

УДК 539.12.01

PACS 03.65.Nk, 13.88.+e, 21.45.Bc

DOI: <https://doi.org/10.24144/2415-8038.2016.39.82-87>

В.І. Жаба

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54
e-mail: viktorzh@meta.ua

НОВІ АНАЛІТИЧНІ ФОРМИ ХВИЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ДЕЙТРОНА ДЛЯ ПОТЕНЦІАЛУ Reid93

Апроксимовано хвильову функцію дейтрона в координатному представленні для потенціалу Reid93. Розрахована по хвильових функціях тензорна поляризація t_{20} співрозмірна з раніше опублікованими результатами. По отриманим хвильовим функціям дейтрона в координатному та імпульсному представленнях розраховано його поляризаційні характеристики: тензор поляризованої мішені і тензор асиметрії. Теоретичні розрахунки добре узгоджуються з експериментальними даними.

Ключові слова: дейтрон, хвильова функція, апроксимація, тензорна поляризація, асиметрія.

Вступ

Дейтрон є найпростішим ядром, яке складається з двох сильно взаємодіючих частинок - протона і нейтрона. Простота будови дейтрона робить його зручною лабораторією для вивчення міжнуклонних сил. На даний час розрахунки статичних характеристик дейтрона добре узгоджуються з експериментальними даними [1].

Незважаючи на досить добрий теоретичний опис експериментальних величин параметрів дейтрона, існують певні теоретичні неузгодженості. Наприклад, одна або обидві компоненти хвильової функції мають вузли [2,3] поблизу початку координат. Наявність вузлів у хвильових функціях основного (і єдиного) стану дейтрона може вказувати на існування певних неузгодженостей в реалізації чисельних алгоритмів в подібних задачах. Вплив вибору чисельних алгоритмів на розв'язки задачі приведено в роботах [4-6].

Такі потенціали нуклон-нуклонної взаємодії, як CD-Bonn [2], Moscow [3], NijmI, NijmII, Nijm93 (Неймегенської групи [7]), Argonne v18 чи Paris потенціал мають досить непросту структуру і громіздкий запис. Оригінальний потенціал Reid68 був параметризований на основі фазового аналізу Неймегенською групою і

отримав назву Reid93. Параметризація була проведена для 50 параметрів потенціалу, причому $\chi^2/N_{data}=1.03$ [7].

Крім того, хвильова функція дейтрона (ХФД) може бути представлена таблично: через відповідні масиви значень радіальних хвильових функцій. Іноді при чисельних розрахунках оперувати такими масивами чисел доволі складно. І текст програм для чисельних розрахунків є перевантажений. Тому є доцільним отримання більш простих аналітичних форм представлення ХФД.

Апроксимація ХФД

Відомі чисельні значення радіальної ХФД в координатному представленні можна апроксимувати за допомогою зручних розкладів [8] в аналітичній формі:

$$\begin{cases} u_a(r) = \sum_{i=1}^{N_a} A_i \exp(-a_i r^2), \\ w_a(r) = r^2 \sum_{i=1}^{N_a} B_i \exp(-b_i r^2), \end{cases} \quad (1)$$

асиметричного подвійного сигмоїдала [6] або апроксимацій юкавівського виду [2]:

$$\begin{cases} u_b(r) = \sum_{i=1}^{N_b} C_i \exp(-m_i r), \\ w_b(r) = \sum_{i=1}^{N_b} D_i \exp(-m_i r) \left[1 + \frac{3}{m_i r} + \frac{3}{(m_i r)^2} \right], \end{cases} \quad (2)$$

де $m_i = \beta + (i-1)m_0$, $\beta = \sqrt{ME_d}$, $m_0 = 0.9 \text{ fm}^{-1}$. M - нуклонна маса, E_d - енергія зв'язку дейтрона.

Пошук коефіцієнтів аналітичної форми (2) був здійснений для Боннського [2] і Парижського потенціалів.

