

В. І. Жаба

*Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна
e-mail: viktorzh@meta.ua*

ДЕЙТРОН: ХВИЛЬОВА ФУНКЦІЯ І ТЕНЗОРНА ПОЛЯРИЗАЦІЯ

Deuteron continues to be the object of study for the experimentalists and theorists. For quantitative studies of the structure, of the wave function and parameters of the deuteron and the interpretation addresses various potential models of nucleon-nucleon interaction. On the received in previous paper wave functions of a deuteron in coordinate and momentum representations is calculated tensor polarization. Numerical calculations are performed for the nucleon-nucleon potentials Reid93 and Argonne v18. The value of deuteron tensor polarization $T_{21}(p)$ for these interaction potentials is proportional to results for other potential models: Glendenning-Kramer, Hamada-Johnston, Reid68, Paris and etc. Also values of polarization $T_{20}(p)$ and $T_{22}(p)$ are received. The scattering angle is equal to 90° . Interval momentum deuteron was $0-10 \text{ fm}^{-1}$. In the calculations of the tensor polarization of the deuteron into account its charge, quadrupole and magnetic form factors, which contain information on the electromagnetic properties of the deuteron. The results provide information on the electromagnetic structure of the deuteron. For known values of vector and tensor analyzing power of the secondary scattering can calculate the differential cross section of the double scattering, using the results obtained in this paper value deuteron tensor polarization.

Keywords: deuteron, wave function, scattering, knot, polarization.

Дейтрон надалі залишається об'єктом дослідження для експериментаторів і теоретиків. Для кількісного дослідження структури, хвильової функції і параметрів дейтрона та їх інтерпретації розглядаються різні моделі потенціалу нуклон-нуклонного взаємодії. По отриманим у попередній роботі хвильовим функціям дейтрона у координатному та імпульсному представленнях розраховано тензорну поляризацію. Чисельні розрахунки проведено для нуклон-нуклонних потенціалів Reid93 і Argonne v18. Величина дейтронної тензорної поляризації $T_{21}(p)$ для цих потенціалів взаємодії співрозмірна з результатами для інших потенціальних моделей: Glendenning-Kramer, Hamada-Johnston, Reid68, Paris та ін. Також отримано величини поляризації $T_{20}(p)$ і $T_{22}(p)$. Кут розсіяння рівний 90° . Інтервал імпульсів дейтрона становив $0-10 \text{ fm}^{-1}$. При розрахунках тензорної поляризації дейтрона враховано його зарядовий, квадрупольний і магнітний формфактори, які містять інформацію про електромагнітні властивості дейтрона. Отримані результати дають інформацію про електромагнітну структуру дейтрона. При відомих значеннях векторної і тензорної аналізуючих здатностей вторинного розсіяння можна розрахувати диференціальний переріз подвійного розсіяння, використовуючи отримані в цій роботі значення дейтронної тензорної поляризації.

Ключові слова: дейтрон, хвильова функція, розсіяння, вузол, поляризація.

Дейтрон продолжает оставаться объектом исследования для экспериментаторов и теоретиков. Для количественного исследования структуры, волновой функции и параметров дейтрона и их интерпретации рассматриваются различные модели потенциала нуклон-нуклонного взаимодействия. По полученным в предыдущей работе волновым функциям дейтрона в координатном и импульсном представлении рассчитано тензорную поляризацию. Численные расчеты проведены для нуклон-нуклонных потенциалов Reid93 и Argonne v18. Величина дейтронной тензорной поляризации $T_{21}(p)$ для этих потенциалов взаимодействия соразмерна с результатами для других потенциальных моделей: Glendenning-Kramer, Hamada-Johnston, Reid68, Paris и др. Также получены величины поляризации $T_{20}(p)$ и $T_{22}(p)$. Угол рассеивания равен 90° . Интервал импульсов дейтрона составлял $0-10 \text{ fm}^{-1}$. При расчетах тензорной поляризации дейтрона учтено его зарядовый, квадрупольный и магнитный формфакторы, которые содержат информацию об электромагнитных свойствах дейтрона. Полученные результаты дают информацию об электромагнитной структуре дейтрона. При известных значениях векторной и тензорной анализирующих способностей вторичного рассеяния можно рассчитать дифференциальное сечение двойного рассеяния, используя полученные в этой работе значение дейтронной тензорной поляризации.

Ключевые слова: дейтрон, волновая функция, рассеяние, узел, поляризация.

