

СТАБИЛЬНЫЕ ЯДРА И ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

СВОЙСТВА СТАБИЛЬНЫХ ЯДЕР

Выше уже было сказано, что ядро состоит из протонов и нейтронов, связанных ядерными силами. Если измерять массу ядра в атомных единицах массы, то она должна быть близка к массе протона, умноженной на целое число A , называемое массовым числом. Если заряд ядра Z , а массовое число A , то это означает, что в состав ядра входит Z протонов и $(A-Z)$ нейтронов. (Число нейтронов в составе ядра обозначается обычно через $N=A-Z$.)

Эти свойства ядра отражены в символических обозначениях, которые будут использованы в дальнейшем в виде



где X — название элемента, атому которого принадлежит ядро (например, ядра: гелия — He_2^4 , кислорода — O_8^{16} , железа — Fe_{26}^{57} , урана — U_{92}^{235}).

К числу основных характеристик стабильных ядер можно отнести: заряд, массу, радиус, механический и магнитный моменты, спектр возбужденных состояний, четность и квадрупольный момент. Радиоактивные (нестабильные) ядра дополнительно характеризуются временем жизни, типом радиоактивных превращений, энергией испускаемых частиц и рядом других специальных свойств, о которых будет сказано далее.

Прежде всего рассмотрим свойства элементарных частиц, из которых состоит ядро: протона и нейтрона.

§ 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТОНА И НЕЙТРОНА

Масса. В единицах массы электрона: масса протона $m_p = 1836,1$; m_e масса нейтрона $m_n = 1838,6 m_e$.

В атомных единицах массы: масса протона $m_p = 1,00759 ME$; масса нейтрона $m_n = 1,00898 ME$.

В энергетических единицах масса покоя протона $m_p = 938,3 \text{ Мэв}$; масса покоя нейтрона $m_n = 939,6 \text{ Мэв}$.

Электрический заряд. q — параметр, характеризующий взаимодействие частицы с электрическим полем, выражается в единицах заряда электрона $q_e = -e$, где

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ кулона} = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE.}$$

Все элементарные частицы¹ несут количество электричества, равное либо 0, либо $\pm e$. Заряд протона $q_p = +1e$ Заряд нейтрона равен нулю.

Спин. Спины протона и нейтрона равны $\frac{1}{2}\hbar$. Обе частицы являются фермионами и подчиняются статистике Ферми—Дирака, а следовательно, и принципу Паули.

Магнитный момент. Если подставить в формулу (10), определяющую магнитный момент электрона вместо массы электрона массу протона, получим

$$\mu_0 = \frac{e\hbar}{2m_p c} = \frac{M_B}{1836} = 5,05 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/гаусс.}$$

Величина μ_0 называется *ядерным магнетон*. Можно было предположить по аналогии с электроном, что спиновый магнитный момент протона равен μ_0 . Однако опыт показал, что собственный магнитный момент протона больше ядерного магнетона: по современным данным

$$\mu_p = [+2,792763 \pm 0,000030]\mu_0.$$

Кроме того, оказалось, что незаряженная частица — нейтрон — также имеет магнитный момент, отличный от нуля и равный

$$\mu_n = [-1,913148 + 0,000066]\mu_0.$$

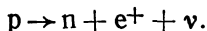
Наличие магнитного момента у нейтрона и столь большое значение магнитного момента у протона противоречат предположениям о точечности этих частиц. Ряд экспериментальных данных, полученных в последние годы, свидетельствует о том, что и протон и нейтрон обладают сложной неоднородной структурой. В центре нейтрона при этом находится положительный заряд, а на периферии равный ему по величине распределенный в объеме частицы отрицательный заряд. Но поскольку магнитный момент определяется не только величиной обтекающего тока, но и охватываемой им площадью, то создаваемые ими магнитные моменты не будут равны. Поэтому нейтрон может обладать магнитным моментом, оставаясь в целом нейтральным.

Взаимные превращения нуклонов. Масса нейтрона больше массы протона на 0,14%, или на 2,5 массы электрона, $m_n > m_p + m_e$.

¹ Здесь мы не включаем в число элементарных частиц резонансы.

В свободном состоянии нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}^1$. Среднее время жизни его близко к 17 мин.

Протон — частица стабильная. Однако внутри ядра он может превращаться в нейтрон; при этом реакция идет по схеме



Разница в массах частиц, стоящих слева и справа, компенсируется за счет энергии, сообщаемой протону другими нуклонами ядра.

