



## Х. Гюйгенс

1629—1695

---

### О проблемах механики. О теории света

Две области физики — механика и оптика — в наибольшей степени способствовали формированию классической науки. Это обстоятельство подтверждается тем, что практически все крупнейшие естествоиспытатели XVII в., работавшие в области физики (И. Кеплер, Г. Галилей, Р. Декарт, Р. Гук, И. Ньютон), занимались как проблемами механики, так и вопросами оптики. Среди ученых — младших современников Галилея и старших современников Ньютона — особое место занимает голландский физик и математик Х. Гюйгенс, чьи работы в области механики оказали влияние на создателя «Математических начал натуральной философии», а подход к вопросам оптики в виде «принципа Гюйгенса» сохранился в современной науке.

**Х**ристиан Гюйгенс родился 14 апреля 1629 г. в Гааге в знатной и богатой семье. Получив юридическое образование в Лейденском и Бредском университетах, Гюйгенс решил все же посвятить себя математике и физике, наклонности к которым проявились у него еще в детстве.

Свой творческий путь он начинает как математик, находясь под сильным влиянием трудов Архимеда и Декарта. Его первые работы посвящены классическим проблемам: «Теоремы о квадратуре гиперболы, эллипса и круга и центра тяжести их частей» и «Открытия о величине круга». В последнем сочинении он сумел, используя алгебраический подход, уточнить значение числа « $\pi$ ». Написанный им в 1657 г. трактат «О расчетах при азартной игре» является одной из первых работ по теории вероятности.

Увлечшись в молодости шлифованием стекол, Гюйгенс совершенствовал свою технику на протяжении всей жизни. Ему удалось создать линзы с громадными фокусными расстояниями в десятки метров (в том числе в 54 и 63 м), сконструировать окуляр, названный впоследствии его именем и используемый до настоящего времени.

Усовершенствовав конструкцию телескопа, Гюйгенс, подобно Галилею, сам проводил астрономические наблюдения, причем ему удалось сделать ряд астрономических открытий, таких, как наблюдение спутника и установление строения Сатурна, обнаружение шапок на Марсе, полос на Юпитере, туманности в созвездии Ориона. Для измерения видимого диаметра планет ученый сконструировал астрономический микрометр. Свои открытия он описал в книге «Система Сатурна», вышедшей в 1659 г.

Астрономические открытия принесли Гюйгенсу международную известность. Его избирают первым иностранным членом только что созданного Лондонского Королевского общества, а в 1665 г. приглашают в качестве почетного члена Парижской Академии наук. На протяжении многих лет он живет в Париже, и Франция становится его второй родиной. Он способствует поднятию престижа французской науки, завязывает международные научные связи, в частности с английскими физиками Бойлем, Гуком, Ньютоном, немецким математиком Лейбницем. В 1681 г., когда начались враждебные действия католической Франции по отношению к протестантской Голландии, Гюйгенс уезжает на родину, которую не покидает уже до самой смерти (8 июля 1695 г.).

Астрономические наблюдения, а также насущная для Нидерландов — морской державы — проблема определения долгот в открытом море настоятельно требовали определения точного времени. Гюйгенс берется за решение этой задачи, и 16 июня 1657 г. Генеральные штаты Нидерландов закрепляют за ученым приоритет изобретения маятниковых часов. В качестве регулятора, обеспечивающего равномерность хода часов, Гюйгенс использовал маятник. Идею таких часов предложил еще Галилей в последние годы своей жизни, но реализовать эту идею ни ему, ни его сыну не удалось. Гюйгенс пришел к своему изобретению, по-видимому, совершенно независимо от Галилея, хотя после публикации в 1658 г. трактата «Маятниковые часы» некоторые его современники высказывали сомнение в его приоритете. В трактате была изложена теория математического и физического маятников, приведена формула для расчета периода колебаний маятника. Кроме того, Гюйгенс рассмотрел теорию таутохронного маятника, период колебаний которого не зависит от амплитуды. Ученый доказал, что для обеспечения таутохронности центр масс должен двигаться по циклоиде. В конце трактата Гюйгенс приводит теоремы о центробежной силе и ее формулу без вывода. В небольшой работе «О центробежной силе», написанной вскоре после «Маятниковых часов», он дал подробный вывод этой формулы. Важной особенностью этой работы является использование принципа относительности для доказательства ряда теорем.

Важным вкладом в развитие динамики стал мемуар «О движении тел под влиянием удара». Проблема соударения тел была актуальной во второй половине XVII в., поскольку она касалась

одного из простейших примеров взаимодействий тел, которые являются основным предметом динамики. Решение проблемы удара было найдено почти одновременно Валлисом, Реном и Гюйгенсом. В ответ на запрос Лондонского Королевского общества последний вслед за английскими учеными представил 7 января 1669 г. подробное доказательство теорем, касающихся удара упругих тел и правила вычисления их скоростей после взаимодействия. Королевское общество несправедливо замолчало работу Гюйгенса, опубликовав в январе 1669 г. в «Philosophical Transactions» только статьи Рена и Валлиса. Мемуар Гюйгенса «О движении тел под влиянием удара» увидел свет (как и мемуар о центробежной силе) в посмертных трудах, изданных в Лейдене в 1703 г.

Крупнейшим вкладом Гюйгенса в развитие физики была его теория света. Свои результаты по оптике Гюйгенс излагал неоднократно на заседаниях Парижской академии еще в 1678 г., но лишь в 1690 г., достигнув в своих исследованиях необходимой ясности и законченности, он издал «Трактат о свете». В этом небольшом, но очень глубоком сочинении Гюйгенс на основе представления об эфире и движении его частиц смог вывести законы отражения и преломления, а также объяснить особенности двойного лучепреломления, открытого Э. Бартолином в 1669 г. Основой рассмотрения оптических явлений служит знаменитый «принцип Гюйгенса», согласно которому любая точка волнового фронта становится источником вторичных возмущений в эфире, а их огибающая образует новый волновой фронт. Следует отметить, что Гюйгенс не вводил гипотезу о периодичности световых возмущений, поэтому его теорию света лишь условно можно называть «волновой». Несмотря на большие достижения теории Гюйгенса, невозможность объяснения в ее рамках прямолинейности распространения света и некоторых других оптических эффектов привела к тому, что представления Гюйгенса о свете не получили всеобщего признания и были возрождены (конечно, на новой основе) лишь в начале XIX в.

Мировоззрение Гюйгенса складывалось под впечатлением успехов, одерживаемых механикой в объяснении природных явлений. Его можно считать одним из родоначальников механистического подхода к физике. В «Трактате о свете» он писал: «Истинная философия сводит все причины явлений природы к механическим причинам. Именно так надо поступать, по моему мнению, или же вообще оставить всякую надежду понять что-либо в физике».

**Гипотеза I.** Тело, приведенное в движение, при отсутствии противодействия продолжает свое движение неизменно с той же скоростью и по прямой линии.

