0,000620
Крайний красный . . .	0,000645		

Только что нами сказанное о небольшом числе полос, даваемых белым светом, и о весьма ограниченном числе тех из них, которые можно различать в возможно более упрощенном свете, объясняет нам, почему во многих случаях, когда лучи, исходящие из одного источника, пересекаются под направлениями, почти параллельными друг другу, все же не наблюдается полос; это происходит оттого, что разность пройденных путей слишком значительна и содержит во всех точках пространства, освещенных обоими пучками вместе, слишком большое число раз  $d$ , ибо таким образом центральная полоса и другие, которые к ней достаточно близко примыкают, чтобы быть видными, оказываются расположенными вне поля, общего обоим световым пучкам. Вот почему в опыте с двумя зеркалами так важно, чтобы зеркала не выступали одно над другим; в самом деле, вследствие крайней малости величины  $d$ , которая для желтых

\* См. примечание 8-е.

лучей составляет всего лишь одну полутысячную миллиметра, самый небольшой выступ, создающий для пройденных путей разность, равную его удвоенной величине, может отбросить группу видимых полос за пределы поля, общего обоим зеркалам. \*

15. Рассуждение, которое мы только что привели для объяснения окрашивания полос, получаемых вследствие взаимодействия двух белых пучков, приложимо ко всем явлениям дифракции в белом свете. Эти явления всегда происходят оттого, что лучи различной окраски не дают темных и блестящих полос одной и той же ширины, и что поэтому для каждой точки они не будут больше находиться в том соотношении, которое составляет белый свет.

Если известны положения этих полос для каждого рода лучей, равно как и законы изменения их интенсивностей от точки к точке, то можно вычислить отношения, в которых они смешиваются, и определить затем получающиеся отсюда окраски, воспользовавшись для этого эмпирической формулой Ньютона, с помощью которой находится окраска, соответствующая какой-нибудь смеси цветных лучей. Таким образом, достаточно изучать явления оптики в однородном свете, что приводит их к наибольшей степени простоты, и из полученных результатов всегда, и с легкостью, можно будет вывести то, что они должны представлять собой в белом свете. В соответствии с этим, во всем том, что мы скажем дальше, мы всегда станем предполагать, что применяемый свет однороден, исключая те случаи, когда мы будем специально касаться результатов, полученных с белым светом.

16. Из только что изложенного очень простого закона о взаимодействии световых лучей легко заключить, что ши-

\* Кроме лучей, правильно отраженных зеркалами, всегда находятся и такие, которые искривляются их краями и которые увеличивают таким образом пространство, общее обоим световым полям. Лучи, правильно отраженные одним из зеркал, интерферируя с лучами, искривленными краем другого, могут также образовать полосы, если разность пройденных ими путей достаточно мала; но своей кривой формой и направлением, которое больше не будет перпендикулярно к прямой, соединяющей оба изображения светящейся точки, эти полосы в общем отличаются от полос, полученных интерференцией правильно отраженных лучей.

рина полос, всегда пропорциональная длине  $d$ , должна быть, кроме того, обратно пропорциональна расстоянию, которое разделяет оба изображения светящейся точки, и прямо пропорциональна их расстоянию от микрометра, или, другими словами, обратно пропорциональна углу, под которым наблюдатель увидел бы оба изображения, если бы поместил свой глаз в точке, в которой он измеряет полосы.

Тот же простой геометрический закон приложим к полосам, полученным с двумя очень тонкими щелями, проделанными в экране. Ширина этих полос всегда пропорциональна расстоянию от экрана и обратно пропорциональна промежутку, заключенному между двумя щелями.

Этот закон оказывается еще приблизительно верным и для полос, наблюдаемых в тени узкого тела — по крайней мере до тех пор, пока они не оказываются слишком близкими к границе тени; ибо в последнем случае они следуют другому, более сложному закону, который хотя и покоится на весьма простых основаниях, но может быть изображен только трансцендентной функцией, в которую входит, кроме ширины тела и его расстояния от микрометра, также и его расстояние от светящейся точки.

Что касается до внешних, окаймляющих тени, полос, то их ширина зависит всегда сразу от этих двух расстояний. Если первое из них остается постоянным, то они будут тем шире, чем второе из них меньше.

17 Если относительные положения светящейся точки и экрана не меняются и если изменять одно лишь расстояние между микрометром и экраном, то оказывается, что ширина внешних полос не будет ему пропорциональна, как это имело место для полос внутренних. Этот же факт можно высказать в более геометрической форме, если представить себе, что через светящуюся точку, касательно к краю непрозрачного тела, проведена прямая линия (определяющая пределы того, что мы назвали геометрической тенью), и если, следуя в пространстве за средней точкой одной и той же темной или блестящей полосы и опуская из каждого ее положения перпендикуляр на касательную, сказать, что этот коротенький перпендикуляр возрастает по мере удаления от непрозрачного тела,

но в отношении меньшем, чем расстояние от него. Отсюда следует, что одна и та же точка темной или блестящей внешней полосы описывает не прямую линию, но кривую, выпуклость которой обращена наружу. Это можно показать точными измерениями, если пользоваться описанным мною микрометром. Так как этот результат весьма замечателен, то я считаю нужным привести здесь один из опытов, который послужил мне для его доказательства; этот опыт был произведен в приблизительно однородном свете, пропускаемом тем сортом красного стекла, о котором я уже говорил.

Непрозрачное тело находилось на расстоянии 3018 мм от светящейся точки, и я измерял последовательно промежутки, заключающийся между краем геометрической тени \* и наиболее

\* Край тени в такой степени сливается с полосой первого порядка, что оказывается невозможным с помощью глаза судить о том, где находится граница геометрической тени, к которой во всех моих вычислениях я относил положение блестящих и темных полос различных порядков. Поэтому я определял ее положение не непосредственно, но с помощью очень простого вычисления, которое сейчас укажу. Экран, которым я пользуюсь, представляет собою металлическую нить или цилиндр, достаточно толстый для того, чтобы на самом большом расстоянии, при котором я наблюдаю внешние полосы, последние не могли бы подвергнуться заметному изменению под действием отклоненных лучей, которые могли бы попасть с противоположной стороны цилиндра или нити; я убеждался в этом, наклеивая с одной стороны на часть цилиндра маленький кусок картона, чтобы таким образом один его край оставался свободным, и рассматривая, не произведет ли это расширение экрана некоторого изменения в положении внешних полос, и будут ли они совпадать с продолжением тех полос, которые соответствуют части цилиндра без экрана. После этого, если я желаю, например, знать, как в настоящем опыте, положение самой темной точки полосы третьего порядка по отношению к краю геометрической тени, то я должен измерить промежуток, заключенный между самыми темными точками обеих полос третьего порядка, расположенных с каждой стороны тени. Мы видим, что достаточно затем вычесть отсюда ширину геометрической тени и разделить остаток на два, чтобы получить расстояние каждой из этих минимальных точек темной полосы третьего порядка от края геометрической тени. Но если тщательно измерить диаметр применяемого цилиндра, если знать его расстояние от светящейся точки и от места, где наблюдаются полосы, то будет нетрудно вычислить ширину геометрической тени в том же самом месте; для этого достаточно установить следующую пропорцию: расстояние светящейся точки от цилиндра относится к диаметру цилиндра так же, как расстояние светящейся точки от нити микрометра относится к четвертому члену пропорции, который как раз и пред-

темной точкой темной полосы третьего порядка; я делал это последовательно, сначала на расстоянии 1,7 мм от непрозрачного тела, затем на расстоянии 1003 мм и, наконец, 3995 мм; в первом случае я нашел 0,08 мм, во втором случае 2,20 мм и в третьем 5,83 мм. Но если соединить обе крайние точки прямой линии, то ордината этой прямой, соответствующая средней точке, окажется равной 1,52 мм; это означает, что если бы темная полоса третьего порядка пробегала по прямой линии, то ее расстояние от края геометрической тени было бы в этой точке 1,52 мм вместо даваемых наблюдением 2,20 мм. Разность 0,68 мм приблизительно в полтора раза больше промежутка между серединами полос третьего и второго порядка; в самом деле, последний промежуток на расстоянии 1003 мм от непрозрачного тела составлял всего лишь 0,42 мм; таким образом, совершенно ясно, что разность 0,68 мм не может быть приписана неточности, возникающей вследствие трудности правильно оценить наиболее темные точки темной полосы, так как для того, чтобы ошибиться на эту величину, было бы нужно перейти через соседнюю блестящую полосу и даже за следующую темную полосу.

Эту разность нельзя было бы объяснить более удовлетворительно, при предположении, что неточность лежит в третьем наблюдении на расстоянии 3995 мм от непрозрачного тела. Правда, измерения, вследствие большей ширины полос, должны были иметь меньшую точность; но, проделав их несколько раз,

ставляет собой искомую ширину геометрической тени. Диаметр этих цилиндров я измеряю с помощью очень простого маленького инструмента, похожего на потяг сапожника, нониус которого мне сразу дает пятидесятые доли миллиметра и позволяет приблизительно определить сотые. Чаще всего, вместо того, чтобы применять цилиндры, я непосредственно пользовался этим инструментом; я раздвигал обе маленькие пластинки, расстояние между которыми мне указывал нониус, причем заботился о том, чтобы этот промежуток был достаточно велик для того, чтобы внешние полосы, произведенные одной из пластинок, не смешивались с полосами другой; измерив затем расстояние, например, между двумя полосами третьего порядка, я вычитал из него ширину проекции отверстия между пластинками (которую я вычисляла так же, как геометрическую тень в предшествующем способе); разделив остаток на два, я получал расстояние края геометрической тени каждой пластинки от темной полосы третьего порядка.

я заметил лишь изменения, не превосходившие трех или четырех сотых миллиметра. Кроме того, если предположить даже и при этом измерении ошибку в полмиллиметра (ошибка невозможная), то отсюда получилась бы разность всего лишь в 0,13 мм для точки, расположенной на 103 мм от непрозрачного тела. Таким образом, этот опыт вполне доказывает, что внешние полосы расположены на пути своего распространения по кривым линиям, выпуклость которых обращена наружу.

Я сделал много других наблюдений в том же роде, и все они подтверждают этот замечательный результат. Но только что приведенного опыта достаточно, чтобы поставить вне сомнения заметную кривизну траекторий, по которым распространяются внешние полосы.

18. Этот замечательный результат представляется весьма трудно совместимым с принципом испускания; в самом деле, самое естественное объяснение внешних полос с точки зрения этого принципа состояло бы в предположении, что световой пучок, коснувшись края экрана, испытывает в его близости попеременно расширения и сжатия, которые и порождают темные и светлые полосы. Но тогда эти различные пучки — сжатые или расширенные — должны были бы, перейдя за экран, идти по прямой линии, ибо, если в теории Ньютона допускается, что тела могут производить на световые молекулы сильные притяжения или отталкивания, то все же никогда не предполагается, что действия этих сил могут распространяться на расстояния столь значительные, как размеры тех траекторий, которые обладают заметной кривизной на протяжении многих метров; подобное предположение имело бы следствием многочисленные трудности, еще более непреодолимые, чем та трудность, о которой идет здесь речь.

Какова бы ни была принимаемая теория, криволинейный ход лучей может быть удовлетворительным образом объяснен только взаимодействием световых лучей между собой; это единственный способ понять, каким образом наклоненные или подвергшиеся диффракции в соседстве с телом лучи могут, продолжая распространяться по прямой линии, дать место образованию кривых траекторий для темных и блестящих полос; в самом деле, для этого достаточно, чтобы различные

точки, в которых они, встретившись, усиливаются или ослабляются, лежали бы не на прямых линиях, а на кривых. Это произошло бы, например, если бы внешние полосы получались от совместного действия прямых лучей и лучей, отраженных краем экрана; в самом деле, в этом случае точки с максимумом и минимумом света, соответствующие различным расстояниям от экрана, были бы расположены на гиперболох с фокусами в светящейся точке и на краю экрана, как это легко вывести из очень простого закона о взаимодействии между световыми лучами. Правда, как мы скоро увидим, внешние полосы образуются не одними прямыми и отраженными от края экрана лучами; бесконечное количество других лучей, рассеянных около непрозрачного тела, также содействует их образованию; все же пути их расположения представляют собой кривые такого же точно характера, и темные и светлые полосы получаются всегда, как результат взаимодействия световых лучей, без которого понимание криволинейного хода расположения полос было бы невысказано. Таким образом, какие бы основные положения мы ни приняли, необходимо допустить существование взаимодействия между световыми лучами, которое, помимо всего прочего, с такою полнотой доказано вышеприведенными опытами, что на него можно смотреть, как на одно из наиболее достоверных начал оптики.

19. Подобное явление трудно представить себе с точки зрения теории испускания, в которой, не вступая в противоречие с основной гипотезой, нельзя предполагать какой-нибудь зависимости между движениями различных световых молекул. Нужно было бы, значит, допустить, что это действие одних лучей на другие не является реальным, а только кажущимся. Другими словами, нужно допустить, что явление происходит исключительно в одном глазу, в котором последовательные удары световых молекул об оптический нерв увеличивают или уменьшают уже начавшиеся колебания, смотря по тому, препятствуют ли они или способствуют их движению; точно таким же образом, если желают привести в движение тяжелый колокол, то недостаточно увеличивать число ударов, но нужно оставлять между ними некоторые соответствующие и правильные промежутки времени, определяемые продолжительностью коле-

баний колокола, чтобы, таким образом, удары действовали совместно с уже приобретенным движением.

Это остроумное объяснение, указанное сторонникам теории испускания самим господином Юнгом,\* представляет большие трудности, если сравнить с фактами выводы, которые из него следуют. Но как бы интересно это ни было, в разбор этого мы здесь не войдем, так как иначе выйдем из положенных нами пределов.\*\* Кроме того, новые явления диффракции, которыми мы сейчас займемся и которые нам кажутся решающими и находящимися в явном противоречии с теорией испускания, делают этот разбор до некоторой степени излишним.

20. Господин Юнг предположил,\*\*\* и я думал так же, как и он (прежде чем узнал то, что им было опубликовано по этому вопросу), что внешние полосы получаются от совместного действия лучей прямых и лучей, отраженных от края экрана; но если бы это было так, то острие бритвы, которое имеет очень малую поверхность отражения, должно было бы давать внешние полосы, значительно более слабые, чем тупая сторона бритвы, отражающая гораздо больше света. Но на самом деле не замечают никакой разницы в интенсивности даваемых разными краями бритвы полос, во всяком случае, если не наблюдают их слишком близко от бритвы.

Если пропустить лучи светящейся точки через узкое отверстие, шириною, например, в полмиллиметра и произвольной длины, и если светящаяся точка не будет к нему слишком близка, то на достаточном расстоянии всегда можно видеть, что прошедший через отверстие световой пучок заметно расширяется и образует на белом картоне или в фокусе лупы (которой пользуются, чтобы наблюдать тень экрана) блестящую полосу, более широкую, чем коническая проекция отверстия.\*\*\*\*

\* Supplement to the Encyclopedia Britannica, art. Chromatics (Sect. XVI, art. 2).

\*\* Этот вопрос будет рассмотрен несколько более детально в Мемуаре о диффракции, который будет напечатан в „Сборнике Мемуаров иностранных ученых“ (Recueil des Mémoires des savants étrangers).

\*\*\* On the theorie of Light and Colours (Philosophical Transactions, for 1802).

\*\*\*\* Я называю таким образом проекцию, получающуюся с помощью прямых линий, исходящих из светящейся точки и касательных к краям отверстия.

Предположим, что края очень тонкие, подобно двум остро наточенным лезвиям; это не влияет на явление, но это делает более очевидным то следствие, которое из него нужно вывести. Если бы только те из лучей, которые коснулись края лезвия, испытывали некоторый изгиб, то в тени распространялась бы лишь чрезвычайно малая часть пропущенного через отверстие света. Отклоненные лучи являли бы тогда только весьма слабое свечение, в середине которого резко выделялась бы образованная прямыми лучами блестящая проекция отверстия. Но, как мы только что сказали, при достаточном удалении микрометра и светящейся точки от экрана, наблюдается вовсе не это; прошедший пучок распространяет свой свет с почти одинаковой силой по пространству, значительно более широкому, чем проекция отверстия. Мы предположили, что отверстие узко (что оно имеет только полмиллиметра в ширину), и сделали это, чтобы указать на опыт, который можно произвести в темной комнате в пять или шесть метров глубины. Но если светящаяся точка находится на бесконечном расстоянии, как звезда, то подобного рода расширение введенного пучка всегда можно получить с отверстием какой угодно ширины, удалившись от него на достаточное расстояние.

21. Из этих опытов следует, что световые лучи, если в их непосредственной близости находится экран, могут быть отклонены от их первоначального направления не только у самого края экрана, но и на весьма заметных от него расстояниях.

Проследим теперь за следствиями, вытекающими из этого положения в теории испускания. Если бы световые молекулы, проходя на заметных расстояниях от поверхности тел, были их действием отклонены от первоначального направления, то по этой теории необходимо предположить, что это действие или производится притягивающими или отталкивающими силами, исходящими из тел, сфера действия которых простирается на подобные же по величине расстояния, или же его нужно приписать маленьким атмосферам, такой же величины, как и сферы действия, и с другим, чем у окружающей среды, показателем преломления. Но из этих двух гипотез одинаково следует, что в приведенном нами опыте отклонение лучей зависело бы от формы, величины и природы краев отверстия, тогда как с

помощью точных наблюдений можно убедиться в том, что эти обстоятельства никакого заметного влияния на явления не оказывают и что расширение световых пучков зависит исключительно от ширины отверстия. Таким образом, явления дифракции необъяснимы в теории испускания.

22. В виду того, что это возражение мне кажется основным и решающим, я считаю нужным привести еще некоторые из опытов, подтверждающих принцип, на котором оно основано.

Я пропускал пучок света между двумя стальными пластинками, очень близкими друг к другу; их вертикальные края, во всю длину хорошо выправленные, были в одной половине острыми, а в другой закругленными, и были расположены таким образом, что закругленный край одной пластинки соответствовал острому краю другой и обратно. Отсюда следовало, что если в верхней половине отверстия острие находилось, например, справа, то в нижней части оно было налево. Следовательно, если бы разница в действии того и другого края отклоняла лучи в одну сторону хоть сколько-нибудь больше, чем в другую, то я заметил бы это в относительном положении верхних и нижних частей среднего блестящего промежутка и в особенности в положении сопровождающих его полос, которые должны были бы казаться сломанными в той своей части, которая соответствует точке, где верхнее острие внезапно закругляется и где начинается нижнее острие другой пластинки. Но внимательно и во всю длину рассматривая эти полосы, я не замечал никакой точки разрыва или изгиба; они были прямы и непрерывны, как если бы пластинки были расположены так, чтобы противолежащие части были на всем протяжении одной и той же формы.

За несколько лет до этого Малус и господин Бертоле, производя опыты по дифракции с пластинками, состоящими из двух различных по составу частей, например, из слоновой кости и из металла, признали по положению полос, что диффрактивные действия различного рода веществ были одинаковы; и хотя наблюдения этих знаменитых ученых не могут иметь совершенно такую же точность, как наблюдения, которые получаются с помощью микрометра по новому, мною указанному, способу, все же они достаточны, чтобы показать, что

если различие в природе вещества имеет какое-нибудь незамеченное влияние на отклонение лучей, то это влияние значительно слабее того, которого нужно ожидать вследствие большой разницы в преломляющей и отражающей способностях употребляемых веществ, если только приписывать отклонение света притягивающим или отталкивающим силам, действующим на световые молекулы.

23. Я приведу еще один опыт, с помощью которого я показал до очевидности, что масса и природа края экрана не оказывают никакого заметного действия на отклонение световых лучей.

Я покрыл кусок непосеребренного стекла слоем китайской туши и тонким листом бумаги, которые вместе взятые имели толщину в одну десятую миллиметра; я провел острием перочинного ножа две параллельные линии, и между двумя получившимися чертами я тщательно удалил бумагу и китайскую тушь, прилипавшую к поверхности стекла. Я измерил это отверстие с помощью микрометра, и я образовал другое отверстие такой же ширины, поставив рядом друг с другом два массивных медных цилиндра, диаметр которых был приблизительно в полтора сантиметра; они были помещены рядом с зачерненным стеклом и на таком же расстоянии от светящейся точки. Наблюдая и измеряя микрометром расширение светового пучка, прошедшего через эти два отверстия, я его нашел совершенно одинаковым в том и другом случае. Однако, по отношению к массе и природе краев отверстия трудно представить себе обстоятельства более несходные: в одном случае диффракция производилась одними краями простого слоя китайской туши, нанесенной на тонкий лист бумаги, так как стекло, на которое накладывались тушь и бумага, покрывало отверстие так же, как и остальную часть экрана; в другом случае свет изгибался двумя медными цилиндрами, масса и поверхности которых являлись для лучей значительными.

Таким образом, хорошо доказано, что ни природа тел, ни масса их, ни толщина краев не имеют никакого заметного влияния на отклонение световых лучей, проходящих в их соседстве, и в равной мере очевидно, что этот замечательный факт не может совмещаться с теорией испускания.

Волновая теория, наоборот, его объясняет и дает даже средства для вычисления всех явлений диффракции; результаты вычислений, как это можно видеть в извлечении из Мемуара о диффракции, опубликованном в томе XI „Анналов химии и физики“, очень хорошо сходятся с наблюдениями.

Я не стану здесь детально излагать рассуждений и вычислений, приводящих к общим формулам, которыми я пользовался для определения положения полос и интенсивности отклоненных лучей; но я считаю необходимым дать, по крайней мере, ясное понятие о принципах, на которых эта теория покоится, и в частности о принципе интерференции,\* которым объясняется взаимодействие лучей друг на друга.

Это замечательное явление, которое так трудно объяснить удовлетворительным образом в теории испускания, оказывается, наоборот, столь естественным следствием волновой теории, что его можно было бы предсказать заранее.

Всем известно, что когда бросают камни в спокойную воду, то в то время, как две группы волн приблизительно одинаковой силы встречаются на ее поверхности, на ней оказываются такие точки, в которых вода остается спокойной, но имеются и такие, в которых волны, соединяясь, вздуваются. Причину этого легко понять. Волнообразное движение поверхности воды состоит в вертикальных движениях, которыми молекулы жидкости по очереди поднимаются и опускаются. Но вследствие самого факта скрещивания волн случается, что в некоторых точках встречи одна из двух волн приносит с собой движение вверх, тогда как другая стремится в то же самое время опустить поверхность жидкости; если оба импульса равны, то она не может подчиниться действию одного из них легче, чем действию другого, и должна остаться в покое. Напротив того, в точках встречи, где движения согласованы, где они постоянно одинаковы, там жидкость, толкаемая обеими волнами в одном и том же направлении, будет опускаться или подниматься со скоростью, равной сумме двух импульсов, ко-

\* По крайней мере, если не наблюдать полосы слишком близко к экрану, или если поверхность, которой касаются лучи, не будет поверхностью слишком большого плоского зеркала.

торые она получила, а в частном случае, который мы рассматриваем, с удвоенной скоростью, так как мы предполагаем, что обе волны имеют одинаковую интенсивность.

Между этими точками полной согласованности и полной противоположности, — причем в одних движение отсутствует совершенно, а в других жидкость находится в максимуме колебания, — имеется бесконечное множество других промежуточных точек, в которых волновое качание совершается с большей или меньшей энергией, в зависимости от того, будут ли два встречающиеся в них движения приближаться более к полной согласованности или же к полной противоположности.

24. Волны, распространяющиеся внутри упругой жидкости, по природе своей хотя и совершенно отличны от только что указанных, показывают при интерференции сходные с ними механические явления, как только начинают приводить в колебательное движение молекулы жидкости. В самом деле, достаточно, чтобы эти движения были колебательными, т. е. перемещали молекулы по очереди в две противоположные стороны, для того, чтобы действие одного ряда волн могло быть уничтожено действием другого ряда волн такой же интенсивности; ибо, как только в каждой точке жидкости разность хода между двумя группами волн будет такова, что движениям в одну сторону первой группы будут соответствовать движения в противоположную сторону второй, то движения, если они одинаковой интенсивности, окажутся взаимно нейтрализованы, и молекулы жидкости останутся в покое. Этот результат имеет место всегда, каково бы ни было направление колебательного движения по отношению к направлению распространения волн, лишь бы это последнее было одинаково для обеих групп волн. Так, например, в волнах, которые образуются на поверхности жидкости, колебание совершается в вертикальном направлении, тогда как волны распространяются горизонтально и, следовательно, по направлению, перпендикулярному к первому; в звуковых волнах, наоборот, колебательное движение параллельно направлению распространения, но как те, так и другие подчинены законам интерференции.

Мы говорили сейчас о волнах вообще, которые могут образовываться внутри жидкости; для того, чтобы получить ясное

представление о способах их распространения, надо заметить, что если жидкость имеет по всем направлениям одинаковую плотность и одинаковую упругость, то возмущение, произведенное в одной точке, должно распространяться во все стороны с одинаковой скоростью; ибо эта скорость распространения (которую не следует смешивать с абсолютною скоростью молекул) зависит исключительно от плотности и упругости жидкости. Отсюда следует, что все возмущенные в один и тот же момент точки должны находиться на сферической поверхности, центр которой—место возникновения возмущения; таким образом, эти волны будут сферическими, тогда как волны на поверхности жидкости будут просто круговыми.

25. Прямые линии, проведенные от центра возмущения к различным точкам этой сферической поверхности, называют лучами; они представляют собой направления, по которым движение распространяется. Вот что подразумевают под звуковыми лучами в акустике и под световыми лучами в той теории, которая приписывает происхождение света колебаниям универсальной жидкости, названной эфиром.

Природа различных элементарных движений, из которых состоит каждая волна, зависит от природы различных движений, составляющих первоначальное возмущение. Самой простой гипотезой об образовании световых волн будет предположение, что небольшие колебания молекул в производящих колебания телах подобны колебаниям маятника, выведенного несколько из положения равновесия; ибо не следует представлять себе молекулы тел закрепленными в своих положениях незыблемым образом, а как бы подвешенными силами, по всем направлениям уравнивающими друг друга; но какова бы ни была природа подобных сил, поддерживающих молекулы в таком расположении, до тех пор, пока молекулы выводятся из положения равновесия на расстояния лишь небольшие по сравнению со сферой действия сил, ускоряющие силы будут стремиться вернуть их обратно, чтобы тем самым вызвать колебания их по ту и другую сторону около точки равновесия, и эти силы будут приблизительно пропорциональны отклонению; это как раз и составляет закон малых колебаний маятника и всех малых колебаний вообще. Эта гипотеза, на которую указы-

вает аналогия и которая является самой простой по отношению к колебаниям освещающих частиц, должна привести к точным результатам, так как не наблюдается, чтобы оптические свойства света менялись при обстоятельствах, которые, повидимому, должны были бы принести с собой наибольшую разницу для энергии колебаний.

26. Из гипотезы малых колебаний следует, что скорость, с которой в данный момент движется колеблющаяся молекула, пропорциональна синусу времени, если считать его от начала движения и если взять за окружность круга время, которое требуется молекуле, чтобы вернуться в исходную точку, т. е. продолжительность двух колебаний, одного в одном направлении, другого — в другом. Таков закон, по которому я вычислил формулы, которые служат для определения равнодействующей какого угодно числа волновых групп, интенсивности и относительные положения которых даны.\*

Не входя в детали этих вычислений, я считаю необходимым показать, каким образом природа волны зависит от характера движения колеблющейся частицы.

Представим себе в жидкости небольшую твердую площадку, которую отклонили из ее положения равновесия и которая возвращается в него обратно под действием силы, пропорциональной отклонению. В начале ее движения ускоряющая сила сообщает ей бесконечно малую скорость, но так как действие силы продолжается, то результаты этого действия складываются, и скорость твердой площадки все время увеличивается вплоть до того момента, когда она достигает положения равновесия, в котором она и осталась бы, если бы не приобрела некоторой скорости; в силу этой скорости она переходит за точку равновесия. Та же самая сила, которая стремится ее вернуть назад и которая действует теперь в направлении, обратном приобретенному движению, непрерывно уменьшает скорость, пока последняя не сведется к нулю; в этот момент продолжающееся действие силы вызовет скорость в обратном

\* Эти формулы и детали вычислений можно найти в уже цитированном Мемуаре о диффракции, на стр. 254, 255 и 256 тома XI „Анналов физики и химии“.

направлении, которая возвращает движущееся тело в его положение равновесия. Эта скорость, почти равная нулю в начале обратного движения, возрастает в той же мере, в какой она раньше уменьшалась, вплоть до момента, когда движущееся тело достигает точки равновесия, которую она переходит в силу приобретенного движения; но, начиная с этой точки, движение непрерывно уменьшается вследствие действия силы, которая стремится вернуть к ней движущееся тело; скорость тела сводится к нулю, когда оно достигает исходной точки. Тогда оно начинает сызнова, и с теми же самыми периодами, только что описанные нами движения и продолжало бы колебаться неопределенно долго, если бы не было сопротивления со стороны окружающей жидкости, инерция которой постепенно уменьшает амплитуду колебаний и, в конце концов, через более или менее продолжительное время, заглушает их совсем.

Посмотрим теперь, каким образом жидкость окажется возмущенной колебаниями твердой площадки. Непосредственно соприкасающийся с ней и толкаемый ею слой принимает в каждый момент ту скорость, которою площадка обладает, и сообщает ее следующему слою, толкая его в свою очередь; таким образом движение передается последовательно во все слои жидкости; но эта передача движения не совершается мгновенно, и только через некоторое время оно достигает определенного расстояния от центра возмущения. Это время будет тем более кратким, чем меньше плотность жидкости и чем больше упругая сила, т. е. чем больше энергия, с которой молекулы жидкости отталкивают друг друга. Установив это, возьмем для большей определенности момент, в который твердая площадка, совершив два колебания в противоположные стороны, вернулась в исходную точку; в этот момент скорость, которою точка обладала в самом начале и которая была приблизительно равна нулю, окажется переданной слою жидкости, который удален от центра возмущения на величину, которую мы обозначим через  $d$ . Немедленно вслед за этим немного увеличившаяся скорость твердой площадки передалась смежному слою; от него она последовательно перешла ко всем следующим слоям, и в тот момент, когда первое возмущение достигает слоя, находящегося на расстоянии  $d$ , второе достигает непосредственно

предшествующего слоя. Продолжая мысленно разделять продолжительность двух колебаний твердой площадки на бесконечное число малых промежутков времени, а жидкость, заключенную в длине  $d$ , на такое же число соответствующих бесконечно тонких слоев, легко видеть с помощью такого же рассуждения, что в каждый из этих моментов различные скорости подвижной площадки оказываются теперь распределенными по соответствующим слоям; таким образом, например, скорость, которою площадка обладала в середине первого колебания, должна была в рассматриваемый нами момент достигнуть расстояния, равного трем четвертям  $d$ ; это значит, что слой, расположенный на этом расстоянии, в этот момент обладает максимумом скорости в движении вперед;\* точно также, когда площадка достигла предела своего первого колебания, то ее скорость равнялась нулю, и это отсутствие движения должно повториться в слое, расположенном на расстоянии, равном половине  $d$ . Во втором своем колебании площадка, возвращаясь по своему пути обратно, должна сообщить соприкасающемуся с ней слою жидкости и последовательно другим слоям движение, противоположное движению первого колебания, ибо, когда площадка идет назад, то соприкасающийся с нею слой, толкаемый к этой площадке упругостью или расширяющей силой жидкости, непременно за нею следует и наполняет пустоту, которую пытается создать ее обратное движение. По той же причине следующий слой стремится к первому, третий ко второму и так далее. Таким вот образом

\* Я предполагаю, что колебания этой площадки имеют достаточно малую амплитуду по отношению к длине  $d$  для того, чтобы можно было пренебречь ее небольшими перемещениями при вычислении расстояний, на которые распространились последовательные импульсы, сообщенные площадкой жидкости. Эта гипотеза имеет свои хорошие основания, так как естественно предполагать, что даже самые большие колебания раскаленных частиц чрезвычайно малы по отношению к длине световой волны, которая, хотя и очень мала, но все же заметная величина и может быть измерена. Кроме того, если даже и нельзя будет пренебречь амплитудой этих колебаний по сравнению с длиной волны, то достаточно будет рассмотреть достаточно удаленную от центра возмущения волну для того, чтобы иметь право считать расстояние, начиная от этого центра, пренебрегая при этом небольшими передвижениями колеблющейся частицы.

