

## УГЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЕЙТРОННЫХ АНАЛИЗИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ В $dp$ -УПРУГОМ РАССЕЯНИИ ПРИ БОЛЬШИХ ПОПЕРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСАХ

*В. П. Ладыгин*<sup>1,\*</sup>, *А. В. Аверьянов*<sup>1</sup>, *Е. В. Черных*<sup>1</sup>,  
*Д. Еначе*<sup>2</sup>, *Ю. В. Гурчин*<sup>1</sup>, *А. Ю. Исупов*<sup>1</sup>, *М. Янек*<sup>3</sup>,  
*Ю. Т. Карачук*<sup>2</sup>, *А. Н. Хренов*<sup>1</sup>, *Д. О. Кривенков*<sup>1</sup>,  
*П. К. Курилкин*<sup>1</sup>, *Н. Б. Ладыгина*<sup>1</sup>, *А. Н. Ливанов*<sup>1</sup>,  
*С. М. Пиядин*<sup>1</sup>, *С. Г. Резников*<sup>1</sup>, *А. А. Терехин*<sup>1</sup>,  
*А. В. Тишевский*<sup>1</sup>, *Т. Усака*<sup>4</sup>, *И. С. Волков*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Национальный исследовательский институт электрической инженерии ICPE-SA,  
Бухарест

<sup>3</sup> Жилинский университет, Жилина, Словакия

<sup>4</sup> Научный центр Нишина, RIKEN, Вако, Япония

Представлены результаты векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$  и  $A_{xx}$  анализирующих способностей в дейтрон-протонном упругом рассеянии при больших поперечных импульсах. Эти данные были получены на внутренней мишени нуклотрона ОИЯИ в диапазоне энергий 400–1800 МэВ с использованием пучка поляризованных дейтронов от нового источника поляризованных ионов. Новые данные по дейтронным анализирующим способностям в широком энергетическом диапазоне демонстрируют чувствительность спиновой структуры изоскалярных нуклон-нуклонных корреляций на малых расстояниях.

The results on the vector  $A_y$  and tensor  $A_{yy}$  and  $A_{xx}$  analyzing powers in deuteron–proton elastic scattering at large transverse momenta are presented. These data were obtained at internal target at JINR Nuclotron in the energy range 400–1800 MeV using polarized deuteron beam from new polarized ion source. New data on the deuteron analyzing powers in a wide energy range demonstrate the sensitivity to the short-range spin structure of the isoscalar nucleon–nucleon correlations.

PACS: 24.70.+s; 25.10.+s; 21.45.+v

---

\* E-mail: vladygina@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Основная цель экспериментальной программы коллаборации DSS — получение информации о спин-зависимых частях двух- и трехнуклонных корреляций в двух процессах: дейтрон-протонном упругом рассеянии в широком интервале энергий и безмезонном развале дейтрона с детектированием двух протонов при энергиях 300–500 МэВ [1–3] на станции внутренних мишеней (СВМ) [4].

Важность исследований  $dp$ -упругого рассеяния при высоких энергиях обсуждается в работе [5]. Экспериментальная программа на нуклотроне была начата с измерений векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$  и  $A_{xx}$  анализирующих способностей в  $dp$ -упругом рассеянии при энергиях  $T_d = 880$  МэВ [6] и 2000 МэВ [7]. Также в последние годы проведены систематические измерения дифференциального сечения [8–10].

В настоящей работе представлены новые результаты по векторной  $A_y$  и тензорным  $A_{yy}$  и  $A_{xx}$  анализирующим способностям в  $dp$ -упругом рассеянии, полученные на СВМ нуклотрона [4] в энергетическом диапазоне 400–1800 МэВ.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА СВМ

Установка на СВМ хорошо подходит для исследования энергетической зависимости поляризационных наблюдаемых для дейтрон-протонного упругого рассеяния и реакции развала дейтрона с детектированием двух протонов при больших углах рассеяния. Для этих целей при измерении используется  $\text{CH}_2$ -мишень толщиной 10 мкм. Выход от содержания углерода в  $\text{CH}_2$ -мишени оценивается в отдельных измерениях с использованием нескольких скрученных 8-мкм углеродных нитей. Контроль интенсивности осуществляется детектированием  $pp$ -квазиупругого рассеяния под углом  $90^\circ$  в с. ц. м. сцинтилляционными счетчиками, расположенными в горизонтальной плоскости. Детектирование  $dp$ -упругих событий осуществляется методом совпадений сигналов со сцинтилляционных детекторов для вторичных протонов и дейтронов. Детекторы расположены как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях для измерения анализирующих способностей. Отбор  $dp$ -упругих событий осуществляется методом корреляции потерь энергии в пластиковых сцинтилляторах для дейтрона и протона и их разности во времени пролета. Использование большого количества сцинтилляционных счетчиков позволило покрыть широкий угловой диапазон [11]. Данный метод был использован для получения поляризационных данных в  $dp$ -упругом рассеянии при энергии 880 [6] и 2000 МэВ [7].

