приблизительно в 10^5 раз больше массы протона:

$$M \cong (10^5)\cdot(1{,}7\cdot10^{-24}) \cong 2\cdot10^{-19}\ г$$

(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

$$Ma = M\omega^2 r \cong (2\cdot10^{-19})\cdot(4\cdot10^8) \cong 8\cdot10^{-11}\ дин,$$

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.

Является ли помещение лаборатории, неподвижное относительно земной поверхности, достаточно хорошей инерциальной системой отсчета? Если нет, то какую поправку надо внести в уравнение $\mathbf{F} = M\mathbf{a}$, чтобы учесть ускорение самой лаборатории?

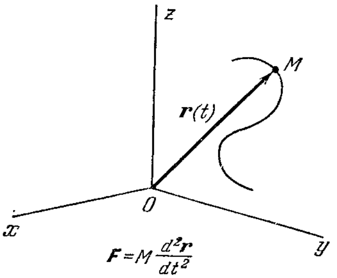

Рис. 3.2. Второй закон Ньютона гласит:
Сила=масса×ускорение.
Но относительно какой системы отсчета надо определять ускорение?

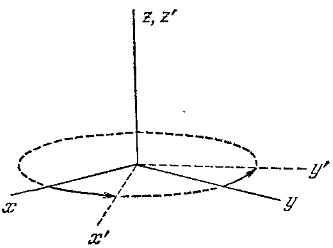

Рис. 3.3. Например, система отсчета S' (x', y', z') вращается относительно системы S (x, y, z). Материальная точка M имеет различные ускорения в каждой из этих систем отсчета.

Для многих целей Земля является довольно хорошим приближением к инерциальной системе отсчета. Причиной ускорения лаборатории, неподвижной относительно Земли, является суточное вращение Земли вокруг ее оси. Это вращение создает небольшое ускорение лабораторной системы отсчета, которым можно пренебречь не

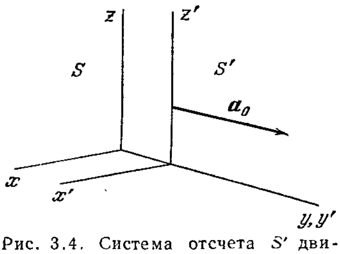

Рис. 3.4. Система отсчета S' движется поступательно с ускорением $\mathbf{a}_0$ относительно системы S. Ускорение материальной точки M различно в каждой из этих систем отсчета.

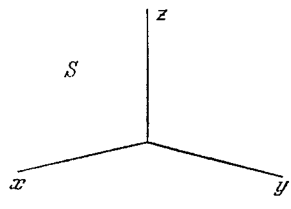

Рис. 3.5. Существуют ли инерциальные системы отсчета, относительно которых мы должны определять ускорение $\mathbf{a}$, входящее в уравнение $\mathbf{F} = M\mathbf{a}$? (S — инерциальная система отсчета.)

во всех случаях. Точка, покоящаяся на поверхности Земли на ее экваторе, должна иметь центростремительное ускорение относительно центра Земли, равное

$$a = \frac{v^2}{R_З} = \omega^2 R_З. \qquad (3)$$

Здесь $\omega = 2\pi f$ — угловая скорость Земли, а $R_З$ — радиус Земли. Земля за одни сутки совершает оборот на 360°, т. е. на 2π радиан, а в сутках около $8{,}6 \cdot 10^4$ *сек*. Поэтому угловая скорость Земли равна

$$\omega = \frac{2\pi}{8{,}6 \cdot 10^4} \approx 0{,}73 \cdot 10^{-4}\ сек^{-1}. \qquad (4)$$

Так как $R_З \cong 6{,}4 \cdot 10^8$ *см*, то центростремительное ускорение равно

$$a \approx (0{,}73 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (6{,}4 \cdot 10^8) \approx 3{,}4 \text{ см/сек}^2. \qquad (5)$$

Это представляет собой бóльшую часть той величины, на которую наблюдаемое ускорение силы тяжести на Северном полюсе превышает наблюдаемое ускорение силы тяжести на экваторе. Остальная часть изменения веса на земной поверхности, зависящего от широты, обусловлена эллипсоидальной формой Земли. Полное изменение величины g при переходе от Северного (или Южного) полюса к экватору составляет около 5,2 *см/сек*². До того, как появились искусственные спутники, лучшим способом определения степени сплюснутости Земли у полюсов было исследование изменений ускорения силы тяжести на поверхности Земли.

