

## ВЕКТОРНАЯ АНАЛИЗИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ В КВАЗИУПРУГОМ ПРОТОН-ПРОТОННОМ РАССЕЯНИИ ПРИ ЭНЕРГИИ 500 МэВ/НУКЛОН

*И. С. Волков<sup>a,1</sup>, А. В. Аверьянов<sup>a</sup>, И. Е. Внуков<sup>b</sup>, Ю. В. Гурчин<sup>a</sup>,  
Д. Еначе<sup>c</sup>, А. Ю. Исупов<sup>a</sup>, Ю. Т. Карачук<sup>a,c</sup>, Д. О. Кривенков<sup>a</sup>,  
П. К. Курилкин<sup>a</sup>, В. П. Ладыгин<sup>a</sup>, А. Н. Ливанов<sup>a</sup>, С. М. Пиядин<sup>a</sup>,  
С. Г. Резников<sup>a</sup>, Я. Т. Схоменко<sup>a</sup>, А. А. Терехин<sup>a</sup>, А. В. Тишевский<sup>a</sup>,  
А. Н. Хренов<sup>a</sup>, Е. В. Черных<sup>a</sup>, М. Янек<sup>c</sup>*

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

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

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

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

Значения векторной анализирующей способности квазиупругого протон-протонного рассеяния были получены на станции внутренних мишеней нуклотрона с использованием поляризованного пучка дейтронов с энергией 500 МэВ/нуклон и полиэтиленовой мишени. Отбор полезных событий выполнен с использованием временной и амплитудной информации, полученной с помощью сцинтилляционных счетчиков. Асимметрия на протонах получена путем вычитания углеродного фона из данных, набранных на полиэтилене. Значения анализирующей способности сравнивались с предсказаниями парциально-волнового анализа SAID и данными других экспериментов.

The values of the analyzing power in quasi-elastic proton–proton scattering were obtained at the Nuclotron Internal Target Station using a polarized deuteron beam at the energy of 500 MeV/nucleon and the polyethylene target. The selection of useful events was performed using the time and amplitude information from scintillation counters. The asymmetry on proton was obtained by the subtraction of the carbon background from the data accumulated on polyethylene. The analyzing power values were compared with the predictions of the partial-wave analysis SAID and the data of the other experiments.

PACS: 25.40.Cm; 13.85.Dz; 13.88.+e; 29.27.Hj

### ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты по изучению протон-протонного упругого рассеяния являются фундаментальными для понимания нуклон-нуклонных взаимодействий [1]. Для энергий ниже 1 ГэВ была получена большая база данных сечений и поляризационных наблю-

---

<sup>1</sup>E-mail: isvolkov@jinr.ru

даемых в различных диапазонах углов рассеяния. Эти данные хорошо описываются решениями парциально-волнового анализа [2–11].

Современные феноменологические потенциальные модели обеспечивают хорошее описание данных до порога рождения пионов, однако 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 получены значения векторной анализирующей способности реакции взаимодействия дейтронов и протонов в кинематике протон-протонного упругого рассеяния при энергии 500 МэВ/нуклон.

В разд. 1 проиллюстрирована общая схема проведения эксперимента. Процедура отбора полезных событий на полиэтилене и углероде описывается в разд. 2. В разд. 3 разъясняются детали процесса вычитания углеродного фона из данных на полиэтилене. Для коррекции углов установки детекторов использовалось моделирование сдвига пучка, результаты которого представлены в разд. 4. Получение значений анализирующей способности изложено в разд. 5. В разд. 6 описывается нахождение значений поляризации пучка дейтронов. Полученные значения анализирующей способности и поляризации пучка представлены в разд. 7.

## 1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент был выполнен на станции внутренних мишеней [12, 13] нуклотрона, сверхпроводящего синхротрона, расположенного в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ.

Эксперимент выполнялся следующим образом: пучок поляризованных дейтронов обеспечивался источником поляризованных ионов [14, 15], поляризация ядер дейтерия производилась с помощью радиочастотных переходов сверхтонкой структуры, поляризованные дейтроны ускорялись линейным ускорителем, а затем инжектировались в кольцо нуклотрона для дальнейшего ускорения. По достижении заданной энергии диск с мишенями вращался, выводя нужную мишень на траекторию движения пучка. Частицы, полученные в результате взаимодействия пучка с мишенью, регистрировались сцинтилляционными детекторами.

В эксперименте использовался источник ионов, разработанный для нуклотрона и коллайдера NICA. Он представляет собой атомарный источник поляризованных ионов пучкового типа с зарядообменным плазменным ионизатором и накопительной ячейкой. Атомарный дейтерий получался из молекулярного дейтерия с помощью радиочастотного плазменного диссоциатора. Атомарный дейтерий 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

Таблица 1. Усредненные значения поляризации, полученные с помощью  $dp$ -упругого рассеяния при энергии 135 МэВ/нуклон [16] для спиновых мод 2–6 и 3–5

Спиновая мода	$p_y$	$\Delta p_y$
2–6	0,231	0,008
3–5	0,245	0,006

соленоида. Ионизация атомов достигалась путем инжекции 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  $(p_y, p_{yy}) = (0, 0)$ ,  $(+1/3, +1)$  и  $(+1/3, -1)$  соответственно. Спиновые моды источника менялись поочередно от цикла к циклу. Ось квантования поляризации располагалась перпендикулярно плоскости кольца нуклотрона.

Поляризация пучка измерялась с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии пучка 135 МэВ/нуклон [16]. Эта процедура выполнялась регулярно во время эксперимента, 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.

