

Г Л А В А II

ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

* *

В этой главе излагаются основные законы *динамики* — той части классической механики, которая занимается изучением движения тел в связи с действующими на них силами. Сила, действующая на тело, является мерой взаимодействия его с окружающими материальными объектами (другими телами, полями). Более полное определение приводится несколько ниже.

Законы динамики были установлены Ньютоном и носят его имя. Как и другие принципы, лежащие в основе физики, они являются *обобщением опытных фактов*. На них следует смотреть не как на изолированные независимые утверждения, а как на *систему взаимосвязанных законов*. Опытной проверке подвергается не каждый закон в отдельности, а вся система в целом.

Ввиду исключительной роли, которую играют законы Ньютона в механике, приведем их в том виде, в каком они были сформулированы самим Ньютоном (перевод акад. А. Н. Крылова). Формулировке основных законов Ньютон предпосылает восемь определений, из которых для нас здесь важны первые четыре.

Определение 1. *Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее.*

Определение 2. *Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе.*

Определение 3. *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 движения.*

Определение 4. *Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.*

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.*

Закон 2. *Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.*

Закон 3. *Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собою равны и направлены в противоположные стороны.*

Понятие массы у Ньютона отличается неясностью, поскольку им не было дано определения плотности. Кроме того, представление массы как произведения объема тела на плотность содержащегося в нем вещества возможно только для макроскопических тел, но не для элементарных и атомных частиц. Поэтому ньютоново определение массы не удержалось в науке и было заменено другими определениями.

Аристотель и его последователи рассматривали силу как причину движения. Они считали, что с прекращением действия силы прекращается и движение тела. Сила необходима для поддержания движения. Установление первого закона Ньютона означало, что такое представление о силе является неправильным, так как для поддержания (равномерного) движения никаких «сил» не требуется. Силу стали рассматривать как *причину изменения количества движения тела*. А так как это изменение вызывается другими телами, то можно дать следующее определение силы. *Сила есть мера интенсивности взаимодействия тел, проявляющаяся в изменении их количества движения.*

Ниже мы подробно разберем содержание законов Ньютона и связанных с ними понятий, хотя и не будем следовать той системе изложения, которая была принята самим Ньютоном.

§ 9. Закон инерции. Инерциальная система отсчета

1. *В качестве первого закона движения* Ньютон принял закон инерции, открытый еще Галилеем. Согласно этому закону *тело (материальная точка), не подверженное внешним воздействиям, либо находится в покое, либо движется прямолинейно и равномерно*. Такое тело называется *свободным*, а его движение — *свободным движением* или *движением по инерции*.

Свободных тел, строго говоря, не существует. Они являются физическими абстракциями. Однако можно поставить тело в такие условия, когда внешние воздействия на него по возможности устранены или практически компенсируют друг друга. Представив себе, что эти воздействия беспредельно уменьшаются, мы и приходим в пределе к представлению о свободном теле и свободном движении.

Здесь, однако, возникает следующая трудность. Как убедиться в том, что тело не подвержено внешним воздействиям? Об этом нельзя судить по отсутствию ускорений. Нужны какие-то другие независимые способы. Иначе закон инерции потерял бы всякое содержание. Вполне удовлетворительного ответа на этот вопрос не существует. В отсутствие внешних воздействий мы убеждаемся по отсутствию растягивающих пружин или веревок, которые тянут

тело, по отсутствию тел, которые давят на него, и т. д. Но тело может испытывать воздействия не только со стороны тел, с которыми оно соприкасается. Оно может подвергаться воздействиям также со стороны различного рода *силовых полей*, возбуждаемых другими телами. Поэтому вопрос сводится к тому, как убедиться в том, что воздействиям со стороны силовых полей тело не подвергается.

Все силы, встречающиеся в природе, известные в настоящее время, сводятся к силам *гравитационного притяжения*, *электромагнитным силам* и прочим силам, действующим между атомными ядрами и элементарными частицами (*ядерные силы*, *слабые взаимодействия*). От действия последних сил легко освободиться, так как они являются силами *короткодействующими* и проявляются лишь на расстояниях, меньших примерно 10^{-12} см.

