

SIR ISAAC NEWTON.

*From the original Picture by Vanderbank  
in the possession of the Royal Society*

# УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИФР  
110

ОТ РЕДАКЦИИ.



**Д**ВАДЦАТОГО марта ст. ст. 1727 г. умер **Исаак Ньютон**. Его памяти посвящается эта книга „Успехов Физических Наук“.

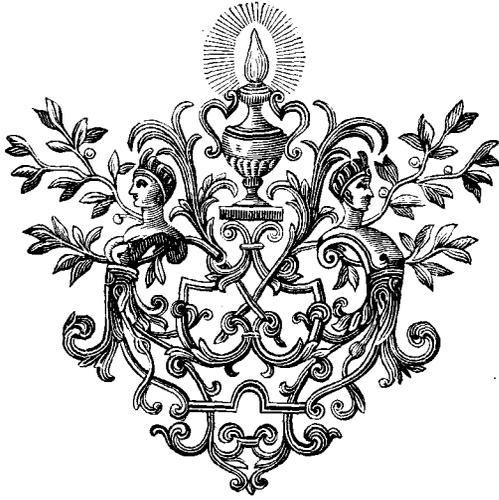
Велики и многочисленны заслуги Ньютона в различных областях точных наук. Но, среди всех открытий его, важнейшие идут по двум направлениям: для одного из них символом могут служить „Математические Начала Натуральной Философии“; другое нашло себе наиболее полное и яркое выражение в „Оптике“. Судьба, которая постигла оба эти направления творчества Ньютона, оказались, однако, различной.

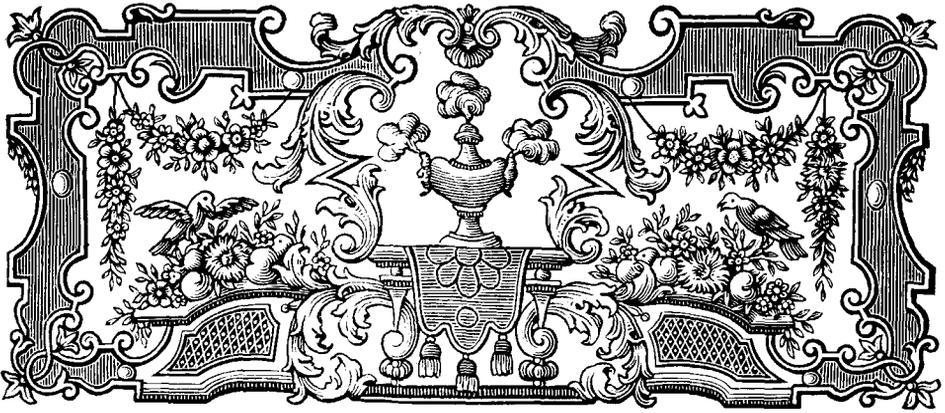
Духом „Начал Натуральной Философии“ проникнута история физики за все два века, протекавшие со дня смерти Ньютона. На мыслях, представлениях и методах этой книги выросла современная теоретическая физика. „Начала“ никогда не подвергались забвению. Плохой была судьба оптических воззрений Ньютона. Победа волновой теории заставила забыть не только корпускулярную гипотезу, но вместе с нею и многое другое в „Оптике“ Ньютона.

В наши дни, когда вопрос о природе света вновь приобрел остроту, не меньшую той, какую он имел в XVII и XVIII столетиях, поучительно вспомнить оптические воззрения Ньютона. На наших глазах волновая теория оказалась бессильной дать удовлетворительное объяснение целому ряду экспериментальных фактов, и в новой форме оживают корпускулы, а в самые последние дни выступают на сцену теории, предлагающие синтез волн с корпускулами. „Оптика“

Ньютона перестает казаться столь архаичной, какой она представлялась совсем недавно; она вновь приобретает живой и действенный интерес.

Располагая ограниченным местом, редакция сошла правильным посвятить большую часть настоящего выпуска именно оптическим работам Ньютона и их связи с проблемами современной физики. Наряду со статьями, посвященными этим вопросам, мы печатаем здесь два оригинальных мемуара Ньютона, освещающие его теоретические воззрения и его главнейшие экспериментальные открытия в области оптики.





## НАЧАЛА МЕХАНИКИ НЬЮТОНА И ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.

*В. К. Фредерикс, Ленинград.*

Всем известно, что старая и постоянная мечта физиков состоит в том, чтобы сделать из физики науку, изложение которой было бы подобно изложению геометрии: сначала ряд основных, точно и ясно сформулированных определений, затем ряд аксиом, независимость которых друг от друга должна быть строго доказана, и затем, наконец, ряд теорем, приводящих к положениям, согласным с опытом и предвидящим новые, еще неизвестные явления. Может ли такая мечта сбыться, возможна ли „аксиоматика“ физики? — Вот вопрос, на который, думается нам, в настоящее время представители разных течений в физике дадут весьма разные ответы.

Правда, отдельные главы физики всегда стараются изложить в форме, которая как можно ближе подходит к геометрической форме изложения. Так например, в классической термодинамике исходными положениями служат закон энергии и закон энтропии: из них вытекают все остальные выводы и заключения. Но при этом термодинамика пользуется не только теми физическими понятиями, которые, как температура или количество тепла, в ней же определяются и поясняются, но заимствует из всех отделов физики и другие физические понятия и соотношения. Уже одно это обстоятельство может сделать сомнительной аксиоматическую строгость ее изложения. Но главные трудности, как нам кажется, заключаются в следующем: во-первых, требуется, чтобы основные определения физических понятий не заключали в себе внутренних и взаимных противоречий; во-вторых, необходимо строгое доказательство независимости принятых аксиом; в-третьих, нужно, чтобы автор незаметно для себя и для читателя не пользовался новыми скрытыми определениями и аксиомами.

Совершенно очевидно, что в физике удовлетворить этим условиям особенно трудно. Основные определения, вводимые в науку, не могут не зависеть от общего уровня знаний, а этот уровень в различные эпохи весьма различен. Точный смысл употребляемых в физике терминов находится в зависимости от многих случайных обстоятельств, оговорить которые полностью бывает иногда вовсе не легко. Достаточно вспомнить, например, многочисленные споры, посвященные в более старое время вопросу об определении массы или количества материи, а в более новое время — разным парадоксам, касающимся времени и пространства в специальном принципе относительности. Сколько остроумия и изощренности ума потребовалось для решения этих вопросов и сколько при всем том тщетных стараний сделать свои рассуждения вполне строгими! Понятие о массе и об энергии до появления специального принципа относительности — два самостоятельных понятия, после — связанные между собой. О всех тех трудностях, которые прибавляют к этому вопросу кванты, не стоит и говорить. Мы отметим только, что в современной физике новые и неожиданные надежды — не больше! — на успех в этом направлении принес с собой общий принцип относительности Эйнштейна. Исторически же первой попыткой был знаменитый труд Ньютона „*Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*“<sup>1)</sup>. Он изложен в том же стиле и духе, в котором Эвклид излагает свою геометрию.

Нам хотелось бы в настоящей статье сделать несколько сравнений между этой первой и, скажем, последней попыткой Эйнштейна установить начала физики, т.-е. обосновать механику.

Общий принцип относительности принято противопоставлять классической механике Ньютона. Кто прав, Ньютон или Эйнштейн? Вот вопрос, который часто приходится слышать. Нам кажется, что дать на него ответ в столь же категорической форме было бы не совсем правильно. Несомненно, что аксиоматичность изложения Ньютона по указанным выше соображениям не может быть признана строгой. Теория относительности, хотя и дала надежду на возможность аксиоматики в физике, но все же — пока что — такого изложения для нее не существует. Если бы аксиоматика обеих теорий имела налицо, то сравнивать их между собой было бы просто. Сравним для примера геометрию Лобачевского с геометрией Евклида. Мы имеем для той и другой один и тот же ряд определений и аксиом, кроме одной, утверждающей у Евклида невозможность пересечения двух параллельных прямых и утверждающей как раз обратное у Лобачевского. В результате — две разные геометрии. Если бы их можно

<sup>1)</sup> На русском языке: „Математические начала натуральной философии“. 2 тома. Перевод А. Н. Крылова. Изд. Морской Академии. Петербург. 1915 г. Все последующие ссылки на страницы и цитаты относятся к этому изданию.

было проверить на опыте, то можно было бы также высказать категорическое суждение о верности одной и неверности другой. Но в теории Ньютона и Эйнштейна нет аксиоматики и поэтому невозможно столь же упрощенное суждение об их правильности. Приходится сопоставлять друг с другом положения, содержание которых охватывает иногда не совсем одну и ту же группу понятий и вещей; нельзя быть уверенным, что противоречивые утверждения непременно и полностью должны исключать друг друга.

Можно заметить еще следующее: читая введение и поучение Ньютона в I томе „Начал Натуральной Философии“, трудно не думать, что мысль его идет совершенно тем же путем, как у Эйнштейна. Уровень математических и физических знаний теперь не тот, что во времена Ньютона. Если логический ход мысли, идущий тем же путем, по которому шел Ньютон, приводит поэтому теперь к иному результату, то что надо считать истинным содержанием его теории: указанный им путь или результат, к которому он пришел? Формальное преимущество за последним. Первое включает в себе опасность произвольного толкования намерений Ньютона, соединенного с невозможностью отрешиться от субъективно-современных взглядов на вещи. Тем не менее нам кажется, что по существу оно справедливее.

Формального сопоставления формул Ньютона и Эйнштейна мы делать не будем. О выводах принципа относительности и о различии между ними и классической механикой так много говорилось и писалось, что новое повторение того же самого не может представлять интереса. Мы ограничимся сравнением основных понятий: 1) пространства и времени и 2) массы и силы. Сравнение будет далеко не полным и не исчерпывающим всех сторон вопроса, так как такое сравнение мог бы дать только специальный труд историка-физика.

## 1. Пространство и время.

Ньютоновское определение абсолютного пространства и абсолютного времени общеизвестно, и мы не считаем нужным повторять его здесь. Абсолютное, непрерывно текущее время имеет одно измерение, непрерывное пространство — три. Геометрия Евклида описывает его свойства. Пространство и время независимы друг от друга. Во введении к первому изданию своей книги и, главным образом, в поучении к главе об аксиомах или законах движения Ньютон поясняет свои определения. Эти пояснения нам кажутся весьма интересными, и мы приведем некоторые из них. По Ньютону, следует отличать место, занимаемое телом, от самого тела. „Место есть часть пространства, занимаемая телом“ (стр. 30). Вопрос о том, как практически отделить „место“ от тела очень труден. Мы читаем (стр. 32): „Однако совершенно невоз-

можно ни видеть, ни как-нибудь иначе различить при помощи наших чувств отдельные части этого пространства одну от другой, и вместо них приходится обращаться к измерениям, доступным чувствам“... Может оказаться, что в действительности не существует покоящегося тела, к которому можно относить места и движения прочих. „Из рассмотрения вопроса вытекает необходимость различать движения относительные и абсолютные. Один из выводов (стр. 33): „Абсолютное движение совершенно не зависит от тех соотношений, которыми определяется движение относительное“. Далее (стр. 33): „Проявления, которыми различаются абсолютное и относительное движение, состоит в силах стремления удалиться от оси вращательного движения, ибо в чисто относительном вращательном движении эти силы равны нулю, в истинном же или в абсолютном они больше или меньше, сообразно количеству движения“<sup>1)</sup>. Таким образом динамика — специально центробежная сила — должна дать возможность найти абсолютное пространство. Ньютон еще раз возвращается к трудности этого вопроса (стр. 35): „Распознавание истинных движений отдельных тел и точное их разграничение от кажущихся весьма трудно, ибо части того неподвижного пространства, о котором говорилось и в котором совершаются истинные движения тел, не ощущаются нашими чувствами. Однако это дело не вполне безнадежное. Основания для суждений можно заимствовать частью из кажущихся движений, представляющих разности истинных, частью из сил, представляющих причины и проявления истинных движений“. Мы должны знать абсолютные и истинные движения тел: „Нахождение же истинных движений тел по причинам их производящим, по их проявлениям или по разностям кажущихся движений и, наоборот, нахождение по истинным или кажущимся движениям их причин и проявлений излагается подробно в последующем, именно с этой целью и составлено предлагаемое сочинение“. И так эти пояснения приводят приблизительно к следующему: как ни трудно представить себе абсолютное, недоступное чувствам пространство, проявления некоторых сил природы заставляют все же его признать; заметим, что проявления сил природы по отношению именно к нему имеют некоторый совсем особый смысл, к которому мы ниже вернемся. Что же касается до геометрии абсолютного пространства, то Ньютон еще во введении говорит (стр. 2): „Итак, геометрия основывается на механической практике и есть не что иное, как часть «общей механики», в которой излагается и доказывается искусство точного измерения“. Эта основанная на механической практике, т.-е. на опыте, геометрия у Ньютона на естественным образом отождествляется с геометрией Евклида. В настоящее время вопрос о природе геометрических аксиом и поло-

<sup>1)</sup> Разрядка оригинала.

жений в геометрии, рассматриваемой как отвлеченная математическая дисциплина, и о роли, которую играет опыт в деле их установления, разработан с исчерпывающей полнотой.

Применяет ли Ньютон геометрию Евклида как единственно возможную или же он считает единственно для него возможную геометрию результатом наблюдений и опыта? Нам кажется, что приведенная цитата не оставляет в том сомнений. Если Ньютон мало на этом вопросе останавливается, то потому, что „точная механика“ его времени дает только геометрию Евклида и ничего больше дать и не может, так как других геометрий еще не существует. Современный физик совсем в другом положении. Он должен, он обязан дать подробное разъяснение, что он подразумевает под геометрией, основанной на „механической практике“, и как раз это разъяснение и составляет весьма существенную часть принципа относительности. Но каковы бы ни были результаты сделанного разъяснения, основное требование, предъявленное к геометрии Ньютона и к теории относительности, одно и то же. Но теории относительности геометрия с помощью опыта вводится в физику примерно таким образом. Прежде всего указывается, каким образом нумеруются вещи и предметы физического мира. Определенному физическому явлению, например, камню, лежащему на дороге, пересечению двух паутиновых нитей в астрономической трубе и т. п. сопоставляется геометрическое понятие точки, и этой, теперь уже физической, точке приписывается три числа; в примере с камнем эти три числа могут быть широтой и долготой места и расстоянием от центра земли. Этот процесс нумерации представляет собой введение некоторой координатной системы. Далее, некоторому другому физическому явлению, например, световому лучу, идущему от одной физической точки к другой, или, если это кому-нибудь больше нравится, туго натянутому шнуру между теми же точками сопоставляется понятие геометрической прямой. Световой луч или шнур, или еще что-нибудь другое становится физической прямой. Точно так же другим физическим явлениям сопоставляется дальнейший ряд основных геометрических понятий: площади, угла, длины и т. п., и таким образом возникают физические площади, углы, длины и т. д. Совершенно очевидно, что физическая геометрия, таким образом возникающая, будет зависеть от того, каким образом сделаны основные сопоставления, и от законов, которыми управляются физические явления, т. е. от опыта. Очевидно также, что это не противоречит основной мысли Ньютона.

Предположим, что какая-нибудь геометрия выбрана на основании опыта. Следующим вопросом будет тогда вопрос об абсолютном пространстве. Физическое пространство составлено из физических точек. По Ньютону, оно будет относительным пространством. Нужно ли абсолютное? Нужно ли отделить тело от занимаемого им

места? Необходимость этого вытекает по Ньютону из исследования относительного движения, из существования центробежной силы. Динамика отвечает на заданный вопрос. Если ответ, как это имеет место у Ньютона, утвердительный, то существование абсолютного пространства можно выставить наперед как аксиому. Но если ответ отрицательный, если абсолютное пространство, „будучи невидимым и недоступным нашим чувствам само по себе“, кроме того окажется недоступным и нашим приборам, то оно потеряет смысл своего существования.

Следует добавить, что то, что современный физик делает для пространства, он должен делать также и для времени и, рассуждая последовательно, должен дать физическое определение времени. Это обстоятельство само по себе также не противоречит Ньютону, который вполне отдает себе отчет в том, что практически он пользуется звездным временем: „возможно, что не существует такого равномерного движения, которым время могло бы измеряться с абсолютной точностью“ (стр. 31). Разница между принципом относительности и Ньютоном здесь в том, что в первом — определение времени соответствует не одному физическому явлению, а разделяется на установление физического времени в одном месте и на установление одновременности в различных местах (т.-е. требуется выбор некоторого определенного физического процесса, с помощью которого надлежит сравнивать часы в разных местах). Это расчленение в процессе введения времени в физику имеет особое значение. Как раз оно показывает, что время и пространство не вполне отделимы друг от друга. В самом деле, расстояние, измеряемое между двумя точками с помощью линейки, только тогда имеет смысл, если точки и линейка не движутся, или если измерение производится в обоих концах одновременно. Вопрос о том, какова форма связи между временем и пространством, опять должен решиться опытом и наблюдением. Непосредственно геометрические опыты, как бы высоко ни стояло „искусство точного измерения“, и опыты с часами дают, в пределах ошибок наблюдений, им свойственных, результаты довольно грубые. Для того чтобы получить результаты более точные, принцип относительности так же, как и Ньютон, для доказательства существования абсолютного пространства вынужден обратиться к динамике.

## 2. О массах и силах.

После введения понятий времени и пространства и установления физической геометрии, следующий шаг механики состоит в введении понятий массы и силы. Определить физическую величину значит прежде всего указать способ ее измерения. Так поступает Ньютон, и принцип относительности ничего, конечно, в этом отношении не

меняет. Далее между введенными понятиями устанавливаются некоторые определенные соотношения. Делается это или непосредственно с помощью опыта, или же с помощью каких-либо соображений с намерением в дальнейшем — через те выводы, которые из них следуют — подвергнуть экспериментальной проверке. Но масса, определяемая взвешиванием, сила, измеряемая динамометром, и вообще всякие опыты происходят всегда в обстановке, на которую физик весьма часто не может не смотреть как на случайную. Так, например, приступая в первый раз к взвешиванию, физик может впасть в сомнение, получит ли он на разных широтах и долготах один и тот же результат или разный; сравнение динамометром двух сил даст ли на луне то же численное отношение, как на земле, или нет и т. п. Физик, желающий предвидеть и предсказывать события, никак не может удовлетвориться соотношениями, в которых он не освободился от замеченных им случайностей опыта. Если дело идет о влиянии широты и долготы на определение массы взвешиванием, то все, конечно, очень просто: можно перебраться из одного места на земной поверхности в другое и проверить это обстоятельство. Но если для устранения сомнений нужно переехать на луну, то дело обстоит гораздо хуже. Отсюда вытекает необходимость приписывать некоторым физическим величинам или явлениям свойства, которые непосредственно из опыта не следуют и которые можно проверить только косвенным путем. Нам кажется, что Ньютон, отождествляя массу с „количеством“ материи, этим самым как раз и возводит физическую величину, массу, в ранг чего-то, что имеет, так сказать, абсолютное, независимое от привходящих обстоятельств измерения значение. В современной терминологии мы сказали бы то же самое, утверждая, что масса является скаларом или инвариантом. Заметим, что в этом более строгом современном определении свойства этой величины содержится целый ряд добавочных идей и указаний, которых не только нет, но еще и не может быть у Ньютона.

То же можно сказать и о силах. По Ньютону, нужно различать „настоящую“ или абсолютную силу от той, которая происходит вследствие того, что вещи в наших относительных измерениях кажутся нам не такими, какими они есть. Основное соотношение между „настоящей“ силой, „количеством“ материи и движением в абсолютном пространстве можно в привычной нам терминологии написать таким образом:

$$\vec{mg} = \vec{f},$$

где  $m$  масса,  $\vec{g}$  вектор-ускорение и  $\vec{f}$  вектор-сила. Если мы находимся в относительном пространстве, то только в редких случаях написанное уравнение сохраняет свой вид; вообще говоря, правая его часть будет

другая. Если из найденной для относительного движения правой части вычесть „настоящую“ силу  $\vec{f}$ , то оставшаяся разность будет кажущейся силой. Простейший пример такой „кажущейся“ силы мы имеем в центробежной силе. Если истинной силы нет, то свободное тело находится в состоянии прямолинейного и равномерного движения. Отсюда следует закон инерции и существование так называемых „инерциальных систем“, по отношению к которым основной закон Ньютона сохраняет свою форму, — так называемый принцип относительности Ньютона-Галилея.

Если Ньютону, чтобы выразить закон природы, имеющий общее значение, необходимо абсолютное пространство, истинная сила и абсолютная масса в виде „количества“ материи, то современный физик может пойти к той же цели совсем иным путем. Математика дает ему теперь для этого другие средства. Пусть опыт и наблюдения привязывают его к определенному месту и времени. Если он хочет освободиться от случайностей их выбора, т.-е. от рода движения, в котором он участвует, то он может обратиться к теории групп и точечных преобразований и с их помощью пытаться выразить результаты своих измерений. Как раз это и делает теория относительности. Геометрия, к которой на основании опыта он должен притти, непременно должна зависеть от распределения и величины масс и их движения. Время, не вполне отделимое от пространственных измерений, тоже должно от них зависеть. В движении массы сочетаются элементы пространственные с элементами времени. Условно можно говорить о времени как о четвертой координате и ввести понятие о четырехмерном мире в отличие от трехмерного пространства. Можно сказать условно: физическая геометрия мира зависит от распределения в нем масс. Теории инвариантов и точечных преобразований учат, что целый ряд свойств подобной геометрии не зависит от выбора специальной координатной системы, взятой для ее описания. Координатная система в четырехмерном мире означает обыкновенную трехмерную координатную систему, движущуюся в обыкновенном трехмерном пространстве. Выражение „абсолютного“ в законах физики можно искать не по отношению к гипотетическому абсолютному пространству, а в инвариантных свойствах геометрии четырехмерного мира. „Количество“ материи — это „покоющаяся масса“, скаляр, или инвариант, не зависящий от выбора координатной системы в этом мире. Вместо „истинной“ силы по отношению к абсолютному пространству, мы имеем здесь ко- или контравариантное определение с помощью тензора, соответствующего ранга, т.-е. опять-таки освобождение от случайностей выбора координатной системы. Если основное положение физики в виде соотношения между массой, ускорением и силой должно быть сохранено, то это соотношение должно быть написано для инвариантной

массы, для силы-тензора, для ко- или контравариантного эквивалента вектора ускорения. Предположим, что такое соотношение написано, можно ли затем говорить о силах истинных и силах кажущихся? Возьмем для примера силу тяготения и силу центробежную. По Ньютону, движение масс под действием силы тяготения зависит от величины этой силы, т.-е. от тех же масс. В принципе относительности геометрия и время в своей совокупности также зависят от масс и их распределения. Но физическая геометрия и время определяются с помощью наблюдений над массами и их движениями. Значит, изучая физическую геометрию и время, мы изучаем тем самым зависимость между движениями масс и их распределением, т.-е. делаем как раз то самое, что Ньютон делает с помощью силы тяготения. Само собою разумеется, что полученный в процессе этого изучения и в зависимости от избранной системы координат результат мы должны будем получить в такой форме, чтобы он в пределах точности, с которой выводы Ньютона подтверждаются опытом, совпадал с его результатами для той же координатной системы. Но так как уравнения Эйнштейна написаны в инвариантной, т.-е. независимой от выбора системы, форме, и именно поэтому являются общим законом природы, то нет оснований дать предпочтение какой-нибудь одной из них и сказать, что то выражение, которое Ньютон называет силой, в одном случае — истинная сила, в другом — кажущаяся. Поэтому разница в квалификации центробежной силы и силы тяготения отпадает. Она могла бы сохраниться только в том случае, если ньютоновская масса, вызывающая тяготение, и масса, влияющая на характер физического пространства и времени, не одни и те же. Можно показать, что масса, влияющая на характер геометрии, и масса, входящая в выражение для центробежной силы, т.-е. масса, создающая инерцию и входящая как коэффициент при ускорении в выражение (1), совпадают друг с другом. Сам Ньютон на основании опыта утверждает их тождество. Все последующие с чрезвычайно большой точностью проделанные опыты подтвердили его наблюдение. Постулативное утверждение тождества обеих масс составляет принцип эквивалентности Эйнштейна, положенный им в основу своей теории.

Если содержание закона природы не зависит от случайностей места и времени, т.-е. от выбора координатной системы, и в этом смысле имеет абсолютное значение, то описать его содержание и проверить на опыте можно только с помощью специальной, частной координатной системы координат. К такой специальной системе, не к абсолютному пространству, относятся и по Ньютону результаты наблюдений. Формулы, практически применяемые обеими теориями, если и могут отличаться друг от друга, то только на такие величины, которые меньше тех, в пределах которых до сих пор была верна старая теория. Более точные наблюдения, в отдельных случаях уже сделан-

ные, например, для движения перигелия Меркурия, могут указать на разницу между обеими теориями. Другими словами: на более строгую правильность одной по сравнению с другой. Едва ли есть надобность повторять, что все предвидения теории относительности оказались на опыте правильными.

Заметим еще следующее: абсолютное пространство, без которого Ньютон не может выразить общие законы природы, если оно вообще имеет какой-нибудь реальный физический смысл, должно заключаться в числе тех пространств, которые можно ввести в инвариантное выражение общих законов общего принципа относительности. Если бы выводы принципа относительности по отношению к явлениям тяготения, т.-е. главным образом небесной механики, оказались неверными, то это никак нельзя было бы отнести к факту существования или несуществования абсолютного пространства и времени и Евклидовой геометрии и прочего, а следовало бы отнести к тому, что геометрия, „основанная на механической практике“, обоснована неправильно, т.-е. не согласна с опытом. В этом смысле могут быть опровергнуты опытом, например, опытом Дейтона-Миллера<sup>1)</sup> — не принципиальные положения принципа относительности, а только форма связи между геометрическими величинами, с помощью которых интерпретируются некоторые определенные физические явления, и массами и, быть может, еще другими, в настоящее время не учитываемыми физическими величинами. Именно поэтому нельзя также противопоставлять механике Ньютона принцип относительности; последний является лишь естественным и логическим развитием заложенных в первой идее, оказавшимся в наши дни возможным благодаря более обширным математическим знаниям. Совсем не следует считать также принцип относительности законченным в своем развитии. Как раз наоборот — это только первый этап на еще весьма длинном пути. Согласовать физическую геометрию с „механической практикой“ совсем не так просто, как только приходится выйти за пределы совсем грубых измерений. В последние годы в связи с работами Борна, Гейзенберга и Йордана, с одной стороны, и Шрёдингера<sup>2)</sup> — с другой, оказалось нужным еще раз пересмотреть понятия пространства и времени. В этом направлении пока что сделано еще очень немного; в сущности лишь указано, что сопоставление геометрических понятий с физическими

<sup>1)</sup> Кстати укажем, что в ноябрьской книжке «Известий Вашингтонской Академии Наук» (т. 12, № 11) 1926 г. опубликована работа Кеннеди, проверявшего работы Дейтона-Миллера, не подтверждающая его результаты: Кеннеди не смог обнаружить никакого эфирного ветра.

<sup>2)</sup> Я имею в виду новую квантовую механику: теорию матриц первых трех авторов и „волновую“ механику последнего. Читателю, незнакомому с этими вопросами, рекомендуем: „Основания новой квантовой механики“. Сборник статей под редакцией акад. А. И о ф ф е. Гос. Изд. 1927.

явлениями делается в принципе относительности лишь для явлений макроскопических, т.-е. таких, которые включают в себе по необходимости большое количество атомов, молекул. Поэтому физические понятия длины, времени и, быть может, массы и заряда, являются своего рода средними понятиями. Применять их к явлениям микроскопическим, т.-е. интрамолекулярным, было бы логической ошибкой. В этом смысле, кажется нам, нужно понимать мысль Борна о том, что при внутриатомных процессах принцип причинности может, строго говоря, и не выполняться, и что строить модели атомов не имеет по этому большого смысла. Но нам кажется, что нет надобности в столь радикальном изменении наших взглядов на вещи. Дело, начатое Ньютоном и продолженное Эйнштейном, можно закончить и довести до его логического завершения. Введение электромагнитного поля в четырехмерную геометрию по способу Вейля-Ми, Эддингтона, самого Эйнштейна и других представляет собой первые, еще весьма несовершенные попытки в этом направлении. Можно питать надежду, что, идя по этому пути, удастся решить ту самую задачу, которая так удачно разрешается подходом — можно сказать — с диаметрально противоположного конца в новой квантовой механике.

