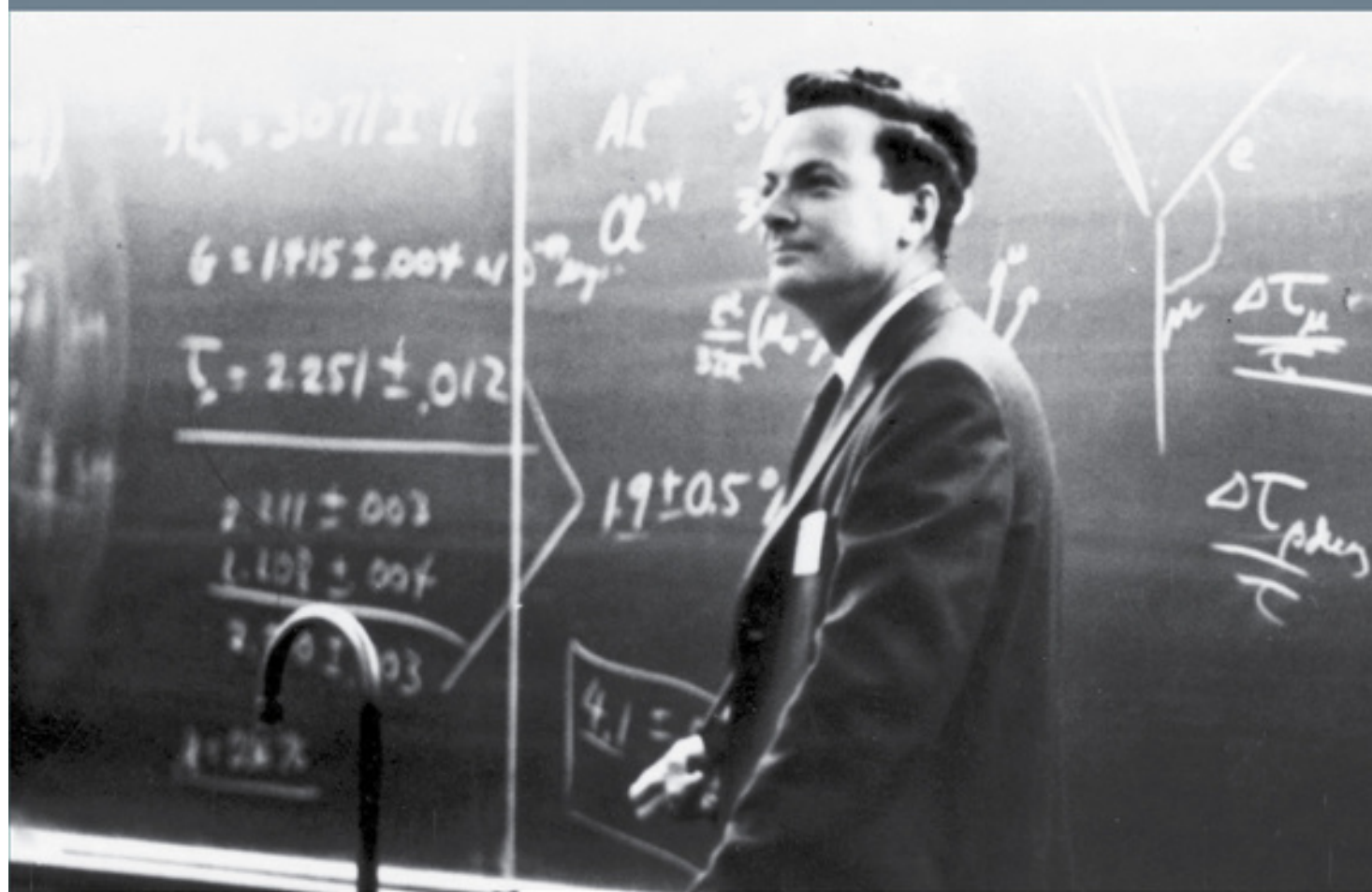


ПРОСТО О СЛОЖНОМ! — КУРС ДЛЯ
ГУМАНИТАРИЕВ ОТ ВЕЛИКОГО ФИЗИКА

ХАРАКТЕР ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ



*Книга, которая больше 50 лет входит в списки
международных бестселлеров!*

РИЧАРД ФЕЙНМАН

Ричард Фейнман

Характер физических законов

«ФТМ»

«АСТ»

1965

УДК 53(73)
ББК 22.3г

Фейнман Р. Ф.

Характер физических законов / Р. Ф. Фейнман — «ФТМ»,
«АСТ», 1965

ISBN 978-5-17-087507-8

В основу этой книги, больше 50 лет состоящей в списке международных бестселлеров, легли знаменитые лекции Ричарда Фейнмана, прочитанные им в 1964 году в Корнеллском университете. В этих лекциях прославленный физик рассказывает о фундаментальных законах природы и величайших достижениях мировой физики, не утративших своей актуальности и по сей день, – рассказывает простым доступным языком, понятным даже самому обычному читателю. Чего только стоит его знаменитая аналогия с мокрым человеком, который пытается вытереться мокрым полотенцем, на примере которой он объясняет закон сохранения энергии!..

УДК 53(73)
ББК 22.3г

ISBN 978-5-17-087507-8

© Фейнман Р. Ф., 1965
© ФТМ, 1965
© АСТ, 1965

Содержание

Вступительное слово ректора Корнеллского университета Д. Корсона	6
Лекция 1. Пример физического закона – закон тяготения	7
Лекция 2. Связь математики с физикой	25
Конец ознакомительного фрагмента.	38

Ричард Фейнман

Характер физических законов

© Richard Feynman, 1965

© Перевод. Э.Л. Наппельбаум, 2014

© Перевод. В.П. Голышев, 2014

© Издание на русском языке AST Publishers, 2015

* * *

Вступительное слово ректора Корнеллского университета Д. Корсона

Леди и джентльмены, я имею честь представить вам нынешнего лектора Мессенджерских чтений профессора Ричарда Фейнмана из Калифорнийского технологического института.

Профессор Фейнман – выдающийся физик-теоретик, многое сделавший для того, чтобы навести порядок в той путанице, которой отмечено захватывающее развитие физики в послевоенный период.

Р. Фейнман выполнил свою дипломную работу в Массачусетском технологическом институте, а затем занимался в аспирантуре Принстонского университета. Он участвовал в работах, проводившихся по так называемому Манхэттенскому проекту, сначала в Принстоне, а позже в Лос-Аламосе. В 1944 г. он получил звание ассистента профессора в Корнеллском университете, но занял эту должность только по окончании войны. Мне было интересно узнать, что говорили о нем, когда присуждалось это звание, поэтому я просмотрел протоколы попечительского совета... и не обнаружил там никаких записей об этом событии. Там имеется, однако, около двадцати записей о предоставлении отпусков, увеличении жалованья и повышении в должности. Одна запись особенно меня заинтересовала. 31 июля 1945 г. председатель физического отделения написал декану факультета искусств, что «доктор Фейнман – выдающийся педагог и исследователь, равные которому вырастают не часто». Председатель считал, что годового жалованья в три тысячи долларов маловато для выдающегося работника факультета, и рекомендовал увеличить жалованье профессору Фейнману на девятьсот долларов. Декан, с несвойственной его положению щедростью и совершенно не учитывая финансовых возможностей университета, вычеркнул девятьсот долларов и вписал круглое число – тысячу. Отсюда вы можете заключить, что уже тогда мы высоко ценили профессора Фейнмана! Фейнман вступил в должность в конце 1945 г. и очень плодотворно работал на факультете в течение пяти лет. Он покинул Корнеллский университет в 1950 г. и перешел в Калифорнийский технологический институт, где и работает по сей день.

Прежде чем дать ему слово, я хочу сказать вам о нем еще кое-что. Недавно он прочел курс общей физики в Калифорнийском технологическом институте и в результате приобрел еще большую известность – теперь его лекции, отличающиеся свежим подходом к предмету, опубликованы в трех томах¹. В первом томе есть фотография Фейнмана, весело играющего на бонго². Мои друзья из Калифорнийского технологического института рассказывают, что в Лос-Анджелесе он заменяет ударника в эстрадном оркестре, однако сам Фейнман это отрицает. Другая его специальность – сейфы. Рассказывают, что однажды он, подбрав шифр замка, открыл сейф в секретном учреждении, забрал секретные документы и оставил записку: «Угадай, кто?» Я мог бы рассказать вам, как он учил испанский язык перед тем, как ехать с лекциями в Бразилию, но не стану.

Я думаю, что этих сведений вам будет достаточно, и теперь разрешите мне сказать, что я рад вновь приветствовать профессора Фейнмана в стенах Корнеллского университета. Его лекции посвящены характеру физических законов, а тема его первой лекции: «Пример физического закона – закон тяготения».

¹ В русском переводе они изданы в 1965–1967 гг. в девяти выпусках под названием «Фейнмановские лекции по физике». – *Примеч. ред.*

² Бонго – маленькие барабаны, на которых играют пальцами. – *Примеч. пер.*

Лекция 1. Пример физического закона – закон тяготения

Как ни странно, но когда меня (изредка) приглашают играть на бонго, ведущий не считает нужным объявить, что я занимаюсь еще и теоретической физикой. Я объясняю это тем, что искусство мы уважаем больше, чем науку. Художники Возрождения говорили, что интересовать человека должен прежде всего он сам, однако в мире немало других интересных предметов. Ведь и художники любят закаты, волны в океане, хороводом звезд на небе... Поэтому иногда не мешает поговорить и о таких вещах. Созерцая их, мы испытываем эстетическое наслаждение. Вместе с тем в явлениях природы есть формы и ритмы, не доступные глазу созерцателя, но открытые глазу аналитика. Эти формы и ритмы мы называем физическими законами. В своих лекциях я хочу поговорить об особенностях физического закона вообще – поднявшись, если хотите, на одну ступеньку выше самих законов. Передо мной все время будет картина природы, которая возникает после подробнейшего ее анализа, но говорить я буду лишь о самых общих, самых крупных мазках этой картины.

Конечно, подобная тема слишком общая и поневоле располагает к философствованию – начинаешь говорить так расплывчато, что понять тебя может не всякий. И тогда считается, что ты решаешь глубокие философские вопросы. Я постараюсь говорить конкретнее, ибо считаю, что мысль простая, но выраженная честно, полезнее туманных намеков. Поэтому в первой лекции, не вдаваясь в общие рассуждения, я просто расскажу об одном физическом законе, дабы вы имели хоть один пример того, о чем впоследствии пойдет отвлеченный разговор. К этому примеру я буду обращаться снова и снова: чтобы проиллюстрировать свою мысль или сделать реальностью то, что иначе могло бы превратиться в абстракцию. В качестве такого примера я выбрал явление гравитации – закон всемирного тяготения. Почему именно его – не знаю. Может быть, потому, что этот великий закон был открыт одним из первых и имеет интересную историю. Вы скажете: «Да, но это старая история, а мне хотелось бы услышать что-нибудь о более современной науке». Может быть, более новой, но не более современной. Современная наука лежит в том же самом русле, что и закон всемирного тяготения. Другими словами, вы просто хотите услышать о более поздних открытиях. Меня же совсем не тяготит перспектива рассказывать вам о законе всемирного тяготения, потому что, описывая его историю, пути и методы его открытия, его основные особенности, я останусь человеком вполне современным.

Этот закон называли «величайшим обобщением, достигнутым человеческим разумом». Но уже из вступительных слов вы, наверное, поняли, что меня интересует не столько человеческий разум, сколько чудеса природы, которая может подчиняться таким изящным и простым законам, как закон всемирного тяготения. Поэтому мы будем говорить не о том, как мы умны, что открыли этот закон, но о том, как мудра природа, которая соблюдает его.

Закон тяготения заключается в том, что два тела действуют друг на друга с силой, которая обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и прямо пропорциональна произведению их масс. Математически мы можем выразить этот великий закон формулой

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

– некоторая постоянная умножена на произведение двух масс и поделена на квадрат расстояния. Теперь если я напомним, что под действием силы тело ускоряет свое движение и изменение скорости за секунду обратно пропорционально массе, т. е. скорость меняется тем медленнее, чем больше масса, то я скажу все, что нужно сказать о законе тяготения. Все остальное – математические следствия этих двух фактов. Но я знаю, что нематематику трудно увидеть все такие следствия, и потому постараюсь коротко рассказать вам об истории открытия, о некоторых его следствиях, о том, как оно повлияло на историю науки, о тех тайнах, которые освещает этот закон, об уточнениях, сделанных Эйнштейном, и, возможно, о связи этого закона с другими законами физики.

