

Г. М. Голин, С. Р. Филонович

КЛАССИКИ
ФИЗИЧЕСКОЙ
НАУКИ

Г. М. Голин, СР. Филонович

КЛАССИКИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАУКИ

(с древнейших
времен
до начала XX в.)



Москва «Высшая школа» 1989

Содержание

стр.

Лукреций. Об атомах	14
Архимед. О статике и гидростатике	21
Н. Коперник. О гелиоцентрической системе мира	39
Г. Галилей. О движении	50
Р. Декарт. О радуге	65
Э. Торричелли. Об атмосферном давлении	73
О. Герике. Опыты с пустотой	85
О. Ремер. О скорости света	117
Х. Гюйгенс. О проблемах механики О теории света	121
И. Ньютон. О началах механики Об оптике	142
В. Гершель. Об инфракрасном излучении	269
А. Вольта. Об электрическом токе	277
Г. Юнг. Об интерференции света и ее проявлениях	285
О. Френель. О волновой оптике	295

- У. Томсон (Кельвин).** Об абсолютной шкале температур и втором начале термодинамики **405**
- Л. Фуко.** О скорости света в различных средах **416**



Лукреций

99—55 гг. до н. э.

Об атомах

Атомистическая идея, лежащая в основе современного естествознания, зародилась в Древней Греции. Зачатки этого воззрения можно обнаружить в трудах Анаксагора и Эмпедокла. Но свое утверждение атомистическая гипотеза получила в философском учении Демокрита из фракийского города Абдеры, перенявшего, по-видимому, взгляды своего учителя и друга Левкиппа (V в. до н. э.)

Сочинения Демокрита не дошли до нашего времени, однако отдельные выдержки из его произведений, приводимые в работах сторонников и противников его учения, позволяют считать Демокрита материалистом, создавшим последовательную атомистическую концепцию.

Мир, по Демокриту, состоит из бесчисленного множества частиц (атомов) и пустоты. Атомы — плотные образования, различающиеся лишь по форме и размерам и не имеющие тех разнообразных свойств, которыми обладают тела — различные сочетания этих атомов. Внутренне присущим свойством всех атомов является падение под действием тяготения вниз в пустом пространстве. При этом более крупные атомы, двигаясь быстрее, наталкиваются на менее крупные и происходят боковые сдвиги — «вихри», приводящие к образованию тел. Так была образована бесконечная и не имеющая какого-либо центра Вселенная.

Эпикур углубил и дополнил атомистическое учение Демокрита. Он ввел в число основных характеристик атома его вес и, предвосхищая эксперименты Г. Галилея, считал в отличие от Демокрита, что в пустоте все тела независимо от веса должны падать с одинаковыми скоростями («тяжелейшие атомы никогда не могут падать на легчайшие»). Для объяснения образования Вселенной из тел и пустоты он ввел новую, не свойственную концепции Демокрита, идею о спонтанном отклонении атомов от прямолинейного падения, которое происходит, по Демокриту, из-за строгой Необходимости и предопределенности. Это, пожалуй, самое существенное, что внес Эпикур в атомистическое учение Демокрита. Он обобщил идею о спонтанном отклонении в этическую концепцию о «свободе воли» более сложных объектов. С. И. Вавилов отмечал «паразитное совпадение принципиального содержания идеи Эпикура — Лукреция о спонтанном отклонении с так называемым «соотношением неопределенности» современной физики».

Атомистическое учение Демокрита — Эпикура определило многие черты мировоззрения выдающихся естествоиспытателей, в том числе таких, как И. Ньютон и М. В. Ломоносов.

Лукреций (99—55 гг. до н. э.), глубокий знаток и последователь атомистического учения, старался как можно ближе к подлиннику изложить мысли Демокрита и Эпикура, избрав в дидактических целях стихотворную форму.

О жизни ученого-поэта достоверных сведений не сохранилось, кроме краткой записи в хронике Иеронима (IV в. н. э.). Заимствовав, по-видимому, сведения у неизвестных языческих авторов, живших в эпоху Лукреция, Иероним под цифрой «95 г. до н. э.» повествует о трагической судьбе Лукреция: «Рождается поэт Тит Лукреций. Впоследствии, впадши в умопомешательство от приворотного зелья и написав в промежутках между припадками безумия несколько книг, которые впоследствии отредактировал Цицерон, он покончил самоубийством на сорок четвертом году своей жизни». Некоторые историки оспаривают истинность этого утверждения, но до сих пор не выяснено ни место рождения поэта, ни его происхождение. По тройному имени — Тит Лукреций Кар — и ряду других соображений одни исследователи относят его к высшим слоям римского общества, другие, основываясь на резкой критике в поэме алчности и жестокости римских патрициев, отражающей взгляды средних слоев римских граждан, причисляют Лукреция к «всадникам».

Поэму «О природе вещей» смело можно назвать энциклопедией научных знаний времен Лукреция. В ее шести книгах рассматриваются вопросы сущности мира и космогонии, оптики и зрения, астрономии, метеорологии, геологии, географии, техники, биологии и теории наследственности, анатомии, психологии, экономики, почвоведения, истории человеческого общества и культуры, музыки и т. д.

Здесь приведены отрывки из двух первых книг поэмы, в которых идет речь об атомах, их хаотическом движении и взаимодействии.

О природе вещей

КНИГА I

(...) Но продолжаю я нить своего рассуждения снова.
Всю, самое по себе, составляют природу две вещи:
Это, во-первых, тела, во-вторых же, пустое пространство,
Где пребывают они и где двигаться могут различно.
Что существуют тела — непосредственно в том убеждает
Здравый смысл; а когда мы ему доверяться не станем,
То и не сможем совсем, не зная, на что положиться,
Мы рассуждать о вещах каких-нибудь тайных и скрытых,
Если ж пространства иль места, что мы пустотой называем,
Не было б вовсе, тела не могли бы нигде находиться
И не могли б никуда и двигаться также различно,
Как я на это тебе указал уже несколько раньше.
Кроме того, привести ничего ты не мог бы такого,
Что и не тело и что к пустоте вместе с тем не причастно
И оказаться могло б какой-нибудь третьей природы.
Ибо наличное все непременно быть чем-нибудь должно,
Будь оно иль велико, или самых ничтожных размеров:

Коль осязанью оно хоть несколько будет доступно,
Тел совокупность умножит собой и к итогу причтется;
Если же будет совсем недоступно оно осязанью
И не поставит преград прохождению любого предмета,
Полостью будет оно, что мы пустотой называем.
Кроме того, все то, что само по себе существует,
Действует или само, иль подвержено действию будет,
Иль будет там, где вещам находиться и двигаться можно.
Действовать иль подвергаться воздействию тело лишь может,
Быть же вместилищем тел может только пустое пространство.
Так что самой по себе среди вещей оказаться не может,
Вне пустоты и вне тел, какой-нибудь третьей природы.
Иль осязуемой когда-либо помощью нашего чувства,
Или такой, что она разумною была бы доступна. (...)

Дальше, тела иль вещей представляют собою начала,
Или они состоят из стеченья частиц изначальных.
Эти начала вещей ничему не под силу разрушить,
Плотностью тела своей они все, наконец, побеждают.
Правда, представить себе затруднительно то, что возможно
Что-нибудь в мире найти с безусловною плотностью тела:
Даже сквозь стены домов проникают небесные молнии,
Как голоса или крик; огонь раскаляет железо,
Скалы трещат, рассыпаясь в куски от свирепого жара,
Золото крепость свою теряет, в пыли расплавляясь,
Жидким становится лед, побежденный пламенем меди,
Сквозь серебро и тепло и пронзительный холод проходят.
То и другое всегда мы чувствуем, взявши, как должно,
Чашу рукою, когда она полнится влагой росистой.
Видимо, нет ничего, таким образом, плотного в мире.
Но коль и разум, а с ним и природа вещей принуждают
Думать иначе, то здесь мы в немногих стихах истолкуем,
Что существуют такие тела, что и прочны и вечны:
Это — вещей семена и начала в учении нашем,
То, из чего получился весь мир, существующий ныне.

Прежде всего, раз уж найдено здесь основное различье
Между вещами двумя, по их двоякой природе, —
Именно телом и местом, в котором все происходит, —
То существуют они непременно вполне самобытно.
Ибо, где есть то пространство, что мы пустотой называем,
Тела там нет, а везде, где только находится тело,
Там оказаться никак не может пустого пространства.
Значит, начальные плотны тела, и нет пустоты в них.
Так как затем в производных вещах пустоту мы находим,
Плотное должно ее вещество окружать непременно;
Да и нельзя допустить на основе разумной, чтоб вещи
В теле своем пустоту, сокровенно тая, содержали,
Ежели плотность того отрицать, что ее заключает.
Далее: только одно вещества сочетание может
Быть в состояньи в себе заключать пустое пространство;

И потому вещество, состоя из плотного тела,
Может быть вечным, хотя разлагается все остальное.
Далее, если б нигде никакой пустоты не встречалось,
Плотным являлось бы все; и напротив, коль тел бы известных
Не было, чтобы заполнить места, что они занимают,
Все б оказалось тогда и пустым, и порожним пространством.
Значит, везде пустота, очевидно, сменяется телом,
Ибо ни полноты нет совершенной нигде во Вселенной,
Ни пустоты, а тела существуют известные только,
Что полнотой разграничить способны пустое пространство.
Эти тела ни от внешних толчков разлагаться не могут,
Ни, изнутри чем-нибудь пораженные, взрость распадаться,
Ни от воздействия силы иной уничтожиться все,
Как я на это тебе указал уже несколько раньше.
Без пустоты ведь ничто, очевидно, разбиться не может
Или же сломленным быть, или надвое быть рассеченным,
Или же влагу вбирать, а равно и пронзительный холод,
Или палящий огонь, от чего разрушаются вещи.
Так что, чем более вещи в себе пустоты заключают,
Тем и скорей это все до конца уничтожить их может.
Если ж начальные плотны тела, если нет пустоты в них,
Как я учил, то должны они вечными быть непременно.
Если же, кроме того, не была бы материя вечной,
То совершенно в ничто обратились давно бы все вещи,
Из ничего бы тогда возрождалось и все, что мы видим.
Но, раз уж я доказал, что ничто созидаться не может
Из ничего, и все то, что родилось, в ничто обращаться,
Первоначалам должно быть присуще бессмертное тело,
Чтобы все вещи могли при кончине на них разлагаться,
И не иссяк бы запас вещества для вещей возрожденья.
Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны.
Иначе ведь не могли бы они, сохраняясь веками,
От бесконечных времен и досель восстанавливать вещи.
И, наконец, не поставь никакого предела природа
Для раздробленья вещей, тела материи ныне,
Силой минувших веков раздробившись, дошли до того бы,
Что ничему уж, из них зачатому, в известное время
Было б пробиться нельзя до высшего жизни предела.
Ибо, мы видим, скорей что угодно разрушиться может,
Чем восстановленным быть; поэтому то, что доселе
Долгие дни и века бесконечных времен миновавших
Взрость разнесли, раздробив и на мелкие части расторгнув,
Вновь в остальные века никогда не могло б воссоздаться.
Но, несомненно, предел раздробленью известный положен,
Так как мы видим, что вещь возрождается каждая снова
И установлен вещам сообразно с их родом предельный
Срок, когда могут они достигнуть жизни расцвета.
Надо добавить сюда еще то, что, хотя совершенно
Плотны тела основные, однако вполне объяснимо,

Как из них воздух, вода, и земля, и огонь — все, что мягко, —
Может возникнуть, какой создается все это силой,
Если в составе вещей пустоты заключается примесь.
Если ж, напротив, вещей начала мягкими были б,
Взяться откуда могли и твердый кремь, и железо, —
Это нельзя объяснить, потому что тогда изначальных
Всех оснований своих совершенно лишится природа.
Значит, начала вещей в существе своем просты и плотны.
Большая сплоченность их доставляет предметам возможность
Более твердыми быть и выказывать большие силы.
Далее, если б совсем не положено было предела
Для раздробления тел, то должны бы, однако, от века
Даже донныне в вещах тела сохраняться, которых
Не постигла еще до сих пор никакая опасность.
Но если эти тела по природе дробленью доступны,
То непонятно тогда, почему же они сохранились,
Испокон века всегда подвергаясь несчетным ударам.

Так как затем, наконец, положены твердые грани
Каждому роду вещей для их разрастанья и жизни,
Раз установлено, что, сообразно законам природы,
Могут они породить и чего совершенно не могут.
-Раз перемен никаких не бывает, а все неизменно,
Так что и птицы всегда в своем оперении пестром
Пятна на теле хранят, присущие каждой породе,
То и материя вся должна пребывать неизменной
В теле отдельных пород. Ведь, если б могли изменяться
Первоначала вещей, подчиняясь каким-то причинам,
Было б неясно для нас и то совершенно, что может
Происходить, что не может, какая конечная сила
Каждой вещи дана и какой ей предел установлен.
И не могли б столько раз повторяться в отдельных породах
Свойства природные, нрав и быт, и движения предков.

Далее, так как есть предельная некая точка
Тела такого, что уже недоступно для нашего чувства,
То, несомненно, она совсем не делима на части,
Будучи меньше всего по природе своей; и отдельно,
Самостоятельно, быть не могла никогда и не сможет,
Ибо другого она единая первая доля,
Вслед за которой еще подобные ей, по порядку
Сомкнутым строем сплотясь, образуют телесную сущность;
Так как самим по себе им быть невозможно, то, значит,
Держатся вместе они, и ничто их не может расторгнуть.
Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны,
Стиснуты будучи крепко сцепленьем частей наименьших,
Но не являясь притом скоплением отдельных частичек,
А отличаясь скорей вековечной своей простотою.
И ничего ни отторгнуть у них, ни уменьшить природа
Не допускает уже, семена для вещей сберегая.
Если не будет затем ничего наименьшего, будет

Из бесконечных частей состоять и мельчайшее тело:
У половины всегда найдется своя половина,
И для деленья нигде не окажется вовсе предела.
Чем отличишь ты тогда наименьшую вещь от Вселенной?
Ровно, поверь мне, ничем. Потому что, хотя никакого
Нет у Вселенной конца, но ведь даже мельчайшие вещи
Из бесконечных частей состоять одинаково будут.
Здравый, однако же, смысл отрицает, что этому верить
Может наш ум, и тебе остается признать неизбежно
Существованье того, что совсем неделимо, являясь
По существу наименьшим. А если оно существует,
Должно признать, что тела изначальные плотны и вечны.
Если бы все, наконец, природа, творящая вещи,
На наименьшие части дробиться опять заставляла,
Снова она никогда ничего возродить не могла бы.
Ведь у того, что в себе никаких уж частей не содержит,
Нет совсем ничего, что материи производящей
Необходимо иметь: сочетаний различных и веса,
Всяких движений, толчков, из чего созидаются вещи. (...)

КНИГА 2

(...) Дабы ты лучше постиг, что тела основные¹ мнутся
В вечном движеньи всегда, припомни, что dna никакого
Нет у Вселенной нигде, и телам изначальным остаться
Негде на месте, раз нет ни конца, ни предела пространству,
Если безмерно оно и простерто во всех направлениях,
Как я подробно уже доказал на основе разумной.
Раз установлено так, то телам изначальным, конечно,
Вовсе покоя нигде не дано в пустоте необъятной.
Наоборот: непрерывно гонимые разным движеньем,
Частью далеко они отлетают, столкнувшись друг с другом,
Частью ж расходятся врозь на короткие лишь расстоянья.
Те, у которых тесней их взаимная сплоченность, мало
И на ничтожные лишь расстояния прядая порознь,
Сложностью самих фигур своих спутаны будучи цепко,
Мощные корни камней и тела образуют железа
Стойкого, так же как все остальное подобного рода.
Прочие, в малом числе в пустоте необъятной витая,
Прядают прочь далеко и далеко назад отбегают
На промежуток большой. Из них составляется редкий
Воздух, и солнечный свет они нам доставляют блестящий.
Множество, кроме того, в пустоте необъятной витает
Тех, что отброшены прочь от вещей сочетаний и снова
Не были в силах еще сочетаться с другими в движеньи.
Образ того, что сейчас описано мной, и явленье
Это пред нами всегда и на наших глазах происходит.
Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает

В наши жилища и мрак пререзает своими лучами,
Множество маленьких тел в пустоте, ты увидишь, мелькая,
Мечутся взад и вперед в лучистом сиянии света;
Будто бы в вечной борьбе они бьются в сраженьях и битвах,
В схватки бросаются вдруг по отрядам, не зная покоя,
Или сходясь, или врозь беспрерывно опять разлетаясь.
Можешь из этого ты уяснить себе, как неустанно
Первоначала вещей в пустоте необъятной мнутся.
Так о великих вещах помогают составить понятие
Малые вещи, пути намечая для их постиженья.
Кроме того, потому обратить тебе надо вниманье
На суматоху в телах, мелькающих в солнечном свете,
Что из нее познаешь ты материи также движенья,
Происходящие в ней потаенно и скрыто от взора.
Ибо увидишь ты там, как много пылинок меняют
Путь свой от скрытых толчков и опять отлетают обратно,
Всюду туда и сюда разбегаясь во всех направлениях.
Знай же: идет от начал всеобщее это блужданье.
Первоначала вещей сначала движутся сами,
Следом за ними тела из малейшего их сочетанья,
Близкие, как бы сказать, по силам к началам первичным,
Скрыто от них получая толчки, начинают стремиться,
Сами к движенью затем понуждая тела покрупнее.
Так, исходя от начал, движение мало-помалу,
Наших касается чувств, и становится видимым также
Нам и в пылинках оно, что движутся в солнечном свете,
Хоть незаметны толчки, от которых оно происходит². (...)

Комментарий

Перевод с латинского поэмы Лукреция выполнен Ф. А. Петровским. Отрывки воспроизводятся по изданию: Лукреций. О природе вещей. Т. 1. М., 1945.

¹ Т. е. атомы. Лукреций не употребляет слово «атом», заменяя его в поэме терминами: «тело изначальное», «тело основное», «первоначало вещей» и т. д.

² Это место у Лукреция удивительно напоминает описание броуновского движения частиц, взвешенных в воздухе.

Литература

- [1] Латинский текст поэмы Лукреция воспроизведен параллельно русскому переводу в издании, указанном выше. Второй том этого издания содержит статьи о Лукреции, его естественно-научных представлениях и эпохе, в которую он жил, а также фрагменты произведений Эпикура и Эмпедокла.
- [2] Лурье С. Я. Демокрит. Л., 1970.
- [3] Маковельский А. О. Древнегреческие атомисты. Баку, 1946.
- [4] Гончарова Т. Эпикур. М., 1988.
- [5] Шакирзаде А. С. Эпикур. М., 1963.
-



Архимед

ок. 287 — 212 до н.э.

О статике и гидростатике

Для эпохи эллинизма, начало которой было положено завоеваниями Александра Македонского, характерен постепенный переход от общих натурфилософских построений к более конкретным исследованиям в отдельных областях естествознания. Этому во многом способствовало значительное расширение круга практических знаний и опыта, вызванное образованием громадной империи Александра. Философские рассуждения, догадки, а часто и домыслы в трудах греческих ученых постепенно уступали место доказательным методам математики. Широкое развитие военной и строительной техники делало мышление ученых более прагматичным. Отмеченные особенности науки эллинистической эпохи были присущи творчеству Архимеда, одного из основателей статики и гидростатики.

О жизни Архимеда известно не много, но его имя и творчество овеяны многочисленными легендами.

Архимед родился в Сиракузах на острове Сицилия в 287 г. до н. э. Его отец, астроном Фидий, был родственником сиракузского царя Гиерона. Архимед получил хорошее образование, долгие годы пробыл в знаменитом Александрийском музее — уникальном научно-исследовательском центре античного мира, с которым ученый не порывал связей до конца своей жизни (он погиб в 212 г. до н. э.). Легендой овеяны последние минуты жизни ученого. Ворвавшийся в дом Архимеда римский воин убил склоненного над какими-то вычислениями старика, который просил немного подождать, пока он не закончит решение задачи.

Творческую деятельность Архимед начал как инженер, создавая различные механические приспособления, широко использовавшиеся в строительной технике и быту. Всего Архимеду приписывают около 40 изобретений, в том числе такие, как винт и полиспаст. К этому периоду относится одно из первых его сочинений «Книга опор», не дошедшая до нас, цитаты из которой приводит в своей «Механике» александрийский инженер и математик Герон. В сочинении давался расчет (правда, ошибочный) многоопорной балки и приводилась теория двуплечего рычага.

В трудах по геометрии Архимед разрабатывал интегральные методы, широко использовавшиеся математиками вплоть до создания Г. В. Лейбницем и И. Ньютоном интегрального исчисления. Архимед предложил приемы вычисления поверхностей и объемов сложных фигур, которые основывались на рассмотрении более простых (кругов, цилиндров, шаров).

Большую известность получил трактат Архимеда «Псаммит» («Исчисление песчинок») астрономо-вычислительного характера. Архимед определяет число песчинок во Вселенной, полагая ее замкнутой и ограниченной сферой. Здесь же он дает размеры (разумеется, неточные) Земли, Солнца и расстояние между ними.

Подход Архимеда к физическим проблемам основан на простых, но строгих геометрических доказательствах, так что его можно считать родоначальником математической физики, которой он посвящает трактаты «О равновесии плоских фигур», «О плавающих телах» и не дошедшую до нас фундаментальную работу по оптике «Катоптрика».

Трактат «О равновесии плоских фигур» состоит из двух книг. В первой Архимед обобщает эмпирические данные, полученные его предшественниками о равновесии твердых тел, формулируя на их основе аксиомы-постулаты, и выводит закон рычага. С помощью строгих геометрических доказательств он получает ряд следствий, строя, таким образом, теорию о центре тяжести; пользуясь доказанными теоремами, Архимед находит положение центра тяжести различных плоских фигур, ограниченных прямыми: параллелограмма, треугольника и трапеции. Вторая книга посвящена определению центров тяжести параболического сегмента и параболической трапеции.

Сочинение «О плавающих телах» исследователи относят к числу самых поздних, а некоторые считают его последним научным трудом Архимеда. Это сочинение также состоит из двух книг. В первой книге Архимед, полагая свободную поверхность жидкости сферической, подробно разбирает вопросы, связанные с погружением твердых тел в жидкость, и формулирует закон, до сих пор приводимый в любом школьном учебнике. И здесь подход к проблеме тот же: на основании опытных наблюдений Архимед строит модель жидкости, с помощью которой получает ряд следствий, обосновывая их строгими геометрическими доказательствами. Во второй книге, полагая поверхность жидкости плоской, он рассматривает принцип работы ареометра и условие равновесия в жидкости тел, имеющих форму сегмента параболоида. Выводы Архимеда представляли практический интерес для судостроения.

О равновесии плоских фигур, или о центрах тяжести плоских фигур

КНИГА I

Сделаем следующие допущения:

1. *Равные тяжести на равных длинах уравниваются, на неравных же длинах не уравниваются, но перевешивают тяжести на большей длине.*

2. *Если при равновесии тяжестей на каких-нибудь длинах к одной из тяжестей будет что-нибудь прибавлено, то они не будут уравниваться, но перевесит та тяжесть, к которой было прибавлено.*

3. *Точно так же, если от одной тяжести будет отнято что-нибудь, то они не будут уравниваться, но перевесит та тяжесть, от которой не было отнято.*

4. *При совмещении друг с другом равных и подобных¹ плоских фигур совместятся друг с другом и их центры тяжести.*

5. *У неравных же, но подобных фигур центры тяжести будут подобно же расположены.* Под подобным расположением точек в подобных фигурах мы подразумеваем такое, в котором прямые, проведенные из этих точек к вершинам равных углов, образуют равные углы с соответствующими сторонами.

6. *Если величины уравниваются на каких-нибудь длинах, то на тех же самых длинах будут уравниваться и равные им.*

7. *Во всякой фигуре, периметр которой везде выпукл в одну и ту же сторону, центр тяжести должен находиться внутри фигуры.*

При этих предположениях:

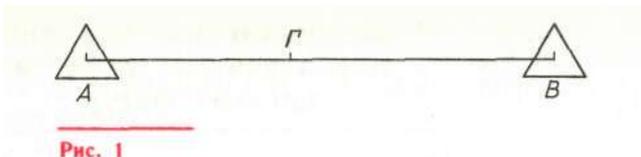
I. *Тяжести, уравнивающиеся на равных длинах, будут тоже равны.* Действительно, если бы они были неравными, то после отнятия от большей избытка они не уравниваются, поскольку что-то отнято от одной из двух уравнивающих тяжестей. Таким образом, уравнивающиеся на равных длинах тяжести будут тоже равны.

II. *Неравные тяжести на равных длинах не уравниваются, но перевешивает большая. (...)*

III. *Неравные тяжести будут уравниваться на неравных длинах, причем большая тяжесть на меньшей длине.*

Пусть А, В — неравные тяжести и А — большая, причем они уравниваются на длинах АГ, ГВ [рис. 1]. Требуется доказать, что АГ меньше ГВ.

Действительно, пусть она не будет меньше. Тогда после отнятия избытка, на который А превышает В, перевесит В, поскольку что-то было отнято от одной из уравнивающихся тяжестей. Но она не перевесит; действительно, если ГА равна ГВ, то они уравниваются [как равные тяжести на равных длинах], если же ГА больше ГВ, то перевесит А, так как равные тяжести на не-



равных длинах не уравновешиваются, но перевешивает тяжесть на большей длине. На основании этого АГ меньше ГВ.

Так же ясно, что уравновешивающиеся на неравных длинах тяжести не равны, причем большая тяжесть будет на меньшей длине.

IV. *Если две равные величины не имеют одного и того же центра тяжести, то для величины, составленной из обеих этих величин, центром тяжести будет середина прямой, соединяющей центры тяжести этих величин. (...)*

V. *Если центры тяжести трех величин лежат на одной прямой, причем эти величины имеют одинаковую тяжесть, и прямые, лежащие между центрами, равны, то для величины, составленной из всех величин, центром тяжести будет точка, которая является центром тяжести для средней [величины]. (...)*

Следствие 1

Из этого ясно, что если имеется любое нечетное количество величин, центры тяжести которых лежат на одной прямой, причем величины, одинаково отстоящие от середины, имеют равные тяжести и прямые, заключающиеся между их центрами, равны, то для величины, составленной из всех этих величин, центром тяжести будет точка, которая является центром тяжести для средней из них.

Следствие 2

Также если эти величины будут в четном количестве, причем их центры тяжести лежат на одной прямой, и как средние величины, так и одинаково от них отстоящие имеют равную тяжесть, а прямые между центрами равны, то для величины, составленной из всех этих величин, центром тяжести будет середина прямой, соединяющей центры тяжести этих величин, как нарисовано ниже [рис. 2].

VI. *Соизмеримые величины уравновешиваются на длинах, которые обратно пропорциональнытяжестям.*

Пусть А, В будут соизмеримые величины, центры которых А, В. Возьмем некоторую длину ЕД, причем пусть как А [относится] к В, так будет и длина ДГ [относиться] к длине ГЕ [рис. 3]. Требуется доказать, что для величины, составленной из обеих величин АВ, центром тяжести будет Г.

Действительно, поскольку А относится к В как АГ к ЕГ

$$\frac{A}{B} \sim \frac{AG}{EG}$$

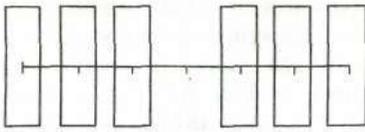


Рис. 2

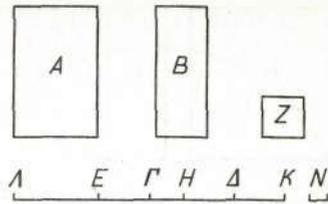


Рис. 3

и A соизмерима с B , то, значит, $\Delta\Gamma$ соизмерима с $E\Gamma$, т. е. прямая соизмерима с прямой, так что у $E\Gamma$, $\Delta\Gamma$ есть общая мера. Пусть она будет N ; отложим ΔH , ΔK , равные каждая $E\Gamma$, и $E\Delta$, равную $\Delta\Gamma$.

Тогда, поскольку AH равна $E\Gamma$, и $A\Gamma$ равна $E\Delta$, так что и AE равна $E\Delta$.

Значит, ΔH вдвое больше $\Delta\Gamma$, а HK вдвое больше $E\Gamma$, так что N измерит и каждую из ΔH , HK , поскольку она измеряет их половины. И поскольку как A относится к B , так и $\Delta\Gamma$ к $E\Gamma$, т. е.

$$\frac{A}{B} = \frac{\Delta\Gamma}{E\Gamma}, \quad \frac{\Delta\Gamma}{E\Gamma} = \frac{AH}{HK}$$

(так как каждая из вторых вдвое больше соответствующей из первых прямых), значит $\frac{A}{B} = \frac{AH}{HK}$. Пусть A во столько раз больше

Z , во сколько AH больше N . Тогда $\frac{AH}{N} = \frac{A}{Z}$. Так же

$\frac{HK}{AH} = \frac{B}{A}$ и тогда «по равенству» $\frac{HK}{N} = \frac{B}{Z}$. Значит, HK от N и

B от Z будут равнократными. Доказано, что и A есть кратное Z , так что Z будет общей мерой для A , B . Если мы разделим прямую ΔH на части, равные N , величину A — на части, равные Z , то равновеликие N отрезки в ΔH будут в равном количестве с частями в A , равными Z . Таким образом, если на каждый из содержащихся в ΔH отрезков наложить величину, равную Z , так, чтобы она имела центр тяжести в середине отрезка, то все эти величины вместе будут равны A и для составленной из всех их величины центром тяжести будет E , так как все они будут в четном числе и в одинаковом количестве с каждой стороны от E вследствие того, что ΔE равна $E\Delta$.

Подобным же образом докажем, что если на каждый из содержащихся в HK отрезков наложить величину, равную Z , так, чтобы она имела центр тяжести в середине отрезка, то все эти величины вместе будут равны B , и для составленной из всех их величины центром тяжести будет Δ ; тогда величина A будет наложена в E , величина же B — в Δ . Таким образом, получатся равные друг другу величины, расположенные по прямой, центры тяжести которых равноудалены друг от друга, причем в четном числе. Ясно, что для составленной из всех их величины центром

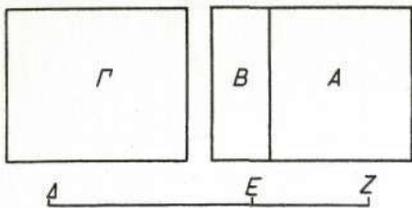


Рис. 4

тяжести будет точка, делящая пополам прямую, на которой находятся центры промежуточных величин. Поскольку ΔE равна $\Delta \Gamma$, а $E \Gamma$ равна ΔK , значит, и вся $\Delta \Gamma$ будет равна ΓK ; так что для составленной из всех величин центром тяжести будет точка Γ . Итак, если A приложить в E , а B в A ,

то A и B будут находиться в равновесии по отношению к Γ .

VII. Если величины будут несоизмеримы, то они точно так же уравновесятся на длинах, которые обратно пропорциональны этим величинам.

Пусть AB , Γ — несоизмеримые величины, а ΔE , EZ — длины, и пусть AB имеет к Γ то же самое отношение, что длина ΔE к длине EZ [рис. 4]; я утверждаю, что для величины, составленной из обоих AB , Γ , центром тяжести будет E . Действительно, если AB , помещенная в Z , не уравновесится с Γ , помещенной в Δ , то AB или будет больше, чем нужно для равновесия с Γ , или нет.

Пусть она будет больше; отнимем от AB меньше того избытка, на который AB больше, чем нужно для равновесия с Γ , так чтобы остаток A был соизмерим с Γ . Поскольку теперь величины A , Γ соизмеримы и A имеет к Γ отношение меньшее, чем ΔE к EZ , то A и Γ не уравновесятся на длинах ΔE , EZ , если A поместить в Z , а Γ в Δ . Таким же образом докажем и в том случае, когда Γ будет больше того, что нужно для равновесия с AB^2 .

О плавающих тел

КНИГА I

Предположим, что жидкость имеет такую природу, что из ее частиц, расположенных на одинаковом уровне и прилежащих друг к другу, менее сдавленные выталкиваются более сдавленными и что каждая из ее частиц сдавливается жидкостью, находящейся над ней по отвесу, если только жидкость не заключена в каком-нибудь сосуде и не сдавливается еще чем-нибудь другим., <...>

II. Поверхность всякой жидкости, установившейся неподвижно, будет иметь форму шара, центр которого совпадает с центром Земли., (...)

III. Тела, равнотяжелые с жидкостью, будучи опущены в эту жидкость, погружаются так, что никакая их часть не выступает над поверхностью жидкости и они не будут двигаться вниз.

Опустим в жидкость какое-нибудь тело из равнотяжелых с этой жидкостью, и пусть, если возможно, некоторая часть его будет выступать над поверхностью жидкости. Пусть жидкость

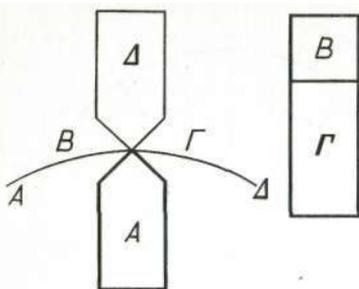


Рис. 6

V. Тело более легкое, чем жидкость, будучи опущено в эту жидкость, погружается настолько, чтобы объем жидкости, соответствующий погруженной [части тела], имел вес, равный весу всего тела. (...)

VI. Тела более легкие, чем жидкость, опущенные в эту жидкость насильно, будут выталкиваться вверх с силой, равной тому весу, на который жидкость, имеющая равный объем с телом, будет тяжелее этого тела.

Пусть имеется некоторое тело А [рис. 6], более легкое, чем жидкость; В — вес тела А, а $B + \Gamma$ — вес жидкости в объеме А. Требуется доказать, что насильно погруженное в жидкость тело А будет выталкиваться вверх с силой, равной весу Γ .

Возьмем какое-нибудь тело Δ , имеющее вес, равный Γ . Тогда тело, составленное из обоих тел А и Δ , будет легче жидкости [в том же объеме], так как вес составного тела будет $B + \Gamma$, вес же жидкости в равном объеме будет больше, чем $B + \Gamma$, так как $B + \Gamma$ представляет вес [жидкости] в объеме, равном А. Теперь тело, составленное из тел А, Δ , будучи опущено в жидкость, погрузится настолько, чтобы жидкость в объеме, равном погруженной части, имела вес, равный весу всего тела, как это доказано выше.

Пусть дуга АВГД — поверхность некоторой жидкости. Так как количество жидкости в объеме, равном телу А, имеет вес, равный весу тел А, Δ , то ясно, что погруженная часть этого тела будет иметь объем, равный А, остальная же часть его, именно Δ , будет находиться над поверхностью жидкости. Действительно, если бы это тело погрузилось иначе, то получилось бы [противоречие] с тем, что было доказано [раньше]. Теперь ясно, что [с какой силой] тело Δ выталкивается кверху, [с такой же силой оно будет придавливаться] книзу находящимся над ним телом Δ , поскольку ни то, ни другое не пересиливают друг друга. Но Δ давит вниз с тяжестью, равной весу Γ , так как было предположено, что вес тела Δ равен Γ ; теперь то, что требовалось доказать, будет очевидно.

VII. Тела более тяжелые, чем жидкость, опущенные в эту жидкость, будут погружаться, пока не дойдут до самого низа и в жидкости станут легче на величину веса жидкости в объеме, равном объему погруженного тела.

Что тело будет погружаться, пока не дойдет до самого дна, очевидно, так как находящиеся под ним частицы жидкости будут испытывать большее давление, чем другие, расположенные на одном с ним уровне, так как тело предполагается более тяжелым, чем жидкость; а что оно, как сказано, [в жидкости] станет легче, это следует доказать.

Пусть имеется некоторое тело А [рис. 7], более тяжелое, чем жидкость. Пусть вес тела А будет $B + \Gamma$, вес же жидкости в объеме, равном А, будет В. Требуется доказать, что тело А, находясь в жидкости, будет иметь вес, равный Γ .

Возьмем некоторое тело Δ , [более легкое, чем жидкость в его объеме; пусть] вес тела А будет равен весу В, вес же жидкости, имеющей одинаковый с телом Δ объем, пусть будет равен весу $B + \Gamma$. Если мы сло-

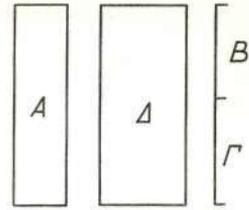


Рис. 7

жим оба наши тела А и Δ в одно, то составное тело будет равнотяжелым с жидкостью; действительно, вес обоих этих тел равен вместе взятым весам $B + \Gamma$ и В, вес же жидкости, имеющей объем составного тела, равен тем же самым весам. Значит, если эти тела опустить в жидкость, то они будут в равновесии с жидкостью и не будут двигаться ни вверх, ни вниз. Вследствие этого тело А пойдет вниз с такой же силой, с какой тело Δ будет увлекаться вверх. Тело Δ , поскольку оно легче жидкости, будет двигаться вверх с силой, равной весу Γ , так как доказано, что более легкие, чем жидкость, тела, будучи насильно погружены в эту жидкость, движутся вверх с силой, равной тому весу, на который жидкость, имеющая объем, равный этому телу, будет тяжелее последнего. Но жидкость, имеющая равный объем с телом Δ , будет тяжелее тела Δ на вес Γ . Теперь ясно, что тело А будет двигаться вниз [с силой, равной весу Γ]. (...)

Комментарий

Перевод с латинского работ Архимеда выполнен И. Н. Веселовским. Отрывки воспроизводятся по изданию: Архимед. Сочинения. М., 1962.

¹ Т. е. конгруэнтных, так как геометрическое равенство греки понимали в смысле равновеликости. Доказательство должно быть дополнено так. Если мы от АВ отнимем В так, что А, являясь соизмеримой с Γ , все же будет перевешивать последнюю, то отношение А к Γ должно быть больше отношения Е к Е. В самом деле, при равновесии относительно точки Е мы имели бы равенство

$$\frac{A}{\Gamma} = \frac{E\Delta}{EZ}, \text{ если же } A \text{ перевешивает, то } \frac{A}{\Gamma} > \frac{E\Delta}{EZ}; \text{ но в действительности } \frac{A}{\Gamma} < \frac{E\Delta}{EZ}, \text{ так как } \frac{E}{F} = \frac{A+B}{\Gamma}; \text{ полученное противоречие и доказы-}$$

вает теорему.

³ Фраза в скобках, по-видимому, представляет позднейшую вставку; во всяком случае, слова «одинаковой по величине» совершенно излишни.

⁴ Это место иногда толковали в том смысле, что рав-

нотяжелое с жидкостью тело будет в равновесии только у поверхности жидкости, а не в любом положении внутри жидкости, и соответственно упрекали Архимеда в ошибке. Такого рода толкование не является необходимым; дальнейшие слова об одинаковости давления, т. е. об отсутствии побудительной силы для движения, показывают, что мысль Архимеда заключалась в том, что движение вниз считалось невозможным именно вследствие отсутствия причины их движения.

Литература

- [1] Собрание сочинений Архимеда:
Archimedis opera omnia cum commentariis Eutocii. Ed.
J. L. Heiberg. Vols. 1—3. Leipzig, 1880—1881.
- [2] Лурье С. Я. Архимед. М.—Л., 1945.
- [3] Веселовский И. Н. Архимед. М., 1957.
- [4] Житомирский С. В. Архимед, М., 1981.



Н. Коперник

1473—1543

О гелиоцентрической системе мира

Важнейшим моментом в подготовке научной революции XVI—XVII вв., приведшей к рождению нового естествознания, было переосмысление вопроса о месте Земли во Вселенной. Еще в Древней Греции Аристарх Самосский выдвинул идею об обращении Земли вокруг Солнца. Однако эта идея не стала общепринятой, и в течение многих столетий господствующей была освященная церковью система Птолемея, в которой Земля рассматривалась как центр Вселенной. Многовековое господство теории Птолемея не только мешало развитию астрономии, но и тормозило прогресс всего естествознания, препятствуя осмыслению общности явлений природы. Поэтому выдвижение гелиоцентрической системы Н. Коперника, низводящей Землю до положения одной из планет Солнечной системы, рассматривается как крупнейшее событие в истории не только астрономии, но и естествознания в целом.

Николай Коперник родился в Торуні на Висле 19 февраля 1473 г. в семье крупного купца, принадлежавшего к местной знати. Рано потеряв отца, он воспитывался у дяди, занимавшего высокие государственные посты в Вармийской епархии — самостоятельном церковном княжестве на территории западной Пруссии.

Коперник получил прекрасное образование. Три года он учился в крупнейшем в то время Ягеллонском университете в Кракове, затем в течение десяти лет совершенствовал свое образование в университетах Болоньи и Падуи. Он увлеченно занимался медициной, астрономией, математикой, философией, юридическими науками. В 1503 г. он получил диплом доктора права, обеспечивший ему место каноника Вармийской епархии. В 1505 г. Коперник вернулся на родину и с тех пор безвыездно жил и работал в Вармии до своей кончины (24 мая 1543 г.).

Движимый интуитивным убеждением в простоте природы («должно скорее следовать мудрости природы, которая как бы больше всего боится произвести что-нибудь излишнее и бесполезное»), Коперник разуверился в справедливости геоцентрической системы, сторонники которой для описания движения планет

вынуждены были делать сложные расчеты, нагромождая одни эпициклы на другие, использовать множество сфер. Вместо нее Коперник предложил простое построение, качественно хорошо объяснявшее наблюдаемые астрономические закономерности. Земля в системе Коперника, как и другие планеты, обращается по окружности вокруг Солнца, и вращается вокруг своей оси. Отказ от идеи о выделенном положении Земли во Вселенной ставил под сомнение предложенную Аристотелем картину мира, в которой все явления природы делились на небесные и земные, не сводимые друг к другу и подчинявшиеся различным законам. Преимущество гелиоцентрической системы особенно отчетливо проявилось в описании движения Луны, соответствующем астрономическим наблюдениям, в то время как на основе системы Птолемея этого соответствия так и не удалось получить. Конечно, использование представления о круговых («совершенных») орбитах планет не позволило Копернику добиться полного согласия наблюдений с теоретическими представлениями. Это было сделано позднее, когда И. Кеплер на основе анализа многолетних наблюдений Тихо Браге пришел к выводу о том, что планеты движутся по эллиптическим траекториям. Однако для прогресса науки было важно не столько повышение точности астрономических расчетов, сколько принципиально новый подход к астрономическим явлениям. Определенное стимулирующее значение для создания новой механики имела идея Коперника об относительности восприятия движения (так называемый «принцип кинематической относительности»).

Коперник дал первое изложение своей системы, не приводя детальных доказательств, еще в 1515 г., в рукописном труде «Малый комментарий о гипотезах, относящихся к небесным движениям», с которым ознакомил своих друзей. Он целенаправленно работал над обоснованием гелиоцентрической системы, и примерно в 1530—1532 гг. закончил сочинение «О вращении небесных сфер». Однако Коперник не спешил с публикацией книги, справедливо опасаясь непонимания со стороны большинства ученых-схоластов, а также церковных преследований. И все же друзья уговорили его издать книгу. Особенно большую роль в ее издании и распространении учения Коперника сыграл Г. И. Ретик, молодой профессор математики, специально приехавший из Виттенберга к Копернику для ознакомления с его учением. Ретик в 1539 г. опубликовал в Гданьске анонимный труд, в котором изложил основы новой системы мира.

Успех книги Ретика убедил Коперника дать согласие на издание главного труда своей жизни. Книга была выпущена в Нюрнберге в год смерти ученого с предисловием математика и богослова Осияндера. Это предисловие вошло в историю как попытка подвергнуть сомнению способность науки познать истину. Последняя, по мнению Осияндера, доступна лишь божественному откровению: «Астроном прибегает к лучшей и легчайшей гипотезе. Философ, вероятно, потребует нечто более вероятное, но оба они без божественного откровения не в состоянии что-либо открывать или что-

либо нам передавать». Однако попытка Осиандера выхолостить революционную сущность учения Коперника потерпела неудачу. Оно стало манифестом нового естествознания.

О вращениях небесных сфер

Глава IX

О том, можно ли приписать
Земле несколько движений,
и о центре мира

Таким образом, поскольку ничто не препятствует подвижности Земли, то я полагаю, что нужно рассмотреть, не может ли она иметь несколько движений, так чтобы ее можно было считать одной из планет. Действительно, что она не является центром для всех вращений, обнаруживается и неравномерным видимым движением планет и переменностью их расстояний от Земли, что не может быть объяснено в предположении гомоцентрического с Землей круга. Поскольку существует несколько центров, не будет легкомысленным подумать также и о центре мира, совпадает ли последний с центром земной тяжести или нет. Что касается меня, то я полагаю, что тяготение есть не что иное, как некоторое природное стремление, сообщенное частям божественным провидением творца Вселенной, чтобы они стремились к целостности и единству, сходясь к форме шара. Вполне вероятно, что это свойство присуще также Солнцу, Луне и остальным блуждающим светилам, чтобы при его действии они продолжали пребывать в своей шарообразной форме, совершая тем не менее различные круговые движения.

Следовательно, если и Земля совершает иные движения, например около центра, то эти движения необходимо должны быть такими же, какие замечаются внешне и у других планет. Среди этих движений мы находим годичное обращение. Поэтому если мы переделаем это движение из солнечного в земное и согласимся, что Солнце неподвижно, то восходы и заходы знаков зодиака и неподвижных звезд, когда они становятся то утренними, то вечерними, покажутся нам происходящими совершенно так же. Равным образом, стояния, попятные и прямые движения планет окажутся принадлежащими не им, а происходящими от движения Земли, которое они заимствуют для своих видимых движений. Наконец, само Солнце будем считать занимающим центр мира. Во всем этом нас убеждает разумный порядок, в котором следуют друг за другом все светила, и гармония всего мира, если только мы захотим взглянуть на само дело обоими (как говорят) глазами.