Вернемся еще раз к абсолютному пространству Ньютона. Это пространство, или „место“, отделенное от занимающего его тела, а также и сила тяготения в своей классической форме.

$$f = k \frac{mm'}{r^2}$$

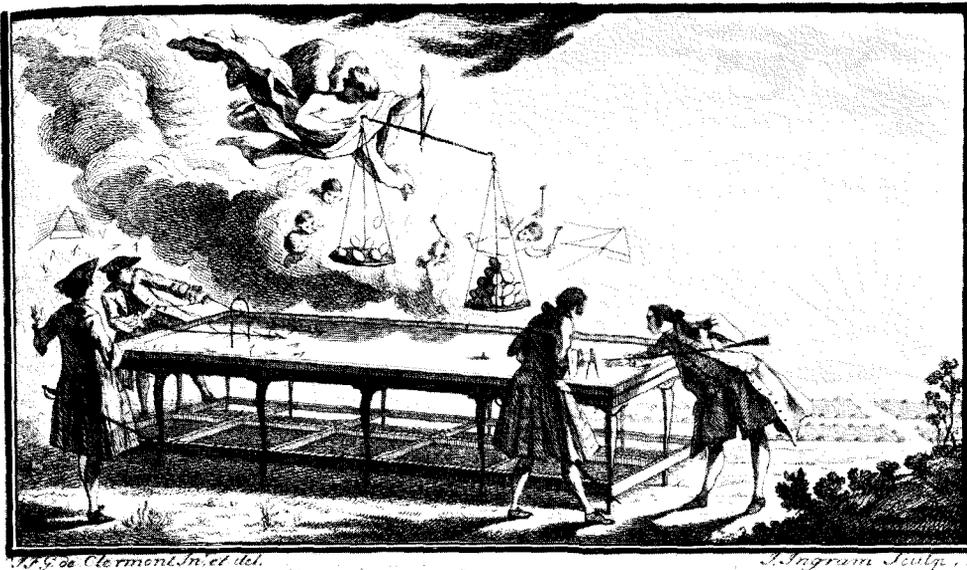
оказываются по теории относительности ненужными. Они не нужны по существу, в обиходе же физика, в его терминологии, при соответствующих оговорках, они естественно останутся и смогут быть даже весьма полезными. Ненужное по существу принцип относительности отбрасывает. С понятием абсолютного пространства связывают часто понятие об эфире. Если эфир нужен только как остов для абсолютного пространства, то для Эйнштейна он также не нужен, как и абсолютное пространство. Если же эфир должен служить остовом для электромагнитного и гравитационного полей, то вопрос несколько меняется. Поле тяготения существует и у Ньютона. Разница в скорости распространения и в том, что энергия поля у Эйнштейна эквивалентна массе, а у Ньютона нет. Если придумать такую жидкость — эфир, которая была бы нужна для физики только, и только в такой же мере, как и указанные поля, то это несколько не изменило бы фактический уровень наших знаний. Рожер Котс, издатель „Принципов“ Ньютона, в предисловии ко второму изданию, возражая современным ему сторонникам эфира, говорит (стр. 18): „Такого рода жидкость никоим образом не может быть различена от пустоты, и весь спор будет идти о словах, а не о сути дела“, кроме

того (стр. 17): „не следует ли поэтому такую гипотезу, которая совершенно лишена обоснованности, которая даже в малейшей степени не может служить к объяснению явлений природы, признать нелепейшей и совершенно недостойной философа“. Конечно, Котс не отличает пустоты от гравитационного поля; у Эйнштейна полная пустота вообще никакого физического смысла не имеет. Если между электромагнитным и гравитационным полями и словом эфир поставить знак тождества, то это слово можно в принципе относительности сохранить. Но эфир, как совсем особого свойства жидкость с ее движениями, ненужна Эйнштейну в такой же степени, как и Ньютону. Первый, как и последний, мог бы сказать „*hypotheses non fingo*“, сделав при этом неизбежную для современного физика оговорку: „по мере возможности“.

Мы видели, что обе теории стремятся идти по одному и тому же пути. Уйти дальше не значит пойти по другой дороге. Современному летчику легче побить рекорд на расстояние, чем путешественнику XVII века, и если вспомнить состояние науки того времени, то трудно не повторить восторженного восклицания английского поэта: «Nature and Nature's laws hid in Night, God said: „Let Newton be“, and all was Light»<sup>1)</sup>.



<sup>1)</sup> «Природа и ее законы были покрыты мраком ночи; и сказал бог: „Да будет Ньютон“, и все озарилось светом».



## ПРИНЦИПЫ И ГИПОТЕЗЫ ОПТИКИ НЬЮТОНА.

С. И. Вавилов, Москва.

*Ego vero incerta certis miscere nolo.*

И. Ньютон.

Слова, поставленные выше, написаны Ньютоном в 1671 г., в первом его мемуаре; более решительное „*hypotheses non fingo*“ появилось во втором издании „Начал“, в 1713 г., на склоне жизни. Правило — не смешивать домыслов с достоверностями, гипотез с принципами неуклонно выполнялось Ньютоном. Но „*hypotheses non fingo*“ — только вывод многолетнего опыта, метод, указываемый старым Ньютоном молодому поколению. Сам Ньютон придумал не мало гипотез, но они всегда резко отделены от достоверного, от принципов и теории. Гипотезы Ньютона изложены в мемуаре 1675 г., напечатанном только через 30 лет после его смерти, в Вопросах „Оптики“, внешне совершенно отделенных от основного текста и по самому заглавию содержащих нечто недостоверное, наконец, в частных письмах к Бойлю, Бэнтлею, Бэрнету и пр. и в богословских сочинениях. Официальная часть писаний Ньютона: „Начала“, основной текст „Оптики“, „Оптические лекции“, математические сочинения и мемуары, напечатанные в *Philosophical Transactions*, не содержат гипотез, по крайней мере намеренных. Гипотезы Ньютона — временные механизмы, применявшиеся для отыскания принципов и затем устранявшиеся за недостоверностью или ненадобностью. Ньютон указывает и другой, популяризационный смысл своих гипотез. В мемуаре 1675 г. он писал: „Я нашел, что некоторые, которых я не могу убедить в моем

мнении, говоря отвлеченно о природе света и цветов, легко согласились бы с ним, если бы я пояснил мое рассуждение какой-либо гипотезой. По этой причине я полагал уместным послать вам описание подробностей гипотезы, имеющей целью только пояснение мемуара, отправляемого вместе с сим. Я сам не буду принимать ни этой, ни какой-либо другой гипотезы...". Устранив, или



Рис. 1. Памятник Ньютону в Кембридже.

обесценив гипотезы, Ньютон обеспечил своему научному наследию ту прочность, которую не сокрушило и не может сокрушить дальнейшее развитие физики. Принципы Ньютона долговечны настолько же, насколько безошибочен опыт, эквивалентом которого они являются; они могут дополняться, обобщаться, подвергаться некоторому исправлению, но в своей основе несокрушимы.

За четверть тысячелетия, прошедшую со времени первых работ Ньютона, отношения принципов и гипотез, как методов естествознания, стали совершенно мирными. Как безупречные примеры физики принципов развились механика, термодинамика, электродинамика, теория относительности, а на ряду с ними образцы физики гипотез: теория молекул, теория электронов, оптика Юнга-Френеля и пр. Иногда гипотеза становилась принципом, достоверностью (атомы). Возникали теории, сразу пользующиеся обоими методами, в которых есть и принципы и

гипотезы (теория Бора). Оба метода оказались необходимы, но еще очень далеки от слияния в ту единую физику, к которой стремились в XVII в. (Декарт, Ньютон).

Особенно в оптике, с которой начал Ньютон, положение в общем остается почти тем же, как и во времена его. Попрежнему спорят гипотезы волн и корпускул, попрежнему ищут компромиссных решений и принципы — свойства света не поглощаются во всей совокупности ни одной гипотезой. В дальнейшем напоминаются принципы и гипотезы оптики Ньютона и коротко намечается их последующая историческая судьба.

## 1. Происхождение оптических работ Ньютона.

Исток научных занятий Ньютона, в котором пересекаются три основных русла — оптика, небесная механика и математические исследования, — телескоп-рефлектор. Поиски совершенной формы

оптических стекол с наименьшей абберационной ошибкой — вероятный практический повод первых геометрических работ Ньютона. Открытие дисперсии света — прямое следствие работ по усовершенствованию телескопических стекол. Самый объект телескопа — планеты и спутники их — привлекли внимание Ньютона к небесной механике. Наконец длительные химические работы, о результатах которых мы очень мало знаем, имели целью вначале разыскание сплавов, пригодных для изготовления металлических зеркал рефлекторов. Эти химические опыты пригодились Ньютону впоследствии, на лондонском монетном дворе. Таким образом естественно искать внешний повод развития мысли Ньютона в технической задаче усовершенствования телескопов.

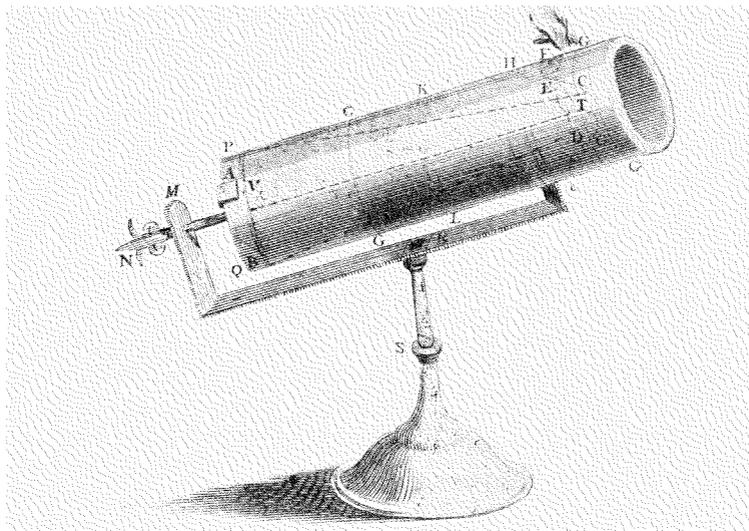


Рис. 2. Телескоп Ньютона.

Трудно установить какие-либо сильные влияния на Ньютона или преемственность, за исключением разве математической традиции Барроу. Ньютон читал Декарта, Кеплера, де Доминис, но только ничтожные следы этих книг можно найти в первых оптических мемуарах Ньютона. Он приступил к изучению природы так, как будто-бы до него ничего не было сделано. Первый принцип Декарта: „Для исследования истины необходимо раз в жизни усумниться насколько возможно во всех вещах“ осуществлен Ньютоном в бóльшей мере, чем Декартом. Но „идеи носились в воздухе“; если нельзя говорить о влиянии отдельных лиц, то общая тенденция эпохи несомненна и в исключительной деятельности Ньютона. Достаточно сопоставить некоторые даты истории оптики в XVII веке:

1660 г. Гримальди в Италии открывает диффракцию света.

1665 г. Гук в Англии описывает интерференционные явления в тонких пластинках.

1666—1667 гг. Ньютон открывает дисперсию света и простые цвета.

1669 г. Бартолинус в Дании обнаруживает двойное преломление исландского шпата.

1675 г. Ньютон доказывает периодичность света.

1675 г. Рёмер в Париже определяет скорость света.

За 15 лет разными людьми, почти ничего не знавшими один о другом, в разных странах, были заложены основы физической оптики и открыты почти все главные свойства света. В этом смысле Ньютон был человеком своей эпохи.

Оптические сочинения Ньютона многочисленны. В 1672 г. напечатан его первый мемуар: „Теория света и цветов“, в 1675 г. в Королевское Общество был представлен другой большой мемуар, содержащий гипотезу о природе света и описание опытов с интерференционными кольцами<sup>1)</sup>. В промежутке в *Philosophical Transactions* он вел длительную полемику со своими многочисленными оппонентами. После смерти Ньютона в 1729 г. были, по манускрипту, изданы его „Оптические лекции“, читавшиеся в Кембридже в 1669, 1670, 1671 гг. В 1704 г. Ньютон издал впервые „Оптику“. В ней собраны почти все исследования Ньютона в области световых явлений. Наконец математическая теория преломления света вынесена Ньютоном в „Начала“, там же встречаются и другие замечания оптического характера, например, относительно светового давления. Переписка Ньютона содержит также большой оптический материал, касающийся в частности вопросов физиологической оптики. Оптические сочинения Ньютона за исключением мемуара 1675 г. и писем полностью изданы в 1749 г. в Падуе отдельной книгой на латинском языке.

## 2. Принцип неизменности простого цвета.

В методе принципов Ньютона две стороны — аналитическая и синтетическая, отыскание самих принципов и получение из них математических следствий. Первая из них экспериментальная, вторая — математическая. В „Началах“ в области механики выполнены обе задачи. В „Оптике“ сделана только первая часть — аналитическая, найдены принципы, основные свойства света. Фонтенелль назвал дело Ньютона „анатомией света“. В сменах дневного света, в постоянных изменениях цветности и яркости Ньютон отыскал неизменное — простые цвета. Из них составлен любой свет и они постоянны, это своего рода атомы оптики. „Вид цвета, — писал Ньютон в своей „доктрине“ 1671 г., — свойственный каждому отдельному сорту лучей, не изменяется ни преломлением, ни отражением от естественных тел,

<sup>1)</sup> Эти мемуары переведены в настоящем выпуске УФН.

ни какой-либо иной причиной, которую я мог наблюдать“. Зеленая окраска сурика и красная у лазури, при освещении через монохроматор соответствующим светом, явились полной неожиданностью и для Ньютона и тем более для его современников и потомков. Еще в XVIII веке не заглохло эхо этого поразительного открытия. Неизменность простых цветов воспевалась стихами <sup>1)</sup>).

Mais quoi? De ces rayons la subtile structure  
 Ne peut ni s'altérer, ni changer de nature.  
 L'art ne la détruit point, et des efforts vainqueurs,  
 Le rayon rouge ou bleu conserve sa couleur.  
 D'eau, de lumière, d'air la plus faible parcelle  
 Ne peut être détruite. Oh, Sagesse éternelle  
 Tout Être *corporel*, de tes trésors sorti,  
 Par ton pouvoir lui seul peut être anéanti.

Из последних строк видно, что даже поэты делали отсюда вывод о телесности света, сравнивая свет с атомами: тот же вывод, правда в форме крайне осторожной, высказал и Ньютон в своем мемуаре.

Неизменность простого цвета — первый и главный принцип ньютоновской оптики. С какой точностью и достоверностью он был установлен? Повидимому, не мало затруднений доставила Ньютону желтая настойка нефритового дерева, светящаяся синим цветом на дневном свету (флюоресценция эскулина). Если бы настойку удалось осветить чистым крайним фиолетовым светом, принцип Ньютона, по крайней мере для физика XVII века, был бы нарушен, при освещении фиолетовым появилось бы синее свечение. Но монохроматор Ньютона оказался недостаточно совершенным, хотя он и пользовался коллиматорной установкой с узкой щелью; флюоресценции при однородном освещении Ньютон не заметил, и принцип был спасен. Перед нами нередкий пример того, как несовершенство опыта способствует развитию науки. Трудно представить себе путаницу оптических представлений, которая возникла бы, если бы смещение Стокса открыли в XVII в.

О постоянстве и изменении цвета Ньютон судил по окраске и преломлению, т.-е. принцип был установлен с точностью, едва ли превышающей 10 мк, или, примерно, 1—2 процента от длины волны. Что случилось с принципом Ньютона за 250 лет развития оптики? Подтвердился ли он с большей точностью, или подвергся изменениям? Случилось то и другое.

<sup>1)</sup> Dulaud, La grandeur de Dieu dans les merveilles de la nature, poème. Paris, 1758, стр. 29. Русский перевод: „Но что это? Тонкая сущность этих лучей не может измениться по своей природе! Никакое искусство не в состоянии ее разрушить и красный или синий луч сохраняет окраску, побеждая все усилия. Малейшая частица воды, света, воздуха не может быть разрушена. О, вечная премудрость, все телесное вышедшее от тебя, может быть уничтожено только силою твоею“.

Для неподвижных зеркал и преломляющих тел в видимой области спектра цветность луча (вернее, его частота) остается неизменной с колоссальной степенью точности. В этом можно удостовериться самым простым интерференционным опытом: пусть от светящейся точки  $S$  (рис. 3) свет попадает в глаз  $P$ . Часть пучка идет прямо, другая, когерентная с ней часть отражается от зеркала в  $A$ . Глаз наблюдает интерференционные полосы. Если бы при отражении от зеркала произошло небольшое изменение частоты света, то в  $P$  интерферировали бы лучи с разными частотами и возникли „биения“, т.е. полосы казались бы движущимися. Непрерывный ряд волн излучается только в течение, примерно, одной стомиллионной доли секунды, поэтому движения полос при небольшом изменении частоты не могут быть заметными, вместо этого произойдет размытие интерференционных полос, они станут менее резкими или совсем практически исчезнут. Нетрудно подсчитать, что если бы длина волны видимого света при отражении изменялась на  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  мк, то размытие полос стало бы заметным. На опыте этого не происходит, и, следовательно, можно утверждать, что принцип Ньютона выполняется с точностью, примерно, в миллионную долю процента (от длины волны). Непосредственное спектроскопическое наблюдение подтверждает принцип Ньютона с точностью, примерно, в одну сотысячную долю процента.

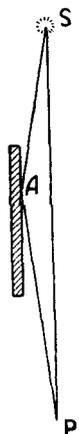


Рис. 3.

Теоретический смысл принципа непосредственно ясен в волновой теории света, это очевидный результат теории вынужденных колебаний. Но на основании той же волновой теории принцип Ньютона нуждается в исправлении для движущихся систем (эффект Доплера-Физо-Михельсона). Опыты А. А. Белопольского с многократным отражением света от движущихся зеркал показали это на прямом опыте<sup>1)</sup>. Цветность, или длина волны, при отражении от движущегося зеркала заметно изменяется. В последнее время Шрёдингер показал, что эффект Доплера следует не только из волновой теории, но также из теории световых квантов, если, утверждая сохранение энергии и количества движения, постулировать неизменность константы  $h$ .

Эффект Доплера, разумеется, не устраняет принципа Ньютона, он только обобщает его на случай движущихся систем. Перед нами типичный случай эволюции принципа.

Значительно чувствительнее, по самому существу, принцип Ньютона затронут явлением Комптона<sup>2)</sup>. По теории Комптона-

<sup>1)</sup> Ср. Изв. Петерб. Акад. Наук. 13, стр. 461, 1900. Также А. А. Белопольский и А. Астроспектроскопия, стр. 98, Петроград 1921 г.

<sup>2)</sup> Ср. УФН. 6, стр. 142, 1926.

Дебая, световой луч, рассеиваясь от свободных или слабо связанных электронов, испытывает процентное изменение длины волны:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0,00482 \frac{\sin^2 \frac{\theta}{2}}{\lambda} \text{ мк,}$$

где  $\theta$  — угол между падающим и отраженным лучом. Теория прекрасно подтверждена опытом. Изменение длины волны, или цветности, может достигать колоссальных процентных значений для лучей высокой частоты, изменяясь вдвое, втрое и в десятки раз. Для видимой области процентное изменение исчезающе мало и лежит за теми пределами, которые были указаны выше. Теория Комптона до некоторой степени объединяет явления рассеяния света и флюоресценции (или резонансного излучения). В том и другом случае при „соударении“ кванта с атомом происходит смещение электрона в атоме и приобретенная энергия электрона вычитается из кванта  $h\nu$ ; постулат постоянства  $h$  приводит к необходимости уменьшения  $\nu$ . С этой точки зрения опыты Ньютона с настойкой нефритового дерева — отдаленный прообраз опытов Комптона. Во всяком случае принцип Ньютона оказался только частным случаем более широкого начала, в своей общей форме мало похожего на принципы постоянства. Но, как всякий принцип, основанный на точном опыте, он только обобщился и сохранил свою реальную силу в определенных границах.

### 3. Принцип периодичности света.

Гримальди в трактате *Physico-Mathesis de lumine. coloribus et iride* (Болонья, 1665 г.) впервые заподозрил возможность интерференционных явлений: „Иногда свет превращает поверхность тела, уже ранее освещенную, в более темную“ (предл. XXII). Он приводит в доказательство опыты, несколько схожие с известными опытами Юнга с двумя отверстиями. Но потемнение, наблюдавшееся им, было, очевидно, дифракционного происхождения, в условиях его опыта чистая интерференция наблюдаться не могла. С Ньютоном произошло как раз обратное. Он нашел чистое интерференционное явление в темных и светлых кольцах, в тонких и толстых пластинках, но не признал в нем нарушения принципа суперпозиции интенсивностей. Его „энергетическое“ толкование темных и светлых колец ясно из рис. 4 (стр. 94), взятом из второй книги „Оптики“. Темные кольца соответствуют отсутствию отражения, в этих местах свет проходит насквозь. Нарушения суперпозиции нет, есть только чередование прохождений и отражений. Принцип суперпозиции подтверждается обыденным опытом (для некогерентных пучков), и у Ньютона не было оснований предполагать

возможности его нарушений. Только с тех пор, как учение о волновом движении приняло реальные формы, и выяснилось понятие когерентности, местное нарушение суперпозиции света стало принципиально возможным. Для Ньютона толкование колец чередующимися прохождениями и отражениями было единственным. Впоследствии Эйлер объяснял ньютоновы кольца с точки зрения волновой теории резонансом тонких слоев на падающие волны. Чередование колец толковалось как обертоновый резонанс. Но и в этом представлении энергетическая схема Ньютона была единственной. Резонирующие слои дают отраженный свет, нерезонирующие пропускают. В наше время, разумеется, нетрудно опровергнуть схему Ньютона фотометрически или, например, таким опытом. Если слой между

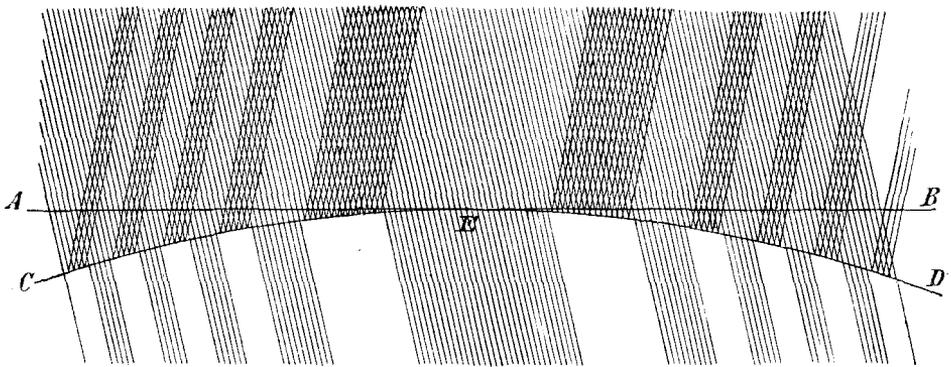


Рис. 4.

линзой и стеклом заполнить флюоресцирующим раствором, то по Ньютону флюоресценция должна быть чередующейся яркости (по закону колец). Там, где видно светлое кольцо в отраженном свете, раствор внутри зазора поглощает, примерно, вдвое больше света, чем в соседних участках. Опыт не дает колец флюоресценции и, следовательно, Ньютон не прав. Так, увидав интерференцию, Ньютон ее не обнаружил, потому что для этого нужны были гипотеза, или опыт, который во времена Ньютона трудно было осуществить.

Но, не найдя интерференции, Ньютон открыл периодичность света, она обнаружилась точностью и простотой закона чередования колец. С изумительной для своего времени тщательностью Ньютон измерил длины периодов для разных цветов (для границ между цветами солнечного спектра), сравнил результаты для тонких и толстых пластинок и получил одинаковые цифры. В таблице приведены перечисленные по современному данные Ньютона для границ некоторых цветов и сравнены с цифрами длин волн, которыми теперь оцениваются эти границы:

Цвет	По Ньютоу $\lambda$	Округленное истинное значение $\lambda$
Граница оранжев. и желт.	571 $\mu\mu$	587 $\mu\mu$
Граница желт. и зел. .	532 ..	536 .
Граница зел. и син. . .	492 ..	492 .
Граница син. и индиго .	459 „	454
Граница индиго и фиол.	439 „	426 „

Как истолковал Ньютон свое новое открытие? В окончательной форме, в „Оптике“ — как эмпирический принцип: „Всякий луч света, проходя через преломляющую поверхность, принимает определенное временное строение, или состояние, снова возвращающееся через равные промежутки по мере прохождения луча; всякий раз, как это состояние возвращается, оно располагает луч к прохождению в промежутке между возвращениями такого состояния луч отражается... Возвращения предрасположения к отражению в луче я называю приступами легчайшего отражения, а предрасположения к прохождению — приступами легчайшего прохождения; пространство, проходное между каждыми двумя возвращениями, я называю интервалом приступов... Я не стану здесь разбирать, в чем заключается предрасположение такого рода, состоит ли оно из вращательного, или колебательного движения луча, или среды, или из чего-либо другого. Для меня достаточно простого открытия, что лучи света располагаются к преломлению, или отражению какой-то причиной, или чем-либо другим“.

Принцип периодичности дождался до наших дней в полной неприкосновенности, только „интервалы приступов“ стали называться длинами волн. Это — основной признак света, объединивший все разнообразие излучений от волн радиотелеграфа до миллиметровских проникающих космических лучей. Разделив ньютонский „интервал“ на скорость света, получили частоту, которой и надлежит по первому принципу Ньютона оставаться неизменной. Классическая волновая теория дала простое истолкование частоте. В теории квантов частота света загадочный, чисто эмпирический фактор, частное от деления энергии кванта на постоянную  $h$ .

Метод анализа световых частот — спектроскопия — в значительной степени создана Ньютоном. Он указал все три метода разложения света: преломление, интерференцию и диффракцию

Призма с коллиматором, щелью и линзой была первой моделью спектроскопа, ньютонны кольца — интерференционный прибор, при помощи которого получена первая в истории оптики спектральная

таблица, приведенная выше; наконец щель между лезвиями бритв — праобраз диффракционной решетки. Ньютон придумал и применял, когда требовалась большая однородность света, коллиматорную установку и ясно представлял себе условия повышения разрешающей способности. Непонятно, почему он не обнаружил темных линий в солнечном спектре до Волластона?

#### 4. ДИФФРАКЦИЯ.

Диффракция света открыта Гримальди. Описание его опытов появилось в посмертном трактате, напечатанном в 1665 г. Гримальди дает несколько туманное качественное объяснение огибания, сравнивая свет со звуком. Ньютон не читал книги Гримальди, по крайней мере до 1675 г., и цитировал Гримальди по изложению Фабри, противника Гримальди. Прямым поводом собственных диффракционных опытов Ньютона явились опыты Гукка, который, тоже не зная о Гримальди, претендовал на открытие огибания. Диффракцией Ньютон занимался немного. Его опыты, в значительной мере — повторение опытов Гримальди. Шаг вперед — количественное изучение явления, как всегда у Ньютона, и применение идеи сложности белого цвета. Для объяснения цветных диффракционных полос Ньютон производил опыты в монохроматическом свете. Он показал, что вещество диффрагирующего тела не влияет на характер явления. „Производя эти наблюдения, — заключает Ньютон описание своих опытов в „Оптике“, — я намеревался повторить их с большей точностью и тщательностью и поставить новые опыты... Однако, в те времена, я был прерван в моей работе и теперь не имею возможности приняться вновь за исследования. Оставляя эту часть моей работы незаконченной, я хочу в заключение предложить некоторые вопросы для того, чтобы другие могли исследовать данный предмет дальше“. С этого места и начинаются знаменитые вопросы „Оптики“.