**Гипотеза II.** Не входя в рассмотрение причины отскакивания твердых тел<sup>1</sup> после соударения, принимаем следующее положение:

Если два одинаковых тела, движущихся с одинаковой скоростью навстречу друг другу, сталкиваются прямым ударом, то каждое из них отскакивает назад с той же скоростью, с какой ударилось<sup>2</sup>.

Удар называется прямым, если само движение и соприкосновение происходит по прямой линии, соединяющей центры тяжести тел.

**Гипотеза III.** Движение тел, а также их одинаковые или разные скорости надо рассматривать как относительные по отношению к другим телам, которые мы считаем покоящимися, не учитывая того, что как те, так и другие тела могут участвовать в другом, общем движении. Поэтому два тела, соударяясь, даже в случае, если оба вместе участвуют еще в другом равномерном движении, для лица, также участвующего в общем движении, действуют друг на друга так, как будто бы этого общего движения не существовало.

Если, например, пассажир корабля, движущегося равномерно, вызовет удар двух равных шаров с одинаковыми, опять-таки по отношению к пассажиру, скоростями, то эти шары отскочат с одинаковыми по отношению к пассажиру и кораблю скоростями, совсем так, как если бы пассажир вызвал удар этих шаров на неподвижном корабле или на берегу<sup>3</sup>.

Положив такие гипотезы в основу рассмотрения удара равных тел, выведем законы их воздействия друг на друга. В дальнейшем в должном месте, мы введем еще новые гипотезы, которые нам потребуются при рассмотрении соударения неодинаковых тел.

**Предложение I.** Если с покоящимся телом соударяется одинаковое с ним тело, то ударившееся тело приходит в состояние покоя, а покоящееся тело приходит в движение со скоростью ударившегося о него.

Представим себе, что лодка плывет у берега по течению, и притом так близко к берегу, что пассажир лодки может подать руки человеку, стоящему на берегу. Пусть пассажир лодки держит в своих руках  $A$  и  $B$  [рис. 36] два одинаковых, подвешенных на нитях тела  $E$  и  $F$ . Расстояние  $EF$  делится пополам в точке  $G$ . Пассажир лодки, двигая свои руки навстречу одна другой с одинаковой скоростью по отношению к себе и лодке, вызовет удар шаров, которые затем отскочат один от другого с одина-

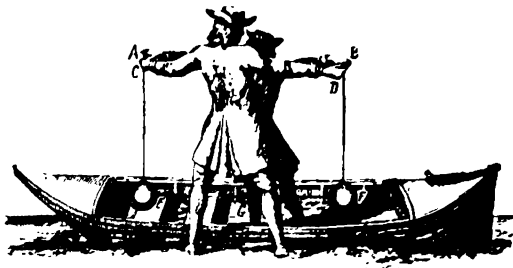
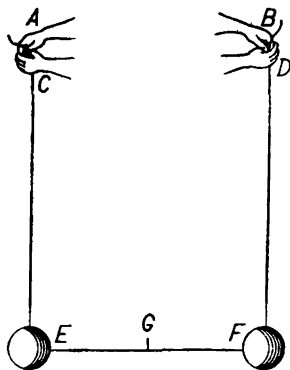


Рис. 36



ковыми скоростями относительно пассажира и лодки (по второй гипотезе).

Пусть лодка движется влево со скоростью  $GE$ , т. е. с той скоростью, с которой рука  $A$  движется вправо. Ясно, что относительно берега и человека, стоящего на берегу, рука  $A$  пассажира находится в покое, а рука  $B$  с точки зрения того же человека, движется со скоростью  $FE$ , удвоенной по сравнению с  $GE$  или  $FG$ . Представим себе теперь, что человек, стоящий на берегу, схватил своей рукой  $C$  руку  $A$  пассажира и вместе с тем конец нити, на которой висит шар  $E$ , а другой рукой  $D$  — руку пассажира  $B$ , держащую нить, на которой подвешен шар  $F$  [рис. 36]. Тогда произойдет следующее: в то время как пассажир лодки двигает шары навстречу один другому с одинаковой скоростью (относительно себя и лодки), человек, стоящий на берегу, ударяет по неподвижному шару  $E$  шаром  $F$ , движущимся со скоростью  $FE$ . Для пассажира лодки, двигающего шары указанным способом, не имеет никакого значения то обстоятельство, что человек на берегу схватил его руки и концы нитей, так как человек на берегу только участвует в движении, но движению не мешает. По той же причине человеку на берегу, который ударяет шаром  $F$  по неподвижному шару  $E$ , не мешает сплетение рук с пассажиром лодки, если только  $A$  и  $C$  покоятся относительно берега и человека, стоящего на берегу, а руки  $D$  и  $B$  движутся с одинаковой скоростью  $FE$ . Ввиду того что, как сказано, шары  $E$  и  $F$  отскакивают с одинаковыми скоростями, а именно: шар  $E$  — со скоростью  $GE$ , а шар  $F$  — со скоростью  $GF$  относительно лодки и пассажира, а сама лодка за это время проплывает влево со скоростью  $GE$  или  $FG$ , то относительно берега и человека, стоящего на берегу, шар  $F$  после удара останавливается, а шар  $E$ , с той же точки зрения, движется влево с двойной скоростью  $FE$ , той же самой, с которой человек на берегу двигал шар  $F$  к шару  $E$ . Таким образом, мы доказали относительно человека, стоящего на берегу, который ударял по неподвижному шару другим шаром, одинаковым с первым, что первоначально двигающийся шар потерял при ударе все свое дви-

жение, а первоначально неподвижный шар приобрел все движение. Это и требовалось доказать.

**Предложение II.** Если два одинаковых тела соударяются с разными скоростями, то они при ударе обмениваются скоростями.

Пусть тело  $E$  движется направо со скоростью  $EH$  [рис. 37], а одинаковое с ним тело  $F$  движется ему навстречу с меньшей скоростью  $FH$ . Следовательно, они встретятся в  $H$ . Я утверждаю, что после удара тело  $E$  будет двигаться влево со скоростью  $FH$ , а тело  $F$  — вправо со скоростью  $EH$ .

Представим себе человека, стоящего на берегу реки и следующим образом производящего указанные движения тел. Он держит в руках  $C$  и  $D$  концы нитей, на которых висят тела, и сближает руки со скоростями  $EH$  и  $FH$ , сближая, таким образом, и тела  $E$  и  $F$ .

Пусть расстояние  $EF$  делится пополам в точке  $G$ . Представим себе лодку, движущуюся вправо со скоростью  $GH$ , и на лодке человека. По отношению к этому человеку скорость шара  $E$  будет только  $EG$ , а скорость шара  $F$  будет  $FG$ .

