

§ 2. Состав ядер. Элементарные частицы

Ядра атомов имеют положительный электрический заряд q , кратный абсолютной величине заряда электрона: $q = Ze$. Целое число Z совпадает с порядковым номером элемента в периодической таблице Менделеева. Второй важной характеристикой ядра является его масса. Масса каждого ядра приблизительно равна целому числу атомных единиц массы. Атомной единицей массы является $\frac{1}{16}$ массы атома кислорода O^{16} . Ближайшее целое к массе ядра число, выраженное в атомных единицах, называется *массовым числом* и обозначается буквой A .

Ядро атома химического элемента X обозначается обычно символом химического элемента с двумя числами, указывающими заряд ядра и массовое число: X_Z^A . Часто заряд ядра не отмечается, так как он целиком определяется указанием химического символа соответствующего атома. Ядра одинакового заряда, но разного веса называются *изотопами*. Ядра одинакового веса, но разного заряда называются *изобарами*.

Структурными единицами атомного ядра являются протоны и нейтроны. Ядро с массовым числом A содержит Z протонов и $N = A - Z$ нейтронов.

Напомним основные свойства протонов и нейтронов. *Протон* (p) — стабильная частица. Масса протона в 1837 раз больше массы электрона. Заряд положителен и равен $4,802 \cdot 10^{-10}$ единицы электрического заряда (в CGSE-системе). Спин протона равен $\frac{1}{2}$ в единицах \hbar ; *нейтрон* (n) не имеет заряда и примерно на 2,5 массы электрона тяжелее протона, таким образом, отличие в массах ($0,0023 \cdot 10^{-24}$ г) немногим больше $0,1\%$. Свободный нейтрон нестабилен и распадается с средним временем жизни, равным ~ 12 минутам, на протон, электрон и антинейтрино.

Хотя нейтроны в свободном состоянии нестабильны, они образуют вместе с протонами стабильные ядра. Так, например, дейтрон, ядро гелия (He^4), ядро кислорода (O^{16}) и многие другие ядра, соответствующие определенному отношению числа нейтронов к числу протонов, являются стабильными ядрами. Если отношение числа нейтронов к числу протонов отличается от стабильного, то в таких ядрах становятся возможными превращения нейтрона в протон, электрон и нейтрино или превращение протона в нейтрон, позитрон и нейтрино. Такие превращения называются β -распадом (см. главу VI). Они происходят до тех пор, пока ядро не станет стабильным.

Взаимные превращения нейтрона в протон и протона в нейтрон позволяют рассматривать нейтрон и протон как два состояния одной и той же частицы, которую называют *нуклоном*.

Элементарные частицы со спином $\frac{1}{2}$ описываются уравнением Дирака. Если бы протон и нейтрон тоже описывались уравнением Дирака

для свободных частиц, то магнитный момент нейтрона равнялся бы нулю, а магнитный момент протона — одному *ядерному магнетону* $\mu_0 = \frac{e\hbar}{2M_p c} \approx 5,05 \cdot 10^{-24} \frac{\text{эрг}}{\text{гаусс}}$, который в 1837 раз меньше магнетона Бора. На самом же деле магнитный момент протона $2,792743 \mu_0$, а магнитный момент нейтрона равен — $1,913138 \mu_0$. Эти факты указывают, что свойства протона и нейтрона полностью не отражаются уравнением Дирака для свободных частиц.

Современная квантовая теория поля еще не в состоянии количественно объяснить аномальные значения магнитных моментов протона и нейтрона. Понятие свободной частицы является грубой идеализацией, заимствованной из классической физики. В настоящее время установлено, что свободное пространство — физический вакуум — обладает определенными физическими свойствами. Так, электромагнитное взаимодействие электрона с вакуумом приводит к смещению спектральных термов атомов и к изменению магнитного момента электрона. Однако вследствие слабости электромагнитных взаимодействий так называемые «вакуумные» эффекты очень малы. Нуклоны же взаимодействуют с вакуумом мезонного поля. Это взаимодействие столь велико, что понятие свободного нуклона без окружающего его мезонного поля совершенно несостоятельно. Из-за большой величины взаимодействия нуклона с мезонным полем нельзя применять методы теории возмущений (являющиеся основным аппаратом квантовой электродинамики), и в настоящее время еще не созданы достаточно удовлетворительные методы для количественного описания свойств протонов и нейтронов. За неимением лучшего приходится пользоваться уравнениями типа Паули для описания поведения нерелятивистских нуклонов, подставляя в них экспериментальные значения магнитных моментов.

Кроме протонов и нейтронов, входящих в состав атомных ядер, в настоящее время известно сравнительно большое число частиц, которые считаются элементарными. Элементарными частицами называют частицы, которые на современном этапе наших знаний нельзя рассматривать составленными из более простых. Многие из элементарных частиц являются нестабильными и существуют («живут») очень малое время после их образования, превращаясь в другие элементарные частицы.

Краткий перечень основных элементарных частиц и некоторых их свойств приведен в таблице 1. Более подробные сведения об элементарных частицах можно найти в статье А. М. Шапиро [2].

Согласно современной теории некоторые из элементарных частиц образуют пары; таковы, например, электрон и позитрон, нейтрино и антинейтрино. Одну из составляющих пары называют частицей, а вторую — античастицей. В частности, протону и нейтрону также должны были соответствовать свои античастицы: антипротон и антинейтрон. Долгое время поиски антипротонов и антинейтронов не приводили к успеху. Наконец, в 1955 г. в Калифорнийском университете группой сотрудников под руководством Э. Сегре [3] был открыт *антипротон*.

