

Массы атомных ядер и элементарных частиц варьируются в следующих пределах. Известны ядра с массами от $2 \cdot 10^{-24}$ до $5 \cdot 10^{-22}$ г. Известны элементарные частицы с массами от 10^{-27} г (электрон) до примерно $1,7 \cdot 10^{-23}$ г (резонанс в системе $e^+ - e^-$ при энергии 9,6 ГэВ). Кроме того, существуют частицы (γ -квант и, по-видимому, нейтрино), массы которых точно равны нулю. Что такое частицы нулевой массы, будет объяснено ниже в § 2, п. 6.

В качестве единицы массы для ядер часто используется атомная единица массы (а. е. м.), определение которой мы дадим в гл. II, § 3. Массы элементарных частиц часто измеряются в энергетических единицах, о чем мы скажем в § 2, п. 2.

§ 2. Релятивистские свойства частиц

1. При больших скоростях и высоких энергиях частиц ньютоновская механика перестает быть справедливой и должна быть заменена более точной механикой теории относительности, или, что то же самое, релятивистской механикой. Специфичные для релятивистской механики свойства частиц и физических величин называются *релятивистскими свойствами*.

Важнейшей для теории относительности константой является скорость света в вакууме, обозначаемая через c :

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с.}$$

Согласно теории относительности скорость c является предельной. Ни один физический объект не может двигаться со скоростью, превышающей c .

Релятивистские эффекты малы, если скорости v всех физических объектов малы по сравнению с c , а энергии этих объектов малы по сравнению с Mc^2 , где M — масса объекта:

$$v_{\text{нерел}} \ll c, \quad E_{\text{нерел}} \ll Mc^2 \left\{ \begin{array}{l} \text{условия малости реляти-} \\ \text{вистских эффектов.} \end{array} \right. \quad (1.3)$$

Первое из этих неравенств часто используется в форме $v \ll c$.

Когда величины v/c и E/Mc^2 хотя и малы по сравнению с единицей, но все же не пренебрежимо малы (например, порядка 0,1%), то можно наблюдать релятивистские поправки при сравнении с опытом результатов нерелятивистских расчетов. С такой ситуацией мы сталкиваемся в физике атомного ядра. Если же эти величины имеют порядок единицы, то соответствующий процесс будет существенно релятивистским. Такие процессы обычны для физики элементарных частиц.

В теории относительности основным является коренное изменение свойств пространства и времени при больших скоростях. Однако подробное изложение этой теории не входит в программу нашей книги. Поэтому мы ограничимся сводкой нужных для даль-

нейшего следствий из релятивистской теории, изложив их «в потребительском плане», без выводов и доказательств.

2. Самым главным для приложений выводом из теории относительности является знаменитое соотношение Эйнштейна

$$E_{\text{рел}} = Mc^2, \quad (1.4)$$

связывающее полную энергию $E_{\text{рел}}$ покоящейся изолированной физической системы (элементарная частица, ядро, атом, булыжник, ...) с ее массой. Это соотношение применимо к любой изолированной физической системе и поэтому является универсальным. Оно отражает эквивалентность массы и энергии.

Пользуясь формулой (1.4), можно по массе определять энергию и наоборот. В нерелятивистском макроскопическом мире энергии и массы измеряются разными методами, потому что химические, тепловые, электрические и другие макроскопические формы энергии обладают ничтожными массами, не доступными никаким методам взвешивания. В физике атомного ядра масса, создаваемая энергией ядерных сил, уже достаточно велика, чтобы ее можно было обнаружить методами, специфичными для измерения масс. Поэтому энергию ядерных сил выражают как в энергетических единицах (МэВ), так и в массовых (атомная единица массы). В физике элементарных частиц массы большинства частиц измеряются через энергии на основе соотношения (1.4). Поэтому в современных таблицах массы частиц приводятся всегда в энергетических единицах (МэВ). Переход к энергетическим единицам здесь не является прихотью, а обусловлен тем, что при столкновениях частиц высоких энергий происходит рождение и взаимопревращение частиц. Необходимая же для таких процессов энергия определяется как раз соотношением (1.4). Если в таблице для массы элементарной частицы — нейтрального пиона π^0 — стоит цифра 135 МэВ, то это и есть энергия, необходимая для его рождения. А если в таблице поставить массу $2,4 \cdot 10^{-25}$ г, то ее каждый раз надо будет пересчитывать на энергию по формуле (1.4).