Станция внутренних мишеней представляет собой сферическую вакуумную камеру с системой смены мишеней [12]. Камера зафиксирована на ионопроводе ускорителя с помощью фланцевого соединения. Диск с различными мишенями (CH<sub>2</sub>, C, W, Cu и др.) фиксируется внутри камеры на оси шагового двигателя. Мишени установлены внутри прорезей в диске. Во время ускорения пучка диск повернут пустой прорезью, а по достижении необходимой энергии диск вращается, вводя нужную мишень в ионопровод [13]. Для эксперимента использовалась полиэтиленовая пленка толщиной 10 мкм. Для оценки фона от углерода, содержащегося в полиэтилене, использовалась мишень, состоящая из 10 скрученных углеродных нитей, каждая толщиной по 8 мкм.

Частицы, полученные в ходе взаимодействия пучка с мишенью, регистрировались сцинтилляционными счетчиками, расположенными вокруг камеры рассеяния в направлении пучка (рис. 1). Счетчики устанавливались таким образом, чтобы регистрировать продукты реакции протон-протонного квазиупругого рассеяния. В эксперименте использовались 22 детектора для регистрации протонов, рассеянных влево и вправо. Они располагались под одинаковыми углами симметрично относительно оси ионопровода. Применялись детекторы разных размеров, чтобы использовать наибольшую площадь сцинтиллятора для компенсации кинематических углов разлета пары частиц. Два дополнительных детектора располагались симметрично относительно направления пучка под 90° в с. с. м., что обеспечивало их нечувствительность к векторной поляризации пучка. Они также назывались мониторными счетчиками.

В эксперименте использовалась часть детекторов дейтронного поляриметра, использующего асимметрию  $dp$ -упругого рассеяния при энергии 135 МэВ/нуклон [17]. Параметры сцинтилляторов, а также углы установки детекторов в лабораторной системе и в с. с. м. для энергии пучка 500 МэВ/нуклон указаны в табл. 2. Под углами

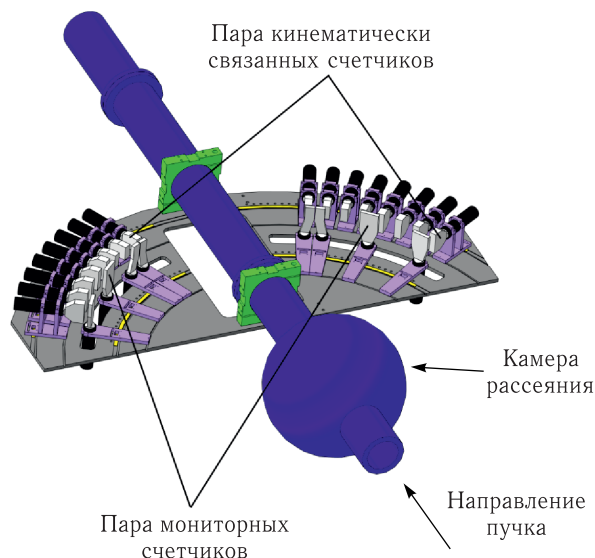


Рис. 1. Схема размещения детекторов для эксперимента по изучению анализирующей способности  $A_y$  в протон-протонном квазиупругом рассеянии на станции внутренних мишеней нуклотрона. Детекторы выставлялись в соответствии с кинематикой  $pp$ -упругого рассеяния

Таблица 2. Размеры и углы установки сцинтилляторов детекторов в лабораторной системе и с. ц. м., использованных в поляриметре для измерения анализирующей способности при энергии пучка дейтронов 500 МэВ/нуклон. Детекторы устанавливались симметрично справа и слева относительно центра ионопровода

Углы установки в с. ц. м., °	Углы установки в лабораторной системе, °	Ширина, мм	Высота, мм	Толщина, мм	Расстояние до точки взаимодействия, мм
55	24,8	20	40	20	580
58	26,0	24	40	10	555
62	28,4	24	40	10	555
65	29,5	20	40	20	580
75	34,3	20	40	20	580
85	39,2	20	40	20	580
90	41,6	50	60	10	555
95	44,1	20	60	20	580
105	49,2	20	60	20	580
115	54,4	20	60	20	580
120	57,0	50	40	10	555
125	59,6	20	60	20	580

установки в с. ц. м. подразумеваются идеальные значения, соответствующие прохождению первичного пучка по центру ионопровода. Программная часть системы сбора данных более подробно описана в [18].

## 2. ОТБОР ПОЛЕЗНЫХ СОБЫТИЙ

Для отбора событий в эксперименте использовались пары детекторов, установленных в соответствии с кинематикой  $pp$ -упругого рассеяния (см. табл. 2). 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 [19]. На рис. 2 показана зависимость количества событий от положения мишени в момент взаимодействия с пучком. Штриховые линии — критерии, которые использовались для отбраковки событий, находящихся вдали от точки взаимодействия пучка и мишени.

Разница времени пролета показывает разницу между временем прихода сигналов двух кинематически связанных счетчиков (рис. 3). В финальных расчетах учитываются только события, имеющие относительно малую временную разницу.