Никто, как я знаю, не сомневается, что наивысшим из всего видимого является небо неподвижных звезд. Что же касается порядка планет, то древние философы пожелали его установить на основании продолжительности их обращений, полагая, что из тел, имеющих одинаковую скорость, будут казаться движущимися медленнее те, которые находятся на большем расстоянии, как это доказывается у Евклида в «Оптике». Поэтому они полагают, что Луна совершает свое круговое обращение в кратчайшее время, так как она вращается ближе всего к Земле по наименьшему кругу. Самым же вышним является Сатурн, который в наибольшее время обходит длиннейший круг. Ниже его находится Юпитер. После него идет Марс. Относительно Венеры и Меркурия имеются различные мнения вследствие того, что они не могут удалиться от Солнца на любое расстояние, как приведенные выше планеты. Поэтому некоторые помещают их выше Солнца, как Тимей у Платона, а другие — ниже его, как Птолемей и большая часть позднейших астрономов. Альпетрагий делает Венеру находящейся выше Солнца, а Меркурий — ниже.

Те, кто следует мнению Платона, полагая, что все звезды и вообще темные тела блестят заимствованным от Солнца светом, считают, что если бы Меркурий и Венера находились ниже Солнца, то они вследствие небольшого от него расстояния казались бы половинчатыми и, во всяком случае, отклоняющимися от круглости. Действительно, они отражали бы полученный свет почти исключительно вверх, т. е. по направлению к Солнцу, как мы его видим у молодой Луны или на ущербе. Также говорят, что иногда, проходя перед Солнцем, эти планеты должны загораживать его и, в зависимости от своих размеров, производить затмения солнечного света; поскольку это никогда не замечается, они полагают, что эти планеты никак не могут проходить под Солнцем.

Наоборот, помещающие Венеру и Меркурий под Солнцем, берут в качестве основного довода расстояние между Солнцем и Луной. Действительно, найдено, что наибольшее расстояние от Земли до Луны составляет 64 части и одну шестую, если за одну часть принять радиус Земли, и все это расстояние почти восемнадцать раз содержится в наименьшем расстоянии до Солнца, которое составляет 1160 упомянутых частей. Следовательно, между Солнцем и Луной будет 1096 частей. Поэтому, чтобы такой обширный промежуток не оставался пустым, они на основании расстояния между апсидами¹, которое считают шириной орбит этих планет, полагают, что эти числовые промежутки будут приблизительно заполнены, если за самой высокой частью орбиты Луны будет следовать нижняя часть орбиты Меркурия, а за верхней частью последней пойдет ближайшая часть орбиты Ве-

неры, которая, в свою очередь, верхней своей апсидой будет как бы касаться нижних частей орбиты Солнца.

Итак, расстояние между апсидами Меркурия они вычисляют приблизительно в $177 \frac{1}{2}$ вышеупомянутых частей, затем оставшее расстояние заполняется промежутком для Венеры приблизительно в 910 частей. Следовательно, считают, что в светилах нет никакой темноты, подобной лунной, но что они или сияют собственным светом, или всем телом насыщены солнечным сиянием и поэтому не затмевают Солнца. Кроме того, необычайно редким событием бывает, когда эти светила станут между нами и Солнцем, ибо они значительно отклоняются по широте. Впрочем, они представляют малые тела по сравнению с Солнцем, так как даже Венера, будучи больше Меркурия, еле может закрыть сотую часть Солнца, как говорит Альбатегний Аратский, который полагает, что диаметр Солнца в десять раз больше диаметра Венеры; поэтому нелегко увидеть такое пятнышко под сильнейшим освещением. Однако Аверроэс в своем парафразе Птолемея упоминает, что он видел что-то темноватое, а после вычислений обнаружил, что происходило соединение Солнца и Меркурия. Вот как доказывают, что оба светила движутся под солнечным кругом.

Однако насколько слабы и малодостоверны эти доводы, можно видеть из того, что до Луны расстояние будет 38 земных радиусов, если следовать Птолемею, а *по* более истинной оценке, более 49 (как будет показано ниже). Но, как мы знаем, в таком большом промежутке не содержится ничего, кроме воздуха, или, если угодно, того, что называется огненным элементом. Помимо того, диаметр круга Венеры, двигаясь по которому она удаляется от Солнца в обе стороны приблизительно на 45° , должен быть в шесть раз больше расстояния от центра Земли до наинизшей апсиды Венеры. Так пусть же они скажут, что должно содержаться во всем этом столь большом пространстве, которое заключало бы Землю, воздух, эфир, Луну и Меркурий и, наконец, тот огромный эпицикл Венеры, если бы последняя вращалась вокруг покоящейся Земли. Наконец, насколько неубедительны рассуждения Птолемея, что Солнце должно двигаться как раз посередине между планетами, которые могут сколь угодно удаляться от Солнца, и теми, которые от него не удаляются, видно из того, что Луна, которая сама может сколь угодно далеко от него отходить, обнаруживает их ложность.

Далее, те, кто помещает под Солнце Венеру, а затем Меркурий или как-нибудь иначе разделяет их, какую могут привести причину, что эти светила не совершают самостоятельных и отличных от Солнца обращений, как другие планеты, если только относительная быстрота или медленность не обманывает относительно порядка?

Итак, необходимо, или чтобы Земля не была центром, к которому относится порядок распределения светил и их сфер, или чтобы вообще не было никакого принципа распределения и нель-

зя было видеть, почему Сатурн должен иметь более высокое место, чем Юпитер или какая-нибудь другая планета. Поэтому я полагаю, никак не следует пренебрегать тем, что написал в энциклопедии Марциан Капелла и что хорошо знали некоторые другие латинские писатели. Они полагают, что Венера и Меркурий обращаются вокруг находящегося в середине Солнца, и по этой причине думают, что эти планеты могут отойти от Солнца не дальше, чем позволяет кривизна их орбит, поэтому эти светила не обходят вокруг Земли, как другие планеты, но имеют повернутые вовнутрь апсиды. Следовательно, что же другое хотя бы сказать эти писатели, как не то, что центр орбит этих светил находится около Солнца. Таким образом, орбита Меркурия помещается внутри орбиты Венеры, более чем вдвое большей, и находит по величине вполне соответствующее место.

Если теперь кто-нибудь на этом основании отнесет к тому же центру и Сатурн с Юпитером и Марсом, определив только величину их орбит так, чтобы они вместе с этими планетами охватывали и окружали неподвижную Землю, то не ошибется, как показывают числовые отношения их движений. Действительно, известно, что эти планеты находятся ближе к Земле всегда около времени своих восходов вечером, т. е. когда они бывают в противостоянии с Солнцем, а всего дальше они бывают от Земли около времени своих заходов вечером, когда скрываются вблизи Солнца, и Солнце, очевидно, бывает между ними и Землей. Все это достаточно ясно показывает, что центр их скорее относится к Солнцу и будет тем же самым, вокруг которого совершают свои обращения Венера и Меркурий.

Если же они все связаны с одним центром, то необходимо, чтобы в пространстве, остающемся между выпуклостью сферы Венеры и вогнутостью Марса, находился тот же круг или гомоцентрическая с ним По обоим своим поверхностям сфера, которая вместила бы в себя Землю вместе с сопутствующей ей Луной и всем тем, что содержится под сферой Луны. Действительно, мы никак не можем отделить от Земли Луну, бесспорно самую близкую к ней, в особенности если в указанном пространстве найдем достаточно обширное и подходящее для нее место. Поэтому нам не стыдно признать, что весь подлунный мир и центр Земли движутся по Великому кругу между другими планетами, заканчивая свое обращение вокруг Солнца в один год, и что около Солнца находится центр мира. Если же Солнце остается неподвижным, то все видимое движение его должно скорее найти себе объяснение в подвижности Земли. Размеры же мира остаются столь большими, что, хотя расстояние от Земли до Солнца и имеет достаточно ощутимую величину по отношению к размерам любых планетных орбит, оно по сравнению со сферой неподвижных звезд не будет заметным. Я полагаю, что это допустить легче, чем устремлять свой ум почти в бесконечное множество сфер, а ведь это принуждены делать те, которые удерживают Землю в середине мира. Но должно скорее следовать мудрости природы,

которая как бы больше всего боится произвести что-нибудь излишнее или бесполезное, но зато часто одну вещь обогащает многими действиями.

Хотя все это и очень трудно и даже почти невозможно осмыслить, однако, вопреки мнению многих, если бог позволит, мы сделаем это яснее Солнца для людей, по крайней мере не невежд в математическом искусстве. Поэтому если сохранить указанный ранее принцип, ибо никто не приведет более удобного о том, что размеры орбит

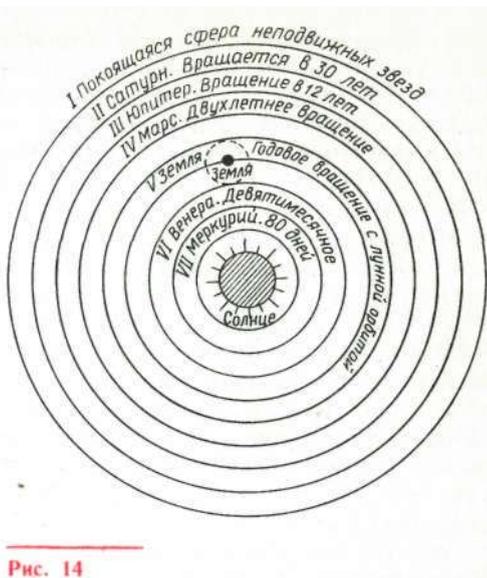


Рис. 14

измеряются временем обращения, то порядок сфер, начиная с наивысшей, будет следующий [рис. 14].

Первой и наивысшей из всех является сфера неподвижных звезд, содержащая самое себя и все и поэтому неподвижная. Она служит местом Вселенной, к которому относятся движения и положения всех остальных светил. Действительно, хотя некоторые полагают, что она каким-то образом движется, мы для этого явления приведем другую причину, выводимую из земного движения. Далее следует первая из планет — Сатурн, завершающий свое обращение в 30 лет, после него Юпитер, движущийся двенадцатилетним обращением, затем Марс, который делает круг в два года. Четвертое по порядку место занимает годовое вращение, и в этом пространстве, как мы сказали, содержится Земля с лунной орбитой, как бы эпициклом. На пятом месте стоит Венера, возвращающаяся на девятый месяц. Наконец, шестое место занимает Меркурий, делающий круг в восемьдесят дней. В середине всего находится Солнце. Действительно, в таком великолепнейшем храме кто бы мог поместить этот светильник в другом и лучше месте, как не в том, откуда он может одновременно все освещать. Ведь не напрасно некоторые называют Солнце светильником мира, другие — умом его, а третьи — правителем. Гермес Трисмегист называет его видимым богом, а Софоклова Электра — всевидящим. Конечно, именно так Солнце, как бы восседая на царском троне, правит обходящей вокруг него семьей светил. Также и Земля не лишается обслуживания Луной, но, как говорит Аристотель в книге «О животных», Луна имеет наибольшее сродство с Землей. В то же время Земля зачинает от Солнца и беременеет каждый год.

Таким образом, в этом расположении мы находим удивитель-

ную соразмерность мира и определенную гармоничную связь между движением и величиной орбит, которую иным способом нельзя обнаружить. Здесь человеку, не ленивому в своих созерцаниях, следует обратить внимание на то, по какой причине прямое и попятное движение у Юпитера представляются большими, чем у Сатурна, и меньшими, чем у Марса, почему эти движения у Венеры больше, чем у Меркурия, и почему такая смена движений у Сатурна во время одного оборота наблюдается чаще, чем у Юпитера, а у Марса и Венеры реже, чем у Меркурия, а также почему Сатурн, Юпитер и Марс, когда они видимы в течение всей ночи, ближе к Земле, чем во время их гелиактических восходов² и заходов. Когда Марс делается видимым в течение всей ночи, он по величине представляется равным Юпитеру, отличаясь от него только красноватым цветом, в другое же время он едва находится среди звезд второй величины и распознается только в результате тщательного наблюдения следящих за ним. Все это происходит по одной причине, которая заключается в движении Земли.

А что ничего подобного не замечается у неподвижных звезд, только доказывает неизмеримую их высоту, которая заставляет исчезать из вида даже орбиту годового движения или ее отображение, так как всякому видимому предмету соответствует некоторая величина расстояния, за которой он больше уже не замечается, как показано в оптике. А именно, что между наивысшей планетой Сатурн и сферой неподвижных звезд находится еще очень большой промежуток, доказывает их мерцающий свет. Этим признаком они больше всего отличаются от планет, так как необходимо, чтобы наибольшая разница была между движимыми и недвижимыми. Так велико это божественное творение всеблагого и всевышнего.

Глава XI

Доказательство тройного движения Земли

Поскольку так много важных свидетельств планет согласуется с тем, что Земля подвижна, мы изложим теперь в заключение самое ее движение, насколько оно, принятое как гипотеза, объясняет видимые явления. Нужно допустить, что Земля имеет всего три движения: первое, которое, как мы сказали, греки называют *νυχθημερίον*, соответствующее дню и ночи обращение вокруг оси Земли в направлении с запада на восток, в зависимости от чего весь мир представляется движущимся в обратном направлении, описывая экваториальный круг, который некоторые называют равноденственным, подражая терминологии греков, у которых он называется *ισημερίως*.

Второе — это годовое движение центра, который описывает вокруг Солнца зодиакальный круг также с запада на восток, т. е. в направлении последовательности знаков; этот круг идет

между Венерой и Марсом, которые, как мы сказали, прилегают к нему. Это заставляет само Солнце казаться нам проходящим зодиак подобным же движением так, что если, например, центр Земли проходит через Козерог, то Солнце кажется проходящим через Рак, из Водолея оно кажется находящимся во Льве, и так далее, как мы уже говорили. Надо считать, что в этом кругу, который расположен по средней линии знаков зодиака, и к его плоскости равноденственный круг и ось Земли имеют периодически меняющееся наклонение. Действительно, если бы они были неизменными и только просто следовали движению центра, то не было бы никакого неравенства дней и ночей, но всегда было бы или солнцестояние, или кратчайший день, или равноденствие, или лето, или зима, или какое-нибудь одно и то же одинаковое время года.

Таким образом, отсюда следует третье деклинационное движение тоже с годовым обращением, но против последовательности знаков, т. е. противоположно движению центра. Так оба эти почти равные друг другу и противоположные движения вместе делают, что ось Земли и наибольшая из ее параллелей — экваториальный круг — смотрят приблизительно в одну и ту же часть мира, как будто бы они оставались все время неподвижными. Одновременно Солнце представляется движущимся по наклонному зодиакальному кругу совершенно так же, как и центр Земли³, и как будто бы последний был центром мира, если только ты вспомнишь, что расстояние между Солнцем и Землей на сфере неподвижных звезд уже ускользает от нашего зрения.

А для доказательства, что все это обстоит именно так [это желательнее показать наглядно, чем рассказывать], опишем круг $abcd$, который представляет годовой путь центра Земли на поверхности зодиака, и пусть e будет Солнце, находящееся около его центра. Этот самый круг я рассеку на четыре части, проведя диаметры aec и bed . Пусть точку a занимает начало созвездия Рака, b — Весов, c — Козерога, d — Овна. Примем также, что центр Земли сначала находится в a . Вокруг него я начерчу земной экватор fhg , но только не в той же самой плоскости; в ней будет находиться лишь диаметр gal — общее сечение обоих кругов, а именно экватора и зодиака. Проведем также диаметр $fall$ под прямым углом к gai ; пусть точка f будет пределом наибольшего отклонения к югу, a — к северу. В таких предположениях жители Земли будут видеть Солнце в центре e совершающим свой зимний солнцеворот под знаком Козерога; это будет производить обращенное к Солнцу наибольшее северное отклонение h . Таким образом, наклон экватора к линии ae заставляет ее в суточном вращении описывать параллель зимнего тропика на расстоянии, соответствующем углу наклона eah .

Пусть теперь центр Земли пойдет в направлении последовательности знаков, а предел f наибольшего отклонения на такой же угол повернется против последовательности знаков, пока оба они в b не опишут по четверти окружности. В течение этого

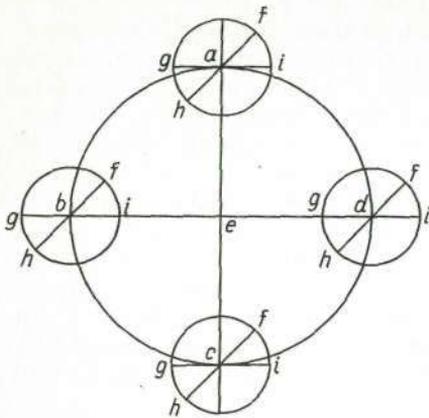


Рис. 15

будет ей никакого отклонения [от экватора], но все отклонения будут получаться по сторонам. Вот так Солнце будет усматриваться в весеннем равноденствии.

Пусть в принятых условиях центр Земли продолжает движение; когда в с он пройдет полуокружность, то Солнце будет усматриваться входящим в созвездие Рака. Тогда южное отклонение / экватора, повернутое к Солнцу, сделает последнее видимым на севере и описывающим летний тропик на расстоянии, соответствующем углу наклона ecf . Затем, когда точка f повернется на третью четверть круга, общее сечение gi снова попадет на линию ed . Отсюда Солнце, наблюдаемое в Весах, окажется завершившим осеннее равноденствие. После этого в том же самом движении прямая gi , постепенно поворачиваясь к Солнцу, заставит повториться то, что было в начале, откуда исходило наше движение.

Иначе. Пусть опять на плоскости чертежа прямая aec будет диаметром и общим сечением с кругом $abcd$ [рис. 15, 16], восстановленным перпендикулярно упомянутой плоскости. На этом круге в точках a и c , т. е. под знаками Рака и Козерога, начертим соответственно круговые сечения $dgfi$ Земли через полюсы; ось Земли — df , северный полюс — d , южный — f , диаметр экваториального круга — gi . Когда f обращается к находящемуся в e Солнцу и отклонение экватора будет к северу на угол iae , вращение вокруг земной оси заставит описать параллельный экватору южный круг с диаметром kl и расстоянием li , представляющий для Солнца тропик Козерога. Или, чтобы сказать правильнее, это движение вокруг оси по отношению к ac совершается по конической поверхности, имеющей вершину в центре Земли, а в качестве основания — круг, параллельный экватору. В противоположном знаке c все происходит так же, но в обратную сторону. Таким образом, ясно, как эти два идущие друг к

времени вследствие равенства обоих вращений угол eai будет всегда оставаться равным углу aeb и диаметры fah и fbh будут все время соответственно параллельны, так же как gai и gbi и как один экватор параллелен другому. Последние по уже упоминавшейся причине будут представляться на неизмеримости неба одними и теми же. Таким образом, из точки b — начала Весов — точка e будет усматриваться в Овне и общее сечение упомянутых кругов совпадает с прямой $gbie$. Суточное вращение уже не сообщит ей никакого отклонения



Рис. 16

другу навстречу движения, а именно движение центра и наклона, заставляют ось Земли оставаться в одном и том же и всегда одинаковом положении, причем все кажется происходящим, как если бы это были движения Солнца. (...)

Комментарий

Перевод с латинского сочинения Н. Коперника выполнен И. Н. Веселовским. Открывки печатаются по изданию: Коперник Н., О вращениях небесных сфер. М., 1981.

- 1 Апсиды (апогей и перигей) — наиболее удаленная от Земли и наиболее близкая к ней точки эллипса, по которому движется планета вокруг своего среднего положения.
- 2 Гелиактическим называется восход светила, совпадающий с восходом Солнца.
- 3 При описании движения Земли Коперник употребляет только вращения, понимая их строго в том смысле, какой установился уже в XIX столетии; в настоящее время мы разлагаем движение Земли на два: вращение вокруг собственной оси (суточное) и обращение вокруг Солнца (годовое); последнее в смысле механики XIX в. является не вращением, а круговым поступательным движением. Коперник заменяет его двумя вращениями.

Литература

- [1] Собрание сочинений Н. Коперника: Nicolaus Copernicus complete works. London, 1972.
- [2] Nikolaus Copernicus. 1473—1973. Das Bild vom Kosmos und die Copernicanische Revolution in den gesellschaftlichen und geistigen Auseinandersetzungen. Berlin, 1973.
- [3] Веселовский И. Н., Белый Ю. А. Николай Коперник. 1473—1543. М., 1974.
- [4] Гребенников Е. А. Николай Коперник. М., 1982.



Г. Галилей

1564—1642

О движении

Первая половина XVII в. в истории науки знаменательна по нескольким причинам. В этот период были получены важные конкретные научные результаты (создан телескоп, установлен закон преломления света, определены законы движения планет и др.). В то же время активно формировалась новая методология науки. На этом фоне особенно выделяется творчество ученого, который в своей исследовательской практике вырабатывал эту методологию, а значимостью сделанных им открытий доказывал ее эффективность. Этим ученым был итальянец Г. Галилей.

Галилео Галилей родился 15 февраля 1564 г. Его детство прошло в Пизе и Флоренции — городах Великого герцогства Тосканы. Отец будущего ученого был знатным, но обедневшим флорентийским патрицием, профессиональным музыкантом и композитором, автором серьезных исследований по истории и теории музыки. Отец хотел, чтобы Галилео стал врачом, и поэтому послал его учиться в Пизанский университет. Однако Галилею не нравилась медицина. С гораздо большим увлечением читал он сочинения Евклида и Архимеда, знакомство с которыми и определило судьбу молодого Галилея. Он оставляет университет и начинает серьезно заниматься механикой. Его первые научные работы были посвящены гидростатическим весам, определению центров тяжести. Специалисты высоко оценивают работы начинающего исследователя и помогают ему получить кафедру в университете сначала Пизы, а затем Падуи.

Падуанский период, продолжавшийся 18 лет, был самым плодотворным и спокойным в жизни ученого. Хотя с университетской кафедры Галилей излагал освященные церковью идеи перипатетиков о мироздании и даже «доказывал» справедливость геоцентризма, одновременно он страстно искал и находил новые подтверждения учения Коперника. Узнав в конце 1608 г. об изобретении за границей зрительной трубы, ученый занялся разработкой прибора собственной конструкции, используя сочетания двояковыпуклой и двояковогнутой линз. В 1609 г. Галилей добил-

ся успеха. Изготовив трубу, он тотчас же направил ее в небо, и это событие стало эпохальным в истории науки. Галилей открывает горы на Луне, четыре спутника Юпитера, сложное строение Млечного Пути, темные пятна на Солнце. Эти открытия убеждают его в необоснованности противопоставления перипатетиков земного и небесного, в справедливости идеи о бесконечности Вселенной, единстве всех природных явлений, наконец, в наличии суточного и годичного вращения Земли. Свои открытия он публикует в книге «Звездный вестник» (1610).

В 1610 г. Галилей покидает пределы Венецианской республики, независимой от папского Рима, и возвращается на родину, в Тоскану. Получив почетное место придворного математика и астронома у великого герцога — своего бывшего ученика, Галилей надеется, что сумеет теперь, избавившись от преподавания, целиком посвятить себя науке.

В Тоскане ученый пишет знаменитую книгу «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой», которая выходит в свет в 1632 г. Написанное не на мертвой латыни, а на живом итальянском языке в виде бесед трех патрициев, это произведение делало любого непредубежденного читателя сторонником гелиоцентрической системы. Участниками диалога являются: Сальвиати, высказывающий в книге мысли самого автора, Симпличио (имя которого в переводе означает «простак»), сторонник учения Аристотеля, и Сагрето, выполняющий в книге функции объективного судьи, но под действием убедительных доводов Сальвиати становящийся сторонником нового учения. Отметим, что Сагрето и Сальвиати имели реальных прототипов, друзей Галилея. Диалоги ведутся в течение четырех дней. Все они нацелены на кинематическое и динамическое обоснование учения Коперника.

Хотя издание «Диалогов» было санкционировано церковными властями, вскоре после публикации книги ученый был вызван в Рим, где 12 апреля 1633 г. предстал перед генеральным комиссаром инквизиции. Под угрозой пыток большого Галилея заставили отречься от учения Коперника и покаяться. После этого ученого поместили под домашний арест на его загородную виллу в Арчетри и лишили возможности видаться и беседовать с друзьями и учениками. Лишь в последние годы жизни контроль над ним со стороны церкви немного ослаб.

Однако сломить Галилея церковь так и не смогла. В Арчетри он закончил свой последний труд «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению». В нем ученый обобщил свои открытия в области механики. Под двумя новыми науками, о которых говорится в названии книги, Галилей подразумевает динамику и сопротивление материалов. «Беседы» представляют собой естественное продолжение «Диалогов», в них те же участники, и построены они в форме бесед. Но последняя книга Галилея строже в научном отношении и выдержана в стиле луч-

ших образцов сочинений Архимеда: здесь приводятся подробные геометрические доказательства основных соотношений кинематики и динамики.

Галилей получил книгу, изданную в протестантском Лейдене, в 1638 г., но прочесть ее уже не мог: к этому времени он окончательно ослеп. Умер ученый 3 января 1642 г. Несомненно, что Галилей так и остался убежденным сторонником нового учения о строении мира. Недаром легенда приписывает ему слова, якобы произнесенные сразу после отречения: «И все-таки она вертится», — ставшие символом борьбы за научную истину.

Величие творчества Галилея состоит в том, что в исследовании природы он использовал научный метод, который В. И. Ленин определил как путь «от живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике...» (Поли. собр. соч. Т. 29. С. 152—153).

В отличие от английского философа, Френсиса Бэкона, лишь теоретически провозгласившего необходимость планомерного эксперимента в познании природы, Галилей сумел практически реализовать экспериментальный метод, придав ему современные черты (создание модели реального процесса, абстрагирование от несущественных факторов, неоднократное повторение опыта и т. д.). С другой стороны, он возродил математический подход Архимеда к исследованию явлений природы, провозгласив, что «книга природы написана на языке математики, ее буквами служат треугольники, окружности и другие геометрические фигуры, без помощи которых человеку невозможно понять ее речь; без них — напрасные блуждания в темном лабиринте».

Творчество Галилея отличается удивительной глубиной проникновения в суть явлений, позволяющей считать выдающегося итальянского ученого родоначальником физической науки в современном ее понимании.

В своих произведениях Галилей касался столь широкого круга проблем, рассматриваемых теперь во всех курсах физики, что даже перечислить их здесь невозможно. Однако главная заслуга ученого — это новый подход к описанию и анализу движения. Приводимые здесь отрывки посвящены именно этой проблеме. Из них первый и второй характеризуют стиль «Диалогов», а третий, взятый из «Бесед», дает представление о математических методах, использовавшихся Галилеем, и уровне проводившихся им экспериментов.

Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой

День второй

(..) *Сальвиати.* Я также хочу, чтобы вы продолжали твердо держаться того, что явления на Земле должны соответствовать явлениям на корабле; ведь если бы это оказалось несоответствующим вашей цели, вам не жаль было бы изменить мнение. Вы говорите: так как, когда корабль стоит неподвижно, камень падает к подножью мачты, а когда движется, падает далеко от подножья, то, следовательно, и наоборот, из падения камня к подножью вытекает, что корабль стоит неподвижно, а падение камня на некотором расстоянии доказывает, что корабль находится в движении; а так как то, что происходит на корабле, равным образом происходит и на Земле, то из падения камня к подножью башни вытекает с необходимостью неподвижность земного шара. Не таково ли ваше рассуждение?

Симпличио. Совершенно верно, таково оно, изложенное в простой форме, которая делает его в высшей степени удобной для усвоения.

Сальвиати. Скажите же мне, если бы камень, выпущенный с вершины мачты плывущего с большой скоростью корабля, упал в точности в то же самое место, куда он падает, когда корабль стоит неподвижно, то какую службу сослужил бы вам этот опыт с падением для решения вопроса, стоит ли судно неподвижно или же плывет?

Симпличио. Решительно никакой. Точно так же, например, по биению пульса нельзя узнать, спит ли кто или бодрствует, поскольку пульс бьется одинаково как у спящих, так и бодрствующих.

Сальвиати. Отлично. Производили ли вы когда-нибудь опыт на корабле?

Симпличио. Я его не производил, но вполне уверен, что те авторы, которые его производили, тщательно его рассмотрели. Кроме того, причины различия столь ясны, что не оставляют места для сомнения.

Сальвиати. Возможно, что эти авторы ссылались на опыт, не производя его. Вы сами являетесь тому хорошим примером, когда, не производя опыта, объявляете его достоверным и предлагаете нам на слово поверить им. Совершенно так же не только возможно, но и достоверно, что авторы поступали таким же образом, отсылая к своим предшественникам и никогда не доходя до того, кто этот опыт проделал сам, ибо всякий, кто его проделает, найдет, что опыт показывает совершенно обратное написанному, а именно, что камень всегда упадет в одно и то же место корабля, неподвижен ли тот или движется с какой угодно скоростью.

Отсюда, так как условия Земли и корабля одни и те же, следует, что из факта всегда отвесного падения камня к подножью башни нельзя сделать никакого заключения о движении или покое Земли. Камень, падающий с корабельной мачты, всегда попадает в одно и то же место, движется ли корабль или стоит на месте.

Симпличио. Если бы вы отослали меня к иным доводам, а не к опыту, то споры наши, я думаю, окончились бы не так скоро, ибо предмет этот кажется мне столь недоступным для человеческого разума, что исключается возможность что-либо утверждать или предполагать.

Сальвиати. И, однако, я считаю возможным это сделать.

Симпличио. Как же это, не проделав ни ста испытаний, ни даже одного, вы выступаете столь решительным образом? Я возвращаюсь к своему неверию и к убеждению, что опыт был произведен первоначальными авторами, которые на него ссылаются, и что он показывает то, что они утверждают.

Сальвиати. Я и без опыта уверен, что результат будет такой, как я вам говорю, так как необходимо, чтобы он последовал. Более того, я скажу, что вы и сами также знаете, что не может быть иначе, хотя притворяетесь или делаете вид, будто не знаете этого. Но я достаточно хороший ловец умов и насильно вырву у вас признание. Однако синьор Сагрето совсем умолк, хотя, мне кажется, я заметил какое-то движение, точно он хотел что-то сказать.

Сагрето. Я в самом деле хотел кое-что сказать, но любопытство, вызванное вашим заявлением, что вы вынудите синьора Симпличио открыть намеренно скрываемое от нас знание, заставило меня отложить всякое иное попечение; прошу вас осуществить обещанное.

Сальвиати. Лишь бы синьор Симпличио сообразовал отвечать на мои вопросы, а за мной дело не станет.

Симпличио. Я буду отвечать то, что знаю, и уверен, что затруднений у меня будет мало, так как о вещах, которые я считаю ложными, думается, нельзя знать ничего, поскольку наука есть наука об истинном, а не о ложном.

Сальвиати. Я не хочу ничего, кроме того, чтобы вы говорили или отвечали только то, что сами достаточно знаете. Поэтому скажите мне: если у вас имеется плоская поверхность, совершенно гладкая, как зеркало, а из вещества твердого, как сталь, не параллельная горизонту, но несколько наклонная, и если вы положите на нее совершенно круглый шар из вещества тяжелого и весьма твердого, например из бронзы, то что, думаете вы, он станет делать, будучи предоставлен самому себе? Не думаете ли вы (как я думаю), что он будет неподвижным?

Симпличио. Если эта поверхность наклонна?

Сальвиати. Да, как мы и предположили.

Симпличио. никоим образом не думаю, чтобы он остался неподвижным. Наоборот, я уверен, что он сам собою двигался бы по наклону.

Сальвиати. Вдумайтесь хорошенько в свои слова, синьор Симпличио, ибо я уверен, что он будет пребывать в неподвижности в любом месте, куда бы вы его ни поместили.

Симпличио. Если вы, синьор Сальвиати, станете пользоваться подобного рода предположениями, я перестану удивляться тому, что вы делаете совершенно ложные выводы.

Сальвиати. Значит, вы считаете совершенно достоверным, что шар будет двигаться по наклону сам собой?

Симпличио. Разве в этом можно сомневаться?

Сальвиати. И вы считаете это неоспоримым не потому, что я вам это внушил (ведь я старался убедить вас в противном), но на основании собственного суждения?

Симпличио. Теперь я понимаю вашу хитрость. Вы говорили так, чтобы испытать меня или подловить, как говорится в просторечии, а вовсе не потому, что думали так на самом деле?

Сальвиати. Именно. И как долго продолжал бы двигаться шар и с какой скоростью? Заметьте, что я говорил о шаре совершенно круглом и о плоскости совершенно гладкой, чтобы устранить все внешние и случайные препятствия. Я хочу также, чтобы вы отвлеклись от сопротивления, оказываемого воздухом своему разделению, и от всех случайных помех, какие могут встретиться.

Симпличио. Я все прекрасно понял и на ваш вопрос отвечаю так: шар продолжал бы двигаться до бесконечности, лишь бы продолжалась такая плоскость, и притом движением непрерывно ускоряющимся, ибо такова природа тяжелых движущихся тел, которые *vires acquirant eundo*¹; и чем больше будет наклон, тем больше будет и скорость.

Сальвиати. Но если бы кому-нибудь захотелось, чтобы этот же шар двигался по той же плоскости вверх, думаете ли вы, что он пошел бы таким образом?

Симпличио. Самостоятельно нет, но втащить его или с силой бросить вверх можно.

Сальвиати. А если бы он был приведен в такое движение насильственно переданным ему импульсом, каково и сколь продолжительно было бы его движение?

Симпличио. Движение шло бы, постепенно ослабевая и замедляясь, поскольку оно противоестественно, и было бы более продолжительным или более кратким в зависимости от большей или меньшей крутизны подъема.

Сальвиати. Как будто вы объяснили мне сейчас случаи движения по двум разного рода плоскостям: на наклонной плоскости движущееся тело самопроизвольно опускается, двигаясь с непрерывным ускорением, так что требуется применить силу для того, чтобы удержать его в покое. На плоскости, поднимающейся вверх, требуется сила для того, чтобы двигать тело вверх, и даже для того, чтобы удержать его в покое, причем сообщенное телу движение непрерывно убывает, так что в конце концов вовсе уничтожается. Добавим еще, что, кроме того, в том и дру-

гом случае возникает различие в зависимости от того, больше или меньше наклон или подъем плоскости, причем при большем наклоне имеет место большая скорость, и, наоборот, при поднимающейся плоскости то же тело, движимое той же самой силой, продвигается на тем большее расстояние, чем меньше высота подъема. А теперь скажите мне, что произошло бы с тем же движущимся телом на поверхности, которая не поднимается и не опускается?

Симпличио. Здесь мне нужно немного подумать над ответом. Раз там нет наклона, то не может быть естественной склонности к движению, и раз там нет подъема, не может быть противодействия движению, так что тело оказалось бы безразличным по отношению как склонности к движению, так и противодействию ему. Мне кажется, что оно должно оставаться неподвижным. Однако я совсем забыл, что синьор Сагрето еще совсем недавно растолковал мне, что это так и должно быть.

Сальвиати. Так, думаю я, если бы шар положить неподвижно; но если придать ему импульс движения в каком-нибудь направлении, то что впоследствии было бы?

Симпличио. Последовало бы его движение в этом направлении.

Сальвиати. Но какого рода было бы это движение: непрерывно ускоряющееся, как на плоскости наклонной, или постепенно замедляющееся, как на плоскости поднимающейся?

Симпличио. Я не могу открыть здесь причины для ускорения или для замедления, поскольку тут нет ни наклона, ни подъема.

Сальвиати. Так, но если здесь нет причины для замедления, то тем менее может находиться здесь причина для покоя. Поэтому сколь долго, полагаете вы, продолжалось бы движение этого тела?

Симпличио. Столь долго, сколь велика длина такой поверхности без спуска и подъема.

Сальвиати. Следовательно, если бы такое пространство было беспредельно, движение по нему равным образом не имело бы предела, т. е. было бы постоянным?

Симпличио. Мне кажется, что так, если бы тело было из прочного материала.

Сальвиати. Это уже предполагается, поскольку было сказано, что устраняются все привходящие и внешние препятствия, а разрушаемость движущегося тела есть одно из привходящих препятствий. Скажите мне, что именно считаете вы причиной того, что этот шар движется по наклонной плоскости самостоятельно, а по плоскости поднимающейся не иначе, как насильственно?

Симпличио. То, что тяжелые тела имеют свойство естественно двигаться к центру Земли и лишь насильственно вверх к периферии, наклонная же поверхность такова, что приближает к центру, поднимающаяся удаляет.

Сальвиати. Следовательно, поверхность, которая не имела бы ни наклона, ни подъема, должна была бы во всех своих частях одинаково отстоять от центра. Но из подобных плоскостей есть ли где такие в мире?

Симпличио. Такие есть, хотя бы поверхность нашего земного шара, будь только она вполне гладкой, а не такой, какова она на самом деле, т. е. неровной и гористой. Такова, например, поверхность воды, когда она тиха и спокойна².

Сальвиати. Следовательно, корабль, движущийся по морской глади, есть одно из тех движущихся тел, которые скользят по одной из таких поверхностей без наклона и подъема и которые поэтому имеют склонность в случае устранения всех случайностей и внешних препятствий двигаться с раз полученным импульсом постоянно и равномерно?

Симпличио. Кажется, что так должно быть.

Сальвиати. И тот камень, который находится на вершине мачты, не движется ли он, переносимый кораблем по окружности круга, вокруг центра, следовательно, движением, в нем не уничтожаемым при отсутствии внешних препятствий? И это движение не столь же ли быстро, как движение корабля?

Симпличио. До сих пор все идет хорошо. Но дальше?

Сальвиати. Не выведете ли вы, наконец, сами и последнее заключение, если сами знаете вперед все посылки?

Симпличио. Вы хотите назвать последним заключением то, что этот камень благодаря движению, в него вложенному, не способен ни отставать от хода корабля, ни опережать его и должен в конце концов упасть в то самое место, куда упал бы, когда корабль стоит неподвижно. (...)

Опыт, показывающий несостоятельность всех опытов, приводимых против движения Земли

Сальвиати. (...) И здесь в качестве последнего подтверждения ничтожности всех приведенных примеров мне кажется своевременным и уместным показать способ, которым легче всего проверить их на опыте. Уединитесь с кем-либо из друзей в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими летающими насекомыми. Пусть будет у вас там также большой сосуд с водой и плавающими в нем маленькими рыбками. Подвесьте наверху ведро, из которого вода будет падать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, подставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая какой-нибудь

предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же; и если вы будете прыгать сразу двумя ногами, то сделаете прыжок на одинаковое расстояние в любом направлении. Прилежно наблюдайте все это, хотя у нас не возникает никакого сомнения в том, что, пока корабль стоит неподвижно, все должно происходить именно так. Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту или другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно. Прыгая, вы переместитесь по полу на то же расстояние, что и раньше, и не будете делать больших прыжков в сторону кормы, чем в сторону носа, на том основании, что корабль быстро движется, хотя за то время, как вы будете в воздухе, пол под вами будет двигаться в сторону, противоположную вашему прыжку, и, бросая какую-нибудь вещь товарищу, вы не должны будете бросать ее с большей силой, когда он будет находиться на носу, а вы на корме, чем когда ваше взаимное положение будет обратным. Капли, как и ранее, будут падать в нижний сосуд, и ни одна не упадет ближе к корме, хотя, пока капля находится в воздухе, корабль пройдет много пядей. Рыбы в воде не с большим усилием будут плыть к передней, чем к задней части сосуда; настолько же проворно они бросятся к пище, положенной в какой угодно части сосуда. Наконец, бабочки и мухи по-прежнему будут летать во всех направлениях, и никогда не случится того, чтобы они собрались у стенки, обращенной к корме, как если бы устали, следуя за быстрым движением корабля, от которого они были совершенно обособлены, держась долгое время в воздухе. Если от капли зажженного ладана образуется немного дыма, то видно будет, как он восходит вверх и держится наподобие облачка, двигаясь безразлично, в одну сторону не более, чем в другую. И причина согласованности всех этих явлений заключается в том, что движение корабля обще всем находящимся на нем предметам, так же как и воздуху. (...)

Сагрето. Хотя во время плавания мне не приходило на ум намеренно производить такие наблюдения, я во всяком случае более чем уверен, что они происходят именно так, как рассказано. В подтверждение этого припоминаю, что сотни раз, сидя в своей каюте, я спрашивал себя, движется корабль или стоит неподвижно. Иногда, в задумчивости, я полагал, что корабль движется в одном направлении, тогда как движение его шло в сторону противоположную. Поэтому я теперь чувствую себя удовлетворенным и совершенно убежден в отсутствии всякой ценности всех опытов, проводимых для доказательства большей вероятности отсутствия, чем существования обращения Земли. <...>

**Беседы и математические
доказательства, касающиеся
двух новых отраслей науки,
относящихся к механике
и местному движению**

День третий

О естественно ускоренном движении

Теорема 1. Предложение 1. Время, в течение которого тело, вышедшее из состояния покоя и движущееся равномерно ускоренно, проходит некоторое расстояние, равно времени, в течение которого это же расстояние было пройдено тем же телом при равномерном движении, скорость которого равна половине наибольшей конечной скорости, достигаемой при первом равномерно ускоренном движении .

Пусть линия AB [рис. 17] представляет время, в течение которого тело, выйдя из состояния покоя в точке C , проходит при равномерно ускоренном движении расстояние CD . Отметим степени скоростей, приобретаемых телом в конце каждой отдельной частицы времени AB ; степени эти, постепенно увеличиваясь, возрастают в конце до величины EB , которую и отложим на линии, перпендикулярной AB ; соединив точки A и E , проведя линии, параллельные EB , на равных друг от друга расстояниях, отложенных на AB , мы представим таким способом возрастающие степени скорости, начиная от A . Разделим линию EB пополам в точке F и проведем линии FG и GA , параллельные AB и соответственно FB . Площадь параллелограмма $GAFB$ будет равна площади треугольника AEB , так как линия FG делит AE пополам в точке I . Если продолжить параллельные линии, заключенные в треугольнике AEB , до линии IG , то сумма параллельных сторон четырехугольника равна сумме тех же сторон треугольника AEB . В самом деле, сумма сторон треугольника IEF равна сумме сторон треугольника GIA , остающиеся же стороны, заключенные в трапеции $AIFB$, являются общими. Так как каждому отдельному времени AB соответствует и отдельная точка на линии AB , а проведенные через эти точки параллели в треугольнике AEB представляют возрастающие степени скорости, в то время как такие же параллели внутри параллелограмма представляют равную им совокупность равномерных скоростей, то ясно, что все моменты скорости ускоренного движения показаны возрастающими параллельными линиями треугольника AEB , а равномерного движения — аналогичными линиями параллелограмма; то, чего недостает моментам в первое время движения (т. е. моментам, представленным параллельными линиями в треугольнике AGI), возмещается моментами, показанными параллельными линиями треугольника IEF . Отсюда следует, что

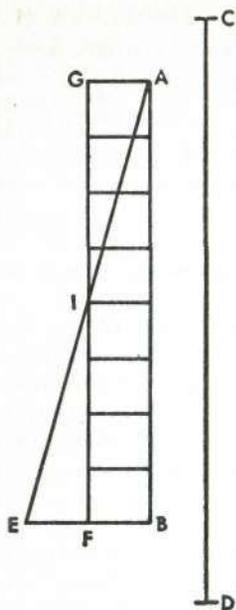


Рис. 17

два тела пройдут равные расстояния в одно и то же время, если одно, выйдя из состояния покоя, будет двигаться равномерно ускоренно, а другое просто равномерно со скоростью, равной половине максимальной степени скорости, достигнутой при ускоренном движении, что и требовалось доказать.

Теорема II. Предложение II. Если тело, выйдя из состояния покоя, падает равномерно ускоренно, то расстояния, проходимые им за определенные промежутки времени, относятся между собой, как квадраты времени⁴.

Изобразим промежуток времени, начинающийся с какого-либо мгновения A , линией AB [рис. 18] и представим себе, что AD и AE — некоторые части этого промежутка времени. Пусть HI — линия, вдоль которой падающее тело, вышедшее из состояния покоя, движется равномерно ускоренно, HL — расстояние, пройденное в течение первого промежутка времени AD , и HM — расстояние, пройденное за время AE . Утверждаю, что отношение расстояния HM к расстоянию HL равно двойному отношению времени AE ко времени AD , другими словами, отношение расстояний HM , HL равно отношению квадратов AE , AD . Проведем линию AC под любым углом к AB и через точки D и E проведем параллельные линии OD и PE , при этом OD представляет максимальную степень скорости, приобретенную к мгновению D времени AD , а PE — максимальную степень скорости, приобретенную к мгновению E времени AE . Как уже было доказано выше, расстояния, пройденные в одном случае при равномерно ускоренном движении, а в другом при просто равномерном движении, происходящем со скоростью, равной половине максимальной конечной скорости, приобретенной при ускоренном движении, равны между собою. Отсюда ясно, что расстояния HM и HL имеют такую же величину, какую имели бы расстояния, пройденные при равномерном движении со скоростями, равными половинам PE и OD , в течение промежутков времени AE и AD . Следовательно, если бы можно было доказать, что линии HM и HL относятся между собой, как квадраты AE и DA , то было бы доказано и наше предложение. Но в четвертом предложении первой части было указано, что при равномерном движении расстояния находятся в составном отношении скоростей и промежутков времени⁶. В данном случае отношение скоростей равно отношению промежутков времени (ибо отношение половины PE к половине OD или PE к OD равно отношению AE к AD). Следовательно, расстояния относятся как квадраты промежутков времени, что и требовалось доказать.