1. Вступ

Дейтрон – найпростіше ядро, яке складається з двох сильно взаємодіючих частинок: протона і нейтрона. Простота будови дейтрона робить його зручною лабораторією для вивчення нуклон-нуклонних сил. На даний час розрахунки статичних характеристик дейтрона (енергія зв'язку, магнітний момент, електричний квадрупольний момент та ін.) добре узгоджуються з експериментальними даними [1]. Незважаючи на досить добрий теоретичний опис експериментальних величин параметрів дейтрона, існує неузгодженість: одна [2] (Боннський потенціал) або обидві [3, 4] (Московський потенціал) компоненти хвильової функції мають вузли поблизу початку координат. Це суперечить загальній математичній теоремі про число вузлів власних функцій крайових задач [5]. Основному стану системи відповідає функція без вузлів у середині інтервалу крайової задачі. Наявність вузлів у хвильових функціях основного (і єдиного) стану дейтрона може вказувати на існування певних неузгодженостей у реалізації чисельних алгоритмів, які застосовуються у подібних задачах.

У роботі [6] показано, що асимптотика компонент рішення системи рівнянь вже не визначається одним орбітальним числом L , як у випадку з розв'язками одиночного рівняння Шрьодінгера, а обумовлюється повним орбітальним моментом J і асимптотичною поведінкою тензорного потенціалу на малих відстанях, який забезпечує зв'язування рівнянь Шрьодінгера у систему.

Для потенціалів Reid93 [7] і Argonne v18 [8] у роботі [9] розраховано хвильову функцію дейтрона у координатному та імпульсному представленнях, які не містять лишніх вузлів. По отриманим хвильовим функціям також обчислено [9] компоненту тензора чутливості до поляризації дейтронів T_{20} , поляризаційну передачу K_0 і тензорну аналізуючу здатність A_{yy} . До поляризаційних характеристик дейтрона відносять також і дейтронну тензорну поляризацію.

2. Дейтронна тензорна поляризація

Для кількісного розуміння структури дейтрона, S - і D - станів розглядаються різні моделі нуклон-нуклонного потенціалу. Розподіл заряду дейтрона добре не відомий з експерименту, тому що це здійснюється тільки через використання як вимірювань поляризації, так і неполяризованих пружних розсіяних диференціальних перерізів. Однак його можна визначити [10]. Диференціальний переріз пружнього розсіяння неполяризованих електронів неполяризованими дейтронами без вимірювання поляризації відбитих електронів і дейтронів є вираз [11-14]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{МОНТ}} S, \quad (1)$$

$$S = A(p) + B(p) \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (2)$$

Тут θ – кут розсіяння у лабораторній системі, p – імпульс дейтрона в одиницях fm^{-1} , $A(p)$ і $B(p)$ – функції електричної та магнітної структури [11,14]:

$$A(p) = F_C^2(p) + \frac{8}{9}\eta^2 F_Q^2(p) + \frac{2}{3}\eta F_M^2(p), \quad (3)$$

$$B(p) = \frac{4}{3} \eta (1 + \eta) F_M^2(p), \quad (4)$$

де $\eta = \frac{p^2}{4M_D^2}$. Зарядовий $F_C(p)$, квадрупольний $F_Q(p)$ і магнітний $F_M(p)$ формфактори містять інформацію про електромагнітні властивості дейтрона:

$$F_C(p) = [G_{Ep}(p) + G_{En}(p)] \int_0^\infty [u^2(r) + w^2(r)] j_0\left(\frac{pr}{2}\right) dr, \quad (5)$$

$$F_Q(p) = \frac{2}{\eta} \sqrt{\frac{9}{8}} [G_{Ep}(p) + G_{En}(p)] \int_0^\infty \left[u(r)w(r) - \frac{w^2(r)}{\sqrt{8}} \right] j_2\left(\frac{pr}{2}\right) dr, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_M(p) = & 2[G_{Mp}(p) + G_{Mn}(p)] \int_0^\infty \left[\left(u^2(r) - \frac{w^2(r)}{2} \right) j_0\left(\frac{pr}{2}\right) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{u(r)w(r)}{\sqrt{2}} + \frac{w^2(r)}{2} \right) j_2\left(\frac{pr}{2}\right) \right] dr + \\ & + \frac{3}{2} [G_{Ep}(p) + G_{En}(p)] \int_0^\infty w^2(r) \left[j_0\left(\frac{pr}{2}\right) + j_2\left(\frac{pr}{2}\right) \right] dr, \end{aligned} \quad (7)$$