Чем могла быть диффракция для Ньютона при принятом решении „не смешивать домыслов с достоверностями“? Только принципом. Свет, проходя вблизи тел, изгибается, нарушается прямолинейность его движения. Отсюда первый вопрос „Оптики“: „не действуют ли тела на свет уже на некотором расстоянии, загибая световые лучи? И не будет ли это действие, при прочих равных обстоятельствах, тем сильнее, чем меньше расстояние“? Предположение об отклонении световых лучей при прохождении около материальных тел много раз высказывалось Ньютоном, оно приведено в „Началах“, упоминалось в письмах к Бойлю. Действием тел на свет на расстоянии Ньютон объяснял правильное отражение (естественная „шереховатость“ всякой поверхности превратила бы иначе всякое отражение в диффузное). Мы воспитались на волновой теории света, но если попробовать на

момент отвлечься от всякой теории, и чисто эмпирически формулировать явление диффракции, то едва ли удастся придумать что-либо иное, кроме „отклонения света материальными телами“. Также как в механике отклонение от прямолинейности есть для нас признак наличия силы, так в оптике диффракция была для Ньютона доказательством действия тела на свет на расстоянии (в 1675 г. это действие объяснялось гипотезой эфира). Ньютон знал, что за этим кроется либо доказательство материальности света, либо по крайней мере гипотеза об этой материальности. Поэтому вывод помещен не в тексте „Оптики“, а в вопросах. 4-й вопрос „Оптики“ содержит в лаконической форме общую теорию диффракции, отражения и преломления: „Не начинают ли световые лучи, падающие на тело и отражающиеся или преломляющиеся в нем, погибаться еще до того, как они попадут на тело, и не происходят ли отражение, преломление и огибание посредством одной и той же силы, проявляющейся по-разному в разных обстоятельствах?“

Диффракция — основное, не случайное свойство света, принцип, как подчеркнул уже Гримальди. Она необходимый признак всякого света от волн радиотелеграфии до X-лучей. Для Ньютона огибание было аргументом телесности света, а исторически оно стало базой волновой теории. Правда, наглядная теория Юнга-Френеля не могла справиться до конца с фактом прямолинейности распространения света и диффракционной задачей. Только волновое уравнение, значительно более широкое, чем всякая частная форма волновой теории, дало в математической обработке Кирхгофа и затем Зоммерфельда решение задачи. Само по себе волновое уравнение не гипотеза, а принцип, такой же обобщенный факт, как уравнения термодинамики или электродинамики, не связанный с той или иной формой волновой гипотезы.

## 5. Принцип поляризации света.

25-й вопрос „Оптики“ начинается так: „Нет ли у лучей света, кроме описанных, иных первоначальных свойств?“ И дальше Ньютон доказывает существование световой поляризации на основании анализа наблюдений Гюйгенса над двойным преломлением в исландском шпате. Гюйгенс в „Трактате о свете“ дал известное формальное построение, основанное на волновой теории, для определения направления необыкновенного луча. В этом случае волновая теория не только объясняла поведение необыкновенного луча, но являлась теорией почти неизбежной. Ньютон дает собственное, совершенно неверное правило преломления необыкновенного луча, не упоминая построение Гюйгенса. Мы встречаемся с трудно объяснимым капризом великого физика. Объяснять его можно либо мало характерной

для Ньютона небрежностью, либо желанием обойти волновую теорию. Сам Гюйгенс в одном письме к Лейбницу называет свои опыты с двойным преломлением „*experimentum crucis*“ волновой теории. Впрочем, впоследствии Лаплас Био и др. дали и корпускулярную математическую теорию двойного преломления. Гюйгенс не мог, однако, объяснить с точки зрения своей теории того факта, что если один из лучей обыкновенный или необыкновенный падает на вторую кристаллическую пластинку, то он либо снова испытает двойное преломление, либо пройдет в виде одного луча, в зависимости от поворота пластинки. Ньютон в двух строках дает формальное объяснение: „Не обладают ли световые лучи различными сторонами с различными первоначальными свойствами?“ В вопросе 28-м „стороны“ луча сравниваются с полюсами магнита, почему в 1808 г. Малю назвал все явление поляризацией. Названием увековечена и тенденция: Ньютон считал поляризацию сильным аргументом корпускулярной теории: „Я не говорю, пишет Ньютон, что эта сила магнитная; природа ее, повидимому, иная. Но какова бы она ни была, трудно понять, каким образом у световых лучей, если они не состоят из корпускул, могут быть две стороны, постоянно проявляющие силы, каковых нет с других сторон“.

Поляризация явилась большим затруднением на пути развития волновой гипотезы в подлинном смысле, т.-е. гипотезы, основывавшейся на наглядном гидродинамическом представлении. Учение Френеля о поперечных колебаниях эфира встретило резкие гидродинамические возражения Пуассона. Только формальная волновая теория, с волновым уравнением, но без конкретной среды мирно приняла поляризацию как эмпирический принцип.

Ньютон не ошибся, включив поляризацию в число основных первоначальных свойств света. В световом спектре все лучи могут обнаруживать поляризацию, а попытки найти продольные световые волны оказались тщетными.

Если к принципам периодичности, неизменности периодов, дифракции и поляризации добавить эмпирическую скорость света и перенос энергии, принципы учения о свете самом по себе (независимо от действий света на вещество) почти будут исчерпаны.

Ньютон впервые определил самый предмет оптики, обнаружив почти все основные свойства света. Но оставалась нерешенной синтетическая часть задачи. Надо было найти тот высший общий принцип, из которого вытекали бы однозначно все свойства.

Световой луч Ньютона с „приступами“, „полюсами“, с бесконечным многообразием периодов, с особыми притягательными или отталкивательными свойствами нуждался в объединяющем образе или по крайней мере общем математическом выражении. Достичь этого

не удалось и до сих пор. Формальная волновая теория охватила только часть явлений. В другой части господствуют странные квантовые законы. Остается строить гипотезы.

## 6. Корпускулярно-волновая гипотеза Ньютона.

История подтвердила дальновидность Ньютона, когда он осторожно отдал предпочтение верному методу принципов перед гипотезами при изучении света и тяготения. Природа света и природа тяготения остаются непонятными и по сие время. Число возможных механических гипотез в отношении света невелико, это отчетливо знали и в XVII и в XVIII веках. Позволим себе сделать выдержку из „Слова о происхождении света“ Ломоносова, говоренного в 1756 г.:

„Положив жидкую, тончайшую и неосязаемую материю света, о чем ныне уже никто не сомневается, три возможные движения в оной находим, которые действительно есть, или нет, после окажется. Первое движение может быть текущее, или проходное, как Гассенд и Невтон думают, которым эфир (материю света с древними и многими новыми так называю) движется от солнца и от других великих и малых светящих тел во все стороны на подобие реки беспрестанно. Второе движение может в эфире быть зыблющееся по Картезиеву и Гугениву мнению, которым он на подобие весьма мелких и частых волн во все стороны от солнца действует... Третье движение быть может коловратное, когда каждая нечувствительная частица, эфир составляющая, около своего центра, или оси обращается“. Такие гипотезы и возникали в разных видоизменениях с тех пор как человек стал задумываться о природе света. Количественную обработку эти гипотезы получили только в XIX веке.

Для нас теперь очень туманным кажется вывод, сделанный Ньютоном в заключение 13 пунктов его эмпирической доктрины 1671 г.: „Мы признаем тела субстанциями только по их ощущаемым качествам и буде главные качества чего-то найдены, у нас достаточно оснований полагать это нечто также субстанцией“. Но в XVII веке сразу поняли, что Невтон утверждает материальность света, и он подтвердил это в споре с Гуком, указав, однако, гипотетичность своего вывода. Прямолинейность световых лучей, неизменяемость их, притяжения и отталкивания, проявляющиеся по Невтону при диффракции, отражении и проявлении, наконец, позднее, поляризация, которая могла быть для XVII века только проявлением твердой корпускулы, — вот доводы, которые согласно объединялись в образе летящей материальной частицы для Ньютона. Была и некоторая, может быть, не сознаваемая традиция; по „Оптике“, „Началам“ и письмам можно судить, что Невтон был атомистом, хотя в определенной форме атомизм им не высказывался. Учение Эпикура, Лукреция, Гассенди, может

быть, и не в прямой форме, было известно Ньютону. Излагая историю открытия дисперсии, Ньютон, предваряя доктрину, сравнивает световой луч с летящим теннисным мячиком.

Таково возникновение эмиссионной гипотезы. Ньютон остался верен ей до конца, до последнего издания „Оптики“ в 1721 г., но никогда она не заявлялась в утвердительной форме. „Самое большее — это очень вероятное следствие доктрины“ сказано в 1672 г., и это мнение оставалось неизменным. Что оставалось сомнительным в эмиссионной гипотезе для Ньютона — мы не знаем.

Ньютон знал достоинства волнового представления лучше его апологетов Гюйгенса и Гука, об этом можно судить по полемике с Гуком, по мемуару 1675 г. и „Началам“. Основным возражением против нее служила прямолинейность света. Это препятствие удалось устранить до конца только формальной волновой теории Кирхгофа. В мемуаре 1675 г. и в „Оптике“ (вопрос 29) приводятся и другие возражения: полное внутреннее отражение, поляризация и механическая непостижимость эфира.

„Если от такой жидкости нет никакой пользы и она только мешает и ослабляет действия природы (движения светил), то нет никакого основания к ее существованию и, следовательно, ее надо отбросить“. Эфир нашего времени скомпрометирован много больше, чем во времена Ньютона, мы совершенно не знаем и отказываемся понять его свойства, и возражение Ньютона осталось неустранимым.

Но в явлениях периодичности (и диффракции в 1675 г.) Ньютон ясно видел наличие некоторого волнового элемента в световых лучах. В этом пункте волновая гипотеза была наглядной и полезной. И Ньютон создает гипотезу совершенно нового типа, в которой есть и корпускулы и волны. В эфире, заполняющем тела, световые корпускулы вызывают волны, распространяющиеся со скоростью, несколько большей скорости корпускулы. Обгоняя корпускулы, волны подводят к ним то фазу сгущения, то фазу расширения, вызывая приступы чередующихся отражений и прохождений. Гипотеза изложена в мемуаре 1675 г., переведенном здесь, к нему и отсылаем читателя за подробностями.

Гипотеза Ньютона необычайно широка, это типичная „система“ XVII века, в которой сразу объясняется свет, тяготение, электричество, живые процессы, молекулярные явления и пр. Основной агент этой системы эфир — обрисован Ньютоном по образу и подобию реальной жидкости с вязкостью, поверхностным натяжением и пр. Корпускулярно-волновая гипотеза, правда, в более абстрактной и еще менее утвердительной форме, излагается и в „Оптике“.

Гипотезу Ньютона оценило только наше время, по ее принципиальному достоинству — идее компромисса. Последователи Ньютона в XVIII и XIX веке развивали чистую эмиссионную теорию.

Мало кому известно, что схему компромиссной теории света намечал в 1842 г. Лобачевский <sup>1)</sup>. По поводу наблюдения солнечного затмения в Пензе он писал: „Систему волнений нельзя справедливо назвать теорией, а только выражением тех явлений, которые желают объяснить... Теория волнений представляет верно некоторые законы в явлениях света, но не дает еще понятия, в чем существенность заключается“. Формализм волновой теории значительно вырос со времен Лобачевского, и его сомнения имеют еще большие основания. „Говорить о волнах значит основывать все суждение на том, что в строгом смысле не существует, подобно тому, как мы говорим о линиях и поверхностях, тогда как в природе находятся только тела“. Лобачевский предполагает, как и Ньютон, что теорию волнения и истечения следует соединить. „Поток эфира, — пишет он, — встречая препятствия на пути, приходит в волнение, подобно тому, как вода в реке, встретив плотину“... Поступательное движение потока эфира причина нагревания и освещения, его колебания объясняют дифракцию, интерференцию, цвета и поляризацию.

В наше время сочетание волн и корпускул — единственной оставшийся выход в вопросе о природе света. Мы имеем несколько попыток такого соединения, теорию сэра Дж. Дж. Томсона <sup>2)</sup>, теорию де Бройля <sup>3)</sup> и совершенно отвлеченную и формальную теорию Шрёдингера <sup>4)</sup>. Результаты такого сочетания удовлетворительнее, чем у каждой теории порознь, но еще рано говорить об окончательном решении задачи. Незыблемы и прочны попрежнему только принципы Ньютона.

## 7. Эмиссионная гипотеза.

На неподготовленного читателя чтение вопросов „Оптики“ произведет странное впечатление. Одна гипотеза сменяется другой, совсем не схожей. В одном вопросе гипотеза эфира излагается в утвердительном смысле, в другом в отрицательном. Корпускулярно-волновое представление сменяется после отказа от эфира чисто корпускулярным (28 и 29-й вопросы). Ключ к пониманию этих противоречий все тот же: „я не вымышляю гипотез“, или, вернее, „я не буду смешивать домыслы с достоверностями“. Сопоставление противоположных гипотез, одинаково правдоподобных, до некоторой степени насмешка над гипотезами и защита метода принципов.

Но гипотезы имели большое подсобное значение и для самого Ньютона. Первые представления о тяготении, о квадратичном за-

<sup>1)</sup> Н. И. Лобачевский. Полное затмение солнца в Пензе 26 июня 1842. Ученые записки Казанского Университета 1842 г. 3, стр. 74.

<sup>2)</sup> Ср., напр., Sir. J. J. Thomson. The structure of light. Cambridge. 1925.

<sup>3)</sup> См. L. de Broglie. Ondes et mouvements. Paris, 1926.

<sup>4)</sup> См. E. Schrödinger. Abhandlungen zur Wellenmechanik. 1927.

коне возникли на основании гидродинамической гипотезы эфира (письма к Бойлю, мемуар 1675 г.), возникновение идеи поляризации едва ли стало бы возможным без представления о световых корпускулах.

Появление „Начал“ является моментом резкого перелома в истории гипотез Ньютона. До этого времени схема рабочих гипотез Ньютона: частицы материи и эфир (солнце и эфирные вихри вокруг него в тяготении, световые корпускулы и волны в эфире, возбуждаемые ими в оптике и т. д.).

Потрясающий успех „Начал“, получение законов тяготения и системы мира без гипотез из одних принципов механики и эмпирических законов Кеплера заставили отнестись к гипотезам с еще большим скептицизмом, чем раньше. Гипотетический механизм взаимодействия масс удалось заменить строгим формальным понятием центральных сил. Демокритовский мир: атомы, движущиеся в пустоте, сменился сначала атомами в эфире, и наконец формальным представлением об атомах — силовых центрах, притягивающихся или отталкивающихся на расстоянии.

Ньютон обходит в „Началах“ вопрос о возможных причинах тяготения, ограничиваясь фактом и его математической формулировкой: „Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря“. Современники во многих случаях не поняли формализма Ньютона и обвиняли его в введении скрытых, или, как говорили в XVIII веке, „потаенных“ качеств. Блестящую отповедь этим обвинителям дал Котс в предисловии ко 2-му изданию „Начал“: „Я слышу, — писал он, — как некоторые... бормочут о скрытых свойствах. Они постоянно твердят, что тяготение есть скрытое, сокровенное свойство, скрытым же свойствам нет места в философии. На это легко ответить: сокровенны не те причины, коих существование обнаруживается наблюдениями с полнейшей ясностью, а лишь те, самое существование которых неизвестно и ничем не подтверждается. Следовательно тяготение не есть скрытая причина движения небесных тел, ибо явления показывают, что эта причина существует на самом деле. Правильнее признать, что к скрытым причинам прибегают те, кто законы этих движений приписывает неведомо каким вихрям некоторой, чисто воображаемой материи, совершенно непостижимой чувствами“. Обвинение было перевернуто, потаенным качеством оказался эфир. Котс в пылу борьбы и защиты впадал в другую крайность, утверждая, правда, не совсем определенно, первичность и дальнейшую непостижимость тяготения, приписывая центральным силам реальное, а не только формальное значение. Сам Ньютон в этом вопросе был очень осторожен: „Я отнюдь не утверждаю, что тяготение существенно для тел, — писал он в третьем издании „Начал“, — под вро-

жденною силой я разумею единственно только силу инерции“. „Начала“ заканчиваются примечательным абзацем: „Теперь следовало бы кое-что добавить о некотором тончайшем эфире, проникающем все сплошные тела и в них содержащемся, коего силою и действиями частицы тел при весьма малых <sup>1)</sup> расстояниях взаимно притягиваются, а при соприкосновении сцепляются, наэлектризованные тела действуют на большие расстояния, как отталкивая, так и притягивая близкие малые тела, свет испускается, отражается, преломляется, уклоняется и нагревает тела... но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны“. На первый взгляд это место может показаться простым резюме мемуара 1675 г. На самом деле речь идет только о действиях на малые расстояния, т.е. об эфире, сосредоточенном в материи; тяготение в этой схеме не упоминается.

Ученики, вернее последователи Ньютона во многом не поняли его крайней осторожности и грубо превращали формальный принцип центральных сил в гипотезу, создавая из тяготения первичное, далее необъяснимое начало.

Во всяком случае хотя бы и формальная идея центральных сил, связанных с массами, могла быть распространена помимо тяготения на обширный класс явлений, сцепление, капиллярность, химические процессы, электричество и, наконец, оптику. Ньютон дал блестящий эскиз такой универсальной теории в обширном 31-м вопросе „Оптики“. В этой универсальной схеме оставалось место только для чистой корпускулярной гипотезы света. Для волн в ней не было механизма за устранением эфира. Желательность чистой корпускулярной теории вызывалась требованиями стройности и единства новой механики Ньютона, в которой были только атомы, силовые центры в пустоте. Оптика подгонялась под механику, в общую схему „Начал“.

Сам Ньютон беспристрастно и очень коротко изложил чистую корпускулярную гипотезу на ряду с корпускулярно-волновой в вопросах „Оптики“. Процессы излучения, отражения, дифракции света объяснялись как проявления отталкивательных сил на расстоянии между частицами света и материи. Наоборот, в простом и двойном преломлении проявляются взаимные притяжения. Свет может превращаться в материю, а материя в свет, они родственны между собою, нагревание и сопровождающее его свечение результат такого превращения. Несколько причин указывается для объяснения периодических „приступов“. Вращение двухполюсной частицы, похожей на палочный магнит, вполне достаточно для этой цели.

---

<sup>1)</sup> Подчеркнуто нами.

В наше время почти забыли, что теория корпускул была разработана и математически, причем иногда очень детально, в трудах Лапласа, Пуассона, Био, Брюстера, Малю и других.

Ближе всего к концепции ньютоновской механики центральных сил подошел Бошкович. Оптические экскурсы Бошковича разбросаны по его многочисленным книгам и мемуарам. Подробнее всего оптическая теория Бошковича излагается в его „Рассуждении о свете“<sup>1)</sup>. Трудно отыскать в XVIII веке другого столь тонкого аналитика основных понятий физики о пространстве, движении, материи и силах. Рассуждение начинается с анализа понятия прямолинейности света. Бошкович доказывает порочный круг этого определения. Физическое понятие прямолинейности сводится всегда к оптическому определению, и при помощи этого понятия мы желаем обратно судить о прямолинейности луча! Опору понятия прямолинейности по Бошковичу дает только механический принцип инерции. Путь, по кото-

рому движется тело по инерции, и следует называть прямолинейным. Наоборот, совпадение пути света с траекторией инерционного движения свидетельствует по Бошковичу о телесности света.

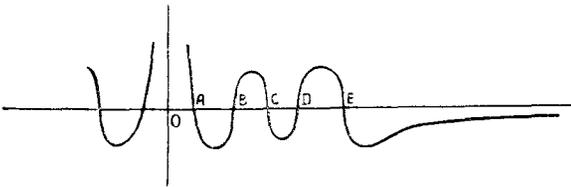


Рис. 5.

Основа теории Бошковича — представление о частицах материи. Это „неделимые и непротяженные точки, стоящие одна от другой на расстоянии“ и взаимодействующие силами ньютоновского типа. Частицы эти неизменны, так как не имеют частей, будучи точками. Они всегда одинаковы, об этом можно судить по неизменности постоянной закона тяготения. Частицы действуют между собою по закону сил, изображенному на рис. 5. По абсциссам отложено расстояние от частицы  $O$ , по ординатам величины сил. Положительные значения ординат соответствуют отталкиванию, отрицательные — притяжению, асимптотически убывающее притяжение в конце кривой изображает ньютоновское тяготение. Понятие центральной силы обобщается, и закон Ньютона является только отрезком универсальной кривой. „Такая форма кривой объясняет наилучшим образом все основные механические свойства тел и в общем и в частности, подвижность, непроницаемость и протяженность тел, равенство действия и противодействия, взаимодействия частиц материи на малых расстояниях, тяготение, сцепление, твердость и текучесть, упругость и мягкость и все оптические свой-

<sup>1)</sup> Dissertatio de lumine auctore P. Rogerio Josapho Boscovich Societatis Jesu. Vindobonae MDCCL XVI. Подробное изложение учения Бошковича можно найти в книге D. Nedelkovich. La philosophie naturelle et relativiste de R. J. Boscovich. Paris, 1919.

ства". В трактате „О живых силах“ Бошкович дает аналитическое выражение своей кривой;

$$y = a + bx^m + cx + dx^r + \dots$$

Световые корпускулы у Бошковича не отличаются ничем от прочих точек центров материи. Только в связи с явлением поляризации, Бошкович указывает возможность дипольного характера корпускулы, сравнивая ее, как и Ньютон, с вращающимся магнитом. Если корпускула-точка находится около положения  $A$  на кривой, она может совершать колебания, ничтожный внешний импульс может перенести ее на крутую отталкивающую часть кривой около центра  $O$ , тогда произойдет излучение — отталкивание частицы. Поглощение — захват корпускулы в области сильного притяжения около центра. Поглощенная корпускула в результате внутренних движений материи может попасть в зону отталкивания и снова излучиться. Таким образом объясняется у Бошковича фосфоресценция. В кривой Бошковича достаточно изгибов, чтобы качественно истолковать и отражение, и преломление, и различные случаи диффракции. Периодичность объясняется, как и у Ньютона, вращательным движением корпускул-диполей, либо некоторыми изменениями в самой среде, „ex mutatione aliqua facta in ipso medio“. как туманно выражается Бошкович. Эта неопределенность понятна, так как изменения среды, о которых может идти речь, ньютоновские волны в эфире, возбуждаемые корпускулами, но эфир в системе Бошковича излишен.

Идея сложной, но единой силовой функции Бошковича в той или иной форме и до сих пор применяется в физике. Лорд Кельвин <sup>1)</sup> пользовался ею в динамике кристаллов.

В учении о твердом теле Борна снова фигурирует частный случай функции Бошковича. Для объяснения стационарных состояний атома и законов спектральных серий сэра Дж. Дж. Томсон недавно предлагал обобщение кулонова закона, схожее с кривой Бошковича <sup>2)</sup>. От поры до времени возникают и универсальные гипотезы совершенно в духе Бошковича, обыкновенно без упоминания его имени <sup>3)</sup>.

Следует, впрочем, помнить, что представление Ньютона было формальным, у Бошковича оно трактуется как реальность и становится гипотезой.

---

История оптики за два с половиною века была и сложной и во многом неожиданной. Но если говорить об основном: свойствах и при-

<sup>1)</sup> Lord Kelvin. Baltimore lectures, p. 667, 1904.

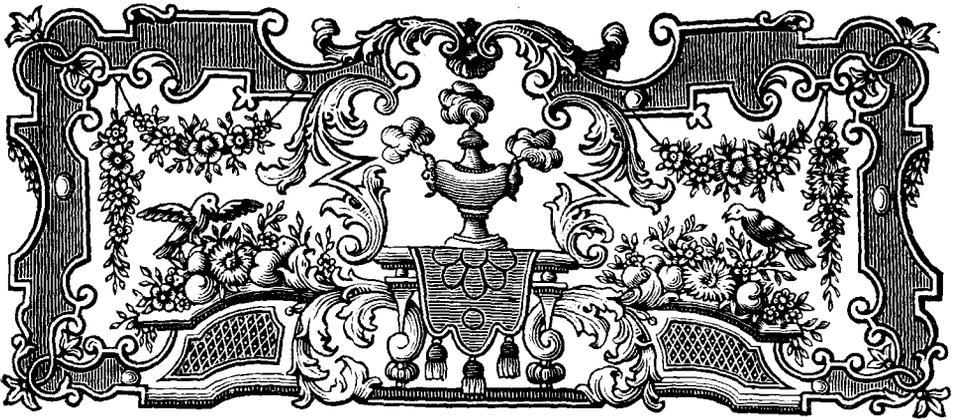
<sup>2)</sup> Sir J. J. Thomson. Phil. Mag. 38, 1919.

<sup>3)</sup> Ср., напр., H. Strache. Die Einheit der Materie. Leipzig. 1919.

роде света, то здесь почти все было предугадано Ньютоном. Он установил все главные свойства света, дал признаки объекта оптики и по этим признакам в XIX и XX веках физикам пришлось включать в оптику все новые и новые области явлений. Он рассмотрел три возможных теории света — волновую, корпускулярную и корпускулярно-волновую, и не удовлетворился ни одной, все три остались гипотезами, т.-е. недоказанными. Принципиально новых гипотез последующие века не придумали и попрежнему остался не решенным вопрос, какая из гипотез верна и верна ли хотя бы одна из них.

Лагранж, который часто называл Ньютона величайшим гением, когда-либо существовавшим, прибавлял: „Он самый счастливый, систему мира можно установить только один раз“. Почти то же приходится повторить и в отношении учения о свете.





## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТОВЫХ АТОМОВ (КВАНТОВ).

*Я. И. Френкель, Ленинград.*

### § 1. МАССА И ВЕС СВЕТОВЫХ АТОМОВ.

В 1905 г., после почти полуторавекового забвения, ньютоновская гипотеза „источения света“ вновь появилась на физической арене. Весьма замечательно, что продолжателем Ньютона и здесь, так же как и в механике (включая сюда и теорию тяготения), явился Эйнштейн. Правда, новая корпускулярная теория света возрождала ньютоновскую теорию в несколько преобразенном виде. А именно, в то время как в теории Ньютона световые атомы трактовались, как частицы некоторой материи и соответственно этому обладали основным принципом материальности — неразрушимостью, в теории Эйнштейна они получили новый совершенно своеобразный смысл — атомов, или „квантов“ энергии. Световые кванты Эйнштейна, в противоположность материальным частицам, могут создаваться и исчезать — за счет механической энергии испускающих их атомов или, так сказать, „в пользу“ механической энергии атомов, их поглощающих. При этом энергия светового кванта ( $\varepsilon$ ) представляет собой меру той величины ( $\nu$ ), которая на языке волновой теории называется частотой света, т. е. числом колебаний в секунду. Соотношение между этими двумя величинами выражается известной формулой

$$\varepsilon = h\nu, \quad (1)$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Теория Ньютона занималась главным образом вопросом о распространении света и, в частности, отражением и преломлением световых лучей на границе двух сред, которые при этом трактовались, как сплошные, лишенные внутреннего строения тела. Эта ма-

крескопическая точка зрения уступила место в теории Эйнштейна микроскопической; в связи с этим, а также в связи с нематериальностью световых атомов, новая оптика занялась, главным образом, вопросом об испускании (создании) и поглощении (уничтожении) этих атомов. Что же касается вопроса об их распространении, то он был разрешен весьма просто: при отсутствии сил тяготения световые кванты движутся прямолинейно и равномерно с предельной скоростью

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек. .}$$

(само собой разумеется, что при этом речь идет о движении в пустоте, от одного атома — испускающего, к другому — поглощающему). В поле тяготения движение светового кванта совпадает с движением материальной частицы, имеющей ту же самую предельную скорость. — Последний принцип вытекает из того факта, что движение какой-либо частицы в поле тяжести не зависит от массы этой частицы. Поэтому представляется вполне естественным допущение, что законы, установленные для движения материальных частиц в поле тяжести, остаются в силе и по отношению к частицам нематериальным, поскольку последние обладают массой. Согласно же общему принципу, установленному Эйнштейном на основании теории относительности, масса и энергия — понятия эквивалентные, так что световой квант, обладающий энергией  $\epsilon$ , обладает вместе с тем массой

$$m = \frac{\epsilon}{c^2}, \quad (2).$$

В Эйнштейновской теории световые атомы, как и у Ньютона, столь же весомы, как и атомы материальные. Эта весомость света проявляется наиболее непосредственным и наглядным образом в отклонении, которое испытывают лучи, испускаемые звездами, при прохождении около солнечного диска.

