

## ЧТО МОЖНО УЗНАТЬ О $P$ -ВОЛНОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ $N\bar{N}$ ИЗ ИЗУЧЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРА ПРОТОНИЯ

В.Е.Маркушин

Новые указания на существование вблизипороговых  $P$ -волновых состояний квазиядерного бариония получены из теоретического анализа рентгеновского спектра протония, измеренного группой ASTERIX в ЦЕРНе.

Попытки обнаружить рентгеновские переходы в основное состояние  $\bar{p}p$  атома <sup>1,2</sup> недавно увенчались успехом <sup>3</sup> благодаря вводу в строй низкоэнергетического антипротонного кольца (LEAR) в ЦЕРНе. Ранее неоднократно указывалось, что измерение ядерного сдвига и ширины уровня  $1s$  и ширины уровня  $2p$  протония представляет большой интерес для теории низкоэнергетического  $N\bar{N}$ -взаимодействия и, в частности, для физики бариония (см. <sup>4</sup> и ссылки там). В данной статье мы хотим прокомментировать с этой точки зрения результаты по рентгеновскому спектру протония, полученные группой ASTERIX.

Аннигиляционная ширина  $2p$  уровня  $\Gamma_{2p}^a$  может быть извлечена из данных по интенсивностям рентгеновских линий  $L$ -серии и линии  $K_\alpha$  с использованием уравнений баланса для заселенности  $p_{2p}$  уровня  $2p$  протония в газообразном водороде

$$p_{2p} = \sum_{n \geq 3} Y_{nd \rightarrow 2p}, \quad (1a)$$

$$Y_{2p \rightarrow 1s} = p_{2p} \Gamma_{2p}^\gamma / (\Gamma_{2p}^a + \Gamma_{2p}^\gamma). \quad (1b)$$

Здесь  $Y_{nl \rightarrow n'l'}$  – интенсивности радиационных переходов  $nl \rightarrow n'l'$ ,  $\Gamma_{2p}^\gamma = 3,8 \cdot 10^{-4}$  эВ – радиационная ширина уровня  $2p$ . Уравнения (1) написаны в предположении, что штарковское смешивание  $2p - 2s$  пренебрежимо мало, а уровень  $2p$  заселяется преимущественно радиационными переходами. Эти предположения заведомо выполняются при плотности водорода  $N \lesssim 5 \cdot 10^{-2} N_0$  ( $N_0$  – плотность жидкого водорода) и, в частности, для газообразного водорода при нормальных условиях <sup>5</sup>.

Из (1) следует

$$Y_{2p \rightarrow 1s} / \sum_{n \geq 3} Y_{nd \rightarrow 2p} = (1 + \eta)^{-1},$$

где  $\eta = \Gamma_{2p}^a / \Gamma_{2p}^\gamma$  – отношение аннигиляционной и радиационной ширин уровня  $2p$ .

Радиационная и аннигиляционная ширины уровня  $2p$  определяются формулами

$$\Gamma_{2p}^\gamma = (2/3)^8 M \alpha^5,$$

$$\Gamma_{2p}^a = 3M^4 \alpha^5 \text{Im } A / 8,$$

где  $M = m_p / 2$  – приведенная масса  $\bar{p}p$  атома,  $\alpha = 1/137$ ,  $A = \lim_{k \rightarrow 0} [t_1(k)k^{-2}]$  – так называемый

$P$ -волновой объем рассеяния, определяемый поведением  $P$ -волновой амплитуды  $t_1(k)$  протон-антипротонного рассеяния при малых относительных импульсах  $k$ . Для отношения ширины  $\eta$  имеем:

$$\eta^{\text{теор}} = (3^9 / 2^{14}) m_p^3 \text{Im } A. \quad (2)$$

Благодаря малости аннигиляционного радиуса  $r_a \sim 1/2m_p = 0,1$  Ф в сравнении с радиусом действия ядерных сил  $R \sim 1$  Ф для мнимой части  $P$ -волнового объема рассеяния имеет место соотношение факторизации <sup>4,6</sup>

$$\text{Im } A = |f_1(0)|^{-2} \text{Im } \bar{A} \equiv g_1(0) \text{Im } \bar{A}. \quad (3)$$

Здесь  $\text{Im } \bar{A} \sim r_a^3$  — величина определяемая собственно аннигиляционными процессами,  $f_1(k)$  —  $P$ -волновая функция Йоста для ядерного потенциала. Величина  $g_1(k) = |f_1(k)|^{-2}$  называется коэффициентом усиления и характеризует интенсивность ядерного взаимодействия в системе  $N\bar{N}$ <sup>4</sup>.

