

ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЕЙТРОННОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ КВАЗИУПРУГОГО ПРОТОН-ПРОТОННОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 500 И 650 МэВ/НУКЛОН

© 2023 г. И. С. Волков^{1)*}, В. П. Ладыгин¹⁾, Я. Т. Схоменко¹⁾, Ю. В. Гурчин¹⁾, А. Ю. Исупов¹⁾, М. Янек²⁾, Ю. Т. Карачук^{1),3)}, А. Н. Хренов¹⁾, П. К. Курилкин¹⁾, А. Н. Ливанов¹⁾, С. М. Пиядин¹⁾, С. Г. Резников¹⁾, А. А. Терехин¹⁾, А. В. Тишевский¹⁾, А. В. Аверьянов¹⁾, Е. В. Черных¹⁾, Д. Энаше³⁾, Д. О. Кривенков¹⁾, И. Е. Внуков⁴⁾

Поступила в редакцию 18.06.2023 г.; после доработки 18.06.2023 г.; принята к публикации 18.06.2023 г.

Векторная поляризация дейтронного пучка получена на станции внутренних мишеней Нуклотрона с использованием данных протон-протонного квазиупругого рассеяния на полиэтиленовой мишени. Отбор полезных событий был выполнен, используя временную и амплитудную информацию, полученную с помощью сцинтилляционных счетчиков. Для получения асимметрии на водороде было выполнено вычитание углеродного фона. Значения векторной поляризации были получены при энергиях пучка 500 и 650 МэВ/нуклон. Полученные значения сравнивались со значениями поляризации, полученными в дейтрон-протонном упругом рассеянии при энергии 135 МэВ/нуклон.

DOI: 10.31857/S0044002723060090, EDN: OVKVLN

1. ВВЕДЕНИЕ

В современной ядерной физике эксперименты по изучению дейтрон-протонного и протон-протонного упругого рассеяния являются фундаментальными для понимания нуклон-нуклонных взаимодействий. Большая база данных поперечных сечений и поляризационных наблюдаемых была получена для энергий ниже 1 ГэВ, что позволило провести парциально-волновой анализ [1]. Современные феноменологические потенциальные модели взаимодействия нуклонов обеспечивают хорошее описание данных до порога рождения пионов.

Расширение мезонной обменной модели для больших энергий требует включения вкладов неупругих каналов из-за возбуждения барионных резонансов. Упругое dp - и pp -рассеяние хорошо подходит для изучения короткодействующей части нуклон-нуклонных взаимодействий. Точные значения анализирующей способности при энергиях выше порога рождения пионов позволяют уточнить

вклад спин-орбитальных сил, чувствительных к обмену тяжелыми мезонами. Измерение поляризации пучков также являются важной частью этих исследований, что создает потребность в развитии новых методов исследования поляризации и анализирующей способности.

В ходе этой работы были получены значения векторной поляризации дейтронного пучка при энергиях 500 и 650 МэВ/нуклон с использованием данных, полученных с использованием протон-протонного квазиупругого рассеяния.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент выполнялся на станции внутренних мишеней сверхпроводящего синхротрона Нуклотрона, который располагается в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований. Пучок дейтронов для эксперимента обеспечивался источником поляризованных ионов [2], ускорялся RFQ и линейным ускорителем, после чего инжектировался в кольцо Нуклотрона. При достижении необходимой энергии диск с мишенями, расположенный внутри кольца ускорителя, вращался, выводя необходимую мишень на траекторию движения дейтронов. Регистрация частиц, полученных в ходе взаимодействия пучка с мишенью, производилась с помощью сцинтилляционных детекторов.

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²⁾Жилинский университет, Физическое отделение, Жилина, Словакия.

³⁾Национальный институт исследования и развития электротехники, Бухарест, Румыния.

⁴⁾Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия.