Вкратце история его такова. Еще древние, наблюдая за движением планет на небе, догадались, что все они, вместе с Землей, «ходят» вокруг Солнца. Позднее, когда люди забыли то, о чем знали прежде, это открытие заново сделал Коперник. И тогда возник новый вопрос: как именно планеты ходят вокруг Солнца, каково их движение? Ходят ли они по кругу и Солнце находится в центре или они движутся по какой-нибудь другой кривой? Как быстро они движутся? И так далее. Выяснилось это не так скоро. После Коперника снова настали смутные времена и разгорелись великие споры о том, ходят ли планеты вместе с Землей вокруг Солнца или Земля находится в центре Вселенной. Тогда человек по имени Тихо Браге³ придумал, как можно ответить на этот вопрос. Он решил, что нужно очень внимательно следить за тем, где появляются на небе планеты, точно это записывать и тогда уже выбирать между двумя враждебными теориями. Это и было началом современной науки, ключом к правильному пониманию природы – наблюдать за предметом, записывать все подробно-сти и надеяться, что полученные таким способом сведения послужат основой для того или иного теоретического истолкования. И вот Тихо Браге, человек богатый, владевший островом поблизости от Копенгагена, оборудовал свой остров большими бронзовыми кругами и специальными наблюдательными пунктами и записывал ночь за ночью положения планет. Лишь ценой такого тяжелого труда достается нам любое открытие.

Когда все эти данные были собраны, они попали в руки Кеплера⁴, который и пытался решить, как движутся планеты вокруг Солнца. Он искал решение методом проб и ошибок. Однажды ему показалось, что он уже получил ответ: он решил, что планеты движутся по кругу, но Солнце лежит не в центре. Потом Кеплер заметил, что одна из планет, кажется Марс, отклоняется от нужного положения на 8 угловых минут, и понял, что полученный им ответ неверен, так как Тихо Браге не мог допустить такую большую ошибку. Полагаясь на точность наблюдений, он решил пересмотреть свою теорию и в конце концов обнаружил три факта.

Сначала он установил, что планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам и Солнце находится в одном из фокусов. Эллипс – это кривая, о которой знают все художники, потому что она представляет собой растянутый круг. Дети тоже знают о нем: им рассказывали, что

³ Тихо Браге (1546–1601) – датский астроном.

⁴ Иоганн Кеплер (1571–1630) – немецкий астроном и математик, был помощником Браге.

если продеть в кольцо бечевку, закрепить ее концы и вставить в кольцо карандаш, то он опишет эллипс (рис. 1).

Две точки A и B – фокусы. Орбита планеты – эллипс. Солнце находится в одном из фокусов. Возникает другой вопрос: как движется планета по эллипсу? Идет ли она быстрее, когда находится ближе к Солнцу? Замедляет ли движение, удаляясь от него? Кеплер ответил и на этот вопрос (рис. 2).

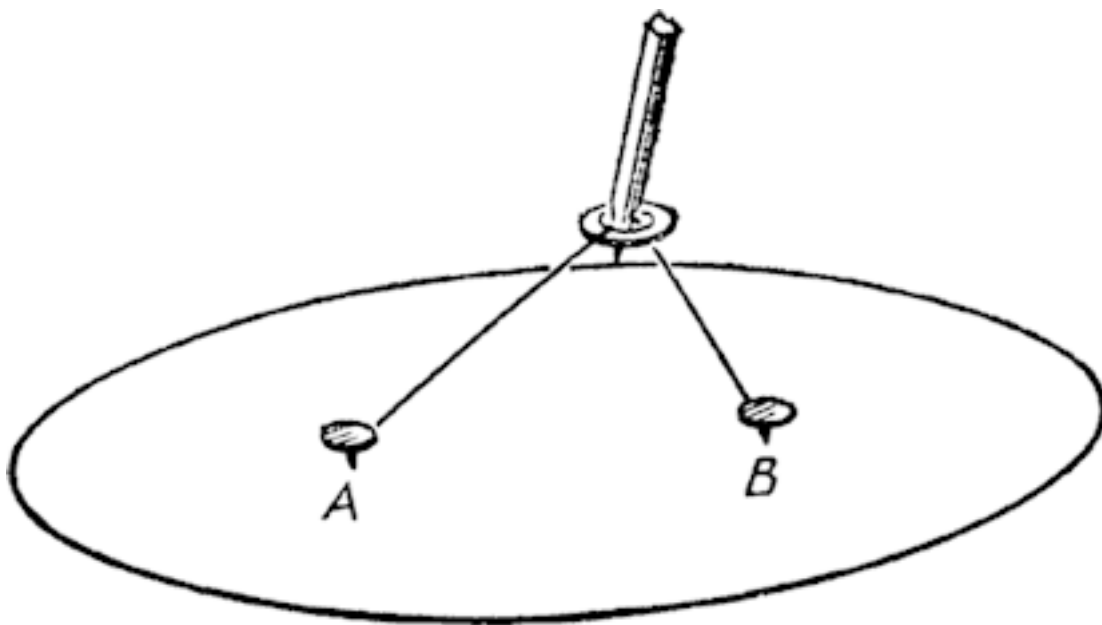


Рис. 1

Он обнаружил, что если взять два положения планеты, отделенных друг от друга определенным промежутком времени, скажем тремя неделями, потом взять другую часть орбиты и там – тоже два положения планеты, разделенных тремя неделями, и провести линии (ученные называют их радиус-векторами) от Солнца к планете, то площадь, заключенная между орбитой планеты и парой линий, которые отделены друг от друга тремя неделями, всюду одинакова, в любой части орбиты. А чтобы эти площади были одинаковы, планета должна идти быстрее, когда она ближе к Солнцу, и медленнее, когда она далеко от него.

Еще через несколько лет Кеплер сформулировал третье правило, которое касалось не движения одной планеты вокруг Солнца, а связывало движения различных планет друг с другом. Оно гласило, что время полного оборота планеты вокруг Солнца зависит от величины орбиты и пропорционально квадратному корню из куба этой величины. А величиной орбиты считается диаметр, пересекающий самое широкое место эллипса.

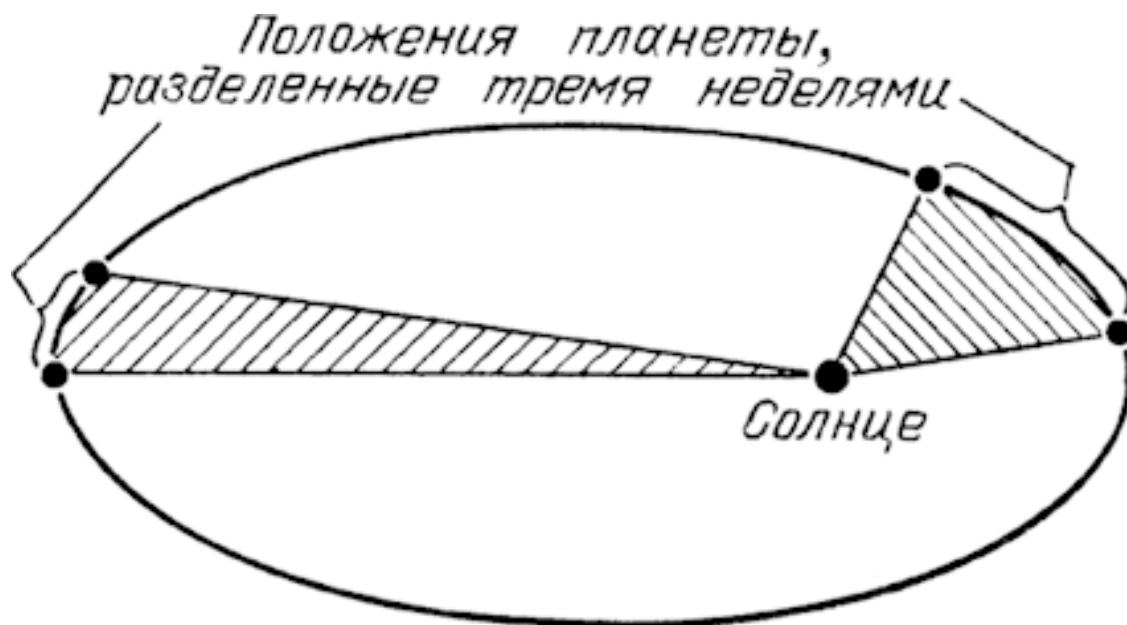


Рис. 2

Так Кеплер открыл три закона, которые можно свести в один, если сказать, что *орбита планеты представляет собой эллипс; за равные промежутки времени радиус-вектор планеты описывает равные площади и время (период) обращения планеты вокруг Солнца пропорционально величине орбиты в степени три вторых, т. е. квадратному корню из куба величины орбиты*. Эти три закона Кеплера полностью описывают движение планет вокруг Солнца.

Спросим себя: что заставляет планеты двигаться вокруг Солнца? Во времена Кеплера некоторые люди отвечали, что позади планет сидят ангелы, машут крыльями и толкают планеты по орбитам. Позднее вы увидите, что этот ответ не так уж далек от истины. С той только разницей, что «ангелы» сидят в другом месте и толкают планету к Солнцу.

Тем временем Галилей исследовал законы движения самых обычных предметов, которые были у него под рукой. Изучая эти законы, производя различные опыты, чтобы выяснить, как скатываются шарики по наклонной плоскости, как качаются маятники и т. д., Галилей открыл великий принцип, который называется принципом инерции и состоит вот в чем: если на предмет ничто не действует и он движется с определенной скоростью по прямой линии, то он будет двигаться с той же самой скоростью и по той же самой прямой линии вечно. Как ни странно это звучит для тех, кто пытался заставить шарик вечно катиться по полу, но если бы эта идеализация была верна и на шарик ничто не действовало (например, трение о пол), то шарик все время катился бы с постоянной скоростью.

Затем наступила очередь Ньютона, который раздумывал над таким вопросом: а если шарик не катится по прямой линии, что *тогда*? И он ответил так: для того чтобы хоть как-нибудь изменить скорость, нужна сила. Например, если вы подталкиваете шарик в том направлении, в каком он катится, то он покатится быстрее. Если вы заметили, что он свернул в сторону, значит, сила действовала сбоку. Силу можно измерить произведением двух величин. Насколько меняется скорость за небольшой промежуток времени? Эта величина называется ускорением. Если ее умножить на коэффициент, называемый массой предмета, то произведение и будет силой. Силу можно измерить. Например, если мы привяжем к веревке камень и станем крутить его над головой, то почувствуем, что за веревку надо тянуть. Правда, когда камень летает по кругу, величина скорости не изменяется – зато изменяется ее направление. Значит, нужна сила, которая все время тянула бы камень к центру, и сила эта

пропорциональна массе. Если мы возьмем два разных предмета и станем раскручивать сначала один, а потом другой с той же самой скоростью, то во втором случае потребуется сила, во столько раз большая, во сколько масса второго предмета больше массы первого. Таким образом, определив силу, необходимую для того, чтобы изменить скорость тела, мы можем вычислить его массу. Поэтому, решил Ньютон, планете, вращающейся вокруг Солнца, *не нужна сила, чтобы двигаться вперед*; если бы никакой силы не было, планета летела бы по касательной. Но на самом деле планета летит не по прямой. Она все время оказывается не в том месте, куда попала бы, если бы летела свободно, а ближе к Солнцу (рис. 3). Другими словами, ее скорость, ее движение отклоняются в сторону Солнца. Поэтому ангелы должны так махать крыльями, чтобы все время подталкивать планету к Солнцу.

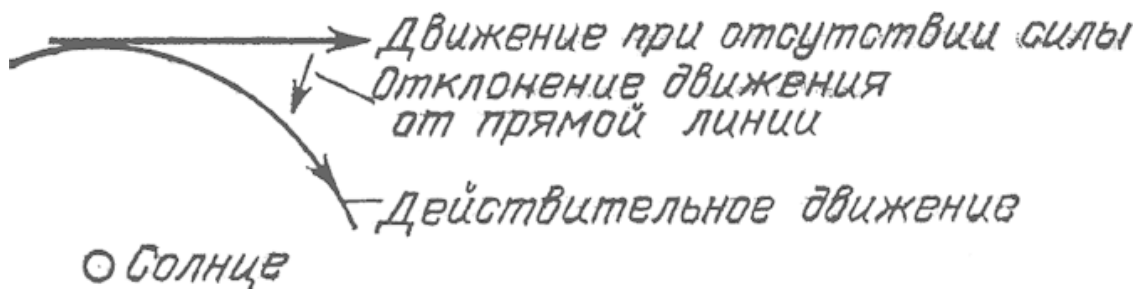


Рис. 3

Но свободное движение не имеет никакой видимой причины. Почему предметы способны вечно лететь по прямой линии, мы не знаем. Происхождение закона инерции до сих пор остается загадкой. В отличие от ангелов свободное движение существует, и, чтобы искривить его, нужна сила. Стало ясно, что источник этой силы находится где-то около Солнца. И Ньютону удалось доказать, что второй закон Кеплера – закон равенства площадей – прямо вытекает из той простой идеи, что все изменения в скорости направлены к Солнцу. Даже в случае эллиптической орбиты. В следующей лекции я попытаюсь подробно объяснить вам, как это можно сделать.

Этот закон укрепил Ньютона в мысли, что сила, действующая на планеты, направлена к Солнцу и что, зная, как период обращения разных планет зависит от расстояния до Солнца, можно будет определить, как ослабляется сила с расстоянием. Он нашел, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

До сих пор Ньютон не сказал ничего нового – он лишь повторил другими словами то, что сказал до него Кеплер. Один закон Кеплера равнозначен утверждению, что сила направлена к Солнцу, а другой – утверждению, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Люди рассматривали в телескоп Юпитер со спутниками, обращающимися вокруг него, и им это напоминало маленькую Солнечную систему. Все выглядело так, будто спутники притягиваются к Юпитеру. Луна тоже вращается вокруг Земли и притягивается к ней точно таким же образом. Естественно, возникла мысль, что притяжение действует повсюду. Оставалось лишь обобщить эти наблюдения и сказать, что все тела притягивают друг друга. А значит, Земля должна притягивать Луну так же, как Солнце притягивает планеты. Но известно, что Земля притягивает и обычные предметы: вы, например, прочно сидите на стуле, хотя вам, может быть, и хотелось бы летать по воздуху. Тяготение предметов к Земле было явлением, хорошо известным. Ньютон предположил, что Луну на орбите удерживают те же силы, которые притягивают предметы к Земле.

