ГЛАВА 14

ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

14.1. Инертная и гравитационная массы

Массу тела можно определять путем измерения испытываемого телом ускорения под действием известной силы:

$$M_{\text{ин}} = \frac{F}{a}. \tag{1}$$

Определяемая таким путем масса, обозначаемая $M_{\text{ин}}$, известна под названием *инертной массы*. Массу можно также определить, измеряя силу ее тяготения к другому телу, например к Земле:

$$\begin{gathered} GM_{\text{гр}}M_{\text{З}} = F, \\ M_{\text{гр}} = \frac{Fr^2}{GM_{\text{З}}}. \end{gathered} \tag{2}$$

Определяемая подобным способом масса, обозначаемая $M_{\text{гр}}$, носит название *гравитационной массы*. В формулах (2) $M_{\text{З}}$ — масса Земли.

Замечательно, что инертные массы всех тел в пределах точности измерений пропорциональны их гравитационным массам. (Путем соответствующего подбора величины G можно добиться того, чтобы инертные массы были равны гравитационным.) Простейший опыт по проверке сказанного заключается в выяснении, действительно ли все тела падают с одинаковым ускорением. Для одного тела, падающего вблизи поверхности Земли, имеем

$$M_{\text{ин}}(1)\,a(1) = \frac{GM_{\text{З}}M_{\text{гр}}(1)}{R_{\text{З}}^2}; \tag{3}$$

для другого можем написать

$$M_{\text{ин}}(2)\,a(2) = \frac{GM_{\text{З}}M_{\text{гр}}(2)}{R_{\text{З}}^2}. \tag{4}$$

Деля уравнение (3) на (4), получаем

$$\left.\begin{aligned} \frac{M_{\text{ин}}(1)\, a(1)}{M_{\text{ин}}(2)\, a(2)} &= \frac{M_{\text{гр}}(1)}{M_{\text{гр}}(2)}, \\ \frac{M_{\text{ин}}(1)}{M_{\text{гр}}(1)} &= \frac{M_{\text{ин}}(2)}{M_{\text{гр}}(2)} \frac{a(2)}{a(1)}. \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Но, как показывают наблюдения, в вакууме все тела падают одинаково, так что, в пределах точности измерений, $a(2)=a(1)$, откуда получаем для отношения инертных масс к гравитационным

$$\frac{M_{\text{ин}}(1)}{M_{\text{гр}}(1)} = \frac{M_{\text{ин}}(2)}{M_{\text{гр}}(2)}. \qquad (6)$$

Коль скоро это отношение постоянно, мы всегда можем привести его к единице, подобрав подходящее значение для G. Экспериментальная задача заключается лишь в том, чтобы выяснить, не существует ли изменений отношения $M_{\text{ин}}/M_{\text{гр}}$ для разных частиц, веществ и тел.

Классические опыты принадлежат Ньютону, который воспользовался методом маятника, описанным в задаче 1. Среди других получивших широкую известность опытов следует в первую очередь отметить измерения, начатые Р. Этвёшем в 1890 г. и продолжавшиеся около 25 лет. Чтобы понять его остроумный метод, надо рассмотреть поведение маятника, подвешенного у поверхности Земли на широте 45° (рис. 14.1). На маятник действует сила тяжести $M_{\text{гр}}g$, направленная к центру Земли. На него также действует центробежная сила $M_{\text{ин}}\omega^2 R_З/\sqrt{2}$, где множитель $1/\sqrt{2}$ присутствует в качестве cos 45°; отметим, что $R_З/\sqrt{2}$ выражает длину перпендикуляра, опущенного от маятника на ось вращения Земли. Центробежная сила направлена перпендикулярно к оси вращения. Равнодействующая обеих сил образует угол

$$\theta \cong \frac{M_{\text{ин}}\omega^2 R_З/2}{M_{\text{гр}}g - \frac{1}{2} M_{\text{ин}}\omega^2 R_З} \cong \frac{M_{\text{ин}}\omega^2 R_З}{2M_{\text{гр}}g} \qquad (7)$$

с направлением местной вертикали. Здесь использовано то обстоятельство, что отношение $M_{\text{ин}}\omega^2 R_З/M_{\text{гр}}g$ — малая величина. Из данных, приведенных в начале гл. 3, следует, что это отношение приблизительно равно 0,003.