обратное движение передается от одного слоя к другому, вплоть до самых отдаленных слоев. Его распространение следует такому же закону, как и распространение движения вперед; разница только в направлении движения, или, говоря языком математическим, в знаке скоростей, сообщаемых движением молекулам жидкости. Мы видим, стало быть, что различные скорости, с которыми двигалась твердая площадка, в течение ее второго колебания, должны к рассматриваемому нами моменту быть приложенными к различным слоям, расположенным между серединой расстояния  $d$  и центром возмущения. Они равны скоростям слоев, расположенных в другой половине  $d$ , но противоположны по знаку. Так, например, скорость, которою площадка обладала в середине своего второго колебания и которая представляет собою максимум скорости обратного движения, должна будет находиться теперь в жидком слое, расположенном на четверть  $d$  от центра возмущения, тогда как максимум скорости в движении вперед в тот же самый момент будет у слоя, расположенного на три четверти  $d$  от центра возмущения.

Протяжение, занимаемое жидкостью, возмущенной двумя противоположными по направлению колебаниями твердой площадки, мы назовем целою волной, и, в соответствии с этим, мы дадим название полуволны каждой из половин его, возмущенных противоположными колебаниями, совокупность которых можно назвать полным колебанием, так как оно соответствует возвращению колеблющейся площадки к исходному положению. Мы видим, что обе полуволны, которые составляют вместе полную волну, обладают в соответствующих им слоях жидкости скоростями, совершенно одинаковыми по величине, но противоположными по знаку, т. е. движущими молекулы жидкости в противоположную сторону. Эти скорости имеют наибольшее значение в середине каждой полуволны и постепенно уменьшаются к их краям, где сводятся к нулю; таким образом, точки покоя и точки наибольшей положительной или отрицательной скорости разделены между собой промежутками в четверть волны.

Длина волны  $d$  зависит от двух обстоятельств: во-первых, от быстроты, с которой движение распространяется в жидкости,

и, во-вторых, от продолжительности полного колебания колеблющейся площадки; ибо, чем больше будет продолжительность колебания и чем быстрее распространение движения, тем дальше будет отстоять передовое возмущение от твердой площадки в тот момент, когда эта последняя вернется в свое исходное положение. Если колебание происходит в одной определенной среде, то скорость распространения будет оставаться одной и той же, и длина волн будет только пропорциональна продолжительности колебания колеблющихся и образующих волну частиц. Если колеблющиеся частицы остаются подчиненными действию одних и тех же сил, то механика показывает, что каждое из их малых колебаний будет всегда иметь одну и ту же продолжительность, какова бы ни была его амплитуда; таким образом, в этом случае соответствующие волны будут иметь одну и ту же длину; они будут отличаться друг от друга только большим или меньшим количеством энергии колебания жидких слоев, причем амплитуда колебания пропорциональна амплитуде колебаний возбуждающих свет частиц, ибо из того, что было сказано, видно, что каждый слой жидкости повторяет все движения колеблющейся молекулы. Большая или меньшая величина амплитуды колебания слоев жидкости определяет собой степень абсолютной скорости, с которой они движутся, и, следовательно, энергию, но не род ощущения, который, если судить по всем аналогиям, должен зависеть от продолжительности колебаний. Так, например, характер звуков, которые через воздух передаются нашему уху, исключительно зависит от продолжительности каждого из колебаний, произведенных воздухом или звучащим телом, приводящим воздух в колебание, причем большая или меньшая амплитуда, или энергия, колебания только увеличивает или уменьшает интенсивность звука, но не меняет его характер, т. е. тон.

Интенсивность света будет, значит, зависеть от интенсивности колебания эфира, и его характер, т. е. даваемое им ощущение цвета, будет зависеть от продолжительности каждого колебания или от длины волны, так как последняя пропорциональна колебанию.

Если продолжительность колебания остается одной и той же, то, в соответствующие друг другу моменты колебательного

движения, абсолютная скорость эфирных молекул будет, как мы только что сказали выше, пропорциональна его амплитуде.\* Квадрат этой скорости, умноженный на плотность жидкости, представляет собою то, что в механике называется живою силою и что нужно брать, как меру произведенного ощущения или интенсивности света; так, например, если в одной и той же среде амплитуды колебания удвоились, то абсолютная скорость также удвоится, а живая сила, или интенсивность, света учетверится.

По мере того, как волна удаляется от центра возмущения, движение, распространяясь по большему протяжению, должно в каждой точке волны стать более слабым. Вычисление показывает, что ослабление колебательного движения или уменьшение абсолютной скорости молекул жидкости пропорционально расстоянию от центра возмущения. Следовательно, квадрат этой скорости обратно пропорционален квадрату этого расстояния; таким образом, интенсивность света должна уменьшаться пропорционально квадрату расстояния от светящейся точки.† Следует заметить, что благодаря этому сумма живых сил, заключенных в волне, остается постоянной; в самом деле, с одной стороны, длина волны  $d$  (которую можно было бы назвать ее толщиной) не меняется, а, с другой стороны, протяжение волны по поверхности увеличивается пропорционально квадрату расстояния от центра возмущения, т. е. количество, или масса, возмущенной волной жидкости пропорциональна квадрату этого расстояния; но так как квадраты абсолютных

\* Не следует смешивать эту абсолютную скорость молекул жидкости со скоростью распространения возмущения. Первая меняется при изменении амплитуды колебания, вторая же, представляющая собою только быстроту, с которой движение передается от одного слоя к другому, не зависит от интенсивности колебаний. По этой причине слабый звук передается по воздуху с такой же быстротой, как и сильный, и наименее интенсивный свет распространяется с такой же быстротой, как и наиболее яркий. Когда говорят о скорости света, то под этим всегда подразумевают скорость распространения. Так, когда говорят, что свет пробегает семьдесят тысяч льё в секунду, то по волновой теории это не означает, что такова абсолютная скорость эфирных молекул, но это означает, что движение, сообщенное эфиру, нуждается только в одной секунде, чтобы перейти от данного слоя к другому слою, отдаленному от первого на семьдесят тысяч льё.

скоростей уменьшаются как раз в том же соотношении, в каком массы увеличиваются, то отсюда следует, что сумма произведений масс на квадраты скоростей, т. е. сумма живых сил, остается постоянной. В движении упругих жидкостей, независимо от того, каким образом возмущение распространяется или подразделяется, постоянство всей суммы живых сил является общим принципом. Это обстоятельство является главной причиной, почему живую силу следует рассматривать как меру света, общее количество которого всегда остается приблизительно одним и тем же, по крайней мере, в тех случаях, когда он проходит через хорошо прозрачные средыны. \*

Для того, чтобы создать себе ясное понятие о том, каким образом колебание маленького твердого тела производит волны в упругой жидкости, нам было достаточно рассмотреть одно полное колебание твердой площадки, дающее целую волну. Если, не останавливаясь на этом первом полном колебании, мы подождем, пока площадка не совершит большого числа других колебаний, то в этом случае в жидкости окажется, вместо одной волны, число волн, равное числу полных колебаний; эти волны будут следовать друг за другом с правильностью и без перерыва, если только колебания вибрирующей частицы сами с правильностью следовали одно за другим. Это правильное и непрерывное чередование световых волн представляет собою то, что я называю системой волн.

27. Естественно предположить, что, вследствие чрезвычайной быстроты световых колебаний, производящие свет частицы способны совершить весьма большое число правильных коле-

\* Черные тела и даже наиболее блестящие металлические поверхности далеко не с полностью отражают падающий на них свет; тела не вполне прозрачные и даже самые прозрачные, если только их толщина достаточно велика, также поглощают (я пользуюсь общепринятым выражением) заметное количество падающего света; но отсюда не следует заключать, что принцип сохранения живых сил более не приложим к этим явлениям; наоборот, из наиболее вероятного представления, которое можно себе создать о механической природе тел, следует, что сумма живых сил всегда должна оставаться одной и той же (до тех пор, пока ускоряющие силы, стремящиеся вернуть молекулы в их положение равновесия, не изменились в интенсивности) и что то количество живых сил, которое исчезает как свет, воспроизводится как теплота.

баний при тех различных механических обстоятельствах, в которых они находятся при сжигании или раскаливании светящихся тел, хотя эти различные обстоятельства и могут чередоваться друг с другом с весьма большой быстротой. Одна миллионная часть секунды достаточна, например, для того, чтобы произвести 548 миллионов колебаний желтого цвета; таким образом, если бы механические возмущения, которые расстраивают правильное чередование колебаний светящихся частиц или даже меняют их характер, повторялись только через каждую миллионную долю секунды, то и тогда в промежутках между ними могли бы совершиться 500 последовательных и правильных колебаний. Это замечание позволит нам скоро определить условия, при которых интерференция световых волн должна дать заметное действие.

Мы видели, что каждая волна, произведенная колебательным движением, складывалась из двух полуволн, которые сообщали молекулам жидкости скорости, совершенно одинаковые по интенсивности, но противоположные по знаку и направлению движения. Предположим сначала, что две целые волны, идущие в одну сторону и по одному направлению, различаются в их ходе на одну полуволну; в этом случае они наложатся друг на друга только на половину своей длины,\* и интерференция произойдет между второй половиной наиболее продвинувшейся волны и первой половиной другой. Если эти две волны равны по интенсивности, то, сообщая одним и тем же точкам эфира прямо противоположные импульсы, они взаимно нейтрализуют друг друга, и в этой части жидкости движение оказывается уничтоженным; но оно продолжает существовать без изменения в двух других полуволнах. Таким образом, только половина движения оказалась бы уничтоженной.

Предположим теперь, что каждой из этих двух волн, различающихся в ходе на одну полуволну, предшествует и сопровождает их другое очень большое число подобных же волн;

\* Под этим подразумевают обыкновенно ширину волны, когда говорят о волнах, распространяющихся на поверхности жидкости. Но я подразумеваю здесь под длиной волны промежуток, заключенный между первой и последней из точек, возмущенных в жидкости одним полным колебанием колеблющейся частицы.

в этом случае, вместо интерференции двух изолированных волн, мы должны рассмотреть интерференцию двух систем волн. Я их предположу одинаковыми по числу содержащихся в них волн и по их интенсивности. Так как, по предположению, они отличаются в ходе на одну полуволну, то полуволны одной, стремящиеся двигать молекулы эфира в одном направлении, совпадут с полуволнами другой, стремящимися двигать молекулы в обратном направлении, и вместе взятые уравниваются друг друга; таким образом, движение оказывается уничтоженным по всему протяжению, занимаемому двумя системами волн, за исключением двух крайних полуволн, не принимающих участия в интерференции.\* Но так как они составляют лишь небольшую часть этих систем волн, то мы видим, что почти все движение оказывается уничтоженным.

Представляется чрезвычайно вероятным, что единственный удар одной полуволны или даже целой волны недостаточен, чтобы поколебать частицы оптического нерва, подобно тому, как одна единственная звуковая волна недостаточна, чтобы привести в колебание тела, которые могут колебаться с нею в унисон. Только последовательность волн, суммируя небольшие действия каждой волны, может, в конце концов, привести в заметное колебание звучащее тело, подобно тому, как правильное чередование незначительных ударов заставляет звучать, наконец, даже самый тяжелый колокол. Применяя эту механическую идею, — самую естественную и наиболее согласную со всеми аналогиями, — к зрению, становится понятным, что обе остающиеся полуволны, о которых мы только

\* Очевидно, что это рассуждение применимо только к системам, состоящим из волн одной и той же длины; в самом деле, если бы волны одной были длинней, чем волны другой, то, как бы эта разность ни была мала, относительное положение их уже не могло бы быть одним и тем же по всему протяжению обеих групп волн, и в то время, как противоположность между первыми волнами была бы почти полной, для последующих она была бы уже не полной, а еще несколько далее между ними оказалась бы даже согласованность в движении; отсюда произошло бы чередование слабых и сильных колебаний, подобное биениям, которые можно слышать при созвучии двух мало отличающихся друг от друга нот; но эти чередования слабого и сильного света следуют друг за другом с такой огромной быстротой, что вызываемое ими в глазу ощущение будет непрерывно.

что говорили, не могут действовать на сетчатку заметным образом, и что в таком случае соединение двух систем волн должно производить действие полной темноты.

Если ту из двух систем волн, которая уже опаздывает на одну полуволну, задержать еще на одну полуволну, то разность хода будет в одну целую волну, совпадение между движениями обеих групп волн будет восстановлено, и скорости двух колебаний будут складываться во всех тех точках, где они налагаются друг на друга. Интенсивность света будет тогда наибольшей.

Если ту же самую систему задержать еще на одну полуволну, то разность хода составит полторы полуволны, и мы видим, что наложатся друг на друга те полуволны двух систем, которые, как и в первом случае, приносят с собой движение противоположное, и что, следовательно, все волны, входящие в обе системы, должны взаимно нейтрализовать друг друга, за исключением трех полуволн с каждого конца, которые не принимают участия в интерференции. Таким образом, почти вся совокупность движения опять оказывается уничтоженной, и соединение двух пучков света, как и в первом случае, должно производить темноту.

Продолжая последовательно и каждый раз на одну полуволну увеличивать разность хода двух систем волн, мы будем иметь по очереди полную темноту\* и самый сильный свет, смотря по тому, будет ли разность хода нечетным или четным числом полуволн. Таковы следствия, вытекающие из принципа интерференции волн, которые, как мы видим, превосходно согласуются с получаемым из опыта законом взаимного влияния световых лучей; в самом деле, выражение последнего станет

\* Мы всегда предполагаем, что обе системы волн имеют одинаковую интенсивность; если бы колебания одной из них были менее энергичны, чем колебания другой, то они не могли бы более вполне их уничтожить. Скорости колебания одной из них попрежнему должны были бы вычитаться из скоростей другой, так как они толкают молекулы эфира в разные стороны; но остатки не были бы больше равны нулю и давали бы только равнодействующие скорости более маленькие, чем те, которые имеются в самом интенсивном пучке света. Таким образом, и в этом случае, с прибавлением второго пучка света, света бы стало меньше, но это уменьшение будет тем менее заметно, чем слабее будет второй пучок по отношению к первому.

совершенно тем же, если назвать длиною волны разность пройденных путей, которую мы обозначили через  $d$ . Таким образом, если, как все заставляет думать, допустить, что свет представляет собою колебания очень тонкой жидкости, то период  $d$ , период, с которым повторяются одни и те же явления интерференции, будет длиною волны.

28. Из таблицы, которую мы дали выше для семи главных родов цветных лучей, видно, что этот период  $d$ , или длина волны, сильно меняется от одного цвета к другому, и что, например, для крайних красных лучей он в полтора раза больше, чем для фиолетовых лучей, расположенных в другом конце солнечного спектра.

Становится ясным, что число различных колебаний не ограничивается семью главными, указанными в таблице, и что должно существовать множество других как между ними, так и за пределами лучей красных и лучей фиолетовых; в самом деле, весомые частицы, колебаниями которых они производятся, должны подчиняться действию сил, разнообразие которых при сжигании или накаливании тел, приводящих эфир в колебание, бесконечно велико; но от энергии этих сил как раз и зависит продолжительность колебания, а значит, и длина порождаемых колебанием волн.

Все волны, заключенные между крайней длиной в 0,000423 мм и длиной 0,000620 мм, видимы, т. е. могут действовать на оптический нерв; другие могут быть обнаружены только лишь их теплотой или вызываемыми ими химическими действиями.

Мы только что заметили, что когда обе системы волн различаются в своем ходе на одну полуволну, то две полуволны в интерференции не участвуют; если разность хода три полуволны, то таких полуволн будет 6, что составит 3 волны; вообще говоря, число волн, не участвующих в интерференции, будет равно числу полуволн, разделяющих соответствующие точки двух систем волн. Пока это число мало по сравнению с числом волн в каждой системе, почти все движение должно быть уничтожено, и должна получиться темнота так же, как и в первом случае полной противоположности. Но ясно, что, при все увеличивающейся разности хода, не принимающие участия в интерференции колебания станут значительной частью от

каждой группы волн, и что, наконец, эта разность может стать даже такой, что обе группы волн окажутся разделенными; в последнем случае явления взаимодействия световых волн совершенно перестанут иметь место. Если бы, например, группы волн содержали в себе вообще только тысячу волн, то разность хода в один миллиметр была бы более чем достаточна, чтобы воспрепятствовать проявлению интерференции всех родов световых лучей.

29. Но существует еще другая причина, в значительно большей степени препятствующая тому, чтобы взаимодействие между системами волн было заметно в тех случаях, когда разность хода хоть сколько-нибудь значительна; именно, оказывается невозможным сделать свет в достаточной степени однородным; даже самый простой по составу свет состоит еще из бесконечного числа разнородных лучей; не имеющих точно одну и ту же длину волны, и, как бы ни была мала эта разность, повторенная достаточно большое число раз, она, как мы уже заметили, создаст в характере интерференции различных лучей такую противоположность, что ослабление одних лучей окажется компенсированным усилением других. В этом состоит, без сомнения, главная причина, почему проявления взаимодействия световых лучей становятся незаметными, когда разность хода делается слишком большой и превосходит только в 50 или 60 раз длину волны.

30. Нами было также указано, что одно из необходимых условий для наблюдения явлений интерференции состоит в том, чтобы сходящиеся лучи исходили из одного общего источника; это нетрудно объяснить с помощью только что изложенной теории.

Всякая система волн при встрече с другой системой будет на нее всегда оказывать одинаковое действие, причем безразлично, будут ли обе они исходить из одного или из различных источников, так как очевидно, что рассуждения, которыми мы объяснили их взаимодействие, одинаково приложимы в обоих случаях. Но для того, чтобы это взаимодействие было заметно для наших глаз, недостаточно, чтобы оно существовало; нужно еще, чтобы проявления его сохранялись. Но как раз этого и не может быть, когда обе системы интерферирующих волн

исходят из различных источников. В самом деле, как мы уже заметили, частицы светящихся тел, колебания которых приводят в движение эфир и производят свет, должны испытывать в своих колебаниях весьма частые возмущения вследствие тех быстрых перемен, которые вокруг них происходят, что, впрочем, как показано, хорошо согласуется с большим числом колебаний между этими возмущениями. Установив это, нельзя допустить, что эти возмущения происходят одновременно и одинаковым образом для отдельных и независимых частиц; так, например, может случиться, что колебания одной станут запаздывать на одну полуволну, в то время как колебания другой будут продолжаться без изменения или же запоздают на целую волну, что в корне изменит результаты интерференции двух систем волн, ибо если в первом случае между их движениями было полное согласие, то во втором случае будет полное расхождение. Эти противоположные действия будут чередоваться с чрезвычайно большой быстротой и дадут в глазу одно только непрерывное ощущение, которое будет средним из более или менее ярких ощущений, вызываемых каждым из них, и которое останется неизменным, какова бы ни была разность пройденных путей.

Иначе обстоит дело, если оба пучка света исходят из одного общего источника. В этом случае обе системы волн, исходящие из одного центра колебаний, испытывают эти возмущения одинаковым образом и в один и тот же момент времени, а это не создает никакой разницы в их относительном положении, и, таким образом, если движения их вполне совпадали с самого начала, то продолжают совпадать и далее, если же расходились, то продолжают расходиться, и так до тех пор, пока центр колебания продолжает посылать свой свет. Итак, в этом случае явления будут неизменными и поэтому станут заметными. Это общий принцип, приложимый ко всем явлениям, в которых наблюдаются результаты комбинации световых волн: явления могут быть заметны только тогда, когда остаются неизменными (permanents).

31. До сих пор мы предполагали, что обе системы волн идут по одному и тому же направлению, и что, следовательно, колебательные движения совершаются также, по общему пра-

вилу, или в одну сторону, или в прямо противоположные стороны; это самый простой случай интерференции и единственный, в котором может происходить полное уничтожение одного движения другим, ибо для этого нужно не только, чтобы обе силы были равны и действовали в разные стороны, но нужно еще, чтобы они действовали по одной и той же прямой, т. е., одним словом, были бы прямо противоположны.

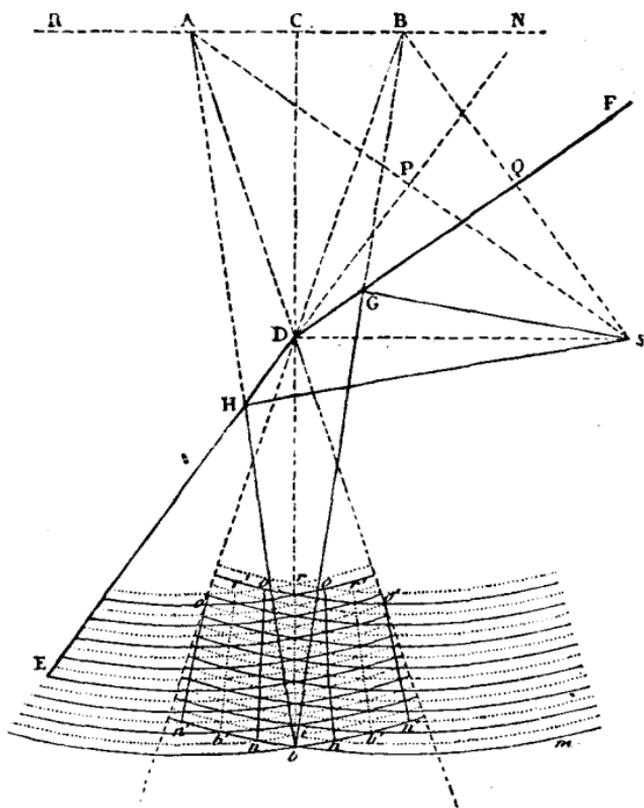
Явление цветных колец и явления окрашивания, которые получаются с поляризованным светом в кристаллических пластинках, представляют частный случай интерференции, когда волны обеих систем параллельны между собой. Но в явлениях дифракции или в опыте с двумя зеркалами, о котором мы раньше говорили, интерферирующие лучи всегда образуют между собой, хотя и малые, но все же заметные углы. В этом случае импульсы, сообщаемые двумя системами волн одним и тем же точкам эфира, пересекаются также под заметными углами, но вследствие малости их равнодействующая двух импульсов будет почти равняться их сумме, когда они направлены в одну сторону, и их разнице, когда в разные стороны. Таким образом, в точках согласованного действия или в точках противоположного действия интенсивность света будет такая же, как если бы оба пучка света следовали по одному направлению; во всяком случае, даже самый привычный глаз не заметит здесь никакой разницы. Но если по отношению к интенсивностям рассматриваемый случай интерференции похож на тот, который мы рассматривали раньше, то в других отношениях он от него сильно отличается, в особенности своим внешним видом и условиями, необходимыми для его получения.

32. Для большей определенности рассмотрим случай, когда расходящиеся лучи, испускаемые одной и той же светящейся точкой, отражаются от двух слегка наклоненных друг к другу зеркал таким образом, что получаются два пучка лучей, сходящихся под заметным углом; тогда обе системы световых волн, отраженных от этих зеркал, пересекаются под тем же углом, и это легкое наклонение имеет следствием, что если в какой-нибудь точке одна полуволна первой системы точно совпадает с полуволной второй системы, толкающей жидкость

в том же направлении, то налево и направо от этой точки пересечения совпадения не будет, но немного дальше оно произойдет опять — с одной стороны с полуволной предшествующего противоположного движения, а с другой стороны — с полуволной последующего; потом совпадения опять не будет, но затем на двойном расстоянии от первого совпадения полуволна первой системы опять совпадет с двумя полуволнами, импульсы которых действуют в ту же сторону, как и ее собственный; отсюда следует, что на поверхности этой волны появится ряд равноотстоящих линий, в которых движение по очереди усиливается волнами другого пучка. Таким образом, если заставить падать эту световую волну на белый картон, то на нем должен быть виден ряд темных и блестящих полос, если свет приблизительно однороден, или же ряд окрашенных в разные цвета полос, если пользуются белым светом.

Только что нами сказанное станет более понятным с помощью черт. 1 (стр. 59); чертеж представляет сечение двух зеркал и отраженных волн, сделанное плоскостью, проведенной через светящуюся точку перпендикулярно к зеркалам, которые проектируются по  $ED$  и  $DF$ . Пусть светящаяся точка будет в  $S$  и пусть  $A$  и  $B$  представляют геометрические положения ее двух изображений, которые определяют, опустив из точки  $S$  на два зеркала  $ED$  и  $DF$  перпендикуляры  $SA$  и  $SB$  и взяв  $PA$  равным  $SP$  и  $QB$  равным  $SQ$ ; в самом деле, к определенным таким способам точкам  $A$  и  $B$  будут, по известным законам отражения, сходиться лучи, отраженные от первого и второго зеркал. Таким образом, чтобы получить, например, в какой-нибудь точке  $G$  зеркала  $DF$  направление отраженного луча, достаточно провести прямую через  $B$  и  $G$ , и продолжение этой прямой будет отраженным лучом. Но следует заметить, что по построению, которое нам дало точку  $B$ , расстояния  $BG$  и  $SG$  одинаковы и что, таким образом, весь путь, пройденный световым лучом от точки  $S$  до точки  $b$ , совершенно такой же, как если бы он исходил от точки  $B$ . Это геометрическое следствие приложимо ко всем лучам, отраженным от одного и того же зеркала, и мы видим, что все они должны приходить в одно и то же время к различным точкам окружности  $n'bm$ , описанной из  $B$ , как центра, радиусом, равным  $Bb$ . Эта окружность

представляет собой, значит, поверхность отраженной волны,\* пришедшей в  $b$ , или, говоря точнее, пересечение этой поверхности с плоскостью чертежа. Подобным же образом волны, отраженные от зеркала, будут иметь свой центр в  $A$ .



Черт. 1.

Чтобы изобразить обе системы волн, отраженных из точек  $A$  и  $B$ , как из центров, опишем ряд равноотстоящих друг от друга дуг, промежутки между которыми предполагаются равными одной полуволне. Для того, чтобы можно было разли-

\* Я называю волновой поверхностью поверхность, все точки которой в один и тот же момент времени оказываются возмущенными одинаковым образом. Если рассматривать ее, например, в начале, в середине или в конце волны, то это будет поверхность, в которой колебательное движение равно нулю; если взять ее в середине первой или второй половины волны, то это будет поверхность, на всем протяжении которой абсолютные скорости эфирных молекул достигают своего максимума.

чить противоположные движения, дуги окружностей изображены сплошными штрихами, если предполагается, что в рассматриваемый момент эфирные молекулы обладают в них наибольшей скоростью вперед, и пунктированной линией, если предполагается, что эфирные молекулы обладают в них наибольшей скоростью назад. Отсюда следует, что пересечения пунктированных дуг окружностей со сплошными представляют собой точки полной противоположности движения и, следовательно, середины темных полос; напротив, пересечения одинаковых дуг дают точки полной согласованности движения, т. е. середины блестящих полос. Пунктирными линиями  $br$ ,  $br'$ ,  $b'r$  и т. д. соединены соответствующие пересечения дуг одного и того же рода и сплошными линиями  $no$ ,  $no$ ,  $n'o'$ ,  $n'o'$ , и т. д. пересечения дуг различных родов; первые из них дают последовательные положения, или траектории середин темных полос, а вторые — середин блестящих полос.

В этом чертеже мы были вынуждены увеличить в огромное число раз действительную длину световых волн и преувеличить взаимный наклон обоих зеркал. Таким образом, в нем не нужно искать точного изображения действительности, но только способ изобразить игру интерференции в волнах, пересекающихся под заметным углом.

С помощью очень простых геометрических рассуждений легко видеть, что ширина полос обратно пропорциональна величине угла, который образуют между собой оба интерферирующих пучка, и что промежуток, заключенный между серединами двух последовательных темных или блестящих полос, равен длине волны, разделенной на синус угла, под которым пересекаются лучи. В самом деле, треугольник  $bni$ , образованный прямой линией  $bi$  и двумя дугами круга  $ni$  и  $nb$ , можно рассматривать, вследствие малости этих дуг, как прямолинейный и равнобедренный, синус же угла  $bni$ , в виду его малости, будет приблизительно равен  $\frac{ib}{bn}$ ; значит,  $bn$  равно  $ib$ , разделенному на этот синус. Но стороны угла  $bni$  перпендикулярны к сторонам угла  $AbB$ , так как  $bn$  перпендикулярно к  $Ab$  и  $ni$  к  $Bb$ ; значит, эти углы равны между собой, и один из них можно подставить вместо другого; таким образом, изобразив

через  $i$  угол  $AbB$ , под которым пересекаются отраженные лучи, имеем:

$$bn = \frac{ib}{\sin i},$$

значит,  $nn$ , которое в два раза больше, чем  $bn$ , будет равно  $\frac{2ib}{\sin i}$ . Но  $nn$  представляет собой расстояние между серединами двух последовательных темных полос и является, следовательно, тем, что мы назвали шириною полосы; так как по построению чертежа  $ib$  есть длина полуволны, то  $2ib$  будет длиною целой волны; значит, ширина полосы действительно равна длине волны, разделенной на синус угла, который образуют между собой отраженные лучи и который в то же время будет углом, под которым виден промежуток  $AB$  между двумя изображениями светящейся точки, если поместить глаз в  $b$ . Можно найти другую формулу, равносильную этой, если заметить, что два треугольника  $bni$  и  $AbB$  подобны, что дает пропорцию:

$$bn : bi = Ab : AB,$$

откуда следует

$$bn = \frac{bi \times Ab}{AB},$$

или

$$2bn = \frac{2bi \times Ab}{AB},$$

т. е. длина полосы равна длине волны, умноженной на расстояние изображений  $A$  и  $B$  от плоскости, в которой измеряют полосы, и разделенной на промежуток между этими двумя изображениями.