Насколько падает Луна за секунду, нетрудно сообразить потому, что вы знаете размеры орбиты, знаете, что Луна обходит Землю за месяц, и, подсчитав, сколько она проходит за

секунду, сможете узнать, насколько круг лунной орбиты отклоняется за секунду от прямой линии, по которой бы летела Луна, если бы Земля ее не притягивала. Эта величина немногим больше 1,25 мм. Луна в 60 раз дальше от центра Земли, чем мы (мы удалены от центра Земли на 6400 км, а Луна – на 378 000 км). Значит, если закон обратно пропорциональной зависимости от квадрата расстояния правилен, то предмет у поверхности Земли при падении должен пролетать за секунду $1,25 \text{ мм} \times 60^2$, потому что на орбите Луны предметы должны притягиваться в 60×60 раз слабее. Итак, $1,25 \text{ мм} \times 3600$ – это примерно 5 м. Измерения Галилея показали, что, падая у поверхности Земли, тела пролетают в секунду 5 м. Это означало, что Ньютон встал на верную дорогу, потому что, если раньше было известно два независимых факта: во-первых, период вращения Луны и величина ее орбиты и, во-вторых, расстояние, которое пролетает падающее тело у поверхности Земли, то теперь эти факты оказались тесно связанными. Эта увлекательная проверка показала, что с теорией Ньютона все обстоит благополучно.

Затем Ньютон сделал еще несколько предсказаний. Ему удалось вычислить, какую форму должна иметь орбита, если закон обратной пропорциональности квадрату расстояния справедлив; он нашел, что орбита должна быть эллипсом, и получил третье подтверждение своего закона. Вдобавок ему удалось объяснить и некоторые другие явления.

Во-первых, приливы. Приливы вызваны тем, что Луна сама притягивает Землю и ее океаны. Так думали раньше, но вот что оказалось необъяснимым: если Луна притягивает воды и поднимает их над ближней стороной Земли, то за сутки происходил бы лишь один прилив – прямо под Луной (рис. 4). На самом же деле, как мы знаем, приливы повторяются примерно через 12 часов, т. е. два раза в сутки.

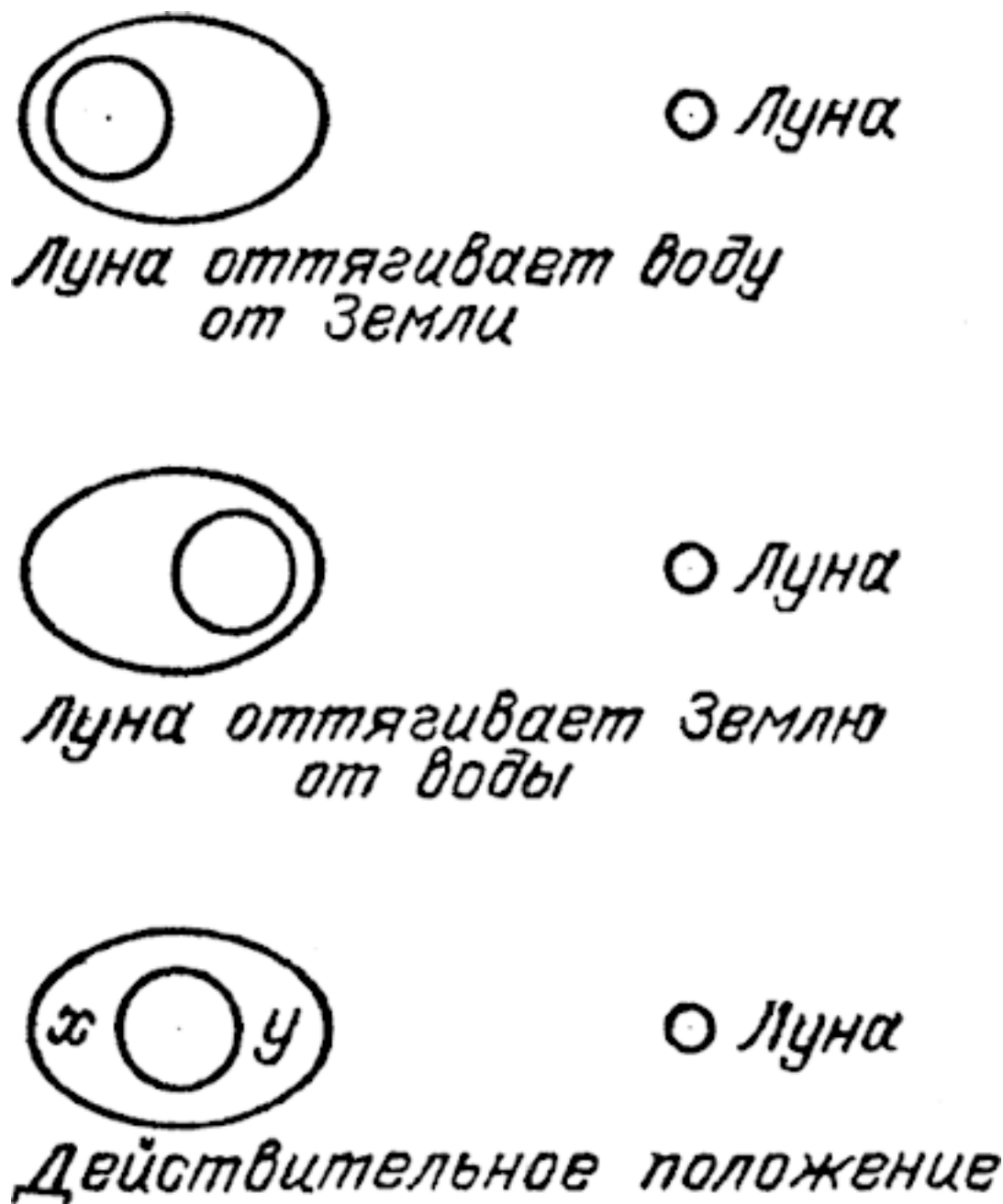


Рис. 4

Была и другая школа, которая придерживалась противоположных взглядов. Ее приверженцы считали, что Луна притягивает Землю, а вода за ней не успевает. Ньютон первым понял, что происходит на самом деле: притяжение Луны одинаково действует на Землю и на воду, если они одинаково удалены. Но вода в точке y ближе к Луне, чем Земля, а в точке x — дальше. В y вода притягивается к Луне сильнее, чем Земля, а в x — слабее. Поэтому получается комбинация двух предыдущих картинок, которая и дает двойной прилив.

Фактически Земля делает то же самое, что и Луна, — она движется по кругу. Сила, с которой Луна действует на Землю, уравнивается — но чем? Как Луна ходит по кругу, чтобы уравновесить притяжение Земли, точно так же ходит по кругу и Земля. Обе они обращаются вокруг общего центра, и силы на Земле уравниваются так, что вода в x притягивается Луной слабее, в y — сильнее и в обоих местах вода вспучивается. Так были объяснены приливы и почему они происходят дважды в сутки. Прояснилось и многое другое: как

Земля стала круглой из-за того, что все ее части притягивали друг друга, как она оказалась не совсем круглой из-за того, что вращается и наружные части ее стремятся прочь сильнее, чем внутренние, почему шарообразны Луна и Солнце и т. д.

С развитием науки измерения производились все точнее и подтверждения ньютоновских законов становились все более убедительными. Первые точные измерения касались спутников Юпитера. Казалось бы, если тщательно наблюдать за их обращением, то можно убедиться, что все происходит согласно Ньютону. Однако выяснилось, что это не так. Спутники Юпитера появлялись в расчетных точках то на 8 мин раньше, то на 8 мин позже, чем полагалось бы согласно законам Ньютона. Обнаружилось, что они опережают график, когда Юпитер сближается с Землей, и отстают, когда Юпитер и Земля расходятся, – очень странное явление. Рёмер⁵, убежденный в правильности закона тяготения, пришел к интересному выводу, что для путешествия от спутников Юпитера до Земли свету требуется определенное время, и, глядя на спутники Юпитера, мы видим их не там, где они находятся сейчас, а там, где они были несколько минут назад – столько минут, сколько требуется свету, чтобы дойти до нас. Когда Юпитер ближе к нам, свет приходит быстрее, а когда Юпитер дальше – свет идет дольше; поэтому Рёмеру пришлось внести поправку в наблюдения на эту разницу во времени, т. е. учесть, что иногда мы делаем эти наблюдения раньше, а иногда позже. Отсюда ему удалось определить скорость света. Так было впервые установлено, что свет распространяется не мгновенно.

История этого открытия показывает, что если какой-то закон верен, то при его помощи можно открыть другой закон. Когда мы убеждены в правильности некоторого закона, но что-то в наших наблюдениях с ним не вяжется, это может указать нам на другое, неизвестное явление. Если бы мы не знали закона тяготения, потребовалось бы гораздо больше времени, чтобы определить скорость света, ибо мы не знали бы, чего ожидать от спутников Юпитера. Этот процесс разросся в целую лавину открытий. Каждое новое открытие давало толчок следующему, и лавина эта движется вот уже 400 лет – в наши дни так же быстро, как и прежде.

Возникла еще одна проблема: планеты не должны двигаться по эллипсам, потому что, согласно законам Ньютона, они не только притягиваются Солнцем, но и притягивают друг друга – слабо, но все же притягивают, и это слегка изменяет их движение. Уже были известны большие планеты – Юпитер, Сатурн, Уран – и было подсчитано, насколько они должны отклоняться от своих совершенных кеплеровских орбит-эллипсов за счет взаимного притяжения. Когда эти расчеты были закончены и проверены наблюдениями, обнаружилось, что Юпитер и Сатурн движутся в полном согласии с расчетами, а с Ураном творится что-то странное. Казалось бы, еще повод усомниться в законах Ньютона; но главное – не падать духом! Два человека, Адамс и Леверье⁶, которые выполнили эти расчеты независимо друг от друга и почти одновременно, предположили, что на движение Урана влияет невидимая планета. Они послали письма в обсерватории с предложением: «Направьте ваш телескоп туда-то, и вы увидите неизвестную планету». «Что за чепуха, – сказали в одной из обсерваторий, – какому-то мальчишке попала в руки бумага и карандаш, и он указывает нам, где искать новую планету». В другой обсерватории дирекция была легче на подъем – и там открыли Нептун!

Позже, в начале XX века, выяснилось, что движение планеты Меркурий не совсем правильно. Это вызвало большие волнения и было объяснено только тогда, когда Эйнштейн доказал, что законы Ньютона не совсем точны и надо их несколько изменить.

⁵ Олаф Рёмер (1644–1710) – датский астроном.

⁶ Джон Кауч Адамс (1819–1892) – английский математик и астроном; Урбен Леверье (1811–1877) – французский астроном. (Вы можете почитать о них в книге: Саймон Т. Поиски планеты Икс. – М.: Мир, 1966. – Примеч. ред.)



