УДК 539.12:539.14:539.171

## АНАЛИЗИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ В КВАЗИУПРУГОМ ПРОТОН-ПРОТОННОМ РАССЕЯНИИ ПРИ ЭНЕРГИЯХ ОТ 200 ДО 650 МэВ/НУКЛОН

© 2022 г. И. С. Волков<sup>1, \*</sup>, В. П. Ладыгин<sup>1</sup>, Я. Т. Схоменко<sup>1</sup>, Ю. В. Гурчин<sup>1</sup>, А. Ю. Исупов<sup>1</sup>, М. Янек<sup>2</sup>, Ю. Т. Карачук<sup>1, 3</sup>, А. Н. Хренов<sup>1</sup>, П. К. Курилкин<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>, А. В. Аверьянов<sup>1</sup>, Е. В. Черных<sup>1</sup>,

Д. Энаше<sup>3</sup>, Д. О. Кривенков<sup>1</sup>, И. Е. Внуков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Международная межправительственная организация "Объединенный институт ядерных исследований", Дубна, Россия

<sup>2</sup>Жилинский университет, Физическое отделение, Жилина, Словакия

<sup>3</sup>Национальный институт исследования и развития электротехники, Бухарест, Румыния

<sup>4</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

\**E-mail: isvolkov@jinr.ru* Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Векторная анализирующая способность квазиупругого протон-протонного рассеяния получена на станции внутренних мишеней Нуклотрона, с использованием поляризованного дейтронного пучка и полиэтиленовой мишени. Отбор полезных событий был выполнен, используя временную и амплитудную информацию, полученную с помощью сцинтилляционных счетчиков. Асимметрия на водороде была получена путем вычитания углеродного фона. Значения векторной анализирующей способности были получены при энергиях пучка 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон. Полученные значения сравнивалась с предсказаниями парциально-волнового анализа SAID.

DOI: 10.31857/S0367676522090332

#### введение

Эксперименты по изучению протон-протонного упругого рассеяния являются фундаментальными для понимания нуклон-нуклонных взаимодействий. Для энергий ниже 1 ГэВ была получена большая база данных поперечных сечений и поляризационных наблюдаемых, что позволило выполнить парциально волновой анализ [1]. Современные феноменологические потенциальные модели 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. С другой стороны, упругое *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. В ходе работы были получены значения векторной анализирующей способности реакции взаимодействия дейтронов и протонов в кинематике протон-протонного упругого рассеяния при энергиях 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон.

## СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент был выполнен на станции внутренних мишеней Нуклотрона, сверхпроводящего синхротрона, расположенного в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ. Схема эксперимента была следующей: пучок дейтронов обеспечивался источником поляризованных ионов [2], поляризованные дейтроны ускорялись RFQ и линейным ускорителем, а затем вводились в кольцо Нуклотрона. Когда достигалась необходимая энергия, диск с мишенями вращался, выводя мишень на траекторию движения дейтронов. Частицы, полученные в реакции, регистрировались сцинтилляционными детекторами.

Станция внутренних мишеней представляет собой сферическую вакуумную камеру с систе-

мой смены мишеней [3]. Камера зафиксирована на ионопроводе с помощью фланцевого соединения. Диск с мишенями (CH<sub>2</sub>, C, W, Cu и др.) зафиксирован внутри камеры на оси шагового двигателя. Для эксперимента использовались полиэтиленовая пленка и углеродные нити толщиной 10 и 8 мкм, соответственно. Эффект на водороде был получен с помощью процедуры вычитания углеродного фона. Сигнал с датчика положения мишени был использован для корректировки параметров ускорителя, чтобы точка взаимодействия пучка с мишенью была как можно ближе к центру ионопровода.