Достаточно посмотреть на чертеж, чтобы видеть, почему необходимо, чтобы оба зеркала были почти в одной и той же плоскости, когда желают получить полосы сколько-нибудь заметной толщины; именно в маленьком треугольнике  $bni$  сторона  $bi$ , представляющая длину одной полуволны, составляет, например, для желтых лучей всего четверть одной тысячной миллиметра, и  $bn$ , измеряющая полуширину полосы, может

стать заметной только в том случае, если  $bn$  очень мало наклонено к  $in$ , так как тогда их точка пересечения удаляется от  $ib$ ; но наклон между  $bn$  и  $in$  как раз такой же, как между продолжением  $DP$  зеркала  $DE$  и зеркала  $DF$ , если при этом  $D_b = D_s$ .

Если бы  $A$  и  $B$ , вместо того, чтобы быть изображениями светящейся точки, представляли собой проекции двух очень тонких щелей, сделанных в экране  $RN$ , через которые проходили бы лучи, посылаемые освещающей точкой, помещенной за экраном на продолжении средней линии  $bDC$ , то два пройденных пути от этой точки до щелей  $A$  и  $B$  были бы равны между собой, и было бы достаточно, чтобы получить разность хода путей, пройденных лучами, считать их, начиная от  $A$  и  $B$ ; и мы видим, что вычисления, которые мы только что сделали для ширины полос, производимых двумя зеркалами, можно было бы приложить и для этого случая, если только каждая щель достаточно узка для того, чтобы ее можно было рассматривать как один единственный центр волны по отношению к проходящим через нее под различными углам лучам. Таким образом, можно утверждать, что ширина полос, производимых двумя очень тонкими щелями, равняется длине волны, умноженной на промежуток между ними и разделенной на расстояние между экраном и нитью микрометра, которыми пользуются для измерения полос.

Эта формула приложима также к темным и блестящим полосам, которые наблюдают в тени узкого тела, если только эти полосы достаточно далеки от края тени (и если подставить при этом, вместо промежутка, отделяющего обе щели, ширину тела); но если они очень близки к краю, то теория показывает, и опыт доказывает, что эта формула более не соответствует явлению с достаточной степенью точности; вообще она не будет вполне точной ни для полос, на которые подразделяются узкие тени, ни для тех полос, которые образуются двумя щелями, но исключительно только для полос, получаемых с двумя зеркалами, представляющих собой наиболее простой случай интерференции слегка наклоненных друг к другу лучей. Чтобы точным образом вывести из теории положение темных и блестящих полос в двух остальных случаях, надо вычислить

не только действие двух систем волн, но также и бесконечного числа других подобных групп, согласно принципу, который мы вскоре объясним при изложении общей теории диффракции.

33. Для того, чтобы закончить объяснение условий, необходимых для получения полос, мне остается показать, почему в опытах с диффракцией мы вынуждены пользоваться одной светящейся точкой, а не светящим телом больших размеров. Вернемся к случаю внутренних полос в тени узкого тела; аналогичные рассуждения легко можно будет применить затем ко всем другим явлениям диффракции.

Середина центральной полосы, которая всегда образована совместным приходом лучей, вышедших в одно и то же время из светящейся точки, должна находиться на плоскости, проведенной через эту точку и через среднюю линию узкого тела, так как с той и с другой стороны этой плоскости все будет симметрично, и лучи, в ней соединяющиеся, проходят с каждой стороны одинаковые пути и должны, следовательно, прибывать в одно и то же время, если только им не пришлось пройти через различные среды, чего мы здесь не предполагаем. Если положение центральной полосы определено, то положение других определено также, но можно видеть, что если бы светящаяся точка немного меняла свое место, например, смещалась бы направо, то плоскость, о которой мы только что говорили, наклонилась бы налево и увлекла бы за собою все полосы, сопровождающие центральную полосу. Вместо того, чтобы предполагать смещение освещающей точки, предположим, что она имеет весьма заметные размеры; в этом случае различные светящиеся точки, из которых она теперь будет составлена, произведут каждая группу полос, и положение этих групп будет тем более отличаться друг от друга, чем больше будут отдалены друг от друга светящиеся точки; если же они удалены достаточно, т. е. если светящая точка достаточно широка, то произойдет то, что полосы различных групп, накладываясь друг на друга, взаимно сгладятся. Вот почему в опытах с интерференцией, в которых лучи пересекаются под заметными углами, как во всех опытах с диффракцией, необходимо пользоваться очень тонкой светящейся точкой для того, чтобы заметить результаты взаимодействия лучей; и эта точка

должна быть тем уже, чем больше угол, под которым лучи пересекаются.

Как бы ни была мала светящаяся точка, в действительности она всегда состоит из бесконечного числа волновых центров, и то, что было сказано до сих пор об освещающей точке, нужно относить к каждому из этих центров. Но до тех пор, пока они находятся по отношению к ширине полос на очень малом расстоянии друг от друга, ясно, что различные производимые ими группы полос, вместо того, чтобы беспорядочно смешиваться, будут почти с точностью накладываться друг на друга и, далеко не сглаживаясь, будут взаимно усиливаться.

Если обе системы интерферирующих волн параллельны, то промежуток, который отделяет их соответствующие точки, должен оставаться одним и тем же на значительной части волновой поверхности, т. е., другими словами, полосы сделаются почти неопределенной ширины,\* и, следовательно, весьма значительное смещение волнового центра не принесет собой заметного изменения в степени согласованности или расхождения их колебаний. Вот почему в этом случае нет надобности пользоваться столь малым освещающим предметом для того, чтобы заметить результаты их взаимодействия.

34. Теперь должно стать понятным, почему светлые лучи, хотя и оказывают всегда друг на друга некоторое действие, обнаруживают это влияние все же так редко и в таких исключительных случаях; для того, чтобы сделать взаимодействие заметным, необходимо: во - первых, чтобы интерферирующие лучи исходили из одного общего источника; во - вторых, чтобы они не отличались в своем ходе более, чем на некоторое весьма ограниченное число волн, даже в том случае, когда пользуются самым упрощенным светом; в-третьих, чтобы они не пересекались под слишком большим углом, так как иначе

\* Если цветные кольца, получающиеся при интерференции двух почти параллельных систем волн, показывают, как и полосы, и часто даже на весьма узком протяжении, попеременно темные и светлые полосы, то это зависит исключительно от того, что воздушный слой, находящийся между двумя соприкасающимися стеклами, не имеет повсюду одной и той же толщины, а это меняет разность хода лучей, отраженных от первой и второй поверхности воздушного слоя и дающих взаимной интерференцией темные и блестящие кольца.

полосы сделаются столь узкими, что их не обнаружить самой сильной лупой; в-четвертых, чтобы в том случае, когда эти лучи не параллельны и образуют между собой заметный угол, освещающий предмет имел бы очень маленькие размеры, и чтобы он был тем тоньше, чем больше этот угол.

Я счел необходимым изложить теорию интерференции с некоторыми деталями, так как она находит многочисленные применения при вычислении самых интересных законов оптики. Может быть с первого взгляда покажется, что рассуждения, на которых эта теория покоится, — несмотря на то, что они изложены мною весьма пространно, — несколько утонченного свойства и трудны для понимания; но если подумать немного, то станет ясно, что, в сущности, нет ничего проще, и легко будет освоиться с ее приложениями.

35. Для того, чтобы окончательно установить основы, на которых покоится общая теория диффракции, мне остается только рассказать о принципе Гюйгенса, который, как мне кажется, строго выводится из волновой теории.

Этот принцип можно формулировать таким образом: колебания световой волны в каждой ее точке могут рассматриваться как результат сложения элементарных движений, которые посылают в эту точку в один и тот же момент времени, действуя изолированно, все отдельные части этой волны, взятой в каком-нибудь из ее предшествующих положений. \*

Колебания, которые производятся в какой-нибудь точке упругой жидкости многими возмущениями сразу, равны статической равнодействующей всех скоростей, которые в один и тот же момент получают из различных центров колебаний, каково бы ни было их число, их относительное положение, природа и разница в моментах возмущения; — это обстоятельство является следствием принципа независимости маленьких движений, который, будучи общим, приложим ко всем отдельным случаям. Я предположу, что все эти возмущения, число которых бесконечно, одного и того же рода, происходят

\* См. примечание 9-е.

одновременно, между собой смежны и расположены на одной и той же сферической плоскости или на одной и той же сферической поверхности. Я сделаю еще одно предположение о природе этих возмущений, — а именно, что сообщенные молекулам скорости направлены все в одну и ту же сторону, перпендикулярно к сферической поверхности, и что они, кроме того, пропорциональны уплотнениям и находятся в таком соотношении, что молекулы не могут двигаться назад. Таким образом, мною будет восстановлена вторичная волна, которая получается из совокупности всех этих частичных возмущений. Значит, правильно будет сказать, что колебания световой волны в каждой из ее точек могут рассматриваться как результат сложения всех элементарных движений, которые в один и тот же момент в эту точку посылаются от всех отдельных и самостоятельно действующих частей этой волны, рассматриваемой в каком-нибудь из ее прежних положений.

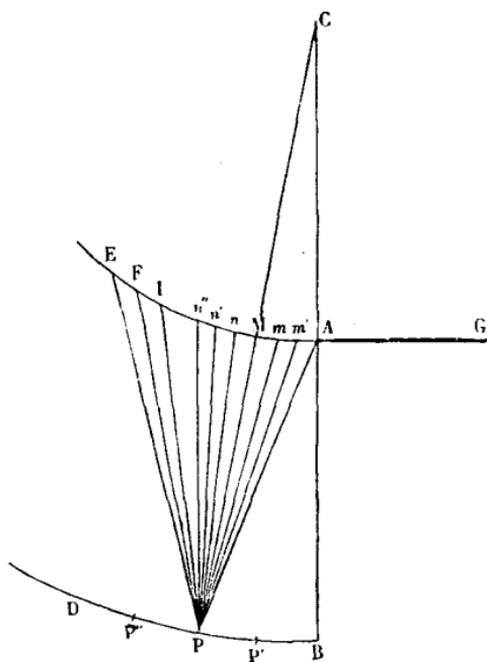
Из этого теоретического рассуждения, так же как и из всех других, следует, что если интенсивность начальной волны равномерна, то эта равномерность сохранится во время движения, если только ни одна часть волны не пресекается или не задерживается по отношению к смежным частям, так как равнодействующая элементарных движений, о которой я только что говорил, будет для всех точек одной и той же. Но если одна из частей волны задерживается непрозрачным поставленным на ее пути телом, то интенсивность в каждой точке будет меняться с расстоянием от края тени, и эти изменения будут особенно заметны вблизи от касательных к телу лучей.

Пусть  $C$  светящаяся точка (черт. 2),  $AG$  экран,  $AME$  волна, пришедшая в  $A$  и частью задержанная непрозрачным телом. Я предположу, что она разделена на бесконечное число маленьких дуг  $Am'$ ,  $m't$ ,  $tM$ ,  $Mn$ ,  $nn'$ ,  $n'n''$ ... и т. д. Чтобы получить интенсивность волны в точке  $P$  в одном каком-нибудь из ее последующих положений  $BPD$ , нужно найти равнодействующую всех элементарных волн, которые в нее посылают каждая из этих действующих отдельно друг от друга частей первоначальной волны.

Так как импульсы, сообщенные всем частям начальной волны, направлены по нормали, то движения, которые они

стремятся сообщить эфиру, должны быть в этом направлении более интенсивны, чем в каком-нибудь другом, и лучи, ими испускаемые, если они действуют изолированно, должны быть тем слабее, чем более они от этого направления отклоняются.

36. Несомненно, что найти закон, по которому интенсивности их меняются вокруг каждого центра возмущения, пред-



Черт. 2.

ставляет большие трудности; но, к счастью, нам не нужно знать этого закона, так как легко видеть, что действия, производимые этими лучами, уничтожаются почти полностью, как только они отклоняются заметным образом от нормали, так что те лучи, которые заметным образом влияют на количество света, получаемого каждой точкой P, могут рассматриваться как равной интенсивности.\*

\* Если центр возмущения подвергся уплотнению, то расширяющая сила стремится толкать молекулы по всем направлениям, и если последние не имеют движения назад, то это зависит исключительно от того, что их начальные скорости, направленные вперед, уничтожают скорости назад, которые

В самом деле, рассмотрим заметно наклоненные лучи  $EP$ ,  $FP$ ,  $IP$ , сходящиеся в точке  $P$ , расстояние которой от волны  $EA$  я предполагаю равным большому числу волн. Возьмем две дуги  $EF$  и  $FI$  такой длины, чтобы разности  $EP - FP$  и  $FP - IP$  были равны полуволне. Вследствие значительного наклона лучей и малости одной полуволны по отношению к длине лучей, эти две дуги будут почти равны между собой, и лучи, которые ими посылаются в точку  $P$ , будут приблизительно параллельны; таким образом, вследствие разности в одну полуволну, которая существует между соответствующими лучами обеих дуг, действие их взаимно уничтожится.

Таким образом, можно предположить, что все лучи, посылаемые различными частями начальной волны  $AE$  к точке  $P$ , будут одинаковой интенсивности, так как единственные лучи, для которых это предположение неправильно, не оказывают заметного влияния на количество света, получаемого точкой  $P$ . По той же причине можно также — для упрощения вычисления равнодействующей всех этих элементарных волн — рассматривать их колебательное движение, как происходящее, вследствие незначительности углов между лучами, по одному и тому же направлению; таким образом, задача сводится к следующей, решение которой я дал в Мемуаре о диффракции, уже указанном: найти равнодействующую кокого угодно числа систем световых волн, параллельных, одинаковой длины и для которых стремится сообщить им расширение; но отсюда не следует, что возмущение может распространяться только по направлению начальных скоростей, ибо расширяющая сила, действуя, например, в направлении перпендикулярном, складывается с начальным импульсом так, что ее действия не становятся при этом более слабыми. Очевидно, что интенсивность таким образом произведенной волны должна сильно меняться в различных точках ее окружности не только вследствие начального импульса, но также и потому, что уплотнения не подчинены одному и тому же закону вокруг центра возмущенной части. Но изменения в интенсивности вторичной волны необходимо должны следовать закону неразрывности и должны поэтому считаться незаметными для очень маленьких угловых промежутков, в особенности вблизи нормали начальной волны; в самом деле, начальные скорости молекул, отнесенные к какому-нибудь направлению, пропорциональны косинусу угла между этим направлением и нормалью, поэтому компоненты эти меняются в отношении, значительно меньшем, чем угловой промежуток, если он не велик.

интенсивности и относительные положения известны. Интенсивности пропорциональны здесь длине посылающих свет малых дуг, а относительные положения даются разностями пройденных путей.

Строго говоря, мы рассматривали только одно сечение волны, сделанное плоскостью, перпендикулярною к краю экрана, который проектируется в  $A$ . Рассмотрим теперь ее во всем протяжении и представим ее себе разделенной равноотстоящими меридианами, перпендикулярными к плоскости чертежа, на бесконечно тонкие секторы; к ним можно будет применить рассуждение, только что нами сделанное для одного сечения волны, и, таким образом, показать, что заметно наклоненные лучи взаимно уничтожаются.

В интересующем нас случае, когда волна отсекается экраном только с одной стороны, секторы эти, параллельные краю экрана, будут бесконечно протяженными, и интенсивность равнодействующей всех колебаний, посылаемых ими к точке  $P$ , будет одной и той же для каждой из них; в самом деле, нужно считать, что лучи, которые эти секторы испускают, имеют одинаковую интенсивность, по крайней мере для той небольшой части начальной волны, которая оказывает заметное влияние на свет, посылаемый в точку  $P$ . Кроме того, очевидно, что каждая отдельная равнодействующая будет отставать на одно и то же количество от луча, исходящего из той точки сектора, которая наиболее близка к точке  $P$ , т. е. точке, в которой сектор пересекает плоскость чертежа. Таким образом расстояния между этими отдельными равнодействующими будут равны разностям пути, который проходят лучи  $AP$ ,  $m'P$ ,  $mP$  и т. д., лежащие в плоскости чертежа; интенсивности же их будут пропорциональны дугам  $Am'$ ,  $m't$ ,  $mM$  и т. д. Для того, чтобы получить интенсивность их общей равнодействующей нужно будет, значит, произвести то же самое вычисление, которое мы уже раз делали, рассматривая одно только сечение волны плоскостью, перпендикулярной к краю экрана. \*

\* Если края экрана прямолинейны, то для определения блестящих и темных полос к их относительной интенсивности достаточно рассматривать сечение волны, сделанное плоскостью, перпендикулярной к краю экрана; но если край экрана кривой или состоит из прямых, образующих между собой

37. Теперь мы с ясностью можем представить себе, каким образом следует вычислять положение и интенсивность темных и светлых полос в различных случаях, когда желательно сравнить теорию и опыт. Если в одну свою сторону экран простирается на неопределенно большое расстояние или, по крайней мере, настолько широк, что можно пренебречь лучами, идущими с этой стороны, то в каждой точке  $P$  (черт. 2), расположенной на расстоянии, при котором полосы наблюдаются, ищется равнодействующая всех отдельных элементарных волн, приходящих от одной только части  $AMF$  падающей волны; сравнивая затем интенсивности, полученные для различных точек  $P, P', P''$  и т. д., определяют положение точек наиболее темных и наиболее освещенных. В интересующем нас случае, т. е. для экрана, неопределенно далеко простирающегося в одну сторону, таким образом находят: 1) что, начиная от касательной плоскости  $CAB$ , интенсивность света быстро уменьшается по направлению внутрь тени и тем быстрее, чем меньше длина волны; уменьшение идет непрерывно, не показывая ни максимумов, ни минимумов, образующих темные и блестящие полосы; 2) что вне тени интенсивность света, увеличившаяся сначала до некоторой точки, которую можно назвать максимумом первого порядка, уменьшается затем до некоторой второй точки, которую можно назвать минимумом первого порядка, после которого увеличивается опять до второго максимума, за которым следует минимум второго порядка, и так далее; 3) что ни один минимум не равен нулю, как это бывает для полос, получаемых схождением двух пучков одинаковой интенсивности, и что разница между максимумами и минимумами уменьшается по мере того, как они удаляются от тени, что объясняет, почему в однородном свете полосы, окаймляющие тени, менее резко выражены и менее многочисленны, чем полосы, получаемые с помощью соединенных зеркал, и почему в белом

какие-нибудь углы, то становится необходимым интегрировать по двум, находящимся под прямым углом, направлениям, или же по кругу вокруг рассматриваемой точки. Этот последний способ в некоторых частных случаях проще, как, например, в том случае, когда нужно вычислить интенсивность света в проекции центра экрана или круглого отверстия.

свете они дают менее яркие цвета; 4) что промежутки между этими максимумами и минимумами не равны между собой, но уменьшаются по мере того, как удаляются от тени, и в отношениях, которые зависят оттого, на каком расстоянии от экрана полосы измеряются; 5) что одни и те же максимумы и минимумы, вычисленные для различных расстояний от экрана, расположены на заметным образом искривленных гиперболох, фокусы которых будут край экрана и светящаяся точка. Все эти теоретические выводы подтверждаются опытом.

Если известна длина волны употребляемого света, то общая формула дает положение максимумов и минимумов для каких угодно расстояний светящейся точки от экрана и экрана от микрометра. Чтобы окончательно проверить теорию, я поступал таким образом. Вместо того, чтобы измерять длину волны с помощью нескольких измерений внешних полос, я выводил ее из одного опыта с диффракцией, носящей совершенно другой характер; после этого я проверял полученные результаты на полосах, получаемых с двумя зеркалами, причем ширина полос оказывалась правильной с точностью до одной сотой, и затем подставлял их в формулу, которую сравнивал с 125 измерениями внешних полос; измерения эти производились при весьма различных обстоятельствах; так, расстояние светящейся точки от экрана менялось от 1 дм до 6 м, а расстояние между экраном и микрометром от 2 мм до 4 м. Во всех этих случаях результаты вычислений весьма хорошо согласовались с наблюдениями, что можно видеть из сравнительной таблицы в уже приведенном Мемуаре на стр. 339 и 343 тома XI „Анналов химии и физики“.

38. Если экран с одной своей стороны не будет бесконечно большим, но будет достаточно узким для того, чтобы свет, отклоненный к середине его тени не был слишком ослаблен быстрым уменьшением интенсивности, которое производится отклонением лучей, то в вычислениях нужно принимать в расчет лучи, приходящие с двух его сторон, и в каждой точке тени нужно искать общую равнодействующую всех элементарных волн, направляемых в нее из различных точек обеих частей начальной волны, из которых одна расположена направо от экрана, а другая налево. Таким способом можно найти, что

внутренняя часть тени должна быть разделена на ряд темных и блестящих полос, ширина которых приблизительно постоянна, а положение очень мало отличается от того, которое можно было бы вычислить из уже приведенной нами для тех же полос приближенной формулы, когда они уже отстоят от края тени на ширину нескольких полос. Но если непрозрачное тело достаточно узко и если микрометр настолько удален от него, что наблюдаемые полосы очень близки к внешним полосам, то произведенные по только что изложенному методу вычисления, так же как и опыт, показывают, что приближенная формула уже не верна.

С помощью таких же вычислений и с замечательной верностью получаются те особенные видоизменения, которые происходят с внешними полосами, когда внутренние выходят из тени и начинают как бы смешиваться с внешними.

Я проверил теорию также и в том случае, когда полосы получались с помощью узкого отверстия неопределенно большой длины, причем я искал для различных точек, освещаемых световым пучком, равнодействующую всех элементарных волн, которые испускаются заключенной в ширине отверстия частью начальной волны; и я также нашел удовлетворительное согласие между вычислением и наблюдением, даже и в тех случаях, когда полученные таким образом полосы имели самый странный и самый неправильный вид.

39. Трактую этим способом задачи дифракции, мы при вычислении совершенно не принимали в расчет большую или меньшую толщину края экрана, но исключительно только ту часть волны, которая может посылать элементарные лучи к точкам, в которых мы вычисляем интенсивность; непрозрачное тело служит только для того, чтобы уничтожить одну часть волны. Вот почему результат вычислений оказывается независимым от природы тела, его массы и толщины краев. Все же, если бы поверхность края была очень велика, то уже нельзя было бы считать, что начальная волна в тот момент, когда она покидает край тела, не подверглась никаким заметным изменениям, и при вычислении нужно было бы принять в соображение те маленькие полосы, которые должны были уже возникнуть при прохождении волны через предшествую-

щие части отверстия. Но до тех пор, пока толщина краев мала или кривизна их велика, полученные таким образом маленькие полосы будут настолько узки, что ими можно пренебречь и рассматривать исходящую волну, как имеющую в момент выхода из экрана однородную по всему протяжению волны интенсивность, в особенности, если вычислять интенсивность на сколько-нибудь большом расстоянии от тела. Не следует упускать из виду, что наши формулы диффракции, в соответствии с теми рассуждениями, на которых они покоятся, будут в достаточной мере точными только для расстояния, очень большого по сравнению с длиной одной световой волны, что позволяет пренебрегать лучами, сильно наклоненными, и рассматривать, как равно интенсивные, те из них, которые действительно влияют на результат. Все же не покажется удивительным, что те же самые формулы могут с достаточной точностью давать положения полос и для небольших расстояний от экрана (когда его края не слишком толсты), если подумать о том, что средняя длина световых волн составляет всего одну полутысячную миллиметра, и два или три миллиметра будут по отношению к ним уже весьма большими длинами.

40. Мы только что рассмотрели три главных вида, которые дает диффракция, когда края экрана или проделанного в экране отверстия достаточно вытянуты для того, чтобы их крайние части не оказывали никакого влияния на исследуемую часть полос; в этом случае, для определения положения темных и блестящих полос и их относительной интенсивности, достаточно, чтобы интегрирование, к которому приводят формулы и которое дает общую равнодействующую элементарных волн, было произведено по направлению, перпендикулярному к краю экрана. Но если экран или отверстие имеют по всем направлениям очень небольшие размеры, то становится необходимым интегрировать сразу по двум измерениям. Результаты этих вычислений также вполне согласуются с наблюдениями; я приведу два весьма любопытных примера.

Если экран представляет собою круг, то вычисления приводят к тому замечательному выводу, что центр проектируемой им тени освещен точно так же, как если бы экрана не было вовсе.

Господин Пуассон указал мне на это следствие моих формул, не замеченное мною сначала, хотя оно и сразу выводится из теории с помощью очень простых геометрических рассуждений. Господин Араго проверил его в тени экрана, имевшего два миллиметра в диаметре, точно закругленного на станке и закрепленного на стеклянной пластинке с параллельными сторонами. Результат опыта подтвердил заранее предсказанное теорией явление. Только один центр тени обладает этим свойством, и та же самая сила света будет простирается от этой математической точки на заметное расстояние только в том случае, когда у экрана очень маленький диаметр, и когда его тень наблюдается на очень большом расстоянии; чем шире экран, тем уже будет этот маленький блестящий кружок; если экран имеет всего только один сантиметр в диаметре, то можно видеть всего лишь одну светящуюся точку, даже если находиться на расстоянии одного метра и пользоваться очень сильной лупой. Следует заметить, что если экран слишком велик, то рассуждения, которыми мы пользовались для вывода формул, не будут более строго применимы к лучам, отклоненным к центру тени вследствие их слишком сильного наклона, который уже не позволяет рассматривать идущие с ними элементарные волны, как одинаковой интенсивности с волнами прямых лучей.

Если с помощью тех же формул вычислить интенсивность света в середине проекции небольшого круглого отверстия, сделанного в широком экране, то окажется, что центр этой проекции будет представлять собой попеременно то блестящую то темную точку, в зависимости от расстояния, на котором рассматривается тень, причем для однородного света минимумы должны свестись совсем к нулю. Это новое следствие общих формул может быть выведено из теории с помощью простых геометрических рассуждений. Таким образом, можно найти следующее значение для последовательных расстояний, в которых центр тени становится совершенно темным:

$$b = \frac{ar^2}{2ad - r^2}, \quad b = \frac{ar^2}{4ad - r^2}, \quad b = \frac{ar^2}{8ad - r^2} \text{ и т. д.,}$$

где  $r$  радиус или полудиаметр отверстия,  $a$  и  $b$  его расстояния, соответственно от светящейся точки и от микрометра, и  $d$  длина волны применяемого света; и действительно, если поместить микрометр на расстояниях, указанных этими формулами, то наблюдается, что центр проекции отверстия в такой степени лишен света, что он кажется чернильным пятном в середине освещенной части, по крайней мере для минимумов в трех первых порядках, соответствующих только что приведенным формулам; те же, которые соответствуют последующим порядкам и которые находятся ближе к экрану, не дают более столь же темного пятна вследствие недостатка в однородности применяемого света.

41. Существует еще множество других явлений дифракции; к ним относятся, например, многократные и окрашенные изображения, получаемые при отражении от испещренных бороздками поверхностей, или также изображения, которые бывают видны сквозь очень тонкую ткань; затем к ним относятся цветные кольца, которые получаются, если между глазом наблюдателя и светящейся точкой поместить очень тонкие нити или легкие атомы, собранные неправильной кучей; все они могут быть объяснены и строго вычислены с помощью только что нами изложенной теории. Описывать их здесь и показать, каким образом они являются новым подтверждением теории, было бы здесь слишком долго.

Мы думаем, кроме того, что она в достаточной степени доказана многочисленными и разнообразными явлениями, о которых мы говорили, и мы закончим это извлечение из „Мемуара о дифракции“ детальным описанием одного важного опыта господина Араго, который позволяет вычислить самые небольшие разности в преломляющей способности тел с точностью почти неопределенно большой.

42. Мы видели, что полосы, которые получаются с помощью двух очень узких щелей, оказываются всегда симметрично расположенными по отношению к плоскости, проведенной через светящуюся точку и через середину промежутка между двумя щелями, если только оба интерферирующие пучка света прошли предварительно через одну и ту же среду, например, воздух, как это и происходит при обычном расположении при-

бора. Но дело будет обстоять иначе, если один из пучков пройдет только через воздух, а другой встретит на своем пути более сильно преломляющее тело, как, например, тонкую пластинку слюды или пленку дутого стекла; в этом случае полосы окажутся смещенными в сторону пучка, который прошел через прозрачную пластинку, а если последняя будет иметь хоть сколько-нибудь значительную толщину, то они выйдут даже из освещенного пространства и исчезнут. Этот важный опыт, выполнением которого мы обязаны господину Араго, может быть также произведен с помощью прибора с двумя зеркалами, если поместить тонкую пластинку на пути одного из пучков до или после отражения.

Посмотрим теперь, какие выводы можно сделать из этого замечательного факта с помощью принципа интерференции. Мы уже обратили внимание на то, что середина центральной полосы получается всегда от одновременного прибытия лучей, вышедших в один и тот же момент из светящейся точки; значит, при обычных обстоятельствах, когда они проходят через одну и ту же среду, для того, чтобы они прибыли в одно и то же время к месту встречи, необходимо, чтобы они прошли совершенно равные пути; но легко понять, что если они проходят через среду, в которой свет не распространяется с той же самой скоростью, то тот из двух пучков, который идет медленнее, придет в эту точку позднее, и что, следовательно, эта точка не может быть более серединой центральной полосы. Последняя по необходимости должна приблизиться ближе к пучку, который шел медленнее, чтобы, таким образом, меньшая длина пути компенсировала бы запаздывание, испытываемое лучом в пути; наоборот, если полосы оказываются отклоненными направо или налево, то отсюда следует заключить, что пучок, в сторону которого полосы подвинулись, запаздывает в своем ходе. Таким образом, естественным следствием только что приведенного нами опыта господина Араго будет то, что свет распространяется быстрее в воздухе, чем в слюде или в стекле и вообще в других плотных телах, более сильно преломляющих, чем воздух, — результат, диаметрально противоположный объяснению, данному для преломления Ньютоном, предполагавшим, что световые молекулы сильно притягиваются

плотными телами, так как из этого объяснения вытекало бы, что скорость света в этих телах больше, чем в средах менее плотных.

43. Этот опыт дает возможность сравнить скорость распространения света в разных средах. В самом деле, предположим, что толщина тонкой стеклянной пластинки была очень точно измерена с помощью сферометра, и что смещение полос было измерено с помощью микрометра; так как известно, что до того, как пластинка была вставлена, пройденные пути были равны для середины центральной полосы, то можно вычислением определить, насколько они отличаются по длине друг от друга при новом положении полосы; эта разность будет запаздыванием, которое испытывает свет в стеклянной пластинке, толщина которой известна; прибавив эту толщину к найденной разности, мы получим тот небольшой путь, который другой пучок прошел в воздухе за то же время, как первый прошел стеклянную пластинку; этот путь, сравненный с толщиной стеклянной пластинки, даст отношение скорости света в воздухе к скорости света в стекле.