Отсюда вытекает, что расстояния относятся и как квадраты максимальных конечных скоростей, т. е. PE и OD , ибо отношения PE к OD и AE к AD равны.

Следствие 1. Из вышеизложенного получаем, что если от начального мгновения движения взять равные промежутки времени AD , DE , EF , FG , в течение которых телом пройдены расстояния HL , LM , MN' , NI , то последние будут относиться между собой как ряд последовательных нечетных чисел, т. е. как 1:3:5:7. Действительно, именно такое отношение существует между разностями квадратов линий произвольной длины, постепенно увеличивающихся на длину наименьшей из этих линий (разностями между квадратами всех чисел, начиная с единицы). Таким образом, в то время, как скорость возрастает в равные промежутки времени как простой ряд последовательных чисел, расстояния, пройденные за те же промежутки времени, относятся между собой как последовательные нечетные числа.

Сагredo. Приостановите, пожалуйста, на минуту ваше чтение, так как мне хочется поделиться с вами одной мыслью, пришедшей мне в голову. Для того чтобы лучше изложить ее и сделать более ясной как для самого себя, так и для вас, я сделаю небольшой рисунок. Пусть линия AI [рис. 19] изображает промежуток времени, первым мгновением которого является A . Через A я провожу прямую линию AF под любым углом к первой, соединяя конечные точки A и F , разделяя время AI пополам в точке C и провожу через нее линию BC , параллельную FL . Рассматривая BC как максимальную степень скорости, каковые степени, начиная с мгновения A выхода тела из состояния покоя, идут, возрастая, совершенно так же, как линии, параллельные BC и проведенные в треугольнике ABC (т. е. растут в соответствии с возрастанием времени), я принимаю без дальнейших доказательств, основываясь на предшествующих рассуждениях, что пространство, пройденное телом, падающим с подобной возрастающей скоростью, равно тому пространству, которое оно пройдет, если будет двигаться в продолжение того же времени AC равномерно, и степень его скорости будет равна EC , т. е. половине BC . Пойдем теперь далее и представим себе, что тело, движущееся равномерно ускоренно, достигает точки C и обладает степенью скорости BC . Ясно, что если бы оно продолжало дальнейшее движение с той же степенью скорости BC без ускорения, то в следующий промежуток времени IC оно прошло бы расстояние, вдвое большее того, которое оно может пройти в равный промежуток времени AC , двигаясь с постоянной скоростью EC , равной половине BC . Так как, однако, тело падает со скоростью, постоянно и равномерно увеличивающейся в равные промежут-

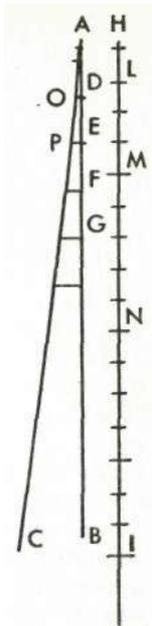


Рис. 18

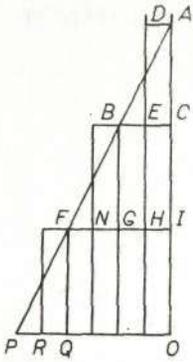


Рис. 19

ки времени, то в течение следующего, промежутка времени к степени скорости его BC будут прибавляться наращения, соответствующие параллелям треугольника BFG , равного треугольнику ABC . Таким образом, прибавив к степени скорости IC половину скорости FG — наибольшей из приобретенных при ускоренном движении и выражающихся параллелями треугольника BFG , — мы будем иметь степень скорости IN , с которой тело двигалось бы равномерно в течение промежутка времени IC . Так как IN втрое больше EC , то выходит, что расстояние, пройденное за второй промежуток времени IC , должно быть в три раза более того, которое пройдено за первый промежуток времени AC . И если мы представим себе, что к AI прибавляется следующий равный промежуток времени IO , а треугольник возрастает до APO , то ясно, что если бы движение продолжалось в течение всего времени IO со степенью скорости IF , приобретенной при ускоренном движении за время AI , то расстояние, пройденное за время IO , было бы равно учетверенному расстоянию, пройденному в первый промежуток времени AC , так как степень скорости IF в четыре раза превышает EC . Но нарастание ускоренного движения идет в треугольнике FPQ совершенно так же, как в треугольнике ABC , и, приведенное к соответственному равномерному движению, дает приращение, равное EC . Поскольку, прибавляя QO , равное EC , мы получаем общую скорость равномерного движения в течение времени IO , в пять раз превышающую скорость равномерного движения в течение первого периода AC . Следовательно, и пройденное пространство будет в пять раз более пройденного в течение первого промежутка времени AC . Таким образом, из этого простого вычисления мы видим, что расстояния, проходимые в равные промежутки времени телом, вышедшим из состояния покоя и движущимся со скоростями, нарастающими в соответствии со временем, относятся между собой как нечетные числа 1, 3, 5 и т. д. Если же мы сложим пройденные пути, то найдем, что в удвоенное время будет пройден путь, в четыре раза больший, и т. д. Вообще, пройденные пути будут относиться между собой как квадраты промежутков времени.

Симпличио. Простое и ясное рассуждение синьора Сагрето понравилось мне, право, много более, нежели несколько неясные для меня доказательства нашего Автора⁷. Теперь я в достаточной мере убежден, что явление должно происходить именно так, если только принять указанное определение равномерно ускоренного движения. Но действительно ли таково ускорение, которым природа пользуется при движении тяжелых падающих тел, остается для меня сомнительным. Поэтому для поучения меня и других, мне подобных, не мешало бы теперь привести несколько опытов из числа многих выполненных, которые показали бы, что различ-

ные случаи падения тел совпадают с приведенными заключениями.

Сальвиати. Вы, как подлинный ученый, предъявляете совершенно основательное требование. Оно особенно уместно в отношении таких наук, в которых для объяснения законов природы применяются математические доказательства. Таковы, например, перспектива, астрономия, механика, музыка и другие аналогичные науки. В них опыт, воспринимаемый чувствами, подтверждает принципы, являющиеся основой всех дальнейших построений. Однако мне не хотелось бы, чтобы у вас создалось впечатление, будто мы слишком подробно остановились на первом и основном положении, на котором покоится колоссальное здание бесчисленных выводов, лишь в малой доле затронутых нашим Автором в настоящем сочинении. Он сделал достаточно уже одним тем, что открыл пытливым умом запертые до сего времени двери. Что касается опытов, то Автор не упустил из виду их произвести, и чтобы убедиться в том, что ускорение естественно падающих тел происходит описанным выше образом, я много раз в обществе нашего Автора производил следующий опыт.

Вдоль узкой стороны линейки или, лучше сказать, деревянной доски длиной около двенадцати локтей, шириной пол-локтя и толщиной около трех дюймов был прорезан канал шириной немого больше одного дюйма. Канал этот был прорезан совершенно прямым и, чтобы сделать его достаточно гладким и скользким, оклеен внутри возможно ровным и полированным пергаментом; по этому каналу мы заставляли падать гладкий шарик из твердейшей бронзы совершенно правильной формы. Установив изготовленную таким образом доску, мы поднимали конец ее над горизонтальной плоскостью когда на один, когда на два локтя и заставляли скользить шарик по каналу, отмечая способом, о котором речь будет идти ниже, время, необходимое для пробега им всего пути. Повторяя много раз один и тот же опыт, чтобы точно определить время, мы не находили никакой разницы даже на одну десятую времени биения пульса. Точно установив это обстоятельство, мы заставляли шарик проходить лишь четвертую часть длины того же канала. Измерив время его падения, мы всегда находили самым точным образом, что оно равно всего половине того, которое наблюдалось в первом случае. Производя далее опыты при различной иной длине пути, сравнивая время прохождения всей линейки со временем прохождения половины, двух третей, трех четвертей или любых иных частей ее и повторяя опыты сотни раз, мы постоянно находили, что отношение пройденных путей равно отношению квадратов времени их прохождения при всех наклонах плоскости, т. е. канала, по которому скользил шарик. При этом мы наблюдали также, что промежутки времени пробега пути при различных наклонах относятся между собой именно так, как утверждает и доказывает далее Автор. Что касается способа измерения времени, то мы пользовались большим ведром, наполненным водой и подве-

шенным наверху. В дне ведра был проделан узкий канал, через который вода изливалась тонкой струйкой и собиралась в маленьком бокале в течение всего того времени, как шарик спускался по всему каналу или части его. Собранные таким образом количества воды каждый раз взвешивались на точнейших весах. Разность и отношение веса воды для разных случаев давали нам разность и отношение времен падения, и притом с такой точностью, что, как я уже упоминал, повторяя один опыт много и много раз, мы не могли заметить сколько-нибудь значительных отклонений. (...)

Замечание. То, что доказано в отношении падения тел в вертикальном направлении, справедливо и в отношении падения по любым наклонным плоскостям. И в этом случае скорость увеличивается по тому же закону, т. е. в соответствии с ростом времени, иными словами, как последовательный ряд целых чисел. (...)

Комментарий

Отрывки из сочинений Г. Галилея воспроизводятся по изданию: Галилей Г. Избранные сочинения. В 2 т., 1964. Переводы с итальянского «Диалогов» (т. 1) и «Бесед» (т. 2) выполнены А. И. Долговым.

¹ Приобретают силы в пути (лат).

² Следует помнить, что Галилей считал, что движением по инерции является равномерное обращение тела по окружности. Идея о прямолинейном движении по инерции была выдвинута позднее; ее, в частности, придерживался Р. Декарт.

³ Данная теорема и ее доказательство были известны уже в XIV в.; она часто встречается в печатных трудах по физике XVI в.

⁴ Следует иметь в виду, что во времена Галилея еще не пользовались алгебраической нотацией и в соответствии с традицией, восходящей еще к античности, допустимо было рассмотрение отношений лишь «однородных» (т. е. имеющих одинаковую размерность) величин. Этим и определяются формулировки теорем, доказываемых Галилеем.

⁵ По старинной терминологии, когда величины a , b , c и d были связаны соотношением $a : b = c^2 : d^2$, говорили, что a находится к b «в удвоенном отношении с к d »; если $a : b = c^3 : d^3$, то говорилось: «в утроенном отношении с к d »; если $a : b = c^{1/2} : d^{1/2}$, то — «в половинном отношении» и т. п.

⁶ Т. е. $s_1 : s_2 = v_1 t_1 : v_2 t_2$.

⁷ Под словом «Автор» скрывается сам Галилей.

Литература

- [1] Собрание сочинений Г. Галилея: Le opere di Galileo Galilei. Vols. 1—20. Firenze, 1929—1939.
- [2] Галилей Г. Пробирных дел мастер. М., 1987.
- [3] Кузнецов Б. Г. Галилей. М., 1964.
- [4] Штекли А. Э. Галилей. М., 1972.



Р. Декарт

1596—1650

О радуге

Реальная история науки сложна и противоречива. Это проявляется и в том, что многие важные открытия на долгие годы погружаются в забвение, и в том, что в течение длительного времени господствующее положение могут занимать в корне ошибочные воззрения. Для правильного понимания хода исторического развития физики необходимо учитывать ее многообразные связи с социальной историей, с философией, с другими естественными науками. Без этого, в частности, невозможно оценить ту роль, которую сыграло в становлении науки Нового времени творчество выдающегося французского философа Р. Декарта.

Рене Декарт родился 31 марта 1596 г. в Лаэ, близ Тура, в знатной, но небогатой семье. Отец Рене считал, что детям следует дать образование, подобающее их дворянскому происхождению, поэтому отдал сына в иезуитский коллеж Ла-Флеш. Декарт закончил коллеж в 1614 г. и затем некоторое время изучал медицину и право в университете в Пуатье. В конце 1616 г. он сдает экзамен и утверждается в звании бакалавра и лиценциата права.

В отличие от многих других выдающихся мыслителей жизненные интересы Декарта определились далеко не сразу. После окончания учебы он какое-то время предавался светской жизни, а затем поступил на военную службу сначала в армию Мориса Оранского, а затем курфюрста Баварского. Именно во время службы в качестве наемника Декарт начал размышлять над проблемами, занимавшими его на протяжении всей жизни. Обострению интереса к проблемам познания способствовало и знакомство Декарта с голландцем И. Бекманом, ставшим близким другом будущего философа, в переписке с которым были впервые сформулированы многие идеи Декарта.

Почти семь лет (1619—1626) Декарт провел в скитаниях по Европе, набираясь жизненных впечатлений и размышляя над проблемами философии и математики. Обращение к математике не было случайным. Убедившись в бесполезности схоластической логики, которой его обучали в коллеже, Декарт пришел

к мысли о том, что единственный надежный путь познания — это использование строгого метода математики. Именно поэтому еще в молодости у него возникла идея создать всеобщую математику, которую он считал наукой о пространственных образах, их расположении и измерении. В математике Декарт добился больших успехов. Он решил ряд задач, касающихся алгебраических уравнений и классификации плоских кривых. Вершиной его творчества в этой области стало знаменитое сочинение «Геометрия» (1637), в котором были заложены основы аналитической геометрии. Отметим, что Декарту принадлежит и заслуга введения алгебраической символики — он предложил обозначать неизвестные буквами x , y , z , а буквенные коэффициенты — a , b , c , ..., ввел обозначения степеней и т.д.

Однако при жизни наиболее широкую известность Декарт приобрел как философ, пропагандировавший скептицизм. Он, вопреки господствовавшим в ту пору религиозным взглядам, считал человеческий разум основой познания и отводил ему главную роль в оценке результатов научных исследований. Эти взгляды Декарт развивал в сочинении «Мир», законченном в 1634 г. Оно, однако, не было издано — и неортодоксальные философские суждения, и изложение системы Коперника делали публикацию книги Декарта крайне опасной. Некоторое время ученый даже размышлял над тем, не отказаться ли ему вообще от издания каких-либо сочинений. Однако размеренная жизнь в небольших городках Голландии, вдали от суеты и жарких дискуссий, постепенно восстановила душевное равновесие Декарта, и в 1637 г. он издал сочинение «Рассуждение о методе, чтобы хорошо направлять свой разум и отыскивать истину в науках» с приложениями «Диоптрика», «Метеоры» и «Геометрия».

К этому времени у Декарта сложились основные физические воззрения. Он построил свою картину мира, основанную на предположении о том, что все пространство заполнено материей, находящейся в состоянии непрерывного движения. Все процессы в природе Декарт сводил к пространственному перемещению и рассматривал закон «сохранения движения» как один из фундаментальных законов природы. В целом материалистическая концепция Декарта была, безусловно, прогрессивной для своего времени. Он боролся за изгнание из науки всех непознаваемых сущностей, которыми ее заполняла средневековая схоластика. В то же время многие суждения Декарта, касающиеся конкретных физических явлений и закономерностей, были ошибочными. В частности, он создал фантастическую теорию тяготения, основанную на представлении о вихрях, с которой пришлось бороться теории тяготения Ньютона. Правила удара, выведенные на основе закона «сохранения движения», не соответствовали данным опыта (Декарт считал скорость сугубо положительной величиной — отсюда и происходят его ошибки). Декарт сформулировал закон преломления света, но данный им вывод этого закона, базирующийся на аналогии между движением мяча че-

рез границу раздела двух сред и распространением света, был внутренне противоречивым.

Одним из немногих правильных физических результатов, полученных Декартом, было объяснение явления радуги, привлекавшего внимание ученых-оптиков на протяжении столетий. Оно было дано в приложении «Метеоры» к сочинению «Рассуждение о методе». В исследовании радуги гармонично соединились тонкий, критический анализ явления, характерный для Декарта, экспериментальный метод, который пропагандировал ученый, и математический расчет, проведенный в обоснование качественного объяснения физического эффекта.

Уже при жизни Декарт пользовался широкой известностью и авторитетом в научных кругах. Он поддерживал контакты со многими известными учеными того времени (М. Мерсенн, П. Ферма, Б. Паскаль и др.). Знатные особы считали за честь **учиться** у него философии. В 1649 г. к нему обратилась шведская королева Кристина с просьбой переехать в Стокгольм и стать ее учителем. Декарт не смог отказать коронованной особе. Он покинул Голландию, ставшую его второй родиной, и переехал в холодную, Швецию. Этот шаг стал роковым для Декарта, не отличавшегося крепким здоровьем. Не выдержав непривычного климата и режима работы, ученый заболел и 11 февраля 1650 г. умер.

После смерти ученого влияние его идей не только не ослабло, но и получило более широкое распространение, несмотря на то, что его сочинения были включены в «Индекс запрещенных книг» католической церкви. Вера в силу человеческого разума, пропагандировавшаяся Декартом, стала одним из символов науки Нового времени.

О радуге

Радуга — столь замечательное чудо природы, и над ее причинами, до сих пор столь мало известными, во все времена столь настойчиво задумывались пытливые умы, что мне трудно найти вопрос, на котором я лучше мог бы показать, как при помощи применяемого мною метода можно прийти к знаниям, которыми не обладали те, чими сочинениями мы располагаем. Во-первых, когда я принял во внимание, что радуга может появляться не только на небе, но также и воздухе вблизи нас каждый раз, когда в нем находятся капли воды, освещенные солнцем, как это иногда можно видеть на опыте в фонтанах, мне было легко заключить, что она зависит от того, каким образом лучи света действуют на эти капли, а от них достигают нашего глаза. Зная, что эти капли шарообразны, и видя, что и при больших, и при малых каплях радуга появляется всегда одинаковым образом, я поставил себе целью создать очень большую каплю, чтобы иметь возможность лучше ее рассмотреть. Для этого я наполнил

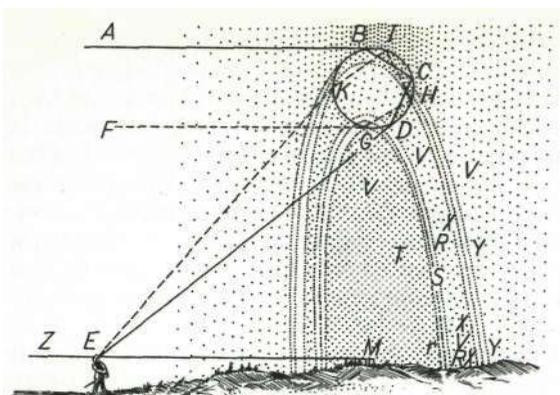


Рис. 20

водой большой стеклянный сосуд, вполне круглый и вполне прозрачный, и пришел к следующему выводу: если, например, Солнце [рис. 20] находится в части неба, обозначенной AFZ , а мой глаз — в точке E , и я помещал свой шар в BCD , его часть D казалась мне совершенно красной и значительно более яркой, чем остальное. Если я приближался к сосуду или удалялся от него и помещал его вправо или влево [от себя], или даже поворачивал вокруг своей головы, эта часть казалась все такой же красной, если только линия DE составляла угол около 42° с линией EM , соединяющей центр глаза с центром Солнца. Но если я несколько увеличивал этот угол, красный цвет исчезал, если же я его немного уменьшал, то он исчезал не так внезапно, а предварительно разделялся как бы на две менее яркие части, в которых можно было видеть желтый цвет, голубой и другие цвета. Глядя на то место шара, которое обозначено K , я заметил, что, когда угол составлял около 52° , эта часть K также представлялась красной, но менее яркой, чем D . Если я его немного увеличивал, то в ней появлялись и другие более слабые цвета; если же я его чуть-чуть уменьшал или сильно увеличивал, больше никакой окраски не появлялось. Это было для меня явным доказательством того, что если весь воздух, находящийся в M , наполнен такими шариками или, на их месте, каплями воды, то в каждой из этих капель, — для которых линии, проведенные к глазу E , составят угол около 42° с EM и которые я обозначаю R , — должна появиться точка очень яркого красного цвета. Поскольку мы обозреваем эти точки все вместе, отмечая места, где они находятся лишь углом, под которым мы их видим, они должны представиться нам в виде непрерывного круга красного цвета. Точно так же должны существовать и точки в S и T , для которых линии, проведенные из E , составляют с EM более острые углы и которые образуют круги более слабой окраски; в этом и состоит первая и главная радуга. Если угол MEX составляет 52° , то в каплях, обозначенных X , должен появиться красный круг, а в каплях, обозначенных Y , — круги более слабых цветов. Они вызывают появление второй, побочной радуги. И наконец, во всех остальных каплях, обозначенных V , не появится никаких цветов. Когда я затем рассмотрел подробнее, почему в шарике BCD часть D

представлялась красной, я нашел, что здесь дело в лучах Солнца, которые, проходя из A в B , преломлялись, входя в воду в точке B , и шли в C , откуда они отражались в D , и преломлялись вновь при выходе из воды, направляясь в E , ибо как только я помещал непрозрачное или темное тело в каком-либо участке линий AB , CD , BC или DE , этот красный цвет исчезал, а если я закрывал весь шар, кроме точек B и D , и помещал темные тела во всяких иных местах, красный цвет продолжал появляться. Затем, отыскивая причину красного цвета, возникшего в K , я нашел, что это были солнечные лучи, идущие из F в G , где они преломлялись по направлению к $Я$, а из $Я$ отражались в I , а из I вновь отражались в K и, наконец, преломлялись в точке K и направлялись в E . Таким образом, первая радуга происходит от лучей, которые достигают глаза, после двух преломлений и одного отражения, а вторая — от других лучей, которые его достигают лишь после двух преломлений и двух отражений; поэтому она не может быть такой яркой, как первая. Но оставалась еще главная трудность, а именно — выяснить, почему при наличии многих других лучей (которые после двух преломлений и одного или двух отражений могут попасть в глаз, когда шар находится в ином положении) все же лишь те лучи, о которых я говорил, дают различные цвета. (...)

...я еще не знал, почему цвета появлялись там лишь под известными углами, пока я не взял перо и не вычислил подробно хода всех лучей, которые падают на различные точки водяной капли, чтобы узнать, под какими углами они могут попасть в наш глаз после двух преломлений и одного или двух отражений. Тогда я нашел, что после одного отражения и двух преломлений оказывается гораздо больше лучей, которые могут быть видны под углом от 41 до 42° , чем таких, которые видны под каким-либо меньшим углом, и нет ни одного, который был бы виден под большим. Я нашел также, что после двух отражений и двух преломлений имеется гораздо больше лучей, падающих в глаз под углом от 51 до 52° , чем таких, которые падали бы под каким-либо большим углом, и нет совсем таких, которые падали бы под меньшим. Вследствие этого получается тень, ограничивающая по одну и по другую сторону свет, который, пройдя через бесчисленное число дождевых капель, освещенных Солнцем, попадает в глаз под углом 42° или немного менее и дает, таким образом, первую и главную радугу. Так же получается и тень, ограничивающая свет, падающий под углом 51° или немного больше и дающий внешнюю радугу. (...)

Но чтобы те, кто знает математику, могли судить, достаточно ли правильны сделанные мною вычисления для этих лучей, мне следует их здесь пояснить.

Пусть DFA [рис. 21] — капля воды, полудиаметр которой CD или AB я делю на столько равных частей, сколько я хочу вычислить лучей, чтобы на долю одних пришлось столько же света, сколько и на долю других¹. Затем я рассматриваю один из этих

Линия <i>FH</i>	Линия <i>CI</i>	Дуга <i>FG</i>	Дуга <i>FK</i>	Угол <i>ONP</i>	Угол <i>SQR</i>
8000	5984	73°44'	106°30'	40°44'	65°46'
8100	6058	71°48'	105°25'	40°58'	64°37'
8200	6133	69°50'	104°20'	41°10'	63°10'
8300	6208	67°48'	103°14'	41°20'	62°54'
8400	6283	65°44'	102°9'	41°26'	61°43'
8500	6358	63°34'	101°2'	41°30'	60°32'
8600	6432	61°22'	99°56'	41°30'	58°26'
8700	6507	59°4'	98°48'	41°28'	57°20'
8800	6582	56°42'	97°40'	41°22'	56°18'
8900	6657	54°16'	96°32'	41°12'	55°20'
9000	6732	51°41'	95°22'	40°57'	54°25'
9100	6806	49°0'	94°12'	40°36'	53°36'
9200	6881	46°8'	93°2'	40°4'	52°58'
9300	6956	43°8'	91°51'	39°26'	52°25'
9400	7031	39°54'	90°38'	38°38'	52°0'
9500	7106	36°24'	89°26'	37°32'	51°54'
9600	7180	32°30'	88°12'	36°6'	52°6'
9700	7255	28°8'	86°58'	34°12'	52°46'
9800	7330	22°57'	85°43'	31°31'	54°12'

и я вижу отсюда, что самый большой угол *ONP* может быть равен 41°30', а самый маленький *SQR* — 51°54'; прибавляя или отнимая приблизительно 17' для полудиаметра Солнца, имею 41°47' для наибольшего полудиаметра внутренней радуги и 51°37' для наименьшего полудиаметра внешней. (...)

Впрочем, мне не стоило труда узнать, почему красный цвет находится снаружи у внутренней радуги и почему он находится внутри внешней. Ибо та же причина, по которой красный цвет виден через призму *MNP* [рис. 22] в *F*, а не в *Я*, вызывает следующее: если поместить глаз на место белого полотна *FGH* и смотреть на эту призму, мы увидим красный цвет в более толстой ее части *MP*, а синий — в *N*. Это происходит потому, что окрашенный в красное луч, идущий в *F*, исходит из *C*, т. е. части Солнца, более близкой к *MP*. И по той же причине, поскольку центр водяных капель, а стало быть более толстая их часть, находится снаружи по отношению к окрашенным точкам, образующим внутреннюю радугу, то и красный цвет должен появляться в ней снаружи. Поскольку этот центр расположен внутри по отношению к точкам, образующим внешнюю радугу, то и красный цвет также должен возникать в ней внутри. <...)

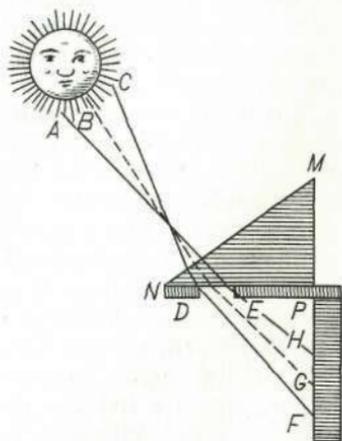


Рис. 22

Комментарий

Перевод с французского сочинения *Р. Декарта* выполнен Г. Г. Слюсаревым. *Отрывки* воспроизводятся по изданию: *Декарт Р.* Рассуждение о методе. М., 1953. Полное название на языке оригинала: Discour de la Methode, pour bien conduire sa raison et chercher la verite dans les sciences. Plus La Dioptrique. Les Mefheores et la Geometrie qui sont des essais de cette Methode.

Первое издание этого сочинения Декарта вышло в Лейдене в 1637 г.

- 1 Этот остроумный метод расчета световой энергии находит применение и в настоящее время в тех случаях, когда нельзя пользоваться аналитическим способом.

Литература

- [1] Собрание сочинений Декарта: Oeuvres de Descartes. Publ. par C. Adam, P. Tannery. T. 1 — 12, Paris, 1897—1913.
 - [2] Scott t. F. The scientific work of Rene Descartes. London, 1952
 - [3] *Sabra A. J.* Theories of light from Descartes to Newton. London, 1967, ch. 1—4.
 - [4] Матвиевская Г. П. Рене Декарт. М., 1976.
-



Э. Торричелли

1608—1647

Об атмосферном давлении

С позиций современной физики существование атмосферного давления не относится к числу фундаментальных фактов, лежащих в основе этой науки. Однако в ретроспективе открытие атмосферного давления является событием исключительной важности, знаменующим еще одно крупное поражение старой физики. Центральным действующим лицом в обосновании идеи об атмосферном давлении стал итальянский ученый Э. Торричелли.

Э ванджелиста Торричелли родился 15 октября 1608 г. в небольшом итальянском городе Фаэнца в небогатой семье. Воспитание он получил у своего дяди, бенедиктинского монаха. Во время учебы в иезуитском колледже Торричелли проявил большие математические способности и был направлен в Рим к известному математику, одному из талантливейших учеников Галилея аббату Б. Кастелли, который сделал молодого человека своим секретарем. Жизнь в Риме и общение с Кастелли и его учениками способствовали развитию таланта Торричелли. В 1641 г. он закончил свое первое научное произведение «О движении тел, опускающихся естественным путем», в котором развивались идеи Галилея. По рекомендации Кастелли Галилей пригласил Торричелли к себе для помощи в разработке неоконченных исследований. В октябре 1641 г. Торричелли переехал в Арчетри и начал работать над дополнением к «Беседам» Галилея. Однако совместная работа начинающего исследователя и маститого ученого продолжалась недолго. В январе 1642 г. Галилей умер. Торричелли, потрясенный случившимся, хотел покинуть Флоренцию, но Великий Герцог предложил ему занять пост, ранее принадлежавший Галилею, — пост «философа и первого математика Его Высочества». Торричелли принял это предложение и остался во Флоренции, где работал до своей безвременной кончины (25 октября 1647 г.). Флорентийский период оказался наиболее плодотворным в жизни ученого.

Труды Торричелли, оставшиеся по большей части неопубликованными до его смерти, касаются различных разделов матема-

тики, физики и метеорологии. В книге «Opera geometrica», получившей европейскую известность, Торричелли развил методы, предложенные другим учеником Кастелли — Б. Кавальери. В механике он впервые высказал идею о движении тел по касательной, сформулировал «принцип Торричелли», согласно которому движение системы, предоставленной самой себе, возможно лишь при понижении положения центра тяжести, рассмотрел «параболу безопасности» (границу области, недоступной для тела, брошенного под углом к горизонту с заданной скоростью) и т. д. В гидродинамику вошла «формула Торричелли» для скорости истечения жидкости из сосуда. Торричелли является одним из создателей жидкостного термометра. В оптике он достиг исключительного мастерства в изготовлении линз. Наконец, с именем Торричелли связана первая правильная в общих чертах теория образования ветров как следствия циркуляции атмосферных масс.

Соединяя в себе талант первоклассного математика и способности блестящего экспериментатора, Торричелли всей своей научной деятельностью продолжал дело Галилея по разработке основ нового естествознания, опирающегося, с одной стороны, на математику, а с другой — на эксперимент.

Наиболее известным экспериментальным исследованием Торричелли являются его опыты со ртутью, доказавшие существование атмосферного давления. По меткому замечанию В. П. Зубова, «опыты Торричелли являются, пожалуй, одним из очень ярких примеров, позволяющих показать коллективный и кумулятивный характер научных исследований: наука создается в результате совместных усилий многих людей и постепенно накапливает положительные результаты своих достижений». У этих экспериментов имеется большая предыстория. В ней можно выделить два основных направления. Первое — теоретическое — берет свое начало от Аристотеля, который утверждал, что существование пустого пространства (вакуума) невозможно вследствие присущей Природе «боязни пустоты» (*horror vacui*). Второе направление — практическое — было связано с известным мастерам-водопроводчикам фактом: вода с помощью обычного насоса не может быть поднята на высоту, большую 18 флорентийских локтей («10,5 м»). Этот факт отмечал в своих «Беседах» Галилей, который отказался от представлений перипатетиков о *horror vacui*, но приписал пустоте некую способность к сопротивлению. Отметим, что ограниченность эффективности насосов отмечалась рядом авторов (голландцем Бекманом, итальянцем Балиани) еще до публикации «Бесед» (1638). Более того, тот же Балиани в письме к Галилею в 1630 г. высказал гипотезу о существовании атмосферного давления. По некоторым причинам Галилей не принял идею Балиани (это несколько странно, поскольку Галилей первым определил вес воздуха). Неясно, до какой степени Торричелли был в курсе обсуждения вопроса о пустоте между Галилеем и Балиани, но, во всяком случае, он наверняка был

хорошо осведомлен о позиции Галилея. Поэтому нет ничего удивительного, что в 1644 г. он вместе с другим учеником Галилея В. Вивиани занялся исследованием вопроса, над которым размышлял учитель. Заслугой Торричелли является то, что он решил перейти к жидкости, обладающей большей плотностью, чем вода, — к ртути. Это позволило сделать эксперименты относительно легко воспроизводимыми. Однако не следует думать, что в середине XVII в. постановка и воспроизведение опытов Торричелли были простым делом. В те времена было довольно трудно изготовить необходимые стеклянные трубки, о чем свидетельствуют неудачи некоторых ученых в постановке аналогичных опытов независимо от Торричелли и задержка их повторения в других странах после того, как стало известно о его успехе.

О результатах своих опытов ученый сообщил в письме к своему другу Микельанджело Риччи, жившему в Риме. Хотя это письмо не было опубликовано, оно разошлось в списках по всей Европе и стимулировало появление работ других авторов (в том числе Б.Паскаля, О. Герике, Р. Бойля). Эти опыты послужили катализатором исследований, которые вышли далеко за пределы той проблемы, решению которой они были посвящены.

Торричелли — Микельанджело Риччи

Преславный синьор и ученейший мой покровитель!

(...) Я уже упоминал раньше¹, что занимался производством некоего философского эксперимента, касающегося пустоты, не для того, чтобы просто произвести пустоту, но для того, чтобы сделать прибор, который показывал бы перемены воздуха, то более тяжелого и густого, то более легкого и тонкого. Многие говорили, что пустоты не существует, другие — что она существует, но Природа испытывает к ней отвращение, и что создание такой пустоты требует усилий. Уже не помню, кто-то говорил, что она существует, не требуя усилий и без того, чтобы Природа ее образованию противилась. Я рассуждал так: если бы можно было найти совершенно явную причину, от которой проистекало бы такое сопротивление, ощущаемое нами, когда хотя бы произвести пустоту, то, как мне кажется, тщетна была бы попытка приписать именно пустоте подобное действие, которое явно проистекает от другой причины. Однако, производя некоторые весьма простые расчеты, я нашел, что причина, мною предложенная (т. е. тяжесть воздуха), сама по себе взятая, должна была бы оказывать большее противодействие, чем это имеет место тогда, когда пытаются образовать пустоту². Говорю это для того, чтобы какой-нибудь философ, видя, что нельзя избежать признания тяжести воздуха за причину противодействия, ощущаемого нами при образовании пустоты, не сказал бы, что

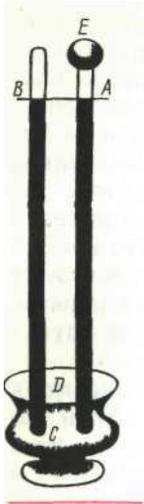


Рис. 23

хотя он готов допустить действие тяжести воздуха, но продолжает настаивать, что и Природа содействует в этом случае своим отвращением к пустоте.

Мы живем погруженные на дно океана воздушной стихии, о которой посредством неоспоримых опытов известно, что она имеет тяжесть, и притом такую, что наиболее густой воздух, по соседству с земной поверхностью, имеет вес, составляющий примерно $1/400$ веса воды. Авторы сочинений о «вечерних зорях» заметили³, что видимый воздух, наполненный парами, достигает высоты над нами примерно 50 или 54 миль. Тем не менее я не думаю, чтобы высота была столь большой, ибо я показал, что в таком случае пустота должна была бы оказывать гораздо большее противодействие, чем она это делает. Правда, остается выход: утверждать, что под весом, который указан Галилеем, следует понимать вес самого нижнего воздуха, в котором живут люди и животные, но что над вершинами высоких гор воздух начи-

нает становиться совершенно чистым и имеющим гораздо меньший вес, чем $1/400$ веса воды.

Мы сделали много стеклянных сосудов, подобных тем, которые изображены здесь [рис. 23] и обозначены буквами *A* и *B*, — широкие, с шейкой длиной в два локтя. Когда они были наполнены ртутью, а затем отверстие закрыто пальцем и сосуды эти были погружены в чашку *C*, где находилась ртуть, можно было видеть, что они становились пустыми и ничего не поступало в опустошающийся сосуд. Однако шейка *AD* оставалась всегда наполненной до высоты $1\frac{1}{4}$ локтя и еще одного пальца. Дабы показать, что сосуд был совершенно пустым, нижняя чашка наполнялась водой до *D*, и если сосуд постепенно поднимали, можно было видеть, что, когда отверстие сосуда достигало воды, ртуть опускалась из шейки, а вода целиком наполняла сосуд со страшным напором (*con impeto horribile*) вплоть до знака *E*. Пока сосуд *AE* был пустым и ртуть, хотя и обладающая большой тяжестью, продолжала держаться в шейке *AC*, мы рассуждали так: до сих пор существовало мнение, будто сила, не позволяющая ртути, вопреки ее природному свойству, падать вниз, находится внутри сосуда *AE*, т. е. заключается либо в пустоте, либо в веществе предельно разреженном. Однако я утверждаю, что эта сила — внешняя — и что сила берется извне. На поверхность жидкости, находящейся в чашке, действуют своей тяжестью 50 миль воздуха. Что же удивительного, если ртуть, не имея ни стремления, ни отвращения находиться в стеклянном сосуде *CE*, проникает туда и поднимается настолько, чтобы уравновесить тяжесть наружного воздуха, который ее гонит.

Далее, вода в аналогичном, но гораздо более длинном сосуде будет подниматься почти до 18 локтей (т. е. до высоты, во столько раз большей, во сколько раз ртуть тяжелее воды).

Я подтвердил приведенное рассуждение, произведя одновременно эксперимент с сосудом *A* и трубкой *B*. Ртуть останавливалась в них на том же уровне *AB* — почти верный знак того, что сила не находилась внутри. Ведь сосуд *AE* обладал бы большей силой и разреженное и притягивающее вещество, в нем находящееся, должно было бы быть благодаря большему объему более действенным, нежели вещество в совсем маленьком пространстве *B*. (...)

Должен сказать еще, что главное мое намерение не могло осуществиться, а именно определить при помощи прибора *EC*, когда воздух бывает более густым и тяжелым и когда он более тонкий и легкий, ибо уровень *AB* меняется еще и от другой причины (чего я никак не думал), а именно — от теплоты и холода, и притом весьма ощутимо, совершенно так, как если бы сосуд *AE* был полон воздуха.

*Вашей преславной милости преданнейший
и премного обязанный слуга Э. Торричелли
Флоренция, 11 июня 1644 г.*

Комментарий

Перевод письма Э. Торричелли с итальянского выполнен В. П. Зубовым. Приводится только та его часть, в которой речь идет о барометрических опытах. Перевод печатается по публикации: Зубов В. П. Из переписки между Эванджелиста Торричелли с Микельанджело Риччи. Вопросы истории естествознания и техники. М., 1959. Вып. 8, С. 95—101.

¹ Письмо, на которое ссылается Торричелли, не сохранилось.

² Оценки Торричелли и других ученых основывались на данных о высоте атмосферы $H = 50$ миль (73 600 м) и измерениях Галилея, касающихся веса воздуха (1/400 веса воды). При оценках полагалось, что, говоря современным языком, плотность воздуха не меняется с высотой. Нетрудно показать, что рассчитываемое на основе этих предположений атмосферное давление должно составить 20 атм. О предложениях Торричелли относительно причин расхождения расчета и данных опыта см. ниже текст письма.

Здесь речь идет о ряде трактатов, в которых рассматривалось явление атмосферной рефракции.

Литература

- [1] Собрание сочинений Э. Торричелли: Torricelli E. Opera. Faenza. Vols. 1—3, 1919; vol. 4, 1944.
- [2] Кудрявцев П. С. Эванджелиста Торричелли. М., 1958.
- [3] Зубов В. П. Флорентийские опыты Торричелли — Вивани//Вестник истории мировой культуры, 1958, № 5, с. 54—66.



О. Герике

1602—1686

Опыты с пустотой

Дискуссия относительно существования пустого пространства, развернувшаяся в середине XVII в., имела своим следствием не только опровержение представлений перипатетиков о «боязни пустоты», присущей природе, но также и изобретение ряда физических приборов, ставших впоследствии важнейшими инструментами физиков-экспериментаторов. Среди этих приборов особое место занимает воздушный насос, в усовершенствованном виде широко используемый и в наши дни. Изобретателем первого насоса является немецкий естествоиспытатель О. Герике.

ОТТО Герике родился 20 ноября 1602 г. в Магдебурге в обеспеченной семье. Он получил хорошее образование: с 1617 по 1626 г. Герике учился праву в университетах Лейпцига, Гельмшtedта и Йены, а затем слушал лекции по математике и инженерному делу в Лейпциге, после чего совершил длительное путешествие по Франции и Англии. По возвращении на родину он был избран членом городского совета и много сил отдавал строительству и укреплению Магдебурга. В 1631 г. в ходе Тридцатилетней войны (1618—1648) Магдебург был разрушен, и Герике пришлось покинуть город. В течение десяти лет он выполнял обязанности инженера сначала в Эрфурте, находясь на службе у шведского короля, а затем в Саксонии. В эти же годы он занимался дипломатической деятельностью, которая во многом способствовала возрождению Магдебурга и заключению выгодного для города соглашения о его послевоенном статусе. За заслуги перед Магдебургом в 1646 г. Герике был избран его бургомистром. Он занимал этот пост в течение 30 лет. В 1666 г. Герике был возведен в дворянское достоинство. В 1681 г. он переехал из Магдебурга в Гамбург, где и провел последние годы жизни. Умер Герике 11 мая 1686 г.

Несмотря на большую занятость государственными и дипломатическими обязанностями, Герике на протяжении всей жизни интересовался вопросами естествознания. Его частые поездки по делам службы способствовали получению информации о работах

других ученых и распространению сведений о его собственных опытах.

Особенно остро со студенческих времен Герике волновала проблема пространства. Одним из аспектов этой проблемы был вопрос о существовании пустого пространства. Размышляя над ним, Герике решил проверить на опыте теорию Декарта, согласно которой все пространство заполнено материей. Так возникла идея его первых экспериментов по получению «пустоты», которые в конечном счете привели к созданию насоса. Используя насос, он поставил множество оригинальных опытов, доказав, в частности, что птицы и животные в безвоздушном пространстве гибнут, что колокольчик, помещенный в откачанный сосуд, перестает звенеть, что воздух занимает весь предоставленный ему объем, и т. д. Особенностью экспериментов Герике была их наглядность и убедительность, что с особой силой проявилось в истории с «магдебургскими полушариями».

Опыты Герике были многочисленны и разнообразны. Он, например, сконструировал и построил водяной барометр, с помощью которого с 1660 г. вел метеорологические наблюдения. Герике был создателем первой электростатической машины. Она представляла собой шар из серы, насаженный на горизонтальную ось, при касании которой рукой во время его вращения можно было добиться гораздо большей электризации, чем традиционным методом натирания кусочка янтаря.

Следует отметить, что Герике рассматривал свои пневматические и электрические опыты не как отдельные любопытные наблюдения, а в рамках общих представлений о системе мира. Эти представления были для XVII в. весьма смелыми. Будучи убежденным сторонником учения Коперника, Герике стремился обосновать гипотезу о множественности обитаемых миров и считал, что свойства пустого пространства независимы от божественного промысла.

Из-за большой занятости Герике не смог сам описать свои опыты. Это сделал (с его согласия) профессор математики Вюрцбургской академии иезуит К. Шотт в нескольких книгах, опубликованных в 1657—1664 гг. Именно в описании, Шотта опыты Герике стали известны другим ученым и, в частности, побудили Бойля поставить опыты по исследованию свойств газов. В 1663 г. Герике подготовил свое описание экспериментов, как уже известных по книгам Шотта, так и новых. Однако его книга «Новые, так называемые магдебургские, опыты о пустом пространстве» увидела свет лишь в 1672 г. Этот труд стал одним из символов экспериментальной науки Нового времени.

Когда я размышлял о беспредельности пространства и о том, что оно должно быть всюду, я придумал следующий опыт.

Винная или пивная бочка наполнена водой и со всех сторон прочно закупорена, так чтобы в нее не мог проникнуть наружный воздух. К нижней части бочки прикреплена металлическая трубка, с помощью которой можно извлекать воду. Тогда вода вследствие собственной тяжести должна опускаться и оставлять над собой в бочке пространство, свободное от воздуха и вследствие этого от всякого другого вещества.

Чтобы продемонстрировать справедливость этих соображений, я приготовил латунную трубу abc [рис. 25], которая используется при пожарах, со штоком c или f , тщательно обработанным поршнем g [так чтобы воздух не находил места по бокам для выхода или входа]. К трубе были прикреплены два кожаных клапана, из которых внутренний a или d на крышке трубы должен был способствовать поступлению воды, а внешний b — ее стоку. После установки трубы [посредством железных колец, снабженных четырьмя ушками e] в нижней части бочки я попытался извлечь из нее воду. Однако прежде чем вода последовала за поршнем, лопнули железные обручи и болты, с помощью которых труба была прикреплена к бочке.

Тем не менее усилия вовсе не были безнадежными. После того как недостатки установки были устранены посредством использования более прочных болтов, трое сильных мужчин, тянувших за шток, смогли наконец извлечь через верхний клапан следующую за поршнем воду.

Воздух проникает через дерево.

При этом, однако, во всех частях бочки слышался шум, как будто вода сильно кипела, и это продолжалось до тех пор, пока бочка вместо извлеченной воды не заполнилась воздухом.

Этот недостаток нужно было как-то исправить. Для этого была приобретена меньшая бочка, которую поместили внутри большей. Теперь, после того как трубка с более длинным заостренным концом была пропущена через стенки обеих бочек, я смог наполнить эту меньшую бочку водой, уплотнить отверстие, затем наполнить водой и большую бочку и начать работу заново. На этот раз уже удалось извлечь воду из меньшей бочки, и на месте воды, без сомнения, осталось пустое пространство.

Вода проникает через дерево.

Однако после того как через несколько дней работа была прекращена и все вокруг было спокойно, из бочки стал слышаться меняющийся время от времени звук, похожий на тихое ше-



Рис. 25

бетание певчих птиц. Это продолжалось почти три полных дня.

Когда же после этого открыли отверстие меньшей бочки, то оказалось, что ее большая часть заполнена воздухом и водой. Тем не менее часть ее все же была пустой, поскольку немного воздуха проникло в бочку во время ее вскрытия.

