

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА PHYSICS

УДК 539.12-17

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-159-163>

Поступило в редакцию 30.12.2019

Received 30.12.2019

Е. С. Кокоулина¹, М. И. Левчук², М. Н. Невмержицкий³, Р. Г. Шуляковский³

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация

²Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

³Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

О ПОЛНОМ СЕЧЕНИИ РЕАКЦИИ $\gamma d \rightarrow \pi pp$ В ПОРОГОВОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ

(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)

Аннотация. Рассчитано полное сечение некогерентного фоторождения π^- -мезона на дейтроне при пороговых энергиях реакции от 145 до 160 МэВ. Для описания реакции был использован диаграммный подход. Учтены вклады от диаграмм, которые соответствуют плосковолновому импульсному приближению, а также NN - и πN -взаимодействиям в конечном состоянии. Проведено сравнение вычисленных сечений с результатами недавних измерений, выполненных в лаборатории MAX IV Лундского университета. Имеется хорошее согласие с данными при энергиях фотона от 147 до 155 МэВ. Однако при 158 и 160 МэВ теоретические предсказания заметно превышают измеренные сечения.

Ключевые слова: фотон, дейтрон, нуклон, мезон, диаграммный подход, нуклон-нуклонный потенциал, фоторождение пиона

Для цитирования: О полном сечении реакции $\gamma d \rightarrow \pi pp$ в пороговой области энергий / Е. С. Кокоулина [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 159–163. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-159-163>

Elena S. Kokoulina¹, Michael I. Levchuk², Maxim N. Nevmerzhitsky³, Roman G. Shulyakovsky³

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

²B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

TOTAL CROSS SECTION OF THE REACTION $\gamma d \rightarrow \pi pp$ IN THE THRESHOLD ENERGY REGION

(Communicated by Corresponding Member Lev M. Tomilchik)

Abstract. In the framework of the diagrammatic approach, the total cross section of near-threshold π^- photoproduction on the deuteron is calculated. Contributions of the diagrams corresponding to the plane wave impulse approximation as well as to NN - and πN -interactions in the final state have been taken into account. We have compared the theoretical predictions with the results of the recent measurements performed at the MAX IV laboratory of the Lund University. There is good agreement with the data at photon energies from 147 to 155 MeV. However, at 158 and 160 MeV, the theoretical predictions significantly overestimate the measured cross sections.

Keywords: photon, deuteron, nucleon, meson, diagrammatic approach, nucleon-nucleon potential, pion photoproduction

For citation: Kokoulina E. S., Levchuk M. I., Nevmerzhitsky M. N., Shulyakovsky R. G. Total cross section of the reaction $\gamma d \rightarrow \pi pp$ in the threshold energy region. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 159–163 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-159-163>

Введение. Отсутствие плотной свободной нейтронной мишени обуславливает интерес к ядрам как к источникам стабильных нейтронов. Ввиду того, что дейтрон – ядро с наиболее простой и хорошо изученной структурой, реакции на нем являются основным источником

сведений о нейтроне и об «элементарных» амплитудах взаимодействия на нем. Данные о реакции фоторождения пионов на нуклонах несут богатую информацию о структуре нуклона. Неудивительно, что этот процесс привлекает пристальное внимание как теоретиков, так и экспериментаторов уже в течение многих десятилетий. Отметим, что знание амплитуд фоторождения пионов на нуклоне имеет большое значение при интерпретации данных по фоторождению пионов на ядрах. Детальное обсуждение фоторождения пионов на нуклоне и в легких ядрах можно найти в [1].

Теоретические предсказания хорошо согласуются с измеренными сечениями по когерентному фоторождению нейтральных пионов на дейтроне, $\gamma d \rightarrow \pi^0 d$, которые были получены на установке МАМІ [2; 3]. Однако в случае некогерентной реакции $\gamma d \rightarrow \pi NN$ есть заметные расхождения между предсказываемыми всеми имеющимися моделями и измеренными сечениями, особенно в окрестности Δ -пика и для канала с фоторождением нейтральных π^0 -мезонов [4].

