

состояниях. Из неравенства (11,7), определяющего условия образования связанного состояния, следует:

$$(V_0 d^2)_t > \frac{\pi^2 \hbar^2}{4M} \text{ — для триплетного спинового состояния;}$$

$$(V_0 d^2)_s < \frac{\pi^2 \hbar^2}{4M} \text{ — для синглетного спинового состояния.}$$

Наиболее общим видом центрального потенциала взаимодействия между нуклонами, зависящим от координат и спинов нуклонов, является выражение

$$V(r_1, \sigma_1; r_2, \sigma_2) = \alpha(r_{12}) + \beta(r_{12}) \sigma_1 \sigma_2. \quad (11,9)$$

Выражая полный спин системы через  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  с помощью равенства  $S = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$ , находим:

$$\sigma_1 \sigma_2 = \begin{cases} -3 & \text{в синглетном спиновом состоянии;} \\ 1 & \text{в триплетном спиновом состоянии.} \end{cases}$$

Итак, потенциал взаимодействия между нуклонами в синглетном и триплетном спиновых состояниях выражаются через функции  $\alpha(r_{12})$  и  $\beta(r_{12})$  простыми соотношениями:

$$V_s = \alpha(r_{12}) - 3\beta(r_{12}),$$

$$V_t = \alpha(r_{12}) + \beta(r_{12}).$$

Если ограничиться простейшей формой зависимости потенциала от радиуса (в виде прямоугольной ямы определенного радиуса), то из значения энергии связи дейтрона можно определить только произведение квадрата радиуса на «глубину» потенциальной ямы для триплетного спинового взаимодействия.

Более полные сведения о потенциале взаимодействия двух нуклонов можно получить при изучении рассеяния нуклонов на нуклонах (см. главу VII).

## § 12. Нецентральный характер ядерных сил

Наличие квадрупольного момента  $Q = 2,74 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$  у основного состояния дейтрона указывает на то, что это состояние не может быть чистым  $S$ -состоянием, а должно содержать и состояния с орбитальным моментом не ниже  $l=2$ . Отличие магнитного момента дейтрона ( $\mu_d = 0,86\mu_0$ ) от суммы магнитных моментов протона и нейтрона ( $\mu_p + \mu_n = 0,88\mu_0$ ) также указывает на то, что в значение магнитного момента дейтрона вносит небольшой вклад орбитальное движение нуклонов, чего не было бы в чистом  $S$ -состоянии.

Для объяснения квадрупольного момента дейтрона приходится допустить, что ядерные силы между двумя нуклонами не являются

центральными, а зависят не только от расстояния между нуклонами, но и от ориентации спинов нуклонов по отношению к линии, соединяющей нуклоны. В системе с нецентральной силой орбитальный момент не сохраняется, поэтому нельзя классифицировать состояния такой системы по значениям орбитального момента ( $S, P, D, \dots$ ).

Нецентральную часть взаимодействия между нуклонами называют *тензорным потенциалом*. Обычно тензорный потенциал

$$\gamma(r_{12})S_{12} \quad (12,1)$$

определяется так, чтобы он равнялся нулю при пространственном усреднении. Из векторов  $r_{12}$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  можно построить только одну скалярную величину  $S_{12}$ , удовлетворяющую указанным выше условиям

$$S_{12} = \frac{3(\sigma_1 r_{12})(\sigma_2 r_{12})}{r_{12}^2} - \sigma_1 \sigma_2. \quad (12,1a)$$

Тензорный потенциал (12,1) является скаляром, поэтому полный момент системы и ее четность должны оставаться интегралами движения и при наличии тензорных сил. Орбитальный и спиновый моменты количества движения в общем случае не будут интегралами движения. Можно, однако, показать, что в системе двух тел квадрат полного спинового момента еще является интегралом движения. Действительно, выражая скалярное произведение  $\sigma_1 \sigma_2$  через вектор полного спина системы  $S = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$ , запишем (12,1a) в виде

$$S_{12} = 6 \frac{(Sr_{12})^2}{r_{12}^2} - 2S^2. \quad (12,2)$$

Отсюда следует, что  $S_{12}$  коммутирует с  $S^2$ . Кроме того,  $\sigma_1 \sigma_2$  также коммутирует с  $S^2$ . Следовательно, и потенциал взаимодействия между двумя нуклонами, имеющий вид

$$V = \alpha(r_{12}) + \beta(r_{12})\sigma_1 \sigma_2 + \gamma(r_{12})S_{12}, \quad (12,3)$$

