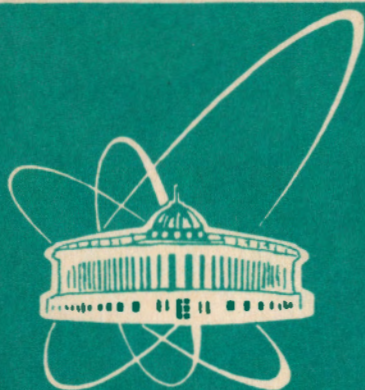


93-29



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P15-93-29

С.Б.Борзаков

NN -ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В 1S_0 -СОСТОЯНИИ:
ВИРТУАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ
ИЛИ ДИБАРИОННЫЙ РЕЗОНАНС?

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1993

Результаты работ /1-3/ указывают на существование квазистационарного или связанного состояния двух нуклонов. Вероятнее всего, это состояние имеет изотопический спин $I = 1$. В силу изотопической инвариантности нейтрон и протон также должны образовывать квазистационарное состояние с $I = 1$ и полным спином $J = 0$ с массой, близкой к сумме масс двух нуклонов. Этот резонанс должен проявляться в np -рассеянии, радиационном захвате нейтронов протонами, а также в рассеянии γ -квантов дейтронами. В данной работе обсуждаются различные модели NN -рассеяния при низких энергиях и возможные эксперименты по поиску возбуждённого состояния дейтрона.

Нуклон-нуклонное взаимодействие при низких энергиях возможно в двух спиновых состояниях: $S = 0$ и $S = 1$ (мы рассматриваем s -рассеяние). np - и pp -рассеяние происходит лишь в синглетном состоянии ($S = 0$); поскольку триплетные состояния запрещены принципом Паули. В случае np -взаимодействия возможно рассеяние как в синглетном (1S_0), так и в триплетном (3S_1) состояниях.

Общепринятой моделью NN -взаимодействия является теория эффективного радиуса /4/. Согласно этой модели, для каждого спинового состояния зависимость амплитуды рассеяния от импульса налетающего нуклона характеризуется двумя параметрами: длиной рассеяния a и эффективным радиусом взаимодействия r_0 :

$$f = \frac{1}{-1/a + (\gamma_0/2)k^2 - 1/k} \quad (1)$$

Для pp -рассеяния развита теория эффективного радиуса, учитывающая кулоновское взаимодействие. Амплитуда рассеяния для pp -взаимодействия может быть представлена в следующем виде /5/:

$$f^+ = \frac{1}{-1/a_p + (\gamma_{op}/2)k^2 + P \cdot k^4 + Q \cdot k^6 - 1/k} \quad (2)$$

В настоящее время параметры рассеяния определены с хорошей точностью для np - и pp -рассеяния. В случае nn -рассеяния прямое экспериментальное определение сечения взаимодействия затруднено, поскольку не существует нейтронной мишени, однако известен ряд работ по определению параметров nn -рассеяния из данных по взаимодействию в конечном состоянии двух нейтронов, образующихся в результате какой-либо реакции.

Зная параметры рассеяния, можно определить полюса S -матрицы, используя соотношение

$$S = 1 + 2 i k f. \quad (3)$$

Как известно, полюсам S -матрицы, расположенным на мнимой оси, соответствуют связанные или виртуальные состояния. Согласно (1) и известным значениям параметров рассеяния

$$a_t = 5.414 \text{ Fm} \quad r_{ot} = 1.75 \text{ Fm}$$

для np -взаимодействия в 3S_1 -состоянии полюс S -матрицы расположен при $\text{Re } k = 0.23 > 0$. Соответствующая энергия порядка 2.2 МэВ. Предполагается, что этот полюс описывает основное состояние дейтрона. В случае 1S_0 -состояния полюс S -матрицы находится на мнимой оси в нижней полуплоскости и соответствует определению виртуального состояния. Отсюда был сделан вывод, что np (1S_0)-система не имеет связанного состояния. Аналогично, в силу изотопической инвариантности, делается вывод о том, что два нейтрона также не образуют связанного состояния. При этом предполагается, что амплитуда nn -взаимодействия имеет вид (1), хотя в принципе знак реальной части амплитуды nn -взаимодействия может быть обратным, и тогда те же значения длины рассеяния и эффективного радиуса соответствовали бы связанному состоянию.

Используя известные параметры pp -взаимодействия, Кок вычислил положение полюса S -матрицы^{6/}. Оказалось, что соответствующая энергия комплексна, причём $\text{Re}(E) < 0$:

$$E = -140 - i 467 \quad (\text{кэВ})$$

Физический смысл этого состояния в работе не обсуждается.

Следует отметить, что теория эффективного радиуса не является строгой теорией и обладает рядом недостатков. Например, эта модель предсказывает глубоко лежащие связанные состояния, не имеющие физического смысла. Поэтому выводы, следующие из этой модели, нуждаются в тщательной экспериментальной проверке.