Практически все имеющиеся данные по реакции $\gamma d \rightarrow \pi NN$ относятся к области энергий $E_\gamma > 200$ МэВ. Только в одном эксперименте измерялось полное сечение реакции $\gamma d \rightarrow \pi^+ nn$ при энергиях до 22 МэВ выше порога [5]. Недавно были выполнены первые измерения полного сечения реакции $\gamma d \rightarrow \pi^- pp$ в пороговой области энергий $E_\gamma < 160$ МэВ [6]. В этой же работе приведены предсказания теоретической модели В. Е. Тарасова и др. [7]. Оказалось, что при энергиях от 147 до 157 МэВ в пределах неопределенностей модель удовлетворительно описывает полученные данные. Однако выше 157 МэВ теоретические предсказания заметно превышают измеренные значения. Возможные причины расхождения подробно обсуждаются в [6]. Авторы считают, что одной из причин является неучет энергетической зависимости доминирующего мультиполя E_{0+} в реакции фоторождения заряженных π -мезонов на нуклонах при пороговых энергиях. Вторая причина может состоять в том, что в модели [6] при расчете амплитуды элементарной реакции $\gamma n \rightarrow \pi p$ учитывается только вклад s -волны. Но при энергиях примерно на 10 МэВ выше порога и другие волны (p и d) могут давать заметный вклад.

Кинематика реакции. В данной работе мы проведем расчет полного сечения реакции $\gamma d \rightarrow \pi pp$ в модели, построенной в [4; 8]. Прежде чем переходить к описанию модели, коротко остановимся на кинематике реакции. Пусть $k = (k^0, \mathbf{k})$, $p_d = (\varepsilon_d, \mathbf{p}_d)$, $q = (\varepsilon_\pi, \mathbf{q})$, $p_1 = (\varepsilon_1, \mathbf{p}_1)$ и $p_2 = (\varepsilon_2, \mathbf{p}_2)$ – есть 4-импульсы начальных фотона и дейтрона, а также 4-импульсы конечных пиона и протонов соответственно. Символом E_γ обозначим энергию фотона в лабораторной системе ($k_{\text{lab}}^0 = E_\gamma$), а символ ω будем использовать для энергии фотона в системе центра масс: $k_{\text{cm}}^0 = \omega = E_\gamma M / W_{\gamma d}$, где $W_{\gamma d} = \sqrt{M^2 + 2ME_\gamma}$ – инвариантная масса системы фотон–дейтрон, а M – масса дейтрона.

Удобно взять в качестве независимых кинематических переменных энергию фотона и импульс пиона \mathbf{q} в используемой системе отсчета (система центра масс в нашем случае), углы Θ_p и Φ_p одного из протонов в системе центра масс протон-протонной пары. Используя тождество

$$W_{NN} = 2\varepsilon_p = 2\sqrt{\mathbf{P}^2 + m^2} = \sqrt{(k + p_d - q)^2},$$

где m – масса нуклона, можно найти величину 3-импульса \mathbf{P} . Буст импульсов \mathbf{P} и $-\mathbf{P}$ со скоростью $\mathbf{v} = (\mathbf{k} + \mathbf{p}_d - \mathbf{q}) / (k^0 + \varepsilon_d - \varepsilon_\pi)$ дает импульсы конечных протонов

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{P} + \gamma \mathbf{v} \left[\frac{\gamma}{1 + \gamma} \mathbf{v} \mathbf{P} + \varepsilon_p \right], \quad \mathbf{p}_2 = -\mathbf{P} + \gamma \mathbf{v} \left[-\frac{\gamma}{1 + \gamma} \mathbf{v} \mathbf{P} + \varepsilon_p \right], \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \mathbf{v}^2}},$$

и, следовательно, кинематика полностью определена. Отметим, что пороги реакции $\gamma d \rightarrow \pi^- pp$ составляют $\omega = 135,6$ мэВ в системе центра масс и $E_\gamma = 145,8$ мэВ в лабораторной системе.

Дифференциальное сечение реакции имеет вид

$$\frac{d\sigma}{d\mathbf{q}d\Omega_{\mathbf{P}}} = \frac{1}{(2\pi)^5} \frac{m^2 \varepsilon_d |\mathbf{P}|}{8k p_d \varepsilon_\pi \varepsilon_p} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{6} |T|^2. \quad (1)$$

Фактор $\frac{1}{2}$ возникает из-за тождественности конечных фермионов (протонов), а фактор $\frac{1}{6}$ – из-за усреднения по начальным спиновым состояниям частиц. В квадрате модуля амплитуды реакции $|T|^2$ подразумевается суммирование по поляризациям начальных и конечных частиц.

