

1. Ньютонская физика и специальная теория относительности

1. Предшественники Ньютона

Из самых древних исторических записей, дошедших до нас, следует, что людям давно было известно о небольшой группе небесных объектов, которые передвигаются по небу совсем не так, как остальные звезды, перемещающиеся по периодически повторяющимся орбитам как единое целое. Не считая Солнца и Луны, двигались по своим собственным орбитам планеты Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Движение этих небесных тел вызывало живой интерес у мореплавателей и составителей календарей; планеты связывались с религиозными и мистическими идеями, известны попытки построить схемы для предсказания их движения. Согласно воззрениям александрийского астронома Клавдия Птолемея (II век) Земля находится в центре Вселенной. До сих пор, пока придерживались схемы Птолемея, видимое движение планет по небу рассматривалось как истинные орбиты планет; объяснение движения планет по наблюдаемым орбитам требовало участия сфер, приводимых во вращение зубчатыми передачами — шестеренками, для того чтобы получить наблюдаемые узлы и петли.

В XVII в. немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571—1630) провел тщательнейшую обработку наблюдений датского астронома Тихо Браге (1546—1601), исходя из представлений Николая Коперника (1473—1543). Польский астроном утверждал, что скорее Солнце, а не Земля является центром, вокруг которого движутся планеты. Кеплеру удалось показать, что планеты движутся по эллиптическим орбитам и что Солнце находится в одном из *фокусов* такого *эллипса* (рис. 1). Движение всех планет происходит таким образом, что прямая, соединяющая Солнце с планетой, описывает равные

площади за равные промежутки времени. Планета, изображенная на рис. 2, проходит путь от точки C к D за то же самое время, что и путь от A к B . Наконец, периоды обращения различных планет пропорциональны корню квадратному из наибольшего диаметра каждой орбиты, возведенному в третью степень. На рис. 3 на графике

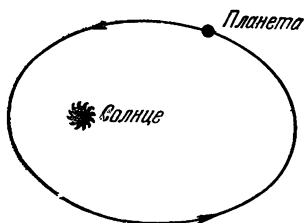


Рис. 1. Орбита планеты; в фокусе эллипса — Солнце.

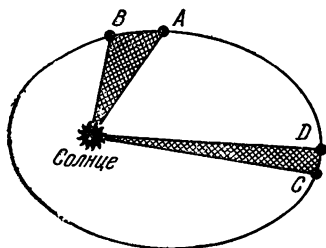


Рис. 2. Закон площадей.

изображен этот закон. На обеих осях — наибольших диаметров и периодов обращения — величины отложены в логарифмическом масштабе, чтобы на графике уместились все нужные данные: от периода обращения Меркурия, равного 88 дням, до Плутона — 91 000 дней. Прямая линия соответствует закону $3/2$. Данные, относящиеся к отдельным планетам, указаны черными кружками.

Законы, открытые Кеплером, позволили Ньютону сформулировать законы механики вообще и закон всемирного тяготения в частности. Мы едва ли в состоянии оценить в полной мере гений английского физика и математика Исаака Ньютона (1642—1717). Он смог превратить законы Кеплера во всеобъемлющую физическую теорию только потому, что сумел создать необходимый математический аппарат: Ньютон изобрел *дифференциальное и интегральное исчисление*, важнейшую математическую технику, необходимую для обращения с переменными величинами, такими, например, как перемещение тел с течением времени. С помощью аппарата дифференциального исчисления он сумел из законов Кеплера, найденных на основе наблюдений, получить основные принципы движения, которые справедливы в лю-

бой момент времени и заставляют планеты двигаться по замкнутым орбитам.

Если скорость движения, или просто *скорость* планеты, известна в любой момент времени, то с помощью дифференциального исчисления можно подсчитать в каждый момент времени ту скорость, с которой изменится сама скорость, т. е. *ускорение*. Обратнo, с помощью интегрального исчисления, зная скорость планеты, можно вычислить расстояние, проходимое планетой за любой заданный промежуток времени.

