

симметрии распределения зарядов. Квадрупольный электрический момент при сферически симметричном распределении зарядов (рис. 14, б) равен нулю.

Положительный знак квадрупольного момента означает, что распределение зарядов вытянуто в направлении спина (рис. 14, в). Отрицательный знак квадрупольного момента означает, что сфероид сплюснен в направлении спина (рис. 14, г). Эти отклонения от сферического распределения заряда в ядре не превышают 10% величины радиуса ядра.

Определить квадрупольный момент можно из сверхтонкой структуры по кулоновскому возбуждению ядер и другими методами. Знание его дает дополнительные сведения о строении ядра. Наличие квадрупольного момента у дейтона также свидетельствует о нецентральности ядерных сил.

Большинство тяжелых ядер имеет сильно вытянутую форму, но все ядра с  $Z=N$  сферически симметричны.

## § 8. ЧЕТНОСТЬ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ

Четность волновой функции  $\Psi$ , описывающей состояние ядра, является существенной специфически квантовой характеристикой системы.

Напомним, что функция  $f(x_1, \dots, x_n)$  называется четной, если

$$f(-x_1, \dots, -x_n) = f(x_1, \dots, x_n),$$

и нечетной, если

$$f(-x_1, \dots, -x_n) = -f(x_1, \dots, x_n).$$

Если волновая функция не меняет свой знак при инверсии всех координат (т. е. при их зеркальном отражении относительно нуля), то состояние системы, которую она описывает, называют четным и обозначают символом  $P=+1$ . Нечетность обозначается символом  $P=-1$ .

Так, например, в основном состоянии атома водорода волновая функция электрона имеет вид  $\Psi = Ne^{-r/a}$ , где  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  расстояние от ядра;  $a$  и  $N$  — постоянные. Эта функция четная, так как при замене  $x$  на  $-x$ ,  $y$  на  $-y$ ,  $z$  на  $-z$  она не меняется. Но, например, в одном из возбужденных состояний, в состоянии

2  $p$ , когда  $\psi = N_1 \frac{z}{r} e^{-\frac{r}{2a}}$ , где  $N_1$  — новая константа, при отражении координат волновая функция меняет знак  $\Psi \rightarrow -\Psi$ , т. е. данное состояние, в котором момент количества движения  $l$  равен 1, пространственно нечетно. Вообще состояние с моментом количества движения  $l$ , как легко убедиться, имеет четность  $P = (-1)^l$  [4].

Однако помимо такой четности, легко обнаруживаемой по известной зависимости  $\Psi$ -функции от координат, частицы обладают

еще и так называемой *внутренней четностью*. Ее происхождение можно представить себе как результат того, что частица имеет некоторую неизвестную нам структуру. Поэтому в действительности ее полная волновая функция зависит от пространственных координат, каким-то более сложным, пока неизвестным нам способом. Эта дополнительная зависимость, не отражаемая при написании волновой функции, может быть как четной, так и нечетной.

В самом деле, если бы мы не знали внутреннего устройства атома водорода, а описывали его только как одну единую частицу, мы не знали бы и написанных выше зависимостей его внутренней волновой функции  $\Psi$  от координат  $x, y, z$ . Однако опыт обнаружил бы, что в основном состоянии волновая функция атома в целом не меняет знака при отражении координат, т. е. является внутренне четной, а в некоторых возбужденных состояниях — внутренне нечетной.

Подобно этому эксперименты показали, что протон и электрон помимо четности, описываемой  $\Psi$ -функцией их состояния в целом, обладают одинаковой внутренней четностью, а, например,  $\pi$ -мезон — противоположной. Принимая внутреннюю четность протона и электрона за положительную ( $P_p = P_e = +1$ ) для  $\pi$ -мезона получаем отрицательную внутреннюю четность ( $P_\pi = -1$ ). Концепция внутренней четности частиц сохраняет значение независимо от описанного выше модельного представления об их внутреннем пространственном строении.

В квантовой механике показывается, что для изолированной системы четность является интегралом движения, т. е. не меняется с течением времени [8]. Таким образом,  $P$  является квантовым числом состояния, принимающим только два значения:  $P = \pm 1$ . Эксперименты подтверждают сохранение четности для сильных (ядерных) и электромагнитных взаимодействий. Закон сохранения четности накладывает определенные ограничения на протекание ядерных процессов. Поэтому очень важно уметь определять четность системы.

Например, для системы двух не взаимодействующих частиц А и Б четность определяется как произведение внутренних четностей  $P_A, P_B$  составных частей А и Б и четностей  $P_{IA}, P_{IB}$  волновых функций, описывающих их движение относительно общего центра инерции

$$P_{A+B} = P_A \cdot P_B \cdot P_{IA} \cdot P_{IB}. \quad (29a)$$

В свою очередь, четность волновой функции относительного движения

$$P_l = (-1)^l. \quad (29b)$$

Поэтому выражение (29a) можно переписать:

$$P_{A+B} = P_A \cdot P_B \cdot (-1)^{l_A} \cdot (-1)^{l_B}, \quad (29b)$$

где  $l_A$  и  $l_B$  — орбитальные квантовые числа, характеризующие движение частиц А и Б.

Эта формула выведена для системы двух невзаимодействующих частиц. Но если теперь учесть взаимодействие, то, хотя это изменит их волновую функцию, четность системы остается такой же, если действуют электромагнитные или ядерные силы.

Если атомное ядро представить в виде совокупности независимых движущихся нуклонов (например, согласно модели ядерных оболочек), то четность ядра будет равна произведению собственных четностей нуклонов на величину  $(-1)^{\sum l_i}$ , где  $l_i$  — орбитальное число, определяющее характер движения данного нуклона.

Так как собственная четность нуклона положительна, его состояние будет четным или нечетным в зависимости от четности  $l$  и четность системы нуклонов (ядра) будет определяться суммой всех  $l$ . Если число  $\sum l$  четное, то и система четная и наоборот.

Поскольку четность замкнутой системы сохраняется, четность ядра может измениться только в результате захвата или испускания частиц (или квантов), находящихся в нечетном состоянии. Определить четность ядра можно из ядерных реакций, от четности начальных и конечных ядер зависят угловые распределения продуктов реакции и другие характеристики.

В 1956 г. экспериментально было показано, что закон сохранения четности не выполняется при слабых взаимодействиях. Это явление будет подробно рассмотрено в разделе, посвященном элементарным частицам.

## § 9. ЯДЕРНЫЕ МОДЕЛИ

Теория атомного ядра, разрабатываемая на основе обширного экспериментального материала, накопленного при исследовании атомных ядер, должна прежде всего объяснить особенности внутренней структуры ядра.

Такая теория исходит из того факта, что все ядра состоят из протонов и нейтронов, связанных между собой ядерными силами.

И тут прежде всего приходится сталкиваться с недостаточностью наших знаний о ядерных силах. В атоме действуют электромагнитные силы, теория которых разработана и хорошо согласуется с экспериментом. Теория же ядерных сил до сих пор не построена из-за ряда принципиальных трудностей: по целому ряду характеристик ядерных сил имеется недостаточно экспериментальных данных, кроме того, задача о взаимодействии многих тел из-за громоздкости аппарата может решаться только приближенно даже при использовании вычислительных машин.

Наиболее эффективным методом получения сведений о ядерных силах в настоящее время является исследование столкновений