

ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНОГО РАДІУСА ТА КВАДРУПОЛЬНОГО МОМЕНТУ ДЕ ЙТРОНА ІЗ СУЧАСНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ЗА ФАЗАМИ РОЗСІЯННЯ

В. О. Бабенко, М. М. Петров

Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ

(Отримано 15 вересня 2009 р.)

На основі кореляційної залежності між матеріальним середньоквадратичним радіусом дейтрона r_m та ефективним радіусом дейтрона ρ , а та кож на основі залежності між квадрупольним моментом Q та середньоквадратичним радіусом r_m отримано значення матеріального середньоквадратичного радіуса $r_m = 1.9580(61)$ Фм та квадрупольного моменту $Q = 0.2723(17)$ Фм², які відповідають експериментальному значенню ефективного радіуса дейтрона Борбея *та ін.* $\rho = 1.727(26)$ Фм. Визначено значення матеріального r_m , структурного r_d та зарядового r_{ch} середньоквадратичних радіусів дейтрона, а також квадрупольного моменту дейтрона Q для експериментальних фаз розсіяння групи GWU та Ніймегенської групи. Показано, що фази розсіяння групи GWU краще узгоджуються з експериментальними значеннями характеристик дейтрона, ніж фази розсіяння Ніймегенської групи.

Ключові слова: середньоквадратичний радіус дейтрона, квадрупольний момент дейтрона, фази нуклон-нуклонного розсіяння, нуклон-нуклонний потенціал, дейтрон, низькі енергії.

PACS number(s): 13.75.Cs, 21.10.Ft, 21.10.Gv, 21.10.Jx, 21.30.Cb, 25.40.Dn, 27.10.+h

1. Середньоквадратичний радіус та квадрупольний момент дейтрона є фундаментальними характеристиками дейтрона, які дають важливу інформацію про ядерну взаємодію між нуклонами. Вивченню середньоквадратичного радіуса та квадрупольного моменту дейтрона завжди приділяли та приділяють велику увагу як у теоретичних, так і в експериментальних дослідженнях. На сьогодні момент на рівні 1–2% існують розбіжності в значеннях середньоквадратичного радіуса дейтрона, визначених і в теорії, і в експерименті. Однак для такої простої й добре вивченої системи, як дейтрон, ці розбіжності є небажаними і тому останнім часом зусилля різних авторів [1–3] спрямовані на усунення цієї суперечності та на точніше визначення середньоквадратичного радіуса дейтрона.

2. У цій статті на основі кореляційної залежності між середньоквадратичним матеріальним r_m та ефективним $\rho \equiv \rho(-\varepsilon_d, -\varepsilon_d)$ радіусами дейтрона, яку ми запропонували [4],

$$r_m = a + b(\rho - \rho_0) + c(\rho - \rho_0)^2 + \dots, \quad (1)$$

а також на основі залежності між квадрупольним моментом дейтрона Q , коефіцієнтом $S - D$ змішування η та середньоквадратичним радіусом r_m ,

$$\frac{Q}{\eta} = Ar_m^2 + B, \quad (2)$$

розраховано значення r_m та Q для сучасних експериментальних фаз нуклон-нуклонного розсіяння групи GWU [5] та Ніймегенської групи [6]. Обчислено також значення r_m , що відповідає експериментальному значенню ефективного радіуса дейтрона

$$\rho = 1.727(26) \text{ Фм} [7]. \quad (3)$$

Значення параметрів r_m та ρ для ряду реалістичних нуклон-нуклонних потенціалів [8–19] наведено в таблиці 1 праці [4]. При цьому значення ρ розраховані згідно з формулою

$$A_S^2 (1 + \eta^2) = \frac{2\alpha}{1 - \alpha\rho} \quad (4)$$

із використанням експериментального значення хвильового числа дейтрона

$$\alpha = 0.231538 \text{ Фм}^{-1} \quad (5)$$

і значень асимптотичних констант дейтрона A_S та η для різних потенціалів [8–19]. Вибираючи значення $\rho_0 = 1.727$ Фм, що відповідає експериментальному значенню ефективного радіуса дейтрона (3), та застосовуючи метод найменших квадратів, у параболічному наближенні розкладу (1) для параметрів a , b та c маємо значення