Таким образом, относительно человека в лодке оба шара стремятся к столкновению с равными скоростями. Пусть человек в лодке схватил своими руками  $A$  и  $B$  руки  $C$  и  $D$  человека, стоящего на берегу, и вместе с руками — концы нитей [с грузами]. Тогда человек, стоящий на берегу, движет шары навстречу один другому со скоростями  $EH$  и  $HF$ , а человек в лодке — с одинаковыми скоростями  $EG$  и  $FG$ . Следовательно, с точки зрения человека в лодке оба шара отскочат один от другого с той же скоростью (гипотеза II), а именно:  $E$  отскочит со скоростью  $GE$ , а  $F$  — со скоростью  $GF$ . В то же время лодка движется вправо со скоростью  $GH$ . Поэтому относительно берега и человека на берегу  $F$  будет иметь скорость  $EH$ , составленную из  $GF$  и  $GH$ , а  $E$  — скорость  $HF$ , разность  $GE$  и  $GH$ . Следовательно, относительно человека на берегу, вызывающего соударение шаров  $E$  и  $F$  со скоростями  $EH$  и  $FH$ , шар  $E$  после удара отскакивает со скоростью  $FH$ , а шар  $F$  — со скоростью  $EH$ , что и требовалось доказать.

Если оба тела движутся вправо и притом  $E$  со скоростью  $EH$ , а  $F$  с меньшей скоростью  $FH$  [рис. 38], то тело  $E$  нагонит тело  $F$  и они встретятся в  $H$ . Я утверждаю, что после удара  $F$  будет продолжать движение со скоростью  $EH$ , а  $E$  — следовать со скоростью  $FH$ . Доказательство подобно вышеприведенному.

**Гипотеза IV.** Если большее тело соударяется с меньшим, находящимся в покое, то оно сообщает последнему некоторое движение и, следовательно, теряет несколько в своем движении. <...>

**Гипотеза V.** Если при соударении двух твердых, движущихся навстречу друг другу тел обнаруживается, что одно из них сохранило все движение, то и другое не выигрывает и не теряет ничего в движении.

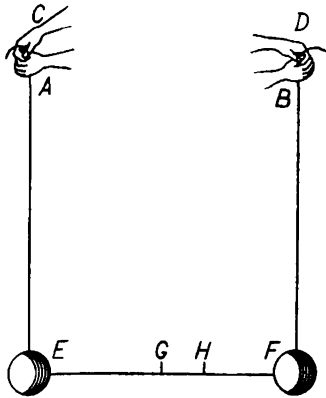


Рис. 37

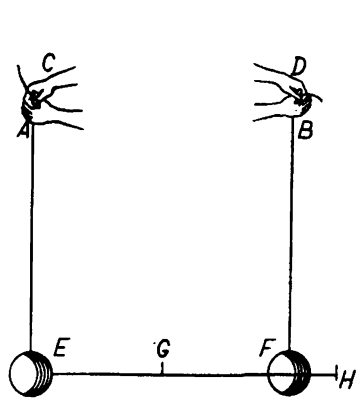


Рис. 38

**Предложение IV.** Если два тела сталкиваются, то их относительная скорость удаления после удара та же, что и относительная скорость сближения до удара.

Для одинаковых тел это очевидно по теореме II. Пусть тела будут не равны и пусть сначала рассматривается случай, когда на покоящееся большое тело движется меньшее  $B$  со скоростью  $BA$ , направленной вправо [рис. 39].

Пусть для пробега  $BA$  телу  $B$  потребовалось некоторое время.

Я утверждаю, что и после удара через такой же промежуток времени тела будут разделены промежутком  $BA$ . Тело  $A$ , несомненно, получит от удара некоторую скорость  $AC$ . Эта скорость должна быть меньше, чем  $BA$ , так как только при равенстве  $A$  и  $B$  тело  $A$  приобрело бы скорость  $BA$  (предложение I).

Разделим  $AC$  пополам в точке  $D$ , и пусть  $AE = AD$ . Предположим, что наши движения происходят в лодке, движущейся влево со скоростью  $DA$ . Тогда ясно, что тело  $A$ , с точки зрения наблюдателя на берегу, двигалось до удара влево со скоростью  $DA$ , а после удара — вправо со скоростью  $DC$ , или  $AD$ , так как относительно лодки оно после удара будет двигаться вправо со скоростью  $AC$ , а лодка имеет скорость  $DA$ , направленную влево.

Таким образом, тело  $A$ , с точки зрения наблюдателя на берегу, сохраняет свою скорость до и после удара. Следовательно, и  $B$ , согласно гипотезе V, не должно ничего терять в скорости. Но до удара тело  $B$  двигалось относительно берега со скоростью  $BE$  вправо, так как в лодке  $B$  имело скорость  $BA$  вправо, а лодка — скорость  $DA$  или  $AE$  в обратную сторону. Следовательно, и после удара  $B$  должно двигаться относительно берега со скоростью  $BE$ , но влево. Движению вправо мешает более медлен-

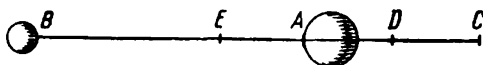


Рис. 39

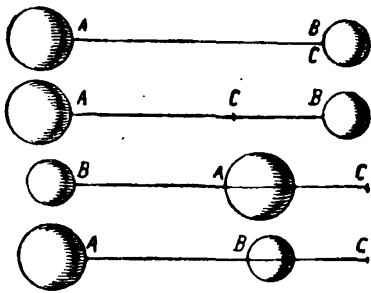


Рис. 40

ное движение тела  $A$ . Так как после удара  $B$  движется относительно берега влево со скоростью  $EB$ , а  $A$  вправо со скоростью  $AD$  или  $EA$ , то оба тела должны удаляться друг от друга со скоростью, составленной из  $BE$  и  $EA$ , т. е. со скоростью  $BA$ . Это будет справедливо не только относительно берега, но и относительно лодки, так как оба тела действительно удаляются друг от друга с этой скоростью. То, что проис-

ходит с телами при столкновении в движущейся лодке, будет происходить таким же образом и вне лодки в любом другом месте.

После доказательства разобранный случай легко доказываются и все остальные. Остаются еще четыре возможности: или покоится меньшее тело, или оба тела движутся навстречу одно другому, или меньшее тело следует за большим с большей скоростью, или наоборот.

Все эти случаи можно рассмотреть одновременно. Пусть, как и раньше, тело  $A$  больше тела  $B$  [рис. 40] и движется со скоростью  $AC$ ;  $B$  или находится в покое, или движется со скоростью  $BC$ . Тела, движущиеся таким образом, имеют относительную скорость  $AB$ .

Я утверждаю, что тела после удара разойдутся с той же относительной скоростью  $AB$ .

