

от взглядов Птолемея к учению Коперника — Галилея — Кеплера — Ньютона и дальше — к естественному и неизбежному расширению идей Коперника — Ньютона на все звездные скопления, на весь мир в целом.

### § 11. Инерциальная система. Принцип относительности

В формулировке закона инерции ничего не говорится о том, по отношению к какой системе координат тело, на которое не действуют силы, будет по инерции сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Астрономические наблюдения и вычисления показывают, что закон инерции оправдывается в координатной системе, связанной с Солнцем. Приблизительно закон инерции оправдывается также и для движений, отнесенных к Земле.

Материальную систему, в которой с полной точностью оправдывается закон инерции, называют *инерциальной* (или, иначе, *галилеевой*) системой. Поясним понятие инерциальной системы примером.

Пусть нас интересует движение мяча, подброшенного к потолку одним из пассажиров железнодорожного вагона. Чтобы следить за движением мяча, мы можем избрать в качестве системы координатных плоскостей стенки вагона. Наряду с этой изберем еще другую систему координат, связанную с Землей. Если вагон стоит неподвижно, то движение подброшенного в вагоне мяча будет, понятно, одинаковым по отношению к обеим избранным нами координатным системам. Когда вагон движется равномерно и прямолинейно, наблюдатель, находящийся внутри вагона, может считать, что все предметы в его вагоне по инерции пребывают в покое, а подброшенный мяч ему будет казаться поднявшимся и опустившимся по вертикали. Наблюдатель же, стоящий у полотна железной дороги, скажет, что предметы внутри вагона движутся по инерции с общей скоростью (в частности и подброшенный мяч). Поскольку в неподвижном вагоне был справедлив (с некоторой степенью приближения) закон инерции, постольку и в движущемся равномерно и прямолинейно вагоне будет также справедлив закон инерции (с той же степенью приближения).

Иначе обстоит дело, если вагон движется ускоренно, или замедленно, или хотя бы и равномерно, но по криволинейному пути. Тогда движение подброшенного внутри вагона мяча приобретает совершенно иной характер: при ускоренном движении вагона подброшенный вертикально мяч упадет сзади бросившего его пассажира; при движении вагона по криволинейному пути он упадет сбоку и т. д. При резком затормаживании вагона неподвижно лежащие на столике предметы соскальзывают и падают на пол вперед по направлению движения вагона. Стоящие пассажиры с трудом удерживаются на ногах, а пассажиры, сидящие спиной к движению, чувствуют, что, помимо своей воли, они вдруг оказывают давление на спинки скамеек. Закон инерции — в ньютоновом понимании его

содержания — перестает (в применении к интересующей нас координатной системе) быть справедливым. Действительно, ведь в вагоне неподвижные относительно стенок и пола предметы при резком затормаживании вагона вдруг приобретают по отношению к вагону ускорение вперед, несмотря на то, что к ним не были извне приложены никакие силы, которые могли бы сообщить им это ускорение; какое-либо равномерно двигавшееся внутри вагона тело при затормаживании вагона вдруг испытывает изменение скорости своего движения относительно связанной с вагоном координатной системы; если вагон проходит по закруглению пути, то мяч, брошенный пассажиром параллельно стене вагона, будет приближаться к стене вагона или удаляться от нее.

Понятно, что всякий пассажир, осведомленный о том, как движется вагон, сумеет легко разобраться во всех этих явлениях, которые кажущимся образом опровергают закон инерции применительно к связанной с вагоном системе.

Из сказанного напрашивается следующий действительно справедливый вывод: *если какая-либо система движется прямолинейно и равномерно относительно некоторой инерциальной системы, то подвижная система также является инерциальной*. Если же подвижная система движется относительно второй инерциальной системы непрямолинейно или хотя бы и прямолинейно, но неравномерно, то она не будет инерциальной системой.

Приведенные утверждения являются следствием совмещения закона инерции с законом сложения ускорений. Действительно, согласно закону сложения ускорений (§ 7) две системы ориентировки, движущиеся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, *равноценны в отношении ускорения*, т. е. в этом случае (и только в этом случае) ускорение относительного движения равно ускорению абсолютного движения. Следовательно, если одна из упомянутых систем является инерциальной системой и некоторое тело, свободное от воздействия сил, движется по отношению к этой системе равномерно и прямолинейно, иначе говоря, движется с ускорением, равным нулю, то и по отношению к другой из упомянутых систем движение тела будет происходить также с ускорением, равным нулю, т. е. равномерно и прямолинейно. А это и означает, что вторая из рассмотренных систем тоже является инерциальной системой.

Как уже упоминалось, с Солнцем можно связать координатную систему, являющуюся инерциальной. Координатные оси этой системы надо мыслить себе пересекающимися в некоторой точке Солнца (*в центре массы солнечной системы*). Поскольку Земля в своем обращении вокруг Солнца движется с определенным центростремительным ускорением, то, строго говоря, любая координатная система, связанная с Землей, не является инерциальной. Но если учесть, что в течение 30 минут Земля в своем движении вокруг Солнца описывает дугу, лишь немного большую  $1'$  (это указывает, насколько

мала кривизна земной орбиты), то становится понятной крайняя малость влияния криволинейности движения Земли на инерциальные свойства координатной системы, связанной с Землей.

