

## СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ПИОННЫМ АТОМАМ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ

*В.М.Колыбасов, А.Е.Кудрявцев*

Анализ последних данных по сдвигам  $1s$ -уровней пионных атомов водорода и дейтерия дает новые значения величин изосинглетной и изотриплетной длин  $\pi N$ -рассеяния, противоречащие результатам, полученным на основе дисперсионных соотношений.

Появившиеся недавно предварительные данные по сдвигам  $1s$ -уровней пионных атомов водорода и дейтерия<sup>1</sup> позволяют получить новую оценку изосинглетной ( $b_0$ ) и изотриплетной ( $b_1$ ) длин  $s$ -волнового пион-нуклонного рассеяния. (Напомним, что амплитуда пион-нуклонного рассеяния при нулевой энергии есть

$$a_{\pi N} = b_0 + b_1 \mathbf{t} \vec{\tau}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{t}$  и  $\vec{\tau}$  – операторы изоспина пиона и нуклона).

Сдвиг энергии  $1s$ -уровня пионного атома за счет сильного взаимодействия простым образом связан с длиной рассеяния пиона на соответствующем ядре (обозначим ее через  $a$ )<sup>2</sup>:

$$\Delta E = - \frac{2\pi}{m} a |\psi_{1s}(0)|^2, \quad (2)$$

Здесь  $m$  – приведенная масса пиона и ядра,  $\psi_{1s}(0)$  – значение кулоновской волновой функции в нуле. В силу малости  $a$  по сравнению с боровским радиусом системы  $a/a_B \sim 10^{-3}$ ,

поправки к этому соотношению для систем  $\pi^-p$  и  $\pi^-d$  пренебрежимо малы (см. <sup>3</sup>). В свою очередь длины рассеяния пионов на легчайших ядрах связаны с величинами  $b_0$  и  $b_1$ . Для рассеяния на протоне

$$a_{\pi^-p} = b_0 - b_1. \quad (3)$$

Для дейтерия соответствующая связь не столь проста. Наглядная методика расчета величины  $a_{\pi d}$  была развита в работах <sup>4-6</sup>. Там при рассмотрении ряда многократного рассеяния было показано, что основной вклад вносят процессы одно- и двукратного рассеяния пиона на нуклонах, причем существенен учет эффекта схода амплитуд с энергетической поверхности, отдачи нуклонов (их нестатичности) и энергии связи дейтрона. Вклад  $p$ -волновой части  $\pi N$ -взаимодействия и перерассеяний более высокого порядка оказался весьма мал. Вклад абсорбтивного канала в действительную часть  $a_{\pi d}$  также невелик и брался из работы <sup>7</sup>. Для нас сейчас существенно то, что с точностью до малых поправок  $a_{\pi d}$  выражается через линейную и квадратичную комбинацию  $b_0$  и  $b_1$ . Поэтому, зная эту комбинацию из работ <sup>4-6</sup> и учитывая соотношение (2), легко решить обратную задачу — найти  $b_0$  и  $b_1$  по известным  $a_{\pi^-p}$  и  $a_{\pi^-d}$ .

В работе <sup>1</sup> получен сдвиг  $1s$ -уровня пионного атома протона, равный  $-12,1 \pm 2,9$  эВ, а для пионного атома дейтерия  $4,8 \pm 2,3$  эВ. Измерения на пионном атоме протона выполнены впервые, а результат для случая дейтерия находится в хорошем согласии с данными работы <sup>8</sup>. Приведенным выше величинам сдвигов отвечают следующие длины рассеяния:

$$a_{\pi^-p} = (0,151 \pm 0,035) \mu^{-1}; \quad a_{\pi d} = (-0,052 \pm 0,025) \mu^{-1},$$

где  $\mu$  — масса  $\pi$ -мезона,  $\mu^{-1} = 1,414 \Phi$ . Анализ, проведенный нами в соответствии с рассмотренной ранее схемой, дает отсюда

$$\begin{aligned} b_0 &= (0,004 \pm 0,017) \mu^{-1}, \\ b_1 &= (-0,147 \pm 0,035) \mu^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Уточнение данных по сдвигам  $1s$ -уровней пионных атомов протона и дейтерия позволило бы существенно уменьшить погрешности в определении  $b_0$  и  $b_1$ .

Перейдем к сопоставлению полученных результатов для  $b_0$  и  $b_1$  с известными ранее значениями. Имеется большое число работ, в которых  $b_0$  и  $b_1$  получались экстраполяцией данных  $\pi N$ -рассеяния при энергиях от нескольких ГэВ до 30 МэВ с использованием либо дисперсионных соотношений, либо других аналитических методов (см., например, компиляцию <sup>9</sup>). Для  $b_0$  получен спектр значений от  $-0,030$  до  $0,009 \mu^{-1}$ . Разброс значений  $b_1$  существенно меньше — в интервале  $(-0,08 \div -0,10) \mu^{-1}$ . В обзоре <sup>10</sup> приводятся как наиболее правдоподобные цифры

$$b_0 = (-0,013 \pm 0,003) \mu^{-1}; \quad b_1 = (-0,092 \pm 0,001) \mu^{-1}.$$

Таким образом для величины  $b_1$  имеется существенное противоречие с (4). Ситуация с  $b_0$  менее определенная вследствие больших погрешностей в ее определении (4).