де u і w – радіальні хвильові функції дейтрона, j_0, j_2 – сферичні функції Бесселя, G_{Ep} і G_{En} – протонний і нейтронний електричний формфактори, G_{Mp} і G_{Mn} – протонний і нейтронний магнітний формфактори. Ці формфактори дорівнюють

$$G_{Ep}(p) = \left(1 + \frac{p^2}{18.235} \right)^{-2}; \quad G_{En}(p) = 0; \quad G_{Mp}(p) = \mu_p G_{Ep}(p); \quad G_{Mn}(p) = \mu_n G_{En}(p);$$

де μ_p і μ_n – протонний і нейтронний магнітний моменти в ядерних магнетонах.

В експериментах по неполяризованому пружному розсіянні функції структури можуть бути отриманими, визначаючи $B(p)$ безпосередньо із поперечного перерізу розсіяння назад. Рівняння (4) містить магнітний формфактор $F_M(p)$, який з $F_C(p)$ і $F_Q(p)$ є складовою частиною і в (3). Таким чином додатком до неполяризованого розсіяння повинна також розглядатися і помітна поляризація [14]. Оскільки спин дейтрона рівний $S=1$, то тензорна і векторна поляризації є також помітними, і можуть бути розрахованими і розглядатися в задачах розсіяння. Тензорна поляризація відбитих дейтронів визначається наступними виразами [10] через формфактори (5)–(7):

$$T_{20}(p) = -\frac{1}{\sqrt{2}S} \left(\frac{8}{3} \eta F_C(p) F_Q(p) + \frac{8}{9} \eta^2 F_Q^2(p) + \frac{1}{3} \eta \left[1 + 2(1 + \eta) \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] F_M^2(p) \right), \quad (8)$$

$$T_{21}(p) = \frac{2}{\sqrt{3}S \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \eta \sqrt{\eta + \eta^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} F_M(p) F_Q(p), \quad (9)$$

$$T_{22}(p) = -\frac{1}{2\sqrt{3}S} \eta F_M^2(p), \quad (10)$$

Величина тензорної поляризації $T_{20}(p)$ визначається формфакторами $F_C(p)$, $F_Q(p)$, $F_M(p)$ і кутом розсіяння θ , а $T_{21}(p)$ – $F_Q(p)$, $F_M(p)$ і θ . $T_{22}(p)$ залежить тільки від формфактору $F_M(p)$ і не залежить від кута розсіяння.

Поляризація відбитого дейтрона може бути виміряна, аналізуючи розсіяння. Диференціальний переріз для подвійного процесу розсіяння [4, 11]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega d\Omega_2} = \frac{d\sigma}{d\Omega d\Omega_2} \left[1 + \frac{3}{2} h p_x A_y \sin \phi_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} T_{20} A_{zz} - \frac{2}{\sqrt{3}} T_{21} A_{xz} \cos \phi_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} T_{22} (A_{xx} - A_{yy}) \cos 2\phi_2 \right], \quad (11)$$

де $h = \pm 1/2$ – поляризація падаючого електронного пучка; ϕ_2 – кут між двома розсіюючими площинами; A_y і A_{ij} – векторна і тензорна аналізуючі здатності вторинного розсіяння; T_{20} , T_{21} і T_{22} визначаються формулами (8)–(10).

Розрахована дейтронна тензорна поляризація $T_{21}(p)$ з урахуванням хвильової функції дейтрона приведено на рис. 1. Кут розсіяння рівний $\theta = 90^\circ$. Отриманий результат $T_{21}(p)$ для потенціалів Reid93 [7] і Argonne v18 [8] добре узгоджується з наявними літературними даними [14] для інших потенціальних моделей: Glendenning-Kramer, Hamada-Johnston, Reid68, Paris, Tourreil-Sprung, Mustafa та ін.

Розраховані величини тензорної поляризації $T_{20}(p)$ і $T_{22}(p)$ для потенціалів Reid93 і Argonne v18 (рис. 2 і 3) відсутні у науковій літературі.

