

ИЗМЕРЕНИЕ АНАЛИЗИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ pp И $\bar{p}p$ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ СПАСЧАРМ НА У-70

© 2024 г. А. А. Богданов^{1,2)*}, В. П. Ладыгин³⁾, В. В. Моисеев⁴⁾,
В. В. Мочалов^{1,4)}, М. Б. Нурушева¹⁾, П. А. Семенов^{1,4)}

Поступила в редакцию 30.08.2024 г.; после доработки 30.08.2024 г.; принята к публикации 07.09.2024 г.

Обсуждается исследование спиновых эффектов в упругом протон-протонном и антипротон-протонном рассеянии в эксперименте СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 (НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, Протвино). Для измерения анализирующей способности A_N упругого рассеяния протонов и антипротонов будут использоваться поляризованные пучки или поляризованная мишень эксперимента. Анализируется возможность использовать два различных детектора для регистрации частиц отдачи упругого рассеяния протонов. В первом случае предполагается использовать сцинтилляционные счетчики, второй вариант – детектор на основе пропорциональных камер. Проведено сравнение эффективности регистрации упругого pp -рассеяния для двух конфигураций экспериментальной установки, и определено необходимое время измерения.

DOI: 10.31857/S0044002724060093, EDN: HOYNVB

1. ВВЕДЕНИЕ

На крупнейшем ускорительном комплексе России У-70 Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” – ИФВЭ (Протвино) подготовлен Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ (СПиновые АСимметрии в рождении ЧАРМония) [1]. Сочетание широкого спектра пучков и мишеней с возможностью одновременной регистрации заряженных и нейтральных частиц в конечных состояниях реакций позволяет осуществлять широкую программу экспериментальных исследований.

Поляризация в упругом pp -рассеянии в области кулон-ядерной интерференции измерялась на ускорителе RHIC в BNL для нескольких значений импульса пучка [2–4], в том числе и в нескольких точках рабочего интервала импульсов СПАСЧАРМ. Асимметрия A_N достигает значения ~ 4.0 – 4.5% при $-t = 0.003$ (ГэВ/с)², а среднее значение, взвешенное с сечением на интервале $0.002 < -t < 0.05$ (ГэВ/с)², примерно 3%. Таким образом, для достижения 5% относительной погрешности в измерении анализирующей способности сама асимметрия A_N должна быть измерена с точностью 0.15%.

Универсальный канал 24А (рис. 1) [5] на ускорительном комплексе У-70 позволит проводить изучение спиновых эффектов на различных пучках, в том числе во взаимодействиях поляризованных протонов и антипротонов с нуклонами и ядрами. Эксперимент СПАСЧАРМ требует создания системы измерения

поляризации пучка [6]. Одним из стандартных способов является измерение односпиновой асимметрии A_N в упругих реакциях [7]. Таким образом, уже на первом этапе эксперимента необходимо подготовить установку к изучению спиновых эффектов в упругих реакциях.

На первом этапе эксперимента планируется провести измерения асимметрии при энергии 45 ГэВ, чтобы подтвердить правильность расчетов канала и сравнить полученные результаты с существующими. Измерения анализирующей способности A_N (или поляризации P) в кинематической области $0.04 < -t < 0.525$ (ГэВ/с)² и импульсе 45 ГэВ/с на ускорительном комплексе У-70 ИФВЭ были проведены в эксперименте ГЕРА [8]. Результаты измерений из данной статьи приведены на рис. 2.

Ранее было оценено время, необходимое для поляриметрии при энергии 45 ГэВ, чтобы сравнить значение асимметрии с полученными ранее данными [9].

В настоящей работе оценка точности измерения приведена для реальной геометрии выбранного детектора и для энергии 16 ГэВ – общей энергии, при которой возможно измерение односпиновой асимметрии упругого рассеяния как на пучке протонов, так и антипротонов.

