

ПОЛЯРИМЕТР ПРОТОНОВ НА СТАНЦИИ ВНУТРЕННИХ МИШЕНЕЙ НУКЛОТРОНА ОИЯИ

А. А. Терехин^{1,*}, И. С. Волков¹, Ю. В. Гурчин¹,
А. Ю. Исупов¹, В. П. Ладыгин¹, С. Г. Резников¹,
А. В. Тишевский¹, А. Н. Хренов¹, М. Янек²

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Жилинский университет, Жилина, Словакия

Представлена программа модернизации поляриметра на станции внутренних мишеней нуклотрона ОИЯИ с целью измерения поляризаций пучков дейтронов и протонов. Данный поляриметр предназначен для поляризационных экспериментов по изучению спиновой структуры двух- и трехнуклонных систем. Проведено моделирование процессов *pp*- и *pd*-упругого рассеяния в диапазоне энергии 500–1000 МэВ. Представлены результаты тестирования новых детекторов.

The polarimeter upgrade program at the Internal target station at the Nuclotron for the polarizations measurements of the proton and deuteron beams is presented. This polarimeter is intended for the polarized experiments to study of the two- and three nucleon systems. The simulation of the *pp*-elastic and *pd*-elastic scattering for 500–1000 MeV proton energy are performed. The results of the test of the new detectors are presented.

PACS: 25.40.Cm; 25.45.De

ВВЕДЕНИЕ

Реакции с дейтроном традиционно используются для изучения структуры легких ядер на малых межнуклонных расстояниях. Установка на станции внутренних мишеней [1] нуклотрона ОИЯИ позволяет проводить измерения при углах рассеяния $\theta_{\text{см}} > 40\text{--}60^\circ$. В рамках проекта DSS (Deuteron Spin Structure) [2] проводятся эксперименты по исследованию *dp*-упругого рассеяния при энергиях до 1000 МэВ/нуклон. В результате измерений с пучком поляризованных дейтронов от источника «Полярис» [3] получены данные по векторной A_y и тензорным A_{xx} и A_{yy} анализирующим способностям при энергиях 440 [4] и 1000 МэВ/нуклон [5]. Угловые зависимости для дифференциального сечения были определены при нескольких энергиях в диапазоне от 250 до 1000 МэВ/нуклон [6–9]. С запуском нового источника

* E-mail: aterekhin@jinr.ru

поляризованных ионов [10] продолжились поляризационные измерения. Были получены значения для анализирующих способностей A_y , A_{xx} и A_{yy} при энергиях 200–650 МэВ/нуклон в угловом диапазоне $60 < \theta_{\text{см}} < 140^\circ$ [11, 12]. Кроме того, были измерены поляризации пучка дейтронов при 135, 500 и 650 МэВ/нуклон [13]. Также была измерена поляризация протонов [14, 15] при энергии 500 МэВ для квазиупругого pp -рассеяния. Получено значение вертикальной поляризации около 35%. Таким образом, в результате проведенных экспериментов выявлена возможность измерения поляризации протонов на имеющемся поляриметре дейтронов [16].

При наличии пучка поляризованных протонов становятся доступными эксперименты на нуклотроне по pp -, pn - и pd -упругому рассеянию для исследования угловой зависимости нуклонной анализирующей способности A_y в области энергии 100–1000 МэВ в угловом диапазоне $30 < \theta_{\text{см}} < 125^\circ$. Для этих целей нужна высокоэффективная поляриметрия протонов в данном диапазоне энергии. Классическим методом для измерения асимметрии рассеяния является pp -упругое рассеяние. Кроме того, может быть использована реакция pd -упругого рассеяния при энергии 200 МэВ, в которой анализирующая способность A_y близка к 100% [17]. Однако это требует существенной модификации имеющейся экспериментальной установки. В данной работе представлены результаты первого этапа реализации программы модернизации поляриметра на станции внутренних мишеней нуклотрона.