Существуют также другие подходы к описанию нуклон-нуклонного взаимодействия. Например, NN -рассеяние при низких энергиях можно описать с помощью R -матрицы. Впервые, видимо, это отметил Ма в работе

1953 г.^{7/}. Согласно Ма, полюс R -матрицы определяется длиной рассеяния и эффективным радиусом:

$$E_r = \frac{2 h^2}{a r_0 2 \mu} \quad (4)$$

Здесь μ - приведённая масса NN -системы.

Для 1S_0 -состояния $E_r < 0$. Описание np -взаимодействия с помощью квазистационарного уровня с отрицательной энергией позволяет также описать радиационный захват^{8/}. Из данных по рассеянию и радиационному захвату можно сделать оценки положения и времени жизни квазистационарного состояния:

$$E_r = -1.3 \text{ MeV}, \quad \tau = 10^{-15} \text{ сек.}$$

Эти оценки носят качественный характер, поскольку введение кора может существенно изменить положение уровня.

Таким образом, различные модели приводят к противоположным выводам относительно существования связанного 1S_0 -состояния. Следовательно, необходимо экспериментальное исследование этого вопроса.

Квазистационарное состояние с $J = 0$ может быть обнаружено в радиационном захвате нейтронов протонами с испусканием двух γ -квантов. Оценим вероятность такого процесса. Захват возможен из 3S_1 -состояния непрерывного спектра. Матричный элемент перехода аналогичен приведённому в^{5/} матричному элементу M_1 -перехода из 1S_0 -состояния в основное состояние дейтрона 3S_1 :

$$M = \int \psi_f({}^1S_0) M_1 \psi_i({}^3S_1) dr. \quad (5)$$

В нашем случае в качестве волновых функций начального и конечного состояний нужно подставить:

$$\begin{aligned} \psi_i &= \chi_t \sin(kr + \delta) / k, \\ \psi_f &= \chi_s C_f \exp(-\gamma_0 r), \end{aligned} \quad (6)$$

где δ_t - фаза рассеяния в триплетном состоянии и γ_0 - соответствует энергии связи 1S_0 уровня. Используя вычисления^{5/}, получим отношение сечений с испусканием двух и одного γ -кванта для тепловых нейтронов:

$$\frac{\sigma_{2\gamma}}{\sigma_\gamma} = \frac{(\gamma_0 - 1/a_t)^2 (k + 1/a_s)^2}{(k^2 + 1/a_t^2) (\gamma - 1/a_s)^2} = 10^{-3} - 10^{-4}. \quad (7)$$

Этот результат объясняет, почему 1S_0 уровень не был обнаружен экспериментально.

Другой реакцией, в которой мог бы проявиться 1S_0 - уровень, является резонансное рассеяние γ - квантов дейтронами. Сечение рассеяния γ - квантов с возбуждением квазистационарного состояния описывается формулой Брейта - Вигнера:

$$\sigma = \frac{\pi}{k_\gamma^2} \frac{g \Gamma_\gamma \Gamma_t}{(E_\gamma - E_0)^2 + \Gamma^2 / 4} \quad (8)$$

Здесь $k_\gamma = E_\gamma / (\hbar c)$. Поскольку при $E_\gamma < 2.2$ МэВ закрыт канал распада $\gamma + d \rightarrow n + p$, $\Gamma_t = \Gamma_\gamma$ и при $E_\gamma = E_0$ получим:

$$\sigma_{\gamma\gamma} = \pi / k_\gamma^2 \quad (9)$$

Легко получить, что сечение рассеяния достигает величины порядка сотен барн в максимуме, однако ширина резонанса мала (~ 1 эВ), что осложняет возможность его экспериментального обнаружения.

Экспериментально можно наблюдать резонансное рассеяние γ - квантов, падающих на дейтронную мишень, регистрируя рассеянные γ - кванты с помощью Ge(Li)-детектора. Оценки показывают, что плотности потока γ - квантов $1 - 10 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$ вполне достаточно для обнаружения возбужденного уровня дейтрона.

Литература

1. Seth K.K., Parker B. - Phys. Rev. Lett., 1991, V.66, No.19; p.2448.
2. Бочкарёв О.В. и др. - ЯФ, 1987, т.46, вып.1/7/, с.12.
3. Zhang Ying-Ji et. al. Phys. Rev. C; 1992, V. C45, No.2, p.528.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. - Квантовая механика, М., Наука, 1989.
5. Браун Дж.Е., Джексон А.Д. - Нуклон-нуклонные взаимодействия, М., Атомиздат, 1979.
6. Kok L.P. - Phys. Rev. Lett., 1980, V.45, No. 6, p.427.
7. Ma S.T. - Rev. Mod. Phys., 1953, 25, p.853.
8. Борзаков С.Б. - Сообщения ОИЯИ P15-89-430, Дубна, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел

2 февраля 1993 года.