Частицы, полученные в ходе взаимодействия пучка с мишенью, попадали в сцинтилляционные детекторы, расположенные вокруг камеры рассеяния в направлении пучка. Счетчики регистрировали продукты реакции протон-протонного квазиупругого рассеяния. В эксперименте использовались 11 детекторов для регистрации протонов слева и столько же справа, расположенные симметрично относительно оси ионопровода. Два отдельных детектора были расположены симметрично относительно направления пучка примерно под 90° в с.ц.м, что обеспечивает их нечувствительность к векторной поляризации пучка. Данные по угловой зависимости анализирующей способности протон-протонного квазиупругого рассеяния были получены при энергиях 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон на полиэтиленовой и углеродной мишенях.

#### АНАЛИЗ ДАННЫХ

Поляризация пучка измерялась с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии пучка 270 МэВ [4]. Эта процедура выполнялась регулярно во время эксперимента. В эксперименте использовались 3 спиновые моды источника поляризованных ионов: неполяризованная и 2 смешанных, с идеальными значениями  $(p_{z}, p_{zz})$  равными (0,0), (+1/3, +1) и (+1/3, -1), соответственно. Данные в эксперименте набирались в две сессии, с небольшим временным промежутком между ними. Значения векторной поляризации, использованной для расчетов при энергиях пучка 500 и 650 МэВ/нуклон, указаны в табл. 1. Значения векторной поляризации пучка при энергиях 200 и 550 МэВ/нуклон указаны в табл. 2.

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

Таблица 1. Значения поляризации дейтронного пучка, полученные с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии 270 МэВ, для первой сессии эксперимента (при энергиях пучка 500 и 650 МэВ/ нуклон) [4]

Компонента	p <sub>z</sub>	$\Delta p_z$
(+1/3, +1)	-0.231	0.008
(+1/3, -1)	-0.245	0.006

Таблица 2. Значения поляризации дейтронного пучка, полученные с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии 270 МэВ, для второй сессии эксперимента (при энергиях пучка 200 и 550 МэВ/нуклон) [4]

Компонента	p <sub>z</sub>	$\Delta p_z$
(+1/3, +1)	-0.212	0.007
(+1/3, -1)	-0.239	0.005

Так как дейтронный пучок взаимодействовал с полиэтиленовой мишенью, в данных неизбежно появлялся углеродный фон. Выход углерода от СН<sub>2</sub>-мишени оценивался из измерений с использованием углеродной мишени, состоящей из нескольких нитей. Предполагалось, что форма углеродного спектра была одинакова при рассеянии на полиэтиленовой и углеродной мишенях. Процедура вычитания углеродного фона состояла в определении коэффициента, на который необходимо помножить углеродные данные для приближения к фону в данных на полиэтилене. Для проведения процедуры вычитания использовалась следующая формула:

$$N_p = N_{\rm CH_2} - k N_{\rm C},\tag{1}$$

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 события энергетических потерь для углеродной мишени. Учитывая только данные, находящиеся вне критерия, углеродный спектр приближался к полиэтиленовому спектру с помощью метода наименьших квадратов. В результате, k – коэффициент, на который нужно умножить углеродный спектр, чтобы получить спектр, максимально близкий к углеродному фону в данных на полиэтилене.

Значения анализирующей способности *pp*квазиупругого рассеяния могут быть вычислены, используя данные, полученные с помощью вычи-



**Рис. 1.** Сравнение анализирующей способности в реакции *pp*-квазиупругого рассеяния при энергии 200 МэВ/нуклон с мировыми данными и результатами решения SP07 парциально-волнового анализа SAID. Заполненные символы — результаты данного эксперимента. Открытые символы — мировые данные [6, 7]. Сплошная линия — предсказания SAID [1].