1. ПОЛЯРИМЕТР

Дейтронный поляриметр основан на измерении спиновой асимметрии в dp -упругом рассеянии [16]. В настоящее время поляриметр включает в себя 39 сцинтилляционных счетчиков на базе фотоумножителей Hamamatsu H7416MOD для детектирования протонов (P) и дейтронов (D) рассеяния, которые размещены в горизонтальной и вертикальной плоскостях на расстоянии 58–62 см от точки взаимодействия пучка с мишенью. На данном расстоянии угловой захват P-детекторов в лабораторной системе составляет 2° , что соответствует 4° в с. ц. м. Акцептанс одного D-детектора в с. ц. м. значительно больше и может покрывать телесный угол, равный сумме телесных углов нескольких протонных счетчиков. Помимо этого, в состав поляриметра входит одна пара детекторов для регистрации продуктов pp -квазиупругого рассеяния, размещенных под углом 90° в с. ц. м. в горизонтальной плоскости относительно оси ионопровода. Для измерений используются CH_2 - и ^{12}C -мишени толщиной 10 и 8 мкм соответственно. Для сбора и записи данных применяется система стандарта VME (Versa Module Eurocard) [18], в состав которой входят 16-канальные модули TQDC-16, осуществляющие прием амплитудной и временной информации от детекторов.

Программа модернизации поляриметра включает в себя изготовление нового набора сцинтилляционных детекторов для регистрации продуктов pd - и pp -рассеяния, элементов механики для их размещения, а также изготовление новой мишени. Новая механика должна будет обеспечить, с одной стороны, возможность эффективного размещения большого количества детекторов (80 шт.) в горизонтальной плоскости, а с другой стороны, увеличение углового диапазона в с. ц. м. измерений различных наблюдаемых.

Для достижения наибольшей эффективности работы поляриметра необходимо определить количество счетчиков, размеры сцинтилляторов и расстояние до центра взаимодействия. При вычислении оптимальных размеров сцинтилляторов детекторов необходимо учитывать следующие факторы: а) площадь сцинтилляторов должна быть такой, чтобы все полезные события были зарегистрированы системой сбора данных; б) эффективная площадь сцинтилляторов детекторов должна быть максимально приближена к их геометрической площади; в) при возможной замене детекторов не должно возникать дополнительных трудностей с поиском детектора подходящего размера; г) размеры сцинтилляторов и расстояние до мишени должны обеспечивать размещение большого количества счетчиков без возникновения существенных перекрытий, которые могут затруднить отбор полезных событий.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ pp - и pd -УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ

Для учета всех требований было проведено моделирование событий pp - и pd -упругого рассеяния с помощью генератора событий PLUTO [19] в диапазоне энергии $E_p = 100-1000$ МэВ. На рис. 1 представлены схемы расположения детекторов для каждой из исследуемых реакций (PP - и PD -детекторы соответственно). Из моделирования были определены наиболее оптимальные размеры счетчиков и их количество. Набор PP -де-

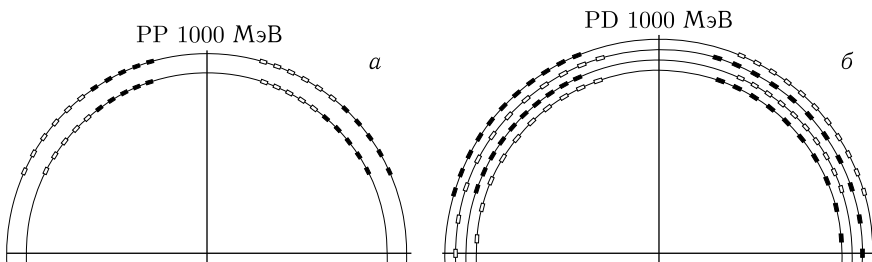


Рис. 1. Схема расположения детекторов для исследования реакции pp -упругого (а) и pd -упругого (б) рассеяния при энергии 1000 МэВ/нуклон. Темными и светлыми символами обозначены два идентичных набора кинематически сопряженных счетчиков

текторов включает в себя 42 счетчика: 22 сцинтиллятора размерами $2 \times 2 \times 2$ см и 20 сцинтилляторов размерами $2,3 \times 6 \times 2$ см. Размещение детекторов через каждые 5° в с. ц. м. позволит одновременно измерять рассеяние влево и вправо, охватывая угловой диапазон $40 < \theta_{\text{см}} < 90^\circ$. Набор PD-детекторов включает в себя 80 счетчиков: 40 сцинтилляторов размерами $2 \times 2 \times 2$ см, 22 сцинтиллятора размерами $2,3 \times 6 \times 2$ см и 18 — размерами $3,5 \times 6 \times 2$ см. Такое количество позволит разместить детекторы через каждые 5° в с. ц. м., суммарно охватив угловой диапазон $30 < \theta_{\text{см}} < 125^\circ$. Монтаж счетчиков будет осуществляться на расстоянии от 530 до 620 мм от точки взаимодействия мишени с пучком.

