

Глава 3. Заряды и динамические переменные

3.1 Физические величины

Все физические величины можно разделить на два больших класса: **заряды** и **динамические переменные**. Существует простое правило, по которому легко определить, является данная физическая величина зарядом или динамической переменной. Для этого надо выполнить операцию $C \rightarrow A$, то есть заменить частицу на античастицу. Физическая величина **симметричная** относительно этой операции (не изменяется) является динамической переменной. Например, масса покоя m_0 , спин s у электрона и позитрона одинаковы. Следовательно, эти величины – динамические переменные. Физическая величина **антисимметричная** относительно этой операции (изменяет знак на противоположный) является зарядом. Например, электрические заряды Q электрона и позитрона одинаковы по абсолютной величине и противоположны по знаку.

3.2 Заряды

Современной науке известны 10 видов зарядов. В таблице 3.1 приведены их названия и частицы – элементарные носители зарядов.

Таблица 3.1

Заряды

№ п/п	Название заряда	Символ	Элементарные носители	Заряды элементарных носителей
1	Цвет	C	Кварки и глюоны	Цветовой заряд кварка: k, z, c антикварка: $\bar{k}, \bar{z}, \bar{c}$
2	Барионный	B	Кварки	Барионный заряд кварка равен $1/3$
3	Электрический	Q	Кварки, лептоны, векторные бозоны	Верхние кварки $Q = \frac{2}{3}e$ Нижние кварки $Q = -\frac{1}{3}e$ Заряженные лептоны $Q = -e$ Заряды $W^+, W^- = +e, -e$
4	Лептонный электронный	L_e	электрон и электронное нейтрино	$L_e = +1$ для e и ν_e
5	Лептонный мюонный	L_μ	мюон и мюонное нейтрино	$L_\mu = +1$ для μ и ν_μ
6	Лептонный таонный	L_τ	таон и таонное нейтрино	$L_\tau = +1$ для τ и ν_τ
7	Странность	S	странный кварк s	$S_{\text{Странного кварка}} = -1$
8	c -заряд (<i>charm</i> - чарм)	C	c -кварк	$C_{c\text{-кварка}} = +1$
9	b -заряд (<i>beauty</i> - красота)	B	b -кварк	$B_{b\text{-кварка}} = +1$
10	t -заряд (<i>truth</i> - истина)	T	t -кварк	$T_{t\text{-кварка}} = +1$

Свойства зарядов всех видов

- 1 Заряды частиц и античастиц одинаковы по величине и противоположны по знаку.
- 2 Заряд материальной системы равен алгебраической сумме зарядов всех входящих в нее частиц.
- 3 Заряд не зависит от скоростей частицы и системы отсчета, относительно которой частица рассматривается. Это важное свойство называют в теории относительности лоренц-инвариантностью.
- 4 Закон сохранения заряда: суммарный заряд изолированной системы не изменяется (сохраняется) при всех превращениях, происходящих внутри нее. Этот один из важнейших законов природы выполняется для каждого из 10 видов зарядов.

3.3 Динамические переменные

Самые элементарные динамические переменные: время t ; координаты x, y, z ; компоненты скорости (импульса) v_x, v_y, v_z ; масса покоя m_0 ; спин S . Остальные динамические переменные являются функциями от них. Примеры: радиус-вектор частицы $\mathbf{r} = \mathbf{e}_x x + \mathbf{e}_y y + \mathbf{e}_z z$; сферические, цилиндрические, гиперболические и другие системы координат; импульс $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$. Полная энергия частицы складывается из трех частей: энергии покоя, кинетической и потенциальной

$$E = m_0 c^2 + T + U, \quad (3.1)$$

где m_0 – масса покоя частицы, равная ее обычной массе при малых скоростях $v \ll c$.

Полный механический момент частицы складывается из орбитального и спина

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}. \quad (3.2)$$

Орбитальный механический момент

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ x & y & z \\ p_x & p_y & p_z \end{vmatrix}. \quad (3.3)$$

В дальнейшем мы неоднократно будем использовать все эти физические величины, постепенно постигая их содержание.