Т а б л и ц а 1. Основные элементарные частицы

Наименование частицы	Обозначение и заряд	Масса в единицах массы электрона m_e	Спин в единицах $\frac{h}{2\pi}$	Изотопический спин*) $T; T_3$	Время жизни в свободном состоянии (сек)
Электрон	$e^- (e)$	1	$\frac{1}{2}$	—	Стабилен
Позитрон	$e^+ (\bar{e})$	1	$\frac{1}{2}$	—	Стабилен**)
Фотон	γ	0	1	—	Стабилен
Нейтрино	ν	0	$\frac{1}{2}$	—	Стабилен
Антинейтрино	$\bar{\nu}$	0	$\frac{1}{2}$	—	Стабилен
Протон	p	1836,12	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}; \frac{1}{2}$	Стабилен
Нейтрон	n	1838,65	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}$	$1,11 \cdot 10^8$
μ -мезоны	μ^+, μ^-	206,7	$\frac{1}{2}$	—	$2,22 \cdot 10^6$
π -мезоны (пионы)	$\left\{ \begin{array}{l} \pi^+, \pi^- \\ \pi^0 \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} 273 \\ 264,3 \end{array}$	$\begin{array}{l} 0 \\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{l} 1; 1, -1 \\ 1; 0 \end{array}$	$\begin{array}{l} 2,5 \cdot 10^8 \\ 10^{15} \end{array}$
Тяжелые мезоны, или K -мезоны	K^+, K^0, K^-, \bar{K}^0	966	0	$\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; -\frac{1}{2}$	10^8
Гипероны	Λ^0	2181,5	$\frac{1}{2}$	0; 0	$3,7 \cdot 10^{10}$
	Σ^+, Σ^-	2326,9	$\frac{1}{2}$	1; 1, -1,	10^{11}
	Ξ^-	2586	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}$	10^{10}

*) Понятие об изотопическом спине дается в § 8.

***) При встрече с электроном образует позитроний с временем жизни $\sim 10^{-7}$ сек, если сталкиваются электрон и позитрон с параллельными спинами, и $\sim 10^{-10}$ сек, если сталкиваются электрон и позитрон с антипараллельными спинами.

Антипротоном называют частицу, имеющую отрицательный знак электрического заряда и магнитный момент, обратный протонному. Антипротон находится в таком же отношении к протону, как позитрон к электрону. Так, например, при столкновении антипротона с протоном они «аннигилируют», превращаясь в π -мезоны или со значительно меньшей вероятностью в фотоны, или отдают полностью свою энергию и, следовательно, массу другим частицам, вызывая, например, полный развал ядер. В 1956 г. после долгих попыток был обнаружен и *антинейтрон*.

Антинейтроном называют частицу, которая находится в таком же отношении к нейтрону, как позитрон к электрону.

Наиболее существенным свойством античастиц является их способность «аннигилировать» с частицами с выделением всей энергии, соответствующей массе покоя обеих частиц.

Для характеристики нуклонного и антинуклонного состояний можно ввести «ядерный» заряд или *нуклонный заряд*. При этом нуклонный заряд протона и нейтрона принимается равным 1, а нуклонный заряд антипротона и антинейтрона равен минус 1. В настоящее время предполагается, что нуклонный заряд гиперонов также равен 1, а нуклонный заряд антигиперонов равен минус 1. Нуклонный заряд всех остальных частиц, масса которых меньше массы нуклона, равен нулю. Существенно, что в системе, состоящей из нуклонов и антинуклонов, полный ядерный заряд, пропорциональный разности чисел нуклонов и антинуклонов, остается постоянным независимо от вида процессов, протекающих в системе.

Согласно современным представлениям законы природы инвариантны относительно операции зарядового сопряжения, т. е. превращения всех частиц в античастицы. При операции зарядового сопряжения надо менять одновременно знаки всех зарядов: электрических и нуклонных. В последнее время показано, однако, что в явлениях β -распада ядер (и распада других элементарных частиц) необходимо сохранять инвариантность относительно комбинированной операции: зарядового сопряжения и инверсии, а не отдельно для каждой операции (см. § 39 и 40).

Задачей теории ядра является установление свойств ядер, исходя из свойств протонов и нейтронов, входящих в состав ядер. К сожалению, в настоящее время мы слишком мало еще знаем о силах взаимодействия между нуклонами, чтобы решить эту задачу. Приходится довольствоваться рядом полуэмпирических методов, используя те или иные гипотезы о ядерных силах. Сравнение теории с опытом позволяет уяснить ценность таких гипотез.

§ 3. Механические величины, характеризующие ядро

Стационарные состояния ядра характеризуются некоторым набором физических величин, сохраняющихся с течением времени, если ядро не подвергается внешним воздействиям. К этим величинам относятся: энергия E , масса ядра M , импульс P , момент количества движения J и некоторые другие.

В этой главе мы будем рассматривать только стационарные состояния ядер или состояния, близкие к стационарным, в которых энергия имеет почти определенное значение.

Полная энергия и импульс любого тела связаны релятивистским соотношением

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 = (Mc)^2 + P^2, \quad (3,1)$$