

Изучая рассеяние электронов высокой энергии на нуклонах можно получить сведения о распределении электрического заряда и магнитного момента нуклона. Такие опыты были поставлены Хофштадтером с электронами, имеющими энергию до нескольких сотен мегаэлектронвольт.

Результаты измерений подтвердили, что нуклоны обладают неоднородной структурой — плотной сердцевиной (кernом) и менее плотной оболочкой (рис. 25).

В распределении заряда в нуклоне можно выделить три области: 1) сердцевину с положительным зарядом, как у протона, так и у нейтрона. В этой области, радиус которой составляет около  $4 \cdot 10^{-14}$  см, сосредоточено примерно 0,4 общего заряда протона;

2) среднюю часть положительную у протона и отрицательную у нейтрона (на ее долю приходится 0,5 заряда протона); предполагают, что эта часть связана с виртуальными  $\pi$ -мезонами;

3) наружную часть, имеющую форму плавного спада, одинакового у протона и нейтрона (на долю этой области приходится примерно 0,1 заряда протона).

Однако необходимо заметить, что эти результаты получены в предположении о справедливости электродинамики на расстояниях, меньших  $10^{-14}$  см. Окончательный вывод о структуре нуклона можно будет получить в результате дальнейших исследований с помощью электронов значительно более высокой энергии.

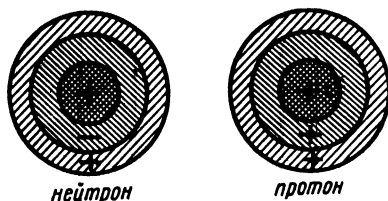


Рис. 25. Структура нейтрона и протона

### § 13. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ДЕЙТОНА

Рассмотрим теперь самое простое ядро, состоящее из двух частиц: протона и нейтрона — изотоп водорода  $H_1^2$ , называемый дейтоном ( $D_1^2$ ).

Исследование такого простого образования позволяет с высокой достоверностью получать информацию о законах действия ядерных сил и проверять справедливость основных теоретических построений. Однако, несмотря на простоту структуры дейтона и на то, что изучение его ведется во многих лабораториях, некоторые детали строения дейтона до конца еще не выяснены.

Как уже говорилось, многие проявления ядерных сил мало зависят от точного вида потенциала взаимодействия, поэтому для

простоты можно принять, что потенциальная яма имеет прямоугольную форму (рис. 26). Другими словами, пренебрегая пока зависимостью сил от спина и нецентральный характером этих сил, положим

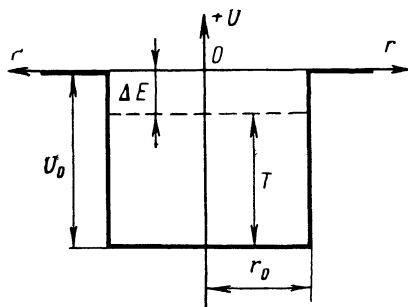


Рис. 26. Прямоугольная потенциальная яма дейтона

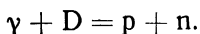
$$U = -U_0 \quad \text{при } r \leq r_0;$$

$$U = 0 \quad \text{при } r > r_0.$$

Расстояние между протоном и нейтроном  $r$ , центр одного из нуклонов будем считать за начало отсчета.

Образование связанной системы при сближении двух частиц должно сопровождаться выделением энергии. Такую же

энергию нужно вернуть, чтобы их снова разделить. Если облучать дейтон  $\gamma$ -лучами, то при определенной энергии  $\gamma$ -лучей он распадается на протон и нейтрон:



Минимальная энергия  $\gamma$ -квантов, при которой идет реакция  $E_\gamma = 2,23 \text{ Мэв}$ . Очевидно, что величина  $E_\gamma$  и определяет энергию связи двух частиц в ядре —  $\Delta E$ .

Малость величины  $\Delta E$  по сравнению со средней энергией связи нуклона в ядрах ( $\sim 8 \text{ Мэв}$ ) указывает на то, что в дейтоне нуклоны слабо связаны. Пунктиром на рис. 26 показан уровень энергии связи  $\Delta E$ . Если сообщить такую энергию нуклону в дейтоне, то нуклон получит возможность выйти из потенциальной ямы, т. е. ядро развалится.

Из классических представлений можно было ожидать, что уровень энергии связи одновременно должен быть дном потенциальной ямы. Однако для квантовых частиц это не так. Обратимся опять к соотношению неопределенностей для координаты и импульса:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar.$$

Если нуклон находится внутри потенциальной ямы, то неопределенность его положения  $\Delta x$  не больше, чем  $r_0$ .  $\Delta x \leq r_0$  и, следовательно,

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{r_0}.$$

Так как среднее значение импульса не может быть меньше неопределенности его величины ( $\Delta p$ ), то это означает, что части-

цы, запертые в такой потенциальной яме, не могут находиться в состоянии покоя, а должны обладать кинетической энергией, по меньшей мере равной  $T = (\Delta p)^2/2M$  или

$$T \geq \frac{\hbar^2}{2Mr_0^2}, \quad (34)$$

где  $M = \frac{m_p m_n}{m_p + m_n} \approx \frac{m}{2}$  — приведенная масса протона и нейтрона.