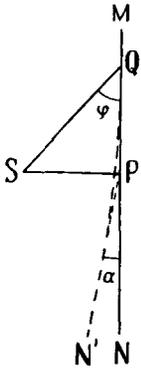


Рис. 1.

Не останавливаясь на строгом выводе этого отклонения, основанном на Эйнштейновской механике и теории тяготения, мы приведем расчет, основанный на теории самого Ньютона.

Представим себе, что при отсутствии сил тяготения световой квант двигался бы равномерно по прямой  $MN$  со скоростью  $c$ . Под влиянием поля тяготения, исходящего из центра  $S$  (солнце), путь кванта искривляется, принимая вид  $MN'$ . Вследствие чрезвычайной малости этого отклонения (угол  $\alpha$ ), можно при вычислении его оперировать с силой, действующей на квант при невозмущенном движении

вдоль прямой  $MN$ . В точке  $Q$  на единицу массы действует сила  $\frac{k}{r^2}$ , где  $k$  — постоянная, а  $r = SQ$ ; поперечная составляющая этой силы (перпендикулярная к  $MN$ ) равна  $\frac{k}{r^2} \sin \varphi$  ( $\varphi = \sphericalangle SQN$ ). Обозначая соответствующую (поперечную) составляющую скорости кванта через  $v$ , имеем равенство:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{k}{r^2} \sin \varphi.$$

Если  $r_0 = SP$  есть ближайшее расстояние световой частицы от притягивающего центра, а  $x = QP$  расстояние ее от точки  $P$ , то из треугольника  $SQP$  получаем:

$$r = \frac{r_0}{\sin \varphi}, \quad -x = r_0 \cot \varphi$$

и далее

$$dx = c dt = \frac{r_0}{\sin^2 \varphi} d\varphi.$$

Предыдущее уравнение превращается, следовательно, в

$$\frac{c \sin^2 \varphi}{r_0} \cdot \frac{dv}{d\varphi} = \frac{k}{r_0^2} \sin^3 \varphi$$

т.-е. в

$$\frac{dv}{d\varphi} = \frac{k}{cr_0} \sin \varphi.$$

Полная величина поперечной скорости, приобретаемой световой частицей на всем ее пути  $MN'$  (или  $MN$ ), получается интегрированием правой части этого уравнения от  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \pi$ . Таким образом, окончательно получаем  $v = \frac{2k}{cr_0}$ , и для углового отклонения

$$\alpha = \frac{v}{c} = \frac{2k}{c^2 r_0}.$$

На самом деле, отклонение световых лучей оказывается как в теории, так и на опыте — вдвое бóльшим. Предыдущая формула дает для него во всяком случае правильный порядок величины и надлежащую зависимость от расстояния  $r_0$ .

## § 2. ЭНЕРГИЯ И КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ СВЕТОВЫХ КВАНТОВ И ВОЛН.

В механике Ньютона масса считалась основным признаком материи, неизменным свойством всякой материальной частицы. Резуль-

татом этого представления явилось весьма распространенное — даже поныне — отождествление понятий „материи“ и массы. В механике Эйнштейна эти понятия так сказать огорвались друг от друга, при чем понятие массы оказалось непосредственно связанным не с понятием материи, но с понятием энергии, согласно формуле (2). В случае элементарных частиц материи — электронов — роль массы, как основного „инвариантного“ признака материи, перешла к электрическому заряду. Впрочем, наряду с последним стала так называемая покоящаяся масса  $m_0$ , т.е. масса частицы в состоянии покоя. Масса частицы, движущейся со скоростью  $v$  ( $< c$ ), выражается через эту „покоющуюся“ массу формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

Соответственно этому для энергии  $\varepsilon = mc^2$  получается выражение, которое при малости  $v$  в сравнении с  $c$  принимает вид

$$c^2 m = c^2 m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2,$$

где  $\frac{1}{2} m_0 v^2$  представляет собой обычную кинетическую энергию частицы (в механике Ньютона), а  $c^2 m_0$  ее „внутреннюю энергию“, происхождение и сущность которой остаются покамест гадательными.

Необходимо отметить, что масса, определяемая формулой (3), трактуется в теории относительности не как отношение между силой ( $F'$ ) и ускорением  $\left(\frac{d\vec{v}}{dt}\right)$ , но как коэффициент при скорости в выражении количества движения частицы

$$\vec{g} = m\vec{v}; \quad (3a)$$

так что уравнение движения имеет вид  $d(\vec{mv}) = \vec{F}$ , а не  $m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}$ , как в механике Ньютона. Правда, второй закон Ньютона в „Началах“ текстуально выражен именно в первой форме, но фактически эта значительно более широкая формулировка им никогда не применялась.

Если в формуле (3) положить  $v = c$  и  $m_0 = 0$ , то она превращается в неопределенность вида  $m = \frac{0}{0}$ . Это обстоятельство показывает, что с точки зрения теории относительности вполне мыслимо существование частиц, движущихся со скоростью света и имеющих

тем не менее конечную массу и, следовательно, конечную энергию  $\epsilon$ . Подобными частицами и являются световые кванты. В отличие от обыкновенных материальных частиц они не обладают покоящейся массой (а также лишены заряда). Они существуют постольку, поскольку движутся со скоростью  $c$ . Остановка означает для них исчезновение. Не обладая неразрушимостью, характеризующей частицы материи, они должны трактоваться поэтому как частицы нематериальные — как атомы энергии.

Применяя это представление к световым квантам, мы должны, очевидно, наделить их, на ряду с энергией (1) и массой (2), еще количеством движения

$$\vec{g} = m\vec{c} = \frac{\vec{\epsilon}}{c} = \frac{\vec{h}}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  — величина, которая на языке волновой оптики означает длину волны<sup>1)</sup>.

Соотношение (4) находится в полном соответствии не только с механикой Эйнштейна, но и с электродинамикой, точнее, с электромагнитной теорией света. В классической электродинамике энергия трактуется как некоторая непрерывная субстанция, разлитая в пространстве, с объемной плотностью  $\eta = \frac{1}{8\pi}(E^2 + H^2)$ , где  $E$  — электрическое, а  $H$  — магнитное напряжение. Этому представлению об энергии соответствует представление о количестве движения, объемная плотность которого определяется векторным произведением  $E$  и  $H$  по формуле  $\vec{g} = \frac{1}{4\pi c} \vec{E} \times \vec{H}$ . При этом оказывается необходимым дополнить понятие об энергии понятием о потоке энергии, определяемым вектором Пойнтинга  $\vec{S} = \frac{c}{4\pi} \vec{E} \times \vec{H}$ . Сравнение последнего с вектором  $\vec{g}$  приводит к соотношению  $\vec{g} = \frac{S}{c^2}$ , которое в известном смысле соответствует соотношению (2) между энергией и массой. Это соответствие становится полным в том случае, если поток энергии может быть представлен в виде  $\vec{S} = \vec{\eta}c$ , где  $\vec{c}$  — вектор, численно равный скорости света. В таком случае, для плотности электромагнитного количества движения получается формула  $\vec{g} = \frac{\eta}{c^2} \vec{c}$ , из которой явствует, что величину  $\mu = \frac{\eta}{c^2}$  следует трактовать как обыкновенную

1) Стрелки над буквами обозначают соответствующие векторные величины.

плотность, т.е. плотность массы. — На самом деле соотношение

$$\vec{S} = \vec{\tau} c$$

в точности выполняется лишь для плоских электромагнитных волн (или, приблизительно, на больших расстояниях от источников поля).

А именно, в этом случае, как известно, векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  численно равны и перпендикулярны как друг к другу, так и к направлению распространения волн. Характеризуя это направление (соответствующее векторному произведению  $\vec{E} \times \vec{H}$ ) единичным вектором  $\vec{n}$ , мы имеем:

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} \vec{E} \times \vec{H} = \frac{c}{4\pi} E^2 \vec{n} = \frac{c}{8\pi} (E^2 + H^2) \vec{n} = \frac{E^2 + H^2}{8\pi} \vec{c},$$

где  $\vec{c} = c\vec{n}$ , т.е.

$$\vec{S} = \vec{\tau} c$$

Таким образом, поскольку дело касается распространения света (в пустоте), различие между электромагнитной (волновой) теорией и квантовой теорией Эйнштейна сводится к тому, что в первой световая энергия представляется распределенной в пространстве непрерывно, а во второй — сконцентрированной практически в отдельных точках (или весьма малых элементах объема).

Это различие имеет двойное значение. Во-первых, оно означает, что атомы могут терять энергию (при излучении света) или приобретать ее (при поглощении) лишь определенными конечными порциями, а не непрерывно, как это предполагала классическая теория. Во-вторых, из него следует, что при излучении света, так же как и при его поглощении, мы имеем дело с направленным актом (Эйнштейновское „Nadelstrahlung“). Применяя к этому акту закон сохранения количества движения, мы приходим к выводу, что при испускании света частоты  $\nu$  в виде кванта с энергией  $h\nu$  и количеством движения  $\frac{h\nu}{c}$  атом должен испытывать толчок в обратную сторону, получая

при этом количество движения  $-\frac{h\nu}{c}$  („световая отдача“). Наоборот, при поглощении указанного кванта, количество движения последнего, наравне с его энергией, сообщается соответствующему атому.

Эти представления необходимо дополнить еще следующим, основанным на аналогии между квантовой и волновой теориями. Согласно последней поглощение света происходит следующим образом. Электрическая сила падающих волн вызывает в атомах колебательное движение электронов. Это колебательное движение вызывает в свою очередь

вторичные электромагнитные волны. Если энергия атома возрастает, т.-е. амплитуда вынужденных электронных колебаний увеличивается, то вторичные электрические силы оказываются противоположными первичным и ослабляют их. При этом атом испытывает положительное световое давление, направленное в сторону распространения волн. Если, наоборот, энергия атома убывает, т.-е. амплитуда электронных колебаний уменьшается, то вторичные электрические силы совпадают по направлению с первичными и их увеличивают: при этом атом испытывает отрицательное световое давление, противоположное направлению распространения волн. Это соотношение непосредственно вытекает из формулы  $\vec{g} = \frac{\vec{S}}{c^2}$ , связывающей поток энергии с плотностью электромагнитного количества движения. Оно было удержано Эйнштейном и в его квантовой теории света. А именно, на ряду с обыкновенным поглощением кванта, он ввел в рассмотрение так называемое отрицательное поглощение или вынужденное испускание, при котором квант света не поглощается атомом, но выходит из него вкупе с другим квантом той же величины и направления, испущенным самим атомом. При этом последний, так же как и при обыкновенном „спонтанном“ излучении, испытывает толчок в сторону, обратную испусканию кванта, получая количество движения  $-\frac{h\nu}{c}$ .

§ 3. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ СВЕТА.

### § 3. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ СВЕТА.

Нетрудно показать, что эти представления в связи с соотношением (1) приведут к тем же формулам для эффекта Допплера, как и волновая теория света.

Представим себе атом с массой  $M$ , движущейся по отношению к рассматриваемой координатной системе со скоростью  $\vec{v}$  (последнюю мы будем предполагать малой в сравнении со скоростью света). Предположим, что атом обладает некоторой внутренней энергией  $\Sigma_0$ , которую он, оставаясь в покое, должен был бы излучить в виде кванта с частотой  $\nu_0 = \frac{\epsilon_0}{h}$ . На ряду с этой внутренней энергией он обладает кинетической энергией  $\frac{1}{2} Mv^2$ . Испускание света связано не только с потерей внутренней энергии, но также с изменением кинетической. Таким образом частота испускаемого кванта  $\nu$  должна, вообще говоря, отличаться от величины  $\nu_0$ . Обозначая скорость атома после испускания через  $v'$ , имеем на основании закона сохранения энергии

$$\frac{1}{2} Mv^2 + \epsilon_0 = \frac{1}{2} Mv'^2 + h\nu.$$

С другой стороны, из закона сохранения количества движения вытекает равенство:

$$\vec{M}v = \vec{M}v' + \frac{\vec{h}\nu}{c}.$$

Комбинируя его с предыдущим и замечая, что

$$v^2 - v_0^2 = (\vec{v} + \vec{v}')(\vec{v} - \vec{v}'),$$

получаем:

$$\frac{1}{2}(\vec{v} + \vec{v}') \frac{\vec{h}\nu}{c} = h\nu - h\nu_0$$

или, так как

$$\frac{1}{2}(\vec{v} + \vec{v}') = \vec{v} - \frac{1}{2}(\vec{v} - \vec{v}') = \vec{v} - \frac{1}{2M} \frac{\vec{h}\nu}{c},$$

$$\frac{v \cdot \vec{h}\nu}{c} - \frac{1}{2M} \left( \frac{\vec{h}\nu}{c} \right)^2 = h\nu - h\nu_0$$

Обозначая угол между направлением начальной скорости и направлением выброшенного кванта через  $\theta$ , получаем окончательно для определения зависимости  $\nu$  от  $\theta$  следующее уравнение:

$$\nu_0 = \nu \left( 1 - \frac{v}{c} \cos \varphi + \frac{h\nu}{2Mc^2} \right), \quad (5)$$

которое в первом приближении (если пренебречь весьма малым при обычных условиях членом  $\frac{h\nu}{Mc^2}$ ) превращается в известное уравнение Допплера для частоты света, испускаемого движущимся источником. — Совершенно аналогичным образом можно вычислить эффект Допплера для частоты света, поглощаемого движущимся атомом. Для этого нужно лишь в предыдущем расчете рассматривать  $\nu$ , как частоту падающего света,  $\vec{v}'$  как начальную,  $\vec{v}$  как конечную скорость, и, наконец, угол  $\varphi$  между  $v$  и  $\frac{h\nu}{c}$  заменить углом  $\varphi'$  между  $\vec{v}$

и  $\frac{\vec{h}\nu}{c}$ . Полагая во этом случае

$$\frac{1}{2}(\vec{v} + \vec{v}') = \vec{v}' + \frac{1}{2}(\vec{v} - \vec{v}') = v' + \frac{1}{2M} \frac{h\nu}{c},$$

получаем

$$\vec{v}' \cdot \frac{h\nu'}{c} + \frac{1}{2M} \left( \frac{h\nu}{c} \right)^2 = h\nu - h\nu_0,$$

т.-е. вместо (5)

$$\nu_0 = \nu \left( 1 - \frac{v'}{c} \cos \varphi' - \frac{h\nu}{2Mc^2} \right) \quad (5a).$$

Поглощение света может быть связано с расщеплением атома на две самостоятельно движущиеся части: положительный ион и отрицательный электрон (фотоэлектрический эффект). Считая атом неподвижным, т.-е. пренебрегая явлением Доплера, мы получаем в этом случае известное уравнение Эйнштейна для фотоэлектрического эффекта:

$$h\nu = \frac{1}{2} m v^2 + \varepsilon,$$

где  $m$  — масса,  $v$  — скорость фотоэлектрона, а  $\varepsilon$  — работа, необходимая для его вырывания из атома. При этом  $v$  предполагается малым в сравнении с  $c$ , точное выражение для кинетической энергии имеет вид:

$$c^2(m - m_0) = c^2 m_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

В случае действия света на свободный электрон, т.-е. систему, внутренняя энергия которой ( $m_0 c^2$ ) остается неизменной, полное исчезновение кванта, т.-е. превращение его энергии и количества движения нацело в энергию и количество движения электрона, оказывается невозможным. Так, например, если считать электрон до столкновения с квантом неподвижным, то после столкновения он должен был бы получить кинетическую энергию  $c^2(m - m_0) = h\nu$  и количество движения  $mv = \frac{h\nu}{c}$ . Отсюда вытекало бы соотношение

$$\frac{v}{c} = \frac{m - m_0}{m} = 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

то-есть

$$\left( 1 - \frac{v}{c} \right)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}.$$

Это уравнение имеет два решения  $v = c$  и  $v = 0$ , оба они очевидно лишены физического смысла.

В рассматриваемом случае, как показали Комптон и Дебай, происходит рассеяние света; отдав часть своей энергии и своего количества движения электрону, квант как бы отскакивает от него, имея при этом несколько меньшую частоту ( $\nu'$ ) и новое направление движения. Это, связанное с рассеянием света свободными электронами

уменьшение частоты колебаний и составляет сущность эффекта Комптона. Заметим, что подобное понижение частоты происходит лишь в том случае, если электрон находится первоначально в покое; в общем случае оно осложняется явлением Доплера и может даже при известных условиях замениться увеличением частоты рассеянного кванта.

Обозначим скорость электрона до „столкновения“ с квантом через  $v_1 = c\beta_1$ , а после столкновения через  $v_2 = c\beta_2$ ; частоты падающего рассеянного кванта обозначим через  $\nu_1$  и  $\nu_2$ .

Предположим далее, что первоначальное направление кванта совпадает с осью  $X$ , косинусы углов, образуемых рассеянным квантом с прямоугольными осями  $X, Y, Z$ , обозначим через  $p, q, r$ , а соответствующие косинусы для векторов  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  через  $a_1, b_1, c_1$  и  $a_2, b_2, c_2$ .

В таком случае закон сохранения энергии выразится уравнением

$$h\nu_1 + \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta_1^2}} = h\nu_2 + \frac{m_0 c'^2}{\sqrt{1 - \beta_2^2}},$$

а закон сохранения количества движения уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{h\nu_1}{c} + \frac{m_0 \beta_1 c}{\sqrt{1 - \beta_1^2}} a_1 &= \frac{h\nu_2}{c} p + \frac{m_0 \beta_2 c}{\sqrt{1 - \beta_2^2}} a_2 \\ \frac{m_0 \beta_1 c}{\sqrt{1 - \beta_1^2}} b_1 &= \frac{h\nu_2}{c} q + \frac{m_0 \beta_2 c}{\sqrt{1 - \beta_2^2}} b_2 \\ \frac{m_0 \beta_1 c}{\sqrt{1 - \beta_1^2}} c_1 &= \frac{h\nu_2}{c} r + \frac{m_0 \beta_2 c}{\sqrt{1 - \beta_2^2}} c_2 \end{aligned}$$

Если из этих уравнений исключить косинусы  $a_2, b_2, c_2$  (пользуясь соотношением  $a_2^2 + b_2^2 + c_2^2 = 1$ ), а также величину  $\beta_2$ , и ввести обозначения  $a_1 = \cos \theta_1$ ,  $p = \cos \theta$  и  $a_1 p + b_1 q + c_1 r = \cos \varphi$  ( $\varphi = \sphericalangle$  между  $\frac{h\nu_2}{c}$  и  $\vec{v}_1$ ), то получается следующая формула<sup>1)</sup>:

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{1 - \beta_1 \cos \theta_1}{1 - \beta_1 \cos \varphi + 2\alpha \sqrt{1 - \beta_1^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}}, \quad (6)$$

где для краткости положено

$$\alpha = \frac{h\nu_1}{m_0 c^2}.$$

<sup>1)</sup> См. L. De Broglie — Thèse; Annales de Physique, p. 101, 1925.

В случае покоящегося электрона ( $\beta_1 = 0$ ) предыдущая формула превращается в известную формулу Дебая — Комптона:

$$\nu_2 = \frac{\nu_1}{1 + 2\alpha \sin^2 \frac{\theta}{2}}. \quad (6a)$$

Пренебрегая величиной  $\alpha$ , которая характеризует эффект Комптона, мы получаем изменение частоты, обусловленное двойным эффектом Доплера (ибо электрон как бы одновременно поглощает свет и вновь его испускает):

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{1 - \beta_1 \cos \theta_1}{1 - \beta_1 \cos \varphi}. \quad (6b)$$

Мы должны упомянуть еще об одном применении Эйнштейновской теории излучения, а именно о применении ее к вопросу о тепловом равновесии между материей и излучением. Взаимодействие между атомами материи и атомами света должно быть таково, чтобы первые даже при отсутствии столкновений между собой имели в среднем кинетическую энергию  $\frac{3}{2}kT$ , где  $T$  — абсолютная температура.

Действительно, расчет, который мы не имеем возможности воспроизвести в этой статье<sup>2)</sup>, показывает, что толчки, испытываемые атомами при испускании или поглощении световых квантов, сообщают им кинетическую энергию вышеуказанной величины. При этом необходимо исходить из спектрального распределения световой энергии, определяемого известной формулой Планка.

#### § 4. Поляризация света и электромагнитный момент световых квантов.

Мы видели выше (§ 2), что механические свойства световых квантов — энергия, масса, количество движения — присущи также и электромагнитным волнам, которые они в известном смысле заменяют. Однако эти механические величины являются, так сказать, лишь вторичными, „производными“ свойствами электромагнитных волн; основными величинами, которыми эти волны характеризуются, являются электрическое и магнитное напряжение. Что же соответствует этим напряжениям в случае световых квантов? Нетрудно видеть, что этот вопрос может быть перефразирован следующим образом: какими свойствами необходимо наделить кванты для того, чтобы они могли выполнять функции поляризованных световых лучей?

<sup>2)</sup> См. замечательную работу Эйнштейна — Phys. ZS 1917, p. 127.

Представим себе сначала, что мы имеем дело с прямолинейно поляризованным светом. В этом случае, согласно волновой теории, электрический и магнитный вектор колеблются в двух неизменных направлениях, перпендикулярных как друг к другу, так и к самим лучам. Эти направления могут быть обнаружены экспериментально, например, по направлению, в котором выбрасываются фотоэлектроны; как известно, максимальное количество последних приходится на направление, соответствующее электрическому вектору. Если мы хотим трактовать фотоэлектрический эффект как результат поглощения световых квантов, мы должны наделить последние некоторым векторным свойством, соответствующим электрическому напряжению. Простейшим свойством этого рода является электрический момент. Естественно поэтому предположить, что световой квант ведет себя как элементарный диполь, т.-е. совокупность двух электрических зарядов противоположного знака<sup>1)</sup>. Электрический момент кванта, характеризующего прямолинейно поляризованный свет, мы будем трактовать как постоянный вектор, а не как колеблющуюся величину, подобно электрическому напряжению, которое, или вернее амплитуда которого, им, так сказать, „представляется“. Численное значение этого вектора ( $p$ ) мы оставим покамест неопределенным.

Точно также магнитное напряжение световой волны может быть „представлено“ в квантовой теории света магнитным моментом кванта ( $\mu$ ), перпендикулярным к электрическому и численно ему равным. Оба вектора  $\vec{p}$  и  $\vec{\mu}$  должны быть перпендикулярны к направлению движения кванта (при чем это движение происходит в ту сторону, куда движется правый винт, вращаемый от  $\vec{p}$  к  $\vec{\mu}$ ).

Оставляя в стороне вопрос о том, каким образом наличие электрического и магнитного момента сообщает световому кванту способность к направленному (по отношению к одному из них) действию на материальные частицы, мы попытаемся вкратце осветить другой — чисто-формальный вопрос — о совместимости предыдущего представления с требованиями теории относительности.

В теории относительности электрическое и магнитное напряжение объединяются в единую четырехмерную величину с 6 различными составляющими („Sechservektor“)  $F_{\alpha\beta} = -F_{\beta\alpha}$  ( $\alpha, \beta = 1, 2, 3, 4$ ) по следующей схеме:

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c} F_{23} & F_{31} & F_{12} & F_{14} & F_{24} & F_{34} \\ H_1 & H_2 & H_3 & -iE_1 & -iE_2 & -iE_3 \end{array},$$

где значки 1, 2, 3 относятся к трем взаимно перпендикулярным пространственным осям, а 4 — к оси времени (умноженного на  $C\sqrt{-1}$ ). При этом электрическое и магнитное напряжение не являются сами

<sup>1)</sup> Эта задача была формулирована проф. П. Эрнфестом.

по себе инвариантными величинами; они зависят от выбора координатной системы, в которой определяются. Предположим, например, что в некоторой „покоющейся“ координатной системе  $K^0$  магнитное напряжение равно нулю, а электрическое  $\vec{E}^0$ . Рассматривая то же самое поле с точки зрения другой системы  $K$ , по отношению к которой  $K^0$  движется с постоянной скоростью  $\vec{v}$ , мы получаем, наряду с некоторым электрическим полем  $\vec{E}$ , слегка отличным от  $E^0$ , магнитное поле, определяемое формулой

$$\vec{H} = \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{E}.$$

В первом приближении, т.е. с точностью до величины порядка  $\frac{v}{c}$ ,  $E$  совпадает при этом с  $E^0$ .

Если, наоборот, в системе  $K^0$  магнитное напряжение  $H^0$  отлично, а электрическое равно нулю, то в движущейся системе  $K$  мы получаем

$$\vec{E} = -\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{H}$$

при  $\vec{H}$ , совпадающем в первом приближении с  $H^0$ .

Мы видим, следовательно, что электрическое и магнитное напряжение являются некоторой реальностью не сами по себе, но лишь взятые вместе: одно из них не может существовать без другого.

То же самое относится к тем величинам — электрическому и магнитному моменту, — которые в случае атомной теории света „представляют“ собой электрическое и магнитное напряжение. Электрический и магнитный момент не образуют самостоятельных реальностей, но имеют определенный инвариантный смысл лишь вместе взятые. Если в покоющейся системе  $K^0$  рассматриваемая частица представляет собой электрический диполь с моментом  $\vec{p}^0$ , то с точки зрения движущейся системы она ведет себя, как комбинация электрического диполя с (приблизительно) тем же моментом  $\vec{p}$  и магнитного диполя с моментом

$$\vec{\mu} = -\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{p}. \quad (7)$$

Наоборот, в случае если в системе  $K^0$  частица ведет себя, как магнитный диполь с моментом  $\vec{\mu}^0$ , то в системе  $K$  она приобретает, кроме того, свойства электрического диполя с моментом

$$\vec{p} = +\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{\mu}, \quad (7a)$$

где  $\vec{\mu} \subseteq \vec{\mu}^0$ .

Представим себе теперь, что рассматриваемая частица движется со скоростью  $v$ . В этом случае соотношения (7) и (7 а), — вообще говоря, т.-е. при  $v < c$ , не совместимые друг с другом, — могут быть выполнены одновременно. Для этого, как нетрудно убедиться, необходимо и достаточно, чтобы векторы  $\vec{p}$  и  $\vec{\mu}$  были численно равны друг другу, взаимно перпендикулярны и перпендикулярны к направлению движения. Мы получаем, таким образом, основываясь на теории относительности, то самое соотношение между электрическим и магнитным моментом световых квантов, которое необходимо для того, чтобы обеспечить соответствие между ними и волнами электромагнитной теории света.

Мы не будем углубляться здесь в исследование этого вопроса. Заметим лишь, что электрически поляризованный свет может быть представлен квантами с комплексными значениями векторов  $\vec{p}$  и  $\vec{\mu}$ . Во всяком случае, можно думать, что все свойства света, не связанные с его колебательным характером, могут быть интерпретированы в терминах теории световых квантов. Что же касается колебательных свойств, т.-е. характеризующей свет периодичности во времени и пространстве, то здесь квантовая теория является, по видимому, бессильной и должна быть дополнена волновыми представлениями, как это делается в теории Л. де Бройля, или даже, быть совершенно заменена ими, в соответствии с волновой механикой Шредингера.



