

УДК 539.125.17

АНАЛИЗИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РЕАКЦИИ $p + p \rightarrow d + \pi^+$ И ДИБАРИОНЫ

С. И. Поташев, И. И. Осипчук

Показана возможность поиска узких дибарионных резонансов при изучении анализирующей способности реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ при промежуточных энергиях.

Впервые на возможность существования шестикварковых состояний обратили внимание В. А. Матвеев и другие [1]. В этих работах, как правило, рассматривались дибарионы, которые преимущественно распадаются на два нуклона по каналу сильного взаимодействия. Поэтому они должны проявляться в виде широких структур в спектрах инвариантной массы двух нуклонов с $\Gamma \sim 100 \text{ МэВ}/c^2$. Однако такие структуры, если они будут найдены в эксперименте, могут интерпретироваться и без привлечения гипотезы дибарионов.

В ряде теоретических работ [2, 3] рассматривались сверхузкие дибарионы, распад которых на два нуклона запрещен принципом Паули. Дибарионы такого вида с массой $M < 2m_N + m_\pi$ (m_N и m_π – массы нуклона и пиона соответственно) должны преимущественно распадаться с испусканием γ -кванта и поэтому будут иметь очень малую ширину ($< 1 \text{ кэВ}$). В самом деле, недавние экспериментальные результаты [4, 5] уверенно свидетельствуют в пользу существования таких дибарионов с массами 1904, 1926 и 1942 $\text{МэВ}/c^2$. Найдено, что наиболее вероятное значение изоспина этих состояний равно 1.

Однако могут существовать и дибарионы, распад которых на два нуклона разрешен. Такие дибарионы могут быть узкими лишь в рамках некоторых моделей. В модели Л. Кондратюка [6] дибарион рассматривается как вытянутая, вращающаяся "гантель", на одном конце которой расположены 4 кварка, а на другом 2. Необходимость перестройки структуры дибариона для распада на два нуклона должна приводить к увеличению времени жизни, а значит к малой ширине. Другая модель вращающихся соединенных ориентированных струн была предложена Ю. Трояном [7]. Однако экспериментальный

вклад дибарионов этого вида в полное и дифференциальное сечение не превышает 1% от вклада нерезонансных процессов, обусловленных сильным взаимодействием [8].

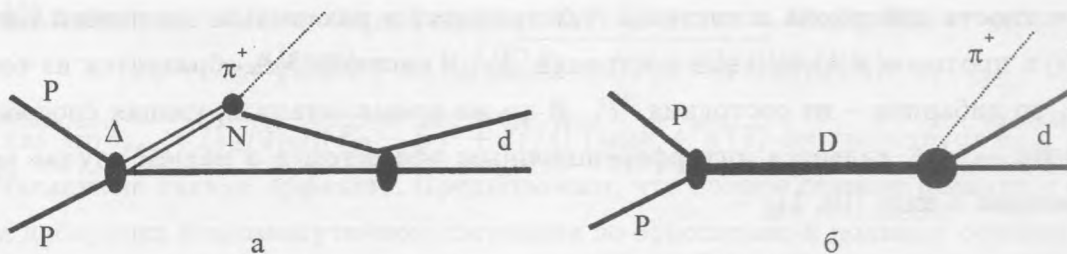


Рис. 1. Рассматриваемые механизмы реакции $pp \rightarrow d\pi^+$: а) $N\Delta$ в промежуточном состоянии и б) дибарион в промежуточном состоянии.

Выберем для исследования реакцию $p + p \rightarrow d + \pi^+$ и рассмотрим ее дифференциальные характеристики на основе двух возможных диаграмм: через образование нуклона с Δ -изобарой (рис. 1а) и дибариона (рис. 1б) в промежуточных состояниях.

В реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ в диапазоне энергии пиона от 30 до 165 МэВ основной вклад в амплитуду реакции дает промежуточное состояние $N\Delta$ с полным моментом, равным 2 и положительной четностью, т.е. $J^P(N\Delta) = 2^+$ [9]. Дибарион в промежуточном состоянии на рис. 1б возьмем со следующими квантовыми числами: $J^P(D) = 1^-$.