*E-mail: isvolkov@jinr.ru

Таблица 1. Усредненные значения поляризации дейтронного пучка, полученные с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии 135 МэВ/нуклон [9]

Компонента	p_z	Δp_z
(+1/3, +1)	-0.231	0.008
(+1/3, -1)	-0.245	0.006

Станция внутренних мишеней представляет собой сферическую вакуумную камеру с системой смены мишеней [3]. Камера фиксируется на ионопроводе ускорителя с помощью фланцевого соединения. Диск с различными мишенями (CH_2 , C, W, Cu и др.) зафиксирован внутри камеры на оси шагового двигателя, который используется для поворота диска и выведения нужной мишени на траекторию пучка. Для эксперимента использовались мишени из полиэтиленовой пленки толщиной 10 мкм и углеродных нитей толщиной 8 мкм. Для получения эффекта на водороде производилась процедура вычитания углеродного фона. Сигнал от датчика положения мишени использовался для привязки точки взаимодействия к центру ионопровода.

Сцинтилляционные детекторы, расположенные вокруг камеры рассеяния в направлении пучка, регистрировали частицы, полученные в ходе взаимодействия пучка с мишенью. Эти счетчики регистрировали продукты реакции протон-протонного квазиупругого рассеяния. Для регистрации протонов, рассеянных влево и вправо, использовались 22 детектора, которые располагались симметрично относительно оси ионопровода. Два отдельных детектора использовались для мониторингирования интенсивности пучка и располагались под углом 90° в с.ц.м. для обеспечения нечувствительности к векторной поляризации пучка. Данные по угловой зависимости анализирующей способности протон-протонного квазиупругого рассеяния были получены при энергиях 500 и 650 МэВ/нуклон на полиэтиленовой и углеродной мишенях.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Полезные события отбирались с использованием критериев для разницы времени пролета пары сцинтилляционных счетчиков, корреляции энергетических потерь для сигналов кинематически сопряженных счетчиков, а также для положения мишени, которое записывалось для каждого события в ходе эксперимента.

При взаимодействии дейтронного пучка с полиэтиленовой мишенью в данных неизбежно появляется углеродный фон. Вклад углерода в данных от CH_2 -мишени оценивался из отдельных

измерений, в которых использовалась углеродная мишень. Предполагалось, что форма углеродного спектра была одинакова при рассеянии как на полиэтиленовой, так и на углеродной мишенях. Процедура вычитания углеродного фона состояла в определении коэффициента, на который необходимо умножить данные, полученные на углероде, для приближения к углеродному фону в данных, полученных на полиэтилене. Для проведения процедуры вычитания использовалась следующая формула:

$$N_p = N_{\text{CH}_2} - k N_C, \quad (1)$$

где N_p — число событий на протонах, N_{CH_2} — число событий на полиэтилене, N_C — число событий на углероде, k — искомый коэффициент.

Коэффициент k находился следующим образом: в данных от кинематически связанных счетчиков при рассеянии на полиэтиленовой мишени выделялась область полезных событий, соответствующих протон-протонному рассеянию. Этот критерий также переносился на гистограммы энергетических потерь для углеродной мишени. Учитывая только данные, находящиеся вне критерия, углеродный спектр приближался к полиэтиленовому спектру с помощью метода наименьших квадратов. В результате был получен коэффициент k , на который нужно умножить углеродный спектр, чтобы получить спектр, максимально близкий к углеродному фону в данных на полиэтилене.

Значения анализирующей способности pp -квазиупругого рассеяния вычислялись, используя данные, полученные с помощью вычитания углеродного фона из данных на полиэтиленовой мишени. На рис. 1 и 2 показаны значения анализирующих способностей протон-протонного квазиупругого рассеяния при энергиях пучка 500 и 650 МэВ/нуклон. Эти значения были получены с использованием поляризации, указанной в табл. 1. Полученные значения анализирующей способности говорят о том, что pp -квазиупругое рассеяние можно использовать для вычисления векторной поляризации дейтронного пучка.