$$a = 1.9580 \text{ Фм}, \quad (6)$$

$$b = 0.2314, \quad (7)$$

$$c = 0.4343 \text{ Фм}^{-1}. \quad (8)$$

Використовуючи значення Q , η та r_m для сучасних реалістичних потенціалів другого покоління (Nijm-I, Nijm-II, Reid 93 [16, 17], Moscow 99 [14]), для параметрів A та B в залежності (2) отримуємо значення

$$A = 2.7595, \quad (9)$$

$$B = 0.05784 \text{ Фм}^2. \quad (10)$$

Кореляційну параболічну залежність між матеріальним середньоквадратичним радіусом r_m та ефективним радіусом дейтрона ρ , а також результати розрахунків r_m у параболічному наближенні для різних нуклон-нуклонних потенціалів наведено на рисунку. Усереднені значення абсолютної Δ та відносної δ похибок у цьому випадку дорівнюють $\Delta = 0.0005 \text{ Фм}$ та $\delta = 0.03 \%$.

Для експериментального значення ефективного радіуса дейтрона (3) згідно з (1), (6)–(10) отримуємо експериментальне значення середньоквадратичного матеріального радіуса дейтрона

$$r_m = 1.9580 (61) \text{ Фм} \quad (11)$$

та квадрупольного моменту дейтрона

$$Q = 0.2723 (17) \text{ Фм}^2. \quad (12)$$

Значення квадрупольного моменту (12) відрізняється від експериментального значення

$$Q_{\text{expt}} = 0.2859 (3) \text{ Фм}^2 [20, 21]. \quad (13)$$

Різниця

$$Q_{\text{expt}} - Q = 0.0136 \text{ Фм}^2 \quad (14)$$

є поправкою, що пов'язана з обмінними мезонними струмами та іншими неklasичними ефектами.

У таблиці 1 наведено значення характеристик дейтрона, що отримані з використанням експериментальних даних по фазам розсіяння групи GWU [5] та Ніймегенської групи [6]. Значення ефективного радіуса дейтрона ρ для фаз розсіяння групи GWU ми визначили нами на основі полюсного наближення функції ефективного радіуса [22], що дає змогу практично точно описати експериментальну фазу розсіяння до енергій $\sim 50 \text{ MeV}$. Для Ніймегенських фаз розсіяння ми використали значення цих параметрів, що наведені в роботі [17]. Значення середньоквадратичного радіуса r_m , асимптотичної константи A_S та квадрупольного моменту Q розраховані згідно з формулами (1), (2), (4). При цьому значення коефіцієнта $S - D$ змішування для фаз розсіяння групи GWU було покладено рівним експериментальному значенню $\eta = 0.0256$ [23], а для Ніймегенських фаз розсіяння використано значення $\eta = 0.02543$, яке отримано в праці [17]. У таблиці 1 наведено також експериментальні значення характеристик дейтрона.

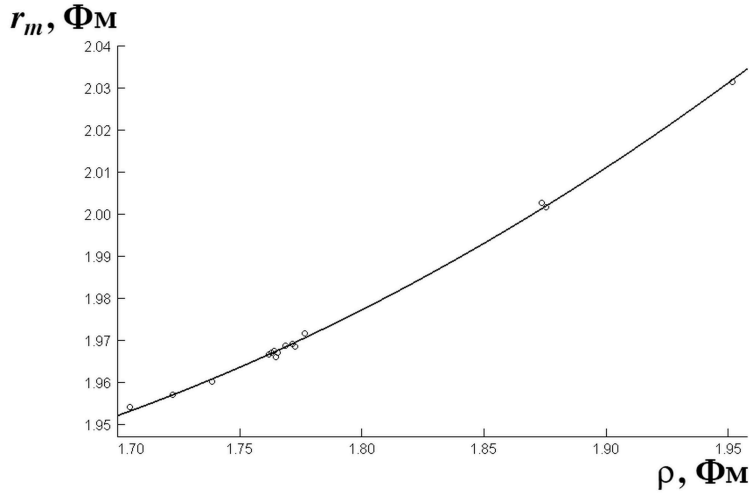


Рис. 1. Параболічна кореляційна залежність між матеріальним середньоквадратичним радіусом дейтрона r_m та ефективним радіусом дейтрона ρ . Точки відповідають значенням r_m та ρ для реалістичних NN -потенціалів [8–19]. Парабола, що проведена по точках, отримана з використанням методу найменших квадратів (див. формулу (1)).