Крім (1) і (2), ХФД можна апроксимувати аналітичними формами виду [9]:

$$\begin{cases} u_c(r) = r^{3/2} \sum_{i=1}^{N_c} E_i \exp(-e_i r^3), \\ w_c(r) = r \sum_{i=1}^{N_c} F_i \exp(-f_i r^3). \end{cases} \quad (3)$$

Незважаючи на громіздкі і довготривалі розрахунки і мінімізації χ^2 , доводилося апроксимувати масиви 839×4 чисельних значень ХФД в інтервалі $r = 25 \text{ Фм}$ для потенціалу Reid93. Розраховані ХФД (3) не містять надлишкових вузлів і добре корелюють із даними роботи [11]. Згідно чисельно розрахованих ХФД (3) в координатному представленні отримані його параметри [6]: вклад D - стану P_D , радіус дейтрона r_d , електричний квадрупольний момент Q_d , магнітний момент μ_d . Вони добре узгоджуються з експериментальними [1] і теоретичними [7] результатами. Значення отриманих коефіцієнтів розкладу (3), форма ХФД і параметри дейтрона наведені в роботі [10]. По отриманих ХФД розраховано поляризаційні характеристики дейтрона [9].

Тензорна поляризація дейтрона

Експериментальне значення тензора поляризованої твердої ND_3 мішені визначається як [12,13]

$$R_{EXP} = 1 + P_{zz} (R_T - 1),$$

де P_{zz} - тензорна поляризація дейтронів мішені. Теоретичні значення тензора поляризованої мішені і тензорної поляризації відповідно [13]

$$R_T - 1 = \frac{x + 0,5x^2}{1 + 2x^2}, \quad (4)$$

$$t_{20} = -\sqrt{2} \frac{2x + x^2}{1 + 2x^2}, \quad (5)$$

де $x = \frac{2}{3} \eta \frac{F_G}{F_C}$. Зарядовий $F_C(p)$ і квадрупольний $F_Q(p)$ формфактори містять інформацію про електромагнітні властивості дейтрона:

$$F_C = [G_{Ep} + G_{En}] \int_0^\infty [u^2 + w^2] j_0 dr;$$

$$F_Q = \frac{2}{\eta} \sqrt{\frac{9}{8}} [G_{Ep} + G_{En}] \int_0^\infty [uw - \frac{w^2}{\sqrt{8}}] j_2 dr;$$

де $\eta = \frac{p^2}{4M_D^2}$; $M_D = 1875,63 \text{ MeV}$ - дейтронна маса; u і w - радіальні ХФД в координатному представленні; j_0, j_2 - сферичні функції Бесселя від аргументу $pr/2$; G_{Ep} і G_{En} - протонний і нейтронний електричний формфактори.

Розраховані теоретичні значення тензора поляризованої мішені (4) і тензорної поляризації (5) та їх порівняння з експериментальними даними [13] приведено на Рис. 1 і 2 відповідно.

Як видно з Рис. 1 і 2, теоретичні розрахунки тензора поляризованої мішені і тензорної поляризації добре узгоджуються з експериментальними даними.