Соотношение (1.4) мы будем неоднократно использовать в физике ядра (гл. IV, § 2) и в физике элементарных частиц (гл. VII, § 4).

3. При увеличении скорости тело приобретает дополнительную кинетическую энергию, так что его полная энергия возрастает. Поэтому и масса тела должна расти со скоростью. Масса тела при нулевой скорости называется его массой покоя. Именно массы покоя всегда приводятся в таблицах элементарных частиц. В старину (т. е. лет 30—40 назад) массу покоя частицы обычно отличали индексом 0 (например, писали M_0). Однако понятие массы движущейся частицы оказалось не очень удобным, и сейчас в статьях, монографиях и обыденной речи специалистов по ядерной физике оно практически не встречается. Массу покоя частицы теперь обычно называют просто массой и нулевым индексом не снабжают. Поэтому

всюду, в том числе и в (1.4), под массой частицы будет подразумеваться только ее масса покоя.

4. Вторым по практической важности в теории относительности является соотношение, связывающее полную энергию, импульс \mathbf{p} и массу свободной релятивистской частицы:

$$E_{\text{рел}} = c \sqrt{\mathbf{p}^2 + M^2 c^2}. \quad (1.5)$$

Для покоящейся частицы $\mathbf{p} = 0$, и из (1.5) получается (1.4).

Релятивистская кинетическая энергия, которую мы обозначим просто через E , получается вычитанием энергии покоя из полной:

$$E = c \sqrt{\mathbf{p}^2 + M^2 c^2} - M c^2. \quad (1.6)$$

В нерелятивистском пределе $|\mathbf{p}| \ll M c$, и, разложив корень в ряд Тейлора, получаем

$$E = M c^2 \sqrt{\frac{\mathbf{p}^2}{M^2 c^2} + 1} - M c^2 \approx \frac{\mathbf{p}^2}{2M} \quad (\text{нерел.}), \quad (1.7)$$

т. е. нерелятивистское выражение для энергии. Наоборот, при $|\mathbf{p}| \gg M c$ (так называемый ультрарелятивистский случай) можно просто пренебречь массой частицы. Тогда

$$E \approx c |\mathbf{p}| \quad (\text{ультрарел.}), \quad (1.8)$$

так что энергия становится пропорциональной импульсу (а не его квадрату). По размерности импульс представляет собой энергию, деленную на скорость. В ядерной физике и особенно в физике элементарных частиц импульс все чаще измеряют в МэВ/с или в ГэВ/с. При задании импульса в таких единицах величина pc получается непосредственно в МэВ или в ГэВ. Для ориентировки укажем, что протон с импульсом 100 МэВ/с обладает кинетической энергией 20 МэВ, а с импульсом 1 ГэВ/с — 400 МэВ. В ультрарелятивистском случае (1.8) импульс в МэВ/с численно близок к энергии в МэВ.

5. Скорость \mathbf{v} релятивистской частицы определяется соотношением

$$\mathbf{v} = \frac{pc^2}{E_{\text{рел}}}. \quad (1.9)$$

Подставив в (1.9) выражение (1.5) для $E_{\text{рел}}$, получаем, что при $M \neq 0$ всегда $|\mathbf{v}| < c$, причем при $|\mathbf{p}| \rightarrow \infty$ будет $|\mathbf{v}| \rightarrow c$. Это значит, что при возрастании энергии частицы ее скорость стремится к предельному значению c , но никогда не достигает этого предела (при $M \neq 0$). Читатель может сам убедиться, пользуясь формулами этого и предыдущего пунктов, что в нерелятивистском случае $|\mathbf{v}|/c \ll \ll 1$, а в ультрарелятивистском $1 - |\mathbf{v}|/c \ll 1$.

6. В теории относительности возможно существование не имеющих нерелятивистского аналога частиц с нулевой массой покоя

$$M = 0. \quad (1.10)$$

В этом случае согласно (1.5) и (1.10)

$$E_{\text{рел}} = c |\mathbf{p}| \quad (1.11)$$

и согласно (1.9)

$$|\mathbf{v}| = c, \quad (1.12)$$

т. е. частица с нулевой массой может иметь только скорость, равную скорости света. В частности, такая частица не может покоиться. Именно такими частицами являются γ -кванты или, что то же самое, фотоны — мельчайшие порции электромагнитного излучения. Повидимому, нулевой массой обладают еще частицы, называемые нейтрино.