При анализе данных по пионным атомам сложных ядер обычно используется оптический потенциал Кисслингера — Эриксонов с одним из входных параметров  $b_1 = -0,08 \mu^{-1}$  <sup>10</sup>. Однако использование величины  $b_1 = -0,12 \mu^{-1}$  дает несколько не худшее описание экспериментальных данных по сдвигам и ширинам  $s$ -уровней (см. <sup>10</sup>, стр. 202, 203). Таким образом, здесь прямого противоречия с (4) нет.

Данные по сдвигу  $1s$ -уровня пионного атома  ${}^4\text{He}$  ( $\Delta E \sim 76 \div 80$  эВ <sup>10</sup>) оказываются для нас не критичными, т. к. в их описании входит квадратичная комбинация  $b_0$  и  $b_1$ , близкая к той, через которую выражается  $a_{\pi d}$ , и если  $b_0$  и  $b_1$  таковы, что хорошо воспроизво-

дят длину пион-дейтронного рассеяния, то они почти автоматически хорошо опишут и длину рассеяния  $\pi^4\text{He}$ . Укажем, что для так называемой величины  $b_0^{\text{эфф}}$ , используемой в работе <sup>11</sup> для описания рассеяния  $\pi^4\text{He}$  и выражающейся через  $b_0$  и  $b_1$ , из (4) получается оценка  $(-0,029 \pm 0,011) \mu^{-1}$ . Для объяснения экспериментальных данных требуется  $b_0^{\text{эфф}} = (-0,023 \pm 0,001) \mu^{-1}$ .

Более интересная ситуация с пионным атомом  $^3\text{He}$  (сдвиг  $1s$ -уровня  $-30 \div -35$  эВ, ширина около  $30$  эВ <sup>10</sup>). Сравнение длин рассеяния пиона на  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  дает <sup>12</sup>

$$\text{Re} \{ a(\pi^- ^4\text{He}) - a(\pi^- ^3\text{He}) \} = (-0,119 \div -0,159) \mu^{-1}.$$

Эта величина должна быть близка <sup>13</sup> к длине рассеяния,  $\pi^- n$ , равной  $b_0 + b_1$ , что прекрасно согласуется с (4). С другой стороны, расчет длины рассеяния  $\pi^3\text{He}$ , выполненный в <sup>12</sup> с использованием стандартных значений  $b_0$  и  $b_1$  <sup>9</sup>, по-видимому, дает явно заниженный результат, если учесть вклад абсорбтивных каналов, который в этом случае велик, т. к. сдвиг уровня и ширина одного порядка. Положение может быть исправлено лишь существенным увеличением  $b_1$  по модулю, что находится в согласии с (4).

Таким образом, сейчас возникла противоречивая ситуация с  $s$ -волновыми длинами  $\pi N$ -рассеяния. Новая оценка их величин (4) находится в согласии с данными по пионным атомам  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ , и противоречит тому, что получено обработкой данных по  $\pi N$ -рассеянию с применением дисперсионных соотношений.

#### Литература

1. *Bovet E., Boehm F., Gimlett J. et al.* Nucl. Instr. and Methods, 1981, **190**, 613.
2. *Deser S., Goldberger M.L., Baumann K., Thirring W.* Phys. Rev., 1954, **96**, 774.
3. *Понов В.С., Кудрявцев А.Е., Лусин В.И., Мур В.Д.* ЖЭТФ, 1982, **80**, 1271.
4. *Kolybasov V.M., Kudryavtsev A.E.* Nucl. Phys., B, 1972, **41**, 510.
5. *Колыбасов В.М., Кудрявцев А.Е.* Письма в ЖЭТФ, 1973, **18**, 527.
6. *Kolybasov V.M., Kudryavtsev A.E.* Preprint ITEP-57, 1975.
7. *Afnan I.R., Thomas A.W.* Phys. Rev. C, 1974, **10**, 109.
8. *Bailey J., Bugg D.V. et al.* Phys. Lett., B, 1974, **50**, 403.
9. *Nagels M.N., Rijken Th. A., de Swart J.J. et al.* Nucl. Phys. B, 1979, **147**, 189.
10. *Бегги С.Дж.* ЭЧАЯ, 1982, **13**, 166.
11. *Backenstoss G. et al.* Nucl. Phys. A, 1974, **232**, 519.
12. *Lohs K.P.* Nucl. Phys. A, 1978, **312**, 297.
13. *Hüfner J.* Phys. Reports, 1975, **21C**, 1.

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
7 апреля 1983 г