*ОПТИЧЕСКИЕ МЕМУАРЫ*

*ИСААКА НЬЮТОНА*





## ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРЕВОДУ МЕМУАРОВ.

Вспомнить подлинные мысли и слова Ньютона — лучший способ почтить память величайшего естествоиспытателя. Писания Ньютона и книги о Ньютоне основательно забыты, о них помнят только немногие, главным образом историки науки. Глубоко различна судьба великого поэта и великого ученого. Мы помним каждое слово Горация, Шекспира, Пушкина, комментирована каждая строка, малейший вариант из литературного наследия, и поэт прав, предсказывая

Так! Весь я не умру; но часть меня большая,  
От тлена убежав, по смерти сгнет жить.

Совсем иное в науке Единственное большое собрание творения Ньютона издано в XVIII веке и с тех пор не переиздавалось, нового же собрания нет совершенно, письма Ньютона разбросаны по разным редким изданиям, архив Ньютона в значительной части не издан. А что помнит физик, астроном и математик во многих случаях (если не в большинстве) о Ньютоне? Законы механики и тяготения, опыты с призмой, интерференционные кольца, что-то о спорах Ньютона с Лейбницем и вольтеровский анекдот о яблоке. Вместо живого образа небывалой творческой напряженности — примитивная схема элементарного учебника. Стага ученого, осуществляющаяся главным образом предисловием „закон такого-то“, — только жалкая тень живой славы поэта.

Причины этого неизбежны, их много, но главная — стремительное развитие науки. В науке мы живем настоящим, передовые линии, особенно в наши дни, непрерывно переносятся, а трофеи тыла остаются неразборчивыми в тиши и пыли библиотек. В 1761 г. Ламберт писал Эйлеру (по поводу своей „Фотометрии“), „Если я пользуюсь иногда ньютоновскими терминами, то это, примерно, то же, что применение системы Птолемея в сферической астрономии“, а позднее Гете называл „Оптику“ Ньютона „старым гнездом крыс и сов“. Но в истории науки совершаются иногда неожиданные вещи. Оптика Ньютона для нас в эпоху теории световых квантов и „волновой механики“ значительно ближе, чем оптика Эйлера, не говоря уже о Гете. Знакомство с ньютоновской оптикой имеет интерес не только исторический, но и современный.

Мы выбрали для перевода два совершенно разнохарактерных мемуара Ньютона „Теория света и цветов“ — первое печатное сообщение Ньютона. Эта теория, в которой „домыслы не смешиваются с достоверностями“, останется навсегда живой и непоколебленной, сохраняя свою роль в науке, как механика и термодинамика, чтобы с наукой ни случилось. Со стороны формы — это прекраснейший образец простого, ясного, краткого и до конца открытого изложения. „Этот мемуар, — пишет Розенбергер, — совершенно своеобразен, другого подобного Ньютон не писал. Он полон любезной откровенности, живо передает радость открытия, подробно изла-

гает все неудачные предположения и медленное достижение истины... Никогда впоследствии не рассказывал Ньютон столь непринужденно развитие своих открытий“.

Совсем иной характер второго мемуара. Это гипотеза о природе света, написанная тем, кто сказал „*hypotheses non fingo*“. В противоположность „достоверности“ первого мемуара, Ньютон просит „не смешивать гипотезы с его другими рассуждениями или судить об их достоверности по гипотезе“, он даже не считает себя обязанным отвечать на возражения против этого мемуара. Мемуар не был напечатан при жизни Ньютона, не вошел в собрание его оптических сочинений \*) и напечатан только в 1752 г. в Истории Королевского Общества, откуда и сделан перевод. Здесь излагается всеобъемлющая гипотеза эфира, объясняющая тяготение, электричество, свет, животные процессы и пр., здесь же дан набросок компромиссной корпускулярно-волновой теории света, представляющей по своей основной мысли большой интерес для современника.

Различные, главным образом исторические, сведения, поясняющие мемуары, собраны в примечаниях, помещенных в конце текста.

Переводить Ньютона не легко, приходится искать средней линии между подстрочным переводом и нежелательной модернизацией, но, говоря словами одного переводчика XVIII века: „Самым худым переводом гораздо больше можно пользоваться, нежели ничем“.

*С. Вавилов.*

## 1. НОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА И ЦВЕТОВ <sup>1)</sup>\*\*) \*\*)

Сэр, выполняя мое недавнее обещание, я без дальнейших церемоний начну с того, что в начале 1666 года (в это время я занимался шлифовкой оптических стекол иных форм, чем сферические) я достал треугольную стеклянную призму, чтобы с нею произвести опыты над знаменитым явлением цветов <sup>2)</sup>. Для этой цели, 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 удлинненной формой: в соответствии с известными мне законами преломления я ожидал, что форма будет круглой. По бокам цвета ограничивались прямыми линиями, на концах же убывание света было столь постепенно, что трудно было определить фигуру; она казалась, однако, полукруглой.

Сравнивая длину окрашенного спектра с шириною, я нашел, что она примерно в пять раз больше. Диспропорция была так необычна, что возбудила во мне более чем простое любопытство узнать отчего это происходит. Едва ли можно было думать, что различная толщина

<sup>1)</sup> *Isaac Newtoni optices libri tres; accedunt ejusdem Lectiones Opticae et opuscula omnia ad lucem et colores pertinentia sumpta ex Transactionibus Philosophicis. Patavii MDCCXLIX.*

\*\* Ссылки относятся к примечаниям на стр. 58 и след.

стекла или граница с тенью или темнотою производят на свет такое влияние, что получается указанный эффект <sup>3)</sup>. Я считал, однако, нужным сначала обследовать эти обстоятельства и попробовал, что произойдет при пропускании света через части стекла различных толщин или через отверстия в окне различных размеров, или при помещении призмы снаружи, так что свет проходил и преломлялся в ней, прежде чем ограничивался отверстием. Но я нашел, что ни одно из этих обстоятельств не существенно. Вид цветов во всех этих случаях оставался тем же самым.

Тогда я заподозрил, не расширяются ли цвета благодаря каким-нибудь неровностям в стекле или случайным неправильностям. Для проверки этого я взял другую призму, подобную первой, и поместил ее так, что свет, проходящий через обе призмы, может преломляться противоположным образом, вторая призма возвращает свет на тот путь, от которого он был отклонен первой. Таким способом думал я, правильные действия первой призмы будут уничтожены второй, неправильные же увеличатся благодаря увеличению числа преломлений. На самом деле произошло то, что свет, рассеиваемый первой призмой в удлиненную форму, приводился второй призмой к круглой форме настолько правильно, как будто бы он совсем не проходил через призмы. Итак, какова бы ни была причина удлинения, она не объясняется случайными неправильностями.

Далее я перешел к более критическому рассмотрению того, что может произвести различие падения лучей, идущих от различных частей солнца. Для этой цели я измерил различные линии и углы, соответствующие изображению. Расстояние изображения от отверстия было 22 фута, его наибольшая длина  $13\frac{1}{4}$  дюймов, ширина  $2\frac{5}{8}$ ; диаметр отверстия  $\frac{1}{4}$  дюйма; угол, образуемый лучами, идущими к середине изображения, и линией, по которой пошли бы лучи без преломления, был  $44^{\circ} 56'$ , вертикальный угол призмы равнялся  $63^{\circ} 12'$ . Преломления по обеим сторонам призмы, т.-е. со стороны падающих и выходящих лучей, были одинаковы, насколько я мог это сделать, и, следовательно, равнялись приблизительно  $54^{\circ} 4'$ . Лучи падали на стену перпендикулярно. Если вычесть диаметр отверстия из длины и ширины изображения, то останется 13 дюймов длины и  $2\frac{3}{8}$  дюйма ширины, соответствующих лучам, проходящим через центр отверстия. Следовательно, угол от отверстия, стягиваемый указанной шириной, был приблизительно  $31'$ , соответственно диаметру солнца; но угол, стягиваемый длиной отверстия, был больше чем в пять раз солнечного диаметра, именно  $2^{\circ} 49'$ .

Сделав эти наблюдения, я прежде всего вычислил на основании их преломляющую силу стекла и нашел, что она измеряется отношением синусов 20 к 31. Из этого отношения я вычислил далее преломления двух лучей, идущих от противоположных частей солнечного

диска и отличающихся на  $31'$  по отлогости падения; я нашел, что выходящие лучи должны составлять угол около  $31'$ , как и до падения. Этот расчет был основан на гипотезе пропорциональности синусов падения и преломления. Однако, на основании собственных опытов я не мог представить себе, что эта гипотеза настолько ошибочна, что из нее получается угол в  $31'$ , хотя в действительности он равен  $2^\circ 49'$ . Мое любопытство заставило меня снова взяться за эту изму. Поместив ее у окна, как и раньше, я наблюдал, что при небольшом поворачивании ее вокруг оси туда и сюда, при чем наклон ее к свету менялся более чем на 4—5 градусов, цвета заметно не смещались со своего места на стене. Следовательно, при такой вариации угла падения величина преломления заметно не менялась. Из этого опыта, а также на основании предыдущего расчета было очевидно, что различие падения лучей, идущих от различных частей солнца, не может вызвать после их пересечения расхождения на угол заметно больший, чем тот, под которым они ранее сходились; величина же этого угла не больше 31—32 минут; поэтому остается найти другую причину, по которой получался бы угол в  $2^\circ 49'$  4).

Тогда я стал подозревать, не движутся ли лучи после прохождения их через призму по кривым линиям, стремясь соответственно большей или меньшей кривизне к различным частям стены. Это подозрение усилилось, когда я вспомнил, что мне часто приходилось видеть, как теннисный мяч при косом ударе ракетки описывает подобную кривую линию. Ибо мячу сообщается при этом как круговое, так и поступательное движение. Та сторона мяча, где оба движения согласуются, должна с большею силой давить и толкать прилежащий воздух, чем другая сторона и, следовательно, будет возбуждать пропорционально большее сопротивление и реакцию воздуха<sup>5</sup>). По той же причине, если бы лучи света были шарообразными телами и при наклонном переходе из одной среды в другую приобретали вращательное движение, то они должны бы испытывать большее сопротивление от окружающего эфира с той стороны, где движения согласуются, и непрерывно отгибались бы в другую сторону. Однако, несмотря на правдоподобное основание этого предположения, при исследовании его я не мог наблюдать никакой кривизны лучей. И, кроме того (для моей цели это было достаточно), я наблюдал, что разница между длиной изображения и диаметром отверстия, через которое свет пропускался, была пропорциональна их расстоянию.

Постепенно устранив эти предположения, я пришел, наконец, к *experimentum crucis*, который заключался в следующем. Я взял две доски, одну из них поместил непосредственно за призмой у окна, так что свет мог проходить через маленькое отверстие, сделанное в доске для этой цели, и падал на другую доску, которую я поставил примерно на расстоянии в 12 футов, в ней также сначала было сделано

маленькое отверстие, чтобы часть падающего света могла через него проходить. Затем за этой второй доской я поместил другую призму так, чтобы свет, проходящий через обе доски, мог так же проходить через призму, преломляясь в ней прежде, чем дойти до стены. Сделав это, я взял первую призму в руку и медленно поворачивал ее туда и сюда вокруг оси, так что различные части изображения, падавшего на вторую доску, могли последовательно проходить через отверстие в этой доске и я мог видеть, к каким местам стены вторая призма преломляет лучи. И я нашел, меняя эти места, что свет, направлявшийся к тому концу изображения, к которому происходило наибольшее преломление первой призмой, испытывал во второй призме значительно большее преломление, чем свет, направлявшийся к другому концу. 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 проходят к различным частям стены соответственно их степеням преломления<sup>6)</sup>.

Поняв это, я оставил упомянутые выше мои работы со стеклом, ибо увидал, что усовершенствование телескопов ограничивалось до сих пор не столько отсутствием стекол правильной формы, соответствующей предписаниям оптических авторов (каковы бы ни были эти формы), сколько тем, что свет является разнородной смесью лучей различной преломляемости. Если бы стеклу была придана столь точная форма, что оно собирало бы все лучи одного сорта в одну точку, то оно не собрало бы в той же точке лучей, которые при одинаковом падении на ту же среду были бы способны испытывать различное преломление. Больше того, видя столь большое различие преломляемости, как найдено мною, я удивлялся, что телескопы достигли такого совершенства, как теперь. Измеряя преломления в одной из моих призм, я нашел, что, если предположить общий синус падения на одну из ее плоскостей равным 44 частям, то синус преломления крайних лучей на красном конце цветов при переходе из стекла в воздух будет 68 частей, а синус преломления крайних лучей на другом конце — 69 частей, так что разница составляет примерно одну 24-ю или 25-ю часть всего преломления. Следовательно, объективное стекло любого телескопа не может собрать всех лучей, идущих от какой-нибудь точки предмета в фокусе на пространстве меньшем, чем круг, диаметр которого составляет 50-ю часть диаметра отверстия стекла. 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. Найдя, что они происходят регулярно, так что угол отражения всех сортов лучей

равен их углу падения, я понял, что посредством отражений можно довести оптические инструменты до любой воображимой степени совершенства. Это возможно, если удастся найти отражающее вещество, которое полируется столь же тонко, как стекло, и отражает столько же света, сколько стекло пропускает, и будет найден способ придавать веществу параболическую форму. Но здесь обнаружились очень большие затруднения, я полагал их вообще непреборимыми, рассудив, что каждая неправильность отражающей поверхности заставляет лучи отходить на расстояние в 5—6 раз большее от требуемого пути, чем в случае подобных неправильностей преломляющей поверхности. Таким образом здесь требуется значительно большая тщательность, чем при формировании стекол для преломления.

Среди этих занятий случившаяся чума заставила меня покинуть Кэмбридж, и прошло более двух лет прежде, чем я вернулся к дальнейшему. Придумав более тонкий способ полировки, пригодный для металлов, с помощью которого, я надеялся, форма может быть совершенно исправлена, я начал пробовать, что можно сделать таким способом. Постепенно я усовершенствовал инструмент (который в существенных частях похож на тот, который я послал в Лондон <sup>7</sup>) настолько, что мог различать 4 спутника Юпитера и показывал их иногда двум моим знакомым. Мог я также различать луновидные фазы Венеры, но не очень отчетливо и не без некоторых ухищрений при расположении инструмента.

С того времени я был прерван до последней осени, когда и сделал другой инструмент. Он оказался значительно лучше, чем первый

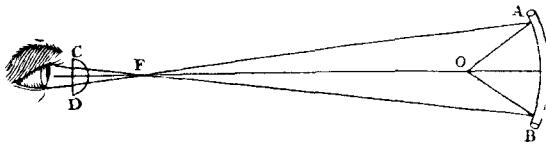


Рис. 1.

(в особенности в отношении дневных предметов), так что я не сомневаюсь, что инструменты будут доведены еще до большего совершенства стараниями тех, которые, как

вы мне сообщили, приняли на себя заботы о нем в Лондоне <sup>7</sup>).

Я думал также сделать микроскоп, в котором подобным же образом вместо объективного стекла помещен отражающий металл. Я надеюсь, что это также будет принято во внимание. Ибо такие инструменты могут, повидимому, быть усовершенствованы, как и телескопы, и, возможно, еще больше, так как в них требуется только одно отражающее металлическое зеркало. Вы можете видеть это из диаграммы, где  $AB$  представляет объективное металлическое зеркало,  $CD$  — окулярное стекло,  $F$  — их общий фокус,  $O$  — другой фокус зеркала, в котором помещается предмет.

После этого отступления вернемся к дальнейшему; я сказал, что свет не одинаков или не однороден и состоит из разнообразных лу-

чей, одни из которых преломляются больше других. Из лучей, одинаково падающих на одну и ту же среду, одни будут преломляться более, чем другие, и не в силу какой-либо способности стекла или другой внешней причины, но вследствие предрасположения, имеющегося у каждого отдельного луча испытывать свою степень преломления.

Теперь я ознакомлю вас с другим более замечательным многообразием лучей, которое раскрывает происхождение цветов. В связи с этим я изложу сначала доктрину, а затем для ее проверки дам вам один или два примера опытов, как образчик остального. Доктрина излагается и поясняется следующими предложениями:

1. Подобно тому, как лучи различаются по степени преломляемости, точно так же различаются они по их расположению проявлять тот или иной особый цвет. Цвета не являются качествами света, происходящими вследствие преломлений или отражений в естественных телах (как обыкновенно думают), но суть первоначальные и природные свойства, различные в различных лучах. Некоторые лучи расположены проявлять красный цвет и никакой другой, некоторые желтый и никакой иной, некоторые зеленый и никакой иной и так далее. Существуют не только лучи, соответствующие наиболее сильным цветам, но и всем их промежуточным градациям.

2. Одной и той же степени преломляемости всегда соответствует один и тот же цвет, и к одному и тому же цвету всегда относится одна и та же степень преломляемости. Все наименее преломляемые лучи расположены к проявлению красного цвета, и, обратно, лучи, расположенные к проявлению красного цвета, все наименее преломляются. Также наиболее преломляемые лучи все расположены к проявлению глубокого фиолетового цвета, и, наоборот, те лучи, которые способны проявлять такой фиолетовый цвет, все преломляются наиболее сильно. Также и в отношении промежуточных цветов. Эта аналогия между цветами и преломляемостью очень точна и строга; лучи либо точно согласуются в обоих отношениях, либо пропорционально не согласуются в обоих.

3. Вид цвета и степень преломляемости, свойственные каждому отдельному сорту лучей, не изменяются ни преломлением, ни отражением от естественных тел, ни какой-либо иной причиной, которую я мог наблюдать. Если какой-нибудь сорт лучей был хорошо отделен от лучей другого рода, то после этого он упорно удерживал свою окраску, несмотря на мои крайние старания изменить ее. Я преломлял темный цвет призмами, отражал его от тел, которые на дневном свете имели другую окраску. Я преграждал ему путь окрашенной пленкой воздуха между двумя сжатыми пластинками стекол<sup>8)</sup>, пропускал его через окрашенные среды, через среды, освещавшиеся другими сортами лучей, различным образом ограничивал его и, однако, никогда не мог произвести в нем новой окраски. При сжатии или

расширении он становился более блестящим или слабым, а при потере многих лучей в некоторых случаях — очень мрачным и темным, но никогда я не замечал изменения его вида.

4. Однако изменения цвета, повидимому, могут получаться там, где есть какая-либо смесь различных сортов лучей. Ибо в такой смеси слагающие цвета не видны; налагаясь взаимно друг на друга, они составляют промежуточную окраску. Поэтому, если преломлением или благодаря другим указанным причинам, разнообразные лучи, скрытые в темной смеси, разделятся, они будут проявлять цвета, отличные от окраски смеси. Эти цвета не созданы вновь, но стали только видными благодаря разделению. Ибо если они снова полностью смешаются и скроют один другой, то они снова составят тот цвет, который имели до разделения. По той же причине превращения, получающиеся при встрече различных лучей, не реальны; ибо если снова развести различные лучи, они будут проявлять точно те же цвета, как и до вхождения в смесь. Как вы знаете, синие и желтые порошки при тонком смешивании кажутся невооруженному глазу зелеными, и, однако, цвета составляющих частиц не изменились в действительности, а только скрыли друг друга. Ибо если посмотреть в хороший микроскоп, они снова будут казаться попеременно синими и желтыми.

5. Поэтому есть два рода цветов. Один первоначальный и простой, другой сложенный из них. Первоначальные цвета: красный, желтый, зеленый, синий и фиолетово-пурпуровый, вместе с оранжевым, индиго и бесконечным разнообразием промежуточных степеней <sup>9)</sup>.

6. Те же цвета по виду, как и первичные, можно получить смешением: ибо смесь желтого и синего дает зеленый, красного и желтого — оранжевый, оранжевого и желтовато-зеленого — желтый. И вообще, если смешать какие-либо два цвета в ряду, получающемся посредством призмы, расположенные недалеко один от другого, то при их взаимном соединении составится цвет, лежащий в вышеуказанном ряду между ними. Иначе ведут себя цвета, расположенные на очень большом расстоянии. Оранжевый и индиго не дают промежуточного зеленого, багряный и зеленый не дают промежуточного желтого.

7. Но наиболее поразительна и чудесна смесь, дающая белизну.

Нет ни одного сорта лучей, который в отдельности мог бы проявлять ее. Она всегда составная, и для ее получения требуются все вышеупомянутые цвета, смешанные в необходимой пропорции. Часто я с восторгом смотрел, как все цвета призмы, когда я их заставлял сходить и снова смешиваться так же, как они были в свете, падавшем на призму, воспроизводили полный и совершенный белый свет, совсем не отличавшийся от прямого света солнца, если только стекла, применявшиеся мною, были достаточно прозрачны; иначе стекло несколько склоняет их к своей окраске.

8. Отсюда вытекает, что белизна — обычная окраска света: ибо свет есть смешанный агрегат лучей, наделенных всеми сортами цветов, соответственно их беспорядочному выбрасыванию из различных частей светящихся тел. Такая беспорядочная смесь, как я сказал, порождает белизну, если имеется надлежащая пропорция ингредиентов. Но если какой-нибудь ингредиент господствует, свет склоняется к его окраске, как это происходит в синем пламени серы, желтом пламени свечи и в неподвижных звездах различной окраски.

9. Если рассудить о всех этих вещах, то станет очевидным способ возникновения цветов в призме. Ибо лучи, составляющие падающий свет, различаясь по цвету, пропорционально различаются по преломляемости; поэтому, вследствие неодинаковой преломляемости, они должны разделиться и рассеяться в удлиненную форму в последовательности по порядку от наименее преломляемого багряного до наиболее преломляемого фиолетового. По той же причине предметы, если на них смотреть через призму, кажутся окрашенными. Ибо различные лучи, благодаря их неодинаковым преломлениям, расходятся к различным частям сетчатки и здесь дают окрашенные изображения предметов, как в предыдущем случае изображение солнца на стене. Благодаря этому неравенству преломлений изображения становятся не только окрашенными, но также очень смутными и неотчетливыми.

10. Отсюда же очевидно, почему появляются цвета радуги в падающих каплях дождя. Ибо капли, преломляющие в наибольшем количестве к глазу наблюдателя лучи, способные к проявлению пурпурового <sup>9)</sup>, преломляют лучи других сортов настолько меньше, что они *появляются в другом месте*; таковы капли на внутренней стороне первичной радуги и на внешней стороне второй радуги. Точно так же капли, преломляющие к глазу наблюдателя с наибольшей полнотой лучи, способные казаться красными, преломляют лучи других сортов *насколько больше, что они проходят в стороне*; таковы капли на внешней части первичной радуги и на внутренней части вторичной.

11. Странные явления настойки *lignum nephriticum* <sup>10)</sup>, золотых листочков, кусочков окрашенного стекла и других прозрачных окрашенных тел, кажущихся в одном положении одного цвета, в другом — иного, не являются более по этим основаниям загадочными. Ибо эти вещества способны отражать один сорт света и пропускать другой, что можно видеть в темной комнате, освещая их однородным или несложным светом. Ибо тогда они обнаруживают только тот цвет, которым освещаются, но в одном положении этот цвет более живой, или светлый, чем в другом, соответственно тому, расположены ли эти вещества к большему или меньшему отражению или пропусканию падающего цвета.

12. Отсюда же ясна причина одного неожиданного опыта, о котором сообщает мр. Гук в своей „Микрографии“. Опыт сделан, как

он пишет, с двумя клинообразными прозрачными сосудами, один сосуд наполнялся красной, другой — синей жидкостью. Несмотря на то, что сосуды были в отдельности довольно прозрачны, однако оба вместе они были непрозрачными. Ибо один сосуд пропускает только красные лучи, другой — только синие, поэтому никакие лучи не могли пройти через оба сосуда вместе <sup>11)</sup>.

13. Я мог бы добавить много примеров того же характера. Но я закончу следующим общим фактом: цвета всех естественных тел происходят только от того, что они имеют способность отражать один сорт света с ббльшей полнотой, чем другие. Я испытал это в темной комнате, освещая естественные тела несмешанным светом различных окрасок. Ибо таким способом любое тело можно заставить являться с любой окраской. Они не имеют поэтому собственного цвета и являются в окраске того цвета, который на них падает, но с тем различием, что наиболее блестящими и живыми тела кажутся в свете их собственной дневной окраски. Так, сурик обнаруживает безразлично любую окраску в зависимости от цвета, которым он освещается, но наиболее светлую в красном цвете; точно также лазурь <sup>11a)</sup> показывает безразлично любой цвет, которым она освещается, но светлее всего она в синем. Поэтому сурик отражает лучи всех цветов, но наиболее щедро лучи, вызывающие красный цвет; при освещении дневным светом, т.-е. всеми сортами лучей, беспорядочно скрывающимися одни другие, лучи, имеющие качество красных, будут, следовательно, наиболее изобиловать в свете, отраженном от сурика, и благодаря их преимуществу вызовут появление этой окраски. По той же причине лазурь, отражающая обильнее всего синий, будет казаться синей благодаря избытку этих лучей в отраженном свете; также и в отношении других тел. Ясно, что в этом полная и достаточная причина окраски тел, потому что они не могут изменить или превратить цвета любого сорта лучей, падающего на них, и безразлично принимают все цвета, которыми освещаются.

Если это так, то нельзя больше спорить о том, существуют ли цвета в темноте, не качества ли они видимых предметов и не являются ли, быть может, свет телом. Ибо, поскольку цвета — качества света, имеющие лучи своим полным и непосредственным субъектом, то можно ли думать и о лучах, как о качествах, если только качество не может быть субъектом и поддержкой другого качества, что значило бы назвать его в действительности субстанцией. Мы признаем тела субстанциями только по их осязаемым качествам, и, буде главные качества чего-то найдены, у нас достаточно оснований полагать это нечто также субстанцией <sup>12)</sup>.

Кроме того, думал ли кто когда-нибудь, что какое-нибудь качество может быть таким неоднородным агрегатом, как это открылось в отношении света? Но не так легко определить более решительно,

или действиями он производит в наших умах образы цветов. И я не буду смешивать домыслов с достоверностями<sup>12)</sup>.

Просматривая написанное мною, я вижу, что само рассуждение приводит к различным опытам, достаточным для их исследования, поэтому я не буду задерживать вас дальше и ограничусь только описанием одного из опытов, который я уже упоминал.

Сделайте отверстие в оконной ставне затемненной комнаты — подходящий диаметр его около трети дюйма, — чтобы прошло нужное количество солнечного света; поместите там прозрачную и бесцветную призму так, чтобы она преломила входящий свет к удаленным частям помещения. Свет, как я сказал, при этом рассеется в удлиненное окрашенное изображение. Затем, в расстоянии около четырех или пяти футов оттуда поместите линзу с радиусом около трех футов (положим, широкое объективное стекло трехфутового телескопа); все цвета должны пройти сразу через линзу и благодаря преломлению в ней сойдутся на расстоянии десяти—двенадцати футов. Если на этом расстоянии вы пересечете свет листом белой бумаги, вы увидите, что цвета снова, благодаря смещению, обратились в белизну. Призму

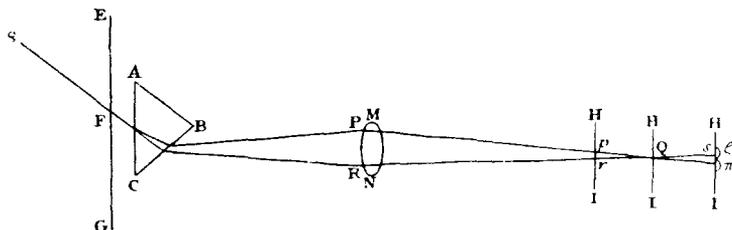


Рис. 2.

и линзу нужно оставить неподвижными, бумагу же, на которой отображаются цвета, следует двигать вперед и назад; при помощи такого движения вы не только найдете, на каком расстоянии белизна наиболее совершенна, но увидите также, 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. Вы можете видеть также, что если какие-либо из цветов у линзы задержаны, то белизна изменяется в другие цвета. Поэтому для составления совершенной белизны нужно озаботиться, чтобы ни один из цветов не падал в стороне от линзы.