Эту же задачу можно рассматривать с другой точки зрения, с которой полезно хорошо освоиться. Продолжительность каждой волны, как мы видели, не зависит вовсе от большей или меньшей скорости, с которой возмущение распространяется по жидкости, а зависит только от продолжительности полного колебания, производящего эту волну; так, когда световые волны переходят из одной среды в другую, в которой они распространяются медленнее, то каждое колебание совершается всегда в такой же промежуток времени, как и раньше, и большая плотность второй среды влияет только на изменение длины волны, и в том же самом отношении, в котором она уменьшает скорость света, так как длина волны равняется пространству, пройденному начальным возмущением в продолжение одного полного колебания. Можно, значит, вычислить относительные скорости света в различных средах, сравнивая в этих средах длины волн одного и того же рода лучей. Установив это, заметим, что центр центральной полосы получается соединением тех лучей обоих пучков, которые, начиная от светящейся точки, насчитывают одно и то же число волн, какова бы при этом

ни была природа средин, через которые лучи проходят. Значит, если центральная полоса смещается в сторону пучка, который проходит через стеклянную пластинку, то световые волны короче в стекле, чем в воздухе, и, следовательно, необходимо, чтобы пройденный путь с этой стороны был короче, для того, чтобы число колебаний было бы с той и другой стороны одинаково. Предположим теперь, что центральная полоса переместилась на расстояние, равное, например, ширине двадцати полос, т. е. на расстояние, которое в двадцать раз больше промежутка, заключенного между серединами двух последовательных темных полос; отсюда следует заключить, что, вставив стеклянную пластинку, мы задержали проходящий через эту пластинку пучок на двадцать волн, или, другими словами, что пучок совершил в этой пластинке на двадцать волновых колебаний более, чем другой пучок в слое воздуха такой же толщины, ибо каждой ширине полосы соответствует разница в одну волну. Таким образом, если известна толщина этой пластинки и длина волны употребляемого света (которую по измерении полос легко вывести с помощью данной нами формулы), то можно вычислить число волн, заключенных в слое воздуха такой же толщины; прибавив к этому числу двадцать, мы получим число волн, совершивших свои колебания в толщине стеклянной пластинки; отношение этих двух чисел даст отношение скоростей света в этих двух средах. Но оно оказывается равным отношению синуса угла падения к синусу угла преломления при проходе света из воздуха в стекло; как мы увидим дальше, это согласно с объяснением преломления, даваемым волновой теорией.\*

44. Только что указанный нами способ представляет некоторые трудности, если желают определить *a priori* показатель преломления тела, значительно более плотного, чем воздух, как, например, вода или стекло, так как для того, чтобы полосы не вышли совсем из поля, общего обоим световым пуч-

\* Обратно, с помощью того же самого опыта и с чрезвычайно большой точностью можно определить толщину тонкой пластинки, сделанной из вещества, показатель преломления которого известен; для этого ее надо поместить на пути одного из двух световых пучков перпендикулярно к его направлению и измерить смещение полос.

кам, нужно брать очень тонкую пластинку из этого вещества, но тогда становится трудным измерить с необходимой точностью толщину пластинки. Правда, можно на пути другого пучка поместить другую толстую пластинку, сделанную из прозрачного вещества, показатель преломления которой был определен с большою точностью обычными способами; это позволит тогда пользоваться толстой пластинкой также и для нового вещества, но в таком случае гораздо проще измерить его показатель преломления обычным способом.

Метод, основанный на опыте господина Араго, имеет большое преимущество перед обычным методом в том случае, когда оказывается нужным определить небольшие разности в скорости света в средах, которые преломляют его почти одинаково; в самом деле, увеличивая путь, проходимый светом в обеих средах, показатель преломления которых сравнивается, можно почти беспредельно увеличивать точность получаемых результатов. Чтобы дать представление о высокой степени точности, которой можно достигнуть этими измерениями, достаточно заметить, что длина желтых волн\* в воздухе равна 0,000551 мм и что на протяжении 1,10 м их будет два миллиона; но очень легко заметить равницу в одну пятую полосы, а это соответствует запаздыванию или ускорению на одну пятую волны в ходе света, и так как в 1,20 м имеется два миллиона этих волн, то одна пятая волны составит всего только одну девятимиллионную часть этой длины; можно, значит, вводя какой-нибудь газ или пар в трубку, имеющую подобную длину и закрытую двумя стеклами, определить с точностью до одной десятиллионной изменения в их преломляющих способностях. Как раз с помощью такого аппарата господин Араго и я измерили разность в преломлении сухого воздуха и воздуха, насыщенного парами при 30°. Влажность

\* Я беру длину волны желтых лучей, так как они самые блестящие в спектре и так как по этой причине их темные и блестящие полосы совпадают с наименее освещенными и наиболее блестящими точками полос, которые получаются с белым светом; белым же светом при такого рода опытах пользуются обыкновенно как вследствие его большого блеска, так и вследствие того, что он более резко выделяет центральную полосу, в положении которой существенно не ошибаться.

---

в последнем случае так мала, что ускользнула бы при всяком другом способе наблюдения, ибо бóльшая преломляющая способность водяного пара почти в точности компенсируется меньшей плотностью влажного воздуха. Но во всех других случаях самая легкая примесь какого-нибудь одного пара или газа к другому производит значительное смещение полос, и если бы существовал ряд тщательно произведенных в этом направлении опытов, то прибор этот мог бы стать ценным инструментом химического анализа.

## О ЦВЕТНЫХ КОЛЬЦАХ

45. Цветные кольца, которые показывают два прижатых друг к другу стекла, когда одна из соприкасающихся поверхностей стекла выпукла, объясняются очень просто с помощью принципа интерференции; они происходят очевидно от взаимодействия двух систем волн, отраженных от первой и от второй поверхностей воздушного слоя, заключенного между двумя стеклами. Но, прежде чем войти в детали этого объяснения, необходимо по отношению к отражению света установить один принцип, который нам будет нужен.

Когда возмущение распространяется в среде с однородными упругостью и плотностью, то оно никогда не возвращается обратно, и, передаваясь к новым слоям, оно оставляет предшествующие слои в полном покое; таким образом шарик из слоновой кости, ударившись о другой шарик с равной массой, сообщает ему все свое движение, а сам после удара остается в покое. Но дело обстоит иначе, если второй шарик имеет массу, которая больше или меньше, чем масса первого; в том и другом случае этот последний после удара все еще будет находиться в движении. Если второй шарик обладает большей массой, чем первый, то новая скорость последнего будет направлена в сторону, обратную его первоначальному движению, а если второй шарик имеет меньшую массу, чем первый, то он будет продолжать двигаться в том же направлении; таким образом, после удара новые скорости первого шарика будут в обоих случаях противоположны по знаку. Это позволяет понять, что происходит, когда световая волна достигает поверхности соприкосновения двух упругих средин различной плотности; бесконечно тонкий слой первой среды, который соприкасается со второй средой, можно уподобить первому шарiku;

он не остается в покое после того, как привел в движение смежный с ним слой второй среды, вследствие разницы их масс, и происходит отражение; но новая скорость, которую слой первой среды имеет после удара и которая последовательно передается предшествующим слоям той же самой среды, должна менять свой знак в зависимости от того, будет ли слой второй среды иметь массу большую или меньшую, чем слой первой среды, т. е. в зависимости от того, будет ли плотность первой среды меньше или больше, чем плотность второй. Этот важный принцип, который господин Юнг открыл с помощью только что изложенных рассуждений, следует также из формул, которые господин Пуассон вывел с помощью глубокого и точного анализа. \* Применяемый к отражению света, этот принцип учит нас, что скорость колебания в зависимости от того, будет ли световая волна отражена внутри или вне более плотной среды, окажется соответственно положительной или отрицательной. Таким образом, колебательные движения, соответствующие этим двум случаям, будут противоположны по знаку.

46. Установив это, вернемся к явлению цветных колец, и, чтобы упростить рассуждения, предположим, что наблюдают отраженный свет, падающий перпендикулярно или, по крайней мере, по направлению, которое мало отличается от перпендикулярного; рассмотрим одну из волновых систем, посылаемых освещающим телом на первую поверхность воздушного слоя, т. е. на вторую поверхность верхнего стекла; то, что мы скажем об этой системе волн, можно будет приложить и ко всем другим системам. В тот момент, когда она достигает поверхности, разделяющей стекло и воздух, она испытывает частичное отражение, которое немного уменьшает интенсивность света, прошедшего воздушный слой, и которое производит внутри первого стекла другую систему волн, интенсивность которых, как известно, значительно меньше интенсивности проходящего света; таким образом, последний, весьма мало осла-

\* Мемуар о движении упругой жидкости в цилиндрических трубах и о теории ветряных двигателей (Memoires de l'Academie des Sciences, т. II, стр. 305).

бленный первым отражением, достигнув второй поверхности воздушного слоя, произведет вторую систему отраженных волн, интенсивность которых почти равняется интенсивности волн от первого отражения; вот почему их интерференция дает столь яркие цвета в белом свете и столь резкие блестящие темные кольца в однородном свете. Так как вблизи от точки соприкосновения, где образуются цветные кольца, обе поверхности воздушного слоя приблизительно параллельны друг другу, то обе системы волн пойдут по одному пути; но та из них, которая отражается от второй поверхности, будет запаздывать по отношению к отраженным от первой, и запаздывание будет равно удвоенной толщине воздушного слоя, который система волн пересекла два раза. Следует заметить, что между ними существует, кроме того, и другая разница, а именно: первая отражается в н у т р ь стекла или от среды более плотной, тогда как другая отражается в н е нижнего стекла; отсюда, в соответствии с вышеустановленным принципом, следует противоположность в их колебательных движениях. Таким образом, если, вследствие разности пройденных путей, обе системы волн должны находиться в согласии, т. е. совершать все свои колебательные движения в одном и том же направлении, то мы должны прийти к выводу, что они, наоборот, вполне расходятся; обратно, если разность пройденных путей указывает на полное расхождение, мы заключаем, что их колебательные движения вполне согласуются. Установив это, легко определить положение темных и блестящих полос.

Прежде всего точка соприкосновения, в которой толщина воздушного слоя равняется нулю, не давая никакой разности хода для двух систем волн, должна была бы установить полное согласие между их колебаниями; но так как в силу противоположности знака нужно считать правильным как раз обратное, то их колебания будут вполне расходиться, и точка соприкосновения, рассматриваемая в отраженном свете, даст черное пятно. По мере того, как от нее удаляются, толщина воздушного слоя увеличивается; остановимся в той точке, где ее толщина равняется четверти волны; разность пройденных путей составит тогда одну полуволну, что соответствует полному расхождению; но для обеих систем волн в этом месте будет,

следовательно, полное согласие; это будет, значит, самая светлая точка первого блестящего кольца. Когда толщина воздушного слоя достигнет половины одной волны, разность пройденных путей будет равняться одной волне, что соответствует полному согласию; в этом месте будет полное расхождение, и эта точка будет серединою темного кольца. Вообще, с помощью тех же рассуждений, легко видеть, что самые черные точки темных колец соответствуют толщинам воздушного слоя, равным

$$0, \frac{1}{2}d, \frac{3}{2}d, 2d, \frac{5}{2}d \text{ и т. д.,}$$

и наиболее светлые точки блестящих колец — толщинам

$$\frac{1}{4}d, \frac{3}{4}d, \frac{5}{4}d, \frac{7}{4}d, \frac{9}{4}d, \frac{11}{4}d \text{ и т. д.,}$$

причем  $d$  будет длиной световой волны в воздухе; если же мы возьмем за единицу четверть этой длины, то толщины воздушного слоя, соответствующие максимумам и минимумам отраженного света, будут представлены следующими числами:

темные кольца . . . . . 0, 2, 4, 6, 8, 10 и т. д.

светлые кольца . . . . . 1, 3, 5, 7, 9, 11 и т. д.

Мы видим, что эта единица или четверть световой волны представляет собой как раз длину того, что Ньютон называет приступами световых молекул. Таким образом, умножая на четыре меры, которые он с их помощью дал для семи главных родов простых лучей, мы получаем соответствующие длины их волн. Таким способом мы получаем те же самые результаты, как в том случае, когда выводим длины волн из измерения полос, получаемых с двумя зеркалами, или из различных явлений диффракции. Это численное совпадение, впервые замеченное господином Юнгом, устанавливает между цветными кольцами и диффракцией света внутреннюю связь, которая до этого ускользала от физиков, руководившихся теорией испускания, и к которой могла привести одна только волновая теория.

47. Из опыта господина Араго о смещении полос, получающихся при интерференции двух световых пучков, в тех

случаях, когда одному из них приходится пройти через тонкую пластинку, мы видели, что в этой пластинке световые волны оказывались укороченными в отношении синуса угла преломления к синусу угла падения при проходе света из воздуха в пластинку. Этот принцип оказывается общим и распространяется на все тела, из какого бы вещества они ни были, так что, например, длина световой волны в воздухе относится к длине волны в воде, как синус угла падения лучей, которые наклонно проходят из воздуха в воду, относится к синусу их угла преломления. Следовательно, если ввести воду между двумя соприкасающимися стеклами, которые показывают цветные кольца, то слой воздуха будет заменен слоем воды, в котором световые волны становятся в только что указанном соотношении более короткими; толщины этих двух слоев, отражающих одни и те же кольца, будут находиться между собою в отношении синуса угла падения к синусу угла преломления при проходе света из воздуха в воду. Это как раз тот результат, который Ньютон нашел наблюдением, когда сравнивал диаметры получающихся в обоих случаях колец и вычислял с их помощью соответствующие толщины. Это замечательное соотношение между явлениями диффракции, преломления и цветных колец, которые ничем не объясняются в теории испускания, могло бы быть заранее предсказано волновой теорией, по которой синусы углов падения и преломления непременно должны быть пропорциональны скоростям распространения или длинам световых волн в двух различных средах, как нами и будет вскоре доказано при объяснении законов преломления.

48. Объяснив образование отраженных колец интерференцией лучей, отраженных от первой и второй поверхности воздушного слоя, господин Юнг показал, что значительно более слабые кольца, которые бывают видны в проходящем свете, получаются вследствие интерференции сразу прошедших лучей с теми, которые проходят после двух последовательных отражений в тонком слое и которые, следовательно, должны быть дополнительными к отраженным кольцам, что согласно с опытом. Мы считаем не нужным дать здесь его объяснение, которое подобно предшествующему; мы заметим только, что чрезвычайная бледность колец, прошедших при перпендику-

---

лярном падении, зависит от большой разности в интенсивности двух производящих их систем волн.

49. Мы не будем также рассматривать кольца, отраженные при наклонном падении, мы укажем только, что теория объясняет, почему их диаметр увеличивается с наклоном, и что очень простая формула, к которой приводит теория, с точностью воспроизводит факты, по крайней мере до тех пор, пока наклон падающих лучей не очень велик; если лучи, проникающие в воздушный слой, очень сильно наклонены, то результаты вычислений не согласуются больше с измерениями Ньютона.\* Но вероятно, что эта аномалия зависит от того, что обыкновенные законы преломления, на основании которых формулы вычислены, испытывают некоторые видоизменения при очень наклонном проходе лучей между двумя столь близкими друг к другу поверхностями.

До сих пор мы рассматривали только кольца, получаемые с простым светом; но с помощью рассуждений, аналогичных тем, которые нам пришлось делать для полос в опыте с двумя зеркалами, легко видеть, что должно происходить в белом свете. Кроме того, анализ этого явления с весьма большими деталями можно найти в Оптике Ньютона, который первый показал, что действие, производимое белым светом, всегда является результатом соединения действий различных цветных лучей, из которых белый свет состоит.

\* По поводу измерений Ньютона см. Мемуар господ Ла-Провоста и Дезэна о цветных кольцах (La-Provostaye et Desains, Annales de chimie et de physique), 3-я серия, т. XXVII, стр. 423. См. также примечание 10-е в конце книги.

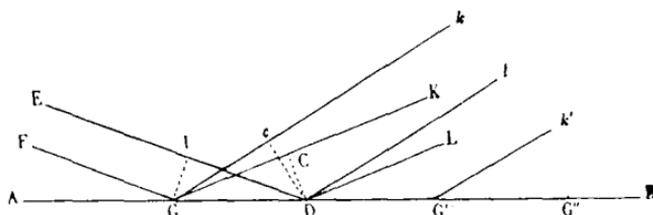
## ОБ ОТРАЖЕНИИ И ПРЕЛОМЛЕНИИ

50. Воспользовавшись сравнением с ударом упругих тел мы показали, каким образом часть колебательного движения отражается от поверхности соприкосновения двух средин различной плотности, в то время как другая часть передается дальше и распространяется во второй среде; \* таким образом мы объяснили разделение на лучи отраженные и на лучи преломленные, которое испытывается светом, когда он достигает поверхности прозрачного тела, но мы еще не обосновали законов, по которым определяются направления этих лучей. Этим вопросом мы сейчас и займемся, причем обоснование это мы сведем к самым простым рассуждениям и пожертвуем для краткости несколько сложными выводами, в объяснение которых следовало бы войти, чтобы дать доказательству всю возможную для него общность и точность.

Пусть  $ED$  и  $FG$  будут два падающих луча (черт. 3), исходящие из одного и того же волнового центра, который я предположу на бесконечно большом расстоянии для того, чтобы эти лучи были параллельны между собой; пусть будет  $AB$  отражающая поверхность; проведем через точку  $G$  прямую линию  $GI$ , перпендикулярную к лучам  $ED$  и  $FG$ ; это будет направлением падающей волны в тот момент, когда она встречает в  $G$  отражающую поверхность. По принципу Гюйгенса, мы можем рассматривать каждую из последовательно возмущенных этой волной точек  $G$  и  $D$ , как представляющую собою центр воз-

\* По этому вопросу можно справиться в прекрасном Мемуаре господина Пуассона об отражении волн на поверхности двух соприкасающихся жидкостей различной плотности; в этом Мемуаре можно найти строгое доказательство этого принципа.

мушения, который, действуя в отдельности, посылает лучи по всевозможным направлениям с различной интенсивностью. Без сомнения, было бы очень трудно установить закон изменения их интенсивности вокруг излучающей точки, но, к счастью, мы в этом не нуждаемся; в самом деле, каков бы этот закон ни был, очевидно, что элементарные лучи, вышедшие из точек  $G$  и  $D$  и идущие по параллельным направлениям, будут находиться в совершенно одинаковых условиях и должны будут иметь одну и ту же интенсивность и одно и то же направление для колебательного движения; но принцип Гюйгенса окажется достаточным для того, чтобы судить о направлении, по которому могут распространяться колебания, происходящие при соединении элементарных лучей.



Черт. 3.

В самом деле, рассмотрим отраженную волну на таком расстоянии от  $AB$ , чтобы оно было бесконечно большим по сравнению с промежутком  $GD$  и с другими промежутками такого же порядка; пусть будут  $GK$  и  $DL$  два элементарных отраженных луча, сходящиеся в одной и той же точке этой волны; они будут параллельны вследствие бесконечно большого расстояния, на котором эта точка находится. Предположим, что угол  $KGB$  равен углу  $EDA$ ; ясно, что колебания, которые придут с лучами  $GK$  и  $DL$  в точку их встречи, будут находиться в полном согласии. В самом деле, если из точки  $D$  опустить перпендикуляр  $DC$  на  $GK$ , то вследствие равенства этих углов оба треугольника  $GCD$  и  $IDG$  будут равны, и, следовательно,  $GC$  будет равно  $ID$ . Но  $ID$  представляет собою излишек пути, который падающий луч  $ED$  должен пройти по сравнению с лучом  $FG$ , чтобы дойти до поверхности; а  $GC$  будет излишек пути, который должен

пройти луч, отраженный в  $G$ , по сравнению с лучом, отраженным в  $D$ , чтобы дойти до их точки встречи; значит, в тот момент, когда оба луча туда придут, они пройдут в общем одну и ту же длину пути и будут, следовательно, колебаться там в согласии.

Но дело будет обстоять иначе, когда направление элементарных лучей  $GK$  и  $DI$ , которые я также предполагаю сходящимися в бесконечно удаленной точке, образует с поверхностью угол, не равный углу  $EDA$ ; в самом деле, в этом случае промежуток  $Gc$ , заключенный между точкой  $G$  и основанием перпендикуляра  $Dc$ , не будет больше равен  $ID$ , и пути, пройденные лучами до достижения ими точки встречи, не будут более равны, и колебания их в этой точке должны будут более или менее расходиться; но мы всегда можем взять точку  $G$  на таком расстоянии от точки  $D$ , чтобы разница между  $Gc$  и  $Id$  составляла бы одну полуволну; в точке встречи это создаст полное расхождение для колебаний, отраженных по  $Gk$  и  $DI$ , а так как они, кроме того, равны по интенсивности, то они взаимно уничтожатся, и, следовательно, свет по этому направлению распространяться не будет.

51. То обстоятельство, что элементарный луч  $DI$  в этом случае нейтрализуется лучом, приходящим из точки  $G$ , оказывается настолько справедливым, что если этот последний луч и лучи, которые к нему достаточно близки, чтобы создать противовес колебаниям луча  $DG$ , уничтожить, то этим самым этому последнему лучу дается, или, лучше сказать, сообщается, возможность быть обнаруженным. Различные элементарные лучи, отраженные в  $D$ , могут тем в большей степени расходиться, чем в большей степени сужена отражающая поверхность с каждой стороны этой точки; в самом деле, элементарный луч  $G'k'$ , исходящий из точки  $G'$ , находящейся на таком же расстоянии от  $D$ , как и точка  $G$ , создаст в точке встречи противовес колебаниям  $DI$  в такой же мере, как и луч  $Gk$ ; самый же общий способ представить себе эти взаимные уничтожения элементарных лучей будет состоять в том, чтобы рассматривать каждый промежуточный луч  $DI$ , как уничтоженный половиной (по отношению к интенсивности) луча  $Gk$  и половиной луча  $G'k'$ , а затем остающиеся половины этих

лучей, как уничтоженные половиной лучей следующих, и так далее. \*

Эти теоретические выводы легко проверить, если в темной комнате направить лучи светящейся точки на металлическое

\* Если поверхность зеркала разделить на ряд частей  $DG'$ ,  $G'G''$  и т. д., равных  $GD$ , то элементарные лучи, отраженные в точках  $G$ ,  $D$ ,  $G'$ ,  $G''$ , направленные все к одной и той же бесконечно удаленной точке встречи и, следовательно, параллельные между собой, будут в их ходе попарно отличаться друг от друга на одну полуволну; так, например, луч  $GK$  окажется в точке встречи на одну полуволну вперед по отношению к лучу  $Dl$ , этот последний на то же самое количество вперед по отношению к лучу  $G'k'$  и так далее; по той же самой причине луч, исходящий из середины  $GD$ , будет находиться в полном расхождении с лучом, исходящим из середины  $DG'$ , и подобное расхождение будет иметь место для всех лучей, отраженных во всех соответствующих точках промежутков  $GD$  и  $DG'$ ; точно так же все лучи, отраженные в различных точках  $DG'$ , будут в полном расхождении с лучами, отраженными в соответствующих точках  $G'G''$ , и т. д. Но интервалы  $GD$ ,  $DG'$ ,  $G'G''$  и т. д. равны между собой, и, значит, количество отраженных ими лучей одно и то же; таким образом, каждый пучок элементарных лучей, отраженный в этом направлении в каком-нибудь промежутке  $DG'$ , можно рассматривать как уничтоженный половиной (по отношению к интенсивности) лучей предшествующего пучка и половиной последующего. Если поверхность ограничена и заключает в себе четное число подобных промежутков, то две остающиеся половины крайних пучков будут в точке встречи находиться в полном расхождении и взаимно уничтожат друг друга, и в этом направлении отраженного света вовсе не будет; но если число интервалов будет нечетным, то по этому направлению отраженный свет будет наименее слабым, так как остающиеся половины крайних пучков будут находиться в полном согласии. Следует все же заметить, что в этом случае свет, отклоненный по направлению  $Gk$ , будет значительно слабее света, отраженного по направлению  $GK$ , так как все исходящие от поверхности лучи, которые соединяются в первой точке встречи, проходят одинаковые пути и складываются. Все эти выводы теории подтверждаются опытом. Чтобы дать представление о чрезвычайной быстроте, с которой свет должен уменьшаться по мере того, как направление  $Gk$  удаляется от направления правильного отражения, я прибавлю, что если на поверхности зеркала окажется всего только пять интервалов, подобных  $GD$  и дающих для их крайних лучей разности хода в одну полуволну, то интенсивность света, отклоненного по  $Gk$ , составит по теории всего только около  $\frac{1}{30}$  интенсивности света, правильно отраженного; и если зеркало хоть сколько-нибудь широко, то легко понять, как мало направление  $Gk$  должно отличаться от направления  $GK$  для того, чтобы в нем было всего только пять промежутков, подобных  $GD$ , т. е. для того, чтобы существовало всего только пять полуволн у разности хода между лучами, исходящими из двух крайних частей зеркала.

зеркало или на зачерненное с задней стороны стекло, верхняя поверхность которых покрыта черной, очень матовой краской, за исключением небольшого промежутка, несколько длинного и очень узкого; последний ограничен двумя прямыми линиями, образующими между собой очень узкий угол, и, таким образом, ширина отражающей поверхности становится постепенно все меньше и меньше вплоть до точки встречи ее краев. Если отойти на достаточное расстояние от зеркала и если принять отраженные лучи на белый картон или же непосредственно наблюдать с лупою, то можно будет заметить, что отраженный пучок в части, близкой к вершине угла, значительно шире, чем тот, который приходит с противоположной части, и что, следовательно, расхождение отражающих лучей тем больше, чем уже отражающая поверхность.

52. Этот способ рассматривать отражение не только объясняет, почему лучи в их ходе не подчиняются обыкновенному закону равенства углов падения и отражения, когда поверхность узкая и не сплошная, но он дает также средство вычислить относительные интенсивности лучей в их новых направлениях. Он имеет также то преимущество, что дает ясное и точное понятие о том, что представляет собою блестящая полировка. Как уже заметил Ньютон, поверхность даже самым лучшим образом отполированного зеркала не следует рассматривать как вполне однородную и образующую математическую плоскость; напротив того, уже из одного способа полировки зеркала очевидно, что его поверхность должна быть испещрена бесконечным числом маленьких неровностей; в самом деле, мелкий порошок, служащий для этой цели, может только испещрить ее поверхность по всевозможным направлениям, и только чрезвычайная малость царапин делает их невидимыми. Но насколько должны они быть малы для того, чтобы свет отражался правильно? Это можно легко вывести из объяснения, которое мы только что дали для обыкновенного закона отражения. В самом деле, если точки  $G$  и  $G'$ , на чертеже 3, вместо того, чтобы точно приходиться в математической плоскости  $ABD$ , расположены немного выше или немного ниже этой плоскости, то в ходе лучей  $Gk$  и  $G'k'$  должна будет возникнуть небольшая разность, которая умень-

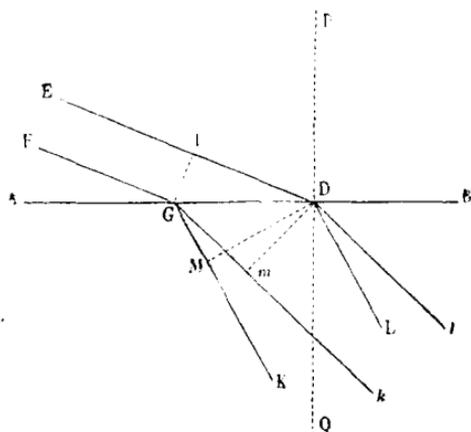
шит то полное расхождение, в котором они находились по отношению к лучу  $DI$ ; например, в частном случае перпендикулярного падения эта разность будет удвоенным расстоянием точек  $G$  и  $G'$  от плоскости  $ADB$ ; если, значит, эти расстояния составляли одну сотую длины световой волны, то разность хода, ими вызванная, составит одну пятидесятую волны; но столь малое изменение в полном расхождении элементарных лучей не даст заметного количества света по направлению  $DI$ , как это легко можно вычислить с помощью интерференционных формул. Таким образом, достаточно, чтобы величина неровностей вверх или в глубину была очень мала по сравнению с длиной одной световой волны, для того, чтобы поверхность зеркала отражала заметное количество света только по направлению угла, равного углу падения; и если, например, самые большие неровности не превышают одной сотой волны (что составляет для желтых лучей пять или шесть миллионных миллиметра), то зеркало должно обладать очень хорошей полировкой.

53. Мы встречаемся здесь с одним следствием, заслуживающим внимания. В виду того, что для различных родов цветных лучей, составляющих белый свет, длины волн различны, становится ясным, что степень малости шероховатости поверхности может быть такой, что для самых длинных лучей (красных) она даст уже весьма правильное отражение, тогда как фиолетовые лучи, длина волны которых на одну треть короче, будут еще весьма сильно рассеиваться; таким образом, в правильно отраженном изображении какого-нибудь белого предмета красные и оранжевые цвета оказались бы преобладающими, тогда как зеленый, и особенно синий и фиолетовый, были бы в значительно меньшем количестве, вследствие чего получалась бы красноватая окраска. Это также подтверждается опытом. Вместо того, чтобы полировать зеркало до желаемой степени (что было бы, несомненно, не легко), воспользуйтесь зеркалом, поверхность которого только матовая, т. е. хорошо выправлена и сделана ровной одним только тонким наждаком; наклоняйте это зеркало по направлению к падающим лучам до тех пор, пока вы не начнете достаточно ясно различать отражение белого предмета; это изображение вам по-

кажется рыжеватым или даже красно-оранжевым, подобно цвету заходящего Солнца, если только предмет имеет достаточно блеска для того, чтобы вы не оказались вынужденными слишком сильно наклонять зеркало. Кроме того, окраска изображений одна и та же, какова бы ни была природа отражающего тела, будет ли оно, например, из стали или из несколько зеленоватого кронгласса. По мере того, как наклон зеркала увеличивается, изображение становится более белым, более блестящим, и если наклон становится таким, что зеркало приближается к параллельности с падающими лучами, то отражение почти столь же правильно и почти столь же интенсивно, как если бы поверхность была вполне отполирована. Мы видим, что в этом опыте наклон зеркала производит то же действие, как уменьшение шероховатости его поверхности; легко понять причину этого; в самом деле, шероховатость эта изменяет правильность отражения только благодаря возникающим из-за нее разностям пройденных путей. Но легко доказать с помощью геометрических рассуждений, что эти разности будут тем меньше, чем больше наклон лучей.

54. Применим теперь к преломлению те рассуждения об интерференциях, которые послужили нам для объяснения законов отражения. Пусть будет  $AB$  (черт. 4) поверхность раздела двух средин, в которых свет распространяется не с одинаковой скоростью. Я предположу, кроме того, что падающие лучи  $FG$  и  $ED$  исходят из бесконечно удаленной точки и, следовательно, параллельны между собой; действия же, производимые элементарными преломленными лучами, с целью упростить рассуждения, я буду определять только на таком расстоянии от  $AB$ , которое было бы бесконечно велико по сравнению с промежутком  $GD$  или с другими величинами того же порядка. Через точку  $G$  я провожу  $GI$ , перпендикулярно к падающим лучам;  $GI$  будет направлением падающей волны, или, другими словами, соответствующие друг другу волновые движения обоих падающих лучей придут одновременно в  $G$  и  $I$ ; таким образом,  $ID$  будет излишком пути, который луч  $ED$  должен пройти по сравнению с другим лучом, чтобы достигнуть поверхности. Точно также, если рассматривать два элементарных преломленных луча, исходящие из точек  $G$  и  $D$  и сходящиеся по направ-

влияниям  $GK$  и  $DL$  к одной и той же бесконечно удаленной точке, и если провести к последним направлениям перпендикуляр  $DM$ , то  $GM$  будет излишек пути, который луч  $GK$  должен, начиная от поверхности, пройти по сравнению с другим лучом для того, чтобы достигнуть точки встречи. Следовательно, оба луча придут в нее одновременно, если только свет проходит  $GM$  в тот же промежуток времени, как и  $ID$ ; но ясно, что для этого необходимо, чтобы эти оба пространства были в таком же отношении, как скорости распространения или длины световых волн в обеих средах; таким образом, обозначая через  $d$  и  $d'$  длины волн в первой и второй средах, мы



Черт. 4.