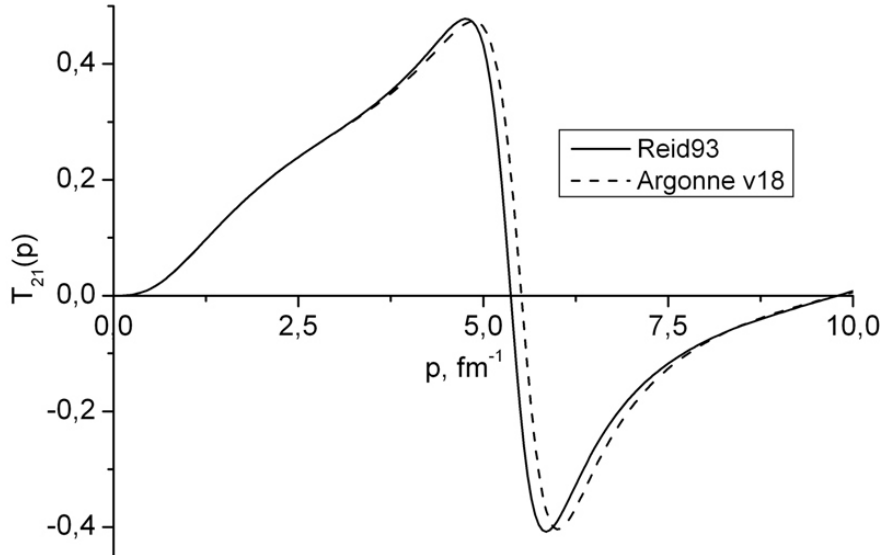
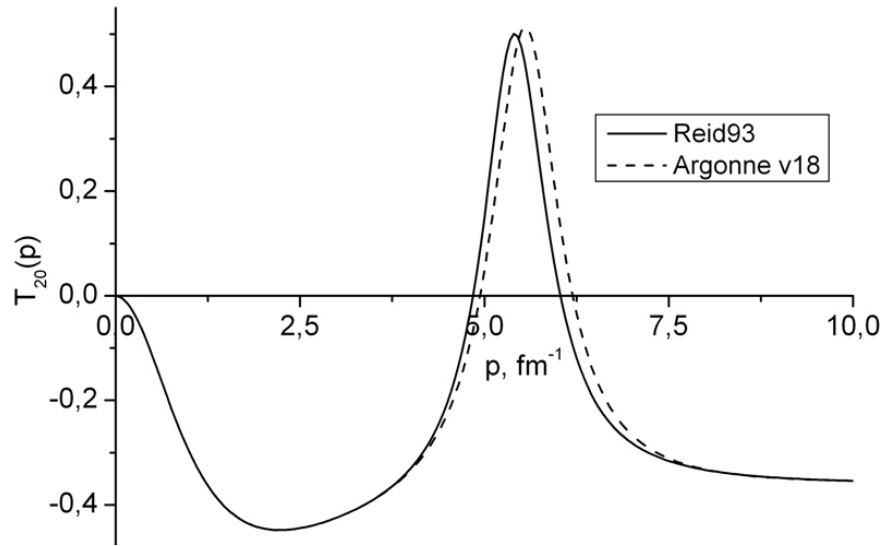
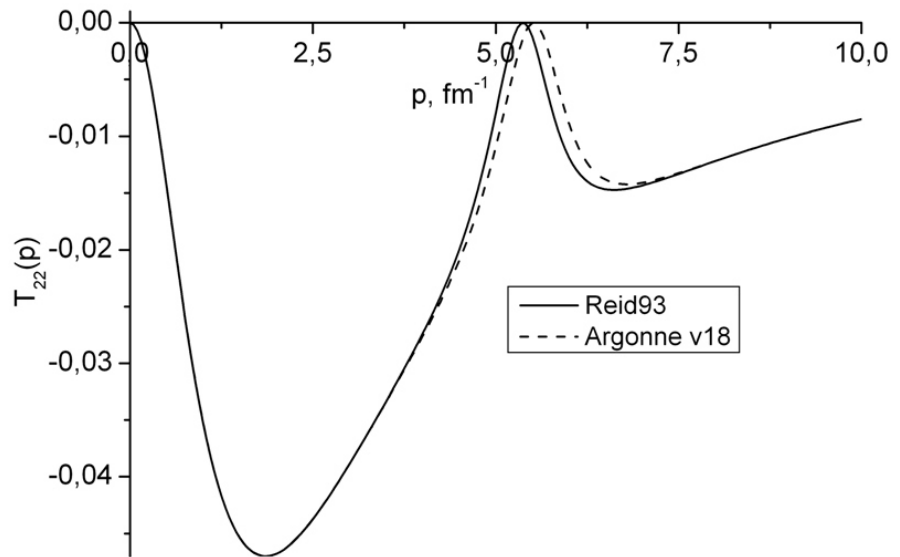