Модернизированная установка на СВМ [4] была использована для измерения векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$  и  $A_{xx}$  анализирующих способностей в  $dp$ -упругом рассеянии при энергиях между 400 и 1800 МэВ с использованием пучка поляризованных дейтронов, полученного из со-

зданного в ЛФВЭ ОИЯИ нового источника поляризованных ионов [12]. Данные измерения проводились на СВМ нуклотрона [4] с новой системой управления и сбора данных [13]. Существующая установка [11] была модернизирована путем введения в эксплуатацию новой системы сбора данных на базе стандарта VME, новой системы высоковольтного питания MPod, новых мониторинговых детекторов и т. д. Эта же установка была использована и в качестве поляриметра, основанного на использовании  $dp$ -упругого рассеяния при больших углах и энергии 270 МэВ [11]. Точность определения векторной и тензорной компонент поляризации дейтронного пучка составляет 2%.

### ИЗМЕРЕНИЕ АНАЛИЗИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ

Пучок поляризованных дейтронов обеспечивался новым источником поляризованных ионов [12]. В эксперименте были использованы спиновые моды с максимальными идеальными значениями  $(P_z, P_{zz}) = (0, 0)$ ,  $(+1/3, +1)$  и  $(+1/3, +1)$ . Поляризация пучка дейтронов была измерена при энергии 270 МэВ [11]. События для  $dp$ -упругого рассеяния отбирались по корреляции потерь энергии и разности времени пролета для дейтронных и протонных детекторов. Значения поляризации пучка для различных спиновых мод источника [12] были получены в виде средневзвешенных значений для восьми углов  $dp$ -упругого рассеяния. Типичные значения поляризации пучка составили 65–75% от идеальных значений.

После измерения поляризации пучка дейтронов при энергии 270 МэВ пучок был ускорен до требуемой энергии между 400 и 1800 МэВ. Сцинтилляционные детекторы располагались в горизонтальной и вертикальной плоскостях в соответствии с кинематикой  $dp$ -упругого рассеяния для исследуемой энергии. Основная часть измерений была проведена с использованием  $\text{CH}_2$ -мишени. Углеродная мишень применялась для оценки фона. Отбор  $dp$ -упругих событий осуществлялся по корреляции потерь энергии в пластиковых сцинтилляторах для дейтрона и протона и по разности времени их пролета. Нормированные числа событий  $dp$ -упругого рассеяния для каждой спиновой моды были использованы для вычисления значений анализирующих способностей  $A_y$ ,  $A_{yy}$  и  $A_{xx}$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Угловые зависимости векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$  и  $A_{xx}$  анализирующих способностей дейтрона при кинетической энергии  $T_d = 400$  МэВ представлены на рис. 1, 2 и 3 соответственно (темные квадраты — результаты эксперимента DSS на нуклотроне; светлые квадраты, треугольники и кружки — данные, полученные в США [14, 15] и Франции [16] соответственно).

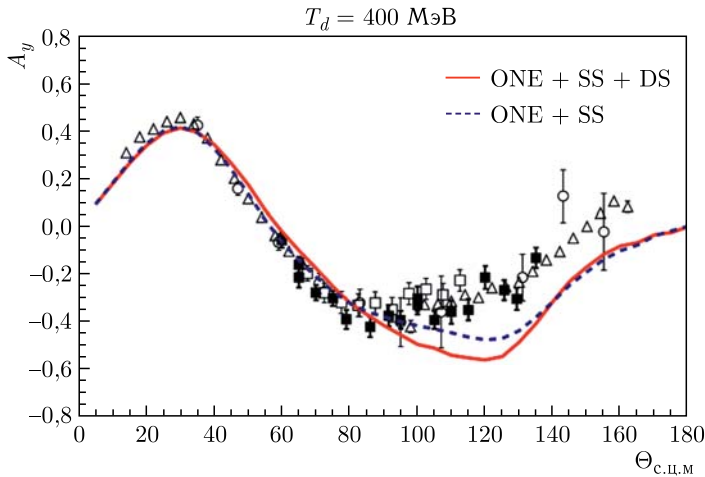


Рис. 1. Векторная анализирующая способность  $A_y$  при энергии 400 МэВ: темные квадраты — данные, полученные на нуклотроне; светлые квадраты, треугольники и кружки — данные, полученные в США [14, 15] и Франции [16] соответственно; линии — теоретические расчеты, выполненные в рамках формализма релятивистского многократного рассеяния [17–20]