должны иметь пропорцию  $GM : DI = d' : d$ . Но если рассматривать  $GD$  как радиус, то  $GM$  будет синусом угла  $GDM$  и  $ID$  синусом угла  $IGD$ ; но  $IGD$  равно углу падения  $IDP$ , а  $GDM$  углу преломления  $QDL$ ; значит, синус угла преломления должен относиться к синусу угла падения, как  $d'$  к  $d$  для того, чтобы оба элементарных преломленных луча, которые мы рассматриваем, были в полном согласии в точке встречи; так как это условие будет в то же время выполнено и для всех других элементарных лучей, исходящих из различных точек поверхности  $AB$  и сходящихся в той же точке, то их волны в точности наложатся и сложатся одни с другими. Дело будет обстоит иначе с другими элементарными лучами  $Gk$  и  $DL$ , также сходящимися в очень удаленной точке, но по

другому направлению; в самом деле, в этом случае  $Gm$ , будучи больше или меньше, чем  $GM$ , уже не будет больше проходить в тот же промежуток времени, что и  $ID$ ; отсюда следует запаздывание в ходе одного из лучей по отношению к другому; но всегда можно взять  $G$  на таком расстоянии от  $D$ , что эта разность хода будет как раз равняться полуволне, и видно, значит, что для какого-нибудь элементарного луча  $Dl$ , который отклоняется от направления  $DL$ , всегда существует другой луч  $Gk$ , который направлен к той же точке встречи и который отличается от него на полуволну; но, каков бы ни был закон, по которому меняется интенсивность элементарных лучей, в различных направлениях посылаемых каждым из возмущений, возбуждаемых в  $G$  и  $D$ , действующих по отдельности, очевидно, что вследствие совершенно одинаковых условий для колебаний, распространяющихся по параллельным лучам  $Dl$  и  $Gk$ , их интенсивности будут одинаковы, так же, как направление их колебательных движений, и так как эти колебания отличаются в своем ходе на одну полуволну, то их движения взаимно уничтожатся.\* Мы видим, значит, что световые коле-

\* Взаимно уничтожаются не одни только эти движения, но также сопровождающие их сгущение и растяжение; в самом деле, так как в начальном движении между противоположными по знаку величинами все симметрично и одинаково, то все должно оставаться таковым же в элементарных волнах, из него проистекающих, и этого достаточно для того, чтобы все противоположные по знаку величины, положительные и отрицательные скорости, сгущение и разрежение, уничтожились бы взаимно в тех случаях, когда величины положительные соответствуют отрицательным, или, другими словами, тогда, когда имеется разность хода в одну полуволну между обеими системами интерферирующих волн.

Как раньше для отражения, мы заметим и здесь, что если поверхность  $AB$  не бесконечна, то из точек, близких к ее краям, всегда исходят элементарные лучи, которые не вполне уничтожаются, за исключением того случая, когда для рассматриваемого направления  $DL$  промежутки, равные  $GD$  и соответствующие разности в одну полуволну между крайними лучами, оказываются на протяжении этой поверхности в четном числе. Но если поверхность хоть сколько-нибудь широка, то идущий от краев ее и получившийся вследствие диффракции свет значительно слабее правильно преломленного света.

Более полное изложение можно найти в примечаниях к Мемуару о диффракции, который будет опубликован в „Сборнике иностранных ученых“ (Recueil des savants étrangers).

бания могут обнаружиться во второй среде только по направлению, которое образует такой угол преломления, что его синус относится к синусу угла падения, как  $d'$  к  $d$ .

Если в каждой среде скорость распространения света для разных направлений одинакова, то отношение  $d$  к  $d'$ , и, следовательно, отношение синусов углов падения и преломления остается постоянным, и свет следует обыкновенному и известному закону преломления. Но существуют такие вещества, в которых при одной и той же среде скорость распространения меняется с направлением лучей, и в таком случае преломление происходит иначе.

Как мы видим, только что найденное нами отношение между синусами углов падения и преломления вполне согласуется с опытом господина Араго, который показал, что в различных средах длины световых волн относятся между собой, как синусы углов падения и преломления при проходе света из одной среды в другую; это отношение объясняет в то же время, почему толщины воздушного и водяного слоев, отражающих одинаковым образом окрашенные кольца, относятся между собой, как синусы углов падения и преломления света, проходящего из воздуха в воду.

55. Обобщая рассуждения, только что примененные нами для объяснения обыкновенного закона преломления, для частного случая непрерывной и бесконечно протяженной поверхности, оказывается возможным с помощью тех же самых формул, которые дают явления диффракции, определить более сложные законы, которым следуют преломленные лучи, когда преломляющая поверхность оказывается узкой или разрывной, причем всегда получаются результаты, сходные с опытом; это доказывает одновременно общность и правильность принципа Гюйгенса и принципа интерференции, на которых вся эта теория основывается.

56. Я не могу закончить этого краткого изложения о явлении преломления, не коснувшись некоторых теоретических соображений об одном оптическом явлении, которое всегда его сопровождает, которое много изучалось и которое все же принадлежит еще к тем явлениям, законы которых меньше всего известны; я хочу коснуться того разделения, которое испыты-

вает свет, проходя через призму, и которому было дано имя дисперсии, так как благодаря ему цветные лучи, составляющие белый свет, как бы разделяются и рассеиваются, следуя по разным путям. Из этого явления следует, что лучи различных цветов преломляются не одинаково, или, другими словами, что волны различной длины не распространяются с одной и той же скоростью в одной и той же среде; в самом деле, то, что для каждого рода волн отношение между синусами углов падения и преломления должно всегда быть равно отношению скоростей их распространения в обеих средах, представляет собою неизбежное следствие из объяснения, которое мы дали преломлению; таким образом, если бы различные лучи проходили обе среды с одинаковой скоростью, то они были бы одинаково преломлены, и дисперсии не существовало бы. Значит, нужно предположить, что в преломляющих средах волны различной длины распространяются не с одной и той же скоростью, или, другими словами, не укорачиваются в одном и том же отношении. Этот вывод кажется на первый взгляд в противоречии с результатами замечательных вычислений господина Пуассона, касающихся распространения звуковых волн в упругих жидкостях различных плотностей; но следует заметить, что его общие уравнения основываются на гипотезе, что каждый бесконечно тонкий слой жидкости отталкивается одним только смежным с ним слоем, и что, таким образом, действие ускоряющей силы простирается только на расстояния, бесконечно малые по сравнению с длиной волны. Без сомнения, эта гипотеза вполне допустима для звуковых волн, из которых самые короткие имеют все же несколько миллиметров в длину, но она может оказаться не точной для световых волн, из которых самые длинные меньше одной тысячной миллиметра. Весьма возможно, что сфера действия ускоряющей силы, которая определяет скорость распространения света в преломляющей среде, или взаимная зависимость между ее молекулами простирается на расстояния, которые не являются бесконечно малыми по сравнению с одной тысячной миллиметра; это несколько не противоречит представлениям, которые опыт дает нам о малости этих сфер действия. Но с помощью механики легко видеть, что если сфера действия ускоряющих сил

---

действительно простирается на расстояния одного порядка с длиной световых волн, то самые длинные волны должны в более плотных средах менее замедляться в своем ходе или менее укорачиваться, чем сравнительно короткие волны; они должны поэтому преломляться менее сильно, что находится в согласии с единственным общим правилом, до настоящего времени открытым с помощью опыта в явлениях дисперсии.

Как бы то ни было, факты показывают, что световые волны разной длины распространяются с различными скоростями в одних и тех же преломляющих средах; законы изменения этих скоростей еще совершенно неизвестны и, повидимому, находятся в очень тесной зависимости от химической природы тел. Будут ли скорости распространения различных лучей не совсем одинаковы в чистом эфире, заполняющем, например, междузвездное пространство, — вот вопрос, на который трудно ответить с уверенностью, но который, повидимому, астрономические наблюдения господина А р а г о разрешают отрицательно.\*

\* Смотри А р а г о, Популярная астрономия (A r a g o, *Astronomie Populaire*), 1827, т. I, стр. 405.

## О ДВОЙНОМ ПРЕЛОМЛЕНИИ И О ПОЛЯРИЗАЦИИ

57. Если направить световой пучок на естественную грань ромбоэдра из известкового шпата, то он разделится внутри его на два других пучка, которые идут по разным направлениям и которые дают, таким образом, два изображения для предметов, рассматриваемых через ромбоэдр. Этому явлению было дано название двойного преломления, точно так же, как и всем другим такого же типа явлениям, которые получаются во многих других кристаллах, если, с целью сделать более заметными оба отдельных изображения, шлифовать их в виде призм.

58. Но это раздвоение света оказывается не единственным замечательным фактом, который дает нам двойное преломление; каждый из пучков, на которые подразделяются падающие лучи, обладает особенными свойствами, которые устанавливают различие между их сторонами. Для того, чтобы с точностью описать встречающиеся здесь явления, нужно пользоваться принятыми наименованиями и разъяснить их.

В кристаллах, в которых законы двойного преломления оказываются наиболее простыми, всегда существует некоторое направление, вокруг которого во все стороны все происходит одинаково и которое называют осью кристалла. Ее не следует рассматривать как одну единственную линию; в кристалле можно представить себе столько осей, сколько имеется линий, параллельных этому направлению; все же кристалл носит название одноосного, если только оптические явления, совершающиеся вокруг оси, вполне сходственны. Мы видим, что этот термин теряет здесь свое обычное значение и становится синонимом направления. Можно себе представить, что направление оси зависит от кристаллической группировки частиц среды, и что оно должно иметь, по отношению к их граням

или к их линиям кристаллизации определенное положение, которое в кристалле всегда остается одним и тем же, каким бы образом мы его ни повернули к падающим лучам.

59. Существуют кристаллы, для которых не существует подобия вокруг какой-либо оси и в которых вследствие этого обнаруживаются два особенных направления, более или менее наклонных друг к другу, и которым свойственны явления, похожие на те, что наблюдаются вдоль оси, когда вокруг нее все одинаково; такие кристаллы называются двуосными. Но мы будем говорить только об одноосных кристаллах, оптические свойства которых проще и легче понимаются.

60. Главным сечением называют плоскость, проведенную через ось перпендикулярно к поверхности кристалла. В виду того, что нашей целью является не изложение всех разных родов преломления световых лучей кристаллами, но изложение одного лишь образа их распространения в этих средах и оптических свойств, при этом им свойственных, то для упрощения рассуждения мы предположим, что падающие лучи всегда перпендикулярны к граням кристалла и находятся, таким образом, в плоскости главного сечения; если мы пожелаем изучать их ход по различным по отношению к оси направлениям, то мы каждый раз предположим, что грани входа и выхода высечены перпендикулярно к этим направлениям.

61. Установив это, заметим, что в углекислой извести, двойное преломление которой весьма велико, один из двух пучков принимает направление, наклонное к поверхности, несмотря на то, что падающие лучи к ней перпендикулярны; другой луч не испытывает в то же время никакого излома, что согласно с обыкновенным законом преломления; поэтому говорят про последний, что он преломился обыкновенным образом, а про другой, что он преломился необыкновенным образом; а чтобы отличить оба луча друг от друга, их называют по характеру испытываемого ими преломления; так, обыкновенным пучком называют тот, что испытывает обыкновенное преломление, а необыкновенным пучком тот, что испытывает необыкновенное преломление; точно так же обыкновенным называется изображение, получающееся с обыкновенными лучами, а необыкновен-

ным изображение, получающееся с необыкновенными лучами. В других, обладающих двойным преломлением, кристаллах, как, например, в горном хрустале, при одинаковых условиях происходит такое же раздвоение луча, но в столь слабой степени, что необходимы очень толстые пластинки, чтобы сделать его заметным. Раздвоения легче добиться, если шлифовать кристалл таким образом, чтобы грань выхода была наклонна к первой грани; в таком случае оба пучка, не выходя более по параллельным направлениям, в конце концов, если проследить их ход, всегда разделятся. Но мы не будем входить в детали опытов, которыми устанавливаются общие законы двойного преломления, мы изложим только главные результаты, к которым они приводят.

Прежде всего следует заметить, что если, как мы предполагаем, падающие лучи перпендикулярны к поверхности кристалла, то отклонение необыкновенного пучка всегда происходит в плоскости главного сечения и становится равным нулю каждый раз, когда лучи проходят кристалл параллельно или перпендикулярно к оси.

Наблюдение показало, что если лучи параллельны оси, то они не только следуют по одному и тому же направлению, но и проходят кристалл с одинаковой скоростью; когда же они перпендикулярны к оси, то, наоборот, их скорости распространения различаются сильнее всего, хотя они еще и идут по одному и тому же пути. Скорость распространения обыкновенных лучей по всем направлениям одна и та же, и вследствие этого они подчиняются действию обыкновенных законов преломления. Скорость необыкновенных лучей меняется в зависимости от угла, который они образуют с осью; и об этой скорости — в волновой теории так же, как и в теории испускания, — можно судить по излому, который они испытывают при входе и выходе при наклонном падении, и который дает отношение между синусами углов падения и преломления. Опыты Гюйгенса, \* господина Волластона \*\* и Малуса, \*\*\*

\* Трактат о свете (Traité de la lumière), глава V.

\*\* Wollaston, Philosophical Transactions, 1802.

\*\*\* Мемуары иностранных ученых, 2-й сборник (Malus, Memoires des Savants étrangers, 2 collection), 1802 г., т. II, стр. 303.

сделанные с углекислой известью, и многочисленные наблюдения господина Био \* над горным хрусталем, в которых угловые измерения двойного преломления были доведены до высокой степени точности, показывают, что разность между квадратами скоростей распространения обыкновенных и необыкновенных лучей пропорциональна квадрату синуса угла, который необыкновенные лучи образуют с осью, если при этом вычислять скорости по теории испускания, как это было сделано знаменитым автором „Небесной механики“; по волновой теории точно такое же соотношение будет иметь место для частных от делений единицы на те же самые квадраты скоростей, ибо отношение скоростей в этих двух теориях всегда обратно. Этот важный закон, открытием которого мы обязаны гению Гюйгенса, заключает в себе, как следствие, только что изложенные факты; по направлению оси оба рода лучей будут иметь одну и ту же скорость, так как в этом случае синус равняется нулю; разность скоростей будет постепенно возрастать вместе с этим синусом по мере удаления от оси до тех пор, пока лучи не станут перпендикулярными; в этом направлении разность достигнет своего максимума.

Эта разность скорости положительна для некоторых кристаллов и отрицательна для других, т. е. в одних обыкновенные лучи идут менее быстро, чем необыкновенные, а в других, наоборот, более быстро. Углекислая известь или известковый шпат дают пример первого рода, а горный хрусталь второго.

Вот краткое изложение общих принципов хода обыкновенных и необыкновенных лучей в кристаллах; вернемся теперь к физическим свойствам, которые они обнаруживают при их выходе, когда их заставляют проходить второй кристалл, который, как и первый, обладает способностью разделять свет на два различных пучка. \*\*

\* Мемуары Королевской академии наук при Институте (Memoires de l'Academie royale des Sciences de l'Institut), 1818 г., т. III, стр. 177.

\*\* Я буду в дальнейшем пользоваться выражением „пучок“, заимствованным из теории испускания, для того, чтобы обозначить таким образом систему волн, которая отличается от других систем своим направлением или даже просто величиною скорости.

62. Рассмотрим по очереди каждый из двух пучков, исходящих из первого ромбоэдра известкового шпата, и сначала тот, который преломляется обыкновенным образом. Проходя через второй ромбоэдр, он образует два новых пучка, которые будут равны по интенсивности только в том случае, если главное сечение второго кристалла образует угол в  $45^\circ$  с главным сечением первого; при всех других положениях оба пучка, или оба даваемых ими изображения, будут не одинаково интенсивны, и одно из них даже совершенно исчезнет, когда главное сечение второго ромбоэдра окажется параллельным или перпендикулярным к главному сечению первого; когда оно параллельно, то исчезает необыкновенное изображение, а обыкновенное достигает в то же время максимума своего блеска; когда главное сечение второго ромбоэдра перпендикулярно к главному сечению первого, то, наоборот, обыкновенное изображение исчезает, а необыкновенное достигает своего максимума. Необыкновенный пучок, выходящий из первого ромбоэдра, дает при прохождении через второй обратное явление; его обыкновенное изображение исчезает, когда главное сечение второго кристалла параллельно главному сечению первого и, наоборот, достигает своего максимума, когда главное сечение второго кристалла перпендикулярно к главному сечению первого, причем необыкновенное изображение исчезает. Резюмируя, мы видим, значит, что каждый пучок, получившийся в каждом из двух преломлений в первом кристалле, разделяется, вообще говоря, на два преломленных пучка в другом кристалле, но на неравные части, если только главное сечение второго кристалла не образует угла в  $45^\circ$  с главным сечением первого; при этом во втором кристалле он испытывает только один род преломления, когда главное сечение последнего параллельно или перпендикулярно главному сечению первого, и новое преломление будет иметь одинаковый характер с преломлением в первом кристалле в первом случае и противоположный характер во втором.

Из этих фактов следует, что оба получающиеся при двойном преломлении пучка не имеют одинаковых оптических свойств вокруг их направления, так как они испытывают то обыкновенное преломление, то необыкновенное, смотря по тому,

будет ли главное сечение второго кристалла направлено по некоторой плоскости или перпендикулярно к этой плоскости. Если, значит, провести в этих плоскостях прямые линии, перпендикулярные к лучам, и если представить себе, что эти линии переносятся вместе с системой волн, то этими линиями будут указываться два направления, по которым системы волн обладают противоположными оптическими свойствами.

Этому необычайному видоизменению света Малус дал название поляризации, что соответствовало одной гипотезе, которая была придумана Ньютоном для объяснения явления; этот великий геометр предполагал, что световые молекулы обладают двумя родами полюсов, или, лучше, граней, обладающих различными физическими свойствами; в обыкновенном свете одинакового рода грани различных световых молекул повернуты по всевозможным направлениям, но под действием кристалла одни из них оказываются направленными параллельно к главному сечению, а другие перпендикулярно; род преломления, которое испытывают световые молекулы, зависит от направления, по которому их грани повернуты по отношению к главному сечению. Можно представить себе, что эта гипотеза действительно соответствует фактам. Но не останавливаясь на рассмотрении ее и не показывая ее трудностей, — я скажу — даже противоречий, — к которым она приводит после тщательных исследований, я замечу только, что эту разницу оптических свойств, которую разделенные двойным преломлением пучки лучей обнаруживают по двум взаимно перпендикулярным направлениям, можно также понять, если предположить существование в световых волнах поперечных\* колебаний, различных для двух направлений. Но оставим в настоящий момент теоретические соображения и продолжим изучение фактического материала.

63. Это замечательное видоизменение приобретает свет не только тогда, когда он проходит через кристалл, который разделяет его на два отдельных пучка; свет может быть поляризован простым отражением от поверхности прозрачных тел, как это было в первый раз замечено Малусом.

\* Я называю поперечным движением те колебания эфирных молекул, которые совершаются перпендикулярно к направлению лучей.

Если на непокрытое зеркальным слоем (амальгамой) стекло направить пучок света под наклоном в  $35^\circ$  к поверхности стекла, и если поместить ромбоэдр известкового шпата на пути отраженного луча, то можно заметить, что оба пучка, на которые он разделяется, при проходе через кристалл будут одинаковой интенсивности только в том случае, если главное сечение ромбоэдра образует угол в  $45^\circ$  с плоскостью отражения; для всех других направлений главного сечения интенсивности изображений будут не равны; это неравенство будет тем более заметно, чем больше главное сечение будет отклоняться от угла в  $45^\circ$ ; наконец, если оно будет перпендикулярно или параллельно к плоскости падения, то одно из двух изображений исчезнет, — в первом случае изображение необыкновенное, во втором изображение обыкновенное. Мы видим, что свет, отраженный от стекла под наклоном в  $35^\circ$ , ведет себя совершенно таким же образом, как обыкновенный пучок, вышедший из ромбоэдра, главное сечение которого направлено по плоскости отражения. Относительно отраженного пучка говорят, что он поляризован в плоскости отражения; точно также про обыкновенный пучок, вышедший из ромбоэдра известкового шпата, говорят, что он поляризован в плоскости главного сечения этого кристалла; относительно необыкновенного пучка нужно сказать, что он поляризован перпендикулярно к главному сечению, так как он имеет в этом направлении те же самые свойства, что обыкновенный пучок в плоскости главного сечения.

При отражении от поверхности воды полная поляризация света происходит при наклоне в  $37^\circ$ , а вообще — при отражении от прозрачных тел при таком падении, при котором отраженный луч перпендикулярен к преломленному. Открытие этого замечательного закона было сделано доктором Брюстером. Точный ли этот закон или только приблизительный? Вопрос решить трудно, но второе предположение более вероятно.\*

При других углах падения поляризация оказывается только частичной, т. е. если вращать ромбоэдр, то изображение никогда не исчезает. Правда, изображение проходит при этом через различные степени яркости, но минимумы интенсивности,

\* См. примечание 11-е.

которые всегда соответствуют одним и тем же направлениям главного сечения, уже не равняются больше нулю. Наконец, если падающие лучи перпендикулярны или почти параллельны поверхности, то отраженный свет не показывает больше никаких следов поляризации, т. е. оба изображения оказываются всегда одинаково интенсивными при каких угодно положениях ромбоэдра.

Многие непрозрачные тела, которые не очень сильно преломляют, как, например, мрамор, черные лаки и т. д., также оказываются способными делать вполне поляризованными лучи, правильно отраженные от их поверхности; но некоторые другие тела, совершенно прозрачные или полупрозрачные и очень сильно преломляющие, как, например, алмаз и сурмянное стекло, никогда не поляризуют вполне. Но наименее хорошо поляризуют отражаемый ими свет металлы, даже при самых благоприятных углах падения. Следует заметить, что углы падения, которые соответствуют максимуму поляризации, тем более приближаются к поверхности, чем сильнее преломляет отражающее тело, насколько, по крайней мере, об этом можно судить по большому количеству отраженного света в случае совершенно непрозрачного, подобного металлам, тела.

64. Прозрачные тела поляризуют свет не только при отражении, но также и при преломлении, и тем в большей степени, чем сильнее поверхность наклонена к лучам; но при этом свет никогда не бывает вполне поляризованным, если только его не заставляют последовательно проходить через несколько параллельных пластинок; этих пластинок нужно тем больше, чем менее они наклонены к падающим лучам. Малус, которому мы обязаны также открытием этого рода поляризации, показал, что прошедшие лучи будут поляризованы по направлению, перпендикулярному к направлению отраженных лучей; в то время как первые были поляризованы в плоскости падения, вторые поляризованы перпендикулярно к этой плоскости. Господин Араго, с помощью остроумных опытов, которые давали ему возможность производить наблюдения с очень большою точностью, показал, что количество света, поляризованного при отражении от поверхности прозрачного тела, всегда равняется количеству света, поляризованного при пре-

ломлении. \* Формулирование этого замечательного принципа можно обобщить и сказать, что всякий раз, когда свет разделяется на два пучка (если при этом не происходит поглощения), — то же самое количество света, которое оказывается поляризованным в одном из них, будет находиться и в другом, но только поляризованным в перпендикулярном направлении.

65. Изучив главные способы поляризации, мы займемся теперь имеющими особенный характер явлениями, которые обнаруживаются в поляризованном свете, когда его направляют на поверхность прозрачных тел; открытием этих важных фактов мы также обязаны Малусу. \*\* Мы только что видели, что свет, отраженный под углом в  $35^\circ$  от непокрытого зеркальным слоем стекла, был вполне поляризован; это свойство должно быть общим и независимым от предшествующих изменений, которым падающий свет мог подвергнуться; в самом деле, свет, поляризованный в какой-нибудь плоскости, подобно обыкновенному свету после этого отражения, всегда оказывается вполне поляризованным в плоскости падения. Но мы заметили, что поляризованный пучок, проходя через ромбоэдр известкового шпата, главное сечение которого параллельно или перпендикулярно к его плоскости поляризации, давал всего одно только изображение, обыкновенное в первом случае и необыкновенное во втором, т. е. давал всегда изображение, плоскость поляризации которого совпадала с его собственной; таким образом, пучок, поляризованный в какой-нибудь плоскости, не может при последующем своем разделении давать свет, поляризованный перпендикулярно к плоскости начальной поляризации. Обобщая этот принцип, следует сделать вывод, что поляризованный пучок, направленный на непокрытое зеркальным слоем стекло под углом в  $35^\circ$  и лежащий в плоскости падения, перпендикулярной к плоскости поля-

\* Араго, Замечание о поляризации (Полное собрание сочинений, т. VII, стр. 291) (Arago, Oeuvres completes, t. VII, p. 291).

\*\* Малус, Об одном свойстве отраженного света (Malus, Memoires de la Societe d'Arcueil), т. II, стр. 143; Мемуар о новых явлениях оптики; Мемуар о явлениях, сопровождающих отражение и преломление света (Memoires de la Classe des Sciences mathematiques et physiques de l'Institut, 1810 г., стр. 105 и 112).

ризации, не может создать света, поляризованного в плоскости падения, так как последняя перпендикулярна к плоскости поляризации. Но лучи, отраженные под углом в  $35^\circ$ , всегда поляризованы в плоскости падения; значит, падающий пучок, поляризованный перпендикулярно к этой плоскости, ничего не может дать при отражении. Это следствие подтверждается прекрасными опытами Малуса; в том случае, о котором мы говорим, отраженного света больше не имеется, весь свет проходит целиком. Но если, не меняя наклона зеркала, вращать его вокруг падающего пучка так, чтобы плоскость отражения последовательно находилась во всевозможных азимутах, \* то можно заметить, что отраженный свет начинает снова появляться с того момента, когда плоскость отражения отклоняется от плоскости, перпендикулярной к плоскости первоначальной поляризации; сначала он очень слаб, но затем увеличивается по мере того, как плоскость отражения все более и более от нее удаляется и достигает, наконец, своего максимума, когда она становится параллельной первоначальной плоскости поляризации; после этого отраженный свет в той же последовательности уменьшается, и исчезает, наконец, совершенно, когда плоскость падения снова оказывается перпендикулярной к первоначальной плоскости поляризации.

Мы видим, что эти явления совершенно аналогичны тем, которые мы наблюдали в каждом из двух изображений, даваемых поляризованным пучком, проходящим через вращающийся ромбоэдр известкового шпата. Для обоих случаев Малус дал одну и ту же формулу, выражающую изменение интенсивности этих изображений и отраженного света. Если я обозначу через  $i$  угол, который начальная плоскость образует с плоскостью отражения, или угол, по которому при двойном преломлении поляризуется рассматриваемое изображение, то интенсивность этого изображения и интенсивность отраженного света будут

\* При описании явлений поляризации общим именем азимутов называют углы, которые образуют плоскости, проведенные по всевозможным направлениям через световой луч, с первоначальной плоскостью поляризации; этот термин заимствован из астрономии, в которой он обозначает углы, образованные меридианом с вертикальными плоскостями, направленным к различным точкам горизонта.

---

представлены через  $\cos^2 i$ , умноженный на максимум интенсивности, который мы возьмем за единицу.

66. Проверим эту формулу для того случая, когда поляризованный пучок проходит через ромбоэдр известкового шпата; обозначим через  $i$  угол, который образует плоскость поляризации обыкновенного изображения, т. е. главные сечения кристалла, с первоначальной плоскостью поляризации;  $90^\circ - i$  будет угол, который последняя плоскость образует с плоскостью поляризации необыкновенного изображения; таким образом, если  $\cos^2 i$  представляет собой интенсивность обыкновенного изображения, то интенсивность необыкновенного будет представлена через  $\cos^2 (90^\circ - i)$  или  $\sin^2 i$ . Если  $i$  равняется нулю, т. е. если главное сечение совмещается с главной плоскостью поляризации, то  $\sin^2 i$  тоже становится равным нулю, необыкновенное изображение исчезает, и весь свет оказывается в обыкновенном изображении, так как при этом  $\cos^2 i$  равно 1. Если  $i$  равняется  $45^\circ$ , то  $\sin^2 i$  и  $\cos^2 i$  становятся каждый равным половине, и оба изображения имеют одинаковую интенсивность; наконец, если  $i$  равняется  $90^\circ$ , то  $\sin^2 i$  равняется единице и  $\cos^2 i$  равняется нулю, что означает, что обыкновенное изображение исчезает и что весь свет попадает в необыкновенное. Те же явления повторяются в других квадрантах. Мы видим, что следствия, вытекающие из формул, согласуются с наблюдением. Для того, чтобы вполне доказать правильность этой формулы, нужно было бы непосредственно проверить ее на промежуточных значениях  $i$ ; но для этих последних эта формула была много раз испытана путем косвенной проверки, что хотя и не может иметь решающего значения, все же увеличивает вероятность ее правильности. Кроме того, аналогия и вполне допустимые соображения механического характера указывают, повидимому, на ее строгость.

67. Излагая основные принципы волновой теории, мы показали, что интенсивность света равняется сумме живых сил, заключающихся в каждой волне, или, для одной определенной среды, просто сумме квадратов скоростей различных точек волны, и может быть, значит, представлена квадратом общего коэффициента этих скоростей; так, если  $\cos^2 i$  будет интенсивностью света обыкновенного изображения, то  $\cos i$  будет общим

коэффициентом скоростей колебания в этом изображении и представляет собой их амплитуду; \* точно также, если  $\sin^2 i$  будет интенсивность света необыкновенного изображения, то  $\sin i$  представит собой амплитуду скоростей колебания в системе волн, подвергшейся необыкновенному преломлению. Мы видим, значит, что разложение скоростей колебания в первоначально поляризованном пучке, который при проходе в кристалл распадается на два других пучка, происходит совершенно так, как если бы эти колебательные движения, вместо того, чтобы быть параллельны лучам, происходили по перпендикулярному к ним направлению, параллельно или перпендикулярно к плоскости поляризации; в самом деле, в этом случае, по принципу сложения и разложения малых движений жидкости, которые должны происходить так же, как сложение и разложение сил в статике, обе слагающие скорости оказались бы также пропорциональны синусу или косинусу  $i$ . Таким образом, закон Малюса, повидимому, указывает на то, что колебательные движения эфирных молекул совершаются перпендикулярно к лучам; мы имеем здесь гипотезу, которая становится еще более вероятной, благодаря другим замечательным свойствам поляризованного света, с которыми нам предстоит познакомиться.

68. Изучая интерференцию поляризованных лучей, я нашел совместно с господином Араго, что они не оказывают больше действия друг на друга, если их плоскости поляризации взаимно перпендикулярны, т. е. с ними нельзя получать тогда полос, хотя бы все условия, необходимые для их появления в обыкновенном случае, и были тщательнейшим образом выполнены. Я приведу три главных опыта, с помощью которых мы установили этот факт, и начну с того опыта, который был сделан господином Араго. Он состоит в том, что два пучка, исходящие из одной и той же светящейся точки и проходящие через две параллельные щели, пропускают через две стопки очень тонких прозрачных пластинок, как, например, пластинки слюды или дутого стекла; обе эти стопки должны быть в достаточной степени наклонены для того, чтобы каждый из двух пучков оказался вполне поляризованным, причем нужно по-

\* См. примечание 12-е в конце книги.