Предположим опять, что эти движения происходят в лодке, движущейся со скоростью  $CA$ , т. е. с той же скоростью, которой обладает тело  $A$ , но в обратную сторону. Тогда ясно, что относительно берега  $A$  неподвижно, а  $B$  во всех случаях столкнется с  $A$  со скоростью  $BA$ .  $A$  больше  $B$ . Таким образом, мы приходим к вышеразобранному случаю, из которого следует, что тела относительно берега должны разойтись со скоростью  $AB$ . Следовательно, и относительно лодки и в действительности они отскакивают одно от другого с этой скоростью. <...>

## О центробежной силе

<...> Рассмотрим теперь, какое и с какой силой стремление удалиться от центра имеют тела, прикрепленные к вращающейся нити или колесу.

Пусть колесо  $BG$  [рис. 41] движется в горизонтальной плоскости около центра  $A$ . Прикрепленный к ободу шарик, пришедший в  $B$ , имеет стремление продолжать свое движение по прямой  $BH$ , касательной к колесу. В этом направлении шарик начал бы двигаться, если бы освободился от колеса. Шарик будет продолжать это движение неизменно, если только он не будет отклонен



вниз силой тяжести или же если его движению не воспрепятствует столкновение с другим телом. На первый взгляд трудно понять, почему тогда существует натяжение нити  $AB$ , если тело  $B$  стремится двигаться по прямой  $BH$ , перпендикулярной длине нити. Но все объясняется следующим образом. Представим себе это колесо таким большим, чтобы оно легко могло увлечь с собой человека, стоящего на окружности и, конечно, прикрепленного в  $B$  так, чтобы его не могло выбросить с колеса.

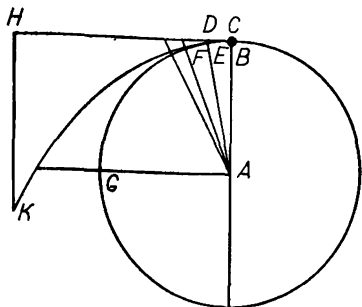


Рис. 41

Пусть этот человек держит в руках нить со свинцовым грузом на конце. Благодаря вращению нить будет натянута таким же образом и с одинаковой силой, [независимо от того] будет ли она удерживаться в руке или продолжена до центра  $A$  и там закреплена. Причину натяжения нити мы теперь легче поймем. Возьмем равные дуги  $BE$  и  $EF$ , малые по сравнению с длиной окружности, например в сотую долю окружности или еще меньше. Эти дуги человек на колесе пройдет за одинаковое время. А свинец, если его освободить, за те же промежутки времени прошел бы по касательной равные этим дугам длины  $BC$  и  $CD$ . Правда, точки  $C$  и  $D$  придутся не на продолжение  $AE$  и  $AF$ , а немного правее, ближе к  $B$ . Теперь ясно, что свинец, будучи свободен, находился бы в  $C$ , когда человек придет в  $E$ , и в  $D$ , когда человек придет в  $F$ . <...>

Если бы точки  $C, D$  лежали на продолжении прямых  $AE$  и  $AF$ , то свинец стремился бы удалиться от человека по линии, идущей от центра через человека, причем в первом промежутке времени он удалился бы на  $EC$ , во втором — на  $FD$ , и т. д. Эти расстояния растут как ряд квадратов начиная с единицы: 1, 4, 9, 16 и т. д.

Поэтому можно считать, что в самом начале движения этих отступлений от ряда не будет. Следовательно, это стремление совершенно подобно тому, которые мы чувствуем, когда держим шарик за нить, так как шарик тоже стремится удалиться в направлении нити таким же ускоренным движением, так что в конце первого промежутка времени тело пройдет малое расстояние 1, в конце второго промежутка 4 таких малых расстояния, в конце третьего — 9 малых расстояний, и т. д. <...>

Достаточно, чтобы эта прогрессия осуществлялась в самом начале движения по кривой. Потом шар может двигаться по какому угодно другому закону, что не имеет отношения к стремлению, существующему до начала движения. Указанное стремление совершенно сходно с тем стремлением, с каким подвешенные тела стремятся двигаться вниз.

Отсюда мы заключаем, что центробежные силы разных тел,

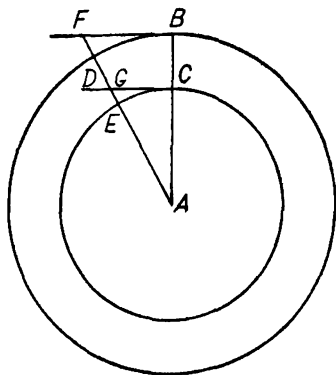


Рис. 42

движущихся по одинаковым кругам с одинаковой скоростью, относятся друг к другу, как веса тел или как количества материи. Как все весомые тела стремятся падать вниз с одинаковой скоростью и одинаковым ускоренным движением, и притом это стремление обладает тем большей силой, чем они больше, так должно быть и с теми телами, которые стремятся удалиться от центра, так как их стремление подобно тому, которое происходит от тяготения. Но в то время как стремление падать у одного и того же шара всегда одно и то же, всякий раз, когда он

подвешен на нити, центробежное стремление разное в зависимости от скорости вращения. Остается еще исследовать величину стремления в зависимости от скорости. Сначала мы определим, с какой скоростью надо вращать колесо, чтобы натяжение нити шаром было такое же, какое получается при подвешивании того же шара на нити.

**Предложение I.** Если два одинаковых тела описывают в одинаковое время неодинаковые окружности, то отношение центробежной силы на большем круге к центробежной силе на меньшем равно отношению диаметров или длин окружностей.

Даны две окружности с радиусами  $AB$ ,  $AC$ , по которым в одинаковое время совершают оборот два одинаковых [рис. 42] тела. Возьмем на двух окружностях две очень маленькие подобные дуги  $BD$  и  $CE$ . Отложим на касательных, проведенных в  $B$  и  $C$ , отрезки  $BF$  и  $CG$ , равные соответственно  $BD$  и  $CE$ . Тело, вращающееся на круге  $BD$ , имеет стремление удалиться от центра в направлении продолжения радиуса равномерно ускоренным движением и при этом движении в определенный промежуток времени пройти путь  $DF$ . В свою очередь, тело, вращающееся по дуге  $CE$ , имеет также стремление удалиться от центра и так, чтобы за то же время пройти путь  $DF$ . Таким образом, во сколько раз отрезок  $DF$  больше отрезка  $EG$ , во столько раз натяжение нити у большой окружности больше, чем у малой. Ясно, что  $FD : GE = BF : CG$ , т. е. как  $AB : AC$ . Следовательно, центробежная сила на большей окружности во столько раз больше центробежной силы на меньшей окружности, во сколько длина окружности или диаметр большего круга больше диаметра или длины окружности меньшего круга.

**Предложение II.** Если два равных тела вращаются на одинаковых дугах или колесах с разными скоростями, но оба с равномерным движением, то сила удаления от центра у более быстрого тела относится к силе более медленного, как квадраты их скоростей. Это значит: если протянуть нити от центра вниз и подвесить

гири, как раз уравнивающие центробежную силу, то эти гири будут относиться друг к другу, как квадраты скоростей.

