ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА
2025. Т. 56, вып. 3. С. 1606–1614

ДВА ПОДХОДА К ВОПРОСУ О ДИБАРИОНАХ

Е. А. Дорошкевич

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Рассматриваются наиболее примечательные результаты экспериментальных и теоретических работ, относящихся к исследованиям многокварковых систем, в частности состояний из шести кварков, называемых дибарионами. Результатом исследования реакций $pn \to d\pi^0\pi^0$ и $pn \to d\pi^+\pi^-$ стала регистрация дибарионного резонанса с массой 2,38 ГэВ и шириной 80 МэВ. Эксперимент по измерению сечения рассеяния поляризованных нейтронов на протонах подтверждает существование резонанса. Результаты экспериментов сопоставляются с предсказаниями теоретических работ.

Most remarkable results in the studying of multiquark systems are discussed. Experimental study of the reactions $pn \to d\pi^0\pi^0$ and $pn \to d\pi^+\pi^-$ shows a resonance-like form in the cross-section energy dependence with a maximum at $\sqrt{s} = 2.38$ GeV and width 80 MeV. These results demonstrate features of resonance with $J^p = 3^+$. It has been confirmed in the polarized neutron proton scattering. These results are compared with theoretical predictions.

PACS: 12.39.–x; 24.85.+p

ВВЕДЕНИЕ

Измерения полных и дифференциальных сечений в реакциях $pn \to$ $\to d\pi^0\pi^0$, $pn \to d\pi^+\pi^-$ и $pp \to d\pi^+\pi^0$ показали, что резонанс наблюдается как в изоскалярном, так и в канале со смешанной изотопической симметрией.

Результаты последних экспериментов на детекторе WASA-at-COSY [1, 2], обеспечивающих высокую статистическую точность и кинематическую замкнутость измерений, подтверждают скалярно-изоскалярные особенности дибарионного резонанса d^*. Подробная история предсказания, поисков и обнаружения дибарионов излагается в обзоре [3].

1. ЭКСПЕРИМЕНТ WASA-at-COSY

Первоначально детектор WASA (Wide Angle Shower Apparatus) был установлен в лаборатории TSL (Theodor Svedberg Laboratory) на ускорителе CELSIUS (Уппсала, Швеция) [4]. Он был предназначен для исследования взаимодействий адронов, особенно для исследования рождения легких мезонов и редких распадов, причем детектор позволял регистрировать несколько частиц в конечном состоянии как заряженных, так

и нейтральных. На этом детекторе был выполнен ряд экспериментов (см., например, [5–7]). Затем в 2005 г. детектор WASA был перемещен в исследовательский центр Юлих (Германия [8]), где он был установлен на внутреннем пучке ускорителя COSY. На новом месте имелась возможность работать с пучками частиц большей энергии и достигать большей светимости, вследствие чего на детекторе были выполнены модификации в электронике и в небольшом объеме в элементной базе.

Столкновения пучка протонов с дейтериевой мишенью позволяют использовать квазисвободную кинематику pn-рассеяния. Если при pd-взаимодействии рассеяние происходит на одном из нуклонов, то второй (спектаторный) продолжит движение со своим ферми-импульсом. При фиксированной энергии пучка взаимодействие с нуклонами, имеющими отличные от нуля импульсы, означает, что полная энергия системы занимает некоторый диапазон. При достаточной статистике эта особенность позволяет определять зависимость сечений от начальной энергии.

Зависимость сечения реакции $pd \to d\pi^0\pi^0 + p_{\text{spect}}$ от $\sigma(\sqrt{s}\,)$ была измерена с высокой точностью в эксперименте WASA-at-COSY [9] для трех значений кинетической энергии налетающих протонов $T_p = 1{,}0$, 1,2 и 1,4 ГэВ.