Для вычисления векторной поляризации пучка были использованы следующие формулы, которые были выведены из [10] для случая, описанного в данной работе:

$$N_L = 1 + P_z A_y, \quad (2)$$

$$N_R = 1 - P_z A_y, \quad (3)$$

где N_L , N_R — выходы реакции, P_z — значение векторной поляризации, A_y — значение векторной анализирующей способности рассеяния. Следующие формулы были использованы для вычисле-

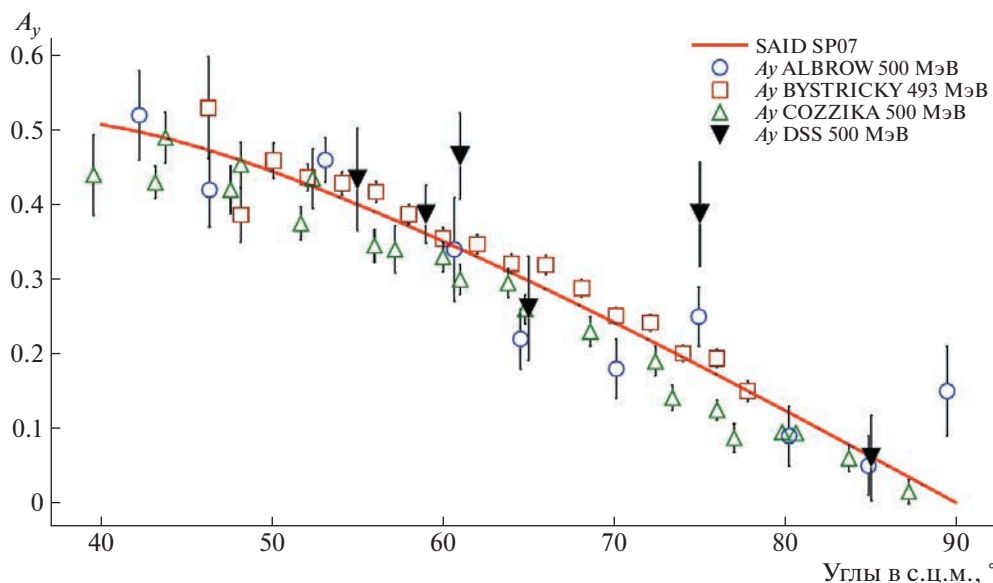


Рис. 1. Сравнение анализирующей способности в реакции pp -квазиупругого рассеяния при энергии 500 МэВ/нуклон с мировыми данными и результатами решения SP07 парциально-волнового анализа SAID. Заполненные символы — результаты данного эксперимента. Открытые символы — мировые данные [4–6]. Сплошная кривая — предсказания SAID [1].