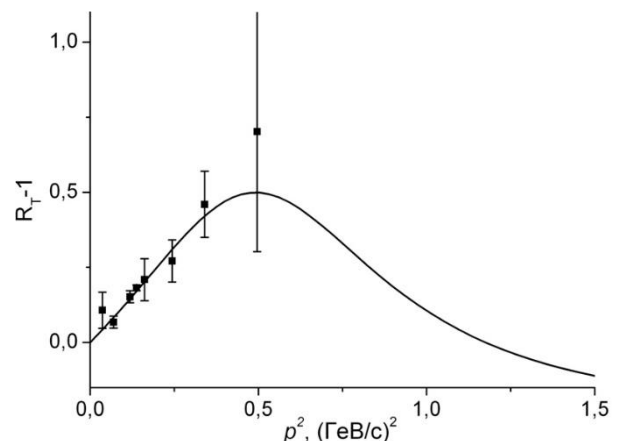


Рис. 1. Тензор поляризованої мішені

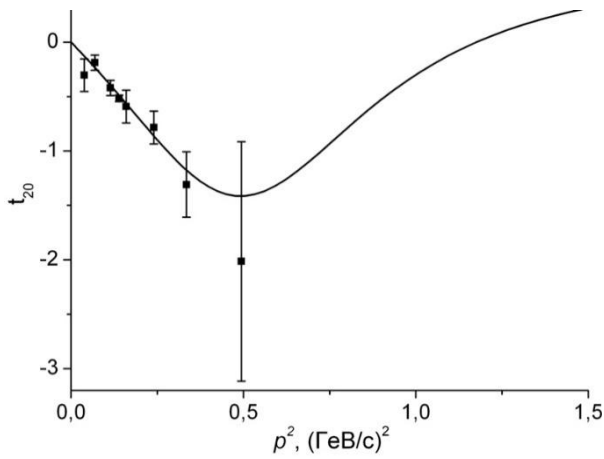


Рис. 2. Тензорна поляризація

По відомим ХФД в імпульсному представленні $u(p)$ і $w(p)$ можна знайти тензор асиметрії [14]

$$A_{zz} \propto \frac{\frac{1}{2}w^2(p) - \sqrt{2}u(p)w(p)}{u^2(p) + w^2(p)}. \quad (6)$$

Значення розрахованої величини тензора асиметрії A_{zz} для потенціалу Reid93 приведено на Рис. 3.

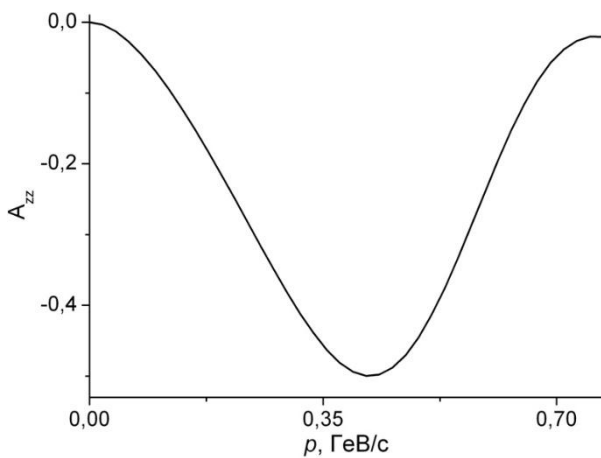


Рис. 3. Тензор асиметрії

Висновки

Застосовано дві нові аналітичні форми (3) для хвильових функцій дейтрона в координатному представленні для реалістичного нуклон-нуклонного потенціалу Reid93. Вказано, що отримані по цим ХФД статичні характеристики добре співпадають з експериментальними результатами.

Використовуючи хвильові функції дейтрона в координатному та імпульсному представленні, було розраховано такі величини як тензор поляризованої мішені (4), тензорну поляризацію (5) і тензор асиметрії (6). При розрахунках тензорної поляризації дейтрона враховано його зарядовий, квадрупольний і магнітний формфактори, які містять інформацію про електромагнітні властивості дейтрона. Отримані результати дають певну інформацію про електромагнітну структуру дейтрона.

У науковій літературі відсутні експериментальні дані для величин тензорної поляризації $t_{21}(p)$ і $t_{22}(p)$ в широкому інтервалі імпульсів. Тому є актуальним отримання даних величин як теоретично, так і експериментально.

Доцільними є також розрахунки поляризаційних характеристик дейтрона (компоненти тензора чутливості до поляризації дейтронів T_{20} , поляризаційної передачі K_0 і тензорної аналізуючої здатності A_{yy}) і порівняння їх з теоретичними розрахунками, а також з наявними експериментальними даними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Machleidt R. The nuclear force in the third millennium // Nucl. Phys. A. – 2001. – Vol. 689, Iss. 1. – P. 11–22.
2. Machleidt R. High-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential // Phys. Rev. C. – 2001. – Vol. 63, Iss. 2. – P. 024001-024032.
3. Kukuljin V.I., Pomerantsev V.N., Faessler A. et al. Moscow-type NN-potentials and three-nucleon bound states // Phys. Rev. C. – 1998. – Vol. 57, Iss. 2. – P. 535–554.
4. Гайсак І., Жаба В. Про вузли хвильової функції дейтрона // Вісник Львівського університету. Серія Фізика. – 2009. – № 44. – С. 8–15.
5. Гайсак І.І., Жаба В.І. Дейтрон: хвильова функція і параметри // Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Серія Фізика. – 2014. – № 36. – С. 100–106.