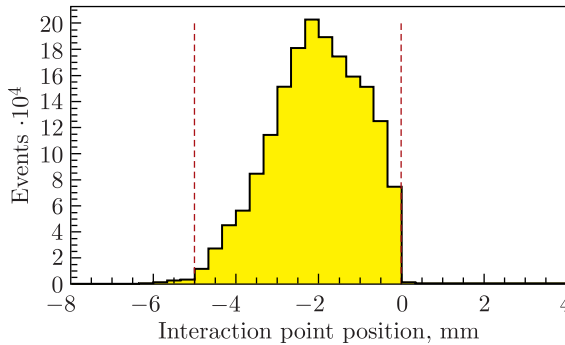


Рис. 2. Количество событий в зависимости от положения мишени в момент взаимодействия с пучком относительно центра ионопровода. Штриховые линии — критерий отбора событий

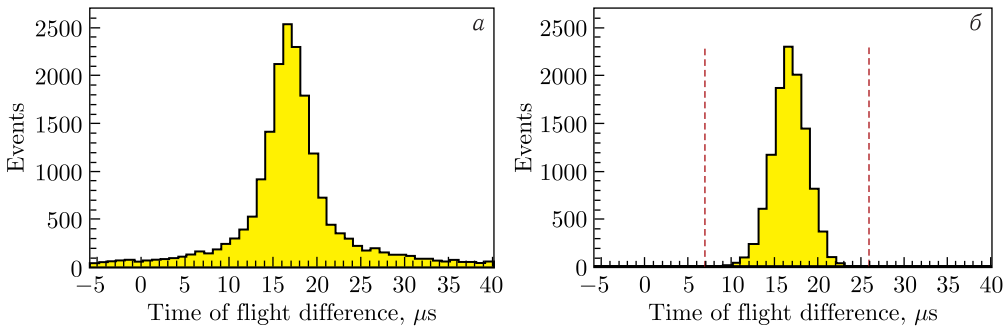


Рис. 3. Критерий отбора событий по разнице прихода сигналов с двух кинематически связанных детекторов для угла  $65^\circ$  в с.ц.м. Зависимость разницы времени прихода от количества событий до установки критериев (а), после применения критерия на разницу времени прихода, корреляцию энергетических потерь и положение мишени (б). Штриховые линии — критерий отбора событий

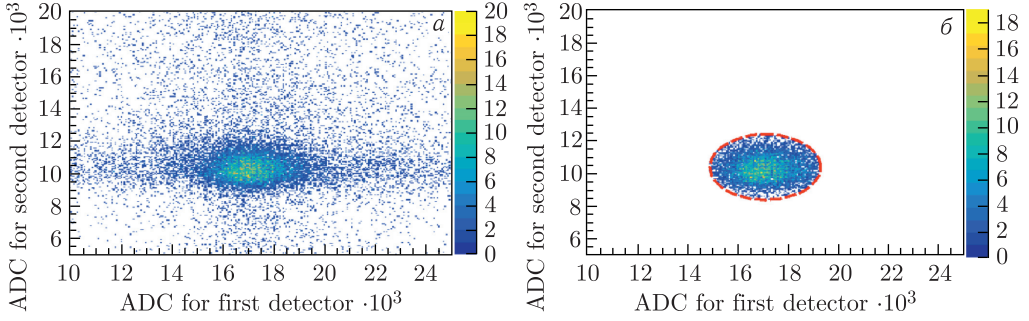


Рис. 4. Критерий отбора для корреляции энергетических потерь в двух кинематически связанных детекторах для угла  $65^\circ$  в с. с. м. *а)* Корреляция энергетических потерь без применения критериев. *б)* Корреляция энергетических потерь после установки критерия на корреляцию энергетических потерь и разницу времени прихода. Штриховая линия — критерий отбора событий

На гистограмме корреляции энергетических потерь кинематически связанных счетчиков (рис. 4) 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 оптимизировались для улучшения отбора полезных событий.

### 3. ВЫЧИТАНИЕ УГЛЕРОДНОГО ФОНА

Так как дейтронный пучок взаимодействовал с полиэтиленовой мишенью, в полученных данных неизбежно появлялся фон. Количество событий от взаимодействия с углеродом в  $\text{CH}_2$ -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. 5, *а, б*). 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 мишени. Для проведения процедуры вычитания использовались следующие формулы:

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

$$\delta N_p = \sqrt{N_{\text{CH}_2} + \delta k^2 N_C^2 + k^2 N_C}, \quad (2)$$

где  $N_p$  — общее число событий на протонах;  $\delta N_p$  — ошибка вычисления количества событий на протонах;  $N_{\text{CH}_2}$  — общее число событий на полиэтилене;  $N_C$  — общее число событий на углероде;  $k$  — искомый коэффициент;  $\delta k$  — ошибка вычисления коэффициента.