В измеренные величины были внесены поправки на эффективность и акцептанс. В области небольшого перекрытия соседних интервалов $\sqrt{s}$, соответствующих экспозициям с разными начальными энергиями, измеренные величины сечений согласуются между собой в пределах ошибок. Это видно на рис. 1, где разные экспозиции обозначены сим-

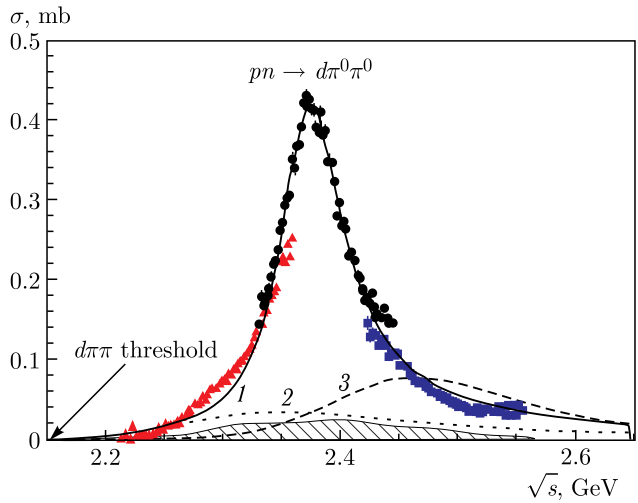

Рис. 1. Зависимость сечения $pn \to d\pi^0\pi^0$ от $\sqrt{s}$ (из работы [9]). ▲ — $T_p = 1{,}0$ ГэВ; ● — $T_p = 1{,}2$ ГэВ; ■ — $T_p = 1{,}4$ ГэВ. *1* — s-канальный резонанс; *2* — N^*; *3* — $\Delta\Delta$, штриховкой показана оценка систематических ошибок

волами разной формы. Заштрихованная область показывает оценку систематических погрешностей, пунктирная линия (*2*) — оценка вклада $N^*(1440)$, штриховая (*3*) — оценка вклада $\Delta\Delta$, сплошная линия (*1*) — расчет вклада s-канального резонанса с массой 2,37 ГэВ и шириной 70 МэВ. В энергетической зависимости полных сечений есть максимум в точке $\sqrt{s} = 2{,}38$ ГэВ, форма которого имеет вид резонанса. Ширина этой особенности (порядка 80 МэВ) в 4 раза меньше ширины $2\Gamma_\Delta$ — стандартного состояния пары Δ-резонансов. Положение пика сечения примерно на 80 МэВ ниже массы двух Δ-резонансов $2M_\Delta$.

На рис. 2 показано угловое распределение в с. ц. м. для дейтронов, измеренное в изоскалярной реакции при $\sqrt{s}$ вблизи максимума сечения. Распределение имеет вид параболы, симметричной относительно 0. Кривыми на рисунке показаны расчеты распределений для продуктов распада резонанса с определенным значением спина, а именно $J^p = 1^+$ (пунктирная линия) и $J^p = 3^+$ (сплошная линия). Таким образом, наблюдаемый резонанс имеет спин 3. Важно отметить, что в 1964 г. была опубликована работа [10], в которой авторы F. J. Dyson, N.-H. Xuong предсказали существование 6-кваркового состояния с изоспином 0, $J^p = 3^+$ и массой $M_{6q} = 2{,}35$ ГэВ.

Рассмотрим реакции $pn \to d\pi^0\pi^0$, $pp \to d\pi^+\pi^0$, $pn \to d\pi^+\pi^-$, в которых в конечном состоянии образуется дейтрон и пара π-мезонов. Первая реакция имеет изоскалярный вклад, вторая — изовекторный, а третья имеет как изоскалярный, так и изовекторный. Зависимости от $\sqrt{s}$ сечений реакций $pn \to d\pi^+\pi^-$, $pn \to d\pi^0\pi^0$, $pp \to d\pi^+\pi^0$ [2] приводятся на рис. 3.

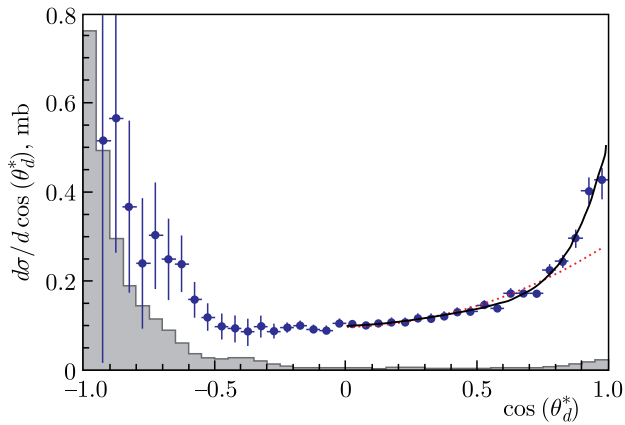

Рис. 2. Угловое распределение в с. ц. м. для дейтронов в точке $\sqrt{s} = 2{,}37$ ГэВ (из работы [9]). Распределение, закрашенное серым цветом, — фазовый объем. Сплошная линия — расчет для s-канального резонанса с $J^p = 3^+$, пунктирная линия — для $J^p = 1^+$

