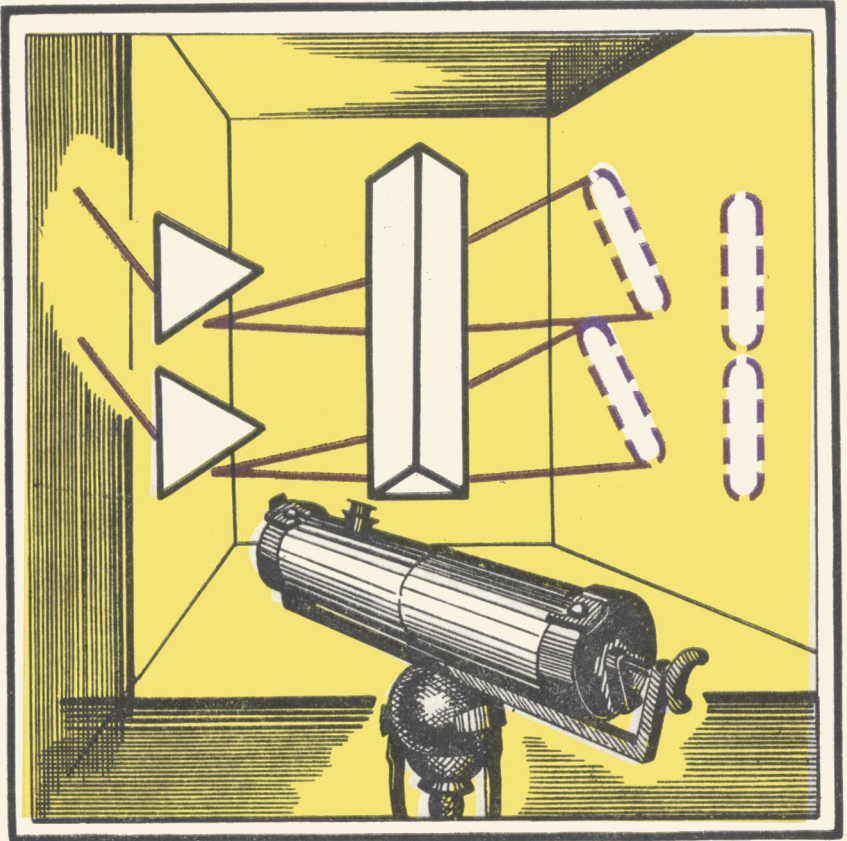


Е. И. ПОГРЕБЫССКАЯ

ОПТИКА НЬЮТОНА



АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Серия «История науки и техники»

Е. И. ПОГРЕБЫССКАЯ

ОПТИКА НЬЮТОНА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1981

П 43 Погребысская Е. И. Оптика Ньютона.— М.: Наука, 1981. 135 с.

В книге рассмотрены исследования Исаака Ньютона (1642—1727) по физической оптике. С них началась его научная карьера, вопросы оптики оставались предметом изучения великого ученого в течение всей жизни. Самые разные проблемы занимали Ньютона: природа призматических цветов, цвета тонких и толстых пластин, прозрачность и окраска тел. Именно в оптических исследованиях Ньютон впервые предстал не только как блестящий экспериментатор, но и как выдающийся теоретик — создатель новой методологии в физике. В книге прослежено влияние работ Ньютона на дальнейшее развитие оптики.

17.4.5

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
А. Т. ГРИГОРЬЯН



Scan AAW

П $\frac{20405-590}{054(02)-81}$ БЗ-82-114-80 НП. 1704050000

© Издательство «Наука», 1981 г.

ВВЕДЕНИЕ

Один из величайших гениев в истории науки Исаак Ньютон известен прежде всего как автор «Математических начал натуральной философии», как создатель ньютоновой механики. Советский кораблестроитель академик А. Н. Крылов, переводчик «Начал» («Principia»), писал, что «каждое предположение Ньютона¹ разрасталось за 250 лет в целую обширную науку, изложение которой занимало сотни и тысячи книг. Это лучше всего характеризует Ньютона как автора «Principia» и подтверждает слова Лагранжа, что этот его труд «есть величайшее произведение человеческого ума»².

Ньютона-математика высоко ставили его современники, и эта оценка не изменилась за прошедшие со дня смерти Ньютона 250 лет.

Иная судьба работ по оптике великого английского ученого. Своей известностью, причем не только в научных кругах, Ньютон при жизни более всего был обязан оптическим исследованиям, а самым популярным его произведением была «Оптика», которая в течение многих десятилетий оставалась энциклопедией науки о свете.

В XVIII в. «Оптика» неоднократно издавалась на английском, французском и немецком языках наряду с латинским переводом. Первый биограф Ньютона картезианец Фонтенель³ в речи, произнесенной после смерти Ньютона в Парижской академии наук, отметил, что новизна результатов, полученных английским ученым в оптике, столь велика, что эта область физики почти полностью есть творение Ньютона.

Однако в XIX в., когда отказались от корпускулярной теории света, которую развил Ньютон и отстаивали ньютонианцы, и праздновала свою, казалось окончательную, победу волновая теория, оптику Ньютона считали устаревшей, ею перестали интересоваться, хотя и не все. Знаменитый английский физик Рэлей считал, что каждому, кто изучает физику, следует внимательно прочитать пер-

вые части «Оптики». Дж. Дж. Томсон присоединяется к этому совету Рэля⁴. Таково же мнение С. И. Вавилова, который писал, что чтение второй книги «Оптики» — лучшее введение в искусство эксперимента. Таким образом, высокая оценка «Оптики» — это дань удивительному экспериментаторскому искусству Ньютона⁵. Что же касается теоретических воззрений ее автора, то здесь дело обстояло не столь просто. Их оценка менялась в связи с развитием оптики. Утверждение волновой теории света привело, как мы уже говорили, к забвению ньютоновского оптического наследия. Им вновь заинтересовались в 20-е годы нашего столетия. Произошло любопытное совпадение — в 1927 г. отмечалось 200-летие со дня смерти Ньютона. К этому времени не только стала ясна недостаточность волновой концепции для описания взаимодействия излучения с веществом, но и получила экспериментальное подтверждение гипотеза о квантах света А. Эйнштейна, возрождавшая, правда только по названию, корпускулярную теорию. В юбилейных статьях того времени можно было встретить утверждения, что Ньютон не отдавал предпочтение ни одной из двух концепций, что он стремился к синтезу обеих теорий и именно этим он близок науке нашей эпохи. Поэтому изучение оптического наследия Ньютона представляет не только исторический интерес. С последним утверждением согласен и автор предлагаемой книги, хотя он далек от желания модернизировать взгляды Ньютона. Наследие гения — его достижения, равно как и его заблуждения (с позиции нашего времени), интересны независимо от того, совпадают ли положения, отстаивавшиеся им, с современным пониманием предмета. Нам кажется, что мы более объективны в оценке прошлого, чем наши предшественники, потому что мы опираемся и на результаты их исследований, и на данные, полученные историками науки и культуры разных стран после смерти Ньютона, особенно за последние тридцать лет, когда усилиями в основном английских ученых изданы многие неизвестные ранее материалы о жизни и деятельности Ньютона. Главные из них — предпринятые Королевским обществом многотомные издания переписки Ньютона и его математических работ⁶.

Основные работы Ньютона по оптике переведены на русский язык. «Оптика» издавалась дважды — в 1927 и 1954 гг. «Лекции по оптике» вышли из печати в 1946 г. Последнее издание — уникальное: это единственный в мире

полный перевод первого сочинения Ньютона по оптике (оригинал — на латинском языке) на живой язык со времени первой публикации лекций. Есть также переводы двух оптических мемуаров (1672 и 1675 гг.), сделанные к 200-летию со дня смерти Ньютона. Переводы трудов Ньютона по оптике, а также одна из лучших книг в мировой литературе о жизни и творчестве Ньютона принадлежат выдающемуся советскому физическому С. И. Вавилову. Вся мировая литература о Ньюtone, работы и переписка Ньютона, вышедшие из печати при жизни С. И. Вавилова, были им учтены. Его комментарии к работам Ньютона, многочисленные статьи и, конечно, его монография «Исаак Ньютон» не потеряли своего значения и в настоящее время. Содержательный анализ исследований Ньютона по спектральному разложению света дал Л. И. Мандельштам в докладе, прочитанном в 1943 г. Естественно, сейчас, когда изданы многие, прежде не публиковавшиеся заметки, записные книжки Ньютона, вся дошедшая до нас переписка Ньютона, мы располагаем материалами, ранее бывшими труднодоступными. В ряде случаев это обстоятельство помогает точнее и доказательнее представить ход исследований Ньютона, а иногда заставляет по-новому взглянуть на прежние выводы.

Глава 1

БИОГРАФИЯ НЬЮТОНА

Исаак Ньютон прожил долгую жизнь. Он родился 25 декабря 1642 г. (по старому стилю)¹ в семье фермера-протестанта в деревне Вулсторп, расположенной в северо-восточной Англии, умер 20 марта 1727 г. в Лондоне. Учился в школе в Грентеме, небольшом городке, примерно в 10 километрах от его родной деревни; 1661—1665 гг.— годы учебы в Тринити-колледже, т. е. коллегии Троицы, в Кембридже — одном из двух старейших университетских центров Англии. По окончании колледжа Ньютон получает первую ученую степень — бакалавра, в 1667 г. его избирают младшим членом, в следующем году — старшим членом колледжа и в том же 1668 г. — магистром, а в 1669 г. он получает люкасианскую кафедру математики² своего родного колледжа, которую занимал до 1702 г. Таким образом, Ньютон очень быстро прошел путь от ассистента, если пользоваться привычной терминологией, до профессора.

В 1672 г. Ньютона избирают членом незадолго до того учрежденного Королевского общества. Годом организации Общества принято считать 1660 г., когда группа видных английских ученых, уже с 1645 г. собиравшихся вместе для обсуждения научных вопросов и постановки экспериментов, выступила с заявлением, в котором сообщалось о решении создать «Коллегию для развития физико-математического знания». Королевским Обществом стало называться с 1662 г., когда король Карл II согласился стать его покровителем. Среди основателей и первых членов Общества были известный физико-химик и богослов Р. Бойль, выдающиеся математики И. Барроу и Дж. Валлис, математик и архитектор, строитель самого крупного культового сооружения протестантского мира — лондонского собора св. Павла — К. Рен, блестящий экспериментатор, автор многих плодотворных идей в механике и физике Р. Гук и др. С Обществом сотрудничали начиная с первых лет его существования многие видные ученые континентальной

Европы (достаточно назвать имена Х. Гюйгенса, Г. В. Лейбница, Я. Бернулли).

И членом этого Общества становится 29-летний профессор математики из Кембриджа, пока только известный благодаря построенному им отражательному телескопу (первому в мире)³. Он-то и открыл перед Ньютоном двери Королевского общества. Ободренный приемом, оказанным ему, Ньютон решает представить на суд своих новых коллег «Новую теорию света и цветов». В том же 1672 г. он публикует исправленную и расширенную «Общую географию» Варениуса (второе издание вышло в 1681 г.). Следующей опубликованной работой Ньютона стали «Математические начала натуральной философии» (1687), которые появились благодаря настойчивости друга Ньютона астронома Э. Галлея. После полемики, вызванной его «Новой теорией», Ньютон надолго потерял желание «быть услышанным». Остальные его естественнонаучные работы увидели свет в XVIII столетии: «Оптика» с двумя математическими трактатами — в 1704 г.; латинский перевод «Оптики» — в 1706 г.; «Всеобщая арифметика» — в 1707; «Анализ с помощью уравнений с бесконечным числом членов» — в 1711 г.; второе издание «Начал» — в 1713 г. и последние прижизненные издания «Оптики» — в 1717 и 1721 гг. Эти книги и трактаты были написаны задолго до их напечатания.

Одна из главных причин такого положения кроется в характере Ньютона: он болезненно относился к критике своих работ, старался избегать открытой полемики. Для него более приемлемым был путь оповещения о своих результатах посредством переписки.

До организации журналов, а первые из них начали издаваться с 60-х годов XVII в.⁴, переписка была едва ли не единственным, кроме книг, источником информации о научных исследованиях. Но и в последующие десятилетия переписка сохранила свое значение в качестве инструмента научного общения⁵. Сообщения об оптических работах Ньютона, реакция на них ученых разных стран, результаты, полученные Ньютоном по математике, — все это в основном становилось известным из его переписки; в 70-е годы — с секретарем Королевского общества Г. Ольденбургом (1615—1677) и членом общества, любителем науки Дж. Коллинсом (1625—1683). Со временем круг корреспондентов Ньютона расширился, а впоследствии переписку (и полемику) за Ньютона часто вели его ученики и

последователи (Фацио Дюилье, Самуэль Кларк, Т. Деагюлье).

В 1696 г. начинается лондонский период жизни Ньютона: он переезжает из Кембриджа в Лондон в связи с назначением его на должность хранителя Монетного двора⁶. С этого времени он становится более активным членом Королевского общества. В ноябре 1703 г., после смерти своего постоянного оппонента Р. Гука, бывшего секретарем Общества с 1677 г., Ньютон становится президентом Королевского общества. И ежегодно, вплоть до смерти, его переизбирают на этот пост. Ньютон практически присутствует на всех заседаниях, совмещая свою деятельность на этом поприще с должностью (с 1699 г.) директора Монетного двора, к исполнению обязанностей которого он относился с большой ответственностью. Последняя должность обеспечила ему постоянный и значительный доход, а также способствовала его известности и вне научных кругов.

В 1705 г. королева Анна возводит Ньютона в дворянство, тем самым его научные и административные заслуги получают высокую оценку государства. Несколько ранее Ньютон был избран иностранным членом Парижской академии наук⁷.

Ньютон дважды избирался членом парламента от Кембриджского университета — в 1689 и 1701 гг. В 1705 г. он вновь баллотировался в парламента, но не прошел, что связано, однако, не с личностью кандидата, а с политической обстановкой в Англии этого периода.

Жизнь Ньютона не богата внешними событиями. К уже сказанному можно добавить, что он никогда не был женат, никогда не выезжал за пределы Англии, старался не участвовать в публичных дискуссиях, но был втянут в споры, получившие широкую известность (например, приоритетный спор с Р. Гуком об открытии закона тяготения, спор об открытии дифференциального и интегрального исчисления с Лейбницем).

Жизнь Ньютона была заполнена напряженной интеллектуальной работой; в первую ее половину — по преимуществу в области физики, математики, механики и химии⁸; во вторую он много сил и времени отдал изучению истории христианства, разработке теологических вопросов, хронологии. Интерес к таким проблемам неудивителен, если вспомнить, в какое бурное время жил Ньютон.

Детство и юность великого ученого совпали с английской буржуазной революцией (1640—1660). Гражданские

войны 40-х годов, казнь короля Карла I Стюарта (январь 1649 г.), провозглашение республики (май 1649 г.), установление диктатуры Кромвеля (1653 г.) — вот ее главные события. Затем наступил период феодальной реакции — реставрация Стюартов (1660—1688). В 1688 г. — новый государственный переворот, так называемая бескровная, или славная, революция.

И каждый из этих поворотов в истории Англии знаменовал изменения в политике религиозной. В этих условиях обращение к богословию имело для английских ученых отнюдь не только академический интерес. В этом смысле Ньютон не представляет исключения. Большинство своих богословских исследований Ньютон даже не пытался опубликовать, так как его взгляды не были ортодоксальными: он, например, не верил в догмат Троицы. По этой причине, а возможно, и по другим, столь же существенным мотивам эта группа работ ученого была отнесена к разряду тех, которые печатать не следует. Во всяком случае такое заключение сделал М. Я. Пеллет, просматривавший после смерти Ньютона его архив.

В XIX в. ими также не заинтересовались, потому что считали подобное занятие причудой гения, а религиозные деятели не могли допустить, чтобы национальный герой предстал перед потомками еретиком. И только уже в наше время предприняты первые серьезные попытки понять и оценить место теологических исследований в научном творчестве Ньютона. Для понимания происхождения концепций, положенных в основу его механики, последнее особенно существенно. Для анализа оптических работ Ньютона это не имеет большого значения, так как корни оптики Ньютона натурфилософского (наряду с экспериментом) происхождения, а не теологического.

Ньютон-ученый — сын своего времени. Это проявилось в том, какие проблемы его интересовали, над чем он работал и как он работал. Научная революция XVII в. коснулась в основном математики, механики, оптики, причем физическая оптика была создана в эпоху Ньютона. Его вклад в развитие этих областей огромен и в общем уникален; но ряд его результатов был переоткрыт его современниками, особенно в математике. Однако, что всегда поражает и кажется непостижимым — основные идеи и результаты получены Ньютоном во всех трех областях всего за два года (1665—1666), которые он провел в Вулсторпе, изредка наезжая в Кембридж. Это были годы, когда в Ан-

глии свирепствовала чума и многие горожане стремились найти спасение в сельском уединении. В эти годы, по собственному признанию Ньютона, он «был на высшей точке своей изобретательности и размышлял о математике и философии⁹ больше, чем когда-либо позже»¹⁰. Воистину, пир ума во время чумы!

Ньютон много внимания уделял также экспериментальным исследованиям, и в этом он на уровне требований века; но и здесь его работы выделяются продуманностью и тщательностью. Он был далек от голого эмпиризма, которым грешили его старшие современники и что, по иронии судьбы, отличало ревностных ньютонианцев.

Не в меньшей степени Ньютона как ученого своего времени характеризует и то, как были встречены многие его работы. В этом плане весьма показательным отношением к ставшему известным первым созданию Ньютона — к его отражательному телескопу, на чем мы остановимся в третьей главе, а также огромная прижизненная слава Ньютона. «Такой гений, как Ньютон, может прокладывать новые пути в математике и механике только тогда, когда есть в обществе классы, готовые поддерживать и ободрять его, готовые создать ему условия для работы и для того, чтобы быть услышанным»¹¹.

Глава 2

ПРЕДНЬЮТОНОВСКАЯ ОПТИКА

Середина XVII в. — время больших перемен в оптике. Буквально за несколько лет она изменила свою структуру — наряду с геометрической и физиологической оптикой (оба термина применительно к науке той эпохи несколько условны, разумеется) формируется оптика физическая. Но то, что для нас спрессовано в немногие годы, для ученых того времени растянулось на значительный срок.

Переменам в оптике предшествовал длительный период накопления новых знаний. Растянувшийся на века процесс систематизации полученных в античности и в средние века результатов завершается в первой половине XVII столетия. В это время дописываются последние главы средневековой оптики. Но в ней исподволь происходит и другой процесс — формирование новых представлений. Было

бы ошибкой предположить, что речь идет о саморазвитии науки о свете. В действительности, кроме этого побудительного мотива, существовали и другие, внешние по отношению к оптике; на протяжении всего средневековья именно они были доминирующими.

В подтверждение соплемя на книгу уже тогда известного астронома И. Кеплера (1571—1630) «Дополнения к Витело, в которых сообщается об оптической части астрономии», изданной в 1604 г., ровно за сто лет до «Оптики» Ньютона. Последнее обстоятельство, конечно, совершенно случайное, но сопоставление этих трактатов (несмотря на неизбежный субъективизм каждого из авторов при отборе материала) позволяет объективно судить об изменениях в самой оптике и об изменении ее положения среди других наук. Книга Ньютона — это трактат о цветах (в одном из писем он назвал ее «теорией цветов»). Цвета — доминирующая проблема оптики Ньютона, но таковой она стала в науке уже с середины XVII в. Ньютон не чуждается прикладных вопросов, но главными для него являются проблемы физической оптики: основное внимание уделено описанию явлений дисперсии, интерференции и дифракции — все эти явления были открыты и стали предметом изучения, начиная с середины XVII в. Ньютон, как правило, не ссылается на предшественников, так как он сообщает результаты собственных опытов и результаты собственных теоретических построений.

В начале XVII в. мы видим иную картину. Уже по названию книги Кеплера можно судить о причине его интереса к оптике и о том, кого он считал своим непосредственным предшественником. Переход от астрономии к оптике был логичен: атмосферная рефракция, т. е. преломление света в атмосфере, известная уже Птолемею, влияла на видимое положение звезд и учет ее был необходим для точных астрономических измерений; кроме того, наблюдая в 1600 г. солнечное затмение с помощью камеры-обскуры с линзой, Кеплер обратил внимание на следующее обстоятельство — изображение повторяет контуры Солнца, а не отверстия камеры-обскуры. Объяснение этого частного вопроса привело его к постановке более общей проблемы — получение изображения с помощью зеркал и линз, а позднее, после изобретения зрительной трубы, и к построению теории оптических инструментов.

Почему же Кеплер считал свою работу дополнением книги монаха Витело, жившего в XIII (!) столетии, кни-

ги, которую предшественник Кеплера Ф. Мавролик назвал ужасным и странным томом, обвинив ее автора в том, что он никогда ничего не доказывает? Попробуем объяснить это.

Своими корнями оптика первой половины XVII в. уходит в средневековую и даже античную науку. На протяжении всего средневековья занятия наукой не прерывались, однако формы, в каких это проявлялось, своеобразны. Р. Бэкон (1214—1294) писал: «...философию нельзя постичь, пока не овладеешь математикой, а каждый знает, что теологию нельзя постичь, пока не понимаешь философию; теолог должен знать математику»¹. В числе наук, знание которых считалось необходимым теологу, была и оптика. Но подчинение науки целям, от нее далеким, конечно, не могло не сказаться на общем уровне ее развития и мало способствовало проведению самостоятельных научных исследований. При таких условиях «эффект насыщения», потолок возможного в оптике, был достигнут уже в XIII в. К этому времени относятся переводы арабских авторов, познакомившие Западную Европу не только с достижениями арабской науки, но и через ее посредничество с работами античных ученых. В XIII в. выполнен латинский перевод книги крупнейшего оптика Арабского Востока Ибн-ал-Хайсама (Альхазена, 965—1039) «Оптика». Все наиболее значительные оптики средневековья (за исключением Р. Гроссетесте, XII в.) жили в XIII столетии — Р. Бэкон, Витело, Дж. Пекам. Самые популярные книги по оптике средневековой Европы — «Общая перспектива» Пекама и «Перспектива» Витело. (В средние века оптику называли перспективой, что является переводом на латинский заимствованного из греческого языка слова «оптика». Свои названия оба сочинения получили в первых печатных изданиях.) Книги Пекама и Витело составлены примерно в одно время — в 70-е годы. Написанная с дидактическими целями первая оставалась основным учебником по оптике на протяжении последующих трех столетий. По ней учились, по ней читали лекции в Парижском, Венском, Пражском университетах, в университетах Испании, Германии, Польши. С появлением книгопечатания она с конца XV по начало XVII в. издавалась одиннадцать раз. Только в XVI столетии она выходила девять раз².

«Перспектива» Витело заняла особое место в научной литературе средневековья. Она фактически стала энцик-

лопедией по оптике. В ней собраны практически все сведения по оптике, известные античным авторам и арабским ученым. Основным же источником для Витело было сочинение Ибн-ал-Хайсама. В десяти книгах, составляющих «Перспективу», Витело рассмотрел вопросы геометрической и физиологической оптики, метеорологические явления — образование радуги, ложных солнц и т. д. Основное место занимала катоптрика, т. е. наука о построении изображений в системах, состоящих только из отражающих поверхностей. У Витело это плоские, сферические, цилиндрические и конические выпуклые и вогнутые зеркала. Строение глаза, обманы зрения, теория лучей и теней и, наконец, преломление составляют содержание отдельных частей. В XVI в. «Перспектива» издавалась трижды. Наиболее известно издание 1572 г., когда труд Витело вышел вместе с «Оптикой» Ибн-ал-Хайсама.

Однако в XVI столетии издавались не только сочинения средневековых авторов, но также и «Оптика» и «Катоптрика» Евклида, «Оптика» Птолемея. Все это отражало возросший интерес к оптике, который следует рассматривать в контексте возрождения интереса к науке вообще, последовавшего за эпохой Ренессанса в литературе и искусстве. В обоих случаях причины, породившие эти движения, сходны — стремление освободиться от диктата церкви, подкрепленное экономическими, а затем и социальными изменениями, происходившими в ту эпоху. В свою очередь эти издания способствовали популяризации достижений античной и средневековой оптики и привлекли внимание многих к изучению ее различных вопросов.

Комментарии к трудам Евклида и Птолемея, добавления, которые вносились непосредственно в тексты средневековых авторов (как это было сделано, например, в издании 1542 г. книги Пекама³), не единственные формы научной продукции XVI в. Создавались также оригинальные сочинения по оптике. Обычно принято, говоря об оптике того времени, останавливаться на сочинениях двух авторов — неаполитанца Дж. Порты (1535—1615) и мессинского математика Ф. Мавролика (1494—1575). Основанием для этого является, конечно, не тот факт, что первый — автор многотомных трудов по оптике, а второй написал только одну небольшую книгу по этому предмету, к тому же не изданную при жизни автора. Важно то, что они оказались выразителями двух характерных для

своего времени тенденций: с одной стороны, увлечение чудесами, оптическими обманами, которые способствовали распространению мнения о недостоверности показаний зрения, а с другой — стремление поставить оптику в согласии с традицией греческой науки на твердую основу математики, точнее, геометрии и опыта.

Первое оптическое сочинение Порты «Натуральная магия», вышедшая в 1558 г. в четырех книгах, в 1589 г. появилась уже в двадцати книгах. В 1593 г. издан его трактат «О преломлении». Второе издание «Натуральной магии» получило широкое распространение; ее читали не только в XVI, но и в следующем столетии; ее перевели на итальянский и английский языки⁴, причем последний перевод издан в 1658 г. Кеплер был знаком с трудами Порты, и, возможно, описание камеры-обскуры с линзой, а также широкие применения этого прибора, предложенные Портой, привлекли внимание немецкого астронома к этому устройству. В основном же Порту интересовало все необычное в оптике, о чем и свидетельствовало название его главного труда. Такой подход к научным проблемам был чужд Кеплеру. Более того, он чужд духу передовой науки того времени, рациональные основания которой, пока в основном в механике, начинают уже складываться в XVI столетии.

Но и оптика не остается в стороне от этого движения, и подтверждение тому мы находим в наиболее значительном сочинении XVI в. — в книге Мавролика «*Photismi de lumine et umbrae*». Точный перевод ее названия затруднителен, здесь игра слов (приблизительно «Свет о свете и тени»), но стремление автора прояснить некоторые вопросы оптики недвусмысленно явствует уже из названия трактата. Он написан в 1530—1550 гг., но стал широко известен после 1611 г., когда его издали в Неаполе⁵; в то время благодаря применению зрительной трубы Галилеем для астрономических наблюдений был возбужден всеобщий интерес к оптике. Книга Мавролика примечательна не только и не столько новыми результатами, сообщаемыми в ней; собственно, нового не так много. Это, во-первых, понимание того, что хрусталик выполняет в глазу роль линзы, и как следствие — объяснение близорукости и дальновидности избыточной или недостаточной кривизной хрусталика; во-вторых, объяснение действия вогнутых и выпуклых очковых линз, применявшихся для исправления этих дефектов зрения, и, наконец, что опять-

таки непосредственно связано с предыдущим, Мавролик фактически пришел к понятию фокуса линзы. Он утверждал, что фокус (у Мавролика — место схождения) тем дальше от линзы (термин, тоже отсутствующий у Мавролика, но примененный переводчиком его книги на английский Г. Крю), чем выпуклость стекла меньше⁶.

Трактат Мавролика примечателен стремлением его автора поставить всю оптику на твердое основание опыта и геометрии. В заключительном разделе книги, озаглавленном «Проблемы оптики и радуга» и добавленном в 1567 г., он спрашивает: «Почему оптика столь трудна?» И отвечает: «Не потому ли, что она требует как физических, так и математических аргументов и потому известна как пограничная или разнородная наука?»⁷. В последнем утверждении замечательно отсутствие упоминания об аргументах философских. Отказ от натурфилософских рассуждений привел к тому, что в книге Мавролика мы не находим рассуждений о природе света и цветов, а авторов, писавших об этом — Аристотеля, Плиния, Аверроэса, Пекама, Витело, Мавролик осуждает за их «оптические грезы» в отношении объяснения радуги и хвалит Евклида и Птолемея за то, что они не проявили скольконибудь заметного рвения при обсуждении теории радуги. Такое мудрое самоограничение Мавролика — явление уникальное в средневековой оптике и сопоставимое, пожалуй, только с подходом Ньютона, также не стремившегося выносить свои «мечты» на суд публики и старавшегося ограничиться физическими и математическими аргументами.

Что же такое физические аргументы у Мавролика? Это результаты опыта. Правда, описания опытов практически отсутствуют, но, говоря о каком-либо положении, им отстаиваемом, Мавролик обычно заключает: «Это вытекает не только из теории или законов оптики, но также подтверждается опытом». Из опыта Мавролик определил, например, относительный показатель преломления стекла. Однако количественные измерения у него — исключение, а не правило. И вообще, следуя за Р. Бэконом, он называет опытом не только эксперимент в нашем понимании (к нему Мавролик обращается редко), но и наблюдение.

Трактат Мавролика был неизвестен Кеплеру (во всяком случае до 1611 г.) и, таким образом, на работы Кеплера по оптике — «Дополнения к Витело» (1604) и «Диоптрику» (1611) — не повлиял. Но даже если бы Кеплер

знал сочинение Мавролика, все равно оно не смогло бы заменить ему энциклопедический труд Витело.

Итак, Кеплер был знаком с сочинениями древнегреческих авторов, из ближайших предшественников — с трудами Порты и, наконец, с книгами средневековых авторов, среди которых наибольшей полнотой и обстоятельностью отличался труд Витело. Не только по названию, но и по структуре первый трактат Кеплера по оптике продолжает традиции средневековых авторов, и Витело в частности. Начинается он с главы, в которой обсуждается вопрос о природе света и цветов; сделано это в духе Аристотеля. Исключение составляет в этой главе геометрическое доказательство основного закона фотометрии — закона обратных квадратов. Затем следует глава по катоптрике — раздела оптики, основные положения которой — закон отражения от полированных поверхностей и принцип прямолинейного распространения света — были известны еще древним грекам (например, Евклиду, IV в. до н. э.). Постепенно усложняясь, она развивалась как дисциплина по преимуществу математическая и к началу XVII в. представляла собой достаточно разработанную теорию. Вклад Кеплера в эту область невелик, и в основном изложение здесь сводится к пересказу ранее известного материала. Далее Кеплер, опираясь на данные, приведенные Витело, а также на измерения величины атмосферной рефракции своего учителя, выдающегося астронома Тихо Браге, попытался найти закон, связывающий угол падения и угол отклонения, т. е. угол между продолжением падающего луча и преломленного. Пятая глава посвящена теории зрения. А заключают книгу три раздела, объединенные автором под общим названием «Астрономическая часть оптики»; в них речь идет об атмосферной рефракции, описаны различные инструменты, применявшиеся при астрономических наблюдениях. В заключительных главах нашли отражение научные пристрастия Кеплера, но, с другой стороны, это симптоматично: ведь именно астрономия, нуждаясь в помощи оптики, дала мощный импульс ее развитию в первой половине XVII в.

«Дополнения к Витело» — итог средневековой оптики. Конечно, такое утверждение не означает, что после работы Кеплера в течение многих лет не появлялись сочинения, авторы которых отстали от науки своего времени если не на столетие, то, во всяком случае, на десятилетия.

Другой характер имеет книга Кеплера «Диоптрика».

в которой он объяснил действие только что вошедших в употребление зрительных труб. Кеплер новую главу оптики, предмет изучения которой — построение изображений в преломляющих системах, строит по образцу катоптрики. Точный закон преломления Кеплер не нашел, но на основе экспериментальных данных (в том числе и собственных) он показал, что пропорциональность углов падения и отклонения имеет место, если угол падения не превышает 30° . Используя этот приближенный закон, Кеплер объяснил действие зрительной трубы, состоящей из собирающей и рассеивающей линз (телескоп Галилея), из двух собирающих линз (эта новая конструкция получила впоследствии имя Кеплера), рассмотрел ход лучей в двух- и трехлинзовых системах и т. п. Чтобы все это осуществить, необходимо было ввести ряд понятий, какими не пользовалась или не знала докеплеровская оптика. В первую очередь это понятие «фокус линзы» (в «Дополнениях»), а также «конус лучей». Таким образом, каждую точку источника или предмета Кеплер рассматривал как вершину расходящегося пучка лучей, общим основанием которых является линза. Таким образом, Кеплер ввел в оптику построение изображения с помощью гомоцентрических пучков. Вот почему его схемы хода лучей в «Диоптрике» современны в отличие от того, что мы видим в книгах других авторов того времени. Опираясь на геометрию и количественный эксперимент, Кеплер заложил фундамент современной теории оптических инструментов.

«Диоптрика» Иоганна Кеплера — произведение по оптике, в котором не было места домыслам и туманным рассуждениям, что определялось уровнем понимания предмета. Ясность изложения отличает и «Диоптрику» Декарта. В ней продолжено исследование вопросов, рассмотренных Кеплером, — теории зрения и учения о преломлении. Но Декарт не только развил некоторые идеи Кеплера. Он вышел за узкие рамки геометрии световых лучей и попытался создать «механическую картину света и цвета». Он определил лицо оптики не только на ближайшие десятилетия: вся классическая оптика построена на «механическом основании», хотя, конечно, требования, предъявляемые к оптическим теориям, в разные эпохи менялись.

Как же шло развитие таких важных разделов средневековой оптики, как теория зрения и учение о преломле-

нии, завершившееся в обоих случаях созданием в первой половине XVII в. принципиально верных концепций?

Без исследования процесса видения, без знания анатомического строения глаза теория оптических инструментов не была бы Кеплером построена так быстро. И до него теория зрения немало дала другим разделам оптики. Это мы видели на примере исследований Мавролика. Но результаты его работы оставались фактически неизвестными до 1611 г., и когда Кеплер приступил к изучению этого вопроса, изложение его Витело все еще считалось последним словом науки. Витело же основывался на теории Альхазена, которая для своего времени имела большое значение.

Арабский оптик значительно упростил рассмотрение процесса видения, отказавшись от теории зрительных лучей древних греков. Согласно последней свет исходит из глаз человека и, осяпав предмет, возвращается к нему, давая возможность видеть. В их существование верили Евклид, Птолемей. Такой подход позволил Евклиду ввести понятие «световой луч», а тем самым дал возможность геометризовать оптику, точнее, один ее раздел — катоптрику. Значение этого шага трудно переоценить.

Такой взгляд на механизм зрения отнюдь не курьез. В античности об анатомическом строении глаза имели представление весьма смутное, поэтому не могли сколь угодно достоверно описать, как человек видит. А с другой стороны, знали, что глаза некоторых животных в темноте светятся. Основываясь на этих наблюдениях, Декарт еще допускал возможность подобного механизма зрения для некоторых видов животных.

Кроме «математического» подхода существовал и «физический», более наглядный вариант объяснения процесса зрения. Согласно ему от каждого предмета исходят лучи — образы: предмет как бы посылает свои уменьшенные копии. Передача изображения осуществляется с помощью частиц — корпускул (таково мнение Левкиппа, Демокрита), либо, как полагал Аристотель, мы воспринимаем некоторое движение.

Платон предложил промежуточный способ описания: образы предметов и «свет очей», взаимодействуя, дают возможность видеть окружающий мир. Но эта концепция заметно усложняла картину видения, и конкурирующими остались первые две.

Итак, глаз, по Ибн-ал-Хайсаму,— только приемник излучения. Показательна причина, почему это так. Даже если глаз излучает свет, говорил Ибн-ал-Хайсам, все равно он воспринимает лучи, пришедшие от внешних объектов: если посмотреть на Солнце, то глаз испытывает боль; если смотреть на зеркало, отражающее солнечные лучи, глаз также испытывает боль, т. е. мы видим, когда нечто попадает от воспринимаемого предмета в глаз. Ибн-ал-Хайсам уже знал о том, что в глазу человека есть несколько сред — кристаллических и жидких; он считал, что изображение образуется в хрусталике⁸.

В таком виде теория просуществовала до XVII в., хотя анатомическое строение глаза за прошедшие столетия стало известно значительно лучше. Уже были обнаружены роговица, сетчатка, но еще у Мавролика сетчатка, хотя и является местом, куда выходит оптический нерв, выполняет функции только внутренней оболочки глаза; хрусталик, как установил Мавролик, действует подобно выпуклой линзе. Но тогда изображение, даваемое выпуклым хрусталиком-линзой, на сетчатке должно быть обратным. Поэтому Мавролик считал, что изображение получается в стекловидном теле. Кеплер был первым, кого это не смутило, и ему мы обязаны в общем правильной теорией зрения.