Моделирование событий pp -упругого рассеяния проводилось для энергий протона 100, 500 и 1000 МэВ с учетом угловых зависимостей дифференциального сечения (рис. 2) pp -упругого рассеяния при 108, 500 и 1000 МэВ/нуклон в исследуемом угловом диапазоне, взятых из базы данных SAID [20], являющихся решением SM16 [21]. На рис. 3 представлено распределение количества pp -упругих событий, попавших в детектор, для энергии 100 МэВ при рассеянии под углом $\theta_{\text{см}} = 55^\circ$. Штриховой и сплошной гистограммами обозначены распределения без включения (N_{pp}^{tot}) и с включением (N_{pp}) режима совпадений кинематически сопряженных друг другу счетчиков. Угловые зависимости количества событий по детекторам, нормированные на интегральные сечения σ_{tot}^{pp} pp -упругого рассеяния, представлены на рис. 4. Значения σ_{tot}^{pp} вычислялись для данных из базы SAID (см. рис. 2) в угловом диапазоне $40 < \theta_{\text{см}} < 90^\circ$.

На рис. 5 представлено распределение эффективной площади S_{eff} одного из детекторов по углу рассеяния в с. ц. м. для энергий 100, 500 и 1000 МэВ с включением режима совпадений. Минимальное значение S_{eff}

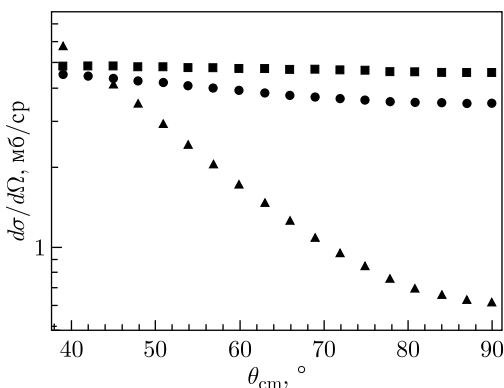


Рис. 2. Дифференциальное сечение pp -упругого рассеяния. Квадратами, кружками и треугольниками обозначены данные для энергий протона 100, 500 и 1000 МэВ соответственно, взятые из базы данных SAID [20]

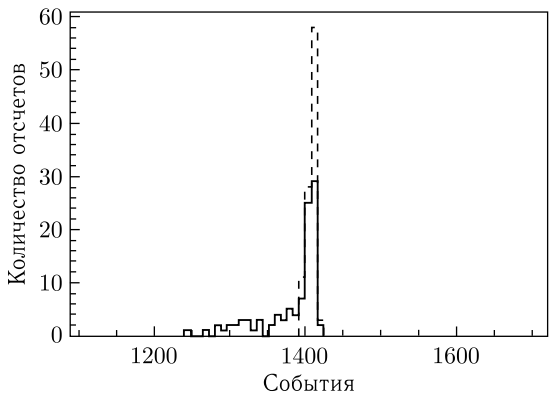


Рис. 3. Распределение количества pp -упругих событий, попавших в детектор, для энергии 100 МэВ при рассеянии под углом $\theta_{cm} = 55^\circ$. Штриховой и сплошной гистограммами обозначены распределения без включения и с включением режима совпадения кинематически сопряженных друг другу счетчиков

