

ИЗОСКАЛЯРНОЕ СЕЧЕНИЕ РОЖДЕНИЯ ОДИНОЧНОГО ПИОНА НА ПОРОГЕ NN

Е. Дорошкевич^{1,*}, Х. Клемент^{2,3,**}, Т. Скородько^{1,***}

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

² Physikalisches Institut, Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen, 72076, Germany

³ Kepler Center for Astro and Particle Physics, University of Tübingen, Tübingen, 72076, Germany

Обсуждается изоскалярное сечение рождения одного пиона в NN -взаимодействии. Из экспериментальных данных получена разность между сечением однопионного рождения со смешанной симметрией и изовекторным сечением. В энергетической зависимости изоскалярного сечения наблюдается резонансоподобная структура с максимумом в точке $\sqrt{s} = 2310$ МэВ и шириной порядка 150 МэВ.

The isoscalar cross section of single-pion production in NN interactions is discussed. The difference between the mixed symmetry and isovector cross sections were obtained from the experimental data. The energy dependence of the isoscalar cross section shows resonance-like structure at $\sqrt{s} = 2310$ MeV and width 150 MeV.

PACS: 13.75.-cs; 14.20.-pt

ВВЕДЕНИЕ

Данные эксперимента WASA-at-COSY для изоскалярного двухпионного рождения в канале $pn \rightarrow d\pi\pi$ [1] показали в полном сечении реакции узкую резонансную структуру с максимумом при 2380 МэВ и шириной ~ 70 МэВ.

Дальнейший парциально-волновой анализ для np -рассеяния, выполненный группой SAID, выявил наличие резонансного полюса для 3D_3 -волны в точке $((2380 \pm 10) - i(40 \pm 5))$ МэВ [2]. Наличие полюса подтвердило предположение, что наблюдаемая структура представляет собой s -канальный резонанс в системе двух барионов. С этого времени данный резонанс стали обозначать как $d^*(2380)$. Из анализа далитц-диаграмм реакций $pn \rightarrow d\pi^0\pi^0$ и $pn \rightarrow d\pi^+\pi^-$ было сделано заключение, что $d^*(2380)$ распадается преимущественно через $\Delta\Delta$ -систему в промежуточном состоянии [3]. Также вклад от распада $d^*(2380)$ был

* E-mail: eugene.doroshkevich@gmail.com

** E-mail: heinz.clement@uni-tuebingen.de

*** E-mail: tatiana.skorodko@gmail.com

найден в реакциях $np \rightarrow NN\pi\pi$ [4, 5], где возможно изоскалярное двухпионное рождение. Причем экспериментально полученная оценка вклада от распада $d^*(2380)$ в этих реакциях согласовывалась с тем, что ожидалось от изоспиновых соотношений, если промежуточным является $\Delta\Delta$ -состояние [6].

Были опубликованы теоретические работы, в которых предполагались другие промежуточные состояния $d^*(2380)$. В. Кукулин и М. Платонова предложили сценарий, в котором $d^*(2380)$ распадается на D_{12} и пион в p -волне [7]. Поскольку масса D_{12} лежит на пороге $N\Delta$, такой распад трудно отличить кинематически от распада через $\Delta\Delta$. Однако D_{12} может с вероятностью 16–18 % распасться на два нуклона. В результате образуется $NN\pi$ -конечное состояние после распада $d^*(2380)$. Имеется также модель [8], где $d^*(2380)$ представляет собой систему $N^*(1440)N$. Такой сценарий дает вклад в распад $d^*(2380)$ на изоскалярное $NN\pi$ -конечное состояние, так как $N^*(1440)$ распадается на нуклон и пион с вероятностью 55–75 %. Таким образом, чтобы подтвердить или опровергнуть предположение о возможных альтернативных промежуточных состояниях $d^*(2380)$, необходимо исследовать изоскалярное однопионное рождение в нуклон-нуклонных взаимодействиях.