Причина же, видимо, в том, что Кеплер лучше своих предшественников понимал, как действуют линзы, и поэтому догадался, что объяснение того, что мы видим предметы не перевернутыми, надо искать не в физике, а в физиологии.

Х. Шейнер (1575—1650) подтвердил это: на серии опытов с препарированным бычьим глазом и глазом человека он показал, что на сетчатке действительно образуется перевернутое изображение, и описал их в книге «Глаз — основа оптики» (1630 г.). А затем Декарт дал развернутое объяснение феномена зрения, указав, что свет раздражает окончания оптических нервов на сетчатке, которые передают это возбуждение в определенный участок мозга и там-то происходит «переворачивание изображения».

Кеплер объяснил действие очков, исправляющих дальновзоркость и близорукость, что уже сделал ранее Мавролик (см. рис. 1 и 2; первый взят из книги Мавролика, второй — из «Дополнений к Вителло»). Кеплер изучил также некоторые дефекты зрения, влияющие на точность астро-

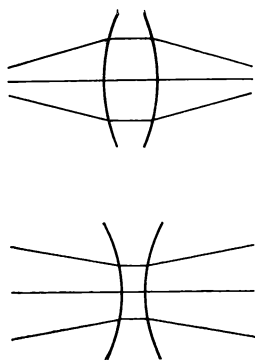


Рис. 1

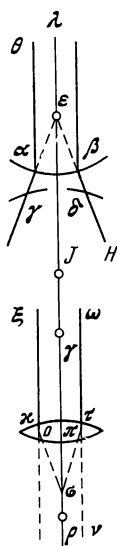


Рис. 2

номических наблюдений, и способы их учета, рассматривая глаз как физический прибор.

Итак, Кеплер в «Дополнениях» решил задачу построения изображения в глазу человека, но это изображение было черно-белым. Вопросы о восприятии цветов он не коснулся, как и других проблем, связанных с цветом.

Только в XVII в. был найден закон преломления, хотя поиски его начались в античности. Выдающийся астроном Клавдий Птолемей (70—147) описал явление атмосферной рефракции, т. е. кажущееся смещение небесных светил вследствие искривления светового луча в атмосфере, и понял, что оно вызвано преломлением света. Птолемей предложил прибор для определения углов падения и преломления — разделенный на 360° диск с двумя подвижными стрелками — и с помощью этого прибора провел измерения для трех пар соприкасающихся сред: воздух — вода, воздух — стекло, вода — стекло⁹. Измерения при прохождении света из более плотной в менее плотную среду ему выполнить не удалось. Птолемей не нашел зависимости между измеренными углами, хотя некоторые закономерности он установил: если свет падает на границу раздела двух сред из менее плотной

среды (воздуха) в более плотную (вода, стекло), то луч преломляется к перпендикуляру к поверхности раздела, в то время как свет, проходя из более плотной среды в менее плотную, отклоняется в этой второй среде от перпендикуляра к границе раздела; обратил он внимание и на связь между относительной плотностью соприкасающихся сред и преломлением.

Ученых средневековья не меньше, чем закон, описывающий явление, интересовала причина его; и усилия многих были направлены на объяснение, а не на поиски количественных закономерностей. Известные к тому времени факты уже давали возможность строить некоторые гипотезы о причине преломления. Наиболее плодотворная, но не получившая в течение нескольких веков развития идея принадлежала Ибн-ал-Хайсаму. Он предложил рассматривать преломление и отражение с единой точки зрения¹⁰.

Ибн-ал-Хайсам считал, что преломление является более слабым случаем отражения: скорость света, которая очень велика, меняется, когда он встречает сопротивление; в зависимости от величины сопротивления среды свет может либо полностью отразиться (когда среда оказывает сильное сопротивление), либо испытать частичное отражение и частичное преломление при более слабом сопротивлении среды. А последнее определяется плотностью среды.

Таким образом, у Ибн-ал-Хайсама мы видим попытку механически объяснить явления преломления и отражения. Витело, как Роджер Бэкон, воспринял такой подход. Витело приводит также результаты измерений Птолемея и дополняет их данными для соответствующих углов при переходе света из более плотной в менее плотную среду. Хотя бы частично эти новые «измерения» тоже являются результатом ошибочной экстраполяции, поскольку некоторые из них абсурдны: они противоречат явлению полного внутреннего отражения. Описывает Витело и прибор Птолемея.

Экспериментальная часть «Оптики» Витело стала тем источником, откуда черпали первоначальные знания об этом предмете все, занимавшиеся поисками закона преломления в начале XVII в.: Т. Хариот (1560—1621), И. Кеплер, В. Снелль (1580—1626) и, наконец, Р. Декарт (1596—1650) начинали с попыток найти его из анализа данных, сообщаемых Витело. Первые три проводили и собственные измерения; возможно, Декарт также экспериментировал с помощью диска Птолемея, описанного Витело. Хариот около 1602 г.¹¹, а Снелль примерно к 1617 г. установили правильный закон преломления, но не опубликовали его, почему — сказать трудно, во всяком случае такая ситуация не столь необычна, как нам это сейчас представляется. У нас нет прямых свидетельств и о

том, что заставило этих ученых обратиться к данному вопросу. Но если вспомнить, что основные области исследований Хариота — математика и астрономия, а Снелль занялся изучением явления преломления около 1615 г., когда зрительные трубы получили практическое применение в астрономии, то станет ясно, что астрономия действительно была повивальной бабкой этой области оптики.

Кеплер преуспел меньше в поисках закона преломления во многом потому, что остался слишком верным последователем Витело (и Птолемея): он искал связь между углом падения и углом отклонения (сам он называл его углом преломления), которая достаточно сложна. В «Диоптрике» Кеплер опирается на приближенный закон преломления — о пропорциональности этих углов между собой при углах падения, не превышающих 30° , что оказалось достаточным для построения теории телескопов. В этих исследованиях Кеплер обнаружил явление полного внутреннего отражения — первого (!) нового явления в оптике за многие столетия. Но понять, что это им сделано, можно только по сообщаемым Кеплером результатам измерений. В «Дополнениях к Витело» он указывает, что при переходе света из воздуха в воду при скользющем угле падения ($\sim 90^\circ$) угол преломления составляет только $53^\circ 30'$, что указывает на наличие предельного угла преломления. В «Диоптрике» он непосредственно измерял при переходе света из стекла в воздух угол, при котором падающий на границу раздела свет полностью от нее отражается. Но ни в том, ни в другом случае он не отмечает, что им обнаружено новое явление.

Оставляя в стороне вопрос о том, знал ли Декарт об открытии Снелля, несомненным остается то, что первое теоретическое обоснование, равно как и первое сообщение в печати о новом законе преломления, принадлежит Декарту. Сделано это в «Диоптрике» — одном из трех наряду с «Метеорами» и «Геометрией» приложений к его «Рассуждению о методе, чтобы хорошо направлять свой разум и отыскивать истину в науках», опубликованных в 1637 г. Свет, по Декарту, — движение, или воздействие, распространяющееся мгновенно в весьма разреженной материи, заполняющей поры тел. Переходя к анализу конкретных проблем, Декарт вынужден прибегать к различным сравнениям, иногда весьма далеким от его представлений о природе света. Анализируя, как происходит пре-

ломление, он сравнивает распространение света с движением мяча, посланного ракеткой, — аналогия, уже использовавшаяся Ибн-ал-Хайсамом. Эта аналогия имеет, вообще говоря, бóльшую область применения: в зависимости от свойств тел, на которые попадает мяч, можно представить, как происходит отражение (поверхность тела твердая, гладкая, плоская или искривленная), рассеяние (поверхность тела шероховатая), преломление (мяч попадает на поверхность воды или тонкую материю). На последнем примере Декарт как бы проверяет все возможные ситуации, объясняя, в частности, явление полного внутреннего отражения.

Для вывода закона преломления Декарт опирается на следующие предположения.

1. Удар ракетки по мячу определяет движение последнего — его величину и направление, т. е. движение описывается вектором.

2. Декарт переходит от рассмотрения собственно движения мяча к стремлению к движению по некоторому направлению, ничего не меняя при этом.

3. Кроме того, составляющая, параллельная границе раздела, при переходе мяча-света через нее не изменяется по величине ¹².

По первому и частично третьему пунктам у Декарта был единомышленник — Галилей. Последний в «Дне четвертом» «Бесед и математических доказательств» рассматривает движение бросаемых тел как движение сложное, «слагающееся из равномерного горизонтального и естественно-ускоренного вниз», т. е. решает задачу, обратную той, которую поставил перед собой Декарт. И «сложение двух скоростей, применяемое... Галилеем, было не арифметически-алгебраическим, а геометрическим, векторным» ¹³. Оба отмеченных положения имели большое значение для механики; законность такого рассмотрения для анализа преломления света проблематична и могла оправдываться в глазах Декарта, возможно, только конечным результатом — получением в итоге закона синусов.

Вот как Декарт описывает явление преломления света. Мяч, посланный ракеткой, попадает на тонкую материю, которую он «может прорвать... и пройти насквозь, теряя только часть своей скорости... Если это так, то для того чтобы знать, каким путем мяч должен следовать, примем опять во внимание, что его движение совершенно отличается от стремления к движению скорее в одну сто-

рону, чем в другую, откуда вытекает, что их значение должно рассматриваться отдельно; учтем также, что из двух составляющих этого стремления лишь та из них, которая вынуждает мяч спуститься сверху вниз, может быть сколько-нибудь изменена при встрече с материей; что касается составляющей, которая направляет его к правой руке, то она должна остаться такой же, какой была, ибо кусок материи *СВЕ* несколько не оказывает сопротивления в этом направлении»¹⁴. Чем более косо падает мяч на границу раздела, тем больше мяч отклоняется ею: это объясняет, почему луч, падающий вдоль перпендикуляра к границе раздела двух сред, не отклоняется при переходе через нее, а при некотором значении угла падения не проникает во вторую среду, полностью отражаясь от границы, т. е. мы имеем аналог явления полного внутреннего отражения с одной, но очень существенной поправкой: по схеме Декарта оно происходит, когда мяч-свет переходит из воздуха, например, в воду, т. е. из менее плотной среды в более плотную. Но Декарт знал, что в этом случае такое явление не может иметь места для света. Чтобы привести следствия, вытекающие из его рассмотрения проблемы преломления в соответствии с наблюдаемыми на опыте закономерностями (при переходе из менее плотной в более плотную среду луч света приближается к перпендикуляру, а в обратном случае — отклоняется от него и в этом последнем и может иметь место, начиная с определенного значения угла падения, полное отражение света от границы раздела), Декарт делает еще одно допущение: мяч-свет, попадая из воздуха на материю или воду в точке *B*, «отбрасывается снова... ракеткой... увеличивающей силу его движения, например на одну треть, таким образом, чтобы он мог потом совершить за двойной промежуток времени такой же путь, какой он проделывал за тройной; подобное действие следует рассматривать так, как если бы мяч встречал в точке *B* тело такого характера, что он мог бы пройти через его поверхность *СВЕ* на одну треть легче, чем через воздух»¹⁵. Так Декарт объясняет возрастание скорости света при переходе из разреженной в более плотную среду. Уверенность в том, что это имеет место в действительности, появилась у него задолго до того, как перед ним стала проблема доказать закон преломления. В записной книжке, относящейся к 1619—1621 гг., Декарт отметил: «Так как свет может возникать только в веществе, то чем больше ве-

щества, тем легче он возникает при прочих равных условиях; следовательно, он проникает более легко через плотную, чем через разреженную среду. Отсюда следует, что преломление происходит в последней среде от перпендикуляра, в первой — к перпендикуляру»¹⁶.

Не вполне ясно, как Декарт пришел к правильному закону преломления, хотя происхождение основных положений доказательства в отдельности понятно¹⁷. Известно также, что в письме к Гоолу от 2 февраля 1632 г. Декарт описал установку, которая позволяла убедиться в правильности закона синусов, но пользовался ли ею Декарт, чтобы найти его? Закон преломления в современных обозначениях (ученый ограничился по обычаю своего времени словесным описанием) имеет вид $\sin i / \sin r = n = \text{const}$ ¹⁸. Декарт оставил открытым вопрос об экспериментальной подтвержденности закона; его теоретическое обоснование также не было безупречным.

Учеными постепенно осознавалось то, что экспериментальные исследования наряду с теоретическими являются необходимой частью науки. Блестящие образцы сочетания опыта и теории продемонстрировал Галилей. Но уже в работах его учеников и последователей, объединившихся во Флоренции в «Академию эксперимента», наблюдается явный крен в сторону эмпирических изысканий в ущерб теоретизированию. Еще раньше («Академия эксперимента» просуществовала десять лет — до 1667 г.) в других городах Италии, во Франции, Англии начали появляться различные кружки и общества, объединившие профессионалов-ученых и любителей науки, собиравшихся для обсуждения научных проблем, но главное — для коллективного экспериментирования в различных областях естествознания. (Некоторые из этих кружков и обществ впоследствии стали ядром научных учреждений нового типа — академий¹⁹). Это была и реакция на многовековое засилие схоластики и отклик на выдвигаемые развитием общества новые задачи науки. Но эта же тенденция имела объективное обоснование в рамках самого естествознания — слишком мало экспериментальных данных накопила наука к середине XVII в., чтобы построенные на таком фундаменте теории могли оказаться жизнеспособными. Первоочередной задачей новой науки становится проведение достаточно точных и воспроизводимых опытов. И поэтому для решения вопроса о правильности закона преломления основным критерием стало согласие

его с данными экспериментов. В Голландии, по-видимому, не было оснований сомневаться в экспериментальной обоснованности закона синусов: ко времени выхода «Диоптрики» Декарта ученик Снелля Гооль в 1632 г., разбирая бумаги своего учителя, обнаружил, что тот нашел из эксперимента закон преломления. Гооль сообщил об этом некоторым ученым, в их числе и К. Гюйгенсу. В других странах такие опыты ставились и после смерти Декарта.

В 1663—1665 гг. на заседаниях Лондонского Королевского общества многократно производились определения преломления при различных углах падения для твердых, газообразных и жидких веществ²⁰; для последних применялся прибор, специально созданный для этих целей постоянным в тот период исполнителем экспериментов Общества Р. Гуком; было определено преломление теплой и холодной воды. Эти опыты повторяли предложенные или описанные Декартом. Аналогичные исследования в те же годы провели парижские «виртуозы» (так называли искусных и искусенных в науке); они также подтвердили закон синусов. В связи с этим стали меняться задачи экспериментов по определению преломления различных веществ. Их цель теперь — найти наилучшие материалы для линз, т. е. эти опыты все отчетливее приобретали прикладной характер.

Таким образом, к середине 60-х годов справедливость закона синусов уже не вызывала сомнений.

Но для оптики XVII в. большое значение имела также теоретическая сторона проблемы преломления света. За исключением выдающегося французского математика П. Ферма, который подошел к выводу закона Декартом как математик, остальные, занимающиеся этой проблемой, поставили механическую интерпретацию преломления света в зависимость от взглядов на природу света. У Декарта нет такой жесткой связи последней проблемы с принципами, лежащими в основе доказательства закона преломления. Но он первый отходит от традиционного философского, рассмотрения и этой области оптики.

Уже в античности представления о природе света становятся частью общей картины мира. К этой эпохе относится и возникновение основных концепций о природе света — субстанциональной и акцидентальной, если оставаться в рамках заимствованной из средневековья терминологии XVII в. Вошедшие в употребление позднее

(в XIX в.) и более привычные для нас определения — корпускулярная и волновая (а точнее, континуальная) концепция о природе света — не точно отражают существо вопроса. В подтверждение сказанному сошлемся на Аристотеля. «Свет... есть действие прозрачного как прозрачного. Там же, где прозрачное имеется лишь в возможности, там тьма». Свет — «это не огонь, не какое-либо тело вообще и не истечение из какого-либо тела (ведь и в этом случае свет оказался бы каким-то телом); нет, свет — это наличие огня или чего-то подобного в прозрачном»²¹. Переход от потенциальной к актуальной прозрачности, что соответствует передаче света, не требует времени. В отношении мгновенности распространения света высказывались иной раз сомнения (Ибн-ал-Хайсам), но такие авторитеты, как Гроссетесте, Витело, Кеплер и, наконец, Декарт, соглашались в этом вопросе с Аристотелем. У Декарта мы встречаемся с первой физически корректной постановкой вопроса: он объясняет мгновенность распространения света по существу тем, что такова же скорость передачи движения через абсолютно упругие шары. Декарт первый обращается к опыту для подтверждения своего мнения. Для его натурфилософской системы результат такого эксперимента имеет решающее значение. В письме 1634 г. он отмечал, что в основании его физики лежит предположение о мгновенной передаче света и если опыт покажет противоположное, то он готов согласиться с тем, что абсолютно ничего не знает в физике. Известно, что Галилей в «Беседах и математических доказательствах» (1638) предлагал опыт для установления факта конечной скорости света: два наблюдателя с фонарями находятся на расстоянии трех, а может быть, восьми или десяти миль, т. е. максимальное расстояние составляет примерно 15 км (в этом последнем случае наблюдения следует проводить при помощи телескопа); один из наблюдателей открывает фонарь, и в то мгновение, когда свет от первого фонаря достигнет второго наблюдателя, тот открывает свой фонарь и первый фиксирует, таким образом, время, за которое свет дважды проходит расстояние между ними. Опыты самого Галилея (расстояние между наблюдателями менее 1 мили) не дали никаких результатов — из них можно было только заключить, что свет распространяется почти мгновенно, если принимать, что его скорость конечна. Во Флорентийской академии экспериментов были предприняты также

не увенчавшиеся успехом попытки определить скорость света.

Правильнее остальных своих современников оценил положение Декарт, который понял, что реальная возможность ответить на вопрос о величине скорости света — попытаться определить ее из астрономических наблюдений, например лунных затмений. И действительно, если эта величина в земных условиях была определена только в середине XIX в., то идея Декарта была реализована уже вскоре после его смерти. В 1675 г. датский астроном Олаф Рёмер, работавший в Париже, сообщил о нерегулярности затмений первого (внутреннего) спутника Юпитера: промежутки между затмениями спутника больше, когда Земля и Юпитер удаляются друг от друга, чем когда они приближаются. Эту нерегулярность он объяснил конечностью скорости света. В 1676 г. он правильно предсказал время затмения. Но картезианцы, составлявшие большинство в Парижской академии, членом которой являлся и Рёмер, не согласились с ним. Только в конце 20-х годов XVIII в., когда после открытия явления абберрации света появилась еще одна возможность определить его скорость, конечность распространения света стала общепризнанным фактом.

Окончательно решить последний вопрос мог только эксперимент. Но в оптике первой половины XVII в. уже были основания и теоретического характера для предположения о конечности скорости света. И не кто иной, как Декарт, сделал первый шаг по этому пути. При доказательстве закона преломления Декарт указывает, что свет проходит через различные среды с различной силой, причем более легко — через более плотные, чем через более разреженные. Отношение этих сил для двух сред постоянно (т. е. не зависит от угла падения) и может быть измерено на опыте:

$$n = \sin i / \sin r.$$

Уже Ферма интерпретировал показатель преломления²² как отношение скоростей света в двух средах, и это не вызвало возражений Декарта, а его последователи Клерселье и Рохо приняли такую интерпретацию²³. При всем разнообразии взглядов на физическую сущность явления преломления света, какое демонстрируют ученые XVII в., все они (после «Диоптрики») едины в том, что изменение скорости распространения света в различных средах вы-

зывает в конечном счете это явление. И хотя одни считают, что скорость возрастает в более плотной среде, как полагал Декарт, а другие придерживались противоположного мнения, в обоих случаях речь шла об изменении скорости при переходе света из одной среды в другую, причем принятие той или другой точки зрения не связано со взглядами на природу света.

Доказательство Декарта закона преломления было основано отнюдь не на очевидных положениях. А поэтому и правильность закона подвергалась сомнению. В этом отношении характерна позиция Ферма, который до того, как в 1662 г. дал свое доказательство закона преломления, считал, что хотя он подтверждается как будто опытом, но это означает лишь то, что вследствие недостаточной точности эксперимента нельзя обнаружить приближенный характер закона синусов. Поиски более надежного обоснования этого закона, таким образом, имели существенное значение для теоретического фундамента новой оптики. Таково, заметим кстати, было и мнение Ньютона.

В обосновании закона преломления легко прослеживаются два направления: математическое и физическое — с точки зрения континуального или с точки зрения корпускулярного представления о природе света. Наиболее известным представителем первого направления был П. Ферма (1601—1665). В своем доказательстве он шел от принципа кратчайшего пути александрийского физика Герона (I в. н. э.), который заметил, что при отражении от плоских зеркал свет распространяется по кратчайшему пути. В этом случае угол падения равен углу отражения. При преломлении такое условие явно не соблюдается. Ферма ищет и находит общий принцип: свет «выбирает» путь более «легкий». В данном случае это означало, что минимальным должно быть общее сопротивление, которое испытывает свет в двух средах, или, что, по Ферма, равносильно предыдущему утверждению, свет при преломлении следует по пути, который требует для его прохождения наименьшего времени. К такому выводу Ферма приходит в 1657 г. Но одного этого условия недостаточно для вывода закона преломления. Только к 1662 г. Ферма смог прийти к закону преломления, который, к его удивлению, совпал с законом Декарта. Как ставит и как решает эту задачу Ферма в 1662 г.? Заданы отрезки AB , FD , точки F и D (рис. 3). Отношение сопротивления R_1 , оказываемого свету при движении в более плотной среде

(на рисунке — нижняя часть круга), к такой же величине (R_i) в менее плотной среде (верхняя часть круга), т. е. R_r/R_i , равно DF/m , где m — некоторый отрезок, причем $DF > m$. Последнее неравенство означает, таким образом, что более плотная среда оказывает большее сопротивление свету, чем менее плотная. По этому поводу Ферма замечает, что такое предположение очень естественно. Далее движение падающего (CD) и преломленного (DI) лучей он представляет как $CD \cdot m + DI \cdot DF$. В силу предположения, высказанного им в 1657 г., эта сумма должна иметь

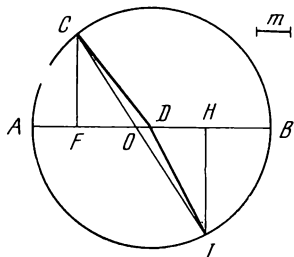


Рис. 3

наименьшее из всех возможных значений для случая преломления света; его Ферма находит используя предложенный им еще в 1629 г. метод отыскания максимумов и минимумов, являющийся по существу методом нахождения экстремума дифференцируемой функции²⁴: Ферма составляет аналогичное выражение для движений вдоль CO и OI , причем OD сколь

угодно мало. Таким образом, движения вдоль CD и DI и CO и OI в пределе должны быть равны:

$$CO \cdot m + IO \cdot DF = CD \cdot m + DI \cdot DF.$$

Обозначив $CD = DI = n$, $b = DF$, $OD = e$, $DH = a$, предыдущее равенство можно записать следующим образом:

$$CO \cdot m + IO \cdot b = nm + nb, \quad (1)$$

CO и IO — стороны треугольников, соответственно, COD и DOI . Тогда

$$CO^2 = n^2 + e^2 - 2be,$$

$$IO^2 = n^2 + e^2 + 2ae.$$

Ферма подставляет выражения для CO и IO в соотношение (1), проводит необходимые выкладки и, пренебрегая членами, содержащими бесконечно малую величину e в первой и высших степенях, приходит к следующему результату: $a = m$. Так как

$$R_r/R_i = 2F/m = \text{const} = K, \text{ то } DF/a = K > 1.$$

Учитывая, что $DF/CD = \sin i$, а $a/DI = DH/DI = \sin r$ (где i

и r — соответственно угол падения и угол преломления), Ферма приходит к закону синусов:

$$\sin i / \sin r = K.$$

Отношение синусов, т. е. показатель преломления, он интерпретирует как отношение скорости света в соответствующих средах: в более плотной ($R_r > R_i$) скорость меньше.

В 1682 г. Г. В. Лейбниц (1646—1716) также приходит к закону синусов. Свет следует, считает он, по пути наименьшего «сопротивления»: если R_i и R_r — сопротивления, оказываемые свету при движении в двух средах, а s_i и s_r — пути света в этих средах, то $R_i s_i + R_r s_r$ будет величиной минимальной. Под сопротивлением Лейбниц понимает величину, пропорциональную скорости света, т. е. минимально действие vds . В отличие от Ферма и в согласии с Декартом Лейбниц принимает, что при переходе в более плотную и оказывающую большее сопротивление распространению света среду скорость его возрастает, как и в случае водяного потока, скорость которого увеличивается, когда русло сужается²⁵. Таким образом, в системе математического доказательства Ферма (и Лейбница) последнее заключение имело произвольный характер. Лишь Х. Гюйгенс (1629—1695) в «Трактате о свете»²⁶ показал, что из принципа наименьшего времени Ферма следует, что скорость света в разреженной среде больше, чем в плотной, если принять еще гюйгенсово правило построения волнового фронта как огибающей вторичных волн. Последнее правило позволило Гюйгенсу объяснить прямолинейность распространения света, отражение и преломление как простое, так и двойное. На этом дискуссия о выводе закона преломления «только из математических принципов» не закончилась. Она продолжалась и в XVIII в. (Мопертюи, Эйлер, Клеро).

У тех, кто стремился дать вывод закона преломления опираясь на определенные представления о природе света, наибольшие возражения, естественно, вызывала легкость с которой Декарт переходит от рассмотрения движения мяча (как аналога света) к стремлению к движению, что по мысли Декарта, и было светом. Французского ученого с этой точки зрения критиковали выдающийся английский философ Т. Гоббс (1588—1679), один из крупнейших философов и физиков XVII в. Меньян (1600—1676)²⁷.

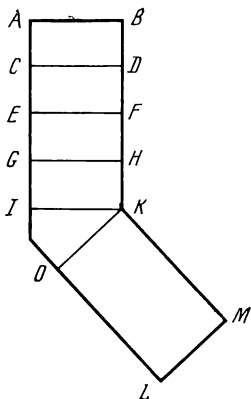


Рис. 4

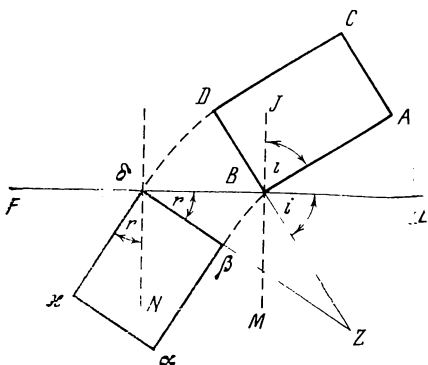


Рис. 5

К середине 30-х годов Гоббс отказался от эмиссионной теории и принял, что свет — это движение. В единственном опубликованном при его жизни оптическом сочинении (1644) Гоббс поясняет, что свет распространяется концентрическими кругами от источника излучения — Солнца, которое пульсирует подобно сердцу, попеременно сжимаясь и расширяясь. Впоследствии он отказался от этой теории «пульсаций», но по-прежнему считал свет движением, оставаясь тем самым, как и Декарт, в рамках континуальной теории света. Причина расхождений между Декартом и Гоббсом, двумя сторонниками континуальной теории, лежала в их философии: последний — «философ движения, тогда как Декарт — философ протяженности» (Ф. Брандт)²⁸. С Гоббса начинается кинематическая традиция: он вводит понятие лучевого фронта и, опираясь на него, доказывает закон преломления. На рис. 4 CD , EF , ..., IK — последовательные положения лучевого фронта; луч — это путь, по которому движение от светящегося тела распространяется через среду. Лучевой фронт (по определению Гоббса, линия света), т. е. линия AB , всегда перпендикулярна сторонам луча, т. е. AI , BK . Концепция лучевого фронта приняли также сторонники корпускулярной теории — Меньян и Барроу (1630—1677). Возможность использовать формальные элементы теории Гоббса в теории, основанной на противоположном представлении о природе света, связана в основном с тем, что обе концеп-

ции находились в зачаточном состоянии, были математически не развиты. В «Оптических лекциях» (1669) Барроу приводит более ясное и простое, чем у Гоббса, доказательство закона преломления. Воспользуемся им, сохранив при этом физическую интерпретацию Гоббса²⁹. На рис. 5 EF — граница раздела двух сред; луч $ABCD$ входит в точке B в более плотную среду, в которой он движется медленнее, чем в разреженной среде.

Из рис. 5 $ZD/ZB = D\delta/B\beta$. Это отношение постоянно при любом угле падения i , если скорость света в однородной среде зависит только от плотности или какой-либо другой характеристики среды. За время t_i , за которое свет от точки D дойдет до точки δ в первой среде, свет во второй среде дойдет от точки B до точки β и, следовательно,

$$D\delta/B\beta = v_i t_i / v_r t_i = v_i / v_r.$$

В треугольнике $Z\delta B$ отношение

$$\frac{Z\delta}{ZB} = \frac{\sin ZB\delta}{\sin Z\delta B} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Откуда

$$\frac{ZD}{ZB} = \frac{Z\delta}{ZB} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_i}{v_r} = n.$$

Таким образом, в интерпретации показателя преломления Гоббс расходится с Декартом: скорость распространения движения или импульса в более плотной среде уменьшается. Гук, который после Гоббса развил далее импульсную теорию, воспринял у него идею физического и математического лучей, идею лучевого фронта, но в вопросе об изменении скорости света в различных средах он следует за Декартом. Таким образом, в предньютоновскую эпоху еще не произошло четкого разграничения мнений о характере изменения скорости света в зависимости от принимаемой гипотезы о природе света. Но что характерно для этого времени — вопрос о природе света перестает быть вопросом, изучаемым философией, а постепенно становится предметом изучения физики, чему способствовали открытия новых явлений в оптике. Проиллюстрируем это на одном примере. Гримальди (1618—1663) в изданном посмертно сочинении по оптике (1665) первый отчетливо понял и описал новое явление — дифракцию, которую он поясняет так. «Подобно тому, как вокруг камня, брошенного в воду (как вокруг центра), образуются круговые

возвышения воды, точно так же вокруг тени непрозрачного предмета возникают блестящие полосы, которые соответственно форме последнего или распространяются в длину или же изгибаются дугообразно. Далее, подобно тому, как те круговые волны представляют простое скопление воды, вокруг которых с обеих сторон тянется углубление, так и блестящие полосы суть не что иное, как свет, распределенный неравномерно вследствие сильного рассеяния и прорезанный теньвыми промежутками»³⁰. Гримальди, возможно, видел в наблюдавшихся им дифракционных явлениях наглядную (видимую глазом) картину распространения света.

В первой половине XVII в. постепенно все большее значение начинает приобретать и учение о цветах. Главными при изучении этой проблемы также становятся аргументы физические, а не философские.

Все доньютоновские концепции связаны с представлениями Аристотеля (IV в. до н. э.) о возникновении цветов; появление цветов связывалось со взаимодействием света с темнотой, причем различие в цветах определялось разным количеством добавлявшейся к белому (солнечному) свету темноты: белый свет — простой, красный наиболее близок к белому, а синий (фиолетовый) — к черному. Через посредничество средневековых авторов учение Аристотеля о цветах вошло в науку XVII в. Кеплер в «Дополнениях к Вителло» излагает его; де Доминис в книге, изданной в 1611 г., дает достаточно разработанный вариант этого учения, а через полвека И. Барроу в «Лекциях по оптике» (1670) готов порассуждать о цветах в стиле Аристотеля уже только «по обычаю и для порядка».

За прошедшие несколько десятилетий многое изменилось в науке о цвете. В этом большая заслуга Декарта. Знание точного закона преломления в сочетании с экспериментальным изучением вопроса — редкий случай в доньютоновской оптике — позволило ему разработать теорию радуги.

Экспериментируя со стеклянной колбой, наполненной водой (модель водяной капли), он нашел, что главную радугу образуют лучи, испытавшие два преломления и одно отражение, а побочную — лучи, попадающие в глаз после двух преломлений и двух отражений. Затем он, используя закон преломления, рассчитал, а также подтвердил на опыте, что направление к вершине радуги образует с линией, проходящей через солнце и глаз наблюдателя, угол

около 42° , а для второй радуги, которая почти всегда наблюдается, но цвета которой слабее и их порядок обратен порядку в главной радуге, этот угол равен примерно 51° . Тут же Декарт замечает, что Мавролик (он единственный, на кого в этой связи Декарт ссылается) нашел из измерений для соответствующих углов значения 45° и 56° . Это дало Декарту основание высказать очень важную для него мысль, что только эксперимент, «сопровождаемый прави-

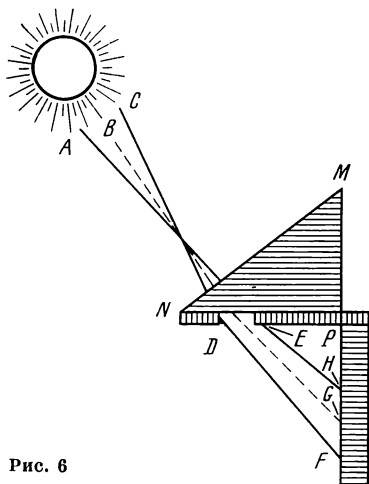


Рис. 6

льными рассуждениями», приводит к решению задачи ³¹.

Но оставалось еще объяснить цвета радуги, порядок их следования. И здесь Декарт вынужден покинуть область математики — он не знал о дисперсии света ³². И математические выкладки сменяют рассуждения, для которых — опять-таки редкий случай в оптике того времени — Декарт стремится найти опору в эксперименте. Радужные цвета можно получить также при помощи призмы, и Декарт проводит опыты с хрустальной призмой (рис. 6). Когда лучи солнца падают на поверхность призмы MN перпендикулярно или почти перпендикулярно, они проходят в нее без преломления и только на выходе у поверхности NP преломляются. На белой бумаге FGH видны все цвета радуги, в F — красные, а в H — синие или фиолетовые. Из подобных опытов Декарт заключил, что для появления цветов не имеет значения кривизна преломляющей поверхности, так как у призмы они плоские, «несущественна и величина угла, под которым они видны, ибо здесь он может быть изменен, причем они не изменяются; не играет роли и отражение, ибо здесь его вовсе нет; ни, наконец, многократные преломления, ибо здесь имеет место только одно. Но... одно преломление все же необходимо, и притом такое, действию которого не противодействовала бы обратная рефракция. Я не сомневался, что необходим так-

же и свет, ибо без света ничего не видно, и, кроме того, я заметил, что необходима и тень, т. е. ограничение этого света»³³; если достаточно расширить отверстие *DE*, цвета исчезают.

Декарт ставит вопрос, почему же «цвета в *F* иные, чем в *H*, хотя и преломление, и тень и свет участвуют в их возникновении одинаковым образом»? И отвечает в духе новой механистической философии: из-за различной скорости вращения, которую приобретают шарики передающей свет среды под действием света.

Как известно, Вселенная Декарта заполнена телами и всепроникающей материей (эфиром). И тела, и эфир состоят из частиц; характер взаимодействия между ними аналогичен передаче движения при ударе. Но частицы — шары эфира способны еще вращаться: «...частицы разреженной материи, передающей действие света, стремятся с большей силой вращаться, чем двигаться по прямой линии; таким образом, те, которые вращаются с гораздо большей силой, дают красный цвет, а те, которые вращаются лишь немного сильнее, дают желтый... зеленый свет появляется там, где они вращаются немного медленнее, а синий — там, где они вращаются медленнее»³⁴. Вполне в механическом духе объяснил Декарт и необходимость тени для возникновения цветов: на границе света и тени вращение шариков эфира замедляется либо убыстряется в зависимости от направления их вращения. Хотя Декарт не вполне отказался от теории Аристотеля, тем не менее «тень» у него выполняет другие функции, чем у его предшественников. Декарт был первым, кто попытался объяснить явления оптические, исходя из представлений механики. Именно поэтому можно сказать, что дальнейшее развитие оптики пошло по Декарту.