Для получения полного сечения реакции соотношение (1) должно быть проинтегрировано по 3-импульсу \mathbf{q} и телесному углу $d\Omega_{\mathbf{p}}$.

Модель реакции. Наша модель основана на использовании так называемого диаграммного подхода. Были учтены вклады от диаграмм, изображенных на рис. 1. Все детали расчетов диаграмм можно найти в [4; 8].

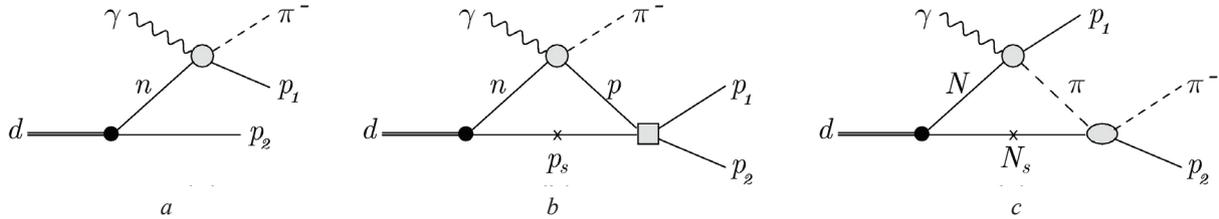


Рис. 1. Диаграммное представление амплитуды реакции $\gamma d \rightarrow \pi pp$: a – плосковолновое импульсное приближение (ПВИП); b и c – ПВИП с pp - и πN -взаимодействиями в конечном состоянии (ВКС) соответственно. Диаграммы с перестановкой $1 \leftrightarrow 2$ подразумеваются. Символ x означает, что нуклон-спектатор N_s находится на массовой поверхности

Fig. 1. Diagrammatic representation of the reaction amplitude for $\gamma d \rightarrow \pi pp$: a is diagram for plane wave impulse approximation (PWIA); b and c : PWIA with pp and πN final state interactions (FSI) consequently. Diagrams with the permutation $1 \leftrightarrow 2$ are assumed. Symbol x means that the spectator nucleon N_s is on the mass shell

При расчете диаграмм требуется знание дейтронной волновой функции. Она бралась для известного CD-Bonn нуклон-нуклонного потенциала [9]. Во всех диаграммах нужна элементарная амплитуда фоторождения пионов на нуклоне $\gamma N \rightarrow \pi N$. Для описания этой реакции нами была использована модель MAID07 [10], которая хорошо воспроизводит многочисленные данные как в случае неполяризованных, так и поляризованных частиц. При расчете диаграммы на рис. 1, b требуется знание амплитуды pp -рассеяния. Последняя была получена путем решения интегрального уравнения Липпмана–Швингера для CD-Bonn потенциала. Нами были учтены все парциальные волны с полным моментом $J \leq 4$, а не только s -волна, как это делалось в [6].

Наконец, при расчете диаграммы, изображенной на рис. 1, c , необходима амплитуда πN -рассеяния. Она была получена решением уравнения Липпмана–Швингера для сепарабельного потенциала, построенного в [11]. В амплитуде учитывалось 10 парциальных волн, включая, конечно, и s -волны. Построенная модель хорошо описывает экспериментальные данные, «аккумулированные» в парциальных анализах, которые можно найти, например, в [12].

Таким образом, в отличие от [6], в амплитудах NN - и πN -рассеяния нами были учтены все необходимые в данной области энергий парциальные волны, а не только s -волны. Отметим также, что в нашем расчете зависимость этих амплитуд от энергии учитывается автоматически.

Результаты и их обсуждение. Результаты данной работы, их сравнение с предсказаниями других моделей и экспериментальными данными показаны на рис. 2. Можно видеть идеальное согласие наших расчетов и расчетов работы [6] в ПВИП. Полные расчеты в разных моделях немного различаются, но две экспериментальные точки при 158 и 160 МэВ находятся заметно ниже теоретических предсказаний всех подходов. У нас нет объяснений для указанного расхождения. Решение проблемы требует дополнительного исследования.