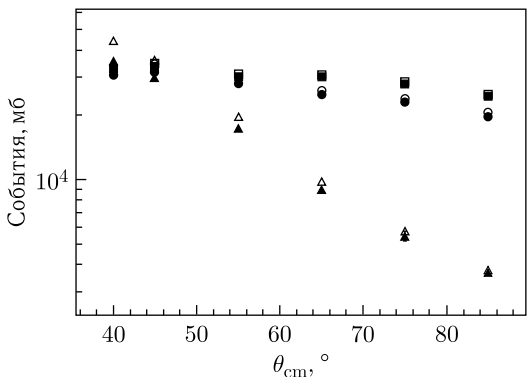


Рис. 4. Распределение нормированных сгенерированных [19] событий pp -упругого рассеяния. Светлыми и темными квадратами, кружками и треугольниками обозначены данные для энергий протона 100, 500 и 1000 МэВ без включения и с включением схемы совпадений кинематически сопряженных друг другу счетчиков соответственно

составляет 82 % от геометрической площади сцинтиллятора. Уменьшение эффективной площади связано с особенностями кинематических перекрытий детекторов по азимутальному углу φ . Этот же эффект можно наблюдать на рис. 4 из уменьшения разности между количеством событий N_{pp}^{tot} и N_{pp} с увеличением угла рассеяния. Для полного соответствия S_{eff} необходимо увеличивать размеры детекторов, рассчитывая их для каждого конкретного угла рассеяния в с. ц. м., что приведет к возникновению дополнительных трудностей в изготовлении и эксплуатации детекторов.

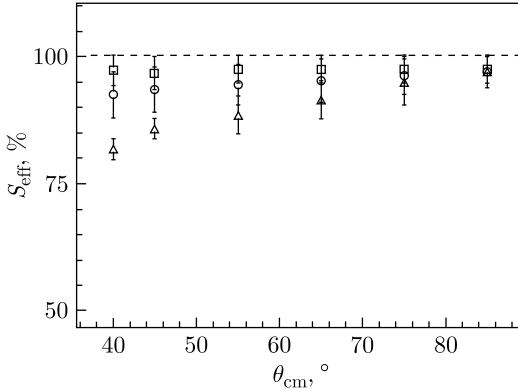


Рис. 5. Распределение эффективной площади одного из детекторов с учетом схемы совпадений по углу рассеяния в с.ц.м. Квадратами, кружками и треугольниками обозначены данные для энергий протона 100, 500 и 1000 МэВ соответственно, штриховой линией — величина геометрических размеров сцинтилляторов

Суммарное количество моделированных событий в детекторах

Событие	$E, \text{ МэВ/нуклон}$		
	100	500	1000
N_{pp}	94 050	99 000	122 100
N_{pd}	66 000	69 300	69 300

В таблице представлено суммарное количество pp -упругих событий в детекторах из общего количества — $1 \cdot 10^7$. Максимальное количество pp -упругих событий в 80 детекторах составляет 123 000 ($1,23 \cdot 10^5$). Предел загрузки системы сбора данных оценивается как $1 \cdot 10^5$ событий. Полиэтиленовая мишень способна воспринять $5 \cdot 10^9$ входящих частиц в секунду. Таким образом, подобранные размеры детекторов и их количество удовлетворяют требованиям, предъявляемым системой сбора данных и возможностям мишени.

Моделирование событий pd -упругого рассеяния проводилось также для энергий протона 100, 500 и 1000 МэВ с учетом угловых зависимостей дифференциального сечения dp -упругого рассеяния при 108 [22], 580 [23] и 1000 [24] МэВ/нуклон в исследуемом угловом диапазоне (рис. 6). На рис. 7 представлено распределение количества pd -упругих событий, попавших в дейтронный детектор, для энергии 100 МэВ при рассеянии под углом $\theta_{cm} = 35^\circ$. Штриховой и сплошной гистограммами обозначены распределения без включения (N_{pd}^{tot}) и с включением (N_{pd}) режима совпадения дейтронного счетчика с кинематически сопряженным ему протонным. Угловые зависимости количества событий по детекторам,