На приложенном рисунке этого опыта  $ABC$  представляет призму, видимую со стороны основания и расположенную у отверстия  $F$  в окне  $EG$ . Вертикальный угол  $ABC$  удобно выбрать около 60 градусов;  $MN$  обозначает линзу. Ширина ее  $2\frac{1}{2}$  — 3 дюйма.  $SF'$  — одна из прямых линий, по которым можно представлять себе последовательно движу-

щимися различные лучи от солнца.  $FP$  и  $FR$  — два из этих лучей, неодинаково преломляющиеся. Линза заставляет их сходиться в  $Q$  и затем снова разойтись после встречи,  $HI$  — бумага на различных расстояниях, на ней проектируются цвета, в  $Q$  составляется белизна, но в  $R$ ,  $r$  и  $\rho$  получается красный и желтый, а в  $P$ ,  $p$  и  $\pi$  — синий и пурпуровый.

Если вы пожелаете далее исследовать невозможность изменения простых цветов (утверждаемую мною в предложениях 3-ем и 13-ом), то для этого требуется, чтобы комната была очень темной, ибо всякий рассеянный свет, смешиваясь с простым цветом, нарушает его и сливается с ним, делая его сложным, что противоречит цели опыта. Требуется также, чтобы разделение цветов было совершеннее того, которое получается преломлением в одной призме вышеописанным способом. Для тех, которые рассмотрят открытые законы преломлений, едва ли будет трудно получить такое дальнейшее разделение<sup>13)</sup>.

Но если опыт будет сделан с цветами не совершенно разделенными, то обнаружатся изменения цвета, пропорциональные смеси. Так, если сложный желтый цвет падает на синюю лазурь, то последняя не будет казаться совершенно желтой, но скорее зеленой, так как в желтой смеси имеется много лучей, вызывающих зеленый; зеленый же цвет содержится в обычной синей окраске лазури в большем количестве, чем желтый, и поэтому отражается более щедро.

Подобным же образом, если задерживать один из призматических цветов, положим, красный, с целью проверки утверждаемой невозможности воспроизведения этого цвета из пропускаемых остальных, то необходимо очень хорошо разделить цвета прежде, чем задерживать красный. Или нужно задерживать вместе с красным соседние цвета, в которых незаметно рассеян красный (т.-е. желтый, а может быть, даже зеленый). Иначе придется помириться с наличием красного в желто-зеленом, рассеянном в нем и скрываемом этими цветами. Если все эти вещи соблюдены, то новое получение красного или иного задержанного цвета окажется невозможным.

Полагаю, что этого достаточно для введения к опытам такого рода. Если кто-нибудь из Королевского Общества полюбопытствует проверить их, я буду очень рад осведомиться об успешности опытов. Если что-нибудь окажется ошибочным или противоречащим этому сообщению, то я буду иметь возможность дать дальнейшие указания или же признаю мои ошибки, в случае если я таковые сделал<sup>14)</sup>.

II. ОДНА ГИПОТЕЗА, ОБЪЯСНЯЮЩАЯ СВОЙСТВА СВЕТА.  
ИЗЛОЖЕННЫЕ В НЕСКОЛЬКИХ МОИХ СТАТЬЯХ.

Сэр, в моем ответе мр. Гуку, как вы можете припомнить, я имел случай говорить о гипотезах, при чем указал основание, почему все допустимые гипотезы в их подлинной сущности (*genuine constitution*) должны согласоваться с моими теориями <sup>16</sup>). Относительно гипотезы мр. Гука я сказал тогда, что наиболее свободно и естественно ее можно применить к явлениям следующим образом: движущиеся частицы тел, сообразно их различным размерам, фигуре и движениям, возбуждают в эфире колебания различной глубины или толщины, каковы, смешиваясь, распространяются через эту среду к нашим глазам, вызывая в них ощущение света белой окраски. Но, если каким-либо способом колебания различной ширины разделены одно от другого, то наиболее широкие вызывают ощущения красного цвета, а наименьшие, или самые короткие, — ощущение глубокого фиолетового, промежуточные вызывают ощущения промежуточных цветов. Подобным же образом тела, сообразно их различным размерам, формам и движениям, возбуждают в воздухе колебания разной ширины, которые соответственно этой ширине создают различные тоны звука и т. д. Я был рад узнать, из доклада мр. Гука <sup>17</sup>), когда последний раз был на одном из ваших собраний, что он переменял свое прежнее мнение о том, что все цвета составлены только из двух первоначальных, получающихся от двух сторон наклонной пульсации; он приспособил свою гипотезу к указанному моему предположению о цветах, которые, подобно звукам, различны, сообразно разной ширине пульсаций. Я полагаю эту гипотезу более вероятной, чем другие, описанные прежними авторами, так как не вижу, как можно удовлетворительно объяснить цвета тонких прозрачных пластинок, или пленок, если не прибегнуть к эфирным пульсациям; однако я считаю, что еще лучше другая гипотеза, которой я имел случай коснуться в том же письме в таких словах \*):

„Гипотеза о телесности света, если бы я предлагал таковую, имеет значительно большее родство с собственной гипотезой оппонента, чем это ему, повидимому, известно; колебания эфира полезны и необходимы и в той и в другой. Ибо, если предположить, что лучи света являются малыми телами, испускаемыми во все стороны светящими субстанциями, то лучи эти, ударяясь о преломляющую или отражающую поверхность, должны бы возбуждать в эфире колебания столь же необходимо, как камни в воде, когда они в нее брошены.

---

\*) Transact. № 88, p. 5087.

Вопрос о том, какую пользу можно получить от этих колебаний (если предположить, что они имеют различные глубины или толщины, сообразно возбуждению их сказанными корпускулярными лучами различных размеров и скоростей), для объяснения характера отражения и преломления, получения тепла при помощи солнечных пучков, испускания света горящими, гниющими и прочими субстанциями, частицы которых находятся в бурном движении, для объяснения явлений тонких прозрачных пластинок и пузырей и всех естественных тел, характера зрения и различия цветов, их гармонии и разногласия, — вопрос этот я предоставляю на рассмотрение тем, которые могут полагать заслуживающим старания применение этой гипотезы к объяснению явлений“.

Если бы мне пришлось принять какую-нибудь гипотезу, я выбрал бы эту, но высказанную в более общей форме, без определения того, что такое свет, кроме того, что он есть то или иное, способное возбуждать колебания в эфире: ибо в таком виде гипотеза станет столь общей и широкой в сравнении с другими, что остается мало места для изобретения новых. Я заметил, что головы некоторых доблестных мужей <sup>18)</sup> очень склонны к гипотезам, а в моих рассуждениях отсутствовала гипотеза, их объясняющая. Я нашел, что некоторые, которых я не мог убедить в моем мнении, говоря отвлеченно о природе света и цветов, легко согласились бы с ним, если бы я пояснил мое рассуждение какой-либо гипотезой. По этой причине я полагал уместным послать вам описание подробностей этой гипотезы, имеющей целью только пояснение мемуара, отправляемого вместе с сим. Я сам не буду принимать ни этой, ни какой-либо другой гипотезы, полагая, что меня не обязательно касается то, объясняются ли открытые мною свойства света этой гипотезой или гипотеза Мр. Гукка, или другие гипотезы могут объяснить их. Однако, излагая гипотезу, во избежание многословия и для более удобного представления ее, я буду иногда говорить о ней так, как будто бы я ее принял и верю в нее. Полагаю, что сказанного достаточно, чтобы никто не смешивал гипотезы с моими другими рассуждениями или судил об их достоверности по гипотезе, или считал бы меня обязанным отвечать на возражения против настоящего мемуара. Ибо я желаю избегнуть вовлечения в такие недоразумения и пререкания, не имеющие значения <sup>19)</sup>.

Но перейду к гипотезе: во-первых, в ней предполагается, что существует некая эфирная среда, во многом имеющая то же строение, как и воздух, но значительно разреженнее, тоньше и эластичнее. Не маловажным аргументом существования такой среды является то, что движение маятника в стеклянном сосуде с выкаченным воздухом почти

столь же быстро, как и на открытом воздухе <sup>20</sup>). Нельзя, однако, предполагать, что эта среда есть однородная материя, она складывается частью из основного косного <sup>21</sup>) тела эфира, частью из других различных эфирных газов <sup>22</sup>) во многом подобно тому, как воздух слагается из косного тела воздуха, перемешанного с различными парами или выдыханиями. В пользу такой разнородности, повидимому, говорят электрические и магнитные истечения и начало тяготения. Может быть общий осто́в природы не что иное, как различные сплетения некоторых эфирных газов или паров, конденсируемых как бы осаждением, подобно тому, как пары сгущаются в воду, или выдыхания в более грубые субстанции, хотя и не столь легко. После конденсации они принимают различные формы, во-первых, непосредственно руко́в Творца, а затем силою природы, каковая по предначертанию увеличивает и умножает, становясь полной подражательницей копий предустановленных оригиналом <sup>23</sup>). Итак, может быть, все вещи произошли из эфира.

По меньшей мере упругие истечения, повидимому, поучают нас, что имеется нечто эфирной природы, конденсированное в телах. Я неоднократно помещал на стол круглый кусок стекла, шириною около двух дюймов, в латунном кольце, так что стекло находилось от стола на расстоянии от одной восьмой до одной шестой дюйма. Воздух между стеклом и столом был замкнут со всех сторон кольцом, как будто бы на стол было поставлено маленькое сито; затем я быстро натирал некоторое время стекло какой-нибудь грубой, шершавой тканью, до тех пор, пока очень маленькие кусочки весьма тонкой бумаги, положенные на столе под стеклом, ни начинали притягиваться и оживленно двигаться туда и сюда. После прекращения трения стекла бумажки продолжали некоторое время различные движения; иногда они подпрыгивали к стеклу и оставались так некоторое время, затем прыгали к столу и оставались там; затем они снова прыгали вниз и вверх, при чем иногда по линиям, которые казались перпендикулярными к столу, а иногда по наклонным; иногда вверх они прыгали по одной кривой, а вниз по другой с различными временами, не останавливаясь заметно по середине; иногда они скакали по дуге от одной части стекла к другой, не касаясь стола, а иногда подвешивались за уголок, часто очень оживленно вращаясь, как будто бы они вовлекались в вихревой ветер; двигались они и другими способами, каждая бумажка различным движением. Когда я скользил пальцем по верхней стороне стекла, не двигая ни стекла, ни воздуха под ним, то бумажки, висевшие на стекле, получали некоторое новое движение, наклоняясь в ту или иную сторону, сообразно движению моего пальца <sup>24</sup>). Я не могу представить себе возникновение всех этих неправильных движений иначе как через посредство некой тонкой материи, сгущенной в стекле и разрезаемой при трении, как вода разрезается в пар

при нагревании. Эта материя разрежается, рассеивается в пространстве вокруг стекла на большое расстояние и, вынужденная двигаться и циркулировать различным образом, соответственно действует на бумажки, пока не вернется снова в стекло и здесь не сгустится. Эта конденсированная материя при разрежении в эфирный ветер (ибо по легкости ее проникания и циркуляции в стекле я считаю эту материя эфирной) может причинять неправильные движения, а сгущаясь снова, может вызывать при возвращении в стекло электрические притяжения в том месте, где она постоянно реконденсируется. Гравитационное притяжение земли может также причиняться непрерывной конденсацией некоторого иного, схожего эфирного газа <sup>25</sup>).

Этот газ не основное тело косного эфира, но нечто более тонкое и субтильное, рассеянное в нем, имеющее возможно маслянистую или клейкую, вязкую и упругую природу; он находится к эфиру в том же отношении, как жизненный воздушный газ, требующийся для поддержания пламени и жизненных движений, к воздуху. Такой эфирный газ может сгущаться в телах, подвергнутых брожению или горящих, или иным способом собираться в парах земли и воды в некий род влажной активной материи для постоянных нужд природы, приставая к стенкам этих пор так же, как пары конденсируются на стенках сосуда. Если это так, то обширное тело земли, каковое всюду может быть действительным центром вечной работы, способно непрерывно сгущать такое количество этого газа, чтобы вызывать нисхождение его сверху с большей скоростью для использования. При таком нисхождении этот газ может увлекать вниз с собою тела, через которые он проходит с силою, пропорциональною поверхностям всех частей тел, на которые действует <sup>26</sup>). Природа создает круговорот посредством медленного подъема такого же количества материи из внутренней земли в воздушной форме; эта материя некоторое время составляет атмосферу; но она непрерывно вытесняется новым воздухом: выдыхания и пары, подымающиеся снизу, наконец снова исчезают в эфирных пространствах (за исключением некоторой части паров, которые обращаются в дождь) и здесь, может быть, со временем тают и утончаются в свое первое начало. Ибо природа—вечный работник, производящий жидкости из твердых тел и твердые из жидких, стойкие вещи из летучих и летучие из стойких, тонкие из грубых и грубые из тонких. Некоторые вещества поднимаются и создают верхние земные воды, реки и атмосферу, а другие, соответственно, нисходят для замещения первых. Солнце, как и земля, быть может, обильно впитывает газы для сохранения своего сияния и для сдерживания планет, чтобы они не удалились от него <sup>27</sup>). Желющие могут предположить далее, что этот газ производит или несет с собою солнечный жар и материальное начало света, обширные же эфирные пространства между нами и звездами являются достаточным складом для этой пищи солнца

и планет. Вот что, между прочим, можно сказать относительно эфирных природ.

Во-вторых, нужно предположить, что эфир является колеблющейся средой подобно воздуху, только колебания его значительно быстрее и мельче; колебания воздуха, производимые обычным человеческим голосом, следуют друг за другом на расстоянии более полуфута или фута; колебания же эфира—на расстоянии, меньшем столетней части дюйма. В воздухе одни колебания несколько больше других, но одинаково быстры (потому что звук любого тона от ряда колоколов слышен на расстоянии двух-трех миль в том же чередовании, как ударяются колокола). Так же, предполагаю я, эфирные колебания различаются шириною, но не скоростью. Эти колебания, кроме пользы их в отражении и преломлении, можно предположить, являются главным посредником, при помощи коего поддерживается движение частиц бродящих или гниющих субстанций, текучих жидкостей, расплавленных, горящих или других нагретых тел. Эти тела ударяются эфирными колебаниями, как корабль волнами, и рассеиваются в пары, выдыхания или дым; в этих телах освобождается или возбуждается свет и они становятся горящим углем, дымом и пламенем. Я предполагаю, что пламя не что иное как частицы дыма, обратившиеся благодаря натиску света и тепла в накаленные угли, маленькие и неисчислимые.

В-третьих, воздух проходит через отверстия маленьких стеклинных трубок не столь легко, как через широкие, и потому находится внутри них в большей степени разрежения, чем в свободных воздушных пространствах; чем трубка уже, тем больше степень разрежения, как это известно по подъему воды в таких трубках на высоту значительно большую, чем поверхность стоячей воды, в которую трубки погружены<sup>25</sup>). Подобным же образом, предполагаю я, эфир хотя и проходит через поры кристалла, стекла, воды и других естественных тел, однако в этих порах он находится в большей степени разрежения, чем в свободных эфирных пространствах; степень разрежения тел больше, чем уже поры тела. Поэтому, может быть, винный спирт, например, хотя и является легким телом, однако, имея тонкие частицы, а следовательно, меньшие поры, чем вода, является жидкостью с большим преломлением. В этом же, возможно, главная причина сцепления частиц твердых и жидких тел, хрупкости стекла и тел, частицы которых не скользят одна относительно другой при сгибании, в этом же, может быть, причина того, что в опыте Торичелли ртуть доходит иногда до вершины трубки, хотя высота ее много больше двадцати девяти дюймов.

Плотный эфир, окружающий эти тела, должен давить и сжимать вместе их частицы, подобно тому как воздух, окружающий два куска мрамора, сжимает их, если между ними мало или совсем нет воздуха.

Далее и такая трудная проблема: каким образом мускулы сжимаются и расширяются, вызывая животные движения, может получить отсюда большее освещение, чем посредством каких-либо иных способов, придуманных до сих пор людьми. Ибо если в человеке есть некоторая способность сжимать и разрезать по произволу эфир, проникающий в мускулы, то такое сжатие или расширение должно менять сжатие мускула, производимое окружающим эфиром, соответственно вызывая его подъем или оседание. Ибо хотя обыкновенная вода едва ли сжимается при сдавливании и расширяется при ослаблении давления, однако (судя по моим наблюдениям) это имеет место в винном спирте и масле; опыт мр. Бойля относительно большого сжатия головастика при сильном давлении на воду, в которой он плавает, является аргументом в пользу того, что животные соки обнаруживают то же самое. Давление окружающего эфира меняется, поэтому ясно, что сжатие или расширение должно происходить в большей или меньшей степени соответственно большему или меньшему количеству эфира внутри, удерживающего и уравнивающего наружное давление. Если оба эфира одинаково плотны, мускул должен быть свободным, как будто бы давления не было; если бы эфира внутри не было, то окружающий эфир сдавил бы мускул с полной силой своей упругости. Если бы эфир внутри был расширен вдвое в сравнении с внешним, имея половинную упругость, то уравнивалась бы лишь половина силы окружающего, вторая же половина действовала бы на мускул; так же и в других случаях окружающее сжимало бы мускул избытком сил своей упругости над упругостью эфира, замкнутого внутри. Таким образом для сжимания мускула и для его подъема и опускания не требуется ничего, кроме изменения консистенции замкнутого эфира; достаточно очень небольшое изменение, если только предположить упругость эфира очень большой; я считаю, что он во много раз более упруг, чем воздух.

Как изменяется консистенция эфира? Проще всего допустить, что душа имеет непосредственную власть надо всем эфиром в любой части тела, расширяя и сжимая его по произволу: но тогда, как зависит мускульное движение от нервов? Иным может казаться более удобным мыслить о некотором эфирном газе, заключенном внутри *anima mater*; душа может сжимать или расширять этот газ по произволу в любом мускуле, вызывая его течение по нервам.

Однако остается затруднение, почему эта сила души не стнимает от эфирного газа его упругости, благодаря которой он должен сдерживать в большой или меньшей мере силу внешнего эфира. Возможно третье предположение, что душа имеет способность вдыхать в мускул этот газ, прогоняя его через нервы. Но и это предположение встречает много затруднений, так как оно требует насильственного влияния на упругость эфира в мускулах давлением, производимым от частей

мозга; но трудно представить себе, каким образом столь нежная материя, как мозг, может производить такие большие силы. II, кроме того, почему этот эфирный газ, будучи довольно тонким и подвергаясь большой силе, не проходит насквозь через *dura mater* и кожу мускула или по крайней мере не уступает дорогу другому эфиру, заключенному в мускуле? Для устранения этих затруднений придется сделать отступление, но, считая, что предмет заслуживает этого, я не могу удержаться и изложу, что думаю об этом.

Во-первых, я предполагаю, что такой газ имеется, т.-е. что животные газы не похожи ни на жидкость, ни на пары или газ<sup>29)</sup> винного спирта: они имеют эфирную природу, достаточно тонкую для проникания животных соков столь же свободно, как электрические или магнитные истечения проходят через стекло. Чтобы понять, каким образом ткани мозга, нервов и мускулов могут стать подходящим сосудом для столь тонких газов, вспомните, что жидкости и газы имеют предрасположение проникать или не проникать через вещи и по другим причинам, кроме их тонкости. Вода и масло проникают сквозь дерево и камень, а через ртуть нет; ртуть, однако, проходит сквозь металлы, чего не могут вода и масло; вода и кислые спирты<sup>30)</sup> проходят через соли, а масло и винный спирт нет; масло и винный спирт проникают через серу, а вода и кислые спирты нет. Некоторые жидкости, например масло и вода, частицы которых достаточно свободны для того, чтобы они могли смешаться одна с другой, остаются, однако, разделенными по причине некоторого скрытого начала несмешиваемости; другие жидкости, смешивающиеся, могут стать несмешиваемыми, если прибавить третью вещь к одной из них, например вода с винным спиртом, если в ней растворить винокаменную соль. Подобная несмешиваемость возможна и в эфирных телах как это, может быть, происходит между эфирами в вихрях солнца и планет<sup>31)</sup>; причина, почему воздух разреженнее в каналах малых стеклянных трубок, а эфир более разрежен в порах тел, чем наружи, может быть, заключается не в недостатке тонкости, но в недостатке смешиваемости<sup>32)</sup>. По этой причине, если эфирный жизненный газ в человеке легко смешивается с костным мозгом и соками и не смешивается с тканями мозга, нервов и мускулов или с какими-либо вещами, находящимися в порах этих тканей, то он может удерживаться, несмотря на свою тонкость, в особенности, если предположить, что не производится большого усилия для его вытеснения, что он, может быть, совсем не столь тонок, как основное тело эфира, хотя и достаточно тонок для прохождения сквозь животные соки, и что по мере растрачивания каких-либо из этих газов они непрерывно заменяются новыми от сердца.

Затем, для понимания того, каким образом этот газ может быть использован для животных движений, вы можете учесть, что некоторые несмешиваемые вещи становятся смешиваемыми посредством третьей

вещи. Вода, не желающая растворять меди, растворяет ее, если медь смешать с серой; aqua fortis, не проникающая через золото, проходит через него, если прибавить немного аммиачной соли или спирта этой соли; свинец не смешивается при плавлении с медью, но, если прибавить немного олова или сурьмы, они легко смешиваются, но их согласие снова нарушается, если извлечь сурьму селитрой или иным способом; свинец, сплавляясь с серебром, быстро проникает через него и его ожигает при значительно меньшем тепле, чем требуется для плавления одного серебра; но если небольшое количество субстанции, примирявшей их, устранить или изменить, их согласие снова нарушается. Подобным же образом эфирный животный газ в человеке может быть посредником между обычным эфиром и мускулярными соками, облегчая им более свободное смешение. Немного этого газа посылается в мускул—настолько мало, чтобы не произошло заметного натяжения мускула его собственной силой. Сделав ткани более смешивающимися с обычным внешним эфиром, этот газ позволяет эфиру на мгновение свободно проникать в мускул легче и обильнее, чем это произошло бы без его посредства; эфир снова свободно выходит, как только посредник смешиваемости устраняется. В согласии с тем, что мною сказано выше, благодаря этому произойдет растяжение или сжатие мускула, а следовательно, и животное движение, зависящее от этого.

Так, направляя этот эфирный газ или ветер в тот или иной нерв с тою же легкостью, может быть, как движется воздух в открытых пространствах, душа может вызывать все движения, которые мы видим у животных. Для того, чтобы движения эти были сильными, нет нужды предполагать очень большое сгущение или разрежение эфира в мускуле, получаемое такими способами; достаточно, чтобы упругость его была настолько велика, чтобы небольшое изменение его плотности вызвало значительное изменение давления. Сказанное по поводу мускульного движения можно применить к движению сердца с тою только разницей, что сюда газ не посылается, как в другие мускулы, а непрерывно образуется здесь же благодаря брожению соков, которыми наполнено мясо; после того как газ образовался, он направляется в мозг через соответственный канал, производя своим давлением в мускулах те движения, которые в сердце он производит своим образованием. Я не вижу, почему бы брожение в сердце не могло поднять из его тканей такого тонкого газа, который вызывал бы эти движения, также как трение стекла подымает газ, вызывающий электрическое притяжение, а горение подымает из пламени газ, проникающий через стекло, как показал мр. Бойль, а известь, оржавляя металлы, сплавляется с ними<sup>33</sup>).

До сих пор я рассматривал природу эфира и эфирных субстанций в отношении их действий и применений, теперь я к этому присоединю соображения о свете.

Итак, в четвертых, я предполагаю, что свет—не эфир, но его колебательное движение, но нечто иного рода, распространяющееся от светящихся тел. Желаящие могут предполагать его агрегатом различных перипатетических свойств. Другие могут предполагать, что свет—множество невообразимо малых и быстрых корпускул различных размеров, отлетающих от светящихся тел на большие расстояния одна от другой, но без заметного промежутка времени. Эти корпускулы непрерывно нудятся вперед некоторым началом движения, вначале ускоряющем их до тех пор, пока сопротивление эфирной среды не сравняется с силою этого начала, так же как тела, падающие в воде, ускоряются до тех пор, пока сопротивление воды не станет равным силе тяготения. Бог, давший животным собственное движение, которое выше нашего понимания, несомненно может произвести и другие начала движения в телах, которые мы столь же мало понимаем. Некоторые станут просто считать это начало духовным, однако возможно указать и механическое начало, но я предпочитаю обойти этот вопрос.

Те, которым это не нравится, могут предполагать, что свет является какой-то иной телесной эманацией импульсом или движением некой другой среды или эфирного газа, рассеянного по основному телу эфира, или что-нибудь иное, что они считают подходящим для этой цели. Во избежание пререканий и для общности гипотезы пусть каждый останется при своем. Чем бы ни являлся свет, я предполагаю, однако, что он состоит из лучей, отличающихся один от другого по таким случайным признакам, как толщина, форма или сила, подобно тому как отличаются песчинки на берегу, морские волны, лица людей и все другие естественные предметы того же рода. Почти невозможно найти среди вещей одного рода вещи без какого-либо случайного отличия.

Далее, я буду предполагать свет отличным от колебаний эфира. Если бы он был таковым, он должен бы всегда сильно расходиться по кривым линиям в темную или покоящуюся среду, нарушая все тени и направляясь по кривым порам, или проходам, как звук. Но, помимо этого, я не понимаю, каким образом при этом какая-нибудь поверхность (например грань стеклянной призмы, на которую изнутри падают лучи под углом больше сорока градусов), может быть совершенно темной. Ибо колебания, ударяясь о преломляющую границу разреженного и более плотного эфира должны заставить эту податливую поверхность колебаться, а эти колебания возбудят волнение и распространят его по другую сторону. Далее, каким образом свет, падающий на очень тонкие пленки или пластинки прозрачного тела при последовательных толщинах пластинки, находящихся в арифметической прогрессии, попеременно отражается и пропускается, как это найдено мною, — это меня столь же удивляет. Арифметическая прогрессия этих толщин, попеременно отражающих и пропускающих свет, указывает,

что они зависят от числа колебаний между двумя поверхностями пластинки как при отражении, так и при прохождении луча. Я не понимаю, однако, каким образом число может изменять характер явления в зависимости от того, больше оно или меньше, целое или дробное, если только не предположить, что свет является чем-то отличным от этих колебаний. Правда, я могу несколько облегчить эти два последних затруднения, но не считаю этого достаточным.

В-пятых, предполагается, что свет и эфир взаимно действуют друг на друга: эфир преломляет свет, а свет нагревает эфир, при этом наиболее плотный эфир действует сильнее всего. Поэтому, когда луч движется сквозь эфир неравномерной плотности, то, предполагаю я, среда производит на него наибольшее давление, силу или действие в сторону более плотного эфира, он получает непрерывный импульс или изгиб с этой стороны; отступая к более разреженному эфиру и ускоряется, если идет таким путем, и замедляется на пути обратном. По этой причине, если луч движется наклонно сквозь такую среду неравномерной плотности (т.-е. наклонно к тем воображаемым поверхностям, которые проходят через части среды одинаковой плотности и могут быть названы преломляющими поверхностями), то он должен искривиться, как это наблюдается в воде \*), нижние слои которой постепенно становятся более солеными, а следовательно, более плотными, чем верхние. В этом может быть причина всякого преломления и отражения. Разреженный воздух внутри маленькой стеклянной трубки и более сгущенный снаружи <sup>28)</sup> разделяются не точной математической поверхностью: между ними находится воздух у отверстия трубки, проходящий через все промежуточные степени плотности. Также, предполагаю я, преломляющие поверхности эфира между средами неодинаковой плотности не являются математическими, они имеют некоторую толщину, при чем эфир в них, у отверстий пор твердого тела, имеет все промежуточные степени плотности между разреженной и более плотной эфирными средами. Я считаю, что преломление происходит от непрерывного искривления луча во время его прохождения через физические поверхности. Если предположить, что движение луча при таком прохождении увеличивается или уменьшается в некоторой пропорции, сообразно разнице плотностей эфирных сред, а увеличение или уменьшение движения отсчитывается по перпендикуляру к преломляющим поверхностям, как это должно быть, то синусы падения и преломления будут пропорциональны в согласии с тем, что доказано Декартом <sup>34)</sup>.

