

УДК 539.12.01

PACS 03.65.Nk, 13.40.Gp, 13.88.+e, 21.45.Vc

DOI 10.24144/2415-8038.2018.43.34-40

В.І. Жаба

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

АНАЛІТИЧНІ ФОРМИ ХВИЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ДЕЙТРОНА І ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ СПОСТЕРЕЖУВАНІ В A(d,d')X- РЕАКЦІЯХ

По отриманим раніше коефіцієнтам аналітичної форми хвильової функції дейтрона в координатному представленні для нуклон-нуклонного потенціалу Reid93 розраховані поляризаційні спостережувані в A(d,d')X- реакціях. Обчислені величини тензорної A_{yy} і векторної A_y аналізуючих здатностей порівнюються з експериментальними даними в t - масштабуванні. В моделі імпульсного наближення також оцінені теоретичні значення тензор-тензорної K_{yy} та вектор-векторної K_y передач поляризації.

Ключові слова: дейтрон, хвильова функція, аналітична форма, аналізуюча здатність, передача поляризації.

Вступ

Дейтрон як найпростіше ядро складається з двох елементарних частинок - протона і нейтрона. Простота і наочність будови дейтрона слугує зручною лабораторією для вивчення і моделювання нуклон-нуклонних сил. Незважаючи на всебічне теоретичне і експериментальне дослідження, на сьогодні дейтрон викликає значний інтерес із-за певних теоретичних неузгодженостей. Зокрема в ряді робіт хвильова функція дейтрона (ХФД) в координатному представленні має вузли поблизу початку координат (див. огляд [1]). Існування таких вузлів основного і єдиного стану дейтрона свідчить про неузгодженості і неточності в реалізації чисельних алгоритмів при розв'язанні подібних задач або ж про особливості потенціальних моделей дейтрона.

В огляді [1] систематизовано статичні параметри дейтрона, отримані по ХФД для різних потенціальних моделей, і проведено огляд аналітичних форм ХФД в координатному представленні. Також приведені як аналітичні форми, так і параметризації ХФД, необхідні для подальших розрахунків характеристик процесів із участю дейтрона. Крім цього, відмічено, що у такій зручній формі ХФД

необхідні для використання у розрахунках поляризаційних характеристик дейтрона, а також для оцінки теоретичних значень спінових спостережуваних в dp - розсіянні. Зрештою ХФД можна використати і для розрахунків параметрів і характеристик (d,d')- реакцій.

У даній роботі застосовано аналітичні форми ХФД для теоретичних розрахунків набору поляризаційних спостережуваних в A(d,d')X- реакціях.

Аналітичні форми ХФД

В 2000-х рр. були запропоновані нові аналітичні ХФД в координатному представленні. Серед них слід відмітити параметризації Дубовиченка [2] і Бережного-Корди-Гаха [3], а також аналітичну форму у такому простому виді [4]

$$\begin{cases} u(r) = r \sum_{i=1}^N A_i \exp(-a_i r^2), \\ w(r) = r \sum_{i=1}^N B_i \exp(-b_i r^2). \end{cases} \quad (1)$$

Аналітична форма ХФД (1) була застосована для апроксимації чисельних масивів радіальних хвильових функцій, отриманих для реалістичних феноменологічних потенціалів

Неймегенської групи (NijmI, NijmII, Nijm93 і Reid93). Досліджувалась поведінку значення величини χ^2 у залежності від кількості доданків розкладу N . Крім ХФД (1), в роботі [5] була запропонована аналітична форма для потенціалів NijmI, NijmII і Nijm93

$$\begin{cases} u(r) = r^{3/2} \sum_{i=1}^N A_i \exp(-a_i r^3), \\ w(r) = r \sum_{i=1}^N B_i \exp(-b_i r^3). \end{cases} \quad (2)$$

Формула (2) була застосована [6] для апроксимації ХФД для потенціалів Reid93 і Argonne v18. Доцільною є теоретична оцінка поляризаційних характеристик дейтрона, використовуючи згадані ХФД.