Фазовий аналіз	$A_S, \text{ Фм}^{-1/2}$	$\rho, \text{ Фм}$	$r_m, \text{ Фм}$	$Q, \text{ Фм}^2$
Nijm PWA93	0.8846	1.7647	1.9673	0.2867 ⁽¹⁾
GWU PWA	0.8760	1.7151	1.9557	0.2853 ⁽¹⁾
Експеримент	0.8781(44) [7]	1.727(26) [7]	1.9580(61) ⁽²⁾	0.2859(3) [20, 21]

Таблиця 1. Фізичні характеристики дейтрона, що відповідають експериментальним фазам розсіяння Ніймегенської групи [6] і групи GWU [5].

⁽¹⁾ Квадрупольний момент дейтрона Q обчислено з урахуванням поправки (14), зумовленої обмінними мезонними струмами.

⁽²⁾ Визначено в цій роботі з використанням експериментального значення ефективного радіуса дейтрона $\rho = 1.727 (26) \text{ Фм}$ [7].

Джерело визначення	r_m , ФМ	r_d , ФМ	r_{ch} , ФМ
GWU PWA	1.9557	1.9619	2.124(6)
Nijm PWA93	1.9673	1.9734	2.135(6)
Експериментальне значення ефективного радіуса ρ	1.9580(61)	1.9641(61)	2.126(12)
Пружне ed -розсіяння, Berard <i>et al.</i> [25]	1.9574(45)	1.9635(45)	2.126(11)
Пружне ed -розсіяння, Sick and Trautmann [1]	1.962(18)	1.968(18)	2.130(10)
Пружне ed -розсіяння, Herrmann and Rosenfelder [2]	1.962(7)	1.968(7)	2.130(10)

Таблиця 2. Матеріальний r_m , структурний r_d та зарядовий r_{ch} середньоквадратичні радіуси дейтрона, знайдені з різних джерел. У перших трьох рядках наведено значення радіусів дейтрона, які знайдено в цій роботі з використанням параболічної кореляційної формули (1).

Із наведених у таблиці 1 результатів випливає, що характеристики дейтрона, які розраховані з використанням фаз розсіяння групи GWU [5], виключно добре узгоджуються з їхніми експериментальними значеннями. Значення параметрів ρ , A_S та r_m для Ніймегенських фаз розсіяння [6] не узгоджуються з експериментальними значеннями цих величин навіть у границях невизначеності останніх.

3. Для порівняння наших результатів із результатами інших авторів, що отримані шляхом обробки експериментальних даних з пружного ed -розсіяння [1–3, 25], у таблиці 2 наведено значення матеріального r_m , структурного r_d та зарядового r_{ch} середньоквадратичних радіусів дейтрона, які пов'язані одне з одним співвідношеннями

$$r_{ch}^2 = r_d^2 + r_p^2 + r_n^2 + r_{DF}^2, \quad (15)$$

$$r_d^2 = r_m^2 + \Delta r_m^2, \quad (16)$$

де r_p^2 та r_n^2 — поправки, що зумовлені зарядовими радіусами протона й нейтрона,

$$r_{DF}^2 \equiv \frac{3}{4} \left(\frac{\hbar}{m_p c} \right)^2 = 0.0332 \text{ ФМ}^2 \quad (17)$$

— релятивістська поправка Дарвіна–Фолді [26], а Δr_m^2 — поправка, яка пов'язана з обмінними мезонними струмами й іншими ненуклонними ступенями вільності. Значення r_m , r_d та r_{ch} , що наведені в таблиці 2, були узгоджені відповідно до (15) та (16) із використанням значень

$$r_p^2 = 0.743(21) \text{ ФМ}^2 [27], \quad (18)$$

$$r_n^2 = -0.113(7) \text{ ФМ}^2 [28], \quad (19)$$

$$\Delta r_m^2 = 0.0241 \text{ ФМ}^2. \quad (20)$$

Значення поправки (20) відповідає поправці $\Delta r_{MESC} = 0.0057$ ФМ, отриманій в [3] для потенціалу Рейда RSC [8], для якого значення $r_m = 1.9569$ ФМ добре узгоджується із значенням $r_m = 1.9580(61)$ ФМ, що ми

знайшли з використанням експериментального значення ефективного радіуса дейтрона $\rho = 1.727(26)$ ФМ [7].

