

ИЗМЕРЕНИЕ АНАЛИЗИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ В КВАЗИУПРУГОМ ПРОТОН-ПРОТОННОМ РАССЕЯНИИ ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ НА ВНУТРЕННЕЙ МИШЕНИ НУКЛОТРОНА

© 2025 г. И. С. Волков^{1),*}, А. В. Аверьянов¹⁾, И. Е. Внуков²⁾, Ю. В. Гурчин¹⁾,
Д. Еначе³⁾, А. Ю. Исупов¹⁾, Ю.-Т. Карачук^{1),3)}, Д. О. Кривенков¹⁾, П. К. Курилкин¹⁾,
В. П. Ладыгин¹⁾, А. Н. Ливанов¹⁾, С. М. Пиядин¹⁾, С. Г. Резников¹⁾,
Я. Т. Схоменко¹⁾, А. А. Терехин¹⁾, А. В. Тишевский¹⁾, Е. В. Черных¹⁾, М. Янек⁴⁾

Поступила в редакцию 05.07.2024 г.; после доработки 07.10.2024 г.; принята к публикации 16.10.2024 г.

Получение новых данных по поляризационным наблюдаемым является важной частью развития моделей нуклон-нуклонного рассеяния. Для этой цели были использованы пучок поляризованных дейтронов и детектирующая установка на станции внутренних мишеней Нуклотрона. Счетчики устанавливались в соответствии с кинематикой pp -упругого рассеяния. Полезные события отбирались с помощью временной и амплитудной информации от счетчиков. В качестве основной мишени использовалась полиэтиленовая пленка. Для удаления фона из данных использовалась вспомогательная углеродная мишень. В настоящей статье представлены результаты измерения векторной анализирующей способности протон-протонного квазиупругого рассеяния при энергиях пучка дейтронов 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными предыдущих экспериментов и предсказаниями парциально-волнового анализа SP07 SAID.

Ключевые слова: поляризационные наблюдаемые, модели нуклон-нуклонного рассеяния, кинематика pp -упругого рассеяния, углеродная мишень

DOI: 10.31857/S0044002725010061, EDN: GSHEIV

1. ВВЕДЕНИЕ

Нуклон-нуклонное рассеяние является очень важной частью ядерной физики, а следовательно, и частью процесса понимания материи как таковой [1]. Также оно является необходимой частью в описании образования мезонов и других процессов при средних энергиях.

В случае протон-протонного рассеяния была собрана очень обширная база данных дифференциальных и полных сечений, а также одно- и многоспиновых наблюдаемых в различных диапазонах углов рассеяния. Это позволило построить модели PSA (phase-shift analysis [2]) и PWA (partial-wave analysis) для изоспина $I = 1$ [3–12], которые хорошо описывают экспериментальные

данные до 3 ГэВ. Для случая $I = 0$ ситуация более неоднозначна [10], данные качественно описываются лишь до 1.3 ГэВ.

Для полного описания рассеяния частиц со спином $\frac{1}{2}$ в процессе $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$ необходимо использовать 16 независимых амплитуд [13]. Используя требования инвариантности пространственного вращения, пространственного обращения времени, а также следствие тождественности частиц, из 16 амплитуд ненулевыми остаются только 5 [13, 14].

Матрицу рассеяния в таком случае удобно выразить в следующем виде [15, 16]:

$$M(\mathbf{k}_f, \mathbf{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ (a + b) + (a - b)(\sigma_1, \mathbf{n})(\sigma_2, \mathbf{n}) + \right. \\ \left. + (c + d)(\sigma_1, \mathbf{m})(\sigma_2, \mathbf{m}) + (c - d)(\sigma_1, \mathbf{l})(\sigma_2, \mathbf{l}) + \right. \\ \left. + e(\sigma_1 + \sigma_2, \mathbf{n}) \right\}. \quad (1)$$

Здесь амплитуды a , b , c , d и e являются комплексными функциями двух переменных, начального импульса и угла рассеяния. σ_1 и σ_2 — спиновые матрицы Паули, действующие на волновые функции первого и второго нуклонов,

¹⁾ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²⁾ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия.

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

⁴⁾ Жилинский университет, физическое отделение, Жилина, Словакия.

* E-mail: isvolkov@jinr.ru

соответственно. Базисные векторы в системе центра масс определяются как

$$\mathbf{l} = \frac{\mathbf{k}_f + \mathbf{k}_i}{|\mathbf{k}_f + \mathbf{k}_i|}, \quad \mathbf{m} = \frac{\mathbf{k}_f - \mathbf{k}_i}{|\mathbf{k}_f - \mathbf{k}_i|}, \quad \mathbf{n} = \frac{\mathbf{k}_f \times \mathbf{k}_i}{|\mathbf{k}_f \times \mathbf{k}_i|}, \quad (2)$$

где $\mathbf{k}_i$ и $\mathbf{k}_f$ — единичные векторы, направленные вдоль импульсов начальной и конечной частиц в системе центра масс, соответственно.

Для описания экспериментальных поляризационных наблюдаемых используются четырехиндексные обозначения [15]: X_{srbt} , где s — поляризация рассеянной частицы, r — поляризация частицы отдачи, b — поляризация начального пучка, t — поляризация мишени. Эти индексы символизируют направление вектора поляризации, соответствующее базисным векторам, определенным в формулах (2). Если начальные частицы неполяризованы или поляризация конечных состояний частиц не анализируется, то соответствующие индексы полагаются равными нулю. Всего может быть определено 256 различных идеальных величин [16], которые представляют собой компоненты тензора.

В данном эксперименте рассеянные частицы анализировались в горизонтальной плоскости (в плоскости, параллельной $\mathbf{k}_i$ и $\mathbf{k}_f$), пучок имел поляризацию, направленную вверх [17] (параллельно или антипараллельно $\mathbf{n}$). Использовалась неполяризованная мишень.

Для однокомпонентных тензоров сохранение четности, принцип Паули, инвариантность обращения времени из 12 возможных величин оставляют ненулевыми лишь 4, которые равны друг другу [16]. Это означает, что результаты эксперимента по измерению A_{00n0} могут также сравниваться с результатами экспериментов по изучению P_{n000} , P_{0n00} и A_{000n} при одинаковых кинематических условиях. Исходя из принципа Паули, также следует то, что анализирующая способность pp -упругого рассеяния, связанная с поляризацией пучка, антисимметрична относительно преобразований $\pi - \theta \rightarrow \theta$:

$$A_{00n0}(\pi - \theta) = -A_{00n0}(\theta). \quad (3)$$

Анализирующую способность, связанную с поляризацией пучка, можно выразить через амплитуды рассеяния в явном виде, используя формулу

$$\sigma A_{00n0} = \frac{1}{4} \text{Tr}(M \sigma_{1n} M^+) = \text{Re}(a^* e), \quad (4)$$

где $\sigma \equiv I_{0000} = \frac{1}{4} \text{Tr}(MM^+)$.

Сравнение анализирующих способностей pp -упругого и pp -квазиупругого рассеяния в

экспериментах с использованием поляризованных мишеней ${}^6\text{LiH}$ и ${}^6\text{LiD}$ показывает, что они неотличимы в рамках достигнутой экспериментальной точности измерения в большом диапазоне энергий [18]. Это свойство позволяет измерять анализирующую способность pp -упругого рассеяния, используя реакцию развала дейтрона, при условии, что детекторы установлены в соответствии с кинематикой pp -упругого рассеяния.