Рис. 1. Дейтронна тензорна поляризація $T_{21}(p)$


 Рис. 2. Дейтронна тензорна поляризація $T_{20}(p)$

 Рис. 3. Дейтронна тензорна поляризація $T_{22}(p)$

3. Висновки

По отриманим хвильовим функціям дейтрона, що не містять лишніх вузлів, розраховано дейтронну тензорну поляризацію. Отриманий результат $T_{21}(p)$ для потенціалів Reid93 і Argonne v18 добре узгоджується з літературними даними [14] для інших потенціалів.

Також розраховано $T_{20}(p)$ і $T_{22}(p)$. Аналогічні результати для цих потенціальних моделей відсутні у науковій літературі. Чисельні розрахунки дейтронної тензорної поляризації проведено в інтервалі імпульсів $0\text{--}10 \text{ fm}^{-1}$.

Отримані результати дають певну інформацію про електромагнітну структуру дейтрона і диференціальний переріз подвійного розсіяння (11), якщо б були відомі інші складові останнього.

Бібліографічні посилання

1. **Machleidt, R.** The nuclear force in the third millennium [Text] / R. Machleidt // Nucl. Phys. A. – 2001. – Vol. 689. – P. 11–22.
2. **Machleidt, R.** High-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential [Text] / R. Machleidt // Phys. Rev. C. – 2001. – Vol. 63. – P. 024001.
3. **Kukulin, V. I.** Moscow-type NN-potentials and three-nucleon bound states [Text] / V. I. Kukulin, V. N. Pomerantsev, A. Faessler et al. // Phys. Rev. C. – 1998. – Vol. 57. – P. 535–554.
4. **Arnold, R. G.** Elastic electron-Deuteron Scattering at High-Energy [Text] / R. G. Arnold, C. E. Carlson, F. Gross // Phys. Rev. C. – 1980. – Vol. 21. – P. 1426–1451.
5. **Courant, R.** Methods of Mathematical Physics [Text] / R. Courant, D. Hilbert. - New York: Interscience, 1953. – 561 p.
6. **Haysak, I.** On the nodes of the deuteron wave function [Text] / I. Haysak, V. Zhaba // Visnyk Lviv. Univ. Ser. Phys. – 2009. – Iss. 44. – P. 8–15.
7. **Stoks, V. G. J.** Construction of high quality NN potential models [Text] / V. G. J. Stoks, R. A. M. Klomp, C. P. F. Terheggen et al. // Phys. Rev. C. – 1994. – Vol. 49. – P. 2950–2962.
8. **Wiringa, R. B.** Accurate nucleon-nucleon potential with charge-independence breaking [Text] / R. B. Wiringa, V. G. J. Stoks, R. Schiavilla // Phys. Rev. C. – 1995. – Vol. 51. – P. 38–51.
9. **Haysak, I. I.** Deuteron: wave function and parameters [Text] / I. I. Haysak, V. I. Zhaba // Uzhhorod Univ. Scien. Herald. Ser. Phys. – 2014. – № 36. – P. 100–106.
10. **Abbott, D.** Measurement of Tensor Polarization in Elastic Electron-Deuteron Scattering at Large Momentum Transfer [Text] / D. Abbott et al. // Phys. Rev. Lett. – 2000. – 84. – P. 5053–5057
11. **Gilman, R.** Electromagnetic structure of the deuteron [Text] / R. Gilman, F. Gross // J. Phys. G. – 2002. – Vol. 28. – R37–R116.
12. **Donnelly, T. W.** Considerations of Polarization in Inclusive Electron Scattering from Nuclei [Text] / T. W. Donnelly, A. S. Raskin // Ann. Phys. – 1986. – Vol. 169. – P. 247–351.
13. **Haftel, M. I.** Electron-deuteron tensor polarization and the two-nucleon force [Text] / M. I. Haftel, L. Mathelitsch, H. F. K. Zingl // Phys. Rev. C. – 1980. – 22. – P. 1285–1303.
14. **Azzam, A. K. A.** Electron-Deuteron Tensor Polarization and D-State Probability [Text] / A. K. A. Azzam, M. A. Fawzy, E. M. Hassan, A. M. Yasser // Turk. J. Phys. – 2005. – Vol. 29. – P. 127–135.

Надійшла до редколегії 15 червня 2015 р.