Электромагнитные и гравитационные силы, напротив, являются силами *дальнодействующими*. С расстоянием они убывают медленно. Если это статические силы, то они убывают обратно пропорционально квадрату расстояния. Если же они переменные (электромагнитные волны), то убывание происходит еще медленнее — обратно пропорционально расстоянию. Только благодаря электромагнитным волнам (свет, радиоизлучение, рентгеновское излучение), исходящим от планет, звезд, пульсаров, галактик и пр., мы и знаем о существовании этих небесных объектов. Поэтому нет оснований утверждать, что удаленные источники не возбуждают заметных электромагнитных и гравитационных полей в рассматриваемой нами области пространства. Однако в отсутствии электромагнитных полей всегда можно убедиться, так как они действуют *по-разному* на положительные и отрицательные заряды, из которых состоят тела. Под действием таких полей возникло бы некоторое разделение положительных и отрицательных зарядов, которое можно было бы обнаружить на опыте. Заряженный шарик, помещенный в одну и ту же точку пространства, двигался бы по-разному в зависимости от того, заряжен он положительно или отрицательно. Все имеющиеся факты не противоречат утверждению, что удаленные тела Вселенной не возбуждают сколько-нибудь заметных статических электромагнитных полей в малых областях пространства (порядка размеров Солнечной системы или Галактики).

О гравитационных полях этого нельзя сказать с той же уверенностью. Но если бы такие поля и существовали, то с ними можно было бы не считаться. Дело в том, что всем телам, независимо от их состава, одно и то же гравитационное поле сообщает в точности одинаковое ускорение. Статическое гравитационное поле удаленных тел Вселенной в малых областях пространства можно считать практически однородным. Можно ввести систему отсчета, свободно падающую в таком однородном гравитационном поле. На явлениях, происходящих в такой системе отсчета, наличие этого однородного

гравитационного поля никак не сказывается. Здесь все происходит в точности так же, как в кабине космического корабля, свободно движущегося в космическом пространстве. В такой кабине космонавты не чувствуют наличия поля тяготения (невесомость). Переменные же гравитационные поля (гравитационные волны) слишком слабы. Попытки их экспериментального обнаружения стали предприниматься лишь в последнее время. Однако из-за малости ожидаемых эффектов гравитационные волны еще не обнаружены экспериментально. Ограничимся здесь этими замечаниями, откладывая подробный разбор вопроса до гл. IX.

2. В кинематике выбор системы отсчета не был существенным. Все системы отсчета *кинематически эквивалентны*. Не так обстоит дело в динамике. Уже закон инерции с особой остротой ставит вопрос о выборе системы отсчета. Одно и то же движение выглядит *по-разному* в разных системах отсчета. Если в какой-либо системе отсчета тело движется прямолинейно и равномерно, то в системе отсчета, движущейся относительно первой ускоренно, этого уже не будет. Отсюда следует, что закон инерции не может быть справедливым во всех системах отсчета. Без указания системы отсчета он просто теряет смысл. Классическая механика постулирует, что *существует система отсчета, в которой все свободные тела движутся прямолинейно и равномерно*. Такая система называется *инерциальной системой отсчета*. Содержание закона инерции, в сущности, сводится к утверждению, что существует по крайней мере одна инерциальная система отсчета.

Это утверждение является обобщением громадной совокупности опытных фактов. Точно так же только опытным путем можно установить, какие системы отсчета являются инерциальными, а какие — не инерциальными. Допустим, например, что речь идет о движении звезд и других астрономических объектов в доступной нашему наблюдению части Вселенной. Тогда можно утверждать, что система отсчета, в которой Земля принимается неподвижной (такую систему мы будем называть *земной*), не будет инерциальной. Действительно, в такой системе звезды совершают суточные вращения на небесном своде. Так как расстояния до звезд очень велики, то при этом развиваются очень большие центростремительные ускорения, направленные к Земле. Между тем каждая звезда, ввиду ее громадной удаленности от других небесных тел, практически является свободной. Свободное движение звезды в земной системе отсчета совершается по кругу, а не по прямой линии. Оно не подчиняется закону инерции, а потому земная система отсчета не будет инерциальной. Надо испытать на инерциальность другие системы отсчета. Попробуем взять *гелиоцентрическую систему отсчета*, иначе называемую *системой Коперника*. Это есть координатная система, начало которой помещено в центре Солнца (точнее, в центре масс Солнечной системы), а координатные оси являются прямыми, направленными

на три удаленные звезды и не лежащими в одной плоскости. Материальными объектами, с помощью которых реализуются эти оси, являются световые лучи, приходящие от звезд в Солнечную систему. Благодаря относительному движению звезд углы между координатными осями в системе Коперника не остаются постоянными, а медленно изменяются с течением времени. Однако ввиду колоссальности расстояний до звезд изменения направлений координатных осей происходят настолько медленно, что, как правило, их можно не принимать во внимание. Система Коперника практически является инерциальной системой по крайней мере при изучении движений, происходящих в масштабе нашей планетной системы, а также всякой другой системы, размеры которой малы по сравнению с расстояниями до тех трех звезд, которые в системе Коперника выбраны в качестве опорных. Это доказывается опытами, большинство из которых являются косвенными. Некоторые прямые опыты (маятник Фуко и пр.) будут рассмотрены в гл. IX. Эти же опыты доказывают неинерциальность земной системы отсчета.