Поляризаційні спостережувані в $A(d,d')X$ - реакціях

Експериментальне визначення величин поляризаційних характеристик реакції фрагментації дейтрона $A(d,p)X$ та реакції непружного розсіяння дейтрона на ядрах [7] залишаються одним з основних інструментів для дослідження структури дейтрона. Крім цього, реакції непружного розсіяння дейтронів використовують для дослідження утворення і властивостей баріонних резонансів.

В рамках моделі імпульсного наближення плоских хвиль аналізуються [7] раніше одержані експериментальні дані [8] тензорної і векторної аналізуючих здатностей в реакції непружного розсіяння дейтронів на вуглеці при початковому імпульсі дейтрона 9 ГеВ/с і кути детектування вторинних дейтронів 85 мрад в області збудження резонансу масою 2190 МеВ/с².

Результати експериментальних досліджень [9] тензорної A_{yy} та векторної A_y аналізуючих здатностей при непружному розсіянні дейтронів з імпульсом 4.5 ГеВ/с на берилію під кутом 80 мрад поблизу збудження баріонних резонансів. Дані A_{yy} добре узгоджуються з даними експериментів при нульовому куті і демонструють приблизне t -масштабування до ~ 0.9 (ГеВ/с)². В [10] приведені експериментальні дані аналізуючих здатностей в непружному розсіянні дейтронів з імпульсом 5.0 ГеВ/с

на берилії під кутом 178 мрад в околі збудження баріонних резонансів масою до ~ 1.8 ГеВ/с². Причому дані величини A_{yy} добре корелюють з попередніми даними при 4.5 і 5.5 ГеВ/с. Результати цих експериментів порівнюються з прогнозами моделей з множинним розсіянням, плоскохвильового імпульсного наближення та моделями обміну ω -мезонами.

В [11] виміряна кутова залежність аналізуючих здатностей в непружному розсіянні дейтронів з імпульсом 9.0 ГеВ/с на водні та вуглеці. Діапазон вимірювань відповідає баріонному резонансному збудженню з масою ~ 2.2 -2.6 ГеВ/с². Ці дані демонструють приблизне t -масштабування до -1.5 (ГеВ/с)². Великі значення величини A_y вказали на значну роль спіньзалежної частини елементарної амплітуди реакції $NN \rightarrow NN^*$.

Експериментально величини тензорної A_{yy} і векторної A_y аналізуючих здатностей отримують з чисел дейтронів n^+ , n^- і n^0 , зареєстрованих для різних мод поляризації пучка і нормованих на інтенсивність пучка з урахуванням ефекту мертвого часу установки [10]:

$$A_{yy} = 2 \frac{p_z^-(n^+ / n^0 - 1) - p_z^+(n^- / n^0 - 1)}{p_z^- p_{zz}^+ - p_z^+ p_{zz}^-}. \quad (3)$$

$$A_y = -\frac{2}{3} \frac{p_{zz}^-(n^+ / n^0 - 1) - p_{zz}^+(n^- / n^0 - 1)}{p_z^- p_{zz}^+ - p_z^+ p_{zz}^-}. \quad (4)$$

Тензорна і векторна аналізуючі здатності в імпульсному наближенні теоретично розраховується по наступним формулам [7]:

$$A_{yy} = \frac{T_{00}^2 - T_{11}^2 + 4P^2 T_{10}^2}{T_{00}^2 + 2T_{11}^2 + 4P^2 T_{10}^2}; \quad (5)$$

$$A_y = 2\sqrt{2}P \frac{(T_{11} + T_{00})T_{10}}{T_{00}^2 + 2T_{11}^2 + 4P^2 T_{10}^2}; \quad (6)$$

