Далее, извлекая положительный корень, имеем

$$E=(p^2c^2+M^2c^4)^{1/2}=Mc^2\left[1+\left(\frac{p^2}{M^2c^2}\right)\right]^{1/2}, \tag{51}$$

что составляет релятивистское обобщение равенства

$$E=Mc^2+\frac{1}{2}Mv^2.$$

Выше, в связи с выражением (26a), было упомянуто, что условие сохранения энергии заключается в том, чтобы

$$\sum_{i=1}^{n} E_i=\text{const} \tag{52}$$

до и после столкновения, где E_i — релятивистская энергия i-й частицы. Сохранение релятивистской энергии соблюдается даже при столкновениях, которые мы назвали неупругими, так как потеря кинетической энергии (на внутреннее «возбуждение» частиц) возмещается в виде энергии, связанной с приращением масс. Условие сохранения импульса принимает вид

$$\sum_{i=1}^{n} \mathbf{p}_i=\text{const} \tag{53}$$

до и после столкновения.

12.6. Частицы с массой покоя, равной нулю

Если $M=0$, то согласно уравнению (50)

$$E=pc, \tag{54}$$

и при этом уравнение (21a) дает

$$v=c, \tag{55}$$

откуда видно, что частица с массой покоя, равной нулю, всегда движется со скоростью света. Она имеет одну и ту же скорость и одну и ту же массу покоя, равную нулю, с точки зрения любого наблюдателя. Световой импульс в вакууме обладает именно тем свойством, что для него $v\equiv c$, хотя мы и не всегда думаем о нем как о частице. Во многих явлениях, в которых квантовая природа света проявляется ярче волновой, мы обнаруживаем, что свет ведет себя так, как будто он состоит из частиц, называемых фотонами или световыми квантами. Фотон есть частица с массой покоя, равной нулю, но он не является единственной частицей, обладающей этой особенностью (см. гл. 15). Все частицы с нулевой массой покоя обнаруживают чрезвычайно простую закономерность, выражаемую равенством $E=pc$. С другой стороны, энергия фотона связана с частотой ν равенством $E=h\nu$, где h — постоянная Планка. Таким образом, $E=h\nu=pc$, откуда $p=h\nu/c$.

С фотоном, обладающим энергией E, всегда связан импульс E/c. Когда фотон поглощается атомом, импульс E/c передается атому. Если же фотон отражается (поглощается и вновь излучается в обратном направлении), то переданный импульс составляет $2E/c$.

Подсчитаем давление излучения внутри большого кубического сосуда с ребром L, содержащего большое число фотонов с суммарной плотностью лучистой энергии U. Мы предполагаем, что фотоны

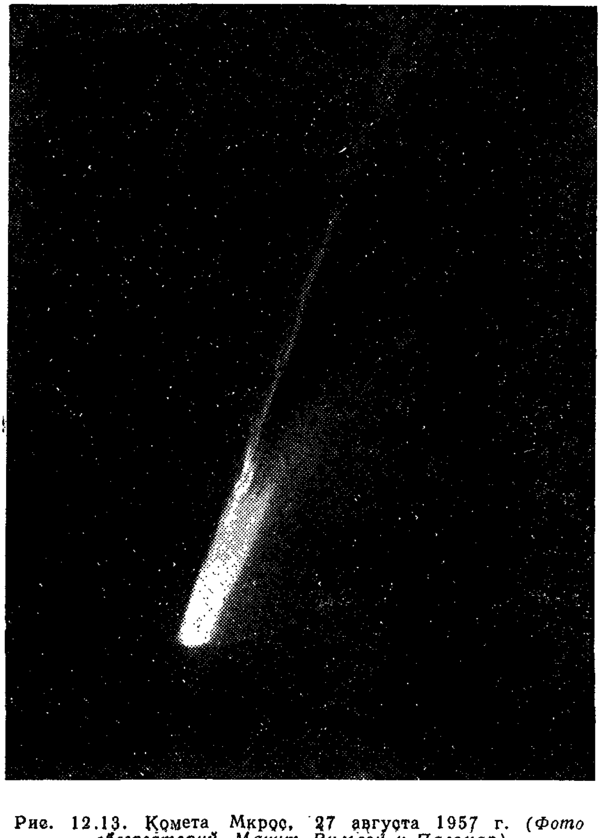

Рис. 12.13. Комета Мкрос, 27 августа 1957 г. (*Фото обсерваторий Маунт Вильсон и Паломар*)