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

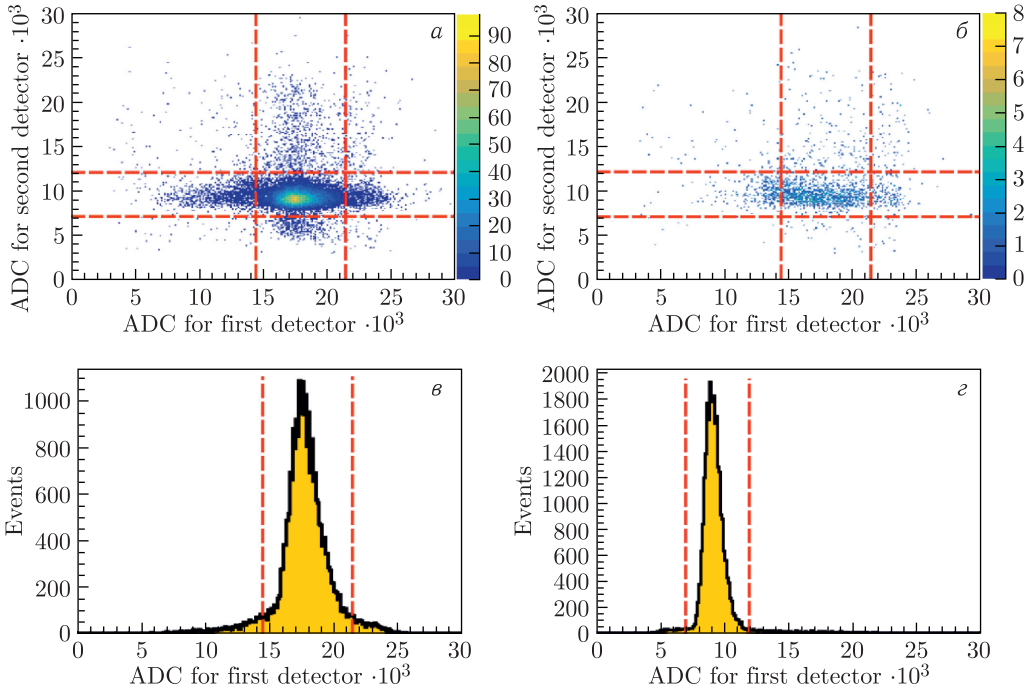


Рис. 5. Процесс установки критериев для процедуры вычитания  $\text{CH}_2\text{-C}$  для угла  $55^\circ$  в с.ц.м.: а) корреляция ионизационных потерь для полиэтиленовой мишени; б) корреляция для углеродной мишени; в) проекция корреляции ионизационных потерь для полиэтилена на ось  $X$ ; г) проекция корреляции для полиэтилена на ось  $Y$ . Штриховые линии — критерии для проведения процедуры вычитания фона

Метод наименьших квадратов предполагает, что в данных по корреляции амплитуды ионизационных потерь от кинематически связанных счетчиков (см. рис. 4), полученных при рассеянии на полиэтиленовой мишени, выделялась область полезных событий (показана штриховыми линиями), соответствующих протон-протонному упругому рассеянию (см. рис. 5). Этот критерий также учитывался и в данных по корреляции ионизационных потерь для углеродной мишени. С учетом событий, находящихся 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 определения 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 гауссианы и функции, полученной после аппроксимации данных на углероде, умноженной на коэффициент  $k$ . Одиночная гауссиана описывала данные на протонах.

Значения  $N_p$  и  $\delta N_p$  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. В табл. 3 представлено количество событий для угла  $85^\circ$  в с. ц. м., полученных при использовании различных методов вычитания углеродного фона. Результаты совпадают в пределах 10%.

На рис. 6 показан результат вычитания углеродного фона из данных, полученных для полиэтиленовой мишени. Видно хорошее соответствие данных, полученных для 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. Штриховые линии — горизонтальная полуось эллиптического критерия отбора полезных событий, показанного на рис. 4.

Таблица 3. Количество событий для угла  $85^\circ$  в с. ц. м., полученное при использовании различных методов вычитания углеродного фона, а также с учетом критериев на положение мишени, на разницу времени прихода сигнала и на корреляцию энергетических потерь. Значения представлены для неполяризованной моды источника ионов

Метод нахождения коэффициента	$k$	$\Delta k$	$N_p$	$\delta N_p$
Наименьших квадратов	3,29	0,03	6531	96
Интегральный	4,90	0,30	5950	162
Аппроксимации	4,57	0,12	6352	199

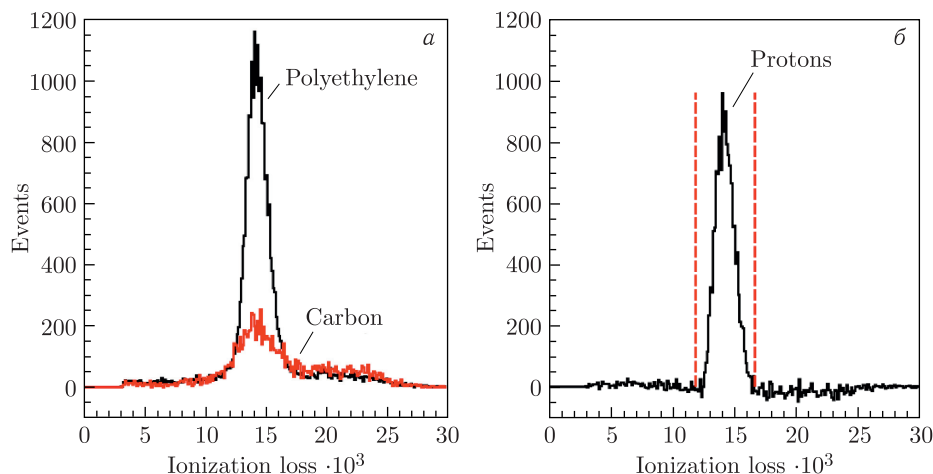


Рис. 6. Результат проведения процедуры вычитания углеродного фона при угле рассеяния  $85^\circ$  в с. ц. м. для неполяризованной моды источника ионов. а) Гистограммы ионизационных потерь для данных, полученных на полиэтиленовой и углеродной мишенях. Данные на углероде были предварительно умножены на коэффициент  $k$ . б) Гистограмма после вычитания углеродного фона из гистограммы на полиэтилене. Штриховые линии — горизонтальная полуось эллиптического критерия отбора событий, показанного на рис. 4



Количество событий для протонов в результате было получено путем побинового вычитания данных на углероде из гистограммы на полиэтилене. Для вычисления количества событий использовались данные с учетом критериев на положение мишени, на разницу времен прихода сигналов и на корреляцию энергетических потерь. Количество событий на протонах необходимо для того, чтобы определить асимметрию рассеяния частиц. Асимметрия, в свою очередь, нужна для вычисления поляризации пучка или анализирующей способности реакции.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

В то время как детекторы были выставлены симметрично относительно центра ионопровода, полученные события регистрировались со сдвигом, что можно увидеть на рис. 2. 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 энергии 500 МэВ с помощью генератора Pluto, который представляет собой набор библиотек для программного пакета ROOT. Угловая зависимость  $pp$ -упругого рассеяния была взята из решения SP07 SAID [10].