С целью исследования спиновой структуры двухнуклонных ($2N$) и трехнуклонных ($3N$) сил на Нуклотроне был предложен эксперимент DSS (Deuteron Spin Structure) [19], в ходе которого были получены данные из процессов dp -упругого рассеяния [20, 21] и развала дейтрона $dp \rightarrow ppn$ [22, 23]. Часть детекторов установки DSS была использована для эксперимента, изложенного в этой статье.

В настоящей работе представлены результаты по измерению анализирующей способности A_{00n0} протон-протонного квазиупругого рассеяния в реакции развала дейтронов при энергиях пучка 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон при углах рассеяния $55^\circ < \theta_{\text{с.м.}} < 85^\circ$ в системе центра масс. Предварительные результаты по анализирующим способностям при данных энергиях, полученные на части статистики и без оценки систематических ошибок, были опубликованы в работе [24]. Процедура получения значений анализирующей способности и моделирования с дополнительными подробностями обработки первичных данных была ранее опубликована в [25]. Для анализирующей способности A_{00n0} в дальнейшем будет использоваться обозначение A_y .

В разд. 2 проиллюстрирована общая схема проведения эксперимента. Процедура отбора полезных событий на полиэтилене и углероде описывается в разд. 3. В разд. 4 разъясняются детали процесса вычитания углеродного фона из данных на полиэтилене. Для коррекции углов установки детекторов использовалось моделирование сдвига пучка, результаты которого представлены в разд. 5. Получение значений анализирующей способности изложено в разд. 6. Полученные результаты представлены в разд. 7. Заключение сформулировано в разд. 8.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве базовой установки для проведения эксперимента использовалась станция внутренних мишеней [26, 27] Нуклотрона.

В эксперименте использовался источник поляризованных ионов [17, 28], разработанный для Нуклотрона и коллайдера NICA. Он представ-

ляет собой атомарный источник ионов пучкового типа с зарядообменным плазменным ионизатором и накопительной ячейкой. Атомарный дейтерий производился из молекулярного дейтерия с помощью радиочастотного плазменного диссоциатора и далее проходил через охлаждающий канал, стенки которого были охлаждены до ~ 80 К. Затем атомы проходили через секступольный магнит, который фокусировал атомы с атомной поляризацией $1/2$ и дефокусировал остальные. Ядерная поляризация атомов дейтерия получалась с помощью сложной системы магнитных полей различной силы. Поляризованный дейтерий затем попадал в накопительную ячейку, расположенную внутри солениода. Ионизация атомов достигалась путем инъекции в камеру протонов в направлении, противоположном движению дейтерия. Таким образом, происходила зарядообменная реакция между дейтерием и протонами, что на выходе из ячейки давало дейтроны.

Поляризация дейтронного пучка достигалась путем радиочастотных переходов в сверхтонкой структуре. В эксперименте использовались три спиновые моды источника поляризованных ионов: неполяризованная, “2–6” и “3–5”, с максимальными теоретическими значениями векторной и тензорной поляризаций пучка $(p_y, p_{yy}) = (0, 0)$, $(+1/3, +1)$ и $(+1/3, -1)$ соответственно. Спиновые моды источника менялись поочередно от цикла к циклу. Ось квантования поляризации располагалась перпендикулярно плоскости кольца Нуклотрона.

Во время эксперимента поляризация пучка регулярно измерялась с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии пучка 135 МэВ/нуклон [29], чередуясь с наборами при других энергиях. При проведении расчетов предполагалось, что при более высоких энергиях пучок имеет ту же степень поляризации. Полученные значения векторной компоненты поляризации указаны в табл. 1. Данные набирались в ходе двух сессий со значительным промежутком времени между ними, в каждой из которых поляризация была вычислена отдельно. Таким образом, данные по анализирующей способности для энергий пучка 500 и 650 МэВ были получены в ходе первой сессии, а данные для энергий 200 и 550 МэВ/нуклон были получены во второй сессии.

Мишень представляла собой диск с установленными внутри прорезей различными материалами (CH_2 , С, W, Си и др.), который фиксировался на оси шагового двигателя внутри вакуумной камеры [26]. Во время ускорения пучка диск был повернут пустой прорезью, а по до-

Таблица 1. Усредненные значения поляризации, полученные с помощью dp -упругого рассеяния при энергии 135 МэВ/нуклон [29] для спиновых мод “2–6” и “3–5”; данные представлены для двух сессий

Сессия	Спиновая мода	p_y	Δp_y
1	“2–6”	0.231	0.008
	“3–5”	0.245	0.006
2	“2–6”	0.212	0.007
	“3–5”	0.239	0.005

стижении необходимой энергии вращался, вводя нужную мишень в ионопровод [27]. В данном эксперименте в качестве основной мишени использовалась полиэтиленовая пленка толщиной 10 мкм. Для оценки фона от углерода, содержащегося в полиэтилене, использовалась мишень, состоящая из десяти скрученных углеродных нитей, каждая толщиной по 8 мкм.

22 сцинтилляционных счетчика, расположенных вокруг камеры внутренней мишени (рис. 1), использовались для регистрации продуктов протон-протонного квазиупругого рассеяния. Для достижения полной эффективности регистрации как протонов отдачи (с их широким угловым распределением), так и рассеянных протонов (с узким угловым распределением), использовались детекторы разных размеров. В качестве мониторинговых счетчиков требовалась дополнительная пара детекторов, нечувствительных к поляризации пучка. Для этого они должны были располагаться под углом 90° в с.ц.м. (системе центра масс).

В эксперименте использовалась часть детекторов дейтронного поляриметра, использующего асимметрию dp -упругого рассеяния [20]. Параметры сцинтилляторов, а также углы установки детекторов в с.ц.м. указаны в табл. 2. Детекторы устанавливались под одинаковыми углами в с.ц.м. при всех исследуемых энергиях. Углы установки детекторов в лабораторной системе для всех энергий указаны в табл. 3. Под углами установки в с.ц.м. подразумеваются идеальные значения, соответствующие прохождению первичного пучка по центру ионопровода. Детекторы устанавливались парами симметрично справа и слева относительно центра ионопровода. Программная часть системы сбора данных более подробно описана в [30].

3. ОТБОР ПОЛЕЗНЫХ СОБЫТИЙ

Для отбора событий в эксперименте использовались пары детекторов, установленные в соответствии с кинематикой pp -упругого рассеяния

Таблица 2. Размеры сцинтилляторов детекторов, использованных в поляриметре для измерения анализирующей способности, и их углы установки в с.ц.м; углы установки в с.ц.м. были одинаковы для всех энергий пучка

Углы установки в с.ц.м., град	Ширина, мм	Высота, мм	Толщина, мм	Расстояние до точки взаимодействия, мм
55, 65, 75, 85	20	40	20	580
58, 62	24	40	10	555
90	50	60	10	555
95, 105, 115, 125	20	60	20	580
120	50	40	10	555

Таблица 3. Углы установки детекторов в лабораторной системе при различных энергиях пучка

Углы установки в с.ц.м., град	Углы установки в лабораторной системе, град			
	200 МэВ/нуклон	500 МэВ/нуклон	550 МэВ/нуклон	650 МэВ/нуклон
55	27.6	24.8	24.6	24.2
58	28.3	26.0	25.7	25.3
62	30.0	28.4	28.1	27.7
65	31.2	29.5	29.6	28.8
75	36.1	34.3	34.0	33.5
85	41.1	39.2	38.9	38.3
90	43.6	41.6	41.3	40.8
95	46.1	44.1	43.8	43.2
105	51.1	49.2	48.9	48.3
115	56.2	54.4	54.1	53.5
120	58.7	57.0	56.7	56.2
125	61.3	59.6	59.4	58.9

(см. табл. 2 и 3). Полезные события выделялись с использованием критериев для разницы времени прихода сигналов и корреляции энергетических потерь в кинематически сопряженных сцинтилляционных детекторах, а также с учетом положения точки взаимодействия. Позиция мишени записывалась для каждого события в ходе эксперимента, следовательно, имеется возможность отбросить события, которые находятся далеко от точки, где наблюдалось наибольшее число событий [31].