Тем самым Декарт не только начал новую главу в истории оптики, но и по-новому поставил вопрос о том, что, собственно, значит объяснить оптическое явление. Для него и его последователей объяснение сводится к описанию через движение процесса, лежащего в основе рассматриваемого эффекта с помощью законов механики. И в этом отношении большинство известных естествоиспытателей XVII в. — картезианцы³⁵. Однако было бы неверно утверждать, что такой подход к объяснению является изобретением Декарта — и лучше всего это подтверждает широкое и быстрое распространение, какое получил механицизм уже в 1640—1650 гг. Декарт одним из первых

увидел в современной ему механике альтернативу старому схоластическому объяснению и первым попытался построить механическую картину оптики³⁶. С этим связано и второе достоинство оптики Декарта. Он первый последовательно стал проводить ту точку зрения, что цвета радуги, призматические цвета столь же реальны (их называли в то время «кажущимися»), как и цвета тел, и вызывают определенные ощущения благодаря различию в некотором присущем им объективно качестве. Такой объективной характеристикой цвета у Декарта является относительная скорость вращения шариков передающей свет среды. И хотя определить введенные им цветовые характеристики было невозможно, сам факт такого подхода к проблеме был нов и важен.

По пути, проложенному Декартом, последовали многие. До Ньютона в учении о цветах самые существенные результаты были получены Р. Гуком (1635—1703). Но между «Микрографией» Гука (год первого издания — 1665, второго — 1667) и «Рассуждениями о методе» (1637) прошло четверть века. За это время в оптике произошли события, которые привели к появлению новой области — физической оптики³⁷: были открыты явления дисперсии света, интерференции, дифракции. О дисперсии света знал, правда, около 1605 г. еще Т. Хариот³⁸. Этот эффект был переоткрыт известным чешским естествоиспытателем М. Марци (1595—1667). В изданной в Праге книге «*Thaumantias*»³⁹ он сообщает о своих спектральных исследованиях; Марци был, видимо, первым, кто заинтересовался вопросом, что произойдет, если отдельные части удлиненного цветного изображения (так называли тогда спектр) заставить проходить через вторую призму. Так он обнаружил, что цвета при повторном преломлении не меняются. Книга Марци получила некоторое распространение в Европе. Известно, например, что один ее экземпляр находился в библиотеке И. Барроу, но на сообщаемые в ней новые факты не обратили внимания. Произошло это, как принято считать, из-за неясности изложения Марци. С конца XVIII в. обычно считают открывателем явления дисперсии Марци, в XVII столетии о дисперсии узнали от Ньютона.

В учении о цветах в рассматриваемый период главным стало открытие интерференционных цветов. Первым наблюдал цвета, появляющиеся в тонких стеклянных пленках и пленках различных жидкостей, Р. Бойль (1664).

Р. Гук расширил класс предметов, где эти цвета могут возникать; в «Микрографии» (1665) он описал их и указал на характерные особенности нового явления. То, что цвета возникают в плоскопараллельных пластинках, в слюде, тонких пленках, противоречило объяснению Декарта причины возникновения призматических цветов. «В них есть все цвета, возникающие в прозрачном теле, но... нет того преломления, которое, по предположению Декарта, дает возможность его шарикам приобрести вращение: в ровных и одинаковых пластинках обнаруживается, что второе преломление... упорядочивает и восстанавливает предполагаемое вращение шариков в их прежнее однородное движение», — писал Гук⁴⁰. И он предлагает свою модификацию учения Аристотеля, которая могла бы объяснить и цвета тонких пленок. Согласно Гуку, свет в однородной среде распространяется от источника подобно волнам на воде, расходящимся, как от центра, от места падения в воду камня. Он заимствует у Гоббса идею физического светового луча⁴¹, ограниченного лучами математическими. В сечении физический луч представляет прямоугольник. Если такой луч попадает на преломляющую поверхность под углом, отличным от прямого, то, проходя во вторую среду, он из-за неодинаковой «легкости» прохождения сред деформируется и линия, соединяющая стороны импульса, уже более не пересекает их под прямым углом. (В этом пункте Гук расходится с Гоббсом.)

Таким образом, свет — белый, когда угол между направлением его распространения (лучом) и волновой поверхностью (импульсом) — прямой. Возмущающее влияние среды приводит к изменению величины этого угла — он становится острым, а свет из белого — цветным; объективной характеристикой цвета служит, таким образом, величина угла. Однако подобные характеристики вводятся только для трех цветов — белого, красного и синего. Последние два Гук выделяет как главные, остальные цвета — смесь, разбавление этих двух.

Вот описание опыта, который, по мнению Гука, поясняет его концепцию. Пусть солнечный луч (рис. 7) попадает через отверстие ab в стеклянный сосуд ABC , заполненный до линии AB водой. Лучи преломляются к $cdef$. На листе бумаги, помещенном за стенкой C , появляются все цвета радуги. Они возникают вследствие неодинакового наклона лучей к преломляющей поверхности. «Если

глаз оказывается против cd , он воспринимает нижнюю часть солнца как темно-красную, а если против ef , то он воспринимает верхнюю часть светящегося тела как темно-синюю; и эти цвета будут казаться все более темными соответственно тому, что лучи от светящегося тела падают более наклонно на поверхность воды и, следовательно, испытывают больше преломление и более различаются, чем дальше $cdef$ сдвигается от входного отверстия»⁴². И заключает рассуждения о причинах возникновения цветов при преломлении Гук замечанием, что появление призматических цветов зависит от наклона импульса к линии излучения и, в частности, «в лучах cd , которые составляют алый свет, их внутренние части, а именно те, которые являются ближайшими к середине излучающего тела, предшествуют самым удаленным от центра, которые соприкасаются с темнотой и неизлучающим небом». А у лучей, вызывающих ощущение синего света, часть импульса, которая соприкасается с темным небом, предшествует внутренней части, которая граничит с излучающим телом. Почему у Гука только два главных цвета? Основная причина этого, видимо, в том, что для Гука, как показала его дискуссия с Ньютоном, механическое объяснение возникновения цветов, наглядность были существеннее, чем математическое описание цвета, а в таком случае проще представить два вида импульсов, чем, скажем, пять (по числу цветов, им обычно выделяемым в спектре).

Чтобы объяснить интерференционные цвета, Гук соединяет представление о деформированных вследствие перехода в другую среду импульсах с принципом, напоминающим принцип интерференции.

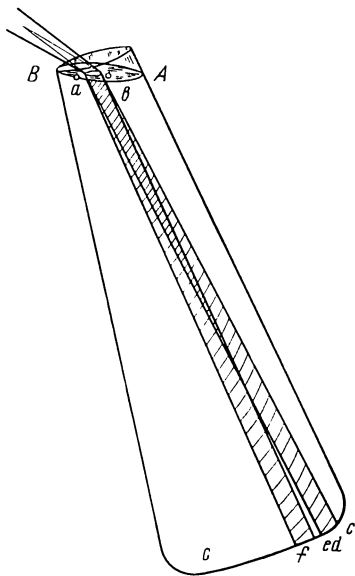


Рис. 7

Несмотря на прогресс в экспериментальном изучении цветов эта проблема в теоретическом плане не вышла за рамки представлений начала века. Она оставалась проблемой общенаучной, натурфилософской. Такое положение вещей нашло отражение, например, в книге Р. Бойля «Опыты и рассуждения о цветах» (1664). Основное внимание Бойль обращает на изменение окраски растворов при смешении их или на появление окраски в тех случаях, когда сливаемые растворы были прежде бесцветными, на цвета тел. В связи с последними находится их поглотительная и отражательная способности. В подтверждение приводится следующий опыт. В затемненную комнату через отверстие в 3,5 дюйма (8,75 см) пропускается солнечный свет, который падает на различно окрашенные листы бумаги, находящиеся на расстоянии 5 футов (~152 см) от отверстия. «Белый [лист] больше всего отражает. Сравнение зеленого, красного и синего показывает, что красный наиболее сильно отражает ... зеленый и синий ... отражают свет, видимо, почти одинаково. Желтый по сравнению с двумя последними отражает несколько больше света...»⁴³. Белизна свойственна телу, которое полностью отражает падающий на него свет, чернота — телу, полностью поглощающему свет.

Рассуждая о цвете, Бойль замечает: «Цвет настолько далек от того, чтобы быть неотъемлемым качеством объекта в смысле, который имеют обыкновение провозглашать школы, или даже в смысле некоторых современных атомистов, что если мы вникнем в существо дела внимательнее, то увидим причину для предположения, если не заключения, что... свет сам вызывает ощущение цвета»⁴⁴.

Бойль сообщает также о нескольких своих призматических опытах и заканчивает их описание обещанием исследовать в дальнейшем этот предмет подробно. Обещание выполнено не было: эксперименты Ньютона сделали такое исследование не нужным.

В эти же годы была описана дифракция света — в «Физико-математическом трактате о свете, цветах и радуге» Гримальди (1665). До Гримальди об отдельных дифракционных явлениях знали, но не понимали, что имеют дело с неизвестным в оптике эффектом. Так, Мавролик описывал цвета, которые появляются, если смотреть на свет через птичье перо, но считал, что причина их появления та же, что и при образовании радуги, т. е. объяснял их преломлением; об ореолах вокруг горящей свечи знал Декарт;

Марци ставил сходные с Гримальди опыты, но только последний описал фактически все проявления дифракции света и отметил основные особенности этого явления.

Упомянем еще об открытии в 1669 г. двойного преломления в исландском шпате Э. Бартолином (1625—1698).

Таким образом, к середине 60-х годов были открыты и исследованы (без установления количественных закономерностей) явления, ставшие основой нового раздела о свете — физической оптики. Увлечение экспериментированием приносило реальные плоды, причем основные открытия в оптике XVII в. приходятся на период наиболее интенсивных экспериментальных исследований — 1640—1670 гг.

Многое из того, о чем мы говорили, стало известно Ньютону уже в студенческие годы или вскоре после окончания колледжа. В 60-е годы он читал Декарта, книгу Р. Бойля, «Микрографию» Гука. Видимо, «Дополнения к Витело» и «Диоптрика» Кеплера так и не были им прочитаны, но с основными достижениями Кеплера в оптике он познакомился по «Диоптрике» Декарта. О концепции лучевого фронта Гоббса он мог знать из книги Гука, «Лекций» Барроу.

И Ньютон отбирал в прошлом то, что казалось ему более соответствующим действительности. Возможно, картина, которую он видел перед собой, не слишком отличалась от изображенной в этой главе, хотя, несомненно, первая была богаче деталями и связана множеством нитей с другими разделами естествознания, философией.

Глава 3

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП НЬЮТОНА

Широкую известность Ньютону вначале принесли не его математические результаты, хотя о них постепенно становилось известно в конце 60-х — начале 70-х годов, не работы по механике, а построенный им отражательный телескоп. Чтобы понять причину шумного и неожиданного для двадцатидевятилетнего профессора математики из Кембриджа успеха его прибора, надо вернуться немного назад и вспомнить, каким был телескоп в то время.

К середине XVII в. телескопы были весьма распространенным астрономическим прибором. Ими пользовались и ученые, и любители; их можно было купить в Лондоне, Париже, в лавках оптиков других городов Западной Европы.

За несколько десятилетий, которые прошли со времени первых наблюдений астрономических объектов — Луны, Солнца, планет, звезд — с помощью телескопа, он изменился и усовершенствовался. Первая зрительная труба, использованная для астрономических наблюдений, была построена Галилеем в 1610 г.¹ и представляла трубу с двумя стеклами: объективом служила плоско-выпуклая, а окуляром — плоско-вогнутая линзы. За два месяца наблюдений (с января до начала марта) Галилей открыл неровности поверхности Луны, четыре спутника Юпитера, установил, что Млечный путь представляет собой скопление звезд. Обо всем этом он сообщил в «Звездном вестнике»

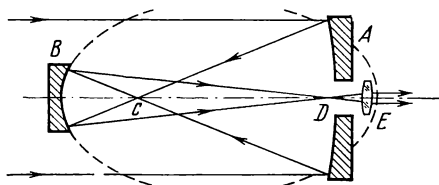


Рис. 9

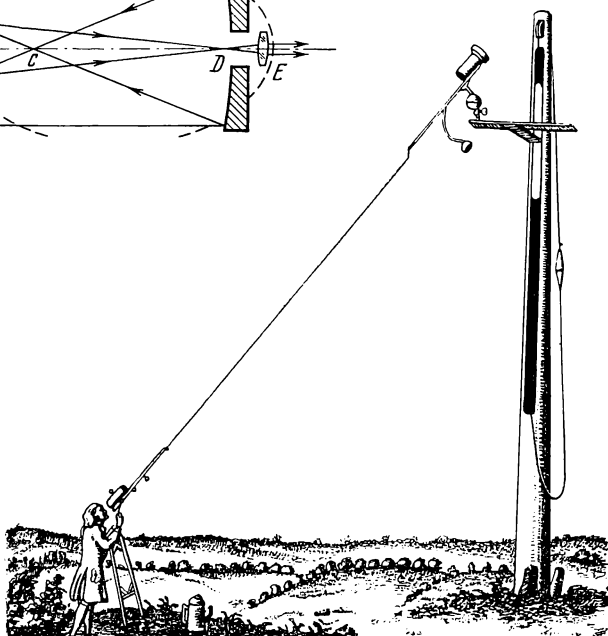


Рис. 8

Воздушный телескоп Х. Гюйгенса

(март 1610 г.). Трудно передать впечатление, которое произвел этот каскад открытий на современников. Не надо забывать и о психологической стороне дела — перед взором ученого открылся новый мир. Галилей так описал собственные ощущения: «...пуже шестой величины² замечаешь через зрительную трубу такое многочисленное стадо других звезд, ускользящих от естественного зрения, что едва можно поверить; пожалуй, даже в бóльшем количестве, чем остальные шесть разрядов величин; наибольшие из них, которые мы могли бы назвать звездами седьмой величины или первой из невидимых, наблюдаемые с помощью трубы, кажутся и больше, и ярче, чем звезды второй величины простым глазом. Чтобы показать на паре примеров невероятное их множество, я решил описать два созвездия... Сначала я решил нарисовать целиком созвездие Ориона, но подавленный громадным множеством звезд и недостатком времени, отложил этот приступ до другого случая»³.

Штурм звездного неба, начатый Галилеем, был продолжен и им самим, и многими другими. Параллельно шло усовершенствование телескопов. Их действие объяснил Кеплер в «Диоптрике» (1611). Там же он предложил тип астрономической трубы, отличной от галилеевой: вогнутую окулярную линзу он заменил выпуклой, благодаря чему поле зрения трубы увеличилось. То, что сочетание стекол, предложенное Кеплером, давало перевернутое, а не прямое, как в трубе Галилея, изображение, для астрономических целей значения не имело. Указал он и на то, что диаметр объектива должен быть всегда больше диаметра окулярной линзы (увеличение телескопической системы равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра или диаметров входной и выходной линз), в противном случае надо диафрагмировать окуляр. Кеплеру принадлежит еще ряд предложений относительно конструкций различных зрительных труб. По идее Кеплера в 1613 г. патер Шейнер (1575—1650) построил трубу, которая постепенно вытеснила из употребления (для астрономических наблюдений) трубу Галилея. Труба Кеплера обладала еще одним достоинством: в отличие от телескопа Галилея она давала действительное изображение, это позволило применить крест нитей и окулярный микрометр, благодаря чему стало возможно проведение измерений с помощью телескопа, а не только наблюдений.

Стремясь улучшить качество изображения и получить большее увеличение, строили все более длиннофокусные телескопы: если у лучших телескопов Галилея фокусное расстояние было около 1 м, то в 60-е годы XVII в. обычными стали телескопы, длины труб которых достигали 60—100 футов (18—30 м). Дальнейшая погоня за увеличением, а также стремление уменьшить вредное влияние сферичности стекол привели к созданию так называемых «воздушных» телескопов — длина их была настолько велика (порядка 60 м), что стало невозможно изготавливать столь длинные трубы и пришлось объектив и окуляр закреплять порознь (рис. 8). Это, однако, затрудняло работу с ними. Да и четкость изображений оставляла желать лучшего. Необходимо помнить, что и окуляры, и объективы телескопов того времени делали однолинзовыми. Качество стекла и шлифовка линз тоже были невысоки. В этих условиях особенно большое значение имело искусство наблюдателя, острота его зрения.

Вскоре после появления астрономических труб со стеклами была высказана мысль о постройке телескопов, объективом которых служили бы зеркала. Сама идея была очень естественной — о свойстве вогнутых зеркал давать увеличенное изображение предмета знали еще в античности. Однако на пути реализации было много трудностей технического характера (подробнее об этом см. дальше). К тому же, видимо, поначалу казалось проще достичь хороших результатов с телескопами-рефракторами. В этом смысле показательна судьба предложения известного английского математика Джеймса Грегори (1638—1675). Неудобство работы с современными ему длинными зрительными трубами, а также плохое качество стекол побудили Грегори, по его собственным словам, обратиться к телескопу с зеркалом. Чтобы избежать влияния сферической аберрации, он предложил применить параболическое, а не сферическое зеркало. Но и рефлектор, по мысли Грегори, имеет недостатки в сравнении с рефрактором — он проигрывает, как мы сказали бы сейчас, в светосиле из-за многочисленных отражений⁴. Выход Грегори видит в сочетании зеркал и линз, и в этом — новизна и оригинальность его предложения. Такой телескоп он описал в книге «Optica promota» («Высшая оптика»), изданной в Лондоне в 1663 г. Конструкция телескопа понятна из рис. 9. *A* — параболическое зеркало, в центре которого отверстие. В точке *C* находится фокус большого зеркала *A*; *B* — малое эллипти-

ческое зеркало, фокусы которого C и D . Окулярная линза также имеет фокус в D . Предполагаемая длина телескопа — примерно 6 футов, т. е. около 180 см. Осуществить свой проект Грегори не смог и поэтому обратился к лучшему лондонскому оптику Рейву. Однако Рейву не удалось изготовить параболическое зеркало требуемого качества. Для Грегори это обстоятельство оказалось решающим, и своим телескопом он больше не занимался. Вспомнил о нем он только тогда, когда узнал о телескопе, построенном Ньютоном.

Уже в первые годы учебы в Кембридже Ньютон начинает астрономические наблюдения. Примерно к 1664 г. относится его знакомство с «Диоптрикой» Декарта, написанной как руководство для оптиков-практиков. В согласии с рекомендациями Декарта Ньютон строит станок для шлифования линз, пытается придавать им более сложную, чем сферическая, форму — задача трудная и сейчас. Примерно в это время он мог прочитать и трактат Грегори. К решению построить отражательный телескоп Ньютон мог прийти и вполне самостоятельно — по тем же причинам, что и Грегори.

Предположение, что еще до открытия дисперсии света у Ньютона возникла мысль о постройке отражательного телескопа, не лишено основания: в его записной книжке 1661—1665 гг. есть рецепт состава для покрытия зеркала⁵. Эксперименты с призмой привели Ньютона к открытию неодинаковой преломляемости лучей различного цвета и как результат — к пониманию того, что не столько сферическая аберрация, но и в первую очередь хроматизм изображения является главным препятствием на пути улучшения качества телескопов. Более того, результаты опытов с призмами убедили Ньютона если не в принципиальной, то во всяком случае в практической невозможности избавиться от хроматизма изображения с помощью линзовых систем⁶. При отражении же, как проверил Ньютон, дисперсия не наблюдается.

Итак, вопрос о постройке рефлектора предстал перед Ньютоном в совершенно новом свете.

К этому времени он уже был знаком с книгой Грегори и, создавая свой проект, в значительной степени отталкивался от схемы Грегори, которая его не удовлетворяла и из-за больших потерь при отражении света от малого вогнутого зеркала, чем от плоского, и из-за ошибок, дополнительно вносимых вогнутым зеркалом, если ему толь-

ко не придать гиперболическую форму, что практически осуществить было невозможно⁷. Так он пришел к своей схеме рефлектора. Но на пути создания отражательного телескопа возникли трудности технического порядка. Требования к качеству полировки зеркальной поверхности были, по оценкам Ньютона (приблизительно правильными), в 5—6 раз выше, чем к шлифовке преломляющей поверхности. Ньютон придумал способ полировки металлической поверхности, занялся поисками подходящих сплавов для зеркала и добился успеха. В процессе этих занятий он понял, что получить параболическое зеркало, которое, как тогда уже знали, дает изображение, свободное от сферической аберрации, чрезвычайно трудно, но что можно прийти к неплохим результатам, если зеркало оставить сферическим. (Вспомним, что требование Грегори — отполировать параболическое зеркало — не смог выполнить лучший оптик Лондона).

В 1668 г. рефлектор был построен. Его описание содержится в письме Ньютона другу от 23 февраля 1669 г.⁸ Длина телескопа 6 дюймов, т. е. примерно 15 см (!), диаметр зеркала 1 дюйм (~2,5 см); окуляром служила плоско-выпуклая линза. Этот карманный телескоп по увеличению соответствовал 6-футовому телескопу обычного типа. Однако из-за неудачного выбора материала и недостаточно хорошей полировки зеркала качество изображения, даваемого этим телескопом, оказалось хуже, чем предполагал Ньютон, и соответствовало 3- или 4-футовым рефракторам. Все же в свою трубу он отчетливо видел спутники Юпитера и фазы Венеры, последние — «не очень отчетливо и не без некоторых ухищрений при расположении инструмента». Ньютон рассматривал свой первый телескоп как модель для более совершенного образца — 6-футового рефлектора, который не уступал бы по своим эксплуатационным качествам 60- или даже 100-футовому рефрактору.

Второй телескоп Ньютон построил в 1671 г. (рис. 10). Известие о том, что в Кембридже сделан телескоп совершенно новой конструкции, дошло до Лондона. Рефлектор был отправлен королю; его работу проверила комиссия Королевского общества, и благожелательный отзыв ее о телескопе послужил рекомендацией Ньютону для приема его в 1672 г. в члены Общества. Этот телескоп хранится в Королевском обществе до настоящего времени. Его описание было опубликовано в «Философских трудах». Одно-



Рис. 10. Телескоп И. Ньютона

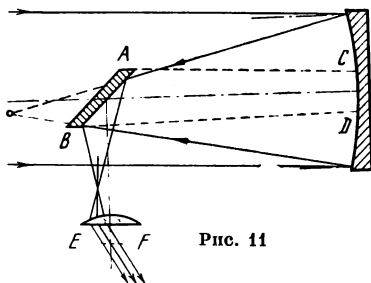


Рис. 11

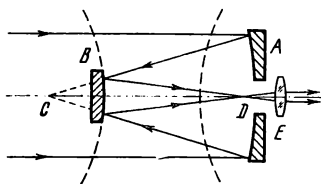


Рис. 12

временно было составлено письмо в Париж Гюйгенсу с описанием инструмента; прежде чем отправить письмо во Францию, его переслали для ознакомления Ньютону. Такая процедура ясно показывает, какое значение придавалось приоритетным вопросам; защищали не просто право на изобретение конкретного лица (Ньютона), о котором в то время члены Королевского общества мало что знали. Речь шла о приоритете английской науки. Как писал Ольденбург Ньютону 2 января 1672 г., «необходимо предпринять некоторые шаги, чтобы защитить это изобретение от узурпации иностранцев»⁹.

Интерес к телескопу Ньютона был велик. Особенно поражали небольшие размеры прибора. Член Королевского общества, житель Кембриджа Т. Гейль сообщал в Лондон, что 16-футовый телескоп Ньютон сократил до размеров пяди (пядь равна 9 дюймам).

Схема телескопа ясна из рис. 11. В нем, кроме сферического зеркала CD , применено небольшое плоское зеркало AB , наклоненное под углом 45° к оси. Поразившие современников небольшие размеры телескопа связаны и с этой конструктивной особенностью. Но одновременно оно, как справедливо заметил Грегори, задержи-

вало часть лучей, и видимость объектов тем самым ухудшалась. Такая конструкция создавала еще одно неудобство чисто механического характера — наблюдатель должен был сидеть сбоку.

Почти одновременно с сообщением о ньютоновском телескопе в Париже было опубликовано описание телескопа-рефлектора, предложенного французом Кассегреном. Он отличается от схемы Грегори тем, что вместо второго вогнутого сферического зеркала в нем применено выпуклое (рис. 12). Благодаря этому телескоп Кассегрена более длиннофокусный, а потому дает большее увеличение.

Таким образом, менее чем за десять лет были предложены три основных типа рефлекторов.

После волны энтузиазма, вызванной поначалу телескопом Ньютона, наступила пора трезвой оценки возможностей прибора. Уже в марте 1672 г. сферическое зеркало начало тускнеть. Королевское общество заказало лондонскому оптику К. Коку рефлектор ньютоновского типа с зеркалом с фокусным расстоянием в 4 фута, но тот не смог отполировать такое зеркало, хотя он пользовался советами Ньютона. Предлагали Гуку заняться усовершенствованием рефлектора. Но так ничего и не было сделано.

То, что на протяжении еще нескольких десятилетий рефлекторы не получали распространения, несмотря на большой вначале интерес к этому типу телескопов, объясняется двумя причинами. Во-первых, трудностью отполировать металлическое зеркало необходимого качества; чтобы в какой-то мере оценить ее, достаточно прочитать страницы «Оптики», посвященные этому вопросу. Вторая причина отчасти связана с первой, но в основном — с особенностью рефлектора: он представляет открытую трубу, поэтому погода оказывает заметное влияние на состояние отражающей зеркальной поверхности и на процесс измерений.

В течение последующих примерно двадцати лет фактически только Ньютон продолжал заниматься усовершенствованием своего телескопа. Он искал и находил новые составы для отливки зеркал, новые методы полировки и, видимо, в этом преуспел. Во всяком случае, Дэвид Грегори (1661—1710), посетивший в мае 1694 г. Кембридж, записал со слов Ньютона, что последний нашел прекрасный химический состав для металлического зеркала, благодаря чему оно не тускнело со временем. К моменту разговора, отмечает Грегори, у Ньютона был превосходный телескоп

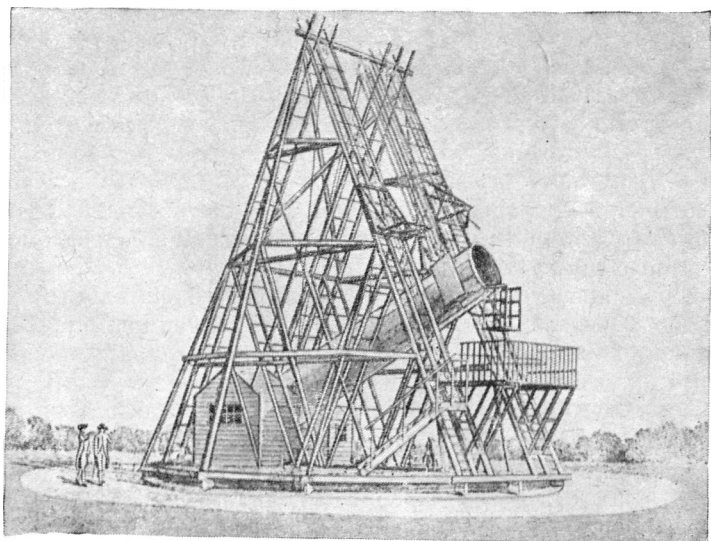


Рис. 13. 40-футовый рефлексор В. Гершеля

собственной конструкции ¹⁰. После переезда в Лондон Ньютон больше не занимался своим телескопом.

В 1723 г. Дж. Гадлей (1682—1744) изготовил достаточно хорошего качества рефлексор Ньютона, причем ему удалось придать большому зеркалу параболическую форму. Таким образом, проект Ньютона в полной мере осуществил впервые Гадлей. На этом основании его иногда считают истинным создателем рефлексора. Рефлексор работы Гадлея демонстрировался на заседании Королевского общества в присутствии Ньютона. Бредли и Паунд сравнили его с 122-футовым рефрактором Гюйгенса, который тот подарил в 1691 г. Королевскому обществу. И новый рефлексор оказался менее светосильным, чем рефрактор. Гадлей в 1726 г. построил еще один рефлексор — типа, предложенного Грегори.

В течение XVIII в. рефлексоры постепенно завоевывали признание. Самые известные из них построены выдающимся астрономом и оптиком В. Гершелем (1738—1822). На рис. 13 представлен самый знаменитый его 12-метровый рефлексор с диаметром зеркала 122 см, построенный в 1783 г. Но коренной перелом в отношении рефлексоров произошел только во второй половине XIX в., когда нашли

удачный метод серебрения стеклянных зеркал. Еще Ньютон наряду с поисками усовершенствования металлических зеркал обратился к стеклянным, так как они легче поддаются полировке. Проект телескопа с таким зеркалом относится еще к 1673 г. В «Оптике» он рекомендует применять «вместо металла стекло, вогнутое с передней стороны и настолько же выпуклое с задней и покрытое ртутью с выпуклой стороны. Стекло должно быть всюду точно одинаковой толщины, иначе оно будет окрашивать рассматриваемые предметы и делать их неотчетливыми. Я пытался с помощью такого стекла... сделать отражательный телескоп в четыре фута длиной для увеличения приблизительно в 150 раз и убедился, что требуется только хороший мастер для совершенного выполнения этого намерения»¹¹. В своем прогнозе Ньютон ошибся. Нужна была работа нескольких поколений ученых и оптиков-практиков, чтобы научиться варить высококачественное стекло, нужно было создать новые методы серебрения зеркал, прежде чем хорошее качество зеркал стало определяться в основном мастерством изготовителя.

Ньютон неоднократно утверждал, что причиной, побудившей его обратиться к постройке отражательного телескопа, явилась обнаруженная им на опыте неодинаковая преломляемость лучей разного цвета. Об этом он говорит в «Лекциях по оптике» (они, собственно, с этого пункта и начинаются); это же он утверждает в «Новой теории света и цветов», затем в «Началах» и, наконец, в «Оптике». При чем всегда из факта дисперсии света у него следует невозможность создать диоптрическую систему, которая бы позволяла хотя бы уменьшить вредное влияние хроматизма. Вот характерный пример высказываний Ньютона по этому вопросу. Сообщая впервые членам Королевского общества о своей новой теории света в феврале 1672 г.¹², Ньютон отмечает, что результаты его экспериментов свидетельствуют о том, что «свет состоит из лучей различной преломляемости», и продолжает: «Поняв это, я оставил мои работы со стеклом, ибо увидел, что усовершенствование телескопов ограничивалось до сих пор не столько отсутствием стекол правильной формы, соответствующей предписаниям оптических авторов... сколько тем, что свет является разнородной смесью лучей различной преломляемости... Эта неправильность в несколько сотен раз превышает неправильность, которую могла бы вызвать в случае однородного света благодаря неточности формы сферическая линза

Столь же малого сечения, как объективные стекла длинных телескопов. Это заставило меня обратиться к отражениям»¹³. Но единственное, что следовало из факта дисперсии света, а также из найденной Ньютоном из опыта величины погрешности, вносимой хроматизмом, — то, что последняя ошибка является значительно бóльшим препятствием для улучшения качества телескопов, чем сферическая аберрация. Причиной, по которой Ньютон столь жестко связал два факта — дисперсию света и невозможность устранить хроматическую аберрацию с помощью преломлений, явился принятый им (на основании результатов эксперимента и некоторых общих теоретических соображений) закон дисперсии¹⁴. Следствием этого и стало первое положение теории Ньютона: «Цвета не являются качествами света... но суть первоначальные и прирожденные свойства, различные в различных лучах»¹⁵.

Однако изложение, принятое Ньютоном в «Новой теории...», построено так, чтобы создать впечатление, будто его отказ от усовершенствования рефракторов связан только с экспериментально наблюдаемыми фактами. Этой же цели служат и приводимые им оценки погрешности — хроматической разности увеличений (терминология современная), которая в несколько сот раз превышает «неправильности из-за неточности формы» сферической линзы. Только об этом виде аберрации Ньютон упоминает и в «Оптике».

Но ему известен и другой вид хроматической аберрации — продольная. Это ясно из его ответа Гуку от 11 июня 1672 г. Ньютон сообщает, что из опыта он определил фокусные расстояния вогнутого зеркала и плоско-выпуклой линзы при одинаковых апертурах для лучей разного цвета; затем сравнил рассчитанные значения фокусных расстояний с найденными экспериментально и нашел, что ошибка для линзы превосходит ошибку для зеркала более чем в 16 раз. Абсолютная величина ошибки увеличивается с увеличением апертуры¹⁶.

От Гука, первого критика ньютоновской теории света, не укрылась связь между теоретическим положением, что цвет не качество, а свойство света, и отказом Ньютона работать над усовершенствованием рефракторов. Но Ньютон тогда не хотел связывать судьбу своей теории с решением вопроса о путях улучшения оптических приборов. Он ограничился замечанием, что найдет более удобный случай обсудить вопрос, являются ли его практические выводы

следствием принятых им теоретических положений или же результатом опытного исследования. Но свое обещание Ньютон не выполнил. В двух напечатанных при его жизни работах, где он затронул эту проблему, — в «Началах» и «Оптике» — он ничего не прибавил к тому, что им было сказано в 1672 г.

Настойчивость, с которой Ньютон пропагандировал идею отражательного телескопа, и его практическая работа над его усовершенствованием принесли свои плоды. Уже к концу жизни Ньютона их стали строить повсеместно — от Англии до России. И хотя современные телескопы для астрономических исследований строят, как правило, по схеме Кассегрена, но значение работы Ньютона это не умаляет. Самые крупные современные телескопы — это рефлекторы: пятиметровый телескоп Хейла, построенный в 1949 г. в США, и советский шестиметровый Большой астрономический телескоп (станция Зеленчукская, 1975). Астрономы же любители пользуются рефлекторами ньютоновского типа.

Глава 4

ПРОБЛЕМА

СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СВЕТА

«Говорят, что посередине между двумя противоположными мнениями лежит истина. Никоим образом! Между ними лежит проблема, то, что недоступно взору, — вечно деятельная жизнь, мыслимая в покое»¹. Приведенное высказывание великого немецкого поэта, мыслителя, естествоиспытателя Гете можно было бы поставить эпиграфом к этой главе. В данном случае проблема состоит в том, является ли основой теории цветов Ньютона эксперимент, и только эксперимент, как утверждал он сам, или прав Гете, говоривший, что «исследователь пытал природу, вымогая у нее признание в том, в чем сам он уже заранее был уверен». По этому поводу высказывались полярные точки зрения и менее радикальные, но тем не менее еще не приближающие нас к истине.

Теория цветов Ньютона, связанная в первую очередь с его опытами с призмами, была в основных чертах сформулирована уже в 1666 г.² Ее Ньютон сделал предметом лек-

ций по оптике, прочитанных им в 1670—1671 гг. Но лекции «остались малоусвоенным материалом в головах кембриджских студентов и почти неизвестным манускриптом в университетском архиве»³. Концепция цветов Ньютона стала известна только в феврале 1672 г., когда он представил членам Королевского общества статью «Новая теория света и цветов», вскоре опубликованную в «Философских трудах». Материал для нее Ньютон взял из «Лекций».

Известно, что Ньютон, особенно в молодости, неохотно публиковал результаты своих исследований, будь то работа по механике, математике или оптике. Нужно было благоприятное стечение обстоятельств, чтобы он решился на такой шаг. В данном случае основную роль сыграл большой интерес, проявленный членами Королевского общества к телескопу-рефлектору, и та благожелательность, с которой был встречен Ньютон, его создатель. Естественно, что для первой публикации он выбрал теорию, практической реализацией которой являлся его телескоп.

Ньютон представил свою теорию по образцу изложения катоптрики, науки математической и по форме излагавшейся аналогично началам геометрии. Ее основные выводы сводились к следующим положениям.

1. Цвета являются не качествами, а первоначальными свойствами света, различными в различных лучах, которые отличаются друг от друга по степени преломляемости, а значит, и по способности проявлять тот или иной цвет.

2. Одна и та же степень преломляемости n (показатель преломления) соответствует одному и тому же цвету и наоборот.

3. «Вид цвета и степень преломляемости, свойственные каждому отдельному сорту лучей, не изменяются ни преломлением, ни отражением, ни какой-либо иной причиной, которую я мог наблюдать», — подчеркивает Ньютон.

4. Поэтому изменение цвета происходит только тогда, когда имеется смесь лучей разного цвета.

5. Отсюда вытекает деление лучей на простые и сложные, т. е. состоящие из смеси лучей разных цветов.

6. «Те же цвета по виду, как и первичные, можно получить смешением».

7. Но ни один цвет не может в отдельности проявлять белизну, т. е. белый свет — всегда сложный⁴.