Вследствие трения воды возникает немного воздуха.

Все были удивлены тем, как вода попала в бочку, которая была со всех сторон так тщательно зашпаклевана и закупорена. Наконец, на основе многократно повторенных опытов я сделал вывод, что вода, находящаяся под большим давлением, просачивается через дерево и что из-за сжатия и возникающего при просачивании через дерево трения из воды в бочке всегда одновременно выходит немного воздуха [что впоследствии, вероятно, также следует учитывать]. Бочка, однако, не может быть полностью заполнена воздухом вследствие сопротивления, которое дерево оказывает [его] прохождению. При снятии давления прекращается также и просачивание воздуха и воды. Следовательно, в опыте была получена как бы наполовину откачанная бочка. (...)

Глава IV

Устройство специальной машины, предназначенной
для создания пустоты

Поскольку воздух исключительно тонкое тело, он невероятно быстро проходит через все отверстия и заполняет промежутки, какими бы малыми они ни были, и всегда некоторое количество воздуха незаметно проходит как мимо краев поршней, так и че-

рез клапаны. Поскольку невозможно установить поршень или вентиль настолько тщательно, чтобы они препятствовали любому проникновению воздуха, я построил несколько машин [так, я изготовил приспособление, с помощью которого можно было окружить воздушный насос как сверху, так и снизу водой], впервые описанных преподобным патером Каспаром Шоттом в его книге «Гидравлико-пневматическое искусство», а затем в первой книге его «Удивительной техники» и названных «магдебургскими диковинами».

Поскольку эти машины было сложно перевозить, а мой всемилостивый и могущественный господин, курфюрст Бранденбургский, мой благосклонный повелитель, пожелал увидеть эти эксперименты [которые вышеупомянутый патер Шотт назвал магдебургскими], я изготовил описываемое ниже устройство.

1. Была выкована железная тренога *abcdf* [рис. 26, *a*], высотой примерно в 2 локтя, опоры которой наверху прикрепляются к железному кольцу *be* [рис. 26, *a*, *б*], *a* внизу с помощью железных болтов *afd* [рис. 26, *a*] — к полу.

2. В качестве воздушного насоса *gh* [рис. 26, *a*, *в*] следует взять латунную пожарную трубу так, как мы это описали в гл. И, а именно со свинцовым кольцом *y* наверху.

3. На этой верхней части *y* следует расположить латунную крышку *mn* [рис. 26, *a*], снабженную трубкой *n* [в которую с помощью кранов могут быть вставлены подлежащие полной откачке сосуды], укрепленную тремя болтами. Предварительно между ними следует поместить кожаное кольцо.

4. В середине с внутренней или внешней стороны эту крышку необходимо снабдить кожаным клапаном, так что поршень *h* со штоком *f* при опускании может вытягивать воздух или воду из откачиваемого сосуда в насос *gh*, а при подъеме — выводить их наружу через клапан *z* [рис. 26, *з*].

5. К изготовленному из свинца ранту воздушного насоса следует прикрепить медный сосуд *xx* [рис. 26, *a*], предназначенный для наполнения водой.

6. Насос *ugh* [рис. 26, *б*] вместе с прикрепленным к нему сосудом ставится на треногу, причем продевается через отверстие *e* кольца *bc* [рис. 26, *б*], и затем прикрепляется к ее свинцовому ранту тремя железными болтами.

7. Чтобы нижний конец насоса не двигался, там устанавливается железное кольцо *kk* [рис. 26, *a*], которое с помощью таких же болтов крепится к трем лапкам *ooo*, стягивающим треногу.

8. К одной из ног треноги в точке *w* приделан железный рычаг *awi* [рис. 26, *a*], который можно поднимать и опускать вокруг штифта *w*.

9. С рычагом соединяется железный стержень *wt*, который, в свою очередь, в точке *t* связан с деревянным штоком *fn* [рис. 26, *д*]. Шток снабжен массивным поршнем *h* так, что с помощью этих деталей может быть приведен в действие.

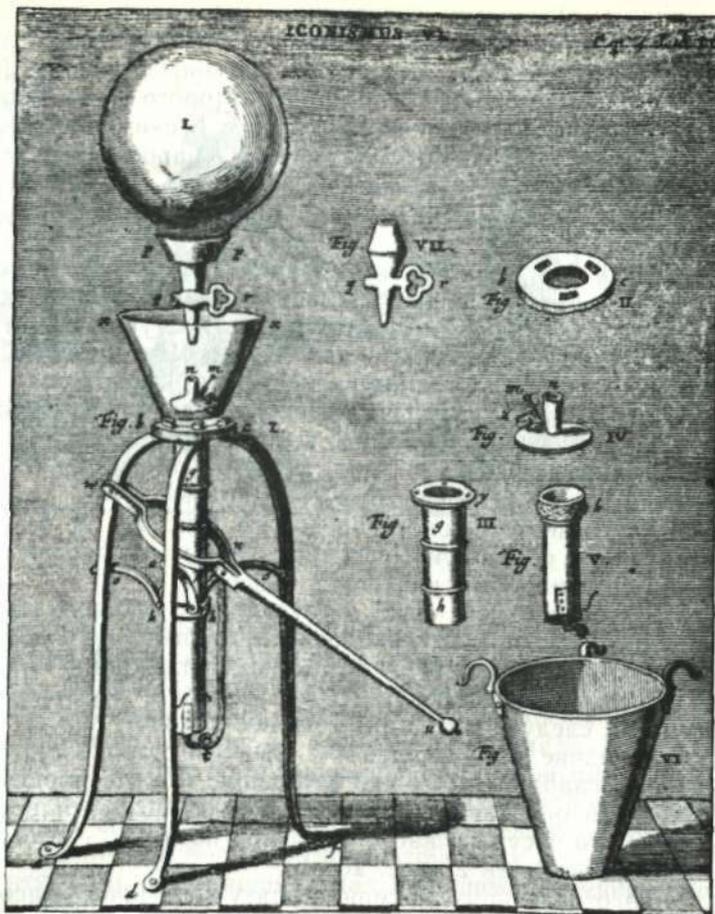


Рис. 26

10. Чтобы при этом снизу и сбоку от поршня в насос не проникал воздух, следует изготовить продолговатый медный сосуд, похожий на котелок [рис. 26, e], который тремя крючками вешается на лапки *ooo* и заполняется водой. Таким образом, нижнее отверстие воздушного насоса внутри *kk*, как и плунжер, и все другие детали с помощью воды могут быть постоянно уплотнены, так что ни сверху, ни снизу не может проходить воздух.

11. Каждое извлечение воздуха, однако, происходит, как правило, вследствие силы его упругости или расширения, так что при движении поршня воздух всегда выходит из откачиваемого сосуда в пустой насос, из которого он постепенно выталкивается. То незначительное количество воздуха, которое остается в откачиваемом сосуде, уже не обладает упругостью, достаточной для того, чтобы открыть кожаный клапан [который в большинстве

случаев снабжен металлической пружиной, чтобы клапан всегда был хорошо закрыт].

Как с помощью специальной трубки могут быть окончательно удалены остатки воздуха.

На крышке zmn насоса между клапаном z и трубкой h можно прикреплять трубочку, снабженную поршнем и штоком с выступом, и с ее помощью открывать и закрывать внутренний клапан. Вследствие этого удастся извлекать оставшиеся в сосуде следы воздуха и в конце концов без труда можно достичь веса, свойственного им в насосе. Это устройство, однако, является избыточным, и здесь о нем достаточно лишь упомянуть для любознательных.

Если поршень поднят, то внутри насоса создается пустота.

Из описания этой машины отчетливо следует, что с ее помощью создается пустота, и те трудности, которые обычно считались непреодолимыми, могут быть разрешены. А именно, если рычаг wau поднят, то поршень fn касается крышки ngn и насос освобожден от поршня: если поршень опустить, то внутри насоса возникает пустота. В него проникает воздух из сосуда, вследствие чего сосуд становится в конце концов пустым. (...)

Глава XXIII

Опыт, посредством которого показывается, что вследствие давления воздуха два полушария могут быть так прочно соединены, что их не могут оторвать друг от друга шестнадцать лошадей

Я велел изготовить два полушария, или чаши, из меди диаметром около $3/4$ или точно $67/100$ магдебургского локтя [поскольку обычно изготавливаемые вручную сосуды делаются не столь точно, как желательное]. Они хорошо подходят друг к другу и при том одно было снабжено краном, или, скорее, клапаном H , с помощью которого извлекается находящийся внутри воздух, а доступ воздуха снаружи может быть предотвращен. (...) Кроме того, чаши следует снабдить железными кольцами $NNNN$, чтобы цеплять к ним лошадей, что видно из рисунка. Далее, я велел сшить кольцо D из кожи, пропитанной воском [смешанным со скипидаром], так чтобы оно совершенно не пропускало воздух.

После того как это кольцо было проложено между чашами, я прижал их друг к другу и быстро выкачал из них воздух. (...) Я убедился, с какой силой были соединены чаши, между которыми находилось такое кольцо. Сжатые давлением окружающего воздуха, они соединялись так прочно, что шестнадцать лошадей либо совсем не могли их разорвать, либо могли это сделать с большим усилием. Когда же, наконец, благодаря напряжению всех сил чаши удалось разъединить, то возник шум, похожий на звук ружейного выстрела.



Рис. 27

После пропускания воздуха чаши могут быть легко разделены.

Однако как только мы, открывая кран Я, предоставим доступ воздуху, чаши могут быть разделены или оторваны друг от друга вручную. Чтобы знать точно, насколько велик вес, столь сильно сдавливающий полушария, необходимо определить вес воздушных цилиндров, диаметр которых составляет $67/100$ магдебургского локтя. Мы выбрали здесь именно этот пример с той целью, чтобы по возможности облегчить понимание опыта.

Давление, которое соединяет чаши.

Вес этих цилиндров оказывается равным 2686 или 2687 фунтам, откуда следует, что давление воздуха прижимает одну из чаш к другой с силой 2686 фунтов. Другая оказывает равное противодействие. Поэтому восемь лошадей с одной стороны должны создать силу тяги 2686 фунтов для отрыва чаши, точно так же как восемь лошадей с другой стороны с той же силой тяги 2686 фунтов должны удалить вторую чашу.

Хотя восемь лошадей и могут без особого труда сдвинуть с места телегу, нагруженную 2686 фунтами, все-таки в данном случае использование тяги затруднено, поскольку сила лошадей направлена против всего столба воздуха и, так сказать, в большей степени против природы, чем при перемещении груза с помощью телеги.

Как они могут быть оторваны друг от друга с помощью груза.

Отсюда следует, что когда чаши подвешены и на нижнем конце закреплен груз 2686 фунтов, то нижняя чаша может быть оттянута и оторвана от верхней посредством этого веса [рис. 28]. Следует лишь отметить [так как давление воздуха становится то больше, то меньше], что этот вес также изменяется в соответствии с состоянием воздуха. Следовательно, этот вес

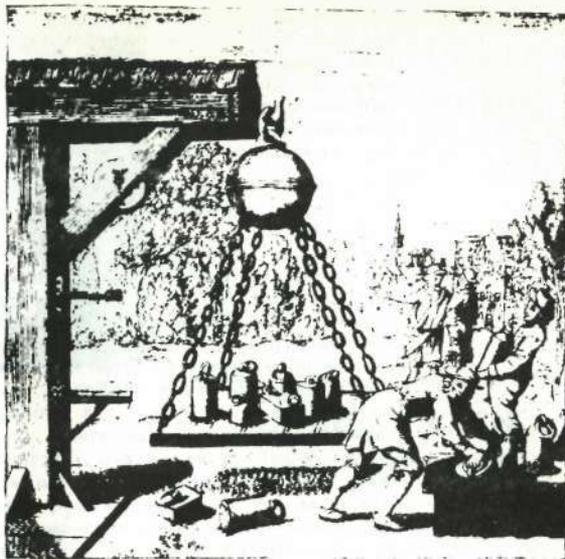


Рис. 28

представляет [конечно, сообразно размерам или, вернее сказать, основанию соответствующих цилиндров] полную массу небес.

Что следует понимать под массой небес?

Когда кто-либо пожелает узнать последнее, т. е. вес общей массы воздуха вокруг Земли, то он должен искать его, сначала вычисляя площадь Земли в квадратных милях, затем перевести ее в квадратные локти и далее действовать в соответствии с золотым правилом, как это было разъяснено в предыдущей главе. Так определяется искомый вес.

Земля вместе с воздухом образует особое космическое тело.

В результате следует вывод, что Земля [поскольку окружающий воздух обладает своим собственным весом] есть особенное и само по себе существующее мировое тело, которое сохраняется свободным и не погружено в некую небесную материю или окружено ею.

Комментарий

Перевод с немецкого отрывков из книги О. Герике выполнен Б. В. Булюбашем и С. Р. Филоновичем по изданию: Otto von Guericke's Neue «Magdeburgische» Versuche iiber den leeren Raum. Leipzig, 1894. Полное название книги Герике впервые изданной в 1672 г. на латинском языке в Амстердаме таково: «Новые, так называемые магдебургские, опыты о пустом пространстве, впервые изданные преосвященным отцом Каспаром Шоттом, членом Общества Иисуса и профессором математики Вюрцбургской Академии; теперь же самим авто-

ром более совершенно изданные и увеличенные другими различными экспериментами, с добавлением надежных сведений о весе воздуха, окружающего Землю; о мировых силах и системе планетного мира, а также о неподвижных звездах и том неизмеримом пространстве, которое как внутри, так и вовне их находится».

¹ Об этом идет речь в гл. I книги.

Об упругости воздуха Герике подробно говорит в гл. XXXIII.

² Вот как описывает сам Герике события, связанные с этим знаменитым опытом, в предисловии к книге: «Потом, когда я был послан по государственным делам на Имперский сейм, проведенный в 1654 г. в Регенсбурге, некоторые любители этих вопросов узнали об упомянутых опытах с пустотой и стали настоятельно от меня требовать, чтобы я показал им некоторые из них, что я и попытался, в меру своих возможностей, сделать.

К концу сейма, когда его участники уже начали разъезжаться, случилось так, что мои опыты стали известны Его Императорскому Величеству, курфюрстам и некоторым князьям, которые пожелали посмотреть их до отъезда; отказать этому желанию я не мог, да и не считал должным.

Больше всего они понравились Высочайшему Курфюрсту Иоганну-Филиппу, архиепископу Майнцскому и епископу Вюрцбургскому, и он настоятельно просил меня сделать подобные инструменты. Но так как трудности того времени не позволили мастерам сделать такие же инструменты, он просил меня уступить ему привезенные мною в Регенсбург машины после уплаты их стоимости и даже позаботился, чтобы они были перевезены в Вюрцбургский замок». Отметим, что «машины» Герике сохранились до наших дней.

Литература

- [1] Современное издание сочинения Герике на немецком языке с добавлением его переписки: Otto von Guericke's Neue (sogenannte) Magdeburger Versuche über den leeren Raum, nebst Briefen, Urkunden und anderen Zeugnissen seiner Lebens — und Schaffensgeschichte. Hrsg. von H. Schimank. Dusseldorf, 1968.
- [2] Kaufeld A. Otto von Guericke. Leipzig, 1980.
- [3] Капица С. П. Отто фон Герике — выдающийся физик XVII в. // Природа. 1973. № 3. С. 80—85.
- [4] Овчинников Н. Ф. О натурфилософском и опытным знаниям. По поводу магдебургских опытов О. Герике // Природа. 1973. № 3. С. 85—87.



О. Ремер

1644—1710

О скорости света

Вопрос о том, конечна или бесконечно велика скорость света, начал широко обсуждаться уже в первой половине XVII в. С одной стороны, это было связано с развитием оптики и попытками выяснить природу света, а с другой — со стремлением к решению физических проблем путем постановки количественных экспериментов. В 1638 г. Г. Галилей в книге «Беседы и математические доказательства ...» устами своих героев обсудил этот вопрос и предложил схему эксперимента для определения скорости света. На практике опыт, проведенный по схеме Галилея, не дал определенных результатов, однако Галилей, будучи сторонником представлений о конечности скорости света, справедливо указал, что при усовершенствовании методики проведения опыта его итог может оказаться другим. Значительным событием в истории физики стала теоретическая дискуссия между П. Ферма и Р. Декартом (а также его последователями) о скорости света, приведшая Ферма к выдвиганию «принципа наименьшего времени» для описания распространения света. В наши дни ясно, что с помощью экспериментальной техники XVII в. измерение скорости света в земных условиях было невозможно. Поэтому совершенно естественно, что доказательство конечности скорости света и первая оценка ее величины были получены в астрономии. Автором этого доказательства был датский ученый О. Ремер.

Олаф (Оле) Ремер родился в Ааргузе в Ютландии 25 сентября 1644 г. в семье купца. Образование он получил в Копенгагенском университете, где сначала изучал медицину, а затем занялся физикой и астрономией под руководством Э. Бартолина. В 1671 г. французский астроном Ж. Пикар, приехавший в Данию для определения географических координат знаменитой обсерватории Т. Браге, пригласил Ремера для работы в Парижской обсерватории. Ремер принял приглашение.

В Париже Ремер не только проводил разнообразные астрономические наблюдения, но и участвовал в решении ряда технических проблем, а также обучал математике наследника французского престола. Работая в Обсерватории, в 1676 г. он сделал открытие первостепенной важности — доказал конечность скорости света.

После возвращения на родину Ремер занял кафедру математики столичного университета и продолжил астрономические

исследования. Он создал первоклассную обсерваторию, где провел наблюдения, позволившие определить положение свыше 1000 звезд, которые были впоследствии использованы для установления собственных движений ряда звезд. Ремер уделял много внимания созданию новых астрономических приборов. Он изобрел и изготовил пассажный инструмент, имевший точно разделенный круг, создал меридианный круг, усовершенствовал микрометр, построил ряд других инструментов. Авторитет Ремера в точном приборостроении был очень высок. Сам Лейбниц советовался с ним относительно оборудования обсерватории. К сожалению, инструменты Ремера погибли во время пожара.

Несмотря на увлечение научными исследованиями, Ремер принимал активное участие в общественной и политической жизни Дании. По поручению короля он выполнял множество поручений инженерного характера (был смотрителем дорог королевства, занимался вопросами строительства портов и т. д.). Кроме того, он разработал новую систему налогообложения, исполнял обязанности сенатора, а в конце жизни стал даже главой государственного Совета. Умер ученый 19 сентября 1710 г.

Установление Ремером конечности скорости света явилось «побочным продуктом» его наблюдений одного из спутников Юпитера. Эти наблюдения велись в надежде составить таблицу затмений спутника, которую можно было бы использовать для определения географической долготы точек земной поверхности на море. Сравнение местного времени начала или конца затемнения с табличным значением (определенным для фиксированной точки) позволило бы найти долготу места наблюдения. Во время наблюдений было обнаружено, что в затмениях первого спутника Юпитера наблюдаются отклонения от периодичности, которые Ремер объяснил конечностью скорости распространения света. В сентябре 1676 г. на заседании Парижской Академии наук он, руководствуясь этой идеей, предсказал, что затмение, которое должно было наблюдаться 9 ноября того же года, произойдет на 10 минут позже, чем следует из расчетов, не учитывающих время распространения света от Юпитера до Земли. Хотя предсказание Ремера блестяще подтвердилось, его вывод подвергся резкой критике со стороны директора Обсерватории Дж. Д. Кассини. Молодому ученому пришлось отстаивать свою точку зрения. Следует, однако, отметить, что большинство крупнейших ученых того времени, таких, как Х. Гюйгенс, Г. В. Лейбниц, И. Ньютон, разделяли взгляды Ремера и ссылались на его открытие. Отметим, что скорость света была первой фундаментальной постоянной, вошедшей в арсенал физических констант.

Доказательство, касающееся движения света

В течение долгого времени философы затруднялись решить с помощью какого-либо опыта, переносится ли действие света мгновенно на любое расстояние или это требует времени. Месье Ремер из Королевской Академии наук обнаружил способ, почерпнутый из наблюдений первого спутника Юпитера¹, с помощью которого он показал, что для [прохождения] расстояния примерно 3000 лье, т. е. приблизительно равного диаметру Земли, свету не требуется и одной секунды.

Пусть A [рис. 35] — Солнце, B — Юпитер, C — первый спутник Юпитера, который входит в тень паленты, чтобы выйти из нее в [точке] D , и пусть E, F, G, H, L, K — положения Земли на различных расстояниях.

Предположим, что с Земли, находящейся в L , вблизи второй квадратуры² Юпитера, виден его первый спутник во время выступления из тени в [точке] D , и затем спустя примерно 42—ч, т. е. после одного оборота этого спутника, когда Земля находится в точке K , он виден вновь возвращающимся в точку D . Ясно, что если свету требуется время, чтобы пройти расстояние LK , то спутник будет виден возвратившимся в точку D позже, чем если бы Земля оставалась в точке L . Таким образом, обращения этого спутника, наблюдаемые так по выступлениям из тени, будут запаздывать на такое время, которое требуется свету, чтобы пройти от L до K и наоборот, в другой квадратуре FG , где Земля приближается, идя навстречу свету, обращения [наблюдаемые] по вступлению в тень будут казаться настолько же укороченными, насколько обращения [наблюдавшиеся] по выступлению из тени казались удлиненными. И поскольку за $42\frac{1}{2}$ ч, которые этот спутник тратит, чтобы совершить приближенно одно обращение, расстояние между Землей и Юпитером в той или иной квадратуре изменится по меньшей мере на 210 диаметров Земли, то отсюда следует, что если бы для [прохождения] каждого диаметра Земли требовалась 1 с, то свету потребовалось бы $3\frac{1}{2}$ мин для прохождения каждого интервала FG , KL , что приведет к разнице примерно в половину четверти часа между двумя обращениями первого спутника, из которых одно наблюдается в FG , а другое — в AH , в то время как никакой ошутимой разницы не отмечается.

Однако из этого не вытекает, что свету совсем не требуется времени: ибо после более тщательного изучения вещей он обнаружил, что незаметное для двух обращений становится весьма значительным для многих [обращений], взятых вместе, и что, например, 40 оборотов, наблюдаемых со стороны [точки] F , были бы заметно короче, чем 40 других, наблюдаемых с противоположной стороны, в каком бы месте зодиака ни оказался

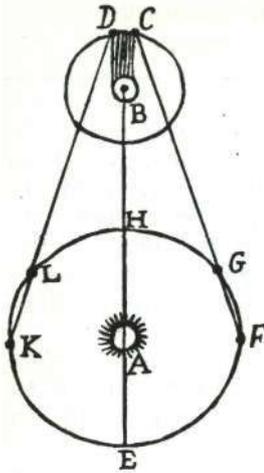


Рис. 35

Юпитер. По этой причине необходимо 22 [минуты] для [прохождения] интервала *HE*, который является удвоенным расстоянием от нас до Солнца³.

Необходимость этого нового уравнения для запаздывания света устанавливается всеми наблюдениями, которые были сделаны в Королевской Академии и в Обсерватории на протяжении восьми лет. Они были вновь подтверждены выступлением из тени первого спутника Юпитера, наблюдавшимся в Париже 9 ноября этого года в $5^h 35^m 45^s$ вечера, на 10 мин позже, чем следовало ожидать, рассчитывая его на основе тех [наблюдений], что были сделаны в августе, когда Земля была гораздо ближе к Юпитеру, что месье Ремер предсказывал в Академии в начале сентября.

Но чтобы устранить всякие сомнения, что это неравенство вызвано запаздыванием света, он показывает, что оно не может происходить из-за какого-либо эксцентриситета или другой причины из тех, которые обычно приводят, чтобы объяснить нерегулярности в движении Луны и других планет.

Комментарий

Перевод с французского работы О. Ремера выполнен С. Р. Филоновичем. Перевод дается по публикации: *Demonstration touchant le mouvement de la lumiere trouve par M. Romer de l'Academie Royale des Sciences. Journal des Scavans du lundy 7 Decembre 1676, p. 233—236.*

¹ Речь идет о спутнике Юпитера Ио.

² Квадратурой в данном случае называется положение Юпитера, при котором направления Земля — Солнце и Солнце — Юпитер образуют угол 90° .

³ Причина, по которой Ремер указывает не саму скорость света, а время, за которое свет проходит диаметр земной орбиты, состоит в том, что во второй половине XVII в. этот диаметр не был еще определен с необходимой точностью.

Литература

- Собрание работ О. Ремера не издавалось.
- [1] Stromgren E. Ole Romer, som astronom. KfSbenhavn, 1944.
- [2] Roemer et la vitesse de la lumiere. Paris, 1978.
- [J] Cohen / . B. Roemer and the first determination of the velocity of lighth. N. Y., 1944.
- [4] Филонович С. Р. Самая большая скорость. М., 1983, гл. II.



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.

Христиан 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 «л». 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 куляр, 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 сомнения 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' 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 ударилось².

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 берегу³.

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-

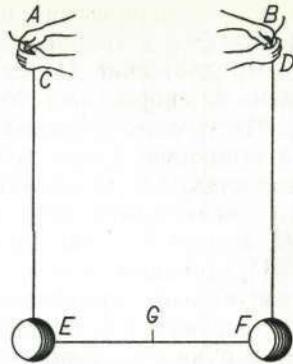
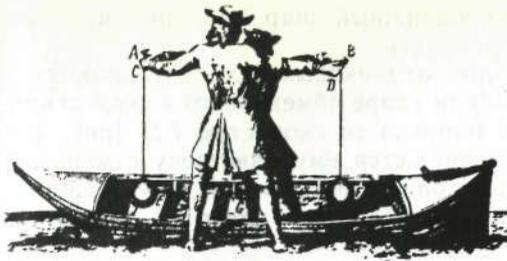


Рис. 36

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-

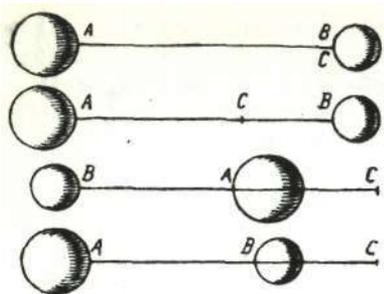


Рис. 40

ное движение тела A . Так как после удара B движется относительно берега влево со скоростью EB , а A вправо со скоростью EA 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 разобранных случаев 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 вышерассмотренному 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

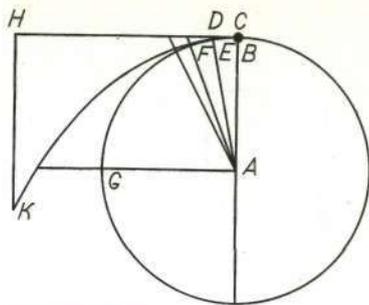


Рис. 41

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. 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,

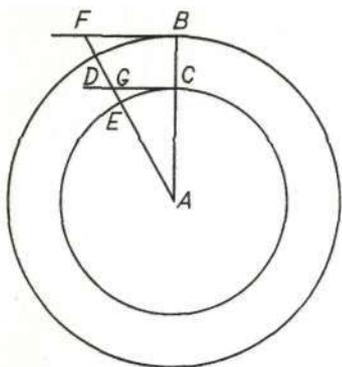


Рис. 42

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 тяготению. 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 большей 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, уста-

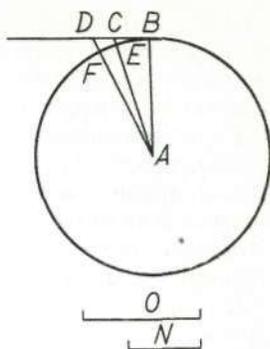


Рис. 43

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. (...)

**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 мной 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. (...)

Глава I

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 приходится 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 волнами³.

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 сотрясанием всего тела или значительной его части, что возмущает весь смежный с ним воздух. Но движение света должно зародиться 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-

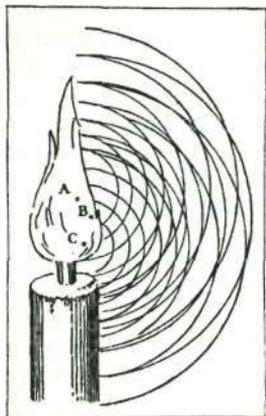


Рис. 44

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 направлении. 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

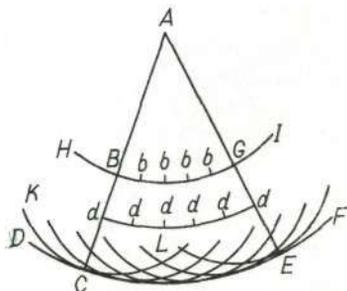


Рис. 46

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 L , а радиус AN равен CB .

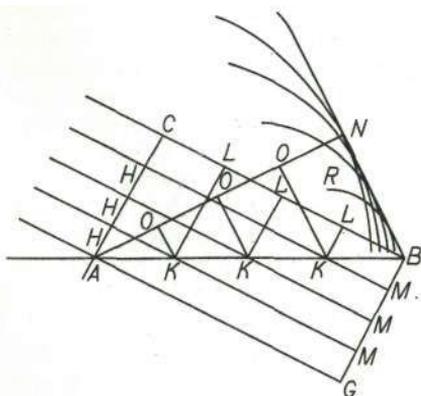


Рис. 47

Если затем рассмотреть 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-

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 полурадиусом, 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 прямоугольные 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 (...)

Глава 3 О преломлении

(••) 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

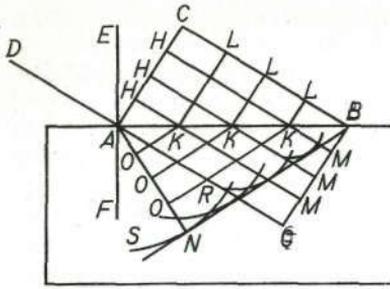


Рис. 48

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 хотя бы 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° , 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 испробовать, 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 опытов⁴. (...)

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.

²Здесь Гюйгенс имеет в виду величину скорости, не учитывая ее знака. Это замечание надо принимать во внимание при многих формулировках Гюйгенса.

³ В своих оценках Гюйгенс пользуется результатами работы О. Ремера.

⁴ 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 встречает те же затруднения, что и при объяснении причин отражения и разницы между прозрачными и поглощающими телами.

Литература

- [1] Собрание сочинений Х. Гюйгенса: Oeuvres completes 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.



И. НЬЮТОН

(1643—1727)

О началах механики. Об оптике

Творчество И. Ньютона по праву относится к вершинам научной мысли. В нем сочетались мастерство экспериментатора и смелость мысли теоретика. Важную роль сыграл Ньютон в формировании методологии научного исследования. С именем Ньютона связывают установление основных положений классической механики, ограниченность которой была осознана лишь в начале XX в. Ньютон сформировал целую научную программу, под влиянием которой физика развивалась в XVIII—XIX вв.

Исаак Ньютон родился 4 января 1643 г. в деревушке Вулсторп недалеко от Грантэма в семье небогатого фермера. Отец его умер еще до рождения сына и в детстве Исаак большую часть времени находился на попечении родственников. Он учился в школе Грантэма, а затем (1661) поступил в Тринити-колледж Кембриджского университета на правах сабсайзера — студента, в обязанности которого входило прислушивание членам колледжа (преподавателям).

В 1665 г. Ньютон получает степень бакалавра, а в 1668 г. — степень магистра и одновременно становится старшим членом колледжа. В 1669 г. учитель Ньютона И. Барроу передает ему Лукасовскую кафедру, и с этого времени Ньютон на протяжении многих лет читает в Кембриджском университете лекции по математике и оптике.

В 1688 г. Ньютона избирают членом английского парламента, вследствие чего он два года был вынужден провести в Лондоне. Возвратившись в Кембридж, он не смог вернуться к научным занятиям из-за тяжелой болезни. После выздоровления Ньютон был назначен на должность хранителя Монетного двора. Он провел крайне необходимую для экономики Англии денежную реформу. В 1699 г. Ньютон становится директором Монетного двора и вскоре окончательно отказывается от кафедры в Кембридже. Еще два события характеризуют постепенный рост общественного положения Ньютона: в 1703 г. его избирают президентом

Лондонского Королевского общества, а в 1705 г. королева Анна возводит Ньютона в дворянство.

Последние годы жизни Ньютон провел в Лондоне. В этот период он издал и переиздал ряд работ, подготовленных еще в Кембридже; много времени занимали у Ньютона обязанности президента ЛКО. Сэр Исаак Ньютон умер 31 марта 1727 г.

Научные исследования Ньютон начал вести еще будучи студентом. Сохранились свидетельства о его интересе к изготовлению оптических приборов. Творческая деятельность Ньютона достигла пика очень рано — в 1665—1667 г. В это время в Англии свирепствовала страшная эпидемия чумы, спасаясь от которой многие горожане уезжали в деревню. Уехал из Кембриджа на родину и Ньютон. В Вулсторпе за неполные два года он разработал основы анализа бесконечно малых (в его терминологии — метод флюксий). В это же время ученый начал размышлять о всемирном тяготении. В Вулсторпе были начаты и оптические эксперименты, приведшие к доказательству объективности цвета как характеристики света. Однако, вернувшись в Кембридж, Ньютон не опубликовал сразу же полученные результаты. Он обнародовал их постепенно.

Известность как физик Ньютон получил после 1668 г., когда им была изготовлена первая модель телескопа-рефлектора. (Это изобретение послужило поводом для его избрания членом Лондонского Королевского общества.) В 1673 г. на заседании ЛКО был зачитан мемуар Ньютона «Новая теория света-и цветов», в котором изложена теория, построенная на основе убедительных экспериментов по дисперсии света. Ньютон показал, что существуют монохроматические лучи различной цветности и что белый свет есть смесь этих лучей. В дальнейшем Ньютон развил свою теорию и поставил ряд новых оптических опытов. В частности, в экспериментах с так называемыми «кольцами Ньютона» было продемонстрировано свойство периодичности, присущее свету. Взгляды ученого на природу света были довольно сложными. Ньютон пытался соединить представление о свете как о потоке корпускул с элементами волновой теории, принять которую в целом он не мог, поскольку она не объясняла прямолинейность распространения света. Впоследствии, в XVIII в. теория Ньютона была упрощена, и его имя оказалось неразрывно связанным с корпускулярной теорией света. Отметим, что резкая полемика Ньютона с Гуком по вопросам оптики привела к тому, что итог своих исследований Ньютон подвел лишь в 1704 г., после смерти Гука, в сочинении «Оптика».

Наиболее значителен вклад Ньютона в развитие механики. Интересуясь проблемами механики еще с середины 60-х годов, Ньютон благодаря настойчивости Э. Галлея систематизировал свои результаты в этой области в фундаментальном труде «Математические начала натуральной философии» (1687). С. И. Вавилов дал такую обобщающую характеристику этого сочинения: «В ис-

тории естествознания не было события более крупного, чем появление «Начал» Ньютона... Ньютоново учение о пространстве, времени, массах и силах давало общую схему для решения любых конкретных задач механики, физики и астрономии. Величественный пример системы мира, разработанный Ньютоном, увенчанный открытием всемирного тяготения, увлекал науку на этот новый путь, на применение ньютоновской схемы ко всем разделам физики. Возникла «классическая физика» по образцу и подобию «Начал».

Следует отметить, что, хотя Ньютон разработал основы дифференциального и интегрального исчисления во многом под влиянием размышлений над проблемами динамики, в «Началах» он пользуется традиционными математическими методами, восходящими еще к Евклиду и Архимеду. Ньютон считал, что новое физическое содержание его труда будет восприниматься читателями легче, если методы решения задач останутся традиционными. Для современного читателя синтетические геометро-алгебраические приемы доказательств Ньютона в определенной степени затрудняют чтение книги.

Значение «Начал» для дальнейшего прогресса науки состоит не только в конкретных результатах (формулировка законов движения, закона всемирного тяготения, объяснение законов Кеплера и т.д.), но и в том, что эти результаты продемонстрировали эффективность ньютоновского подхода к объяснению природных явлений, который ученый хотел распространить и на другие области физики. В предисловии к «Началам» Ньютон писал: «Было бы желательно вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некими силами, с которыми частицы тел, вследствие причин покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга. Так как эти силы неизвестны, то до сих пор попытки философов объяснить явления природы оставались бесплодными». Так родилась ньютоновская программа изучения физических явлений, которую разрабатывали многие естествоиспытатели XVIII — первой половины XIX вв.

Огромное влияние оказал Ньютон и на развитие методологии научных исследований. Его «метод принципов», реализованный в «Началах» и «Оптике», состоит в следующем: на основе опыта формулируются наиболее общие закономерности — аксиомы (принципы) — и из них дедуктивным путем выводятся законы и положения, которые должны быть проверены на опыте. Согласно с опытом этих следствий служит гарантией справедливости основных положений теории. Этот путь построения физического знания оказался необычайно плодотворным. Свой метод Ньютон противопоставил господствующему тогда в естествознании стремлению во что бы то ни стало объяснить явления даже с помощью не обоснованных опытом гипотез, догадок и спекуля-

ций. Ньютон полагал, что на такой основе построить истинную физическую теорию нельзя. Если на данном этапе нет возможности объяснить причины, то следует ограничиться установлением из экспериментов некоторой закономерности. Отсюда его решительное кредо: «Гипотез не измышляю». «Все же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезою; гипотезам же метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии», — писал он в «Общем поучении» второго издания «Начал». Слова Ньютона нельзя принимать буквально: гипотеза — необходимый рабочий инструмент познания. Ньютон неоднократно в своем творчестве прибегал к гипотетическим моделям, строил предположения, которые затем часто отбрасывал. Но в отличие от гипотез ньютоновские принципы, являющиеся обобщением эксперимента, остались непоколебленными, и при дальнейшем развитии науки была лишь сужена область их применения. Сам Ньютон понимал, что все, созданное им, не есть окончательная истина, что познание мира бесконечно: «Не знаю, чем я могу казаться миру, но сам себе я кажусь только мальчиком, играющим на морском берегу, развлекающимся тем, что до поры до времени отыскиваю камешек более цветистый, чем обыкновенно, или красивую раковину, в то время как великий океан истины расстилается передо мной неисследованным».

Математические начала натуральной философии

Определения

I. Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее.

Воздуха двойной плотности в двойном объеме вчетверо больше, в тройном — вшестеро. То же относится к снегу или порошкам, когда они уплотняются от сжатия или таяния. Это же относится и ко всякого рода телам, которые в силу каких бы то ни было причин уплотняются. Однако при этом я не принимаю в расчет той среды, если таковая существует, которая свободно проникает в промежутки между частицами. Это же количество я подразумеваю в дальнейшем под названиями тело или масса. Определяется масса по весу тела, ибо она пропорциональна весу, что мною найдено опытами над маятниками, произведенными точнейшим образом, как о том сказано ниже.

II. Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе.

Количество движения целого есть сумма количеств движения отдельных частей его, значит, для массы, вдвое большей, при равных скоростях оно двойное, при двойной же скорости — четверное.

III. Врожденная сила материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения¹.

Эта сила всегда пропорциональна массе, и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее.

От инерции материи происходит, что всякое тело лишь с трудом выводится из своего покоя или движения. Поэтому «врожденная сила» могла бы быть весьма вразумительно названа «силою инерции». Эта сила проявляется телом единственно лишь, когда другая сила, к нему приложенная, производит изменение в его состоянии. Проявление этой силы может быть рассматриваемо двояко: и как сопротивление, и как напор. Как сопротивление — поскольку тело противится действующей на него силе, стремясь сохранить свое состояние; как напор — поскольку то же тело, с трудом уступая силе сопротивляющегося ему препятствия, стремится изменить состояние этого препятствия. Сопротивление приписывается обыкновенно телам покоящимся, напор — телам движущимся. Но движение и покой при обычном их рассмотрении различаются лишь в отношении одного к другому, ибо не всегда находится в покое то, что таковым простым взглядом представляется.

IV. Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только инерции. Происхождение приложенной силы может быть различное: от удара, от давления, от центростремительной силы². (...)

Поучение. В изложенном выше имелось в виду объяснить, в каком смысле употребляются в дальнейшем менее известные названия. Время, пространство, место и движение составляют понятия общеизвестные. Однако необходимо заметить, что эти понятия обыкновенно относятся к тому, что постигается нашими чувствами. Отсюда происходят некоторые неправильные суждения, для устранения которых необходимо вышеприведенные понятия разделить на абсолютные и относительные, истинные и кажущиеся, математические и обыденные.

I. *Абсолютное, истинное, математическое время* само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью.

Относительное, кажущееся, или обыденное, время есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как-то: час, день, месяц, год.

II. *Абсолютное пространство* по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным.

Относительное [пространство] есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное: так, например, протяжение пространств подземного воздуха или надземного, определяемых по их положению относительно Земли. По виду и величине абсолютное и относительное пространства одинаковы, но численно не всегда остаются одинаковыми. Так, например, если рассматривать Землю подвижной, то пространство нашего воздуха, которое по отношению к Земле остается всегда одним и тем же, будет составлять то одну часть пространства абсолютного, то другую, смотря по тому, куда воздух перешел, и, следовательно, абсолютное пространство беспрерывно меняется.

III. *Место* есть часть пространства, занимаемая телом и, по отношению к пространству бывает или абсолютным, или относительным. Я говорю часть пространства, а не положение тела и не объемлющая его поверхность. Для равнообъемных тел места равны, поверхность же от несходства формы тел могут быть и неравными. Положение, правильно выражаясь, не имеет величины, и оно само по себе не есть место, а принадлежащее месту свойство. Движение целого то же самое, что совокупность движений частей его, т. е. перемещение целого из его места то же самое, что совокупность перемещений его частей из их мест. Поэтому место целого то же самое, что совокупность мест его частей, и, следовательно, оно целиком внутри всего тела.

IV. *Абсолютное движение* есть перемещение тела из одного абсолютного его места в другое, *относительное* — из относительного в относительное же. Так, на корабле, идущем под парусами, относительное место тела есть та часть корабля, в которой тело находится, например та часть трюма, которая заполнена телом и которая, следовательно, движется вместе с кораблем. Относительный покой есть пребывание тела в той же самой области корабля или в той же самой части его трюма.

Истинный покой есть пребывание тела в той же самой части того неподвижного пространства, в котором движется корабль со всем в нем находящемся. Таким образом, если бы Земля на самом деле покоилась, то тело, которое по отношению к кораблю находится в покое, двигалось бы в действительности с той абсолютной скоростью; с какой корабль идет относительно Земли. Если же и сама Земля движется, то истинное абсолютное движение тела найдется по истинному движению Земли в неподвижном пространстве и по относительным движениям корабля по отношению к Земле и тела по отношению к кораблю. (...)

Закон 1. Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Брошенное тело продолжает удерживать свое движение, поскольку его не замедляет сопротивление воздуха и поскольку сила тяжести не побуждает это тело вниз. Волчок, коего части, вследствие взаимного сцепления, отвлекают друг друга от прямолинейного движения, не перестает вращаться (равномерно), поскольку это вращение не замедляется сопротивлением воздуха. Большие же массы планет и комет, встречая меньшее сопротивление в свободном пространстве, сохраняют свое как поступательное, так и вращательное движение в продолжение гораздо большего времени.

Закон II. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Если какая-нибудь сила производит некоторое количество движения, то двойная сила произведет двойное, тройная — тройное, будут ли они приложены разом все вместе или же последовательно и постепенно. Это количество движения, которое всегда происходит по тому же направлению, как и производящая его сила, если тело уже находилось в движении, при совпадении направлений прилагается к количеству движения тела, бывшему ранее, при противоположности — вычитается, при наклонности — прилагается наклонно и соединяется с бывшим ранее, сообразно величине и направлению каждого из них.

Закон III. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны. (...)

Следствие I. *При силах совокупных тело описывает диагональ параллелограмма в то же самое время, как его стороны — при отдельных.*

Если тело при действии в месте A [рис. 49] одной только силы M перенеслось бы в продолжение заданного промежутка времени равномерным движением из A в B и если бы при действии в том же месте одной только силы N оно перенеслось бы из A в C , то при действии обеих сил оно перенесется в то же самое время из A в D по диагонали параллелограмма $ABCD$.

Так как сила N действует по направлению прямой AC , параллельной BD , то, по второму закону, эта сила несколько не изменит той скорости приближения тела к прямой BD , которая была произведена первой силой. Следовательно, тело в продолжение данного времени достигнет линии BD , была ли сила N приложена или нет. На основании такого же рассуждения к концу

того же промежутка времени тело должно находиться и где-либо на прямой CD , следовательно, оно должно быть на их пересечении D . Переходит же оно из A в D прямолинейно на основании закона I.

Следствие II. Отсюда явствует составление силы, направленной по AD , из каких-либо двух [сил] AB и BD , наклоненных друг к другу, и, наоборот, разложение любой силы, направленной по AD , на наклонные AB и BD . Как это сложение, так и разложение сил беспрестанно подтверждаются в учении о машинах. (...)

Следствие III. Количество движения, получаемое при сложении количеств движения, когда они совершаются в одну сторону, и при вычитании, когда они совершаются в стороны противоположные, не изменяется от взаимодействия тел между собой. <.,.>

Следствие IV. Центр тяжести системы двух или нескольких тел от действия тел друг на друга не изменит ни своего состояния покоя, ни движения; поэтому центр тяжести системы всех действующих друг на друга тел [при отсутствии внешних действий и препятствий] или находится в покое, или движется равномерно и прямолинейно. (...)

Следствие V. Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство, или движется равномерно и прямолинейно без вращения. (...)