2. МОНТЕ-КАРЛО-МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Для определения возможности выделения упругих протон-протонных взаимодействий проведено Монте-Карло-моделирование, основными задачами которого были оценка уровня превышения сигнала над фоновыми событиями и выбор оптимальной конфигурации детекторов, чтобы получить макси-

¹⁾ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

²⁾ Школа Сотрудничества, Москва, Россия.

³⁾ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

⁴⁾ НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, Протвино, Россия.

* E-mail: bogdanov411@mail.ru

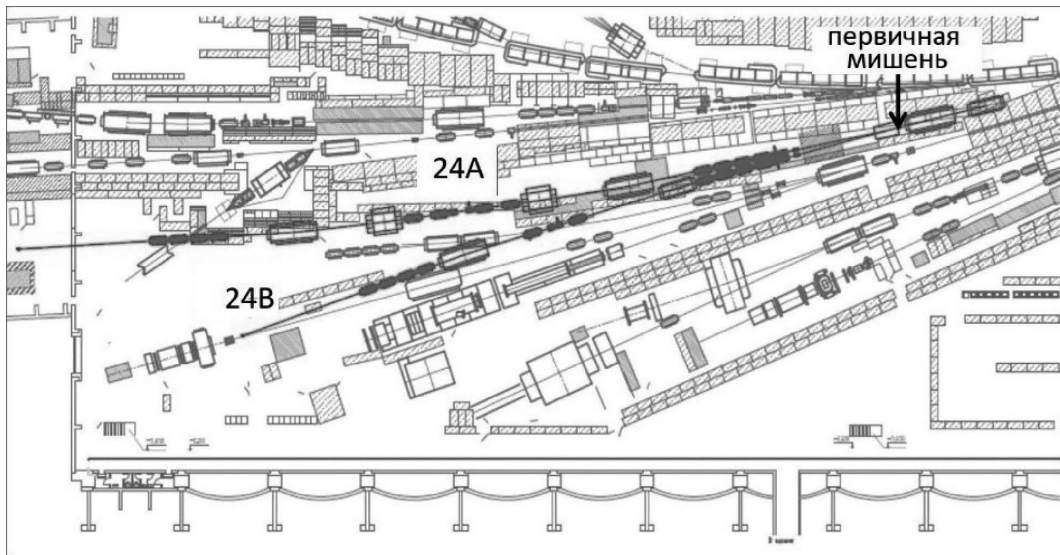


Рис. 1. Схема канала 24А поляризованных протонов и антипротонов на ускорительном комплексе У-70.

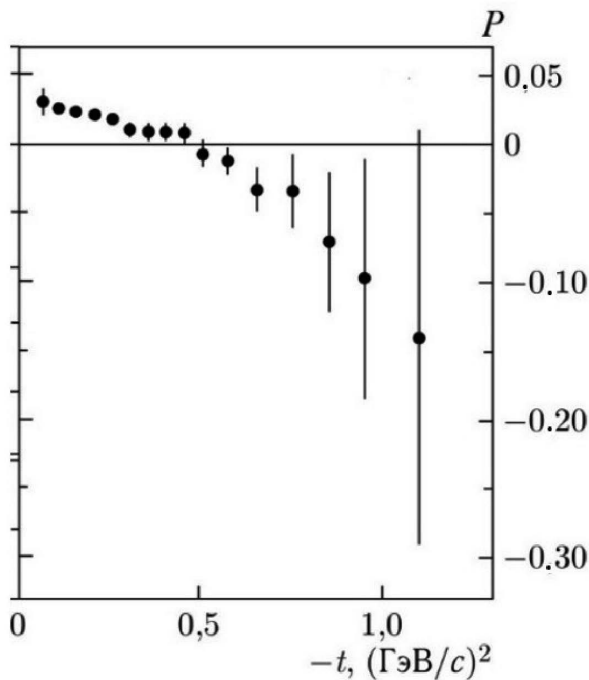


Рис. 2. Поляризация в упругом pp -рассеянии при импульсе 45 ГэВ/с.