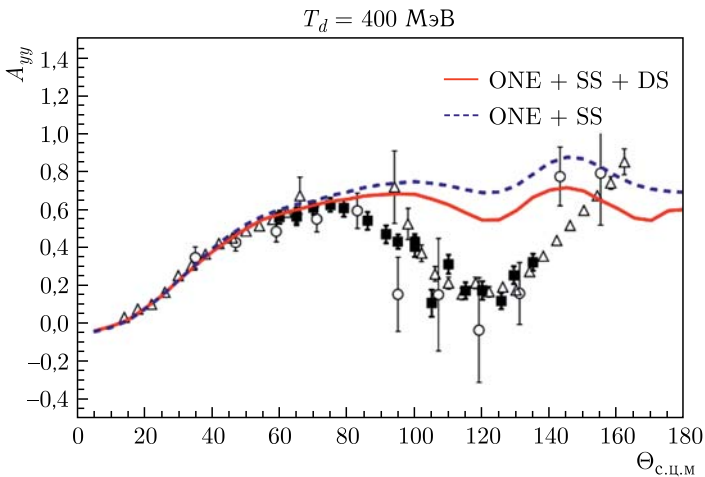


Рис. 2. Тензорная анализирующая способность  $A_{yy}$  при энергии 400 МэВ. Символы и линии — те же обозначения, что и на рис. 1

Можно видеть хорошее совпадение новых данных, полученных на нуклотроне, с данными более ранних экспериментов [14–16]. Теоретические расчеты проводились в рамках формализма релятивистского многократного рассеяния [17–20] с учетом четырех вкладов: однонук-

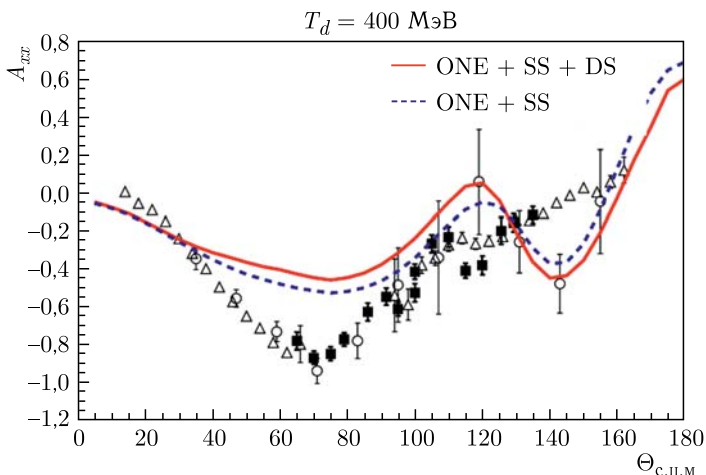


Рис. 3. Тензорная анализирующая способность  $A_{xx}$  при энергии 400 МэВ. Символы и линии — те же обозначения, что и на рис. 1

лонного обмена (ONE), однократного и двукратного рассеяния (SS и DS) и возбуждения дельта-изобары в промежуточном состоянии. Представленный подход был успешно применен для описания дифференциальных сечений при энергиях дейтронов до 1800 МэВ [8–10] во всем угловом диапазоне [19], а также анализирующих способностей [20]. Штриховой и сплошной линиями обозначены результаты расчетов, выполненных в рамках релятивистской модели многократного рассеяния [17–18] с учетом только однонуклонного обмена и однократного рассеяния (ONE+SS) и с дополнительным вкладом двукратного рассеяния (ONE+SS+DS). Вклад механизма с возбуждением дельта-изобары пренебрежительно мал при этой энергии [19, 20]. Релятивистская модель многократного рассеяния [17, 18] описывает данные только по  $A_y$  и  $A_{yy}$  вплоть до  $90^\circ$  в с. ц. м., данные под большими углами она не воспроизводит. Учет двукратного рассеяния не улучшает согласия данных. Поведение  $A_{xx}$  не описывается моделью [17, 18] во всем угловом диапазоне. Возможно, рассмотрение вклада трехнуклонных сил с их короткодействующей частью позволит улучшить согласие данных.