Почтение. Пусть шары A и B [рис. 50] подвешены на равных и параллельных нитях AC , BD из точек C и D . Опишем из этих точек, как из центров, радиусами BD и AC полуокружности EAF и GBH . Отклонив тело A до точки R дуги EAF и убрав тело B , пускаем A качаться и замечаем ту точку V , до которой оно дойдет после одного полного размаха; тогда RV представляет уменьшение величины размаха от сопротивления воздуха. Пусть ST есть четвертая часть RV , так расположенная посередине этой дуги, чтобы RS и TV были между собой равны, т. е. чтобы было $RS = TV = \frac{1}{4}RV$, тогда ST представляет весьма близко влияние сопротивления воздуха при размахе от S до A . Поместим тело B на его место. Если тело A пустить из точки S , то можно без чувствительной погрешности принять, что его скорость при ударе в низшем его положении будет такая же, как если бы оно свободно падало в пустоте из точки T . Эту скорость можно представить хордой TA , ибо известно, что скорость маятника в нижней точке его дуги пропорциональна хорде дуги его падения. Пусть после отражения тело A достигает точки s и тело

B — точки k . Убрав тело B , определяем положение такой точки v , из которой, если пустить тело A , после полного размаха оно приходит в $г$. Если принять $st = \frac{1}{4}rv$ и поместить точки s и t так, чтобы было $rs = tv$, то хорда $(A$ представит ту скорость,

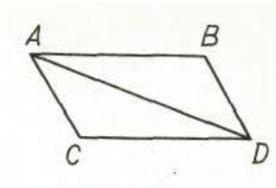


Рис. 49

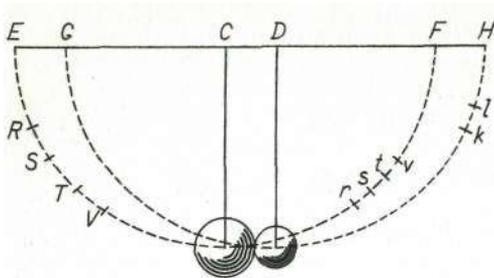


Рис. 50

водя все испытания таким способом, мы как бы производим их в пустоте. Умножив затем массу тела A (если можно так выразиться) на хорду TA , представляющую его скорость, получим его количество движения в точке A перед самым моментом удара. Затем, умножив на tA , получим его количество движения после отражения. Точно так же надо массу тела B умножить на хорду VI , чтобы получить его количество движения после отражения. Подобным образом находятся количества движения каждого из двух тел как перед ударом, так и после отражения в том случае, когда они одновременно пускаются из разных мест, после чего и можно сравнивать количества движения между собой и выводить последствия удара и отражения.

Производя таким образом испытания над маятником длиной 10 футов и над массами равными и неравными и пуская тела так, чтобы они встречались, пройдя большие промежутки, например 8, 12, 16 футов, я получал с ошибкой, меньшей 3 дюймов, в измерениях, что при прямом ударе между телами изменения их количеств движения были равны и направлены в противоположные стороны, откуда следует, что действие и противодействие между собой равны. Так, например, если тело A ударяло по покоящемуся телу B с количеством движения, равным девяти частям, и, потеряв семь, продолжало движение с двумя, то тело B отскакивало также с количеством движения, равным семи. Когда тела шли друг другу навстречу, например A с количеством движения, равным двенадцати, и B с количеством движения, равным шести, и если после удара A шло в обратную сторону с количеством движения, равным двум, то B шло в обратную сторону с количеством движения, равным восьми, т. е. оба тела, как показывает вычитание, изменяли свое количество движения на четырнадцать частей. В самом деле, если из количества движения A вычесть двенадцать, то останется нуль, по вычитании же еще двух получится количество движения, равное двум, направленное в обратную сторону, также при вычитании четырнадцати из количества движения тела B , равного шести, останется количество движения, равное восьми, направленное в обратную сторону.

То же самое происходит и при движении тел в одну сторону-

Пусть, например, тело A идет более быстро и с количеством движения четырнадцать, B — медленнее и с количеством движения, равным пяти. Если после удара A продолжает идти с количеством движения пять, то B пойдет с четырнадцатью, получив девять частей от A .

Подобное соотношение имеет место и в остальных случаях: полное количество движения, рассчитываемое как сумма количеств движения, когда они направлены в одну сторону, и как разность, когда они направлены в стороны противоположные, никогда не меняется от удара при встрече тел.

Ошибки в один или два дюйма при измерениях следует приписать трудности произвести их достаточно точно. Была также трудность и в том, чтобы пустить оба тела так, чтобы они одновременно приходили в низшее положение, а также чтобы заметить места s и k , до которых тела поднимались после встречи. Неравномерное распределение плотности и неравномерность строения тел, происходящие от случайных причин, приводит также к погрешностям.

Чтобы опровергнуть возражение против высказанного выше правила, для доказательства которого эти опыты и производились, будто бы оно предполагает, что тела или абсолютно тверды, или вполне упруги, т. е. такие, каких в природе не встречается, добавлю, что описанные опыты удаются как с телами мягкими, так и с жесткими и совершенно не зависят от степени твердости их. Если это правило прилагать к телам не вполне твердым, то необходимо лишь уменьшить скорость отражения сообразно степени упругости тел. (...)

О движении тел

КНИГА I

Отдел III

О движении тел по эксцентричным
коническим сечениям

Предложение XI. Задача VI. Тело обращается по эллипсу: требуется определить закон центростремительной силы, направленной к фокусу эллипса.

Пусть S [рис. 51] есть фокус эллипса. Проводим SP , пересекающую диаметр DK в точке E , а ординату Qv — в точке x , и дополняем параллелограмм $QxPR$. Тогда окажется, что EP равно большей полуоси AC эллипса, ибо если провести из другого фокуса H прямую HJ параллельно EC , то по равенству CS и CH будут равны ES и EJ ; следовательно,

$$PE = \frac{1}{2} (PS + PJ),$$

но так как HJ параллельно PR и углы JPR и HPZ равны, то $PJ = PH$, сумма же $PS + PH = 2AC$.

На SP опустим перпендикуляр QT и обозначим параметр эллипса через L так, что $L = 2 \frac{BC^2}{AC}$. Тогда

Правило II. Поэтому, поскольку возможно, должно приписывать те же причины того же рода проявлениям природы.

Так, например, дыханию людей и животных, падению камней в Европе и в Африке, свету кухонного очага и Солнца, отражению света на Земле и на планетах.

Правило III. Такие свойства тел, которые не могут быть не усилены, ни ослаблены и которые оказываются присущими всем телам, над которыми возможно производить испытания, должны считаться свойствами всех тел вообще.

Свойства тел постигаются не иначе, как испытаниями. Следовательно, за общие свойства надо принимать те, которые постоянно при опытах обнаруживаются и которые, как не подлежащие уменьшению, не могут быть устранены. Понятно, что против ряда опытов не следует измышлять на авось каких-либо бредней, не следует также уклоняться от сходственности в природе, ибо природа всегда и проста и всегда сама с собой согласна. (...)

Правило IV. В опытной физике предложения, выведенные из совершающихся явлений с помощью индукции, несмотря на возможность противоречащих им предложений, должны приниматься за верные или в точности, или приближенно, пока не обнаружатся такие явления, которыми они еще более уточняются или же окажутся подверженными исключениям.

Так должно поступать, чтобы доводы индукции не уничтожались предположениями. (...)

Предложение VI. Теорема VI. Все тела тяготеют к каждой отдельной планете, и веса тел на всякой планете, при одинаковых расстояниях от ее центра, пропорциональны массам этих планет.

Падение всех тяжелых тел на Землю с одинаковой высоты (исключив неравное замедление, происходящее от ничтожного сопротивления воздуха) совершается за одинаковое время, как это уже наблюдалось другими. Точнейшим же образом это может быть установлено по равенству времен качаний маятников. Я произвел такое испытание для золота, серебра, свинца, стекла, песка, обыкновенной соли, дерева, воды, пшеницы. Я приготовил две круглые деревянные кадочки, равные между собой. Одну из них я заполнил деревом, в другой же я поместил такой же точно груз из золота (насколько смог точно) в центре качаний. Кадочки, подвешенные на равных нитях 11 футов длиной, образовали два маятника, совершенно одинаковых по весу, форме и сопротивлению воздуха. Помещенные рядом, они при равных качаниях шли взад и вперед вместе в продолжение весьма Долгого времени. Следовательно, количество вещества (масса) в золоте (по след. I и 6 предл. 24 кн. II)⁶ относится к количеству вещества в дереве, как действие движущей силы на все золото к ее действию на все дерево, т. е. как вес одного к весу Другого.

То же самое было и для прочих тел. Для тел одинакового веса разность количеств вещества (масс), даже меньшая од-

ной тысячной доли полной массы, могла бы быть с ясностью обнаружена этими опытами.

Конечно, не может быть сомнения, что природа тяжести на других планетах такова же, как и на Земле. В самом деле, вообразим, что земные тела подняты до орбиты Луны и пушены вместе с Луною, также лишенной всякого движения, падать на Землю. На основании уже доказанного несомненно, что в одинаковые времена они пройдут одинаковые с Луною пространства, ибо их массы так относятся к массе Луны, как их веса к весу ее. (...)

Предложение VII. Теорема VII. Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них.

Выше доказано, что все планеты тяготеют друг к другу, а также что тяготение к каждой из них в отдельности обратно пропорционально квадратам расстояний от места до центра этой планеты. Отсюда следует (по предл. LXIX и его следствиям кн. I⁷, что тяготение ко всем планетам пропорционально количеству материи в них.

Кроме того, так как все части какой-либо планеты *A* тяготеют к какой-либо другой планете *B* и тяготение каждой части относится к тяготению целого, как масса этой части к массе целого, всякому же действию (по закону III движения) есть равное противодействие, то и обратно: планета *B* притягивается ко всем частям планеты *A*, и притяжение ее к какой-либо части относится к притяжению к целому, как масса этой части к массе целого.

Следствие 1. Следовательно, тяготение ко всей планете происходит и слагается из тяготений к отдельным ее частям. (...)

Следствие 2. Тяготение к отдельным равным частицам тел обратно пропорционально квадратам расстояний мест до частиц (по след. 3 предл. LXXIV кн. I)⁸.

Предложение VIII. Теорема VII. Если вещество двух шаров, тяготеющих друг к другу, в равных удалениях от их центров однородно, то притяжение каждого шара другим обратно пропорционально квадрату расстояния между центрами их.

После того как я нашел, что тяготение ко всей планете происходит и слагается из тяготений к частицам ее и для каждой из них обратно пропорционально квадрату расстояния до этой частицы, у меня возникло сомнение, будет ли эта обратная пропорциональность квадратам расстояний для всей силы притяжения, слагающейся из частных, выполняться в точности или лишь приближенно. Ибо могло бы быть, что пропорция, которая имеет место для больших расстояний, достаточно точна, близ же поверхности планеты, вследствие неравенства расстояний между частицами и различного их расположения, может оказаться заметно неверной. Однако впоследствии, по предложениям LXXV и LXXI кн. I⁹, я убедился в справедливости выказанного здесь предложения. (...)

Общее поучение. (...) До сих пор я изъяснял небесные явле-

ния и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я не указывал причины самого тяготения. Эта сила происходит от некоторой причины, которая проникает до центра Солнца и планет без уменьшения своей способности и которая не пропорциональна поверхности частиц, на которые она действует (как это обыкновенно имеет место для механических причин), но пропорциональна количеству твердого вещества, причем ее действие распространяется повсюду на огромные расстояния, меняясь обратно пропорционально квадратам расстояний. Тяготение к Солнцу составляется из тяготения к отдельным частицам его и при удалении от Солнца убывает в точности пропорционально квадратам расстояний даже до орбиты Сатурна, что следует из покоя афелиев планет, и даже до крайних афелиев комет, если только эти афелии находятся в покое. Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю. Все же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезой, гипотезам же метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии.

В такой философии предложения выводятся из явлений и обобщаются с помощью индукции. Так были изучены непроницаемость, подвижность и напор тел, законы движения и тяготения. Довольно того, что тяготение на самом деле существует, действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря. (...)

Оптика

КНИГА 1

Часть I
Предложения

Предложение I. Теорема¹ I. *Лучи, отличающиеся по цвету, отличаются и по степеням преломляемости.*

Доказательство опытами. *Опыт I.* Я взял продолговатый кусок черной толстой бумаги с параллельными сторонами и разделил его на две равные половины линией, проведенной перпендикулярно обеим сторонам. Одну часть я покрасил красной краской, другую — синей. Бумага была очень черной, краски были интенсивными и наносились толстым слоем для того, чтобы явление могло быть более отчетливым. Эту бумагу я рассматривал сквозь призму из массивного стекла, две стороны которой, служившие для прохождения света, были плоскими и хорошо ополитрованными; они заключали угол около шестидесяти градусов: этот угол я называю преломляющим углом призмы. Рассматривая бумагу, я держал ее и призму перед окном таким образом, что стороны куска бумаги были параллельными призме; обе эти стороны, поперечная линия и призма были параллельны ризонту; свет, падавший из окна на бумагу, составлял с нею

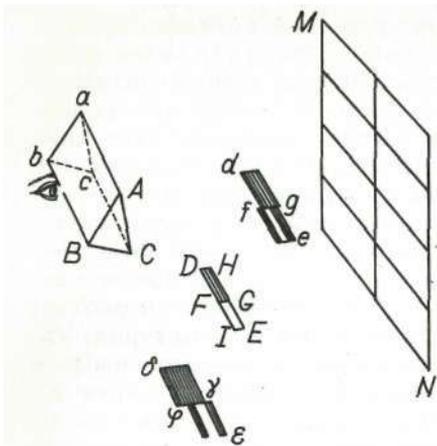


Рис. 52

угол, равный углу, образуемому бумагой и отражаемым от нее светом, попадавшим в глаз. Стена комнаты за призмой под окном была покрыта черной материей, находившейся в темноте; таким образом, от нее не мог отражаться свет, который, проходя мимо краев бумаги в глаз, смешивался бы со светом от бумаги и затемнял явление. Установив предметы таким образом, я нашел, что в том случае, когда преломляющий угол призмы повернут кверху, так что бумага кажется вследствие преломления приподнятой, синяя сторо-

на подымается преломлением выше, чем красная. Если же преломляющий угол призмы повернут вниз и бумага кажется опустившейся вследствие преломления, то синяя часть окажется несколько ниже, чем красная. Таким образом, в обоих случаях свет, приходящий от синей половины бумаги через призму к глазу, испытывает при одинаковых обстоятельствах большее преломление, чем свет, исходящий от красной половины, и, следовательно, преломляется больше.

Пояснение. На рис. 52 MN изображает окно, DE — бумагу с параллельными сторонами DI и HE , разделенную поперечной линией FG на две половины: интенсивно синюю DG и другую, интенсивно красную FE . $BACcab$ — призма, преломляющие плоскости которой $ABba$ и $ACca$ встречаются по ребру преломляющего угла Aa . Это ребро Aa , поднятое кверху, параллельно одновременно горизонту и сторонам бумаги DI и HE ; поперечная линия FG перпендикулярна плоскости окна. Далее, de представляет изображение, видимое при преломлении кверху таким образом, что синяя половина DG подымается выше, в положение dg , красная половина EF находится в ef ; синяя часть претерпевает, следовательно, большее преломление. Если ребро преломляющего угла повернуто вниз, то изображение бумаги преломлением опускается, положим, в $δε$, синяя половина преломляется при этом в $δγ$, ниже, чем красная половина, находящаяся в положении $εφ$. (...)

Поучение. То же самое происходит и при изменении некоторых обстоятельств; в первом опыте получается то же, когда призма и бумага различным образом наклонены к горизонту. (...) Но в описании этих опытов я изложил такие обстоятельства, которые или делают явление более заметным, или более легким для опытов новичка, или те же, которыми я только пользовался. Так же делал я часто и в следующих опытах;

этого замечания достаточно в отношении всех опытов. Однако из этих опытов не следует, что весь свет от синей половины преломляется больше, чем свет красной половины; оба они составлены из лучей различной преломляемости, так что в красной половине есть лучи не менее преломляемые, чем лучи синей половины, а в синей половине есть лучи не более преломляемые, чем некоторые лучи красной половины, но таких лучей в отношении ко всему свету очень мало; они уменьшают успех опыта, однако не в состоянии его совершенно расстроить. Если бы красная и синяя окраски были более блеклыми и слабыми, то расстояние изображений сделалось бы меньшим, чем полтора дюйма, если же окраска будет более интенсивной и полной, то это расстояние возрастает, как станет ясным в дальнейшем. Этих опытов достаточно для цветов естественных тел; для цветов, получаемых преломлением в призмах, предложение, о котором идет речь, станет ясным из опытов, излагаемых в следующем предложении.

Предложение II. Теорема II. *Солнечный свет состоит из лучей различной преломляемости.*

Доказательство опытами. *Опыт 3.* Я поместил в очень темной комнате у круглого отверстия около трети дюйма шириной в ставне окна стеклянную призму, благодаря чему пучок солнечного света, входившего в это отверстие, мог преломляться вверх к противоположной стене комнаты и образовывал там цветное изображение солнца. Ось призмы [т. е. линия, проходящая через середину призмы от одного конца к другому параллельно ребру преломляющего угла] была в этом и следующих опытах перпендикулярна падающим лучам. Я медленно вращал призму вокруг этой оси и видел, что преломленный свет на стене или окрашенное изображение солнца сначала поднималось, затем начало опускаться. Между подъемом и спуском, когда изображение казалось остановившимся, я прекратил вращение призмы и закрепил ее в этом положении так, чтобы она не могла более двигаться, ибо в этом положении по обе стороны преломляющего угла, т. е. при входе лучей внутрь призмы и при выходе из нее, преломления света были равны между собой. Так же и в других опытах, когда я хотел, чтобы преломления по обе стороны призмы были равными, я отмечал место, где изображение солнца, образованное преломленным светом, останавливалось между двумя противоположными движениями при смене поступательного движения на попятное; когда изображение падало на это место, я закреплял призму¹⁰. Именно в этом положении, как наиболее подходящем, следует понимать расположенными призмы и в следующих опытах, если только не описывается другое положение. Поместив призму в это положение, я заставил преломленный свет падать перпендикулярно на лист белой бумаги на противоположной стене комнаты и наблюдал фигуру и размеры солнечного изображения, образованного светом на бумаге. Это изображение было удлинненным, но не

овальным, и замыкалось двумя прямолинейными и параллельными сторонами и двумя полукруглыми концами. По бокам оно было ограничено очень отчетливо, на концах же — неясно и неопределенно: свет ослаблялся и исчезал там постепенно. Ширина этого изображения была около двух дюймов с одной восьмой, включая полутень, и соответствовала диаметру солнца, ибо изображение находилось на расстоянии восемнадцати с половиной футов от призмы; на этом расстоянии указанная ширина, уменьшенная на диаметр отверстия в ставне окна, т. е. на четверть дюйма, соответствует на призме углу около половины градуса, являющемуся кажущимся диаметром солнца. Но длина изображения была около десяти с четвертью дюймов, ширина же прямолинейных сторон — около восьми дюймов; преломляющий угол призмы, благодаря которому получилась столь значительная длина изображения, был 64° . С меньшим углом длина изображения была меньше, ширина же оставалась той же самой. Если призма поворачивалась вокруг своей оси таким образом, что лучи выходили из второй преломляющей поверхности призмы более отлого, то изображение становилось на один, два или более дюймов длиннее; если призма поворачивалась в противоположном направлении, так что лучи падали более отлого на первую преломляющую поверхность, то изображение укорачивалось на один или два дюйма. Вот почему, производя этот опыт, я стремился, насколько мог, ставить призму согласно вышеуказанному правилу точно в такое положение, чтобы преломление лучей при их выходе из призмы равнялось преломлениям при падении на призму. В этой призме было несколько жил, пробегавших внутри стекла от одного конца до другого; эти жилы неправильно рассеивали некоторую часть солнечного света, но не имели заметного влияния на удлинение окрашенного спектра, ибо я производил тот же опыт с другими призмами с таким же успехом. В частности, с призмой, по-видимому, не имевшей таких жил, с преломляющим углом в $62\frac{1}{2}$ градуса я нашел длину изображения $9\frac{3}{4}$ или 10 дюймов на расстоянии $18\frac{1}{2}$ фута от призмы; ширина отверстия в оконной ставне при этом была $\frac{1}{4}$ дюйма, как и раньше. Я повторял опыт четыре или пять раз, ибо нетрудно ошибиться при установке призмы в надлежащее положение, и всегда находил длину изображения такой, как она приведена выше. С другой призмой из более прозрачного стекла и лучше отполированной, свободной, по-видимому, от жил и с преломляющим углом в $63\frac{1}{3}$ градуса, длина изображения на том же самом расстоянии в $18\frac{1}{2}$ футов была также около 10 или $10\frac{1}{8}$ дюймов. За этими пределами на $\frac{1}{4}$ или $\frac{1}{3}$ дюйма на обоих концах спектра свет облаков казался несколько окрашенным в красный и фиолетовый цвет, но столь слабо, что я заподозрил, что эта окраска полностью или большей частью вызывается лучами спектра, неправильно рассеивающимися благодаря некоторой неоднородности вещества и полировке стекла; поэтому я не включил эту окраску в пределы спект-

ра. С другой стороны, различные величины отверстия в оконной ставне, различные толщины того места призмы, где через нее проходят лучи, и различные наклоны призмы к горизонту не изменяют заметно длины изображения. Не влияет также различие вещества призмы, ибо в сосуде, сделанном из полированных стеклянных пластинок, склеенных вместе в форме призмы, и наполненном водой, получается такой же результат опыта в отношении величины преломления". Далее, следует заметить, что лучи идут от призмы к изображению по прямым линиям и поэтому на их длинном пути от призмы они наклонены друг к другу соответственно длине изображения, т. е. более чем на два с половиной градуса. Однако, согласно законам оптики в общепринятом понимании, лучи не могут столь наклониться один к другому; пусть EG [рис. 53] представляет ставню окна, F — отверстие в ней, через которое пучок солнечного света пропускается в затемненную комнату, ABC — треугольная воображаемая плоскость, по которой, надо представить себе, призма пересекается поперек серединой света. Или, если угодно, пусть ABC представляет самую призму, направленную прямо к глазу наблюдателя ее ближайшей вершиной, и пусть XU — солнце, MN — бумага, на которую отбрасывается солнечное изображение спектра, PT — изображение, стороны которого v и w прямолинейны и параллельны, концы же P и T полукруглые. $UKHP$ и $XLIT$ — два луча; первый из них идет от нижней части солнца к верхней части изображения и преломляется в призме в K и $Я$; второй идет от верхней части солнца к нижней части изображения и преломляется у L и I . Преломления на обоих гранях призмы равны одно другому, т. е. преломление у IC равно преломлению у I , и преломление у L равно преломлению у $Я$, так что преломления падающих лучей у K и L , взятые вместе, равны преломлениям выходящих лучей при K и $Я$, взятым вместе; складывая равное с равным, получаем, что преломления при K и $Я$, взятые вместе, равны преломлениям при I и L , взятым вместе, и, следовательно, два луча, одинаково преломленные, имеют тот же наклон один по отношению к другому после преломления, как и до него, т. е. наклон в половину градуса соответственно диаметру солнца, ибо так были наклонены лучи друг к другу до преломления. Таким образом, по правилам общепринятой оптики длина изображения PT должна соответствовать углу в половину градуса у призмы и, следовательно, должна равняться ширине w ; поэтому изображение должно быть круглым. Так было бы, если бы два луча $XLIT$ и $UKHP$ и все остальные, дающие изображения Pw и Tv , одинаково преломлялись. Из опыта найдено, что изображение получается не круглое, но удлиненное, с длиной, почти в пять раз большей ширины; поэтому лучи, идущие к верхнему концу P изображения, претерпевают наибольшее преломление и должны больше преломляться, чем те лучи, которые идут к нижнему концу T , если только неравенство преломления не случайно.

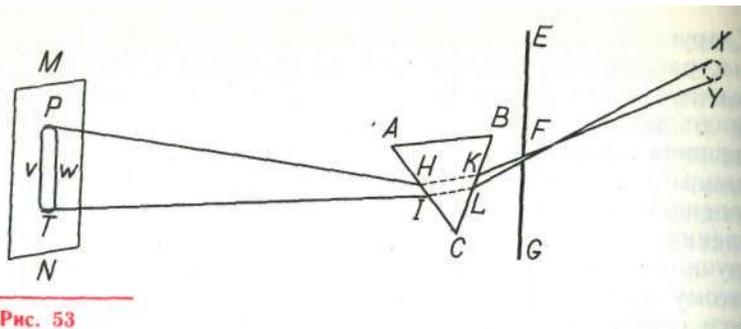


Рис. 53

Это изображение спектра PT было окрашено красным в наименее преломленном конце T , фиолетовым — в наиболее преломленном конце P и желтым, зеленым и синим — в промежуточном пространстве. Это согласуется с первым положением, что свет, различающийся по цвету, различается и в отношении преломляемости. Длину изображения в предыдущих опытах я измерял от крайнего и наиболее слабого и крайнего синего на другом конце, исключая только небольшую полутень, ширина которой едва ли превосходила четверть дюйма, как было сказано выше. (...)

Опыт 5. Рассудив, что если в третьем опыте изображение солнца получается удлинненной формы вследствие расширения каждого луча или же благодаря какому-либо другому случайному неравенству преломлений, то такое же удлинненное изображение, но растянутое в ширину, должно получаться при втором преломлении, производимом в сторону, благодаря подобному же расширению лучей или другому случайному неравенству преломлений; я попробовал, каков будет результат такого второго преломления. Для этой цели я расположил все предметы так же, как и в третьем опыте, и затем поставил вторую призму непосредственно после первой в поперечном положении к ней, так чтобы она снова могла преломлять пучок солнечного света, приходящего к ней через первую призму. В первой призме пучок преломлялся кверху, а во второй — в сторону. Я нашел, что преломление во второй призме не увеличивает ширину изображения, но что его верхняя часть, претерпевающая в первой призме большее преломление и кажущаяся фиолетовой и синей, преломляется и во второй призме больше, чем нижняя часть, являющаяся красной и желтой, причем это происходит без какого-либо увеличения ширины изображения.

Пояснение. Пусть S [рис. 54] — солнце, F — отверстие в окне; ABC — первая призма; DH — вторая призма, Y — круглое изображение солнца, образуемое непосредственно пучком света, когда призмы убраны; PT — удлинненное изображение солнца, образуемое тем же пучком при прохождении только через первую призму, когда вторая призма убрана; pt — изображение, получаемое при перекрестных преломлениях обеих призм вместе.

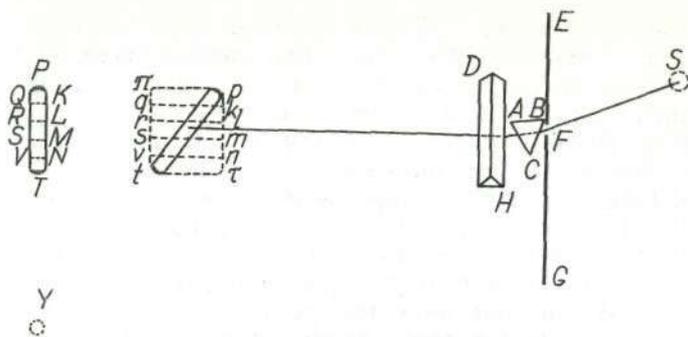


Рис. 54

Если лучи, направленные к различным точкам круглого изображения Y , расширяются и разбиваются преломлением первой призмы так, что уже не идут по определенной линии к определенной точке, но каждый луч расщепляется, рассеивается и превращается из линейного луча в поверхность лучей, расходящуюся от точки преломления и лежащую в плоскости углов падения и преломления, то лучи будут приходить в этих плоскостях к соответствующему числу линий, простирающихся от одного конца изображения PT до другого, и изображение поэтому станет удлинненным. Эти лучи и их различные части, стремящиеся к различным точкам изображения PT , должны снова расширяться и рассеяться в сторону при перекрестном преломлении во второй призме и должны составить квадратное изображение ят. Для лучшего понимания этого разделим изображение PT на пять равных частей: PQK , $KQRL$, $LRSM$, $MSVN$, NVT . Та же самая неправильность, благодаря которой круглый пучок света Y растягивается, преломляясь в первой призме в длинное изображение PT , заставит свет PKQ , занимающий пространство той же длины и ширины, как Y , при преломлении во второй призме расширяться в длинное изображение $-nqkp$, свет $KQRL$ — в длинное изображение $kqrl$, а свет $LRSM$, $MSVN$, NVT — в соответственные длинные изображения $lrs m$, $tnsv n$, $nvtx$. Все эти длинные изображения составят квадратное изображение ят. Это должно произойти, если каждый луч расширяется преломлением и рассеивается в треугольную поверхность лучей, расходящихся из точки преломления, ибо второе преломление рассеет лучи в одну сторону так же, как первое рассеивает в другую, — оно увеличит ширину изображения настолько же, насколько первое преломление увеличивает длину. То же самое должно произойти, если некоторые лучи случайно преломляются больше, чем другие. На самом деле происходит иначе. Изображение PT не становилось шире, преломляясь во второй призме, но делалось только наклонным, как это представлено в pt , его верхний конец P переносился преломлением на большее расстоя-

ние, чем нижний конец T . Таким образом, свет, шедший к верхнему концу P изображения, был [при равных падениях] более преломленным во второй призме, чем свет, направленный к нижнему концу T , т. е. синий и фиолетовый больше, чем красный и желтый, и поэтому более преломляем. Тот же свет, преломляясь в первой призме, переносился дальше от места U , к которому он был направлен до преломления, и, следовательно, как в первой, так и во второй призме испытывал большее преломление, чем остальной свет, являясь, таким образом, более преломляемым еще до падения на первую призму. (...)

Опыт 6. В середине двух тонких досок я проделал круглые отверстия диаметром в треть дюйма, а в оконной ставне было сделано значительно более широкое отверстие для того, чтобы впускать в мою затемненную комнату широкий пучок солнечного света. Я поместил за ставней призму для того, чтобы пучок преломлялся к противоположной стене. Непосредственно за призмой я закрепил одну из досок таким образом, чтобы середина преломленного света могла проходить через отверстия в доске, остальная же часть задерживалась доской. Затем на расстоянии около двенадцати футов от первой доски я закрепил другую доску так, что середина преломленного света, проходящая через отверстие в первой доске и падающая на противоположную стену, могла проходить через отверстие во второй доске, остальная же часть, задержанная доской, могла отбрасывать на ней окрашенный спектр солнца. Непосредственно за этой доской я поместил другую призму для преломления света, проходящего через отверстие. Затем я быстро вернулся к первой призме и, медленно вращая ее в ту и в другую сторону вокруг ее оси, заставил изображение, падающее на вторую доску, двигаться вверх и вниз по доске, так что все его части могли последовательно проходить через отверстие в этой доске и падать на призму за нею. В то же время я отмечал на противоположной стене положения, до которых доходил свет после преломления во второй призме. По разностям этих положений я нашел, что свет, наиболее преломившийся в первой призме, шел к синему концу изображения и во второй призме снова больше преломлялся, чем свет, шедший к красному концу того же изображения, что доказывает как первое, так и второе предложение. Это получалось как в том случае, когда оси двух призм были параллельны, так и тогда, когда они были наклонены одна к другой и к горизонту под любым углом.

Пояснение. Пусть F [рис. 55] — широкое отверстие в ставне окна, через которое солнце освещает первую призму ABC , и пусть преломленный свет падает на середину доски DE , средняя же часть света — на отверстие G , сделанное в середине этой доски. Пусть эта пропущенная часть света снова падает на середину второй доски de и образует здесь такое же удлиненное изображение солнца, как было описано в третьем опыте. Медленно вращая призму ABC в ту и другую сторону вокруг

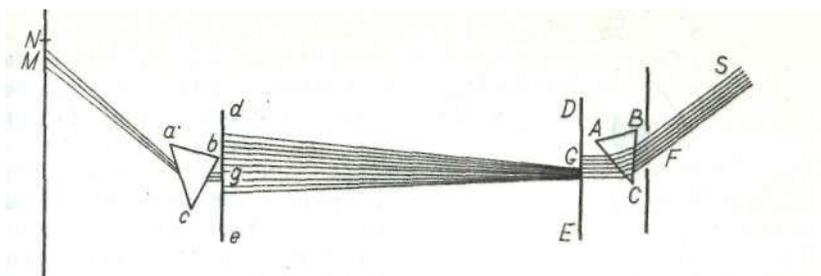


Рис. 55

ее оси, можно передвигать это изображение вверх и вниз по доске *de*. Таким способом все его части от одного конца до другого можно заставить последовательно проходить через отверстие *g*, сделанное в середине этой доски. В то же время другая призма *abc* помещается вблизи за отверстием *g* для второго преломления пропущенного света. Установив таким образом предметы, я отметил места *M* и *N* на противоположной стене, на которые падает преломленный свет, и нашел, что если обе доски и вторая призма оставались неподвижными, то эти места постоянно изменялись при вращении первой призмы вокруг ее оси. Когда через отверстие *g* пропускалась нижняя часть света, падающего на вторую доску *de*, то свет приходил к нижнему положению *M* на стене. Когда пропускалась верхняя часть света через то же отверстие *g*, то она доходила до более высокого места *N* на стене. При пропускании промежуточной части света через отверстие свет падал в некоторое место на стене между *M* и *N*. При неизменном положении отверстий в досках падение лучей на вторую призму оставалось тем же самым во всех случаях. И, однако, при таком одинаковом падении одни лучи преломлялись больше, другие меньше. Больше во второй призме преломлялись те лучи, которые больше всего отклонялись от своего пути при большем преломлении и в первой призме, и в силу этого постоянства большей преломляемости они по праву могут быть названы более преломляемыми¹². (...)

Другие наблюдали, что прозрачные вещества, такие, как стекло, вода, воздух и пр., если их сделать очень тонкими выдуванием в пузыри или изготовляя иным способом в виде пластинок, обнаруживают различные цвета соответственно их различной окраски, хотя при больших толщинах они кажутся очень яркими бесцветными. В предыдущей книге я воздержался гово-

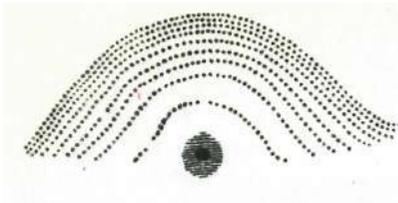


Рис. 56

рить об этих цветах, ибо они казались более трудными для рассмотрения и не были необходимыми для установления свойств света, разбивавшихся там. Но ввиду того что они могут привести к дальнейшим открытиям для дополнения теории света, в частности в связи со строением частиц естественных

тел, от которых зависят цвета и прозрачность последних, я поместил здесь сведения и об этих цветах. Для краткости и ясности изложения я прежде всего описал главные из моих наблюдений, затем рассмотрел их и воспользовался ими. Наблюдения таковы.

Наблюдение 1. Прижимая тесно две призмы одну к другой так, что их стороны [которые случайно были несколько выпуклыми] могли в некоторых местах соприкоснуться, я нашел, что место соприкосновения становилось совершенно прозрачным, как будто бы там был непрерывный кусок стекла. Ибо, когда свет падал на воздух, заключенный между стеклами в других местах, настолько отлого, что полностью отражался, то в местах соприкосновения свет казался полностью проходящим настолько, что при рассмотрении сверху эти места были похожи на черные или темные пятна благодаря тому, что отражался только ничтожный или неощутимый свет в отличие от других мест. Если смотреть через эти пятна, то они кажутся как бы дырами в тонком слое воздуха, образовавшемся между двумя прижатыми стеклами. Предметы, находящиеся за стеклами, через это отверстие можно видеть отчетливо, хотя они совершенно не видны через остальные части стекол, где была прослойка воздуха. Хотя стекла были несколько выпуклыми, однако прозрачные пятна имели значительную ширину, что происходило, по-видимому, главным образом потому, что частицы стекол смещались внутрь благодаря взаимному давлению. Ибо при очень сильном сдавливании пятна становились значительно шире, чем раньше.

Наблюдение 2. Когда слой воздуха при вращении призм около их общей оси становился столь мало наклонным к падающим лучам, что некоторые из них начинали пропускаться, то на слое появлялось много тонких цветных дуг, имевших вначале форму конхоиды [рис. 56]. При дальнейшем движении призм эти дуги увеличивались и загибались все больше и больше вокруг прозрачных пятен, пока, наконец, они не завершались в круги или кольца, окружая пятна и сжимаясь после этого постепенно все больше и больше.

При первом появлении эти дуги были фиолетового и синего цвета и между ними находились белые дуги кругов, которые при дальнейшем движении призм становились несколько окрашенными по их внутренним лимбам в красный и желтый цвет.

ко внешним же лимбам примыкал синий. Следовательно, порядок этих цветов от центрального темного пятна был в это время такой: белый, синий, фиолетовый, черный, красный, оранжевый, желтый, белый, синий, фиолетовый и т. д. Однако желтый и красный были значительно слабее, чем синий и фиолетовый.

При дальнейшем движении призм вокруг их оси эти цвета сжимались все больше и больше, стягиваясь к белизне с каждой стороны, пока, наконец, они совершенно в ней не исчезали. Тогда в этих частях круги казались черными и белыми, без всякой другой примешанной окраски. Но при дальнейшем движении призм цвета снова появлялись из белизны: фиолетовый и синий — на внутреннем лимбе, красный и желтый — на внешнем лимбе. Теперь порядок цветов от центрального пятна был белый, желтый, красный, черный, фиолетовый, синий, белый, желтый, красный и т. д., т. е. противоположный прежнему. (...)

Наблюдение 4. Для более тонкого наблюдения порядка цветов, возникающих из белых кругов по мере того, как лучи делаются все менее и менее наклонными к воздушной пластинке, я взял два объективных стекла: одно плосковыпуклое для телескопа в четырнадцать футов и другое — широкое двояковыпуклое от телескопа около пятидесяти футов; наложив на последнее стекло первое плоской его стороной вниз, я слегка сжимал их вместе для того, чтобы заставить цвета последовательно возникать в середине кругов, и постепенно поднимал верхнее стекло над нижним для того, чтобы цвета последовательно снова исчезали на том же месте. Окраска, появлявшаяся последней при сжатии стекол в середине других цветов, при первом своем появлении была похожа на круг почти однородного цвета от окружности к центру; при дальнейшем сжатии стекол этот круг становился шире, пока в его центре не появился новый цвет и круг не делался кольцом, окружающим этот новый цвет. Дальнейшее сжатие увеличивает диаметр этого кольца, ширина же его орбиты или периметра убывает до тех пор, пока в центре не появится новый цвет. И так же возникают последовательно третий, четвертый, пятый и другие следующие новые цвета и становятся кольцами, окружающими внутренние цвета, из которых последним было черное пятно. И, наоборот, при подъеме верхнего стекла над нижним диаметр колец убывает, ширина же их орбит возрастает до тех пор, пока их цвета не дойдут последовательно до центра; при этом они имеют значительную ширину (И я мог легче различить и разобрать их вид, чем раньше. Таким способом я наблюдал их последовательность и количество, как о том следует ниже).

За прозрачным центральным пятном, появившимся при соприкосновении стекол, следовали синий, белый, желтый и красный, Синий был в столь малом количестве, что я не мог различить его в кругах, полученных при помощи призм, не мог в них я хорошо разобрать и фиолетовый, однако желтый и красный были очень

обильными и, казалось, простирались на столько же, как и белый, и в четыре или пять раз больше синего. Следующие круги в порядке цветов, непосредственно окружавшие предыдущие, были фиолетовый, синий, зеленый, желтый и красный; все они были обильны и ярки, за исключением зеленого, который находился в малом количестве и казался более слабым и размытым, чем другие цвета. Из остальных четырех фиолетовый распространялся меньше всех и синий меньше, чем желтый или красный. Третья окружность или порядок был таков: пурпуровый, синий, зеленый, желтый и красный, причем пурпуровый был красноватее, чем фиолетовый в предыдущей окружности, и зеленый был значительно отчетливее, являясь столь же живым и обильным, как и другие цвета, за исключением желтого; однако красный стал немного бледнее, очень сильно склоняясь к пурпуровому. После этого следовала четвертая окружность — зеленая и красная. Зеленый был очень обильным и живым, склоняясь с одной стороны к синему и с другой к желтому. Но в этой четвертой окружности не было ни фиолетового, ни синего, ни желтого, красный же был очень несовершенным и грязным. Последующие цвета становятся все более и более несовершенными и размытыми, пока после трех или четырех смен не переходят в совершенную белизну. (...)

Наблюдение 5. Для определения промежутка между стеклами, или толщины воздуха, лежащего между ними, при помощи которого производится каждый цвет, я измерил диаметры первых шести колец в наиболее ярких частях их орбит и нашел, что их квадраты находятся в арифметической прогрессии нечетных чисел: 1, 3, 5, 7, 9, 11. И так как одно из этих стекол было плоским, другое — сферическим, то промежутки между ними при этих кольцах должны быть в той же прогрессии. Я измерил также диаметры слабых или темных колец между наиболее блестящими цветами и нашел, что их квадраты располагаются в арифметическую прогрессию четных чисел: 2, 4, 6, 8, 10, 12. Производить эти измерения — дело тонкое и трудное; я повторял их несколько раз в различных частях *стекла*, чтобы по согласию убедиться в них. Тот же метод я применял, делая определения и в некоторых других из следующих наблюдений. (...)

Наблюдение 9. Смотря через два соприкасающихся объективных стекла, я нашел, что промежуточный воздух обнаруживает цветные кольца столь же хорошо и в проходящем свете, как в отраженном. Центральное пятно было теперь белым, Я от него порядок цветов был такой: желтовато-красный, черный, фиолетовый, синий, белый, желтый, красный, фиолетовый, синий, зеленый, желтый, красный и т. д. Но эти цвета были очень слабыми и размытыми, если только свет не пропускаться через стекла очень отлого, ибо таким способом они становились очень живыми. Только первый желтовато-красный, подобно синему в четвертом наблюдении, был столь незначительным и слабым, что едва различался. Сравнивая окрашенные кольца, получае-

чем на открытом воздухе. Иногда я видел их более двадцати, в то время как на открытом воздухе не мог различить свыше восьми или девяти. (...)

Комментарий

Перевод с латинского «Математических начал натуральной философии» И. Ньютона выполнен А. Н. Крыловым. (Первое издание: Newton /*. Philosophia naturalis principia mathematica. Londoni, 1687.*)

Отрывки воспроизводятся по изданию: Собрание трудов академика А.Н.Крылова. Т. VII. М. — Л., 1936.

Перевод «Оптики» И. Ньютона с третьего английского (прижизненного) издания выполнен С. И. Вавиловым (Newton /*. Optics: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light. London, 1721.*). Отрывки воспроизводятся по изданию: Ньютон И. Оптика. М., 1954.

¹ С одной стороны, очевидно, что здесь Ньютон говорит о важнейшем свойстве тел — инертности, и, следовательно, это определение отражает реальность. С другой стороны, в этом месте Ньютон приписывает всем телам «врожденную» силу инерции, существующую независимо от системы отсчета. Такой взгляд в дальнейшем не был принят физиками. Это свидетельствует о сложности процесса формирования основных понятий механики.

² В следующих определениях (V — VIII) Ньютон дает классификацию сил, которая не прижилась в физике и представляет лишь исторический интерес.

³ Здесь Ньютон ссылается на математическую лемму, утверждающую, что «предельное отношение (т.е. отношение при стремлении величин к нулю) дуги, хорды и касательной друг к другу равно единице».

⁴ Речь идет об одной из теорем, касающихся центростремительной силы.

В оригинале заглавие звучит как «Regulae philosophandi», т. е. «правила философствования».

⁶ Указанное предложение звучит так: «Массы маятников, у которых расстояния центра качания до центра подвеса одинаковы, относятся между собою, как произведение весов маятников на квадраты времен их размахов в пустоте».

⁷ Указанное предложение сформулировано Ньютоном так: «В системе многих тел А, В, С, D и т. д. если какое-либо тело А притягивает все прочие с ускорительными силами, обратно пропорциональными квадратам расстояний до этого притягивающего тела, если также и второе тело В притягивает все прочие тела А, С, D и т. д. с силами, обратно пропорциональными квадратам расстояний до этого притягивающего тела, то абсолютные силы притягивающих тел А и В будут относиться друг к другу, как массы соответствующих тел. коим эти силы принадлежат».

- ⁸ Указанное предположение гласит, что если на частицу, помещенную вне шара, действуют силы, обратно пропорциональные квадратам расстояний до его точек, то данная частица притягивается к шару с силой, обратно пропорциональной квадрату ее расстояния до центра шара.
- ⁹ В предложении XXV речь идет о взаимодействии двух шаров, частицы которых взаимодействуют по закону обратных квадратов, а в предложении XXI — о притяжении частицы к сфере.
- ¹⁰ Этот метод установки призмы на угол наименьшего отклонения сохранился и в современной спектроскопии.
- ¹¹ Не обнаружив зависимости длины спектра от вещества, Ньютон делает ошибочный вывод о постоянстве дисперсии для всех веществ. Это привело его к заключению о невозможности избавиться от хроматической абберации в линзах. Ошибочность этого утверждения была доказана Л. Эйлером, а в 1757 г. был построен ахроматический объектив.
- ¹² Шестой опыт Ньютон считал решающим (*experimentum crucis*) и во время дискуссий вокруг его теории (1672—1675) предлагал оппонентам обратить на него особое внимание.

Литература

- [1] Основные издания трудов И. Ньютона:
 а) Isaac Newton's *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Vols. 1—2. Cambridge, 1972.
 б) *Optica*... Londoni, 1706.
 в) *The mathematical papers of Isaac Newton*. Ed. by D. T. Whiteside. Vols. 1—7. Cambridge, 1967—1976.
 г) *The correspondence of Isaac Newton*. Ed. by H. W. Turnbull. Vols. 1—7. Cambridge, 1959—1977.
- [2] Brewster D. *Memoirs of life, writings and discoveries of Sir Isaac Newton*. Vols. 1—2. Edinburgh, 1855—1856.
- [3] Westfall R. *Never at rest: A biography of Isaac Newton*. Cambridge, 1982.
- [4] *Methodological heritage of Newton*. Ed. by R. E. Butts, J. W. Davis.
- [5] Вавилов С. И. *Исаак Ньютон*. М., 1989.
- [6] Кобзарев И. Ю. *Ньютон и его время*. М., 1978.
- [7] Погребысская Е. И. *Оптика Ньютона*. М., 1981.