мальную эффективность регистрации. Моделирование проводилось с учетом реальных материалов и разрешающей способности детекторов экспериментальной установки и параметров пучка [10].

Отношение сигнала к фону получено для взаимодействия протонов при импульсе налетающего протона в 16 ГэВ/с. Образовавшиеся частицы трассировались через детекторы экспериментальной установки с использованием программного пакета СПАСЧАРМ-root, основанного на пакете PANDARoot [11]. В каче-

стве основного фона для упругих событий рассматривались дифракционные и дважды дифракционные процессы, в которых только две заряженных частицы попадают в детектор. Другие неупругие события легко подавляются условием, что должно быть зарегистрировано не более двух частиц.

Экспериментальная установка состоит из переднего детектора и детектора отдачи для регистрации рассеянной частицы и протона отдачи соответственно. В качестве переднего детектора рассматриваются два годоскопа из сцинтилляционных счетчиков сечением в форме квадрата $2 \times 2 \text{ мм}^2$ общим размером $15 \times 15 \text{ см}^2$, расположенные на расстояниях 85 и 285 см от центра мишени. Передний детектор (кроме его геометрических размеров) практически не влияет на эффективность регистрации, однако необходим для отбора упругих событий. В качестве детектора отдачи первоначально также рассматривался детектор на основе сцинтилляционных счетчиков, который позднее был заменен на пропорциональные камеры из-за того, что эффективность регистрации с их использованием более чем в 2 раза выше (см. рис. 3), так как протоны с малыми импульсами поглощаются в веществе детектора.

Для отбора событий и анализа данных рассматривались только данные с использованием пропорциональных камер в качестве детектора. В качестве таких камер (и для описания вещества и разрешения) предполагается использовать камеры размером $40 \times 70 \text{ см}^2$ с шагом 2 мм, аналогичные разработанным для эксперимента ВЕС [12], расположенные на расстоянии 30 и 60 см от центра мишени.

Для выделения упругих событий использовался отбор по зависимости произведения тангенсов полярных углов $\text{tg}(\theta_{\text{scat}}) \times \text{tg}(\theta_{\text{rec}})$ протонов отдачи (recoil) и рассеяния (scattered) от разницы азимутальных уг-

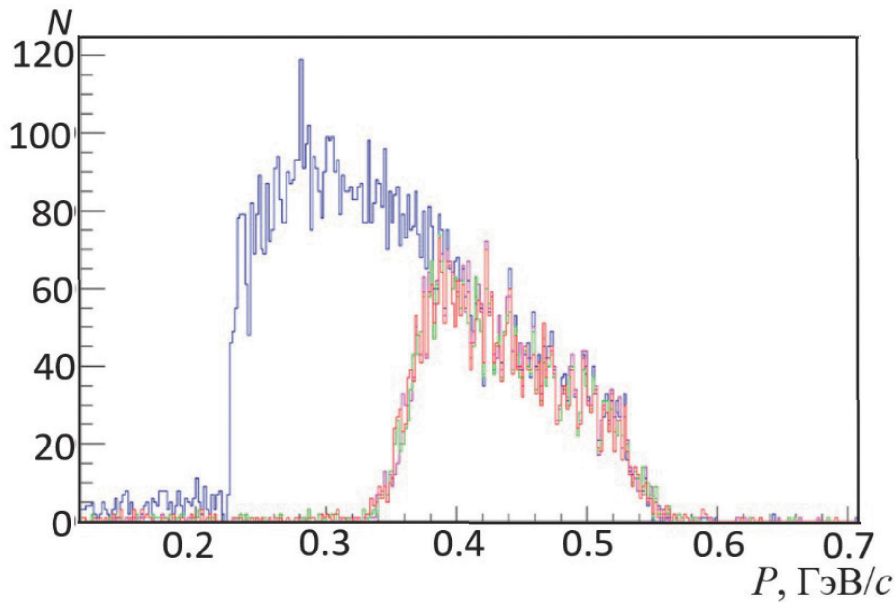


Рис. 3. Количество реконструированных протонов в детекторе отдачи для пропорциональных камер (синий цвет) и сцинтилляционного детектора.