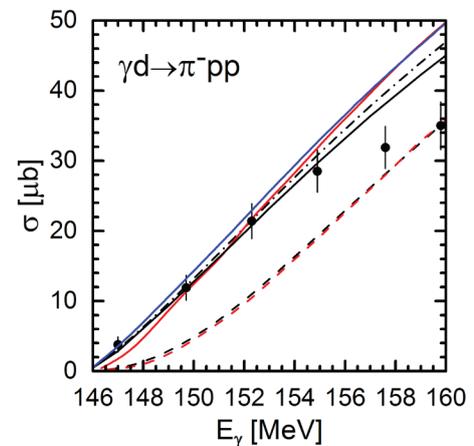


Рис. 2. Полное сечение реакции $\gamma d \rightarrow \pi pp$ в пороговой области энергий: штриховые кривые – ПВИП, штрихпунктирная кривая – ПВИП + pp -ВКС, сплошная кривая – полный расчет. Красные кривые – соответствующие результаты работы [6]. Синяя кривая – полный расчет работы [13]. Экспериментальные данные работы [6]

Fig. 2. Total cross section of the reaction $\gamma d \rightarrow \pi pp$ in the threshold energy region. Dashed curves are results for PWIA. Dot-dash line is obtained for PWIA + pp FSI. Solid curve is our prediction for the total cross section of the reaction. Red curves are corresponding results from Ref. [6]. Blue curve is full calculation from Ref. [13]. Experimental data are taken from Ref. [6]

Следует отметить, что в [5] изучалась реакция $\gamma d \rightarrow \pi^+ nn$ также в пороговой области энергий. Поскольку элементарные амплитуды реакций $\gamma n \rightarrow \pi p$ и $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ при таких энергиях очень близки по величине и отличаются только знаком, то можно было бы ожидать, что поведение полных сечений реакций $\gamma d \rightarrow \pi^+ nn$ и $\gamma d \rightarrow \pi pp$ тоже должно быть очень похожим. Однако измеренное в [5] поведение полного сечения реакции $\gamma d \rightarrow \pi^+ nn$ не согласуется с показанным на рис. 2 для канала $\gamma d \rightarrow \pi pp$. Это поведение оказывается аналогичным предсказаниям полных расчетов из рис. 2.

Благодарности. Авторы очень признательны Е. М. Дарвишу, В. Е. Тарасову и А. И. Фиксу за многочисленные полезные обсуждения. Работа частично поддержана БРФФИ (грант Ф18Д-010).

Acknowledgements. We are very grateful to E. M. Darwish, V. E. Tarasov, A. I. Fix for many valuable discussions. This work was partly supported by Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant Ф18Д-010).