Это была, по словам современников, странная, необычная гипотеза. С такой оценкой вполне можно согласиться,

если вспомнить, какой была «нормальная» теория цветов. Их было песколько — де Доминиса, Декарта, Гука, Гримальди, но всех их объединяла идея, автором которой считают Аристотеля. Цвета согласно ей являлись модификациями света, а свет солнца (белый свет) — простым. На вопрос, что такое модификация, авторы разных концепций отвечали по-разному, но и здесь было нечто общее, объединявшее их: темнота играла основную роль в образовании цветов из белого света (она могла просто смешиваться со светом в различных пропорциях, как у де Доминиса, или роль темноты выполняла граница между покоящейся частью среды и той ее частью, через которую проходил свет, как у Декарта и Гука, и т. д.). Объединяло все эти теории также отсутствие каких-либо количественных характеристик для описания цветов, таких, которые можно было бы измерить на опыте. Единственное, что сделали в этом направлении до Ньютона, — попытались поставить появление призматических цветов в зависимость от угла падения на призму лучей света, приходящих от различных точек солнечного диска. Но, что характерно, до Ньютона никто не проверил это утверждение на опыте.

Обратившись к оптике, Ньютон начал не с экспериментов: описанию первых опытов в записной книжке 1661—1665 гг.⁵ предшествуют выписки из книг или собственные рассуждения Ньютона о природе света, которые свидетельствуют о том, что ученый был уверен (в основном из натурфилософских, а не из физических соображений) в справедливости гипотезы о корпускулярной природе света.

Последнее обстоятельство предопределило очень многое в его теории цветов.

В 1664—1665 гг. Ньютон делает в оптике первые шаги⁶ — сначала в «теоретической», а затем в экспериментальной; в последней он начинает с наблюдений, которые, казалось, подтверждали главную мысль всех тогдашних концепций о возникновении цветов: радужные окаймления предметов, если смотреть на них через призму, служили наглядным доказательством того, что цвета появляются на границе света и тени. Ньютон через призму рассматривает поверхность, окрашенную в два цвета (рис. 14): либо в черно-белый, либо в такие, у которых одна половина белая или черная, а другая — красная или синяя, и отмечает, какого цвета кажется граница между ними. В этой первой серии

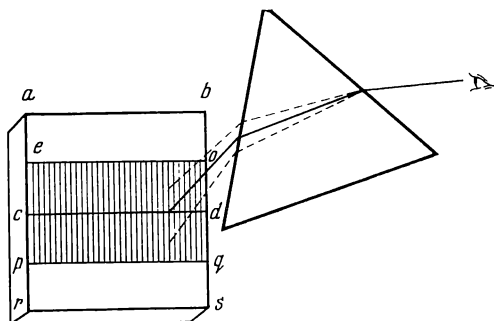


Рис. 14

экспериментов его более всего поразило следующее наблюдение: узкая полоска, окрашенная в два цвета (синий и красный), на темном фоне кажется через призму состоящей из двух смещенных друг относительно друга частей, причем синяя половина сдвинута несколько больше, чем красная. Отсюда Ньютон делает вывод: «Лучи, создающие синий, преломляются больше, чем лучи, создающие красный». Одновременно Ньютон записывает, что «медленно движущиеся лучи преломляются больше, чем быстро движущиеся»; при преломлении лучи разделяются по скоростям: самые медленные — синие, пурпуровые; самые быстрые — красные, желтые; промежуточные по цвету лучи движутся и не быстро, и не медленно; смесь быстро и медленно движущихся лучей дает белый, серый и черный. (Если различие в цвете вызвано разницей в скорости, то дисперсия света должна наблюдаться не только в веществе, но и в вакууме. Однако в начале занятий оптикой Ньютон не обращает внимания на эту сторону проблемы.) Параллельно с такой интерпретацией причины появления цветов Ньютон предлагает другую: «Даже если два луча будут одинаково быстры, все же если один луч будет слабее, чем другой, то этот луч окажет настолько меньшее действие на чувствительное место глаза, насколько меньшим движением он обладает по сравнению с другими лучами, и т. д.

Откуда, полагая, что в порах тела имеются свободные частицы, находящиеся в отношении к большим лучам, как 9 : 12, а меньшие частички [составляющие лучи света] — в отношении к большим, как 2 : 9, то большие [световые] частицы при ударе о такую частицу высвобождают $\frac{6}{7}$ частей своего движения, меньшие частички [света] высвобож-

дают $\frac{2}{7}$ части своего движения и оставшееся движение частиц [света] будет находиться почти в таком же отношении друг к другу, как их количество, а именно $(\frac{5}{7}) : (\frac{1}{7}) = 9 : 1\frac{4}{5}$, что равно почти двум меньшим [световым] частицам, и такое тело может казаться голубым и пурпурным. Но если частицы [материи], от которых [световые] частицы отражаются, одинаковы с меньшими [световыми] частицами, то будет высвобождаться их движение, и большие [световые] частицы высвободят $\frac{2}{11}$ части своего движения, а такое тело может быть красным или желтым»⁷.

По этим объяснениям можно судить о характере влияния Декарта на молодого Ньютона: последний воспринял у французского философа прежде всего его общий механистический подход к объяснению происхождения призматических цветов. Но в конкретных схемах таких объяснений Ньютон не вполне следует за Декартом. Причина этого в первую очередь в их взглядах на природу света: для Ньютона свет — это корпускулы, для Декарта — движение, распространяющееся через среду. Поэтому если у Декарта различие в цветах зависит от соотношения между скоростью вращения шариков, из которых состоит среда, передающая свет, и скоростью движения их по прямой, причем чем относительно больше скорость вращения, тем ближе к красному концу спектра свет, то у Ньютона лучи, преломляясь, разделяются из-за различия в скорости их поступательного движения; так, синий и фиолетовый составляют медленно движущиеся частицы, а красный и желтый — быстро движущиеся. И в терминологии чувствуется влияние Декарта: Ньютон называет световые частицы *globules* — так, как Декарт — частицы передающей свет среды.

На этой стадии изучения цветов Ньютон приходит к положениям, которые стали основными в его будущей теории белого света и цветов. 1. Лучи различных цветов отличаются по преломляемости. 2. Цвета — изначально присущие свету качества. 3. Смесь цветов создает белый свет, а также серый и черный, отличающиеся от белого количеством (но не качеством) входящих в смесь лучей. И, видимо, как следствие: «никакие цвета не появятся из смеси чисто черного и белого». Только первое следует из опыта. остальные — следствия корпускулярной гипотезы о природе света.

Итак, Гете прав — Ньютон действительно «пытал природу». Но чтобы те заключения, к которым пришел Ньютон, стали основой теории, понадобились еще многочисленные количественные эксперименты, которым по точности измерений, продуманности не было равных в оптике того времени. Поэтому точнее было бы оценить первый период изучения цветов Ньютоном как размышления по поводу некоторых наблюдений. В это время Ньютон еще больше натурфилософ, чем естествоиспытатель. И проблема, которой он интересовался, была тогда проблемой общенаучной, натурфилософской, не расчлененной; Ньютон еще не выделяет проблему спектрального разложения как центральную; она — одна из нескольких, связанных с цветом: цвета тел, изменение окраски растворов при химических реакциях, получение из различных сочетаний цветов других, дифракционные цвета — все в одинаковой степени интересует кембриджского студента.

Описание следующей серии экспериментов Ньютона, теперь уже в затемненной комнате, нашло отражение в записной книжке Add. 3975, первые записи в которой относятся к 1664 г., а последние — к 1693 г. Эти опыты знаменуют качественно новый этап в развитии Ньютона-физика: он переходит от наблюдений к экспериментам, от рассуждений — к количественным измерениям. Ход его исследований, зафиксированный в записной книжке⁸, показывает методичность, последовательность, с которой Ньютон представляет экспериментальные доказательства своего основного тезиса. Создается впечатление, что он имел определенный план, знал, что надо искать. Так оно и было. Даже постановка опытов, не имеющих прямого отношения к изучению спектра, подчинена доказательству той же идеи, что свойство света, воспринимаемого нами как цвет, изначально присуще ему — идеи, необычной для того времени.

Начав со стандартных для его времени опытов по разложению солнечного света призмой, Ньютон затем переходит к экспериментам, которые ранее никем не ставились, по смешению лучей разного цвета для получения белого света, а также для получения таких же по цвету, как и спектральные, но состоящих из смеси лучей. Этот переход, естественный для «корпускулярщика» Ньютона, был невозможен, если стоять на общепринятой тогда точке зрения о модификациях света при преломлении. В свою очередь, эти опыты подтвердили для Ньютона правильность во многом

априорного мнения его в справедливости корпускулярных воззрений.

Вот как описывает Ньютон начало своих призматических исследований: «...затемнив мою комнату и проделав небольшую дыру в оконных ставнях для пропускания солнечного света в нужном количестве, я поместил мою призму там, где входил свет, так что он мог преломляться к противоположной стене. Сначала зрелище живых и ярких красок, получавшихся при этом, доставляло очень приятное удовольствие. Но затем, заставив себя более внимательно присмотреться к цветам, я был поражен их удлиненной формой; в соответствии с известными мне законами преломления я ожидал, что форма будет круглой»⁹.

Ньютон сообщает, что первые такие опыты были выполнены им в 1666 г., что, по-видимому, верно, но он не вполне прав, когда утверждает, что с них начались его призматические исследования. Он умолчал о первой серии опытов преднамеренно: они не были «столь просты», как те, о которых он рассказал. (Так оценил Ньютон свои наблюдения в одной из последних лекций по оптике.) Это означало не то, что их труднее выполнить (как раз наоборот), а что из них с очевидностью не следовала справедливость теории Ньютона: существовавшие тогда теории их столь же хорошо объясняли, как и ньютонова.

Не надо думать, что, закончив наблюдения, Ньютон тут же решил продолжить изучение вопроса и перешел к экспериментам в затемненной комнате. Р. Вестфаль так описывает возможную связь между этими исследованиями. После первых наблюдений над различными явлениями цветов Ньютон под влиянием «Диоптрики» Декарта обратился к шлифованию линз, ограниченных несферическими поверхностями¹⁰. Занимаясь этой нелегкой работой, он размышлял о проблемах оптики. «Неожиданно он понял,— пишет Вестфаль,— какое значение имел результат его опыта с тонкой красно-синей полоской для работы, которую он выполнял. Тогда если свет — разнородная смесь лучей с различной преломляемостью, то никакая преломляющая поверхность не сможет свести все лучи в один фокус. С этого начались систематические исследования Ньютона»¹¹.

Он последовательно опровергает все утверждения современных ему теорий о причинах образования спектра. Свет, смешиваясь с темнотой, образует различные цвета —

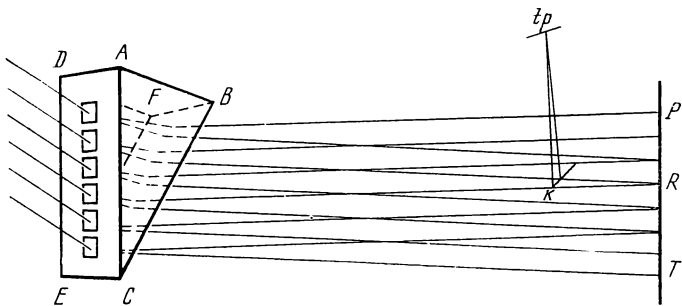


Рис. 15

это общее положение реализовывалось, например, в утверждении, что чем больше путь света в призме, тем больше к нему примешивается темноты и тем более темные цвета образуются (сине-фиолетовые). Опыт с призмой, помещенной у ставни с двумя одинаковыми отверстиями, опровергает такое предположение: свет от каждого из отверстий проходит разный путь в призме, но оба спектра одинаковы, если свет падает на оба отверстия под одним и тем же углом.

Но существовали более тонкие варианты этой старой идеи. Об одном из них дает представление следующее высказывание Декарта: «Я... вначале усомнился в отношении радуги, получают ли ее цвета совершенно так же, как и в кристалле *MNP* (т. е. в призме.— *Е. П.*), ибо в ней я не мог обнаружить тени, которой бы заканчивался свет». Но когда Декарт вычислил, что после одного отражения и двух преломлений (а он знал из опыта, что главную радугу образуют лучи, испытавшие в водяной капле два преломления и одно отражение.— *Е. П.*) «оказывается гораздо больше лучей, которые могут быть видны под углом от 41 до 42 градусов, чем таких, которые видны под каким-либо меньшим углом, и нет ни одного, который был бы виден под бóльшим», то он понял, что «вследствие этого получается тень, ограничивающая по одну и по другую сторону свет; ...ибо если глаз не получает никаких световых лучей или получает их значительно меньше от одного какого-либо предмета, чем от другого, к нему близкого, то, значит, он видит тень»¹².

Так рассуждает Декарт, а Ньютон опровергает его экспериментально, например следующим опытом (рис. 15).

На одну из сторон призмы наклеивается черная бумага, в которой предварительно вырезаны шесть щелей, параллельных между собой и равных друг другу по длине и ширине. Последнее условие необходимо для того, чтобы через каждую из щелей проходило одинаковое количество света. Призма, поставленная на солнечный свет, дает шесть отдельных спектров на белой бумаге. При отодвигании бумаги все дальше и дальше расстояние между отдельными спектрами будет уменьшаться и цвета, полученные от разных щелей, начнут смешиваться, пока белизна в центре бумаги не станет совершенной. Только на концах *P* и *T* цвета не смешиваются. Ньютон отметил, что против его мнения о том, что цвета смешиваются, а не уничтожаются, давая белизну, некоторые философы могли бы возразить, что тень, необходимая для образования цветов, устраняется, когда лучи от различных щелей начинают смешиваться, а это приводит к уничтожению движения вообще, будь то вращение шариков, как у Декарта, или какие-либо другие движения. Но, во-первых, «тени между цветами исчезают при начале движения бумаги *PT*, цвета же не погибают и ни мало не изменяются, пока они не начнут смешиваться при большем удалении бумаги, белизна же не образуется до тех пор, пока еще на большем расстоянии смесь лучей всех родов не станет совершенной. Посему граница тени не необходима для получения цветов и белизна не получается при удалении тени.

Во-вторых, цвета, смешивающиеся первыми, именно пурпуровый, или фиолетовый, и красный, кажутся наиболее разнородными из всех, так как занимают противоположные границы цветов. Однако они не уничтожают друг друга вследствие их противоположных движений и не образуют белого цвета, пока с ними не смешиваются и все прочие цвета.

В-третьих, каждый может наблюдать и без всякой помехи, что цвета совсем не меняются при прохождении лучей через какую-либо светящуюся среду: так, призматические цвета остаются теми же, проходят ли они через освещенное пространство или через темные сумерки»¹³. Объяснение возникновения цветов, связывающее их появление с разницей в пути света внутри призмы, опровергается этим же опытом.

Но подобные эксперименты еще не доказывают главного тезиса теории Ньютона — ошибочности представления о модификации света при преломлении. Последнее

утверждение более сильное и общее, чем конкретное утверждение, что темнота, воздействуя на солнечный свет, превращает его в окрашенный. И Ньютон так видоизменяет последний опыт, чтобы он «работал» против мнения о модификации. Если ввести «маленькое плоское зеркало K в середину белизны, создаваемой на бумаге PT , так, чтобы некоторые из создающих белизну лучей отразились в другое место, например в pt , то белый свет, отраженный так, вырождается в цвета, которые можно видеть отбрасывая на бумагу pt . Ибо лучи, окрашенные различными цветами и смешанные в белизну на зеркале K , наклонены друг к другу, так как они приходят от различных щелей... Поэтому они расходятся от зеркала после отражений так же, как сходились до этого». Следовательно, заключает Ньютон, «в смеси разноцветных лучей расположения к образованию разных цветов при появлении белизны не уничтожаются, но смешиваются между собой»¹⁴. Этими и многими другими опытами Ньютон обосновывает свой тезис, что белизна есть агрегат находящихся в определенной пропорции друг к другу лучей разного цвета, сохраняющих и при смешении свою индивидуальность. Тем самым он изгоняет темноту из теории цветов.

Строго говоря, из таких опытов однозначно не следовало, что свет до призмы также является смесью различных лучей. Этот вывод Ньютону помогла сделать корпускулярная гипотеза о природе света, а конкретно — представление об изначальности такого свойства световых лучей, как преломляемость.

История науки предоставила возможность проиллюстрировать вопрос о соотношении эксперимента и теории для создания физической теории цветов. Известно, что чешский естествоиспытатель М. Марци ближе других (до Ньютона) подошел к идее сложного состава белого света. Он проделал опыт, аналогичный решающему опыту Ньютона, и заключил из него не только то, что при повторных преломлениях свет уже не меняет своей окраски, но и что окрашенный луч есть луч, которому не хватает присутствия других окрашенных световых лучей. Отсюда уже только один шаг до идеи сложности белого света, но его Марци не сделал, чему, по-видимому, помешало его представление о белом свете как однородном движении, распространяющемся от источника излучения.

Значит, Гете прав? Да, но только отчасти. Говоря его словами, «при каждом внимательном взгляде, брошенном

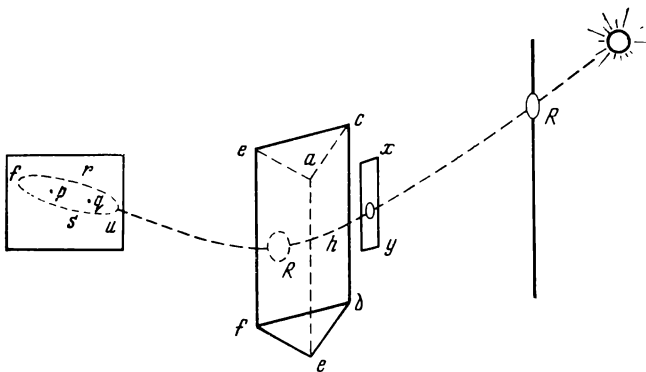


Рис. 16

на мир, мы уже теоретизируем». И корпускулярная гипотеза имела значение направляющей идеи при постановке экспериментов.

Что касается разницы в углах падения на призму лучей, приходящих, например, от крайних точек солнечного диска, то в этом, учитывая конечные размеры нашего светила, также часто видели причину появления цветов при преломлении. Это заключение было чисто умозрительным. Ньютон проверяет его количественным опытом. В «Лекциях» он последовательно прослеживает цепь доказательств, опровергающих подобное мнение. В основе лежит доказываемое им утверждение, что если правильно обычное мнение, то при установке призмы в положение минимума отклонения (и разъясняется, как это делают и сейчас, как найти это положение) лучи, плоскость падения которых совпадает с главным сечением призмы, должны дать круглое изображение, так как углы падения одинаковы для лучей, идущих от противоположных точек солнечного диска. В действительности этого не наблюдается; только лучи одного цвета создают круглое изображение. Угол, под которым из центра входного отверстия видна ширина спектра, составляет полградуса, т. е. он равен угловому диаметру Солнца, а длина заметно превосходит ширину; спектр — это набор отдельных разноокрашенных кругов, делает вывод Ньютон. Очень наглядно это видно из такого сообщаемого в «Лекциях по оптике» эксперимента: свет, прежде чем преломиться в призме, проходит не через одно, как обычно, а через два одинаковых не-

больших отверстия, удаленных друг от друга на значительное расстояние (рис. 16) ¹⁵. Благодаря этому приему видимый диаметр Солнца уменьшается — в опыте Ньютона наибольшееклонение лучей, прошедших через оба отверстия, составляло около $6'$, т. е. примерно в 5 раз меньше солнечного диаметра. В такое же число раз уменьшилась и ширина спектра (при вычете из нее диаметра отверстия), длина же изменилась незначительно: в этом опыте длина примерно в 14 раз больше ширины. Если же убрать одну из досок с отверстием xu , то отношение этих же величин будет равно 5. Еще очевиднее в этом плане опыт Ньютона со светом, приходящим от Венеры, которая для нас является точечным источником. Ньютон приводит и другие эксперименты, подтверждающие его теорию, и все они количественные, что отличает их также и в этом отношении от проводившихся до Ньютона экспериментов. Из этих опытов следует, что преломление солнечного света при том же падении различно. Все это Ньютон подробно и обстоятельно разъясняет студентам. Чтобы убедить в правильности своего мнения ученых коллег, он считает достаточным ограничиться одним опытом: свет проходит через отверстие, затем преломляется в призме и попадает на стену. Все, что можно было измерить, Ньютон измерил: длину и ширину спектра, расстояние между центрами красного и синего участков спектра, расстояние между призмой и изображением, диаметр отверстия, преломляющий угол призмы, угол отклонения лучей от первоначального направления из-за преломления в призме, а зная оба угла, вычислил угол падения (и преломления); призма, как обычно, устанавливалась в положение минимума отклонения.

Измерения показали, что угол от отверстия, стягиваемый шириной спектра, в несколько раз меньше угла, стягиваемого его длиной. По данным, приведенным в «Новой теории...», — это отношение равно примерно 5: первый угол $\sim 31'$, что соответствует диаметру Солнца, а второй — $2^{\circ}49'$. Столь большая разница не могла быть объяснена изменением в углах падения (поворачивая призму вокруг оси так, что угол падения светового пучка менялся более чем на $4-5^{\circ}$, Ньютон не обнаружил заметного смещения спектра). Предположение Ньютона о том, что после призмы лучи света могут двигаться по кривым линиям подобно тому, как при косом ударе ракетки теннисный мяч описывает дугу, поскольку мячу при этом сообщает-

ся как круговое, так и поступательное движение, также не оправдалось: «разница между длиной изображения и диаметром отверстия, через которое свет пропускался, была пропорциональна их расстоянию».

Так постепенно Ньютон, по собственным словам, пришел к опыту, названному им в «Новой теории...» *experimentum crucis* — решающим экспериментом. На рис. 17 представлена схема опыта¹⁶. Поворачивая призму *A* вокруг оси, Ньютон видел, какие участки спектра проходят через второе отверстие и попадают на призму *F*. Свет, испытывающий наибольшее преломление в первой призме, во второй также преломляется больше (вспомним аналогичный опыт Марци). «Таким образом была открыта истинная причина длины изображения, которая заключалась в том, что свет состоит из лучей различной преломляемости, которые независимо от различия их падения приходят к различным частям стены соответственно их степеням преломления»¹⁷. Более сложные опыты для доказательства того же приводит Ньютон в «Лекциях по оптике». Схема одного из них показана на рис. 18. Свет проходит через отверстия в ставне *F* и *φ*, а затем через две одинаковые призмы *ABC* и *DEG*, расположенные на расстоянии 2 дюйма (5 см) друг от друга. От каждой из призм на стене получается спектр *PT* и *tn* соответственно, причем у *P* и *t* — фиолетовые, а у *T* и *n* — красные участки. Если поставить третью призму $\alpha\beta$, как показано на рисунке, то изображения сместятся и более не будут находиться на одной прямой, причем фиолетовая часть спектра сдвигается больше, чем красная. Таким образом, фиолетовые лучи преломляются больше, чем красные, при одинаковых углах падения на третью призму (лучи *FT* и *φt* падают на призму $\alpha\beta$ под одинаковыми относительно соответствующих оснований призмы углами).

Ньютон предлагает также видоизменение этого опыта — вместо двух призм можно применить одну призму *ABC* — результат остается прежним (рис. 19)¹⁸.

На таких и многих других опытах была построена теория Ньютона. Естественно, и проверка ее началась с экспериментальной проверки. Сейчас все знают, что Ньютон, как правило, ставил продуманные, тщательно выполненные и по возможности своего времени точные эксперименты. Возражения, которые Ньютон выслушивал от тех, кто пытался воспроизвести его опыты, его разъяснения по этому поводу к приведенной характеристике ничего нового

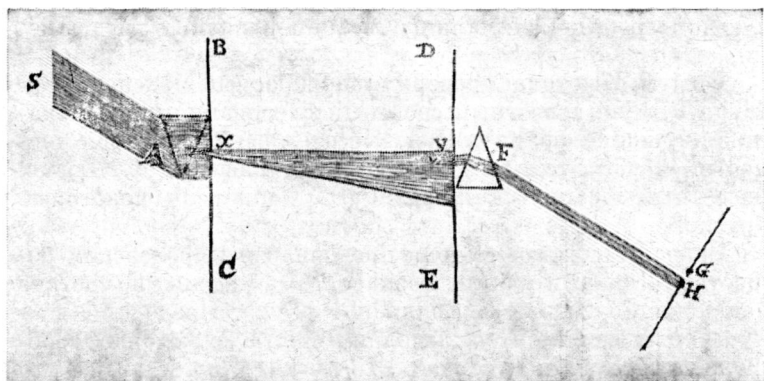


Рис. 17

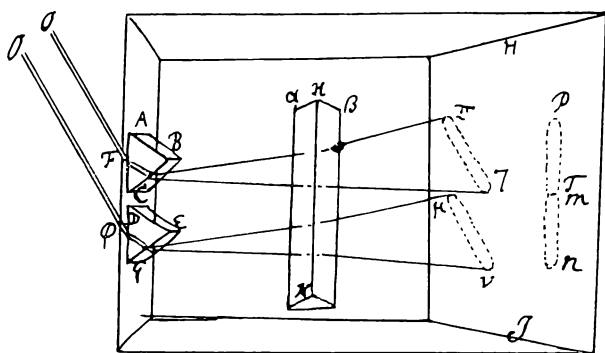


Рис. 18

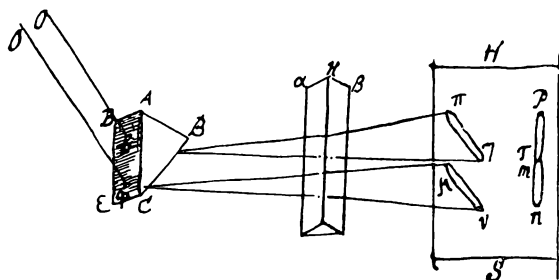


Рис. 19

не добавляют. Но они представляют немалый интерес с точки зрения понимания ситуации в науке того времени, ее среднего уровня.

Опыты Ньютона проверяли прекрасный экспериментатор Р. Гук, известный своими исследованиями по механике и физике француз И. Г. Парди, «осколок старой учености» Ф. Линус и его преемник по кафедре А. Люкас, известный французский физик Э. Мариотт и некоторые другие.

Сначала опыты Ньютона проверили в Королевском обществе. Для этого была назначена комиссия в составе епископа Солсбери, Р. Бойля и Р. Гука. Последний как куратор экспериментов выполнил опыты, о которых сообщал Ньютон, и подтвердил их. Гук единственный, кто смог это сделать без дополнительных разъяснений автора. И по ходу дискуссии, которая происходила на протяжении нескольких лет, он неоднократно повторял многие опыты Ньютона и его оппонентов. А профессор математики английского иезуитского колледжа в Льеже Ф. Линус (1595—1675) так и не сумел увидеть то, что наблюдал Ньютон. Любопытна и достаточно характерна для поколения, уже сходящего со сцены европейской науки, эта фигура. На протяжении своей долгой жизни он занимался многими вопросами медицины, физики, строил солнечные часы. Консервативность взглядов у этого «поклонника древних» сочеталась со своеобразным подходом к эксперименту. Выразительный эпизод из научной деятельности Линуса привел Ф. Розенбергер. Линус отрицал существование атмосферного давления, когда уже имелись многочисленные экспериментальные доказательства, подтверждавшие его. Линус сам проделал опыт с барометром (в то время — это просто стеклянная прямая трубка, открытый конец которой был опущен в чашку с ртутью) и нашел, «что ртуть удерживается в верхнем конце барометра невидимыми нитями и что он сам почувствовал эти нити пальцем, когда закрывал им, как затычкой, барометрическую трубку»¹⁹. С ним по этому поводу полемизировал Р. Бойль, который в 1662 г. выпустил брошюру, опровергающую домыслы Линуса.

На сообщение Ньютона, опубликованное в 1672 г., Линус откликнулся только в сентябре 1674 г., т. е. после того, как Ньютон неоднократно и печатно в том числе (в ответе Парди, например) разъяснял детали своих экспериментов. Возражения Линуса сводились к следующему. Если

опыт проводить в затемненной комнате с призмой, расположенной непосредственно за отверстием в ставне, то в ясный день, когда нет облаков, удлиненное изображение (спектр) наблюдать нельзя. Но «разница между длиной и шириной появляется, когда Солнце или светит через белое облако, или освещает подобные облака, находящиеся вблизи Солнца. И тогда действительно неудивительно, что сказанный спектр был бы длиннее, чем шире». Дело в том, поясняет Линус, что в этом случае лучи света попадают на отверстие под заметно большими углами относительно друг друга, чем если бы они приходили прямо от Солнца, которое имеет меньшие размеры, чем облака; и тогда свет, проходящий в комнату через небольшое отверстие, освещал бы всю призму, а не только малую ее часть, как это сказано у Ньютона. В последнем случае, по утверждению Линуса, изображение всегда круглое. Если расширить входное отверстие настолько, чтобы свет освещал всю призму, сразу появляется спектр, длина которого значительно превосходит его ширину и «настолько больше, насколько длина призмы превышает ее ширину. Отсюда я заключаю, что спектр, который этот ученый автор [т. е. Ньютон] видел значительно более длинным, чем широким, не вызван действительными солнечными пучками, а лучами, идущими, как сказано, от яркого облака; и, следовательно, теория света, основанная на таком эксперименте, не может существовать»²⁰. В том же, 1674 г. это письмо было напечатано в «Философских трудах» вместе с примечанием, принадлежавшим Ньютону: его опыт выполнялся в ясные дни, призма располагалась непосредственно у отверстия, и окрашенное изображение было не параллельно, как сообщил Линус, а перпендикулярно оси призмы. Ответное послание Линуса представляет интерес не с точки зрения обсуждавшихся вопросов, а, как и первое его письмо, позволяет судить о ситуации в науке не только по ее высшим достижениям, а более объективно. Дискуссия с самим Линусом продолжения не имела, так как в ноябре 1675 г. он умер. Но один из его учеников, Гасконь, пожелал ее продолжить. Отвечая ему, Ньютон обратил внимание своего оппонента на то, что призма отбрасывает несколько изображений. Одно, о котором говорил Ньютон, создается двумя преломлениями, другое — когда свет, преломившись на грани призмы, затем отражается от ее основания и после преломления на противоположной грани выходит из призмы. Это изобра-

жение круглое и неокрашенное, если углы призмы равны между собой; при неравенстве углов при отражающей базе призмы его «вытянутость» невелика, пока невелика разница в этих углах. Третье изображение создается только отражением, и оно всегда круглое и бесцветное. Поэтому перепутать можно только первые два. Но они отличаются как по длине и яркости цветов, так и по «динамике поведения»: если вращать призму вокруг ее оси, «второе и третье [изображения] движутся быстро и всегда в одном направлении, пока не исчезнут; а первое движется медленно и все медленнее, пока не остановится, а затем поворачивает в обратную сторону и идет все быстрее и быстрее, пока не исчезнет в том месте, откуда оно начало появляться»²¹.

При всей курьезности возражений Линуса они по существу сводились к стандартному доводу против теории Ньютона: цвета появляются вследствие неравенства углов падения лучей на призму. Вскоре после публикации «Новой теории...» с формально подобным опровержением выступил иезуит Игнаций Гастон Парди (1636—1673). В своем сочинении по оптике, изданном посмертно, Парди отстаивает волновую концепцию о природе света, и, видимо, он первый предположил, что свет представляет собой поперечные, а не продольные колебания в эфире. Его репутация ученого, интересующегося новыми научными теориями, была высока²².

Казалось бы, возражения Парди и Линуса аналогичные, но по существу между ними лежит пропасть. Начав с заявления, что теория, согласно которой свет должен состоять из почти бесконечной совокупности лучей, сохраняющих свои преломляющие свойства и цвет, а в смеси создающих белый, является экстраординарной, Парди затем переходит к рассмотрению причин того, почему спектр имеет удлиненную форму. Для этого он проделал эксперимент, схема которого представлена на рис. 20, где DE и dE — падающие, FG и fg — преломленные лучи, HE и FI и fi — перпендикуляры к соответствующим граням призмы. Парди нашел, что если $\angle DEH = 30^\circ$ и $\angle IFG = 76^\circ 22'$, а $\angle dEH = 29^\circ 30'$ и $\angle ifg = 78^\circ 45'$, то при разнице между углами падения лучей в $30'$ (соответствующей видимому диаметру Солнца) расхождение преломленных лучей составляет угол $2^\circ 23'$, а если взять углы падения $29^\circ 30'$ и 29° , то расхождение преломленных лучей превысит 3° . Таким образом, считал Парди, длина спектра определяется

неравным падением лучей, идущих от различных частей Солнца²³. Кроме того, он полагал, что поправка, вносимая Ньютоном из-за конечных размеров входного отверстия (Ньютон вычитал из длины и ширины спектра диаметр отверстия), недостаточна, так как вследствие сказанного выходящие из призмы лучи расходятся больше, чем это было до вхождения в призму. Отвечая, Ньютон напомнил, что при установке призмы в минимуме отклонения, им примененном, преломления у разных сторон призмы одинаковы или почти одинаковы, и т. д. У Парди вызвало сомнение также описание решающего опыта.

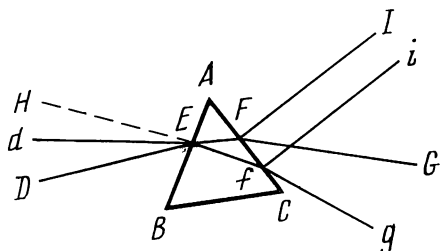


Рис. 20

В сообщении Ньютона сказано, что первая призма помещена за входным отверстием; но в этом случае при ее вращении вокруг собственной оси наклон лучей между двумя досками меняется. С последним Ньютон согласился; во втором письме к Парди он впервые приводит схему опыта, и она исправлена с учетом замечания французского ученого. Но это единственное, если говорить об экспериментальной стороне дела, в чем Парди оказался прав. Он приводит также и другие соображения относительно опытов Ньютона, но мы не будем на них останавливаться. Отметим только, что Парди вполне был удовлетворен разъяснениями Ньютона относительно выполнения опытов. Что касается вопроса интерпретации результатов экспериментов, который Парди также затронул, то об этом речь пойдет дальше.

Вопрос, объясняет ли разница в углах падения света на призму появление окрашенного удлинённого изображения — вопрос, который решался только опытом, был самым простым из всех, поднятых «Новой теорией». Описанный Ньютоном количественный эксперимент неоднократно пов-

торияли. Гук сразу признал его убедительность, хотя ранее в «Микрографии» он занимал другую позицию. Парди в этом случае также согласился с Ньютоном. Даже А. Люкас (1633—1693), коллега уже известного Линуса, после смерти последнего продолживший дискуссию с Ньютоном, в общем признал здесь правоту Ньютона, хотя и нашел из своих опытов, что отношение длины спектра к его ширине отличается от сообщаемого в «Новой теории...» — 3—3,5 вместо 5.

Кроме описанного в статье опыта Ньютон в переписке с Ольденбургом (апрель 1672 г.) сообщил и о том, что он проделал один или два опыта не с солнечным светом, а со светом, приходящим от Венеры, который вполне убедителен для решения вопроса; письмо Ньютона было напечатано в том же году в «Философских трудах». После дискуссии 1672—1678 гг. к этому вопросу больше не возвращались: он был решен в согласии с мнением Ньютона. Но это была единственная безусловная победа Ньютона в XVII в. в учении о цветах.

Сложнее обстояло дело с *experimentum crucis*. (Так назван опыт с двумя последовательно расположенными призмами, см. рис. 17.) Ньютон, выделив его из прочих, подчеркнул его важность для своей теории. И несмотря на это, он не привел схему опыта и очень кратко его описал. (В одном из писем к Ольденбургу Ньютон признал, что последнее обстоятельство явилось причиной многих недоразумений.) Решающий опыт многим показался неясным (например, Гюйгенсу); неясным не только с точки зрения описания самого опыта, но в значительной мере и из-за тех выводов, которые извлекал из него Ньютон.