тания углеродного фона из данных на полиэтиленовой мишени. Для этого были использованы следующие формулы, которые были выведены из [5] для случая, описанного в этой статье:

$$N_L = 1 + P_z A_y, \tag{2}$$

$$N_R = 1 - P_z A_y, \tag{3}$$

где  $N_L$ ,  $N_R$  — выходы реакции,  $P_z$  — значение векторной поляризации,  $A_y$  — значение векторной анализирующей способности рассеяния. Следующие формулы были использованы для вычисления векторной анализирующей способности *pp*-квази-упругого рассеяния:

$$A_{yL} = \frac{\frac{N_L^+ M^0}{N_L^0 M^+} + \frac{N_L^- M^0}{N_L^0 M^-} - 2}{P_z^+ + P_z^-},$$
(4)

$$A_{yR} = \frac{\frac{N_R^+ M^0}{N_R^0 M^+} + \frac{N_R^- M^0}{N_R^0 M^-} - 2}{P_z^+ + P_z^-},$$
 (5)

где  $A_{yL}$  и  $A_{yR}$  — векторная анализирующая способность реакции для рассеяния влево и вправо соответственно.  $N_L^+$ ,  $N_L^-$  и  $N_L^0$  — количество событий для конкретной левой пары для двух поляризованных мод и неполяриованной моды соответственно.  $N_R^+$ ,  $N_R^-$  и  $N_R^0$  — количество событий для конкретной правой пары для двух поляризован-

ных мод и неполяриованной моды соответственно.  $M^+$ ,  $M^-$  и  $M^0$  – количество событий в мониторных счетчиках для соответствующих спиновых

мод.  $P_z^+$  и  $P_z^-$  – значения векторной поляризации пучка для соответствующих поляризованных мод источника поляризованных ионов.

Для определения *A<sub>y</sub>* использовались 13 различных пар детекторов: 6 пар при рассеянии влево, 6 пар вправо и 1 пара для рассеяния под 90° в с.ц.м. Получившиеся результаты для рассеяния влево и вправо затем усреднялись по правилам среднего взвешенного для каждого угла в с.ц.м по отдельности.

Полученные значения анализирующей способности можно сравнить с данными, полученными в других экспериментах с теми же или близкими энергиями, а также с результатами парциально-волнового анализа SAID.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Угловые зависимости векторной анализирующей способности  $A_y$  в протон-протонном квазиупругом рассеянии при энергиях пучка 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон представлены на рис. 1, 2, 3 и 4, соответственно. Заполненные символы результаты этого эксперимента, проведенного на станции внутренней мишени Нуклотрона. Открытые символы — данные, полученные в других экспериментах [6–13]. Значения анали-



**Рис. 2.** 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 [8–10]. Сплошная линия — предсказания SAID [1].



**Рис. 3.** Сравнение анализирующей способности в реакции *pp*-квазиупругого рассеяния при энергии 550 МэВ/нуклон с мировыми данными и результатами решения SP07 парциально-волнового анализа SAID. Заполненные символы — результаты данного эксперимента. Открытые символы — мировые данные [11, 12]. Сплошная линия — предсказания SAID [1].

зирующей способности также сравниваются с предсказаниями парциально-волнового анализа SP07 SAID [1]. Видно хорошее соответствие дан-

ных на Нуклотроне с результатами, полученными ранее, а также с решением SAID SP07. Следовательно, можно также сказать, что эффект сре-



**Рис. 4.** 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 [9, 11, 13]. Сплошная линия — предсказания SAID [1].

ды незначителен для данных, полученных на Нуклотроне.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была получена векторная анализирующая способность  $A_y$  реакции дейтрон-протонного рассеяния в *pp*-квазиупругой кинематике с использованием поляризованного дейтронного пучка с энергией 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон на внутренней мишени Нуклотрона ОИЯИ. При данных энергиях и при больших углах в с.ц.м. анализирующая способность протон-протонного квазиупругого рассеяния была получена впервые.

Результатом этой работы являются значения анализирующей способности, которые сравнивались с данными, полученными в других лабораториях, а также с решением SP07 парциально-волнового анализа SAID. Сравнение показало, что результаты, полученные в этой работе, соответствуют мировым данным и результатам SAID в пределах полученной точности. Это свидетельствует о том, что эффекты связанности протона в дейтроне и возможные эффекты перерассеяния малы. Следовательно, использование протонпротонного квазиупругого рассеяния дает в перспективе возможность измерения векторной поляризации пучка дейтронов.