Як видно з таблиці 2, значення середньоквадратичних радіусів дейтрона, які ми розраховали з використанням експериментального значення $\rho = 1.727(26)$ ФМ [7], а також значення середньоквадратичних радіусів для фаз розсіяння групи GWU [5] добре узгоджуються з експериментальними значеннями цих величин [1–3, 25]. Середньоквадратичні радіуси r_m , r_d , r_{ch} , що відповідають фазам розсіяння Ніймегенської групи, є дещо завищеними порівняно з такими ж параметрами для фаз розсіяння групи GWU, а значення r_d для цих фаз не узгоджуються з експериментальним значенням $r_d = 1.9635(45)$ ФМ Берарда *та ін.* [25] навіть у границях невизначеності останнього.

4. На завершення сформулюємо основні результати та висновки. У праці досліджено кореляційну залежність між матеріальним середньоквадратичним r_m і ефективним ρ радіусами дейтрона. Запропонована в статті параболічна залежність між цими величинами дає змогу за відомим значенням ефективного радіуса ρ обчислити значення матеріального середньоквадратичного радіуса дейтрона r_m з абсолютною похибкою ~ 0.0005 ФМ, що при врахуванні чотирьох знаків після коми є практично точним результатом. Ми також запропонували залежність між квадрупольним моментом дейтрона Q та середньоквадратичним радіусом дейтрона r_m .

Із використанням експериментального значення ефективного радіуса дейтрона $\rho = 1.727(26)$ ФМ [7] отримано значення середньоквадратичного матеріального радіуса дейтрона $r_m = 1.9580(61)$ ФМ та квадрупольного моменту дейтрона $Q = 0.2723(17)$ ФМ².

Одержані значення ефективного радіуса дейтрона ρ , асимптотичної нормувальної константи A_S , середньоквадратичного радіуса дейтрона r_m та квадрупольного моменту дейтрона Q для експериментальних фаз розсіяння американської групи GWU (база нуклон-нуклонних даних SAID) [5] дуже добре узгоджуються з їхніми експериментальними значеннями. Значення цих параметрів для фаз розсіяння Ніймегенської

групи [6] завищені й з експериментом узгоджуються значно гірше. Зокрема, Ніймегенські значення A_S , ρ та r_m не узгоджуються з експериментом у границях їхніх похибок.

Проведено порівняння отриманих у праці результатів з експериментальними результатами інших робіт у термінах матеріального r_m , структурного r_d та зарядового r_{ch} середньоквадратичних радіусів дейтрона. Значення цих величин, отриманих із використанням експериментальних фаз розсіяння групи GWU, добре узгоджуються з експериментальними значеннями цих величин. Значення середньоквадратичних радіусів r_m , r_d і r_{ch} для Ніймегенських фаз розсіяння з

експериментом узгоджуються значно гірше. Зокрема, значення $r_d = 1.9735$ Фм для фаз розсіяння Ніймегенської групи не узгоджується з експериментальним значенням $r_d = 1.9635(45)$ Фм навіть у границях невизначеності останнього.

Отже, експериментальні фази розсіяння Ніймегенської групи, на відміну від фаз розсіяння групи GWU, недостатньо точно описують експериментальні характеристики дейтрона. На цей факт слід звернути серйозну увагу, оскільки всі сучасні реалістичні NN-потенціали другого покоління [13–19] засновані на підганянні до бази даних Ніймегенської групи.