де $T_{ij}(p/2)$ - амплітуди, які визначаються за допомогою хвильових функцій $u(r)$ і $w(r)$ наступним чином:

$$T_{00} = S_0(p/2) + \sqrt{2}S_2(p/2),$$

$$T_{11} = S_0(p/2) - \frac{1}{\sqrt{2}}S_2(p/2),$$

$$T_{10} = \frac{i}{\sqrt{2}} \int_0^\infty \left(u^2 - \frac{w^2}{2} \right) j_0 dr + \frac{i}{2} \int_0^\infty w \left(u + \frac{w}{\sqrt{2}} \right) j_2 dr.$$

Тут S_0 і S_2 - сферичний і квадрупольний формфактори дейтрона:

$$S_0(p/2) = S_0^{(1)} + S_0^{(2)}; \quad (7)$$

$$S_2(p/2) = 2S_2^{(1)} - \frac{1}{\sqrt{2}}S_2^{(2)}; \quad (8)$$

виражаються через елементарні сферичні $S_0^{(i)}$ і квадрупольні $S_2^{(i)}$ формфактори [7, 12] у вигляді

$$S_0^{(1)} = \int_0^\infty u^2 j_0 dr; \quad S_0^{(2)} = \int_0^\infty w^2 j_0 dr; \quad (9)$$

$$S_2^{(1)} = \int_0^\infty uwj_2 dr; \quad S_2^{(2)} = \int_0^\infty w^2 j_2 dr. \quad (10)$$

Тут u і w - радіальні ХФД в координатному представленні, які віднормовані згідно умови:

$$\int_0^\infty [u^2(r) + w^2(r)] dr = 1; \quad j_0, j_2 - \text{сферичні}$$

функції Бесселя нульового і другого порядку від аргументу $pr/2$. Крім цього, в роботі [12] формули (9) і (10) записані з аргументом pr .

У формулах (5) і (6) згідно [7] введений параметр $P = a \cdot p$ характеризує відношення спінзалежної і незалежної від спіну частин амплітуд розсіяння процесу $NN \rightarrow NN^*(2190)$.

Використовуючи ХФД (2) для потенціалу Reid93 (коефіцієнти розкладів взято з роботи [6]), розраховано значення тензорної A_{yy} та векторної A_y аналізуючих здатностей в імпульсному наближенні по формулам (5) та (6) відповідно. Причому для параметру P вибрано аргумент $a=0.4 \div 1.1$. Результати чисельних розрахунків приведені на Рис. 1 і 2. Теоретичні оцінки величин A_{yy} й A_y порівнюються з експериментальними даними для реакції (d,d') на водні [11], вуглеці [11, 13, 14], берилію [9, 10]. З даних [14] тензорна аналізуюча здатність визначається по формулі: $A_{yy} = -T_{20} / \sqrt{2}$. На відміну від розрахованої величини тензорної аналізуючої здатності A_{yy} , її векторна компонента A_y сильно залежить від параметра P і краще співпадає з експериментом при $a=0.4$.

В роботах [7, 11] приведені результати розрахунків аналізуючих здатностей, одержаних по ХФД для

Парижського та трьох (А, В, С) версій Боннського потенціалів. Там для $a=0.4$ величина A_{yy} перетинає нуль в області $|t|=1.0-1.2$ (Гев/с)², а векторна здатність A_y розрахована для Парижського потенціалу краще корелює з експериментальними даними, ніж для Боннського потенціалу ($a=0.3-0.4$), і до $|t|=1.0$ (Гев/с)² визначається спінзалежною частиною амплітуди елементарного процесу $NN \rightarrow NN^*(2190)$.