Следовательно, внутри ямы покоящихся нуклонов нет и в принципе не может быть, ядро является динамической системой.

Если сблизить нуклоны на расстояние, меньшее  $r_0$ , то кинетическая энергия возрастет настолько, что ядро потеряет устойчивость. Для того чтобы частица оставалась связанной, глубина ямы должна превышать кинетическую энергию связи. Таким образом, потенциальная энергия системы, равная  $-U_0$ , равна сумме кинетической энергии частицы  $T$  и ее энергии связи  $\Delta E$ :

$$|U_0| = T + \Delta E.$$

Однако величина  $\Delta E$  у дейтона вообще мала по сравнению с  $U_0$  (как мы увидим ниже) и можно написать

$$U_0 \approx T \approx \frac{\hbar^2}{mr_0^2}. \quad (35)$$

Таким образом, с точки зрения квантовой механики связанное состояние может существовать только в таких потенциальных ямах, глубина и ширина которых связаны соотношением (35).

Это условие устойчивости задает произведение глубины потенциальной ямы ( $U_0$ ) на квадрат ее ширины ( $r_0^2$ )

$$U_0 r_0^2 = \frac{\hbar^2}{m}. \quad (36)$$

Из формулы (36) можно определить глубину потенциальной ямы для дейтона, полагая  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-13}$  см:

$$U_0 = \frac{\hbar^2}{r_0^2 m} \approx \frac{10^{-54}}{2 \cdot 10^{-26} \cdot 1,6 \cdot 10^{-24} \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}} \approx 30 \text{ Мэв}.$$

Поскольку энергия связи дейтона составляет всего 2,23 Мэв, то нормальный уровень его кинетической энергии лежит очень близко от края ямы, что соответствует малой устойчивости дейтона. Максимальная кинетическая энергия нуклонов в ядре —

30 Мэв — все же мала по сравнению с  $mc^2$ , т. е. нуклоны в ядре движутся с нерелятивистскими скоростями ( $v < c$ ).

Более строгое рассмотрение показывает, что в дейтоне среднее расстояние между нуклонами больше радиуса действия ядерных сил  $r_0$ , т. е. часть времени нуклоны проводят вне потенциальной ямы, в области  $r > r_0$ . В соответствии с этим волновая функция внутреннего движения в дейтоне имеет вид, показанный на рис. 27.

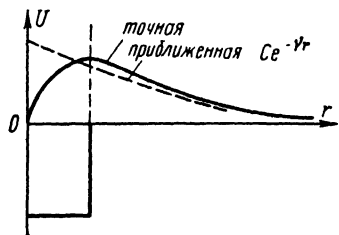


Рис. 27. Волновая функция дейтона

**Магнитный момент дейтона.** Можно ожидать, что суммарный магнитный момент системы, состоящей из  $p$  и  $n$ , равен сумме магнитных моментов  $p$  и  $n$ . Поскольку магнитные моменты связаны со спинами и могут быть либо параллельны, либо анти-

параллельны, то они должны складываться.

Магнитный момент дейтона, определенный из опыта,

$$\mu_d = 0,85735\mu_0.$$

Этому значению близка сумма магнитных моментов протона и нейтрона

$$\mu_p + \mu_n = (2,79255 - 1,91280)\mu_0 = 0,87975\mu_0.$$

Но отличие от опытного значения ( $0,0224\mu_0$ ) выходит за пределы экспериментальных погрешностей ( $+0,00007$ ). Чем же объясняется это расхождение?

Спин суммарной системы может иметь два значения:

$$S = S_n + S_p = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}.$$

Из сверхтонкой структуры спектра дейтерия следует, что суммарный полный момент количества движения дейтона  $I = L + S$  имеет значение  $I = 1$ .

В то же время изучение ядерных реакций с дейтоном показало, что  $L$  этой частицы может принимать только четные значения ( $0, 2, 4, \dots$ ). Следовательно, дейтон может находиться либо в состоянии  $S$  ( $L = 0, S = 1, I = L + S = 1$ ), либо в состоянии  $D$  ( $L = 2, S = -1, I = L + S = 1$ ), либо же основное состояние дейтона является суперпозицией этих состояний с разными  $L$  ( $S$  и  $D$ ).

Состояние, соответствующее  $L = 4$ , уже не может быть, так как для него спин дейтона должен быть равен  $-3$  ( $I = 4 - 3 = 1$ ). Приближенное рассмотрение показало, что основное состояние дейтона неплохо описывается  $S$ -состоянием с небольшой примесью  $D$ -состояния, в котором сумма спинов нуклонов направлена обрат-

но орбитальному моменту. Примесь  $D$ -состояния возникает именно потому, что силы между протоном и нейтроном не центральны, т. е. сферически не симметричны.

Для дейтона, находящегося в  $S$ -состоянии с  $L=0$ , магнитные моменты складываются арифметически. Состояние с  $L=2$  дает дополнительный вклад орбитального магнитного момента в полный магнитный момент системы. Экспериментальное значение среднего  $\mu_d$  получается при допущении, что дейтон 96% своего времени проводит в состоянии  $S$  и только 4% времени — в состоянии  $D$ .