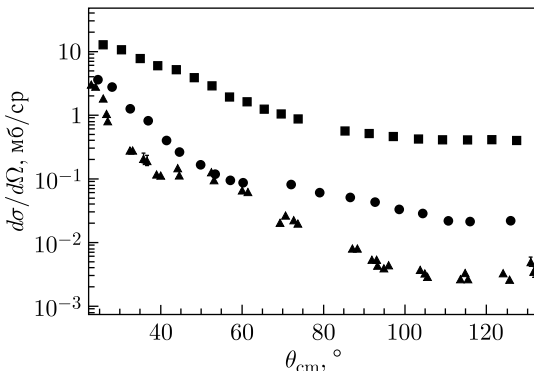


Рис. 6. Дифференциальное сечение dp -упругого рассеяния. Квадратами, кружками и треугольниками обозначены данные для энергий 108 [22], 580 [23] и 1000 [24] МэВ/нуклон соответственно

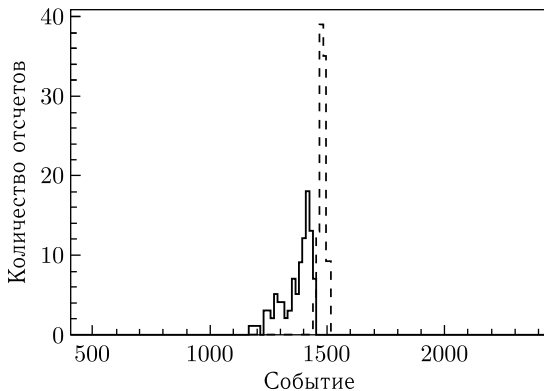


Рис. 7. Распределение количества pd -упругих событий, попавших в детектор, для энергии 100 МэВ при рассеянии под углом $\theta_{cm} = 35^\circ$. Штриховой и сплошной гистограммами обозначены распределения без включения и с включением режима совпадения кинематически сопряженных друг другу D- и P-счетчиков

нормированные на интегральные сечения σ_{tot}^{pd} dp -упругого рассеяния, представлены на рис. 8. Значения σ_{tot}^{pd} вычислялись для угловых зависимостей [22–24] в диапазоне $27 < \theta_{cm} < 135^\circ$.

На рис. 9 представлено распределение эффективной площади дейтронного детектора S_{eff} по углу рассеяния в с. ц. м. для энергий протона 100, 500 и 1000 МэВ. Как видно из рис. 9, при $\theta_{cm} > 80^\circ$ для всех энергий наблюдается существенный спад величины S_{eff} , достигающий 60% от геометрической площади сцинтиллятора (при $\theta_{cm} = 125^\circ$). Также, как видно из рис. 8, с ростом угла рассеяния увеличивается относительная разность между количеством событий, попавших в дейтронный

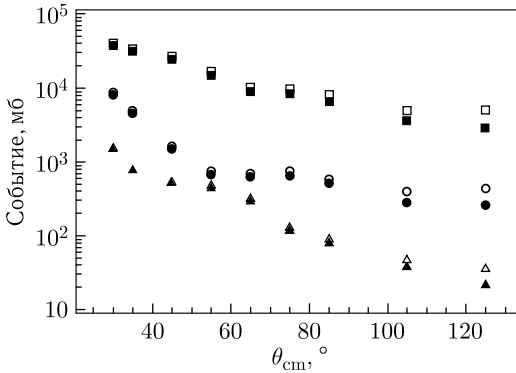


Рис. 8. Распределение нормированных сгенерированных событий *pd*-упругого рассеяния. Светлыми и темными квадратами, кружками и треугольниками обозначены данные для энергий протона 100, 500 и 1000 МэВ без включения и с включением схемы совпадений кинематически сопряженных друг другу счетчиков соответственно

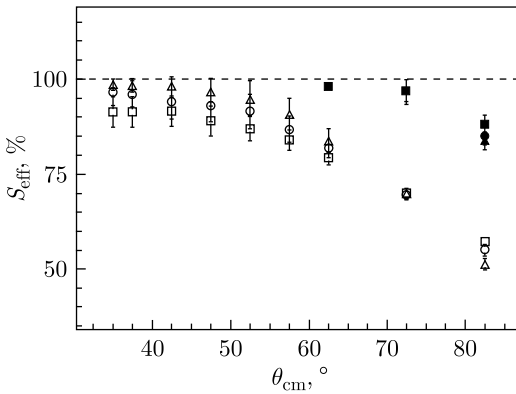


Рис. 9. Распределение величины площади дейтронного детектора по углу рассеяния в с. ц. м. Светлыми квадратами, кружками и треугольниками обозначены данные для энергий протона 100, 500 и 1000 МэВ соответственно. Темными символами обозначены аналогичные данные для детекторов со сцинтилляторами размерами $3,5 \times 6 \times 2$ см. Штриховой линией обозначена величина геометрических размеров сцинтилляторов