Разница между временем прихода сигналов от двух кинематически связанных счетчиков при энергии 550 МэВ/нуклон для угла 58° в с.ц.м. при рассеянии вправо показана на рис. 2. Сплошная гистограмма содержит события без использования критериев отбора. Заштрихованная гистограмма представляет события с учетом критериев на положение мишени и корреляцию энергетических потерь. В финальных расчетах учитываются только события, имеющие относительно малую временную разницу. Штриховые линии — критерий отбора событий.

На гистограмме корреляции энергетических потерь кинематически связанных счетчиков при энергии 550 МэВ/нуклон для угла 58° в с.ц.м.

при рассеянии вправо (рис. 3) хорошо различимо пятно, которое относится к pp -упругим событиям. Учитываются только события, находящиеся внутри выделенной области. Критерии для разницы времени прихода сигналов и для корреляции энергетических потерь поочередно оптимизировались для улучшения отбора полезных событий. Штриховая линия — критерий отбора событий.

4. ВЫЧИТАНИЕ УГЛЕРОДНОГО ФОНА

Так как дейтронный пучок взаимодействовал с полиэтиленовой мишенью, в полученных данных неизбежно появлялся фон. Количество событий от взаимодействия с углеродом в CH_2 -мишени оценивалось из измерений с использованием углеродной мишени, состоящей из нескольких нитей.

Предполагалось, что форма углеродного спектра была одинакова при рассеянии на полиэтиленовой и углеродной мишенях (рис. 4а и рис. 4б). Процедура вычитания углеродного фона состояла в нахождении коэффициента, на который необходимо домножить данные, полученные на углеродной мишени, для приближения к фону в данных, полученных на полиэтиленовой мише-

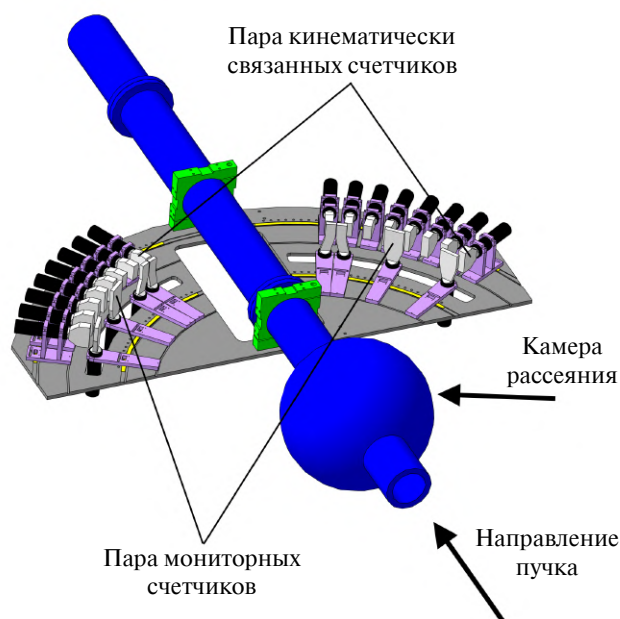


Рис. 1. Схема размещения детекторов для эксперимента по изучению анализирующей способности A_y в протон-протонном квазиупругом рассеянии на станции внутренних мишеней Нуклотрона.

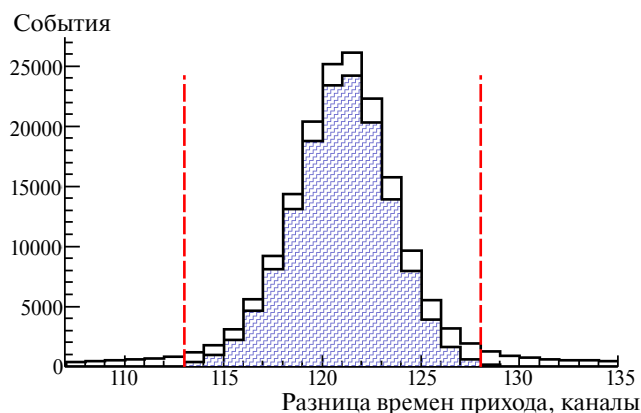


Рис. 2. Критерий отбора событий по разнице прихода сигналов с двух кинематически связанных детекторов для угла 58° в с.ц.м. при энергии 550 МэВ/нуклон. Сплошная гистограмма содержит события без использования критериев отбора. Заштрихованная гистограмма представляет события с учетом критериев на положение мишени и корреляцию энергетических потерь.

ни. Для проведения процедуры вычитания использовались следующие формулы:

$$N_p = N_{CH_2} - kN_C, \quad (5)$$

$$\delta N_p = \sqrt{N_{CH_2} + \delta k^2 N_C^2 + k^2 N_C}, \quad (6)$$

где N_p — общее число событий на протонах, δN_p — ошибка вычисления количества событий

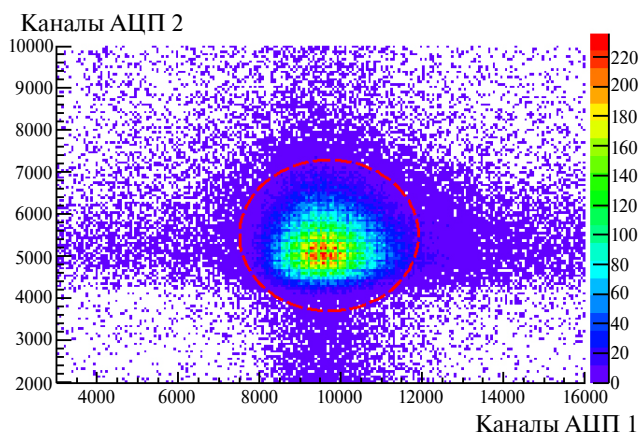


Рис. 3. Критерий отбора для корреляции энергетических потерь в двух кинематически связанных детекторах для угла 58° в с.ц.м. при энергии 550 МэВ/нуклон. Корреляция показана без применения критериев.

на протонах, N_{CH} — общее число событий на полиэтилене, N_C — общее число событий на углероде, k — искомый коэффициент, Δk — ошибка вычисления коэффициента.

Коэффициент k можно найти несколькими способами: используя метод наименьших квадратов, метод суммирования спектров и метод аппроксимации спектров.