ИЗОСКАЛЯРНОЕ ОДНОПИОННОЕ РОЖДЕНИЕ

В нуклон-нуклонных взаимодействиях нет чисто изоскалярного канала рождения одного пиона. Обычно, чтобы получить изоскалярное сечение, сравнивают изовекторное и изоспин-смешанное экспериментальные сечения рождения. Наиболее часто используют формулу [9]

$$\sigma_{NN \rightarrow NN\pi}(I=0) = 3[2\sigma(pp \rightarrow pp\pi^-) - \sigma(pp \rightarrow pp\pi^0)]. \quad (1)$$

Изоскалярное сечение есть разность двух сопоставимых величин и, как видно из формулы (1), может иметь относительно большую ошибку.

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ $\sigma(pp \rightarrow pp\pi^0)$ И $\sigma(pp \rightarrow pp\pi^-)$

Эксперимент проходил в лаборатории COSY на детекторе WASA (Wide Angle Shower Apparatus), имевшем почти полную 4π -геометрию. Детектор состоял из двух частей. Передняя часть включала пять слоев пластикового сцинтиллятора, центральная состояла из мини-дрейфовой камеры, окруженной соленоидальным магнитом, и калориметра, собранного из 1020 блоков сцинтиллятора CsI.

Протонный пучок с кинетической энергией 1,2 ГэВ сталкивался с дейтериевой мишенью, в результате чего пион рождался в квазисвободных взаимодействиях $pd \rightarrow pp\pi + \text{spectator}$. Обе реакции отбирались одновременно с использованием одного и того же триггера. Регистровались протоны и пион в конечном состоянии, импульс спектатора

восстанавливался. По распределению импульса спектратора делалось заключение о квазисвободном рождении пиона. Так как нуклон в дейтроне обладает ферми-импульсом, полные сечения реакций были получены не при фиксированной энергии, а в некотором диапазоне $\sqrt{s}$ [10, 11].

Зависимости полных сечений от $\sqrt{s}$ для реакций $pp \rightarrow pp\pi^0$, $pn \rightarrow pp\pi^-$ приводятся на рис. 1. Красные кружки являются результатом анализа данных, полученных коллаборацией WASA-at-COSY, черные

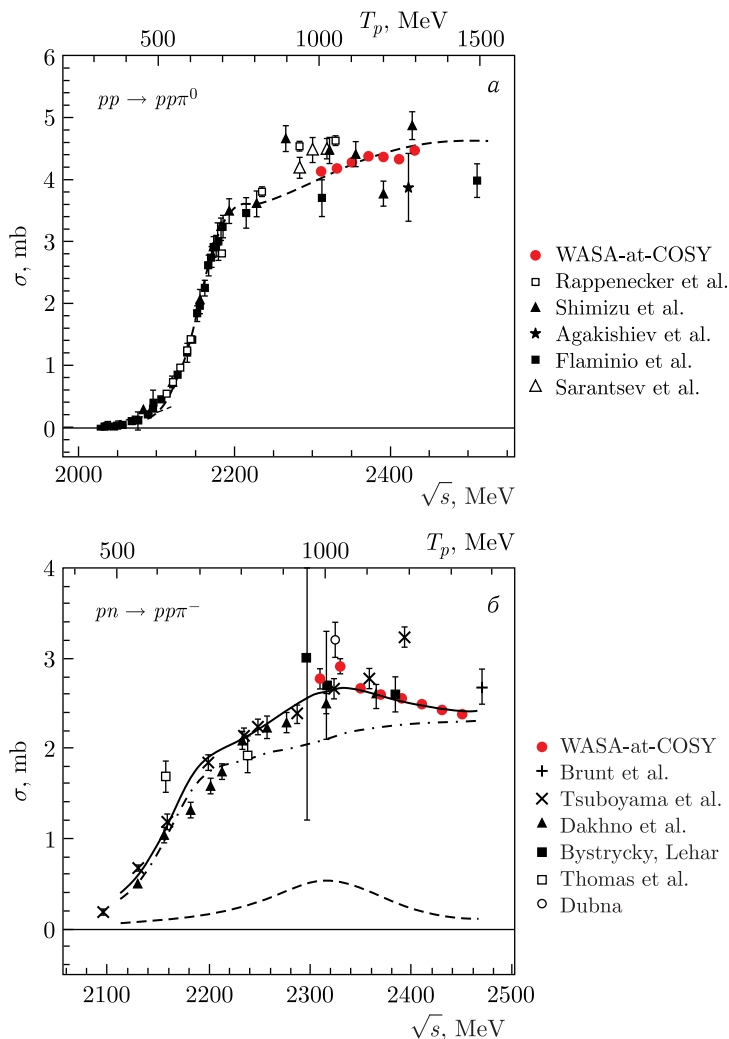


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Сечения $\sigma(pp \rightarrow pp\pi^0)$ (a) и $\sigma(pn \rightarrow pp\pi^-)$ (б) [11]