детектор без включения совпадений его с сопряженным ему протонным детектором (N_{pd}^{tot}), и количеством событий с включением совпадений (N_{pd}). В связи с этим для этой области углов рассеяния был предложен дополнительный набор детекторов со сцинтилляторами размерами $3,5 \times 6 \times 2$ см. Величина $S_{эфф}$ для таких детекторов на рис. 9 представлена сплошными символами. Данные размеры сцинтиллятора позволяют уве-

лчить значение эффективной площади детектора до 90 % от величины его геометрических размеров. Кроме того, как видно из рис. 8, в этой угловой области количество событий существенно меньше, чем при углах рассеяния $\theta_{\text{см}} < 80^\circ$. В силу этого увеличение размеров детекторов не влияет на изменение суммарной статистики, следовательно, не влияет на степень загрузки системы сбора данных.

В таблице представлено суммарное количество pd -упругих событий в детекторах из общего количества — $1 \cdot 10^7$. Максимальное количество pd -упругих событий в 80 детекторах составляет 70 000 ($7 \cdot 10^4$). Таким образом, подобранные размеры детекторов и их количество также удовлетворяют требованиям, предъявляемым системой сбора данных.

3. ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Из полного набора pp -детекторов были изготовлены 20 счетчиков на базе фотоумножителей Hamamatsu H7415MOD, которые были протестированы с помощью радиоактивного источника ^{106}Ru . В качестве приемника частиц используется пластический сцинтиллятор марки BC408, покрываемый светоотражающим и изолирующим бандажом, состоящим из слоя майлара, черной бумаги, изолирующей ленты и термоусадочной трубки. После проверки на светоизоляцию с каждого из детекторов были записаны амплитудные сигналы от радиоактивного источника. Подбор высоковольтного напряжения и запись результатов в бинарные файлы осуществлялись с использованием специального программного обеспечения. Для просмотра данных исходные файлы декодировались в файлы формата root. На рис. 10 представлены амплитудные сигналы с четырех

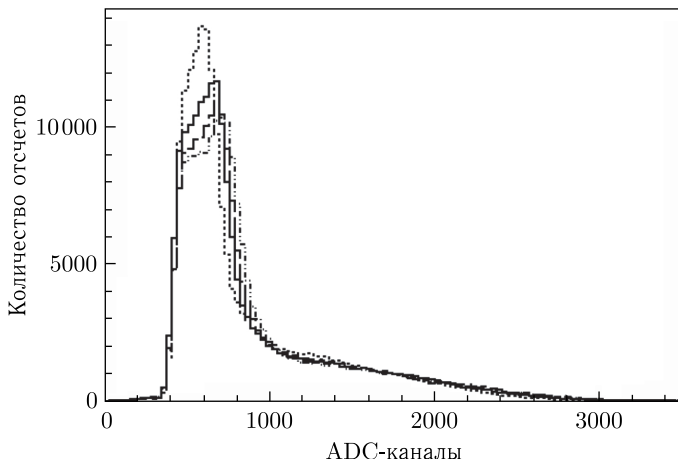


Рис. 10. Амплитудные сигналы от радиоактивного источника с четырех выбранных детекторов