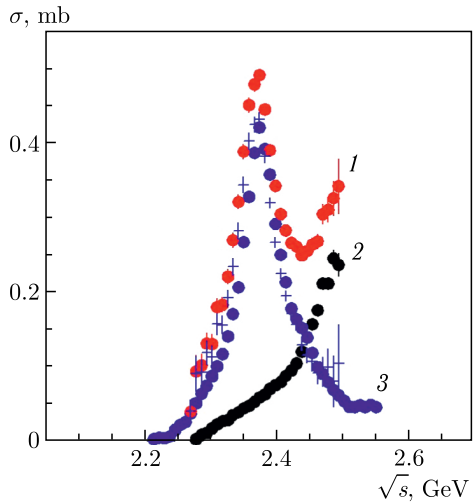

Рис. 3. Полное сечение $\sigma(pn \to d\pi^+\pi^-)$ (точки *1*) и вклад соответствующих компонент по соотношению изоспинов $1/2\sigma(pn \to d\pi^+\pi^0)$ (точки *2*) и $2\sigma(pp \to d\pi^0\pi^0)$ (точки *3*) (см. (1)). Точки, имеющие вид крестиков, показывают результат расчета $\sigma(pn \to d\pi^0\pi^0)$ по формуле (1) (из работы [2])

Сечение изовекторной реакции $pp \to d\pi^+\pi^0$ плавно увеличивается с ростом $\sqrt{s}$. Это соответствует t-канальному процессу с возбуждением промежуточных Δ-изобар. В изоскалярной реакции $pn \to d\pi^0\pi^0$ наблюдается резонансоподобная структура в полном сечении реакции в интервале $2{,}25 < \sqrt{s} < 2{,}5$ ГэВ. Конечные состояния со смешанной симметрией в реакциях $pn \to d\pi^+\pi^-$ имеют резонансный максимум сечения, как в изоскалярной реакции. При больших $\sqrt{s}$ сечение растет подобно изовекторной реакции. Масса резонанса была определена как $m = 2{,}38$ ГэВ и ширина $\Gamma = 80$ МэВ.

Для сечений разных каналов справедливо соотношение [2]

$$\sigma(pn \to d\pi^+\pi^-) = 2\sigma(pn \to d\pi^0\pi^0) + 1/2\sigma(pp \to d\pi^+\pi^0). \tag{1}$$

Действительно, рис. 3 показывает соответствие расчетов (крестики) и измерений (точки).

Набранная статистика событий при измерении полных сечений [2] позволила разделить интервал $2{,}33 < \sqrt{s} < 2{,}45$ ГэВ на 6 бинов шириной 20 МэВ. Рис. 4 демонстрирует динамику поведения дифференциальных сечений $d\sigma/dM_{\pi\pi}$ для трех интервалов по $\sqrt{s}$. Максимум сечений при малых значениях $M_{\pi\pi}$ соответствует хорошо известному эффекту ABC [11–13]. Из данных, показанных на рис. 4, следует, что в изовекторных реакциях эффект ABC отсутствует, а в изоскалярных