Значения g на различных широтах

Географический пункт	Широта	g, *см/сек*²
Северный полюс	90° сев.	983,245
Глетчер Караяк, Гренландия	70° »	982,53
Рейкьявик, Исландия	64° »	982,27
Ленинград	60° »	981,93
Париж	49° »	980,94
Нью-Йорк	41° »	980,27
Сан-Франциско	38° »	979,96
Гонолулу, Гавайские острова	21° »	978,95
Монровия, Либерия	6° »	978,16
Джакарта, Индонезия	6° южн.	978,18
Мельбурн, Австралия	38° »	979,99

Ниже в этой главе мы дадим более сложную формулировку второго закона Ньютона, применимую к системе отсчета, координатные оси которой неподвижно связаны с поверхностью Земли. Однако чтобы этот закон был верен в простой форме, описываемой уравнениями (1) или (2), *мы должны подставлять в эти уравнения ускорение относительно такой системы отсчета, которая сама не имеет ускорения.*

Такая система отсчета называется инерциальной или галилеевой. В системе отсчета, движущейся с ускорением, т. е. неинерциальной, сила $\mathbf{F}$ не равна $M\mathbf{a}$, где $\mathbf{a}$ — ускорение, наблюдаемое относительно неинерциальной системы.

Установилось соглашение говорить о системе, связанной с неподвижными звездами, как о стандартной системе отсчета, не имеющей ускорения. Утверждение, что неподвижные звезды не имеют ускорения, нельзя доказать, исходя из наших фактических экспериментальных значений. Невероятно, чтобы наши приборы смогли определить ускорение удаленной звезды или группы звезд, меньшее чем 10^{-4} *см/сек*², даже если бы мы проводили тщательные наблюдения в течение ста лет. Для практических целей удобно ориентировать направления осей координат относительно неподвижных звезд. Однако, как мы увидим ниже, можно найти опытным путем и другую систему отсчета, которая также окажется не имеющей ускорения с точностью, удовлетворительной для практических целей. Даже если бы Земля была непрерывно окружена совершенно непрозрачным туманом, мы были бы в состоянии без особых трудностей найти какую-либо инерциальную систему отсчета.

Величина ускорения Земли в ее движении по орбите вокруг Солнца на порядок меньше, чем величина ускорения из-за вращения Земли. Так как 1 год $\cong 3\cdot 10^7$ *сек*, то угловая частота обращения Земли вокруг Солнца равна

$$\omega \approx \frac{2\pi}{3\cdot 10^7} \approx 2\cdot 10^{-7}\ сек^{-1}. \tag{6}$$

Подставив $R=1{,}5\cdot 10^{13}$ *см*, получаем центростремительное ускорение движения Земли по орбите вокруг Солнца:

$$a=\omega^2 R \approx (4\cdot 10^{-14})\cdot(1{,}5\cdot 10^{13}) \approx 0{,}6\ см/сек^2. \tag{7}$$

Величина ускорения Солнца относительно центра нашей Галактики *) не была определена экспериментально. Однако скорость движения Солнца относительно центра Галактики определяется по исследованию доплеровского сдвига спектральных линий величиной порядка $3\cdot 10^7$ *см/сек*. Если Солнце обращается по круговой орбите вокруг отстоящего от него на расстоянии около $3\cdot 10^{22}$ *см* центра Галактики, то ускорение движения Солнца вокруг этого центра Галактики равно

$$a=\omega^2 R=\frac{v^2}{R} \approx \frac{9\cdot 10^{14}}{3\cdot 10^{22}} \approx 3\cdot 10^{-8}\ см/сек^2. \tag{8}$$

Это совсем ничтожная величина. Из результатов наблюдений нам неизвестно, движется ли Солнце со значительно бо́льшим ускорением, чем эта величина, а также неизвестно, имеет ли сам центр Галактики сколько-нибудь значительное ускорение.

Мы знаем из опыта, что ряд утверждений, являющихся важнейшими аксиомами классической механики, выполняется исключительно хорошо. Это следующие четыре утверждения:

1. Пространство является евклидовым.