Ньютон понял, что закон Кеплера, утверждающий, что прямая, соединяющая планету и Солнце, описывает равные площади за равные промежутки времени, указывает на то, что любое изменение скорости планеты может быть направлено только прямо к Солнцу, но вовсе не под прямым углом к этому направлению (см. Дополнение 1).

Ньютон пришел к трем выводам, один из которых был уже предугадан итальянским ученым Галилео Галилеем (1564—1642); два других принадлежат полностью Ньюто-ну. Согласно первому из них влияние Солнца заставляет планеты непрерывным образом изменять свою скорость и это изменение скорости — ускорение (куда в большей степени, чем сама скорость, положение частицы или вся траектория в целом) — должно подчиняться сравнительно простым законам. В этом отношении Ньютон преодолел средневековые представления о том, что всякое тело занимает собственное *положение* во Вселенной, а действие других тел вызывает *смещение*. Согласно представлениям Ньютона тело, на которое не действуют другие тела, будет продолжать двигаться со скоростью, которую оно приобрело раньше; результатом действия других тел на данное тело будет изменение скорости тела, т. е. ускорение.

Второй вывод, о котором уже шла речь, следовал из закона равных площадей Кеплера. Ньютон понял, что сила, действующая со стороны Солнца на любую из пла-

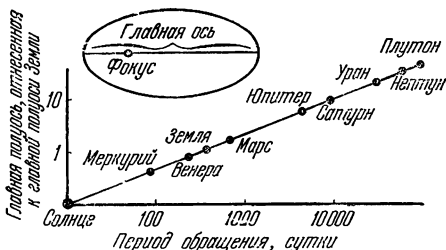


Рис. 3. Третий закон Кеплера.

нет, направлена к Солнцу и что эта сила — *сила притяжения*. Это хорошо видно на рис. 4. Когда планета переходит из положения P_1 в положение P_2 , ее скорость меняется от значения v_1 до значения v_2 . Приращение скорости $\Delta v = v_2 - v_1$ направлено прямо к источнику силы, к Солнцу. Надо помнить, что скорости v_1 и

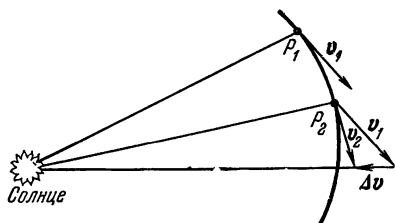


Рис. 4. Гравитационные силы — силы притяжения.

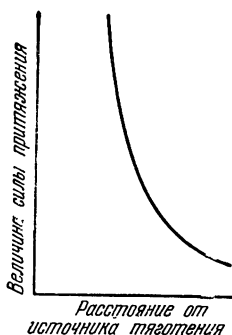


Рис. 5. Гравитационные силы убывают обратно пропорционально квадрату расстояния между телами.

v_2 представляют собой *векторы* (величины, обладающие направлением). Приращение Δv представляет собой также вектор, идущий от конца вектора (стрелки) v_1 к концу стрелки v_2 . Начала векторов v_1 и v_2 сведены в одну точку.

Наконец, форма орбит, по которым движутся планеты, и закон $3/2$, определяющий периоды движения планет по орбитам, привели Ньютона к заключению о том, что сила притяжения между двумя телами зависит от расстояния между этими телами; Ньютон установил, что сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами (рис. 5). Если измерить силу взаимного тяготения двух тел, отстоящих друг от друга на расстоянии в миллион километров, и затем еще раз измерить такую же силу, если тела поместить на удалении в два миллиона километров, то окажется, что на большем удалении друг от друга сила уменьшится в четыре раза по сравнению с ее значением при первом измерении (см. Дополнение 2).