Метод наименьших квадратов предполагает, что в данных по корреляции ионизационных потерь для кинематически связанных счетчиков (см. рис. 4а), полученных при рассеянии на полиэтиленовой мишени, выделялась область полезных событий (показана штриховыми линиями), соответствующая протон-протонному упругому рассеянию. Этот критерий также учитывался и в данных по корреляции ионизационных потерь для углеродной мишени (см. рис. 4б). Учитывая события, находящиеся вне выделенной области, спектр, полученный на углероде, приближался к спектру, полученному на полиэтилене, с помощью метода наименьших квадратов. В результате был получен искомый коэффициент k .

В методе суммирования спектров использовались те же критерии, что и в методе наименьших квадратов. Коэффициент находился путем нахождения отношения количества событий вне критериев в данных на полиэтилене и количества событий вне критериев в данных на углероде.

В методе аппроксимации спектра функциями использовался другой подход. Сначала спектр с данными, полученными на углероде, аппроксимировался суммой двух гауссиан. Затем спектр на полиэтилене аппроксимировался суммой гауссиан и функции, полученной после аппроксимации данных на углероде, умноженной на коэф-

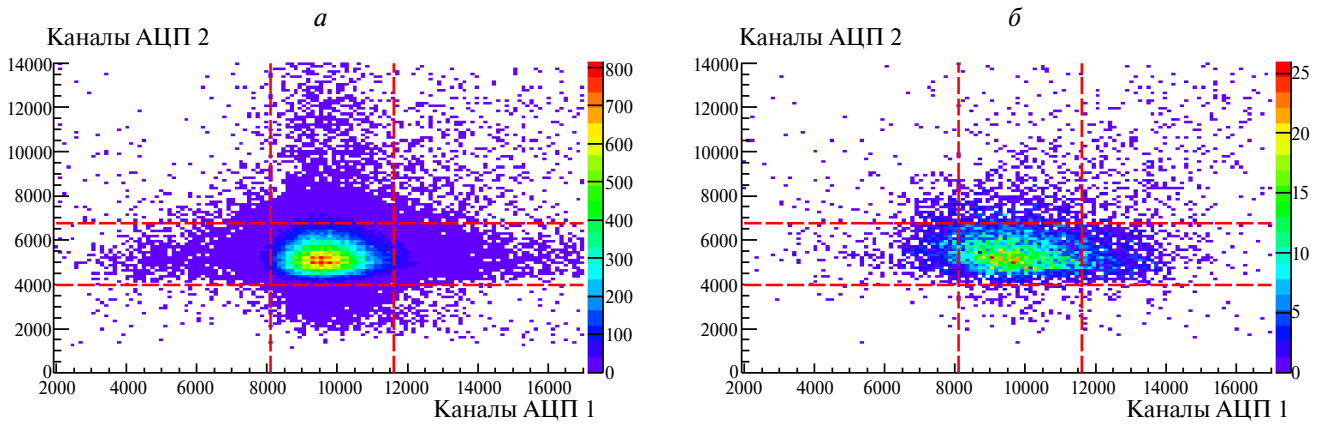


Рис. 4. Процесс установки критериев для процедуры $\text{CH}_2\text{-C}$ -вычитания для угла 58° в с.ц.м при энергии 550 МэВ/нуклон: *а* — корреляция ионизационных потерь для полиэтиленовой мишени; *б* — корреляция для углеродной мишени. Штриховые линии — критерии для проведения процедуры вычитания фона.

фициент k . Одиночная гауссиана описывала данные на протонах.

Значения N_p и ΔN_p вычислялись отдельно для каждой моды источника поляризованных ионов. Для получения финального результата использовался коэффициент, найденный с помощью метода наименьших квадратов. Остальные методы использовались для оценки систематической ошибки, связанной с процедурой вычитания углеродного фона.

На рис. 5 в качестве примера показан результат вычитания углеродного фона из данных, полученных на полиэтиленовой мишени при энергии пучка 550 МэВ/нуклон для угла 58° в с.ц.м. при рассеянии вправо. Видно хорошее соответствие данных, полученных на углеродной мишени, умноженных на коэффициент k , фону в данных, полученных на полиэтилене. Коэффициент k здесь был получен методом наименьших квадратов. На рисунке показаны данные для неполяризованной моды источника ионов.

Количество событий на протонах было получено путем побинового вычитания данных на углеводе из гистограммы на полиэтилене с использованием данных с учетом критериев на положение мишени на разницу времен прихода сигналов и на корреляцию энергетических потерь.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

В то время как детекторы были выставлены симметрично относительно центра ионопровода, полученные события регистрировались со сдвигом. Однако углы установки детекторов можно скорректировать, используя данные о положении мишени в момент взаимодействия с пучком, чтобы исключить проявления фальшивой асимметрии.

Для этой процедуры были сгенерированы pp -упругие события для всех представленных

энергий с использованием генератора событий Pluto [32], представляющего собой набор библиотек для программного пакета ROOT. Угловая зависимость pp -упругого рассеяния была взята из решения парциально-волнового анализа SAID SP07 [11].

Используя углы для двух рассеянных частиц в одном событии, проверялось, попадали ли частицы в кинематически сопряженные детекторы. Угол установки детектора в с.ц.м. определялся путем усреднения углов всех частиц, которые попали в детектор. Ошибка угла установки детектора определялась как стандартное отклонение углов всех попавших в детектор частиц. Затем углы в с.ц.м. и ошибки их установки средневзвешивались на основе ошибок определения количества событий.

6. ВЫЧИСЛЕНИЕ АНАЛИЗИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Значения анализирующей способности pp -квазиупругого рассеяния вычислялись с использованием данных, полученных с помощью вычитания углеродного фона из данных на полиэтиленовой мишени. Для этого были использованы следующие уравнения, выведенные с использованием формулы из [33] для случая, описанного в этой работе:

$$\frac{N_L}{M} = \frac{N_L^0}{M^0} (1 + p_y A_y), \quad (7)$$

$$\frac{N_R}{M} = \frac{N_R^0}{M^0} (1 - p_y A_y), \quad (8)$$

где N_L , N_R — количество событий при рассеянии влево и вправо, M — количество событий мониторингового счетчика, p_y — значение векторной поляризации, A_y — значение векторной анализирующей способности рассеяния. Символы с помет-