заботиться о том, чтобы они были наклонены по двум взаимно перпендикулярным плоскостям; в этом случае полосы более не видны, как бы старательно мы ни пробовали при этом компенсировать разности хода весьма медленным наклонением одной из стопок; \* в том же случае, когда плоскости наклона стопок не перпендикулярны более между собою, всегда можно добиться появления полос. По мере того, как эти плоскости все более отклоняются от параллелизма друг к другу, полосы ослабевают и исчезают совершенно, когда они под прямым углом, если только поляризация обоих пучков была достаточно полной. Из этого опыта следует, что лучи, поляризованные в одной плоскости, действуют друг на друга, подобно лучам не видоизмененного \*\* света, но это действие уменьшается по мере того, как плоскости поляризации расходятся друг от друга, и становится равным нулю, когда они оказываются под прямым углом.

Вот другой опыт, приводящий к тем же результатам. Берут пластинку из сернокислой извести \*\*\* или горного хрусталя, параллельную оси; толщина ее должна быть повсюду одинакова; ее разрезают на две половинки и каждую из них помещают перед одной из щелей экрана. Я предполагаю, что обе половинки повернуты таким образом, что края их, которые были смежными до разделения пластинки, остались параллельными; оси также будут параллельными. В этом случае, точно так же, как и до разделения пластинок, наблюдается только

\* Тот же самый опыт можно было бы сделать с стеклянными пластинками значительно более толстыми, например, в один миллиметр толщины, если только их тщательно выправить и отполировать так, чтобы их поверхности были совершенно параллельными, и если их затем разделить пополам, чтобы получить стопки одинаковой толщины; при этом нужно только менять наклон стопок более медленно для того, чтобы не пропустить полосы незамеченными.

\*\* Т. е. естественного света. *Прим. редактора.*

\*\*\* Как показал Брюстер, сернокислая известь представляет собой двусный кристалл, тем не менее пластинки, на которые он естественным образом распадается, будучи параллельны плоскости обеих осей, производят на падающие на них перпендикулярно лучи такие же действия, как если бы они обладали всего только одной осью, направленной по медиане; я буду рассматривать здесь только одно это направление, которое и назову осью кристалла. См. Brewster, On the Laws of Polarisation and double Refraction in regulary crystallized Bodies (Philosophical Transactions, for 1916, p. 199).

одна группа полос, в середине освещенного пространства. Но если повернуть одну из половинок в своей плоскости и таким образом нарушить параллелизм двух пластинок, то получатся две новые группы полос более слабых и расположенных одна справа, а другая слева от центральной группы; если пластинки из сернокислой извести или горного хрусталя имеют в толщину всего только один миллиметр, то новые группы полос вполне отделены от центральной полосы. Следует заметить, что если мы имеем разные кристаллы из одного и того же вещества или кристаллы с двойным лучепреломлением одинаковой силы, как, например, в горном хрустале и в сернокислой извести, то между серединами одной из новых групп и серединой центральной группы можно поместить число полос, пропорциональное толщине пластинки. По мере того, как угол между осями увеличивается, новые группы полос становятся все более резко выраженными и достигают, наконец, своего максимума интенсивности, когда оси обеих пластинок становятся перпендикулярными друг к другу; в этот момент центральная группа, которая постепенно ослаблялась, исчезает совершенно и заменяется однородным светом. Отсюда следует вывести, что лучи, интерференцией которых она образуется, не могут более действовать друг на друга. По поляризации этих полос легко видеть, что они получаются от интерференции лучей, подвергшихся в обеих пластинках одному и тому же роду преломления, так как, пройдя через них с равными скоростями, они должны одновременно приходить в середину освещенного пространства, соответствующую одинаковым путям, но обе пластинки должны иметь при этом одинаковую толщину и все время оставаться перпендикулярными к лучам, что мы здесь и предполагаем. Таким образом, полосы центральной группы образовывались наложением полос, возникавших 1) от интерференции обыкновенных лучей левой пластинки с обыкновенными лучами правой пластинки, 2) от интерференции необыкновенных лучей первой пластинки с необыкновенными лучами второй. Две внешние группы, напротив, получаются от интерференции лучей, подвергшихся в обеих пластинках различным преломлениям; а так как в горном хрустале или в сернокислой извести обыкновенные лучи обладают более быстрым ходом, то мы и

видим, что, пользуясь одним из этих двух родов кристаллов, левая группа должна образоваться соединением необыкновенных лучей левой пластинки с обыкновенными лучами правой, и правая группа — соединением необыкновенных лучей, правой пластинки с обыкновенными лучами левой. Установив это, следует теперь определить направление поляризации каждого из интерферирующих пучков, с тем, чтобы затем выяснить, каковы будут относительные направления плоскостей поляризации, способствующие или препятствующие взаимодействию лучей. Аналогия говорит нам, что род поляризации света должен быть в тонких пластинках таким же, как в кристаллах, достаточно толстых для разделения света на два отдельных пучка. Но так как это предположение может быть предметом спора и противоречить даже одной остроумной теории, принадлежащей одному из наших самых знаменитых физиков, то мы сначала не будем рассматривать его, как некоторый достоверный принцип, а прибегнем к непосредственному опыту и определим плоскости поляризации обыкновенных и необыкновенных лучей, выходящих из этих пластинок, причем предположим, что их толщина составляет один или два миллиметра. Эта толщина достаточна для того, чтобы какой-нибудь один край пластинок отшлифовать под косым углом и получить, вследствие этой призматической формы, разделение обыкновенных и необыкновенных лучей; в таком случае можно видеть, что они действительно поляризованы, первый по главному сечению, а вторые перпендикулярно к нему. Но если и на это не смотреть, как на достаточное доказательство того, что таков род их поляризации при выходе из каждой пластинки в том случае, когда обе поверхности пластинки параллельны, то этому можно было бы найти еще новое доказательство в только что описанных фактах, если исходить из принципов, установленных опытами господина Араго и подтверждаемых, кроме того, опытом, о котором сейчас будет речь; если же, напротив, уже не считать вопросом направление поляризации обыкновенных и необыкновенных лучей, то настоящий опыт становится вторым доказательством этих принципов. В самом деле, если оси обеих пластинок были параллельны, то лучи, испытавшие одинаковое преломление в обоих кри-

таллах, оказываются поляризованными по одному и тому же направлению, а испытывшие разноименные преломления,— по взаимно перпендикулярным направлениям; вот почему группа центральных полос, получающаяся от интерференции лучей одного наименования, обладала максимумом интенсивности в то время, когда две другие группы, получающиеся от интерференции разноименных лучей, еще не появлялись. Но когда оси обеих пластинок находились под косым углом, например, в 45 градусов, то лучи разноименные и лучи одноименные могли действовать друг на друга, так как их плоскости поляризации не были более под прямыми углами; в этом случае получались три группы полос. Наконец, если оси становились перпендикулярными между собой, то одноименные лучи оказывались поляризованными в взаимно перпендикулярном направлении, и образуемая ими центральная группа исчезала, между тем как обыкновенные лучи левой пластинки, будучи поляризованы параллельно необыкновенным лучам правой пластинки, давали для образуемой ими правой группы максимум ее интенсивности. То же получается и для левой группы, происходящей от интерференции обыкновенных лучей правой пластинки с необыкновенными лучами левой.

Вот еще третий опыт, подтверждающий выводы, сделанные нами из первого. Отполировав у ромбоэдра из известкового шпата две противоположные грани, хорошо выправленные и совершенно между собой параллельные, я распиливал его перпендикулярно к этим граням и получал таким образом два ромбоэдра одинаковой толщины, в которых при одном и том же наклоне ход обыкновенных и необыкновенных лучей должен был быть совершенно одинаков. Я помещал их один перед другим так, чтобы лучи, исходящие из светящейся точки, пройдя через первый ромбоэдр, проходили затем через второй, причем я старался, чтобы грани их были перпендикулярны по направлению к падающим лучам; кроме того, главное сечение второго ромбоэдра было перпендикулярно к главному сечению первого, и, таким образом, четыре пучка, которые с их помощью обыкновенно получают, сводились к двум; обыкновенный пучок первого ромбоэдра преломлялся необыкновенным образом во втором, а необыкновенный пучок первого — обыкновенным обра-

вом во втором. Вследствие такого расположения, разности хода, которые получаются вследствие разности скоростей обыкновенных и необыкновенных лучей, оказывались компенсированными в двух выходящих пучках. Кроме того, оба пучка пересекались далее под очень малым углом, настолько малым, что полосы должны были бы иметь более чем достаточную ширину для того, чтобы быть заметными; однако, несмотря на то, что все условия, необходимые для получения полос при обыкновенных обстоятельствах, были тщательно выполнены, я никак не мог их получить. Вооружив глаз лупой и стараясь найти их, я в то же время медленно менял направление одного из ромбоэдров, отклоняя его то вправо, то влево, чтобы таким образом компенсировать действие некоторой разницы в толщине кристалла, которая могла бы еще существовать; но, несмотря на пробы, повторенные большое число раз, я не заметил никаких полос; после того, чему нас научили другие опыты, это не должно быть удивительным, так как оба исходящих пучка были поляризованы под прямым углом. То обстоятельство, что отсутствие полос не зависит вовсе от той трудности, с которой полная компенсация получается при пробах, доказывается тем, что я с легкостью получал их с помощью света, поляризованного до входа в ромбоэдры и подвергающегося новой поляризации после выхода из них. Таким образом, вполне доказано, с помощью только что приведенных опытов, что лучи, поляризованные под прямым углом, не могут оказывать никакого заметного действия друг на друга, или, другими словами, что соединение их дает всегда одну и ту же интенсивность света, каковы бы ни были разности хода двух систем интерферирующих волн.

69. Другое замечательное явление состоит в том, что, раз они поляризованы по взаимно перпендикулярным направлениям, недостаточно только привести их к одной общей плоскости поляризации для того, чтобы обнаружались признаки их взаимодействия. В самом деле, если в опыте господина Араго или в опыте, вслед за ним мною описанном, заставить лучи, вышедшие из обеих щелей и поляризованные под прямым углом, пройти через стопку наклоненных стекол, то полос не будет видно, как бы мы ни вращали плоскость наклона стопки.

Вместо стопки можно пользоваться ромбоэдром известкового шпата; если главное сечение его наклонить на сорок пять градусов к плоскостям поляризации падающих пучков, чтобы оно таким образом разделяло на две равные части образуемый ими угол, то каждое изображение будет содержать в себе половину от каждого пучка, и эти обе половины, имея одинаковую плоскость поляризации в одном и том же изображении, должны были бы дать в нем полосы, если бы было достаточно привести лучи к одной общей плоскости поляризации для того, чтобы восстановить проявление их взаимодействия. Но таким образом никогда не удастся получить полосы; чтобы получить их, лучи должны быть поляризованными по одной плоскости, прежде чем они разделяются на два поляризованные под прямым углом пучка.

70. Если свет был подвергнут этой предварительной поляризации, то, наоборот, при вставлении ромбоэдра полосы получаются вновь. Самое выгодное направление, которое следует придать первоначальной плоскости поляризации, будет направление, разделяющее на две равные части угол между взаимно перпендикулярными плоскостями, по которым происходит вторичная поляризация обоих пучков, ибо в этом случае падающий свет равномерно распределяется между ними. Для большей определенности предположим, что первоначальная плоскость поляризации горизонтальна; нужно, чтобы плоскости поляризации, которые вслед за этим будут даны каждому из двух пучков, были наклонены на сорок пять градусов к горизонтальной плоскости, одна кверху, другая книзу, так, чтобы они оставались перпендикулярными между собой. Эту взаимно перпендикулярную поляризацию можно получить или с помощью двух маленьких стопок, которыми пользуются в опыте господина Драго, или с двумя пластинками, оси которых расположены под прямым углом, или же, наконец, с помощью одной только кристаллической пластинки; мы рассмотрим только этот последний случай, так как два других дают совершенно аналогичные явления.

71. Если желательно разделить свет на два пучка, которые пересекаются под небольшим углом и которые, таким образом, могут дать место образованию полос, то, вообще говоря, лучше

---

пользоваться аппаратом с двумя зеркалами, чем экраном с проделанными в нем двумя щелями, так как первый аппарат дает более блестящие полосы; кроме того, он имеет преимущество сразу давать обоим пучкам ту предварительную поляризацию, которая необходима для нашего опыта; для этого достаточно, чтобы оба зеркала были сделаны из непокрытого зеркальным слоем стекла и наклонены приблизительно на 35 градусов к падающим лучам; для того, чтобы уничтожить вторичное отражение, нужно позаботиться о том, чтобы стекла были вычернены сзади. Вблизи от них на пути отраженных лучей и перпендикулярно к их направлению помещают пластинку сернокислой извести или горного хрусталя, высеченную параллельно оси и толщиной в один или два миллиметра; ее главное сечение наклоняют на сорок пять градусов к первоначальной плоскости поляризации, которую мы предполагаем горизонтальной. При таком расположении аппарата через пластинку будет видна всего только одна группа полос, так же, как если бы пластинки не было вовсе, и положение группы будет такое же. Но если перед лупой поместить стопку стекол, наклоненных в горизонтальном или вертикальном направлении, то с каждой стороны центральной группы обнаружится другая группа полос, которая будет тем более удалена, чем толще будет кристаллическая пластинка. Если же заменить стеклянную стопку ромбоэдром известкового шпата, главное сечение которого направлено вертикально или горизонтально, то можно видеть, в каждом из даваемых им изображений, обе системы дополнительных полос, которые получались, когда мы вставляли стеклянную стопку; следует заметить, что оба изображения дополнены друг к другу, т. е. темные полосы одного из них соответствуют блестящим полосам другого.

72. В этом опыте мы видим новое подтверждение принципов, доказанных в предшествующих опытах. Лучи, испытывавшие разноименные преломления, не могут действовать друг на друга, так как, выходя, в рассматриваемом нами теперь случае, из одной и той же пластинки, они оказываются поляризованными по взаимно перпендикулярным направлениям; следовательно, правая и левая группы существовать не могут, если только не восстановить взаимодействия между лучами,

приведя их к одной общей плоскости поляризации; последнее осуществляется вставлением стеклянной стопки или ромбоэдра. Таким образом получаемые полосы будут тем более резкими, чем лучше будет равенство по интенсивности разноименных пучков, их образующих; вот почему направление главного сечения ромбоэдра, которое соответствует углу в сорок пять градусов с осью пластинки, будет наиболее благоприятным для появления полос. Если главное сечение ромбоэдра параллельно или перпендикулярно главному сечению пластинки, то лучи, преломленные пластинкой обыкновенным образом, целиком проходят в одно изображение, вместо того, чтобы разделиться между двумя изображениями; все же необыкновенные лучи проходят в другое изображение, и между ними не может быть более интерференции; добавочные группы исчезают, и каждое изображение показывает только те полосы, которые получаются от интерференции одноименных лучей, т. е. лучей, составляющих центральную группу.

73. Обе эти группы добавочных полос, которые наблюдаются в поляризованном свете при первом положении ромбоэдра, дают один из наиболее точных способов измерения двойного лучепреломления и изучения его законов. В самом деле, боковое положение их зависит от разности хода обыкновенных лучей, выходящих из пластинки; о том числе волн, на которое необыкновенные лучи правого пучка отстают от обыкновенных лучей левого, можно судить по тому, сколько раз ширина полос укладывается между серединой правой группы и серединой центральной группы; еще лучше можно определить эту разность хода, если измерить промежуток, заключенный между серединами двух крайних групп, который равняется их удвоенному расстоянию от середины центральной группы. Для подобных наблюдений удобнее всего пользоваться белым светом; во-первых, он наиболее блестящий, и, во-вторых, с его помощью легче всего узнать центральную полосу каждой группы.\* Сравнивая затем толщину пластинки

\* Строго говоря, в таком случае измеряется двойное преломление одних только самых блестящих лучей, т. е. желтых лучей; но это и будет как раз среднее двойное преломление; кроме того, двойные преломления других лучей, вообще говоря, мало отличаются от него.

с наблюдаемой разностью хода, можно вывести отсюда отношение скоростей лучей обыкновенных и необыкновенных.

С помощью только что описанного мною аппарата, я и произвел совместно с господином А р а г о подобного рода опыт с пластинкою горного хрусталя, высеченной параллельно оси, и результат наших измерений дал нам ту же разницу скорости между обыкновенными и необыкновенными лучами, какую господин Б и о нашел, непосредственно наблюдая угол расхождения этих лучей в призме из горного хрусталя. \* В тех случаях, когда требуется измерить двойное преломление в кристаллах, которые, как, например, углекислая известь, горный хрусталь, сернокислая известь и т. д., обладают им в высокой степени, способ господина Б и о не уступает нашему в точности; но для тех веществ, в которых двойное преломление значительно слабее, способ даваемый диффракцией предпочтительнее: если взять пластинку достаточно толстую, то разность хода обоих родов лучей можно определить почти с безграничной точностью; при этом даже не нужно, чтобы пластинка была бы очень толста для того, чтобы точность результатов достигла уже весьма высокой степени; в самом деле, таким образом легко обнаружить разности в одну пятидесятую волны, т. е. в одну десятитысячную миллиметра. Для лучей, направление которых очень близко к направлению оси, этот метод мог бы также послужить очень чувствительным способом для проверки закона Г ю й г е н с а. Благодаря совпадению результатов господина Б и о с нашими, мы еще раз видим здесь, как многочисленны те соотношения, которые принцип интерференции устанавливает между всеми явлениями оптики.

74. Мы предположили, что свет поляризуется в кристаллических пластинках совершенно так же, как и в самых толстых кристаллах, т. е. что лучи, испытывающие обыкновенное преломление, поляризуются по главному сечению, а другие по перпендикулярной к нему плоскости. Эта гипотеза, на которую указывает аналогия, должна быть оставлена только в том случае, если она окажется в противоречии с фактами;

\* Biot, Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut, 1818, t. III, p. 177.

но, делая из нее соответствующие выводы с целью узнать, какого рода пучки должны действовать друг на друга и давать полосы, мы всегда видели, что результаты наблюдений сходятся с ней. Кроме того, употребляемые нами пластинки, имея по крайней мере один миллиметр толщины, могли быть отшлифованы под косым углом на своих краях и разделять вследствие этого обыкновенные и необыкновенные пучки друг от друга, которые оказывались тогда поляризованными параллельно и перпендикулярно к главному сечению. Было бы совсем невероятно, чтобы подобного рода поляризация происходила вследствие небольшого угла, который образуют между собою обе грани кристалла, разделяющего свет на два отдельных пучка, как только этот угол составляет всего только десять градусов; в самом деле, стеклянная призма, образующая такой же угол, благодаря взаимному наклону своих граней, только незаметным образом поляризует прошедший через нее свет, причем если бы поляризация и была более сильной, то свет был бы поляризован перпендикулярно к плоскости падения. Таким образом, если рассматривать поляризующее действие кристаллической призмы, как состоящей, вообще говоря, из двух частей, — одной, зависящей от взаимного наклона ее граней, и другой, происходящей от двойного преломления, — то только этой последней можно приписать поляризацию обоих пучков в направлениях параллельном и перпендикулярном главному сечению; отсюда следует заключить, что характер поляризации обоих пучков будет такой же и в том случае, когда параллелизм граней мешает их различать, так как он ничего не меняет в законах двойного преломления.

75. Эти выводы, которые так хорошо согласуются с правилами аналогии, все же не были приняты господином Био, который предполагает, что в тонких кристаллических пластинках и даже в таких пластинках, толщина которых достигает нескольких миллиметров, характер поляризации света совсем иной, чем тот, который обнаруживается в кристалле, достаточно толстом для того, чтобы разделить свет на два различных пучка. Мнение этого ученого физика имело для меня достаточно большое значение, для того, чтобы заставить меня, с помощью еще новых опытов, проверить направление

---

поляризации обыкновенных и необыкновенных лучей в кристаллических пластинках; но результаты, которые я получал, всегда оказывались в согласии с гипотезой, на которую указывает аналогия.

76. Я поместил две половинки пластинки из сернокислой извести, приблизительно в один миллиметр толщиной, перед двумя щелями, проделанными в экране; я повернул эти пластинки так, чтобы их оси были перпендикулярны между собой, как это соответствует уже указанному мною расположению, затем, с помощью ромбоэдра из углекислой извести, я старался найти направление поляризации в каждой из двух образованных ими групп полос. Мы видели, что правая группа, вследствие известных законов интерференции, получается как неизбежное последствие от соединения необыкновенных лучей правой группы с обыкновенными лучами левой, так как последние идут в сернокислой извести более быстро, чем первые; значит, эта группа должна быть поляризована перпендикулярно главному сечению правой пластинки, так как это направление поляризации будет одновременно направлением поляризации обыкновенных лучей левой пластинки и необыкновенных лучей правой, что следует из расположения пластинок; кроме того, может быть доказано непосредственно из опытов с интерференцией двух пучков, поляризованных в одной и той же плоскости, что полосы, с ними полученные, всегда поляризованы по той же плоскости. Точно так же правая группа, которая получается вследствие интерференции обыкновенных лучей правой пластинки с необыкновенными лучами левой, будет поляризована перпендикулярно главному сечению левой пластинки. Эти выводы, сделанные из нашей гипотезы, вполне согласуются с опытом; в самом деле, если главное сечение ромбоэдра, помещенного перед лупою, параллельно оси правой пластинки, то оказывается, что обыкновенное изображение содержит одни только полосы левой группы, а необыкновенное изображение — одни только полосы правой; наоборот, когда главное сечение ромбоэдра параллельно оси левой пластинки или перпендикулярно к оси правой, то в обыкновенном изображении исчезает левая группа, а в необыкновенном правая.

77. Мы видим, что обыкновенные и необыкновенные лучи в данном случае различаются не разностью их направления, как в случае кристалла, высеченного в виде призмы, но разницей в производимой ими интерференции. Так, например, в пространстве, которое занято полосами правой группы, происходящей вследствие интерференции необыкновенных лучей правой пластинки с обыкновенными лучами левой, проходят одновременно и необыкновенные лучи правой и обыкновенные лучи левой, которые, будучи поляризованы по одному общему направлению, непременно должны действовать друг на друга, но все же они не дают заметных полос, так как разница хода их оказывается в этом месте слишком большой, или, другими словами, по той причине, что они слишком удалены от центральной группы, расположенной для этих двух пучков в левой стороне; в самом деле, мы видели, что в белом свете можно различать вблизи от центральной полосы только весьма ограниченное число полос, и что за пределами полос 7-го или 8-го порядка соединение обоих пучков дает лишь однородный свет. В каждой точке освещенного пространства всегда имеются одновременно обыкновенные и необыкновенные лучи каждой пластинки, но одни из них, интерферируя с лучами противоположного наименования, образуют заметные полосы, тогда как другие приносят с собой лишь однородный свет; это обстоятельство как раз и позволяет различать их и судить о направлении их поляризации.\*

78. Показав, что эти явления интерференции подтверждают принятую нами гипотезу, мы докажем теперь, что они находятся в противоречии с остроумной теорией подвижной

\* Если оба интерферирующих пучка поляризованы по одному направлению, то, как мы уже сказали, полосы их также будут поляризованы по тому же направлению; но если они поляризованы по двум различным направлениям, образующим между собой острый угол, то и образуемые ими более слабые полосы поляризованы одновременно по обоим направлениям, т. е. они исчезают из необыкновенного изображения независимо от того, будет ли главное сечение ромбоэдра параллельно первому или второму направлению; причину этого легко понять, ибо как в одном, так и в другом случае один из двух интерферирующих пучков исключается из необыкновенного изображения, которое, следовательно, и может дать один только однородный свет.

---

поляризации, главные принципы которой мы сначала напомним.

Господин Био предполагает, что если поляризованный пучок проходит через кристалл, обладающий свойством двойного преломления и главное сечение которого не параллельно и не перпендикулярно первоначальной плоскости поляризации, то оси светящихся молекул, сначала направленные по этой плоскости, испытывают затем при проникновении в кристалл некоторое колебание, которое попеременной относит их влево и вправо от главного сечения, то по направлению к первоначальной плоскости, то к плоскости, расположенной с другой стороны на таком же угловом расстоянии, которое он называет азимутом  $2i$ , обозначая через  $i$  угол, образуемый главным сечением с первоначальной плоскостью, от которой считаются все азимуты. Так, например, если главное сечение образует с первоначальной плоскостью поляризации угол в  $45$  градусов, то оси молекул будут периодически отклоняться от этой плоскости к другой, наклоненной по отношению к главной плоскости также на угол в  $45$  градусов, и, следовательно, перпендикулярной к первой; в этом частном случае  $2i$  равно  $90$  градусам. Господин Био предполагает, что эти колебания повторяются очень большое число раз, прежде чем световые молекулы принимают постоянную поляризацию, которая устанавливает их оси параллельно и перпендикулярно главному сечению; по мнению этого искусного физика, для горного хрусталя и для сернокислой извести требуется толщина в несколько миллиметров и даже в несколько сантиметров для того, чтобы подвижная поляризация превратилась в постоянную; по меньшей мере это необходимо, до тех пор, пока параллелизм граней входа и выхода не препятствует разделению обыкновенного и необыкновенного пучков, что всегда сопровождается постоянной поляризацией. Но если грани параллельны и толщина пластинки не превышает только что указанные пределы, то прошедшие через нее световые молекулы, вместо того, чтобы быть поляризованы по главному сечению или перпендикулярно к нему, будут в конце концов поляризованы по первоначальной плоскости или по азимуту  $2i$ , смотря по тому, будут ли их оси отклонены при последнем колебании

к первой или ко второй плоскости, и независимо от того, будет ли это колебание в момент их выхода уже закончено или же только начинаться; в ромбоэдре, который служит для анализа выходящего света, они, по мнению господина Био, во всяком случае ведут себя так, как если бы их последнее колебание было уже закончено. Продолжительность этих колебаний или толщина кристаллического слоя, в котором они совершаются, постоянна для световых молекул одного и того же сорта, но меняется от одного рода их к другому пропорционально их приступам.

Последуем теперь за выводами этой теории; рассмотрим тот случай, когда обе половинки пластинки из сернокислой извести, толщиной в один или два миллиметра, помещены на пути отраженных лучей перед двумя зеркалами из темного стекла. Предположим, что оба зеркала, расположенные так, чтобы получались полосы, кроме того, наклонены еще на 35 градусов по отношению к лучам, исходящим из светящейся точки; таким способом лучи окажутся вполне поляризованными еще до входа их в кристаллические пластинки, как в ранее описанном нами приборе; предположим, кроме того, что оси обеих пластинок перпендикулярны между собой и образуют каждая угол в 45 градусов с плоскостью отражения. По теории подвижной поляризации, все выходящие лучи должны быть поляризованы параллельно или перпендикулярно этой плоскости, которая будет плоскостью первоначальной поляризации; таким образом, каждая из двух групп полос, наблюдаемых слева и справа, получается от интерференции двух пучков, которые одновременно поляризованы по этой плоскости или по перпендикулярному к ней направлению, ибо полосы не могут получаться от интерференции лучей, поляризованных по этой плоскости, с лучами, поляризованными по перпендикулярному направлению; следовательно, если бы обе группы полос могли обнаружить признаки поляризации, то это могло бы быть только в одном или в другом из этих взаимно перпендикулярных направлений; но опыт находится в противоречии с этим выводом настолько, насколько опыт ему вообще может противоречить, так как именно тогда, когда главное сечение ромбоэдра направлено по одному из этих направлений, интенсив-

ность обоих изображений каждой группы оказывается одинаковой; и для того, чтобы одно из них исчезало, необходимо, чтобы главное сечение ромбоэдра, наоборот, образовывало угол в 45 градусов с этими направлениями, т. е. чтобы оно было параллельно или перпендикулярно к главным сечениям обеих пластинок. Когда оно параллельно главному сечению левой пластинки, то из обыкновенного изображения исчезает левая группа, а когда оно параллельно главному сечению правой пластинки, то исчезает правая. Мы видим, что направление поляризации полос такое же, как в нами ранее изложенном опыте, в котором падающий свет до прохождения через кристаллические пластинки не подвергался предварительной поляризации. Таким образом, независимо от того, пользуются ли обыкновенным светом или поляризованным, обыкновенные и необыкновенные пучки, на которые свет разделяется при прохождении через кристаллическую пластинку, всегда оказываются поляризованными—первый по главному сечению, а второй перпендикулярно к нему.

79. До этих пор мы пользовались пластинками толщиной, по крайней мере, в один миллиметр и постоянно находили, что обыкновенные и необыкновенные лучи имеют такое же направление поляризации, как и в том случае, когда они разделяются на два отдельных пучка. Представляло также интерес убедиться с помощью интерференции в том, что тот же характер поляризации имеет еще место для значительно более тонких пластинок, например, для пластинок, окрашенных поляризованным светом, когда анализируют его при его выходе с помощью ромбоэдра из известкового шпата; как раз эти явления окрашивания и привели господина Био к противоположному мнению. Для этой цели я взял пластинку сернокислой извести в два или три десятых миллиметра толщины; она сильно окрашивалась и все же была достаточно толстой для того, чтобы нельзя было смешать правую и левую группы; разделив ее на две половинки, я расположил каждую из них, как было указано выше. Обе группы полос не были на этот раз вполне отделены друг от друга, как в случае пластинок, имевших в толщину один миллиметр, но немного смешивались между собой в промежуточном пространстве; тем не менее, в каждой из них

---

было не трудно различить полосы трех первых порядков и убедиться в том, что, например, правая группа была поляризована перпендикулярно к оси правой пластинки; в самом деле, если главное сечение ромбоэдра поворачивали по этому направлению, то она совершенно исчезала из необыкновенного изображения; когда же вместо ромбоэдра перед лупой помещали стеклянную стопку, достаточно наклоненную в том же направлении, то можно было различить одну только левую группу, которая оказывалась совершенно чистой от примеси полос правой группы и имела обычный вид одной единственной группы. Если производить опыты с двумя металлическими зеркалами и если уничтожить слабую поляризацию, которую они передают отраженным лучам, с помощью стопки из трех или четырех стекол, соответствующим образом наклоненных, что нужно сделать прежде, чем лучи попадут в пластинки, то направление поляризации для каждой группы полос опять окажется тем же самым. Таким образом, вполне доказано, что как в одном, так и в другом случае тонкие пластинки поляризуют обыкновенные и необыкновенные лучи параллельно и перпендикулярно к оси пластинок.

Показав, что гипотеза подвижной поляризации противоречит фактам всякий раз, когда можно каким-нибудь способом отличить обыкновенные лучи от необыкновенных, я займусь теперь специально явлениями окрашивания кристаллических пластинок, которые привели господина Био к этой гипотезе, и покажу, что она не необходима для их объяснения.

## ОКРАШИВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНОК

80. Когда пучок поляризованного света проходит через ромбоэдр известкового шпата, главное сечение которого параллельно плоскости поляризации, то известно, что необыкновенное изображение исчезает; оно появляется снова, когда перед ромбоэдром помещают кристаллическую пластинку, обладающую свойством двойного преломления и главное сечение которой не параллельно и не перпендикулярно к первоначальной плоскости поляризации; его интенсивность будет даже равна интенсивности обыкновенного изображения, если главное сечение образует угол в  $45^\circ$  с первоначальной плоскостью. В этом случае, так же как и в других случаях, оба изображения будут белыми, если только промежуточная пластинка достаточно толста, если, например, для горного хрусталя и сернокислой извести ее толщина составляет по крайней мере полмиллиметра; но если пластинка более тонкая, то оба изображения окрашиваются в дополнительные оттенки, род которых меняется в зависимости от толщины пластинки, и которые меняются только в интенсивности, если вращать пластинку в своей плоскости, оставляя ее все время перпендикулярной к падающим лучам.

Это блестящее открытие, которым мы обязаны господину Араго,\* уже несколько лет как сильно занимает всех физиков Европы, в особенности же господ Био, Юнга и Брюстера, которые наиболее содействовали изучению законов

\* Мемуар о замечательном изменении, которое испытывают световые лучи при их проходе через некоторые тела, и о некоторых других явлениях оптики (Mémoires de la Classe des Sciences physiques et mathématiques de l'Institut, t. XIII, p. 93).

этих явлений. Господин Био первый заметил,\* что цвета кристаллических пластинок следуют по отношению к их толщине законам, аналогичным законам окрашивания цветных колец, т. е. что толщины двух кристаллических пластинок одного и того же рода, которые показывают два каких-нибудь оттенка, относятся между собой так же, как толщины двух воздушных пластинок, дающих при отражении в цветных кольцах такие же оттенки. Вскоре после опубликования прекрасных Мемуаров господина Био, господин Юнг заметил,\*\* что разница хода между обыкновенными и необыкновенными пучками, выходящими из кристаллической пластинки, как раз равняется разности хода между лучами, отраженными от первой и второй поверхности воздушной пластинки, дающей тот же оттенок, и что это численное тождество сохраняется при всех наклонах лучей по отношению к оси кристалла. Это чрезвычайно важное теоретическое наблюдение, на которое во время его опубликования, повидимому, обратили мало внимания, давало, тем не менее, новое доказательство общности и плодотворности принципа интерференции, так как оно устанавливало самое тесное численное соотношение между двумя родами явлений, весьма различными как вследствие большой разницы между толщиной кристаллических пластинок и толщиной воздушных пластинок в цветных кольцах, дающих те же оттенки, так и вследствие разнообразия обстоятельств, необходимых для их получения.

Господин Юнг ограничился тем, что показал своими вычислениями, что цвета кристаллических пластинок должны быть приписаны интерференции обыкновенных волн с необыкновенными; он не объяснил, при каких обстоятельствах эта интерференция может иметь место, почему необходимо, чтобы свет, прежде чем войти в кристаллическую пластинку, был уже предварительно поляризован и был бы снова поляризован по выходе из пластинки; он не объяснил затем, каким образом интенсивность оттенков менялась с изменением относительных направлений первоначальной плоскости главного се-

\* *Traité de physique experimentale et mathématique* и *Mémoires de la Classe physiques et mathématiques de l'Institut*, t. XIII.

\*\* *Quarterly Review*, май 1814.

чения пластинки и главного сечения ромбоэдра, и т. д. Главная задача Мемуара, который я представил Академии Наук 7 октября 1816 года, и добавления, которое я прибавил в январе 1818 года, состояла в том, чтобы разъяснить влияние всех этих различных обстоятельств и выразить законы явления с помощью общих формул, которые давали бы для каждого изображения интенсивность различного рода окрашенных лучей; я изложу теперь эту теорию, причем, как и раньше, буду выводить из опыта принципы, на которых она основывается. Для того, чтобы свести явления к их наибольшей простоте, я предположу, что употребляемый свет однороден.

Если расходящиеся лучи, излучаемые светящейся точкою, поляризовать отражением от стекла, вычерненного с обратной стороны, и затем заставить пройти через два ромбоэдра одинаковой толщины, помещенные один перед другим и расположенные так, чтобы их главные сечения, будучи перпендикулярны между собой, были б в то же время наклонены на  $45^\circ$  к плоскости отражения, то, как известно, оба пучка, получающиеся соединением этих ромбоэдров, могут давать полосы только в том случае, если их привести к общей плоскости поляризации с помощью третьего ромбоэдра или же стеклянной стопки, помещенной впереди или позади лупы. Наиболее выгодным направлением главного сечения третьего ромбоэдра будет направление, образующее угол в  $45^\circ$  с главными сечениями двух других, так как в таком случае каждый из двух пучков, выходящих из этих последних ромбоэдров, поровну разделяется между обыкновенными и необыкновенными изображениями, даваемыми третьим ромбоэдром; это равенство двух систем волн, интерферирующих в каждом изображении, делает насколько возможно более темными точки полного расхождения. Они были бы даже совсем черными, если бы применяемый свет был вполне однороден. Если, при таком расположении прибора, рассматривать какую-нибудь одну точку в группе полос, например, точку, занимающую центр ее и соответствующую равным путям, пройденным обоими пучками, образующими каждое изображение, то окажется, что в обыкновенном изображении будет максимум света, когда главное сечение ромбоэдра параллельно первоначальной плоскости поля-

ризации, которую для большей определенности я предположу горизонтальной, и что та же самая точка, наоборот, будет совершенно черной в необыкновенном изображении, т. е. свет в нем будет сведен к нулю. Если вращать ромбоэдр, этот свет появляется снова, и его интенсивность увеличивается по мере того, как главное сечение ромбоэдра удаляется от горизонтального направления; когда главное сечение наклонено на  $45^\circ$ , то свет в этой точке имеет в необыкновенном изображении такую же интенсивность, как и в обыкновенном; наконец, свет совсем исчезает из обыкновенного изображения и достигает в то же время своего максимума в другом изображении, когда главное сечение вертикально. Мы видим, значит, что весь соединяющийся в этой точке свет обнаруживает все признаки полной поляризации по горизонтальной плоскости. Если рассматривать теперь точку, которая соответствует разнице в четверть волны в ходе обоих пучков, то окажется, что при вращении ромбоэдра она все время сохраняет в обоих изображениях одинаковые интенсивности, и что ее свет как бы вполне лишен поляризации. Если перейти теперь к точке, которая соответствует разности хода в одну полуволну между обеими системами волн, то она окажется совершенно черной в обыкновенном изображении и с максимумом блеска в необыкновенном, если главное сечение ромбоэдра горизонтально, и сделается, наоборот, совершенно темной в необыкновенном изображении и достигнет максимума блеска в другом, если оно вертикально; таким образом весь сходящийся в этой точке свет поляризован вертикально. Если последовательно рассматривать различные точки интерференции обоих световых пучков, то, вообще говоря, окажется, что при соединении их получается вполне поляризованный\* по гори-

\* Совершенно полная поляризация существует на первый взгляд только в полосах трех первых порядков; но очевидно, что если середины темных и блестящих полос других порядков кажутся поляризованными только частично, то это зависит от недостатка однородности употребляемого света, который нельзя сделать более простым, не ослабив его слишком при этом.

Господин Араго придумал весьма удобный способ, позволяющий в опытах с дифракцией значительно увеличить силу света; его можно с выгодой применить в занимающих нас случаях. Он состоит в том, что вместо маленькой линзы, образующей световую точку, берут линзу, поверх-

горизонтальной плоскости свет, т. е. свет, поляризованный по первоначальной плоскости поляризации, если разность хода их равна нулю или четному числу полуволн; весь свет будет поляризован вертикально, т. е. в данном случае по азимуту  $2i$ , если разность хода равна нечетному числу полуволн; наоборот, весь свет будет вполне деполаризирован, если эта разность равняется четному или нечетному числу четвертей волн; наконец, во всех промежуточных случаях имеется только частичная поляризация. Для того, чтобы с большим удобством изучать род поляризации в различных линиях, в которых колебательные движения сходятся или расходятся, нужно остановить свое внимание на той линии, которую желают наблюдать, поместив в соответствующем месте нить, находящуюся в фокусе лупы микрометра, или, еще лучше, взяв вместо этой нити экран с проделанной в нем очень маленькой щелью, которая пропускает свет только от этой части полосы. Горизонтальной или вертикальной поляризации в точках, в которых колебательные движения находятся в полном согласии или расхождении, больше не будет, если один из пучков заслонить и если в щель будет попадать свет от одного только другого пучка; в этом случае свет окажется поляризованным так же, как поляризован этот другой пучок, т. е. по направлению, наклоненному в  $45^\circ$  к горизонтальной плоскости. Таким образом, поляризация по первоначальной плоскости или по азимуту  $2i$  происходит при соединении обоих пучков и не имеет больше места в каждом пучке, взятом в отдельности, которые всегда оказываются поляризованными параллельно или перпендикулярно главным сечениям двух ромбоэдров, что можно наблюдать или с помощью лупы, засло-

ность которой имеет кривизну только в одном направлении и которая дает тогда в своем фокусе вместо светящейся точки светящуюся линию; чтобы полосы имели возможно наибольшую резкость, нужно, чтобы эта цилиндрическая линза была повернута по направлению, параллельному направлению полос; это легко достигается пробам, если смотреть на полосы с лупою в то время, как кто-нибудь другой медленно вращает цилиндрическую линзу. Полосы в этом случае несравненно более блестящи, чем если пользоваться сферической линзой, так как цилиндрическая линза рассеивает лучи только по одному направлению и таким образом сохраняет за ними значительно больше интенсивности.

няя один из пучков, или без лупы, что дает тогда возможность различать обе светящиеся точки и изучать отдельно направление поляризации каждой из них, не закрывая при этом другую. Лупа не позволяет видеть раздельно обе светящиеся точки, так как расширяет их изображения, которые смешивают их лучи в глубине глаза, где она воспроизводит интерференции, происходившие сначала в ее фокусе; вот почему она необходима для того, чтобы явления интерференции были видимы в тех случаях, когда оба изображения светящейся точки не совпадают, или, другими словами, в тех случаях, когда обе интерферирующие системы волн образуют между собой заметный угол. Кроме того, можно убедиться в том, что лупа не производит здесь никакого другого действия, и что ею не возбуждается никакой заметной поляризации, если через нее наблюдать пучок лучей, поляризованный по какому-нибудь известному направлению, ибо тогда окажется, что с помещением лупы ничего в поляризации не изменится. Таким образом, только что наблюденная нами поляризация по первоначальной плоскости и по азимуту  $2i$  происходит исключительно благодаря соединению обоих пучков, выходящих из скрещенных ромбоэдров.

82. \* Если вращать оба ромбоэдра, оставляя их главные сечения все время перпендикулярными между собой, то при всех положениях системы можно будет заметить, что линии полос, соответствующие разности хода, равной четному числу полуволн, поляризованы параллельно первоначальной плоскости, и что линии, соответствующие разности хода, равной нечетному числу полуволн, поляризованы по азимуту  $2i$ , и, наконец, что все другие линии показывают только частичную поляризацию.

Опыт с двумя ромбоэдрами дает нам замечательный пример лучей, поляризованных по двум взаимно перпендикулярным плоскостям и образующих в своем соединении свет, вполне поляризованный по некоторому промежуточному направлению; это еще раз подтверждает гипотезу, о которой мы уже говорили по поводу закона Малуса, и по которой световые

\* Счет ведется по французскому изданию труда Френеля 1924 года.  
*Прим. Ред.*

колебания совершаются в поперечном направлении параллельно или перпендикулярно к плоскости поляризации.

83. Тонкие кристаллические пластинки показывают аналогичные явления при тех же обстоятельствах, т. е. тогда, когда лучи до входа в кристаллическую пластинку были поляризованы по некоторой общей плоскости и когда разность хода в обеих волновых системах при выходе из пластинки была равна целому числу полуволен; если это число четное, то весь свет, выходящий из кристаллической пластинки, оказывается поляризованным по первоначальной плоскости; если оно нечетное, то он поляризован по азимуту  $2i$ ; так, например, если угол  $i$  равен  $45^\circ$ , т. е. если ось пластинки образует угол в  $45^\circ$  с первоначальной плоскостью, то весь свет будет поляризован, в первом случае — по первоначальной плоскости под углом  $45^\circ$  к оси, а во втором случае — по азимуту  $90^\circ$  или перпендикулярно к нему; но из того, что весь свет оказывается, таким образом, поляризованным, не следует заключать, что таким же будет и направление поляризации составляющих его обыкновенных и необыкновенных лучей, как мы это только что видели на опыте с двумя ромбоэдрами.

В самом деле, обстоятельства, сопровождающие явления, аналогичны; единственная разница состоит в том, что в то время, как обе системы волн, выходящие из кристаллической пластинки, параллельны между собой, те, которые выходят из ромбоэдров, пересекаются под заметным углом; отсюда возникает необходимость пользоваться светящейся точкой и лупой для того, чтобы сделать заметными проявления их интерференции. Но, кроме того, в силу этого заметного угла, они сразу показывают в различных точках образуемые ими группы полос всевозможной разности хода и таким образом соединяют в одной единственной картине все случаи, которые могут дать кристаллические пластинки различной толщины.

Господин Био, руководствуясь теорией испускания, не мог подозревать, что свет, поляризованный по некоторой плоскости, мог состоять из лучей, поляризованных по различным направлениям, и, естественным образом, судил о направлении поляризации выходящих из кристаллической пластинки обыкно-

венных и необыкновенных лучей по поляризации всего света. Это и заставило его думать, что лучи в кристаллических пластинках не подвергаются такой же поляризации, как в кристаллах, достаточно толстых для того, чтобы разделить свет на два отдельных пучка. Но последнее обстоятельство вовсе не является необходимым выводом из этого явления, так как опыт с двумя ромбоэдрами показывает, что те же видимые результаты получаются при соединении двух отдельных пучков, поляризованных параллельно и перпендикулярно главному сечению кристалла; эта гипотеза была бы, кроме того, в противоречии с другими фактами, так как мы всегда находили, что в кристаллических пластинках обыкновенные и необыкновенные лучи поляризованы параллельно и перпендикулярно главному сечению. Таким образом, то, что господин Био говорит о роде поляризации света, прошедшего через кристаллическую пластинку, следует применять не к обыкновенным и необыкновенным лучам, рассматриваемым в отдельности, но к совокупности этих лучей; кроме того, чтобы сделать предположение, высказанное этим знаменитым физиком, вполне точным, нужно его еще видоизменить, так как из той формы, в какой он его высказывает, может показаться, что однородные лучи каждого рода всегда целиком поляризованы по первоначальной плоскости или азимуту  $2i$ ; но в опыте с двумя ромбоэдрами мы видели, что поляризация оказывается полной только в отдельных частных случаях; и непосредственный опыт с кристаллическими пластинками приводит к тому же результату.

84. Все происходящие в кристаллических пластинках явления можно легко объяснить и даже предсказать заранее с помощью обыкновенных правил, по которым вычисляются интерференции, и с помощью небольшого числа частных законов, которые относятся к взаимному влиянию друг на друга поляризованных лучей и которые мы вывели из опыта.

Лучи, поляризованные под прямым углом, не влияют друг на друга; вот почему обе системы волн, которые выходят из кристаллических пластинок, не обнаруживают непосредственно никакого подобного влияния, даже в том случае, если разность

хода настолько мала, что эти действия должны были бы быть очень заметными и давать в белом свете очень яркие цвета.\*

Для того, чтобы это взаимное влияние имело место, недостаточно, чтобы поляризованные под прямым углом лучи были приведены к одной общей плоскости поляризации; нужно еще, чтобы они с самого начала были поляризованы по одной плоскости; отсюда возникает необходимость пользоваться поляризованным светом, если желают получить цвета в кристаллических пластинках.

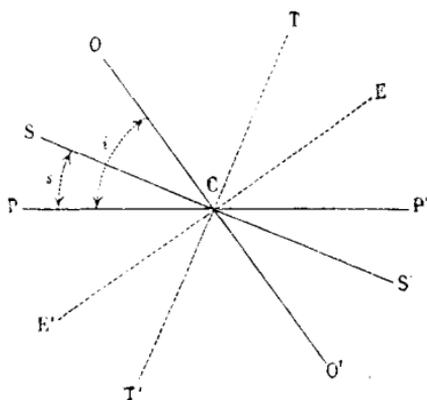
В опыте со скрещенными ромбоэдрами мы видели также, что если оба световых пучка, получившиеся сначала из одной и той же плоскости поляризации, оказываются затем поляризованными под прямым углом, то, проходя через новый ромбоэдр, который приводит их к общей плоскости поляризации, они дают два дополнительных изображения; в самом деле, если центральная полоса была, например, черной в необыкновенном изображении, то она оказывалась в максимуме своего блеска в обыкновенном изображении, и точно такая же противоположность замечалась между всеми блестящими и темными полосами в обоих изображениях. Оба изображения, которые дает поляризованный свет, прошедший через тонкую кристаллическую пластинку, должны быть, значит, также дополнительными. Отсюда с необходимостью следует, что если одно из них соответствует некоторой разности хода обеих систем волн, выходящих из кристаллической пластинки, то другое соответствует той же разности хода, но увеличенной или уменьшенной на одну полуволну, ибо если в одном изображении имеется полное согласие колебаний, то в другом их полное расхождение.

85. Вот общее правило, которое позволяет узнать, в котором из двух изображений нужно прибавить одну полуволну к разности пройденных путей: *изображение, окраска которого как раз соответствует разности пройденных путей, будет*

\* Нужно вспомнить о необходимости, чтобы разность хода составляла всего только небольшое число колебаний, для того, чтобы различные степени интенсивности, определяемые ею в волнах различной длины, вызвали заметную окраску; мы обратили на это внимание, когда объясняли окрашивание полос, получающихся с двумя зеркалами или с отраженными кольцами.

изображением, в котором плоскости поляризации обоих составляющих его пучков, отклонившись сначала друг от друга, сближаются затем, двигаясь в противоположном направлении, и, наконец, совпадают; наоборот, плоскости поляризации, образующие дополнительные изображения, продолжают удаляться друг от друга (если рассматривать их с одной стороны их общей прямой пересечения) до тех пор, пока они не окажутся продолжением одна другой.

Это правило будет легче понять с помощью чертежа 5, в котором  $PP'$  означает первоначальную плоскость поляризации падающих лучей,  $OO'$  главное сечение кристаллической пластинки и  $SS'$  главное сечение ромбоэдра, через который на пластинку смотрят.



Черт. 5.

Мы видим, что падающий свет, поляризованный сначала по  $CP$ , разделяется при прохождении через кристаллическую пластинку на две части; одна из них испытывает обыкновенное преломление и приобретает новую поляризацию по  $CO$ ; другая испытывает необыкновенное преломление и оказывается поляризованной в плоскости  $CE$ , перпендикулярной к  $CO$ . Представим первую через  $F_o$ , а вторую через  $F_c$ . Прохождение через ромбоэдр разделяет часть  $F_o$ , поляризованную по  $CO$ , на две другие системы волн: одну, поляризованную по главному сечению  $CS$ , и я ее обозначу через  $F_o + o'$ , и на другую, поляризованную по перпендикулярной плоскости  $CT$ ; ее назову  $F_o + e'$ . Точно также часть  $F_c$ , поляризованная по

$CE$ , разделяется в ромбоэдре на две системы волн: первую  $F_{e+o'}$ , поляризованную по  $CS$ , и вторую  $F_{e+e'}$ , поляризованную по  $CT'$ . Если следить за движением плоскостей поляризации обоих пучков  $F_{o+o'}$  и  $F_{e+o'}$ , которые дают обыкновенные изображения (если смотреть с одной стороны их общего пересечения, которое проектируется в  $C$ ), то видно, что, исходя вначале из  $CP$ , они затем удаляются друг от друга и принимают направление  $CO$  и  $CE'$  и затем сближаются, соединяясь по  $CS$ . Но в этом случае обыкновенное изображение как раз и соответствует разности путей, пройденных в тот же момент времени обыкновенными и необыкновенными лучами, вышедшими из кристаллической пластинки. Если таким же образом следить за перемещением плоскостей поляризации двух пучков, образующих необыкновенные изображения  $F_{o+e'}$  и  $F_{e+e'}$ , то видно, что вначале плоскость поляризации для того и другого направлена по  $CP$ , что в кристаллической пластинке плоскости поляризации принимают направление  $CO$  и  $CE'$  и затем, вместо того, чтобы сближаться, продолжают удаляться друг от друга до тех пор, пока не оказываются на продолжении друг друга по направлениям  $CT$  и  $CT'$ ; таким образом, согласно только что данному нами правилу, к разности путей, пройденных этими двумя системами волн, нужно прибавить еще одну полуволну, или же, что то же самое, изменить в одной из них знаки колебательных движений; тогда, с помощью формулы интерференции, можно вычислить систему волн, которая получается от соединения этих двух пучков. Мы видим, что все происходит совершенно так же, как если бы дело шло о сложении сил, лежащих в плоскости чертежа, т. е. перпендикулярных к лучам и направленных по плоскостям поляризации или перпендикулярно к ним; в самом деле, компоненты двух сил  $CO$  и  $CE'$ , которые соединялись бы по  $CS$ , имели бы одинаковый знак, так же как и оба пучка  $F_{o+o'}$  и  $F_{e+o'}$ , которые соединяются по тому же направлению; две другие компоненты  $CT$  и  $CT'$ , действуя в противоположные стороны, должны были бы иметь противоположные знаки.

86. С помощью принципа сохранения живой силы можно было бы заранее сказать, что оба изображения должны были быть дополнительными одно к другому; но с его помощью нельзя

было бы указать, какое из двух изображений соответствует разнице пройденных путей и какое соответствует той же разнице, увеличенной на одну полуволну; вот почему я обратился к данным опыта и вывел из опыта господина Био только что указанное мною правило. Его можно вывести также из опыта с двумя ромбоэдрами.

Это правило объясняет, почему два естественных пучка света, поляризованные затем под прямым углом, не проявили никаких признаков взаимодействия, когда, с помощью стеклянной стопки или с ромбоэдром из известкового шпата, их приводили к одной общей плоскости поляризации. Это происходит вовсе не потому, что они не оказывают никакого действия друг на друга; даже независимо от механического рассмотрения вопроса, подобного рода предположение было бы в слишком большом противоречии с аналогией; дело же здесь в том, что действия различных систем волн естественного света компенсируют друг друга и взаимно нейтрализуются. В самом деле, естественный свет можно представить себе, как совокупность или, точнее, как быструю последовательность бесконечного числа систем волн, поляризованных по всевозможным азимутам; таким образом, света, поляризованного по какой-нибудь плоскости, всегда оказывается столько же, сколько света, поляризованного по плоскости перпендикулярной; но из только что указанного правила следует, что если, например, для вычисления интенсивности необыкновенного изображения, полученного со светом, поляризованным по первой плоскости, нужно к разности пройденных путей прибавить одну полуволну, то для необыкновенного изображения, получающегося от света, поляризованного по второй плоскости, ее уже не надо прибавлять; таким образом, оба оттенка, которые системы волн, вместе взятые или последовательно, сообщают необыкновенному изображению, дополняют друг к другу. Компенсация, которая таким образом возникает и которая одинакова для всех азимутов, препятствует заметить действие интерференции.

Вернемся к случаю, изображенному на чертеже 5, в котором падающий свет до прохождения через кристаллическую пластинку подвергается предварительной поляризации по плоскости  $PP'$ , образующей с главным сечением пластинки  $OO'$

угол  $i$ ; найдем для какого-нибудь определенного качества однородного света, с длиной волны, равной  $\lambda$ , каковы должны быть интенсивности обыкновенного и необыкновенного изображений, получаемых с помощью ромбоэдра из известкового шпата, главное сечение которого  $SS'$  образует угол  $S$  с первоначальной плоскостью  $PP'$ . В этом вычислении я оставляю без рассмотрения потерю света, происходящую вследствие частичного отражения от обеих плоскостей кристаллической пластинки и ромбоэдра, так как эта потеря влияет только на абсолютную интенсивность изображений и не влияет вовсе на их относительные интенсивности, единственно нас здесь интересующие. Я обозначу через  $F$  амплитуду скоростей эфирных молекул, колеблющихся в падающем поляризованном пучке; интенсивность света в нем будет дана через  $F^2$ , что будет равняться также живой силе по смыслу, придаваемому этому термину, и по способу, по которому во всех опытах оптики вычисляют интенсивности света, так как при всевозможных подразделениях, испытываемых светом, в качестве общей интенсивности остается постоянной не сумма скоростей колебаний, а сумма их живых сил. Установив это, можно утверждать, что падающий пучок, разделившись при прохождении через кристаллическую пластинку на два других пучка, интенсивности которых, по закону Малюса, должны равняться  $F^2 \cos^2 i$  и  $F^2 \sin^2 i$ , причем первое выражение имеет место для пучка их, подвергающегося обыкновенному преломлению, а второе — для подвергающегося необыкновенному преломлению; амплитуда скоростей колебания будет, значит, в первом случае  $F \cos i$ , а во втором случае  $F \sin i$ . Таким образом, падающий свет, проходя через кристаллическую пластинку, разделяется на две системы волн, которые можно изобразить таким образом:

$$\begin{array}{ll} \cos i \cdot F_o & \sin i \cdot F_e \\ P. O. & P. E'. \end{array}$$

Буквы  $o$  и  $e$ , помещенные внизу у  $F$ , не меняют численного значения этого количества; они указывают только на длину путей, пройденных к одному и тому же моменту времени обыкновенными и необыкновенными лучами после того, что они вышли из кристаллической пластинки; таким образом,

через их разность  $o - e$  они определяют промежуток, разделяющий соответствующие точки обеих систем волн. Большие буквы  $PO$  и  $PE'$  поставлены с целью облегчить применение вышеуказанного правила и указывают на последовательное положение плоскости поляризации каждого пучка.

Каждая из этих двух систем волн действием ромбоэдра из известкового шпата разделяется на два других пучка, что дает в общем следующие четыре пучка, из которых два первых получаются из первой системы волн и два других из второй.

$$\begin{array}{ll} \cos i \cos (i - s) \cdot F_{o+o'} & \cos i \sin (i - s) F_{o+e'} \\ P \cdot O \cdot S. & P \cdot O \cdot T. \\ \sin i \sin (i - s) F_{e+o'} & \sin i \cos (i - s) F_{e+e'} \\ P \cdot E' \cdot S. & P \cdot E' \cdot T'. \end{array}$$

Первый и третий пучки составляют обыкновенное изображение, а второй и четвертый — необыкновенное. Вычислим сначала интенсивность последнего.

Из последовательного положения плоскостей поляризации, на которые указывают большие буквы, помещенные под каждым пучком, мы видим, что второй и четвертый пучки, приведенные к одной общей плоскости поляризации, должны различаться на одну полуволну, независимо от разности  $o - e$  между пройденными путями.

Значит, к  $o - e$  нужно прибавить одну полуволну, или, что то же самое, изменить знак в одном из выражений, представляющих амплитуду или общий множитель скоростей колебания. Таким образом, нужно найти равнодействующую двух систем волн, для которых разность хода равна  $o - e$  и амплитуды скоростей колебания соответственно равны:

$$F \cdot \cos i \sin (i - s) \quad \text{и} \quad -F \cdot \sin i \cos (i - s).$$

Применяя здесь общую формулу, которую я дал в выдержке из моего Мемуара на 258 странице XI тома „Анналов физики и Химии“ („Annales de chimie et de physique“)

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \left( \frac{c}{\lambda} \right),$$

в которой  $a$  и  $a'$  представляют собой амплитуды скоростей колебания обеих систем волн,  $2\pi$  окружность, радиус которой единица,  $C$  разность пройденных путей, и  $\lambda$  длина волны, мы найдем для интенсивности однородного света в необыкновенном изображении:

$$F^2 \left[ \cos^2 i \sin^2 (i-s) + \sin^2 i \cos^2 (i-s) - \right. \\ \left. - 2 \sin i \cos i \sin (i-s) \cos (i-s) \cos 2\pi \left( \frac{o-e}{\lambda} \right) \right]$$

или

$$F^2 \left\{ \left[ -\cos i \sin (i-s) + \sin i \cos (i-s) \right]^2 + \right. \\ \left. + 2 \sin i \cos i \sin (i-s) \cos (i-s) \left[ 1 - \cos 2\pi \left( \frac{o-e}{\lambda} \right) \right] \right\},$$

или, наконец,

$$F^2 \left[ \sin^2 s + \sin 2i \sin 2(i-s) \sin^2 \pi \left( \frac{o-e}{\lambda} \right) \right].$$

Если проделать такое же вычисление для обоих пучков, образующих обыкновенное изображение, и заметить, что оба выражения

$$F \cdot \cos i \cos (i-s) \quad \text{и} \quad F \cdot \sin i \sin (i-s)$$

должны, вследствие изменения положения плоскостей поляризации, иметь один и тот же знак, то окажется, что интенсивность света в обыкновенном изображении будет:

$$F^2 \left[ \cos^2 s - \sin 2i \sin 2(i-s) \sin^2 \pi \left( \frac{o-e}{\lambda} \right) \right].$$

Таковы общие формулы, с помощью которых определяется интенсивность каждого рода однородного света в обыкновенных и необыкновенных изображениях в ее функциональной зависимости от длины волны света и разности  $o-e$ , путей, пройденных лучами при прохождении через кристаллическую пластинку. Зная ее толщину и скорости обыкновенных и необыкновенных лучей в кристалле, легко определить  $o-e$ . В сернокислой извести, в горном хрустале и в большинстве других кристаллов, обладающих двойным преломлением,  $o-e$  испытывает лишь очень небольшие изменения при изменении рода световых лучей, и таким образом на эту величину можно смотреть, как на постоянное количество; во всяком случае это

можно сделать для рассматриваемых здесь кристаллов, в которых дисперсия двойного преломления очень мала по сравнению с двойным преломлением. Если, вычислив разность хода  $o - e$ , затем последовательно делить ее на среднюю длину волны каждого из семи главных родов цветных лучей, и если последовательно подставлять эти различные частные в вышестоящие выражения, то мы получим интенсивности каждого рода цветных лучей в обыкновенном и необыкновенном изображениях и сможем определить тогда окраски их с помощью эмпирической формулы, данной Ньютоном для нахождения оттенка, получающегося при смешении различных лучей, относительная интенсивность которых известна. По этой причине мы должны рассматривать общие формулы, дающие интенсивность каждого рода однородного света в ее функциональной зависимости от длины волны, как формулы, которые сами показывают оттенок, получающийся при белом свете. Во всяком случае это все, что мы можем пока вывести из теории; по отношению к остальному нужно пользоваться эмпирической конструкцией Ньютона, которая достаточно хорошо согласуется с опытом, во всяком случае по отношению к главным подразделениям цветов.