Рис. 5. Три фотографии двойной звезды, сделанные в разное время

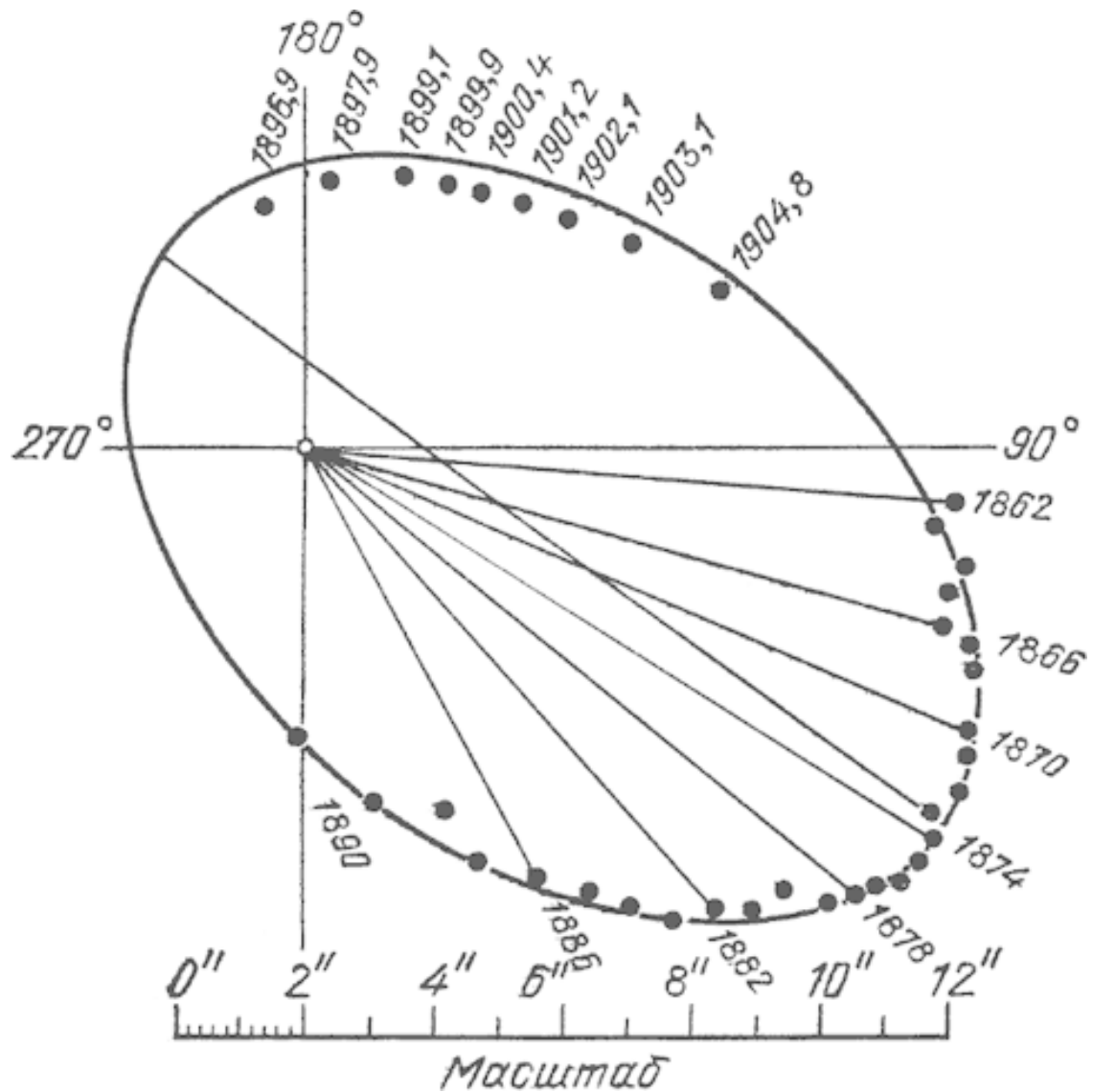


Рис. 6

Возникает вопрос: везде ли действуют эти законы? Выполняются ли они за пределами Солнечной системы? Так вот, рис. 5 показывает, что закон тяготения действует не только в пределах Солнечной системы. Здесь вы видите три фотографии так называемой двойной звезды. На фотографии попала еще одна звезда, и вы можете убедиться, что вращается действительно двойная звезда, а не рамка кадра, хотя сделать это на астрономической фотографии было бы совсем нетрудно. Эти две звезды и в самом деле вращаются, и их орбита изображена на рис. 6. Совершенно ясно, что они притягивают друг друга и движутся по эллипсам так, как это и должно происходить. Здесь отмечено последовательное положение звезд в различные моменты времени; звезды движутся по часовой стрелке. Все это кажется прекрасным до тех пор, пока мы не замечаем, что центр орбиты расположен не в фокусе эллипса, а несколько смещен. Значит, что-то неправильно в законе? Нет, просто орбита сфотографирована не анфас, мы смотрим на нее под острым углом. Если вы нарисуете на бумаге эллипс, отметите его фокус и будете смотреть на бумагу под острым углом, то увидите проекцию этого эллипса и фокус проекции не будет совпадать с фокусом самого эллипса. Орбита наклонена в пространстве и именно поэтому выглядит так странно.



Рис. 7. Шаровое звездное скопление в галактике Млечного Пути

А что происходит на больших расстояниях? Эта сила действует между двумя звездами; но будет ли она действовать на расстояниях, которые не в два и не в три, а во много раз превосходят диаметр Солнечной системы? На рис. 7 показан объект, который в 100 000 раз больше, чем Солнечная система; это огромное скопление звезд. Большое белое пятно – не сплошное; оно кажется таким, потому что наши несовершенные инструменты не позволяют разглядеть в нем мелкие детали. На самом же деле оно состоит из очень-очень мелких пятнышек – обычных звезд, и вовсе не слипшихся, а сильно удаленных друг от друга, движущихся взад и вперед в этом большом шаровом скоплении.



Рис. 8. Спиральная галактика

Это одно из самых прекрасных явлений на небе – такое же прекрасное, как морские волны и закаты. Размещение материала в скоплении совершенно ясно указывает, что звезды в нем также связаны взаимным тяготением. Зная примерно расстояние до этой галактики и размещение материала в ней, мы можем приблизительно определить закон сил, действующих между звездами, – приблизительно определить, что и здесь они обратно пропорциональны квадрату расстояния. Точность этих измерений и выкладок, конечно, не может сравниться с точностью, какую мы получаем в Солнечной системе.



Рис. 9. Скопление галактик в созвездии Волосы Вероники

Тяготение действует и на еще больших расстояниях. Наше звездное скопление выглядит незаметной точкой на рис. 8, где показана типичная галактика. И опять-таки ясно, что эта галактика держится как единое целое благодаря какой-то силе. А никакой другой силы, кроме тяготения, здесь предположить нельзя. Когда мы переходим к таким масштабам, мы уже не можем проверить справедливость ньютоновского закона. Но несомненно, что в таких гигантских звездных образованиях – в этих галактиках, которые простираются на 50–100 тысяч световых лет, тогда как расстояние от Солнца до Земли составляет только 8 световых минут, – даже на таких огромных расстояниях действуют силы тяготения. Рис. 9 свидетельствует о том, что силы тяготения простираются еще дальше. Это так называемое скопление галактик. Все они собраны в один ком, как и звезды, только этот ком составлен не из звезд, а из «крошек» вроде той, которую вы видите на рис. 8.

Это чуть ли не одна сотая, а может быть, и десятая часть известной нам Вселенной, где мы имеем прямые свидетельства существования сил тяготения. Таким образом, притяжение Земли не имеет границ, хотя в газетах и пишут порой, что такое-то тело освободилось от оков земного притяжения. Притяжение становится все слабее и слабее – оно обратно пропорционально квадрату удаления от Земли: каждый раз, когда расстояние до Земли увеличивается вдвое, сила тяготения падает вчетверо и в конце концов теряется в переплетении более сильных полей тяготения других звезд. Вместе с соседними звездами Земля притягивает другие звезды, и они образуют Галактику. Галактика притягивает другие галактики,

и вместе они образуют скопление – систему галактик. Таким образом, притяжение Земли нигде не кончается, но убывает медленно и строго закономерно, может быть, до самых пределов Вселенной.

Закон тяготения отличается от многих других законов. Ясно, что он играет большую роль в механике Вселенной. И покуда речь идет о Вселенной, этот закон всюду находит практическое применение. Но на Земле, как ни странно, закон тяготения дает нам гораздо меньше практически полезных сведений, чем другие законы физики. Только в этом смысле нетипичен выбранный мной пример. Кстати говоря, невозможно выбрать такой пример, который был бы типичен во всех отношениях. Это удивительное свойство нашего мира. Единственные практические приложения этого закона, которые мне приходят на ум, – это, пожалуй, некоторые методы геологической разведки, предсказание приливов и в последнее время расчет движения искусственных спутников и межпланетных станций. Да, и еще одно современное приложение: закон Ньютона позволяет заблаговременно вычислять положения планет астрологам, которые публикуют свои гороскопы в журналах. Поистине мы живем в удивительном мире: все новейшие достижения человеческой мысли используются только для того, чтобы разнообразить чепуху, существующую вот уже две тысячи лет.



Рис. 10. Газовая туманность (в созвездии Ориона)

Теперь я расскажу, где именно тяготение существенно влияет на жизнь Вселенной. Один из интересных в этом смысле примеров – образование звезд. На рис. 10 показаны газобразные туманности внутри нашей Галактики. Это не скопление звезд, это газ. Черные пятнышки – места, где газ сжался и уплотнился за счет притяжения. Процесс этот, может быть, начинается с ударных волн, но потом благодаря притяжению газ стягивается все плотнее и плотнее, и образуются большие шаровые тучи газа и пыли. По мере уплотнения они разогреваются все больше и больше, начинают светиться и превращаются в звезды.

Звезды рождаются из газа, который чересчур сжался под действием притяжения. Иногда звезды взрываются, выбрасывают пыль и газы, потом пыль и газы снова собираются и снова образуют звезды – все это похоже на вечное движение.

Как я уже сказал, тяготение действует на огромных расстояниях. Но Ньютон утверждал, что взаимно притягиваются все предметы. А правда ли, что любые два предмета притягивают друг друга? Можем ли мы сами поставить такой опыт, а не гадать, глядя на небо, притягиваются ли планеты? Такой прямой опыт сделал Кавендиш⁷ при помощи прибора, который показан на рис. 11. Идея состояла в том, чтобы подвесить на очень тонкой кварцевой нити стержень с двумя шарами и затем поднести к ним сбоку два больших свинцовых шара, как показано на рисунке. Притяжение шаров слегка перекрутит нить – слегка, потому что силы притяжения между обычными предметами очень слабы. Силу притяжения между двумя шарами можно измерить. Кавендиш назвал свой опыт «взвешиванием Земли». Педантичный и осторожный преподаватель наших дней не позволит студентам так выразиться; нам пришлось бы сказать «измерение массы Земли». При помощи такого прибора Кавендишу удалось непосредственно измерить силу, расстояние и величину обеих масс и, таким образом, определить постоянную тяготения G . Вы скажете: «Взвешивание Земли представляет собой почти такую же задачу. Мы знаем силу притяжения, знаем массу объекта, который притягивается, и знаем, насколько он удален, но мы не знаем ни массы Земли, ни постоянной тяготения, а только их произведение». Измерив постоянную и зная, как Земля притягивает предметы, мы сможем вычислить ее массу.

Этот опыт впервые позволил косвенно определить, насколько тяжел, массивен шар, на котором мы живем. Результат его невольно вызывает удивление, и я думаю, что именно поэтому Кавендиш назвал свой опыт «взвешиванием Земли», а не «определением постоянной уравнения тяготения». Между прочим, он одновременно взвешивал и Солнце и все остальное, потому что притяжение Солнца определяется точно таким же способом.

Интересно было проверить закон тяготения еще с одной стороны: пропорционально ли притяжение массе. Мы знаем, что ускорение прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе. Поэтому если сила притяжения в точности пропорциональна массе, то два тела с разной массой должны одинаково менять свою скорость в поле тяготения. Иначе говоря, два различных предмета в вакууме, независимо от их массы, за одинаковое время пролетят по направлению к Земле одинаковые расстояния. Такие опыты ставил еще Галилей на падающей башне в Пизе. Это означает, например, что какая-нибудь вещь внутри искусственного спутника Земли будет двигаться точно по такой же орбите, как сам спутник, т. е. будет парить внутри его. И все это – следствие того факта, что сила пропорциональна массе, а ускорение обратно пропорционально массе.

⁷ Генри Кавендиш (1731–1810) – английский физик и химик.

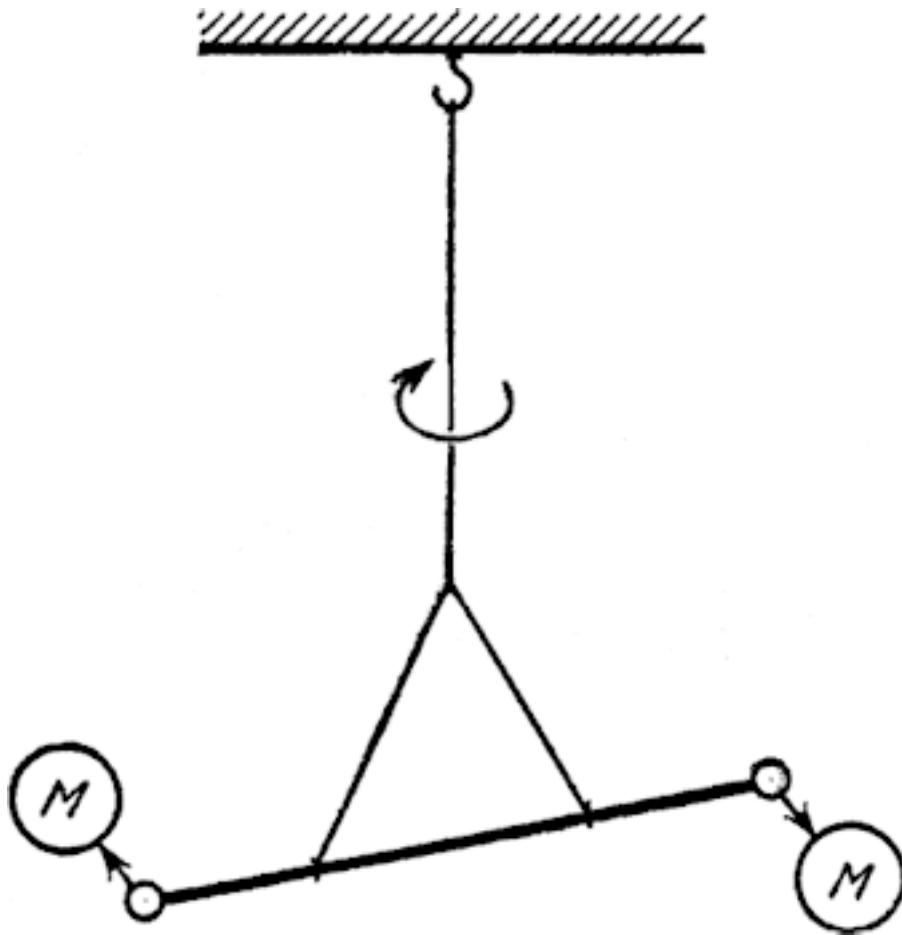


Рис. 11

Насколько точно это утверждение? На опыте его проверил Этвеш⁸ в 1909 г., а впоследствии более тщательно – Дикке⁹. Теперь мы знаем с точностью до одной десятиллиардной, что сила пропорциональна массе. Как удалось добиться такой точности? Предположим, вы хотите определить, в какой мере подчиняется этому правилу притяжение Солнца. Вы знаете, что Солнце притягивает всех нас. Оно притягивает Землю, но, предположим, вы хотите знать, в точности ли это притяжение пропорционально массе. Сначала опыт был проделан над сандаловым деревом, потом экспериментировали с медью и свинцом, а теперь пробуют на полиэтилене. Земля вращается вокруг Солнца, поэтому инерция отбрасывает земные тела от Солнца тем сильнее, чем больше инерция. Но, согласно закону тяготения, тела притягиваются к Солнцу – и тем сильнее, чем больше их масса. Поэтому если они притягиваются к Солнцу не в той же пропорции, в какой отбрасываются инерцией, то один предмет будет, например, стремиться к Солнцу, а другой – прочь от него. И тогда, прикрепив эти два предмета к коромыслу Кавендиша, мы увидим, что оно повернется по направлению к Солнцу и перекрутит кварцевую нить. На самом деле нить не перекручивается, и с той точностью, которую дает этот опыт, мы знаем, что притяжение двух предметов строго пропорционально центробежному эффекту, который обусловлен инерцией. Таким образом, сила притяжения объекта пропорциональна коэффициенту инерции, или, другими словами, массе.