Профиль разброса налетающего протона в горизонтальной плоскости для моделирования генерировался на основе формы распределения, представленного в гистограмме на рис. 2. Затем с использованием углов для двух рассеянных частиц в событии проверялось, попадали ли частицы в кинематически сопряженные детекторы.

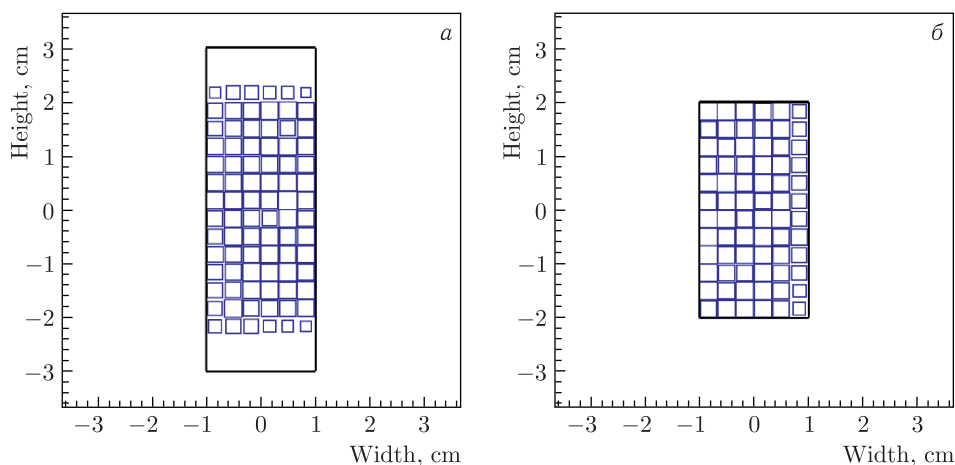


Рис. 7. Пример вывода данных о засечении детектора частицами в результате проведения моделирования поведения пучка для угла  $85^\circ$  в с. ц. м. На рисунках представлено засечение в паре кинематически связанных детекторов с учетом совпадения в них: а) для левого детектора; б) для правого детектора относительно направления пучка. Сплошные линии показывают границы детекторов

Угол установки детектора в с. ц. м. определялся путем усреднения углов всех частиц, которые попали в детектор.

Пример вывода информации по засеянию детектора частицами представлен на рис. 7. Эта информация использовалась для контроля за правильностью процесса моделирования.

## 5. 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, которые были выведены с использованием формул из [20] для случая, описанного в этой статье:

$$\frac{N_L}{M} = \frac{N_L^0}{M^0}(1 + P_y A_y), \quad (3)$$

$$\frac{N_R}{M} = \frac{N_R^0}{M^0}(1 - P_y A_y), \quad (4)$$

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.

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

$$A_{yL} = \frac{\frac{N_L^+ M^0}{N_L^0 M^+} + \frac{N_L^- M^0}{N_L^0 M^-} - 2}{P_y^+ + P_y^-}, \quad (5)$$

$$A_{yR} = -\frac{\frac{N_R^+ M^0}{N_R^0 M^+} + \frac{N_R^- M^0}{N_R^0 M^-} - 2}{P_y^+ + P_y^-}, \quad (6)$$

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, которые представлены в табл. 1.

## 6. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Используя данные по асимметрии протон-протонного рассеяния, можно найти не только анализирующие способности, но также поляризацию пучка. Для этого использовались те же выходы реакции  $pp$ -квазиупругого рассеяния, что и при вычислении анализирующей способности. Для вычисления поляризации использовались следующие выражения, также полученные из формул (3) и (4):

$$P_y^+ = \frac{\frac{N_L^+ M^0}{N_L^0 M^+} - \frac{N_R^+ M^0}{N_R^0 M^+}}{2A_y}, \quad (7)$$

$$P_y^- = \frac{\frac{N_L^- M^0}{N_L^0 M^-} - \frac{N_R^- M^0}{N_R^0 M^-}}{2A_y}, \quad (8)$$

где  $P_y^+$  и  $P_y^-$  — значения векторной поляризации пучка для мод источника поляризованных ионов 2–6 и 3–5 соответственно;  $N_L^+$ ,  $N_R^+$  — количество событий для поляризованной моды 2–6 при рассеянии влево и вправо соответственно;  $N_L^-$ ,  $N_R^-$  — количество событий для поляризованной моды 3–5 при рассеянии влево и вправо соответственно;  $N_L^0$ ,  $N_R^0$  — количество событий для неполяризованной моды при рассеянии влево и вправо соответственно;  $M^+$ ,  $M^-$  и  $M^0$  — количество событий в мониторных счетчиках для соответствующих спиновых мод;  $A_y$  — векторная анализирующая способность реакции.

Значения поляризации вычислялись для каждого угла в с.ц.м. по отдельности (фактически для каждой пары), а затем усреднялись по правилам среднего взвешенного, чтобы получить значения для текущей энергии.

## 7. РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученная угловая зависимость векторной анализирующей способности  $A_y$  в  $pp$ -квазиупругом рассеянии при энергии пучка 500 МэВ/нуклон представлена на рис. 8. Темные символы — результаты, полученные в данном эксперименте; светлые символы — данные, полученные в других экспериментах с той же или близкой энергией: кружки — [21], квадраты — [22], треугольники — [23].