Таким образом, луч, проходя из разреженной среды в более плотную, непрерывно все более и более склоняется к параллелизму к преломляющей поверхности. Если различающиеся плотности среды не

\*) См. „Микрографию“ мр. Гук а, где он говорит об изгибании лучей.

столь велики и падение луча не столь наклонно, чтобы луч успел стать параллельным к поверхности до выхода из нее, то он проходит насквозь и преломляется. Но если по вышеуказанным причинам луч становится параллельным до выхода, тогда он должен повернуться обратно и отразиться. Так, например, в треугольной стеклянной призме  $OEL$  можно наблюдать, что лучи  $Am$ , проходящие из стекла в воздух, при возрастающем наклоне их к преломляющей поверхности, выходят все более и более наклонными до тех пор, пока они не станут бесконечно наклонными, т.-е. параллельными к поверхности, это происходит при угле падения около сорока градусов; если лучи еще несколько наклонить, то все они отражаются, как показано линией  $AmV$ , при этом, я предполагаю, что лучи становятся параллельными к поверхности прежде, чем они могут пройти через нее. Пусть  $ABDC$  — более разреженная среда (рис. 2),  $EFHG$  — более плотная,  $CDFE$  — пространство между ними, или преломляющая физическая поверхность, в которой эфир имеет все промежуточные степени плотности, начиная от наиболее разреженного эфира при  $CD$  до наиболее плотного при  $EF$ ;  $AmL$  —

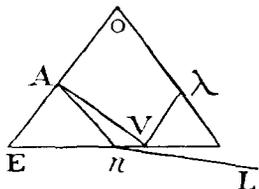


Рис. 1.

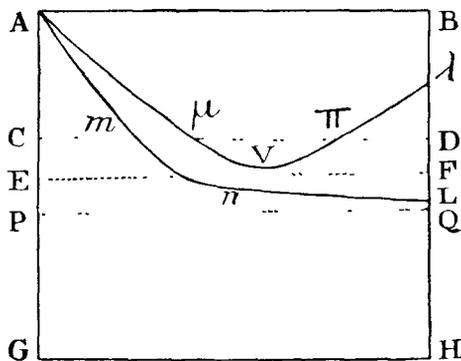


Рис. 2.

некоторый луч,  $Am$  — его падающая часть,  $mn$  — его искривление благодаря преломляющей поверхности,  $nL$  — его выходящая часть. Если теперь луч  $Am$  искривляется настолько, что при выходе  $n$  он становится в точности параллельным  $CD$ , то ясно, что при немного большем падении он должен стать параллельным  $CD$  еще до прихода к  $EF$ , следующей преломляющей поверхности; он не имеет возможности подойти ближе к  $EF$  и благодаря дальнейшему искривлению должен повернуться обратно и отразиться, как это представлено линией  $AmV$ . То же самое произошло бы, если бы плотность эфира возросла дальше от  $EF$  до  $PQ$ , и  $PQHG$  являлось более плотной средой, чем было предположено относительно  $EFHG$ . В данном случае луч, проходя от  $m$  к  $n$ , искривляется настолько, что делается у  $n$  параллельным  $CD$  или  $PQ$ , он не может уже подойти ближе к  $PQ$ , но благо-

даря дальнейшему искривлению у  $n$  возвращается обратно и отражается. Если преломленный луч, например  $nL$ , сделать падающим, то падающий луч  $Am$  станет преломленным. Поэтому, если луч  $AmV$  по приходе в  $V$ , где, я предполагаю, он становится параллельным преломляющей поверхности, отразился бы перпендикулярно назад, то он вернулся бы назад по линии падения  $VmA$ . Продвигаясь вперед, он должен идти по другой линии  $Vn$ ; оба случая схожи, и угол отражения должен равняться углу падения.

Такова, может быть, причина и способ отражения, когда свет идет от разреженного эфира к плотному. Для понимания того, как отражается свет на пути от плотного к разреженному эфиру, надо вспомнить, что жидкости вблизи их поверхностей менее гибки и уступчивы, чем во внутренних частях; если им придать форму тонких пластинок или чешуй, они становятся более жесткими и вязкими, чем в других условиях. Так, вещи, свободно падающие в воде, не легко пробиваются через водяной пузырь, но скользят по его сторонам, если они не слишком велики и тяжелы. Если наложить друг на друга два хорошо полированные выпуклые стекла, отшлифованные по очень большим сферам, то воздух между ними легко уходит до тех пор, пока они почти не коснутся, но далее сопротивление становится столь большим, что вес верхнего стекла слишком мал, чтобы свести их вместе так, чтобы появилась черная окраска посреди цветных колец, о которой говорится в другом мемуаре, который я послал вам <sup>35</sup>). Если стекла плоские, но не шире двухпенсовой монеты, человек со всею своею силою не может выжать весь воздух между ними так, чтобы они вполне касались друг друга. Вы могли также наблюдать, что насекомые прогуливаются по воде, не смачивая ног, при чем вода их выдерживает; моль, падая на воду, часто лежит на ней, не смачиваясь. Я предполагаю, что эфир на границе двух сред менее гибок и податлив, чем в других местах, при том гибкость тем меньше, чем больше среды разнятся по плотности. При переходе из более плотного эфира в разреженный, когда остается пройти только очень малый слой плотного эфира, луч находит таким образом не обычное затруднение для прохода; затруднение столь велико там, где среды очень сильно разнятся по плотности, что лучи отражаются вследствие искривления тем же способом, как описано выше; части эфира с той стороны, где они менее гибки и податливы, действуют на лучи так, как будто бы они были здесь плотнее, чем с другой стороны. Ибо сопротивление среды должно производить на луч одно и то же действие, от какой бы причины оно ни происходило. Такова же, я предполагаю, может быть, причина отражения ртути и других металлических тел. Она должна способствовать отражательной способности тел и в том случае, когда лучи переходят из разреженной среды в плотную. В данном случае отражение, имея двойную причину, должно быть, очевидно, сильнее, чем в эфире. При преломлении такая сильная вяз-

кость или жесткость поверхности может не приниматься во внимание, потому что насколько лучи отклоняются, проходя через эту наиболее вязкую и жесткую часть поверхности, настолько же отклонение снова уменьшается при переходе оттуда в соседние части, менее вязкие.

Так лучи преломляются некоторыми поверхностями и отражаются другими в зависимости от того, плотнее или разреженнее среда, в которую они стремятся. Но далее остается объяснить, каким образом лучи, одинаково падающие на ту же поверхность (положим, хрустали стекла или воды), в одно и то же время одни преломляются, другие отражаются. Для объяснения этого я предполагаю, что, ударяясь о жесткую сопротивляющуюся эфирную поверхность, лучи, на которые поверхность действует, в свою очередь действуют на нее, вызывая в ней колебания, как камни, брошенные в воду, вызывают колебания на поверхности. Эти колебания распространяются во все стороны как в разреженной, так и плотной среде. Как колебания воздуха, производящие звук, они рождаются от удара и сильнее всего продолжаются там, где начались, попеременно сжимая и расширяя эфир в указанной физической поверхности. Ибо из тепла, производимого светом в телах, явствует, что свет может привести частицы тела в движение и тем более может нагреть и привести в движение более нежный эфир; более вероятно, что свет сообщает движение грубым частицам тела не непосредственно, а посредством эфира. Например, у ртути, олова, серебра и других очень темных тел более вероятно, что свет производит колебания, проходящие через эти тела, а не только ударяется о внешние частицы, не входя в тело. Удар каждого отдельного луча может произвести много тысяч колебаний; посылая их через тело, луч движет все частицы, при том, может быть, с большим движением, чем он мог бы двинуть отдельную частицу при непосредственном ударе. Ибо колебания, толкая каждую частицу назад и вперед, могут непрерывно увеличивать ее движение, подобно тому как звонарь делает с колоколом, часто ударяя по нему; таким образом, частицы могут быть доведены до большой степени движения, каковая недостижима ни для простого удара луча, ни для какого-либо иного движения эфира, кроме колебательного. Так, движение частиц в воздухе, заключенном в сосуде, вызванное нагреванием, хотя бы и очень сильным, не способно сообщить телам, подвешенным в сосуде, колебательное или поступательное движение. Но если привести воздух в колебательное движение, ударяя в один или два барабана, он ударяет в стеклянные окна, в тело человека и другие массивные предметы, в особенности, если тела имеют согласный тон; действительно, я наблюдал ясное сотрясение каменного пола в подвале под моими ногами в большом помещении, как этого не могли бы, полагаю, произвести непосредственные удары пятисот барабанных палок, разве только, может быть, если бы они следовали быстро друг за другом через рав-

ные промежутки времени. Поэтому эфирные колебания — наилучшее средство, при помощи которого такой тонкий агент, как свет, может двигать грубые частицы твердых тел, нагревая их. Если предположить, что свет, ударяясь о преломляющую или отражающую поверхность, приводит ее в колебательное движение, то физическая поверхность благодаря непрерывным импульсам лучей поддерживается все время в колебательном движении, и эфир в ней поочередно то расширяется, то сгущается. Если луч ударяется о среду во время большого сжатия, то, предполагаю я, поверхность тогда слишком плотна и жестка, чтобы пропустить луч, она отражает его. Но лучи, ударяющиеся о поверхность в другое время, когда она расширена в промежутке между двумя колебаниями или не слишком сжата и сгущена, проходят и преломляются.

Таковы могут быть причины преломлений и отражений во всех случаях. Чтобы понять, каким образом они могут стать правильными, нужно, далее, принять во внимание следующее. В куче песка поверхность шероховатая, но если к его порам будет просачиваться вода до тех пор, пока все поры заполнятся, то вода будет ровно обволакивать поверхность, и тем ровнее, чем тоньше песок. Таким же образом, хотя поверхность всех тел, даже наиболее полированных, шероховата, как я полагаю, однако, там, где шероховатость не слишком груба и шершава, преломляющая эфирная поверхность может ее ровно обволакивать. Нельзя думать, что при полировке стекла или металла песок, пепел или другие трущие порошки могут настолько правильно сгладить поверхность, чтобы верх каждой частицы стал в точности плоским, а все эти плоскости были направлены одинаково, как нужно для хорошо полированных тел, где отражение осуществляется их частицами. Такие полировочные порошки сначала сглаживают тела до грубой шероховатости, так что она заметна, затем до шероховатости все более тонкой и тонкой, до тех пор, пока она не станет столь тонкой, что эфирная поверхность обволакивает ее ровно и тело принимает видимость полированного. Таково очень естественное и понятное предположение. Странно думать, что в жидкостях поверхности всех их частиц должны быть все плоскими, и плоскости всех поверхностных частиц всегда направлены одинаково, несмотря на то, что они находятся в вечном движении. Однако без этих двух предположений поверхности жидкостей не могли бы стать столь правильно отражающими, каковыми они являются, если только отражение вызывается самими частицами, а не эфирными поверхностями, ровно обволакивающими жидкость.

В отношении правильного движения света можно, далее, сомневаться, не будут ли различные колебания жидкости, через которые проходит свет, возмущать его. Но такое сомнение, предполагаю я, исчезнет, если принять во внимание, что буде в какой-нибудь момент передняя

часть наклонной волны начнет отклонять свет в сторону, то задняя часть обратным действием вскоре снова направит его по прямой <sup>36</sup>).

Наконец, без сомнения, в каждом прозрачном теле имеются поры различных размеров, а я сказал, что эфир находится в наибольшем разрежении в наименьших порах; поэтому эфир в каждой поре должен обладать различной разреженностью, и свет должен преломляться при переходе из каждой поры в соседнюю, что должно привести к рассеянию и уничтожению прозрачности тела. Надо, однако, принять во внимание, что эфир во всех плотных телах постоянно волнуется непрерывными колебаниями, а колебания эти могут осуществиться только вынуждением движения эфира вперед и назад от одной поры в другую посредством некоторого рода трясения; эфир, находящийся в данный момент в большей поре, в следующий момент вынуждается к переходу в соседнюю меньшую, и обратно. Это должно распределить эфир равномерно по всем порам, не превосходящим некоторой определенной ширины, положим, ширины колебания, и таким образом, эфир будет иметь одинаковую плотность во всем [прозрачном теле] сообразно среднему сорту пор. Но там, где поры превосходят определенную ширину, я предполагаю, эфир имеет плотность соответственно ширине поры или среде, ее заполняющей; плотность здесь будет отличной от плотности окружающего эфира, пора преломляет или отражает свет на своей поверхности, и тело, в котором много таких включений, кажется темным.

Сказанное относится к преломлению, отражению, прозрачности и темноте, теперь нужно объяснить цвета. Тела различных размеров, плотностей или качеств при ударе или другом действии возбуждают звуки различных тонов, а следовательно, и колебания в воздухе различных толщин. Я предполагаю также, что лучи света, ударяясь о жесткую преломляющую поверхность, возбуждают колебания в эфире. Эти лучи, чтобы они из себя ни представляли, различаются по величине, напряжению или силе и возбуждают колебания различных толщин. Самые широкие, наиболее напряженные или наиболее мощные лучи вызывают колебания самые большие, остальные лучи, более короткие, вызывают колебания соответственно своей толщине, напряженности или силе. Концы волосков оптического нерва, которыми вымощена или облицована сетчатка, являются преломляющей поверхностью такого рода. Когда лучи ударяются об эти волоски, они должны возбуждать там указанные колебания. Эти колебания (подобно звукам рога или трубы) будут пробегать вдоль водянистых пор или кристаллических сердцевин волосков, через оптические нервы в чувствилище <sup>37</sup>) (сам свет сделать этого не может). В чувствилище, предполагаю я, они вызывают чувство различных цветов, соответственно своей толщине и смещению. Наиболее широкие колебания вызывают самые сильные цвета, — красные и желтые, — наименее широкие, самые слабые цвета, —

синие и фиолетовые, — средние возбуждают зеленые цвета, а смесь всех — белый цвет. Подобно этому — в чувстве слуха природа пользуется воздушными колебаниями различных толщин для порождения звуков различных тонов. Ибо в природе наблюдается подобие. Далее, подобно тому как гармония и разногласие звуков происходят от пропорций воздушных колебаний, также и гармония некоторых цветов, например, золотого и синего и разногласие других, например, красного и синего, происходят от пропорций эфирных колебаний. Возможно, что цвета различаются по своим главным степеням: красной, оранжевой, желтой, зеленой, синей, индиго и глубоко-фиолетовой на том же основании, как звук в пределах октавы располагается по тонам. Несколько лет тому назад, отбросив призматические цвета в хорошо затемненной комнате перпендикулярно на бумагу, в двадцати двух футах расстояния от призмы, я выразил желание, чтобы один мой друг отметил карандашом поперечные линии или границы цветов на изображении, там, где каждая из вышеназванных окрасок была наиболее полной и блестящей, а также там, где, по его суждению, были наиболее верные границы цветов. В это время я держал бумагу так, что указанное изображение падало между определенными границами, отмеченными на ней. Я сделал так отчасти потому, что мои собственные глаза не очень тонки в отношении различения цветов, частью же

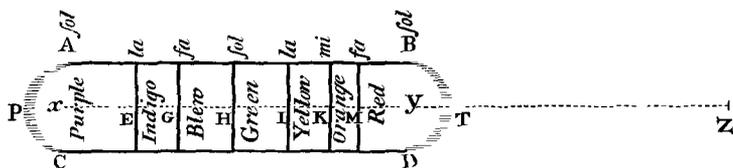


Рис 3.

потому, что другой наблюдатель, которому я не сообщал моих мыслей по этому предмету, не мог иметь ничего, кроме своих глаз, нанося такие отметки. Это наблюдение повторялось несколько раз и в тот же и в другие дни для того, чтобы видеть, насколько согласуются отметки на различных бумагах. Истинные границы цветов отметить затруднительно, так как они незаметно переходят один в другой. Однако, при сравнении, разности наблюдений оказались небольшими, в особенности у красного конца. Когда были взяты средние этих разностей, то длина изображения (отсчитываемая, как это и должно быть, не от вершин полукруглых концов, но от центров этих полукруглостей, т.-е. от прямых сторон) разделилась почти в той же пропорции, как и струна между концом и серединой, когда ее заставляют звучать тонами октавы. Вы поймете меня лучше, если рассмотрите приложенную фигуру, на которой  $AB$  и  $CD$  представляют прямые стороны, примерно, на расстоянии десяти дюймов,  $APC$  и  $BTQ$  — полукруглые концы,  $X$  и  $Y$  — центры этих полукруглостей,  $XZ$  — длина музыкальной

струны, вдвое большей, чем  $XU$ , и разделенной между  $X$  и  $U$  так чтобы она звучала тонами, указанными сбоку (т.-е.  $XH$  — половина,  $XG$  и  $GI$  — третья часть,  $YK$  — пятая часть,  $YM$  — восьмая часть и  $GE$  — девятая часть  $XU$ ). Интервалы между подразделениями указывают пространства, занятые цветами, надписанными на них; при этом цвет наиболее резко своеобразен в средней части этих пространств <sup>35</sup>).

Перейдем теперь к причине тех или иных цветов, получающихся преломлением. Наиболее широкие или наиболее сильные лучи должны свободнее и легче, чем лучи слабые, проникать в преломляющую поверхность, они будут меньше заворачиваться в сторону, т.-е. менее преломляться. Это равносильно тому, что лучи, создающие красный цвет, наименее преломляемы, лучи, создающие синий и фиолетовый, наиболее преломляемы, остальные же преломляются соответственно их окраске. Поэтому, когда лучи, идущие беспорядочно от солнца, преломляются призмой, как в вышесказанном опыте, то лучи разных сортов преломляются различно и должны приходить в различные места бумаги или стены, расположенных напротив. Разделившись таким образом, каждый сорт лучей проявляет свои собственные цвета, вместе, скрывая один другой, они не могут делать этого. Преломление только разделяет лучи и не изменяет их ширины или силы, поэтому после того как лучи однажды хорошо разделены, преломление не может уже произвести никаких дальнейших изменений в их окраске.

На этой основе можно понять все явления преломлений, однако для объяснения цветов, получающихся при отражениях, я должен далее предположить, что, несмотря на невообразимую быстроту света, эфирные колебания, возбуждаемые каким-нибудь лучом, движутся еще скорее, чем сам луч, и, таким образом, обгоняют и опережают один луч за другим. Я предполагаю, что для тех, которые склонны считать эти колебания сами по себе светом, такое предположение должно казаться допустимым <sup>39</sup>). Чтобы сделать его еще более приемлемым, можно предположить, что свет не столь быстр, как некоторые склонны думать. Мне неизвестно никакого аргумента, который противоречил бы тому, что для прохождения света от солнца до нас требуется один-два часа, если не больше <sup>40</sup>). При таком предположении о скорости колебаний, при падении света на тонкую пленку или пластинку какого-нибудь прозрачного тела, волны, возбужденные прохождением света через первую поверхность, обгоняют лучи один за другим. Когда луч дойдет до второй поверхности, то волны заставят его там отразиться, или преломиться соответственно тому, какая часть волны обгоняет там луч, сгущенная или разреженная. Если толщина пластинки такова, что луч обгоняется у второй поверхности сгущенной частью первой волны, то он должен там отразиться. Если толщину удвоить так, чтобы последующая разреженная часть волны, т.-е. пространство между данной и следующей волной обгоняло луч, то на второй поверх-

ности луч будет пропущен. Если толщину утроить так, чтобы сгущенная часть второй волны обогнала луч, то он отразится; то же произойдет там, где пластинка будет в пять, семь или девять раз толще. Луч должен отражаться там по причине третьей, четвертой и пятой волны, обгоняющих его у второй поверхности. Однако, когда толщина в четыре, шесть или восемь раз больше, так что луч обгоняется там расширенным интервалом между вышеуказанными волнами, то он будет пропускаться, и так далее. Вторая поверхность будет способной или неспособной отражать сообразно тому, сгущается или расширяется она волнами. Например, пусть  $AHQ$  представляет поверхность сферического выпуклого стекла, положенного на плоское стекло  $AIR$ ,  $AIRQH$  — тонкая плосковогнутая воздушная пластинка между ними,  $BC, DE, FG, HJ$  и т. д. — толщины этой пластинки, или расстояния между стеклами, находящиеся в арифметической прогрессии чисел 1, 2, 3 и т. д. След-

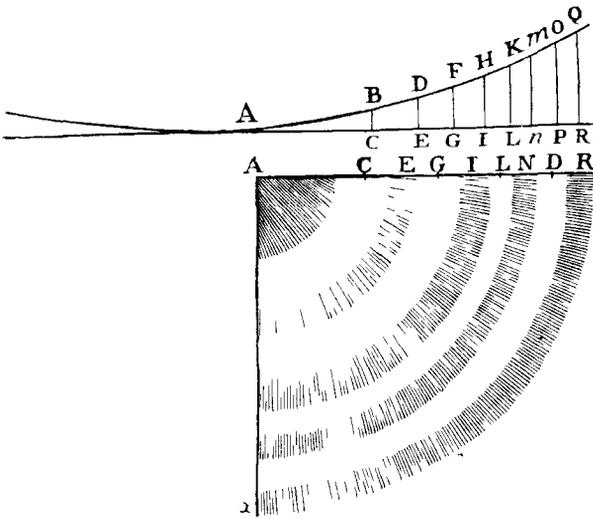


Рис. 4.

довательно  $BC$  — расстояние, на котором луч обгоняется наиболее сгущенной частью первой волны. Я утверждаю, что лучи, падающие при  $B, F, K$  и  $O$ , должны отражаться у  $C, G, L$  и  $P$ , и лучи, падающие в  $D, H, M$  и  $Q$ , должны пропускаться при  $E, I, N$  и  $R$ . Это потому, что луч  $BC$  приходит к поверхности  $AC$ , когда она сгущена первой волной, обгоняющей луч; луч  $DE$  приходит, когда поверх-

ность разрежена интервалом между первой и второй волнами; луч  $FG$ , когда поверхность сгущена второй волной; луч  $HI$ , когда она разрежена интервалом между второй и третьей волнами и т. д. для неопределенного числа чередований. При  $A$ , в центре или касании стекол свет должен пропускаться потому, что там эфирные среды в обоих стеклах следуют непрерывно одна за другою, как будто бы они составляли однородную среду. Поэтому, если смотреть на стекла в этом положении сверху, то при  $A$  там, где стекла касаются, должно быть видно черное пятно, а вокруг него много concentрических светлых и темных кругов, квадраты полудиаметров которых находятся в арифметической прогрессии. Однако не все лучи без исключения должны отражаться или преломляться таким образом, ибо иногда луч может обгоняться у второй поверхности колебаниями, вызванными другим

соседним или непосредственно следующим лучом; такие колебания, если они столь же или еще более сильны, чем собственные колебания луча, могут вызвать его отражение или пропускание, хотя его собственные колебания, одни, вызвали бы противоположное. Поэтому небольшое количество света будет отражаться от черных колец, благодаря чему они делаются скорее черными, а не совершенно темными; небольшой свет пропускается и светлыми кольцами, благодаря чему черные кольца, видимые с другой стороны стекол, не кажутся столь черными, как они должны быть. У центрального черного пятна, где стекла касаются не полностью, также должно отражаться немного света, благодаря чему пятно темнее всего в середине, а по краям только черное. Я наблюдал это, сжимая очень сильно две стеклянных призмы, которые случайно (по крайней мере, одна из них) были слегка выпуклы, и рассматривая при освещении различными цветами черное пятно в месте касания. Если за свечей, на небольшом расстоянии, помещалась белая бумага, и свеча с бумагой попеременно рассматривались в отраженном свете пятна, то края пятна при свете бумаги казались столь же черными, как и средняя часть; при более сильном свете свечи края казались довольно светлыми, и пятно на взгляд делалось меньше, чем раньше, средняя же часть оставалась совершенно черной в обоих случаях, за исключением нескольких пятен и полос, в которых, как я предполагаю, стекла, благодаря некоторой неровности полировки, касаются не полностью. То же самое я наблюдал, рассматривая пятно при таком же отражении попеременно солнца и облаков.

Но вернемся к светлым и черным кольцам. Такие кольца являются всегда, как описано, если свет однороден. Таким способом, освещая два соприкасающихся стекла  $AQ$  и  $AR$  в темной комнате однородным светом, полученным посредством призмы, я наблюдал светящиеся круги числом свыше двадцати со многими темными кольцами между ними; цвет светлых кругов такой же, как и у света, падающего на стекла. Когда стекла помещались между глазом и призматическими цветами, отброшенными на лист белой бумаги, или какой-либо из призматических цветов прямо пропускался через стекла к листу бумаги, помещенному несколько позади, то появлялись такие же кольца цвета и темноты (в первом случае между стеклами, во втором — на бумаге), однако в противоположном порядке, чем кольца, видимые при отражении. Я подразумеваю, что в то время как в отраженном свете в середине было видно темное пятно и затем цветной круг, в проходящем свете, наоборот, в середине было цветное пятно, а за ним черный круг и т. д.; диаметры цветных кругов в проходящем свете равнялись диаметрам черных колец при отражении.

Таковыми являются и должны быть кольца, говорю я, когда они получаются при помощи однородного света. В сложном свете происходит иначе. Лучи, являющие красный и желтый, возбуждают, как

Я сказал, большие пульсации в эфире, чем лучи, создающие синий и фиолетовый, следовательно, они дают круги более широкие в определенной пропорции, как это я ясно обнаружил, освещая стекла последовательно вышесказанными цветами призмы в хорошо затемненной комнате и не изменяя положения моего глаза и стекол. Поэтому круги, получаемые при освещении стекол белым светом, не должны казаться поочередно черными и белыми, подобно тому как круги при освещении стекол, например, красным светом кажутся красными и черными. Цвета, составляющие белый свет, должны разойтись при отражении, синие и фиолетовые должны подойти ближе к центру, чем красные и желтые, благодаря чему всякий светлый круг должен сделаться фиолетовым на внутреннем краю и красным на внешнем, в промежуточных частях цвета должны быть промежуточными. Светлые круги станут шире, чем раньше, рассеивая цвета в обе стороны, в те пространства, которые я называю черными кольцами; то, что казалось раньше черным, теперь

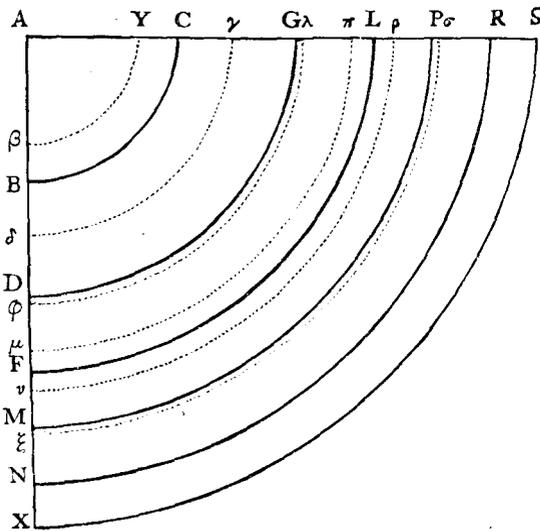


Рис. 5.