выбранных детекторов. Идентичность формы спектров свидетельствует об оптимальности подобранных напряжений для всех счетчиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена программа модернизации поляриметра на станции внутренних мишеней нуклотрона. Проведено моделирование процессов pd - и pp -упругого рассеяния с целью подбора параметров детекторов. Проведены сборка и тестовые измерения новых детекторов.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 19-02-00079а) и Министерством образования, науки, исследований и спорта Словацкой Республики (грант № 1/0445/210).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malakhov A. I., Afanasev S. V., Anisimov Yu. S., Artemov A. S., Bazylev S. N., Khrenov A. N., Krasnov V. A., Starikov A. Yu., Shabunov A. V., Slepnev V. M., Kliman J., Matousek V., Morhac M., Turzo I. Potentialities of the Internal Target Station at the Nuclotron // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 440. P. 320.
2. Ladygin V. P. et al. (DSS Collab.). Few-Body Studies at Nuclotron JINR // Few Body Syst. 2014. V. 55. P. 709.
3. Anishchenko N. G., Baldin A. M., Beznogikh Yu. D., Ershow V. P., Fimushkin V. V., Monchinsky V. A., Pilipenko Yu. K., Romanov Yu. I., Semenyushkin I. N., Shutov V. B., Sulik A., Valevich A. I., Zinoviev L. P. Acceleration of Polarized Deuterons at the Synchrotron from the Source "Polaris" // AIP Conf. Proc. 1983. V. 95. P. 445.
4. Kurilkin P. K., Ladygin V. P., Uesaka T., Suda K., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Itoh K., Janek M., Karachuk J. T., Kawabata T., Khrenov A. N., Kiselev A. S., Kizka V. A., Krasnov V. A., Ladygina N. B., Livanov A. N., Maeda Y., Malakhov A. I., Piyadin S. M., Reznikov S. G., Sakaguchi S., Sakai H., Sasamoto Y., Sekiguchi K., Shikhalev M. A., Vasiliev T. A., Witala H. Measurement of the Vector and Tensor Analyzing Powers for p -Elastic Scattering at 880 MeV // Phys. Lett. B. 2012. V. 715. P. 61.
5. Kurilkin P. K., Ladygin V. P., Uesaka T., Suda K., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Itoh K., Janek M., Karachuk J. T., Kawabata T., Khrenov A. N., Kiselev A. S., Kizka V. A., Krasnov V. A., Ladygina N. B., Livanov A. N., Maeda Y., Malakhov A. I., Reznikov S. G., Sakaguchi S., Sakai H., Sasamoto Y., Sekiguchi K., Shikhalev M. A., Vasiliev T. A. Investigation of the Angular Dependence of the Analyzing Powers in the Deuteron-Proton Elastic Scattering at the Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8. P. 1081.
6. Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Janek M., Karachuk J. T., Khrenov A. N., Krasnov V. A., Kurilkin A. K., Kurilkin P. K., Ladygin V. P., Ladygina N. B., Livanov A. N., Piyadin S. M., Rapatskiy V. L., Reznikov S. G., Terekhin A. A., Vasiliev T. A. The Cross-Section in dp -Elastic Scattering at the Energies of 500, 700 and 880 MeV Obtained at the Internal Target Station of Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10. P. 243.

