

Как видно из рис. 21, значение производной $|\chi'|$, взятой в точке $r = r_0$, значительно меньше производной $|\chi'_{r=0}|$. Кроме того, можно пренебречь энергией связи по сравнению с потенциальной энергией взаимодействия, т. е. считать $|\varepsilon| < |U(r)|$ при $r < r_0$. На малых расстояниях $\chi = Nr$, где N — некоторая константа. Тогда (76,11) преобразуется к виду

$$-N = \frac{m_p}{\hbar^2} N \int_0^{r_1} U(r) r dr \quad (76,12)$$

или

$$\int_0^{r_0} U(r) r dr = -\frac{\hbar^2}{m_p}. \quad (76,13)$$

Заменяя интеграл в (76,13) на $U_0 r_0^2$, где U_0 — некоторая средняя энергия взаимодействия, т. е. средняя глубина ямы, получим по порядку величины:

$$U_0 \approx -\frac{\hbar^2}{m_p r_0^2} \sim -40 \text{ Мэв.}$$

§ 77. Теория ядерных оболочек

В отличие от атомов, у которых взаимодействие между электронами имеет второстепенный характер и происходит на фоне основного фактора — притяжения к ядру, в атомных ядрах нет выделенного центра взаимодействий.

Наоборот, все ядерные частицы — нуклоны — интенсивно взаимодействуют между собой мощными ядерными силами. Поэтому долгое время казалось, что различать состояния индивидуальных частиц в ядре не имеет смысла, а можно говорить лишь о состоянии системы как целого.

Оказалось, однако, что целый ряд наблюдавшихся свойств атомных ядер указывает на сохранение индивидуальности нуклонов в ядрах. По-видимому, сохранение индивидуальности частиц в ядрах связано с тем, что ядерные силы весьма быстро убывают с расстоянием, а кинетическая энергия нуклонов в ядрах весьма велика.

Исходя из предположения, что каждый из ядерных нуклонов движется в самосогласованном поле, образованном всеми остальными нуклонами, оказалось возможным объяснить целый ряд важных свойств ядер.

Самосогласованное поле большинства ядер является сферически-симметричным. Разумеется, точный закон распределения потенциала внутри ядра неизвестен. Оказалось, однако, что характер расположения уровней сравнительно мало зависит от

принимаемой модели потенциального поля, если только она правильно передает основную особенность поля ядра как целого — резкое возрастание потенциала на его поверхности, $r = R$. Самая простая модель ядра — это сферическая потенциальная яма бесконечной глубины. В этой модели самосоглазованное потенциальное поле U , в котором движется отдельный нуклон, имеет вид

$$U = \begin{cases} 0, & r < R, \\ \infty, & r \geq R. \end{cases}$$

Уже эта весьма упрощенная модель позволяет получить общее представление о свойствах и расположении уровней. Волновая функция удовлетворяет уравнению

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\psi}{dr} + \frac{l(l+1)}{r^2} \psi - k^2\psi = 0, \quad (77,1)$$

где $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$. Решением этого уравнения служит выражение (36,9). Граничное условие на поверхности ядра

$$\psi = 0 \quad \text{при} \quad r = R \quad (77,2)$$

приводит к условию

$$J_{l+\frac{1}{2}}(kR) = 0. \quad (77,3)$$

При данном значении орбитального момента уровни энергии, являющиеся корнями трансцендентного уравнения (77,3), классифицируются с помощью главного квантового числа n . Наименьшему корню этого трансцендентного уравнения отвечает волновая функция, не имеющая узлов при $r < R$. Этот уровень классифицируется как уровень с $n = 1$. Следующий корень (77,3) отвечает волновой функции, имеющей один узел при $r < R$. Соответствующее состояние обозначается как $n = 2$ и т. д. При данном n l может принимать любые значения. При этом энергия нуклона растет с ростом орбитального момента.

Порядок расположения уровней дается последовательностью

$$1s, 1p, 1d, 2s, 1f, 2p, 1g, 2d \dots$$

Оказалось, что в атомных ядрах важную роль играет спин-орбитальное взаимодействие, которое до сих пор вовсе не учитывалось. Особая роль спин-орбитального взаимодействия связана с тем, что благодаря быстрому убыванию ядерных сил с расстоянием между частицами энергия парного взаимодействия в среднем мала. Значительная величина спин-орбитального взаимодействия приводит к установлению в ядрах $j-j$ связи. Спинный и орбитальный моменты каждого нуклона складываются в полный момент j . Энергия нуклона оказывается зависящей от

его спина. В ядрах реализуется обращенная структура уровней, так что уровни с большими j лежат ниже уровней с меньшими j . Состояния нуклонов обозначаются символом nl_j , например, $1s_{1/2}$ или $2p_{3/2}$. Поскольку нуклоны подчиняются принципу Паули, в каждом состоянии с данными значениями n , l и j может находиться $(2j + 1)$ нейтрон и $(2j + 1)$ протон. Благодаря этому в ядрах возникает ситуация, весьма сходная с той, которая имеет место в атомах: состояния нуклонов можно разбить на группы или оболочки. При заполнении каждой оболочки возникает замкнутая конфигурация, обладающая наибольшей устойчивостью — в данном случае наибольшей энергией связи нуклона в ядре. Расположение состояний по энергиям и число нуклонов в этих состояниях дается следующей таблицей:

$1s_{1/2}$	.....	2
$1p_{3/2}$, $1p_{1/2}$	.....	6
$1d_{3/2}$, $1d_{1/2}$, $2s_{1/2}$, $1f_{7/2}$	.....	20
$2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$, $1g_{7/2}$	.....	22
$2d_{3/2}$, $1g_{7/2}$, $1h_{11/2}$, $2d_{5/2}$, $3s_{1/2}$	.....	32
$2f_{7/2}$, $1h_{9/2}$, $2i_{13/2}$, $2f_{5/2}$, $3p_{3/2}$, $3p_{1/2}$	.....	44

Из этой таблицы видно, что в замкнутых оболочках помещается последовательно 2, 8, 28, 50, 82 и 126 нуклонов.

Соответственно, особой устойчивостью обладают ядра с полным числом нуклонов, даваемых этими числами, которые называются магическими.

Особой устойчивостью обладают ядра, у которых и число протонов и число нейтронов являются магическими. Такими ядрами являются, например, He_2^4 и O_8^{16} . Их часто называют дважды магическими. Эта простейшая схема позволяет объяснить не только особую устойчивость и распространенность в природе некоторых изотопов, но и ряд других свойств атомных ядер, например, их магнитные моменты. Однако в ряде случаев она оказывается недостаточной. Так, например, ядра с незаполненными оболочками обнаруживают отклонения от сферической формы. Это проявляется в наличии вращения ядра как целого. Экспериментальным доказательством вращения ядра служит наличие в спектрах ядер структуры (идентично со структурой спектров двухатомных молекул).

Мы не можем останавливаться на деталях, которые читатель найдет в специальной литературе¹⁾.

¹⁾ См., например, П. Э. Немировский, Современные модели атомного ядра, Атомиздат, 1960.