Энергетические зависимости векторной  $A_y$  и тензорной  $A_{yy}$  анализирующих способностей при угле рассеяния  $70^\circ$  в с. ц. м. представлены как функция поперечного импульса  $p_T$  на рис. 4 и 5 соответственно (темные кружки — результаты эксперимента на СВМ нуклотрона; темные квадраты — данные, полученные также на СВМ нуклотрона ранее [6, 7]; светлые символы — мировые данные, полученные ранее во Франции, США и Японии [16, 21–24]). Как  $A_y$ , так и  $A_{yy}$  анализирующие способности меняют знак при  $p_T$  около 600 МэВ/с и имеют тенденцию при больших поперечных импульсах достигать положительные и отрицатель-

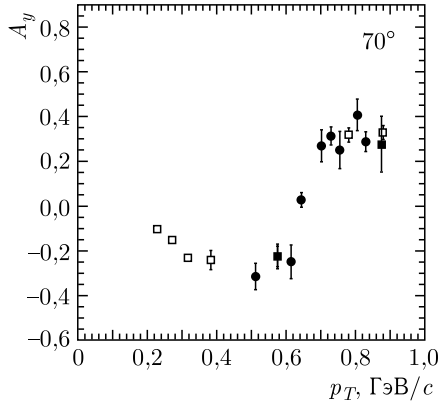


Рис. 4. Зависимость векторной  $A_y$  анализирующей способности  $dp$ -упругого рассеяния при угле  $70^\circ$  в с. ц. м. от поперечного импульса  $p_T$ : темные кружки — результаты эксперимента на СВМ нуклотрона; темные квадраты — данные, полученные на СВМ нуклотрона ранее [6–7]; светлые символы — мировые данные [16, 21–24]

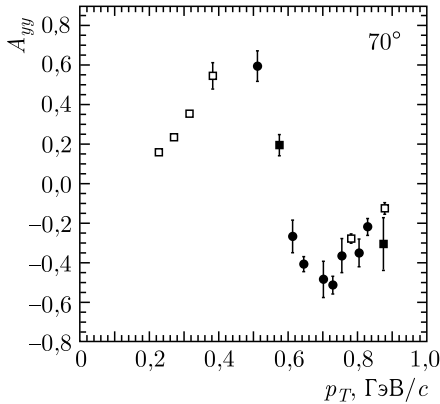


Рис. 5. Зависимость тензорной  $A_{yy}$  анализирующей способности  $dp$ -упругого рассеяния при угле  $70^\circ$  в с. ц. м. от поперечного импульса  $p_T$ . Символы — те же обозначения, что и на рис. 4

ные постоянные значения. Эти особенности данных свидетельствуют о серьезном отклонении спиновой структуры двухнуклонных короткодействующих корреляций от стандартного описания нуклон-нуклонного взаимодействия. Требуется дальнейшие теоретические исследования, чтобы понять поведение полученных данных при больших значениях  $p_T$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизированный нуклотрон с новым источником поляризованных ионов [12] дает уникальную возможность для изучения спиновых эффектов и поляризационных явлений в малонуклонных системах. Реализация программы эксперимента DSS на СВМ нуклотрона позволит получить важнейшие данные о спиновой структуре двухнуклонных и трехнуклонных короткодействующих корреляций.

Проведено сканирование угловых зависимостей дейтронных анализирующих способностей в  $dp$ -упругом рассеянии по начальной энергии от 400 до 1800 МэВ. Полученные данные демонстрируют чувствительность к спиновой структуре дейтрона на малых межнуклонных расстояниях.

Будущие эксперименты с использованием поляризованных дейтронов и протонов на СВМ находятся в стадии подготовки.