И вот что еще интересно. Обратно пропорциональная зависимость от квадрата расстояния встречается и в других законах, например в законах электричества. Электрические силы

⁸ Роланд Этвеш (1848–1919) – венгерский физик.

⁹ Роберт Генри Дикке – современный американский физик.

также обратно пропорциональны квадрату расстояния, но уже между зарядами, и невольно возникает мысль, что в этой закономерности таится глубокий смысл. До сих пор никому не удалось представить тяготение и электричество как два разных проявления одной и той же сущности. Сегодня наши физические теории, законы физики – множество разрозненных частей и обрывков, плохо сочетающихся друг с другом. Физика еще не превратилась в единую конструкцию, где каждая часть – на своем месте. Пока что мы имеем множество деталей, которые трудно подогнать друг к другу. Вот почему в этих лекциях я вынужден говорить не о том, что такое *закон* физики, а о том, что роднит различные законы; мы плохо понимаем их связь. Но интересно, что у них все же есть некоторые общие черты. Обратимся к законам электричества.

Сила и тут изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, но разница в величине электрических сил и сил тяготения поразительна. Пытаясь установить общую природу тяготения и электричества, мы обнаруживаем такое превосходство электрических сил над силами тяготения, что трудно поверить, будто у тех и у других один и тот же источник. Как можно говорить, что одно действует сильнее другого? Ведь все зависит от того, какова масса и каков заряд. Рассуждая о том, насколько сильно действует тяготение, вы не вправе говорить: «Возьмем массу такой-то величины», потому что вы выбираете ее сами. Но если мы возьмем то, что предлагает нам сама Природа (ее собственные числа и меры, которые не имеют ничего общего с нашими дюймами, годами, с нашими мерами), тогда мы сможем сравнивать. Мы возьмем элементарную заряженную частицу, такую, например, как электрон. Две элементарные частицы, два электрона, за счет электрического заряда отталкиваются друг друга с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, а за счет гравитации притягиваются друг к другу опять-таки с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния.

Вопрос: каково отношение силы тяготения к электрической силе? Тяготение относится к электрическому отталкиванию, как единица к числу с 42 нулями. Это вызывает глубочайшее недоумение. Откуда могло взяться такое огромное число? Если бы у нас когда-нибудь появилась общая теория для двух этих явлений, то как она давала бы такую диспропорцию для двух электронов:

$$\frac{\text{сила тяготения}}{\text{электрическое отталкивание}} = \frac{1}{4,17 \cdot 10^{42}}?$$

Каким должно быть общее уравнение, если, решая его для двух видов сил – гравитационного притяжения и электрического отталкивания, мы приходим к такому фантастическому отношению?

Люди ищут этот огромный коэффициент в других явлениях природы. Они перебирают всякие большие числа, а если вам нужно большое число, почему не взять, скажем, отношение диаметра Вселенной к диаметру протона – как ни удивительно, это тоже число с 42 нулями. И вот говорят: может быть, этот коэффициент и равен отношению диаметра протона к диаметру Вселенной? Это интересная мысль, но, поскольку Вселенная постепенно расширяется, должна меняться и постоянная тяготения. Хотя эта гипотеза еще не опровергнута, у нас нет никаких свидетельств в ее пользу. Наоборот, некоторые данные говорят о том, что постоянная тяготения не менялась таким образом. Это громадное число по сей день остается загадкой.

Чтобы покончить с теорией тяготения, я должен упомянуть еще о двух фактах.

Первое. Эйнштейну пришлось видоизменить законы тяготения в соответствии с принципами относительности. Первый из этих принципов гласит, что расстояние x нельзя преодолеть мгновенно, тогда как по теории Ньютона силы действуют мгновенно. Эйнштейну пришлось изменить законы Ньютона. Эти изменения, уточнения очень малы. Одно из них состоит вот в чем: поскольку свет имеет энергию, энергия эквивалентна массе, а все массы притягиваются, свет тоже притягивается и, значит, проходя мимо Солнца, должен отклоняться. Так оно и происходит на самом деле. Сила тяготения тоже слегка изменена в теории Эйнштейна. Но этого очень незначительного изменения в законе тяготения как раз достаточно, чтобы объяснить некоторые кажущиеся неправильности в движении Меркурия.

Второе. Физические явления в микромире подчиняются иным законам, нежели явления в мире больших масштабов. Встает вопрос: как проявляется тяготение в мире малых масштабов? На него ответит квантовая теория гравитации. Но квантовой теории гравитации еще нет. Люди пока не очень преуспели в создании теории тяготения, полностью согласованной с квантовомеханическими принципами и с принципом неопределенности.

Вы скажете: «Вы все время говорили только о том, что происходит, но не объяснили, что такое тяготение. Откуда оно? Что оно собой представляет? Ведь не хотите же вы сказать, что планета смотрит на Солнце, видит, насколько оно удалено, подсчитывает обратный квадрат расстояния в соответствии с этим законом?» Иными словами, я просто изложил математический закон, но не объяснил его механизма. Возможности этого мы обсудим в следующей лекции «Связь математики с физикой».

Заканчивая лекцию, я хочу отметить некоторые особенности закона тяготения, характерные и для других законов, о которых мы упоминали по ходу разговора.

1. Закон тяготения выражается математически, так же как и другие законы.

2. Он неточен; Эйнштейну пришлось видоизменить его, но мы знаем, что он и сейчас не совсем точен, ибо мы еще не связали его с квантовой теорией. То же относится и к другим нашим законам – они неточны. Где-то на краю их всегда лежит тайна, всегда есть над чем поломать голову. Может быть, это – свойство природы, а может быть, и нет, но это свойственно тем законам, которые известны нам сегодня. Может быть, все дело тут в неполноте нашего знания.

3. Но поразительнее всего то, что закон тяготения прост. Его легко сформулировать так, чтобы не оставалось никаких лазеек для двусмысленности и для иного толкования. Он прост и поэтому прекрасен. Он прост по форме. Я не говорю, что он действует просто – движение разных планет, их взаимное влияние могут быть очень запутанными, и определить, как движется каждая звезда в шаровом скоплении, не в наших силах. Закон действует сложно, но его коренная идея проста. Это и роднит все наши законы. Сами по себе они всегда оказываются простыми, хотя в природе действуют сложным образом.

4. И наконец, закон тяготения универсален. Он простирается на огромные расстояния, и Ньютон, которого интересовала Солнечная система, вполне мог бы предсказать, что получится из опыта Кавендиша, ибо весы Кавендиша, два притягивающихся шара, – это маленькая модель Солнечной системы. Если увеличить ее в десять миллионов миллионов раз, то мы получим Солнечную систему. Увеличим еще в десять миллионов миллионов раз – и вот вам галактики, которые притягиваются друг к другу по тому же самому закону. Вышивая свой узор, Природа пользуется лишь самыми длинными нитями, и всякий, даже самый маленький образчик его может открыть нам глаза на строение целого.

Лекция 2. Связь математики с физикой

Если задуматься о приложениях математики и физики, то совершенно очевидно, что математика будет полезна там, где мы имеем дело с большим числом объектов в сложной обстановке. В биологии, к примеру, действие вируса на бактерию не дает никакой пищи для математики. В микроскоп мы увидим, что проворный маленький вирус находит какое-то место в причудливой бактерии (все они имеют разную форму) и либо вводит в нее свою ДНК, либо не вводит. Но если мы будем экспериментировать с миллионами и миллионами бактерий и вирусов, то сможем очень многое узнать о поведении вирусов в среднем. Мы можем использовать математику для того, чтобы находить среднее, для того, чтобы выяснить, развиваются ли вирусы в бактериях, какие виды развиваются и в каком количестве; подобным образом мы можем изучать генетику, мутации и т. п.

Возьмем другой, более тривиальный пример. Представим себе огромную шахматную доску, на которой играют в шахматы или шашки. Каждый отдельный ход – операция не математическая или математически очень простая. Но нетрудно сообразить, что на доске с множеством фигур оценку наилучших ходов, ходов просто хороших или плохих можно сделать только после очень глубокого размышления, ибо каждый ход таит в себе огромное количество последствий. Тут необходимы абстрактные рассуждения и, следовательно, математика. Еще один пример – переключение в вычислительных машинах. Если у вас всего один переключатель, который может быть либо включен, либо выключен, то ничего особенно математического тут нет, хотя математики любят начинать именно с этого. Но чтобы предугадать поведение системы с множеством соединений и проводов, нужна математика.

Я хочу сказать с самого начала, что математика приносит огромную пользу физике там, где речь идет о деталях сложных явлений, если установлены основные правила игры. И если бы я говорил только о взаимоотношении математики и физики, то большую часть времени отвел бы именно этому вопросу. Но, поскольку лекции посвящены характеру физических законов, я не имею возможности подробно разбирать, что происходит в сложных ситуациях, и прямо перейду к своей теме – характеру основных законов. Если снова обратиться к нашим шахматам, то основные законы здесь – это правила, по которым движутся фигуры. Математику можно использовать в сложной обстановке, чтобы сообразить, какие ходы в данных обстоятельствах наиболее выгодны. Но для того чтобы выразить простую суть основных законов, требуется очень мало математики. В шахматах это можно сделать на нашем обычном языке.

В физике же и для основных законов нам нужна математика. Я приведу два примера: в одном математика, по существу, необязательна, а в другом необходима. Первый – закон физики, называемый законом Фарадея, который гласит, что при электролизе количество осажденного вещества пропорционально силе тока и времени его действия. Иначе говоря, количество осажденного вещества пропорционально заряду, проходящему через систему. Звучит это очень математически, но на самом деле все сводится к тому, что электроны, проходящие по проводам, несут только по одному заряду. В частности, можно предположить, что каждый электрон вызывает осаждение одного атома. Тогда число осажденных атомов равно числу прошедших электронов, т. е. пропорционально заряду, протекшему по проводу. Таким образом, этот закон, который кажется математическим, в основе своей прост и на самом деле не требует знания математики. Для осаждения одного атома нужен один электрон – это, конечно, математика, но не та математика, о которой мы здесь говорим.

Второй пример – это закон тяготения Ньютона, который мы рассматривали в предыдущей лекции. Я привел вам уравнение

$$F = G \frac{mm'}{r^2},$$

чтобы поразить вас тем, насколько быстро математические символы могут передавать информацию. Я говорил, что сила пропорциональна произведению масс двух тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, а также что тела реагируют на силы, изменяя свою скорость в направлении действия силы на величину, пропорциональную силе и обратно пропорциональную своим массам. Как видите, все это слова, и было совсем не обязательно писать уравнение. Тем не менее здесь есть математика, и мы можем спросить себя, почему такой закон может быть основным законом. Что делает планета? Неужели она смотрит на Солнце, видит, насколько оно удалено, и вычисляет на своем арифмометре обратный квадрат расстояния, чтобы узнать, как нужно двигаться? Ясно, что это не объяснение механизма гравитации! Вам, может быть, захочется взглянуть поглубже, и многие пытались это сделать. Еще Ньютона спрашивали о его теории: «Но ведь она ничего не говорит, она ничего не объясняет?» Ньютон отвечал: «Она говорит, *как* движутся тела. Этого должно быть достаточно. Я сказал вам, как они движутся, а не почему». Но людей зачастую трудно удовлетворить, не объяснив им механизм, и я расскажу об одной из теорий, которые выдвигались в качестве объяснения гравитации. Согласно этой теории, тяготение представляет собой результат многих отдельных воздействий, и этим объясняется, почему закон Ньютона связан с математикой.