символы обозначают более ранние данные, полученные в основном с помощью пузырьковой камеры. Штриховая линия на рис. 1, *а* является результатом вычислений для модели, включающей t -канальное возбуждение Δ и феноменологический вклад от изовекторных дибарионов [12]. Модель, описывающая только Δ , неплохо согласуется с полными и дифференциальными сечениями для энергий больше 2250 МэВ, но сильно недооценивает полное сечение для меньших энергий. Вклад от дибарионов был добавлен, чтобы получить модель, описывающую изовекторное рождение пиона в области энергий от порога до 2460 МэВ.

На рис. 1, *б* штрихпунктирная линия показывает только изовекторный вклад в рождение π^- , оцененный как половина полного сечения рождения π^0 . Изовекторное рождение удовлетворительно описывает данные до 2200 МэВ, но при больших энергиях ясно видно, что для описания экспериментальных значений требуется также дополнительный вклад, который может быть только изоскалярным. Изоскалярный вклад фитируется простой формулой Брейта–Вигнера с массой 2310 МэВ и шириной 150 МэВ (штриховая линия на рис. 1, *б*). Сплошная линия на рис. 1 есть сумма изовекторного и изоскалярного сечений рождения π^- .

РЕЗУЛЬТАТ

Используя данные измерений в реакциях $pn \rightarrow pp\pi^-$ и $pp \rightarrow pp\pi^0$ сечений, можно по формуле (1) вычислить изоскалярное сечение однопионного рождения. Результат вычислений показан на рис. 2, *а* в виде красных кружков и черных символов.

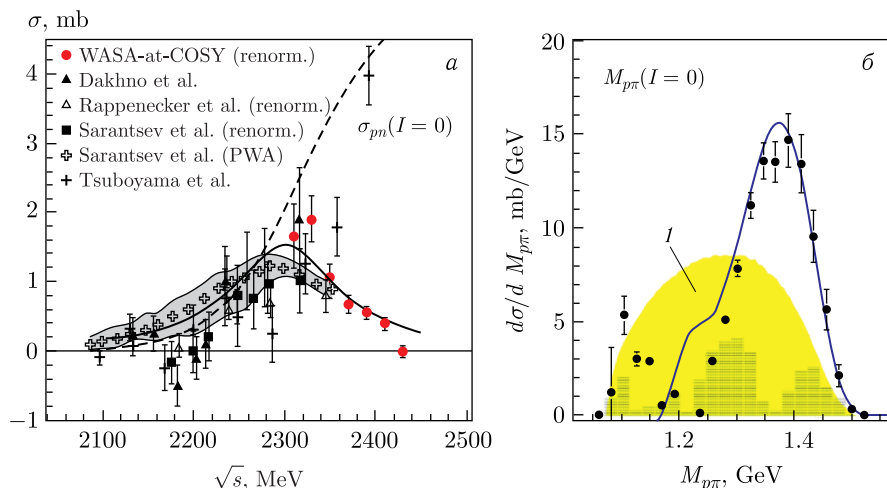


Рис. 2 (цветной в электронной версии). *а*) Изоскалярное сечение $\sigma(NN \rightarrow NN\pi)$ [11]. *б*) Изоскалярное распределение по $M_{p\pi}$ ($I = 0$), желтая область (I) соответствует фазовому объему [10]

В области энергии, где возможно возбуждение $d^*(2380)$ и его распад в изоскалярный $NN\pi$ -канал, визуально нет никакой особенности в плавном уменьшении полного сечения. Тем самым можно оценить только верхний предел для данной моды распада на основе статистической ошибки экспериментальных данных. Он составляет ~ 90 мкб. Полученный верхний предел означает, что меньше 25 % $d^*(2380)$ распадается через $D_{12}\pi$ -состояние, а в модели [8] меньше 7 % $d^*(2380)$ может распадаться через $N^*(1440)N$.