6. Бохінюк В.С., Жаба В.І., Парлаг О.М. До питання про енергетичну залежність перерізу реакції (γ, γ') // *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Серія Фізика.* – 2012. – №. 31. – С. 111–115.
7. Stoks V.G.J., Klomp R.A.M., Terheggen C.P.F. et al. Construction of high quality NN potential models // *Phys. Rev. C.* – 1994. – Vol. 49, Iss. 6. – P. 2950–2962.
8. Дубовиченко С.Б. Свойства легких атомных ядер в потенциальной кластерной модели. – Алматы: Данекер, 2004. – 247с.
9. Жаба В.І. Нові аналітичні форми хвильової функції і поляризаційні характеристики дейтрона для потенціалу Reid93 // *Вісник Черкаського університету. Серія Фізико-математичні науки.* – 2015. – Том. 349, № 16. – С. 50–55.
10. Zhaba V.I. New analytical forms of wave function in coordinate space and tensor polarization of deuteron // *Mod. Phys. Lett. A.* – 2016. – Vol. 31, No. 25 – P. 1650139.
11. Swart de J.J., Klomp R.A.M.M., Rentmeester M.C.M. et al. The Nijmegen Potentials // *Few-Body Systems.* – 1995. – Vol. 8. – P. 438–447.
12. Althoff K.H., Boden B., Burkert V. et al. Elastic Electron Deuteron Scattering on a Tensor Polarized Solid ND₃ Target // *High Energy Spin Physics: Conf. Rep.* – 1990. – Vol. 1. – P. 550–557.
13. Boden B., Burkert V., Knop G. et al. Elastic electron deuteron scattering on a tensor polarized solid ND₃ target // *Z. Phys. C: Particles and Fields.* – 1991. – Vol. 49, Iss. 2. – P. 175–185.
14. Frankfurt L., Strikman M. Hard nuclear processes and microscopic nuclear structure // *Phys. Rept.* – 1988. – Vol. 160, No.5,6. – P. 235–427.

Стаття надійшла до редакції 07.05.2016

В.И. Жаба

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

НОВЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ФОРМЫ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ ДЕЙТРОНА ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛА Reid93

Аппроксимирована волновая функция дейтрона в координатном представлении для потенциала Reid93. Рассчитаная по волновым функциям тензорная поляризация t_{20} сопоставима с ранее опубликованными результатами. По полученным волновым функциям дейтрона в координатном и импульсном представлениях рассчитано его поляризационные характеристики: тензор поляризованной мишени и тензор асимметрии. Теоретические расчеты хорошо согласовываются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: дейтрон, волновая функция, аппроксимация, тензорная поляризация, асимметрия.

PACS 03.65.Nk, 13.88.+e, 21.45.Bc

V.I. Zhaba

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

NEW ANALYTICAL FORMS OF A DEUTERON WAVE FUNCTION FOR POTENTIAL Reid93

Introduction: The deuteron wave function can be presented as the table, that is through the respective massifs of values of radial wave functions. But sometimes, in calculations such arrays of numbers to operate quite difficult. And therefore the text of programs for numerical calculations is overloaded. Therefore receiving simpler analytical forms is expedient.

Purpose: In the received analytical forms of deuteron wave function in coordinate representation it is necessary to calculate polarization characteristics and them to compare to experimental results.

Results: The deuteron wave function in coordinate representation for potential Reid93 is approximated. The tensor polarization t_{20} calculated based on the wave functions is proportionate to the earlier published results. On the received deuteron wave function in coordinate and momentum representation are calculated such polarization characteristics: tensor polarization, tensor polarized target and tensor asymmetry.