В приближении, что распад системы $N\Delta \rightarrow d\pi^+$ обусловлен вылетом p -волновых π^+ -мезонов в системе центра масс, а дибарион D распадается с излучением s -волновых π^+ -мезонов (в предположении, что ширина распада $D \rightarrow d\pi^+$ с испусканием d -волновых пионов мала по сравнению с шириной распада с вылетом s -волновых пионов), матрицу рассматриваемой реакции можно записать в виде [10, 11]

$$T_{fi} = 1/(4\sqrt{\pi})\chi_d^+ [(b_1/\sqrt{2})(\sigma_1 + \sigma_2)\mathbf{p}\chi_t + (b_2/\sqrt{2})(3(\mathbf{p}\mathbf{q})\mathbf{p}\mathbf{t} - \mathbf{p}\mathbf{t})\chi_s], \quad (1)$$

где \mathbf{p} – единичный вектор относительного импульса сталкивающихся протонов в их с.ц.м., \mathbf{q} – единичный вектор в направлении вылета π^+ в с.ц.м., χ_d – спиновая волновая функция дейтрона, $\chi_t(\chi_s)$ – триплетная (синглетная) спиновая волновая функция pp -пары, b_1 и b_2 – амплитуды реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ с полным моментом J , равным 1 и 2 соответственно, причем b_1 соответствует рис. 1б, а b_2 – рис. 1а, $\vec{\sigma}_i$ – матрицы Паули i -го нуклона, $\mathbf{t} = (\vec{\sigma}_1 - \vec{\sigma}_2 + i\vec{\sigma}_1 \times \vec{\sigma}_2)/2$.

Тогда дифференциальное сечение вылета пиона в направлении $\mathbf{q}(\theta_{\pi^+}, \varphi_{\pi^+})$ имеет вид [10, 11]

$$d\sigma/d\Omega = [|b_1|^2 + 0.5|b_2|^2(1 + 3\cos^2\theta_{\pi^+})]/(16\pi). \quad (2)$$

Можно заметить, что в выражении (2) для дифференциального сечения отсутствуют интерференционные члены, связанные с двумя различными механизмами реакции рис. 1а и 1б. Это связано с тем, что в силу принципа тождественности частиц различная четность дибариона и системы $N\Delta$ приводят к различным значениям полного спина двух протонов в начальном состоянии. Если система $N\Delta$ образуется из состояния 1D_2 , то дибарион – из состояния 3P_1 . В то же время, анализирующая способность реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ является интерференционным эффектом и в нашем случае может быть записана в виде [10, 11]

$$A_y(\theta_{\pi^+}) = \text{Im}(b_1^* b_2) \sin \theta_{\pi^+} / (16\pi d\sigma/d\Omega). \quad (3)$$

Исходя из (2), полное сечение реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ можно записать в виде

$$\sigma_t = (|b_1|^2 + |b_2|^2)/4. \quad (4)$$

Из выражения (3) следует, что величина $|A_y(\theta_{\pi^+})|$ имеет максимум при $\theta_{\pi^+} = 90^\circ$ (с.п.м.), причем

$$A_y(90^\circ) = 2\text{Im}(b_1^* b_2) / (2|b_1|^2 + |b_2|^2) \simeq -2 \sin \delta_{отн} |b_1|/|b_2|, \quad (5)$$

где $\delta_{отн}$ – относительный фазовый сдвиг между b_1 и b_2

$$b_1 = |b_1| \exp(i(\delta_{отн} + \delta)), \quad b_2 = |b_2| \exp(i\delta).$$

Из формулы (5) следует, что анализирующая способность приблизительно линейно зависит от отношения $|b_1|/|b_2|$, в то время как дифференциальное и полное сечение имеют квадратичную зависимость от этого отношения.

Для описания энергетической зависимости $b_1(E)$ воспользуемся формулой Брейта-Вигнера

$$b_1(E) \sim (\sqrt{\Gamma_e} \sqrt{\Gamma_r} / \sqrt{[(E_0 - E)^2 + \Gamma_t^2/4]}) \exp(i(\delta_{фок} + \delta_{рез} + \delta)), \quad (6)$$

где Γ_t – полная ширина дибариона D , Γ_e – упругая ширина D , Γ_r – ширина распада дибариона с $J^P = 1^-$ по каналу $pp \rightarrow d\pi^+$ (с излучением s -волновых пионов), $\delta_{фок}$ – относительный сдвиг фазы амплитуды на рис. 1б по отношению к амплитуде реакции на рис. 1а за вычетом резонансной фазы, $\delta_{рез}$ – резонансная фаза. Полное сечение образования дибариона в реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ имеет вид

$$\sigma_t = (\pi/p^2) [(2J + 1)/4] \Gamma_e \Gamma_r / [(E_0 - E)^2 + \Gamma_t^2/4],$$

где J – спин и E_0 – полная энергия дибариона (его масса), \mathbf{p} – относительный импульс сталкивающихся протонов и E – их полная энергия в с.ц.м. pp .