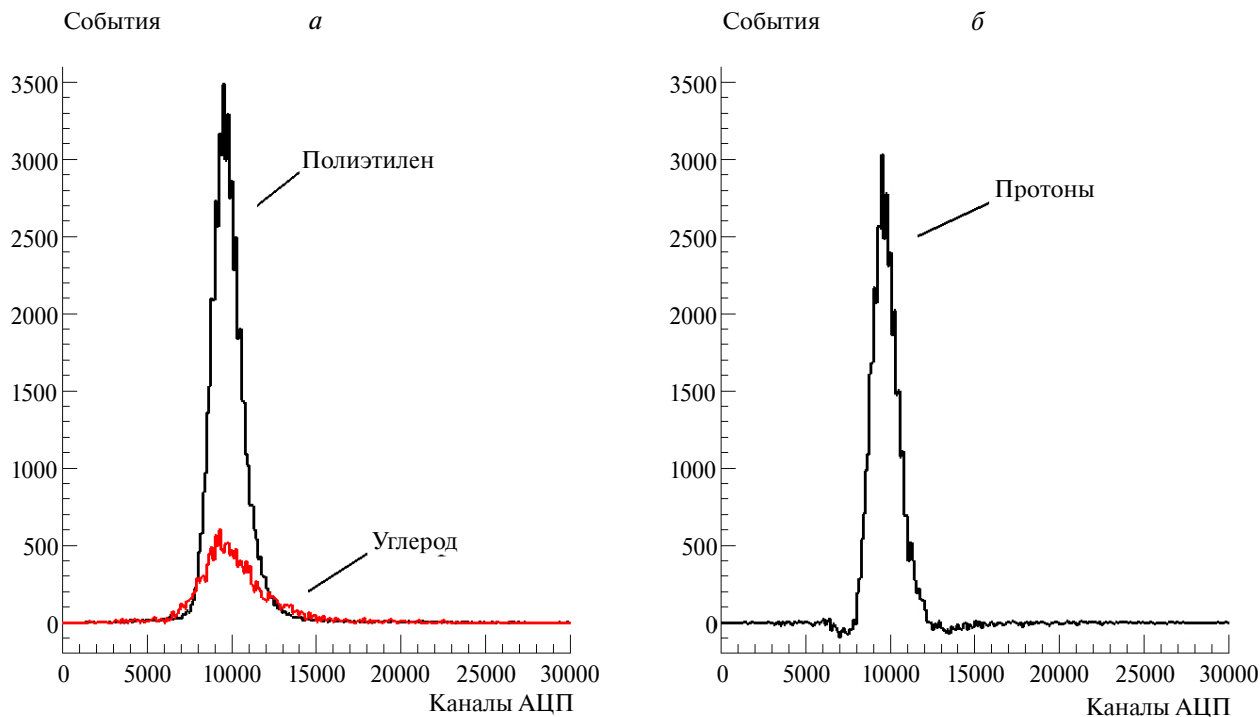


Рис. 5. Вычитание углеродного фона при угле рассеяния 58° в с.ц.м. при энергии 550 МэВ/нуклон. *а* — гистограммы ионизационных потерь для данных, полученных на полиэтиленовой и углеродной мишенях. Данные на углероде были предварительно умножены на коэффициент k ; *б* — гистограмма после вычитания углеродного фона из гистограммы на полиэтилене.

кой 0 — значения для случая отсутствия поляризации.

Для определения векторной анализирующей способности A_y pp -квазиупругого рассеяния использовалось 13 различных пар счетчиков: 6 пар при рассеянии влево, 6 пар вправо и 1 пара для рассеяния под 90° в с.ц.м. Полученные результаты для рассеяния влево и вправо затем усреднялись по правилам среднего взвешенного для каждого угла в с.ц.м. Для вычисления анализирующей способности были использованы следующие формулы:

$$A_{yL} = \frac{\frac{N_L^+ M^0}{N_L^0 M^+} + \frac{N_L^- M^0}{N_L^0 M^-} - 2}{p_y^+ + p_y^-}, \quad (9)$$

$$A_{yR} = \frac{\frac{N_R^+ M^0}{N_R^0 M^+} + \frac{N_R^- M^0}{N_R^0 M^-} - 2}{p_y^+ + p_y^-}, \quad (10)$$

где A_{yL} и A_{yR} — векторная анализирующая способность рассеяния для пар при рассеянии влево и вправо соответственно. N_L^+ , N_L^- и N_L^0 — количество событий в конкретной паре при рассеянии влево для мод источника поляризованных ионов “2–6”, “3–5” и неполяризованной моды соответственно. N_R^+ , N_R^- и N_R^0 — количество событий в конкретной паре при рассеянии вправо для

мод “2–6”, “3–5” и неполяризованной моды соответственно. M^+ , M^- и M^0 — количество событий в мониторинговых счетчиках для соответствующих спиновых мод. p_y^+ и p_y^- — значения векторной поляризации пучка для мод источника поляризованных ионов “2–6” и “3–5” соответственно, представленные в табл. 1.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные значения анализирующей способности квазиупругого протон-протонного рассеяния указаны в табл. 4. Значения были получены для четырех энергий пучка дейтронов: 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон. Для вычисления анализирующих способностей использовались два набора значений поляризации (см. табл. 1), так как данные набирались в две сессии со значительным временным промежутком между ними. При получении A_y при энергиях 500 и 650 МэВ/нуклон использовались данные из первой сессии, при энергиях 200 и 550 МэВ/нуклон — из второй сессии. Указанные в табл. 4 углы были получены с учетом корректировки сдвига пучка (см. разд. 5). Систематическая ошибка при вычислении A_y была

Таблица 4. Полученные значения анализирующей способности A_y в зависимости от угла рассеяния; углы указаны с учетом корректировки

Энергия, МэВ/нуклон	θ , град	$\Delta\theta$, град	A_y	ΔA_y^{stat}	ΔA_y^{sys}
200	57.7	1.6	0.188	0.071	0.098
	59.1	1.3	0.185	0.083	0.119
	62.5	1.6	0.236	0.107	0.050
	65.0	1.2	0.416	0.153	0.073
	75.0	1.3	0.027	0.160	0.089
	85.0	1.3	0.007	0.119	0.078
500	55.2	1.2	0.393	0.044	0.028
	57.8	1.6	0.393	0.023	0.022
	62.6	1.5	0.345	0.035	0.035
	65.1	1.2	0.243	0.045	0.124
	75.1	1.2	0.331	0.043	0.059
	85.0	1.3	-0.029	0.039	0.028
550	54.7	1.1	0.448	0.052	0.030
	57.5	1.5	0.488	0.033	0.056
	62.1	1.6	0.415	0.040	0.085
	64.3	1.2	0.387	0.090	0.107
	74.9	1.2	0.179	0.049	0.010
	84.8	1.3	0.030	0.053	0.015
650	54.5	1.1	0.342	0.100	0.053
	57.5	1.5	0.613	0.058	0.053
	61.8	1.6	0.331	0.088	0.020
	64.7	1.2	0.308	0.126	0.026
	74.9	1.2	0.275	0.115	0.063
	85.0	1.3	0.086	0.091	0.027

получена следующим образом:

$$\Delta A_y^{\text{sys}} = \sqrt{\Delta A_{y(\text{subtr})}^2 + \Delta A_{y(\text{pol})}^2}, \quad (11)$$

где $\Delta A_{y(\text{subtr})}$ — систематическая ошибка при вычитании углеродного фона, $\Delta A_{y(\text{pol})}$ — систематическая ошибка, вызванная неточностью определения поляризации.

Полученная угловая зависимость векторной анализирующей способности A_y в pp -квазиупругом рассеянии представлена на рис. 6 (200 МэВ/нуклон), 7 (500 МэВ/нуклон), 8 (550 МэВ/нуклон) и 9 (650 МэВ/нуклон) с использованием заполненных символов. Статистические ошибки (см. табл. 4) показаны черными вертикальными линиями. Систематические ошибки вычислений показаны вертикальной частью серых прямоугольников вокруг символов. Горизонтальными черными линиями показаны ошибки установки детекторов (см. разд. 5, также

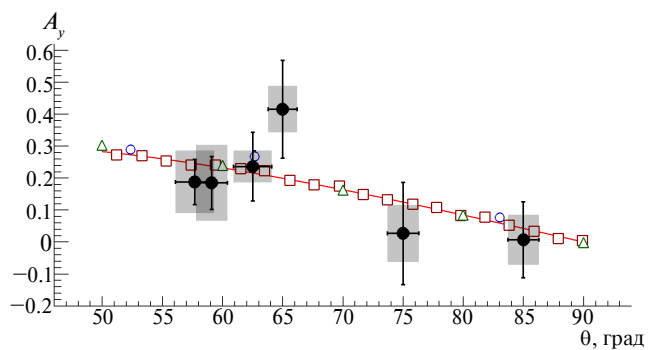


Рис. 6. Угловая зависимость анализирующей способности A_y при энергии 200 МэВ/нуклон. Символы и линии описаны в тексте.