На рис. 8 указаны только статистические ошибки. Систематическая ошибка, связанная с точностью измерения поляризации пучка, составляет  $\sim 3,7\%$ . Систематическая ошибка, обусловленная процедурой вычитания углеродного фона, варьируется от  $\sim 5$  до  $\sim 50\%$  в зависимости от угла рассеяния. Средние значения углов и их разброс, указанные на рис. 8 горизонтальными линиями, были получены из моделирования, описанного в разд. 4.

Значения анализирующей способности также сравнивались с решением SP07 парциально-волнового анализа SAID [10], представленным сплошной линией. Штриховая линия — результат аппроксимации мировых данных [21–23] полиномом второй степени вида

$$A_y = 0,636 + 0,067\theta - 0,3184\theta^2, \quad (9)$$

где  $\theta$  — угол в системе центра масс в радианах.

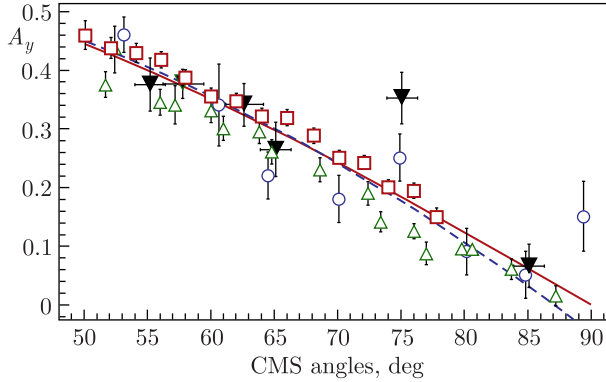


Рис. 8. Сравнение анализирующей способности в реакции  $pp$ -квазиупругого рассеяния при энергии 500 МэВ/нуклон с мировыми данными и результатами решения SP07 парциально-волнового анализа SAID. Темные символы — результаты данного эксперимента; светлые символы — данные, полученные в других экспериментах: кружки — [21]; квадраты — [22]; треугольники — [23]; сплошная линия — предсказания решения SP07 SAID [10]; штриховая — аппроксимация данных других экспериментов полиномом второй степени

Так как  $A_y$  антисимметрична относительно угла  $90^\circ$  с. ц. м., данные по анализирующей способности представлены только для диапазона углов  $0-90^\circ$  в с. ц. м. при рассеянии вперед. Наблюдается хорошее согласие полученных экспериментальных данных с данными других экспериментов [21–23], а также с результатами парциально-волнового анализа SAID [10].

Полученные значения усредненной по углам векторной поляризации пучка дейтронов при энергии 500 МэВ/нуклон представлены в табл. 4. Поляризация была вычислена с использованием анализирующих способностей из решения SP07 SAID [10], а также с использованием значений, полученных путем аппроксимации данных других экспериментов полиномом второй степени (см. формулу (9) при углах, указанных в табл. 5). В таблице указаны только статистические ошибки.

При вычислении поляризации использовались значения асимметрии с учетом критериев на положение мишени в момент взаимодействия пучка с мишенью, разницу времен прихода сигналов и корреляцию ионизационных потерь. При вычитании угле-

Таблица 4. Значения поляризации, полученные с помощью  $pp$ -квазиупругого рассеяния при энергии 500 МэВ/нуклон двумя методами: с использованием анализирующей способности, полученной путем аппроксимации мировых данных [21–23] полиномом второй степени (см. формулу (9)), и с использованием анализирующей способности из решения SP07 SAID [10]

Спиновая мода	Полином		SP07 SAID	
	$p_y$	$\Delta p_y$	$p_y$	$\Delta p_y$
2–6	0,245	0,013	0,249	0,013
3–5	0,231	0,013	0,234	0,013

Таблица 5. Значения анализирующей способности  $A_y$ , полученные из аппроксимации мировых данных полиномом (см. формулу (9)) и из решения SP07 парциально волнового анализа SAID, которые были использованы для сравнения с данными, полученными в этой работе, а также для вычисления поляризации пучка дейтронов

Угол в с. ц. м., °	$A_y$	
	Полином	SP07 SAID
55,2	0,405	0,399
57,8	0,380	0,373
62,6	0,329	0,324
65,1	0,301	0,297
75,1	0,177	0,183
85,1	0,033	0,061

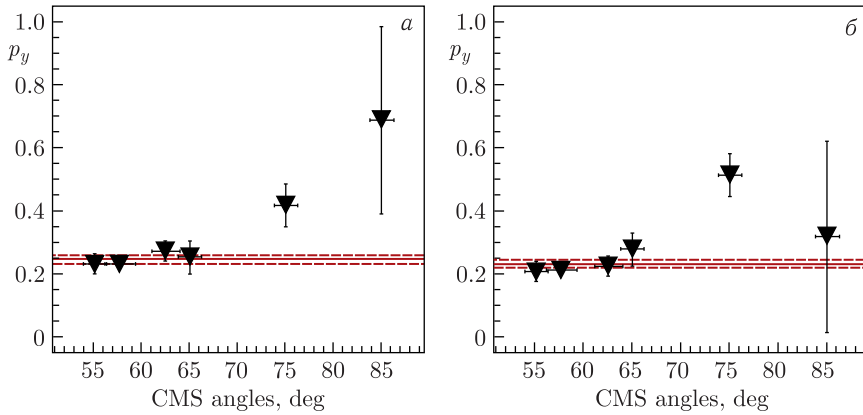


Рис. 9. Угловая зависимость полученных значений векторной поляризации дейтронного пучка для различных мод источника поляризованных ионов: а) для 2–6, б) для 3–5, полученных при энергии 500 МэВ/нуклон. При вычислении использовалась анализирующая способность из формулы (9), представленная в табл. 5. Сплошная линия — среднее взвешенное полученных данных. Штриховые линии соответствуют ошибке среднего взвешенного

родного фона использовался коэффициент, полученный с помощью метода наименьших квадратов.