7. Соотношение (1.5) можно переписать в форме

$$E_{\text{рел}}^2 - c^2 |\mathbf{p}|^2 = M^2 c^4. \quad (1.13)$$

Равенству (1.13) можно дать следующее толкование. Пусть энергия и импульс частицы измеряются сначала в одной системе координат, а потом в другой, движущейся с какой-либо скоростью относительно первой. Очевидно, что оба измерения дадут разные значения энергий и импульсов. Но из (1.13) следует, что величина $E_{\text{рел}}^2 - c^2 |\mathbf{p}|^2$ будет одинаковой в обеих координатных системах, т. е., как говорят, будет инвариантом. Существованием этого инварианта мы воспользуемся в гл. VII, § 4.

Конкретный вид релятивистских преобразований к движущейся системе координат для некоторых физических величин мы приведем в гл. VII, § 4.

Для двух наборов (\mathbf{p}, E_p) и (\mathbf{q}, E_q) импульсов и энергий инвариантом будет величина

$$E_p E_q - c^2 \mathbf{p} \mathbf{q}. \quad (1.14)$$

Этим инвариантом мы воспользуемся в гл. VII, § 7.

8. В нерелятивистской физике действует галилеевский закон сложения скоростей

$$v_2 = v_1 + v \quad (\text{нерел.}), \quad (1.15)$$

где v_2 , v_1 — скорости частицы, измеренные в системах координат, одна из которых движется со скоростью v относительно другой (для простоты мы ограничиваемся случаем одномерного движения). В релятивистской физике вместо (1.15) действует эйнштейновский закон сложения скоростей

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + v_1 v / c^2} \quad (\text{рел.}). \quad (1.16)$$

В отличие от (1.15), релятивистский закон (1.16) неаддитивен. Эта неаддитивность неудобна тем, что разность $v_A - v_B$ скоростей двух частиц в релятивистском случае зависит от выбора движущейся системы координат.

Для сохранения свойства аддитивности в релятивистской кинематике вводится новая кинематическая величина — быстрота y (англ. rapidity). По определению

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{c+v}{c-v}, \quad (1.17)$$

так что быстрота однозначно определяется скоростью.

Из (1.17) легко получить, что для быстрот y_1, y_2 частицы в разных системах отсчета

$$y_{1,2} = \frac{1}{2} \ln \frac{c+v_{1,2}}{c-v_{1,2}}$$

справедлив аналогичный (1.15) аддитивный закон

$$y_2 = y_1 + y \quad (\text{рел.}), \quad (1.18)$$

где y дается формулой (1.17), а v есть относительная скорость систем отсчета. Поэтому, в частности, разность $y_A - y_B$ быстрот двух частиц одинакова во всех движущихся системах отсчета.

Для справок укажем еще два свойства быстроты. Во-первых, из определения (1.17) следует, что интервалу $-c < v < c$ изменения скорости соответствует интервал $-\infty < y < \infty$ изменения быстрот. Во-вторых, согласно (1.17), (1.9)

$$y = \ln \frac{\sqrt{p^2 + M^2 c^2} + p}{Mc}. \quad (1.17a)$$

§ 3. Квантовые свойства частиц

1. На малых расстояниях ньютоновская механика перестает быть справедливой за счет проявления квантовых закономерностей. Квантовые свойства проявляются тем резче, чем меньше массы частиц и расстояния между ними. Для последовательного и полного учета квантовых свойств вместо классической ньютоновской механики надо пользоваться квантовой механикой.

Мы не предполагаем, что читатель знает квантовую механику, и не можем здесь дать последовательного изложения этой науки. Но, поскольку мир атомных ядер и элементарных частиц является существенно квантовым, приходится идти на компромисс. Не излагая квантовую механику целиком, мы перечислим в этом параграфе важнейшие следствия из нее. Пользуясь этими следствиями, мы будем в процессе изучения свойств ядер и элементарных частиц приучаться к «квантовому мышлению».

Подчеркнем, что квантовую механику понять значительно труднее, чем теорию относительности. Действительно, с самой общей точки зрения физическая теория состоит из описания состояния физической системы и из уравнений движения, описывающих изменение этого состояния во времени. В теории относительности ме-