3.4 Законы сохранения динамических переменных

Известны законы сохранения трех динамических переменных: $E, \mathbf{p}, \mathbf{J}$. Последний часто сводится к закону сохранения \mathbf{L} , если спин не изменяется. Выше мы определили $E, \mathbf{p}, \mathbf{L}$ для одной частицы. А если материальный объект содержит N частиц, то его называют системой многих частиц. Полная энергия системы:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i. \quad (3.4)$$

Полный импульс системы

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i. \quad (3.5)$$

Полный момент системы

$$\mathbf{J} = \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_i, \quad \mathbf{L} = \sum_{i=1}^N \mathbf{L}_i. \quad (3.6)$$

Рассмотренные величины называют **аддитивными** (от слова *add* - складывать): характеристика целого есть сумма (скалярная для E и векторная для $\mathbf{p}, \mathbf{J}, \mathbf{L}$) характеристик его частей. Для перечисленных динамических переменных выполняются законы сохранения. Чтобы их сформулировать, необходимо проклассифицировать системы многих частиц. Силы взаимодействия между частицами, включенными в систему, называются внутренними. Силы взаимодействия частиц системы с частицами, не включенными в нее, называются внешними. Если все силы – внутренние и внешние – консервативные (потенциальные), то система называется **консервативной**.

Закон сохранения полной механической энергии: полная механическая энергия консервативной система не изменяется со временем, то есть сохраняется. Если векторная сумма внешних сил равна нулю, то система частиц называется **замкнутой**.

Закон сохранения импульса системы частиц: если система является замкнутой, то импульс ее сохраняется, то есть не изменяется со временем.

Закон сохранения орбитального механического момента. Орбитальный механический момент системы частиц сохраняется, если сумма моментов внешних сил равна нулю.

3.5 Роль законов сохранения зарядов и динамических переменных

Перечень основных законов сохранения:

1 Десять законов сохранения зарядов: $C, B, Q, L_e, L_\mu, L_\tau, S, c, b, t$.

2 Десять законов сохранения динамических переменных: полной энергии E ; трех проекций вектора импульса: p_x, p_y, p_z ; трех проекций орбитального механического момента: L_x, L_y, L_z ; трех проекций полного момента J_x, J_y, J_z , включающего спин. Квантовая теория вносит коррективы в законы сохранения моментов. Мы их рассмотрим позднее.

Примеры применения законов сохранения

1) Реакция рождения пар «частица + античастица» фотонами

$${}^0_0\gamma \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_{+1}\tilde{e}. \quad (3.7)$$

Фотон – истинно нейтральная частица: все заряды равны 0. Аналогично равен нулю суммарный заряд пары «частица + античастица». Поэтому фотоны легко генерируют такие пары, если им хватает энергии. Энергия покоя электрона или позитрона $m_0c^2 = 0,51$ МэВ. Для рождения пары фотон должен иметь энергию больше 1,02 МэВ. Когда фотоны с энергией больше 2 МэВ проходят через вещество, то теряют энергию в основном на рождение $e\tilde{e}$ -пар.

2) Аннигиляция пар «частица + античастица». Еще более эффективная обратная реакция: пара «частица + античастица» исчезает и рождает фотоны. Например, ${}_{-1}^0e + {}_{+1}^0\tilde{e} \rightarrow {}_0^0\gamma$.

3) Распад d -кварка и нейтрона. Самым легким является u -кварк. Его энергия покоя $m_u c^2 \approx 5$ МэВ. Закон сохранения энергии запрещает ему превращаться в другие кварки. Следующим по массе является d -кварк. Его энергия покоя $m_d c^2 \approx 7$ МэВ. Он может превратиться в u -кварк и создать при этом легкие частицы, если позволят законы сохранения зарядов. Оказывается эта реакция возможна



Легко видеть, что выполняются законы сохранения энергии и всех зарядов, а именно барионного (верхний индекс), электрического (нижний индекс) и лептонного электронного: у электрона (e) $L_e = +1$, а у антинейтрино ($\tilde{\nu}_e$) $L_e = -1$. Период полураспада d -кварка 15 мин. И этот процесс сыграл очень важную роль на первых трех минутах после Большого Взрыва и рождения нашей Вселенной.

3.6 Взаимодействие кварков. Восемь видов глюонов

Источники адронного (сильного, цветового) взаимодействия является цветовой заряд C . Он принимает всего 3 значения, которые принято обозначать: k – красный, z – зеленый, c – синий. Цветовой заряд кварка равен одному из этих трех значений: q^k, q^z, q^c . При этом вид кварка q может быть любым из шести: u, d, c, s, t, b . Если перейти от кварка к антикварку, то цвет изменяется на антицвет, который принимает соответственно три значения $\tilde{k}, \tilde{z}, \tilde{c}$. Все, что нужно знать о цветовом заряде, сосредоточено в следующих равенствах:

$$\begin{matrix} k & + & z & + & c & = & 0 & \text{(белый, бесцветный),} \\ \tilde{k} & & & & & & & \end{matrix} \quad (3.9)$$

Адронное взаимодействие кварков осуществляется обменом глюонами. Адронное взаимодействие сильно отличается от электромагнитного, которое осуществляется путем обмена фотонами. Фотон – истинно нейтральная частица. Он не имеет никаких зарядов. Поэтому, когда две заряженные частицы, например, электрон и протон в атоме водорода ${}^1_1H^0$ обмениваются фотонами, то их электрические заряды не изменяются.