87. Вернемся к вышестоящим формулам, причем оставим в стороне общий множитель  $F^2$ , который можно принять за единицу света: обыкновенное изображение

$$\cos^2 s - \sin 2i \sin 2(i - s) \sin^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right),$$

необыкновенное изображение

$$\sin^2 s + \sin 2i \sin 2(i - s) \sin^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right).$$

При рассмотрении этих формул, мы видим, что оба изображения должны стать белыми, когда член, содержащий

$$\sin^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right),$$

исчезает, так как это единственный член, который изменяется с длиной волны и который делает интенсивность различной для различно окрашенных лучей. Таким образом изображения станут белыми, когда имеем:

$$\sin 2i \sin 2(i - s) = 0.$$

Этому уравнению можно удовлетворить, если положить равными нулю

$$\sin 2i \quad \text{или} \quad \sin 2(i-s),$$

это дает для  $i$  четыре значения:

$$i = 0, i = 90^\circ, i = 180^\circ, i = 360^\circ,$$

и для  $s$ :

$$s = i, s = 90^\circ - i, s = 180^\circ - i, s = 360^\circ - i.$$

Таким образом, для того, чтобы изображения стали белыми, достаточно, чтобы одно из этих восьми условий было выполнено, т. е. чтобы главное сечение кристаллической пластинки было параллельно или перпендикулярно к первоначальной плоскости поляризации или к главному сечению ромбоэдра; это можно было бы легко вывести из теории, и не прибегая к формуле; в самом деле, когда главное сечение пластинки параллельно или перпендикулярно к первоначальной плоскости, то падающий свет подвергается в этом кристалле только одному виду преломления, а когда главное сечение параллельно или перпендикулярно к главному сечению ромбоэдра, то каждое изображение содержит в себе только те лучи, которые подверглись в кристаллической пластинке одному и тому же преломлению; значит, как в одном, так и в другом случае каждое изображение содержит только одну систему волн; отсюда следует, что цветов больше быть не может, так как нет более интерференции.

Наоборот, окрашивание обоих изображений будет возможно наибольшим, когда коэффициент переменного члена равняется единице, что случается, когда  $s = 0$  и  $i$  равно  $45^\circ$ ; в этом случае оба изображения становятся:

обыкновенное изображение

$$1 - \sin^2 \pi \left( \frac{o-e}{\lambda} \right)$$

или

$$\cos^2 \pi \left( \frac{o-e}{\lambda} \right),$$

необыкновенное изображение

$$\sin^2 \pi \left( \frac{o-e}{\lambda} \right).$$

Следует заметить, что второе выражение сходно с выражением, которое дает в цветных кольцах равнодействующую двух систем волн, отраженных при нормальном падении от первой и второй поверхностей воздушного слоя, толщина которого равняется  $\frac{1}{2}(o - e)$ , что делает разность пройденных путей равной  $o - e$ . В самом деле, представим через  $\frac{1}{2}$  амплитуду колебания каждой системы волн и заметим, что скорости их колебания должны быть взяты с противоположными знаками, так как одна система волн отражается внутри более плотной среды, а другая вне ее; это обстоятельство, как нами было раньше замечено при объяснении явлений цветных колец, влечет за собою противоположность в знаке. Установив это, мы найдем для интенсивности получающегося света по формуле, уже нами применявшейся:

$$\frac{1}{4} + \frac{1}{4} - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos 2\pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right)$$

или

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\pi \frac{o - e}{\lambda},$$

или, наконец,

$$\sin^2 \pi \frac{o - e}{\lambda}.$$

Таким образом, оттенки необыкновенного изображения, получающиеся в кристаллических пластинках, как это доказали опыты господина Био, должны быть подобны оттенкам отраженных колец,\* если только разность хода  $o - e$ , производимая кристаллом, не меняется заметным образом с изменением природы лучей; в самом деле, эта разность хода, будучи в цветных кольцах при нормальном падении равной удвоенной тол-

\* Формулы, выведенные господином Био на основании этого сходства, с большою точностью передают цвета, даваемые одной пластинкой. Вместо того, чтобы непосредственно давать интенсивности каждого рода цветных лучей, как формулы только что нами вычисленные, они отсылают нас к таблице Ньютона, составленной для оттенков отраженных колец, в то же время они указывают, какое относительное количество белого света должно примешиваться к этим оттенкам в соответствии с относительными направлениями первоначальной плоскости главного сечения пластинки и главного сечения ромбоэдра из известкового шпата.

щине воздушного слоя, будет для всех родов лучей в точности одинаковой.

### 88. Выражения

$$\cos^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right) \quad \text{и} \quad \sin^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right),$$

соответственно дающие интенсивности обыкновенного и необыкновенного изображений в однородном свете, длина волны которого  $\lambda$ , и при условии, что ось кристаллической пластинки образует угол в  $45^\circ$  с первоначальной плоскостью поляризации, и что главное сечение ромбоэдра параллельно этой плоскости, показывают, что совокупность обеих систем волн, выходящих из кристаллической пластинки, должна быть поляризована по первоначальной плоскости поляризации, если  $o - e$  равно нулю или четному числу волн, так как в этом случае

$$\sin^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right)$$

становится равным нулю, и необыкновенное изображение исчезает. Напротив, когда  $o - e$  равно нечетному числу полуволн, то

$$\cos^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right)$$

становится равным нулю, и, следовательно, исчезает обыкновенное изображение; отсюда следует заключить, что весь свет поляризован по плоскости, перпендикулярной к главному сечению, т. е. как раз по плоскости с азимутом  $2i$ . Но для всех промежуточных значений  $\lambda$  совокупность обеих систем волн может показывать одну только частичную поляризацию и должна даже казаться совсем деполаризованной, если  $o - e$  равно нечетному числу четвертей волн, так как в этом случае

$$\cos^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right) \quad \text{и} \quad \sin^2 \pi \left( \frac{o - e}{\lambda} \right)$$

оба становятся равными  $\frac{1}{2}$ , и оба изображения имеют одинаковую интенсивность, причем это имеет место, каков бы ни был азимут, на который повернули главное сечение ромбоэдра,

в чем можно убедиться с помощью вышеприведенных общих формул, подставив в них

$$i = 45^\circ \text{ и } \sin^2 \pi \frac{(o - e)}{\lambda} = \frac{1}{2},$$

в самом деле, они становятся тогда для обыкновенного изображения

$$\cos^2 s - \frac{1}{2} \cos 2s = \frac{1}{2},$$

для необыкновенного изображения

$$\sin^2 s' + \frac{1}{2} \cos 2s' = \frac{1}{2}.$$

С помощью тех же общих формул легко видеть, что если  $o - e$  равно нулю или четному числу полувольт, то, каково бы ни было значение  $i$ , необыкновенное изображение исчезает при  $s$ , равном нулю, и что если  $o - e$  равно нечетному числу, то то же самое изображение исчезает, если в нем подставить  $s = 2i$ , и что, следовательно, весь свет в первом случае поляризован по первоначальной плоскости, а в втором по азимуту  $2i$ ; в то же время для всех промежуточных значений  $o - e$ , как бы мы ни вращали главное сечение ромбоэдра, ни одно изображение не может вполне исчезнуть. Все эти теоретические следствия подтверждены опытом.

89. Если заставить пройти поляризованный свет через несколько кристаллических пластинок, главные сечения которых пересекаются каким-нибудь произвольным образом, то явления значительно усложняются, хотя и могут быть вычислены с помощью той же теории. Сначала в первой пластинке падающий свет разделяется на две системы волн, интенсивности колебаний которых определяются по закону Малуса, а относительные положения по их разности хода, как мы это только что сделали для одной пластинки, затем каждая из этих систем волн во второй пластинке сама разделяется на две других; в третьей пластинке каждая из этих новых четырех систем волн разделяется на две других и так далее. Ясно, что если известны азимуты главных сечений различных друг на друга наложенных пластинок и ромбоэдра, дающего два изобра-

жения, то можно определить относительные интенсивности всех систем волн, входящих в каждое изображение, и что с одинаковой легкостью можно определить их разности хода, причем надо учесть различного рода преломления, которые они последовательно испытывают, и это можно сделать, если толщины пластинок известны, так же как и отношения скоростей для проходящих через них обыкновенных и необыкновенных лучей; таким образом, для каждого изображения получатся интенсивности и относительные положения всех систем волн, из которых это изображение складывается; их равнодействующую можно найти по общему методу, указанному в моем „Мемуаре о диффракции“ („Mémoire sur la diffraction“) на странице 256. Во всех этих вычислениях все предопределяется заранее, с помощью основных принципов, которые были выведены из фактических данных, и нет больше надобности заимствовать еще что-нибудь из опыта, даже и в самых сложных случаях. Главным образом, в этом отношении эта теория и оказывается значительно превосходящей теорию подвижной поляризации, которая становится столь неудобной, когда бывает нужно знать, каким образом колебания осей световых молекул передаются из одной пластинки в другую при переходе света от одной к последующей, главное сечение которой образует какой-нибудь произвольный угол с главным сечением первой. Таким образом, гипотеза господина Био дала ему возможность определить все коэффициенты его формул для двух наложенных друг на друга пластинок только в трех частных случаях, причем в одном из них его формулы не соответствуют даже в точности фактам, в чем я мог убедиться с помощью моих формул; это случай двух пластинок из одного вещества с осями, скрещенными под углом в  $45^\circ$ . Рассмотрение этого частного случая и общие формулы для оттенков, даваемых двумя пластинками, можно найти во второй заметке к докладу господина Араго о моем „Мемуаре“ на странице 267 тома XVII „Анналов физики и химии“ („Annales de chimie et de physique“).

90. В той же заметке мною было показано, что основные свойства поляризованного света, закон Малюса и характерные особенности двойного преломления можно было бы весьма просто объяснить, если предположить, что в световых волнах

колебания молекул совершаются перпендикулярно к лучам и к тому, что мы назвали плоскостью поляризации. Приняв эту гипотезу, было бы естественнее назвать этим именем плоскость, по которой колебания совершаются, но я ничего не хотел менять в общепринятых обозначениях. Эта гипотеза, принять которую нас особенно побуждают законы, замеченные мною совместно с господином Араго при интерференции поляризованных лучей, показывает, каким образом эти законы неизбежно вытекают из самой природы световых волн; формулы, данные мною для кристаллических пластинок, так же как и формулы для явлений дифракции, отражения, преломления и цветных колец, вследствие этого основываются теперь на одном единственном предположении; в самом деле, это предположение так же хорошо, как и раньше принятое, согласуется с вычислениями результатов интерференции, с помощью которых мы объяснили законы этих явлений, так как при этих вычислениях, как было замечено в самом начале, безразлично, будут ли колебательные движения совершаться параллельно или перпендикулярно к лучам, лишь бы только они имели одно и то же направление в интерферирующих волнах. Согласно этой новой гипотезе, обыкновенный свет представляет собою соединение, или, лучше, быстрое чередование бесконечного числа поляризованных по всевозможным направлениям волн; акт поляризации не состоит больше в том, чтобы создавать поперечные движения, но в том, чтобы разлагать те поперечные движения, которые уже существуют в обыкновенном свете, по двум взаимно перпендикулярным неизменным плоскостям и отделять друг от друга системы волн, поляризованных по этим двум направлениям, причем это отделение может выразиться или в направлении их лучей, или просто в разнице их скорости.

91. Опыт и принцип интерференции научили нас, что если поляризованный световой пучок оказывается разделенным на две системы волн одинаковой интенсивности, поляризованных по двум взаимно перпендикулярным направлениям и отделенных промежутком в четверть волны, то, при последующем соединении обеих систем волн, в нем обнаружатся признаки полной деполяризации, т. е. весь свет, анализируе-

---

мый с помощью ромбоэдра из известкового шпата, всегда дает равные по интенсивности изображения, как бы мы ни поворачивали главное сечение ромбоэдра. Свет, таким образом видоизмененный, походит в этом отношении на естественный свет, но он отличается от него чрезвычайно любопытными оптическими свойствами, которые составляют главное содержание другого „Мемуара“, представленного мною Академии Наук 24 ноября 1817 г.

---

## ВИДОИЗМЕНЕНИЯ, СООБЩАЕМЫЕ ПОЛЯРИЗОВАННОМУ СВЕТУ ПРИ ОТРАЖЕНИИ

92. Я нашел, что такое же видоизменение падающего света происходит при повторном полном отражении внутри стекла при наклоне приблизительно в  $50^\circ$ , считаемых от нормали к поверхности, при условии, что падающий пучок был предварительно поляризован по азимуту в  $45^\circ$  относительно плоскости отражения; другими словами, в этом случае отраженный свет состоял из двух равных систем волн, поляризованных под прямым углом и различающихся на четверть волны. Этот отраженный свет, не проявляющий никаких следов поляризации при анализе его с помощью ромбоэдра из известкового шпата, обладает все же, как и поляризованный свет, свойством давать очень яркие цвета в тонких кристаллических пластинках; но цвета эти другого рода. Этот свет отличается от поляризованного света еще в том отношении, что он не дает заметных цветов в скипидаре и в пластинках горного хрусталя, высеченных перпендикулярно к оси. Если подвергнуть его двум новым полным отражениям при том же падении и в той же плоскости или в перпендикулярной плоскости, то он снова получает все признаки и все свойства обыкновенного поляризованного света; два дальнейших подобных отражения делают его опять совершенно деполаризованным, и он опять приобретает все те свойства, которые получил при двух первых отражениях, и т. д. Я не стану входить в более подробные детали по поводу этого замечательного видоизменения света, которое, как и сама поляризация, сообщается сразу всем родам лучей и которое в этом отношении оказывается также свойством общего характера. Я ограничусь указанием, что характер оттенков, которые таким образом видоизмененный свет сообщает кристаллическим пластинкам, заставил меня признать,

что он состоит из двух систем поляризованных под прямым углом волн, различающихся на четверть волны, и что, исходя из этого факта, я с легкостью смог объяснить и вычислить разнообразные, связанные с ним, явления и сделал это с помощью тех же принципов, как те, которые послужили нам для вычисления оттенков, получаемых в обыкновенном поляризованном свете.

93. Прежде чем обнаружить видоизменения, которые сообщаются поляризованному свету при отражении, я изучал видоизменения, которые получаются при частичном отражении от внешней поверхности прозрачных тел, и я заметил, что свет при этом никогда не бывает деполяризован даже частично, и это при любом наклоне лучей и любом азимуте плоскости падения по отношению к первоначальной плоскости поляризации. Новая принятая мною гипотеза о природе световых волн указала мне на закон, управляющий этими отклонениями, который я до этого напрасно пытался выразить с помощью эмпирических формул. Последние хорошо согласовались в трех главных случаях для лучей, параллельных поверхности, при нормальном падении и в случае полной поляризации, но для промежуточных углов падения они не соответствовали более фактам. Формула, к которой я в конце концов пришел на основании теоретических соображений и которую можно найти в добавлении к вышеупомянутой заметке на странице 312 тома XVII „Анналов химии и физики“ („Annales de chimie et de physique“), повидимому, выражает собой закон явления, если судить о нем по согласию между ней и наблюдениями. Я вывел ее из общих формул для интенсивности отраженного света, найденных мною на основании этих соображений и изложенных мною в той же самой заметке.

94. Этим я ограничусь в изложении содержания моих „Мемуаров“ и обойду молчанием теоретические и экспериментальные исследования, сделанные мною для явлений поляризации, открытых господином Био в некоторых однородных жидкостях, как, напр., в скипидаре, в лимонной эссенции и так далее. Мне казалось нужным ограничиться изложением лишь самых общих свойств света и, если мне будет позволено

так выразиться, элементарных фактов, т. е. таких фактов, которые чаще всего повторяются и по отношению к которым другие являются как бы их более или менее сложной комбинацией. Я показал, каким образом волновая теория может их объяснить, и дал средство для того, чтобы выразить управляющие ими законы с помощью аналитических выражений. Для того, чтобы вычислить столь разнообразные явления, как явления диффракции, явления цветных колец, получаемых в тонкой пластинке из воздуха, воды или какого-нибудь другого преломляющего вещества, явления самого преломления, для которого отношение синуса угла падения к синусу преломленных лучей как раз равняется отношению длин волн в обеих средах, явления окрашивания и особого вида поляризации, получающихся в кристаллических пластинках, — для всего этого достаточно знать различные длины волн света в тех средах, через которые они проходят; это единственная величина, которую мы вынуждены заимствовать из опыта, и она лежит в основе всех формул. Если обратить внимание на все эти внутренние и разнообразные соотношения, которые волновая теория устанавливает между самыми различными явлениями, то нельзя не поразиться одновременно и простотой этой теории, и ее плодотворностью, и не согласиться, что даже в том случае, если бы она и не обладала перед теорией испускания преимуществом объяснять многие явления, совершенно непостижимые с точки зрения последней, то она заслуживала бы предпочтение уже вследствие одних тех средств, с помощью которых она позволяет связать между собою все явления оптики, охватывая их общими формулами.

Без сомнения, остается еще много темных мест, нуждающихся в разъяснениях, в особенности там, где дело идет о поглощении света; к таким местам относятся: отражение от металлических поверхностей и черных тел, прохождение света через не вполне прозрачные тела и собственные цвета тел.¶ Вероятно, что во всех этих различных случаях часть света изменяет свою природу и превращается в тепловые колебания, для наших глаз уже незаметные, так как они вследствие испытанных ими видоизменений не могут проникнуть в составляющее глаз вещество или заставить колебаться с ними в унисон оптический нерв.

---

Но общее количество живой силы должно остаться тем же самым, если только светом не было произведено химического или теплового действия, достаточно сильного для того, чтобы изменить состояние равновесия частиц тела и вместе с ним величину сил, которым эти частицы подвергаются; в самом деле, можно представить себе, что если эти силы внезапно ослабевают, то отсюда получается внезапное уменьшение энергии колебаний частиц нагретого тела и вследствие этого поглощение тепла, если воспользоваться общепринятыми выражениями. Быть может, дело как раз так и обстоит, когда твердое тело плавится или когда жидкость испаряется.

Если, как это доказывают явления диффракции, свет представляет собою лишь определенный род колебательного движения универсальной жидкости, то не следует более думать, что его химическое действие на тела состоит в комбинировании молекул этой жидкости с молекулами тела, но нужно думать, что оно состоит в механическом действии, которое создается вследствие того, что колебания универсальной жидкости действуют на весомые частицы; это механическое действие заставляет их перегруппировываться в новые, более устойчивые системы равновесия, зависящие от рода или энергии колебаний, действию которых они подвергаются. Мы видим, насколько принятая нами гипотеза о природе света и тепла может изменить наше представление об их химическом действии и насколько важно не ошибиться в выборе истинной теории для того, чтобы, наконец, открыть принципы молекулярной механики, знание которой бросило бы так много света на всю химию. Если что-либо должно сильно содействовать этому великому открытию и обнаружить тайны внутреннего строения тел, то этим может быть только достаточно глубокое исследование явлений света.

---

## ПРИМЕЧАНИЯ

Огюстен-Жан Френель (Augustin-Jean Fresnel) родился 10 мая 1788 года в Бройли (Broglie) департамента Эра (Eure); шестнадцать лет он поступил в Политехническую школу (Ecole Polytechnique) и был выпущен гражданским инженером. Он был назначен сначала в Вандею (Vendée), затем



Бюст Френеля в Бройли.

в Нион (Nyons); правительством Ста дней он был отставлен от своей должности, но при Второй реставрации он был восстановлен в своих правах. В 1817 году ему было разрешено провести некоторое время в Париже, где в следующем году он был назначен инженером при Уркском канале (Canal de l'Ourcq); затем он был прикомандирован в 1819 году к управлению маяками. Он умер в Виль-д'Аврей (Ville d'Avray) 14 июля 1827 года. Огюстен Френель был избран членом

---

Академии наук в 1823 году и членом Лондонского королевского общества в 1825 году.

С самого детства Френель отличался серьезным и меланхоличным характером. Слабое здоровье и нервное сложение способствовали быть может его естественной склонности к наблюдениям и размышлениям, но меланхолия всегда соединялась в нем с душевным благородством и значительной твердостью воли.

Еще молодым, по возвращении Наполеона с острова Эльбы, он сумел показать истинную твердость убеждений. Уверенный в том, что возвращение императора принесет Франции одно несчастье, Френель присоединился к роялистской армии, повидимому стремившейся организовать на юге Франции вооруженное сопротивление.

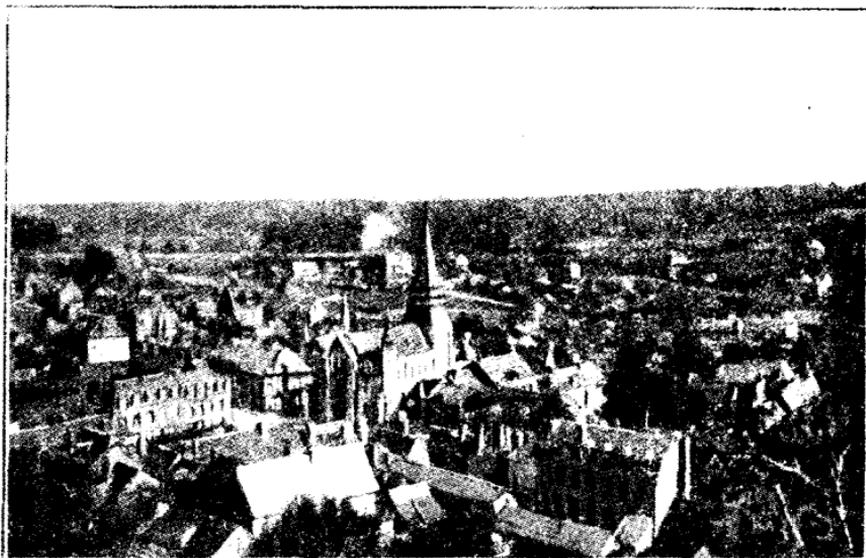
Вынужденный вернуться в Нион, больной, гонимый населением, отставленный от должности правительством, Френель должен был вернуться к матери в деревню Матие (Mathieu) близ Кана (Caen).

Здесь, в вынужденном отдыхе, он окончательно обратился к науке. Уже около года Френель особенно охотно размышлял о трудностях теории света и о неясности и сложности теории истечения. Во время его пребывания в Матие зародившиеся в нем идеи приняли более определенную форму; здесь был им составлен его первый „Мемуар о диффракции“.

После второй реставрации, благодаря дружбе с Араго (Arago), которого Френель отправился навестить в Нормандию, он вскоре был призван в Париж. После этого в течение нескольких лет он мог заниматься научными изысканиями. Его деятельность стала особенно плодотворной, и в эти годы им сделаны его главные работы. Все, что мы называем „физической оптикой“, обязано в своем корне гению Френеля. В явлениях диффракции, интерференции, поляризации, двойном лучепреломлении он сумел найти истинную связь вещей и все это с помощью простых в своей основе представлений: применение общего принципа интерференции, систематическим образом связанного с принципом Гюйгенса, поперечность световых колебаний, обобщение понятия о волновой поверхности.

Правда, результаты, им даваемые, не всегда новы, его доказательства иногда не совсем исчерпывают предмет. Но все же именно его усилиями волновая теория могла, наконец, считаться установленной и превратиться в цельное учение, которому теперь сто лет и с которым законно связано имя Френеля.

К несчастью, здоровье его пошатнулось. Его работа, как деятельного члена комиссии по устройству маяков, репетитора Политехнической школы, его слишком утомляла. В послед-



Город Бройли, где родился Френель (угловой дом слева от церкви).

ние годы своей жизни, весьма мучительной, научная деятельность его ограничивалась разрешением трудных задач об освещении маяков. Ему мы обязаны практическим осуществлением сильнейших маяков с лентикулярными прожекторами, и его технические достижения в этой области являются не последними его заслугами.

Большинство трудов Френеля опубликовано только после его смерти. Им самим напечатаны: „Мемуар о диффракции“ („Mémoire sur la diffraction“), премированный Академией Наук в 1819 году, несколько кратких выдержек из „Мемуара“, представленных Академии, и дидактический труд „О свете“ („De la

lumière“), в котором он резюмирует развитие своих идей и излагает свою теорию; этот труд появился в 1822 году в дополнении к французскому переводу „Химии“ Томсена.

Этот труд был затем перепечатан с поправками автора в Собрании сочинений Огюстена Френеля (Oeuvres d'Augustin Fresnel, 3 m. in 4<sup>o</sup>, Imprimerie National, 1866), затем он был переиздан отдельной книжкой в серии „Классиков науки“ („Les classiques de la science“) издательства А. Колэн (A. Colin) в Париже. С этой последней книжки настоящий перевод и сделан.

Примечание 1 (стр. 7). Descartes, Dioptrices, 1637, гл. I. Декарт (1596—1650) полагал, что распространение света представляет собой как бы мгновенное распространение давления, подобное распространению давления в жидкостях. Декарт пытался обосновать свои рассуждения с помощью астрономических соображений; подробная критика его доказательства и доказательство ошибочности его выводов были сделаны Гюйгенсом (Ch. Huygens, Traité de la lumière, 1696, p. 5). Цвета Декарта рассматривает, как аналогию музыкальным тонам.

Примечание 2 (стр. 7). Ch. Huygens (1629—1695). В своем классическом сочинении „Трактат о свете“ („Traité de la lumière“), резюмирующем его главные труды по оптике, Гюйгенс, исходя из волновой теории, остроумно доказывал прямолинейное распространение света и законы преломления отражения в изотропных телах и в кристаллах.

Примечание 3 (стр. 7). Эйлер (L. Euler, 1707—1783) в своем труде „Dioptrica“, Petropolis, 1771, и в других своих работах был одним из немногих, предпочитавших в восемнадцатом столетии волновую теорию перед общепризнанной в то время теорией истечения Ньютона. Эйлер был, по-видимому, первым, приписавшим происхождение цвета различным периодам световых колебаний, так как его предшественник Гюйгенс рассматривал световые волны скорее как отдельные импульсы, чем как правильно чередующиеся системы волн, приближаясь в этом отношении к Декарту.

Примечание 4 (стр. 7). Т. Юнг (Thomas Young), см. его труд „On the theory of Light and Colours. Phil. Transactions“, 1801 и другие его сочинения. Своими опытными исследованиями может считаться предшественником Френеля; первый ввел в оптику принцип интерференции.

Примечание 5 (стр. 7). Здесь имеется в виду знаменитое „Principia Philosophiae naturalis Acta mathematica“. На русском языке: Исаак Ньютон, Математические принципы натуральной философии. Перевод А. Н. Крылова, Петроград, 1915.

Примечание 6 (стр. 11). Характерный вид диффракционных полос виден из приложенной к этой книге фотографии. Работы Гримальди (Grimaldi, 1613—1663) резюмированы в посмертном его сочинении, точ-

ное название которого „Physiko-Mathesis de lumine, coloribus et iride“. У него находятся также первые зачатки представления о периодичности света.

Примечание 7 (стр. 11). Newton, Optice, 1719.

Примечание 8 (стр. 30). Периодичность световых явлений, столь ярко выступающая в цветных кольцах, не представляла сомнений для Ньютона. Она объяснялась им следующим образом. Уже в испускаемом светящимся телом свете периодически выступают некоторые свойства, которые Ньютон называет приступами легкого отражения и легкого прохождения. Эти периодически возникающие свойства - приступы влияют на отражение и прохождение света, когда свет попадает на поверхность, разделяющую две среды. Если свет попадает в момент приступа легкого прохождения, то он весь проходит через нее, если же в момент приступа легкого отражения, то весь отражается; в промежуточных случаях происходит частичное прохождение и частичное отражение; те и другие приступы чередуются равномерно. Цветные кольца объясняются так: свет, попадающий на первую поверхность, частично отражается, но главная часть проходит; первую часть оставим без рассмотрения, вторая же часть, подойдя ко второй поверхности, пройдет через нее целиком, если расстояние ее от первой поверхности будет соответствовать периоду легкого прохождения. Это место темного кольца. Наоборот, она отразится от нее целиком, если расстояние будет соответствовать полупериоду, то есть попадет на вторую поверхность при приступе легкого отражения. На обратном пути к первой поверхности она как раз попадет на нее с приступом легкого отражения и беспрепятственно пройдет через нее; это место светлого кольца. Таким образом объясняется чередование темных и светлых колец в однородном свете и цветных колец в белом; наблюдая их, Ньютон легко мог вычислить периоды приступов легкого отражения и легкого прохождения, на которые Френель здесь и ссылается. (См. Ньютон, Оптика, „Классики естествознания“, Гиз, 1927.)

Примечание 9 (стр. 65). Принцип Гюйгенса в той формулировке, которая ему была дана Френелем, еще не может считаться вполне строгим. Если точно следовать Френелю, то две вещи остаются необъясненными. Прежде всего остается неразъясненным, почему отсутствует так называемая „обратная“ волна. Если взять какое-нибудь одно из положений, скажем, сферической волны, и каждую ее точку рассматривать как новый центр колебаний, то остается невыясненным, почему элементарные волны, бегущие назад к центру волны, не могут дать вторичной волны, бегущей по тому же направлению. Объяснения Френеля (см. стр. 66 и примечание на стр. 67) страдают некоторой неясностью. В свое время это слабое место теории Френеля привело к чрезвычайно интересной полемике между ним и Пуассоном. (См. по этому вопросу H. Poincaré, *Traité mathématique de la lumière*, v. I.) Второе слабое место теории заключается в том, что она, давая правильное значение для амплитуды или интенсивности беспрепятственно распространяющегося света, дает неправильное значение для его фазы, которое отличается по его теории от истинного на  $\frac{\pi}{2}$ . Вполне строгая формулировка принципа Гюйгенса была дана лишь значительно

---

позднее Кирхгофом (G. Kirchhoff, Zur theorie der Lichtstrahlen, Berlin, Sitzungberichte der Preussischen Akad. d. Wissenschaften, 1882, S. 641). (См. по этому вопросу Winkelmann, Handbuch der Physik, Optik., 1906, S. 1032—1047.)

Примечание 10 (стр. 86). Позднейшие исследования, главным образом, Пуассона и Луммера (см. O. Lummer, Berichte, d. Berliner Akademie d. Wissenschaften, 1900, B. XXIV, S. 504—513) показали, что при вычислении результатов интерференции недостаточно принимать в соображение только один раз отраженный от второй поверхности луч. Если принять в расчет дважды, трижды и т. д. отраженные лучи, то результаты наблюдения вполне согласуются с опытом, даже при весьма наклонном падении лучей, и никакого изменения в законах отражения предполагать не надо.

Примечание 11 (стр. 105). Закон Брюстера (Brewster, Philos. Transactions, 1815, p. 125) строго справедлив для всех не поглощающих тел. Если для алмаза и некоторых других прозрачных тел Брюстер и Френель не находят точного его подтверждения, то потому, что пользуются белым светом и не принимают в соображение дисперсии. Только сильно поглощающие вещества, как металлы, составляют исключение (см. у Зеебека (I. Seebeck), Poggend. Annalen, B. XX, 1830, S. 27), которым закон Брюстера был точно проверен.

Примечание 12 (стр. 110). Вместо термина „амплитуда“ скорости, Френель пользуется термином „интенсивность“ скорости. Имея в виду установившуюся теперь терминологию и во избежание смещения понятий при чтении, мы предпочли в этом месте изменить терминологию Френеля.

---

# ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие редактора . . . . .	5
Природа света . . . . .	7
Диффракция света . . . . .	11
О цветных кольцах . . . . .	81
Об отражении и преломлении . . . . .	87
О двойном преломлении и поляризации . . . . .	99
Окрашивание кристаллических пластинок . . . . .	127
Видоизменения, сообщаемые поляризованному свету при отражении . .	150
Примечания редактора . . . . .	154