2. Пространство изотропно, т. е. его физические свойства одинаковы во всех направлениях. В частности, величина массы M в уравнении $\mathbf{F}=M\mathbf{a}$ не зависит от направления движения.

---

*) Звезды не разбросаны в беспорядке в космическом пространстве. Они группируются в большие системы, разделенные друг от друга огромными расстояниями. Каждая система содержит около 10^{10} звезд. Эти системы называются галактиками; та из них, в которую входит наше Солнце, известна как наша Галактика. Млечный Путь является частью нашей Галактики. Сами галактики не распределяются совершенно произвольно, так как имеется определенная тенденция к образованию скоплений галактик. Наша Галактика принадлежит к скоплению из 19 составных частей, которое называется локальной группой и образует связанную гравитационным притяжением замкнутую физическую систему.

3. Ньютоновы законы движения выполняются в инерциальной системе, определенной для наблюдателя, неподвижно находящегося на Земле, если учитывать только ускорение Земли при ее вращении вокруг оси и при ее движении по орбите вокруг Солнца.

4. Всегда и для всех тел выполняется закон всемирного тяготения Ньютона. Этот закон гласит, что между любыми двумя материальными точками с массами M_1 и M_2, находящимися на расстоянии R, действует сила притяжения $F=GM_1M_2/R^2$, где G — постоянная величина.

Было бы затруднительно очень точно проверить эти утверждения поодиночке. Наибольшая точность достигается при проверке всего сочетания изложенных четырех утверждений по наблюдениям за движением планет Солнечной системы. Некоторые примеры такой точной проверки системы аксиом классической механики разбираются в заметках «Из истории физики» в конце гл. 5.

Силы в инерциальных системах отсчета. Галилей сформулировал закон, что тело, на которое не действуют силы, имеет постоянную скорость *). Мы видели, что это утверждение верно только в инерциальной системе отсчета,— по существу, оно содержит определение инерциальной системы.

Данная формулировка может показаться сомнительной: откуда мы будем знать, что нет сил, действующих на тело? Силы могут действовать на тела не только при непосредственном соприкосновении тел, но они могут действовать и на изолированное тело. Гравитационные или электрические силы могут играть важную роль даже и тогда, когда очень близко от данного тела нет других тел. Мы не можем быть уверены в отсутствии действия сил только потому, что никакие другие тела не соприкасаются или не находятся очень близко к данному телу. Но если мы a priori не можем решить, что какое-то данное тело не подвержено действию силы, то у нас возникает трудность в формулировке системы законов движения, связывающих силы с ускорениями. Нам необходима система отсчета, не имеющая ускорения, относительно которой мы можем измерять ускорения тел. Способ определения, данный Галилеем для такой системы, основан на предположении, что у нас есть какая-то независимая возможность узнать, что на эту систему не действуют никакие силы. Однако этой возможности нет, потому что наш критерий — нет силы, значит, нет ускорения — требует какой-то системы отсчета, относительно которой следует измерять ускорения... и опять повторяется тот же круг рассуждений.

Однако положение не безнадежно, так как мы знаем, что величина любой силы, действующей между двумя телами, должна довольно быстро уменьшаться по мере увеличения расстояния между этими телами. Если бы силы не уменьшались достаточно быстро с увеличением расстояний между взаимодействующими телами, то мы никогда не смогли бы изолировать взаимодействие двух тел от

*) Этот закон часто называют первым законом Ньютона.

взаимодействий их со всеми другими телами во Вселенной. Величина всех известных сил, действующих между частицами, убывает по крайней мере не менее быстро, чем по закону обратных квадратов.

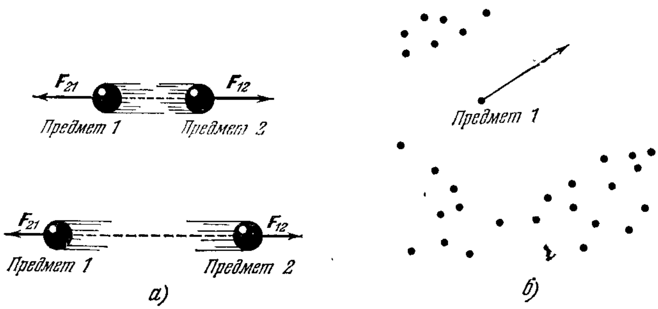

Рис. 3.6. *Экспериментально установлено,* что сила, с которой один предмет действует на другой, всегда быстро уменьшается по мере того, как эти предметы разделяет все большее расстояние (*а*). Следовательно, если предмет *1* находится достаточно далеко от всех других предметов, то на него не будут действовать никакие силы (*б*).