Достаточно большая статистическая ошибка измерений была следствием того, что эксперимент проводился в тестовом режиме. Планируется, что в будущих исследованиях с поляризованными пучками протонов и дейтронов будет улучшена точность измерений анализирующей способности и поляризации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-02-00079а), при поддержке Министерства Образования, Науки, Исследований и спорта Словацкой Республики (VEGA, грант № 1/0113/18), при поддержке гранта АРVV-20-0052, а также по программам кооперации с ОИЯИ Словацкой Республики и ОИЯИ Румынии в 2016–2021 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Arndt R.A., Briscoe W.J., Strakovsky I.I., Workman R.L. // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. Art. No. 025209.
- Fimushkin V.V., Kovalenko A.D., Kutuzova L.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 678. Art. No. 012058.
- 3. *Malakhov A., Afanasiev S., Anisimov Y.et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2000. V. 440. P. 320.
- 4. Skhomenko Y.T., Ladygin V.P., Gurchin Y.V. et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 204. Art. No. 10002.
- 5. Ohlsen G.G. // Rep. Prog. Phys. 1972. V. 35. P. 717.
- Baskir E., Hafner E. M., Roberts A., Tinlot J.H. // Phys. Rev. 1957. V. 106. P. 564.
- Rathmann F., von Przewoski B., Dezarn W.A. et al. // Phys. Rev. C. 1998. V. 58. P. 658.
- Albrow M., Andersson Almehed S. et al. // Nucl. Phys. B. 1970. V. 23. No. 3. P. 445.

- Bystricky J., Chaumette P., Deregel J. et al. // Nucl. Phys. B. 1985. V. 262. No. 4. P. 727.
- 10. *Cozzika G., Ducros Y., de Lesquen A. et al.* // Phys. Rev. 1967. V. 164. P. 1672.
- 11. *Altmeier M., Bauer F., Bisplinghoff J. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2005. V. 23. P. 351.
- 12. *Ball J., Ghazikhanian V., Gordon J. et al.* // Nucl. Phys. B. 1987. V. 286. P. 635.
- Glass G., Bhatia T.S., Hiebert J.C. et al. // Phys. Rev. C. 1993. V. 47. P. 1369.

# Analyzing power of quasi-elastic proton-proton scattering at the energies from 200 to 650 MeV/nucleon

I. S. Volkov<sup>a, \*</sup>, V. P. Ladygin<sup>a</sup>, Ya. T. Skhomenko<sup>a</sup>, Yu. V. Gurchin<sup>a</sup>, A. Yu. Isupov<sup>a</sup>, M. Janek<sup>b</sup>,

J. T. Karachuk<sup>a, c</sup>, A. N. Khrenov<sup>a</sup>, P. K. Kurilkin<sup>a</sup>, A. N. Livanov<sup>a</sup>, S. M. Piyadin<sup>a</sup>, S. G. Reznikov<sup>a</sup>,

A. A. Terekhin<sup>a</sup>, A. V. Tishevsky<sup>a</sup>, A. V. Averyanov<sup>a</sup>, E. V. Chernykh<sup>a</sup>, D. Enache<sup>c</sup>,

D. O. Krivenkov<sup>*a*</sup>, I. E. Vnukov<sup>*d*</sup>

<sup>a</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia <sup>b</sup> Physics Department, University of Zilina, Žilina, 01026 Slovakia <sup>c</sup> National Institute for R&D in Electrical Engineering ICPE-CA, Bucharest, 030138 Romania <sup>d</sup> Belgorod State National Research University, Belgorod, 308015 Russia \*e-mail: isvolkov@iinr.ru

Vector analyzing power in quasielastic proton-proton scattering was obtained at the Nuclotron Internal Target Station using a polarized deuteron beam and a 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 analyzing power were obtained at the beam energies of 200, 500, 550, and 650 MeV/nucleon. The obtained values are compared with the predictions of the partial-wave analysis SAID.