Conclusion: Theoretical calculations for a tensor polarized target and tensor polarization are well coordinated with experimental data. At calculations of tensor polarization of a deuteron it is considered charging, quadrupole and magnetic form factors, which contain information on electromagnetic properties of a deuteron. The received results give certain information on electromagnetic structure of a deuteron.

Key words: deuteron, wave function, approximation, tensor polarization, asymmetry.

PACS NUMBER: 03.65.Nk, 13.88.+e, 21.45.Bc

REFERENCES

1. Machleidt, R. (2001), "The nuclear force in the third millennium", Nucl. Phys. A, Vol. 689, No. 1, pp. 11-22.
2. Machleidt, R. (2001), "High-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential", Phys. Rev. C, Vol. 63, No. 2, pp. 024001-024032.
3. Kukulin, V.I., Pomerantsev, V.N. and Faessler, A. et al. (1998), "Moscow-type NN-potentials and three-nucleon bound states", Phys. Rev. C, Vol. 57, No. 2, pp. 535-554.
4. Haysak, I. and Zhaba, V. (2009), "On the nodes of the deuteron wave function" ["Pro vuzly khvyl'ovoyi funktsiyi deytrona"], Visnyk Lviv Univ. Ser. Phys., No. 44, pp. 8-15.
5. Haysak, I.I. and Zhaba, V.I. (2014), "Deuteron: wave function and parameters" ["Deytron: khvyl'ova funktsiya i parametry"], Uzhhorod Univ. Scien. Herald. Ser. Phys., No. 36, pp. 100-106.
6. Bohinyuk, V.S., Zhaba, V.I. and Parlag, A.M. (2012), "On the reaction cross section energy dependence (γ, γ') " ["Do pytannya pro enerhetychnu zalezhnist' pererizu reaktsiyi (γ, γ') "], Uzhhorod Univ. Scien. Herald. Ser. Phys., No. 31, pp. 111-115.
7. Stoks, V.G.J., Klomp, R.A.M. and Terheggen, C.P.F. et al. (1994), "Construction of high quality NN potential models", Phys. Rev. C, Vol. 49, No. 6, pp. 2950-2962.
8. Dubovichenko, S.B. (2004) Properties of light atomic nuclei in the potential cluster model [Svoystva legkih atomnyih yader v potentsialnoy klasternoy modeli], Daneker, Almaty, 247 p.
9. Zhaba, V.I. (2015), "New analytical forms of the deuteron wave function and polarization characteristics for potential

- Reid93" ["Novi analitychni formy khvyl'ovoyi funktsiyi i polyaryzatsiyini kharakterystyky deytrona dlya potentsialu Reid93"], Cherkasy Univ. Bull.: Phys. and Mathem. Sciences, Vol. 349, No. 16, pp. 50-55.
10. Zhaba, V.I. (2016), "New analytical forms of wave function in coordinate space and tensor polarization of deuteron", Mod. Phys. Lett. A, Vol. 31, No. 25, pp. 1650139.
 11. de Swart, J.J., Klomp, R.A.M.M. and Rentmeester, M.C.M. et al. (1995), "The Nijmegen Potentials", Few-Body Syst. Suppl., No. 8, pp. 438-447.
 12. Althoff, K.H., Boden, B. and Burkert, V. et al. (1990), "Elastic Electron Deuteron Scattering on a Tensor Polarized Solid ND₃ Target", High Energy Spin Physics: Conf. Rep., No. 1, pp. 550-557.
 13. Boden, B., Burkert, V. and Knop, G. et al. (1991), "Elastic electron deuteron scattering on a tensor polarized solid ND₃ target", Z. Phys. C: Particles and Fields, Vol. 49, No. 2, pp. 175-185.
 14. Frankfurt, L. and Strikman, M. (1988), "Hard nuclear processes and microscopic nuclear structure", Phys. Rept., Vol. 160, No. 5,6, pp. 235-427.

© Ужгородський національний університет