

15.2. Массы

Элементарная частица всегда имеет свою неизменную массу покоя *). Если две частицы имеют различные массы покоя, мы рассматриваем их как разные частицы. Величина массы покоя служит основным признаком, однозначно характеризующим частицу. Значение массы покоя может служить указанием на существование частицы даже без прямых наблюдений — просто в силу сохранения массы и импульса. В соответствующих средах заряженные частицы оставляют следы своих траекторий (в камерах Вильсона, пузырьковых камерах, толстослойных фотоэмульсиях, счетчиках). С помощью магнитного поля можно измерять импульс и, следовательно, энергию частиц до и после столкновения.

В виде примера рассмотрим столкновение электрона высокой энергии с покоящимся протоном. Протон может, например, принадлежать молекуле водорода в мишени из жидкого водорода. В большинстве столкновений налетающий электрон и протон-мишень образуют почти изолированную систему, так что лишь очень малая часть импульса или энергии передается другим частицам. Обозначая символами без штрихов параметры частицы до столкновения и со штрихами — после, будем иметь

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}'_1 - \mathbf{p}'_2 \equiv \Delta \mathbf{p} = 0 \quad (1)$$

и

$$[p_1^2 c^2 + m^2 c^4]^{1/2} + [p_2^2 c^2 + M_p^2 c^4]^{1/2} - [p_1'^2 c^2 + m^2 c^4]^{1/2} - [p_2'^2 c^2 + M_p^2 c^4]^{1/2} \equiv \Delta E = 0. \quad (2)$$

Здесь M_p — масса покоя протона, а m — масса покоя электрона. Однако примерно в одном столкновении из ста ΔE и $\Delta \mathbf{p}$ оказываются не равными нулю. Этого следует ожидать, когда при такого рода электронно-протонных столкновениях образуется незаряженная частица (не оставляющая видимых следов своей траектории). Но подобное положение наблюдалось бы и в том случае, если бы сохранение импульса и энергии не всегда соблюдалось. Как определить, какая из этих двух возможностей имеет место? Многозначительным является тот экспериментальный результат, что во всех столкновениях при различных значениях и направлениях векторов \mathbf{p}'_1 и \mathbf{p}'_2 недостающая энергия всегда положительна. Если бы она оказалась отрицательной, мы не могли бы утверждать, что недостающая энергия превратилась в энергию покоя и кинетическую энергию ненаблюдаемых частиц. Еще важнее то, что в тех случаях, когда

*) Это утверждение точно оправдывается только для стабильных частиц. В случае нестабильных опыт подтверждает предсказание квантовой теории, что масса M имеет неотъемлемую неопределенность ΔM , определяемую соотношением $(\Delta M) c^2 \sim \hbar / 2\pi \tau$, где τ — среднее время жизни, а \hbar — постоянная Планка. Для нейтрона $\tau \sim 15$ мин и $(\Delta M / M) \sim 10^{-27}$. Для π^0 -мезона $\tau \sim 10^{-16}$ сек и $(\Delta M / M) \sim 10^{-7}$. Для очень короткоживущих частиц с $\tau \ll 10^{-16}$ сек неопределенность массы уже значительна.

рождается только одна невидимая (нейтральная) частица массы M , уносящая часть энергии ΔE и часть импульса Δp , эти две величины должны быть всегда связаны соотношением

$$(\Delta E)^2 - c^2 (\Delta p)^2 = M^2 c^4 \geq 0. \quad (3)$$

Масса покоя M нейтральной частицы не должна зависеть от p_1 , p_1' , p_2 и Δp . В миллионах проанализированных неупругих столкновений недостающие энергия и импульс всегда получали правдоподобное объяснение с точки зрения образования одной или нескольких известных элементарных частиц. Это является, пожалуй, самым убедительным из существующих подтверждений законов сохранения релятивистских импульса и энергии.