Остановимся сначала на экспериментальной стороне проблемы. Получить результат Ньютона (и Марци) — при повторном преломлении цвета не меняются — оказалось трудной задачей. Не всем ее удалось решить, в том числе А. Люкасу и известному французскому физическому Э. Мариотту (1620—1684). Оба они пришли к одним и тем же выводам. Поэтому мы остановимся только на опытах Мариотта. Почему именно об экспериментах французского ученого, хотя он не принял непосредственного участия в обсуждении доктрины Ньютона, мы предпочитаем говорить? Для этого есть несколько причин. Мариотт ставил опыты для проверки теории Ньютона в течение десяти лет (1672—1682), т. е. он продолжал их в то время, когда ее обсуждение было прекращено: Ньютон в 1678 г. отказался отвечать

на возражения Люкаса, поскольку не было новых аргументов, а повторять старые не имело смысла. Таким образом, Мариотт знал об опытах Люкаса и ему была известна реакция Ньютона (эти материалы печатались в «Философских трудах»); поэтому он располагал максимально возможной информацией. Как ученый и, в частности, как экспериментатор он был сильнее Люкаса. Не исключено, что результаты исследований Мариотта стали для Гюйгенса решающим аргументом для отказа от теории цветов Ньютона²⁴, поскольку сам Гюйгенс таких опытов не производил. И наконец, когда в 1706 г. в связи с выходом латинского издания «Оптики» вновь вспомнили о теории Ньютона, то в рецензии, помещенной в известном немецком научном журнале «Acta eruditiorum» («Лейпцигские ученые записки»), указывалось на один опыт Мариотта, ставящий под сомнение основы теории цветов Ньютона, хотя упоминались и эксперименты «джентльмена из Льежа», т. е. Люкаса. В этом сыграло роль, видимо, то обстоятельство, что Люкас ограничился описанием опыта, в то время как Мариотт привел еще результаты измерений. Опыт, описанный в четвертой части «Essai de physique», опубликованной посмертно в 1686 г., состоял в следующем: на белый картон на расстоянии 25—30 футов направляется свет от призмы. Длина спектра превысила 10 дюймов, причем красный занимал пространство больше 2, а фиолетовый — больше 3 дюймов. Если выделить из спектра узкий пучок крайнего фиолетового участка, вырезав для этой цели в картоне отверстие, и очень наклонно направить этот свет на вторую призму, то на экране появляется красный и желтый, а если выделить из спектра первой призмы красный, то в спектре второй призмы появляется синий и фиолетовый. Опыт проводился в хорошо затемненной комнате, и свет, прошедший через отверстие в картоне, был окрашенным. «Из этого опыта очевидно, что одна и та же часть света может давать различные цвета в зависимости от модификаций и поэтому изобретательная гипотеза мистера Ньютона не может быть принята»²⁵, — таков вывод Мариотта.

На аналогичные возражения Люкаса Ньютон в дискуссии 70-х годов фактически не ответил. Он ограничился призывом как можно тщательнее провести такой опыт. Конечно, причины отрицательного результата Люкаса (и Мариотта) у него не вызывали сомнений, но только в «Оптике» он подробно разобрал этот вопрос. Для опытов, в которых необходимо разделить лучи различных цветов

нужно, «чтобы комната была темной, насколько это возможно, дабы посторонний свет не смешивался со светом спектра *pt* и не делал его сложным, особенно в том случае, когда мы хотим производить опыты в наиболее простом свете, вблизи края спектра... где свет слабый находится в меньшей пропорции к постороннему свету и поэтому, смешиваясь с ним, искажается более других и делается более сложным. (Именно с этими областями спектра работали Люкас и Мариотт.— *Е. П.*)... призма должна быть с широким углом, например в 65 или 70 градусов, тщательно сработанной, из стекла без пузырьков и жил; грани ее должны быть не выпуклыми или вогнутыми, как это обыкновенно случается, но правильно плоскими; полировка должна быть такой же, как при изготовлении оптических стекол; нельзя ограничиваться только оловянным пеплом, как это делается обыкновенно, причем сглаживаются только края выбоин, оставленных песком, но по всему стеклу остаются бесчисленные группы маленьких выпуклых полированных волнообразных возвышений. Далее края призмы и линзы, поскольку они также могут производить неправильное преломление, должны быть покрыты приклеенной черной бумагой. Весь свет солнечного пучка, впускаемый внутрь комнаты, являющийся бесполезным и невыгодным для опыта, должен быть задержан черной бумагой или другими черными препятствиями, ибо иначе бесполезный свет, отражаясь всевозможными путями в комнате, смешается с удлинненным спектром и будет способствовать его искажению. При производстве этих опытов такая тщательность требуется не всегда; она, однако, помогает успеху опытов и заслуживает применения со стороны очень осторожного исследователя»²⁶.

Мы позволили себе привести такую большую цитату из «Оптики» не только и не столько для того, чтобы стали ясны возможные ошибки Люкаса и Мариотта; пояснения Ньютона дают представление о качестве линз, призм, о технике оптического эксперимента того времени; плохое качество стекол, о чем упоминает Ньютон, делает понятным сомнения современников, о которых писал в июне 1672 г. Ольденбург: не могли ли быть причиной появления цветов (которые, согласно доктрине Ньютона, вызваны тем, что свет — смесь различных лучей) пустоты в стекле, расположенные под разными углами; одновременно ясно, почему Ньютон не доверял результатам своих оппонентов.

Но дискуссии не были бесполезны. Возможно, первая

книга «Оптики» не приобрела бы классически законченную форму изложения, не предшествуй ее созданию полемика, в том числе и с Люкасом. С последней, видимо, связаны дополнения в схеме решающего опыта в «Оптике» по сравнению со схемой, помещенной в ответе Парди (см. рис. 17); именно, в «Оптике» перед первой призмой находится еще одна ставня с широким отверстием. Введение дополнительного препятствия для световых лучей понадобилось, чтобы для успеха эксперимента задержать свет от облаков и часть прямого солнечного света. Отвечая в 1716 г. на обвинения, основанные на старых опытах Мариотта, Ньютон рекомендует поступать так, как сказано в «Оптике», или перед входным отверстием поставить на некотором расстоянии две доски с отверстиями, чтобы в комнату, где производится опыт, не попадало слишком много света. Заметим еще, что опыт, названный в «Новой теории...» решающим, в «Оптике» никак не выделен — он один из восьми других, призванных доказать, что солнечный свет состоит из лучей различной преломляемости. Но для Ньютона он, видимо, остался тем же решающим экспериментом, так как Дезагюлье, который по просьбе последнего в 1716 г. повторил некоторые призматические опыты, называет его именно так.

В XVIII в. по существу теории цветов Ньютона не спорили — ее экспериментальные основания были признаны убедительными. Правда, на протяжении первых двух десятилетий в «Лейпцигских ученых записках» трижды публиковались статьи, в которых ставилась под сомнение теория Ньютона, поскольку опыты Мариотта и Люкаса опровергают ее. Первый раз это было в 1706 г. Тогда Ньютон не ответил на критические высказывания рецензента «Оптики». В переписке того времени также не затрагиваются вопросы теории цветов. В 1713 г. редактор лейпцигского журнала вновь обратил внимание читателей на опыт Мариотта. Напомним, что в эти годы спор ньютонианцев и лейбницеанцев о приоритете открытия дифференциального и интегрального исчисления принял резкие формы, а в 1715 г. началась знаменитая дискуссия Лейбница с «рупором» Ньютона С. Кларком²⁷. Можно предположить поэтому, что о старых опытах вспомнили не для выяснения истины. Ньютон решил наконец ответить. Вопрос для него состоял в том, кто мог бы выполнить опыты — в те годы он эксперименты практически уже не ставил. Выбор пал на Д. Т. Дезагюлье (1683—1749), популярного в то

время в Лондоне лектора «по натуральной и экспериментальной философии», который в 1716 г. продемонстрировал в Королевском обществе для всех желающих некоторые из призматических опытов Ньютона, описанных в «Оптике». Первым Дезагюлье выполнил опыт, которым, собственно, можно датировать начало призматических исследований Ньютона — рассмотрение красно-синей полосы через призму. Заметим, что в 1722 г. он опять был повторен, поскольку анонимный автор на страницах тех же «Лейпцигских ученых записок» сообщил, что не смог выполнить этот эксперимент. Из записной книжки Ньютона мы знаем, что это наблюдение навело его на мысль о различной преломляемости лучей разного цвета. Подобный опыт подробно описан в начале «Оптики», а в более ранних «Лекциях по оптике» он помещен в конце. Среди прочих Дезагюлье выполнил «решающий опыт» — все они подтвердили точность наблюдений Ньютона²⁸.

До середины XVIII в., когда появились сомнения в правильности утверждения Ньютона о невозможности построить свободную от хроматической аберрации преломляющую систему, его опыты никто не повторял: все знали, что они верны.

И действительно, эксперименты Ньютона открыли новую главу в оптике; с них начинаются спектральные исследования. Ньютон предложил и использовал ставшую стандартной схему спектроскопа. На его рисунках линзы, как правило, отсутствуют, но он обычно ими пользовался, что ясно из описания опытов. Ньютон предложил устанавливать призму в положение наименьшего отклонения, указав, как найти это положение. Установка призмы в минимуме отклонения, можно сказать, совершила революцию в технике спектральных исследований, сделав возможным воспроизведение результатов опытов.

Известно, что в отношении экспериментов, произведенных в XVII и XVIII вв., можно говорить, что они точны, но нельзя говорить об их точности. В общем это верно, теория ошибок создана в XIX в. Но у Ньютона мы находим высказывания, которые показывают, что он понимал, что не всегда стремление к большей точности измерений оправдано условиями эксперимента — мысль не тривиальная для его времени. Так, Ньютон указывает, что для опыта с призмой, в котором измерялись размеры спектра (его длина и ширина), достаточно измерить преломление на одной стороне, чтобы знать преломление на

другой для среднего рода цветов (призма находится, конечно, в положении наименьшего отклонения). Но это же можно считать достаточным (мы бы сейчас сказали — в пределах ошибки измерений) для любого сорта лучей. Хотя такое утверждение «и не абсолютно верно, однако столь близко к истине, что в отношении чувств и механического расчета его следует считать правильным. Посему, поскольку геометрический расчет преломления как при X [т. е. на входе в призму], так и при Y [на выходе из нее] можно сделать лишь с трудом, я не колеблюсь выполнить его этим более приспособленным к практике, хотя и механическим способом. Я твердо надеюсь, что опущение при расчете физических вопросов мелочей, учет которых требовал бы большой и бесполезной работы, не будет сочтено пороком»²⁹.

Для Ньютона положения его теории казались столь убедительно обоснованными, он настолько был уверен в том, что его теория будет понята и принята, что посчитал достаточным подтвердить ее только двумя опытами, причем описание одного из них — *experimentum crucis* — не пояснялось даже рисунком. И это при том, что основные положения доктрины Ньютона кардинально отличались от установившихся взглядов.

О причине такого отношения к предшественникам Ньютон поведал в одной из оптических лекций: «...не стоит труда опровергать гипотезы, которые после нахождения истины рвутся сами собой»³⁰. И действительно, Ньютон нашел среди читавших его «Новую теорию...» тех, кого сразу вполне убедили его доказательства. В их числе Дж. Грегори, автор одного из проектов отражательного телескопа, Р. Таунли, математик, интересовавшийся также астрономическими наблюдениями, метеорологией, оптикой, который обратился в 1673 г. к Ольденбургу с предложением составить на латыни короткое сообщение о теории цветов Ньютона, что «много добавило бы к нашей чести». Но для большинства современников новая доктрина оказалась неприемлемой.

Гипотезы, о которых говорил Ньютон в «Лекциях», — это объяснения Декарта и Гука возникновения цветов при преломлении. Главным в них было то, что «преломленный свет всегда кончается синим и фиолетовым с той стороны, куда направлено преломление. Ибо вращение шаров, по мнению Картезия, или передние части ударов наклонно колеблющегося эфира, по гипотезе г-на Гука,

будут во всех их частях задерживаться и замедляться вследствие близости покоящейся среды»³¹. Ошибочность таких взглядов Ньютон опровергает в «Лекциях», а позднее в «Оптике» многими опытами, но в «Новой теории» он предпочитает опровергать их «от противного» — доказывая опытами правильность собственного утверждения об изначальности и неизменности свойства света, воспринимаемого нами как цвет.

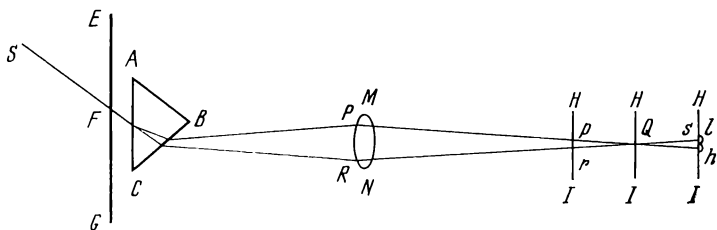


Рис. 21

Кроме «решающего опыта», Ньютон предлагает еще один (рис. 21). Передвигая бумагу *HI*, можно не только найти, «на каком расстоянии белизна наиболее совершенна», но и увидеть, «как постепенно сходятся цвета и исчезают в белизну; пересекшись в том месте, где составляется белизна, они снова рассеиваются и разделяются, сохраняя в обратном порядке те цвета, которые они имели до смешения». Можно видеть также, «что если какие-либо из цветов у линзы задержаны, то белизна изменяется в другие цвета»³².

Если к указанным опытам добавить еще один (им Ньютон доказывал, что разница в углах падения не объясняет разброса цветов после призмы), мы будем иметь полный набор экспериментов, который Ньютону показался достаточным, чтобы убедить коллег в достоверности своей новой теории. Дискуссия была неизбежна и из-за краткости первого сообщения (о чем Ньютон потом сожалел), и из-за новизны подхода к проблеме, а не только способа ее решения. В дискуссии Ньютона с Гуком а также с Парди и Гюйгенсом фактически речь шла о том считать ли представленную Ньютоном доктрину о белом свете и цветах теорией или гипотезой. Таким образом это обсуждение больше затрагивало общие проблемы на-

учного познания, чем конкретный факт представления света суммой отдельных разноокрашенных лучей.

Ньютон отвечал каждому из оппонентов в зависимости от того, в чем конкретно выявлялась эта общая тенденция. Парди, как возможную альтернативу объяснению Ньютона, предложил гипотезы Гука и Гримальди о возникновении цветов. Ньютон ответил на это весьма общей декларацией. «Наилучший способ в исследовании природы, видимо, следующий: сначала тщательно доискиваться до свойств вещей, устанавливая их экспериментами, а затем более осторожно утверждать объясняющие их гипотезы». В соответствии с этим он дает такое определение света, которое бы удовлетворяло любым гипотезам о его природе, а лучи света, по Ньютону, — «это наименьшие или бесконечно малые части его, взаимно независимые, как все лучи, которые светящиеся тела посылают вдоль прямых линий либо одновременно, либо последовательно»³³.

Если сравнить это определение с тем, с которого начинается «Оптика», то существенной разницы между ними мы не заметим. Хотя Ньютон в своем ответе Парди стремится представить такое определение, которое было бы приемлемо при любой гипотезе о природе света, его указание на существование бесконечно малых частей света заставляет думать, что речь идет не о волнах, а о корпускулах. Поэтому в таком «объективистском» контексте утверждение Ньютона, что его доктрина основывается только на свойствах света, не зависящих от объясняющих гипотез, не вполне убедительна. И любезный ответ Парди, заключающий их дискуссию, скорее свидетельствует о его понимании бесполезности продолжать обсуждение этого вопроса, чем о согласии Парди с общей установкой Ньютона. Но по конкретным вопросам — об отражателем телескопе и о выполнении «решающего» опыта — он согласился с автором новой теории.

Первым и самым тонким критиком доктрины Ньютона был Роберт Гук. Его критические замечания были представлены в Королевское общество через неделю после чтения «Новой теории...». Гук согласен: наблюдения, о которых сообщает Ньютон, имеют место. Но почему из этих опытов следует концепция, предлагаемая Ньютоном? Гук видит в гипотезе сложного состава белого света не большую необходимость, чем в том, «что все звуки, которые мы слышим, когда они прошли через трубы органа,

должны находиться в воздухе мехов или в струне, из которой извлекаются звуки нажимами или ударами по ней». И далее: «Мы действительно можем сказать или вообразить, что покой и прямизна струны вызваны либо остановкой движения, либо объединением всех колебаний и что все колебания как бы дремлют в ней. Но все же для меня *естественнее* представить все это по-другому»³⁴ (курсив наш.— *Е. П.*). И Гук объясняет явление призматических цветов, как это сделано в «Микрографии»: все, что связано с положениями новой теории — об изначальности свойства луча проявлять тот или иной цвет, о сложности белого света, им отвергается, а положения, в которых Ньютон отмечает связь цвета с преломлением, принимаются, если переформулировать их с точки зрения представления Гука о природе света. Например, утверждение Ньютона, что лучи света, различающиеся по преломляемости, различаются и по расположению проявлять определенный цвет, у Гука трансформируется так: луч света при преломлении расширяется или разрезается, и та сторона, которая наиболее преломляется, дает синий, а та, что менее всего преломляется, — красный; промежуточные цвета есть разбавленные, смешанные эти два. Гук следующим образом поясняет эту схему: «...движение света в однородной среде, где он [свет] возникает, распространяется в виде простых и однородных импульсов или волн, которые с направлением распространения образуют прямые углы; но, попадая наклонно на преломляющую среду, оно [световое движение] приобретает другой вид или движение, которое разрушает прежнее — нечто подобное колебанию струны; и то, что прежде было линией становится трехгранной поверхностью, и импульс распространяется не под прямыми углами к линии движения (*direction*), а косо, как я более подробно объяснил в «Микрографии»³⁵. И так по каждому из пунктов «Новой теории...».

Остановимся еще на одном примере, не связанном с призматическими опытами, но имеющем прямое отношение к концепции сложности белого света. Речь идет об опыте Гука из «Микрографии», который он приводит там для дополнительного подтверждения своей двухкомпонентной доктрины. Он взял два клинообразных сосуда, один заполненный настойкой алоэ и другой — раствором медного купороса. На свет цвет первого сосуда менялся от слабого желтого (в самой топкой его части) до крас-

ного, а цвет раствора во втором сосуде — от светло-синего до темно-синего. Сложив оба клина в виде параллелограмма и передвигая их вдоль соприкасающихся поверхностей, Гук надеялся получить в проходящем свете все цвета радуги. К своему удивлению, он, однако, через оба сосуда ничего не увидел. Объяснить этот результат Гук не смог. Но когда он в ставне, вблизи отверстия, через которое проходил солнечный свет, проделал еще одно и у каждого из них поместил сосуд соответственно с настойками алоэ и медного купороса, то, смешивая окрашенные лучи, которые прошли через сосуды, он получил на листе бумаги все призматические цвета. Это достигалось изменением действующей толщины сосудов, а иногда также тем, что вместо белой бумаги Гук брал черную или серую. «Таким образом, я экспериментально нашел то, что и думал: все различия в цвете происходят из нескольких степеней этих двух цветов, а именно желтого (?) и синего, или смеси их со светом или темнотой, т. е. белым и черным»³⁶.

Ньютон просто объяснил непонятый Гуком результат этого эксперимента с точки зрения своей теории: «...один сосуд пропускает только красные лучи, другой — только синие, поэтому никакие лучи не могли пройти через оба сосуда вместе»³⁷.

Почему же Гуку естественнее представить (оставляя в стороне вопрос о традиционности такого мнения) образование спектра согласно концепции модификации? Во-первых, вследствие его взглядов на природу света и, во-вторых, в связи с тем, как отвечал Гук на вопрос о том, что значит объяснить оптическое явление.

Остановимся сначала на первой причине. Проблема спектрального разложения света обострила внимание к вопросу о роли прибора в физическом эксперименте: спектр — результат причинного воздействия призмы на свет, как считал Гук (и другие ученые), или же призма только разделяет лучи, уже до прибора отличавшиеся по какому-то признаку, на чем настаивал Ньютон. Критерием выбора между двумя концепциями о природе белого света стало представление о характере процессов, происходящих в источнике, и естественно связанном с ним вопросе о природе света. Высказывания Ньютона и Гука позволяют проследить такую взаимосвязь.

По Ньютону (подобные утверждения можно найти в «Лекциях по оптике», «Новой теории...», переписке),

свет извергается, выбрасывается из источника: свет — это частицы. Поэтому он пришел к пониманию того, что белый свет — сложный, и тем самым снял проблему прибора, которая играла заметную роль в оптике, начиная с античности.

Для Гука все иначе. Ответ Гука на «Новую теорию...» во многих отношениях замечателен. В данном случае подчеркнем одну его особенность — объективность. Он понимал, что корни концепции Ньютона — в принятии последним корпускулярной гипотезы о природе света. Но понимал он и то, что с точки зрения континуальной гипотезы такое представление о белом свете также возможно. В заключение разбора Гук почти согласился с Ньютоном. «В моем предположении я действительно могу представить белое или однородное движение света состоящим из отдельных движений всех других цветов, как любое правильное и однородное движение может быть составлено из тысяч отдельных движений, подобно тому, как объяснил Декарт причину преломления; но я в этом не вижу необходимости»³⁸. Гук не видел в этом необходимости потому, что для него свет — последовательность импульсов. Результатом этого явился отказ Гука (как и Парди, и Гюйгенса) считать предложенную Ньютоном концепцию теорией. Для оппонентов Ньютона она была только гипотезой. В марте 1675 г. Гуку представился случай вновь выступить по этому вопросу в Королевском обществе. «Свет — колебательное или дрожательное движение в среде ... происходящее из подобного же движения в светящемся теле, подобно звуку, который обычно объясняется дрожательным движением среды, проводящей его, вызванного дрожательным движением звучащего тела. И так же как в звуке пропорциональные колебания производят различные гармоника, так и в свете различные странные и приятные цвета создаются при смешении пропорциональных и гармонических движений. Первые воспринимаются ухом, вторые — глазом»³⁹. Здесь Гук говорит как единомышленник Ньютона.

Однако почти через год, в январе 1676 г., Гук записал в своем дневнике: «Звук — это не что иное, как удары с определенной степенью скорости... я мог бы извлечь все тоны при ударах молотка... звук во всех телах есть соударение частей друг о друга, а не вибрация целого». Далее он упоминает о своем эксперименте по возбуждению вибраций струны, не сопровождаемых звуком, «а также

о том, что касание [струны], заставляющее вибрировать ее внутреннюю часть, порождает звук; что колебания струны были неизохронны, [в то время как] колебания [ее] частей изохронны»⁴⁰. Гук отмечает, что звук возникает при скрежете металла, вращении часовой пружины и т. п., т. е. способы извлечения звука и его восприятие свидетельствуют о том, что звук — это импульс. Он «сравнил звук и свет и показал, что свет вызывает цвета так же — смешением импульсов»⁴¹. Запись дневниковая, очень краткая, передающая беседу Гука с членами Королевского общества Х. Реном и В. Холдером, и по ней трудно составить ясное представление, что, собственно, показал своим собеседникам Гук. Тем не менее характер обсуждения вопросов не оставляет места для сомнений.

Наконец, в последнем выступлении по вопросам оптики (февраль 1690 г.) Гук возвращается к своим первоначальным взглядам на сущность спектрального разложения и на природу света, изложенным в «Микрографии».

Отметим один любопытный факт, имеющий отношение к этому же вопросу. В 1693 г. Гюйгенс в письме де ля Гиру (?) впервые вполне ясно описал случай разложения звукового импульса (шума) на отдельные гармонические составляющие. Гюйгенс наблюдал в замке Шантильи, под Парижем, следующее. Когда работал находившийся там фонтан, то если стать между лестницей и фонтаном, со стороны лестницы слышен звук, напоминающий музыкальный тон. «Я нашел вскоре, что он происходит вследствие отражения шума фонтана от ступеней лестницы. Ибо всякий звук, вернее, шум, отражаясь на равных и весьма малых расстояниях, дает музыкальный звук, и длина органной трубки определяет ее тон, соответствующий этой длине, так как воздушные толчки следуют через равные малые промежутки времени, которые требуются для колебаний, чтобы пройти дважды вдоль трубки, когда она закрыта с одного конца. Я полагаю, что также и всякий шум от фонтана, хотя бы он и был плохо слышен, отразившись от ступеней лестницы, должен приходиться в ухо от каждой ступени тем позднее, чем более она удалена. При этом промежутки времени равны тому промежутку, который употребляют воздушные волны на прохождение вперед и назад ширины ступени. Измерив эту ширину и найдя ее равной 17 дюймам, я сделал бумажную трубку такой длины и нашел, что она давала тот же тон, который был слышен внизу лестницы»⁴². Зимой, когда снег нарушал форму

ступеней, при работающем фонтане не было слышно уже никакого тона.

Гюйгенс не связал свое наблюдение с тем, что происходит при разложении света призмой. Первым обратил внимание на аналогию между явлением, описанным Гюйгенсом, и действием спектрального аппарата (дифракционной решетки) на свет П. Зеeman в 1908 г.

Выбор представления о характере процессов, происходящих в источнике, и о природе света (что определяло позиции оппонентов) диктовался соображениями, которые не допускали строгой проверки на опыте. И лучше всего это показывает эволюция взглядов Гука по обсуждавшейся проблеме. В этом споре победителей не было и тогда не могло быть. Вопрос был решен только в конце XIX — начале XX в., когда проблема белого света вновь была поставлена развитием спектральных приборов (созданием приборов высокой разрешающей способности) и математического аппарата (разложение Фурье).

Тем не менее концепция Ньютона белого света и цветов вскоре получила широкое распространение и на протяжении XVIII и почти всего XIX в., по существу, никем не оспаривалась. Это было победой нового научного метода. Ньютон не был его родоначальником. В оптике — Мавролик, в механике — Галилей уже пользовались им. И как Галилея, который дал закон падения, не предложив никакой гипотезы относительно причины падения тел, критиковал Декарт, так и Ньютона, который не смог удовлетворительно объяснить причину дисперсии и отказался от рассмотрения механических моделей явления дисперсии, ограничившись математическим, формальным, как тогда казалось, описанием, критиковали Гук, Парди, Гюйгенс.

В сентябре 1672 г. Гюйгенс писал Ольденбургу, что Ньютону нужно решить одну очень трудную задачу — «объяснить с помощью механической физики, в чем состоит это различие в цветах»⁴³. В январе 1673 г. Гюйгенс вновь возвращается к вопросу механического обоснования теории Ньютона, подчеркивая, что последний «указал только на свойство световых лучей, правда существенное, — по-разному преломляться, но не указал, в чем состоит природа и различие цветов»⁴⁴. Сравнивая гипотезы Гука и Ньютона, Гюйгенс отдает предпочтение первой на том основании, что она «объясняет механически и через природу движения цвет». С тех же позиций критиковал Гюйгенс «Начала». Оппоненты Ньютона считали, что по-

нять какое-либо физическое явление — значит объяснить, как и почему оно происходит, основываясь на полученных в механике результатах. Поэтому для них был неприемлем подчеркнутый эмпиризм Ньютона, декларируемый им отказ от построения гипотез.

Но был ли Ньютон действительно эмпириком? Что это не так, его современники смогли убедиться в том же 1672 г., когда он дал подробный ответ на критические замечания Гука — ведь именно тогда Ньютон впервые, правда очень кратко, сообщил о гипотезе, призванной объяснить цвета тонких пластин. А в 1675 г. он подробно рассматривает ее в сообщении «Одна гипотеза, объясняющая свойства света, изложенные в нескольких моих статьях». Однако он всячески подчеркивал необязательность для себя тех или иных гипотез, пытался создать впечатление, что он-то не является сторонником какой-либо из предлагаемых им. На это большое влияние оказали особенности психического облика великого английского ученого. Он болезненно воспринимал критику своих работ, а гипотетические построения были более уязвимы для критики, чем установленные на опыте факты. Отчасти поэтому Ньютон отдавал предпочтение принципам перед гипотезами. Ньютон много и упорно занимался поисками «механического» объяснения дисперсии, но о них можно было только догадываться по некоторым намекам, содержащимся в изданных при его жизни работах. Эти поиски не привели его к решению поставленной задачи, а учение о белом свете и цветах Ньютона пережило многие «объясняющие» теории XVII в.

Но главным, конечно, было то, что Ньютон острее, чем многие его великие современники, осознал необходимость математизации физики. «Я не вижу препятствий для того, чтобы приступить к исследованию природы цветов, в которой ничто не считалось относящимся к математике. Не лишне еще раз напомнить основание этого: родство между *свойствами преломлений* (курсив наш.— Е. П.) и цветов таково, что их нельзя объяснить в отдельности. Кто хотел бы по привычке знать одно из двух, необходимо должен знать и другое»⁴⁵. От этих слов, сказанных весной 1670 г. слушателям его «Лекций», Ньютон никогда не отказывался. В «Новой теории...» (как до этого в «Лекциях») Ньютон говорит, что та часть оптики, которая рассматривает происхождение цветов, становится такой же математической наукой, как и любой другой раздел оптики, и продолжает: «Все, что я буду говорить здесь о них

[о происхождении цветов], не гипотеза, а самое строгое следствие, построенное не на пустых догадках... но проявляющееся через опыты прямо и несомненно»⁴⁶.

В заключение развернутого продуманного ответа от 11 июня 1672 г. на критические замечания Гука Ньютон вновь обращается к вопросу о том, является ли наука о цветах математической. Этот вопрос связан и с критикуемым Гуком, Парди и другими утверждением Ньютона, что его доктрина о цветах — теория. В ответе Гуку Ньютон высказывается более осторожно, хотя основной его тезис остается неизменным. Он пишет: «Кто не знает, что оптика и многие другие математические науки зависят как от физических принципов, так и от математических доказательств. И абсолютная достоверность науки не может превысить достоверности ее принципов. Тогда доказательство, с помощью которого я отстаивал предложения о цветах, можно в нескольких словах выразить так: из *эксперимента* и поэтому только *физическое* [доказательство]. Следовательно, сами предложения можно оценить не более как *физические принципы* науки. А если эти принципы таковы, что по ним можно определить все явления цветов, какие вызваны преломлениями, то науку о цветах можно представлять как *математическую*»⁴⁷.

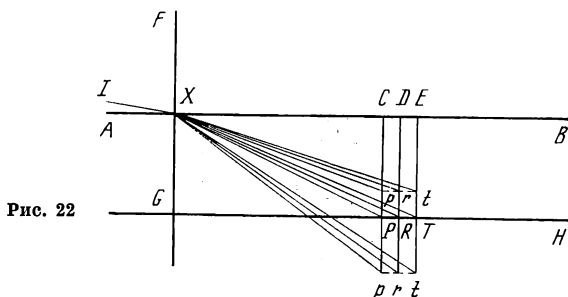
Показательно, что оба раза — в февральском сообщении и июньском ответе Гуку — эти декларации Ньютона при публикации в «Философских трудах» были опущены. Мы не знаем, кто «редактировал» статьи Ньютона — Ольденбург или кто-либо еще, но что многим современникам подобные утверждения кембриджского профессора математики казались неоправданными, несомненно.

То, что сообщил Ньютон в отношении математического описания явления цветов, основывалось на выделении не изменяющего своего цвета при преломлении, отражении и рассеянии простого света. Принцип неизменности простого (монохроматического) света был установлен Ньютоном с точностью, не превышающей 1—2% от длины световой волны. При колоссально возросшей за 300 лет точности измерений этот принцип для неподвижных источника и приемника излучения остался верен до настоящего времени. И только в оптике движущихся тел его потребовалось уточнить⁴⁸.

Когда Ньютон говорил о математизации науки о цвете, он имел в виду не только то, что каждому цвету соответствует свой показатель преломления, и наоборот. Это-

му же служил и принятый им закон дисперсии, точнее — законы дисперсии, так как их у него два; первый предложен в «Лекциях по оптике» (1670 г.), второй — в «Оптике».

В лекциях он приводит теорему, позволяющую по известному преломлению в стекле разнородных лучей определить для любой другой среды показатели преломлений различных по цветности лучей, измерив его только для одного сорта лучей. На рис. 22 IX — луч света, падающий под углом, близким к 90° , XP , XT , XR — крайние и средний преломленные лучи в стекле, Xp , Xt , Xr — такие



же лучи для другой среды. Этому построению соответствует закон дисперсии

$$n^2 - 1 = k(n_0^2 - 1),$$

где n_0 — показатель преломления выбранной за нормаль среды, n — рассматриваемой среды, k — постоянная, меняющаяся от вещества к веществу. Закон принципиально допускал возможность ахроматизации, практически же материалы, подчиняющиеся ему, не пригодны для этой цели⁴⁹. Несмотря на экспериментальную неподтвержденность закона, о чем Ньютон сам говорит, он все же считает его правильным.

Предложенный в «Оптике» закон дисперсии вовсе не допускал возможность ахроматизации. Его аналитическое выражение $n - 1 = k'(n_0 - 1)$, где n и n_0 — показатели преломления двух сред, меняющиеся в зависимости от цвета, k' меняется от вещества к веществу. Последнее правило выведено Ньютоном на основании только одного (!) опыта, который состоял в следующем: если свет проходил через две призмы (одна была водяная, а в ней помещалась

стеклянная) так, что выходящие из этой составной призмы лучи параллельны падающим на первую призму, то выходящий свет — белый, как и падающий. Конечно, подобный опыт Ньютон повторял не один раз и с разными призмами. Как видно из данных, сообщаемых Ньютоном в «Новой теории...», «Лекциях по оптике», «Оптике», его призмы и линзы были выполнены из материалов, близких по своим дисперсионным свойствам. Однако так было не всегда. В записных книжках Ньютона А. Р. Холл обнаружил описание опыта из «Новой теории...», в котором все размеры установки соответствовали приведенным там, кроме одного: отношения между длиной и шириной спектра. Ньютон не учел результат этого опыта, так же как он не согласился с Люкасом, когда последний сообщил ему о том, что он нашел это отношение из своих опытов равным 3—3,5 (у Ньютона оно равно 5). Дискуссия 1676—1678 гг. между ними не заставила Ньютона изменить свое мнение: он пытался объяснить такое расхождение за счет разницы в преломляющих углах призм, в плохом качестве призм (их преломляющие грани могли быть не плоские, а вогнутые или выпуклые — вот одно из свидетельств качества оптических приборов того времени), в трудности (вполне реальной) точно определить границы спектра. Но ни разу Ньютон не высказал предположения, что дисперсионные свойства материалов призм Люкаса были отличны от таковых у Ньютона. Признание этого факта означало бы для Ньютона крушение его плана создания математического учения о цветах, одним из оснований которого являлся универсальный закон дисперсии. Примерно в это же время (1674 г.) в отредактированном Ньютоном варианте «Лекций» (который был опубликован в 1729 г. и с которого выполнен русский перевод) впервые появляется знаменитая музыкально-оптическая аналогия. Помимо общей длины спектра, Ньютон измерил величины участков, занимаемых отдельными цветами; нанес все это на бумагу; затем отметил в каждом из спектральных участков место, где данный цвет, по его мнению, наиболее яркий и чистый (это место не всегда приходилось на середину данного участка); достаточно велик и произвол в определении границ участков спектра. Кроме того, Ньютон «для более изящного разделения изображения на части, пропорциональные между собой», добавил «к числу пяти более заметных цветов еще два других, именно лимонный между красным и желтым и

индиго между синим и фиолетовым... Ограничив этим обширное распространение внешних цветов, получишь большую симметрию и пропорцию с количеством зеленого»⁵⁰. Для выделения в спектре семи основных цветов имела, видимо, значение также причина, указанная Р. Хаустеном⁵¹. Хаустен предположил, что Ньютон и его помощник, о котором он упоминает в «Лекциях» и «Гипотезе», относились к гептахромным, т. е. они различали семь (вместо обычных пяти) цветов в спектре. Что такое свойство не является столь уж редким, свидетельствует наблюдение Хаустена: он проверил группу из 18 человек, и трое из них различали семь цветов.

Ньютон нашел из измерений, что длины участков, занимаемых семью цветами, пропорциональны «струне, разделенной так, чтобы каждая ступень отвечала октаве»⁵². И как следствие указанной гармонии цветов: «можно определить (механическим способом) пропорции синусов преломления, относящегося к каждому роду лучей» для двух соприкасающихся сред, если известны отношения синусов крайних лучей.

В конце 1675 г. Ньютон представил мемуар⁵³, в котором сообщил о музыкально-оптической аналогии членам Королевского общества.

В третий, и последний раз аналогия появляется в «Оптике», но там ее задача скромнее. Из области оптики физической она переходит в разряд формальных рецептов, позволяющих найти цвет смеси различных цветов, если известно «количество и качество» каждого из первичных цветов, входящих в смесь⁵⁴.

Время появления аналогии — 1674 г. — позволяет однозначно ответить на вопрос о связи между этой аналогией и уверенностью Ньютона в неустранимости хроматической аберрации в преломляющих системах. Первый закон дисперсии был предложен Ньютоном в 1670 г. Он принимает его «без доказательств». Музыкально-оптическая аналогия и призвана была стать одним из них. Конечно, уверенности Ньютона в универсальности закона дисперсии способствовало случайное обстоятельство: дисперсия призм, с которыми обычно (но не всегда!) он работал, оказалась примерно одинаковой, а характер дисперсии был таков, что мог привести к музыкально-оптической аналогии. Результаты экспериментов дали толчок попыткам Ньютона создать математическую теорию цветов. Но в дальнейшем он рассматривал собственные и чужие опы-

ты с точки зрения этой задачи. Уже в «Лекциях» Ньютон говорил: «Точная наука о цветах относится к труднейшим из тех, кои желательны были бы философу. Я надеюсь на этом примере показать, что значит математика в натуральной философии»⁵⁵ (курсив наш.— Е. П.). Таким образом, проблема дисперсии выходила за рамки оптики, и, видимо, поэтому Ньютон был столь постоянен в попытках отстоять свой подход к этому вопросу.