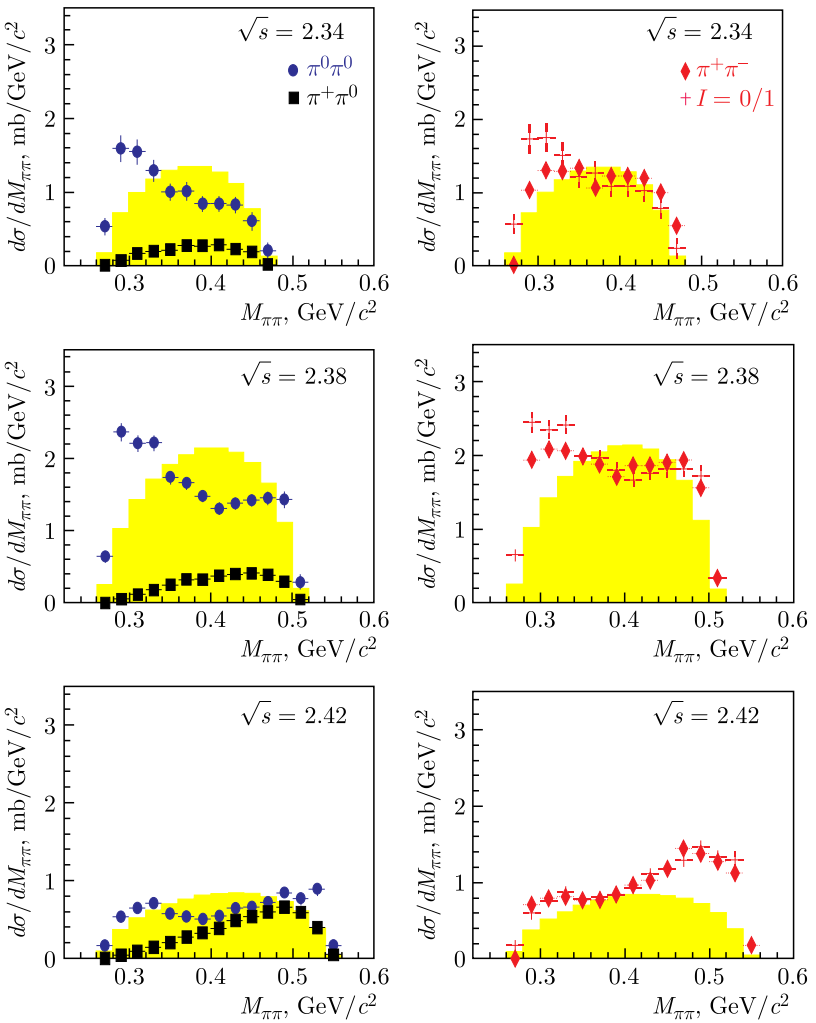

Рис. 4. Распределения по $M_{\pi\pi}$ для реакций $pn \to d\pi^+\pi^0$ и $pn \to d\pi^0\pi^0$ (слева) и $pn \to d\pi^+\pi^-$ (справа) [2]. Ширина интервалов $\sqrt{s}$ равна 20 МэВ

реакциях и в реакциях со смешанной симметрией начавшийся рост эффекта АВС сменяется падением вплоть до исчезновения. Кроме этого, на рис. 4 справа видно подтверждение соотношения (1) в динамике.

На рис. 5 представлены реакции $pn \to NN\pi\pi$, в которых вместо связанного состояния d образуется пара нуклонов, а пара π-мезонов компенсирует электрический заряд. Для этих реакций вклад резонанса Δ является доминирующим, а в зависимости сечений от $\sqrt{(s)}$ видны особенности около точки 2,38 ГэВ, которая соответствует массе резо-