движутся хаотически, так что в среднем треть фотонов движется параллельно каждому ребру куба. В единицу времени фотон ударяется о заданную грань куба в среднем $c/6L$ раз. Изменение импульса за один удар составляет $2E/c$. Усредненная по времени сила, действующая на одну грань, будет

$$F = (\text{число ударов в единицу времени})\ (\text{изменение импульса за один удар}) = N\left(\frac{c}{6L}\right)\left(\frac{2E}{c}\right) = N\frac{E}{3L}, \quad (56)$$

где N — число всех фотонов в кубе. Если n — число фотонов в единице объема, то $N = nL^3$, что после подстановки в (56) дает

$$F = nL^2 \frac{E}{3}, \text{ или } P = \frac{1}{3} U, \tag{57}$$

где давление излучения $P = F/L^2$, а $U = nE$.

Солнечный свет приносит на поверхность Земли около 10^6 *эрг/см²·сек* лучистой энергии. Если вся эта энергия поглощается, то развиваемое давление составляет $(10^6/c)$ *дин/см²*, или около $3 \cdot 10^{-5}$ *дин/см²*. Если вся эта энергия отражается, давление будет вдвое больше. Это — ничтожно малое давление, и его влияние на движение Земли пренебрежимо мало. Однако у чрезвычайно разреженных кометных хвостов площадь поверхности, отнесенная к единице массы, достаточно велика и суммарный эффект этого давления может быть заметным. Впрочем, бомбардировка кометного хвоста вещественными частицами, испускаемыми Солнцем, может оказаться более эффективной. В недрах весьма горячей звезды малой плотности давление излучения может играть огромную роль. Для всякой частицы с достаточно большой энергией ($E \gg Mc^2$) соотношения, включающие импульс и энергию, будут приблизительно те же, что и для фотона. Мы всегда можем подобрать воображаемого движущегося наблюдателя, для которого частица будет находиться в покое. Но для фотона, хотя его энергия и импульс различны с точки зрения разных наблюдателей, скорость всегда будет равна $v = c = E/p$, и его невозможно «остановить» путем подбора системы отсчета.

Рассмотрим уединенный атом водорода, находящийся в покое, но в возбужденном электронном состоянии. Он излучает световой квант с энергией E и импульсом $(E/c)\hat{\mathbf{x}}$. При этом он испытывает отдачу с импульсом $-(E/c)\hat{\mathbf{x}}$. В результате отдачи центр масс системы (состоящей из атома и светового кванта) не сможет остаться в покое, если мы не припишем световому кванту некоторую массу M_γ. Чтобы ее найти, нужно положить

$$\dot{R}_{\text{ц.м.}} \equiv \frac{M_{\text{H}} \dot{\mathbf{r}}_{\text{H}} + M_\gamma \dot{\mathbf{r}}_\gamma}{M_{\text{H}} + M_\gamma} = 0. \tag{58}$$

Но $M_{\text{H}}\dot{\mathbf{r}}_{\text{H}} = -(E/c)\,\hat{\mathbf{x}}$ и $\dot{\mathbf{r}}_\gamma = c\hat{\mathbf{x}}$, откуда

$$-\frac{E}{c} + M_\gamma c = 0, \quad M_\gamma = \frac{E}{c^2}. \tag{59}$$

Это та самая масса, которая получилась бы по формуле Эйнштейна. Масса светового кванта не является массой покоя, а представляет собой массу, эквивалентную энергии E. Масса покоя кванта равна нулю.