Список использованных источников

1. Laget, J. M. Pion photoproduction on few body systems / J. M. Laget // *Phys. Rep.* – 1981. – Vol. 69, N 1. – P. 1–84. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(81\)90164-2](https://doi.org/10.1016/0370-1573(81)90164-2)
2. Single and double π^0 photoproduction from the deuteron / B. Krusche [et al.] // *Eur. Phys. J. A.* – 1999. – Vol. 6, N 3. – P. 309–324. <https://doi.org/10.1007/s100500050349>
3. Coherent and incoherent π^0 photoproduction from the deuteron / U. Siodlaczek [et al.] // *Eur. Phys. J. A.* – 2001. – Vol. 10, N 3. – P. 365–371. <https://doi.org/10.1007/s100500170120>
4. Incoherent pion photoproduction on the deuteron in the first resonance region / M. I. Levchuk [et al.] // *Phys. Rev. C.* – 2006. – Vol. 74, N 1. – Art. 014004(20). <https://doi.org/10.1103/physrevc.74.014004>
5. ${}^2\text{H}(\gamma, \pi^+)nn$ total cross section from threshold to $\Delta E = 22$ MeV / E. C. Booth [et al.] // *Phys. Rev. C.* – 1979. – Vol. 20, N 4. – P. 1217–1220. <https://doi.org/10.1103/physrevc.20.1217>
6. Near-threshold π^- photoproduction on the deuteron [Electronic recourse] / B. Strandberg [et al.]. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1812.03023>. – Date of access: 14.11.2019.
7. Extracting the photoproduction cross sections off the neutron, via the $\gamma n \rightarrow \pi p$ reaction, from deuteron data with final-state interaction effects / V. E. Tarasov [et al.] // *Phys. Rev. C.* – 2011. – Vol. 84, N 3. – Art. 035203(14). <https://doi.org/10.1103/physrevc.84.035203>
8. Levchuk, M. I. Helicity-dependent reaction $\bar{\gamma}d \rightarrow \pi NN$ and its contribution to the Gerasimov–Drell–Hearn sum rule for the deuteron / M. I. Levchuk // *Phys. Rev. C.* – 2010. – Vol. 82, N 4. – Art. 044002(13). <https://doi.org/10.1103/physrevc.82.044002>
9. Machleidt, R. High-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential / R. Machleidt // *Phys. Rev. C.* – 2001. – Vol. 63, N 2. – Art. 024001(32). <https://doi.org/10.1103/physrevc.63.024001>
10. A unitary isobar model for pion photo- and electroproduction on the proton up to 1 GeV / D. Drechsel [et al.] // *Nucl. Phys. A.* – 1999. – Vol. 645, N 1. – P. 145–174. [https://doi.org/10.1016/s0375-9474\(98\)00572-7](https://doi.org/10.1016/s0375-9474(98)00572-7)
11. Nozawa, S. A dynamical model of pion photoproduction on the nucleon / S. Nozawa, B. Blankleider, T. S. H. Lee // *Nucl. Phys. A.* – 1990. – Vol. 513, N 3–4. – P. 459–510. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(90\)90395-3](https://doi.org/10.1016/0375-9474(90)90395-3)
12. Parametrization dependence of T -matrix poles and eigenphases from a fit to πN elastic scattering data / R. L. Workman [et al.] // *Phys. Rev. C.* – 2012. – Vol. 86, N 3. – Art. 035202(6). <https://doi.org/10.1103/physrevc.86.035202>
13. Near-threshold incoherent pion photoproduction on the deuteron with final-state interaction effects / E. M. Darwish [et al.] // *Annals of Physics.* – 2019. – Vol. 411. – Art. 167990(26). <https://doi.org/10.1016/j.aop.2019.167990>

References

1. Laget J. M. Pion photoproduction on few body systems. *Physics Reports*, 1981, vol. 69, no. 1, pp. 1–84. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(81\)90164-2](https://doi.org/10.1016/0370-1573(81)90164-2)
2. Krusche B., Ahrens J., Beck R., Fuchs M., Hall S. J., Härter F., Kellie J. D., Metag V., Röbig-Landau M., Ströher H. Single and double π^0 photoproduction from the deuteron. *European Physical Journal A*, 1999, vol. 6, no. 3, pp. 309–324. <https://doi.org/10.1007/s100500050349>
3. Siodlaczek U., Achenbach P., Ahrens J., Annand J. R. M., Arends H.-J., Beck R., Bilger R., Clement H., Hejny V., Kotulla M., Krusche B., Kuhr V., Leukel R., McGeorge J. C., Metag V., Novotny R., Olmos de León V., Rambo F., Schepkin M., Schmidt A., Seluzhenkov I., Ströher H., Wagner G. J., Walcher Th., Weiß J., Wissmann F., Wolf M. Coherent and incoherent π^0 photoproduction from the deuteron. *European Physical Journal A*, 2001, vol. 10, no. 3, pp. 365–371. <https://doi.org/10.1007/s100500170120>
4. Levchuk M. I., Loginov A. Yu., Sidorov A. A., Stibunov V. N., Schumacher M. Incoherent pion photoproduction on the deuteron in the first resonance region. *Physical Review C*, 2006, vol. 74, no. 1, art. 014004(20). <https://doi.org/10.1103/physrevc.74.014004>
5. Booth E. C., Chasan B., Commuzzi J., Bosted P. ${}^2\text{H}(\gamma, \pi^+)nn$ total cross section from threshold to $\Delta E = 22$ MeV. *Physics Review C*, 1979, vol. 20, no. 4, pp. 1217–1220. <https://doi.org/10.1103/physrevc.20.1217>
6. Strandberg B., Fissum K. G., Annand J. R. M., Briscoe W. J., Brudvik J., Cividini F., Clark L., Downie E. J., England K., Feldman G., Glazier D. I., Hamilton K., Hansen K., Isaksson L., Al Jebali R., Kovash M. A., Kudryavtsev A. E., Lensky V.,