**Благодарности.** Авторы приносят благодарность коллективу, работающему на нуклотроне, за хорошие условия проведения эксперимента и выражают признательность А. С. Белову, В. Б. Шутову, В. В. Фимушкину за настройку источника поляризованных дейтронов. Отдельная благодарность С. Н. Базылеву, В. И. Максименкову, И. В. Слепневу, В. М. Слепневу, А. В. Шутову и Я. Т. Схоменко за помощь во время подготовки и проведения эксперимента.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-02-00079а и гранта Министерства образования, науки, исследований и спорта Республики Словакии (VEGA Grant No. 1/0113/18).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ladygin V. P. et al.* Spin Physics in Few Body Systems at Nuclotron // Phys. Part. Nucl. 2014. V. 45. P. 327–329.
2. *Ladygin V. P. et al.* Few-Body Studies at Nuclotron–JINR // Few Body Syst. 2014. V. 55. P. 709–712.
3. *Janek M. et al.* Investigation of the  $dp$  Breakup and  $dp$  Elastic Reactions at Intermediate Energies at Nuclotron // Few Body Syst. 2017. V. 58. P. 40.
4. *Malakhov A. I. et al.* Potentialities of the Internal Target Station at the Nuclotron // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 440. P. 320–329.
5. *Ladygin V. P. et al.* The Spin Studies in Few-Body Systems at Nuclotron // Intern. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 40. P. 1660074.
6. *Kurilkin P. K. et al.* Measurement of the Vector and Tensor Analyzing Powers for  $dp$  Elastic Scattering at 880 MeV // Phys. Lett. B. 2012. V. 715. P. 61–65.
7. *Kurilkin P. K. et al.* Investigation of the Angular Dependence of the Analyzing Powers in the Deuteron–Proton Elastic Scattering at the Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8. P. 1081–1083.
8. *Terekhin A. A. et al.* Study of the  $dp$  Elastic Scattering at 2 GeV // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 695–702.

9. *Terekhin A. A. et al.* Differential Cross Section for Elastic Deuteron–Proton Scattering at the Energy of 700 MeV per Nucleon // *Phys. At. Nucl.* 2017. V. 8. P. 1061–1072.
10. *Terekhin A. A. et al.* The Differential Cross Section in Deuteron–Proton Elastic Scattering at 500, 750 and 900 MeV/nucleon // *Eur. Phys. J. A.* 2019. V. 55. P. 129.
11. *Kurilkin P. K. et al.* The 270 MeV Deuteron Beam Polarimeter at the Nuclotron Internal Target Station // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 642. P. 45–51.
12. *Fimushkin V. V. et al.* Development of Polarized Ion Source for the JINR Accelerator Complex // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 678. P. 012058.
13. *Isupov A. Yu. et al.* The Nuclotron Internal Target Control and Data Acquisition System // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2013. V. 698. P. 127–134.
14. *Cadman R. V. et al.* Evidence for a Three Nucleon Force Effect in Proton–Deuteron Elastic Scattering // *Phys. Rev. Lett.* 2001. V. 86. P. 967.
15. *Przewoski B. et al.* Analyzing Powers and Spin Correlation Coefficients for  $p + d$  Elastic Scattering at 135 MeV and 200 MeV // *Phys. Rev. C.* 2006. V. 74. P. 064003.
16. *Garcon M. et al.* Measurements of Vector and Tensor Analysing Powers for 191 and 395 MeV Deuteron Scattering // *Nucl. Phys. A.* 1986. V. 458. P. 287–300.
17. *Ladygina N. B.* Deuteron–Proton Elastic Scattering at Intermediate Energies // *Phys. At. Nucl.* 2008. V. 71. P. 2039–2051.
18. *Ladygina N. B.* Differential Cross Section of  $dp$  Elastic Scattering at Intermediate Energies // *Eur. Phys. J. A.* 2009. V. 42. P. 91–96.
19. *Ladygina N. B.* Delta Excitation in Deuteron–Proton Elastic Scattering // *Eur. Phys. J. A.* 2016. V. 52. P. 199.
20. *Ladygina N. B.* On Reaction Mechanisms in Deuteron–Proton Elastic Scattering // *Eur. Phys. J. A.* 2020. V. 56. P. 133.
21. *Haji-Saied M. et al.* Tensor and Vector Spin Observables in  $pd$  Elastic Scattering at 600 MeV, 800 MeV, and 1000 MeV // *Phys. Rev. C.* 1987. V. 36. P. 2010–2017.
22. *Ghazikhanian V. et al.* Vector and Tensor Spin Observables in the Reaction  $^1\text{H}(d, d)^1\text{H}$  at 1.6 GeV // *Phys. Rev. C.* 1991. V. 43. P. 1532–1552.
23. *Sekiguchi K. et al.* Complete Set of Precise Deuteron Analyzing Powers at Intermediate Energies: Comparison with Modern Nuclear Force Predictions // *Phys. Rev. C.* 2002. V. 65. P. 034003.
24. *Sekiguchi K. et al.* Polarization Transfer Measurement for  $^1\text{H}(d, p)^2\text{H}$  Elastic Scattering at 135-MeV/u and Three Nucleon Force Effects // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 70. P. 014001.