указаны в табл. 4). Данные других экспериментов представлены незаполненными символами. При энергии 200 МэВ/нуклон (рис. 6): круглые — [34], квадратные — [35], треугольные — [36]. При энер-

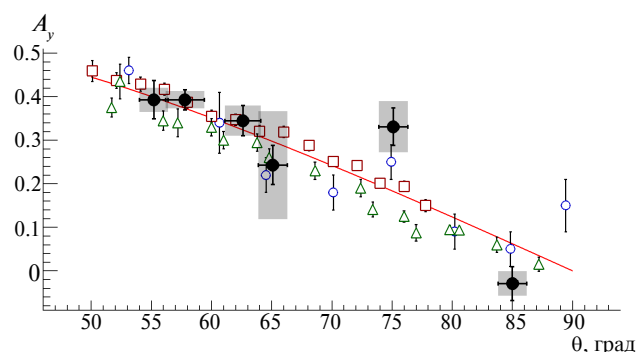


Рис. 7. Угловая зависимость анализирующей способности A_y при энергии 500 МэВ/нуклон. Символы и линии описаны в тексте.

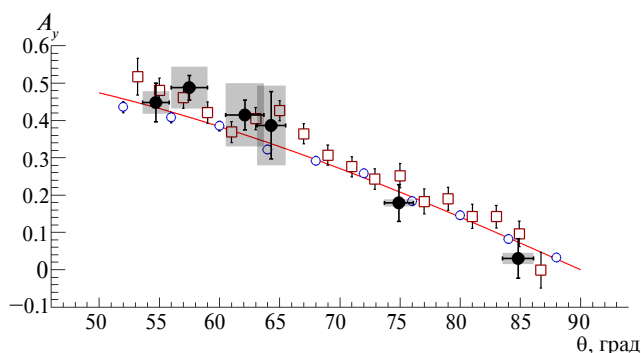


Рис. 8. Угловая зависимость анализирующей способности A_y при энергии 550 МэВ/нуклон. Символы и линии описаны в тексте.

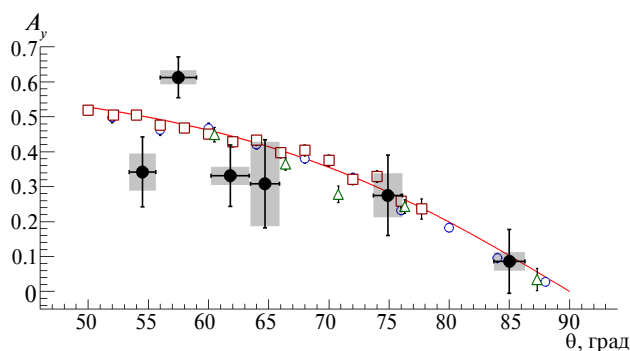


Рис. 9. Угловая зависимость анализирующей способности A_y при энергии 650 МэВ/нуклон. Символы и линии описаны в тексте.

гии 500 МэВ/нуклон (рис. 7): круглые — [37], квадратные — [38], треугольные — [39]. При энергии 550 МэВ/нуклон (рис. 8): круглые — [40], квадратные — [41]. При энергии 650 МэВ/нуклон (рис. 9): круглые — [40], квадратные — [38], треугольные — [42]. Предсказания углового распределения парциально-волнового анализа SP07 [11] для соответствующих энергий представлены сплошной линией.

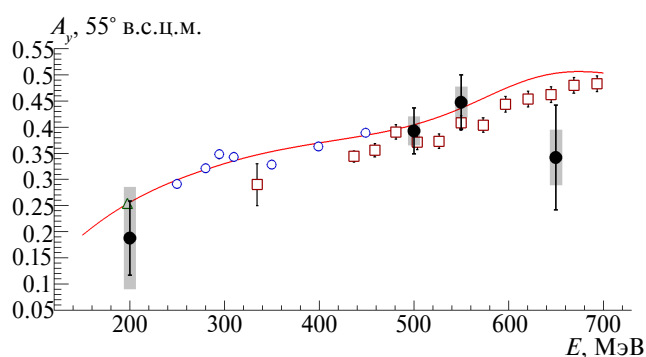


Рис. 10. Энергетическая зависимость анализирующей способности A_y для угла рассеяния 55° в с.ц.м. Символы и линии описаны в тексте.

Так как A_y антисимметрична относительно угла 90° с.ц.м. (см. формулу (3)), данные по анализирующей способности представлены только для диапазона углов 0° – 90° в с.ц.м. при рассеянии вперед. При этом данные при рассеянии влево и вправо интерпретировались как одинаковые углы и усреднялись методом среднего взвешенного, основываясь на данных по ошибкам количества событий в результате вычитания фона.

Энергетические зависимости векторной анализирующей способности A_y в pp -квазиупругом рассеянии для углов 55° и 58° в с.ц.м. представлены на рис. 10 и 11 соответственно. Заполненные символы представляют результаты данного эксперимента. Вертикальные линии и прямоугольники вокруг символов — ошибки статистические и систематические соответственно (см. табл. 4). Данные других экспериментов для угла $\sim 55^\circ$ представлены незаполненными символами: треугольные — [35], круглые — [43], квадратные — [40]. Для угла $\sim 58^\circ$: направленные вверх треугольные — [44], квадратные — [43], круглые — [35], направленные вниз треугольные — [38]. Предсказания энергетической зависимости парциально-волнового анализа SP07 [11] для данных углов рассеяния представлены сплошной линией.

Во всех описанных случаях наблюдается хорошее согласие полученных на Нуклотроне экспериментальных данных с результатами других экспериментов и парциально-волновым анализом SP07 в рамках достигнутой точности. Отметим, что данные нашего эксперимента были получены с использованием пучка дейтронов. Сравнение свидетельствует о том, что эффекты связанности протона в дейтроне и возможные эффекты перерассеяния малы. Относительно большие ошибки измерений в сравнении с другими экспериментами вызваны тем, что данный эксперимент проводился в тестовом режиме при доста-

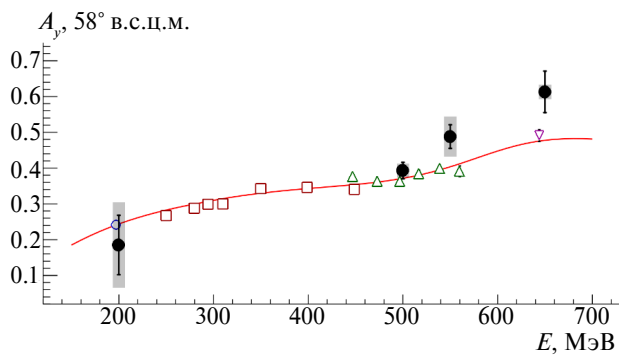


Рис. 11. Энергетическая зависимость анализирующей способности A_y для угла рассеяния 58° в с.ц.м. Символы и линии описаны в тексте.

точно низкой интенсивности пучка дейтронов от нового источника поляризованных ионов [28].