Гораздо большее, но практически все же несущественное влияние оказывает суточное вращение Земли. Если бы этого вращения не существовало, то камень, уроненный с башни, падал бы точно по вертикальной линии. Вследствие суточного вращения Земли каждая точка земной поверхности имеет некоторую горизонтальную скорость перемещения с запада на восток; для вершины башни эта скорость больше, чем для ее основания; поэтому уроненный с высокой башни камень опережает почву в движении на восток и падает не в ту точку, которая является основанием вертикали, проходящей через начальное положение камня, но несколько восточнее этой точки (рис. 13). Это отклонение от вертикали при высоте падения в 20 м составляет всего несколько миллиметров (для средних широт). Отсюда видно, что координатную систему, связанную с поверхностью Земли, можно с достаточной для практических целей точностью рассматривать как инерциальную.

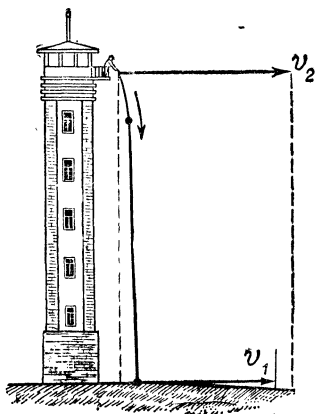


Рис. 13. Камень, сброшенный с высокой башни вследствие суточного вращения Земли имеет горизонтальную скорость  $v_2 - v_1$  относительно земной поверхности.

Отклонения от закона инерции, вызываемые суточным вращением Земли, легче всего заметить, следя за плоскостью качания маятника (маятник Фуко). Чтобы нагляднее представить себе сущность явления, укрепим на оси центробежной машины металлический диск с дугой и к той точке дуги, которая приходится в точности на оси вращения, привесим маятник (рис. 14) посредством шарнирчика С, который способен с малым трением вращаться в отверстии, сделанном в дуге. Маятник, раз приведенный в качание, сохраняет свою первоначальную плоскость колебаний даже при сравнительно быстром вращении дуги. Это понятно, так как на маятник не действуют никакие силы, способные изменить (повернуть) плоскость качаний маятника (это есть вертикальная плоскость, проходящая через направление первоначального отклонения маятника; сила веса маятника неизменно лежит в этой плоскости, а не направлена к ней под углом; если не учитывать малых, по условию, сил трения в точке подвеса, то никаких других сил, действующих на маятник, не имеется).

Изменим теперь масштаб опыта: центробежную машину заменим земным шаром, испытывающим суточное вращение, дугу — потолком

и стенами какой-либо комнаты. Через несколько минут мы заметим, что плоскость качания маятника как бы поворачивается «по солнцу», т. е. с востока на юг. Вообразим, что указанный опыт производится на одном из полюсов Земли. Тогда плоскость качания маятника, поворачивающаяся с точки зрения земного наблюдателя, в действительности была бы неподвижна по отношению к инерциальной астрономической системе координат. Когда опыт с маятником Фуко производят в какой-либо другой точке Земли, то, поскольку

плоскость качания маятника постоянно проходит через вертикаль, эта плоскость будет поворачиваться не только по отношению к земному наблюдателю, но в определенных пределах и по отношению к инерциальной астрономической системе координат.

На описанные опыты можно смотреть как на экспериментальное доказательство вращения Земли. Точные наблюдения над отклонением от вертикали падающих тел были произведены Бенценбергом в 1802 и 1804 гг. и позднее неоднократно повторялись различными исследователями. Опыт с маятником впервые был произведен Вивiani во Флоренции в 1661 г., затем Бартолини в 1833 г. и Фуко в 1850—1851 гг. (об опытах своих предшественников Фуко не знал). Опыт Фуко был произведен с маятником длиной 67 м; медный шар этого маятника весил 28 кг.

Соображения, высказанные выше в связи с утверждением, что материальная система, которая движется равномерно и прямолинейно относительно инерциальной системы, также является инерциальной системой, приводят к следующему выводу:

*Никакие механические опыты и наблюдения, производимые внутри инерциальной системы, не дают возможности решить вопрос, имеет ли вся эта система в целом прямолинейное равномерное движение или же она находится в покое.* Это заключение резюмирует соображения, высказанные в основе своей еще Галилеем, и поэтому называется *принципом относительности Галилея* (приведенная формулировка была дана Эйнштейном). Из этого принципа непосредственно вытекает положение, что в мире не существует абсолютно неподвижного тела; всякий «покой» является относительным.

Галилей указал принцип относительности, разбирая вопрос о том, каким образом общее быстрое движение Земли не расстраивает частных движений, происходящих на ее поверхности. Галилей поясняет этот принцип следующим примером: «Заклучите себя с каким-нибудь приятелем в зале под палубой какого-нибудь большого корабля...