Lipschutz S., Lundin M., Meshkian M., Middleton D. G., Myers L. S., O'Donnell D., O'Rielly G. V., Oussena B., Preston M. F., Schröder B., Seitz B., Strakovsky I. I., Taragin M., Tarasov V. E. Near-threshold π^- photoproduction on the deuteron. Available at: <https://arxiv.org/abs/1812.03023> (accessed 14 November 2019).

7. Tarasov V. E., Briscoe W. J., Gao H., Kudryavtsev A. E., Strakovsky I. I. Extracting the photoproduction cross sections off the neutron, via the $\gamma n \rightarrow \pi p$ reaction, from deuteron data with final-state interaction effects. *Physical Review C*, 2011, vol. 84, no. 3, art. 035203(14). <https://doi.org/10.1103/physrevc.84.035203>

8. Levchuk M. I. Helicity-dependent reaction $\bar{\gamma}d \rightarrow \pi NN$ and its contribution to the Gerasimov–Drell–Hearn sum rule for the deuteron. *Physical Review C*, 2010, vol. 82, no. 4, art. 044002(13). <https://doi.org/10.1103/physrevc.82.044002>

9. Machleidt R. High-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential. *Physical Review C*, 2001, vol. 63, no. 2, art. 024001(32). <https://doi.org/10.1103/physrevc.63.024001>

10. Drechsel D., Hanstein O., Kamalov S. S., Tiator L. A unitary isobar model for pion photo- and electroproduction on the proton up to 1 GeV. *Nuclear Physics A*, 1999, vol. 645, no. 1, pp. 145–174. [https://doi.org/10.1016/s0375-9474\(98\)00572-7](https://doi.org/10.1016/s0375-9474(98)00572-7)

11. Nozawa S., Blankleider B., Lee T. S. H. A dynamical model of pion photoproduction on the nucleon. *Nuclear Physics A*, 1990, vol. 513, no. 3–4, pp. 459–510. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(90\)90395-3](https://doi.org/10.1016/0375-9474(90)90395-3)

12. Workman R. L., Arndt R. A., Briscoe W. J., Paris M. W., Strakovsky I. I. Parametrization dependence of T -matrix poles and eigenphases from a fit to πN elastic scattering data. *Physical Review C*, 2012, vol. 86, no. 3, art. 035202(6). <https://doi.org/10.1103/physrevc.86.035202>

13. Darwish E. M., Almarashi M. M., Mahrous E. M., Hassanain M. A., Saleh Yousef M. Near-threshold incoherent pion photoproduction on the deuteron with final-state interaction effects. *Annals of Physics*, 2019. vol. 411, art. 167990(26). <https://doi.org/10.1016/j.aop.2019.167990>

Информация об авторах

Кокouлина Елена Сергеевна – д-р физ.-мат. наук, доцент, начальник сектора. Объединенный институт ядерных исследований (ЛФВЭ ОИЯИ, 141980, Дубна, Российская Федерация). E-mail: kokoulina@jinr.ru.

Левчук Михаил Иванович – д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: levchuk@dragon.bas-net.by.

Невмержицкий Максим Николаевич – науч. сотрудник. Институт прикладной физики НАН Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nevmerzhhmn@gmail.com.

Шуляковский Роман Георгиевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, директор. Институт прикладной физики НАН Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shulyakovsky@iaph.bas-net.by.

Information about the authors

Kokoulina Elena S. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Head of the Sector. Joint Institute for Nuclear Research (LHEP JINR, 141980, Dubna, Russian Federation). E-mail: kokoulina@jinr.ru.

Levchuk Michael I. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: levchuk@dragon.bas-net.by.

Nevmerzhiitsky Maxim N. – Researcher. Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nevmerzhhmn@gmail.com.

Shulyakovsky Roman G. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Director. Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shulyakovsky@iaph.bas-net.by.