Также на рис. 2, а штриховой линией показаны вычисления для t -канального возбуждения $N^*(1440)$, нормированные на точку 2260 МэВ. Резонанс $N^*(1440)$ был выбран как единственный кандидат для изоскалярного рождения пиона в данной области энергий. Очевидно, что экспериментальные данные не согласуются с вычислениями. Экспериментально полученное изоскалярное сечение растет от порога до максимума в точке 2310 МэВ, а затем плавно падает. Такое поведение не характерно для t -канального возбуждения, а согласуется с возбуждением резонанса в s -канале. Также на рис. 2 представлены экспериментальные данные в виде полых крестиков, расположенных в серой полосе [13]. Половина ширины этой полосы соответствует ошибке анализа. Данные были получены без использования формулы (1), вывод об изоскалярном вкладе был сделан на основе парциально-волнового анализа. Результаты данной работы в целом согласуются с результатами вычислений по формуле (1). Сплошная линия показывает вычисления по формуле Брейта–Вигнера с массой 2310 и шириной 150 МэВ.

Чтобы лучше понять природу изоскалярного полного сечения, мы применили формулу (1) к распределениям по инвариантным массам $p\pi^0$ и $p\pi^-$. На рис. 3 показаны инвариантные массы $p\pi$ для реакций $pp \rightarrow pp\pi^0$ и $pp \rightarrow pp\pi^-$. Черные точки обозначают экспериментальные

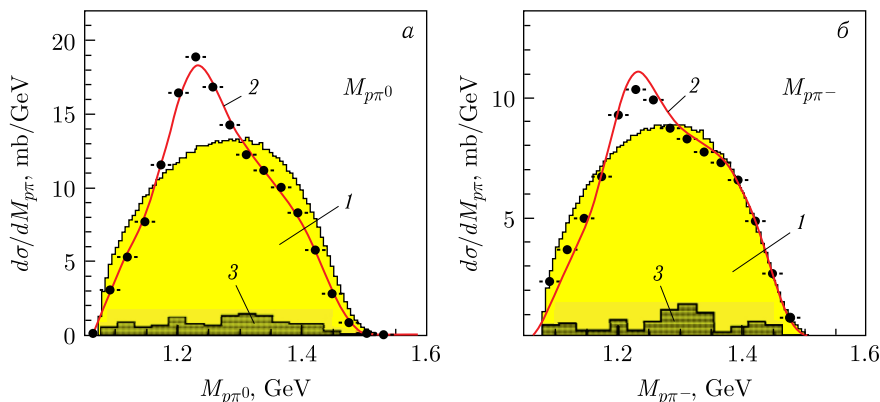


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Дифференциальные сечения $p\pi^0$ (а) и $p\pi^-$ (б) [10]

данные, желтая область (1) соответствует фазовому объему, красная линия (2) представляет вычисления для t -канальных возбуждений $\Delta(1230)$ в случае рождения π^0 и возбуждений $\Delta(1230)$ и $N^*(1440)$ в случае π^- . Заштрихованная область (3) соответствует оценке систематических ошибок, связанных с нормировкой данных.

Зависимость от $M_{p\pi}$ изоскалярного сечения из формулы (1) показана на рис. 2, б. Как видно, вклад от $\Delta(1230)$ практически отсутствует, оставшаяся структура согласуется с предположением о возбуждении N^* (сплошная линия), но с меньшей (~ 1380 МэВ) массой и меньшей (~ 150 МэВ) шириной.