7. *Terekhin A. A., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Khrenov A. N., Kurilkin A. K., Kurilkin P. K., Ladygin V. P., Ladygina N. B., Piyadin S. M., Reznikov S. G., Vnukov I. E.* Study of the dp -Elastic Scattering at 2 GeV // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 5. P. 695.
8. *Terekhin A. A., Ladygin V. P., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Kurilkin A. K., Kurilkin P. K., Ladygina N. B., Piyadin S. M., Reznikov S. G., Khrenov A. N.* Differential Cross Section for Elastic Deuteron–Proton Scattering at the Energy of 700 MeV per Nucleon // *Phys. At. Nucl.* 2017. V. 80, No. 6. P. 1061.
9. *Terekhin A. A., Ladygin V. P., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Janek M., Khrenov A. N., Kurilkin A. K., Kurilkin P. K., Ladygina N. B., Piyadin S. M., Reznikov S. G.* The Differential Cross Section in Deuteron–Proton Elastic Scattering at 500, 750 and 900 MeV/nucleon // *Eur. Phys. J. A.* 2019. V. 55. P. 129.
10. *Fimushkin V. V., Gapienko I. V., Plis Yu. A., Prokofichev Yu. V.* Transition of Polarized Ions Through the System of Ring Permanent Magnets // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 678, No. 1. 012003.
11. *Mezhenska O., Averyanov A. V., Chernykh E. V., Enache D., Gurchin Y. V., Isupov A. Yu., Janek M., Karachuk J., Khrenov A. N., Krivenkov D. O., Kurilkin P. K., Ladygin V. P., Ladygina N. B., Livanov A. N., Piyadin S. M., Reznikov S. G., Skhomenko Y. T., Terekhin A. A., Tishevsky A. V., Uesaka T., Urban J.* Measurement of the Vector and Tensor Analyzing Powers for dp -Elastic Scattering at the Energy of 800 MeV // *AIP Conf. Proc.* 2019. V. 2163. 030011.
12. *Ladygin V. P., Averyanov A. V., Chernykh E. V., Enache D., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Janek M., Karachuk J. T., Khrenov A. N., Krivenkov D. O., Kurilkin P. K., Ladygina N. B., Livanov A. N., Piyadin S. M., Reznikov S. G., Skhomenko Ya. T., Terekhin A. A., Tishevsky A. V., Uesaka T., Volkov I. S.* Deuteron Analyzing Powers in dp -Elastic Scattering at Large Transverse Momenta // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1435. 012039.
13. *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 Polarization Measurement at 270 MeV at Nuclotron Internal Target // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 204. 10002.
14. *Ladygin V. P. et al. (DSS Collab.).* Deuteron and Proton Beams Polarimetry at Internal Target at JINR Nuclotron // *PoS SPIN2018.* 2019. 150.
15. *Terekhin A. A. et al. (DSS Collab.).* Upgrade of the Polarimeter at the Internal Target Station at the Nuclotron // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1435. 012051.
16. *Kurilkin P. K., Ladygin V. P., Uesaka T., Suda K., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Itoh K., Janek M., Karachuk J., Kawabata T., Khrenov A. N., Kiselev A. S., Kizka V. A., Kliman J., Krasnov V. A., Livanov A. N., Maeda Y., Malakhov A. I., Matousek V., Morhach M., Reznikov S. G., Sakaguchi S., Sakai H., Sasamoto Y., Sekiguchi K., Turzo I., Vasiliev T. A.* The 270 MeV Deuteron Beam Polarimeter at the Nuclotron Internal Target Station // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 642. P. 45.
17. *Poblaguev A. A., Atoian G., Zelenski A.* Absolute Polarization Measurement of the 200 MeV Proton Beam at BNL Linac // *PoS PSTP.* 2018. V. 2017. 024.
18. <http://afi.jinr.ru/>

19. Froehlich I., Dohrmann F., Galatyuk T., Holzmann R., Kahlitz P.K., Kampfer B., Moriniere E., Pachmayer Y.C., Ramstein B., Salabura P., Stroth J., Trebacz R., Van de Wiele J., Wuestenfeld J. A Versatile Method for Simulating $pp \rightarrow ppe^+e^-$ and $dp \rightarrow pne^+e^-p(\text{spec})$ Reactions // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 45. P. 401–411.
20. <http://gwdac.phys.gwu.edu>
21. Workman R.L., Briscoe W.J., Strakovsky I.I. Partial-Wave Analysis of Nucleon–Nucleon Elastic Scattering Data // Phys. Rev. C. 2016. V. 94. 065203.
22. Ermish K., Amir-Ahmadi H.R., van den Berg A.M., Castelijns R., Davids B., Epelbaum E., Van Garderen E., Gloeckle W., Golak J., Harakeh M.N., Hunyadi M., de Huu M.A., Kalantar-Nayestanaki N., Kamada H., Kis M., Mahjour-Shafiei M., Nogga A., Skibinski R., Witala H., Wortche H.J. Systematic Investigation of the Elastic Proton Deuteron Differential Cross-Section at Intermediate-Energies // Phys. Rev. C. 2003. V. 68. 051001.
23. Vincent J.S., Roberts W.K., Boschitz E.T., Kisslinger L.S., Gotow K., Gugelot P.C., Perdrisat C.F., Swenson L.W., Priest J.R. Large Angle p - d Scattering at 580 MeV // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24. P. 236.
24. Bennet G.W., Friedes J.L., Palevsky H., Sutter R.J. Proton–Deuteron Scattering at 1 BeV // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. P. 387.