

Тогда для системы невзаимодействующих частиц

$$Mc^2 = \sum \mathcal{E}_i = \sum T_i + c^2 \sum m_{0,i},$$

$$M = \frac{\sum T_i}{c^2} + \sum m_{0,i}.$$

Масса покоя в теории относительности не является аддитивной величиной. При образовании системы масса покоя не входит аддитивно в массу системы.

Рассмотрим устойчивую систему взаимодействующих частиц в системе отсчета, где $\vec{P} = 0$.

$$Mc^2 = E = \sum \mathcal{E}_i + U = c^2 \sum m_{0,i} + \sum T_i + U \quad (U < 0).$$

Величину $\Delta M = \sum m_{0,i} - M$ называют дефектом масс. С помощью этого соотношения определяют энергию связи атомного ядра. Пусть N_p — число протонов в ядре, N_n — число нейтронов; тогда $N_p m_p + N_n m_n$ — сумма масс частиц, составляющих ядро. Масса ядра M может быть определена независимо. Дефект массы ядра $\Delta M = N_p m_p + N_n m_n - M$. Энергия связи может быть определена по формуле

$$U = \Delta M c^2,$$

если $U \gg \sum T_i$.

§ 72. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХМЕРНЫХ ВЕКТОРОВ ЭНЕРГИИ-ИМПУЛЬСА И СИЛЫ

Мы определили четырехмерные векторы энергии-импульса и силы:

$$\vec{P} \begin{pmatrix} P_1, P_2, P_3, P_4 \\ p_x, p_y, p_z, i \frac{\mathcal{E}}{c} \end{pmatrix} \equiv \vec{P} \begin{pmatrix} \vec{p}, i \frac{\mathcal{E}}{c} \end{pmatrix}, \quad \vec{p} = m_0 \gamma \vec{v},$$

$$\vec{F} \begin{pmatrix} \gamma F_x, \gamma F_y, \gamma F_z, i \frac{\gamma}{c} (\vec{F} \vec{v}) \end{pmatrix} \equiv \vec{F} \begin{pmatrix} \gamma \vec{F}, i \frac{\gamma}{c} (\vec{F} \vec{v}) \end{pmatrix}.$$

Компоненты четырехмерных векторов находятся в определенной связи друг с другом. Составим, например, выражение

$$\vec{P}^2 = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 = p^2 - \frac{\mathcal{E}^2}{c^2}, \quad P_0^2 = -\frac{\mathcal{E}_0^2}{c^2} = -m_0^2 c^2.$$

Из этого выражения вытекает уже известная нам связь между энергией, импульсом и массой частицы:

$$\frac{\mathcal{E}^2}{c^2} - p^2 = m_0^2 c^2.$$

Кстати, выразив энергию через импульс, мы получим релятивистскую функцию Гамильтона

$$\mathcal{E}(p) = \mathcal{H}(p) = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}.$$

Формулы преобразования компонент четырехмерных векторов ведут к интересным следствиям. Запишем формулы преобразования четырехмерного вектора энергии-импульса:

$$P'_1 = \Gamma(P_1 + i\beta P_4); P'_2 = P_2; P'_3 = P_3; P'_4 = \Gamma(P_4 - i\beta P_1).$$

Пусть в системе K частица покоится (собственная система частицы). Тогда в этой системе $\vec{P}^0(0, 0, 0, i\frac{\mathcal{E}^0}{c})$, а в системе K'

$$p'_x = \Gamma\left(i\beta \cdot i\frac{\mathcal{E}^0}{c}\right) = -\Gamma\frac{V}{c^2}\mathcal{E}^0; p'_y = p'_z = 0;$$

$$i\frac{\mathcal{E}'}{c} = \Gamma\left(i\frac{\mathcal{E}^0}{c}\right); \mathcal{E}' = \Gamma\mathcal{E}^0.$$

Естественно, что мы вернулись к уже известным формулам (71.15) и (71.10). Мы получили важный результат: в механике частицы всякая передача энергии связана с передачей импульса. Но этот же результат имеет место и в электродинамике (§ 40). Оказывается, он имеет универсальное значение, и именно поэтому утверждалось, что сигнал—это передача энергии и импульса из одной точки пространства в другую.

Полезно знать, как преобразуются силы при переходе от одной ИСО к другой. Пусть в системе K тело покоится и на него действует трехмерная сила \vec{F} . Тогда в этой системе 4-сила F^0 имеет компоненты $\vec{F}^0(F_x^0, F_y^0, F_z^0, 0)$. Компоненты силы преобразуются по стандартным формулам:

$$\mathfrak{F}'_1 = \Gamma(\mathfrak{F}_1 + i\beta\mathfrak{F}_4); \mathfrak{F}'_2 = \mathfrak{F}_2; \mathfrak{F}'_3 = \mathfrak{F}_3; \mathfrak{F}'_4 = \Gamma(\mathfrak{F}_4 - i\beta\mathfrak{F}_1),$$

откуда немедленно получим (четвертое соотношение не рассматриваем):

$$\gamma'F'_x = \Gamma F_x^0; \gamma'F'_y = F_y^0; \gamma'F'_z = F_z^0.$$

Но в рассматриваемом случае $\gamma' = \Gamma$, поэтому мы находим закон преобразования компонент трехмерной силы:

$$F'_x = F_x^0; F'_y = F_y^0 \sqrt{1-\beta^2}; F'_z = F_z^0 \sqrt{1-\beta^2}. \quad (72.1)$$

Компоненты силы в направлении движения не изменяются. При нерелятивистских скоростях силы вообще не изменяются при переходе от одной ИСО к другой.

§ 73. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ (ФОТОНЫ) КАК РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЧАСТИЦЫ

Релятивистская механика строилась для частиц, обладающих конечной (отличной от нуля) массой покоя. Это видно, в частности, из того, что четырехмерный импульс частицы $\vec{P} = m_0\vec{V}$