3. Неинерциальность земной системы отсчета объясняется тем, что Земля вращается вокруг собственной оси и вокруг Солнца, т. е. *движется ускоренно относительно системы Коперника*. Впрочем, оба эти вращения происходят медленно *). Поэтому *по отношению к громадному кругу явлений земная система отсчета ведет себя практически как инерциальная система*. Обычные, сравнительно грубые наблюдения и опыты над движением тел не позволяют обнаружить отступления от инерциальности земной системы отсчета. Для этого требуются более точные и тонкие опыты. Вот почему при установлении основных законов динамики можно начать с изучения движения тел относительно Земли, отвлекаясь от ее вращения, т. е. принять Землю за *приблизительно инерциальную систему отсчета*.

4. Если три звезды, используемые в системе Коперника для фиксирования направлений координатных осей, принадлежат нашей Галактике, то, разумеется, такая система может играть роль инерциальной или, точнее, приблизительно инерциальной системы отсчета только тогда, когда речь идет о движении объектов, малых по сравнению с размерами Галактики, например, о движении Солнечной системы или ее частей. Но при рассмотрении движений всей Галактики или нескольких галактик это будет уже не так. Тогда для построения (приблизительно) инерциальной системы отсчета можно использовать какие-либо другие четыре астрономических объекта, расстояния между которыми весьма велики по сравнению с размерами области пространства, внутри которой совершается движение рассматриваемых тел. Центр одного из этих

*) В каком смысле следует понимать медленность вращения — это выяснится в гл. IX.

астрономических объектов можно принять за начало координат, а остальные три объекта использовать для фиксирования направлений координатных осей.

При изучении движения тел мы будем сначала предполагать, что движение отнесено к инерциальной системе отсчета. После этого в гл. IX мы изучим, как изменится форма законов движения, когда оно рассматривается относительно неинерциальных систем отсчета.

§ 10. Масса. Закон сохранения импульса

1. Всякое тело оказывает сопротивление при попытках привести его в движение или изменить величину или направление его скорости. Это свойство тел называется *инертностью*. У разных тел оно проявляется в разной степени. Так, сообщить одно и то же ускорение большому камню значительно труднее, чем маленькому мячику. *Мера инертности тела называется массой*.

Для точного количественного определения массы введем понятие *изолированной* или *замкнутой системы*. Так называют систему тел, настолько удаленных от всех остальных тел, что они практически не оказывают никакого действия на рассматриваемую систему. Тела системы могут взаимодействовать только между собой. Рассмотрим теперь изолированную систему, состоящую из двух материальных точек. Скорости точек должны быть малы по сравнению со скоростью света. В результате взаимодействия материальных точек их скорости меняются. Пусть v_1 — скорость точки 1, v_2 — скорость точки 2, а Δv_1 и Δv_2 — приращения этих скоростей за один и тот же промежуток времени Δt . Величины Δv_1 и Δv_2 имеют противоположные направления и связаны между собой соотношением

$$m_1 \Delta v_1 = - m_2 \Delta v_2, \quad (10.1)$$

где величины m_1 и m_2 постоянны и имеют одинаковые знаки. Они совершенно не зависят от характера взаимодействия между материальными точками 1 и 2. Например, взаимодействие может происходить путем столкновения материальных точек между собой. Его можно осуществить, сообщив материальным точкам электрические заряды или поместив между ними маленькую пружинку и т. д. Продолжительность времени Δt можно менять произвольным образом. Векторы Δv_1 и Δv_2 при этом будут меняться. Однако коэффициенты m_1 и m_2 , точнее, их отношение, останутся одними и теми же. Эти результаты надо рассматривать как *опытные факты*, подтвержденные бесчисленным множеством примеров. Коэффициенты m_1 и m_2 могут зависеть только от *самих материальных точек системы*. Они называются *массами* или, точнее, *инертными массами* материальных точек 1 и 2.

Таким образом, по определению, *отношение масс двух материальных точек равно взятому с противоположным знаком отношению*