реакций:

$$\mathrm{H}^1 + \mathrm{p} = \mathrm{H}^2 + \mathrm{e}^+ + \text{нейтрино},$$
$$\mathrm{H}^2 + \mathrm{p} = \mathrm{He}^3 + \gamma,$$
$$\mathrm{He}^3 + \mathrm{He}^3 = \mathrm{He}^4 + 2\mathrm{H}^1.$$

Итоговый результат заключается в сгорании водорода с образованием He^4. Следует отметить, что в первой стадии выделяется нейтрино (нейтральная частица, лишенная массы покоя), так что Солнце является мощным источником нейтрино. С веществом эти частицы взаимодействуют очень слабо; таким образом, почти все нейтрино, образуемые в звездных ядерных реакциях, вылетают в космическое пространство. Они способны переносить до 10% выделяемой Солнцем энергии.

Отличное изложение вопроса о происхождении элементов можно найти в статье: Willam A. Fowler, Proc. Nat. Acad. Sci. 52. 524—548 (1964).

12.5. Работа и энергия

Обратимся к другой, более привычной цепи рассуждений, приводящей к выражению (15) релятивистской энергии. В гл. 5 было показано, что быстрота, с которой сила **F** совершает работу по перемещению материальной точки, может быть выражена следующим образом:

$$\frac{dW}{dt} = \mathbf{F}\cdot\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}\cdot\mathbf{v}. \tag{39}$$

В релятивистской области при этом имеем

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt}\frac{M\mathbf{v}}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}, \tag{39a}$$

где M — постоянная масса покоя. Отсюда, будучи обобщено на релятивистскую область, уравнение (39) принимает вид

$$\frac{dW}{dt} = M\mathbf{v}\cdot\frac{d}{dt}\frac{\mathbf{v}}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}. \tag{40}$$

Нетрудно показать, что $\mathbf{v}\cdot\dot{\mathbf{v}} = v\dot{v}$. При этом

$$\mathbf{v}\cdot\frac{d}{dt}\frac{\mathbf{v}}{(1-v^2/c^2)^{1/2}} = \mathbf{v}\cdot\left\{\frac{\dot{\mathbf{v}}}{(1-v^2/c^2)^{1/2}} + \frac{\mathbf{v}\,(\dot{v}v/c^2)}{(1-v^2/c^2)^{3/2}}\right\} =$$
$$= \frac{1-(v^2/c^2)+(v^2/c^2)}{(1-v^2/c^2)^{3/2}}\,v\dot{v} = \frac{d}{dt}\frac{c^2}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}. \tag{41}$$

В приведенных выше выражениях используется обозначение $\dot{v} = dv/dt$. Таким образом, быстрота совершения работы по перемещению материальной точки получает следующее выражение:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}\frac{Mc^2}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}. \tag{42}$$

После интегрирования имеем

$$W=\frac{Mc^2}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}+W_0, \tag{43}$$

где W_0— постоянная. Естественно считать, что работа, затраченная на перемещение свободной материальной точки, равна приращению ее кинетической энергии. Тогда W здесь равно кинетической энергии K при условии, что $W=0$ при $v=0$. Отсюда W_0 определяется как $-Mc^2$, и релятивистское выражение кинетической энергии принимает вид

$$K=\frac{Mc^2}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}-Mc^2=Mc^2(\gamma-1). \tag{44}$$

Используя уравнение (44), перепишем выражение для кинетической энергии (15) в виде

$$E=Mc^2+K. \tag{45}$$

Таким образом, релятивистская энергия свободной материальной точки является суммой энергии, связанной с массой покоя, и релятивистской кинетической энергии. При $v/c\ll 1$, согласно уравнению (27), можно написать

$$\frac{1}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}\cong 1+\frac{v^2}{2c^2}, \tag{46}$$

откуда в случае $v/c\ll 1$ релятивистская кинетическая энергия (44) преобразуется к виду

$$K\cong Mc^2\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)-Mc^2=\frac{1}{2}Mv^2 \tag{47}$$

в согласии со справедливым для этого случая нерелятивистским выражением.

Предположим, что, как и в выражении (15), мы даем *определение* полной релятивистской энергии E материальной точки в виде равенства

$$E=\frac{Mc^2}{(1-v^2/c^2)^{1/2}}. \tag{48}$$

Мы уже видели, что подобно импульсу $\mathbf{p}$ эта величина сохраняется при релятивистских столкновениях. В нерелятивистском случае ($v/c\ll 1$) выражение для E сводится к формуле

$$E\cong Mc^2+\frac{1}{2}Mv^2+\ldots \tag{49}$$

Из уравнения (16) нам известно, что

$$E^2=p^2c^2+M^2c^4. \tag{50}$$

Это равенство связывает E с p вне зависимости от скорости. Часть энергии связана с массой покоя, а другая часть — с импульсом.

Далее, извлекая положительный корень, имеем

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

что составляет релятивистское обобщение равенства

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

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

$$\sum_{i=1}^{n} E_i=\mathrm{const} \qquad (52)$$

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

$$\sum_{i=1}^{n} \mathbf{p}_i=\mathrm{const} \qquad (53)$$

до и после столкновения.

12.6. Частицы с массой покоя, равной нулю

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

$$E=pc, \qquad (54)$$

и при этом уравнение (21а) дает

$$v=c, \qquad (55)$$

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 $p=h\nu/c$.