ГЛАВА 3

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

3.1. Формулировка законов движения Ньютона

Эта глава в основном посвящена законам движения Ньютона, которые уже изучались в курсе средней школы. Сформулируем их сначала для тел с постоянной массой.

Первый закон Ньютона. Тело остается в состоянии покоя или движения с постоянной скоростью (без ускорения), если оно предоставлено само себе, т. е. на него не действуют никакие внешние силы. Это означает:

$$\mathbf{a} = 0, \quad \text{когда} \quad \mathbf{F} = 0.$$

Второй закон Ньютона. Результирующая сила, действующая на тело, равна произведению массы этого тела на его ускорение:

$$\mathbf{F} = M\mathbf{a}.$$

Третий закон Ньютона. При взаимодействии двух тел сила $\mathbf{F}_{12}$, действующая на второе тело (2) со стороны первого (1), равна по величине и противоположна по направлению силе $\mathbf{F}_{21}$, действующей на первое тело (1) со стороны второго (2):

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}.$$

Имеются определенные пределы применимости третьего закона. Мы знаем (о чем еще будем говорить в гл. 10), что все сигналы и силы передаются с конечной скоростью. Однако третий закон содержит утверждение, что сила $\mathbf{F}_{12}$ равна по величине и противоположна силе $\mathbf{F}_{21}$, когда обе они измеряются *в один и тот же момент.* Это требование противоречит факту, что данное тело воспринимает действие силы, оказываемое другим телом, не мгновенно, а через конечный промежуток времени. Поэтому третий закон Ньютона не всегда является достаточно хорошим приближением для рассмотрения столкновений атомов. Для столкновений же автомобилей он будет очень хорошим приближением, потому что продолжительность такого столкновения велика по сравнению с промежутком времени, нужным для того, чтобы световой сигнал прошел вдоль длины помятого автомобиля. Этот промежуток времени имеет следующий порядок величины:

$$\frac{L}{c} \approx \frac{300\ см}{3 \cdot 10^{10}\ см/сек} \approx 10^{-8}\ сек,$$

где L — длина помятого автомобиля (за 10^{-8} *сек* автомобиль, движущийся со скоростью 100 *км/час*, т. е. около $3 \cdot 10^3$ *см/сек*, проходит около $3 \cdot 10^{-5}$ *см*).

Первые два закона движения выполняются только тогда, когда наблюдение ведется в системах отсчета, движущихся без ускорения. Это видно из нашего повседневного опыта. Например, если система отсчета неподвижно связана с вращающейся каруселью, то в такой системе отсчета ускорение тела не равно нулю, когда на это тело не действуют силы. Вы сможете неподвижно стоять на карусели, только если будете отталкиваться от чего-либо, сообщая вашему телу силу $M\omega^2 r$ по направлению к оси, где M — ваша масса, ω — угловая скорость, а r — расстояние от вас до оси вращения. Другой пример — система отсчета, неподвижно связанная с самолетом, который быстро набирает скорость при взлете. Благодаря ускорению вас прижимает назад к сиденью, а сила, действующая со стороны спинки сиденья, удерживает вас в состоянии покоя относительно этой системы.

Если бы вы находились в состоянии равномерного движения или покоя относительно системы отсчета, не имеющей ускорения, то для этого не требовалось бы никакой силы. Но если вы хотите находиться в состоянии покоя относительно системы отсчета, движущейся с ускорением, то вы должны прилагать силу или испытывать действие силы со стороны другого тела — вам нужна веревка, чтобы удержаться, или сиденье, чтобы прижиматься к нему. Силы, автоматически возникающие в системах отсчета, движущихся с ускорением, играют важную роль в физике. Особенно важно понять характер сил, которые действуют в системе отсчета, совершающей вращательное движение. Поэтому целесообразно кратко изложить здесь еще раз эти вопросы, которые уже изучались в курсе средней школы.

Пример. *Ультрацентрифуга.* Результаты того, что тело находится в неинерциальной системе отсчета, могут иметь огромное практическое значение. Рассмотрим молекулу, находящуюся во взвешенном состоянии в жидкости, которая содержится в пробирке ультрацентрифуги. Предположим, что молекула находится на расстоянии 10 *см* от оси вращения и что центрифуга вращается со скоростью 1000 *об/сек* (60 000 *об/мин*). Тогда угловая скорость равна

$$\omega = 2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cong 6 \cdot 10^3\ рад/сек,$$

а линейная скорость

$$v = \omega r \cong 6 \cdot 10^3 \cdot 10 = 6 \cdot 10^4\ см/сек.$$

Величина ускорения при круговом движении равна $\omega^2 r$ (мы это вывели в гл. 2):

$$a = \omega^2 r \cong (6 \cdot 10^3)^2 \cdot 10 \cong 4 \cdot 10^8 \ см/сек^2.$$