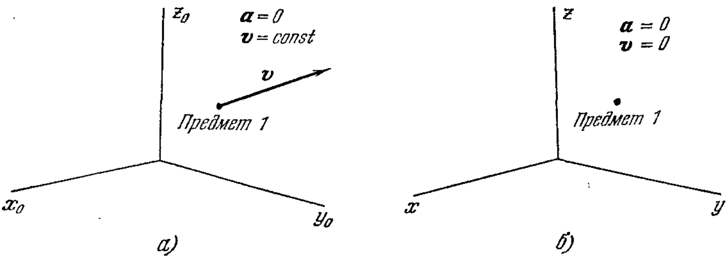

Рис. 3.7. *а*) *Инерциальная система отсчета*—это такая система отсчета, относительно которой ускорение тела, подобного предмету *1* (на который не действуют силы), равно нулю. *б*) В частности, имеются такие инерциальные системы отсчета, относительно которых предмет *1* остается неподвижным.

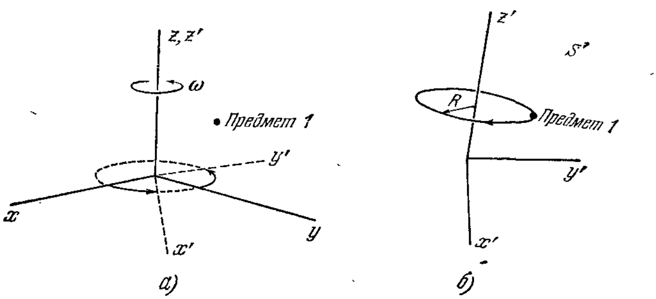

Рис. 3.8. Если S (x, y, z)—инерциальная система отсчета, то система отсчета S', вращающаяся вокруг оси z системы S, *не может* быть инерциальной (*а*), так как относительно системы отсчета S' предмет *1* движется с ускорением (потому что он кажется движущимся по кругу), хотя он весьма удален от всех других предметов (*б*).

Мы, как и всякое другое тело на Земле, испытываем притяжение главным образом к центру Земли и только в ничтожной степени — к какой-либо удаленной части Вселенной. Если бы мы не опирались о пол, то получили бы ускорение 980 *см/сек*^{2} по направлению к центру Земли. Менее сильно нас притягивает Солнце; согласно уравнению (7) мы движемся с направленным к нему ускорением 0,6 *см/сек*^{2}. Если разумно оценивать возможную величину ускорения, то следует ожидать, что на тело, значительно удаленное от всех других тел, вероятно, не будут действовать силы, и поэтому оно не будет иметь ускорения. Типичная звезда удалена от ближайших соседних небесных тел на расстояние не менее 10^{18} *см* *), и поэтому следует ожидать, что она имеет лишь маленькое ускорение. Таким образом, мы пришли к утверждению, что с хорошей степенью приближения можно определить связанную с неподвижными звездами систему координат как удобную систему, не имеющую ускорения.

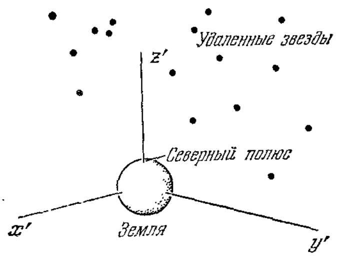

Рис. 3.9. Например, относительно системы отсчета S' (x', y', z'), неподвижно связанной с Землей, удаленные звезды, подобно предмету 1, движутся по круговым траекториям. Система отсчета, неподвижно связанная с Землей, не является инерциальной, потому что Земля вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца.