Представление о том, насколько велико могло быть влияние на Ньютона поставленной им же задачи, мы видим на примере Л. Эйлера. Он первый поставил под сомнение утверждение Ньютона о невозможности избавиться от хроматической аберрации. Основным аргументом для Эйлера стало кажущееся отсутствие хроматизма у глаза человека. В этом он ошибся, однако он обратил внимание современников на саму проблему и тем способствовал ее решению. И все же ему не удалось избежать ошибки, допущенной Ньютоном: формулы дисперсии Эйлера (он их предложил несколько), как это не кажется парадоксальным, приводят к выводу о практической неустранимости хроматизма изображений⁵⁶. Причина такого совпадения не случайна. В XVIII в., как и в XVII в., решить проблему дисперсии света не представлялось возможным — отсутствие данных эксперимента и неразработанность теории света и строения вещества не позволяли это сделать. Кроме того, единственной измеряемой характеристикой цвета был показатель преломления. Поэтому и Ньютону, и Эйлеру пришлось прибегать к помощи некоторого универсального соотношения. У первого — это утверждение о том, что величина дисперсии во всех средах пропорциональна среднему преломлению, у второго — некоторые спектральные промежутки пропорциональны друг другу в различных средах.

Задача отыскания закона (законов) дисперсии оставалась актуальной на протяжении XIX и в начале XX в. Вполне решить ее удалось только в квантовой механике.

Другой аспект проблемы дисперсии света (основной в дискуссии Гука с Ньютоном) — о роли прибора при спектральном разложении света — вновь привлек к себе внимание только в конце XIX в. До этого времени независимо от представлений о природе света концепция Ньютона о сложности белого света не вызывала сомнений. Ревизия его взглядов была связана с тем, что, как писал один из инициаторов пересмотра этого мнения Л. Гуи, считая

белый свет последовательностью совершенно нерегулярных импульсов, можно объяснить «полную непрерывность спектра, которую достаточно трудно понять, если предполагать, что источник света производит различные серии правильных колебаний»⁵⁷. Математическим основанием этого утверждения явилось то, что функция, описывающая световое возмущение, при некоторых ограничениях, соответствующих условиям опыта, разложима в ряд Фурье. Тогда можно считать, что регулярность в спектре создается прибором, более или менее полно разделяющим «простые движения, которые до этого существовали только аналитически».

Таким образом, наряду со старой проблемой прибора возникла новая — адекватности используемого математического аппарата физике явления, насколько допустимо отождествление колебаний, представленных в спектре, отдельным членам разложения Фурье. На рубеже XIX и XX вв. решением этих проблем занимались Рэлей, Пуанкаре, Планк, Эйнштейн, если ограничиться самыми громкими именами⁵⁸. Но свое полное решение они получили в 30-е годы в работах Л. И. Мандельштама и его учеников, которые рассмотрели их с общекосмологических позиций. Это позволило понять выделенную роль разложения Фурье в оптике, поскольку спектральные оптические аппараты являются гармоническими анализаторами.

Глава 5

ЦВЕТА ТОНКИХ ПЛАСТИН

В полемике 1672 г. Гук отметил, что наибольшую трудность для теории света представляет объяснение цветов тонких пластин — проблема, которой Ньютон в первой своей публикации — «Новой теории света и цветов» — не коснулся, а подробно рассмотрел во второй книге «Оптики».

Интерес к изучению этого вопроса у Ньютона был стимулирован работами Бойля и особенно Гука.

Р. Бойль (1627—1691) в 1664 г. дал первое обстоятельное описание цветов, возникающих в очень тонких пленках различных жидкостей и в тончайших пленках стекла, получаемых при выдувании¹.

Р. Гук посвятил целый раздел своей «Микрографии»², вышедшей в 1665 г., цветам, которые можно наблюдать с помощью микроскопа в тонких пластинках слюды, в узком зазоре между двумя линзами малой кривизны, цветам побежалости на стальных предметах и т. д. Гук обнаружил и основные закономерности этих цветов.

1) Цвета располагаются в виде концентрических колец, и их порядок от центра всегда одинаков и является обратным по отношению к порядку цветов радуги. При удалении от центра ширина полос убывает.

2) Цвета сохраняются, если в промежутке между линзами впустить каплю жидкости.

3) Плоские пластинки представляются окрашенными одним цветом. Цвет этот зависит от толщины пластинки. Слишком тонкие и слишком толстые пластинки представляются неокрашенными. Зависимость окраски пластинки от ее толщины Гук обнаружил, сложив вместе желтоватую и синюю пластинки слюды и получив при этом пурпурный цвет.

Гук хотел определить те пределы толщины пластины, при которых возможно возникновение цветов, но ему это сделать не удалось. И он ограничивается качественным объяснением явления.

На пластину (ее толщина на участках от AE до DF различна) падает свет в виде импульсов с фронтом ab , следующих друг за другом на равных расстояниях (рис. 23). Импульсы, отраженные от верхней поверхности, имеют фронт cd ; импульсы, отраженные от нижней поверхности и дважды преломленные, имеют фронт ef . Импульсы ef слабее импульсов cd . Совокупность импульсов cd и ef дает сложный импульс, который вызывает в глазу ощущение различных цветов в зависимости от фазовых соотношений его компонент. Например, на участке 1 более слабый импульс ef отстает от более сильного импульса cd . Такая комбинация дает ощущение желтого цвета. По мере роста толщины пластины увеличивается отставание импульса ef относительно cd — этому соответствует усиление желтой окраски. Когда ef приближается к середине расстояния между двумя последовательными импульсами cd (участок 2), мы ощущаем красный цвет. При дальнейшем росте толщины пластины (участок 3) импульс ef сближается со вторым импульсом cd ; теперь целесообразно считать, что ef опережает cd . В подобном случае, когда более слабый импульс опережает более сильный, мы видим го-

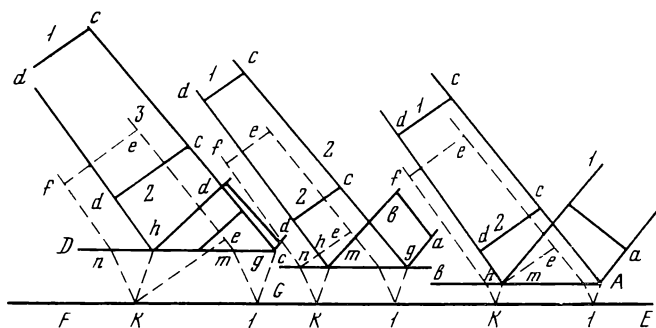


Рис. 23

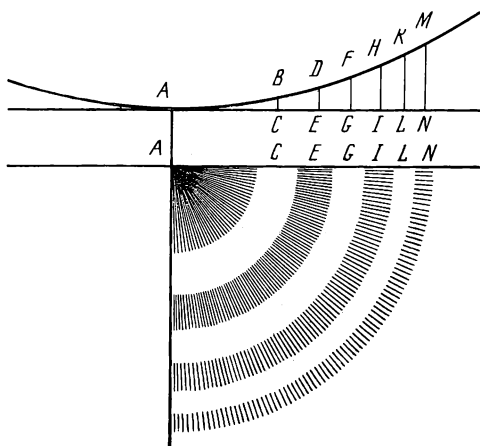


Рис. 24

любой цвет. При дальнейшем росте толщины пластины импульс ef будет периодически то отставать, то опережать последовательные импульсы cd , и в результате цвета будут периодически чередоваться.

При всем своем остроумии гипотеза Гюка позволяла объяснить периодичность цветов в пленке переменной толщины, но не могла объяснить, почему цвета наблюдаются не при любых толщинах, какая толщина соответствует данному цвету и т. п.

Ньютон свои исследования тонких пленок начал с того, на чем остановился Гук — с измерения толщины пленки.

Для этой цели он использовал цветные кольца, наблюдавшиеся в промежутке между двумя линзами (рис. 24). Если на плоскую поверхность плоско-выпуклой линзы наложить двояковыпуклую линзу, то при большом радиусе кривизны R этой линзы наблюдаются кольца достаточно большого диаметра, причем толщина зазора d_k в том месте, где наблюдается кольцо k -го порядка, связана с радиусом этого кольца соотношением

$$d_k = r_k^2 / 2R. \quad (1)$$

Радиус кривизны линзы Ньютон определял по ее фокусному расстоянию (для линз с равными радиусами кривизны обеих поверхностей). Диаметры колец он измерял с помощью циркуля, устанавливая его на верхней поверхности двояковыпуклой линзы и затем вводя поправку на преломление в стекле. Когда стекла соприкасаются, в центре появляется темное пятно. Условно его можно считать кольцом нулевого порядка. Измерив диаметры колец различных порядков в самых ярких и самых темных их местах («светлые» и «темные» кольца) при нормальном падении света, Ньютон установил, что квадраты диаметров колец или соответственные толщины зазоров относятся как числа 0, 1, 2, 3, 4... Здесь нечетные номера соответствуют темным кольцам, а четные — светлым. Толщина зазора в месте первого светлого кольца дается в «Оптике» равной $1/89\,000$ дюйма. Это соответствует самой яркой, по мнению Ньютона, части спектра — границе желтого и оранжевого цветов.

В этих опытах Ньютону приходилось преодолевать значительные трудности. С одной стороны, для уменьшения ошибки измерения диаметров колец нужно было увеличить эти кольца. Но для этого нужно было применить линзу очень большого радиуса кривизны, а при этом увеличивалась ошибка в измерении этого радиуса кривизны. Другая трудность состояла в выборе степени сжатия линз: при слабом сжатии в центре появлялся зазор, при сильном сжатии линзы деформировались и нарушалось соотношение (1). Особенно большие трудности возникли при наклонном падении света.

По результатам измерений, относящимся к разным периодам, видно, что Ньютон вновь и вновь повторяет опыты, увеличивая их число, варьируя условия, стараясь добиться наибольшей точности.

Отбрасывая на линзы с помощью призмы монохроматический свет, Ньютон нашел, что при этом наблюдаются кольца только одного цвета, а именно того, которым освещались линзы. Между этими кольцами располагались темные промежутки.

При освещении монохроматическим светом в проходящем свете наблюдались кольца того же цвета, что и в отраженном; причем в тех местах, где в проходящем свете видны были светлые кольца, в отраженном свете наблюдались темные, и наоборот. При освещении белым светом окраска колец в проходящем свете была дополнительной к окраске колец в отраженном свете.

При попадании воды в зазор между линзами кольца сжимались таким образом, что отношение толщин пленки, соответствующих одному и тому же кольцу в воздухе и в воде, равно показателю преломления воды относительно воздуха. Это правило Ньютон распространил на все среды.

При нормальном наблюдении кольца были наименьшими, когда же наблюдение производилось под углом, то с увеличением угла увеличивались диаметры соответствующих колец.

Измеряя диаметры колец в монохроматическом свете, Ньютон получил для красного и фиолетового света отношение квадратов диаметров колец (отношение толщин промежутков), равное $14/9$. Для света на границе между желтым и зеленым диаметр кольца равен был среднему арифметическому значению диаметров этого кольца в красном и фиолетовом свете.

На основе этих данных Ньютон постулирует, что толщины воздушных зазоров между стеклами, соответствующие границам семи цветов — красного, оранжевого, желтого, зеленого, синего, индиго и фиолетового, «относятся друг к другу как кубические корни из квадратов восьми длин струны, соответствующих нотам октавы: соль, ля, фа, соль, ля, ми, фа, соль, т. е. кубические корни из квадратов чисел: $1, 8/9, 5/6, 3/4, 2/3, 3/5, 9/16, 1/2$ »³.

Таковы основные результаты наблюдений над тонкими пленками, описанные в первой части второй книги «Оптики». Проследим историческую эволюцию этих наблюдений.

В развитии теории тонких пленок можно выделить три стадии; назовем их тремя вариантами теории. Первый относится к периоду до 1672 г., сведения о нем мы находим в записных книжках и рукописях Ньютона, опубликованных А. Холлом⁴ и Р. Вестфаллом⁵. Второй вариант

был изложен в работе «Рассуждения, содержащие такие наблюдения, которые ведут к дальнейшим открытиям для дополнения моей теории света и цветов, в частности, относительно строения природных тел, от которого зависят их цвета и прозрачность»⁶, представленной в Королевское общество вместе с «Гипотезой» в декабре 1675 г. Третий вариант теории был изложен во второй книге «Оптики».

В первом варианте мы находим арифметическую прогрессию толщин пленки для колец, наблюдаемых в отраженном свете при нормальном падении света, а также сравнение колец в воздушной и водяной пленках. Толщина зазора в месте первого светлого кольца все время уточняется: $\frac{1}{64\ 000}$, $\frac{1}{80\ 000}$, $\frac{1}{83\ 000}$ дюйма. Для толщин пленки при наблюдении одного и того же кольца в фиолетовом и красном свете получено отношение 9 : 14 или 13 : 20. Для крайнего пурпурного, яркого пурпурного, индиго, голубого, зеленого, границы зеленого и желтого, желтого, оранжевого, красного, крайнего красного толщины даются относительными числами 13; 14; $14\frac{1}{2}$; $15\frac{1}{2}$; $16\frac{1}{2}$; $17\frac{1}{2}$; $18\frac{1}{2}$; 19 (заметно несоответствие количества цветов и чисел). Каким образом он получил эти числа, Ньютон здесь не указывает.

Следует отметить остроумный прием, который применил Ньютон для сравнения колец в красном и фиолетовом свете. Установив линзы с некоторым зазором так, чтобы при освещении красным светом центральное пятно казалось глубокого красного цвета, он плавно увеличивал степень сжатия линз, подсчитывая, сколько раз яркость центрального пятна будет убывать до минимума и затем вновь возрастать до максимума. Этот процесс продолжался до тех пор, пока в центре не возникало широкое черное пятно — линзы соприкасались. Повторять эту процедуру с фиолетовым светом было труднее из-за слабой интенсивности пятна, и Ньютон применил другой прием. Установив между линзами прежний зазор, он направлял на них солнечный свет, прошедший через призму. Призма при этом медленно поворачивалась то в одну, то в другую сторону, так что центральное пятно непрерывно меняло окраску от фиолетового до красного, и наоборот. Измерение состояло в подсчете числа максимумов разных цветов, которые сменялись в центре минимумами, когда падающий свет менял окраску от фиолетового до красного. Первую измеренную величину он трактует как число половин эфирных импульсов (число полувольт) красного света, по-

мещающихся в зазоре между линзами. Второй результат дает разницу между числом полуволн красного и фиолетового света, помещающихся в зазоре. Отсюда легко определить отношение длин волн этих лучей, которое получается довольно близким в разных опытах ⁷.

На основе измерений диаметров колец при различных углах падения света Ньютон формулирует следующее предложение: диаметры колец пропорциональны секансам углов преломления света (угол определяется лучом, выходящим из стекла в воздушный промежуток). Закон этот неверен: секансам углов преломления должны быть пропорциональны квадраты диаметров или толщины промежутков. Загадочным является тот факт, что из таблицы результатов, на которую ссылается Ньютон, формулируемый им закон не следует, но зато из нее с достаточной степенью точности следует правильный закон ⁸. Возможно, что Ньютон и сам сомневался в правильности своей формулировки, ибо она никогда не была опубликована.

Во втором варианте теории Ньютон изучает кольца не только в отраженном, но и в проходящем свете, причем обнаруживает, что в тех местах, где в отраженном свете наблюдаются светлые кольца, в проходящем свете видны темные кольца, и наоборот. Отсюда следует вывод: «Воздушный промежуток между стеклами в соответствии с его различной толщиной предрасположен в некоторых местах отражать, а в некоторых пропускать свет некоторого цвета, и в одном и том же месте отражается один цвет, а пропускается другой» ⁹.

Поскольку толщины зазора, при которых свет приобретает способность отражаться или проходить, повторялись через равные интервалы, налицо была определенная пространственная периодичность.

Вот как объясняет Ньютон возникновение этой периодичности в «Гипотезе» 1675 г.

Лучи света, падающие на поверхность прозрачного тела, возбуждают в эфире, заполняющем это тело, волны, распространяющиеся вдоль лучей со скоростью, превышающей скорость света. Сжимая или разрежая эфир внутри тела, эти волны создают на определенных расстояниях от поверхности условия либо для наилучшего отражения, либо для наилучшего прохождения света. Например, если в толщине пленки укладывается n волн, то в данном месте наблюдается кольцо n -го порядка. Поскольку в каждом порядке красное кольцо имеет больший диаметр, чем

фиолетовое, значит, красному свету соответствует большая длина эфирных волн.

В гипотезе Ньютона имеются несогласованности и внутренние противоречия. Если для объяснения цветов тонких пленок он вводит эфирные волны, *обгоняющие* лучи света, то при объяснении преломления он такой особенности не вводит. Однако периодичность волн у Ньютона существует, она обеспечивается тем, что от одного удара луча о поверхность возникает много тысяч колебаний.

При объяснении частичного отражения и преломления тоже ничего не сказано о скорости эфирных волн. Ньютон ограничивается рассмотрением поведения поверхности тела. Под ударами световых лучей поверхность тела приходит в непрерывное колебательное состояние, и в результате последующие лучи, сталкивающиеся с поверхностью в сжатом состоянии, отражаются, а лучи, попадающие на поверхность в момент расширения, проходят.

По описанию Ньютона, чем больше расстояние между двумя поверхностями, тем больше волн успевают обогнать луч, пока он доходит до второй поверхности. Видимо, и здесь у Ньютона каждый луч при ударе о поверхность возбуждает множество волн, хотя Ньютон явно об этом не говорит. Длина возбуждаемой в эфире волны определяется сортом луча: «Эти лучи, что бы они из себя ни представляли, различаются по величине, напряжению или силе и возбуждают колебания разных толщин. Самые широкие, наиболее напряженные или наиболее мощные лучи вызывают колебания соответственно своей толщине, напряженности или силе... Наиболее широкие колебания вызывают самые сильные цвета — красные и желтые...»¹⁰.

В «Гипотезе» Ньютон пояснил, как он получает соотношение длин волн в эфире, соответствующих промежуточным цветам. Исходя из гипотезы о глубокой аналогии между светом и звуком, Ньютон ищет в сочетании цветов такое же согласие и несогласие, какое существует для музыкальных тонов. Зная длины струн, дающих основные гармонические аккорды (октаву, квинту, терцию и т. д.), он делит на подобные интервалы длину полученного в опыте призматического спектра и находит связь между преломляемостью лучей разных цветов. Именно отсюда проистекает то соотношение между цветами и толщинами пленки, которое было рассмотрено в первом варианте теории.

Какие же основания были у Ньютона для предположения, что призматические цвета и цвета тонких пленок находятся в одинаковом соотношении?

Этот вопрос был освещен им в «Рассуждениях» 1675 г. при анализе применимости его теории цветов к тонким пластинам.

Ньютон обратил внимание на то, что при наблюдении системы колец через призму всегда видно больше колец, чем невооруженным глазом. При слабом сжатии линз они иногда кажутся глазу равномерно освещенными, в то время как через призму видно множество окрашенных колец. Подобным же образом пластинки слюды или стеклянные пузыри, выдутые на паяльной лампе, будучи не слишком тонкими, казались неокрашенными. Однако при рассматривании через призму обнаруживалось большое разнообразие цветных полос, покрывавших пластинку наподобие волн. Такой же эффект наблюдался и в мыльных пузырях.

В действительности, как выяснил Ньютон, цветные кольца существовали все время. В результате того, что соседние кольца разных цветов накладываются (у Ньютона — «интерферируют»), глаз видит в этом месте равномерную белизну. При наблюдении через призму различные цвета раздвигаются из-за различной преломляемости, и мы видим цветные кольца.

Ньютон объясняет, что различная преломляемость лучей, идущих от колец, является внутренним природным свойством света, ибо, если бы различное преломление лучей объяснялось неправильностями в призме и другими случайными причинами, мы не могли бы наблюдать столь резкую и правильную картину колец.

Аналогично существование для невооруженного глаза четкой и устойчивой картины колец, возникающих в тонких пленках воздуха, жидкости или твердого тела, является доказательством существования у света, идущего от этих колец, другого внутреннего свойства — различной отражаемости. Под различной отражаемостью Ньютон понимает предрасположение разных сортов отражаться на большей или меньшей толщине пленки.

Из опытов с пленками, таким образом, следует, что наблюдаемая белизна — разнородная смесь всех цветов, а свет, идущий от нее, — смесь лучей разных цветов. Из 24-го наблюдения видно, что «существует постоянное отношение между цветами и преломляемостью: наиболее

преломляемые лучи — фиолетовые, наименее преломляемые — красные, а лучи промежуточных цветов имеют пропорциональные промежуточные степени преломляемости... Из 13, 14, 15-го наблюдений при сравнении их с 4-м и 18-м видно, что такое же постоянное отношение существует между цветом и отражаемостью: фиолетовый при одинаковых обстоятельствах отражается при наименьших толщинах любой тонкой пластинки или пузыря, красный — при наибольших, промежуточные же цвета — при промежуточных толщинах. Отсюда следует, что цветные расположения лучей также приращены им и неизменны, и, следовательно, все возникновения и явления цветов в мире происходят не от каких-нибудь физических изменений, вызываемых в свете преломлением или отражением, но только от различных смещений или разделений лучей в силу их различной преломляемости и отражаемости»¹¹.

С помощью простого графического метода, учитывая некоторую ширину колец, Ньютон показал, как для любой заданной толщины пленки можно определить, какие цвета и каких порядков участвуют в образовании цвета соответствующего кольца. Тем же методом можно решить и обратную задачу: зная цвет и его порядок, найти толщину пленки в соответствующем месте. Для большей простоты решения этой задачи Ньютон составил таблицу толщин воздуха, воды и стекла, соответствующих цветам определенных порядков. Данные для воздуха брались из опыта, а для воды и стекла рассчитывались на основе соотношения между толщинами пленок в разных средах и показателями преломления этих сред. Эта таблица была использована Ньютоном для проверки опыта Гука, в котором при наложении двух пластинок слюды изменялась их окраска. Считая показатель преломления у слюды таким же, как у стекла, и полагая, что слабый желтый цвет соответствует первому порядку (толщина $4\frac{3}{5}$), а синий цвет — второму порядку (толщина 9), мы должны получить для суммарной толщины $13\frac{3}{5}$, пурпурный цвет третьего порядка, что соответствует наблюдению.

Таблица цветов Ньютона неоднократно применялась в оптике XIX в. Био¹², например, успешно использовал ее для определения толщин двупреломляющих пластин по их окраске в поляризованном свете.

Королевское общество одобрило ньютонские наблюдения тонких пленок и вновь продемонстрировало неприятие основной идеи теории Ньютона — существования

у света изначальных свойств. После окончания чтения «Рассуждений» развязалась дискуссия по вопросу о том, нельзя ли объяснить цвета по-другому, без изначальных свойств лучей, например на основании различия скоростей лучей. Гук полагал такой способ достаточным для хорошего объяснения разнообразия цветов¹³.

Быть может, этот инцидент повлиял на решение Ньютона отказаться от публикации «Рассуждений». Не исключено, что Ньютон хотел уточнить некоторые неясные вопросы. Случай наклонного падения света так и остался невыясненным: в «Рассуждениях» приводится больше результатов измерений диаметров колец при разных углах падения, чем в первом варианте, но никакая закономерность не сформулирована.

Глава 6

ОКРАСКА ТЕЛ

По некоторым письмам Ньютона 1672 г. видно, что к тому времени у него уже была построена теория окраски природных тел на основе теории тонких пленок. Впервые она была изложена в «Рассуждениях» 1675 г.

«Рассуждения» состоят из двух частей: вначале идут 24 «наблюдения», а за ними следуют 9 «предложений», выводимых из наблюдений. Эта же структура сохранилась впоследствии во второй книге «Оптики», было только увеличено число «предложений».

В своей теории света и цветов 1672 г. Ньютон показал, что всякое тело кажется окрашенным в тот цвет, каких лучей оно больше отражает или пропускает. Теперь он пытается выяснить, почему различные тела неодинаково отражают лучи разных цветов.

Основная идея Ньютона такова: если расщеплять тело на более тонкие части, то их окраска должна быть такой же, как у всего тела. Наименьшие частицы, образующие тела, должны обладать определенной прозрачностью, при этом они, наподобие тонких пленок, будут отражать один цвет и пропускать другой в зависимости от их толщины. Именно в этот (пропускаемый) цвет и будет окрашено тело. В промежутках между твердыми частицами находится среда с меньшей оптической плотностью. Непроз-

рачность тел обусловлена множеством внутренних отражений, при которых часть света гасится.

Таким образом, различие в окраске тел связано с различием размеров частиц, образующих тело. Ньютон считал, что окраска тела (с учетом порядка) является однозначной характеристикой внутреннего строения тела. Он считал возможным с помощью своей таблицы цветов по окраске тел определять размеры частиц тела.

Возникающие при этом трудности, по мнению Ньютона, связаны только с правильным определением порядка цвета. Он дает ряд советов, как это следует делать. Интерес представляет его замечание о том, что изменение окраски при химических реакциях связано с изменением частиц тел.

Последнее предложение теории формулируется так: «Причина отражения не заключается в ударе света о твердые и непроницаемые части тел, как это обыкновенно думают»¹. Ньютон показывает, что ряд явлений (полное внутреннее отражение, цвета тонких пленок, зеркальное отражение от полированных поверхностей и др.) нельзя объяснить допуская столкновение световых лучей с твердыми частицами тел, ибо при любой степени полировки поверхность тел является довольно неровной. Подобными столкновениями, по Ньютону, можно объяснить только непрозрачность тел, ибо при этих столкновениях часть света теряется, поглощается в теле.

Как же в действительности происходит отражение света? В «Гипотезе» 1675 г. Ньютон предположил, что преломление происходит не на поверхности тела, а на границе эфира различной плотности. Он считает, что вблизи поверхности тела плотность эфира изменяется плавно, уменьшаясь до некоторой глубины внутри тела и увеличиваясь до некоторого расстояния от поверхности вне тела. В этом случае луч не преломляется скачком на некоторой математической поверхности, а плавно искривляет свою траекторию подобно тому, как это наблюдается при прохождении света через раствор соли в воде, когда устанавливается градиент плотности по высоте. Впрочем, при преломлении в эфире это искривление траектории луча нельзя наблюдать экспериментально, ибо оно существует только вблизи поверхности тела.

Подобные идеи о плавном изменении преломления света вблизи границы двух сред неоднократно выдвигались физиками XIX в. (в рамках волновой теории) для преодо-

ления некоторых трудностей в теории отражения и преломления света ².

Теория цветов природных тел занимает в оптике Ньютона особое положение. Эта особенность — ее спекулятивный характер. Только предложение 1 о том, что больше всего света отражают те поверхности, которые находятся между средами, максимально различающимися по преломляющим свойствам, как-то обосновано наблюдениями над телами. Остальные предложения — неоправданный перенос свойств тонких пластин на большие тела. Например, свойство тел сохранять окраску при дроблении явно противоречило известным опытам Гука с пластинками слюды, на которые ранее ссылался Ньютон. Те немногие наблюдения над окраской тел, которые, по мнению Ньютона, говорят в пользу его теории, обычно оказываются ошибочными. Так, ссылаясь на то, что перья павлиньего хвоста меняют свою окраску при разных положениях глаза, он уподобляет их волоски тонким пленкам. В действительности же здесь наблюдаются дифракционные явления.

Это же относится к наблюдениям над паутиной и некоторыми шелками, о которых упоминает Ньютон. Различие окраски в отраженном и проходящем свете тончайшей золотой фольги и настойки нефритового дерева Ньютон считал доказательством подобия свойств тонких пленок и толстых тел, хотя здесь действовал совсем иной механизм.

Разумеется, Ньютон не мог знать, что в этих нескольких примерах подобие рассматриваемых явлений известным ему явлениям в тонких пленках было неполным. При тщательном изучении этих явлений он мог бы обнаружить различие.

Однако Ньютон отнюдь не стремился искать доводы против своей теории. Возникшая в самом начале его оптических изысканий мысль о том, что цвета тонких пленок — ключ к цветам всех тел, казалась Ньютону столь удачной, что он сохранил ее на всю жизнь. Хотя теория цветов природных тел фактически состоит из одних гипотез, тем не менее Ньютон не только не поместил ее в «Вопросы», но нигде не выражал ни малейшего сомнения в ее экспериментальной обоснованности.

Для нас основная ценность этой теории состоит в том, что она позволяет нам изучать атомистику Ньютона и любоваться широтой его мышления: земля и небо; жид-

кости и пары; камни, растения и животные; механика, теплота, химия — все привлекается для выяснения природы цвета.

Несмотря на свой спекулятивный характер, а может быть благодаря ему теория цветов природных тел благосклонно принималась и в XVII в., и в XVIII в. Она была в русле идей того времени. Подобную по идее теорию (цвет определяется структурой тел) предложил в своей «Микрографии» Гук³. Отличие его теории от теории Ньютона состояло в ином механизме образования цветов в каждой частице тела.

У Гука все тела состоят из двух сортов веществ, отличающихся по преломляемости. Одно из этих веществ непрерывно распределено и прозрачно, в него погружены одинаково окрашенные и равные по размерам частицы другого вещества. Частицы располагаются упорядоченно, причем тем гуще, чем глубже цвет. Обе среды по-разному задерживают свет, поэтому, если часть импульса идет в непрерывной среде, а другая преломляется в окрашенной частице, получаем комбинацию двух импульсов разной силы, один из которых отстает от другого, т. е., по общей идее Гука, возникает окраска. Возможно, что некоторые идеи этой теории Гука оказали влияние на Ньютона.

В XVIII в. теория окраски тел Ньютона фигурирует во всех учебниках. Некоторые модификации этой теории, появившиеся в конце столетия, не затрагивали ее основной идеи. Бриссон⁴ считал, что различия в толщине частиц тела недостаточно для того, чтобы объяснить различие цветов, а необходимо также учитывать и форму частиц, и способы их соединения. Он аргументировал это изменением окраски твердых и жидких тел под действием красителей. Либ⁵ считал, что различие в окраске тел обусловлено различной степенью их окисления.

Делаваль⁶ многочисленными опытами показал, что для толстых прозрачных окрашенных тел не существует избирательного отражения, а существует только избирательное поглощение, и если, например, стекло кажется нам окрашенным в рассеянном свете, то это в действительности оттого, что часть света проходит толщу стекла по направлению к наблюдателю и затем рассеивается. Он покрывал черной тканью все поверхности твердого тела или сосуда с жидкостью, кроме передней, — при этом любые тела и жидкости в отраженном свете казались черными. Только Леонард Эйлер⁷ полностью отри-

цал ньютоновскую теорию тонких пластин и теорию окраски тел. По его мнению, ни толстые, ни тонкие тела нельзя увидеть при помощи отражаемых ими лучей. При помощи таких лучей, считал Эйлер, мы можем видеть не поверхность тела, а источник света, как при отражении в зеркале. Таким образом, Эйлер не различал зеркального и диффузного отражения света. Он создал собственную теорию окраски тел: все тела мы видим в том свете, который излучают его частицы. Частицы, колеблясь с определенной частотой, создают колебания в эфире, которые и вызывают в нашем глазу ощущение определенного цвета. Частота колебаний частиц определяется их упругостью и «толщиной» (аналогия со струной). При очень большой толщине частиц частота уменьшается настолько, что соответствующие колебания эфира не воспринимаются глазом. Частицы тел приходят в колебание под действием падающего света, периодические воздействия световых импульсов вызывают резонансные явления, и интенсивность света, излучаемого молекулами, становится ощутимой для глаза.

В теории Эйлера были свои трудности. Подобно тому как колеблющаяся струна создает не только основную частоту, но и обертоны, так и в излучаемом молекулами свете должны присутствовать крайние частоты, и всем им необходимо приписать один и тот же цвет.

При освещении белым светом должны были бы возбуждаться все частоты, и отсутствие некоторых из них Эйлер объяснил тем, что соседние молекулы гасят колебания друг друга.

В начале XIX в. развивается новый подход к проблеме окраски тел (Дж. Гершель, Брюстер, Пуйе и др.), в котором окраска связывается с избирательным поглощением света разных цветов. Причины этой избирательности были еще неясны, хотя некоторые догадки высказывались. Пуйе⁸, например, писал в 1828 г., что причина избирательного поглощения состоит в том, что под действием света приходят в колебание не только молекулы эфира в теле, но и сами молекулы тела. В зависимости от расстояний между последними возбуждаются те или иные частоты. Задача состоит, по мнению Пуйе, в том, чтобы установить зависимость этих частот от расстояний между молекулами, их размеров и т. д.

В связи с появлением новой теории окраски интерес к ньютоновской теории уже в 30-е годы XIX в. иссякает.

ЦВЕТА ТОЛСТЫХ ПЛАСТИН

Трудно установить точную хронологию оптических исследований Ньютона, особенно в период после 1675 г. Одним из основных документов служат заметки, которые сделал Дэвид Грегори, будучи в гостях в Кембридже у Ньютона 4—7 мая 1694 г. Предполагают, что эти записи он делал под диктовку Ньютона. В заметках Грегори нашли отражение основные открытия Ньютона и его гипотезы в оптике.

В частности, в п. 15 читаем: «Он [Ньютон] продвинул изучение цветов так далеко, что может объяснить призму, раду, линзы наибольшей апертуры, а также *цвета вогнутого зеркала, у которого тыльная сторона покрыта амальгамой и имеет тот же радиус, как и передняя* (курсив наш.— Е. П.), а также естественные цвета тел, строение которых или хотя бы свойства подразумеваются»¹. Далее в заметках встречаем фразу: «Луч света имеет приступы отражения и преломления...»². Это первые явные упоминания о цветах, получивших название цветов толстых пластин, и о теории приступов. Наблюдения над цветами толстых пластин и теория приступов впервые опубликованы в «Оптике».

Есть указания, позволяющие уточнить дату открытия цветов толстых пластин. В предисловии к первому изданию «Оптики» Ньютон указал, что та часть «Оптики» (четвертая часть второй книги), в которой описаны цвета толстых пластин, составлена около 1687 г. Если учесть, что в 80-е годы Ньютон был поглощен созданием теории тяготения, кажется маловероятным, чтобы до окончания работы над «Началами» в 1686 г. он мог заняться новыми опытами.

С другой стороны, в июне 1689 г. Англию посетил Х. Гюйгенс. 12 июня 1689 г. Ньютон и Гюйгенс докладывали на заседании Королевского общества. Гюйгенс кратко сообщил о содержании своей готовящейся к печати книги «Трактат о свете» (в частности, о теории преломления в исландском шпате) и о своей критике ньютоновской теории тяготения. Ньютон дал свое толкование некоторых случаев двойного преломления в исландском шпате.

К сожалению, ничего не известно о дискуссии по этим докладам. Случай был беспрецедентный: два крупнейших ученых излагают друг другу свои ошибочные теории, призванные опровергнуть правильную теорию соперника!

В письме к Г. Лейбницу (1646—1716) от 24 августа 1690 г. Гюйгенс писал, вспоминая поездку в Англию, что Ньютон показал ему несколько опытов, «самых прекрасных из всех, которые он производил»³.

Несколько раз обращался к Гюйгенсу Лейбниц, пытаясь узнать содержание этих опытов, но ответные письма не сохранились.

Можно предположить, что опыты, которые так восхищали Гюйгенса, относились к цветам толстых пластин.

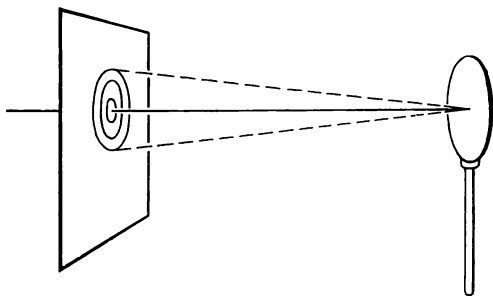


Рис. 25

Опыты действительно очень эффектно и легко наблюдаемы. Трудно допустить, чтобы Ньютон, открыв новое оптическое явление (заметим, это было единственное новое явление в оптике, которое он обнаружил), не сообщил бы о своем открытии столь сведущему оптику, как Гюйгенс.