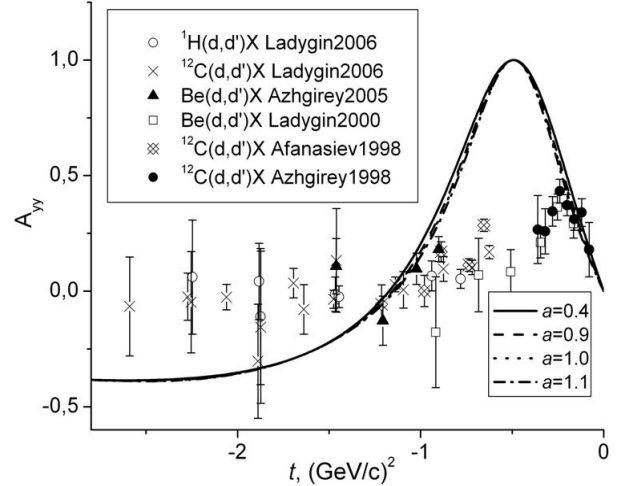


Рис. 1. Тензорна аналізуюча здатність A_{yy}

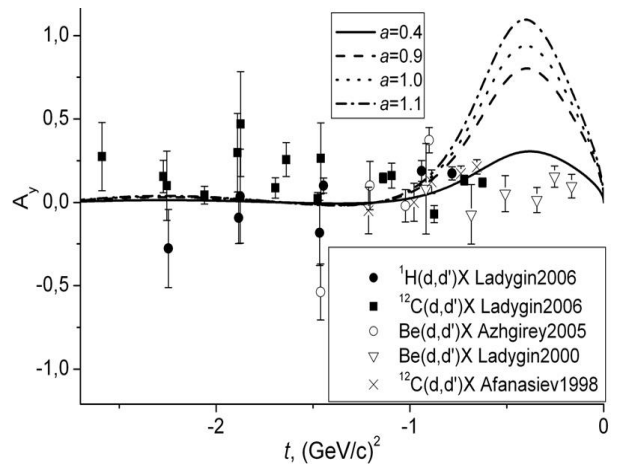


Рис. 2. Векторна аналізуюча здатність A_y

Слід відмітити той факт, що результати розрахунків аналізуючих здатностей A_{yy} і A_y як у роботах [7, 11] для Парижського і Боннського потенціалів, так і в даній роботі для потенціалу Reid93 сильно різняться з експериментальними даними в межах $|t|=0-1.0$ (Гев/с)². До того ж наявний певний розкид даних експериментальних точок для близьких вимірів. Були б цікаво одержати аналізуючі здатності реакції $A(d,d')X$ на

згаданих мішенях при інших значеннях початкового імпульсу дейтрона і кута детектування вторинних дейтронів.

Також можна розрахувати величини тензор-тензорної та вектор-векторної передач поляризації відповідно [7]:

$$K_{yy} = \frac{5T_{11}^2 + T_{00}^2 - 8P^2T_{10}^2}{T_{00}^2 + 2T_{11}^2 + 4P^2T_{10}^2}; \quad (11)$$

$$K_y = 2 \frac{T_{00}T_{11} + 2P^2T_{10}^2}{T_{00}^2 + 2T_{11}^2 + 4P^2T_{10}^2}. \quad (12)$$