В. Гершель

1738—1822

Об инфракрасном излучении

В современной физике к оптическому диапазону шкалы электромагнитных волн относят инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения. Причина объединения разных видов излучения в одном диапазоне состоит в общности ряда их свойств. Процесс осознания этой общности составляет важную страницу в истории физики. Вследствие относительной простоты экспериментирования с инфракрасными лучами этот вид излучения практически сразу же после его открытия стал предметом многочисленных исследований. Обнаружение сходства многих явлений, характерных для видимого и теплового излучений, сыграло важную роль в установлении связи оптики с другими разделами физики. Инфракрасное излучение было открыто в 1800 г. В. Гершелем, к тому времени уже снискавшим славу выдающегося астронома.

Вильям (Фридрих Вильгельм) Гершель родился в Ганновере (Германия) 15 ноября 1738 г. в семье военного музыканта. Поначалу юноша пошел по стопам отца, став гобоистом в оркестре. В 1757 г. он переехал в Англию, которая стала его второй родиной. В первые годы жизни в Англии Гершель добывал средства к существованию уроками музыки и исполнительской деятельностью. Свой досуг он посвящал изучению иностранных языков и чтению. Увлечение теорией музыкальной гармонии привело его к занятиям математикой, затем он обратился к оптике, от нее перешел к астрономии. С 1773 г., когда мастер-самоучка впервые самостоятельно изготовил зеркальная телескопа-рефлектора, начинается многолетняя плодотворная научная работа Гершеля, результаты которой сделали его одним из ведущих астрономов-наблюдателей своего времени. За заслуги перед наукой Гершель был избран членом Лондонского Королевского общества, а затем и членом ряда других научных организаций (в том числе с 1789 г. он был почетным членом Петербургской АН). В 1782 г. король Георг III назначил Гершеля королевским астрономом, что позволило ученому сосредоточить все силы на научных исследованиях. Достижениям Гершеля во многом способствовала помощь, которую оказывала ему сестра Каролина — одна из первых женщин-астрономов.

Увлечение астрономией в семье Гершеля стало наследственным — его сын Джон стал астрономом с мировым именем. Умер В. Гершель 25 августа 1822 г.

Успех наблюдательной деятельности Гершеля связан прежде всего с высоким качеством изготавливавшихся им самим телескопов. Его инструменты по своим размерам и разрешающей силе превосходили все другие телескопы той эпохи (крупнейший 40-футовый телескоп-рефлектор Гершеля имел диаметр зеркала 48 дюймов). Даже неполное перечисление достижений Гершеля в астрономии показывает, насколько велик его вклад в эту науку: открытие Урана (1781), двух спутников Сатурна (1789), изменение периода вращения Сатурна и его колец (1790), открытие более 2500 туманностей и звездных скоплений, в том числе 182 двойных и кратных туманностей, и т. д. При исследовании собственных движений звезд ученый обнаружил движение Солнечной системы в пространстве. Гершель способствовал и развитию методологии астрономии. Так, он использовал специальный «метод черпков» (т. е. подсчет звезд в избранных площадках небесной сферы), позволивший ему очертить форму Галактики и оценить ее размеры. В итоге им был сделан правильный вывод об изолированности нашей Галактики во Вселенной. Значительный интерес представляет и концепция Гершеля об эволюции космической материи, составной частью которой является небулярная звездно-космогоническая гипотеза сгущения звезд и их скоплений из диффузной материи.

На фоне почти непрерывного потока астрономических открытий Гершеля его основное достижение в физике — открытие инфракрасного излучения — может показаться случайным. Это, однако, не так. Занимаясь исследованием Солнца, Гершель искал способ уменьшения нагрева инструмента, с помощью которого велись наблюдения. Для этого он решил определить, различаются ли в смысле нагрева действия различных частей видимого спектра. Для этого ученый получал на поверхности стола призматический спектр и помещал в различные его части один из двух идентичных по чувствительности термометров, в то время как второй оставался неосвещенным и служил в качестве контрольного. Регистрируя увеличение показаний освещенного термометра, Гершель обнаружил, что «максимум тепла» лежит, вероятно, за насыщенным красным цветом и, возможно, «за видимым преломлением». Вслед за этим наблюдением, о котором Гершель сообщил Лондонскому Королевскому обществу¹, он провел подробное исследование распределения лучистой энергии в спектре, создаваемом призмой. Это исследование и положило начало изучению инфракрасного излучения. Ниже приводится текст этой статьи Гершеля. После нее он опубликовал еще одну работу², посвященную сравнению свойств этого вида излучения со свойствами видимого света. Гершель пришел к выводу о близости эффектов, производимых невидимым инфракрасным излучением и светом, и высказал гипотезу о единстве природы двух видов

излучения. Дальнейшие эксперименты с инфракрасными лучами, проведенные в первой половине XIX в. Л. Нобили, М. Меллони, Дж. Форбсом и другими учеными, полностью подтвердили гипотезу Гершеля, а теория электромагнитного поля Максвелла дала этой гипотезе теоретическое обоснование.

Опыты ПО преломляемости невидимых солнечных лучей

В той части моей предыдущей работы, где трактуется о лучистой теплоте, был сделан намек, хотя и на основе несовершенных опытов, что диапазон ее преломляемости, вероятно, шире, чем у призматических цветов; и поскольку недавно стояла благоприятная солнечная погода и было получено достаточное подтверждение этого факта, целесообразно добавить следующие эксперименты к тем, что уже описаны. Я запасся небольшой подставкой на четырех коротких ножках и покрыл ее белой бумагой [рис. 70]. На ней я провел пять линий, параллельных одному из краев подставки, на расстоянии $\frac{1}{4}$ дюйма друг от друга, но так, что первая линия могла быть удалена от края не более чем на $\frac{1}{4}$ дюйма. Эти линии я пересек под прямым углом тремя другими, из которых вторая и третья находились соответственно в $2\frac{1}{2}$ и 4 дюймах от первой. Те же термометры, которые раньше обозначались № 1, 2 и 3, укрепленные на своих маленьких наклонных плоскостях, были затем установлены так, чтобы центры тени от их шариков отбрасывались на пересечении упомянутых линий. Затем, установив мою маленькую подставку на стол, я заставлял призматической спектр падать так, что крайний цвет попадал на край бумаги и ничего не могло проходить за первую линию. При таком расположении весь спектр, исключая ничтожную последнюю четверть дюйма, которая служила направляющей, находился за краем подставки и не мог мешать эксперименту. На этот раз я к тому же воспользовался предосторожностью, затемнив окно, в котором была установлена призма, путем укрепления темно-зеленых штор, с тем чтобы оставалось столько света, сколько удобно.

Когда термометры приняли в точности температуру комнаты, я расположил подставку так, что часть красного цвета, преломленного призмой, падала на край бумаги перед термометром № 1 примерно на полпути, или $1\frac{1}{4}$ дюйма, от термометра № 2. Следовательно, красный цвет не был близок ни к термометру № 2, ни к термометру № 3, которые должны были служить эталонами. Во время эксперимента я удерживал конец видимого красного цвета в точности на первой линии, как на положенном ему пределе, слегка перемещая подставку, когда это было необходимо, и обнаружил, что термометры, находившиеся все на второй линии, показали следующее. В данном случае, когда центр

Таблица 1

№ 1	№ 2	№ 3
45	45	44
49	45	44
51	$44\frac{3}{4}$	44
$50\frac{1}{4}$	$43\frac{3}{4}$	$43\frac{1}{2}$

Таблица 3

№ 1	№ 2	№ 3
46	46	$45\frac{3}{4}$
50	$46\frac{1}{2}$	46
$51\frac{3}{4}$	$46\frac{3}{4}$	$46\frac{1}{4}$
$52\frac{1}{4}$	47	$46\frac{3}{4}$

Таблица 5

№ 1	№ 2	№ 3
48	48	$47\frac{3}{4}$
48	48	$47\frac{3}{4}$
48	$47\frac{1}{2}$	47
$48\frac{1}{2}$	$47\frac{1}{2}$	47
48	48	$47\frac{3}{4}$

Таблица 7

№ 1	№ 2	№ 3
$48\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48
$55\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48
$55\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48

Таблица 9

№ 1	№ 2	№ 3
57	49	$48\frac{1}{2}$
$58\frac{1}{2}$	$49\frac{3}{4}$	49
59	$50\frac{1}{4}$	$49\frac{3}{4}$
59	50	$49\frac{1}{2}$

Таблица 2

№ 1	№ 2	№ 3
44	44	45
47	44	45
$46\frac{3}{4}$	44	45
$46\frac{3}{4}$	44	45

Таблица 4

№ 1	№ 2	№ 3
$48\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{4}$	$47\frac{3}{4}$
$51\frac{1}{2}$	$48\frac{3}{8}$	$47\frac{7}{8}$

Таблица 6

№ 1	№ 2	№ 3
48	48	$47\frac{3}{4}$
$48\frac{1}{2}$	48	$47\frac{3}{4}$
$48\frac{3}{4}$	$48\frac{1}{2}$	$47\frac{3}{4}$
49	$48\frac{1}{2}$	$47\frac{3}{4}$

Таблица 8

№ 1	№ 2	№ 3
$48\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48
$55\frac{1}{2}$	$48\frac{1}{2}$	48
57	49	$48\frac{1}{2}$

Таблица 10

№ 1	№ 2	№ 3
$50\frac{1}{2}$	$50\frac{1}{2}$	50
$57\frac{3}{4}$	50	$49\frac{1}{2}$
$58\frac{1}{2}$	50	$49\frac{1}{2}$
$58\frac{3}{4}$	50	$49\frac{1}{2}$

исполнено с некоторым трудом, поскольку освещенность фиолетовыми лучами настолько слаба, что нельзя уловить их точное окончание. Однако, насколько можно было судить, я поместил термометры на 1 дюйм за предел досягаемости фиолетовых лучей и получил такие результаты. Теперь несколько показаний термометров, два из которых, № 1 и 2, использовались как переменные, тогда как № 3 оставался эталоном, считывались в течение 12 мин. Однако, как можно видеть при внимательном рассмотрении, результаты не дают оснований приписывать какому-либо из их малых изменений другую причину, чем случайное возмущение, которое должно происходить от движения воздуха в комнате, где проводятся какие-то работы [табл. 5].

Затем я поставил термометры на линию самого первого заметного фиолетового света, но так, что № 1 и № 2 вновь были освещены, тогда как № 3 оставался эталоном. Результаты оказались следующими. Термометр № 3 поднялся за 15 мин на 1° ; а термометр № 2 — на $\frac{1}{2}$ за то же время. Эти последние эксперименты в достаточной степени убедили меня в том, что никакие лучи, которые могут падать за фиолетовым [цветом], не могут иметь ощутимой способности ни к освещению, ни к нагреванию и что обе эти способности сосуществуют на протяжении всего призматического спектра и заканчиваются там, где исчезает самый слабый фиолетовый [свет] [табл. 6].

Оставалось решить еще один очень существенный вопрос, а именно: определить положение максимума нагревательной способности. Поскольку я уже знал, что он не лежит с фиолетового края красного [света], я начал с полновесного красного цвета и поместил расположенные в линию термометры так, чтобы иметь шарик термометра № 1 в середине таких лучей, в то время как другие два термометра оставались в стороне и не были подвержены их действию. В этом случае термометр № 1, подставленный под полновесные лучи, поднялся на 7° за 10 мин [табл. 7].

Я сдвигал подставку назад до тех пор, пока центр шарика термометра № 1 не оказался в точности в исчезающем красном цвете, так что половина его шарика была внутри, а половина — вне видимых солнечных лучей. Здесь термометр № 1 поднялся на 8° за 10 мин.

Не теряя времени, дабы лучше связать вместе эти последние наблюдения, я не стал возвращать термометр № 1 к комнатной температуре, будучи уже хорошо знаком со скоростью [изменений] его показаний в сравнении с № 2, а перешел к следующему эксперименту, сдвинув подставку настолько, что шарик термометра № 1 был полностью вне видимых солнечных лучей, помещая всё же линию границы красного цвета столь близко к наружной стороне шарика, сколь было возможно без того, чтобы коснуться его. Здесь термометр № 1 за 10 мин поднялся еще на 1° по сравнению с тем, насколько он смог подняться в его предшествующем положении; теперь это составляло 9° выше эталона. Шарик этого термометра имел диаметр в точности полдюйма, и поэтому его

центр находился на $\frac{1}{4}$ дюйма за видимым освещением, действию которого не подвергалась ни одна его часть [табл. 8, 9].

Для получения истинного максимума было бы неправильно сравнивать эти последние наблюдения с теми, что были выполнены раньше этим же утром, поскольку теперь солнце было сильнее, чем в тот период времени. По этой причине я сделал так, чтобы линия окончания видимого света снова находилась на расстоянии $\frac{1}{2}$ дюйма от этого шарика, и получил такие результаты. Теперь, когда центр шарика термометра № 1 находился на расстоянии $\frac{1}{2}$ дюйма от видимых солнечных лучей, он за 16 мин поднялся на $8\frac{3}{4}^\circ$, и разность слишком незначительна, чтобы предположить, что последнее положение термометра было гораздо дальше максимума нагревательной способности; хотя в то же время эксперимент в достаточной степени указывает, что нет необходимости искать место, о котором идет речь, на большем расстоянии [табл. 10].

Теперь легко уложить полученные результаты в очень узкие рамки. Первые четыре эксперимента доказывают, что существуют лучи, приходящие от Солнца, которые преломляются слабее, чем любые из лучей, действующих на глаз. Они наделены сильной способностью к нагреву тел, но лишены способности освещать тела. Это и объясняет причину, почему до сих пор они ускользали от внимания. В мои намерения не входит указание угла наименьшего преломления для этих лучей, поскольку для этой цели необходимы более точные, повторяющиеся и пространственные опыты. Но на расстоянии 52 дюйма от призмы все еще имелась значительная способность к нагреву, проявляемая нашими невидимыми лучами на расстоянии $1\frac{1}{2}$ дюйма за красными лучами, измеренном по их проекции на горизонтальную плоскость. У меня нет сомнений, что их действительность может быть прослежена и несколько далее. Опыты 5 и 6 показывают, что способность к нагреванию тянется до крайних пределов видимых фиолетовых лучей, но не далее их; и она постепенно ослабляется по мере того, как лучи становятся все более преломляемыми. Последние четыре эксперимента доказывают, что максимум нагревательной способности находится в невидимых лучах, и, вероятно, он находится на расстоянии не менее полудюйма за последними видимыми лучами, когда они проецируются так, как указано выше. Эти эксперименты показывают также, что невидимые солнечные лучи в своем наименее преломляемом состоянии

значительно дальше максимума все еще демонстрируют способность к нагреванию, полностью равную способности к нагреванию красного света. Следовательно, если мы можем вывести количество действующего фактора из производимого действия, то по числу невидимые солнечные лучи, возможно, значительно превышают видимые.

В заключение, если мы называем светом те лучи, которые освещают объекты, и лучистым теплом те, что нагревают тела, то можно задать вопрос: существенно ли отличается свет от лу-

чистой теплоты? Ответ, который я мог бы предложить, состоит в том, что по правилам философствования мы не можем принять две разные причины для объяснения определенных эффектов, если их можно отнести за счет одной. Пучок лучистого тепла, исходящий от Солнца, состоит из лучей, по-разному преломляющихся. (...) Если это правильное описание солнечного тепла, в поддержку которого я ссылаюсь на свои опыты, то нам остается лишь принять, что те солнечные лучи, которые имеют преломляемость лучей, содержащихся в призматическом спектре, благодаря строению органов зрения воспринимаются под видом света, а остальные, будучи задержанными оболочками и соками глаза, действуют на органы зрения, как и на все другие части нашего тела, вызывая ощущение тепла.

Комментарий

Перевод с английского работы В. Гершеля выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: *Philosophical Transactions*, 1800, vol. 90, Pt. 11, p. 284. Название работы на языке оригинала: «Experiments on the Refrangibility of the invisible Rays of Sun».

¹ Речь идет о статье Гершеля «Исследование способности призмных цветов нагревать и освещать тела; с замечаниями, которые доказывают различную преломляемость лучистой теплоты; к чему прибавлено исследование метода удобного наблюдения Солнца посредством телескопов с большой апертурой и высоким увеличением». В ней Гершель предложил использовать в качестве фильтра, уменьшающего нагрев телескопа, слой воды, подкрашенной чернилами.

² Эта работа называется «Опыты с солнечными и земными лучами, которые вызывают тепло; со сравнительным обзором законов, которым подчиняются свет и теплота, или, точнее, лучи, которые их вызывают, с целью определить, одинаковы они или различны».

³ Гершель измерял изменение температуры в градусах шкалы Фаренгейта.

Литература

- [1] Собрание научных трудов В. Гершеля: *The Scientific Papers of Sir William Herschel*. Vols. 1—2. London, 1912.
- [2] King H. C. *Sir William Herschel and the discovery of radiant heat*. «Journal of British Astronomical Association», 1955, vol. 65, n 7.
- [3] Еремеева А. И. *Вселенная Гершеля*. М., 1966.



А. Вольта

1745—1827

Об электрическом токе

Основное внимание исследователей XVIII в., занимавшихся проблемами электричества, было сосредоточено на электростатических явлениях. Хотя Б. Франклин еще в конце 40-х годов XVIII в. доказал электрическую природу молнии, это атмосферное явление не было осознано как принципиально новое проявление электричества — ток. Поэтому столь большой эффект произвело открытие итальянского анатома и физиолога Л. Гальвани, обнаружившего в 1780 г. сокращение мышц препарированной лягушки при прикосновении к ним двух разнородных металлов, между которыми имеется электрический контакт. Гальвани не сумел найти правильное объяснение открытого им эффекта и выдвинул идею о существовании так называемого «животного электричества». С критикой взглядов Гальвани выступил другой итальянский ученый А. Вольта. Дискуссия с Гальвани привела Вольту в конечном счете к созданию первого источника постоянного тока, открывшего новую эпоху в исследовании электричества.

Аlessandro Вольта родился 18 февраля 1745 г. в небольшом городе Комо (близ Милана) в знатной дворянской семье. С ранних лет он проявлял интерес к естественным наукам, особенно к молодой тогда области электричества. Первая печатная работа Вольты увидела свет, когда ему было 24 года, она была посвящена развитию теории лейденской банки. Начинаящий исследователь обратил на себя внимание и получил место преподавателя физики в школе родного города. К этому времени относятся исследования Вольты по химии и изобретение ряда физических и химических приборов. Он исследовал горючие газы, открыл болотный газ (метан) и пришел к выводу, что последний образуется вследствие разложения животных и растительных останков, тогда как в этот период в химии господствовало представление о чисто минералогическом происхождении горючих газов. Он изобрел, в частности, водородную лампу и эвдиометр, употребляемый при газовом анализе.

Всемирную известность принесло Вольте изобретение электрофора (1777). В том же году он стал профессором физики в университете Павии, с которым связана вся дальнейшая твор-

ческая жизнь ученого вплоть до ухода в отставку в 1819 г. Последние годы жизни, отойдя от научных исследований, он провел безвыездно в родном городе, где умер 5 марта 1827 г.

К началу дискуссии с Гальвани Вольта был уже известным ученым, особенно авторитетным в вопросах, связанных с электричеством. Кроме изобретения электрофора Вольте принадлежит создание чувствительного электроскопа с соломинками, плоского конденсатора, обнаружение проводимости пламени.

Поначалу Вольта, настроенный идеей о «животном электричестве», с недоверием отнесся ко всей работе Гальвани. Тщательно повторив его опыты, Вольта убедился в точности сделанных Гальвани наблюдений. Однако сомнения в справедливости их объяснения остались.

В результате многочисленных опытов и тонких рассуждений в 1793 г. Вольта пришел к выводу, что эффекты, обнаруженные Гальвани, не являются порождением самого организма, а возникают как следствия соприкосновения разнородных металлов. Он определяет «контактный ряд» металлов, создающих «напряжения» при соприкосновении.

Вольта продолжает исследования с целью повышения контактного напряжения. Он строит цепи, состоящие из различных металлов, надеясь, что это приведет к увеличению конечного результата. Но эта надежда не сбылась: в 1796 г. ученый сформулировал закон, согласно которому напряжение между крайними металлами в цепи, составленной из различных проводников, равно напряжению, которое устанавливается при непосредственном контакте крайних металлов незамкнутой цепи. Эти исследования и привели ученого к изобретению вольтова столба — первого источника постоянного электрического тока. Араго писал, что прибор Вольты «был самым замечательным прибором, когда-либо изобретенным людьми, не исключая телескопа и паровой машины».

Мир узнал об этом изобретении из письма ученого президенту Лондонского Королевского общества Дж. Бэнксу, датированного 20 марта 1800 г. Уже вскоре во многих странах ученые начали создавать «вольтовы столбы» и исследовать новые физические явления. Так, в том же году А. Фуркруа обнаружил тепловое действие электрического тока, а У. Никольсон и А. Карлейль открыли явление электролиза. В 1802 г. русский физик В. В. Петров с помощью гигантской батареи, составленной из элементов Вольты, впервые получил электрическую дугу.

Впечатление, которое произвело на научный мир открытие Вольты, характеризуется тем, что ученого пригласили во Францию и в Англию для демонстрации его «столба». В Париже он показывал опыты на заседании Академии наук, на котором присутствовал Бонапарт. За большой вклад в науку Вольта был удостоен ряда наград, был избран иностранным членом Лондонского Королевского общества и Академии наук Франции.

Об электричестве, возбуждаемом простым соприкосновением различных проводящих веществ

Комо, 20 марта 1800 года

После долгого молчания, в чем я не стану оправдываться, я хочу сообщить Вам, а через Вас Королевскому обществу о некоторых поразительных результатах, к коим я пришел во время моих опытов с электричеством, возбуждаемым простым взаимным соприкосновением двух различных металлов, и даже иных проводников также различной природы, жидких или содержащих некоторую влагу, которой они как раз и обязаны своею проводимостью.

Самым основным и включающим почти все остальные результаты является постройка прибора, сходного по эффектам, т. е. по сотрясению, вызываемому в руках и т. д., с лейденскими банками или с такими электрическими слабо заряженными, но непрерывно действующими батареями, где бы заряд после каждого взрыва восстанавливался сам собой; одним словом, этот прибор обладает бесконечным зарядом, постоянным импульсом или действием электрического флюида. Но он в то же время значительно отличается от них и непрерывным, ему свойственным действием, и тем, что он состоит исключительно из нескольких неэлектриков, выбранных среди самых лучших проводников, а потому совсем не обладающих, как считалось до сих пор, электрической природой. Лейденские же банки и электрические батареи, как известно, состоят из одной или более изолированных пластинок, из тонких слоев вещества, обычно считаемых электрическими, и снабжены проводниками или так называемыми неэлектрическими телами. Действительно, мой прибор, который несомненно удивит Вас, представляет собой собрание некоторого количества хороших проводников разного рода, расположенных в известном порядке. Его образуют 30, 40, 60 (и более) кусков меди (или лучше серебра), наложенных каждый на кусок свинца (или лучше цинка), и такого же количества слоев воды или другого лучшего жидкого проводника, как, например, соленая вода, щелок и т. п., или кусков картона, кожи и т. п., пропитанных этими жидкостями. Мой новый прибор состоит, таким образом, из указанных слоев, помещенных между каждой парой, или комбинацией из двух различных металлов, из такой перемежающейся последовательности и всегда в одном порядке, этих трех проводников. Он по своим действиям подражает лейденским банкам или электрическим батареям, вызывая такие же сотрясения, как и они. Он, правда, значительно отстает от этих батарей, даже сильно заряженный, в отношении силы взрыва, искры, расстояния, на котором происходит заряд, и т. п. и действует как очень слабо заряженная ба-

тарей, в то же время обладающая огромной емкостью. С другой стороны, он бесконечно превосходит силу и возможности этих же батарей, ибо не требует предварительной зарядки посторонним электричеством и вызывает сотрясение всякий раз, когда к нему прикасаются надлежащим образом, сколько бы раз это ни проделывалось.

Этот прибор, более сходный по существу, как я покажу дальше, с естественным электрическим органом электрического ската или электрического угря и т. п., чем с лейденской банкой и известными электрическими батареями, я назову искусственным электрическим органом². На самом деле, разве он не состоит также только из проводников? Разве он, кроме того, не активен сам по себе без предварительного заряжения, без всякого электричества, возбуждаемого каким-либо из известных методов, но действует беспрестанно и безостановочно, вызывая в любой момент более или менее сильные сотрясения, возобновляющиеся при каждом прикосновении, которые при частом повторении создают то же ощущение органов, как и при прикосновениях к скату?

Я опишу подробнее этот и аналогичные приборы, а также самые замечательные из относящихся сюда опытов.

Я заготовил несколько дюжин небольших круглых пластинок или дисков из меди, латуни и лучше всего серебра с диаметром примерно 1 дюйм и такое же количество оловянных пластинок (или еще лучше цинковых) примерно той же формы и величины. Я говорю примерно, потому что точность здесь не имеет значения и вообще величина и форма металлических частей произвольны. Самое важное, чтобы их можно было удобнее поместить одну над другой в виде столба. Кроме того, я приготовил большое количество кружков из картона, кожи или любого губчатого материала, впитывающего и задерживающего много воды или другой жидкости, которой они должны быть сильно смочены для успешного опыта. Эти кружки, которые я буду называть мокрыми дисками, делаются несколько меньше, чем металлические, чтобы, находясь между последними, они не выходили за их края.

Когда все это находится у меня под рукой и в надлежащем порядке, т. е. металлические диски в сухом и чистом виде, а неметаллические — хорошо пропитаны простой водой (или еще лучше соленой) и слегка отжаты, чтобы жидкость не стекала, я их складываю в должной последовательности.

Я кладу на стол или на какую-нибудь опору одну из металлических пластинок, например серебряную, а на нее цинковую и затем мокрый диск и т. д. в том же порядке. Всегда цинк должен следовать за серебром или наоборот в зависимости от расположения их в первой паре, и каждая пара перекаладывается мокрым диском. Таким образом, я складываю из этих этажей столб такой высоты, который может держаться не обрушиваясь.

Если он содержит около 20 подобных этажей, то он не только показывает на электрометре Кавалло,³ снабженном конденсатором,

свыше 10 или 15°, и заряжает этот конденсатор простым прикосновением, так что получается искра и т. п., но и ударяет в пальцы, если касаться ими его двух концов (верхушки и основания столба) двумя или несколькими слабыми и более или менее частыми толчками в зависимости от частоты этого соприкосновения. Эти удары вполне сходны с легким сотрясением, испытываемым при касании к лейденской банке, слабо заряженной, или к ослабевшему скату, который больше походит на мой прибор своими без конца повторяющимися ударами.

Чтобы получились эти слабые сотрясения, описанные мною, необходимо, чтобы пальцы, которыми одновременно касаются двух концов, были смочены водой, ибо в противном случае кожа является недостаточно хорошим проводником. Чтобы результаты были еще надежней и сотрясения сильнее, необходимо соединить основание столба, т. е. диск дна, при помощи достаточно широкой пластинки или толстой металлической проволоки с водой довольно большого таза и чашки, куда опускают один, два, три пальца или всю руку, касаясь одновременно верхнего края (последнего или одного из последних дисков столба) концом металлической пластинки, находящейся в другой сильно смоченной руке, причем рука должна охватывать большую ее часть и сильно ее сжимать. Уже ощущается легкое покалывание или сотрясение в одном или двух суставах пальца, погруженного в воду таза, если касаться пластинкой в другой руке четвертой и даже третьей пары дисков. Если прикасаться к 5-й, затем 6-й паре их, переходить постепенно все выше и выше к вершине столба, то можно ясно наблюдать, как постепенно увеличивается сила сотрясений. Сила, полученная от колонны, состоящей из 20 пар дисков (не более), такова, что происходят сотрясения, ощущаемые всем пальцем, притом довольно болезненные, если он один был погружен в воду таза. Они распространяются до запястья (но без всякой боли) и даже до локтя, если вся рука целиком или частично была опущена в таз, и даже чувствуются в запястье другой руки.

Я предполагаю, что были приняты все меры для надлежащей конструкции такого столба, что каждая пара металлов, состоящая из серебряного и цинкового дисков, сообщается со следующей парой таких же дисков при помощи достаточного слоя влаги, например чистой воды и, еще лучше, соленой, или же при помощи диска из картона, кожи или чего-либо подобного, хорошо пропитанного этой соленой водой. Этот диск не должен быть слишком маленьким, и поверхности его должны плотно прилипать к поверхностям металлических пластинок, которые он разделяет. Это чрезвычайно важное условие. Что касается металлических пластинок каждой пары, то они могут касаться друг друга лишь в нескольких точках.

Мимоходом замечу, что если для свободного прохождения электрического тока средней силы достаточно соприкосновения металлов (прекрасных проводников) всего лишь в нескольких

точках, то жидкости или тела, пропитанные влагой, являющиеся худшими проводниками, требуют широкой площади касания с металлическими проводниками, а еще более между собой, чтобы электрический ток легко проходил и не задерживался на своем пути, особенно если он движется с незначительной силой, как в нашем случае.

В общем, действие (испытываемое сотрясение) моего прибора возрастает по мере увеличения температуры окружающего воздуха, или воды, или смоченных дисков, входящих в состав столба или даже воды таза, так как тепло *улучшает* проводимость воды, еще лучше она становится от всех солей и, в частности, от поваренной соли. Вот одна из причин, вернее, даже единственная, почему лучше применять соленую воду в тазах и в промежутках между металлическими дисками, а также для пропитки картонных и т. п. дисков, как я уже указывал выше.

Но все эти меры приводят все-таки к слишком незначительным результатам и слабым сотрясениям, если столб состоит всего лишь из 20 дисков, хотя бы они были из самых лучших металлов для данного опыта, таких, как серебро и цинк; будь они из серебра и свинца или олова, или из меди и олова, эффект был бы в два раза меньше, если не возместить их меньшую силу большим числом дисков. Таким образом, электрическая сила этого прибора увеличивается и доводится до силы ската, электрического угря или даже превышает при помощи большого числа дисков, расположенных так, как я указывал. Если к этим 20 парам прибавить еще 20 или 30 других, расположенных в том же порядке, то сотрясения, вызванные таким длинным столбом (я укажу потом, как его поддерживать, чтобы он не обрушился, или, еще лучше, разделить его на два столба или более), отличаются значительно большей силой и пройдут по двум рукам до плеча, особенно в руке, погруженной в воду. Эта рука с предплечьем немеет, если повторить сотрясения несколько раз и быстро друг за другом, и это происходит в том случае, если погружена в воду таза вся рука. Если же опустить туда один лишь палец, весь или часть его, то сотрясения, сконцентрированные на нем одном, будут так болезненны и жгучи, что вынести их невозможно.

Нужно думать, что этот столб, образуемый из 40 или 50 пар металлов и вызывающий довольно сильные сотрясения в руках одного лица, заставит почувствовать подобные сотрясения, хотя и в более слабой степени, ряд лиц, держащихся за руки (мокрые) и образующих непрерывную цепь.

Возвращаясь к описанию механической конструкции моего прибора, имеющего ряд вариантов, я опишу здесь не все те, которые я придумал и выполнил или в большом, или в малом масштабе, но лишь некоторые из них, самые любопытные или полезные, обладающие каким-либо действительным преимуществом, например более легким или быстрым выполнением, более надежной работой и лучшей сохранностью.



Рис. 71

Начнем с одного из них, объединяющего, может быть, все эти преимущества и в то же время отличающегося внешним видом от прибора со столбом, описанного выше. Недостаток его состоит в том, что он слишком объемист. Изображение этого прибора, который я назову устройством с цепью из чашек, дается на рис. 71.

Несколько стаканов из любого материала, кроме металлов, например из дерева, глины, черепахи и еще лучше хрусталя (особенно удобны маленькие кубки или стаканчики), наполняются наполовину чистой или соленой водой или щатокком. Они сообщаются друг с другом так, что образуется подобие цепи при помощи металлических дуг, из которых одно плечо Aa или только конец A , погруженный в стаканчик, сделан из красной или желтой меди или лучше из посеребренной меди, а другой Z^4 , опущенный в следующий стаканчик, — из олова или лучше из цинка. Замечу, что щелок и другие щелочные жидкости следует предпочесть, когда один из погруженных металлов — олово. Лучше применять соленую воду при цинке. Оба металла, образующие дугу, спаяны в любом месте выше части, погруженной в жидкость; эта последняя часть должна обладать довольно большой поверхностью. Поэтому она должна иметь вид пластинки в 1 кв. дюйм или около этого, остальная часть дуги может быть совсем тонкой, даже состоять из простой металлической проволоки. Она может быть совсем из другого металла, чем части, погруженные в жидкость стаканчиков, ибо действие электрического флюида всех контактов нескольких чередующихся металлов, или сила, с какой этот ток проталкивается до конца, почти или совсем равна получаемой при непосредственном контакте первого металла с последним без промежуточных контактов⁵, как я удостоверился на опытах, о чем я еще буду говорить.

Таким образом, ряд из 30, 40, 60 таких стаканчиков, связанных, как указано, друг с другом и расставленных или по прямой линии, или по кривой, или по изогнутой любым образом, образует новый прибор. Он по существу и по материалу есть тот же столб, что описан выше. Основное здесь в непосредственном сообщении между различными материалами, составляющими пару, и промежуточной связью между одной парой и другой, реализующейся при помощи влажного проводника, что имеет место как в первом, так и во втором приборе. (...)

Комментарий

Перевод с английского письма А. Вольты, опубликованного в «Philosophical Transactions» (1800, vol. 90, p. 403—431), выполнен М. И. Радовским. Отрывок из этого письма воспроизводится по изданию: Радовский М. И. Гальвани и Вольта. К 150-летию открытия электрического тока. М. — Л., 1941.

- ¹ «Неэлектриками» в XVIII в. называли проводники, которые невозможно было наэлектризовать.
- ² Позже французские физики начали называть прибор Вольты «вольтовым столбом», исходя из формы его первых образцов.
- ³ Электрометр Кавалло представлял собой пару бузиновых шариков, подвешенных на шелковых нитях, верхние концы которых закреплялись в одной точке.
- ⁴ Обозначения пластин A и Z соответствуют начальным буквам слов *argentum* (серебро) и *zincum* (цинк).
- ⁵ Здесь впервые формулируется закон Вольты.

Литература

- [1] Собрание сочинений А. Вольты: *La opere di Alessandro Volta*. Vols. 1—7. Milano, 1918—1929.
- [2] Maraldi U. *La vita di Alessandro Volta*. Firenze, 1959.
- [3] Dibner V. *Alessandro Volta and the electric battery*. N. Y., 1964.
- [4] Радовский М. И. Гальвани и Вольта. М. — Л., 1941.
- [5] Околотин В. Вольта. М., 1986.



Т. Юнг

1773—1829

Об интерференции света и ее проявлениях

Физическая оптика развивалась очень неравномерно. После плодотворного периода конца XVII в., ознаменовавшегося открытием интерференционных и дифракционных эффектов, установлением сложного состава белого света, доказательством конечности скорости распространения света, выдвижением двух основных гипотез — волновой и корпускулярной — о природе света, в XVIII в оптических исследованиях наступил спад. Хотя в этот период было открыто явление абберрации света, разработаны основы фотометрии и создан первый ахроматический рефрактор, продвижение в развитии представлений о природе света не наблюдалось. Выступления отдельных ученых (Л.Эйлер, М.В.Ломоносов) в защиту волновых представлений о свете не имели успеха, и подавляющее большинство ученых придерживалось корпускулярной концепции.

Начало коренных изменений в оптических исследованиях относится к первым годам XIX в., когда английский ученый Т. Юнг опубликовал ряд работ, в которых был сформулирован закон интерференции и даны примеры его применения для объяснения множества оптических явлений.

Томас Юнг родился 13 июня 1773 г. в Милвертоне (графство Сомерсет, Англия) в семье торговца тканями. Он был старшим сыном в большой семье, принадлежавшей к религиозной общине квакеров. Воспитывавшийся в строгих правилах этой секты Юнг очень рано проявил редкие способности: в возрасте двух лет он научился читать, а в шесть лет начал изучать латынь. Хотя родители направляли мальчика для обучения в различные учебные заведения, основные знания Юнг приобрел самостоятельно — с ранних лет он относился к самообразованию как к важнейшему способу совершенствования в науках. В девятнадцать лет Юнг уже владел многими иностранными языками и считался знатоком греческого и латыни.

С 1792 по 1803 г. Юнг изучал медицину в Лондоне; Эдинбурге, Геттингене и, наконец, в Кембридже. Еще в первые годы учебы он подготовил интересную научную работу, в которой доказал, что аккомодация глаза обусловлена изменением формы хруста-

лика. За эту работу в 1794 г. он был избран членом Лондонского Королевского общества. Во время пребывания в Кембридже Юнг занялся исследованием акустических и оптических явлений (интерес к акустике был связан с любовью к музыке — Юнг играл практически на всех музыкальных инструментах того времени). Аналогия между многими явлениями акустики и оптики убедила его в справедливости волновых представлений о свете. В 1801 г. Юнг сформулировал принцип интерференции, эффективность которого была продемонстрирована им в ряде работ 1801—1803 гг. Итоги этого этапа изучения свойств света были подведены Юнгом в фундаментальном «Курсе лекций по натуральной философии», два тома которого были изданы в 1807 г. Этот курс, подготовленный на основе лекций, читавшихся Юнгом в 1802—1803 г., когда он занимал пост профессора Королевского института, содержал огромный научный материал. В него были включены как обзоры важнейших работ по механике, физике и астрономии других авторов, так и оригинальные результаты, полученные самим Юнгом. В частности, в «Курсе» впервые был введен термин «энергия» и рассматривался модуль упругости, получивший затем название «модуля Юнга».

После издания «Курса лекций» Юнг перешел к исследованиям в области медицины, результаты которых он изложил в большом сочинении «Введение в медицинскую литературу». Разнообразие интересов и занятий Юнга не может не поражать. Не получив признания как практикующий врач, Юнг обращается к изучению египетских иероглифов, получив при этом важные результаты. Одновременно он исполняет обязанности секретаря Лондонского Королевского общества по зарубежным связям, а также является секретарем Комиссии долгот и издателем «Морского альманаха» — справочника по практической астрономии. Кроме того, он ведет большую литературную работу: для Приложения к *Encyclopaedia Britannica* он подготовил более 40 биографических очерков ученых-естественников и филологов, целый ряд фундаментальных статей, оставивших заметный след в истории науки. Всей своей жизнью (Юнг умер 10 мая 1829 г.) ученый оправдал прозвище «феноменальный», данное ему в годы учебы в Кембриджском университете.

После 1807 г., на протяжении всей жизни, Юнг продолжал интересоваться вопросами оптики. Этот интерес стимулировался как важными экспериментальными открытиями, относящимися к поляризационным явлениям (1810—1815), так и появлением работ выдающегося французского ученого О. Френеля (1815—1823). Юнг был активным пропагандистом идей Френеля, состоял с ним в переписке и переводил его работы на английский язык. Отметим, что в некоторых вопросах Юнг предвосхитил точные доказательства Френеля. Так, в 1817 г. в письме, адресованном Араго, Юнг высказал предположение, что явления поляризации могут быть связаны с поперечной компонентой

световых волн. Хотя в целом по глубине и разработанности теория световых волн Френеля значительно превосходит представления Юнга, волновая оптика с полным основанием называется «оптикой Юнга — Френеля».

О теории света и цветов

Хотя изобретение правдоподобных гипотез, независимых от каких-либо экспериментальных наблюдений, может принести очень мало пользы для развития естествознания, тем не менее открытие простых и единых принципов, с помощью которых большое число явно разнородных явлений сводятся к согласованным и универсальным законам, должно всегда считаться имеющим большое значение для усовершенствования человеческого разума; и чем больше и больше явлений оказываются согласующимися с принципами, заложенными в основу, тем более эти принципы могут претендовать на замену звания «гипотеза» званием «фундаментальный закон природы».

Цель сегодняшнего доклада не столько выдвижение каких-либо абсолютно новых мнений, сколько обращение к ряду предложенных ранее теорий и к их непосредственным создателям, чтобы подкрепить эти теории дополнительными доказательствами и применить эти теории к большому числу разнообразных фактов, которые раньше были погружены в темноту. В этой связи не было абсолютно никакой необходимости проводить хотя бы один новый опыт, поскольку набралось уже большое количество экспериментов в высшей степени превосходных, поскольку они должны были проводиться без малейшей приверженности их авторов к системе, с помощью которой они будут объяснены. Тем не менее здесь будет изложен ряд фактов, ранее не наблюдавшихся, с тем чтобы показать полное согласие упомянутой системы с разнообразными явлениями природы, которые с ней связаны. (...)

Гипотеза I. *Вселенную наполняет светоносный эфир малой плотности и в высшей степени упругий, (...)*

Гипотеза II. *Волнообразные движения возбуждаются в этом эфире всякий раз, как тело становится светящимся.*

Комментарий. Я использую термин «волнообразное движение» (undulation), отдавая ему предпочтение перед словом «колебание» (vibration), потому что колебание обычно понимается как движение, происходящее попеременно то вперед, то назад вследствие сложения импульса тела и ускоряющей силы, которое, естественно, более или менее непрерывно. Волнообразное же движение предполагается состоящим из колебательного движения, последовательно распространяющегося через различные части среды без всякого стремления каждой частицы продолжать свое движение, кроме как в связи с передачей следующих друг за другом волнообразных движений от явно колеблю-

щегося тела. Так в воздухе вибрирующая струна создает волнообразные движения, представляющие звук. (...)

Гипотеза III. *Ощущение различных цветов зависит от различной частоты колебаний, возбуждаемых светом в сетчатке. (...)*

Предложение VIII. Когда два волнообразных движения от разных источников либо точно совпадают, либо очень близки по направлению, их общее действие состоит в комбинации движений, принадлежащих каждому из них.

Поскольку каждая частица среды подвержена действию каждого волнообразного движения, где бы ни совпадали их направления, волнообразные движения могут распространяться не иначе как объединяя свои движения, так что объединенное движение может быть либо суммой, либо разностью отдельных движений в соответствии с тем, сходные или несходные части волнообразных движений совпадают.

Я уже раньше¹ настаивал на широком применении этого принципа к гармоникам [звука], однако далее выяснится, что он еще более полезен для объяснения явлений цветов. Волнообразные движения, которые теперь нужно сравнить, имеют равные частоты. Когда два ряда в некий момент времени точно совпадают, то очевидно, что общая скорость движений частицы должна быть наибольшей. Ясно также, что она должна быть наименьшей и, если волнообразные движения равны по силе, полностью исчезать, когда момент наибольшего прямого движения, принадлежащего одному волнообразному движению, совпадает с моментом наибольшего обратного движения, принадлежащего второму. В промежуточном состоянии объединенное волнообразное движение будет обладать промежуточной силой; однако то, по каким законам должна изменяться эта промежуточная сила, нельзя определить без дополнительных данных. Хорошо известно, что в области звука сходные причины вызывают явление, называемое биениями. Два ряда волнообразных движений почти равной величины попеременно то объединяются, то уничтожают друг друга в зависимости от того, когда они более или менее точно совпадают по времени совершения соответствующих движений.

Следствие I. *О цветах бороздчатых поверхностей.* Бойль, по-видимому, был первым, кто наблюдал цвета царапин на полированных поверхностях. Ньютон их не заметил. Мазеас и м-р Брум провели на эту тему несколько экспериментов, однако не получили каких-либо удовлетворительных выводов. Между тем все разнообразие этих цветов очень просто выводится из этого предложения.

Пусть в данной плоскости имеются две отражающие точки, очень близкие друг к другу, и пусть плоскость расположена так, что отраженное изображение светящегося предмета, видимое в ней, окажется совпадающим с этими точками. Тогда очевидно, что длины падающего и отраженного лучей, взятые вместе, равны по отношению к двум точкам, если считать эти

лучи способными к отражению во всех направлениях. Пусть теперь одна из точек опустилась ниже данной плоскости; тогда полный путь света, отраженного от нее, будет удлиннен на величину, которая равна понижению точки, умноженному на удвоенный косинус угла падения [рис. 72].

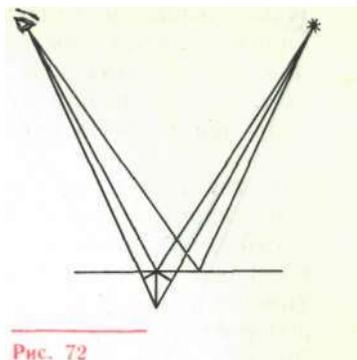


Рис. 72

Теперь, если равные волнообразные движения данных размеров заставить отразиться от двух точек, расположенных достаточно близко для того, чтобы казаться глазу одной точкой, то если только эта линия равна половине ши-

рины полного волнообразного движения, то отражение от пониженной точки будет так интерферировать с отражением от фиксированной точки, что поступательное движение одного будет совпадать с возвратным движением другого и оба они будут уничтожены. Когда же эта линия равна полной ширине волнообразного движения, эффект будет удвоен; а когда она будет равна полутора ширинам, то движения снова уничтожатся, и так далее для значительного числа изменений. Если же отраженные волнообразные движения будут разных типов³, то они будут действовать друг на друга по-разному в зависимости от их отношения к различным длинам той линии, которая является разностью их двух путей и которая может быть названа интервалом запаздывания.