Используя соотношение факторизации (3), запишем формулу (2) в следующем виде:

$$\eta^{\text{теор}} = (3^9/2^{17}) g_1(0) = 0,15 g_1(0).$$

Таким образом, отношение аннигиляционной и радиационной ширин уровня  $2p$  протония характеризует интенсивность ядерного взаимодействия  $\bar{p}p$  при  $k \rightarrow 0$ . В эксперименте ASTERIX<sup>3</sup> для отношения интенсивностей  $K_\alpha$ -линии к суммарной интенсивности линий  $L$ -серии было получено значение

$$Y_{2p \rightarrow 1s} / \sum_{n \geq 3} Y_{nd \rightarrow 2p} = (2,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-2}.$$

Отсюда находим  $\eta^{\text{эксп}} \cong 0,4 \cdot 10^2$  и  $\Gamma_{2p}^a \sim 10^{-2}$  эВ, что соответствует  $g_1(0) \sim 10^2$ . Такое большое значение коэффициента усиления указывает на наличие интенсивного ядерного притяжения между  $p$  и  $\bar{p}$  в  $P$ -волне.

Для количественного выяснения роли ядерного притяжения в работе<sup>7</sup> были вычислены парциальные ( $l = 0, 1, 2$ ) аннигиляционные сечения  $\sigma_a^{(l)}$  с использованием реалистического потенциала однобозонного взаимодействия и аннигиляционные сечения  $\bar{\sigma}_a^{(l)}$  при "выключенном" ядерном взаимодействии. Расчет показал резкий рост  $P$ -волнового коэффициента усиления  $g_1(k) = \sigma_a^{(1)} / \bar{\sigma}_a^{(1)}$  при приближении к порогу  $N\bar{N}$ , связанный с наличием богатого семейства подпороговых квазиядерных  $P$ -уровней. Значение  $g_1(0)$  может варьироваться в пределах  $10 \div 10^2$  при изменении параметров модели (изменении положения уровней квазиядерного бариония).

На основании этих расчетов мы можем заключить, что большая аннигиляционная ширина уровня  $2p$  протония, установленная в эксперименте<sup>3</sup>, имеет естественное объяснение в квазиядерном подходе к системе  $N\bar{N}$  и представляет дополнительное указание на существование вблизипороговых состояний квазиядерного бариония с угловым орбитальным моментом  $l = 1$ .

Автор благодарен И.С.Шапиро и О.Д.Далькарову за обсуждения.

#### Литература

1. Auld E.G., Averdung H., Bailey J.M. et al. Phys. Lett., 1978, 77B, 454.
2. Izzycki M., Backenstoss G., Tauscher L. et al. Z. Phys., 1980, A297, 1.
3. Landua R. Discovery of transitions to ground state of  $\bar{p}p$  atom. Talk given at The VII European Symposium on Antiproton Interactions, Durham, UK, July 1984; Killian K., Bonner B. Talk given at The IX European Conference on Few Body Problems in Physics, Tbilisi, August 1984.
4. Шапиро И.С. УФН, 1978, 125, 577; Phys. Rep., 1978, 35C, 129.
5. Markushin V.E. Preprint ИТЭР-65, 1980.
6. Шапиро И.С., Богданова Л.Н., Маркушин В.Е. Труды международного симпозиума по проблеме нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979, с. 107.
7. Далькаров О.Д., Тляев Р.Т., Шапиро И.С. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 38; Препринт ФИАН № 21, 1984.