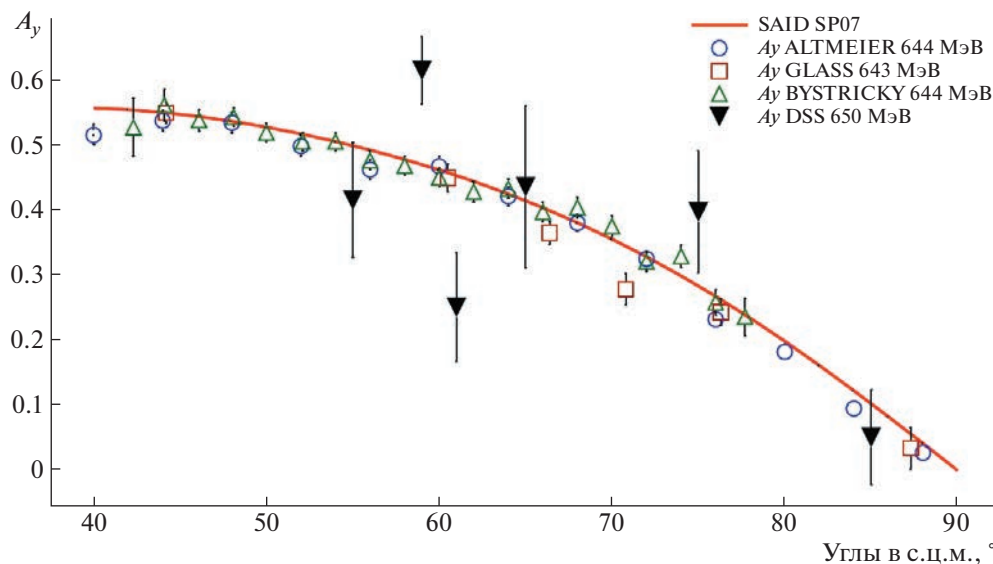


Рис. 2. Сравнение анализирующей способности в реакции pp -квазиупругого рассеяния при энергии 650 МэВ/нуклон с мировыми данными и результатами решения SP07 парциально-волнового анализа SAID. Заполненные символы — результаты данного эксперимента. Открытые символы — мировые данные [5, 7, 8]. Сплошная кривая — предсказания SAID [1].

ния векторной анализирующей способности pp -квазиупругого рассеяния:

$$P_z^+ = \frac{\frac{N_L^+ M^0}{N_L^0 M^+} - \frac{N_R^+ M^0}{N_R^0 M^+}}{2A_y}, \quad (4)$$

$$P_z^- = \frac{\frac{N_L^- M^0}{N_L^0 M^-} - \frac{N_R^- M^0}{N_R^0 M^-}}{2A_y}, \quad (5)$$

где P_z^+ и P_z^- — векторные поляризации для соответствующей поляризационной моды. N_L^+ , N_L^- и N_L^0 — количество событий для конкретного угла слева для двух поляризованных мод и неполяри-

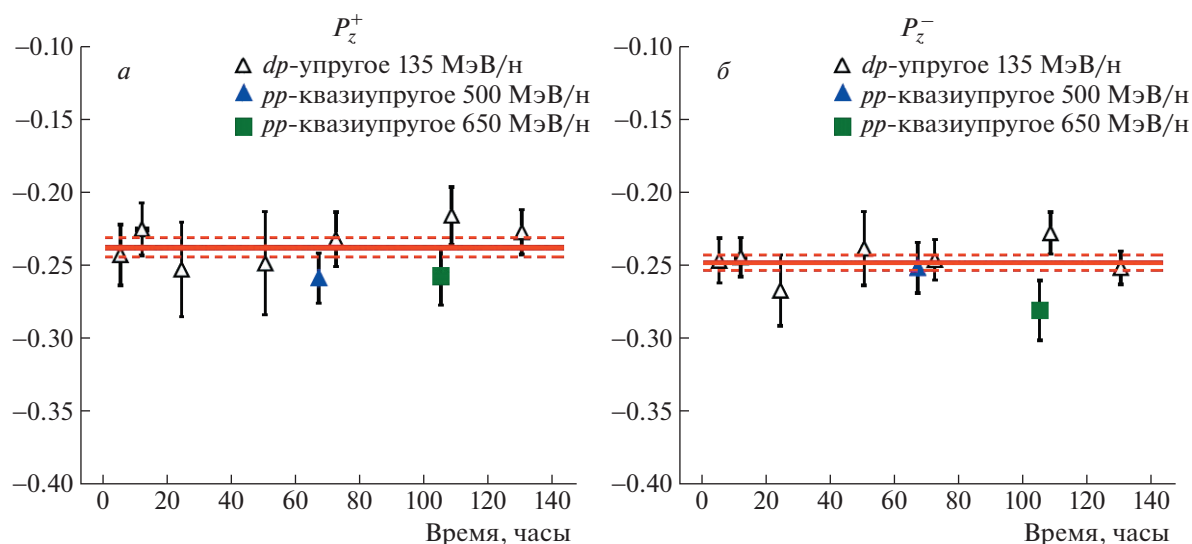


Рис. 3. Сравнение значений векторной поляризации дейтронного пучка, полученных при энергиях 500 и 650 МэВ/нуклон, со значениями поляризации, полученными с помощью дейтрон-протонного рассеяния при энергии 135 МэВ/нуклон [9]. *а* — Для поляризационной моды $(+1/3, +1)$, *б* — для поляризационной моды $(+1/3, -1)$.