Во времена Ньютона лишь два типа сил могли быть исследованы количественно. Одной из этих сил была сила тяжести; другой тип сил — это силы тяги или толка-

ния; с ними мы сталкиваемся в повседневной жизни, когда везем детскую коляску или тянем за поводок упирающуюся собаку. Ньютон отважился построить общую теорию, применимую ко всем силам: как к силам, известным в его время, так и к силам, которые, возможно, будут обнаружены впоследствии. Он рассматривал свою теорию притяжения лишь в качестве частного случая, который он может более полно разработать во всех подробностях. Что касается общей теории сил, то здесь Ньютон сформулировал три своих знаменитых закона:

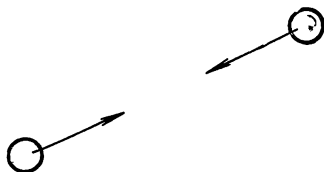


Рис. 6. Третий закон Ньютона.

1) Если на тело не действуют силы, то оно либо покоится, либо совершает равномерное прямолинейное движение.

2) Если на тело действует сила, то тело будет испытывать ускорение в том направлении, в котором действует сила; произведение массы тела на испытываемое им ускорение равно действующей силе ($f = ma$).

3) Каждой силе соответствует равная и противоположно направленная сила (рис. 6). Согласно третьему закону каждая планета притягивает к себе Солнце, сообщая ему ускорение, направленное к планете; однако величина этого ускорения мала, потому что масса Солнца во много раз больше массы любой планеты солнечной системы.

Среди всех сил, которые могут существовать в природе, сила тяготения отличается прежде всего тем, что она проявляется повсюду. Все тела обладают *массой*, которая определяется как отношение силы, приложенной к телу, к ускорению, которое приобретает под действием этой силы тело. Сила притяжения, действующая между любыми двумя телами, зависит от масс обоих тел; она пропорциональна произведению масс рассматриваемых тел. Кроме того, сила тяготения характеризуется тем, что она подчиняется закону обратной пропорциональности квадрату расстояния (рис. 5). Другие силы могут зависеть от расстояния совсем иначе; в наше время известно немало таких сил.

Один аспект всемирного закона тяготения — удивительная двойственная роль, которую играет масса, — пос-

лужил краеугольным камнем для построения общей теории относительности. Согласно второму закону Ньютона масса является характеристикой всякого тела, которая показывает, как будет вести себя тело, когда к нему прикладывается сила, независимо от того, будет ли это сила тяжести или какая-то другая сила. Так как все тела, по Ньютону, в качестве отклика на внешнюю силу ускоряются (изменяют свою скорость), масса тела определяет, какое ускорение испытывает тело, когда к нему приложена заданная сила. Если одно и то же усилие прикладывается к велосипеду и автомобилю, каждый из них достигнет определенной скорости в разное время. Автомобиль, обладающий большей массой, достигнет определенной скорости за больший промежуток времени. Обратно, для того чтобы вызвать у велосипеда и у автомобиля одинаковое изменение скорости, следует приложить к автомобилю большее усилие (точнее, приложить к нему большую силу), чем к велосипеду.

- Но по отношению к тяготению масса играет еще и другую роль, совсем непохожую на ту, которую она играла как отношение силы к ускорению: масса является источником взаимного притяжения тел; если взять два тела и посмотреть, с какой силой они действуют на третье тело, расположенное на одном и том же расстоянии сначала от одного, а затем от другого тела, мы обнаружим, что отношение этих сил равно отношению двух первых масс. Фактически оказывается, что эта сила пропорциональна массе источника. Сходным образом, согласно третьему закону Ньютона, силы притяжения, которые испытывают два различных тела под действием одного и того же источника притяжения (на одном и том же расстоянии от него), пропорциональны отношению масс этих тел. В инженерных науках и повседневной жизни про силу, с которой тело притягивается к земле, говорят как о *весе* тела. Если кто-то из нас окажется в мировом пространстве на большом удалении от Земли и других источников притяжения, он обнаружит, что никакого веса у него нет; однако это вовсе не означает, что он лишился массы. Нет никакого сомнения в том, что со временем медицина сумеет выработать рацион для космических путешественников, который позволит им контролировать массу своего тела, несмотря на то, что они непрерывно будут находиться в состоянии невесомости.