По кругу с центром  $A$  и радиусом  $AB$  [рис. 43] вращаются два одинаковых тела, сначала одно с большей скоростью, потом другое с меньшей скоростью. Скорости представлены отрезками  $O$  и  $N$ .

Возьмем две очень маленькие дуги,  $BE$  и  $BF$ , такие, что  $BE : BF = N : O$ , тогда несомненно, что более медленное тело пройдет дугу  $BE$ , в то время как более быстрое пройдет дугу  $BF$ . Отложим на касательной  $BD$  отрезок  $BC$ , равный  $BE$ , и отрезок  $BD$ , равный  $BF$ . Итак, устано-

новлено, что каждое из двух тел имеет стремление удалиться от центра ускоренным движением и притом так, что более медленное тело стремится удалиться от окружности на расстояние  $EC$  и более быстрое в то же время — на  $FD$ . Более быстрое тело тянет с большей силой, чем тело более медленное, в отношении  $DF : EC$ . Так как мы взяли очень малые дуги, то отношение  $DE : EC$  равно отношению  $DB^2 : CB^2$ , как мы раньше разъяснили. Но  $DB : BC = FB : BE = O : N$ ; следовательно,  $FD : EC = O^2 : N^2$  и в таком же отношении находятся центробежные силы более быстрого и более медленного тела, что и требовалось доказать. <...>

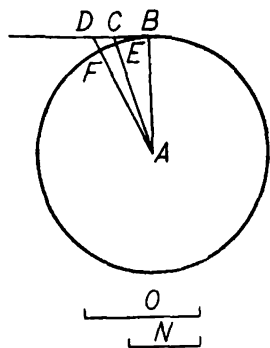


Рис. 43

**Трактат о свете,  
в котором объяснены причины  
того, что с ним происходит  
при отражении и при преломлении,  
в частности при странном  
преломлении исландского  
кристалла**

Предисловие

<...> Доказательства, приводимые в этом трактате, отнюдь не обладают той же достоверностью, как геометрические доказательства, и даже весьма сильно от них отличаются, так как в то время, как геометры доказывают свои предложения с помощью достоверных и неоспоримых принципов, в данном случае принципы подтверждаются при помощи получаемых из них выводов. Природа изучаемого вопроса не позволяет, чтобы это происходило иначе. Все же при этом можно достигнуть такой степени правдоподобия, которая часто вовсе не уступает полной очевидности. Это случается именно тогда, когда вещи, доказанные с помощью этих предполагаемых принципов, совершенно согласуются

с явлениями, обнаруживаемыми на опыте, особенно когда таких опытов много и, что еще важнее, главным образом, когда открываются и предвидятся новые явления, вытекающие из применяемых гипотез, и оказывается, что успех опыта в этом отношении соответствует нашему ожиданию. Если в проведенном мною исследовании все эти доказательства правдоподобия имеются, а мне представляется, что дело как раз так и обстоит, то это должно служить весьма сильным подтверждением успеха моего исследования, и вряд ли положение вещей может значительно отличаться от того, каким я его изображаю. <...>

**О лучах, распространяющихся прямолинейно**

<...> Нельзя сомневаться в том, что свет состоит в движении какого-то вещества. Так, если обратить внимание на его происхождение, то оказывается, что здесь, на земле, его порождают главным образом огонь и пламя, которые, без сомнения, содержат в себе находящиеся в быстром движении тела. Это подтверждается тем, что огонь и пламя растворяют и плавят многие другие и даже самые твердые тела. Если рассмотреть действия, им производимые, то можно заметить, что когда свет собран вместе с помощью, например, вогнутых зеркал, он обладает свойством сжигать, как огонь, т. е. он разъединяет отдельные части тел. Последнее обстоятельство служит убедительным признаком движения, по крайней мере для истинной философии, в которой причину всех естественных явлений постигают при помощи соображений механического характера. По моему мнению, так и следует поступать, в противном случае придется отказаться от всякой надежды когда-либо и что-нибудь понять в физике. <...>

<...> Как мною выше было сказано, звук делает в то же время за 1 секунду только 180 туазов, значит, скорость света более чем в 600 000 раз больше скорости звука. И все же это нечто совсем отличное от мгновенного распространения, так как разница здесь такая же, как между конечной вещью и бесконечной. Постепенное движение света оказывается, таким образом, подтвержденным, а отсюда следует, как я уже сказал, что это движение, так же как и звук, распространяется сферическими волнами<sup>3</sup>.

Но если в этом отношении движения света и звука сходны, то во многих других отношениях они расходятся. Так, они различаются: начальным возбуждением причиняющего их движения, материей, в которой это движение распространяется, и способом, которым оно передается. В самом деле, известно, что возбуждение звука производится внезапным сотрясением всего тела или значительной его части, что возмущает весь смежный с ним воздух. Но движение света должно зарождаться от каждой точки

светящегося тела; тогда, как это лучше выяснится из последующего, смогут быть видимы все отдельные части светящегося тела. И я думаю, что это движение может лучше всего послужить для объяснения, если предположить, что те из светящихся тел, которые, как пламя и, по-видимому Солнце и звезды, являются жидкими, состоят из плавающих в значительно более утонченной материи частиц. Эта материя приводит их в весьма быстрое движение и заставляет ударяться о частицы окружающего их эфира, причем эти последние значительно меньше первых. Что же касается твердых светящихся тел, как уголь или раскаленный на пламени металл, то у них рассматриваемое движение называется сильным сотрясением частиц металла или дерева, причем те частицы, которые находятся на поверхности, также ударяются о частицы эфирной материи. Впрочем, движение, возбуждающее свет, должно быть значительно более резким и быстрым, чем то, которое производит звук. Ведь мы не замечаем, чтобы содрогание звучащего тела могло произвести свет, точно так же как движением руки нельзя получить звук. <...>

<...> Ничто не мешает нам считать частицы эфира состоящими из материи, сколь угодно приближающейся к совершенной твердости и сколь угодно быстро восстанавливающей свою форму. Нам нет надобности исследовать для этого здесь причины этой твердости и упругости, так как рассмотрение их завлекло бы нас слишком далеко от нашего предмета. Я все же укажу здесь мимоходом, что частицы эфира, несмотря на их малость, можно себе представить состоящими еще из других частиц и что упругость их заключается в очень быстром движении тонкой материи, которая проходит сквозь них со всех сторон и заставляет их ткань располагаться так, чтобы она позволяла этой очень тонкой материи проходить через нее самым легким и свободным образом. Это согласуется с объяснением, которое дает упругости Декарт, но только я не предполагаю, как он, существования пор в форме полых круглых каналов. И не нужно думать, что в этом имеется что-нибудь нелепое или невозможное. Наоборот, представляется весьма вероятным, что природа как раз и пользуется этой бесконечной последовательностью частиц различных размеров, обладающих различной скоростью, чтобы производить такое множество удивительных явлений.