Предположим, что мир повсюду полон частиц, пролетающих сквозь нас с очень большой скоростью. Они летят во всех направлениях – просто проносятся мимо, но некоторые из них попадают в нас. Мы и Солнце практически прозрачны для них, практически, но не полностью, и некоторые из них нас ударяют. Посмотрим, к чему это должно привести.

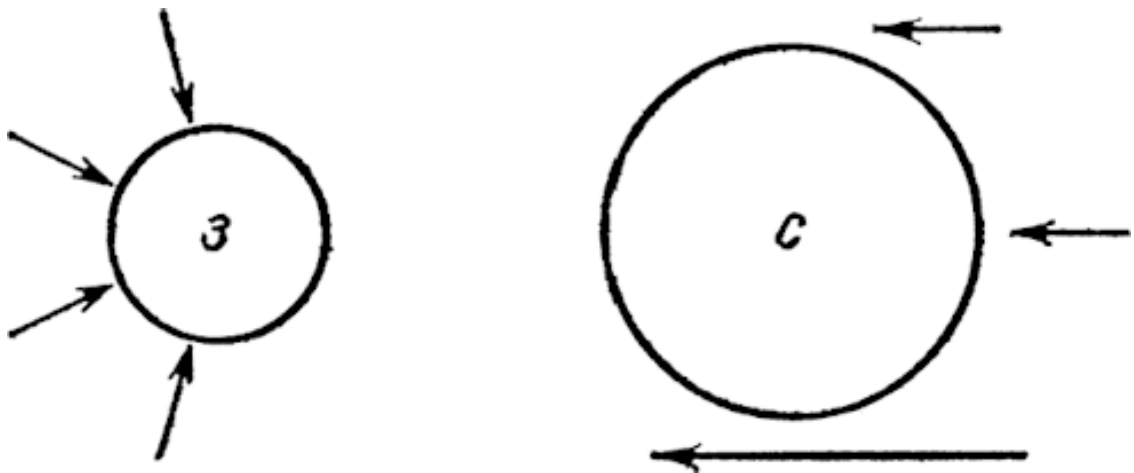


Рис. 12

На рис. 12 С – Солнце, З – Земля. Если бы Солнца не было, то частицы обстреливали бы Землю со всех сторон, барабанили по ней, и каждая упавшая частица немного подталкивала бы Землю. Это не сдвинет Землю ни в каком определенном направлении, потому что с одного боку налетает столько же частиц, сколько с другого, снизу столько же, сколько сверху. Однако если Солнце на месте, то оно в какой-то мере поглощает частицы, летящие

с этой стороны, потому что некоторые из них, попадая в Солнце, не проходят его насквозь. Следовательно, со стороны Солнца к Земле прилетает меньше частиц, чем с других сторон, ибо они наталкиваются на препятствие – Солнце. Нетрудно понять, что чем дальше Солнце, тем меньшую долю частиц, попадающих на Землю, оно будет задерживать. Солнце будет казаться меньше – как раз пропорционально квадрату расстояния. Поэтому со стороны Солнца на Землю будет действовать импульс, обратно пропорциональный квадрату расстояния. Он будет представлять собой результат большого количества простых операций – ударов, которые один за другим сыплются со всех сторон. Таким образом, в этом математическом соотношении нет ничего странного, ибо основная операция значительно проще, чем подсчет обратного квадрата расстояния. Подсчет производят сами частицы, ударяясь о Землю.

Единственный недостаток этой схемы в том, что она не годится совсем по другим соображениям. Всякую придуманную теорию надо проанализировать в отношении *всех* ее возможных последствий, выяснить, не предсказывает ли она другие явления. А эта теория предсказывает другие явления. Если Земля движется, то спереди в нее будет ударяться больше частиц, чем сзади. (Когда вы бежите под дождем, в лицо вам попадает больше капель, чем на затылок, именно потому, что вы бежите.) Если Земля движется, то она налетает на те частицы, которые находятся перед ней, и убегает от тех, которые догоняют ее сзади. Спереди на нее будет падать больше частиц, чем сзади, и они создадут силу, противодействующую движению. Эта сила замедлила бы движение Земли, и Земля не смогла бы долго продержаться на орбите, – но она ведь держится уже три или четыре миллиарда лет. Так приходит конец этой теории. «Что же, – скажете вы, – теория была неплохая, и хоть ненадолго, но позволила мне забыть о математике. Может быть, мне удастся придумать лучшую». Может быть, и удастся – окончательная истина никому еще не известна. Но со времени Ньютона и до наших дней никто не мог описать механизм, скрытый за законом тяготения, не повторив того, что уже сказал Ньютон, не усложнив математики или не предсказав явлений, которых на самом деле не существует. Так что до сих пор у нас нет иной модели для теории гравитации, кроме математической.

Если бы существовал только один закон такого характера, то это было бы интересным, хотя и досадным исключением. Но, оказывается, чем больше мы исследуем, чем больше законов мы открываем, чем глубже проникаем в природу, тем более хронической становится болезнь. Каждый новый наш закон – чисто математическое утверждение, притом довольно сложное и малопонятное. Ньютонова формулировка закона тяготения – это сравнительно простая математика. Но она становится все менее понятной и все более сложной по мере того, как мы продвигаемся вперед. Почему? Не имею ни малейшего понятия. Моя цель в том и состоит, чтобы лишь сообщить об этом факте. В нем и заключается смысл всей лекции: нельзя честно объяснить все красоты законов природы так, чтобы люди восприняли их одними чувствами, без глубокого понимания математики. Как ни прискорбно, но, по-видимому, это факт.

Вы, возможно, возразите: «Ладно, если нет объяснения законам, то по крайней мере скажите, в чем эти законы состоят. Почему вы не скажете этого словами вместо символов? Математика – просто язык, но ведь можно переводить с одного языка на другой». Да, можно, если иметь терпение, и, мне кажется, частично я это сделал. Я мог бы пойти немного дальше и объяснить смысл уравнения более подробно, например, сказать, что при увеличении расстояния в два раза сила убывает вчетверо и т. д. Я мог бы передать все символы словами. Иначе говоря, я мог бы пойти навстречу любителям физики, которые сидят и с надеждой ждут от меня простого объяснения. Что касается умения объяснить эти сложные и запутанные предметы неспециалисту на доступном ему языке, то у разных людей – разные возможности. И вот неспециалист перебирает книгу за книгой в надежде обойти трудности, кото-

рые появляются рано или поздно даже в работах лучших популяризаторов. Но чем дальше он читает, тем больше путаницы: одно сложное утверждение за другим, одна малопонятная мысль за другой, и все, по-видимому, не связаны друг с другом. Смысл ускользает от него, но он надеется, что где-нибудь в другой книге есть объяснение...

Я в этом сомневаюсь, потому что математика – *не просто* другой язык. Математика – это язык плюс рассуждения, это как бы язык и логика вместе. Математика – орудие для размышления. В ней сконцентрированы результаты точного мышления многих людей. При помощи математики можно связать одно утверждение с другим. Например, я могу сказать, что сила направлена к Солнцу. Но я могу сказать и по-другому (как в прошлой лекции): планета движется так, что если провести от Солнца к планете линию, затем другую линию, отделенную от первой определенным периодом, например тремя неделями, то площадь, которую опишет планета за эти три недели, равна площади, которую она опишет за следующие три недели, и за следующие три недели, и так далее по всей орбите. Я могу объяснить оба эти утверждения подробнее, но не могу объяснить, почему они означают одно и то же. Очевидные сложности природы с ее странными законами и правилами, каждое из которых можно объяснить очень подробно, на самом деле тесно связаны. Однако если вы не желаете пользоваться математикой, то в этом огромном многообразии фактов вы не увидите, что логика позволяет переходить от одного к другому.

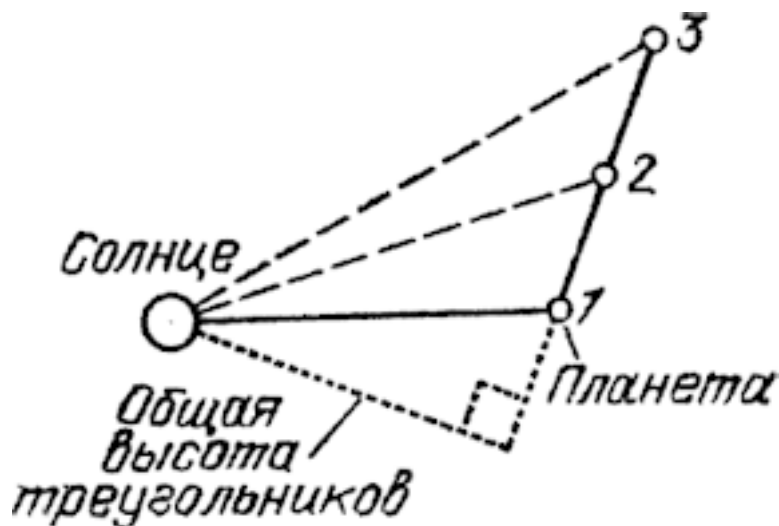


Рис. 13

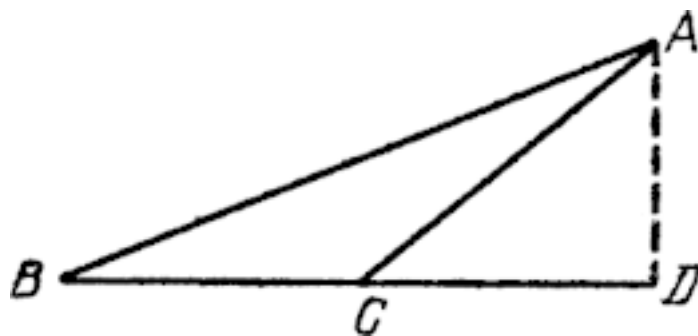


Рис. 14

Как ни удивительно, но я могу доказать, что если силы направлены к Солнцу, то в равные промежутки времени описываются равные площади. Я попытаюсь доказать, что эти

два закона эквивалентны, и тогда вам станут ясными не только формулировки этих двух утверждений. Вы убедитесь, что эти два закона связаны, что путем размышления можно перейти от одного к другому и что математика – это организованные рассуждения. Тогда вы оцените красоту взаимоотношений между этими двумя законами. Итак, докажем, что если сила направлена к Солнцу, то за равное время описываются равные площади.

Рассмотрим Солнце и планету (рис. 13) и вообразим себе, что в определенный момент времени планета находится в положении 1. Она движется так, что через секунду, скажем, очутится в положении 2. Если бы Солнце не действовало на планету, то, согласно галилееву принципу инерции, планета продолжала бы двигаться по прямой. Тогда по истечении такого же промежутка времени, следующей секунды, двигаясь по прямой линии и пройдя такое же расстояние, планета очутилась бы в положении 3. Сначала мы докажем, что в равные промежутки времени описываются равные площади, если силы *нет*. Напомню, что площадь треугольника равна половине произведения основания на высоту, а высота – это расстояние по вертикали от вершины до основания треугольника. Если треугольник тупоугольный (рис. 14), то высота – AD , а основание – BC . Теперь сравним площади, которые описывались бы при движении планеты, если бы Солнце на нее не действовало (рис. 13).

Вы помните, что два расстояния 1–2 и 2–3 равны. Вопрос в том, равны ли две площади. Рассмотрим треугольник, образованный Солнцем (S) и двумя точками 1 и 2. Какова его площадь? Она равна основанию 1–2, умноженному на половину перпендикуляра, опущенного на основание из точки S . Теперь – другой треугольник, образованный точками 2, 3 и S . Его площадь равна основанию 2–3, умноженному на половину перпендикуляра, опущенного из точки S . У этих двух треугольников одна и та же высота и, как я уже сказал, равные основания. Поэтому они имеют одинаковую площадь. Пока все идет прекрасно. Если бы со стороны Солнца не действовало никаких сил, то за равные промежутки времени описывались бы равные площади. Но Солнце действует на планету. На отрезке 1–2–3 Солнце притягивает планету, причем направление силы притяжения постепенно меняется. Чтобы получить хорошее приближение, возьмем среднее положение 2 и скажем, что весь эффект притяжения на отрезке 1–3 сводится к отклонению планеты на некоторое расстояние в направлении линии 2– S (рис. 15).