Что касается нейтрон-протонного упругого рассеяния, то специфика установки не позволяет восстановить упругое np -событие по регистрации двух протонов в реакции $dp \rightarrow npp_{\text{spec}}$, так как на внутренней мишени Нуклотрона нет технической возможности зарегистрировать быстрый протон p_{spec} . Единственной возможностью зарегистрировать упругое np -рассеяние является использование детекторов $\Delta E-E$, входящих в состав установки и описанных в [45], для регистрации нейтронов. Однако, принимая во внимание низкую интенсивность пучка, а также эффективность регистрации нейтронов $\sim 20\%$, $\Delta E-E$ -счетчики не были использованы в ходе данного тестового эксперимента.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были впервые получены угловые зависимости векторной анализирующей способности A_y реакции протон-протонного квазиупругого рассеяния с использованием поляризованного дейтронного пучка Нуклотрона (ОИЯИ) при энергиях 200, 500, 550 и 650 МэВ/нуклон.

Угловые зависимости анализирующей способности сравнивались с данными, полученными в других экспериментах, а также с решением SP07 парциально-волнового анализа SAID [11]. Результаты, полученные в данной работе, соответствуют данным других экспериментов и результатам парциально-волнового анализа SP07 в пределах полученной точности как для угловых, так и энергетических зависимостей. Таким образом, впервые продемонстрировано, что для изучения нуклон-нуклонного упругого рассеяния на Нуклотроне возможно использование пучка дейтронов.

Эксперимент проводился на внутренней мишени Нуклотрона ОИЯИ в 2016 г. в тестовом

режиме, что стало причиной достаточно большой статистической неопределенности. В будущих исследованиях с поляризованными пучками протонов и дейтронов планируется улучшение точности измерений анализирующей способности и поляризации пучков за счет увеличения углового диапазона измерений и времени набора статистики [46, 47]. Кроме того, планируются эксперименты по измерению анализирующей способности нейтрон-протонного упругого рассеяния в реакции $dp \rightarrow npp$ с использованием $\Delta E-E$ -детекторов [45].

БЛАГОДАРНОСТИ

Огромная благодарность выражается А.Н. Хренову за помощь в подготовке эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Lechanoine-LeLuc and F. Lehar, Rev. Mod. Phys. **65**, 47 (1993).
2. J. E. Bowcock and H. Burkhardt, Rep. Prog. Phys. **38**, 1099 (1975).
3. J. Bystricky, C. Lechanoine-Leluc, and F. Lehar, J. Phys. France **48**, 199 (1987).
4. J. Bystricky, C. Lechanoine-Leluc, and F. Lehar, J. Phys. France **51**, 2747 (1990).
5. R. A. Arndt, L. D. Roper, R. L. Workman, and M. W. McNaughton, Phys. Rev. D **45**, 3995 (1992).
6. V. G. J. Stoks, R. A. M. Klomp, M. C. M. Rentmeester, and J. J. de Swart, Phys. Rev. C **48**, 792 (1993).
7. R. A. Arndt, I. I. Strakovsky, and R. L. Workman, Phys. Rev. C **50**, 2731 (1994).
8. M. Matsuda, J. Nagata, H. Yoshino, and Y. Yoshino, Comput. Phys. Commun. **131**, 225 (2000).
9. R. A. Arndt, C. H. Oh, I. I. Strakovsky, R. L. Workman, and F. Dohrmann, Phys. Rev. C **56**, 3005 (1997).
10. R. A. Arndt, I. I. Strakovsky, and R. L. Workman, Phys. Rev. C **62**, 034005 (2000).
11. R. A. Arndt, W. J. Briscoe, I. I. Strakovsky, and R. L. Workman, Phys. Rev. C **76**, 025209 (2007).
12. R. L. Workman, W. J. Briscoe, and I. I. Strakovsky, Phys. Rev. C **94**, 065203 (2016).
13. M. L. Goldberger, M. T. Grisaru, S. W. MacDowell, and D. Y. Wong, Phys. Rev. **120**, 2250 (1960).
14. С. М. Биленький, Л. И. Лапидус, Р. М. Рындин, УФН **84**, 243 (1964).
15. L. Puzikov, R. Ryndin, and I. Smorodinskii, Sov. Phys. JETP **5**, 489 (1957).
16. J. Bystricky, F. Lehar, and P. J. Winternitz, J. Phys. France **39**, 1 (1978).
17. A. S. Belov, D. E. Donets, V. V. Fimushkin, A. D. Kovalenko, L. V. Kutuzova, Yu. V. Prokofichev, V. B. Shutov, A. V. Turbabin, and V. N. Zubets, J. Phys.: Conf. Ser. **938**, 012017 (2017).
18. J. Ball, C. E. Allgower, M. Beddo, J. Bystricky, M. Combet, Ph. Demierre, G. Durand, J.-M. Fontaine, D. Grosnick, R. Hess, Z. Janout, Z. F. Janout, V. A. Kalinnikov, T. E. Kasprzyk, B. A. Khachaturov, R. Kunne, *et al.*, Eur. Phys. J. C **11**, 51 (1999).

