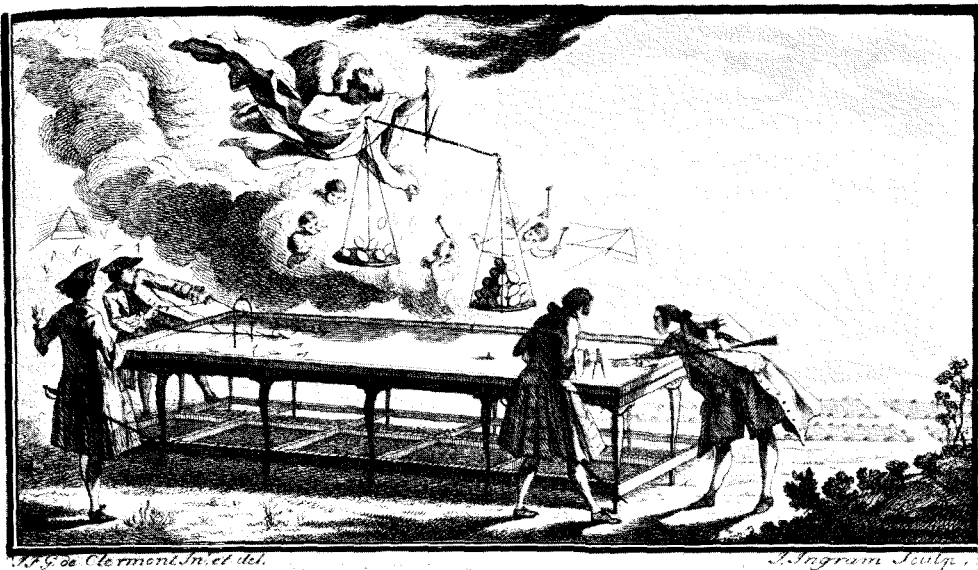




## ПРИНЦИПЫ И ГИПОТЕЗЫ ОПТИКИ НЬЮТОНА.

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 ненужностью. 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 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.



Рис. 1. Памятник Ньютону в Кембридже.

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.

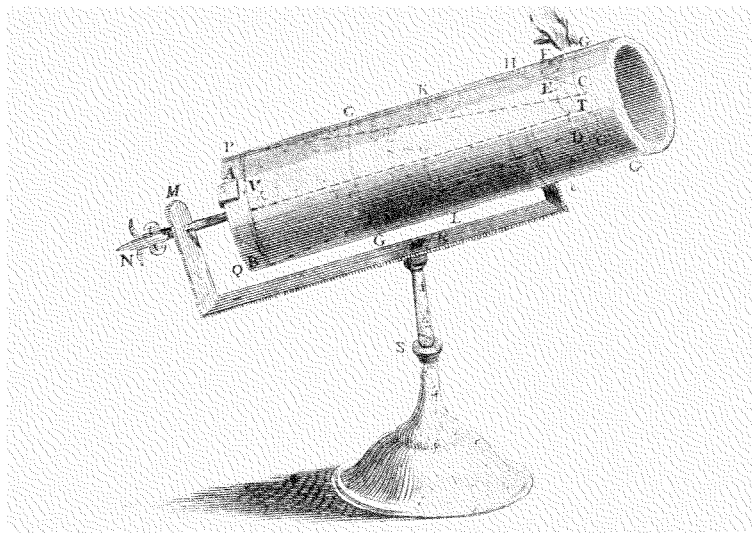


Рис. 2. Телескоп Ньютона.

Трудно установить какие-либо сильные влияния на Ньютона или прееменовенность, 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 большей 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.

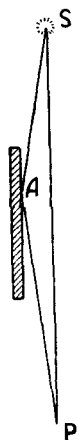
Из последних строк видно, что даже поэты делали отсюда вывод о телесности света, сравнивая свет с атомами: тот же вывод, правда в форме крайне осторожной, высказал и Ньютон в своем мемуаре.

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 мμ, 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 замет-



ными, 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  $10^{-5}$ — $10^{-6}$   $\mu$ , 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.

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

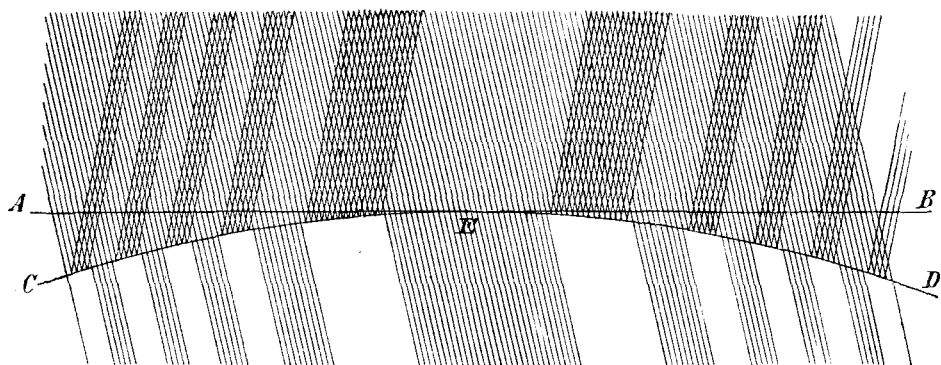


Рис. 4.

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:



| Ц в е т                 | По<br>Н ь ю т о н у<br>$\lambda$ | Округленное<br>истинное значение<br>$\lambda$ |
|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| Граница оранж. и желт.  | 571 $\mu$                        | 587 $\mu$                                     |
| 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 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 ньютоновский „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, ньютоновы кольца — интерференционный прибор, при помощи которого получена первая в истории оптики спектральная

таблица, приведенная выше; наконец щель между лезвиями бритв — прототип 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 Воластона?

#### 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 Ньютону при диффракции, отражении и проявлении, наконец, позднее, поляризация, которая могла быть для XVII века только проявлением твердой корпускулы, — вот доводы, которые согласно объединялись в образ 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 корpusкулах.

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 корpusкулы 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-

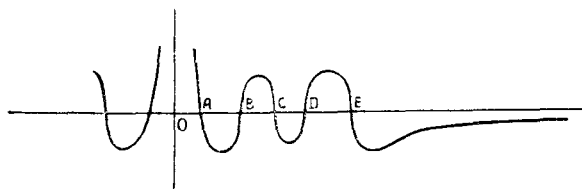


Рис. 5.

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

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 MDCCCL XVI. Подробное изложение учения Бошковича можно найти в книге D. Nedelkovitch. 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 дифракции. 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.