Так как $N^*(1440)$ распадается также на нуклон и два пиона, дибарионное состояние $N^*(1440)N$ должно давать вклад в изоскалярное двухпионное рождение. Действительно, есть указание на такой распад в реакции $pn \rightarrow d\pi^0\pi^0$. В работе [11] показано, что дибарионное состояние $N^*(1440)N$ необходимо, чтобы описать экспериментальные данные в области 2300 МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В области энергий $\sqrt{s} = 2,3\text{--}2,46$ ГэВ выделено полное изоскалярное сечение рождения одного пиона в нуклон-нуклонных взаимодействиях. Величина изоскалярного сечения составляет 1,5–2 мб. Зависимость изоскалярного сечения от энергии описывается брейт-вигнеровской формулой с максимумом 2310 МэВ и шириной 150 МэВ. Такое поведение полного сечения характерно для s -канального резонансного процесса. Инвариантная масса $M_{p\pi}$ ($I = 0$) представляет собой, по сути, единственно выраженную структуру с максимумом при 1370 МэВ и шириной 150 МэВ. Эта структура расположена в области, где возможно возбуждение N^* . Принимая во внимание энергетическую зависимость изоскалярного полного сечения и соответствия изоскалярной инвариантной массы $M_{p\pi}$ с ожидаемым возбуждением N^* , можно предположить, что на пороге $N^*(1440)N$ было сформировано дибарионное состояние [14].

В области энергий, где возможно возбуждение $d^*(2380)$, поведение полного изоскалярного сечения не подтверждает распад d^* в изоскалярный $NN\pi$ -канал. Из экспериментальных данных можно получить только верхний предел на вклад промежуточных $N^*(1440)N$ - и $D_{12}\pi$ -состояний в $d^*(2380)$.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bashkanov M. et al.* Double-Pionic Fusion of Nuclear Systems and the “ABC” Effect: Approaching a Puzzle by Exclusive and Kinematically Complete Measurements // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 102. P. 052301.
2. *Adlarson P. et al.* Evidence for a New Resonance from Polarized Neutron-Proton Scattering // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 112. P. 202301.

3. *Adlarson P. et al.* Isospin Decomposition of the Basic Double-Pionic Fusion in the Region of the ABC Effect // *Phys. Lett. B.* 2013. V. 721. P. 229–236.
4. *Adlarson P. et al.* Measurement of the $pn \rightarrow pp\pi^0\pi^-$ Reaction in Search for the Recently Observed Resonance Structure in $d\pi^0\pi^0$ and $d\pi^+\pi^-$ Systems // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 88. P. 055208.
5. *Adlarson P. et al.* Measurement of the $np \rightarrow np\pi^0\pi^0$ Reaction in Search for the Recently Observed $d^*(2380)$ Resonance // *Phys. Lett. B.* 2015. V. 743. P. 325.
6. *Bashkanov M., Clement H., Skorodko T.* Branching Ratios for the Decay of $d^*(2380)$ // *Eur. Phys. J. A.* 2015. V. 51. P. 87.
7. *Platonova M., Kukulín V.* ABC Effect as a Signal of Chiral Symmetry Restoration in Hadronic Collisions // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 87. P. 025202.
8. *Bugg D. V.* An Alternative Explanation for the Dibaryon Suggested by Experiments at the WASA Facility at Jülich // *Eur. Phys. J. A.* 2014. V. 50. P. 104.
9. *Dakhno L. G. et al.* Measurement of the Cross-Section of the Reaction $pn \rightarrow pp\pi^-$ in the Energy Region of Dibaryon Resonances (500–1000 MeV) // *Phys. Lett. B.* 1982. V. 114. P. 409.
10. *Adlarson P. et al.* Isoscalar Single-Pion Production in the Region of Roper and $d(2380)$ Resonances // *Phys. Lett. B.* 2017. V. 774. P. 599.
11. *Clement H., Skorodko T., Doroshkevich E.* On the Possibility of Dibaryon Formation near the $N^*(1440)N$ Threshold — Reexamination of Isoscalar Single-Pion Production // *Phys. Rev. C.* 2022. V. 106. P. 065204.
12. *Komarov V. et al.* Evidence for Excitation of Two Resonance States in the Isovector Two-Baryon System with a Mass of 2.2 GeV/ c^2 // *Phys. Rev. C.* 2016. V. 93. P. 065206.
13. *Sarantsev V. V. et al.* The Study of the Negative Pion Production in Neutron–Proton Collisions at Beam Momenta below 1.8 GeV/ c // *Eur. Phys. J. A.* 2010. V. 43. P. 11.
14. *Clement H.* The Roper Resonance $N^*(1440)$ in Nucleon–Nucleon Collisions and the Issue of Dibaryons. arXiv:2507.01937.