-
- [1] I. Sick, D. Trautmann, Phys. Lett. B **375**, 16 (1996); Nucl. Phys. A **637**, 559 (1998).
 [2] T. Herrmann, R. Rosenfelder, Eur. Phys. J. A **2**, 29 (1998).
 [3] A. J. Buchmann, H. Henning, P. U. Sauer, Few-Body Systems **21**, 149 (1996).
 [4] В. А. Бабенко, Н. М. Петров, Яд. физ. **71**, 1761 (2008).
 [5] R. A. Arndt, I. I. Strakovsky, R. L. Workman, *Partial-Wave Analysis Facility SAID*, The George Washington University [http://gwdac.phys.gwu.edu]; Phys. Rev. C **62**, 034005 (2000).
 [6] Nijmegen NN-Online program, http://nn-online.org; V. G. J. Stoks, R. A. M. Klomp, M. C. M. Rentmeester, J. J. de Swart, Phys. Rev. C **48**, 792 (1993).
 [7] I. Borbély *et al.*, Phys. Lett. B **160**, 17 (1985).
 [8] R. V. Reid Jr., Ann. Phys. **50**, 411 (1968).
 [9] M. Lacombe *et al.*, Phys. Rev. C **21**, 861 (1980).
 [10] K. Holinde, R. Machleidt, Nucl. Phys. A **256**, 479 (1976).
 [11] R. Machleidt, K. Holinde, Ch. Elster, Phys. Rep. **149**, 1 (1987).
 [12] R. Machleidt, in *Proceedings of the IX European Conference on Few-Body Problems in Physics, Tbilisi, USSR, Aug. 1984* (World Sci., Singapore; Philadelphia, 1984), p. 218.
 [13] V. I. Kukulin *et al.*, Phys. Rev. C **57**, 535 (1998).
 [14] V. I. Kukulin, V. N. Pomerantsev, A. Faessler, Phys. Rev. C **59**, 3021 (1999); arXiv:nucl-th/9903056 (1999).
 [15] R. B. Wiringa, V. G. J. Stoks, R. Schiavilla, Phys. Rev. C **51**, 38 (1995).
 [16] V. G. J. Stoks, R. A. M. Klomp, C. P. F. Terheggen, J. J. de Swart, Phys. Rev. C **49**, 2950 (1994).
 [17] J. J. de Swart, C. P. F. Terheggen, V. G. J. Stoks, *Invited talk at the 3rd International Symposium "Dubna Deuteron 95"* (Dubna, Russia, July 4–7, 1995), nucl-th/9509032.
 [18] R. Machleidt, F. Sammarruca, Y. Song, Phys. Rev. C **53**, 1483 (1996).
 [19] R. Machleidt, Phys. Rev. C **63**, 024001 (2001).
 [20] D. M. Bishop, L. M. Cheung, Phys. Rev. A **20**, 381 (1979).
 [21] T. E. O. Ericson, M. Rosa-Clot, Nucl. Phys. A **405**, 497 (1983).
 [22] В. А. Бабенко, Н. М. Петров, Яд. физ. **68**, 244 (2005).
 [23] N. L. Rodning, L. D. Knutson, Phys. Rev. C **41**, 898 (1990).
 [24] C. Van Der Leun, C. Anderlieden, Nucl. Phys. A **380**, 261 (1982).
 [25] R. W. Berard *et al.*, Phys. Lett. B **47**, 355 (1973).
 [26] B. M. Casper, F. Gross, Phys. Rev. **155**, 1607 (1967).
 [27] G. G. Simon, Ch. Schmitt, F. Borkowski, V. H. Walther, Nucl. Phys. A **333**, 381 (1980).
 [28] S. Kopecky, P. Riehs, J. A. Harvey, N. W. Hill, Phys. Rev. Lett. **74**, 2427 (1995).

DETERMINATION OF THE DEUTRON ROOT-MEAN-SQUARE RADIUS AND QUADRUPOLE MOMENT ON THE BASIS OF MODERN EXPERIMENTAL DATA FROM PHASE-SHIFT ANALYSIS

V. A. Babenko, N. M. Petrov

Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

The value of the deuteron matter root-mean-square radius $r_m = 1.9580(61)$ fm and quadrupole moment $Q = 0.2723(17)$ fm² that correspond to the experimental value of the deuteron effective radius of Borbély *et al.* $\rho = 1.727(26)$ fm, are obtained on the basis of correlation dependence between the deuteron matter root-mean-square radius r_m and effective radius ρ and also on the basis of the quadrupole moment Q dependence on the root-mean-square radius r_m . The deuteron matter radius r_m , structure radius r_d and charge radius r_{ch} , as well as the quadrupole moment Q , are determined for modern experimental data on phase shifts of the GWU group and of the Nijmegen group. Phase shifts of the GWU group appear to be in better agreement with experimental characteristics of the deuteron than phase shifts of the Nijmegen group.