Но если бы даже мы не знали истинной причины упругости, все же мы постоянно видим, что этим свойством обладают многие тела; поэтому нет ничего странного в предположении, что им обладают также и весьма маленькие невидимые тела, как те, что составляют эфир. Если и желать найти какой-нибудь другой способ последовательной передачи движения света, то все же не отыщется такого, который бы лучше, чем упругость, согласовывался с равномерностью распространения движения, потому что если бы движение по мере удаления от источника света и распределения его по все большему количеству материи замедлялось, то на больших расстояниях оно не могло бы сохранить свою боль-

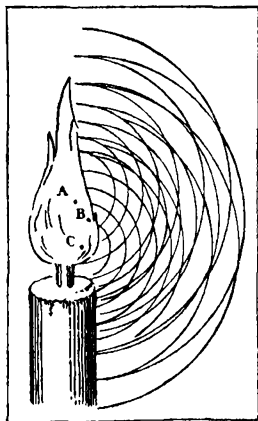


Рис. 44

шую скорость. Если же предположить существование упругости у эфирной материи, то ее частицы будут обладать свойством восстанавливать свою форму одинаково быстро, независимо от того, будет ли воздействие на них сильным или слабым, и, таким образом, распространение света будет постоянно сохранять одну и ту же скорость. <...>

Следует подробнее рассмотреть происхождение этих волн и способ их распространения. Прежде всего из того, что было сказано о происхождении света, следует, что каждая маленькая часть какого-нибудь светящегося тела, как Солнце, свеча или раскаленный уголь, порождает свои собственные волны, центром которых она и является. Так, если в пламени свечи [рис. 44] отметить точки *A*, *B* и *C*, то концентрические круги, описанные около каждой из них, представят собой идущие от них волны. То же самое следует представить себе вокруг каждой точки как поверхности, так и внутренней части пламени.

Так как удары в центрах этих волн совершаются без определенной последовательности, то не нужно представлять себе, что сами волны следуют друг за другом на одинаковых расстояниях. Если на нашем рисунке эти расстояния показаны одинаковыми, то это скорее должно изображать передвижение одной и той же волны за одинаковые промежутки времени, чем несколько волн, исходящих из одного центра.

Впрочем, все это огромное количество волн, пересекающихся, не сливаясь и не уничтожая друг друга, отнюдь не являются непостижимым, раз известно, что одна и та же частица материи может служить для распространения нескольких волн, приходящих с разных и даже противоположных сторон, причем не только в том случае, когда ее толкают удары, близко следующие друг за другом, но даже и тогда, когда удары действуют на нее одновременно; основанием этого служит постепенное распространение движения.

Это может быть доказано на ряде одинаковых шаров из твердого вещества, о которых говорилось выше. Если одновременно ударить по ряду с двух противоположных концов равными шарами *A* и *D* [рис. 45], то каждый из них отскочит с той же скоростью, с какой он шел, а весь ряд останется на месте, хотя движение и прошло по всей длине его в том и другом направлениях. И если эти противоположно направленные движения встречаются в среднем шаре *B* или каком-либо другом шаре *C*, то соответствующий шар должен сжаться и выпрямиться в две стороны и, таким образом, в одно и то же мгновение послужить для передачи этих двух движений.



Рис. 45

Сначала может показаться очень странным и даже невероятным, что волнообразное движение, производимое столь малыми движениями и тельцами, может распространяться на такие огромные расстояния, как, например, расстояние от Солнца или от звезд до нас. Действительно, сила этих волн должна ослабевать по мере их удаления от своего источника, так что каждая из них в отдельности, несомненно, теряет способность воздействовать на наше зрение. Но это перестает быть удивительным, если принять во внимание, что бесконечное число волн, исходящих, правда, из различных точек светящегося тела, на большом расстоянии от него соединяются для нашего ощущения только в одну волну, которая, следовательно, и должна обладать достаточной силой, чтобы быть воспринятой. Таким образом, то бесконечное число волн, которые одновременно нарождаются во всех точках неподвижной звезды, быть может, такой же большой, как и Солнце, для ощущения представляется только одной волной, которая вполне может быть достаточно сильной, чтобы вызвать впечатление в наших глазах. Кроме того, из каждой светящейся точки вследствие частых столкновений частиц, которые в этих точках ударяют в эфир, приходят многие тысячи волн в самое короткое время, которое только можно себе вообразить, а это делает их действие еще более чувствительным.

По поводу процесса образования этих волн следует еще отметить, что каждая частица вещества, в котором распространяется волна, должна сообщать свое движение не только ближайшей частице, лежащей на проведенной от светящейся точки прямой, но необходимо сообщает его также и всем другим частицам, которые касаются ее и препятствуют ее движению. Таким образом, вокруг каждой частицы должна образоваться волна, центром которой она является. Так, если  $DCF$  [рис. 46] — волна, исходящая из светящейся точки  $A$ , ее центра, то частица  $B$ , одна из тех, которые находятся в сфере  $DCF$ , производит свою отдельную волну  $KCL$ , которая коснется волны  $DCF$  в  $C$  в тот же момент, когда главная волна, исходящая из точки  $A$ , достигнет  $DCF$ . И ясно, что только точка  $C$  волны  $KCL$ , т. е. та, которая находится на прямой, проведенной через  $AB$ , коснется волны  $DCF$ . Таким же образом остальные частицы, заключенные в сфере  $DCF$ , как  $bb$ ,  $dd$  и т. д., создадут каждая свою волну. Но каждая из этих волн может быть только бесконечно слабой сравнительно

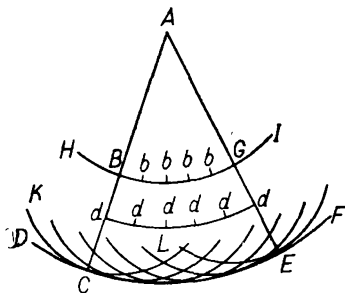


Рис. 46

с волной *DCF*, образованию которой содействуют все остальные волны той частью своей поверхности, которая наиболее удалена от центра *A*. (...)

Объяснив явление световых волн, распространяющихся в однородной среде, мы исследуем затем, что происходит с ними при встрече с другими телами. Сперва мы покажем, как этими же волнами объясняется отражение света и почему при нем сохраняется равенство углов. Пусть *AB* [рис. 47] — плоская полированная поверхность какого-нибудь металла, стекла или другого тела, которую я сначала приму за совершенно гладкую (о неровностях, от которых она не может быть свободна, я скажу в конце этого доказательства), и пусть прямая *AC*, наклоненная к *AB*, представляет собой часть световой волны, центр которой будет так далеко, что эта часть *AC* может быть принята за прямую линию. Я рассматриваю все это как бы в одной плоскости, представляя себе, что плоскость, в которой находится это изображение, пересекает сферу волны через ее центр, а плоскость *AB* — под прямыми углами, о чем достаточно предупредить раз навсегда.

