ленной нет удаленных тел, создающих в месте нахождения тела $A$ гравитационное поле $\boldsymbol{g}$ конечной напряженности. Убывание гравитационного поля из-за расстояния до этих тел может быть компенсировано возрастанием их масс. Однако если изучаются явления в ограниченной области пространства $S$, то при не слишком больших размерах ее поле $\boldsymbol{g}$ может считаться однородным. Тогда если тело $A$ свободно падает в гравитационном поле $\boldsymbol{g}$, то это поле будет *полностью компенсировано поступательными силами инерции*. Если тело $A$ и не вращается (относительно удаленных масс), то оно не будет подтверждено действию и остальных сил инерции. Система отсчета, связанная с таким невращающимся свободно падающим телом $A$, и будет инерциальной системой отсчета. Во всякой системе отсчета $A'$, вращающейся или движущейся ускоренно относительно системы $A$, появятся силы инерции. Но это движение не есть движение в «абсолютном пространстве», а *движение относительно удаленных тел Вселенной*. С этой точки зрения, принадлежащей Э. Маху (1838—1916), силы инерции возникают из-за вращений и ускоренных движений координатных систем относительно удаленных тел Вселенной. Это утверждение известно под названием *принципа Маха*. Точка зрения Маха очень привлекательна. Ее разделял в первоначальных работах Эйнштейн. Однако в дальнейшем он от нее отошел. В современных космологических теориях принцип Маха не используется. Здесь преждевременно обсуждать эти сложные и далеко еще не решенные вопросы.

## § 72. Гравитационное смещение спектральных линий

1. В качестве примера применения принципа эквивалентности гравитационных сил и сил инерции рассмотрим явление *гравитационного смещения спектральных линий*, теоретически предсказанное Эйнштейном. Будем исходить из представления, что свет есть волны, которые в вакууме распространяются со скоростью $c \approx 300\,000$ км/с. Свет определенной спектральной линии характеризуется определенной частотой или числом колебаний в секунду, которое мы будем обозначать $\nu$. Такой свет называется *монохроматическим*, т. е. *одноцветным*. Пусть монохроматический свет приходит к нам от какого-либо удаленного источника, причем в пространстве, через которое он распространяется, гравитационного поля нет. Обозначим $\nu_0$ частоту световой волны, которую воспринимает наблюдатель, покоящийся в какой-либо инерциальной системе отсчета. Если наблюдатель начнет двигаться навстречу световым лучам с постоянным ускорением $\boldsymbol{a}$ (рис. 196, *а*), то частота воспринимаемого света увеличится (эффект Доплера).

Простой расчет показывает, что с точностью до членов порядка $(v/c)^2$ относительное изменение воспринимаемой частоты определяется формулой

$$\frac{\nu-\nu_0}{\nu_0}=\frac{v}{c},$$

где $v$ — скорость наблюдателя. За положительные направления $\boldsymbol{v}$ и $\boldsymbol{a}$ мы принимаем направления против распространения света. Если наблюдатель двигался в течение времени $t$, то $v = at$. За это время свет проходит расстояние $l = ct = cv/a$, а потому изменение частоты за то же время определится формулой

$$\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = \frac{al}{c^2}.$$

2. Допустим теперь, что наблюдатель в инерциальной системе отсчета неподвижен, но в ней имеется однородное гравитационное поле с напряженностью $\boldsymbol{g}$ (рис. 196, *б*). Если величину $\boldsymbol{g}$ подобрать равной $-\boldsymbol{a}$ ($\boldsymbol{g} = -\boldsymbol{a}$), то по принципу эквивалентности гравитационное поле вызовет в точности такое же изменение частоты света, что и в предыдущем случае. *При распространении света по направлению гравитационного поля* $\boldsymbol{g}$ *частота световой волны будет возрастать, а при распространении в противоположном направлении — убывать.* В этом и состоит явление гравитационного смещения спектральных линий, предсказанное Эйнштейном. Величина смещения определяется формулой

$$\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = \frac{gl}{c^2}, \qquad (72.1)$$

где $l$ — расстояние, проходимое светом в поле тяготения.

При выводе формулы (72.1) предполагалось, что поле постоянно и однородно. Результат нетрудно обобщить на случай произвольного постоянного неоднородного гравитационного поля. С этой целью разобьем путь светового луча на бесконечно малые участки $d\boldsymbol{r}$. На протяжении каждого из таких участков гравитационное поле может считаться однородным. Если $d\nu$ — изменение частоты светового луча при прохождении участка $d\boldsymbol{r}$, то по формуле (72.1)

$$\frac{d\nu}{\nu} = \frac{\boldsymbol{g}\, d\boldsymbol{r}}{c^2},$$

так как составляющая вектора $\boldsymbol{g}$, перпендикулярная к направлению распространения света, на изменение частоты не оказывает влияния. Если свет проходит конечный путь из начального положения 1 в конечное положение 2, то изменение частоты на этом пути найдется интегрированием полученного выражения, т. е. по формуле

$$\ln \frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{1}{c^2} \int \boldsymbol{g}\, d\boldsymbol{r}. \qquad (72.2)$$

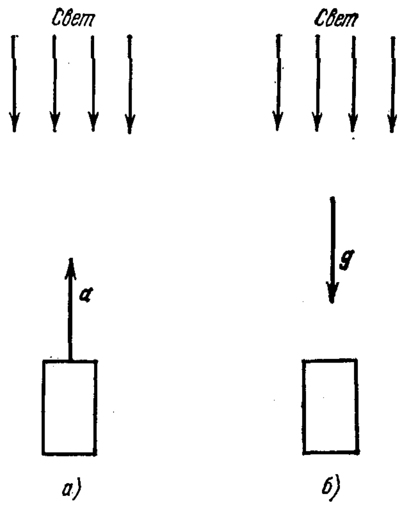


Рис. 196.

Интегрирование не обязательно проводить вдоль пути, по которому распространяется свет. Можно взять произвольный путь, соединяющий начальную точку 1 с конечной точкой 2. Гравитационные силы постоянных полей являются силами консервативными, так что интеграл от формы пути не зависит. Интеграл имеет смысл работы, которую совершили бы силы гравитационного поля над единичной массой при ее перемещении из положения 1 в положение 2. Эта работа называется *разностью гравитационных потенциалов* $\varphi_1 - \varphi_2$ между точками 1 и 2. В этих обозначениях

$$\ln \frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2}. \qquad (72.3)$$

При малой разности потенциалов, когда

$$|\varphi_1 - \varphi_2| \ll c^2,$$

формула переходит в

$$\frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_1} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2}. \tag{72.4}$$

*При распространении света от высшего гравитационного потенциала к низшему его частота увеличивается, при распространении в противоположном направлении — уменьшается.*

В настоящее время (с использованием так называемого *эффекта Мёссбауэра*) гравитационное смещение спектральных линий удалось с уверенностью наблюдать при распространении света даже в поле тяжести Земли. Проходимый путь (сверху вниз) составлял всего 20 м. В этом случае ожидаемое смещение $\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} \sim \sim 2 \cdot 10^{-14}$.

Измерения дали такой же результат. Это является подтверждением принципа эквивалентности гравитационных сил и сил инерции.