Интересное обсуждение проблемы нахождения системы отсчета, не имеющей ускорения, содержится в статье П. В. Бриджмена [Am J. Phys. **29**, 32 (1961)]. Вот некоторые отрывки из этой статьи:

«Система из трех жестких ортогональных осей образует галилееву систему отсчета, если три массивные частицы, на которые не действуют силы, имеют произвольные проекции скоростей на эти три оси и продолжают двигаться с постоянными составляющими скоростей вдоль этих осей. Наши земные лаборатории не образуют

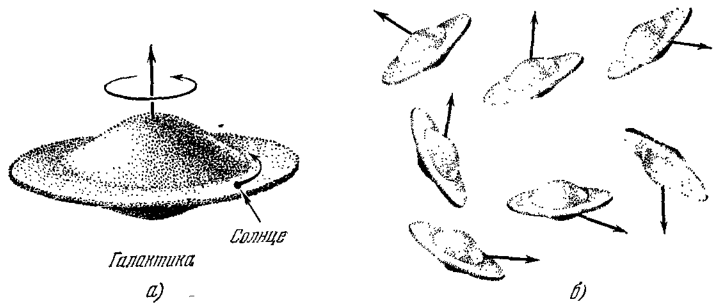

Рис. 3.10. Является ли инерциальной система отсчета, неподвижно связанная с Солнцем? Солнце также вращается вокруг оси Галактики, но, по-видимому, ускорение этого движения достаточно мало, так что им можно пренебречь (*а*), и, по-видимому, мы можем также пренебречь ускорением нашей Галактики относительно других галактик (*б*).

такую систему отсчета, но и в наших лабораториях мы можем построить подобную систему отсчета, измерив, насколько движение трех произвольно избранных масс отклоняется от этого требования...

*) Исключение — двойные звезды.

и введя эти отклонения в качестве отрицательных поправок в наши условия для галилеевой системы отсчета. При этом вовсе не требуется производить измерения положений относительно звезд. Можно вполне надежно описать движение тел, используя такие непосредственно наблюдаемые явления, как вращение плоскости колебаний маятника Фуко относительно Земли или отклонение падающего тела от направления отвеса. Даже если оператор центра управления ракетой, выводя спутник на орбиту, находит удобным ориентироваться по наблюдениям за Полярной звездой, очевидно, что его приборы должны давать показания относительно земных ориентиров... В галилеевой системе отсчета вращающееся тело сохраняет положение плоскости вращения неизменным относительно этой системы отсчета после того, как это тело было приведено во вращение и затем изолировано от действия сил; следовательно, оно сохраняет неизменным направление оси вращения».

3.3. Абсолютное и относительное ускорение

Итак, можно найти инерциальную систему отсчета, т. е. такую систему отсчета, в которой с очень большой точностью сила **F** равна M**a**. Это много раз подтверждено на опыте. Мы установили, что в инерциальной системе отсчета все силы, действием которых объясняется движение галактик, звезд, атомов, электронов и т. д., обладают тем общим свойством, что величина силы, действующей на тело, обязательно уменьшается по мере того, как это тело удаляется все дальше и дальше от своих соседей. Мы увидим, что если избрать неинерциальную систему отсчета, то появятся *кажущиеся* силы, которые не обладают этим свойством, т. е. они не обусловлены присутствием других тел вблизи данного тела.

Существование инерциальных систем отсчета приводит к сложному вопросу, остающемуся без ответа: какое влияние оказывает вся прочая материя во Вселенной на опыт, производимый в лаборатории на Земле? Предположим, например, что в какой-то момент всей материи во Вселенной, за исключением той ее части, которая находится в непосредственной близости к нашей Земле, сообщено большое ускорение **a**. Частица, находящаяся на Земле под действием сил, сумма которых равна нулю, не имела ускорения относительно неподвижных звезд. Когда эти звезды станут двигаться с ускорением, то будет ли эта частица, вначале не находившаяся под действием сил, продолжать двигаться без ускорения относительно далеких звезд, ранее не имевших ускорения, или же изменится характер ее движения относительно своего непосредственного окружения? Существует ли различие между ускоренным движением частицы с ускорением +**a** и ускоренным движением звезд с ускорением —**a**? Если играет роль только относительное ускорение, то ответом на последний вопрос будет *нет*; если же абсолютное ускорение, то ответ будет *да*. Это принципиальный вопрос, остающийся без ответа, но его нелегко подвергнуть экспериментальному исследованию.