Если это предположение верно, то открытие цветов толстых пластин произошло около 1687—1688 гг.

Ньютон экспериментировал со стеклянным зеркалом, отшлифованным с вогнутой стороны и покрытым ртутью с выпуклой стороны (рис. 25). Возможно, это был объектив телескопа. Ньютон освещал зеркало узким пучком света, проходившим в затемненную комнату сквозь небольшое отверстие в ставне, и помещал белый непрозрачный экран с проделанным в нем маленьким отверстием таким образом, чтобы пучок света проходил в это отверстие и чтобы само отверстие находилось в центре сферической поверхности зеркала. При этом на экране наблюдалось не-

сколько концентрических окрашенных колец, а в центре — белое пятно.

Обычно наблюдалось 4—5 колец. При уменьшении или увеличении расстояния от зеркала до экрана видимость колец ухудшалась.

Порядок цветов в кольцах был точно таким, какой наблюдался в тонких пленках в проходящем свете. Наблюдавшаяся аналогия в чередовании цветов побудила Ньютона проверить, нет ли аналогии в размерах цветных колец.

Он нашел, что квадраты диаметров первых четырех ярких колец образуют арифметическую прогрессию чисел 1, 2, 3, 4. Если центральное пятно считать бесконечно узким кольцом, то получим прогрессию 0, 1, 2, 3, 4. В тех же единицах квадраты диаметров темных колец дали прогрессию чисел $1/2$, $3/2$, $5/2$, $7/2$. Сопоставляя эти прогрессии с результатами, полученными для тонких пленок в проходящем свете, находим полную аналогию.

При наблюдении колец через призму число их заметно увеличивалось. Освещая зеркало монохроматическими лучами (после призмы), можно было наблюдать на экране кольца только того цвета, которым освещалось зеркало. Между этими кольцами наблюдались темные промежутки. Измерения диаметров колец в монохроматическом свете подтвердили прогрессию, полученную в белом свете.

При изменении цвета лучей, освещавших зеркало, менялись размеры колец: наибольшие кольца получались в красном свете, следующими по размерам были желтые, зеленые, синие и, наконец, фиолетовые. Отсюда Ньютон сделал вывод, что при освещении зеркала белым светом красные кольца производятся наименее преломляемыми лучами, фиолетовые — наиболее преломляемыми, а промежуточные цвета соответствуют промежуточным степеням преломляемости лучей. Поскольку кольца имели определенную ширину, они накладывались, особенно вдали от центра, и в результате смешения цветов кольца не выделялись на фоне экрана.

Наблюдая зеркало со стороны экрана, Ньютон видел его покрытым цветными кольцами подобно тому, как это наблюдалось в мыльных пузырях и других тонких пленках. И так же, как в тех случаях, здесь при смещении глаза менялись размеры колец и их окраска. Помощник видел на глазу Ньютона тот же цвет, который сам Ньютон в этот момент видел на зеркале. «Отсюда я заключил, — пишет

Ньютон,— что цветные кольца на картоне создавались этими отраженными цветами, распространяющимися под разными углами от зеркала, и что получение их не зависит от границы света и тени»⁴.

Обобщая результаты наблюдений цветов толстых пластин, Ньютон очень краток, он ограничивается указанием на аналогию между этими цветами и цветами тонких пленок. Если несколько детализировать его выводы, пользуясь описанным ранее методом, примененным Ньютоном для тонких пленок, то получится следующее.

В цветах толстых пластин обнаружено новое свойство света (назовем его условно «расходимостью»), проявляющееся в том, что различные лучи выходят из зеркала под разными углами. Это свойство света не связано со случайными нарушениями правильности поверхности зеркала, ибо всегда наблюдается одинаково правильная картина колец. Следовательно, это изначальное, внутреннее свойство света.

Ньютон показал, что лучи, идущие от зеркала, обладают различной преломляемостью. Ньютон измеряет диаметры колец, соответствующих границам красного и оранжевого, а также синего и индиго. Пользуясь соотношением преломляемости различных цветов, он вычисляет отношение квадратов диаметров красного и фиолетового колец и получает значение $\frac{3}{2}$, что достаточно близко к аналогичному соотношению в тонких пленках.

Ньютон показал, что в свете, отраженном зеркалом, белизна — это смесь разнородных лучей, а лучи однородные, отражаясь от зеркала, не меняют своей окраски.

Несмотря на полное внешнее подобие чередования цветов и размеров колец в тонких и толстых пластинах, Ньютон понимал различие в механизме прохождения света через те и другие. При нормальном падении света в тонких пластинах, где лучи света преломлялись на первой поверхности и зеркально отражались на второй, разнообразие наблюдаемых цветов объяснялось различием толщины пластины. В толстых же пластинах, по мнению Ньютона, лучи света, рассеянные на первой поверхности, доходили до второй поверхности, где испытывали диффузное отражение, в результате чего некоторые из них, возвращаясь к первой поверхности, выходили наружу и образовывали кольца, а другие отражались от первой поверхности назад ко второй.

Ньютон обнаружил, что цвета тонких и толстых пластин можно описать с помощью единого формализма. Этот формализм у Ньютона получил название «приступов легкого отражения и легкого прохождения» (для сокращения будем употреблять термин «приступы»).

Появление теории приступов символизировало отказ Ньютона от попыток объяснения попеременного отражения и прохождения света с помощью эфирных волн. В эпоху создания «Начал» Ньютон отказывается от гипотезы эфира ибо сопротивление эфира движению планет должно было бы повлиять на форму их орбит.

В связи с этим более вероятно отнести появление теории приступов к периоду около 1687 г., чем к концу 70-х годов. Это сближает даты появления теории приступов и открытия цветов толстых пластин.

То, что Ньютон поместил эту теорию в третьей части второй книги «Оптики», не противоречит этому допущению. Хотя она включает наблюдения над тонкими пленками в первых двух частях и предшествует наблюдениям над толстыми пластинами, изложенными в четвертой части, однако в самих предложениях теории даются ссылки и на те, и на другие наблюдения.

Из 20 предложений третьей части, по определению Ньютона, первые десять относятся к природе тел (окраска тел и др.), а последующие относятся к природе света. Теория приступов излагается в предложениях XII—XX. Назначение теории Ньютон определяет так: «Я объяснял до сих пор отражательную и преломляющую силу тел и показал, что тонкие прозрачные пластинки, волокна и частицы отражают соответственно их различным толщинам и плотностям различные сорта лучей, являясь поэтому в различных цветах, и что, следовательно, для получения всех цветов естественных тел не требуется ничего иного, кроме различных размеров и плотностей прозрачных частиц тел. Но я, однако, еще не объяснил, почему (курсив наш.—Е. П.) эти тонкие пластинки, волокна и частицы отражают различные сорта лучей соответственно их различным толщинам и плотностям»⁵.

С этой целью Ньютон приписывает световым лучам новое свойство (предложение XII): «Каждый луч при своем прохождении через любую преломляющую поверхность приобретает некоторое преходящее строение или состояние, которое при продвижении луча возвращается через равные интервалы и располагает луч при каждом

возвращении к легкому прохождению через ближайшую преломляющую поверхность, между же возвращениями — к легкому отражению»⁶.

Ньютон отмечает, что если в тонких пленках наблюдалось до ста возвращений, в стеклянном зеркале толщиной около $2\frac{1}{4}$ дюйма их было много тысяч. Отсюда он делает вывод, что, возникнув при преломлении на границе двух сред, эти чередования распространяются далее на любые расстояния. С этим выводом согласуется замечание Ньютона в «Гипотезе» 1675 г. о том, что при применении идеально однородного света и точечного зрачка можно было бы наблюдать бесчисленное множество колец.

По мнению Ньютона, приступы зависят как от первой поверхности, так и от второй, ибо они определяются расстоянием между поверхностями. Ньютон предполагает, что от первой поверхности ко второй распространяется некоторое действие, или расположение, причем при своем распространении оно прерывается и возвращается через равные интервалы, склоняя луч к отражению, при расстояниях от первой поверхности, кратных числам 1, 3, 5, 7, ..., и к прохождению при расстояниях, кратных 0, 2, 4, 6...

«Какого рода это действие или расположение? — спрашивает Ньютон. — Я не исследую здесь, состоит ли оно из вращательного или колебательного движения луча, или среды, или из чего-либо еще. Те, кто неохотно одобряют всякое новое открытие, если оно не объясняется гипотезой, могут в настоящем случае предположить, что подобно тому, как камни, падая на воду, приводят ее в колебательное движение и все тела при ударе возбуждают колебания в воздухе, так и лучи света, ударяясь о какую-нибудь преломляющую или отражающую поверхность, возбуждают колебания в преломляющей или отражающей среде или веществе; можно предположить, что колебания, возбужденные таким образом, распространяются в преломляющей или отражающей среде или веществе подобно тому, как колебания распространяются в воздухе, вызывая звук, и движутся быстрее, чем лучи, обгоняя их; когда луч находится в той части колебания, которая согласуется с его движением, он легко пробивается через преломляющую поверхность; находясь в противоположной части колебания, мешающей его движению, он легко отражается; следовательно, каждый луч попеременно располагается или к легкому отражению, или к легкому пропуска-

нию каждым колебанием, обгоняющим его. *Я не разбираю здесь, верна или ошибочна эта гипотеза.* Я довольствуюсь простым открытием, что лучи света благодаря той или иной причине располагаются к отражению или преломлению во многих чередованиях»⁷.

Воскресив еще раз свою старую гипотезу, Ньютон тут же оставляет ее, внушая читателю, что вполне можно обойтись без гипотез, используя некоторый эмпирический принцип.

Для математического описания периодичности, наблюдаемой в тонких пленках, Ньютон создает эмпирическую теорию приступов.

Вначале вводятся определения «приступов» и «интервалов приступов»: «Возвращения расположения какого-либо луча к отражению я буду называть его приступами легкого отражения; возвращения его расположения к прохождению — приступами легкого прохождения; пространство, проходимое им между каждым возвращением и соседним, — интервалом его приступов»⁸.

На основе измерений, проведенных в опытах с тонкими пленками, Ньютон устанавливает ряд соотношений для интервалов приступов.

1. Интервал приступов в воздухе при нормальном падении света равен $\frac{1}{89\ 000}$ дюйма.

2. Интервалы приступов лучей некоторого цвета в данных двух средах обратно пропорциональны абсолютным показателям преломления этих лучей в этих средах. В частности, в воде интервал приступов меньше, чем в воздухе.

3. Интервалы приступов для лучей разных цветов, выходящих в одну и ту же среду под одним и тем же углом, определяются на основе музыкально-оптической аналогии. Для границ фиолетового, индиго, голубого, зеленого, желтого, оранжевого, красного цветов интервалы относятся как числа 6300, 6814, 7114, 7631, 8225, 8855, 9243, 10 000.

В третьем варианте теории тонких пленок, помимо уточнения ряда результатов измерений, Ньютон наконец сформулировал закон, связывающий диаметры колец с углом преломления света, падающего на пленку наклонно. Следствием этого закона явилось следующее положение:

«4. Для одного и того же сорта лучей, выходящих под некоторым углом из какой-нибудь преломляющей поверх-

ности, в одну и ту же среду, отношение интервалов между последовательными приступами легкого отражения и легкого прохождения равно либо точно, либо весьма близко произведению секанса угла преломления и секанса другого угла, синус которого является первым из 106 арифметических средних пропорциональных между синусом падения и преломления, отсчитываемых от синуса преломления»⁹.

Записывается этот закон так:

$$i'/i = \sec r \cdot \sec u, \quad (1)$$

где

$$\sin u = \sin r \left(\frac{105 + n}{106} \right). \quad (2)$$

Здесь r — угол преломления в веществе с показателем преломления n ; u — вспомогательный угол; i , i' — интервалы приступов при нормальном и наклонном падении света.

Нетрудно видеть, что при не очень больших углах преломления с достаточной точностью выполняются соотношения

$$\sin u \cong \sin r, \quad \sec u \cong 1, \quad i'/i = \sec r. \quad (3)$$

Результаты измерений при углах преломления в воздухе до 60° , проведенных Ньютоном, хорошо соответствовали последней формуле.

Однако результаты измерений Ньютона для больших углов преломления не согласовались с этой простой формулой, и он в конце концов после многолетних усилий решил добиться совпадения с опытом путем введения вспомогательного параметра.

Опыты эти были столь сложны, что в XVIII в. и в начале XIX в. никто не решался повторить их, и странная формула Ньютона (1) переходила из учебника в учебник.

О. Френель (1816 г.)¹⁰ первым заподозрил экспериментальные неточности при больших углах преломления, но только в 1849 г. Провостэ и Дезен¹¹ прямыми опытами показали, что и при углах преломления, близких к 90° , выполняется формула (3).

Для распространения теории приступов на толстые пластины Ньютому понадобились дополнительные гипотезы:

«Если какой-либо сорт лучей, падающих на полированную поверхность некоторой прозрачной среды, отража-

ется назад, то приступы легкого отражения, которые лучи имеют в точке отражения, будут продолжать возвращаться и возвращения будут происходить от точки отражения на расстояниях, соответствующих арифметической прогрессии чисел 2, 4, 6, 8, 10...; между этими приступами лучи будут в приступах легкого прохождения... Интервалы приступов легкого отражения и легкого прохождения, распространяющихся от точек отражения в некоторой среде, равны интервалам подобных же приступов, которые те же лучи должны иметь, если они преломляются в той же среде под углами преломления, равными их углам отражения»¹².

На основании этих гипотез Ньютон получил, что при нормальном падении света лучи, бывшие при входе в первую поверхность в приступе легкого прохождения и отразившиеся от второй поверхности, при возвращении к первой поверхности по нормали к ней вновь будут в приступе легкого прохождения. Именно эти лучи дадут на экране центральное белое пятно, ибо равенство интервалов приступов на прямом и обратном пути справедливо для лучей всех сортов.

Иная ситуация будет для лучей, рассеянных на второй поверхности под углами, отличающимися от угла падения: «Но интервалы приступов тех лучей, которые отражаются более наклонно, чем входят, должны быть после отражения больше, чем прежде... Отсюда может случиться, что лучи при их возвращении к первой поверхности могут при некоторых наклонах быть в приступах легкого отражения и возвращаются к ртути, при других же промежуточных наклонах они снова могут быть в приступах легкого прохождения и выходят к картону, вырисовывая на нем цветные кольца вокруг белого пятна»¹³.

Лучи, образующие соседние кольца, по мнению Ньютона, проходят в стекле после отражения пути, отличающиеся на один интервал приступов. Исходя из этого и используя полученные в опытах с тонкими пленками величины интервала приступов для желого света, Ньютон рассчитал диаметры первых четырех светлых колец при заданных толщине пластины, расстоянии до картона и показателе преломления стекла. Получилось хорошее совпадение с результатами измерений.

Сопоставив размеры колец от двух зеркал разной толщины, но одинакового радиуса кривизны и сорта стекла, он получил, что квадраты диаметров колец обратно про-

порциональны толщинам зеркал. Никаких формул для толстых пластин Ньютон не дал. Позже их восстановил Био¹⁴.

Ньютон сделал следующий вывод о применимости теории приступов: «...я удовлетворился тем, что эти кольца были того же рода и происхождения, как кольца тонких пластинок, и что, следовательно, приступы попеременных расположений лучей к отражению и пропусканию распространяются от каждой отражающей и преломляющей поверхности»¹⁵.

Однако для объяснения частичного отражения и преломления света на границе двух сред одного этого утверждения было недостаточно. Необходимо было объяснить, откуда у световых лучей, достигших поверхности, оказались различные фазы приступов, ибо отражаться могли только лучи в приступе легкого отражения, а преломляться — лучи в приступе легкого прохождения.

«Следовательно, свет находится в состоянии приступов легкого отражения и легкого прохождения и до падения на прозрачные тела. И, вероятно, он получил такие приступы при первом испускании от светящегося тела, сохраняя их во время всего своего пути»¹⁶.

Ньютон подробно изучал и более сложные случаи цветов толстых пластин: случай наклонного падения света, пластины неравной толщины, пластины с разными радиусами кривизны поверхностей. Для случая наклонного падения он подробно описал систему наблюдаемых колец и привел результаты измерения их диаметров. В остальных случаях он не привел описаний явлений и расчетов из-за их сложности, ограничившись заявлением, что все эти опыты полностью подтверждают теорию.

Успешное применение теории приступов к толстым пластинам побудило Ньютона испытать ее для объяснения цветных корон, наблюдаемых иногда вокруг Солнца и Луны, поскольку эти короны весьма напоминали кольца в толстых пластинах.

Идея расчета была такова: луч света от Солнца проходит каплю воды по диаметру и рассеивается на противоположном краю. Лучи, проходящие от конца диаметра расстояния, отличающиеся от длины диаметра на один, два, три интервала, должны были находиться в приступе легкого прохождения. Именно эти лучи, выходя из капли, должны были создавать цветные кольца.

Ньютон не дал своей расчетной формулы, ограничившись указанием, что угловой диаметр колец зависит от диаметра капель и что его расчеты подтвердились наблюдениями 1692 и 1664 гг.

Попытки Био¹⁷ восстановить формулу Ньютона успеха не имели, ибо, по его расчетам, диаметр капель получился в 5 раз больше, чем у Ньютона. Такого размера капли не дают корон. Био рассматривал рассеяние только в одной капле. Ньютон же, видимо, каким-то образом учитывал рассеяние на множестве капель. Об этом говорит его фраза: «Чем более равны между собою шарики воды или льда, тем больше будет появляться цветных корон и тем живее будут цвета»¹⁸.

Глава 8

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Различные дифракционные явления нередко наблюдались и в XVII в. и даже ранее, но дифракцию как самостоятельное оптическое явление, несводимое к ранее известным, описал впервые Ф. Гримальди в книге «О свете и о цветах». Гримальди оценил важность своего открытия: с его изложения и начинается эта объемистая книга. «Свет распространяется или рассеивается не только прямолинейно, отражением и преломлением, но также и четвертым способом — дифракцией»¹.

Рассмотрим результаты основных дифракционных опытов Гримальди.

1. Свет проникает в темную комнату через очень малое отверстие в ставне. В световой конус помещается непрозрачное тело, тень которого наблюдается на бумаге. Измеряя ширину тени, Гримальди пришел к выводу, что она больше, чем должна быть при прямолинейном распространении света.

2. Края тени окаймлены тремя цветными полосками. Эти полосы зависят от отверстия в ставне, ибо при увеличении отверстия они исчезают. Наблюдается обычно не более трех полос, ширина их убывает с удалением от тени. Середина каждой полосы — белая, внутренний край — фиолетовый, наружный — красный.

3. Если тело имеет угол, то полосы не образуют такой же угол, они искривляются, причем внешние полосы — более округлые. Если угол внутренний, то полосы параллельны сторонам и, пересекаясь, не уничтожают друг друга.

4. «Внутри тени иногда видны цветные полосы, подобные тем, что видны снаружи. Иногда их больше, иногда меньше. При одной и той же пластинке число полос зависело от расстояния до экрана. Полосы были шире, когда их было мало, и уже, когда их много. Они были видны более четко при наклоне бумаги»².

5. Окружая острый угол тени, внутренние полосы изгибались. Если освещен только угол, то видны расходящиеся веером из вершины угла полосы в форме пера. Число полос пропорционально толщине пластины. Если она очень тонка, цветные полосы внутри тела могут изгибаться вокруг противоположной стороны и встречаться друг с другом.

Вслед за дифракцией на непрозрачной преграде Гримальди обнаружил дифракцию на отверстии. Пропуская в темной комнате пучок света через малое отверстие в непрозрачном экране, он обнаружил, что наблюдаемый на другом экране диск Солнца больше по размерам, чем он должен быть при прямолинейном распространении света.

Гримальди впервые открыл и дифракцию в отраженном свете. Помещая в световой конус металлическую пластинку, исчерченную штрихами, очень тонкие нити, голубиные перья, он наблюдал при отражении света окрашенное изображение.

К сожалению, открытие Гримальди современники не оценили по достоинству. Вот что писал Г. Ольденбург в рецензии на его книгу об открытии дифракции: «В первой части он объясняет, какими различными путями свет распространяется или рассеивается: не только прямолинейно и преломлением, и отражением, но также путем дифракции, которая имеет место, когда части света, разделенные множеством разбиений, будут распространяться в той же среде различными путями»³.

Многое ли могли уяснить Гук и Ньютон из этой рецензии? Книга же О. Фабри, из которой Ньютон почерпнул сведения об опытах Гримальди, называлась «Физические диалоги против книги Гримальди „О свете и цветах“». Трудно предположить, что именно для опровержения взглядов Гримальди Фабри столь тщательно изложил

бы все его многочисленные опыты, среди которых дифракционные опыты занимают лишь малую часть.

Нужно отметить, что и более крупные ученые, чем Ольденбург, не смогли правильно оценить опыты Гримальди. В 1679 г. Мариотт и Лагир повторили опыты Гримальди в присутствии Гюйгенса и пришли к выводу, что Гримальди ошибся. Вероятнее всего, у них было слишком велико отверстие в ставне, и дифракционные полосы исчезли. Фактически истинное признание открытие Гримальди получило после выхода в свет «Оптики» Ньютона. Только тогда книгу Гримальди стали перечитывать и повторять его дифракционные опыты.

Гук начал свои опыты, видимо, не ознакомившись с опытами Гримальди. Некоторые его опыты повторяли опыты Гримальди, например видимое увеличение размеров Солнца. Однако опыт Гука с ножом был оригинальным. Гримальди применял в основном узкие преграды, и его внимание более всего привлекали дифракционные полосы. Гук же использовал широкие преграды и поэтому обнаружил не полосы, а непрерывное свечение в области тени с постепенно убывающей по мере удаления от края яркостью. Вот некоторые пункты краткого отчета Гука.

1. Существует явление, названное им дефлексией, отличное от преломления и отражения и зависящее, по-видимому, от неодинаковой плотности составляющих частей луча, посредством которого свет отклоняется от места ступенчатости и разрежается.

2. Дефлексия происходит по направлению к телу, перпендикулярно его поверхности.

3. Чем больше угол отклонения света от первоначального направления, тем меньше яркость соответствующего луча света...

7. Одинаковые лучи света, падающие в одну и ту же точку предмета, будут производить все цвета за счет различных отклонений от тела.

Хотя опыт Гука был качественным, все же в нем впервые было показано, что изменение радиуса кривизны экрана и его материала не изменяет дифракционной картины.

Гук сообщил эти результаты на заседании Королевского общества 18 марта 1675 г. Присутствовавший на этом заседании Ньютон заявил, что наблюдавшееся Гуком загибание света на преграду можно объяснить его преломлением в неоднородном эфире вблизи поверхности тела

Далее он добавил, что подобные опыты описаны у Фабри и заимствованы из книги Гримальди.

Открытие Гука было дискредитировано, и больше дифракцией он не занимался.

Хронология дифракционных опытов Ньютона известна хуже всех других его оптических исследований.

Первое упоминание о дифракции, где Ньютон объясняет только опыты Гука и Гримальди, ничего не упоминая о своих собственных, мы находим в «Гипотезе» 1675 г. Загибание света за преграду Ньютон объясняет искривлением траектории светового луча вблизи поверхности тела за счет плавного изменения плотности эфира. Образование цветных полос он объясняет так же, как и в тонких пленках, т. е. с помощью эфирных волн, создающих уплотнения и разрежения в эфире и заставляющих луч изгибаться. Почему луч изгибается, когда волна идет вдоль луча, остается неясным. Вообще все объяснение чрезмерно кратко и туманно. Если же учесть, что в спешке Ньютон допустил ряд ошибок и пропусков в тексте и в чертежах, трудно представить, чтобы первое его объяснение дифракции было принято с одобрением. Впрочем, Ньютон не настаивал на своем объяснении как недостаточно обоснованном на опыте: «Но я не имею времени развивать дальнейшие подробности и не предлагаю этого с уверенностью, так как не сделал достаточных наблюдений по этому поводу»⁴.

Видимо, какие-то опыты в этот период Ньютон уже ставил, но содержание их нам неизвестно.

Следующее упоминание о дифракции мы находим в письме к Бойлю от 26 февраля 1679 г. Здесь повторяется описание опыта Гримальди, данное в «Гипотезе». Ньютон ограничивается объяснением изгибания луча.

Новое объяснение дифракции Ньютон приводит в «Началах»: «Когда же лучи находятся в воздухе (как уже давно заметил Гримальди, пропуская свет через отверстие в темную комнату, что я и сам пробовал), то при прохождении близ углов непрозрачных или прозрачных тел (как, например, около круглых прямоугольных ободков золотых, серебряных или медных монет или же около острых, как осколки камня или стекла) они загибаются в сторону к телу, как бы будучи к нему притягиваемыми. При этом лучи, ближайšie к телу, загибаются больше, как бы более притягиваясь, что я сам тщательно наблюдал. Те же лучи, которые проходят на большем рас-

стоянии, погибают менее, а на еще большем расстоянии погибают даже чуть-чуть в противоположную сторону, давая три цветные полосы»⁵.

Так впервые была сформулирована новая концепция — взаимодействие света и тел. На основе этой концепции Ньютон объясняет, кроме дифракции, и преломление света (луч света искривляется под действием сил еще до входа в тело). Здесь также показано основное положение новой концепции — уменьшение сил взаимодействия между телом и световым лучом с увеличением расстояния между ними.

11 наблюдений по дифракции составляют первую (единственную) часть третьей книги «Оптики». Ньютон не применял термин «дифракция» (разбиение, раздробление), введенный Гримальди, из-за иных представлений о природе света и цветов. У Ньютона луч не может дробиться, это единое целое, поэтому появляется термин «инфлексия» (изгибание).

Тематика наблюдений у Ньютона не очень обширна, выбраны очень простые объекты (волос, полуплоскость, прямоугольная и клиновидная щели), чтобы действие побочных факторов не мешало выяснению основных причин явления.

В первых двух книгах «Оптики» «предложения» и «наблюдения» всюду разделяются, либо вначале следует четко сформулированный тезис, а затем он доказывается опытами, либо этот тезис появляется на основе анализа предшествующих наблюдений.

В третьей книге изложение построено по-иному. Формально здесь вообще нет «предложений». Этим Ньютон, видимо, хотел подчеркнуть отсутствие полной ясности в вопросе, которое, по его мнению, объясняется недостатком экспериментальных данных:

«Производя предыдущие наблюдения, я намеревался повторить большинство из них с большей тщательностью и точностью и сделать некоторые новые наблюдения для определения способа, каковым лучи света изгибаются при их прохождении около тел, создавая цветные каемки с темными линиями между ними. Но я был тогда прерван, и не могу теперь думать о том, чтобы приняться за дальнейшее рассмотрение этих предметов. Ввиду того, что я не завершил этой части моего плана, я закончу предложением только нескольких вопросов для дальнейшего исследования, которое произведут другие»⁶.

Вопросы 1—3 рассматриваются как «предложения», которые Ньютон пытался обосновать своими опытами по дифракции света. Вот они.

Вопрос 1. Не действуют ли тела на свет на расстоянии и не изгибают ли этим действием его лучей; и не будет ли (при прочих равных обстоятельствах) это действие сильнее всего на наименьшем расстоянии?

Вопрос 2. Не различаются ли лучи, различные по преломляемости, также по изгибаемости, и не разделяются ли они один от другого их различным изгибанием так, что после разделения образуют вышеописанные три окрашенные каемки? И каков способ изгибания, приводящий к образованию этих каемок?

Вопрос 3. Не изгибаются ли лучи света, проходя около краев тел, несколько раз вперед и назад, совершая движения, подобные движениям угря? И не возникают ли три окрашенные каймы, о которых я только что говорил, вследствие трех изгибаний такого рода?»⁷

Даже беглого взгляда на «наблюдения» достаточно, чтобы обнаружить, что содержание вопросов 1 и 2 в утвердительной форме используется для объяснения явлений. Таким образом, описание опытов по дифракции уже включает в себя их объяснение на основе некоторых общих идей.

При чтении третьей книги «Оптики» очень трудно освободиться от ощущения, что все дифракционные опыты ставились по заранее продуманному плану после того, как была сформулирована теория этих опытов.

Исследователь творчества Ньютона лорд Кейнс однажды сказал о Ньютоне: «Я подозреваю, что его эксперименты были всегда средством не для открытия, а только для проверки того, что он уже знал»⁸.

По отношению к изучению дифракции (как и к опытам с призмами) это мнение выглядит правдоподобно.

В самом деле, к чему сводится содержание наблюдений? Уже в первом наблюдении, проверив, что уширение тени волоса не связано с преломлением света в среде, окружающей волос, Ньютон утверждает, что увеличение отношения ширины тени к расстоянию от волоса до экрана при приближении экрана свидетельствует о том, что лучи света отклоняются проходя вблизи волоса, и тем сильнее, чем ближе они проходят.

Рисунок, приводимый Ньютоном, показывает, что, по его мнению, крайние лучи, не подвергающиеся изгибанию,

дают границу тени (рис. 26). Следовательно, по ширине тени можно судить о радиусе действия тел на лучи света.

Изучению этого радиуса действия тел посвящаются и наблюдения 6—10. Различными методами Ньютон пытается определить расстояние, на котором проходят лучи, образующие ту или иную каемку.

Последнее наблюдение посвящено изучению каемок в монохроматическом свете. Здесь Ньютон пытается объяснить различие действия тела на лучи разных цветов. Исходя из наблюдений, показавших, что при любых расстояниях от волоса до экрана в красном свете расстояние

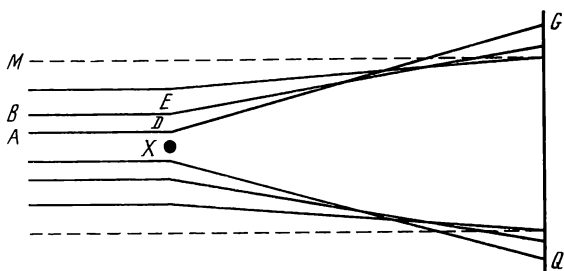


Рис. 26

между двумя светлыми каемками одного порядка, расположенными по разные стороны от тени, больше, чем в фиолетовом, Ньютон делает вывод: «Таким образом, лучи, дающие такие каемки в красном свете, проходили около волоса на большем расстоянии, чем лучи, дающие подобные каемки в фиолетовом свете; поэтому волос, вызывая эти каемки, одинаково действовал на красный свет, или менее преломляемые лучи, на большем расстоянии и на фиолетовые, или наиболее преломляемые лучи, на меньшем расстоянии, и при помощи таких действий расположил красный свет в более широкие каемки, а фиолетовый — в меньшие, свет же промежуточных цветов — в каемки промежуточной толщины, не изменяя при этом окраски ни одного сорта света»⁹.

Эта незавершенность решения даже основной задачи заставляет всерьез отнестись к словам Ньютона о том, что он «был прерван». Возможно, что эти опыты производились незадолго до его переезда в Лондон. Правда, Дэвид Грегори записал в мае 1694 г.: «Я также видел «Три книги оптики»¹⁰. Это свидетельствует, что наблюдения по ди-

фракции уже были описаны, но, с другой стороны, Дж. Уоллис (1616—1703) в письме к Ньютону от 30 мая 1695 г. просил «не задерживать публикацию трактата о свете и цветах несмотря на то, что третья часть не вполне закончена»¹¹.

Если отвлечься от противоречивых теоретических построений Ньютона, остановившись только на экспериментальном аспекте его наблюдений, мы увидим работу мастера, сравнимую с проделанной им ранее. Чтобы, пользуясь таким скудным оборудованием, какое было у Ньютона, получить какие-то численные результаты, требовалось много изобретательности и терпения. Например, чтобы измерить расстояния между полосами, Ньютон их проектирует на наклонный экран и измеряет по расширению тени коэффициент увеличения. Для измерения расстояния между ножами, образующими щель, он применяет щель в виде клина и использует зависимость между шириной щели и длиной ножей до вершины угла.

Результаты ньютоновских измерений расстояний между дифракционными полосами в наблюдениях 3, 4, 9, 11 в начале XIX в. использовались Т. Юнгом для проверки его теории дифракции, а затем и другими физиками. После Ньютона только Френелю первому удалось увеличить точность дифракционных измерений.

В пятом наблюдении Ньютон описал интересный эффект: при наблюдении ножа из области тени его край казался светящимся. В конце XIX в. это явление было переткрыто Л. Гуи и В. Вином. «Светящийся край» в теории дифракции стал рассматриваться как источник «краевой волны». Хотя Ньютон наблюдал подобный эффект и для звука, он не сопоставил оба случая.

Были у Ньютона и ошибки. Наиболее загадочным из всех его наблюдений является шестое. Здесь описан следующий эффект, наблюдавшийся при прохождении света между параллельными ножами: «Когда расстояние между ребрами было около 400-й части дюйма, поток разделялся посредине и оставлял тень между двумя частями. Эта тень была настолько темной и черной, что весь свет, проходивший между ножами, казалось, загибался и направлялся в ту или иную сторону. При дальнейшем приближении ножей одного к другому тень становилась шире, потоки же делались короче на их внутренних краях, которые были ближе к тени, пока при соприкосновении весь свет не исчезал, уступая свое место тени»¹².

В эпоху становления волновой теории, в 1833 г., этот опыт вызвал оживленную дискуссию. Дело в том, что по теории дифракции Френеля при указанных Ньютоном размере щели и расстоянии до экрана (2—3 фута) в центре картины на экране не может наблюдаться темная полоса. Дж. Бартон считал это противоречие доводом против волновой теории. Ему, пытаясь найти в эксперименте какой-то искажающий фактор, возражали Б. Пауэлл и Дж. Эйри. Проверяли влияние кривизны ножей, размеров источника света, ставили проверочные опыты. Только Бартон настаивал на том, что его наблюдения согласуются с ньютоновыми, другие экспериментаторы не подтвердили этого¹³. Эффект оставался невыясненным.

В «Оптике» Ньютон вновь возвращается к объяснению дифракции на основе силового взаимодействия между светом и преградой. В вопросе 4 мы находим: «Не начинают ли лучи, которые падают на тела, отражаясь или преломляясь, изгибаться, еще не доходя до тел; и не происходит ли отражение, преломление и огибание по одному и тому же принципу, действующему различно в разных обстоятельствах?»¹⁴.

Идя от идеи взаимодействия световых частиц и частиц тел на очень малых расстояниях, Ньютон со временем пришел к мысли, что подобным образом на основе взаимодействия частиц весомой материи можно объяснить множество разнообразных физических явлений:

«Не обладают ли малые частицы тел определенными возможностями, способностями или силами, при посредстве коих они действуют на расстоянии не только на лучи света при отражении, преломлении и огибании их, но также друг на друга, производя при этом значительную часть явлений природы? Ибо хорошо известно, что тела действуют друг на друга при помощи притяжений тяготения, магнетизма и электричества: эти примеры показывают тенденцию и ход природы и делают вероятным существование других притягательных сил, кроме этих. Ибо природа весьма согласна и подобна в себе самой»¹⁵.

Эта фундаментальная идея Ньютона намного опередила свою эпоху. Ее разработка началась только в XIX в.

Ньютон создал стройную систему оптики. Понадобилось почти сто лет, чтобы добавить к его творению новые страницы, но в то же время это были последние успехи ньютоновой оптики — ей на смену пришла волновая теория Юнга — Френеля. Что же определило столь долгую жизнь созданию Ньютона? Его теория построена на точном эксперименте. Удивительно, но Ньютон обнаружил только одно оптическое явление — цвета толстых пластин. Все остальные эффекты, составившие основу физической оптики XVII и XVIII вв., были открыты и описаны либо до того, как Ньютон начал серьезные исследования в этой области, либо в первые три десятилетия его научной деятельности другими учеными. Но Ньютон начинал там, где его современники, как правило, останавливались: он не удовлетворялся описанием качественных закономерностей, а стремился получить количественные результаты. Так было при изучении цветов тонких пластин, призматического спектра. Мастер тонкого эксперимента, Ньютон, по словам известного исследователя его творчества Кейнса, часто шел в лабораторию, уже зная, что он должен увидеть. Это второе отличительное качество работы Ньютона — оптика: сочетание эксперимента, послужившего основой создания теории, и теории, направляющей экспериментальное исследование, явилось причиной крупных успехов Ньютона и позволило ему построить не теорию частных явлений, а единую теорию, охватывающую (правда, с разным успехом) все известные тогда явления оптики. Направляющей идеей, которая во многом определила характер его исследований по оптике, была концепция о природе света. Сама проблема относилась к числу наиболее спекулятивных в науке о свете. Только в XVII в. в связи с новыми открытиями в механике и оптике обсуждение ее стало более физичным, аргументы философские и натурфилософские начали уступать место соображениям физическим. В это время сформировалось два представления о природе света — континуальное (в XIX в. не вполне точно названное волновым) и корпускулярное. Оба имели достаточно сторонников.