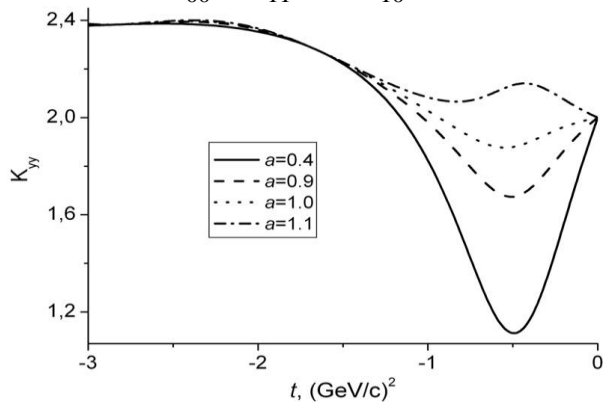


Рис. 3. Тензор-тензорна передача поляризації K_{yy}

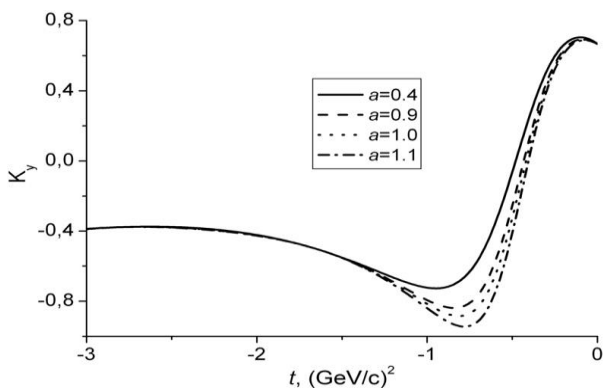


Рис. 4. Вектор-векторна передача поляризації K_y

На жаль ці теоретичні оцінки K_{yy} й K_y для потенціалу Reid93 (Рис. 3 і 4) не вдалося порівняти з експериментальними даними, оскільки останні не були знайдені в науковій літературі. Тому є актуальними експерименти по одержанню цих поляризаційних спостережуваних.

Висновки

По отриманим раніше коефіцієнтам аналітичної форми хвильової функції дейтрона (2) в координатному представленні для феноменологічного реалістичного нуклон-нуклонного потенціалу Reid93 розраховані поляризаційні спостережувані в реакціях типу $A(d,d')X$. В рамках моделі плоскохвильового імпульсного наближення [7] обчислені величини тензорної A_{yy} і векторної A_y аналізуючих здатностей. Вони порівнюються з експериментальними даними реакції непружного розсіяння дейтронів на водні, вуглеці та берилію. Також оцінені теоретичні значення тензор-тензорної K_{yy} та вектор-векторної K_y передач поляризації, які до $|t|=1.5$ $(\text{GeV}/c)^2$ чутливі до амплітуди процесу $NN \rightarrow NN^*(2190)$.

Іноді зручно використовувати саме парціальні перерізи $\tilde{\sigma}_i$ або спін-фліп перерізи $\hat{\sigma}_i$ [7, 15], які характеризуються переворотом спіну і визначаються саме одержаними в цій роботі поляризаційними спостережуваними A_{yy} , K_{yy} , K_y .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhaba V.I. Deuteron: properties and analytical forms of wave function in coordinate space //arXiv:nucl-th/1706.08306
2. Berezhnoy Yu.A. et al. Deuteron Form Matter-Density Distribution in Deuteron and Diffraction Deuteron-Nucleus Interaction // Intern. Jour. Mod. Phys. E – 2005. – Vol. 14, Iss. 7. – P. 1073–1085.
3. Dubovichenko S.B. Deuteron form factors for the Nijmegen potentials // Phys. Atom. Nucl. – 2000. – Vol. 63, Iss. 5. – P. 734–738.
4. Zhaba V.I. Analytical forms of the wave function in coordinate space and tensor polarization of the deuteron for potentials Nijmegen group // J. Phys. Stud. – 2016. – Vol. 20, No. 3. – P. 3101.
5. Zhaba V.I. New analytical forms of a deuteron wave function for potentials Nijmegen groups // Nucl. Phys. Atom. Energy. – 2016. – Vol. 17, No. 1. – P. 22–26.
6. 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.
7. Ladygin V.P., Ladygina N.B. Polarization effects in inelastic deuteron scattering in the region of baryon-resonance excitation // Phys. Atom. Nucl. – 2002. – Vol. 65, Iss. 1. – P. 182–189.
 8. Azhgirey L.S. et al. Differential cross section for the reaction $C-12(d,p)X$ at a primary momentum of 9 GeV/c and its tensor and vector analyzing powers // Phys. Atom. Nucl. – 1999. – Vol. 62, No. 10. – P. 1673–1686.
 9. Ladygin V.P. et al. Measurement of the tensor analyzing power A_{yy} in the inelastic scattering of deuterons in the vicinity of excitation of baryonic resonances // Eur. Phys. J. A – 2000. – Vol. 8. – P. 409–416.
 10. Azhgirey L.S. et al. Measurement of the tensor A_{yy} and vector A_y analyzing powers of the deuteron inelastic scattering of beryllium at 5.0 GeV/c and 178 mrad // Phys. Atom. Nucl. – 2005. – Vol. 68, No. 6. – P. 991–998.
 11. Ladygin V.P. et al. Tensor A_{yy} and Vector A_y Analyzing Powers in the $1H(d,d')X$ and $12C(d,d')X$ Reactions at Initial Deuteron Momenta of 9 GeV/c in the Region of Baryonic Resonance Excitation // Phys. Atom. Nucl. – 2006. – Vol. 69, No. 5. – P. 852–859.
 12. Platonova M.N., Kukulín V.I. Refined Glauber model versus Faddeev calculations and experimental data for pd spin observables // Phys. Rev. C – 2010. – Vol. 81, Iss. 1. – P. 014004.
 13. Afanasiev S.V. et al. Tensor and Vector Analyzing Powers A_{yy} and A_y in the $12C(d,p)X$ and $12C(d,d)X$ reactions at initial Deuteron momentum of 9 GeV/c and emission angle of 85 mrad // JINR Rapid Commun. – 1998. – No. 2[88]-98. – P. 5–16.
 14. Azhgirey L.S. et al. Tensor analyzing power T_{20} in inelastic $(d,d')X$ scattering at 0° on $1H$ and $12C$ from 4.5 to 9.0 GeV/c // JINR Rapid Commun. – 1998. – No. 2[88]-98. – P. 17–26.
 15. Suzuki T. Spin observables for inelastic scattering of polarized deuterons off nuclei // Nucl. Phys. A – 1994. – Vol. 577. – P. 167-172.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2018