Значения поляризации пучка, полученные при энергии 500 МэВ/нуклон с использованием анализирующих способностей из формулы (9), при различных углах для спиновых мод 2–6 и 3–5 показаны на рис. 9, а и б соответственно.

Сравнение значений поляризации пучка, усредненных по углам, с результатами, полученными при энергии 135 МэВ/нуклон с помощью  $dp$ -упругого рассеяния [16], представлены на рис. 10. Указаны только статистические ошибки. Систематическая ошибка, связанная с вычитанием углеродного фона, составляет  $\sim 6\%$ . Вклад неопределенности анализирующей способности составляет  $\sim 1,3\%$ . Можно видеть хорошее соответствие результатов, полученных различными методами, между собой.

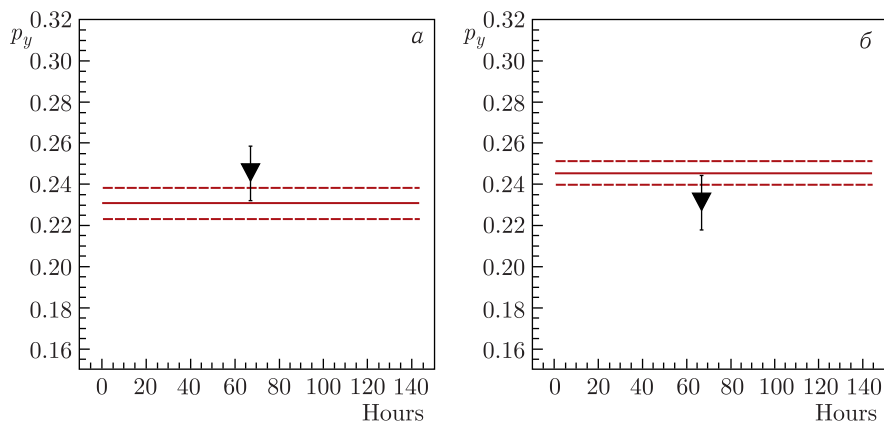


Рис. 10. Сравнение значений векторной поляризации дейтронного пучка, полученных с использованием анализирующих способностей из формулы (9), для различных мод источника поляризованных ионов: а) для 2–6, б) для 3–5, полученных при энергии 500 МэВ/нуклон, со значениями поляризации, полученными с помощью дейтрон-протонного упругого рассеяния при энергии 135 МэВ/нуклон [16], которые были аппроксимированы горизонтальной линией. Штриховые линии соответствуют  $\pm\sigma$  от аппроксимированных данных

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена векторная анализирующая способность  $A_y$  реакции протон-протонного квазиупругого рассеяния с использованием поляризованного дейтронного пучка с энергией 500 МэВ/нуклон. При данной энергии и при больших углах в с.ц.м. анализирующая способность протон-протонного квазиупругого рассеяния была получена впервые.

Значения анализирующей способности сравнивались с данными, полученными в других экспериментах [21–23], а также с решением SP07 парциально-волнового анализа SAID [10]. Результаты, полученные в данной 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.

С использованием тех же данных по асимметрии были получены значения векторной поляризации пучка дейтронов. Полученные результаты находятся в согласии с измерениями, выполненными с использованием асимметрии  $dp$ -упругого рассеяния [16].