будет красным, желтым, синим и фиолетовым цветами, составляющими края колец и появившимися из падающего белого света, освещающего стекла. Для получения светлых колец остается только один зеленый цвет. Положим, что  $CB$ ,  $GD$ ,  $LF$ ,  $PM$ ,  $RN$ ,  $SX$  представляют квадранты кругов, получаемых в темной комнате при освещении одним только самым глубоким призматическим красным цветом;  $Y\beta$ ,  $\gamma\delta$ ,  $\lambda\phi$ ,  $\mu\pi$ ,  $\rho\nu$ ,  $\sigma\xi$  — квадранты таких же кругов, полученных также в темной комнате

при освещении одним только наиболее глубоким призматическим фиолетовым. Если затем стекла освещаются дневным светом, в котором все сорта лучей скрывают друг друга, то ясно, что первым светлым кольцом будет  $Y\beta BC$ , вторым —  $\gamma\delta DG$ , третьим —  $\lambda\phi FL$ , четвертым —  $\mu\pi MP$ , пятым —  $\rho\nu NR$ , шестым —  $\sigma\xi XS$  и т. д., при чем во всех наиболее глубокий фиолетовый должен отражаться по внутренним краям, отмеченным пунктирными линиями, где он отражался бы, если бы он был один; наиболее глубокий красный должен отражаться по внешним краям, представленным черными линиями, где он отражался бы, если бы существовал один; все промежуточные цвета отразятся на тех местах по порядку между указанными краями, на которых они отразились бы,

если бы были одни, отделенные ото всех других цветов в темной комнате преломлением в призме. Квадраты полудиаметров внешних краев  $AC$ ,  $AG$ ,  $AL$  и т. д., так же, как  $AU$ ,  $A\gamma$ ,  $A\lambda$  и т. д., полудиаметров внутренних краев, находятся в арифметической прогрессии чисел 1, 3, 5, 7, 9, 11 и т. д. и квадраты внутренних относятся к квадратам внешних ( $AU^2$  к  $AC^2$ ,  $A\gamma^2$  к  $AG^2$ ,  $A\lambda^2$  к  $AL^2$  и т. д.), как 9 к 14 (как это я нашел тщательно и часто измеряя их, и сравнивая наблюдения). Поэтому внешний красный край второго кольца и внутренний фиолетовый третьего должны граничить друг с другом (как вы можете найти это вычислением и видите изображенным на фигуре). Соответственные края третьего и четвертого колец будут пересекаться, края четвертого и пятого пересекутся еще больше и т. д. В действительности цвета каждого кольца должны распространиться в обе стороны несколько больше, чем это изображено, так как квадратные дуги, начерченные здесь, изображают не края, но середины колец, полученных в темной комнате от крайнего фиолетового и красного; фиолетовый падает по обеим сторонам пунктирных дуг и красный по обеим сторонам черных дуг. Поэтому эти кольца, или окружности, непрерывно следуют друг за другом без всякого черного промежутка, и цвета чисты только в трех или четырех первых кольцах, далее они входят друг в друга и смешиваются все более и более, растворяя друг друга настолько, что после восьмого или девятого кольца их нельзя более различить, они составляют на взгляд равномерную белизну. Между тем, когда кольца получаются в темной комнате только в одном из призматических цветов, я наблюдал, как говорил, свыше двадцати колец и, несомненно, мог бы увидеть их и в большем числе, если бы потрудиться сделать призматический свет более чистым. Разделяя эти кольца одно от другого некоторыми преломлениями, описанными в других бумагах<sup>35)</sup>, посланных вам, я даже на дневном свете открыл свыше сотни колец<sup>41)</sup>; может быть, они являлись бы в бесчисленном количестве, если бы цвет, освещающий стекла, был абсолютно несложным, а зрачок моего глаза — математической точкой, так, чтобы все лучи, идущие от одной и той же точки стекла, могли бы входить в глаз с одинаковым наклоном к стеклу.

Сказанное до сих пор о кольцах относится к их наблюдению неподвижным глазом; если, однако, вы изменяете положение глаза, то чем отложее вы смотрите на стекло, тем шире кажутся кольца. Причина этого может быть отчасти в том, что наклонный луч проходит более длинный путь через первую поверхность, поэтому имется большее время для волнения вперед и назад на этой поверхности и, следовательно, рождается более широкая волна; частью причина может быть в том, что волна, двигаясь между двумя поверхностями, может ускоряться и замедляться твердостью этих поверхностей, связываясь на обоих концах; таким образом она не обгоняет

луч столь же быстро, как волна, движущаяся перпендикулярно поперек стекол.

В других бумагах<sup>35)</sup>, посланных вам, вы найдете описание ширины скружностей для каждого цвета при всех наклонах глаза к стеклам и толщину воздуха, или промежутки между стеклами, при которых получается каждый круг. Там я также подробно описал, насколько получается каждый круг. Там я также подробно описал, насколько заходят или распространяются эти кольца друг за друга, какие цвета видны в каждом кольце, где они наиболее живые, где и каким образом они более растворяются, смешиваясь с цветами других колец, каковы противоположные цвета, видные с задней стороны стекол в проходящем свете, при чем стекла пропускают свет одной окраски в том же месте, где они отражают свет другой окраски.

Нет нужды добавлять что-нибудь дальше о цветах других сред в виде тонких пластинок, например, воды между вышеуказанными стеклами или воды в форме пузырей, ограниченной таким образом воздухом, или стекла, выдутого в очень тонкие пузыри на очаге, и т. д.; обстоятельства везде здесь одни и те же, за исключением того, что там, где толщина пластинки неправильна, кольца не будут таковыми; в пластинках из более плотных прозрачных тел кольца получаются при меньшей толщине пластинки (я предполагаю, что колебания будут короче в более разреженном эфире, чем в плотном), в плотных пластинках, окруженных более разреженным телом, цвета более живые, чем в пластинках из разреженного вещества, окруженных более плотным. Например, цвета более живые в стеклянной пластинке, окруженной воздухом, чем в воздушной пластинке, окруженной стеклом. Причина этого в том, что отражение второй поверхности, вызывающей цвета, как было сказано выше, сильнее в первом случае, чем в последнем. По этой же причине цвета наиболее живые, когда разность плотностей сред наибольшая.

В тех же бумагах я подробно говорю о цветах естественных тел, и показываю каким образом различные размеры прозрачных частиц, из которых тела состоят, достаточны для получения всех цветов. Эти частицы отражают или пропускают тот или иной сорт лучей, сообразно их толщинам, подобно вышеуказанным пластинкам, как будто бы они были осколками таких пластинок. Ибо, я предполагаю, если разбить пластинку равной толщины, а следовательно, однородной окраски на части той же толщины, как у пластинки, то куча таких осколков будет порошком такой же окраски, как и у пластинок. Таким образом, если частицы имеют толщину воды в черном пятне на вершине пузыря, описанного в семнадцатом из наблюдений, посланных вам, то, предполагаю я, тело должно быть черным. При возникновении такой черноты, я предполагаю, что частицы данной формы предрасположены не отражать почти никакого света наружу, они непрерывно преломляют свет при прохождении его от одной частицы к следующей;

при таком множестве преломлений лучам приходится столь долго бродить туда и сюда внутри тела, что, наконец, почти все натываются на твердые частицы тела и, таким образом, останавливаются и тухнут; эти частицы не имеют нужной упругости или другого предрасположения, возвращающего достаточно быстро резкий удар луча ему же обратно.

Я мог бы здесь закончить, но имеется еще другое странное явление цветов, которое заслуживает внимания. Я прошу вспомнить, что мр. Гук говорил о неправильном рассеянии света, вызываемом при прохождении света вблизи ребра бритвы, лезвия или другого непрозрачного тела в темной комнате <sup>42)</sup>. Лучи, проходящие очень близко около ребра, благодаря этому рассеиваются по всем углам внутрь тени лезвия.

По этому поводу сэр Вилльям Петти, тогда президент, поставил один очень уместный вопрос: не происходит ли такое рассеяние по кривым линиям? Это заставило меня сказать, после того как я слышал несколькими днями раньше, как мр. Гук сравнивал такое рассеяние с рассеянием звука внутри покоящейся среды, что я считаю его только новым родом преломления, вызванным, может быть, тем, что внешний эфир начинает немного разрежаться в сравнении со свободным пространством, еще не доходя до темного тела; более плотный эфир вне тела и разреженный эфир внутри него ограничиваются не математической поверхностью, а переходят друг в друга через промежуточные степени плотности. Поэтому лучи, проходящие столь близко от тела, что они заходят внутрь тех пределов, где внешний эфир начинает разрежаться, должны преломляться благодаря неодинаковой плотности и отклоняться внутрь к более разреженной среде. Мр. Гуку было угодно на это ответить, что хотя бы это и был только новый род преломления, однако, все же новый. Я не знал, что делать с этим неожиданным ответом, ибо не имел других мыслей, кроме того, что новый род преломления может быть столь же благородным открытием, как и всякая другая вещь, касающаяся света. Но после этого, я не знаю, по какому случаю, мне довелось сказать некоторым лицам, которые присутствовали при происшедшем, что, я думаю, я видел этот опыт раньше у одного итальянского автора. Автор этот Гоноратус Фабер, опыт описан в его диалоге „De Lumine“, заимствованном из Гримальдо <sup>43)</sup>. Я упоминаю его, так как намерен описать кое-что, являющееся шагом вперед в срав-

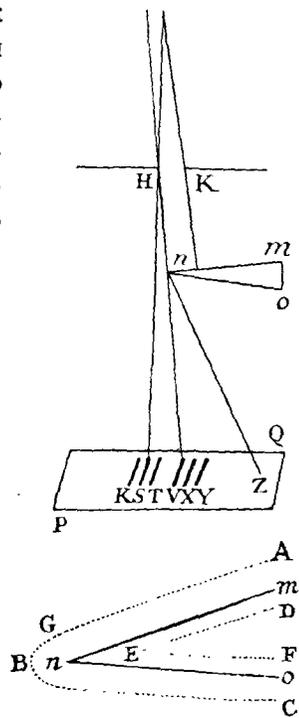
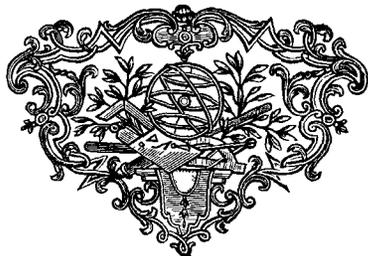


Рис. 6.

нении с ним, как вы поймете из этой фигуры. Положим, что солнце светит через малое отверстие  $HK$  внутрь темной комнаты и освещает бумагу  $PQ$ . Клин  $MNO$  задерживает весь свет за исключением небольшой части пучка. Вы увидите тогда на бумаге шесть рядов цветов  $R, S, T, V, X, Y$ , и, кроме этого, очень слабый свет, рассеивающийся во все стороны, как это получилось бы от преломленных лучей в роде  $HNZ$ . Автор описывает это более пространно на различных схемах. Я имею время упомянуть только главное из того, что он говорит<sup>44</sup>).

Для (объяснения) излома луча  $HNZ$  предположим, что на следующей фигуре  $MNO$ —твердый клин,  $ABC$ —внутренняя граница однородного разрезанного эфира внутри, в этих пределах эфир проходит все промежуточные степени; ясно, что если луч идет между  $B$  и  $n$ , он должен при проходе там отклониться от более плотной среды к  $C$  и тем больше, чем ближе он подходит к  $n$ . Далее, что касается трех рядов цветов  $VXY$ , то они, может быть, происходят от числа колебаний (одного, двух или трех), перегоняющих луч при его переходе от  $G$ , на полпути между  $G$  и  $H$ , т.-е. на ближайшем расстоянии от  $n$ , так что луч касается круга, описанного около  $n$  этим расстоянием. Последнее из указанных колебаний, соответственно сжимая или расширяя там среду, будет давать возможность лучу отойти снова от  $n$ , продвинуться дальше и создать цвета. Если луч загнетса около  $n$  и его обгонит интервал следующей волны, дав ему возможность отойти от  $n$  по линии движения, очень близко совпадающей с той, которая направлена к  $Z$ , то появится слабый свет, о котором говорилось выше. Вы поймете меня немного лучше, сравнив это с тем, что было сказано о цветах тонких прозрачных пластинок, и сравнивая наибольшее расстояние, проходимое лучом от  $GBH$  к  $n$ , с толщиной одной из этих пластинок. Нечто похожее имеется в декартовом объяснении цветов радуги, которое может осветить дальше этот вопрос. Но я не имею времени развивать дальнейшие подробности и не предлагаю этого с уверенностью, так как не сделал достаточных наблюдений по этому поводу.





## ПРИМЕЧАНИЯ К ПЕРЕВОДУ ОПТИЧЕСКИХ МЕМУАРОВ НЬЮТОНА.

1. 11 января 1672 г. Ньютон был избран членом Королевского Общества. В конце письма к секретарю Общества Ольденбургу от 18 января того же года Ньютон писал: „Мне хотелось бы, что в вашем следующем письме вы известили меня, сколько времени еще будут продолжаться еженедельные заседания Общества. Если они продолжатся еще некоторое время, я хотел бы, чтобы там было заслушано и рассмотрено сообщение об одном философском открытии, которое привело меня к изготовлению вышеуказанного телескопа; я не сомневаюсь, что оно будет принято с значительно большим удовлетворением, чем сообщение об инструменте; по моему суждению, это страннейшее, если не самое значительное открытие, которое когда-либо делалось в отношении действий природы“ (Th. Birch. The History of the R. S. of London v. III, 5, 1757). 8 февраля того же года в заседании Общества было прочтено новое письмо Ньютона к Ольденбургу, составляющее первый переведенный мемуар. По постановлению Общества, письмо напечатано в Philosophical Transactions № 80, p. 3075 for February 1674<sup>1/2</sup>). Русский перевод сделан по переизданию Phil. Trans. в 1809 г. (The Philosophical Transactions of the R. S. of London from their commencement, in 1665 to the year 1800; abridged., v. I, p. 678, 1809) и сверен с латинским текстом по изданию оптических сочинений Ньютона, цитированному в предисловии. Точное заглавие мемуара: „Письмо мр. Исаака Ньютона, профессора математики Кембриджского Университета, содержащее его новую теорию света и цветов“.

2. Историю возникновения оптических работ Ньютона можно найти, например, у F. Rosenberger'a. Isaac Newton, 1895.

3. Возникновение призматических цветов различными толщинами стекла в призме объяснял de Dominis (1611). Трактат de Dominis, изданный в Венеции в 1611 г., был известен Ньютону. Ср. Rosenberger, l. c., p. 14.

4. По поводу некоторых опытов, предложенных для проверки теории Ньютона в Обществе (Phil. Trans. abridged., v. I, p. 714, 1809), Ньютон сообщает о таком опыте: „Рассудив, что лучи, идущие от планеты Венеры, меньше наклонены друг к другу, чем лучи от противоположных частей солнечного диска, я однажды сделал один или два опыта с ее светом. Для того, чтобы он был достаточно сильным, я счел нужным собрать сначала свет Венеры при помощи широкой линзы. Поместив затем призму между линзой и ее фокусом на таком расстоянии, что свет мог проходить через призму, я нашел, что фокус, казавшийся ранее светлой точкой, растянулся в длинную блестящую линию“. То же наблюдение излагается в „Оптических лекциях“ (раздел первый, XX).

5. Явление, описываемое здесь Ньютоном, известно теперь под названием „эффекта Магнуса“ и нашло техническое применение в роторном корабле Флеттнера. Современное гидродинамическое объяснение эффекта можно найти, например, в статье Л. Прандтля: „Эффект Магнуса и ветряной корабль“ (У. Ф. Н. 5, стр. 1, 1925).

6. В связи с возражениями О. Пардиса, Ньютон поместил позднее в *Phil. Trans.* рисунок, иллюстрирующий *experimentum crucis*, который здесь воспроизводится без дальнейших пояснений.

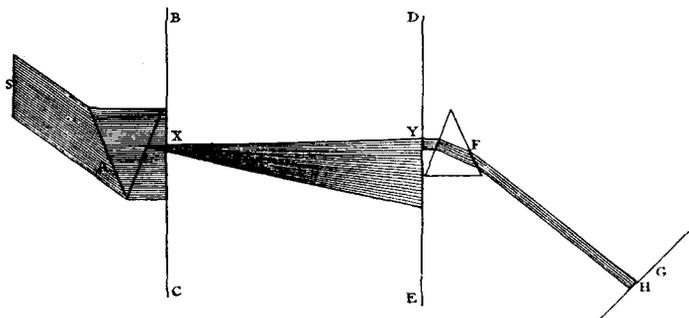


Рис. 1.

7. Второй телескоп Ньютона был послан в конце 1671 г. в Лондон, осматривался королем и членами Королевского Общества: „Они составили столь хорошее мнение об инструменте (*Biich. History of R. S.*, v. III, p. 1), что постановили послать через секретаря описание и схему с письмом к г. Гюйгенсу, находившемуся тогда в Париже, чтобы обеспечить права автора“. Описание телескопа Ньютона вместе с ответом Гюйгенса напечатаны в *Phil. Trans.* за 1672 г.

8. Цвета тонких пластинок, впервые обстоятельно описанные Гуком в его „Микрографии“ (1667 г.).

9. Впоследствии (в „Оптике“) Ньютон переменил номенклатуру цветов: пурпуровым стал называться сложный цвет, — результат смешения фиолетового с красным в разных пропорциях.

10. Настойка нефритового дерева, вывезенного из Мексики, содержащая, по видимому, раствор эскулина. Цвет вытяжки в проходящем свете желтый, в отраженном обнаруживается синяя флуоресценция, возбуждающаяся крайними фиолетовыми и ультра-фиолетовыми лучами. В этой области спектра Ньютон едва ли производил свои опыты с монохроматическим освещением. В остальных частях получался рассеянный свет от частиц, взвешенных в жидкости, вполне совпадавший по цвету с падающим. Наблюдения над настойкой нефритового дерева производились Кирхером, Гримальди, Бойлем, Гуком и др.

11. Самому Ньютону этот опыт Гука повторить не удалось, как следует из соответствующего места в „Оптике“. Опыт подробно дискутируется Ньютоном в ответе на критику Гука (*Phil. Trans. abr.*, v. II, p. 21, 1809).

11а. В английском тексте — *bise*, в латинском переводе — *pulvis caeruleus montanus* (синий горный порошок).

12. Этот неясно и осторожно написанный абзац был понят Гуком как утверждение телесности света Ньютоном (*Biich.*, v. III, p. 14). В своем длинном, остроумном ответе Гуку, дополняющем во многом основной мемуар (*Phil. Trans.*, v. II, p. 13, 1809), Ньютон пишет: „Эго верно, что из моей теории я заключаю о телесности света, но делаю это безо всякой решительной настойчивости (*absolute positiveness*), как на то указывает слово „быть может“. Самое большее — это очень вероятное следствие доктрины, но не основное предположение, или часть такового, все предложения собраны в предыдущих пунктах. Я несколько удивлен, как мог вообразить критик, что, утверждая теорию с величайшей строгостью, я после этого беззаботно говорю об основном предположении только как о чем-то, что „быть может“. Если бы в мое намерение входила такая гипотеза, я объяснил бы ее где-нибудь. Но я знал, что утверждаемые мною свойства света могут быть в некоторой степени объяснены

не только этой, но и многими другими механическими гипотезами. Поэтому я решил их все отклонить и говорить о свете в общих выражениях, рассуждая о нем отвлеченно, как о чем-то, распространяющемся всегда по прямым линиям от светящихся тел, не определяя того, что это такое: беспорядочная ли смесь разнообразных качеств, модусов тел, тел самих, или каких-то способностей, сил или чего-либо иного". В латинском переводе последняя фраза текста передана так: *ego vero incerta certis miscere polo*.

13. Подробное описание коллиматорной установки Ньютона дал в „Оптике“.

14. Полемика по поводу теории Ньютона и его опытов тянулась почти непрерывно 4 года и затем сразу заглохла. В *Phil. Trans.* за 1672—1676 гг. помещено 19 №№ Ньютона и его оппонентов по этому вопросу. Полемику начал Гук (*Virch*, v III, p. 10), последнее по времени (1676 г.) возражение было сделано Лусас (Льеж), у которого длина спектра оказалась значительно меньше, чем у Ньютона. Ньютон обстоятельно отвечал оппонентам, производил новые опыты, описывал подробности старых, и в Обществе назначались комиссии для повторения опытов Ньютона. Однако поверхностные полемические выступления, основывавшиеся в значительной мере на неумелых повторениях опытов или непонимании новой теории, чрезвычайно раздражали Ньютона. В марте 1673 г. Ньютон собирался уйти из Общества, в июне того же года он просит Ольденбурга, по возможности, не пересылать к нему всяких возражений и писем. Наконец, 18 ноября 1676 г. он пишет Ольденбургу: „Я вижу, что сделался рабом философии. Но когда я покончу с делом мр. Люкаса, я решительно и навсегда с ней распрощаюсь, за исключением того, что делаю для собственного удовольствия, и того, что оставляю для опубликования после смерти. Я узнал теперь, что либо вообще нельзя с общать ничего нового, либо приходится тратить все свои силы на защиту своего открытия“. С 1676 г. имя Ньютона исчезает со страниц *Phil. Trans.* и появляется вновь только в конце 1679 г. Подробное изложение полемики см. у Розенбергера. Текст полемики собран в издании оптических сочинений Ньютона, цитированном в предисловии.

15. В письме от 13 ноября 1675 г. Ньютон известил Ольденбурга о своем намерении прислать Обществу новое рассуждение о цветах. Полученный большой манускрипт начали чтением 9 декабря. Чтение продолжалось 16 декабря, 29 января, 3 и 10 февраля. В препроводительном письме Ньютон пишет: „По перерываниям и вставкам между строк вы можете видеть, что гипотеза написана враскоряку и я не имел времени ее переписать, что заставляет меня оставить за собой свободу сделать добавления; я хотел бы, чтобы вы вернули мне как эту, так и другие статьи по миновании надобности“. Мемуар при жизни Ньютона не был напечатан и опубликован полностью в „Истории Королевского Общества“ (*Th. Virch. History of R. S.*, v. III, p. 248, 1757). Вторая часть мемуара почти полностью включена Ньютоном в „Оптику“ с небольшими изменениями. На русский язык переведена первая часть мемуара.

16. Ср. прим. 12. Подробное изложение возражений Гука и ответа Ньютона дано у Розенбергера.

17. Ньютон присутствовал на заседании Общества 11 марта 1675 г. По поводу чтения рассуждения Бойля о свечении гниющего мяса зашел спор о природе света, при чем Гук высказал следующие соображения (*Virch*, v. III, p. 193): „Свет есть колебательное или дрожательное движение среды, происходящее вследствие подобного же движения светящегося тела, подобно звуку, который всегда объясняется дрожанием среды, проводящей его, получающимся от дрожательного движения звучащего тела. Как в звуке пропорциональные колебания производят различные гармонии, также и в свете получаются различные странные и приятные цвета посредством смешения пропорциональных и гармоничных движений. Одни ощущаются ухом, другие глазом“. На следующем заседании 18 марта Гук читал свое рассуждение о природе и свойствах света, основанное на его дифракционных опытах. Можно думать, что

эти два заседания Общества и послужили поводом возникновения нового мемуара Ньютона.

18. Great virtuosos.

19. Ср. конец прим. 14. В препроводительном письме к Ольденбургу Ньютон писал: „Сэр, я предполагал раньше никогда не писать гипотез о свете и цветах, опасаясь, что они вовлекут меня в пустые пререкания. Но я надеюсь, что заявленное мною решение не отвечать на все, что походит на возражение, может уберечь меня от таких опасений“.

20. Впоследствии опыты с маятником в пустоте с той же целью определения затухания колебаний в эфире производил Ламберт (Ср. L. Eulers und J. H. Lambert's Briefwechsel. Aus der Abh. der Preuss. Ak. d. W., № 2, 1924).

21. В оригинале phlegmatic.

22. В оригинале spirits. Слово spiritus применялось Ньютоном и его современниками в самых разнообразных значениях. Иногда spiritus соответствует духу, сущности, иногда им обозначаются кислоты, в некоторых случаях spiritus — спирт в современном смысле. Когда Ньютон называет spiritus'ом один из видов эфира в переводе всюду применяется слово „газ“.

23. В оригинале protoplast.

24. Электрические опыты Ньютона были повторены в Обществе сначала неудачно, затем, после дополнительных указаний Ньютона (Vigsh, v. III, p. 261), с полным успехом.

25. Здесь мы имеем первые указания на занятия Ньютона вопросом о тяготении.

26. Эта фраза может быть истолкована как первое указание на закон обратных квадратов.

27. В этой фразе легко заметить распространение начала тяготения на солнечную систему.

28. Это объяснение капиллярных явлений впоследствии („Оптика“, вопрос 29) оставлено Ньютоном, в „Оптике“ подъем жидкостей в капиллярных трубках иллюстрирует наличие молекулярных притяжений.

29. В подлиннике: the animal spirits are neither like the liquor, vapour, or gas of spirit of wine. Ср. прим. 22.

30. Acid spirits. Ср. прим. 22.

31. Отзвук учения Декарта.

32. Ср. прим. 28.

33. В письме к Ольденбургу от 14 декабря 1675 г., присланном непосредственно вслед за мемуаром по поводу электрических опытов, упомянутых в последнем, Ньютон писал: „Прошу передать мой почтительный привет мр. Бойлю, если вы его увидите, и поблагодарить его за беседу, которой он меня удостоил этой весной. Моя идея поймать эфир в западню (trapping the common aether), как ему угодно было выразиться, думается мне, не так смешна, как ему казалось (makes me begin to have the better thoughts on that he was pleased to entertain it with a smile). Я надеюсь, что если он предполагает сделать ряд опытов со своим воздушным насосом, то он попробует так же, как действует сжатие или расширение мускула на его размягчение или отвердение, удлинение и сокращение“ (Vigsh, v. III, p. 261).

34. Вывод этой теоремы помещен в „Началах“ (русский перевод акад. А. Н. Крылова т. I, ст. 250 и след.).

35. Вторая часть переводимого мемуара, вошедшая впоследствии в „Оптику“.

36. Передней части волны соответствует здесь, например, фаза сжатия, задней — фаза расширения. Ньютон мимоходом минует этот важный пункт гипотезы, столь же трудный для нее, как и для чистого волнового представления.

37. Sensorium.

38. Аналогия между спектром и музыкальной гаммой в „Оптике“ излагается несколько иначе. Относительно современной оценки этой аналогии ср., например Р. Хаустен — „Свет и цвета“, 1926. ГИЗ.

39. Отвечая на заявление Гук а о том, что гипотеза Ньютона совпадает с его собственной, Ньютон замечает: „У меня нет ничего общего с ним, кроме предположения, что эфир есть среда, способная к колебаниям, но я пользуюсь этим предположением совершенно иначе, чем он: он предполагает, что колебания и есть свет, а я предполагаю, что это не так. В этом большое различие как с ним, так и с Декартом (Vigès, v. III, p. 279).

40. В том же году, когда Ньютон так оценивал верхнюю границу для скорости света, было опубликовано открытие Рёмера. Сообщение об этом было помещено в Phil. Trans. в 1677 г.

41. Так называемые ахроматические кольца, получающиеся при рассматривании колец Ньютона через призму и другими способами. См., например, H. Bouasse et Z. Carrigère. Interferences, p. 339, 1923.

42. Гук читал в Обществе о своих диффракционных опытах 18 марта 1675 г.

43. Книга Гримальди Physico Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride etc. Bononiae, 1665, реферировалась в Phil. Trans. в 1672 г. Судя по тексту мемуара, Ньютон до этого времени трактата Гримальди не читал. Цитируемый им автор Оноре Фабри не итальянец, а француз (родился в 1607 г. около Лиона). Заглавие книги, которой пользовался Ньютон: Dialogi Physici; quorum Primus de Lumine etc. Lugduni Galliarum, 1669. Книга не заимствована у Гримальди, а содержит возражения против него.

44. Судя по тому, что Ньютон излагает чужой опыт, можно думать, что до конца 1675 г. он сам не производил диффракционных опытов. Его собственные опыты изложены в „Оптике“.





# ИСААК НЬЮТОН

# ОПТИКА

\*

\*\*\*\*\*

Перевод с третьего английского издания 1721 года  
и примечания проф. С. И. ВАВИЛОВА

\*\*\*\*\*



**В**ыходит из печати и в ближайшие дни будет  
рассылаться годовым подписчикам.

В книге около 380 стр. Цена в розничной  
продаже:

На бумаге вержэ в переплете — 4 р.

На матовой бумаге в перепл. — 3 р. 50 к.

На матовой бумаге в обложке — 3 р. 20 к.

Продажа во всех магазинах Государственного Издательства