зованной моды соответственно. N_R^+ , N_R^- и N_R^0 — количество событий для конкретного угла справа для двух поляризованных мод и неполяризованной моды соответственно. M^+ , M^- и M^0 — количество событий в мониторинговых счетчиках для соответствующих спиновых мод. A_y — значения векторной анализирующей способности для соответствующего угла в с.ц.м.

Для определения векторной поляризации использовались 13 различных пар детекторов: шесть пар при рассеянии частиц влево, шесть пар вправо и одна пара для рассеяния под 90° в с.ц.м. Получившиеся результаты для соответствующих углов затем усреднялись с помощью среднего взвешенного для двух поляризационных мод по отдельности.

Поляризация пучка также измерялась регулярно во время эксперимента с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии пучка 135 МэВ/нуклон [9]. В эксперименте использовались три спиновые моды источника поляризованных ионов: неполяризованная и две смешанных с идеальными значениями (p_z, p_{zz}) , равными $(0, 0)$, $(+1/3, +1)$ и $(+1/3, -1)$ соответственно.

Полученные значения векторной поляризации при энергиях дейтронного пучка 500 и 650 МэВ/нуклон можно сравнить с данными, полученными при энергии 135 МэВ/нуклон.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Угловые зависимости векторной анализирующей способности A_y в протон-протонном квазиупругом рассеянии при энергиях пучка 500 и

650 МэВ/нуклон представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Заполненные символы — результаты этого эксперимента, который проводился на станции внутренней мишени Нуклотрона. Открытые символы — данные, полученные в других экспериментах [4–8]. Значения анализирующей способности также сравниваются с предсказаниями парциально-волнового анализа SP07 SAID [1]. Видно хорошее соответствие данных на Нуклотроне с результатами, полученными ранее, а также с решением SAID SP07. Следовательно, провести измерение поляризации пучка дейтронов, используя протон-протонное квазиупругое рассеяние, возможно.

Значения поляризации дейтронного пучка при энергиях 500 и 650 МэВ/нуклон представлены на рис. 3. Заполненные символы представляют собой результаты этого эксперимента, открытые символы — данные по поляризации, полученные при энергии пучка 135 МэВ/нуклон. Сплошная линия — средневзвешенное значение поляризации по всем точкам, штриховая — средневзвешенная ошибка измерений. Видно хорошее соответствие значений поляризации, представленных в этой работе, значениям, полученным при другой энергии [9].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На внутренней мишени Нуклотрона ОИЯИ была получена векторная поляризация дейтронного пучка. Для этого использовались данные, полученные в pp -квазиупругой кинематике для энергий 500

и 650 МэВ/нуклон. Поляризация дейтронного пучка была впервые измерена на Нуклотроне, используя протон-протонное квазиупругое рассеяние.

Полученные значения поляризации также сравнивались с данными, полученными с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии 135 МэВ/нуклон. Сравнение показало, что полученные результаты хорошо соответствуют поляризации, полученной с помощью другого метода [9].