Эксперимент проводился на внутренней мишени нуклотрона ОИЯИ в 2016 г. Достаточно большая статистическая неопределенность измерений была следствием того, что эксперимент проводился в тестовом режиме. В будущих исследованиях с поляризованными пучками протонов и дейтронов планируется улучшение точности измерений анализирующей способности и поляризации за счет увеличения углового диапазона измерений и времени набора статистики [24].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lechanoine-LeLuc C., Lehar F.* Nucleon–Nucleon Elastic Scattering and Total Cross Sections // *Rev. Mod. Phys.* 1993. V. 65. P. 47–86.
2. *Bystricky J., Lechanoine-Leluc C., Lehar F.* Nucleon–Nucleon Phase Shift Analysis // *J. Phys. France.* 1987. V. 48, No. 2. P. 199–226.
3. *Bystricky J., Lechanoine-Leluc C., Lehar F.* Phase Shift Analyses of *pp* Elastic Scattering at Fixed Energies between 0.83 and 1.8 GeV // *J. Phys. France.* 1990. V. 51, No. 24. P. 2747–2776.
4. *Arndt R. A., Roper L. D., Workman R. L., McNaughton M. W.* Nucleon–Nucleon Partial-Wave Analysis to 1.6 GeV // *Phys. Rev. D.* 1992. V. 45. P. 3995–4001.
5. *Stoks V. G. J., Klomp R. A. M., Rentmeester M. C. M., de Swart J. J.* Partial-Wave Analysis of All Nucleon–Nucleon Scattering Data below 350 MeV // *Phys. Rev. C.* 1993. V. 48. P. 792–815.
6. *Arndt R. A., Strakovsky I. I., Workman R. L.* Updated Analysis of *NN* Elastic Scattering Data to 1.6 GeV // *Phys. Rev. C.* 1994. V. 50. P. 2731–2741.
7. *Matsuda M., Nagata J., Yoshino H., Yoshino Y.* PANN: Partial-Wave Analysis of Nucleon–Nucleon Scattering in Wide-Energy Region // *Comput. Phys. Commun.* 2000. V. 131. P. 225–263.
8. *Arndt R. A., Heon Oh C., Strakovsky I. I., Workman R. L., Dohrmann F.* Nucleon–Nucleon Elastic Scattering Analysis to 2.5 GeV // *Phys. Rev. C.* 1997. V. 56. P. 3005–3013.
9. *Arndt R. A., Strakovsky I. I., Workman R. L.* Nucleon–Nucleon Elastic Scattering to 3 GeV // *Phys. Rev. C.* 2000. V. 62. P. 034005.
10. *Arndt R. A., Briscoe W. J., Strakovsky I. I., Workman R. L.* Updated Analysis of *NN* Elastic Scattering to 3 GeV // *Phys. Rev. C.* 2007. V. 76. P. 025209.
11. *Workman R. L., Briscoe W. J., Strakovsky I. I.* Partial-Wave Analysis of Nucleon–Nucleon Elastic Scattering Data // *Phys. Rev. C.* 2016. V. 94. P. 065203.
12. *Malakhov A., Afanasiev S., Anisimov Yu., Artiomov A., Bazilev S., Khrenov A., Kliman J., Krasnov V., Matousek V., Morhac M., Starikov A., Shabunov A., Slepnev V., Turzo I.* Potentialities of the Internal Target Station at the Nuclotron // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2000. V. 440. P. 320.
13. *Isupov A., Krasnov V., Ladygin V., Piyadin S., Reznikov S.* The Nuclotron Internal Target Control and Data Acquisition System // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2013. V. 698. P. 127–134.
14. *Fimushkin V. V., Kovalenko A. D., Kutuzova L. V., Prokofichev Yu. V., Shutov B., Belov A. S., Zubets V. N., Turbabin A. V.* Development of Polarized Ion Source for the JINR Accelerator Complex // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 678. P. 012058.
15. *Belov A. S., Donets D. E., Fimushkin V. V., Kovalenko A. D., Kutuzova L. V., Prokofichev Yu. V., Shutov V. B., Turbabin A. V., Zubets V. N.* Source of Polarized Ions for the JINR Accelerator Complex // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 938, No. 1. P. 012017.
16. *Skhomenko Ya. T., Ladygin V. P., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Janek M., Karachuk J.-T., Khrenov A. N., Kurilkin P. K., Livanov A. N., Piyadin S. M., Reznikov S. G., Terekhin A. A., Tishevsky A. V., Averyanov A. V., Belov A. S., Chernykh E. V., Enache D., Fimushkin V. V., Krivenkov D. O., Vnukov I. E., Volkov I. S.* Deuteron Beam Polarimeter at Nuclotron Internal Target // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 204. P. 10002.
17. *Kurilkin P., Ladygin V., Uesaka T., Suda K., Gurchin Yu., Isupov A., Itoh K., Janek M., Karachuk J.-T., Kawabata T., Khrenov A., Kiselev A., Kizka V., Kliman J., Krasnov V., Livanov A., Maeda Y., Malakhov A., Matousek V., Morhach M., Reznikov S., Sakaguchi S., Sakai H., Sasamoto Y., Sekiguchi K., Turzo I., Vasiliev T.* The 270 MeV Deuteron Beam

- Polarimeter at the Nuclotron Internal Target Station // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V.642, No. 1. P. 45–51.
18. *Isupov A. Yu.* Online Polarimetry of the Nuclotron Internal Deuteron and Proton Beams // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V.938, No. 1. P. 012019.
  19. *Gurchin Yu. V., Krasnov V. A., Ladygin V. P., Anisimov Yu. S., Isupov A. Yu., Janek M., Karachuk J.-T., Khrenov A. N., Kiselev A. S., Kizka V. A., Kliman J., Livanov A. N., Malakhov A. I., Matousek V., Morhac M., Reznikov S. G., Turzo I., Vasiliev T. A.* Target Position Monitor for the Internal Target Station at the Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2007. V. 4, No. 3. P. 263–267.
  20. *Ohlsen G. G.* Polarization Transfer and Spin Correlation Experiments in Nuclear Physics // Rep. Prog. Phys. 1972. V. 35. P. 717–801.
  21. *Albrow M., Andersson-Almehed S., Bošnjakovic B., Daum C., Ern  F., Lagnaux J., Sens J., Udo F.* Polarization in Elastic Proton–Proton Scattering between 0.86 and 2.74 GeV/c // Nucl. Phys. B. 1970. V. 23, No. 3. P. 445–465.
  22. *Bystricky J., Chaumette P., Deregel J., Fabre J., Lehar F., De Lesquen A., Van Rossum L., Fontaine J., Gosset J., Perrot F., Whitten C., Ball J., Chesny P., Newsom C., Yonnet J., Niinikoski T., Rieubland M., Michalowicz A., Dalla Torre-Colautti S.* Measurement of the Spin Correlation Parameter  $A_{00nn}$  and of the Analyzing Power for  $pp$  Elastic Scattering in the Energy Range from 0.5 to 0.8 GeV // Nucl. Phys. B. 1985. V. 262, No. 4. P. 727–743.
  23. *Cozzika G., Ducros Y., de Lesquen A., Movchet J., Raoul J. C., van Rossum L., Deregel J., Fontaine J. M.* Measurements of the Polarization Parameters  $P$  and  $C_{nn}$  in  $pp$  Elastic Scattering between 500 and 1200 MeV // Phys. Rev. 1967. V. 164. P. 1672–1679.
  24. *Terekhin A. A., Ladygin V. P., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Khrenov A. N., Reznikov S. G., Volkov I. S., Tishevsky A. V., Janek M.* New Proton Polarimeter at the Nuclotron // AIP Conf. Proc. 2021. V. 2377, No. 1. 030016.

Получено 15 июля 2023 г.