При электронно-протонных столкновениях, пока кинетическая энергия налетающего протона меньше 140 Мэв , почти все неупругие столкновения ($\Delta E \neq 0$) дают

$$(\Delta E)^2 - c^2 (\Delta p)^2 = 0. \quad (4)$$

При сопоставлении с (3) это означает, что создаваемая при столкновении частица не имеет массы покоя. Частица является фотоном, так что реакция может быть записана в виде

$$e + p \rightarrow e + p + \gamma. \quad (5)$$

В диапазоне энергий электронов ниже 140 Мэв те случаи, когда $(\Delta E)^2 > c^2 (\Delta p)^2$, можно легко объяснить процессами множественного образования частиц, как, например, $e + p \rightarrow e + p + \gamma + \gamma$. Однако столкновений, при которых $(\Delta E)^2 < c^2 (\Delta p)^2$, никогда не наблюдалось.

При энергиях налетающих электронов, превышающих приблизительно 140 Мэв , начинает действовать другой механизм потери энергии и импульса. В этой области при неупругих столкновениях наблюдается, что

$$(\Delta E)^2 - c^2 (\Delta p)^2 = (135 \text{ Мэв})^2. \quad (6)$$

Такого рода несогласованность между энергией и импульсом приписывается образованию частицы с массой покоя, эквивалентной 135 Мэв . Недостающие энергия и импульс, выраженные уравнением (6), отдаются нейтральному π^0 -мезону, имеющему массу покоя $264 m$, где m — масса электрона. Процесс выражается реакцией

$$e + p \rightarrow e + p + \pi^0.$$

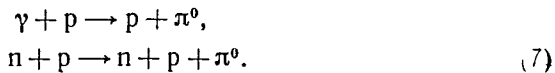
Эта схема подтвердилась наблюдением продуктов распада нестабильного π^0 -мезона, распадающегося по схеме

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Именно таким образом был впервые открыт нейтральный пион. Однако многократного подтверждения уравнения (6) для различных энергий налетающей частицы и различных значений ΔE и Δp уже

самого по себе достаточно для констатации существования мезона с массой покоя 264 *m*.

π^0 -мезон образуется также при столкновениях других частиц высоких энергий, например, в процессах

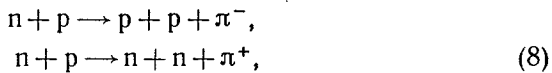


Аналогичным образом, открытие и подтверждение существования других элементарных частиц нередко основаны на использовании законов сохранения энергии и импульса.

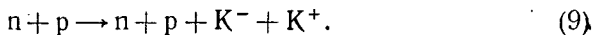
15.3. Заряд

В пределах точности измерений можно утверждать, что все известные элементарные частицы имеют заряды $+e$, $-e$ или заряд, равный нулю. Далее, опять-таки в пределах точности измерений, ни разу не был зарегистрирован ни один процесс столкновения, при котором не соблюдался бы закон сохранения заряда. Например, неотклоняемость нейтронов в однородных электрических полях позволяет рассматривать заряд нейтрона как равный нулю с точностью до 10^{-17} заряда электрона.

Применяя закон сохранения заряда к реакциям



можно приписать π^- - и π^+ -мезонам заряды соответственно $-e$ и $+e$. Другие частицы образуются в виде положительно-отрицательных пар, как, например:



Здесь из закона сохранения заряда следует, что заряды частиц K^- и K^+ должны быть равнопротивоположны.

Итак, мы полагаем, что заряды всех элементарных частиц с большой точностью равны $\pm e$ или нулю. Независимые косвенные данные о сохранении и квантовой природе зарядов элементарных частиц связаны с тем, что величина заряда частицы q участвует в выражении, определяющем импульс частицы p через измеренный радиус ρ круговой орбиты частицы в магнитном поле \mathbf{B} :

$$B\rho = \frac{cp}{q}. \quad (10)$$

Это соотношение было выведено релятивистским путем в гл. 13. Измерения радиуса ρ являются важнейшим средством определения импульса и проверки соотношения (3) между энергией и импульсом. Отклонение заряда частицы от его принятого значения $\pm e$ повлияло бы на вычисленные значения как импульса, так и энергии частицы. Это в свою очередь привело бы к кажущемуся нарушению сохранения энергии и импульса в реакциях. В большинстве случаев,