Подведем итоги. Масса входит в связь, которая существует между силой и ускорением; с другой стороны, масса определяет величину силы притяжения. Такая двойственная роль массы приводит к тому, что ускорение различных тел в одном и том же гравитационном поле оказывается одинаковым. Действительно, возьмем два различных тела с массами m и M соответственно. Пусть оба они свободно падают на Землю. Отношение сил притяжения, испытываемых этими телами, равно отношению масс этих тел m/M . Однако ускорение, приобретаемое ими, оказывается одинаковым. Таким образом, ускорение, приобретаемое телами в поле тяготения, оказывается для всех тел в одном и том же поле тяготения одинаковым и совсем не зависит от конкретных свойств падающих тел. Это ускорение зависит только от масс тел, создающих поле тяготения, и от расположения этих тел в пространстве. Двойственная роль массы и вытекающее из нее равенство ускорения всех тел в одном и том же гравитационном поле известно под названием *принципа эквивалентности*. Это название имеет историческое происхождение, подчеркивающее то обстоятельство, что эффекты тяготения и инерции (о которых речь пойдет ниже) до известной степени эквивалентны. Сегодня нам следует быть несколько осторожнее и оставить термин принцип эквивалентности только для указания на равенство массы как меры сопротивления тела ускорению и массы как источника силы притяжения.

На поверхности Земли ускорение силы тяжести, грубо говоря, равно 10 м/сек^2 . Скорость свободно падающего тела, если отвлечься от сопротивления воздуха при падении тела, возрастает на 10 м/сек за каждую секунду. Например, если тело начинает свободно падать из состояния покоя, то к концу третьей секунды его скорость будет равна 30 м/сек . Обычно в учебниках физики ускорение свободного падения обозначается буквой g . Из-за того, что форма Земли не строго совпадает с шаром, величина g на Земле не всюду одинакова; она больше у полюсов, чем на экваторе, и меньше на вершинах больших гор, чем в долинах. Если величина g определяется с достаточной точностью, то на ней сказывается даже геологическая структура. Этим объясняется то, что в геологические методы поисков нефти и других полезных ископаемых входит также точное определение величины g .

То, что в данном месте все тела испытывают одинаковое ускорение, — характерная особенность тяготения; таким свойством никакие другие силы не обладают. Например, в электрическом поле частицы, имеющие различное отношение заряда к массе, ускоряются по-разному. Известный физический прибор — масс-спектрограф — разделяет частицы именно по этому признаку. Изобретать масс-спектрограф с использованием сил притяжения — дело совершенно бесполезное, поскольку в поле тяготения все частицы, независимо от их прочих свойств, ускоряются совершенно одинаково.

Хотя Ньютону не оставалось ничего лучшего, чем просто описать этот факт, он понимал всеобщность и единство ускорения тяготения. На долю немецкого физика — теоретика Альберта Эйнштейна (1870—1955) выпала честь выяснить принцип, на основе которого можно было объяснить это свойство тяготения, принцип эквивалентности. Эйнштейну также принадлежат основы современного понимания природы пространства и времени.

В начале нашего века венгерский физик Роланд Этвэш (1848—1919) экспериментально проверил справедливость принципа эквивалентности с точностью до 10^{-8} и подтвердил его справедливость *). Совсем недавно Р. Дикке из Принстонского университета повторил опыты Этвэша, увеличив точность эксперимента до 10^{-11} . Опыты Дикке подтвердили вместе с тем основные законы Ньютона с этой же точностью.

2. Относительность движения

До сих пор мы рассматривали скорость и ускорение частиц и молчаливо предполагали, что эти характеристики движения тел не требуют уточнения; считалось, что каждый интуитивно понимает, что они означают. Однако представление о движении или об отсутствии движения, т. е. покое, приобретает четкий смысл лишь тогда, когда установлено соглашение, что движение рассматривается относительно Земли. Пока мы имеем дело с явлениями природы, происходящими на Земле, такая точка зрения вполне

*) Речь идет о том, что отношение инертной m_i и гравитационной m_g масс тела m_i/m_g получается равным единице с точностью до 10^{-11} . (Прим. перев.)