коммутирует с  $S^2$ , т. е. квадрат полного спина системы является интегралом движения и при наличии тензорных сил. Из (12,2) следует, что в синглетном состоянии ( $S=0$ )  $S_{12}=0$ , т. е. тензорные силы вообще отсутствуют. Итак, в системе двух нуклонов с потенциалом взаимодействия (12,3) должны сохраняться: а) полный момент системы  $J$  и его проекция на ось  $z$ ; б) четность волновых функций и в) полный спин системы. Значения орбитального момента  $L$  в общем случае сохраняться не будут.

Основное состояние дейтрона принадлежит к триплетному спиново-му состоянию  $S=1$ , имеет полный момент  $J=1$  и положительную четность, так как в приближении центральных сил четность функции была положительной, а тензорное взаимодействие не меняет четности. Поэтому из всех возможных, указанных в таблице 6 состояний системы двух нуклонов, в основном состоянии дейтрона могут присутствовать

только состояния  ${}^3S_1$  и  ${}^3D_1$ . Наличие  ${}^3D_1$  состояния в дейтроне обуславливает отклонение распределения заряда от сферически симметричного. Для получения правильной величины квадрупольного момента дейтрона и отклонения величины магнитного момента дейтрона от простой суммы магнитного момента протона и нейтрона приходится допустить, что доля  ${}^3D_1$ -состояния в дейтроне составляет примерно  $40\%$ .

Малый квадрупольный момент дейтрона еще не свидетельствует о малой величине тензорных сил. На основе имеющихся экспериментальных данных нельзя сделать однозначного выбора величины потенциала взаимодействия тензорных сил, даже при фиксированной форме потенциала, например прямоугольной потенциальной яме. Можно увеличить вклад тензорных сил, компенсируя это увеличение соответствующим уменьшением центральных сил. Значение радиуса действия и величина тензорных сил, вообще говоря, не очень сильно отличаются от соответствующих величин центральных сил. Возможно, что потенциал взаимодействия тензорных сил имеет несколько больший радиус действия и менее глубок, чем потенциал центральных сил.

### § 13. Проблема насыщения ядерных сил

При изучении ядер с числом нуклонов, превышающем два, возникает прежде всего вопрос о том, не изменяются ли силы взаимодействия между двумя нуклонами, если около них находятся другие нуклоны. Другими словами, можно ли представить взаимодействие между  $N$  нуклонами как сумму взаимодействий между всеми парами нуклонов:

$$V = \sum_{i < j}^A V_{ij}. \quad (13,1)$$

В настоящее время еще нет достаточно убедительного однозначного ответа на этот вопрос. Представляют большой интерес попытки объяснить наблюдаемые свойства ядер путем выбора специального вида  $V_{ij}$ , исходя из предположения, что (13,1) справедливо.

Покажем, что если потенциал взаимодействия  $V_{ij}$  между нуклонами  $i$  и  $j$  в (13,1) выбирается в виде парных сил притяжения, то нельзя объяснить наблюдаемое на опыте приблизительное постоянство плотности вещества и энергии связи, приходящейся на один нуклон в ядре. Если допустить, что ядерные силы между нуклонами не зависят от их зарядового состояния, то согласно (13,1) потенциальная энергия взаимодействия при увеличении числа нуклонов должна расти пропорционально числу пар взаимодействующих частиц, т. е.

$$\bar{V} = \frac{A(A-1)}{2} \bar{V}_{12},$$

где  $\bar{V}_{12}$  — средняя энергия взаимодействия двух нуклонов.

Предположим, что потенциальная энергия взаимодействия между двумя нуклонами может быть представлена в виде ямы ширины  $d$  и