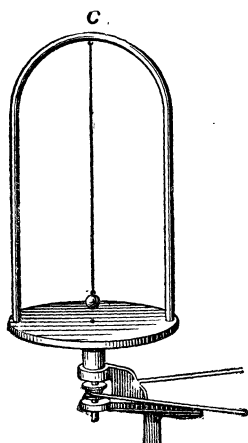


Рис 14 При вращении центробежной машины плоскость качаний маятника остается неизменной.

и заставьте привести в движение корабль с какой угодно быстротой. И вот (если только движение будет равномерное) вы не заметите ни малейшей перемены во всех явлениях и ни по одному из них не в состоянии будете судить — движется ли корабль или стоит на месте: вы, прыгая, будете проходить по полу те же самые пространства, как и при покое корабля, т. е. вы не сделаете — оттого, что корабль движется весьма быстро — больших прыжков к корме, чем к носу корабля, хотя в то время, когда вы находитесь в воздухе, пол, находящийся под вами, бежит в сторону, противоположную вашему прыжку, и, бросая какую-нибудь вещь товарищу, вам не нужно будет с большей силой кидать ее, если он будет около носа корабля, вы же около кормы, чем если бы вы стояли наоборот; капельки из подвешенной к потолку кружки с водой будут падать вертикально на пол и ни одна не упадет по направлению к корме, хотя, покуда капля находится в воздухе, корабль уходит вперед...».

Принцип относительности Галилея устанавливает, что посредством механических наблюдений и опытов, производимых внутри системы, нельзя обнаружить существование прямолинейного равномерного движения всей системы. Но принцип этот ничего не говорит о том, нельзя ли это движение обнаружить посредством каких-либо иных, немеханических наблюдений и опытов, например посредством оптических опытов.

А. Эйнштейн в 1905 г. расширил принцип относительности Галилея утверждением, что не только механические опыты и наблюдения, но вообще никакие физические, в частности оптические и электрические, опыты не могут обнаружить прямолинейного и равномерного движения системы, в которой производятся эти опыты. Если  $K$  есть инерциальная система, то каждая движущаяся по отношению к  $K$  равномерно и без вращения система  $K'$  будет также инерциальной; законы природы выражаются одинаково во всех инерциальных системах. Это — принцип относительности Эйнштейна.

Руководствуясь этим принципом и связанным с ним утверждением, что скорость света в вакууме во всех направлениях для всех инерциальных систем одинакова, Эйнштейн разработал механику движений со скоростями, соизмеримыми со скоростью света, — релятивистскую механику, получившую название теории относительности (т. III). Заметим, что в релятивистской механике галилеев закон сложения скоростей заменяется другим, более сложным законом, который, однако, для движений, происходящих со скоростями, малыми в сравнении со скоростью света, практически не отличается от закона Галилея. В релятивистской механике учитывается и получается в качестве следствия подтвержденная на опыте зависимость массы от скорости, но эта зависимость обнаруживается также только при скоростях, соизмеримых со скоростью света.

Основываясь на принципе относительности, часто делают неверное заключение, что механическое движение существует только по

отношению к наблюдателю, т. е. что всякое механическое движение является будто бы «не имеющим физического смысла», а значит, как бы не существующим, когда не определена система ориентировки, по отношению к которой исследуется движение. Это неверно потому, что движение материи существует объективно, независимо от способов его наблюдения. Реальные процессы движения становятся относительными, когда мы их исследуем по отношению к той или иной системе отсчета. Мы получаем при этом *относительные отображения реального, объективного движения*.

С кинематической точки зрения, отрывающей движение от материальной основы, все инерциальные системы отсчета равноценны. Но абсолютно инерциальной системы отсчета вообще не существует. Такая система могла бы существовать там, где нет сил тяготения, т. е. вне реального мира. Все действительно возможные, т. е. *приблизительно инерциальные*, системы отсчета фактически неравноценны, так как они в разной мере, по-разному неинерциальны. Поэтому кинематическое утверждение о полной равноценности инерциальных систем в физико-философском отношении является бессодержательным.

Исследуя относительные отображения какого-либо движения в разных системах ориентировки, мы получаем приблизительное представление об объективной картине движения, и нужно сказать, что чем менее инерциальна система, чем больше массы, с которыми она реально связана, тем обычно мы ближе подходим к истинной картине движения.

## § 12. Второй ньютонов закон механики

Во втором законе Ньютона говорится об изменении количества движения и о силе. В механике и в физике *количеством движения* называют произведение массы  $m$  на скорость тела  $v$ . Когда в обыденной жизни говорят о «количестве движения», то чаще всего вкладывают в эти слова смысл, аналогичный величине  $mv$ . Действительно, если по какой-либо безлюдной улице с большой скоростью бежит один человек, то никто не скажет, что движение по этой улице велико; если на улице находится неподвижная толпа ожидающих чего-либо людей, то опять-таки никто не скажет про эту улицу, что движение по ней велико; уличное движение все мы измеряем (иногда сами этого не замечая) произведением числа движущихся по улице людей на среднюю скорость их движения.

Количество движения представляет собой вектор, имеющий направление скорости, но по численному значению превосходящий скорость во столько раз, во сколько раз масса тела  $m$  больше единицы массы.

Строго говоря, вышеприведенное определение количества движения справедливо только для материальной точки; в общем случае