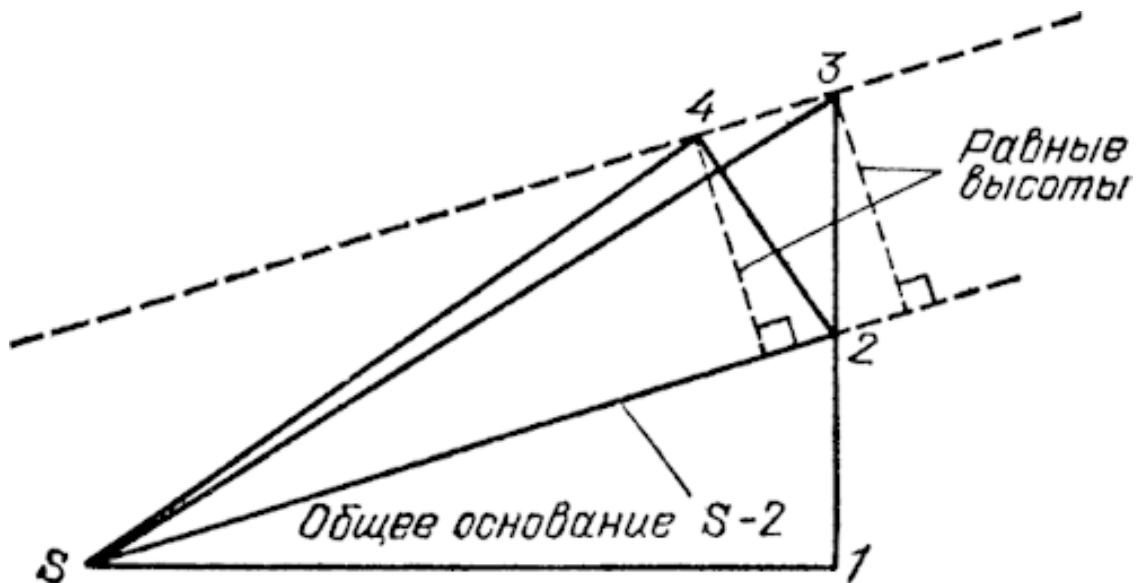


Рис. 15

Это означает, что тело двигалось по линии $1-2$ и продолжало бы двигаться по ней, если бы не было силы, но притяжение Солнца заставляет тело двигаться по линии $2-S$. Таким образом, движение тела на следующем отрезке складывается из того, как планета двигалась бы самостоятельно, и изменения, которое произошло под действием Солнца. Поэтому планета попадает не в положение 3 , а в положение 4 . Теперь мы сравним площади треугольников $23S$ и $24S$ и докажем, что они равны. У них общее основание $S-2$. Одинаковы ли у них высоты? Да, потому что треугольники заключены между параллельными линиями. Расстояние от точки 4 до линии $S-2$ равно расстоянию от точки 3 до линии $S-2$ (продолженной). Значит, площадь у треугольника $S24$ такая же, как у $S23$. Раньше я доказал, что треугольники $S12$ и $S23$ равны по площади. Отсюда ясно, что $S12 = S24$. Таким образом, при движении планеты по орбите площади, описываемые за первую и за вторую секунду, равны. Значит, путем рассуждений мы нашли связь между тем фактом, что сила направлена к Солнцу, и тем фактом, что площади равны. Не правда ли, остроумно? Я позаимствовал вывод прямо у Ньютона. Все это содержится в его «Principia»: и схема, и доказательство. Только цифры другие, потому что он пользовался римскими цифрами, а я – арабскими.

Все доказательства в книге Ньютона были геометрическими. Сегодня мы строим доказательства по-другому. Мы доказываем аналитически, при помощи символов. Чтобы построить нужные треугольники, подметить равенство площадей, требуется изобретательность. Теперь мы имеем усовершенствованные методы анализа, более быстрые и эффективные. Я хочу показать вам, как это выглядит в обозначениях более современной математики, где для доказательства нужно лишь записать несколько символов.

Мы будем говорить о быстроте изменения площади и обозначим эту величину через A' (« A с точкой»). При повороте радиуса площадь изменяется, и быстрота ее изменения – это составляющая скорости, перпендикулярная радиусу, умноженная на радиус. Иначе говоря, это расстояние по радиусу, умноженное на скорость, т. е. на быстроту изменения расстояния:

$$A' = r \times r'.$$

Спросим себя: изменяется ли сама скорость изменения площади? Закон Кеплера говорит, что скорость изменения площади не должна меняться. Поэтому мы дифференцируем написанное равенство, а тут весь фокус в том, чтобы поставить точки в нужных местах – и ничего больше. Таким фокусам надо научиться: это просто набор правил, которые были придуманы, чтобы облегчить доказательства. Мы пишем

$$A'' = r' \times r' + r \times r'' = r \times F / m.$$

Первое слагаемое – это составляющая скорости, перпендикулярная самой скорости. Оно равно нулю – скорость направлена вдоль самой себя. Ускорение r'' – это вторая производная r , т. е. производная скорости. Она равна силе, деленной на массу.

Это означает, что скорость изменения скорости изменения площади есть составляющая силы, направленная под прямым углом к радиусу. Но если сила направлена по радиусу,

$$r \times F / m = 0,$$

как утверждал Ньютон, то под прямым углом к радиусу она не действует, а значит, скорость изменения площади не изменяется:

$$A'' = 0.$$

Мы видим, как много нам дает анализ при помощи символов. Ньютон более или менее умел это делать, только в несколько других обозначениях. Но он предпочел геометрические доказательства, стремясь к тому, чтобы люди могли прочесть его статьи. Он сам изобрел исчисление бесконечно малых, которым я воспользовался во втором доказательстве.

Это хорошая иллюстрация взаимоотношений между математикой и физикой. Когда в физике проблема оказывается трудной, мы можем заглянуть к математикам – вдруг они уже встречались с такими вопросами и имеют готовые способы доказательства? Но может оказаться, что они этим еще не занимались. Тогда нам придется самим изобрести доказательства и потом передать их математикам. Каждый, кто рассуждает о чем-нибудь точно, показывает тем самым, как человек мыслит, и если представить его рассуждения в общем виде и передать математикам, то они внесут его в свои книги в качестве раздела математики. Математика – это путь, по которому мы переходим от одной совокупности утверждений к другой. И она, очевидно, полезна в физике, потому что говорить о вещах мы можем по-разному, а математика позволяет нам выяснить следствия, анализировать ситуации и видоизменять законы, чтобы связать различные утверждения. В общем, физик знает очень мало. Он только должен помнить правила, которые позволяют переходить от одного к другому, ибо все эти различные утверждения о равенстве интервалов времени, о силе, направленной по радиусу, и т. д. тесно связаны логикой.

Тут возникает интересный вопрос. Существует ли какая-нибудь отправная точка для всех наших выводов? Существует ли в природе такой порядок, который позволял бы нам говорить, что одна совокупность утверждений – более фундаментальная, а другая представляет собой ее следствие? Возможны два взгляда на математику. Для удобства один из них я назову вавилонской традицией, а другой – греческой традицией. В вавилонских школах математики ученик решал огромное множество примеров, пока не улавливал общего правила. Он подробно знал геометрию, множество свойств круга, теорему Пифагора, формулы для площадей квадратов и треугольников; кроме того, существовали некоторые способы выводить одно из другого. Имелись числовые таблицы, при помощи которых можно было решать сложные уравнения. Все было подготовлено для того, чтобы производить вычисления. Но Евклид обнаружил, что все теоремы геометрии можно вывести из нескольких простых аксиом. Вавилонский подход – я назвал бы его вавилонской математикой – заключается в том, что вы знаете самые разные теоремы, многие связи между ними, но не осознаете до конца, что все они могут быть выведены из набора аксиом. Самая же современная математика делает упор на аксиому и доказательства исходя из очень четких соглашений о том, что можно и что нельзя считать аксиомами. Современная геометрия берет аксиомы, подобные евклидовым, но несколько усовершенствованные, и выводит из них все остальное. Например, такие теоремы, как теорема Пифагора (сумма квадратов катетов прямоугольного треугольника равна квадрату гипотенузы), не будут аксиомами. Но возможно и другое построение геометрии – так, например, в геометрии Декарта теорема Пифагора является аксиомой.

Итак, прежде всего мы должны согласиться с тем, что даже в математике можно отправляться от разных исходных положений. Поскольку все теоремы связаны друг с другом логикой, нельзя сказать, что такие-то утверждения мы считаем основными аксиомами, ибо если вместо них вам предложат другие аксиомы, то и по ним вы сможете построить всю геометрию. Это подобно мосту, составленному из одинаковых секций. Если он развалится, вы можете восстановить его, соединив секции в другом порядке. Сегодняшняя математическая традиция состоит в том, что берут определенные идеи, которые условились считать аксио-

мами, и исходя из них строят все здание. Если же следовать вавилонской традиции, то мы скажем: «Я знаю то, я знаю это и как будто бы знаю вот это; отсюда я выведу все остальное. Может быть, завтра я что-то забуду, но что-то я буду помнить и по этим остаткам смогу восстановить все заново. Я не очень хорошо знаю, с чего я должен начать и чем кончить. Но в голове у меня всегда достаточно сведений, так что если я забуду часть из них, то все равно смогу это восстановить».

Доказывая теоремы, невыгодно каждый раз начинать с аксиом. Вы не сильно преуспеваете в геометрии, если станете доказывать всякое положение, каждый раз отправляясь от аксиом. Конечно, если вы располагаете определенными сведениями в геометрии, то всегда сможете вывести из них кое-что еще; но гораздо выгоднее поступать иначе. Дорога, которая начинается с выбора наилучших аксиом, не всегда кратчайшая дорога к цели. В физике нам нужен вавилонский метод, а не греческий. Постараюсь объяснить почему.

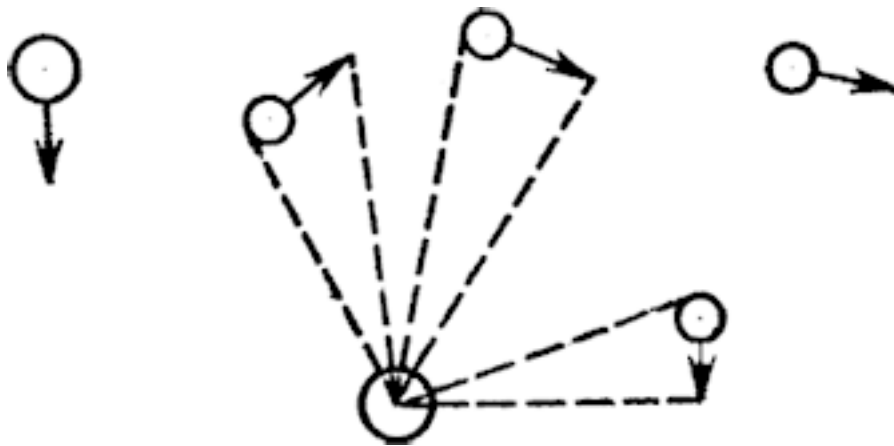


Рис. 16

При евклидовом подходе наша задача – подобрать как можно более интересные и важные аксиомы. Но относительно тяготения, например, мы могли бы спросить себя: какая аксиома лучше – о том, что сила направлена к центру, или о том, что за равные промежутки времени описываются равные площади? Если я буду исходить из того, каковы силы, то смогу рассматривать систему, состоящую из многих тел, орбиты которых уже не являются эллипсами, потому что силовая формулировка говорит мне о взаимном притяжении этих тел. В этом случае теорема о равенстве площадей несправедлива. Поэтому мне кажется, что аксиомой должен быть именно закон сил. С другой стороны, принцип равенства площадей можно сформулировать в виде более общей теоремы для многих тел. Она довольно сложна и совсем не так красива, как первоначальное утверждение о равенстве площадей, но, несомненно, является его порождением. Рассмотрим систему многих тел, взаимодействующих друг с другом, например Юпитер, Сатурн, Солнце, множество звезд, и, глядя на них издали, спроектируем свою систему на плоскость (рис. 16). Тела движутся в разных направлениях. Возьмем в качестве центра произвольную точку и подсчитаем, какую площадь описывают радиусы, проведенные из центра к каждому телу. При этом будем учитывать массу – если у одного тела масса вдвое больше, чем у другого, то соответствующую площадь будем умножать на два. Так мы подсчитаем все площади, описываемые радиусами, а затем сложим их пропорционально соответствующим массам. *Такая сумма площадей не будет изменяться со временем.* Она называется моментом количества движения системы, а закон – законом сохранения момента количества движения. «Сохранение» означает всего-навсего, что величина не изменяется.

Вот одно из следствий этого закона. Вообразим множество звезд, которые сближаются друг с другом, чтобы образовать туманность или галактику. Сначала они разбросаны очень далеко от центра. Звезды медленно движутся вокруг него, и радиусы описывают определенные площади. По мере их сближения расстояния до центра сокращаются, радиусы уменьшаются, и, чтобы описать прежнюю площадь, звезды вынуждены двигаться гораздо быстрее. Таким образом, сближаясь, звезды вращаются все быстрее и быстрее. Этим (приблизительно) и объясняется форма спиральных туманностей. То же самое происходит, когда фигурист крутится на льду. Он начинает, отставив ногу, и вращается медленно, а опуская ногу, крутится быстрее. Когда нога вытянута, она описывает за секунду определенную площадь. Опустив ее, фигурист должен вращаться гораздо быстрее, чтобы описать ту же самую площадь. Правда, я доказывал это не для людей – они пользуются мускульной силой, а не силой тяготения. Но закон справедлив и для спортсменов.