Эксперимент проводился в тестовом режиме. Планируется, что в будущих исследованиях с поляризованными пучками протонов и дейтронов будет улучшена точность измерений поляризации и анализирующей способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. A. Arndt, W. J. Briscoe, I. I. Strakovsky, and R. L. Workman, *Phys. Rev. C* **76**, 025209 (2007).
2. V. V. Fimushkin, A. D. Kovalenko, L. V. Kutuzova, Y. V. Prokofichev, B. Shutov, A. S. Belov, V. N. Zubets, and A. V. Turbabin, *J. Phys.: Conf. Ser.* **678**, 012058 (2016).
3. A. I. Malakhov, S. V. Afanasiev, Yu. S. Anisimov, A. S. Artiimov, S. N. Bazilev, A. N. Khrenov, J. Kliman, V. A. Krasnov, V. Matousek, M. Morhac, A. Yu. Starikov, A. V. Shabunov, V. M. Slepnev, and I. Turzo, *Nucl. Instrum. Methods A* **440**, 320 (2000).
4. M. Albrow, S. A. Almed, B. Bosnjakovic, C. Daum, F. Erne, J. Lagnaux, J. Sens, and F. Udo, *Nucl. Phys. B* **23**, 445 (1970).
5. J. Bystricky, P. Chaumette, J. Deregél, J. Fabre, F. Lehar, A. De Lesquen, L. Van Rossum, J. Fontaine, J. Gosset, F. Perrot, C. Whitten, J. Ball, P. Chesny, C. Newsom, J. Yonnet, T. Niinikoski, *et al.*, *Nucl. Phys. B* **262**, 727 (1985).
6. G. Cozzika, Y. Ducros, A. de Lesquen, J. Movchet, J. C. Raoul, L. van Rossum, J. Deregél, and J. M. Fontaine, *Phys. Rev.* **164**, 1672 (1967).
7. M. Altmeier, F. Bauer, J. Bisplinghoff, K. Bußer, M. Busch, T. Colberg, L. Demirors, H. P. Engelhardt, P. D. Eversheim, K. O. Eyser, O. Felden, R. Gebel, M. Glende, J. Greiff, F. Hinterberger, E. Jonas, *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **23**, 351 (2005).
8. G. Glass, T. S. Bhatia, J. C. Hiebert, R. A. Kenefick, S. Nath, L. C. Northcliffe, W. B. Tippens, and J. E. Simmons, *Phys. Rev. C* **47**, 1369 (1993).
9. Y. T. Skhomenko, V. P. Ladygin, Y. V. Gurchin, A. Y. Isupov, M. Janek, J. T. Karachuk, A. N. Khrenov, P. K. Kurilkin, A. N. Livanov, S. M. Piyadin, S. G. Reznikov, A. A. Terekhin, A. V. Tishevsky, A. V. Averyanov, A. S. Belov, E. V. Chernykh, *et al.*, *EPJ Web Conf.* **204**, 10002 (2019).
10. G. G. Ohlsen, *Rep. Prog. Phys.* **35**, 717 (1972).

DEUTERON BEAM VECTOR POLARIZATION MEASUREMENT USING PROTON-PROTON QUASIELASTIC SCATTERING AT THE ENERGIES 500 AND 650 MeV/NUCLEON

I. S. Volkov¹⁾, V. P. Ladygin¹⁾, Ya. T. Skhomenko¹⁾, Yu. V. Gurchin¹⁾, A. Yu. Isupov¹⁾,
M. Janek²⁾, J. T. Karachuk^{1),3)}, A. N. Khrenov¹⁾, P. K. Kurilkin¹⁾, A. N. Livanov¹⁾,
S. M. Piyadin¹⁾, S. G. Reznikov¹⁾, A. A. Terekhin¹⁾, A. V. Tishevsky¹⁾, A. V. Averyanov¹⁾,
E. V. Chernykh¹⁾, D. Enache³⁾, D. O. Krivenkov¹⁾, I. E. Vnukov⁴⁾

¹⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²⁾Physics Department, University of Žilina, Žilina, Slovakia

³⁾National Institute for R&D in Electrical Engineering ICPE-CA, Bucharest, Romania

⁴⁾Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

The deuteron beam vector polarization was obtained at the Nuclotron Internal Target Station using quasielastic proton-proton scattering on the polyethylene target. The selection of useful events was performed using the time and amplitude information from scintillation counters. The asymmetry on hydrogen was obtained by the subtraction of the carbon background. The values of vector polarization were obtained at the beam energies of 500 and 650 MeV/nucleon. The obtained values are compared with the data obtained in the deuteron-proton elastic scattering at the beam energy of 135 MeV/nucleon.