Но ускорение силы тяжести на поверхности Земли составляет всего 980 $см/сек^2$, так что отношение ускорения вращательного движения к ускорению силы тяжести равно

$$\frac{a}{g} \cong \frac{4 \cdot 10^8}{10^3} \cong 4 \cdot 10^5.$$

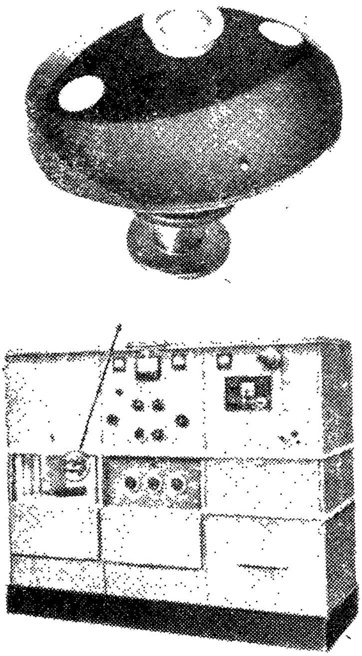

Рис. 3.1. Ротор ультрацентрифуги. Эта ультрацентрифуга работает со скоростью вращения 60 000 *об/мин*, и в ней возникает центробежное ускорение, превышающее ускорение силы тяжести почти в 300 000 раз.

Таким образом, ускорение в ультрацентрифуге в 400 000 раз больше ускорения силы тяжести (эти данные относятся к ультрацентрифугам типа показанной на рис. 3.1). На взвешенные в жидкости молекулы растворенного вещества, *плотность* (*отношение массы к объему*) которых отличается от плотности окружающей жидкости, будет действовать в пробирке ультрацентрифуги очень большая центробежная сила, стремящаяся отделить их от жидкости. Если же их плотность равна плотности жидкой среды, то отделение не будет происходить.

Согласно первому закону Ньютона взвешенная молекула стремится остаться неподвижной (или двигаться по прямой с постоянной скоростью), если рассматривать ее движение относительно лаборатории (лаборатория представляет собой достаточно хорошее приближение к системе отсчета, не имеющей ускорения). Молекула в ультрацентрифуге как бы противится бешеному вращению с большой угловой скоростью. Для наблюдателя, покоящегося относительно ротора ультрацентрифуги, молекула растворенного вещества будет вести себя так, как если бы на нее действовала сила величиной $M\omega^2 r$, стремящаяся оттолкнуть ее от оси вращения в сторону наружной стенки пробирки, вставленной в ротор центрифуги. Как велика эта сила? Предположим, что молекулярный вес растворенного вещества равен 100 000, т. е. что масса M молекулы этого вещества приблизительно в 10^5 раз больше массы протона:

$$M \cong (10^5)\cdot(1{,}7\cdot 10^{-24}) \cong 2\cdot 10^{-19}\ г$$

(так как масса протона приближенно равна одной атомной единице массы — см. таблицу физических постоянных в приложении к этому тому).

Сила, вызывающая ускорение вращательного движения, равна

$$Ma = M\omega^2 r \cong (2\cdot 10^{-19})\cdot(4\cdot 10^8) \cong 8\cdot 10^{-11}\ дин,$$

где подставлена величина ускорения, рассчитанная выше. Эта сила, стремящаяся оттолкнуть молекулу в сторону наружной стенки пробирки, называется *центробежной* силой. Движению в сторону наружной стенки противодействует сила сопротивления со стороны жидкости, окружающей молекулу. Поскольку на различные виды молекул действуют разные по величине центробежные силы и силы сопротивления, то такие молекулы будут двигаться в пробирке ультрацентрифуги с различными скоростями в направлении от оси вращения. Поэтому ультрацентрифугирование является эффективным методом разделения молекул различных видов. Метод ультрацентрифугирования наиболее часто применяется для разделения больших молекул, которые как раз представляют огромный интерес для биологии, и, таким образом, вопрос о том, покоится ли молекула относительно системы отсчета, имеющей ускорение или не имеющей его, оказывается важным для биологических и медицинских исследований.

3.2. Инерциальные системы отсчета

Основным законом классической механики является второй закон Ньютона:

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt}\mathbf{p}, \tag{1}$$

где $\mathbf{F}$ — сила, а $\mathbf{p} \equiv M\mathbf{v}$ — импульс. Этот закон выполняется, если наблюдатель неподвижен относительно системы отсчета, не имеющей ускорения. Такая система отсчета называется *инерциальной системой отсчета*. Для тела с постоянной массой M мы получаем

$$\mathbf{F} = M\frac{d\mathbf{v}}{dt} \equiv M\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \equiv M\mathbf{a}, \tag{2}$$

где $\mathbf{a}$ — ускорение. Иногда масса не является постоянной; она не постоянна, например, у искусственного спутника, из двигателя которого выбрасываются продукты горения, а также у любого тела, движущегося со скоростью в области релятивистских скоростей (т. е. скоростей, близких к скорости света). Уравнение (1) или (2) можно рассматривать как строгое определение *истинной* *) *силы* $\mathbf{F}$, которая действует на данное тело.

---

*) См. примечание на стр. 102.