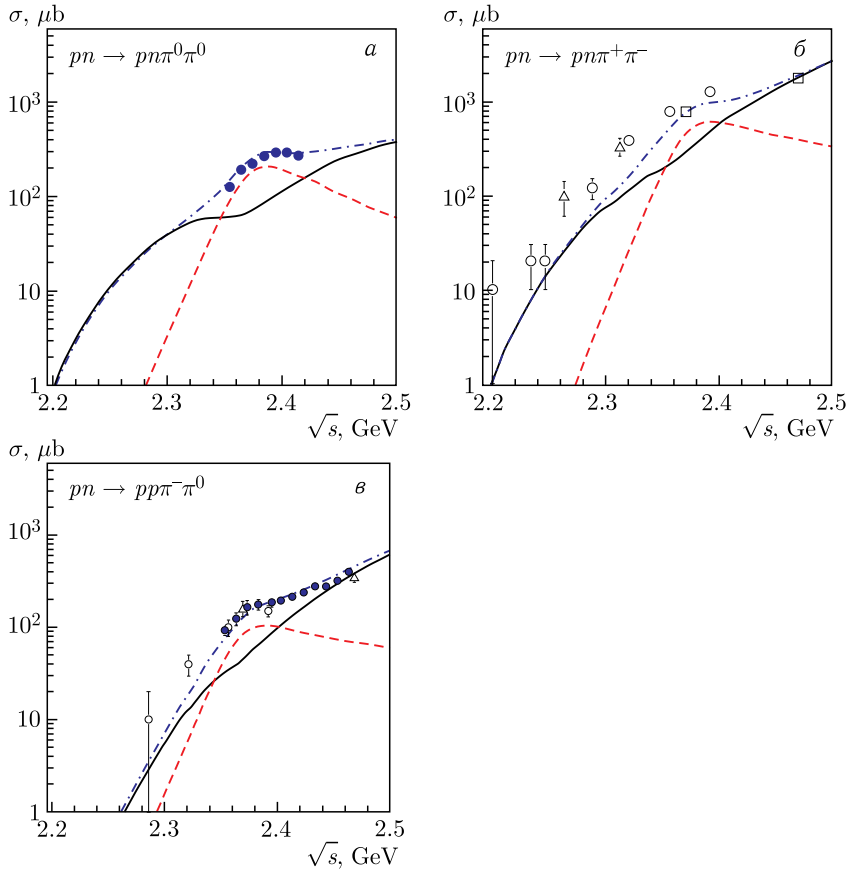

Рис. 5. Полное сечение $\sigma(pn \to pn\pi^0\pi^0)$ (*а*), $\sigma(pn \to pn\pi^+\pi^-)$ (*б*) и $\sigma(pn \to pp\pi^-\pi^0)$ (*в*). Темные точки — результат WASA, светлые точки — предыдущие эксперименты [14–18]

нанса d^*. В результате эффект от резонанса d^* подавлен на уровне $\sigma(d^*)/\sigma(NN\pi\pi) \sim 170$ мкб/40 мб.

2. УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ np

Если резонансная структура видна в s-канале для системы протон–нейтрон, то она также проявляется в поведении некоторых наблюдаемых величин для упругого рассеяния np. В работе [19] такая оценка была сделана. Было показано, что заметный эффект проявится для анализирующей способности A_y. Но оказалось, что именно в области резонанса d^* данных об упругом np-рассеянии нет.

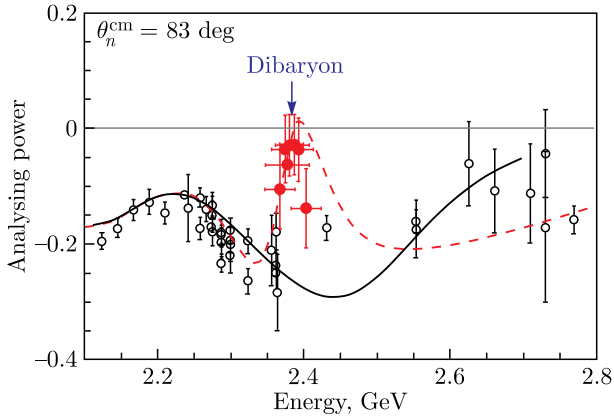

Рис. 6. Зависимость анализирующей способности от $\sqrt{s}$ для реакции $dp \to np + p_{\rm spect}$ от ($T_d = 2{,}27$ ГэВ)

Следующие подтверждения резонанса d^* были получены в эксперименте по измерению сечения рассеяния поляризованных нейтронов на протонах. Исследовалась реакция рассеяния пучка поляризованных дейтронов на протонной мишени. Измерения выполнялись на детекторе WASA-at-COSY. Регистрация рассеянного протона в центральном детекторе или в переднем калориметре, а также регистрация спектаторного протона в переднем калориметре позволяют реконструировать всю кинематику события. Регистрация нейтрона лишь уменьшает число степеней свободы для кинематического фита. На рис. 6 показана измеренная зависимость от $\sqrt{s}$ анализирующей способности упругого np-рассеяния. Измерялись реакции с обратной кинематикой, в которых поляризованные дейтроны рассеивались на протонах $dp \to np + p_{\rm spect}$ при энергии $T_d = 2{,}27$ ГэВ. Поляризации пучка могли быть up, down, neutral.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Связанные с дибарионами многочисленные публикации охватывают широкий круг работ, в основном теоретических, например, [10], где предсказаны мультиплетные состояния, или [20] с расчетами на решетке, или работ [21, 22], где обсуждается описание экспериментальных данных с использованием промежуточных дибарионных резонансов. В настоящей работе проанализированы результаты некоторых экспериментов на детекторе WASA и WASA-at-COSY. Представленный здесь набор данных, включающий интегральные сечения и дифференциальные распределения, указывает на существование резонансной структуры как в изоскалярной реакции $pn \to d\pi^0\pi^0$, так и в реакции со смешанным изоспином

$pn \to d\pi^+\pi^-$. В изовекторной реакции $pp \to d\pi^+\pi^0$ интегральное сечение не имеет особенностей.