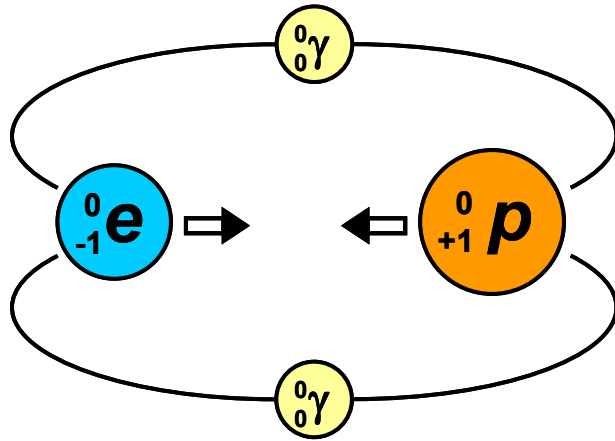


Рис. 3.1 Электрические заряды электрона $\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} e$ и протона $\begin{pmatrix} 0 \\ +1 \end{pmatrix} p$ не изменяются при электромагнитном взаимодействии путем обмена фотонами $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \gamma$, так как фотон не имеет и не переносит никаких зарядов

В отличие от фотонов, глюоны имеют и переносят цветовой заряд. Поэтому при адронном взаимодействии заряды кварков изменяются. Если к этому знанию добавить закон сохранения цветового заряда, то получим, что глюон должен одновременно нести один из трех цветов и один из трех антицветов. Действительно, пусть кварк красный испускает глюон и становится синим:

$$q^k \rightarrow q^c + g^{k\tilde{c}}. \quad (3.10)$$

Тогда по закону сохранения цветового заряда глюон должен иметь одновременно красный цвет и антисиний антицвет. С учетом этого схема адронного взаимодействия выглядит следующим образом.

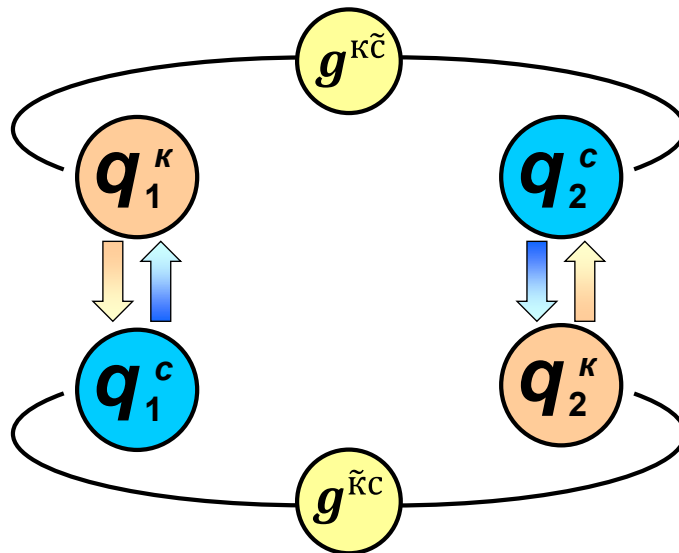


Рис. 3.2 При адронном взаимодействии кварки меняют цвет, обмениваясь глюонами, которые переносят одновременно цвет и антицвет. Цифрами 1 и 2 обозначены разновидности (ароматы) кварков, а буквами их цвета

Восемь видов глюонов

Три цвета и три антицвета дают 9 базовых комбинаций «цвет + антицвет».

Анти- цвет / Цвет	\tilde{K}	\tilde{Z}	\tilde{C}
К	$K\tilde{K}$	$K\tilde{Z}$	$K\tilde{C}$
З	$Z\tilde{K}$	$Z\tilde{Z}$	$Z\tilde{C}$
С	$C\tilde{K}$	$C\tilde{Z}$	$C\tilde{C}$

Как показывает теория адронного взаимодействия – квантовая хромодинамика (КХД) – одна из 9 комбинаций является абсолютно бесцветной и не обеспечивает сильного цветового взаимодействия, при котором переносится цветовой заряд. Остается 8 «дееспособных» глюонов.