Для того чтобы эффект был более ощутимым, ряд пар точек нужно объединить в две параллельные линии; если поместить несколько таких пар линий рядом друг с другом, то они облегчат наблюдение. Если одну такую линию заставить поворачиваться вокруг другой как вокруг оси, то понижение относительно данной плоскости будет равно синусу угла наклона; и поскольку глаз и светящийся объект остаются фиксированными, разность длин путей будет меняться как этот синус.

Наилучшими объектами для экспериментов⁴ являются превосходные микрометры м-ра Ковентри; наиболее удобны те из них, которые состоят из параллельных линий, проведенных на стекле на расстоянии одной пятисотой дюйма друг от друга. Каждая из этих линий при рассмотрении в микроскоп оказывается состоящей из двух или более тонких линий, в точности параллельных, расположенных на расстоянии, несколько большем, чем одна двадцатая расстояния между смежными линиями. Я расположил один из таких микрометров так, чтобы он отражал солнечный свет под углом 45° , и зафиксировал микрометр таким образом, что, когда он вращался вокруг одной из линий как вокруг оси, я мог измерять угловое движение, и я обнаружил, что наиболее яркий красный свет получается при наклоне $10\frac{0}{4}$, $20\frac{3}{4}$, 32° и 45° , синусы которых относятся как числа 1, 2, 3 и 4.

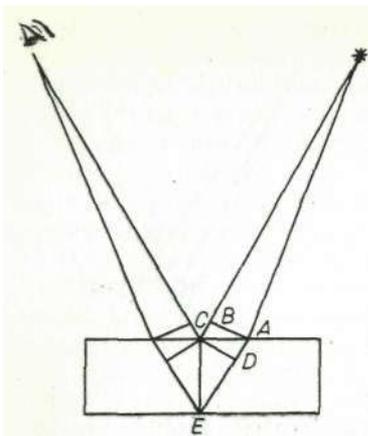


Рис. 73

При всех других углах, когда солнечный свет отражался от поверхности, этот цвет пропадал при изменении наклона и был одним и тем же при равных наклонах в любую сторону.

Этот эксперимент дает очень сильное подтверждение теории. Невозможно вывести "никакое его объяснение из предлагавшихся до сих пор гипотез; и я уверен, что трудно будет изобрести какую-нибудь новую гипотезу, объясняющую его. Существует впечатляющая аналогия между разделением цветов и получением музыкальной ноты с помощью последовательных отражений от эквидистантных железных стержней, что, как я обнаружил,

прекрасно согласуется с известной скоростью звука и расстояниями между поверхностями.

Не представляется невероятным, что цвета покровов некоторых насекомых и некоторых других естественных тел, дающих при различном освещении красивейшее разнообразие, могут иметь такое происхождение, а не получаться из тонких пластин. В некоторых случаях одна царапина или бороздка может создавать сходные эффекты из-за отражений от ее противоположных краев.

Следствие II. О цветах тонких пластин. Когда поток света падает на две параллельные преломляющие поверхности, частичные отражения точно совпадают по направлению; в этом случае интервал запаздывания, взятый между поверхностями, так относится к их пути, как удвоенный косинус угла преломления к единице. Так, рисуя AB и CD перпендикулярно лучам [рис. 73], мы получаем, что времена прохождения BC и AD равны, а DE будет составлять половину интервала запаздывания; но DE относится к CE как синус DCE к единице. Следовательно, для того чтобы DE оставалось постоянным или чтобы один и тот же цвет мог отражаться, толщина CE должна меняться как секанс угла преломления CED , что точно согласуется с экспериментами Ньютона, поскольку исправления, которые он ввел, совершенно незначительны.

Пусть среда между поверхностями будет более разреженной, чем окружающие среды. Тогда импульс, отраженный от второй поверхности, встречая последующее волнообразное движение на первой поверхности, будет придавать способности частицам более разреженной среды полностью останавливать движение более плотной и уничтожать отражение (предложение IV)⁵, в то время как они сами будут испытывать более сильное побуждение к движению, чем если бы они находились в покое, и количество прошедшего света будет увеличено. Таким образом, цвета,

создаваемые отражением, будут уничтожаться, а цвета, создаваемые при прохождении, станут более яркими, когда удвоенная толщина, или интервал запаздывания, оказывается кратной полной ширине волнообразного движения, а при промежуточных толщинах эффект будет обратным в соответствии с наблюдениями Ньютона.

Если окажется, что такие же отношения хорошо выполняются по отношению к тонким пластинам более плотной среды, что, вообще говоря, не кажется невероятным, то необходимо будет принять исправленное доказательство Предложения IV. Однако в любом случае если тонкая пластина будет помещена между менее плотной и более плотной средами, то можно ожидать, что цвета, создаваемые при отражении и прохождении, поменяются местами.

Из ньютоновских измерений толщин, отражающих различные цвета, можно очень точно определить ширину и продолжительность соответствующих им волнообразных движений. Оказывается, что весь видимый спектр укладывается в отношение трех к пяти. Волнообразные движения красного, желтого и синего цветов должны быть связаны по величине как числа 8, 7 и 6, так что интервал от красного до голубого составляет одну четверть. (...) Абсолютная длина и частота каждого колебания представлена в таблице. Предполагается, что свет проходит 500 000 000 000 футов за $8\frac{1}{8}$ мин. (...)

Цвета	Длина волнообразного движения в воздухе, доли дюйма	Число волнообразных движений в одном дюйме	Число колебаний в секунду
Крайний	0,0000266	37 640	463 миллиона миллионов
Красный	0,0000256	39 180	482
Промежуточный	0,0000246	40 720	501
Оранжевый	0,0000240	41 610	512
Промежуточный	0,0000235	42 510	523
Желтый	0,0000227	44 000	542
Промежуточный	0,0000219	45 600	561 (= 2^{18} приближенно)
Зеленый	0,0000211	47 460	584
Промежуточный	0,0000203	49 320	607
Синий	0,0000196	51 110	629
Промежуточный	0,0000189	52 910	652
Индиго	0,0000185	54 070	665
Промежуточный	0,0000181	55 240	680
Фиолетовый	0,0000174	57 490	707
Крайний	0,0000167	58 750	735
Среднее по всем цветам, или белый	0,0000225	44 440	547

Курс лекций по натуральной философии и механическим ремеслам

Лекция XXXIX

О природе света и цветов

(...) Если предположить, что свет любого данного цвета состоит из волнообразных движений данной ширины или данной частоты, то эти волнообразные движения должны подчиняться закономерностям, уже исследованным нами для волн на воде и пульсаций звука. Было показано, что для двух равных рядов волн, происходящих из центров, расположенных поблизости один от другого, можно видеть, как в определенных точках они разрушают действия друг друга, а в других точках — удваивают их. На основе сходного взаимодействия были объяснены и биения двух звуков. Теперь мы применим те же принципы к чередующимся соединению и гашению цветов [рис. 74].

Дабы действия двух частей света могли складываться таким образом, необходимо, чтобы эти части исходили из одного источника и достигали одной и той же точки разными путями, но по направлениям, не слишком отличающимся между собой. Эти различия [в путях] могут создаться либо в одной, либо в обеих частях [света] с помощью дифракции, отражения, преломления или посредством комбинации этих эффектов. Однако простейшим, по-видимому, является случай, когда пучок однородного света падает на экран⁶, имеющий два очень маленьких отверстия или две щели, которые могут рассматриваться как центры расхождения, откуда свет идет во всех направлениях. В этом случае, когда два вновь образованных пучка воспринимаются на поверхности, расположенной так, чтобы пересекать их, свет пучков разделяется темными полосами на части приблизительно равные, но которые становятся шире, когда поверхность удаляется от отверстий, как будто на всех расстояниях от отверстий они стягивают очень близкие по величине углы, и эти части становятся шире в той же пропорции, в какой отверстия располагаются ближе друг к другу. Середина двух частей всегда светлая, и яркие полосы с каждой из сторон находятся на таких расстояниях, что свет, приходящий к ним от одного из отверстий, должен пройти больший путь, чем свет, приходящий от другого, на отрезок, который равен ширине одного, двух, трех или большего числа предполагаемых волнообразных движений, в то время как промежуточные темные области соответствуют разности в половину [ширины] предполагаемых волнообразных движений, в полтора, два с половиной волнообразных движения или более.

Из сравнения различных экспериментов представляется, что ширина волнообразных движений, составляющих крайний красный свет, должна считаться равной в воздухе около одной 36-ты-

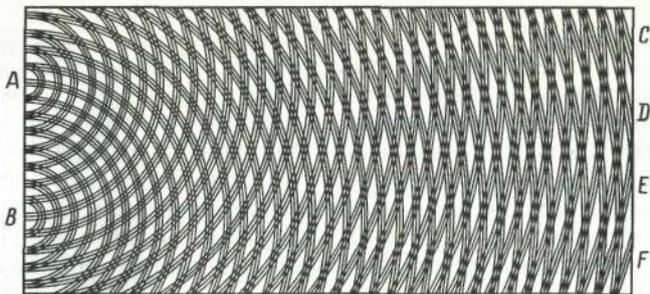


Рис. 74

сячной дюйма, а волнообразных движений, составляющих крайний фиолетовый свет, — около одной 60-тысячной; средняя [ширина] по всему спектру с учетом интенсивности света равна примерно одной 45-тысячной [дюйма]. Из этих величин следует, если вести расчет по известной скорости света, что за одну секунду в глаз должны попадать почти 500 миллионов миллионов самых медленных из таких колебаний. Комбинация двух частей белого, или смешанного, света, когда она рассматривается на большом расстоянии, дает несколько белых и черных полос, соответствующих этому интервалу. При более внимательном рассмотрении оказывается, что складываются вместе отчетливые эффекты бесконечного числа полос различной ширины, так что создается красивое разнообразие оттенков, постепенно переходящих один в другой. Центральная белизна сначала сменяется желтизной, а затем темно-желтым цветом, за которым следует темно-красный, синий и голубой, которые оба кажутся, если смотреть с большого расстояния, темной полосой. Затем появляется зеленый цвет и за ним — темная область, имеющая темно-красный оттенок. Следующие светлые области все более или менее зеленоватые, а темные — пурпурные и красноватые. Красный цвет, по-видимому, настолько доминирует во всех этих эффектах, что красные или пурпурные полосы занимают почти

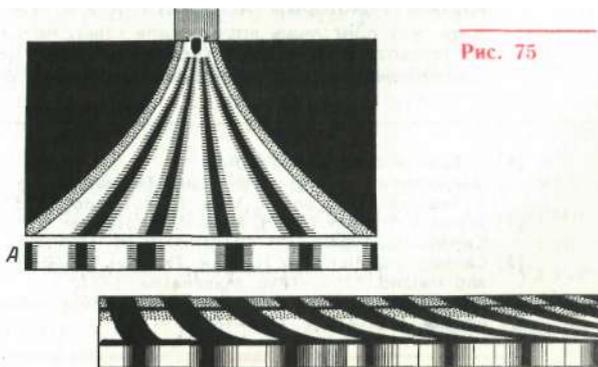


Рис. 75

то же место в смешанных полосах, как если бы их свет воспринимался отдельно.

Сравнение результатов этой теории с данными экспериментов полностью устанавливает их общее совпадение; оно, однако, указывает на небольшие поправки в части измерений, вызванные какой-то неизвестной причиной, возможно, связанной с внутренней природой дифракции, которая постоянно заставляет части света, проходящие в направлении, очень близком к прямолинейному, делиться на полосы или зоны, немного более широкие, чем внешние полосы, образованные светом, изгибающимся сильнее [рис. 75]. (...)

Комментарий

Перевод с английского отрывков из работ Т. Юнга выполнен С. Р. Филоновичем. Первый отрывок взят из работы: *On the theory of light and colours* (Bakerian lecture, 1801), «Philosophical Transactions», 1802, vol. 92, Pt. 1, p. 12—48.

Второй отрывок взят из издания; Young T. *A course of lectures on natural philosophy and mechanical arts*. London, 1807, vol. 1.

¹ Речь идет о работе Юнга «Очерк экспериментов и исследований относительно звука и света».

² Половина ширины волнообразного движения в современной терминологии — это половина длины волны ($V/2$), полная ширина A

³ Т. е. разных длин волн.

⁴ Далее по существу следует описание результатов опытов с дифракционной решеткой.

⁵ Предложение IV гласит: когда волнообразное движение доходит до поверхности, которая является границей сред с различными плотностями, имеет место частичное отражение, по силе пропорциональное разности этих плотностей.

⁶ Отметим, что у Юнга ничего не говорится о способе формирования пучка света, падающего на две щели. Ясно, что без узкой щели — источника — невозможно добиться высокой пространственной когерентности излучения, необходимой для наблюдения интерференционной картины. Это дало основание некоторым историкам науки предположить, что Юнг лишь «придумал» опыт, но сам его не проводил; другие историки считают, что это предположение вряд ли справедливо (см. [3, p. 138]).

Литература

- [1] Собрание сочинений Т. Юнга: *Miscellaneous Works of the Late Thomas Young*. Ed. by G. Peacock and J. Leitch. Vols. 1—3. London, 1855.
 - [2] Wood A. *Thomas Young, Natural Philosopher, 1773—1829*. Cambridge, 1954.
 - [3] Cantor G. *Optics after Newton. Theories of light in Britain and Ireland, 1704—1840*. Manchester, 1983.
 - [4] Кляус Е. М. Томас Юнг. — В кн.: *Творцы физической оптики*. М., 1973, с. 122—159.
-



О. Френель

1788—1827

О волновой оптике

После публикации работ Т. Юнга, в которых развивалась идея об интерференции света, в оптике установилось довольно странное положение. С одной стороны, волновые представления о свете продемонстрировали свою эффективность; процесс распространения света был осознан как явление, характеризующееся периодичностью. С другой стороны, корпускулярные представления сохраняли свои позиции — теория Юнга почти не нашла сторонников, поскольку не дала отчетливого объяснения прямолинейности распространения света. Кроме того, теория Юнга не смогла объяснить открытое в 1808 г. Малюсом явление поляризации света при отражении от диэлектриков и ряд других эффектов, связанных с поляризацией. Сторонникам корпускулярной теории казалось, что поляризационные эффекты можно объяснить на основе ньютоновской идеи об асимметрии световых частиц; они пытались это сделать, используя весьма изощренные математические средства. Математическая основа волновой теории была очень слабой. Большинство указанных недостатков элементарной волновой теории света было преодолено в работах О. Френеля.

Огюстен-Жан Френель родился 10 мая 1788 г. в местечке Брольи в Нормандии, в семье архитектора. Огюстен обладал слабым здоровьем и, по-видимому, поэтому не блистал поначалу успехами в учебе. Однако склонности мальчика определились довольно рано — уже в школе он предпочитал точные науки. Высшее образование он получил в парижской Политехнической школе, а затем в Школе мостов и дорог. После получения звания инженера Френель в течение ряда лет работал в провинции. Рутинная деятельность провинциального инженера, связанная с хозяйственными и административными хлопотами, не могла удовлетворить Френеля, еще в Политехнической школе обратившего на себя внимание математическими исследованиями. Но и этой работы Френель лишился в 1814 г. вследствие политических событий, связанных со Ста днями — временным возвращением Наполеона из ссылки. Однако такое осложнение в жизни Френеля неожиданно обернулось удачей для науки. Молодой инженер получил возможность заняться научными исследованиями. Для приложения своих сил он выбрал оптику.

частями этой волны, рассматриваемой в каком-либо из своих предыдущих положений*.

Из принципа сосуществования малых движений вытекает, что колебания, произведенные в какой-либо точке упругой жидкости при помощи нескольких возмущений, равны результирующей всех возмущений, отправленных в один и тот же момент в эту точку различными центрами колебаний, независимо от их числа, взаимных положений, природы и времени различных возмущений. Будучи общим, этот принцип должен применяться ко всем частным случаям. Я предположу, что все эти возмущения в бесконечном числе имеют один и тот же вид, происходят одновременно, расположены рядом друг с другом в той же плоскости или на одной и той же сферической поверхности. Я сделаю еще одну гипотезу, относящуюся к природе этих возмущений. Я предположу, что скорости, сообщенные частицами, все одинаковым образом направлены именно нормально к сферической поверхности** и, кроме того, пропорциональны сгущениям. Таким образом, частицы не могут иметь обратного движения³.

Этим же путем я мог бы образовать производную волну при помощи совокупности всех этих частичных возмущений. Следовательно, правильно говорить, что колебания световой волны в каждой из ее точек могут рассматриваться как результирующая всех элементарных движений, которые были бы отправлены в один и тот же момент всеми действующими изолированно частями этой волны, рассматриваемой в каком-либо из своих предыдущих положений.

44. Если считать интенсивность первоначальной волны неизменной, то из этого теоретического допущения, как из всех других, вытекает, что эта неизменность будет сохраняться во время ее прохождения, если только ни одна часть волны не будет перехвачена или задержана относительно соседних частей; ибо результирующая элементарных движений, о которых я только что говорил, будет одной и той же во всех точках. Но если одна часть волны задержана путем постановки на ее пути непрозрачного тела, тогда интенсивность в каждой точке будет изменяться

* Я рассматриваю всегда последовательность бесконечного числа волн или общее колебание жидкости. Только в том смысле можно сказать, что две световые волны взаимно уничтожаются, когда они отличаются одна от другой на половину длины волны. Формулы интерференции, которые я только что дал, совершенно неприемлемы к случаю одной изолированной волны, которая, впрочем, и не встречается в действительности.

** Могут существовать производные волны, в которых направление абсолютных скоростей, сообщенных частицам, не будет нормальным к поверхности волны. Размышляя об особых законах интерференции поляризованных лучей, я убедился уже после редактирования этого мемуара, что световые колебания происходят перпендикулярно лучам или параллельно поверхности волны. Соображения и расчеты, содержащиеся в этом мемуаре, так же хорошо согласуются с этой новой гипотезой, как и с предыдущей, потому что они независимы от реального направления колебаний и предполагают лишь? что эти колебания происходят одинаковым образом у всех лучей, образованных одной и той же системой волн, которые совместно с другими участвуют в образовании каемок.

с ее расстоянием от края тени и эти изменения будут особенно заметны по соседству с касательными лучами.

Пусть C — световая точка, AG — непрозрачное тело, AME — волна, пришедшая в A и частично перехваченная телом [рис. 76]. Я предполагаю, что она разделена на бесконечное число маленьких дуг Am' , $m'm$, mM , Mn , nn' , $n'n''$ и т. д. Для того чтобы получить интенсивность света в точке P , в каком-нибудь из следующих положений волны BPD необходимо искать результирующую всех элементарных волн, которые были бы посланы туда каждой из частей первоначальной волны, если бы эта часть действовала изолированно.

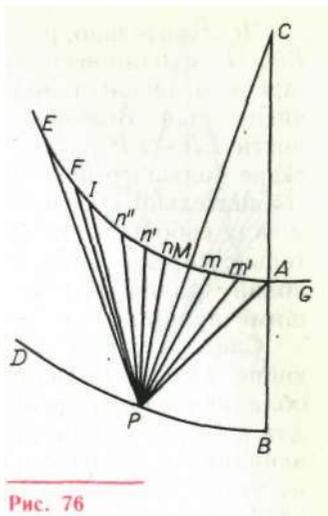


Рис. 76

Так как импульс, который был сообщен всем частям первоначальной волны, имел направление нормали, то движения, которые эти части стремятся передать эфиру, должны быть более интенсивными в этом направлении, чем в каком-либо другом; и лучи, которые были бы оттуда испущены, если бы они действовали изолированно, были бы тем более слабыми, чем более они отклонялись бы от этого направления.

45. Изыскание закона, согласно которому интенсивность лучей варьирует около каждого центра возмущения, представляло бы, безусловно, большие трудности; но, к счастью, нет необходимости знать этот закон, так как легко видеть, что эффекты, вызванные лучами, уничтожаются почти полностью, как только лучи заметно отклоняются от нормали. Таким образом, те лучи, которые заметно влияют на количество света, получаемое каждой точкой, могут рассматриваться как лучи, обладающие равной интенсивностью*.

* Когда центр возмущения испытал уплотнение, расширяющая сила стремится толкать молекулы во всех направлениях; и если они не имеют обратных движений, то это происходит только потому, что их начальные скорости, направленные вперед, уничтожают те скорости, которые расширение стремится придать им в обратном направлении. Но из этого не следует, что возмущение может распространяться лишь следуя направлению первоначальных скоростей, так как, например, расширяющая сила в перпендикулярном направлении комбинируется с первоначальным импульсом без того, чтобы эффекты этой силы были этим ослаблены. Ясно, что интенсивность произведенной таким образом волны должна значительно изменяться в различных точках ее окружности не только по причине первоначального импульса, но еще и потому, что уплотнения около центра возмущенной части не следуют одному и тому же закону. Изменения в интенсивности производной волны неизбежно должны подчиняться закону непрерывности и по этой причине могут рассматриваться как незначительные в очень малом угловом интервале, особенно вблизи от нормали, породившей их волны; ибо составляющие первоначальных скоростей частиц по какому-либо направлению пропорциональны синусу угла, который это направление образует с нормалью. (...)

Действительно, рассмотрим значительно наклоненные лучи EP , FP , IP , сходящиеся в точке P , которую я предполагаю находящейся от фронта волны BD на расстоянии, равном большому числу волн. Возьмем две дуги EF и FI такой длины, что разности $EP - FP$ и $FP - IP$ равны половине длины волны. Вследствие большого наклона лучей и малости половины длины волны сравнительно с длиной лучей эти две дуги будут почти равны между собой и лучи, которые они посылают в точку P , приблизительно параллельны. Таким образом, вследствие различия на половину длины волны, которое существует между соответствующими лучами двух дуг, их действия взаимно уничтожаются.

Следовательно, можно предположить, что все лучи, отправляющие различные части первоначальной волны AE в точку P , обладают равной интенсивностью, потому что единственные лучи, для которых эта гипотеза была бы неточной, не имеют заметного влияния на количество света, получаемого этой точкой. Исходя из этого же соображения можно также для упрощения расчета результирующей всех этих элементарных волн рассматривать их колебательное движение как происходящее в одном и том же направлении, учитывая малую величину углов, которые лучи образуют друг с другом. Таким способом вся проблема оказывается сведенной к той, которую мы уже разрешили: найти результирующую какого-либо числа систем параллельных волн равной длины, интенсивности и относительные положения которых известны.

В данном случае интенсивности пропорциональны длине освещающих дуг и относительные положения даны значениями разностей пройденных путей.

46. Собственно говоря, мы рассматривали лишь сечение волны, образованное плоскостью, перпендикулярной спроецированному в точку A краю экрана. Рассмотрим теперь волну во всем ее протяжении, представив себе ее разделенной на бесконечно узкие лунки равноотстоящими меридианами, перпендикулярными плоскости рисунка [рис. 76]. К ним можно было бы приложить те же рассуждения, которые мы только что сделали для одного сечения волны, и показать, что лучи с заметным наклоном взаимно уничтожаются.

Эти параллельные краю непрозрачного экрана лунки распространены на большое протяжение для рассматриваемого нами случая, когда световая волна перехватывается только с одной стороны. Интенсивность результирующей всех колебаний, которые лунки направляют в точку P , будет той же самой для каждого из них; ибо лучи, испускаемые этими лунками, должны рассматриваться как имеющие равную интенсивность, по крайней мере для весьма ограниченного участка порождающей их волны, который имеет заметное влияние на свет, направленный в точку P . Интенсивности лучей должны считаться равными вследствие чрезвычайно малой разности между пройденными путями. Более того, каждая элементарная результирующая бу-

дет, очевидно, отставать на одну и ту же величину по отношению к лучу, исходящему из точки лунки, наиболее близкой к точке P , т. е. из точки, в которой эта лунка пересекается с плоскостью рисунка. Таким образом, интервалы между этими элементарными результирующими будут равны разностям путей, пройденных лучами AP , $m'P$, mP и т. д., находящимися в плоскости рисунка, и интенсивности этих элементарных результирующих будут пропорциональны дугам Am' , $m'm$, mM и т. д. Для того чтобы получить интенсивность общей результирующей, нужно, следовательно, произвести тот же самый подсчет, к которому мы пришли при рассмотрении только сечения волны плоскостью, перпендикулярной краю непрозрачного экрана*.

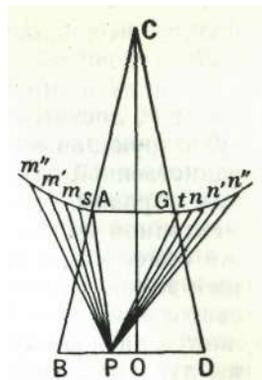


Рис. 77

47. Прежде чем вычислить аналитическое выражение этой результирующей, я сперва выведу из принципа Гюйгенса те следствия, которые можно из него вывести при помощи простых геометрических соображений.

Пусть AG — непрозрачное тело, достаточно узкое, чтобы можно было видеть полосы внутри его тени на расстоянии AB . Пусть C — точка, освещающая тело, BD — белый картон, где получаются изображения каемок, или плоскость фокуса лупы, при помощи которой их наблюдают [рис. 77].

Предположим, что первоначальная волна разделена на маленькие дуги Am , mm' , $m'm''$, $m''m'''$, ..., Gn , tin' , $n'n''$, $n''n'''$, ... так, что лучи, проведенные из точки P , которую считают находящейся внутри тени, к точкам двух смежных делений, отличаются друг от друга на половину длины волны. Все маленькие волны, направляемые в точку P элементами каждой из этих дуг, будут в полном несовпадении с элементарными волнами, испускаемыми соответствующими частями двух дуг, между которыми заключена рассматриваемая дуга. Таким образом, если все эти дуги были бы равны, то лучи, направляемые ими в точку P , взаимно бы уничтожались, за исключением крайней дуги mA , лучи которой сохранили бы половину своей интенсивности, так как половина света, отправленного дугой mm' , с которой дуга mA находится в

* Поскольку край экрана прямолинеен, для определения положений темных и ярких полосок и их относительных интенсивностей достаточно рассмотреть сечение волны, образованное плоскостью, перпендикулярной краю экрана. Если же край экрана криволинеен или если он составлен из отрезков прямых, находящихся друг к другу под некоторыми углами, тогда необходимо интегрировать по двум перпендикулярным направлениям или по окружности около рассматриваемой точки. Этот последний метод более прост в нескольких частных случаях, например когда речь идет о вычислении интенсивности света в месте проекции центра какого-либо экрана или отверстия круглой формы.

полном несовпадении, уничтожается половиной света предыдущей дуги $m'm'$.

Эти дуги приблизительно равны, когда лучи, сходящиеся в точке P , достаточно наклонены относительно нормали. Тогда результирующая волна приблизительно соответствует середине mA единственной дуги, которая производит заметный эффект, и, таким образом, отличается на одну четверть длины волны от элементарной волны, исходящей от края A непрозрачного тела. То же самое справедливо относительно и другой части Gn падающей волны, причем степень совпадения или несовпадения между световыми колебаниями, которая проявляется в точке P , определяется разностью длин двух лучей sP и tP , исходящих из середины дуг Am и Gn , или, что сводится к тому же, разностью между двумя лучами AP и GP , исходящими от самых краев непрозрачного тела. Таким образом, если рассматриваемые внутренние каемки являются достаточно удаленными от краев геометрической тени, то можно без заметной ошибки применить к ним формулу, основанную на гипотезе, что центры дифрагирующих волн находятся на самых краях непрозрачного тела. Но по мере того, как точка P приближается к B , дуга Am становится все более значительной по сравнению с дугой mm' ; дуга mm' — по сравнению с дугой $m'm''$ и т. д.; точно так же в дуге mA элементы, прилегающие к точке A , становятся заметно больше тех, которые расположены около точки m , соответствуя равным разностям пройденных путей.

Отсюда следует, что эффективный луч sP^* не должен уже более быть средним между крайними лучами mP и AP , но должен больше приближаться к длине этого последнего.

Наоборот, на другой стороне непрозрачного тела разность между лучом GP и эффективным лучом tP тем более приближается к одной четверти длины волны, чем более точка P удаляется от D . Таким образом, разность в пройденных путях изменяется более быстро между эффективными лучами sP и tP , чем между лучами AP и GP . Следовательно, каемки, которые находятся вблизи точки B , должны быть немного менее удалены от центра тени, чем это указывается формулой, основанной на первой гипотезе. (...)

Мемуар о действии, которое
оказывают друг на друга лучи
поляризованного света -
(совместно с Ф. Араго)

4. (...) Принцип интерференции показывает, что лучи, исходящие из двух световых фокусов, порожденных одним источником,

* После этих слов в рукописи добавлено: «Вариант, которым мы обязаны д-ру Юнгу».

образуют в точке встречи темные и яркие полосы, при этом нет необходимости пользоваться в опыте каким-либо непрозрачным телом.

Для разрешения вопроса было бы, таким образом, достаточно попробовать, не дали ли бы подобный результат два изображения, образованные путем помещения ромбоида из известкового шпата перед световой точкой. Поскольку, согласно теории двойного преломления, необыкновенный луч в углекислом кальции имеет большую скорость, чем обыкновенный, следовало до того, как осуществить встречу лучей, искусственно компенсировать этот излишек скорости. Для этого, основываясь на опыте г-на Араго, который был опубликован в *Анналах*, г-н Френель поместил на пути только необыкновенного пучка лучей стеклянную пластинку, толщина которой была определена расчетом таким образом, что, проходя через пластинку, при перпендикулярном падении этот пучок терял почти все то опережение по сравнению с обыкновенным пучком, которое он приобрел в кристалле; исходя из этого путем легкого наклона пластинки можно было получить полную компенсацию в указанном отношении. Несмотря на это, встреча двух пучков, поляризованных в противоположных направлениях, не вызывала образования каких-либо полос.

В другом опыте, чтобы компенсировать эффект разности скоростей двух лучей, г-н Френель заставлял оба луча падать на маленькое неамальгамированное стеклянное зеркало, толщина которого была рассчитана так, что необыкновенный луч, отражаясь перпендикулярно от второй стороны стекла, терял в скорости в результате своего двойного пути через стекло больше того, что он в ней выиграл, проходя через кристалл. Постепенное изменение наклона должно было в дальнейшем привести к полной компенсации. Несмотря на это, ни под каким углом падения обыкновенные лучи, отраженные первой поверхностью стекла, не образовывали заметных полос, смешиваясь с лучами (необыкновенными), отраженными второй поверхностью.

5. Г-ну Френелю удалось преодолеть недостаток, которым обладает предыдущий опыт, как опыт, основывающийся на теоретическом соображении, и, более того, сохранить у света всю его интенсивность при помощи следующего приема. Распилив пополам ромбоид исландского шпата, он поместил две половинки его, одну перед другой, так, чтобы главные сечения были перпендикулярны друг другу. При таком расположении обыкновенный Пучок первого кристалла испытал необыкновенное преломление во втором кристалле; и обратно: пучок, который сначала распространялся по пути необыкновенного луча, преломлялся затем обыкновенным образом. Через этот аппарат было видно только двойное изображение световой точки. Каждый пучок последовательно испытывал два вида преломления. Суммы путей, пройденных каждым из них в обоих кристаллах вместе, должны были быть равными, поскольку, по предположению, оба эти кристалла

имели одну и ту же толщину. Таким образом, все, что относится к скоростям и к длине пройденных путей, оказывалось компенсированным. Несмотря на это, эти две системы поляризованных в противоположном смысле лучей⁴, интерферируя, не вызывали образования каких-либо сколько-нибудь заметных каемок. Добавим еще, что, опасаясь, что оба куска ромбоида, возможно, могли не иметь в точности той же самой толщины, мы считали нужным при производстве каждого опыта слегка и весьма медленно изменять угол, под которым падающие лучи встречались со вторым кристаллом.

6. Метод, который был, с другой стороны, разработан г-ном Араго для производства этого же самого опыта, был независим от двойного преломления. Уже давно известно, что если сделать в тонком листе две очень узкие щели, расположенные на небольшом расстоянии одна от другой, и осветить их светом из единственной световой точки, то за этим листом образуются весьма яркие каемки, происходящие от того действия, которое оказывают лучи правой щели на лучи противоположной щели. Для того чтобы поляризовать в противоположных направлениях лучи, образуемые этими двумя отверстиями, г-н Араго хотел сначала использовать тонкий агат, распилить его посередине и поместить каждую половину перед одной из щелей, чтобы части агата, которые до того были смежными, оказались расположенными перпендикулярно друг другу. Это расположение должно было, очевидно, вызвать ожидаемый эффект, но, не имея в данное время под рукой подходящего агата, г-н Араго предложил заменить его двумя стопами из пластинок, придав им необходимую для успеха опыта тонкость путем составления их из листочков слюды.

Для этого мы выбрали пятнадцать таких листочков, *по* возможности наиболее чистых, и наложили их друг на друга. Затем при помощи острого инструмента эта стопа была разрезана пополам. Отсюда ясно, что обе полученные в результате рассечения частичные стопы должны были иметь, с весьма большим приближением, ту же самую толщину, по крайней мере в тех частях, которые до этого соприкасались, даже если бы составляющие стопу пластинки были заметно призматическими. Эти стопы почти полностью поляризовали проходивший через них свет при угле падения 30° , считаемом от поверхности. Каждая из этих стоп была именно под этим углом помещена перед каждой из щелей в медном листике.

Когда обе плоскости падения были параллельны, т. е. когда обе стопы были наклонены в том же направлении (сверху вниз, например), четко были видны полосы, образованные интерференцией двух поляризованных пучков, совершенно такие же, как если бы заставляли действовать друг на друга два луча обычного света. Если же поворачивали одну из стоп около падающего луча, то обе плоскости падения становились перпендикулярными друг другу. Если, например, первая стопа оставалась

неизменно наклоненной сверху вниз, а вторая стопа была наклонена слева направо, то исходящие пучки, поляризованные при этом в противоположных направлениях, не образовывали больше в месте своей встречи никаких заметных полос.

Те предосторожности, которые были нами соблюдены для придания одинаковой толщины обеим стопам, повели к тому, что, помещая их перед щелями, мы обращали внимание на то, чтобы свет проходил через них в тех частях, которые до распиливания большой стопы соприкасались друг с другом. Впрочем, мы видели — и это обстоятельство устраняет все затруднения и возражения, которые можно было бы сделать в этом отношении, — что каемки появлялись, как обычно, когда лучи бывали поляризованы в одном и том же направлении. Тем не менее добавим, что медленное и постепенное изменение наклона одной из стоп никогда не вызывало появления полос в тех случаях, когда плоскости падения света были перпендикулярны друг другу. (...)

9. Вернемся теперь к аппарату из слюдяных стоп и предположим, что плоскости падения перпендикулярны, так что пучки света, прошедшие через обе щели, будут поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. Поместим между медным листом и глазом двоякопреломляющий кристалл, главное сечение которого образует угол 45° с плоскостями падения. Согласно известным законам двойного преломления, каждый из лучей, прошедших через слюдяные стопы, разделится в кристалле на два луча одинаковой интенсивности, поляризованные в двух перпендикулярных направлениях, одно из которых является направлением главного сечения.

Следовательно, в этом опыте можно было бы ожидать увидеть ряд каемок, образованных действием обыкновенного светового пучка справа на обыкновенный световой пучок слева, и второй, совершенно подобный ряд каемок, происшедших от интерференции двух необыкновенных пучков. Тем не менее не обнаруживается ни малейшего следа этих каемок, и все четыре световых пучка, встречаясь, дают только непрерывную полосу света*.

Этот опыт, идея которого принадлежит г-ну Араго, доказал нам, что два луча, которые были первоначально поляризованы в противоположных направлениях, могут быть затем приведены к одной и той же плоскости поляризации, не приобретая, однако, в результате этого способности влиять друг на друга. (...)

* Если бы пластинка, помещенная между медным листом и глазом, была тонкой и мало разделяла изображения, можно было бы объяснить отсутствие полос, предполагая, что те, которые являются результатом интерференции обыкновенных пучков, накладываются на другие, если еще допустить, что яркие полосы первой системы соответствуют темным полосам второй системы и обратно.

Но недостаточность такой гипотезы для объяснения явления доказывается помещением ромбоида известкового шпата между глазом и указанным выше кристаллом. При известных положениях этот ромбоид должен был бы разделять две системы полос, так как они поляризованы в противоположных направлениях, однако, делая именно это, нельзя заметить даже следов каких-либо полос.

10. (...) Опыты, которые мы только что описали, в конце концов приводят к таким следствиям.

1. В тех же условиях, в которых два луча обыкновенного света кажутся взаимно уничтожающимися, два луча, *поляризованные в противоположных направлениях*, не оказывают друг на друга никакого заметного действия.

2. Лучи света, поляризованные в одном направлении, действуют друг на друга, как естественные лучи. Таким образом, для этих двух видов света явления интерференции являются абсолютно одинаковыми.

3. Два луча, *первоначально поляризованных в противоположных направлениях*, могут быть затем возвращены к одной плоскости поляризации, *не приобретая, несмотря на это, способности действовать друг на друга*.

4. Два луча, поляризованных в противоположных направлениях и возвращенных затем к одинаковым поляризациям, действуют друг на друга, как и естественные лучи, если они происходят от светового пучка, который первоначально был поляризован в одном-единственном направлении.

5. В явлениях интерференции, образованных лучами, испытанными двойное преломление, место каемок определяется не только разностью путей и разностью скоростей; при некоторых обстоятельствах, которые нами были указаны, необходимо, кроме того, учитывать разность в половину длины волны. (...)

Комментарий

Перевод с французского работ О. Френеля выполнен З. А. Цейтлиным. Отрывки из работ воспроизводятся по изданию: Френель О. Избранные труды по оптике. М., 1955.

- ¹ Этот способ изложен в § 35—42 данного мемуара.
- ² Речь идет о волновой гипотезе.
- ³ Отсутствие обратной волны не обосновано Френелем достаточно строго; позднее это сделал Г. Кирхгоф.
- ⁴ Выражения «лучи, поляризованные в одном и том же смысле» или «в противоположном смысле» введены Малюсом и означают совпадение или взаимную перпендикулярность плоскостей поляризации.

Литература

- [1] Собрание сочинений О. Френеля: *Oeuvres complètes d'Augustin Fresnel*. Publ. par H. de Senarmont, E. Verdet et L. Fresnel. В 3 т. Paris, 1866—1870.
 - [2] Boufry G. A. Augustin Fresnel: his time, life and work, 1788—1827. London, 1949.
 - [3] Ландсберг Г. С. Огюстен Френель. Очерк жизни и деятельности. — В кн.: Френель О. Избранные труды по оптике. М., 1955, с. 7—69.
 - [4] Верде Э. Труды Огюстена Френеля. — В кн.: Творцы физической оптики. М., 1973, с. 180—206.
-



У. Томсон (Кельвин)

1824—1907

Об абсолютной шкале температур и втором начале термодинамики

Дальнейшее развитие промышленности в середине XIX в., имевшее в своей основе использование тепловых машин, неизбежно должно было привести к активизации и теоретических, и экспериментальных исследований тепловых машин. В течение десяти лет основополагающая работа С. Карно находилась в забвении, из которого ее извлек французский физик и инженер Б. Клапейрон. В 1834 г. он опубликовал работу, в которой облек идеи Карно в математическую форму, дополнив их результатами собственных исследований. Появление работы Клапейрона стимулировало разработку проблем термодинамики другими учеными. Одним из важнейших шагов на пути к построению здания классической термодинамики была идея английского физика У. Томсона о возможности построения абсолютной температурной шкалы.

Уильям Томсон родился 26 июня 1824 г. в Белфасте в семье профессора инженерии. Когда мальчику было семь лет, семья переехала в Глазго, где отец Уильяма получил кафедру математики в университете. Томсон рано потерял мать, и его воспитанием, как и воспитанием старшего брата, занимался отец, пользовавшийся у мальчиков огромным уважением.

Лекции отца в университете Уильям начал посещать уже в восемь лет, а в десять он уже был полноправным студентом. Закончив обучение в Глазго, семнадцатилетний Томсон поступил в Кембриджский университет, где специализировался по математике. После выпуска из Кембриджа по совету отца Уильям отправляется в Париж для стажировки в лаборатории известного экспериментатора В. Реньо, который проводил систематические исследования в области теплоты.

Тематика работ Реньо совпадала с интересами Томсона — еще во время учебы в Англии он под влиянием работ Фурье занялся исследованием процессов распространения тепла. Внимание Томсона привлекала также аналогия между описанием

электростатических и тепловых явлений. Этот интерес к термо- и электродинамике ученый сохранял в течение всей жизни.

После возвращения из Франции Уильям занимает кафедру натуральной философии (физики) в университете Глазго. Будучи блестящим теоретиком, Томсон в то же время много занимался экспериментальной физикой. По примеру Ренью он создал при кафедре лабораторию, в которой велась как учебная, так и исследовательская работа. С университетом Глазго связана практически вся творческая жизнь Томсона: он занимал кафедру физики в течение пятидесяти трех лет, а в последние годы жизни был президентом университета.

Научные интересы Томсона удивительно разнообразны. Так, стажирясь в Париже, он разработал метод решения задач электростатики, получивший название метода «зеркальных изображений» (1846). Там же Томсон по работе Клапейрона ознакомился с теорией Карно, что впоследствии (1848) привело его к идее об абсолютной термодинамической шкале температур. В 1851 г. независимо от Клаузиуса Томсон сформулировал второе начало термодинамики. На основе своих исследований по термодинамике Томсон вместе с Дж. Джоулем установил (1853—1854) изменение температуры газа при его дросселировании (эффект Джоуля — Томсона). В 1856 г. Томсон открыл третий термодинамический эффект (первые два — возникновение термо-ЭДС и выделение теплоты Пельтье), состоявший в выделении так называемой «теплоты Томсона» при протекании тока по проводнику, характеризующемуся ненулевым градиентом температуры. Томсону принадлежит и построение последовательной теории термоэлектрических явлений.

Томсон внес большой вклад в развитие практических применений электричества. Он был главным научным консультантом при прокладке первых трансатлантических кабелей, обеспечивших устойчивую телеграфную связь между двумя континентами. За участие в прокладке трансатлантического кабеля Томсон был возведен в дворянское достоинство (1865). В деле прокладки кабеля роль Томсона не ограничивалась консультациями. В связи с проблемой распространения электрических сигналов он рассмотрел процесс электромагнитных колебаний в контуре и вывел формулу для периода собственных колебаний, названную его именем. Кроме того, Томсон сконструировал целый ряд точных электрических приборов («кабельный» гальванометр, квадрантный электрометр, электростатический вольтметр и др.). Работы по прокладке трансатлантического кабеля пробудили в Томсоне интерес к проблемам морской навигации. Следствием этого интереса стало создание эхолота непрерывного действия, мареографа, принципиально усовершенствование морского компаса. Об авторитете Томсона и уважении к нему свидетельствуют слова одного морского офицера: «Каждый моряк должен молиться на него еженощно!»

С 60-х годов Томсон начал разрабатывать теорию вихревых

атомов. Это направление исследований Томсона было связано с его общей методологической установкой — стремлением объяснить все физические явления механическими причинами. Томсоном была разработана вихревая теория светоносного эфира, которую Дж. Гиббс считал достойной соперницей электромагнитной теории света. В целом работы Томсона на эту тему явились как бы завершением попыток построить законченную механическую картину мира.

Томсон пользовался огромным авторитетом среди ученых всего мира. Он был членом многих научных академий и обществ (в том числе Петербургской АН), избирался президентом Лондонского Королевского общества, удостоивался многих наград. Ученый умер 17 декабря 1907 г.

На первом этапе исследований по термодинамике Томсон колебался в выборе точки зрения на природу теплоты. Поначалу он придерживался традиционной теории теплорода, и его работа (1848), в которой предложен принцип построения абсолютной шкалы температур, основана на этой теории. Позднее под влиянием исследований Джоуля Томсон перешел на позиции кинетической теории теплоты. Заметим, однако, что подход к построению термодинамической шкалы температур, предложенный Томсоном, оказался приемлемым и при новой точке зрения на природу тепла.

Важную роль в развитии учения о теплоте сыграла формулировка второго начала термодинамики как невозможности вечно-го двигателя второго рода, данная Томсоном. Стимулом для выяснения смысла и условий применимости этого закона послужила идея ученого о неизбежности «тепловой смерти» Вселенной (1852), ошибочность которой была убедительно продемонстрирована Л. Больцманом.

Об абсолютной термометрической шкале, основанной на теории Карно о движущей силе тепла и рассчитанной из наблюдений Реньо¹

Определение температуры давно признано в физической науке проблемой величайшей важности. Соответственно она была предметом наиболее пристального внимания и особенно в последние годы — очень тщательных и уточненных экспериментальных исследований. В настоящее время мы обладаем настолько полным практическим решением этой проблемы, насколько это может быть желательно даже для наиболее точных изысканий. Однако теория термометрии еще весьма далека от столь удовлетворительного состояния. Принцип, которому должно следовать при конструировании термометрической шкалы, на первый взгляд,

может показаться очевидным, поскольку может представляться, что совершенный термометр должен показывать равные приращения теплоты, как соответствующие равным приростам температуры, оцениваемым по числу делений этой шкалы. Теперь, однако, по вариациям удельных теплот тел установлен как экспериментально доказанный тот факт, что термометрия [основанная] на этих условиях невозможна, и мы остались без какого-либо принципа, на котором можно было бы основать абсолютную термометрическую шкалу.