Точка *C* волны *AC* в некоторый промежуток времени продвинется до плоскости *AB* к точке *B* по прямой *CB*, которую должно представлять себе исходящей из светящегося центра и которая, следовательно, перпендикулярна *AC*. Но за тот же промежуток времени точка *A* той же волны не могла, по крайней мере отчасти, сообщить свое движение за пределы плоскости *AB* и должна была продолжить свое движение в материи, находящейся над этой плоскостью, притом на протяжении, равном *CB*; вместе с тем она должна была, согласно сказанному выше, образовать свою отдельную сферическую волну. Указанная волна изображена здесь окружностью *NR*, центр которой в *A*, а радиус *AN* равен *CB*.

Если затем рассмотрим остальные точки *H* волны *AC*, то ясно, что они не только достигнут поверхности *AB* по прямым *HK*, параллельным *CB*, но еще породят в прозрачной среде из центров *K* отдельные сферические волны, представленные окружностями, полу-

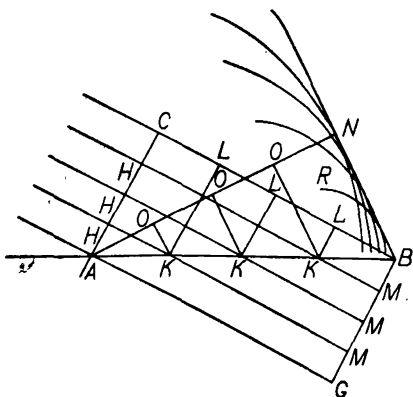


Рис. 47



диаметры которых равны  $KM$ , т. е. продолжениям линий  $NK$  до прямой  $BG$ , параллельной  $AC$ .

Но все эти окружности, как это легко видеть, имеют общей касательную прямую  $BN$ , т. е. ту же прямую, которая является касательной из точки  $B$  к первому из этих кругов, центром которого была точка  $A$ , а полудиаметром, равным прямой  $BC$ ,  $AN$ .

Итак, прямая  $BN$  [заключенная между точками  $B$  и  $N$ , на которую падает перпендикуляр из точки  $A$ ] как бы образована всеми этими окружностями и заканчивает движение, возникшее при отражении волны  $AC$ . Поэтому в этом месте движение имеется в гораздо большем количестве, чем где-либо, и, согласно объясненному выше,  $BN$  является распространением волны  $AC$  в тот момент, когда ее точка  $C$  достигла точки  $B$ . Действительно, нет другой прямой, которая, как  $BN$ , была бы общей касательной всех данных кругов, если не считать  $BG$  под плоскостью  $AB$ . Эта  $BG$  была бы продолжением волны, если бы движение могло распространяться в среде, однородной с той, которая находится над плоскостью. Если мы хотим видеть, как волна  $AC$  постепенно достигла  $BN$ , то достаточно провести в той же фигуре прямые  $KO$ , параллельные  $BN$ , и прямые  $KL$ , параллельные  $AC$ . Тогда мы увидим, что волна  $AC$  из прямой последовательно становится ломаной во всех положениях  $OKL$  и снова становится прямой в  $NB$ .

Но отсюда видно, что угол отражения оказывается равным углу падения. Из того, что треугольники  $ACB$  и  $BNA$  прямоугольны и имеют общую сторону  $AB$ , а сторона  $CB$  равна  $NA$ , следует, что углы, противолежащие этим сторонам, будут равны, а следовательно, также углы  $CBA$  и  $NAB$ . Но как  $CB$ , перпендикулярная  $CA$ , показывает направление луча падающего, так  $AN$ , перпендикулярная волне  $BN$ , показывает направление луча отраженного; значит, эти лучи одинаково наклонны к плоскости  $AB$ . (...)

(...) Для объяснения причины этих явлений, согласно нашим принципам, допустим, что прямая  $AB$  [рис. 48] представляет собой плоскую поверхность, которой ограничены прозрачные тела, простирающиеся по направлению к  $C$  и  $N$ . Когда я говорю про плоскую поверхность, то имею в виду при этом не совершенно ровность, но такую же, какую мы принимали, когда рассматривали отражение, причем по тем же самым соображениям. Пусть линия  $AC$  представляет собой часть световой волны, центр которой, по предположению, так далек, что эту часть можно рассматривать как прямую линию. Тогда точка  $C$  волны  $AC$  в некоторый промежуток времени достигнет плоскости  $AB$  по прямой

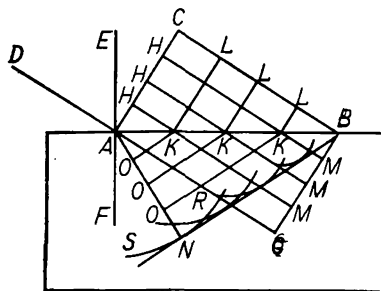


Рис. 48

$CB$ , которую нужно представлять себе исходящей из светящегося центра и которая, следовательно, пересечет  $AC$  под прямыми углами. Если бы материя прозрачного тела передавала движение волны так же быстро, как материя эфира, то за это же время точка  $A$  пришла бы в точку  $G$  по прямой  $AG$ , равной и параллельной  $CB$ , и вся часть волны  $AC$  оказалась бы в  $GB$ . Но предположим, что она передает это движение менее быстро, скажем, на одну треть. Тогда от точки  $A$  движение распространится в материи прозрачного тела на расстояние, равное двум третям  $CB$ , образовав свою отдельную сферическую волну, согласно сказанному выше. Эта волна изображена окружностью  $SNR$ , центр которой  $A$ , а радиус равен двум третям  $CB$ . Если рассматривать другие точки  $H$  волны  $AC$ , то окажется, что за то время, за которое точка  $C$  придет в  $B$ , они не только достигнут поверхности  $AB$  по прямым  $HK$ , параллельным  $CB$ , но сверх того произведут еще из центров  $K$  в прозрачной среде отдельные волны, представленные здесь окружностями, радиусы которых равны двум третям линий  $KM$ , т. е. двум третям продолжений линий  $HK$  до прямой  $BG$ . Эти радиусы были бы равны целым  $KM$ , если бы обе прозрачные среды были одинаковой проницаемости.

Следовательно, все эти окружности имеют общей касательной прямую линию  $BN$ , т. е. касательную из точки  $B$  к окружности  $SNR$ , которую мы рассматривали первой. Легко видеть, что все другие окружности коснутся той же линии  $BN$  от точки  $B$  до точки касания  $N$ , совпадающей с точкой, в которую падает  $AN$ , перпендикуляр к  $BN$ .