Используя выражение (6) для случая, когда $\delta_{\phi_{on}} = 0(\pi)$, можно переписать выражение (5) в виде

$$A_y(90^\circ) = \pm(\Gamma_t/\sqrt{[(E_0 - E)^2 + \Gamma_t^2/4]})|b_1|/|b_2|, \quad (7)$$

так как $\sin \delta_{\phi_{ez}} = (\Gamma_t/2)\sqrt{[(E_0 - E)^2 + \Gamma_t^2/4]}$ (знак + в (7) соответствует $\delta_{\phi_{on}} = \pi$).

Численные оценки эффекта. Предположим, что полное сечение реакции с образованием дибариона в промежуточном состоянии по отношению к полному сечению реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ составляет $\sim 1\%$. Как следует из (4), это означает, что $(|b_1|/|b_2|)^2 = 0.01$. Как следует из формулы (2), при $\theta_{\pi^+} = 90^\circ$ (с.ц.м.), что соответствует углу вылета пиона $\theta_{\pi^+}(\text{лаб.}) = 56.9^\circ$ при энергии падающего протона 500 МэВ , вклад дибариона составит 2% в дифференциальном сечении. Однако в многочисленных экспериментах [12] в поведении дифференциального сечения ($d\sigma/d\Omega \sim 70 \text{ мкб/ср}$) в приведенных выше экспериментальных условиях не было обнаружено никаких узких структур в пределах ошибки 2% .

В то же время значение анализирующей способности по модулю, полученное из формул (5) и (7), при данном угле вблизи точки резонанса может быть $|A_y(90^\circ)| = 0.2$. Можно показать, что в случае $\delta_{\phi_{on}} = \pm\pi/2$ максимальное значение $|A_y(90^\circ)|$ вблизи резонанса будет вдвое меньше, т.е. равно 0.1 .

Согласно экспериментальным данным [13], величина $A_y(90^\circ)$ при энергии падающих протонов 500 МэВ близка к нулю и поэтому вклад рассматриваемого выше дибариона может быть ярко выражен. Таким образом, предлагаемый метод поиска узких дибарионных резонансов в реакции $pp \rightarrow d\pi^+$, по крайней мере при энергии падающих протонов около 500 МэВ , является более чувствительным по сравнению с попыткой их обнаружения при измерении только сечения этой реакции.

При изучении реакции упругого pp -рассеяния были обнаружены нерегулярности в зависимости анализирующей способности A_y [14] от инвариантной массы двух нуклонов. Эти структуры можно интерпретировать как проявления узких дибарионных резонансов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Matveev V. and Sorba P. Lett. Nuovo Cim., **20**, N 12, 435 (1977);

- Mulders P. J., Aerts A. and Swart J. J. Phys. Rev. Lett., **40**, 1543 (1978).
- [2] Ahmedov D. M. and Fil'kov L. V. Nucl. Phys., **A544**, 692 (1992).
- [3] Копелиович В. Б. Ядерн. физика, **58**, 1317 (1995).
- [4] Fil'kov L. V. et al. Ph. At. Nucl., **62**, N 12, 2091 (1999); Fil'kov L. V. et al. Phys. Rev., **C61**, 044004 (2000).
- [5] Fil'kov L. V. et al. Proc. of VII Intern. Conf. Intersections between Particle and Nuclear Physics, Quebec, Canada, May 23-27, (2000); hep-ex/0009044.
- [6] Кондратюк Л. А., Мартемьянов Б. В., Щепкин М. Г. Ядерн. физика, **45**, 1252 (1987); Kondratyuk L. A. and Vasilets A. V. et al., Preprint ИТЕР, N 128-88 (1988).
- [7] Троян Ю. А. Препринт ОИЯИ, N P2-86-35 (1986).
- [8] Seth K. K. Invited paper: "Dibaryons in theory and practice", Intern. Conf. on medium and high energy physics. Taipei, Taiwan, May 16-21, 1988, p. 1-27.
- [9] Эрикссон Т., Вайзе В. Пионы и ядра, М., Наука, 1991, с. 133.
- [10] Ефросинин В. П. и др. Ядерн. физика, **45**, 1733 (1987).
- [11] Ефросинин В. П. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 2, 18 (1987).
- [12] Gulmez E. et al. Nucl. Phys., **A551**, 621 (1993).
- [13] Лартев А. В., Страковскы И. И. Collection of experimental data for $pp \rightarrow d\pi^+$ process, vol. 1, 2, L., 1985.
- [14] Троян Ю. А. и др. Ядерн. физика, **54**, вып. 5(11), 1301 (1991).

Институт ядерных исследований РАН

Поступила в редакцию 26 января 2001 г.