Предположим теперь, что крутильный подвес состоит, как показано на рис. 14.2, из двух шариков различного материала, но одинаковой гравитационной массы, так что $M_{\text{гр}}(1)=M_{\text{гр}}(2)$. Если $M_{\text{ин}}(1)$ не равно $M_{\text{ин}}(2)$, то под действием неуравновешенных центробежных сил крутильная нить будет закручиваться. Измерение повторяется после поворота прибора на 180°; это позволяет определить нулевое положение весов. Данный метод — характерный пример нулевого метода измерений: эффект наблюдается только при $M_{\text{ин}}(1)\neq M_{\text{ин}}(2)$. Этвёш произвел сравнение восьми разных

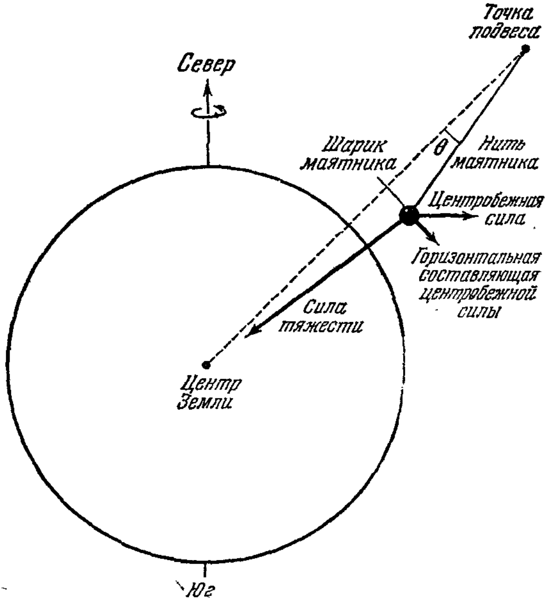

Рис. 14.1. Схема отклонения маятника от вертикали на малый угол θ вследствие центробежной силы, обусловленной вращением Земли.

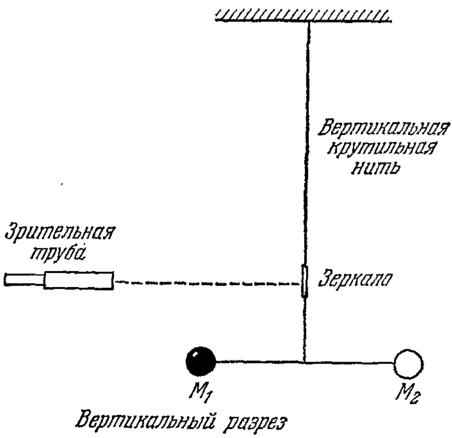

Рис. 14.2. Вертикальный разрез установки, аналогичной прибору Этвёша, использованному для определения отношения инертной и гравитационной масс. M_1 и M_2 — разнородные предметы с одинаковой гравитационной массой.

материалов с платиной, принятой за эталон. Он установил, что

$$\frac{M_{\text{ин}}(1)}{M_{\text{гр}}(1)} = \frac{M_{\text{ин}}(\text{Pt})}{M_{\text{гр}}(\text{Pt})} \tag{8}$$

с относительной ошибкой менее 10^{-8}. Недавние опыты Дике (Dicke) подтвердили равенство обоих видов масс с точностью до 10^{-10}.

Современное состояние вопроса в отношении экспериментальных данных может быть резюмировано следующим образом:

Если обозначить отношение $M_{\text{гр}}/M_{\text{ин}}$ через Q, то:

а) Значение Q для системы электрон плюс протон равно значению того же отношения для нейтрона с точностью до 10^{-7}. (Это

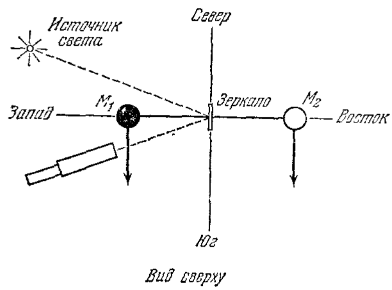

Рис. 14.3. Если инертные массы M_1 и M_2 равны, то горизонтальные составляющие центробежной силы (обозначенные стрелками) тоже равны, и крутильная нить не закручивается.

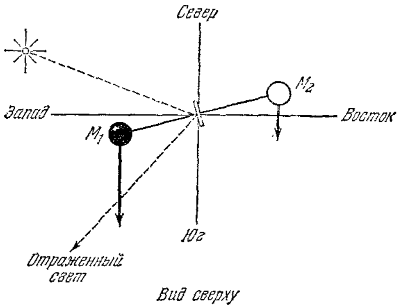

Рис. 14.4. Если инертная масса M_1 превышает M_2, то нить закручивается, и зеркало поворачивается.

следует из сопоставления данных для легких и тяжелых элементов периодической таблицы; у тяжелых элементов относительное содержание нейтронов больше, чем у легких.)

б) Значение Q для той части массы ядра, которая эквивалентна энергии связи ядра, равно единице с точностью до 10^{-5}.

в) Значение Q для той части массы атома, которая эквивалентна энергии связи с орбитальными электронами, равно единице с точностью до 1/200.

14.2. Гравитационная масса фотона

В гл. 12 было показано, что фотон с энергией $h\nu$, где ν — частота, должен обладать инертной массой, равной $h\nu/c^2$. Есть ли у фотона также и гравитационная масса? Имеются веские экспериментальные указания на то, что она есть и равна инертной массе. (При этом, разумеется, масса покоя равна нулю.)

Рассмотрим фотон, у которого на высоте L над поверхностью Земли частота равна ν и энергия $h\nu$. После падения с высоты L энергия фотона увеличивается на MgL и становится равной

$$h\nu' \cong h\nu + \frac{h\nu}{c^2} gL \tag{9}$$