В.И. Жаба

Ужгородский национальный университет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000, Украина,
e-mail: viktorzh@meta.ua

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ФОРМЫ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ ДЕЙТРОНА И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ НАБЛЮДАЕМЫЕ В $A(d,d')X$ - РЕАКЦИЯХ

По полученным ранее коэффициентам аналитической формы волновой функции дейтрона в координатном представлении для нуклон-нуклонного потенциала Reid93 рассчитаны поляризационные наблюдаемые в $A(d,d')X$ -реакциях. Рассчитанные величины тензорной A_{yy} и векторной A_y анализирующих способностей сравниваются с экспериментальными данными в t - масштабировании. В модели импульсного приближения также оценены теоретические значения тензор-тензорной K_{yy} и вектор-векторной K_y передач поляризации.

Ключевые слова: дейтрон, волновая функция, аналитическая форма, анализирующая способность, передача поляризации.

V.I. Zhaba

Uzhhorod National University, Voloshyn Str., 54, Uzhhorod, 88000, Ukraine,

e-mail: viktorzh@meta.ua

ANALYTICAL FORMS OF THE DEUTERON WAVE FUNCTION AND POLARIZATION OBSERVABLES IN A(d,d')X REACTIONS

Introduction: Deuteron wave functions in a convenient form are necessary for use in calculations of polarization characteristics of the deuteron and to evaluate the theoretical values of spin observables in dp -scattering and characteristics of (d,d')-reactions.

Purpose: In the received analytical forms of deuteron wave function in coordinate representation it is necessary to calculate polarization observables A_{yy}, A_y, K_{yy}, K_y .

Results: On the received coefficients of the analytical forms for deuteron wave function in coordinate space for the nucleon-nucleon potential Reid93 are calculated polarization observables in A(d,d')X reactions. The obtained values of tensor A_{yy} and vector A_y analyzing powers have been compared with the published experimental data at t scaling for the inelastic scattering of deuterons on hydrogen, carbon and beryllium. In the impulse approximation are also appraised theoretical values of vector-vector K_{yy} and tensor-tensor K_y polarization transfers.

Conclusion: The obtained values of the polarization observables A_{yy}, K_{yy}, K_y can be used to calculate the partial cross sections or spin-flip cross sections.