Таким образом, прямая  $BN$ , состоящая из ряда маленьких дуг этих окружностей, заканчивает движение, которое волна  $AC$  передала в прозрачное тело, и на этой прямой движение находится в большем количестве, чем где-либо в другом месте. И значит, эта прямая, согласно тому, что было сказано не раз, является распространением волны  $AC$  в тот момент, когда ее точка  $C$  достигла точки  $B$ . Действительно, под плоскостью  $AB$  не существует другой линии, которая, как  $BN$ , была бы общей касательной всех указанных отдельных волн. Если хотят знать, каким образом волна  $AC$  постепенно достигла прямой  $BN$ , стоит только на том же рисунке провести прямые  $KO$  параллельно  $BN$ , а все  $KL$  — параллельно  $AC$ . Тогда будет видно, что волна  $CA$  из прямой становится ломаной последовательно во всех  $LKO$ , и снова становится прямой в  $BN$ . Это очевидно из того, что уже было показано, и не нуждается в дальнейших разъяснениях.

Если на том же рисунке провести прямую  $EAF$  [рис. 48], которая пересекла бы плоскость  $AB$  под прямыми углами в точке  $A$ , и если линия  $AD$  будет перпендикулярна волне  $AC$ , то линия  $DA$  будет обозначать падающий луч света, а прямая  $AN$ , перпендикулярная  $BN$ , — луч преломленный: ведь лучи суть не что иное, как прямые линии, по которым распространяются части волн.

Отсюда ясно видно главное свойство преломления: именно синус угла  $DAE$  всегда находится в одном и том же отношении к синусу угла  $NAF$ , каким бы ни был наклон луча  $DA$ , и это отношение то же, что и отношение скорости волн в прозрачной среде, простирающейся в направлении  $AE$ , к скорости волн в прозрачной среде, простирающейся в направлении к  $AF$ . Действительно, если принять  $AB$  за радиус круга, то синусом угла  $BAC$  будет  $BC$ , а синусом угла  $ABN$  будет  $AN$ . Но угол  $BAC$  равен углу  $DAE$ , так как каждый из них, прибавленный к углу  $CAE$ , образует прямой угол. Угол же  $ABN$  равен углу  $NAF$ , так как каждый из них образует прямой угол вместе с углом  $BAN$ . Следовательно, синус угла  $DAE$  относится к синусу угла  $NAF$ , как  $BC$  к  $AN$ . Но отношение  $BC$  к  $AN$  было равно отношению скоростей света в среде, простирающейся в направлении к  $AE$ , и в среде, простирающейся к  $AF$ . Таким образом, синус угла  $DAE$  относится к синусу угла  $NAF$ , как указанные скорости света. <...>

---

Глава 5  
О своеобразном преломлении в исландском  
кристалле

1. Из Исландии, острова Северного моря, расположенного на широте  $66^\circ$ , привозят особого рода кристалл, или прозрачный камень, который весьма замечателен по своей форме и другим свойствам, но главным образом своими странными преломлениями света. Причины этих странных преломлений казались мне тем более достойными тщательного исследования, что среди прозрачных тел он один не следует обычным правилам по отношению к световым лучам. Я был даже до некоторой степени вынужден произвести эти исследования, так как преломления в этом кристалле, казалось, опровергали наше предшествующее объяснение правильного преломления. Но, как будет видно, данное нами объяснение, наоборот, весьма подтверждается этими преломлениями, если их свести к тому же принципу. <...>

18. Так как здесь имелись два различных преломления, я подумал, что существуют также и две различные категории распространяющихся волн света и что одна из них может существовать в эфирной материи, распространенной в теле кристалла. Эта материя, находясь в гораздо большем количестве, чем составляющие тело частицы, одна способна обусловить

прозрачность согласно вышеприведенному объяснению. Я приписывал этой категории волн правильное преломление, наблюдаемое в этом камне, предполагая, что эти волны имеют обыкновенную сферическую форму и распространяются более медленно внутри кристалла, чем вне его; я показал, что от этого происходит преломление.

19. Что же касается другой категории, которая должна была произвести неправильное преломление, то я хотел испытать, что будут давать эллиптические или, лучше сказать, сфероидальные волны. Я предполагал в соответствии с последним способом, которым я объяснял прозрачность, что эти волны будут распространяться одинаково как в эфирной материи, содержащейся в кристалле, так и в частицах, из которых он состоит. Мне казалось, что правильное расположение или размещение этих частиц могло способствовать образованию сфероидальных волн (для чего требовалось только, чтобы последовательное движение света распространялось немного быстрее в одном направлении, чем в другом), и я почти не сомневался в существовании в этом кристалле такого размещения равных и подобных частиц вследствие определенности и неизменности его формы и углов. Относительно этих частиц, их формы и расположения я предложу в конце этого трактата мои соображения и несколько подтверждающих их опытов<sup>4</sup>. <...>

22. Допустив, таким образом, кроме сферических волн и подобные сфероидальные волны, я приступил к исследованию, могут ли они служить для объяснения явлений неправильного преломления и как с помощью этих явлений я мог бы определить форму и положение сфероидальных волн, в чем я достиг, наконец, желанного успеха. <...>

---

#### Комментарий

Переводы с латинского работ Х. Гюйгенса «О движении тел под влиянием удара» и «О центробежной силе» выполнены К. К. Баумгартом по первому посмертному изданию сочинений ученого, вышедшему в Лейдене в 1703 г. Переводы отрывков из этих работ воспроизводятся по изданию: Гюйгенс Х. Три мемуара по механике. М., 1951.

Перевод с латинского «Трактата о свете» выполнен Н. Фредериксом. Отрывки воспроизводятся по изданию: Гюйгенс Х. Трактат о свете, в котором объяснены причины того, что с ним происходит при отражении и при преломлении, в частности, при странном преломлении исландского кристалла. М. — Л., 1935.

Гюйгенс пишет «*corpus durum*» — твердое тело. Прилагательное «*durum*» в отличие от «*solidum*» означает не только твердое, но и жесткое, так сказать, абсолютно твердое. Удар твердых тел представляет большие трудности для рассмотрения. Гюйгенс разбирает в сущности удары абсолютно упругих тел.

- <sup>2</sup> Здесь Гюйгенс имеет в виду величину скорости, не учитывая ее знака. Это замечание надо принимать во внимание при многих формулировках Гюйгенса.
- <sup>3</sup> В своих оценках Гюйгенс пользуется результатами работы О. Ремера.
- <sup>4</sup> Допустив в исландском шпате существование двух волн, обыкновенной и необыкновенной, Гюйгенс в следующих параграфах этой главы объясняет наблюдаемые им явления двойного лучепреломления. Но ему нужно здесь, кроме того, показать причины существования двух таких волн, и в этом отношении он опять встречается те же затруднения, что и при объяснении причин отражения и разницы между прозрачными и поглощающими телами.
- 

#### Литература

- [1] Собрание сочинений Х. Гюйгенса: *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*. Т. 1—22. La Haye, 1888—1950.
- [2] Веселовский И. Н. Христиан Гюйгенс. М., 1959.
- [3] Франкфурт У. И., Френк А. М. Христиан Гюйгенс. М., 1962.

**Голин Г. М., Филонович С. Р.**

Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил. ISBN 5-06-000058-3