19. V. P. Ladygin, Yu. V. Gurchin, S. M. Piyadin, A. A. Terekhin, A. Yu. Isupov, M. Janek, J.-T. Karachuk, A. N. Khrenov, V. A. Krasnov, A. K. Kurilkin, P. K. Kurilkin, N. B. Ladygina, A. N. Livanov, G. Martinska, V. L. Rapatsky, S. G. Reznikov, *et al.*, *Few-Body Syst.* **55**, 709 (2014).
20. P. Kurilkin, V. P. Ladygin, T. Uesaka, K. Suda, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, K. Itoh, M. Janek, J. T. Karachuk, T. Kawabata, A. N. Khrenov, A. S. Kiselev, V. A. Kizka, J. Kliman, V. A. Krasnov, A. N. Livanov, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **642**, 45 (2011).
21. P. Kurilkin, V. P. Ladygin, T. Uesaka, K. Suda, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, K. Itoh, M. Janek, J.-T. Karachuk, T. Kawabata, A. N. Khrenov, A. S. Kiselev, V. A. Kizka, V. A. Krasnov, N. B. Ladygina, A. N. Livanov, *et al.*, *Phys. Lett. B* **715**, 61 (2012).
22. M. Janek, V. P. Ladygin, S. M. Piyadin, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, J.-T. Karachuk, A. N. Khrenov, A. K. Kurilkin, P. K. Kurilkin, A. N. Livanov, G. Martinska, S. G. Reznikov, G. Tarjanyiova, A. A. Terekhin, and I. E. Vnukov for the DSS Collab., *Eur. Phys. J. Web Conf.* **130**, 07007 (2016).
23. M. Janek, V. P. Ladygin, Yu. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, J.-T. Karachuk, A. N. Khrenov, A. K. Kurilkin, P. K. Kurilkin, A. N. Livanov, G. Martinska, S. M. Piyadin, S. G. Reznikov, G. Tarjanyiova, A. A. Terekhin, and I. E. Vnukov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **938**, 012005 (2017).
24. И. С. Волков, В. П. Ладыгин, Я. Т. Схоменко, Ю. В. Гурчин, А. Ю. Исупов, М. Янек, Ю. Т. Карачук, А. Н. Хренов, П. К. Курилкин, А. Н. Ливанов, С. М. Пиядин, С. Г. Резников, А. А. Терехин, А. В. Тишевский, А. В. Аверьянов, Е. В. Черных и др., *Изв. РАН. Сер. физ.* **86**, 1298 (2022).
25. И. С. Волков, А. В. Аверьянов, И. Е. Внук, Ю. В. Гурчин, Д. Енае, А. Ю. Исупов, Ю. Т. Карачук, Д. О. Кривенков, П. К. Курилкин, В. П. Ладыгин, А. Н. Ливанов, С. М. Пиядин, С. Г. Резников, Я. Т. Схоменко, А. А. Терехин, А. В. Тишевский и др., *Письма в ЭЧАЯ* **21**, 32 (2024).
26. A. Malakhov, S. V. Afanasiev, Yu. S. Anisimov, A. S. Artiominov, 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).
27. A. Yu. Isupov, V. A. Krasnov, V. P. Ladygin, S. M. Piyadin, and S. G. Reznikov, *Nucl. Instrum. Methods A* **698**, 127 (2013).
28. V. V. Fimushkin, A. D. Kovalenko, L. V. Kutuzova, Yu. V. Prokofichev, B. Shutoy, A. S. Belov, V. N. Zubets, and A. V. Turbabin, *J. Phys.: Conf. Ser.* **678**, 012058 (2016).
29. Y. T. Skhomenko *et al.* (DSS Collab.), *Eur. Phys. J. Web Conf.* **204**, 10002 (2019).
30. A. Y. Isupov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **938**, 012019 (2017).
31. Y. V. Gurchin, V. A. Krasnov, V. P. Ladygin, Yu. S. Anisimov, A. Yu. Isupov, M. Janek, J.-T. Karachuk, A. N. Khrenov, A. S. Kiselev, V. A. Kizka, J. Kliman, A. N. Livanov, A. I. Malakhov, V. Matousek, M. Morhac, S. G. Reznikov, *et al.*, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **4**, 443 (2007).
32. I. Frohlich, L. Cazon Boado, T. Galatyuk, V. Hejny, R. Holzmann, M. Kagarlis, W. Kuhn, J. G. Meschedorp, V. Metag, M. A. Pleier, W. Przygoda, B. Ramstein, J. Ritman, P. Salabura, J. Stroth, and M. Sudol, *Proc. Sci. A CAT*, 076 (2007).
33. G. G. Ohlsen, *Rep. Prog. Phys.* **35**, 717 (1972).
34. E. Baskir, E. M. Hafner, A. Roberts, and J. H. Tinlot, *Phys. Rev.* **106**, 564 (1957).
35. F. Rathmann, B. von Przewoski, W. A. Dezarn, J. Doskow, M. Dziedzic, W. Haeberli, J. G. Hardie, B. Lorentz, H. O. Meyer, P. V. Pancella, R. E. Pollock, T. Rinckel, F. Sperisen, and T. Wise, *Phys. Rev. C* **58**, 658 (1998).
36. J. H. Tinlot and R. E. Warner, *Phys. Rev.* **124**, 890 (1961).
37. M. Albrow, S. Andersson/Almehed, B. Bosnjakovic, C. Daum, F. C. Erne, J. P. Lagnaux, J. C. Sens, and F. Udo, *Nucl. Phys. B* **23**, 445 (1970).
38. J. Bystricky, P. Chaumette, J. Deregell, J. Fabre, F. Lehar, A. De Lesquen, L. Van Rossum, J. M. Fontaine, J. Gosset, F. Perrot, C. A. Whitten, Jr., J. Ball, P. H. Chesny, C. R. Newsom, J. Yonnet, T. Niinikoski, *et al.*, *Nucl. Phys. B* **262**, 727 (1985).
39. G. Cozzika, Y. Ducros, A. de Lesquen, J. Movchet, J. C. Raoul, L. van Rossum, J. Deregell, and J. M. Fontaine, *Phys. Rev.* **164**, 1672 (1967).
40. M. Altmeier, F. Bauer, J. Bisplinghoff, K. Bußer, M. Busch, T. Colberg, L. Demirors, H. P. Engelhardt, P. D. Eversheim, K. O. Eysen, O. Felden, R. Gebel, M. Glende, J. Greiff, F. Hinterberger, E. Jonas, *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **23**, 351 (2005).
41. J. Ball, V. Ghazikhanian, J. Gordon, F. Lehar, A. De Lesquen, F. Perrot, and L. Van Rossum, *Nucl. Phys. B* **286**, 635 (1987).
42. 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).
43. B. v. Przewoski, F. Rathmann, W. A. Dezarn, J. Doskow, M. Dziedzic, W. Haeberli, J. G. Hardie, B. Lorentz, H. O. Meyer, P. V. Pancella, R. E. Pollock, T. Rinckel, F. Sperisen, and T. Wise, *Phys. Rev. C* **58**, 1897 (1998).
44. E. Aprile, R. Hausammann, E. Heer, R. Hess, C. Lechanoine-Leluc, W. R. Leo, S. Morenzoni, Y. Onel, D. Rapin, P. Y. Rascher, S. Jaccard, J. A. Konter, and S. Mango, *Phys. Rev. D* **34**, 2566 (1986).
45. С. М. Пиядин и др., *Письма в ЭЧАЯ* **8**, 182 (2016).
46. A. A. Terekhin, V. P. Ladygin, Y. V. Gurchin, A. Yu. Isupov, A. N. Khrenov, S. G. Reznikov, I. S. Volkov, A. V. Tishevsky, and M. Janek, *AIP Conf. Proc.* **2377**, 030016 (2021).
47. А. А. Терехин, И. С. Волков, Ю. В. Гурчин, А. Ю. Исупов, В. П. Ладыгин, С. Г. Резников, А. В. Тишевский, А. Н. Хренов, М. Янек, *ЭЧАЯ* **54**, 789 (2023).

ANALYZING POWER MEASUREMENTS OF QUASI-ELASTIC PROTON-PROTON SCATTERING AT THE INTERMEDIATE ENERGIES AT THE NUCLOTRON INTERNAL TARGET

© 2025 I. S. Volkov¹⁾, A. V. Averyanov¹⁾, I. E. Vnukov²⁾, Yu. V. Gurchin¹⁾, D. Enache³⁾, A. Yu. Isupov¹⁾, J.-T. Karachuk^{1),3)}, D. O. Krivenkov¹⁾, P. K. Kurilkin¹⁾, V. P. Ladygin¹⁾, A. N. Livanov¹⁾, S. M. Piyadin¹⁾, S. G. Reznikov¹⁾, Ya. T. Skhomenko¹⁾, A. A. Terekhin¹⁾, A. V. Tishevsky¹⁾, E. V. Chernykh¹⁾, M. Janek⁴⁾

¹⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²⁾Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

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

⁴⁾Physics Department, University of Zilina, Zilina, Slovakia

Obtaining new data on the polarization observables is the important part of the nucleon-nucleon scattering models' development. For this purpose, the polarized deuteron beam and the detection setup at the Nuclotron internal target station were used. Counters were mounted in according to pp -elastic scattering kinematics. Relevant events were selected using time and amplitude information from the counters. The polyethylene target was used as the main target. Auxiliary carbon target was used to remove the background. This article presents the results of the vector analyzing power measurement for the proton-proton quasielastic scattering at the deuteron beam energies of 200, 500, 550, 650 MeV/nucleon. The obtained results are in a good accordance with the data of other experiments and the partial wave analysis SP07 SAID predictions.