Как видно из первых записных книжек Ньютона, он еще до того как приступил к систематическим исследованиям по оптике уже знал, какая из двух гипотез о природе света — истинная. Трудно определенно утверждать,

что привело Ньютона к выводу о правильности корпускулярной гипотезы. Видимо, путь его к такому выводу был следующим: от убежденности в атомистической структуре материи через уверенность в том, что природа всегда подобна себе самой, к корпускулярной гипотезе о природе света.

В подтверждение такого взгляда сошлемся на два высказывания молодого Ньютона. В записной книжке 1661—1665 гг. Ньютон не делает различия между частицами вещества и частицами света¹. В «Лекциях по оптике» он следующим образом описывает возникновение света: частицы материи быстро и беспорядочно движутся в источнике; некоторые из них (наиболее быстрые) с силой извергаются из него. Они-то и есть лучи света². А в «Оптике» он пишет: «Превращение тел в свет и света в тела соответствует ходу природы, которая как бы услаждается превращениями»³.

Если о мотивах, по которым Ньютон принял корпускулярную концепцию, можно высказать более или менее правдоподобные догадки, то об основаниях, на которых он строил доказательство правильности этой гипотезы впоследствии, мы находим многочисленные свидетельства в переписке Ньютона, в его сообщениях, представленных Королевскому обществу, в его книгах. Уже отмечалось⁴, что представление о корпускулярной природе света помогло Ньютону создать теорию цветов. До полемики 1672 г. с Гуком опыты по разложению и по смешению спектральных цветов служили Ньютону экспериментальным доказательством породившей его корпускулярной гипотезы. Последние опыты имели особое значение для подтверждения корпускулярности света. В «Новой теории...» Ньютон прямо сравнивает смешение разложенных призмой лучей разного цвета со смешением цветных порошков для подтверждения своего мнения о сохранении окраски в смеси лучей. Дискуссия 1672 г. заставила Ньютона отказаться от такого довода как основного, и тогда им становится старый аргумент всех корпускулярных гипотез — прямолинейность распространения света. Но основания этого аргумента Ньютон ищет и находит новые. Во-первых, призматические эксперименты показали, подчеркивает Ньютон в «Новой теории...», что после преломления лучи движутся по прямым, а не по кривым линиям. В «Гипотезе» Ньютон отмечает, что если бы свет представлял колебания эфира, «он должен бы всегда силь-

но расходиться по кривым линиям в темную или покоящуюся среду, нарушая все тени и направляясь по кривым порам, или проходам, как звук»⁵. Но о таком явлении — дифракции — Ньютон уже знал. В марте того же 1675 г. Гук выступает в Королевском обществе с сообщением о новом, как он считал, явлении — о рассеянии света вблизи края бритвы. Гук сравнивает его с рассеянием звука внутри покоящейся среды. Ньютон отвергает подобную аналогию; в данном случае, считает он, речь идет о новом роде преломления. Любопытно, что эта идея Гука довольно старая: в письме к лорду Браункерку (июнь 1672 г.) он описывает это явление как довод против утверждения о прямолинейности распространения света. Однако Гук ничего не смог противопоставить мнению Ньютона. Для Ньютона же несомненно, что загибание «происходит только при прохождении луча около тела и на очень малом расстоянии от него. Как только луч проходит мимо тела, он идет дальше по прямой»⁶.

Не только «корпускулярщик» Ньютон, но и один из творцов волновой теории света Х. Гюйгенс также был убежден в том, что принцип прямолинейности распространения света не имеет исключений.

Ньютон понимал, какие трудности представляет для теории прохождения света по прямым линиям через прозрачные твердые тела. В «Оптике» он объясняет это тем, что каждое тело состоит из отдельных частиц, те, в свою очередь, состоят из более мелких и так далее до бесконечности. Впрочем, «есть и другие пути для понимания исключительной пористости тел», замечает Ньютон⁷.

В латинском издании «Оптики» (1706 г.) у Ньютона появляется еще один аргумент против волновой концепции — явление, названное в XIX в. поляризацией света. Его впервые наблюдал Гюйгенс, рассматривая последовательное прохождение света через два кристалла исландского шпата. Уже Э. Бартолин (1625—1698) в 1669 г., изучая прохождение света через кристалл исландского шпата, нашел, что в общем случае из него выходят два световых луча; поведение одного из них определялось обычным законом преломления (луч обыкновенный), поведение второго характеризовалось рядом особенностей (луч необыкновенный). Гюйгенс установил, что каждый из лучей, выходящих из первого кристалла, вторым также разлагается на два. Но если плоскости их главных сечений (плоскости, проходящие перпендикулярно к пре-

ломляющей грани через биссектрису ее тупого угла, по определению Гюйгенса) взаимно параллельны или перпендикулярны, то из второго кристалла выходят только два луча. В первом случае луч, преломившийся обыкновенно в первом кристалле, преломляется обыкновенно и во втором; так же и необыкновенный. Во втором случае обыкновенный луч, выходящий из первого кристалла, преломляется во втором необыкновенно, и наоборот. Объяснить это явление Гюйгенс не смог: по-видимому, световые волны, пройдя первый кристалл, приобрели «некоторую фигуру или расположение». Вот и все. Ньютон подробно разобрал этот случай. Он писал: «... существует изначальное различие в лучах света, благодаря которому некоторые лучи в этом опыте постоянно преломляются обыкновенно, другие же — постоянно необыкновенно. Ибо если бы различие не было изначальным, но возникало от новых видоизменений, производимых в лучах при их первом преломлении, оно изменилось бы при новых модификациях во время трех следующих преломлений; между тем оно не изменяется, остается постоянным и производит то же действие на лучи при всех преломлениях. Поэтому необыкновенное преломление происходит благодаря изначальному свойству лучей. Остается исследовать, не имеют ли лучи и другие изначальные свойства, кроме уже открытых». И далее: «Не обладают ли лучи света различными сторонами и различными изначальными свойствами?»⁸.

Еще один довод против волновой гипотезы — если не существует эфира (так думал Ньютон, когда писал «Оптику»), нет и волн света, поскольку они могут распространяться только через подобную среду⁹. Ища и находя новые аргументы в подтверждение корпускулярной гипотезы, Ньютон столь же последовательно отвергал любые интерпретации явлений с точки зрения волновой доктрины. Так, он не принял правильное, хотя и формальное, объяснение двойного преломления Гюйгенсом, заменив его в «Оптике» своим (неверным). Число таких примеров можно умножить.

С доктриной о корпускулярной природе света у Ньютона неразрывно связано представление о путях механического обоснования оптики.

В предисловии к первому изданию «Начал» (1686 г.) Ньютон обрисовал грандиозную программу: «Мы же, рассуждая... о силах природы, будем главным образом за-

ниматься тем, что относится к тяжести, легкости, силе упругости, сопротивлению жидкости и к тому подобным притягательным и напирющим силам. Поэтому и сочинение это нами предлагается как математические основания физики. Вся трудность физики, как будет видно, состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления». И далее: «Было бы желательно вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления природы обуславливаются некоторыми силами, с которыми частицы тел вследствие причин, покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга»¹⁰. Эту программу он стремился выполнить, согласовывая основания оптики и механики. Эволюция его взглядов на эфир, на его роль в оптике тесно связана с тем, какую роль мог играть эфир в теории тяготения. Представление о механизме дисперсии, объяснение дифракции Ньютон также пытался свести к силовому взаимодействию частиц среды и частиц света.

Все это и позволило Ньютону построить здание оптики исходя из небольшого числа принципов, являющихся обобщением опыта. И хотя последнее утверждение нельзя принять без оговорок, в XVIII в. к оптике Ньютона относились как к науке, опирающейся на надежные и точные опыты. Именно эту сторону оптических исследований великого ученого высоко ценили в XIX в.

И в наше время оптика Ньютона, несмотря на то, что новая оптика мало похожа на ту науку, основы которой заложил Ньютон, сохраняет свое значение.

ПРИМЕЧАНИЯ

Введение

- ¹ То есть доказываемое им положение, будь то законы механики или задачи, или теоремы.
 - ² *Крылов А. Н.* Ньютон и его значение в мировой науке.— В кн.: Исаак Ньютон. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1943, с. 27.
 - ³ *Фонтенель Б.* (1657—1757) — непреременный секретарь Парижской академии наук с 1699 по 1741 г. В его обязанность входило произносить похвальные речи о вновь избранных членах академии, а также об умерших академиках.
 - ⁴ *Thomson J. J.* Newton's work in physics.— *Nature*, 1927, March 26, Supplement, p. 36—37.
 - ⁵ К вопросу о точности опытов Ньютона мы еще вернемся (см. гл. 4—8).
 - ⁶ *The Correspondence of Isaac Newton.* Cambridge: Univ. Press, v. 1—6. Первые три тома подготовлены к печати Г. Тернбаллом, тома 4—6 — А. Р. Холлом и Л. Тиллинг. Далее цит.: *Correspondence* с указанием тома и страницы. *The Mathematical papers of Isaac Newton.* Cambridge, University Press, v. 1—6. Подготовлены к печати Д. Вайтсайдом. Оптические рукописи опубликованы в 1-м и 3-м томах.
- ца между григорианским (новым) и юлианским (старым) календарем составляла 10 дней. Следует иметь в виду также, что новый год в Англии во времена Ньютона начинался 25 марта и только в 1752 г. в Англии перешли на новый стиль, а начало года перенесли на 1 января. Во избежание путаницы мы будем придерживаться при указании года современной традиции — считать, что и во времена Ньютона первый день года — 1 января.
- ² Люкасианская кафедра математики была организована в 1663 г. на средства Генри Люкаса. Первым профессором кафедры был выдающийся математик, теолог, знаток древних языков Исаак Барроу (1630—1677), который в 1669 г. передал ее Ньютону. Люкасианский профессор должен был читать лекции по одной из математических дисциплин; кроме того, ему вменялось в обязанность по окончании курса представлять в библиотеку экземпляр прочитанных лекций.
 - ³ Вполне точно это можно утверждать относительно работ по оптике. С некоторыми математическими результатами Ньютона уже познакомилось, правда, ограниченное число лиц благодаря Барроу и Дж. Коллинсу, с последним Ньютон состоял в переписке, возникшей опять-таки при содействии Барроу.

Глава 1

- ¹ Все даты приводятся по старому стилю. В XVII в. разли-

⁴ Журнал Королевского общества «Philosophical Transactions» («Философские труды») начал выходить с 1664 г., французский «Journal des Savants» («Журнал ученых») — с 1665 г., лейпцигские «Acta Eruditorum» («Ученые записки») — с 1682 г.

⁵ Например, переписка Гюйгенса занимает половину томов полного собрания его сочинений; Лейбниц написал около 15 000 писем.

⁶ Приглашение Ньютона в Моветный двор было связано с денежной реформой, проведенной в Англии в конце XVII в. Подробнее об этом см., например: *Вавилов С. И.* Исаак Ньютон. М.: Изд-во АН СССР, 1961, гл. 14.

⁷ В конце XVII в. после реформы Парижской академии наук было принято положение о выборах в академию иностранных членов, часть из которых назначалась королем Франции, а часть избиралась французскими академиками. В январе — феврале 1699 г. были названы первые восемь иностранных членов: Г. В. Лейбниц (1646—1716), Э. В. Чирнгауз (1651—1708), Д. Гульельмини (1655—1710), Н. Хартзекер (1656—1725), Я. Бернулли (1654—1705), О. Рёмер (1644—1710), И. Ньютон, И. Бернулли (1667—1748).

⁸ Многие из тех вопросов, которые мы считаем относящимися к механике, в XVII в. составляли предмет физики. И если оставаться в рамках понятий того столетия, то Ньютон — математик, физик, но не механик.

⁹ Речь идет не о философии, а о натуральной философии, т. е. о физике.

¹⁰ Correspondence, v. 6, p. 462. Свидетельства Ньютона вполне надежны. Они не раз про-

верялись в последние десятилетия, когда объектом изучения историков науки стали не рассматривавшиеся прежде записные книжки, черновые наброски Ньютона.

¹¹ *Стройк Д. Я.* Краткий очерк истории математики. М.: Наука, 1969, с. 5.

Глава 2

¹ Цит. по кн.: *Lindberg D. C.* Introduction.— In: John Peckham and the science of optics. *Perspectiva communis. Madison etc.*, 1970, p. 19.

² Там же.

³ Там же, с. 57.

⁴ Вся научная литература средневековья написана по-латыни.

⁵ В последние десятилетия факт издания книги Мавролика в Венеции в 1575 г. подвергается сомнению и потому, что до нас не дошел ни один экземпляр этого издания, и потому, что сочинение Мавролика оставалось неизвестным до 1611 г.

⁶ *Maurollyco F.* The Photismi de lumine / Transl. by H. Grew. New York, 1940, p. 119.

⁷ Там же, с. 123.

⁸ Подробнее о развитии этого раздела средневековой оптики см.: *Lindberg D. C.* Theories of vision from al-Kindi to Kepler. Chicago; London, 1976.

⁹ Неоднократно высказывались сомнения, действительно ли Птолемей получил из опыта все сообщаемые им результаты.

¹⁰ См.: *Lindberg D. C.* The cause of refraction in medieval optics.— *Brit. J. for History Sc.*, 1968, 4, part 1, p. 23—38.

¹¹ См., например: *Lohne J. Thomas Harriott.*— *Centaurus*, 1959, 6, p. 113—121.

¹² См.: *Декарт Р.* Рассуждение о методе с приложениями

- Диоптрика, Метеоры, Геометрия. Л.: Изд-во АН СССР, 1953, с. 79—80. Далее цит. как «Диоптрика» или «Метеоры» с указанием страницы.
- ¹³ *Погребынский И. Б.* Становление классической механики.— В кн.: История механики с древнейших времен до конца XVIII в. М.: Наука, 1971, с. 93.
- ¹⁴ *Декарт Р.* Диоптрика, с. 81—82.
- ¹⁵ Там же, с. 84.
- ¹⁶ Цит. по кн.: *Sabra A. I.* Theories of light from Descartes to Newton. London, 1967, p. 105.
- ¹⁷ См.: *Декарт Р.* Диоптрика, с. 85.
- ¹⁸ Современный способ измерения синусов был введен Л. Эйлером в XVIII в.
- ¹⁹ Подробнее об этом см., например, в кн.: *Копелевич Ю. X.* Возникновение научных академий. Середина XVII—середина XVIII в. Л.: Наука, 1974.
- ²⁰ *Birch Th.* A history of Royal Society. London, 1756. V. 1.
- ²¹ *Аристотель.* О душе.— В кн.: Аристотель. Соч. в 4-х т. М.: Мысль, 1975, т. 1, с. 409.
- ²² В XVII в. это отношение называли просто преломлением.
- ²³ См.: *Sabra A. I.* Theories of light from Descartes to Newton. London, 1967, p. 113.
- ²⁴ См.: История математики / Под ред. А. П. Юшкевича. М.: Наука, 1970, т. 2, с. 196—197.
- ²⁵ *Сабра А.* Указ. соч., с. 148.
- ²⁶ Впервые с содержанием «Трактата о свете» познакомились в 1678 г. члены Парижской академии. Издана книга была в 1690 г.
- ²⁷ Изложение работ Гоббса и Меньяна дается по статье американского историка физики А. Шапиро. См.: *Shapiro A. E.* Kinematic optics: A study of the wave theory of light in the seventeenth century.— Archive for History of Science, 1973, 11, p. 134—266.
- ²⁸ Цит. по ст. Шапиро (см. примеч. 27, с. 158).
- ²⁹ Здесь мы следуем за А. Шапиро (см. примеч. 27).
- ³⁰ Цит. по кн.: *Розенбергер Ф.* История физики. М.; Л.: ОНТИ, 1937, ч. 2, с. 117.
- ³¹ *Декарт Р.* Метеоры, с. 277. Последнее утверждение Декарта, разумеется, небезупречно, а с точки зрения истории данного вопроса и неверно. Р. Бэкон, например, определил из наблюдений угол для первой радуги в 42°. В XVI в. И. Флейшер также экспериментально пришел к тому же результату.
- ³² Т. Хариот около 1605 г. измерил показатели преломления нескольких жидкостей для двух цветов — красного и зеленого. Как он пришел к своим результатам и как он их интерпретировал — неизвестно: сохранились лишь расчеты Хариота (см.: *Lohne J.* Op. cit.; *Idem.* The fair fame of Thomas Harriott.— Centaurus, 1963, 8, p. 69—84). Это открытие английского ученого привлекло к себе внимание только в XX в. В XVII в. Хариот был известен в основном своими математическими работами, частично опубликованными еще при его жизни. О некоторых результатах в оптике он сообщал в переписке (например, с Кеплером), но об открытии дисперсии почему-то умолчал.
- ³³ *Декарт Р.* Рассуждение о методе, с. 268—269.
- ³⁴ Там же, с. 271.
- ³⁵ От латинизированной фамилии Декарта — Картезий.
- ³⁶ Конечно, этот процесс захватил все области естествознания, а не только оптику.
- ³⁷ В «Речи о начале и приращении оптики...» (1763) известного русского астронома

академпка С. Я. Румовского (1734—1812) мы встречаем термин «физическая оптика» в современном значении без всяких пояснений. По-видимому, он был если не общепринятым, то, во всяком случае, уже достаточно распространенным в то время среди русских ученых. В западно-европейской научной литературе им начинают широко пользоваться в XIX в. (начиная с Т. Юнга).

³⁸ См. примеч. 32.

³⁹ Книга названа по имени дочери Тавманта Ириды, богини радуги.

⁴⁰ *Hooke R. Micrographia. New York, 1961, p. 54.*

⁴¹ На это указал впервые А. Шапиро (см. примеч. 27).

⁴² *Гук Р. Указ. соч., с. 58.*

⁴³ Цит. по кн.: *Hall M. B. Robert Boyle on natural philosophy. Bloomington, 1965, p. 260.*

⁴⁴ Там же, с. 255—256.

Глава 3

¹ Первые астрономические наблюдения с помощью зрительной трубы были выполнены учеником Т. Харриота Лоуэлом в 1609 г., т. е. до Галилея. Но сообщение о них не было опубликовано.

² Звезды по яркости распределены по разрядам, наиболее яркие — звезды первой величины, затем — звезды второй величины и т. д. Первый звездный каталог составил Гиппарх (II в. до н. э.).

³ *Галилей Г. Избранные труды. М.: Наука, 1964, т. 1, с. 36.*

⁴ Это утверждение Грегори сейчас звучит странно — известно, что рефлекторы превосходят по светосиле рефракторы; в чем рефлекторы действительно уступают последним, так это в том, что у них меньше поле зрения. Но для

своего времени Грегори совершенно прав. Сошлемся на Ньютона: «...предметы в моем инструменте казались более темными, чем в стекле, частью потому, что при отражении от металла терялось больше света (из-за плохого качества зеркал.— *Е. П.*), чем при преломлении в стекле, частью же от того, что мой инструмент слишком сильно увеличивал» (см.: *Ньютон И. Оптика. М.: ГИИТЛ, 1954, с. 81.*)

⁵ См.: *Hall A. R. Sir Isaac Newton's note-book, 1661—1665.— Cambridge Historical J., 1948, 9, p. 242.*

⁶ Подробнее об этом см. на с. 50—52, 58.

⁷ Об этом см. письмо Ньютона Ольденбургу от 4 мая 1672 г.— *Correspondence, v. 1, p. 153.*

⁸ *Correspondence, v. 1, p. 3—4.*

⁹ Там же, с. 73.

¹⁰ Там же, т. 3, с. 355.

¹¹ *Ньютон И. Оптика, с. 83.*

¹² Этот мемуар напечатан в том же году в журнале «Philosophical Transactions». См. рус. пер. С. И. Вавилова: *Ньютон И. Новая теория света и цветов.— УФН, 1927, 7, с. 124—134.* Все цитаты далее даны по этому переводу. Далее: Новая теория..., с указанием страницы.

¹³ Там же, с. 127.

¹⁴ Подробнее об этом см. в гл. 4, с. 84 и сл.

¹⁵ *Ньютон И. Новая теория..., с. 129.*

¹⁶ *Correspondence, v. 1, p. 172—173.*

Глава 4

¹ *Герге И. В. Избранные сочинения по естествознанию. Л.: Изд-во АН СССР, 1957, с. 393.*

² Об этом говорил Ньютон (см.: *Correspondence, v. 6, p. 462.*) К такому же мнению пришел

- из анализа записных книжек Ньютона А. Р. Холл.
- ³ Вавилов С. И. «Лекции по оптике» И. Ньютона.— В кн.: Вавилов С. И. Исаак Ньютон. М.: Изд-во АН СССР, 1961, с. 288.
 - ⁴ Ньютон И. Новая теория..., с. 129—130.
 - ⁵ Hall A. R. Sir Isaac Newton's Note-book 1661—1665.— Cambridge Historical J., 1948, 9, p. 239—250.
 - ⁶ В хронологии этих опытов мы следуем за А. Р. Холлом (см. примеч. 5).
 - ⁷ Холл А. Р. Указ. соч., с. 247, 248.
 - ⁸ Hall A. R. Further optical experiments of Isaac Newton.— Annals of sci., 1955, 11, p. 27—43.
 - ⁹ Ньютон И. Новая теория..., с. 124.
 - ¹⁰ А. Р. Холл считает, что это было в середине 1665 г., а не в 1666 г., как пишет Ньютон. См.: Холл А. Р. Указ. соч., с. 36.
 - ¹¹ Westfall R. S. The development of Newton's theory of color.— Isis, 1962, 53, p. 351.
 - ¹² Декарт Р. Рассуждение о методе..., с. 273—274.
 - ¹³ Ньютон И. Лекции по оптике. Л.: Изд-во АН СССР, 1964, с. 166.
 - ¹⁴ Там же, с. 168.
 - ¹⁵ Рис. 16 воспроизводит чертеж из записной книжки Ньютона Add. 3975.
 - ¹⁶ Впервые схема помещена не в «Новой теории...», а позднее, в ответе Ньютона Парди, который также был опубликован в 1672 г. в «Философских трудах». Термин *experimentum crucis* заимствован Ньютоном из «Микрографии» Гукка, а последний ссылается на «Новый Органон» Ф. Бэкона. Однако у Бэкона использован термин *instantia crucis*. Гукк, по памяти цитируя Бэкона, ошибочно воспроизвел его как *experimentum crucis*. См.: Correspondence, v. 1, p. 104, p. 10.
 - ¹⁷ Ньютон И. Новая теория..., с. 127.
 - ¹⁸ Рис. 19 и 18 взяты из факсимильного издания рукописного текста первого варианта «Лекций по оптике». См.: The Unpublished First Version of Isaac Newton's Cambridge Lectures on Optics 1670—1672. Cambridge, 1973, p. 26, 27.
 - ¹⁹ Розенбергер Ф. История физики. М.; Л.: ОНТИ, 1937, ч. 2, с. 136.
 - ²⁰ Correspondence, v. 1, p. 318.
 - ²¹ Там же, с. 409.
 - ²² См., например, мнение, сообщаемое о нем Ольденбургом Ньютоному: Correspondence, v. 1, p. 135.
 - ²³ Correspondence, v. 1, p. 134.
 - ²⁴ Часто цитируют слова Гюйгенса из предисловия, написанного в 1690 г. к его «Трактату о свете», что в учении о цветах «никто до сих пор не может похвастаться успехом».
 - ²⁵ Marriott E. Oeuvres. La Haye, 1740, v. 1, p. 228.
 - ²⁶ Ньютон И. Оптика, или Трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. 2-е изд. М.: ГИТТЛ, 1954, с. 58.
 - ²⁷ Об этом см., например, в кн.: Погребысский И. Б. Готфрид Вильгельм Лейбниц. М.: Наука, 1971, гл. VIII, X.
 - ²⁸ Оба сообщения опубликованы в 1716 и 1722 гг., а также перепечатаны в: Phil. Trans. abridg., 1809, v. 6 (1713—1723), p. 229—241, 607—608.
 - ²⁹ Ньютон И. Лекции по оптике, с. 61.
 - ³⁰ Там же, с. 209.
 - ³¹ Там же, с. 208.
 - ³² Ньютон И. Новая теория..., с. 133.
 - ³³ Correspondence, v. 1, p. 169.
 - ³⁴ Там же, с. 111.

- ³⁵ Там же, с. 112.
- ³⁶ *Hooke R.* Micrographia, p. 74
- ³⁷ *Ньютон И.* Новая теория..., с. 132.
- ³⁸ Correspondence, v. 1, p. 114.
- ³⁹ *Birch Th.* A history of Royal Society, v. 3, p. 193.
- ⁴⁰ *Hooke R.* The diary, 1672—1680. London, 1935, p. 211.
- ⁴¹ Там же.
- ⁴² Цит. по ст.: *Соколов Ф. Ф.* Природа белого света.— В кн.: Новые идеи в физике. СПб., 1912, сб. 5, с. 31—32.
- ⁴³ Correspondence, v. 1, p. 236.
- ⁴⁴ Там же.
- ⁴⁵ *Ньютон И.* Лекции по оптике, с. 145—146.
- ⁴⁶ Correspondence, v. 1, p. 96—97.
- ⁴⁷ Там же, с. 187—188.
- ⁴⁸ *Вавилов С. И.* Принципы и гипотезы оптики Ньютона.— УФН, 1927, 7, с. 90—93.
- ⁴⁹ *Вавилов С. И.* Примечания.— В кн.: Ньютон И. Лекции по оптике, с. 282—283.
- ⁵⁰ *Ньютон И.* Лекции по оптике, с. 215—216.
- ⁵¹ *Хаустен Р.* Свет и цвета. М.; Л.: Госиздат, 1933, с. 9.
- ⁵² *Ньютон И.* Лекции по оптике, с. 216.
- ⁵³ *Ньютон И.* Одна гипотеза, объясняющая свойства света, изложенные в нескольких моих статьях (первая часть).— УФН, 1927, 7, с. 135—158. Далее цит. как «Гипотеза» с указанием страницы.
- ⁵⁴ *Ньютон И.* Оптика, с. 116—119.
- ⁵⁵ *Ньютон И.* Лекции по оптике, с. 146.
- ⁵⁶ *Слюсарев Г. Г.* «Диоптрика» Эйлера.— В кн.: Леонард Эйлер. М.: Изд-во АН СССР, 1958, с. 414—420.
- ⁵⁷ *Gouy L.* Sur le mouvement lumineux.— J. Physique, 1886, t. 5, p. 362.
- ⁵⁸ *Спаский В. И., Погребысская Е. И.* К истории вопроса о белом свете (1-я половина XX в.).— История и методология естественных наук, М.:

Изд-во МГУ, 1970, вып. 8, с. 219—239.

Глава 5

- 1 *Boyle R.* Experiment and Consideration touching colours. London, 1664.
- 2 *Hooke R.* Micrographia. New York, 1961, p. 47—79.
- 3 *Ньютон И.* Оптика, с. 159.
- 4 *Hall A. R.* Sir Isaac Newton's note-book 1661—1665.— Cambr. Hist. J., 1948, 9, p. 239—250; Further optical experiments of Isaac Newton.— Ann. of Sci., 1955, 11, p. 27—43.
- 5 *Westfall R.* Isaac Newton's coloured circles twixt two contiguous glasses.— Arch. Hist. Ex. Sci., 1965, 2, p. 181—196.
- 6 *Newton I.* Papers and letters on natural philosophy. Ed. by I. Bernard Cohen. London, 1958, p. 202—208.
- 7 *Вестфаль Р.* Указ. соч., с. 196.
- 8 Там же, с. 191—192.
- 9 *Newton I.* Papers and letters, p. 208.
- 10 *Ньютон И.* Гипотеза, с. 149.
- 11 *Newton I.* Papers and letters, p. 224.
- 12 *Biot J. B.* Traité de physique expérimental et mathématique. Paris, 1816, v. 4, p. 342—360.
- 13 *Birch Th.* A history of Royal Society, v. 3, p. 295.

Глава 6

- 1 *Ньютон И.* Оптика, с. 199.
- 2 *Lorenz L.* Über die Reflexion des Lichtes an der Grenzfläche zweier Isotropen durchsichtigen Mittel.— Ann. d. Phys., 1860, 3, S. 460—473.
- 3 *Hooke R.* Micrographia. p. 67—77.
- 4 *Brisson M.* Traité élémentaire ou principes de physique. Paris, 1800, v. 2, p. 451.
- 5 *Libes A.* Traité élémentaire de physique. Paris, 1801, v. 3, p. 218.

- ⁶ *Delaval E.* An experimental inquiry into the cause of the permanent colours of opaque bodies. Warrington, 1785.
- ⁷ *Euler L.* Essai d'une explication physique des couleurs engendrés sur des surfaces extrêmement minces (1752).— In: *Euler L. Opera omnia.* Ser. 3, 1962, v. 5, p. 156—171.
- ⁸ *Pouillet C.* Leçons de physique de la faculté des sciences de Paris. Paris, 1828.

Глава 7

- ¹ Correspondence, v. 3, p. 317.
- ² Там же, с. 338.
- ³ *Huygens Ch.* Oeuvres complètes, La Haye, 1901, v. 9, p. 471.
- ⁴ *Ньютон И.* Оптика, с. 225.
- ⁵ Там же, с. 240.
- ⁶ Там же, с. 241.
- ⁷ Там же, с. 242.
- ⁸ Там же, с. 243.
- ⁹ Там же, с. 245.
- ¹⁰ *Френель О.* Избранные труды по оптике. М.: Гостехиздат, 1955, с. 109.
- ¹¹ *Provostaye de la, Desains P.* Mémoire sur les anneaux colorés de Newton.— *Ann. d. Chimie* (3), 1849, 27, p. 423—439.
- ¹² *Ньютон И.* Оптика, с. 216.
- ¹³ Там же, с. 227.
- ¹⁴ *Biot J. B.* Traité de physique expérimental et mathématique. Paris, 1816, v. 4, p. 162—167.
- ¹⁵ *Ньютон И.* Оптика, с. 231.
- ¹⁶ Там же, с. 214.
- ¹⁷ *Био Ж. Б.* Указ. соч., с. 229—246.
- ¹⁸ *Ньютон И.* Оптика, с. 238.

Глава 8

- ¹ *Grimaldi F.* Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride. Bononiae, 1665, p. 1.
- ² Там же, с. 4.
- ³ *Oldenburg H.*— *Phil. Trans. abridged*, 1809, v.1, p. 676.
- ⁴ *Ньютон И.* Гипотеза, с. 158, 161.
- ⁵ *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии, с. 284.
- ⁶ *Ньютон И.* Оптика, с. 257.
- ⁷ Там же.
- ⁸ *Lord Keynes.* Newton, the man.— In: Newton tercentenary celebration. Royal Society, London, 1946, p. 29.
- ⁹ *Ньютон И.* Оптика, с. 255.
- ¹⁰ Correspondence, v. 3, p. 338.
- ¹¹ Correspondence, v. 4, p. 130.
- ¹² *Ньютон И.* Оптика, с. 249.
- ¹³ *Lloyd H.* Report on the progress and present state of physical optics.— In: Report of 4th meeting British Assoc. Advanced Science. London, 1834, p. 333—335.
- ¹⁴ *Ньютон И.* Оптика, с. 257.
- ¹⁵ *Ньютон И.* Оптика, с. 285.

Заключение

- ¹ См.: гл. 4, с. 55—56.
- ² *Ньютон И.* Лекции по оптике, с. 116.
- ³ *Ньютон И.* Оптика, с. 284.
- ⁴ См.: гл. 4, с. 56, 57, 61.
- ⁵ *Ньютон И.* Гипотеза, с. 143.
- ⁶ *Ньютон И.* Оптика, с. 275.
- ⁷ Там же, с. 204.
- ⁸ Там же, с. 271—272.
- ⁹ Там же, с. 279.
- ¹⁰ *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии, с. 3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1	
Биография Ньютона	6
Глава 2	
Предньютоновская оптика	10
Глава 3	
Отражательный телескоп Ньютона	41
Глава 4	
Проблема спектрального разложения света	52
Глава 5	
Цвета тонких пластин	89
Глава 6	
Окраска тел	99
Глава 7	
Цвета толстых пластин	104
Глава 8	
Дифракция света	114
Заключение	123
Примечания	128

Елена Иосифовна Погребысская
ОПТИКА НЬЮТОНА

Утверждено к печати Редакцией серии
научно-популярных изданий Академии наук СССР

Редактор издательства **Е. М. Кляус**. Художник **В. П. Хлебников**.
Художественный редактор **Н. А. Фильчагина**. Технический
редактор **Т. Д. Панасюк**. Корректоры **М. В. Борткова**,
В. А. Шварцер

ИБ № 15315

Сдано в набор 09.10.80. Подписано к печати 24.12.80. Т-20747.
Формат 84×108^{1/32}. Бумага типографская № 2. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 7,1. Уч.-изд. л. 7,5.
Тираж 33 500 экз. Тип. зак. 3556. Цена 45 коп.

Издательство «Наука» 117864 ГСП-7, Москва, В-485,
Профсоюзная ул., 90

2-я типография издательства «Наука», 121099, Москва, Г-99,
Шубинский пер., 10



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«НАУКА»
ВЫШЛА
ИЗ ПЕЧАТИ
КНИГА:**

ПОЛИЩУК Е. М.

Эмиль Борель (1871—1956). 9 л.
60 к.

Книга посвящена жизни и деятельности французского математика Эмиля Бореля — основоположника ряда направлений современного математического анализа. Подробно рассказано о яркой жизни Бореля, о ставших классическими его открытиях в теории аналитических функций, теории расходящихся рядов, теории меры и интеграла, о работах Бореля по теории вероятностей и ее приложениям, о его основополагающем вкладе в теорию стратегических игр. Большое внимание уделено организаторской, литературной и политической деятельности Бореля, дискуссиям, которые он вел со своими современниками — философами, биологами, математиками.

Книга рассчитана на читателей, интересующихся историей математики и естествознания.

Книги можно заказать в ближайшем магазине «Академкнига», имеющем отдел «Книга — почтой».

480091 **Алма-Ата**, ул. Фурманова, 91/97 («Книга — почтой»); 370005 **Баку**, ул. Джапаридзе, 13; 320005 **Днепропетровск**, проспект Гагарина, 24 («Книга — почтой»); 734001 **Душанбе**, проспект Ленина, 95 («Книга — почтой»); 335009 **Ереван**, ул. Туманяна, 31; 664033 **Иркутск**, ул. Лермонтова, 289; 252030 **Киев**, ул. Ленина, 42; 252030 **Киев**, ул. Пирогова, 2; 252142 **Киев**, проспект Вернадского, 79; 252030 **Киев**, ул. Пирогова, 4 («Книга — почтой»); 277001 **Кишинев**, ул. Пирогова, 28 («Книга — почтой»); 343900 **Краматорск** Донецкой обл., ул. Марата, 1; 660049 **Красноярск**, проспект Мира, 84; 443002 **Куйбышев**, проспект Ленина, 2 («Книга — почтой»); 192104 **Ленинград**, Д-120, Литейный проспект, 57; 199164 **Ленинград**, Таможенный пер., 2; 196034 **Ленинград**, В/О, 9 линия, 16; 220012 **Минск**, Ленинский проспект, 72 («Книга — почтой»); 103009 **Москва**, ул. Горького, 8; 117312 **Москва**, ул. Вавилова, 55/7; 630076 **Новосибирск**, Красный проспект, 51; 630090 **Новосибирск**, Академгородок, Морской проспект, 22 («Книга — почтой»); 142292 **Пушино** Московской обл., МР «В», 1; 620151 **Свердловск**, ул. Малина-Сибиряка, 137 («Книга — почтой»); 700029 **Ташкент**, ул. Ленина, 73; 700100 **Ташкент**, ул. Шота Руставели, 43; 700187 **Ташкент**, ул. Дружбы народов, 6 («Книга — почтой»); 634050 **Томск**, наб. реки Ушайки, 18; 450059 **Уфа**, ул. Р. Зорге, 10 («Книга — почтой»); 450025 **Уфа**, ул. Коммунистическая, 49.