Протон и нейтрон имеют одинаковые спины, почти одинаковые массы и могут превращаться друг в друга. В дальнейшем будет показано, что и ядерные силы, действующие между этими частицами попарно, тоже одинаковы. Поэтому их называют общим наименованием — нуклон и говорят, что нуклон может находиться в двух состояниях: протон и нейтрон, отличающихся своим отношением к электромагнитному полю.

Нейтроны и протоны взаимодействуют благодаря существованию ядерных сил, имеющих незлектрическую природу. Своим происхождением ядерные силы обязаны обмену мезонами. Если изобразить зависимость потенциальной энергии взаимодействия протона и нейтрона малых энергий U от расстояния между ними r , то приближенно она будет иметь вид графика, представленного на рис. 5, а, т. е. имеет форму *потенциальной ямы*. Такая зависимость

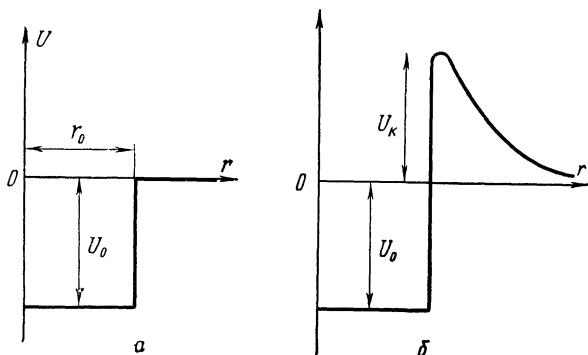


Рис. 5. Зависимость потенциальной энергии взаимодействия от расстояния между нуклонами: а — для пар нейтрон — нейтрон или нейтрон — протон; б — для пары протон — протон

означает, что пока протон и нейтрон находятся на большом расстоянии $r > r_0$ (r_0 — радиус действия ядерных сил), между ними нет взаимодействия и $U(r) = 0$. Как только они сблизятся на расстояние $r \leq r_0$, начинают действовать силы притяжения, в резуль-

¹ Знак \sim над символом частицы употребляется для обозначения соответствующей античастицы.

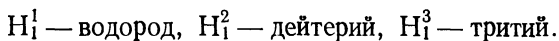
тате чего и может образоваться связанная система — ядро. Глубина такой потенциальной ямы составляет приблизительно 30 Мэв , а радиус r_0 имеет порядок 10^{-13} см . Строго говоря, силы существуют и при $r > r_0$, но очень слабы. Как будет показано далее, в этих условиях скорости движения нуклонов в ядре v существенно меньше c .

Аналогичная зависимость для двух взаимодействующих протонов будет иметь несколько иной вид. На расстояниях $r > r_0$ ядерные силы отсутствуют и потенциал в поле кулоновских сил отталкивания протонов растет с уменьшением r , как $\frac{1}{r}$.

В ядре, на расстояниях, меньших r_0 , кулоновское отталкивание является лишь небольшой поправкой к ядерным силам и ею можно пренебрегать. С учетом обеих сил суммарный потенциал является непрерывной функцией $U(r)$ с характерным максимумом, получившим название потенциального барьера U_k (рис. 5, б). Для того чтобы вступили в действие ядерные силы, частицы должны преодолеть этот барьер. Например, для осуществления термоядерных реакций синтеза надо нагреть газ до десятков миллионов градусов, чтобы заряженные частицы имели достаточную энергию для преодоления потенциального барьера.

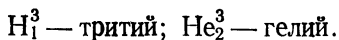
§ 2. ЗАРЯД АТОМНОГО ЯДРА

Заряд ядра Ze определяет место соответствующего элемента в таблице Менделеева и химические свойства элемента. Химически одинаковые элементы с одним и тем же числом Z , но разным A , т. е. с одинаковым числом протонов, но разным числом нейтронов в ядре называются *изотопами*. Например, у водорода есть еще два изотопа дейтерий и тритий:



В настоящее время известно около 280 устойчивых и свыше 1450 неустойчивых радиоактивных изотопов.

Ядра с одинаковым числом нуклонов A , но с разным Z , т. е. с различным числом протонов и нейтронов в ядре называются *изобарами*. Например, у трития есть изобар — один из изотопов гелия:



Как правило, устойчивые изобары встречаются парами и атомные номера их отличаются на две единицы. Из известных в настоящее время 60 устойчивых изобарных пар только две пары (Cd_{48}^{113} In_{49}^{113} ; Sb_{51}^{123} , Te_{52}^{123}) имеют нечетные массовые числа и их порядковые номера отличаются на единицу, а не на две. Остальные изобары имеют четные и A и Z .