Key words: deuteron, wave function, analytical form, analyzing power, polarization transfer.

REFERENCES

1. Zhaba, V.I. (2017), "Deuteron: properties and analytical forms of wave function in coordinate space", arXiv:nucl-th/1706.08306
2. Berezhnoy, Yu.A. et al. (2005), "Deuteron Form Matter-Density Distribution in Deuteron and Diffraction Deuteron-Nucleus Interaction", Intern. Jour. Mod. Phys. E, No. 14, pp. 1073-1085.
3. Dubovichenko, S.B. (2000), "Deuteron form factors for the Nijmegen potentials", Phys. Atom. Nucl., No. 63, pp. 734–738.
4. Zhaba, V.I. (2016), "Analytical forms of the wave function in coordinate space and tensor polarization of the deuteron for potentials Nijmegen group", J. Phys. Stud., No. 20, pp. 3101.
5. Zhaba, V.I. (2016), "New analytical forms of a deuteron wave function for potentials Nijmegen groups", Nucl. Phys. Atom. Energy, No. 17, pp. 22-26.
6. Zhaba, V.I. (2016), "New analytical forms of wave function in coordinate space and tensor polarization of deuteron", Mod. Phys. Lett. A, No. 31, pp. 1650139.
7. Ladygin, V.P., Ladygina, N.B. (2002), "Polarization effects in inelastic deuteron scattering in the region of baryon-resonance excitation", Phys. Atom. Nucl., No. 65, pp. 182-189.
8. Azhgirey, L.S. et al. (1999), "Differential cross section for the reaction C-12(d,p)X at a primary momentum of 9 GeV/c and its tensor and vector analyzing powers", Phys. Atom. Nucl., No. 62, pp. 1673-1686.
9. Ladygin, V.P. et al. (2000), "Measurement of the tensor analyzing power A_{yy} in the inelastic scattering of deuterons in the vicinity of excitation of baryonic resonances", Eur. Phys. J. A, No. 8, pp. 409-416.
10. Azhgirey, L.S. et al. (2005), "Measurement of the tensor A_{yy} and vector A_y analyzing powers of the deuteron inelastic scattering of beryllium at 5.0 GeV/c and 178 mrad", Phys. Atom. Nucl., No 68, pp. 991-998.
11. Ladygin, V.P. et al. (2006), "Tensor A_{yy} and Vector A_y Analyzing Powers in the

- ${}^1\text{H}(\text{d},\text{d}')\text{X}$ and ${}^{12}\text{C}(\text{d},\text{d}')\text{X}$ Reactions at Initial Deuteron Momenta of 9 GeV/c in the Region of Baryonic Resonance Excitation", *Phys. Atom. Nucl.*, No. 69, pp. 852-859.
12. Platonova, M.N., Kukulin, V.I. (2010), "Refined Glauber model versus Faddeev calculations and experimental data for pd spin observables", *Phys. Rev. C*, No. 81, pp. 014004.
13. Afanasiev, S.V. et al. (1998), "Tensor and Vector Analyzing Powers A_{yy} and A_y in the ${}^{12}\text{C}(\text{d},\text{p})\text{X}$ and ${}^{12}\text{C}(\text{d},\text{d}')\text{X}$ reactions at initial Deuteron momentum of 9 GeV/c and emission angle of 85 mrad", *JINR Rapid Commun.*, No. 2[88]-98, pp. 5-16.
14. Azhgirey, L.S. et al. (1998), "Tensor analyzing power T_{20} in inelastic $(\text{d},\text{d}')\text{X}$ scattering at 0° on ${}^1\text{H}$ and ${}^{12}\text{C}$ from 4.5 to 9.0 GeV/c", *JINR Rapid Commun.*, No. 2[88]-98, pp. 17-26.
15. Suzuki, T (1994), "Spin observables for inelastic scattering of polarized deuterons off nuclei", *Nucl. Phys. A*, No. 577, pp. 167-172.

© Ужгородський національний університет