Результаты рассмотренных в этой работе экспериментов по рождению пар пионов в NN-взаимодействиях показали:

1. Эффект ABC наблюдается в изоскалярных реакциях и в реакциях со смешанным изоспином.

2. Зависимость полного сечения от $\sqrt{s}$ для изоскалярных конечных состояний и состояний со смешанным изоспином в реакциях $pn \to d\pi^+\pi^-$ имеет резонансный максимум в точке 2,38 ГэВ. Ширина резонанса оценивается равной 80 МэВ. Положение пика сечения примерно на 80 МэВ ниже массы двух Δ-резонансов $2M_\Delta$.

3. Угловые распределения продуктов распада резонансной структуры в с. ц. м. соответствует спину $J^p = 3^+$.

4. Результаты эксперимента по рассеянию $pn \to pp\pi^0\pi^-$ [14] не имеют характерных признаков ABC-эффекта, но допускают описание особенности сечения с использованием амплитуды резонанса с $M = 2{,}38$ ГэВ, $\Gamma = 80$ МэВ и $I(J^p) = 0(3^+)$.

5. Исследование особенностей в рассеянии поляризованных нейтронов на протонах $\mathbf{d}p \to np + p_{\mathrm{spect}}$ привело к внесению поправок в данные SAID SP07 NN и обнаружению полюса в парциально-волновом анализе [23].

Благодарности. Автор выражает благодарность всем сотрудникам коллаборации WASA-at-COSY, в особенности проф. H. Clement и Т. Ю. Скородько за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adlarson P., Augustyniak W., Bardan W. et al.* // Phys. Rev. C. 2012. V. 86. P. 032201(R).
2. *Adlarson P., Augustyniak W., Bardan W. et al.* // Phys. Lett. B. 2013. V. 721. P. 229–236.
3. *Clement H.* arXiv:1610.05591v1. 2016.
4. *Bargholtz Chr., Bashkanov M., Berlowski M. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 594. P. 339–350.
5. *Brodowski W., Bilger R., Calen H., Clement H. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 192301.
6. *Pätzold J., Bashkanov M., Bilger R., Brodowski W. et al.* // Phys. Rev. C. 2003. V. 67. P. 052202(R).
7. *Bashkanov M. et al.* // Phys. Lett. B. 2006. V. 637. P. 223.
8. *Adam H.-H., Bashkanov M., Bechstedt U. et al.* arXiv:nucl-ex/0411038.
9. *Adlarson P., Adolph C., Augustyniak W. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 242302.
10. *Dyson F. J., Xuong N.-H.* // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13. P. 815.
11. *Booth N. E., Abashian A., Crowe K. M.* // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 7. P. 35.
12. *Booth N. E., Abashian A., Crowe K. M.* // Phys. Rev. Lett. 1960. V. 6. P. 258.
13. *Booth N. E., Abashian A., Crowe K. M.* // Phys. Rev. C. 1963. V. 132. P. 2296.

14. *Adlarson P., Augustyniak W., Bardan W. et al.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 055208.
15. *Adlarson P., Augustyniak W., Bardan W. et al.* // Phys. Lett. B. 2015. V. 743. P. 325–332; arXiv:1409.2659 [nucl-ex].
16. *Tsuboyama T. et al.* // Phys. Rev. C. 2000. V. 62. P. 034001.
17. *Brundt D. C., Clayton M. J., Westwood B. A.* // Phys. Rev. 1969. V. 187. P. 1856.
18. *Abdivaliev A., Besliu C., Cotorobai F., Gasparian A. P., Gruia S., Ierusalimov A. P., Kopylova D. K., Moroz V. I., Nikitin A. V., Troian Yu. A.* // Nucl. Phys. B. 1980. V. 168. P. 385.
19. *Pricking A., Bashkanov M., Clement H.* arXiv:1310.5532. 2013.
20. Sinya AOKI. arXiv:2001.08323 [hep-lat].
21. *Platonova M. N., Kukulin V. I.* // Nucl. Phys. A. 2016. V. 946. P. 117.
22. *Kukulin V. I. et al.* // Phys. Lett. B. 2020. V. 801. P. 135146.
23. *Adlarson P., Augustyniak W., Bardan W. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 202301.