Тут мы приходим к интересной проблеме. Зачастую из частного закона физики, такого, как закон тяготения, можно вывести принцип гораздо более общий, чем само содержание частного закона. В математике этого не бывает; теоремы не появляются там, где их не ожидают. Поясним примером. Если в качестве постулата физики мы взяли бы закон равенства площадей для сил тяготения, то мы могли бы вывести закон сохранения момента импульса, но только для сил тяготения. А на опыте мы обнаруживаем, что закон сохранения момента распространяется на более широкий круг явлений. Ньютон принял другие постулаты, и ему удалось получить при их помощи более общий закон сохранения момента импульса. Пусть постулаты Ньютона неверны. Нет никаких сил – все это чепуха, частицы не имеют орбит и т. д. Тем не менее видоизмененный принцип равенства площадей и закон сохранения момента справедливы. Они распространяются на движение атомов в квантовой механике и, насколько нам известно сегодня, вполне точны. Мы знаем эти общие принципы, которыми пронизаны самые разные законы. Но если мы будем слишком серьезно относиться к математическим доказательствам и считать, что одно справедливо только потому, что справедливо другое, то не сможем понять связи между различными отраслями физики. В тот день, когда физика станет полной и мы будем знать все ее законы, мы, вероятно, сможем начинать с аксиом, и, несомненно, кто-нибудь придумает, как их выбирать, чтобы из них получить все остальное. Но пока мы не знаем всех законов, по некоторым из них можно угадывать теоремы, которые еще не имеют доказательств. Чтобы понимать физику, необходимо строгое равновесие в мыслях. Мы должны держать в голове все разнообразные утверждения и помнить об их связях, потому что законы часто простираются дальше своих доказательств. Надобность в этом отпадет только тогда, когда будут известны все законы.

Во взаимоотношениях физики и математики имеется еще одна интересная черта: математика позволяет доказать, что в физике исходя из разных точек зрения можно прийти к одним и тем же выводам. Это и понятно: если у вас есть аксиомы, то вместо них вы можете воспользоваться некоторыми теоремами; физические же законы построены так деликатно, что их различные, хотя и эквивалентные формулировки качественно отличаются. Этим они и любопытны. Для примера я сформулирую закон тяготения тремя разными способами. Все они совершенно эквивалентны, но звучат очень несхоже.

Первая формулировка – это когда силы между телами описываются уравнением, которое я приводил выше:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}.$$

Каждое тело, «узнав», что на него действует сила, ускоряется, т. е. изменяет свое движение на определенную величину за секунду. Это обычная формулировка закона, я назову ее ньютоновой. Эта формулировка говорит, что сила зависит от чего-то находящегося на конечном расстоянии. Она обладает так называемым свойством нелокальности. Сила, действующая на предмет, зависит от того, насколько удален от него другой предмет.

Вам, возможно, не понравится мысль о действии на расстоянии. Откуда может узнать предмет, что происходит вдалеке? Ну что ж, имеется другой способ сформулировать закон — очень странный. Он основан на понятии поля. Объяснить его трудно, но я попытаюсь дать вам хотя бы приблизительное представление. Звучит он совсем по-другому. В каждой точке пространства имеется число (именно число, а не механизм: в том-то и вся беда с физикой, что она должна быть математической), и, когда вы переходите с места на место, это число меняется. Если в какой-то точке пространства поместить предмет, то на него будет действовать сила в том направлении, в котором быстрее всего изменяется это число (я дам ему обычное название — потенциал; сила действует в направлении быстрейшего изменения потенциала). Далее, сила пропорциональна тому, насколько быстро изменяется потенциал при перемещении из одной точки в другую. Это только одна часть формулировки, и ее недостаточно, потому что я еще не сказал вам, как именно изменяется потенциал. Я мог бы сказать, что потенциал изменяется обратно пропорционально расстоянию от каждого тела, но тогда мы снова вернулись бы к понятию о действии на расстоянии. Можно сформулировать закон по-другому, сказав: нам не надо знать, что происходит за пределами маленького шарика. Если вы хотите знать, чему равен потенциал в центре, скажите мне просто, каков он на поверхности сколь угодно малого шарика. Вам не надо смотреть вокруг шарика, скажите лишь, каков потенциал по соседству с интересующей вас точкой и какова масса шарика. Правило таково. Потенциал в центре равен среднему потенциалу на поверхности шарика минус постоянная G , которая была в предыдущем уравнении, поделенная на удвоенный радиус шарика (обозначим его через a) и умноженная на массу шарика, если шарик достаточно мал:

$$\begin{aligned} \text{Потенциал в центре} = \\ = \text{Средний потенциал на сфере} - \frac{G}{2a} \times \text{Масса сферы.} \end{aligned}$$

Как видите, этот закон отличается от предыдущего, ибо он говорит нам, что происходит в некоторой точке, если известно, что происходит рядом с ней. Ньютонова же формулировка позволяет сказать, что происходит в данный момент времени, если мы знаем, что происходит в предыдущий момент. Во времени она переводит нас плавно от момента к моменту, но в пространстве заставляет скакать из одного места в другое. Вторая формулировка локальна и во времени, и в пространстве, потому что она говорит о соседних точках. Но в математическом смысле обе формулировки эквивалентны.

Существует еще и третья формулировка, основанная на качественно иных понятиях. Если вам не нравится действие на расстоянии, то я показал вам, как можно без него обойтись. Теперь я дам вам формулировку, которая в философском смысле прямо противополо-

ложна предыдущей. Тут нам не нужно переходить от момента к моменту, от точки к точке; мы опишем все сразу, целиком. Пусть у нас имеется несколько частиц и вы желаете знать, как одна из них перемещается из одного места в другое. Вообразим все возможные пути перехода из одного места в другое за данный отрезок времени (рис. 17). Скажем, частица должна перейти из точки X в точку Y за час и вы желаете знать, по какому пути она может двигаться. Вы воображаете всевозможные кривые и для каждой кривой подсчитываете определенную величину. (Я не хочу рассказывать, какая это величина, но для тех, кто о ней слышал, напомним, что для каждого пути она равна среднему значению разности между кинетической и потенциальной энергией.) Если вы подсчитаете эту величину для одного пути, а затем для другого, то для разных путей получите разные числа. Но один из путей дает наименьшее возможное число – именно этим путем и воспользуется на самом деле частица! Теперь мы описываем действительное движение, эллипс, высказывая нечто о кривой в целом. Нам не нужно думать о причинности, о том, что частица чувствует притяжение и движется в согласии с ним. Вместо этого мы говорим, что она разом «обнюхивает» все кривые, все возможные пути и решает, какой выбрать. (Выбирает тот, для которого наша величина – минимальная.)



Рис. 17

Вот вам пример, сколько прекрасных способов существует для описания Природы. Если нам говорят, что в Природе должна господствовать причинность, вы можете взять ньютонову формулировку; если настаивают, что Природа должна обладать свойствами локальности, – к вашим услугам вторая формулировка; если же вас убедили, что Природу нужно описывать при помощи принципа минимума, – берите третью. Какая же из них правильная? Если они математически неравнозначны, если из них вытекают разные следствия, то нам остается лишь выяснить на эксперименте, как именно поступает Природа. К нам могут подойти люди и завести философский спор, что одна им нравится больше, чем другая; но опыт научил нас, что в предсказании поступков Природы философские предчувствия не оправдываются. Мы просто должны представить себе все возможности и затем все их перепробовать. Но в том случае, о котором мы сейчас говорили, все теории совершенно эквивалентны. С точки зрения математической все эти три формулировки – ньютонова, локальная полевая и принцип минимума – приводят к совершенно одинаковым последствиям. Что же тогда делать? Вы прочтете в любой книге, что мы не имеем права отдать научное предпочтение одной из них. И это правда. В научном смысле они эквивалентны. Нет такого опыта, который позволил бы нам сделать этот выбор, потому что все следствия одинаковы. Но психологически они различны. Во-первых, они могут нравиться или не нравиться в фило-

софском плане; эту болезнь можно вылечить только тренировкой. Во-вторых, психологическое различие между ними становится особенно важным, когда вы отправляетесь на поиски новых законов.

Пока физика неполна и мы пытаемся открыть новые законы, различные возможные формулировки могут послужить путеводными нитями к пониманию того, что произойдет при других обстоятельствах. В этом случае они психологически неравноценны, ибо толкают нас на разные догадки относительно того, как может выглядеть закон в более общей ситуации. Например, Эйнштейн понял, что *электрические* сигналы не могут распространяться быстрее света. Он догадался, что это общий принцип. (Подобной игрой в догадки занимались и мы, когда брали закон сохранения момента количества движения и переносили его с одного частного случая, для которого он доказан, на все явления природы.) Эйнштейн догадался, что это общее свойство природы, и в том числе гравитации. Если сигналы не могут распространяться быстрее света, то формулировка, подразумевающая мгновенные взаимодействия, очень плоха. Поэтому в обобщенной теории гравитации, созданной Эйнштейном, метод Ньютона безнадежно слаб и чудовищно сложен, тогда как метод полей и принцип минимума точны и просты. Какой из двух предпочесть – мы до сих пор не решили.

На самом деле оказывается, что в квантовой механике ни один из них не точен в том виде, в каком я их сформулировал, а сам факт существования принципа минимума является следствием того, что в микромире частицы подчиняются квантовой механике. Сейчас наилучшим законом нам представляется комбинация принципа минимума и локальных законов. Сегодня мы думаем, что законы физики должны иметь локальный характер и в то же время сочетаться с принципом минимума, но наверняка мы этого не знаем. Если в системе знаний таится какая-то погрешность, но построена система на удачных аксиомах, то впоследствии вы обнаружите, что неверна лишь одна из них, а остальные справедливы; в этом случае потребуются лишь незначительные переделки. Но если вы строили систему на других аксиомах, то она может вся развалиться из-за того, что целиком опирается на одну-единственную слабую деталь. Мы не можем сказать заранее, не прибегая к интуиции, как лучше всего строить систему, чтобы прийти к новому закону. Мы постоянно должны иметь в виду все возможные способы описания; поэтому физики занимаются вавилонской математикой и уделяют мало внимания аксиоматическому построению своей науки.

Одна из поразительных особенностей природы – многообразие возможных схем ее истолкования. Это обусловлено самим характером наших законов, тонких и четких. Например, свойство локальности существует только потому, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния. Если бы там стоял куб, мы не имели бы локального метода. С другой стороны, тот факт, что сила связана с быстротой изменения скорости, позволяет записывать законы, пользуясь принципом минимума. Если бы сила, например, была пропорциональна самой скорости перемещения, а не ускорению, то это было бы невозможно. Стоит сильно изменить законы, и вы обнаружите, что число возможных формулировок сократилось. Мне это всегда представлялось загадкой. Я не понимаю, почему правильные законы физики допускают такое огромное количество разных формулировок. Они похожи на крокетный шар, который проходит сразу через несколько ворот.

Наконец, я хотел бы сделать несколько более общих замечаний о связи математики с физикой. Математики имеют дело только со структурой рассуждений, и им, в сущности, безразлично, о чем они говорят. Им даже не нужно знать, о чем они говорят, или, как они сами выражаются, истинны ли их утверждения. Объясню почему. Вы формулируете аксиомы: «То-то и то-то обстоит так, а то-то и то-то обстоит так». Что дальше? Дальше можно заниматься логикой, не зная, что означают слова «то-то и то-то». Если аксиомы полны и сформулированы точно, то человеку, строящему доказательство, необязательно понимать значение слов, для того чтобы получить новый вывод на языке, которым он пользуется. Если в одной

из аксиом стоит слово «треугольник», то в выводах математика будут какие-то утверждения относительно треугольников, однако при получении этих выводов он не обязан знать, что за вещь – треугольник. Я же могу вернуться к началу его рассуждений и сказать: «Треугольник – это фигура с тремя сторонами, которая представляет собой то-то и то-то». И тогда я пойму его новые выводы. Другими словами, математик готовит абстрактные доказательства, которыми вы можете воспользоваться, приписав реальному миру некоторый набор аксиом. Физик же не должен забывать о значении своих фраз. Это очень важная обязанность, которой склонны пренебрегать люди, пришедшие в физику из математики. Физика – не математика, а математика – не физика. Одна помогает другой. Но в физике вы должны понимать связь слов с реальным миром. Получив какие-то выводы, вы должны их перевести на родной язык и на язык природы – в медные кубики и стеклянные шарики, с которыми вы будете экспериментировать. Только так вы сможете проверить истинность своих выводов. В математике этой проблемы не существует вовсе.

Вполне понятно, что доказательства и способы мышления, найденные математиками, становятся для физиков могучими и полезными орудиями. Но и рассуждения физиков часто приносят пользу математикам.

Математики любят придавать своим рассуждениям возможно более общую форму. Если я скажу им: «Я хочу поговорить об обычном трехмерном пространстве», – они ответят: «Вот вам все теоремы о пространстве n измерений». – «Но у меня только три измерения». – «Хорошо, подставьте $n = 3$!» Оказывается, что многие сложные теоремы выглядят гораздо проще, если их применить к частному случаю. А физика интересуют только частные случаи; он никогда не интересуется общим случаем. Он говорит о чем-то конкретном; ему не безразлично, о чем говорить. Он хочет обсуждать закон тяготения в трехмерном пространстве; ему не нужны произвольные силы в пространстве n измерений. Он стремится к сокращениям, потому что математики готовят свои выводы для более широкого круга проблем. И поступают предусмотрительно, ибо в конце концов бедный физик всегда вынужден возвращаться и говорить: «Простите, но в прошлый раз вы хотели мне что-то сказать о четырех измерениях».

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.