Следующий по важности момент в первичном установлении абсолютной термометрической шкалы независимо от свойств любых конкретных видов вещества состоит в выборе условной системы термометрии, по которой результаты наблюдений, выполненных различными наблюдателями в разных местах и условиях, можно было бы точно сравнивать. Эта цель в весьма полной мере достигается с помощью термометров, устроенных и градуированных в соответствии с ясно определенными методами, освоенными лучшими приборостроителями наших дней, когда при интерпретации показаний термометров путем, допускающим сравнение, следуют ранее строго определенным (в особенности Ренью) экспериментальным процедурам. Конкретным видом термометра, в наименьшей степени подверженного неопределенным отклонениям любого типа, является термометр, который основан на расширении воздуха, и он поэтому повсеместно принят как эталон для сравнения термометров всех конструкций. Отсюда шкала, которая используется в настоящее время для оценки температуры, — это шкала воздушного термометра; и в точных исследованиях всегда заботятся о сведении к этой шкале показаний реально применяемого прибора, каковы бы ни были его конкретная конструкция и градуировка.

Принцип, согласно которому градуируется шкала воздушного термометра, состоит попросту в том, что равные абсолютные приращения объема массы воздуха или газа при постоянном давлении в приборе будут показывать по шкале равные разности чисел. Длина «градуса» определяется при этом путем приписывания определенного числа интервалу между точками замерзания и кипения. Ренью обнаружил, что различные термометры, построенные с использованием воздуха при разных давлениях или иных газов, дают показания настолько близкие, что различия оказываются неощутимыми*, если только не используются определенные газы, такие, как сернистая кислота, которые приближаются к физическому состоянию насыщенного пара. Это замечательное обстоятельство значительно увеличивает практическую

* Regnault, Relation des Experiences, etc. Fourth Memoir, 1 st part. Различия, как замечает Ренью, должны были бы быть более ощутимые, если бы градуировка выполнялась на основе предположения, что коэффициенты расширения различных газов равны, вместо того чтобы основываться на принципе, изложенном в тексте, согласно которому точки замерзания и кипения определяются экспериментально для каждого термометра.

ценность воздушного термометра. Тем не менее строгий стандарт может быть введен лишь путем выбора в качестве термометрического вещества определенного газа при фиксированном давлении. И хотя мы имеем точный принцип создания определенной системы для оценки температуры, все же, поскольку здесь существенна ссылка на конкретное тело как эталонное термометрическое вещество, мы не можем считать, что получили абсолютную шкалу, и, строго говоря, может рассматривать эту реально принятую шкалу лишь как условное множество оцифрованных точек отсчета, достаточно близкое к требованиям термометрии.

Поэтому при современном состоянии физической науки возникает исключительно интересный вопрос: существует ли какой-либо принцип, на котором может быть основана абсолютная термометрическая шкала?

Мне представляется, что теория Карно о движущей силе тепла позволяет нам дать на него утвердительный ответ.

Связь между движущей силой и теплом, как установлено Карно, состоит в том, что количества теплоты и интервалы температур входят как единственные элементы в выражение для механического действия, которое может быть получено посредством теплоты. Поскольку мы независимо располагаем определенной системой для измерения количеств теплоты, нам представляется и мера для интервалов, в соответствии с которой могут оцениваться абсолютные разности температур. Дабы сделать это более понятным, несколько слов следует сказать в пояснение теории Карно; но за полным изложением этого наиболее значимого вклада в физическую науку читатель отсылается к любой из работ, упоминавшихся выше (оригинальному сочинению Карно или статье Клапейрона об этом же предмете)².

При настоящем состоянии науки неизвестно действие, посредством которого теплота могла бы поглощаться либо без повышения температуры вещества, либо без превращения в скрытую теплоту и произведения некоторого изменения физического состояния тела, в котором она поглощается. Превращение теплоты (или caloric) в механическое действие, вероятно, невозможно* или, во всяком случае, не обнаружено³. В реальных машинах для получения механического действия посредством теплоты мы должны искать источник силы не в каком-либо поглощении и превращении, но единственно в передаче теплоты. Так Карно, отталкиваясь от общепринятых физических принципов, показы-

* Это мнение, по-видимому почти без исключения, принималось теми, кто писал об этом предмете. Тем не менее противоположное мнение защищает м-р Джоуль из Манчестера. Некоторые весьма замечательные открытия, которые он сделал в отношении генерации теплоты посредством трения в жидкостях, находящихся в движении, и некоторые известные эксперименты с магнетоэлектрическими машинами по видимости⁴ указывают на реальное превращение механического действия в теплоту. Тем не менее не представлено никаких экспериментов, в которых демонстрировалось бы обратное действие. Но следует признать, что многое из того, что относится к этим фундаментальным вопросам натуральной философии, еще окружено тайной.

вает, что механическое действие должно получаться именно благодаря *опусканию* теплоты от горячего тела к холодному через среду машины (например, паровой или воздушной); и обратно: он доказывает, что то же количество теплоты может быть *поднято* от холодного тела к горячему (машина в этом случае *работает в обратном направлении*) при затрате разного количества работающей силы (*labouring force*), точно так же как механическое действие может быть получено при течении воды вниз в водяном колесе или как в работающем насосе вода может подниматься на более высокий уровень. Количество механического действия, которое можно получить при передаче данного количества теплоты через какую-либо среду машины, в которой достигается совершенная экономия, будет зависеть, как показывает Карно, не от конкретной природы вещества, используемого в качестве среды для передачи теплоты в машине, но только от разности температур двух тел, между которыми теплота передается.

Карно детально исследовал идеальную конструкцию воздушной и паровой машин, при которой, кроме того что удовлетворено условие совершенной экономии, машина устроена так, что в заключение полного цикла используемое вещество (в одном случае — воздух, а в другом — вода) приводится в то же физическое состояние, в каком оно было в начале. Таким образом он показывает, на каких началах, доступных экспериментально определению, либо со ссылкой на воздух, либо на жидкость и ее пар, может быть установлена абсолютная величина механического действия, обусловленного передачей единицы теплоты от горячего тела холодному при любом интервале термометрической шкалы. В статье м-ра Клапейрона представлены различные экспериментальные данные, по общему признанию очень неполные, и из них в соответствии с формулами Карно для различных частей шкалы рассчитаны величины механического действия, вызванного опусканием единицы теплоты на один градус воздушного термометра. Полученные результаты весьма определенно показывают, что величина, которую мы с большим основанием можем называть градусом (оцениваемым по механическому действию, полученному при опускании единицы количества теплоты на эту величину) воздушного термометра, зависит от того, в какой части шкалы она берется, причем для высоких температур она меньше, чем для низких*.

Характерное свойство той шкалы, которую я теперь предлагаю, состоит в том, что все градусы имеют одну и ту же вели-

* Это то, что мы могли предвидеть, поскольку считаем, что бесконечный холод должен соответствовать конечному числу градусов воздушного термометра ниже нуля. Если мы доведем строгий принцип градуировки, установленный выше, достаточно далеко, то достигнем точки, соответствующей объему воздуха, уменьшенному до нуля, что будет отмечено на шкале как -273° ($-100/0,366$, если $0,366$ есть коэффициент расширения). Поэтому -273° воздушного термометра — это точка, которой не может достигнуть никакая конечная температура, сколь бы низкой она ни была.

чину, т. е. единица теплоты, опускающаяся от тела A с температурой T по этой шкале к телу B с температурой $(T-1)$, должна создавать одно и то же механическое действие, каким бы ни было число T . Такая шкала справедливо может быть названа абсолютной, поскольку ее характеристика совершенно не зависит от физических свойств какого-либо конкретного вещества.

Для того чтобы сравнить эту шкалу со шкалой воздушного термометра, должны быть известны *величины* градусов воздушного термометра (соответствующие принципу оценки, установленному выше). Тогда выражение Карно, полученное из рассмотрения его идеальной паровой машины, позволяет нам рассчитать эти величины, если скрытая теплота какого-либо данного объема и давления насыщенных паров при любой температуре определены экспериментально. Определение этих величин составляет главную цель огромной работы Реньо, о которой уже упоминалось, но в настоящее время его исследования еще не завершены. В первой части, которая пока только и опубликована, были определены скрытые теплоты данных весов и давление насыщенных паров для всех температур между 0 и 230° (по стоградусной шкале воздушного термометра). В дополнение необходимо было бы знать плотность насыщенных паров при различных температурах, что позволило бы определить скрытую теплоту любого данного объема при любой температуре. М-р Реньо сообщил о своем намерении начать подобные исследования; но, пока эти результаты неизвестны, у нас нет другого пути дополнения данных для решения настоящей задачи, кроме оценки плотности насыщенного пара при любой температуре (причем соответствующие давления известны по уже опубликованным исследованиям Реньо) в соответствии с приближенными законами сжимаемости и расширения (законы Мариотта и Гей-Люссака или Бойля и Дальтона). В пределах естественных температур в обычном климате плотность насыщенного пара уже измерена Реньо⁴ для проверки этих законов. Исходя из экспериментов, которые были выполнены Гей-Люссаком и др., мы имеем основание верить, что вплоть до температуры 100° значительных отклонений быть не может. Но наша оценка плотности насыщенного пара, основанная на этих законах, может быть сильно ошибочной при таких высоких температурах, как 230° . Следовательно, полностью удовлетворительный расчет предложенной шкалы не может быть проведен впредь до получения дополнительных экспериментальных данных. И все же с теми данными, которыми мы уже обладаем, можно привести приближенное сравнение новой шкалы со шкалой воздушного термометра, которое, по крайней мере между 0 и 100° , будет достаточно удовлетворительным.

Труд по выполнению необходимых расчетов для проведения сравнения предложенной шкалы и шкалы воздушного термометра в пределах от 0 до 230° последнего любезно взял на себя м-р Уильям Стил, до недавнего времени работавший в Глазго-

колледже, а теперь — в колледже Св. Петра и Кембридже, Его результаты были представлены Обществу в виде таблиц вместе с диаграммой, на которой сравнение двух шкал представлено графически. В первой таблице⁵ показаны величины механического действия, обусловленного опусканием единицы теплоты на, последовательное число градусов воздушного термометра. Принятая единица теплоты — это количество [теплоты], необходимое для повышения температуры 1 кг воды от 0 до 1° воздушного термометра, а единица механического действия — это килограмм-метр, т. е. действие, совершаемое при поднятии 1 кг на высоту 1 м.

Механическое действие, выраженное в футо-фунтах, обусловленное единицей теплоты по стоградусной шкале, переходящей от тела при любой температуре, меньшей 230°, к телу с температурой 0°

Верхний предел температуры	Механическое действие	Верхний предел температуры	Механическое действие
1	4,960	20	96,656
2	9,906	30	143,058
3	14,838	40	188,223
4	19,756	50	232,185
5	24,661	60	274,975
6	29,553	70	316,644
7	34,431	80	357,271
8	39,296	90	396,935
9	44,148	100	435,695
10	48,987		

Во второй таблице⁶ представлены температуры по предложенной шкале, которые соответствуют различным градусам воздушного термометра от 0 до 230°. Условные точки, совпадающие на обеих шкалах — 0 и 100°.

Замечание. Если мы сложим вместе первые сто чисел, данные в первой таблице, то получим 135,7 для работы, обусловленной опусканием единицы теплоты от тела *A* при 100° к *B* при 0°. Далее, 79 таких единиц теплоты, согласно д-ру Блэку (его результаты очень ненамного поправлены Ренью), заставляют таять килограмм льда. Следовательно, если теплоту, необходимую для плавления фунта льда принять за единицу, а метр-фунт — за единицу механического действия, то работа, которая должна получаться при опускании единицы количества теплоты от 100 до 0°, составляет 79-135,7, или приблизительно 10 700. Это то же самое, что и 35 100 футо-фунтов, что чуть больше, чем работа двигателя 1 л. с. за 1 мин (33 000 футо-фунтов). Следовательно, если бы мы имели паровую машину в 1 л. с, работающую с совершенной экономией, с котлом при температуре 100° и конденсатором, поддерживаемым при температуре 0° путем непрерывного добавления льда, то за 1 мин должно было бы таять гораздо менее, чем фунт льда.

О динамической теории теплоты...

ЧАСТЬ I

Основные принципы теории движущей силы тепла

9. Вся теория движущей силы теплоты основывается на следующих двух положениях, обязанных своим происхождением первое — Джоулю, а второе — Карно и Клаузиусу.

Положение I (Джоуль). Во всех случаях, когда равные количества механического действия получаются каким бы то ни было способом исключительно за счет источника тепла или теряются при исключительно тепловых действиях, всегда уничтожаются или приобретаются равные количества теплоты.

Положение II (Карно и Клаузиус). Если какая-либо машина устроена таким образом, что при работе ее в противоположном направлении все механические и физические процессы в любой части ее движений превращаются в противоположные, то она производит точно такое же механическое действие, какое могла бы произвести за счет заданного количества теплоты любая термодинамическая машина с теми же самыми температурами источника тепла и холодильника. (...)

12. Доказательство второго положения основывается на следующей аксиоме: *невозможно при помощи неодоушевленного материального деятеля получить от какой-либо массы вещества механическое действие путем охлаждения ее ниже температуры самого холодного из окружающих предметов**.

13. Для доказательства второго положения допустим, что существуют две термодинамические машины *A* и *B*, из которых *B* удовлетворяет условиям, указанным в формулировке второго предложения, и пусть, если возможно, *A* производит из заданного количества теплоты больше работы, чем *B*, когда их источники тепла и холодильники находятся при соответственно равных температурах. Тогда в силу полной *обратимости* всех совершаемых ею операций машина *B* могла бы работать в обратном направлении и могла бы возвращать своему источнику тепла некоторое количество теплоты за счет той работы, которую она при обратном своем действии получила бы из такого же количества теплоты. Если *B* заставить работать в обратном направлении и возместить источнику тепла машины *A* (которую мы можем предположить соответственно приложенной к *B*) как раз столько теплоты, сколько было заимствовано из него в течение определенного периода действия машины *A*, то окажется, что затра-

* Если бы мы не признали эту аксиому действительной при всех температурах, нам пришлось бы допустить, что можно ввести в действие автоматическую машину и получать путем охлаждения моря или земли механическое действие в любом количестве, вплоть до исчерпания всей теплоты суши и моря или, в конце концов, всего материального мира.

чено на это было работы меньше, чем ее было получено от действия машины *A*. Таким образом, если подобные ряды прямых операций машины *A* и обратных — машины *B*, работающих либо поочередно, либо одновременно, будут продолжены, то результатом этого будет непрерывное получение работы без непрерывного извлечения теплоты из источника тепла. Согласно положению 1, отсюда следует, что при обратной работе машины *B* из холодильника должно забираться больше теплоты, чем ему передается при прямой работе машины *A*. Можно было бы поставить дело и таким образом, чтобы машина *A* тратила часть своей работы на приведение в обратное движение машины *B*, и всю эту установку можно было сконструировать в виде автоматически действующего аппарата. Итак, в этом случае от источника тепла не отнималось бы и ему не сообщалось бы никакой теплоты, а всем прочим окружающим телам и пространствам, за исключением холодильника, можно было бы, не вступая в противоречие с каким-либо принятым ранее условием, приписать температуру, равную температуре источника тепла, какова бы ни была последняя. Мы, следовательно, имели бы автоматически действующую машину, способную непрерывно извлекать теплоту тела, окруженного другими телами с более высокой температурой, и превращать эту теплоту в механическое действие. Но последнее противоречит нашей аксиоме, и поэтому мы приходим к заключению, что гипотеза, допускающая, будто машина *A* извлекает из равного количества теплоты, взятой из источника тепла, большее механическое действие, чем машина *B*, является ложной. Следовательно, при определенных температурах источника тепла и холодильника никакая машина не может извлечь из данного количества введенного в нее теплоты больше работы, чем машина, удовлетворяющая условиям обратимости, что и требовалось доказать. (...)

Комментарий

Сокращенный перевод с английского работы У. Томсона «Об абсолютной термометрической шкале...» выполнен С. Р. Филоновичем по публикации: On an Absolute Thermometric Scale founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and calculated from Regnault's observations. «Philosophical Magazine», 1848, Ser. 3, vol. 33, n222, p. 313—316. Сокращены лишь некоторые примечания Томсона. Перевод с английского работы У. Томсона «О динамической теории теплоты...» выполнен В. С. Гохманом. Отрывки из нее воспроизводятся по изданию: Второе начало термодинамики. Сб., М. — Л., 1934, с. 161—174. Название этой работы на языке оригинала: On the Dynamical Theory of Heat, with numerical Results deduced from Mr. Joule's Equivalent of a thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam (1851).

- ¹ В. Реньо проводил исследования термодинамических свойств различных веществ на протяжении нескольких десятилетий. Первый том издания, содержащего полученные им результаты, вышел в 1847 г., второй — в 1862 г., третий — в 1870 г.
 - ² Статья Клапейрона называлась «Мемуар о движущей силе огня».
 - ³ Эта фраза объясняется тем, что при подготовке данной работы Томсон еще не отказался окончательно от теории теплорода, хотя определенные сомнения относительно ее справедливости у него уже были (см. подстрочное примечание Томсона в тексте).
 - ⁴ В работе «Очерки по гигрометрии».
 - ⁵ Ниже приведен сокращенный вариант таблицы, на которую ссылается Томсон.
 - ⁶ Таблица, о которой говорит Томсон, в его опубликованной работе не приведена.
-

Литература

- [1] Собрание сочинений У. Томсона:
Thomson W. Mathematical and Physical Papers. Vols. 1—6. Cambridge, 1911.
 - [2] Thomson S. P. *The Life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs. Vols. 1—2. London, 1901.*
 - [3] Мак-Дональд Д. Фарадей, Максвелл и Кельвин. М., 1967.
-



Л. Фуко

1819—1868

О скорости света в различных средах

Вопрос о том, как соотносятся между собой скорости света в различных прозрачных средах, интересовал исследователей с начала XVII в. Уже Р. Декарт при обосновании закона преломления света (1637), руководствуясь механической аналогией, выдвинул гипотезу, что коэффициент преломления есть отношение скорости света в двух средах, на границе между которыми происходит преломление. Хотя обоснование этой гипотезы еще при жизни Декарта подвергалось резкой критике (в частности, со стороны П. Ферма), впоследствии ее содержание стало составной частью двух основных конкурировавших теорий света: корпускулярной и волновой. В рамках корпускулярной теории предполагалось, что если закон преломления записывается в виде $\sin i / \sin r = n$ (i и r — углы падения и преломления соответственно), то $n = v_1 / v_2$, причем v_1 — скорость света в первой среде, где определяется угол падения, а v_2 — скорость света во второй среде, в которой находится угол преломления. Следствием волновой теории было равенство $n = v_2 / v_1$. Таким образом, еще в XVII в. возникла идея «решающего эксперимента», который мог однозначно подтвердить справедливость одной теории и указать на ошибочность другой. Однако проведения этого *experimentum crucis* пришлось ждать почти 200 лет. Первым, кому удалось осуществить этот труднейший эксперимент, был французский физик Леон Фуко.

Жан Бернард Леон Фуко родился 19 сентября 1819 г. в Париже в семье книгоиздателя. Вследствие слабого здоровья мальчик получил начальное образование дома. С детства у Фуко проявились склонности к изобретательству и тонкому ручному труду. Желая найти наилучшее применение своему таланту, Фуко начал изучать хирургию. Однако оказалось, что он не переносит вида крови. Более приемлемыми для Фуко оказались исследования в области клинической микроскопии, к которым его привлек А. Донне. Кроме того, в течение ряда лет Фуко активно занимался журналистикой, выступая в качестве научного обозревателя в одной из парижских газет.

Интерес Фуко к фотографии (называвшейся тогда дагерротипией) свел его с И. Физо. Вместе с ним молодой ученый провел

ряд оптических исследований, наиболее известное из которых — наблюдение интерференции света при больших разностях хода.

Через некоторое время от сотрудничества Физо и Фуко перешли к творческому соревнованию по определению скорости света в земных условиях. Физо с помощью вращающегося зубчатого колеса первым добился успеха (1849), Фуко же опередил коллегу в постановке *experimentum crucis* — сравнении скоростей света в различных средах (1850).

Научные интересы Фуко не ограничивались оптикой. Так, в 1851 г. он провел эксперимент с маятником, доказавший вращение Земли, за что был награжден орденом Почетного легиона. В 1855 г. ученый обнаружил нагревание сплошных металлических тел индукционными токами («токи Фуко») и предложил способ их уменьшения. Большой интерес проявлял Фуко к астрономическим наблюдениям, для которых конструировал оригинальные инструменты.;

Фуко принадлежит большое число изобретений, получивших широкое применение на практике (гироскоп, регулятор дуговых ламп, фотометр и др.). Он также разработал метод серебрения стекла для изготовления отражательных телескопов, позволивший значительно уменьшить их стоимость.

Несмотря на очень высокую продуктивность научной работы Фуко, его деятельность получила довольно поздно признание на родине. Лишь незадолго до смерти он был избран членом Французской Академии наук (заметим, что ранее он стал членом-корреспондентом Петербургской Академии наук и членом Лондонского Королевского общества). Умер ученый 11 февраля 1868 г.

В постановке опыта с вращающимся зеркалом у Фуко был предшественник — известный французский физик и астроном Ф. Араго. Именно он в 1838 г. предложил использовать вращающееся плоское зеркало для проведения *experimentum crucis* (до этого в опытах по измерению скорости распространения электрических сигналов по проводам вращающееся зеркало использовал английский физик Ч. Уитстон). В схеме установки Араго и его методике проведения опыта имелись принципиальные недостатки, что привело при проведении опытов к неудаче. С разрешения Араго Фуко воспользовался самим принципом вращающегося плоского зеркала, но внес в схему опыта весьма существенные усовершенствования и добился успеха. Отметим, что в 1853 г. за опыты по сравнению скоростей света в воздухе и воде Фуко был удостоен докторской степени. К этим опытам он вернулся еще раз в 1862 г., когда получил наиболее точные результаты.

Об относительных скоростях света в воздухе и в воде

Общий метод измерения скорости света в прозрачных средах. Относительные скорости света в воздухе и в воде

Задача нового метода, который мне остается описать, состоит в обеспечении возможности работать на малом расстоянии и оценивать время, затрачиваемое светом для прохождения отрезка в несколько метров. Чтобы точно определить этот метод, а также для того, чтобы отличить его от методов, предлагавшихся ранее, достаточно сформулировать его от методов, предлагавших ранее, достаточно сформулировать его важнейшую особенность, которая состоит в *наблюдении неподвижного изображения движущегося изображения*.

Вращающееся зеркало, соединенное с объективом зрительной трубы, легко дает движущееся изображение неподвижного объекта; однако не менее справедливо, хотя, возможно, и менее очевидно, что при использовании отражения от неподвижного зеркала та же оптическая система становится весьма подходящей для того, чтобы давать новое неподвижное изображение движущегося изображения.

Я сначала докажу этот первый пункт, а потом продемонстрирую, что вращательное движение зеркала создает смещение неподвижного изображения, которое позволяет найти скорость света в проходимой им среде как функцию легко измеряемых величин.

При смене среды, если все прочее остается без изменений, смещение должно измениться так, что станет ясно, как скорость света связана с коэффициентом преломления. Я буду настаивать на этом способе сравнения, который является главной целью настоящей работы, и обнаруживаю схему, позволяющую работать сразу с несколькими средами и одновременно наблюдать и сравнивать соответствующие смещения. Затем я дополню описание установки и прибавлю детали, касающиеся предосторожностей, необходимых для обеспечения успеха опыта и повышения точности измерений.

Общая схема опыта. На одной горизонтальной прямой помещают: 1) миру, образованную тонкой платиновой нитью, натянутой в середине маленького квадратного отверстия со стороны 2 мм, вырезанного в тонкой непрозрачной металлической пластинке; 2) оптический центр ахроматического объектива; 3) центр плоского зеркала, способного вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей очень близко к его отражающей поверхности. С помощью гелиостата пучок солнечного света направляется вдоль ряда из этих трех элементов и фиксируется [в этом направлении]. Тогда мира пропускает некоторую часть света,

которая подает на объектив, расположенный от мира на расстоянии, немного меньшем двойного фокусного расстояния. Преломляемый этим объективом свет отражается от плоского зеркала, чтобы образовать в пространстве увеличенное изображение отверстия и нити. Поскольку по желанию расстояние от объектива до мира можно менять, следовательно, произвольно заставляют меняться расстояние от изображения до зеркала, и, когда оно приводится во вращение, изображение движется в пространстве по окружности, радиус которой может принимать желательную протяженность.

Таким образом формируется движущееся изображение, след которого можно различить на экране. Чтобы получить неподвижное изображение, необходимо на окружности, описываемой движущимся изображением, поместить отражающую поверхность сферического вогнутого зеркала, ориентированного так, чтобы его центр кривизны совпадал с центром вращающегося зеркала. Когда это условие выполнено, вращающийся пучок отражается от этого зеркала в течение всего времени, пока он встречает на своем пути вогнутое зеркало, все элементы которого перпендикулярны оси пучка. Кроме того, пучок продолжает проходить установку в обратном направлении до мира, точки его выхода, которую он покрывает прямым изображением натуральной величины, причем все точки изображения перекрываются с соответственными точками самой мира.

Действительно, пусть ab [рис. 93, a] — предмет, а $a'b'$ — его изображение, образованное объективом L и падающее на отражающую поверхность вогнутого зеркала M' . Пусть c — точка пространства, где позже будет помещен центр вращающегося зеркала. Если вогнутое зеркало имеет центр кривизны в точке c , то большая часть пучка, отраженного от его поверхности, будет направлена через объектив для воссоздания на предмете ab прямого изображения в натуральную величину. В тот момент, когда свет возвращается к объективу, изображение $a'b'$ становится предметом, точка которого a' является центром, сопряженным с a , и точка b' сопряжена с b . Следовательно, весь свет, возвращающийся от a' и проходящий через объектив, должен падать в a ; весь свет, возвращающийся от b' , должен падать в b и так же для всех других точек. Значит, предмет ab покрыт равным ему сходно расположенным изображением самого себя.

Теперь установим плоское зеркало m под некоторым наклоном. Чтобы узнать, где будет образовано отраженное изображение $a''b''$, имеется хорошо известный способ построения: продолжают след плоского зеркала cm и для точек $a''b''$ определяют положения с одной стороны этой плоскости, симметричные тем, которые с другой стороны занимают точки $a'b'$. Потом устанавливают вогнутое зеркало M' и ориентируют его, заставляя его Центр кривизны попадать в точку c . Световой пучок возвращается к плоскому зеркалу, оттуда — к объективу, как будто он

проходит от $a'b'$, и окончательно образует изображение предмета ab на самом предмете.

Это устройство дает одинаковый результат при всех наклонах плоского зеркала, поскольку доказательство не зависит от угла падения. Таким образом, безразлично, падает ли изображение в $a''b''$ или в $a''''b''''$ и каково его положение на поверхности зеркала M' ; изображение по возвращении неизменно совпадает с предметом ab . Для того чтобы на опыте констатировать неизменность положения этого изображения, между объективом L и предметом ab наклонно к оси объектива помещают толстое плоскопараллельное стекло, поверхность которого q дает путем частичного отражения легко видимое изображение $\alpha\beta$. Рассматриваемое с помощью окуляра o изображение $\alpha\beta$ сохраняет строго одно и то же положение, какое бы переменное направление ни получал пучок между двумя зеркалами: плоским и вогнутым; значит, это действительно неподвижное изображение движущегося изображения.

В использовавшейся установке предметом ab является мира [рис. 93, б], описанная выше: объектив L имел фокусное расстояние 1,90 м, и окуляр с микрометром давал увеличение от 10 до 20 раз. Вращающееся зеркало имело диаметр 14 мм, а радиус кривизны вогнутого зеркала был 4 м. Расстояние от вращающегося зеркала до предмета могло варьироваться в очень широких пределах, и положение объектива определялось необходимостью поместить предмет и поверхность вогнутого зеркала в сопряженные по отношению к объективу точки.

Приведем теперь зеркало в движение и заставим его непрерывно вращаться (сначала медленно) в направлении, показанном стрелкой [рис. 93, а].

Поскольку угол падения постепенно изменяется, а угол отражения должен всегда оставаться равным ему, отраженный пучок поворачивается вокруг точки s , как зеркало, но с удвоенной угловой скоростью. Изображение вращается по окружности и за каждый поворот плоского зеркала один раз проходит по вогнутому зеркалу, порождая для наблюдателя изображение $\alpha\beta$, которое остается погасшим в течение всего времени, протекающего между двумя последовательными прохождениемми. Поэтому, когда число оборотов зеркала меньше 30 в секунду, изображение лишь прерывисто вспыхивает. При больших скоростях его появления следуют достаточно быстро для того, чтобы сливаться одно с другим по причине стойкости зрительного восприятия. Изображение $\alpha\beta$ кажется тогда постоянным, а его интенсивность для наблюдателя падает в отношении длины полной окружности к половине отражающей дуги вогнутого зеркала.

Однако когда зеркало вращается достаточно быстро, проявляется другой эффект, и видно возникновение важного явления смещения. Изображение $\alpha\beta$ смещается вдоль окулярного микрометра в таком направлении, в каком оно увлекается движением зеркала. Это смещение показывает, что длительность распро-

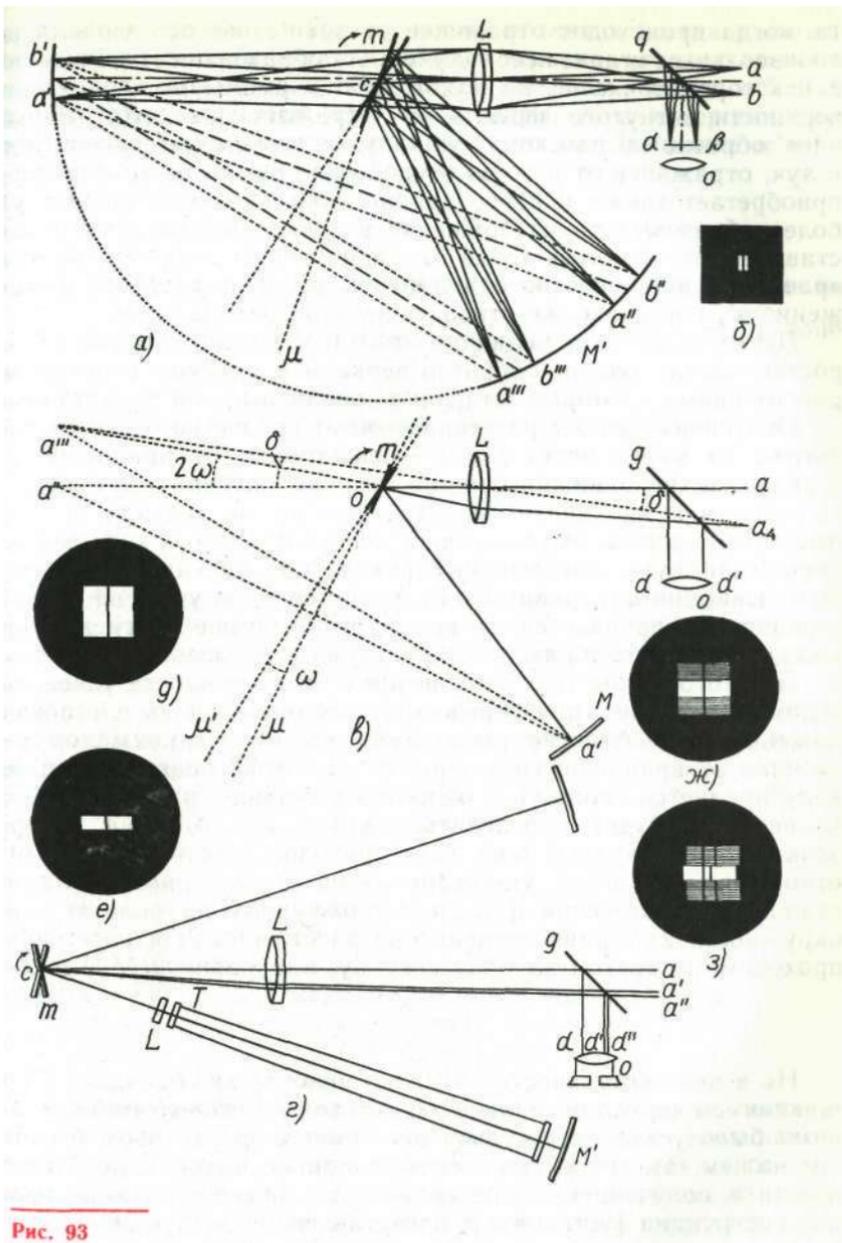


Рис. 93

странения света между двумя зеркалами не равна нулю и что она может быть измерена по смещению.

Для упрощения доказательства сведем источник света к одной точке a [рис. 93, в], предполагая, что в систему входит лишь центральный луч пучка ao , и рассмотрим его путь с момен-

та, когда происходит отражение от вращающегося зеркала под произвольным углом, необходимое для образования изображения в некоторой точке a' , на каком-либо нормальном элементе поверхности вогнутого зеркала M . Отражаясь от него, этот луч идет обратно к плоскому зеркалу, которое уже повернулось, и луч, отражаясь от него во второй раз при новом угле падения, приобретает также и новое направление, что не позволяет уже более образовывать изображение в точке выхода луча, но заставляет его давать в точке a_4 изображение, отклоненное в направлении вращательного движения, и, следовательно, изображение α' , настолько же отклоненное для наблюдателя.

Легко видеть, как величина этого отклонения связана со скоростью света, числом оборотов зеркала в единицу времени и с расстояниями, которые отделяют различные части установки.

Обозначим через r расстояние oa от оптического центра объектива до мира, через l и l' — расстояния от вращающегося зеркала до неподвижного и до того же оптического центра o . Определим n как число оборотов зеркала за секунду, π — как отношение длины окружности к диаметру и v — как скорость света, или путь, который он проходит за секунду. Назовем d дугу девиации aa_4 , равную $\alpha\alpha'$, и примем за ω угол, на который зеркало поворачивается за время, необходимое свету для прохождения туда и обратно между двумя зеркалами.

Для того чтобы угол отклонения δ был в точности удвоенным углом ω , я начну с пренебрежения расстоянием l' , т. е. с предположения, что объектив расположен на неощутимо малом расстоянии от вращающегося зеркала. По этой гипотезе, если зеркалу придается скорость n оборотов в секунду, наблюдаемое отклонение d будет определяться углом $\omega = \delta/2$, на который зеркало повернулось, пока свет проходил расстояние $2l$. Тогда отношение угла ω к n , умноженному на четыре прямых угла, или отношение отклонения d к $2n$, умноженному на полную длину окружности $2\pi r$, равно отношению расстояния $2l$ к расстоянию, проходимому светом за одну секунду, или равно $2l/v$, что дает

$$d = \frac{8\pi lnr}{v}.$$

Но в действительности объектив никогда не совпадает с вращающимся зеркалом, и эксперимент даже требует, чтобы между ними было установлено такое расстояние, при котором отклонение на нем заметно уменьшается. Поправка, которую необходимо ввести в полученную выше величину, с очевидностью вытекает из конструкции [установки], представленной на рис. 93.

Продолжим следы om , om' плоскости вращающегося зеркала в двух положениях, где оно находится в точности в те мгновения, которые ограничивают длительность прохождения света к вогнутому зеркалу, и построим относительно этих следов точки a'' и a''' , симметричные точке a' . Тогда угол $b''oa'''$ равен 2ω должен бы быть также равным углу девиации, если бы объектив

имел своим центром s . Но поскольку объектив всегда располагается на некотором расстоянии l' от зеркала, угол отклонения, равный противолежащему углу $a''oa'''$, меньше, чем $a''ca'''$, равный 2ω . Поскольку эти углы очень малы, то для вершин двух треугольников, которые имеют одно и то же основание $a''a'''$ и высоты l и $l+l'$, имеется пропорция

$$\frac{\delta}{2\omega} = \frac{l}{l+l'}$$

откуда вытекает, что вместо простого соотношения $\delta = 2\omega$ мы имеем $\delta = 2\omega \frac{l}{l+l'}$. Как следствие, истинное значение отклонения

$$d = \frac{2\pi l^2 nr}{v(l+l')}$$

и для скорости света

$$v = \frac{8\pi l^2 nr}{\delta(l+l')}$$

Эта формула на самом деле может служить для расчета скорости света в воздухе с погрешностью, зависящей от точности, с которой измеряется отклонение, а также различные величины, обозначенные буквами l , l' , r и n .

К тому же выражению можно прийти, рассуждая несколько иначе, а именно: скорость света есть путь, проходимый им за единицу времени:

$$v = \frac{e}{t}$$

или

$$e = 2l, \quad t = \frac{\delta(l+l')}{4\pi lnr}$$

Заменяя e и t их выражениями, находим, как и раньше,

$$v = \frac{8\pi l^2 nr}{\delta(l+l')}$$

Этот же метод применим для измерения скорости света во всех однородных и прозрачных средах, которые помещаются между вращающимися и вогнутыми зеркалами. Если по всей длине траектории произведена замена на единственную среду, то отклонение изменится в простом отношении скоростей света в новой и старой средах. Если, например, пространство между зеркалами заполнить водой, ничего более не меняя, то, поскольку коэффициент преломления воды почти равен $4/3$, отклонение должно вырасти в отношении 4 к 3 для подтверждения волновой теории и уменьшиться в отношении 3 к 4, чтобы подтвердить теорию истечения.

Однако, когда между двумя параллельными плоскостями помещается столб воды, приходится оставлять между этими плоскостями и зеркалами некоторое расстояние. В этом случае расстояние I делится на две части: одну P , занимаемую преломляющей средой, и другую Q , где остается воздух. В подобном случае наблюдаемое отклонение дает только среднюю скорость света u в пространстве, занимаемом частично водой, а частично воздухом. Но так как скорость [света] v в воздухе уже известна, а средняя скорость u находится тем же способом и можно непосредственно измерить длины P и Q , сумма которых равна I , то легко получить скорость света v' в воде. Действительно, средняя скорость света на пути $P+Q$ равна

$$u = \frac{(P+Q)vv'}{Pv+Qv'}$$

откуда

$$v' = \frac{Pvu}{(P+Q)v+Qu}$$

У тому же, чтобы разрешить вопрос, интересный с точки зрения теории, нет необходимости ни измерять скорость света в воде, ни изыскивать средства достичь этого. Достаточно определить, как по отношению к отклонению, возникающему при проведении опыта только в воздухе, меняется девиация, когда устанавливается столб воды, достаточно длинный для создания ощутимого эффекта. Еще более желательно иметь в установке две линии для опыта, одну — только для воздуха, а другую — для воздуха и воды, и наблюдать два соответствующих смещения одновременно. Тогда сравнение становится настолько простым, что нет необходимости прибегать к каким-либо измерениям: части установки располагаются так, как показано на рис. 93, г.

Я пока избегаю усложнения геометрической схемы опыта, сводя, как и ранее, световой пучок к центральному лучу; условлено, что точка его выхода, обозначенная a , есть всегда мира, образованная квадратным отверстием, пересекаемым в середине вертикальной нитью, изображение которой, рассматриваемое в окуляр, имеет вид, показанный на рис. 93, д.

Справа и слева от прямого пучка по траектории движущегося изображения устанавливаются два вогнутых зеркала M и M' , поверхности которых принадлежат одной и той же сфере, имеющей своим центром s . Каждое из них ограничивает расстояние, базу эксперимента, которая тянется от их поверхностей до поверхности вращающегося зеркала.

Тогда движущийся луч при каждом обороте заставляют отражаться в двух различных направлениях: при падении на M и при падении на M' . Следовательно, число появлений изображения a удваивается. Иначе говоря, в действительности это изображение создается наложением двух изображений, одно из которых обязано прохождению света по линии sM , а другое —

прохождению по линии cM' . Пока длины cM и cM' поддерживаются равными и среды, проходимые обоими лучами, остаются идентичными, ускорение вращательного движения, создающее для двух изображений одну и ту же девиацию, не позволяет отличить одно от другого. Но помещение преломляющей среды на одном из направлений cM или cM' , меняя совершенную симметрию системы, вследствие изменения скорости света на одном из двух путей должно создавать раздвоение $\alpha'\alpha''$ изображения a . Это действительно и происходит, когда перед зеркалом M' помещают трубу T , наполненную водой и заканчивающуюся на обоих концах параллельными стеклами. И все же, чтобы быть уверенным в успехе опыта и чтобы сделать его результаты более отчетливыми и строгими, необходимо соблюсти еще несколько предосторожностей.

Помещение на пути лучей трубы с водой создает возмущение, которое легко учесть, предполагая, что поверхность входа T действует на сходящийся пучок таким образом, что приближает все лучи к нормали и создает удлинение фокуса. Если в отсутствие трубы движущееся изображение должно было падать в точности на отражающую поверхность M' , то при установке трубы наблюдается искажение изображения в окуляре, поскольку оно имеет тенденцию образовываться за вогнутым зеркалом.

Для восстановления угла сходимости, необходимого для создания четкого изображения на M' , перед трубой помещают простую линзочку L с очень большим фокусным расстоянием, которое легко определить методом проб или путем расчета. Если сделать это, то при возвращении изображение имеет одинаковую четкость независимо от того, тем или иным путем оно образуется. Изображение меняется только по цвету и интенсивности: белое и яркое, когда свет все время идет через воздух, оно становится зеленым и темным при установке трубы с водой, и, если не прибегнуть к специальному приему, это различие в освещенности не позволит рассмотреть раздвоение, которое должно произойти с девиацией.

Назвав изображением в воздухе наложение ощущений, создаваемых быстро повторяющимися появлениями изображения, образованного после прохождения светом всего пути в воздухе, и назвав изображением в воде наложение ощущений от света, направленного по другому пути, я покажу, как их сделать отличными одно от другого во всех фазах эксперимента.

Заставим зеркало вращаться со скоростью 'большой, чем тридцать оборотов в секунду, и поэтому, приставив глаз к окуляру, получим непрерывное ощущение. Если закрыть зеркало M' , то будет видно только изображение в воздухе. Если, наоборот, перенести преграду на место перед зеркалом M , то будет видно только изображение в воде, и чтобы либо одно, либо другое было видно полностью, необходимо вогнутое зеркало, например M' , оставить открытым по всей высоте следа движущегося изображения на поверхности этого зеркала. Если надо уменьшить вы-

соту воспринимаемого изображения, необходимо только поставить перед зеркалом экран с щелью, высота которой должна быть меньше, чем длина следа. Воспринимаемое изображение уменьшится до высоты щели и будет иметь вид, показанный на рис. 93, е.

Покроем зеркало M экраном с прорезью, оставляя полностью открытым зеркало M и заставим подвижное зеркало вращаться достаточно быстро, чтобы изображения совместились, но еще без ощутимого смещения. Очевидно, что воспринимаемое изображение будет образовано наложением изображения в воде, сохранившего присущие ему высоту, интенсивность и цвет, и изображения в воздухе, более яркого и глубокого, причем они оба пересечены одним и тем же вертикальным прямым штрихом: результирующее изображение показано на рис. 93, ж.

Чтобы закончить установку, остается только поместить в фокусе окуляра плоское стеклышко с прочерченным вертикальным штрихом, который при медленном вращении зеркала или даже когда оно неподвижно совпадает с серединным штрихом — изображением мира. Теперь можно привести зеркало в движение с полной скоростью, и по мере того, как его вращение будет ускоряться, можно будет видеть, как изображение в целом смещается и дробится, как на рис. 93, з. Неподвижный штрих, принадлежащий окуляру, остается на месте, как точка отсчета, очень удобная для оценки абсолютных и относительных величин девиаций¹. (...)

В действительности девиация белого изображения всегда меньше, чем девиация видимых частей зеленого изображения, которые располагаются сверху и снизу от него. Если, например, принять в опыте следующие данные:

$$\begin{array}{ll} r = 3 \text{ м}; & n = 500 \text{ м}; \\ l = 4 \text{ м}; & P = 3 \text{ м}; \\ l' = 1,18 \text{ м} & Q = 1 \text{ м}, \end{array}$$

то для белого изображения смещение получается равным 0,375 мм, а для зеленого — 0,469 мм; их разность не может, очевидно, ускользнуть от наблюдения.

Но белое изображение — это изображение в воздухе, и его девиация дает меру длительности пребывания света между двумя зеркалами. Зеленое изображение — это изображение в воде, и его девиация также дает меру времени, соответствующую тому же проходимому расстоянию. Таким образом, мы приходим к решающему выводу, совершенно несовместимому с теорией истечения: *свет движется в воздухе быстрее, чем в воде.* (...)

et dans l'eau. «Annates de Chemie et de Physique», 1854, t. 41, p. 123—164.

Эта работа представляет собой докторскую диссертацию Фуко.

¹ Далее следует описание деталей конструкции установки, которые представляют определенный интерес, поскольку для своего времени она явилась шедевром экспериментального искусства. Два вращающихся посеребренных зеркальца из стекла диаметром 14 мм были укреплены в кольце, по диаметру которого проходила ось миниатюрной турбинки, приводившейся в движение с помощью модели паровой машины Уатта (источником тепла служила спиртовка). Для улучшения условий вращения турбинки в конических подпятниках использовалась смазка жидким маслом, давление которой регулировалось. Особые предосторожности предпринимались для ликвидации вибраций в оси турбины.

Скорость вращения определялась путем сравнения частоты звука, издававшегося турбинкой с эталонным музыкальным звуком по методу биений.

Фуко предлагает также установить на пути луча *сМ'* зеленый светофильтр, чтобы было легче различать изображения, полученные от зеркал *М* и *М'*.

Литература

- [1] Собрание сочинений Л. Фуко: Recueil des Travaux scientifiques de Leon Foucault. Т. 1—2. Paris, 1878.
- [2] Gilbert P. Leon Foucault, sa vie et son oeuvre scientifique. «Revue des questions scientifiques» (Paris), 1879, t. 5, p. 108—154, 516—563.
- [3] Верин А. Опыт Фуко. Л. — М., 1934, гл. 4.
- [4] Филонович С. Р. Самая большая скорость. М., 1983, гл. III.