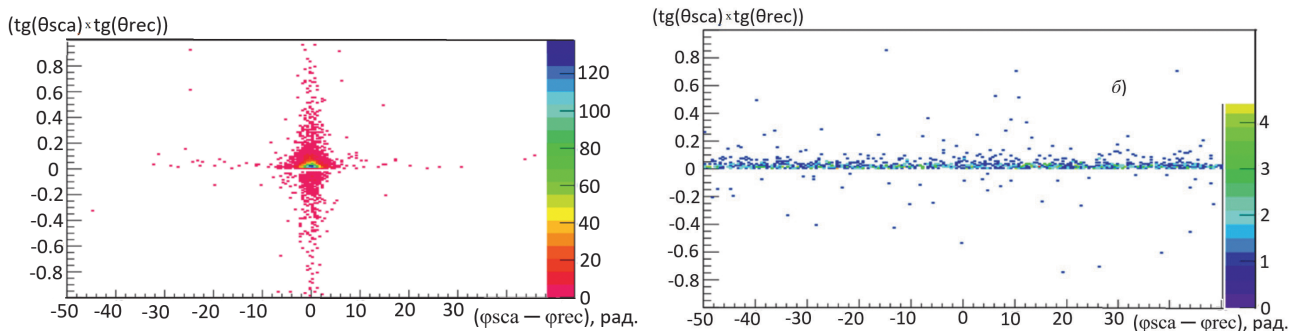


Рис. 4. Количество реконструированных протонов в зависимости от углов рассеяния и произведения тангенсов для упругих (а) и дифракционных (б) событий.

лов протонов отдачи φ_{rec} и рассеяния φ_{scat} . На рис. 4 приведены двумерные распределения для упругих (а) и дифракционных (б) событий. При реалистическом моделировании (при учете вещества в эксперименте) в упругих взаимодействиях появляются реконструированные события, в которых произведение тангенсов отрицательно, что обусловлено многократным рассеянием, такие события в анализе считаются фоновыми.

В эксперименте предлагается отбирать упругие события в области $0.0 < \text{tg}(\theta_{scat}) \times \text{tg}(\theta_{rec}) < 0.2$ и $-4.0^\circ < (\varphi_{scat} - \varphi_{rec}) < 4.0^\circ$. На рис. 5 показаны распределения по импульсу протонов отдачи (а) и протонов рассеяния (б) после отбора событий.

Использование указанного критерия отбора позволяет регистрировать практически одни упругие события — отношение сигнала к сумме сигнальных и фоновых событий $S/(S+B)$ составляет 0.99, таким образом, для оценки точности измерения и необходимого времени отбора вкладом от неупругих событий можно пренебречь.

3. ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для оценки необходимого времени использовались результаты работы [13], в соответствии с которыми сечения упругого рассеяния протон-протонного и антипротон-протонного рассеяния совпадают и при 16 ГэВ/с равны $d\sigma/dt = (3.77 \pm 0.16) \times 10^{-27} \text{ см}^2/(\text{ГэВ}/c)^2$ при $t = 0.3 (\text{ГэВ}/c)^2$. Оценка необходимого времени проводилась для измерения анализирующей способности с использованием неполяризованного пучка антипротонов и поляризованной мишени.

Оценка светимости $L = vIN_A\rho l$ ($v = 0.1$ — скважность пучка, определяемая как количество циклов в секунду, I — интенсивность пучка в цикле, $N_A = 6 \times 10^{23}$ — число Авогадро, ρ — плотность мишени, l — длина мишени) проведена для интенсивности $I = 10^5 \bar{p}/\text{цикл}$ (доля неполяризованных антипротонов в пучке). Для поляризованной мишени из пропандиола, используемой в эксперимен-

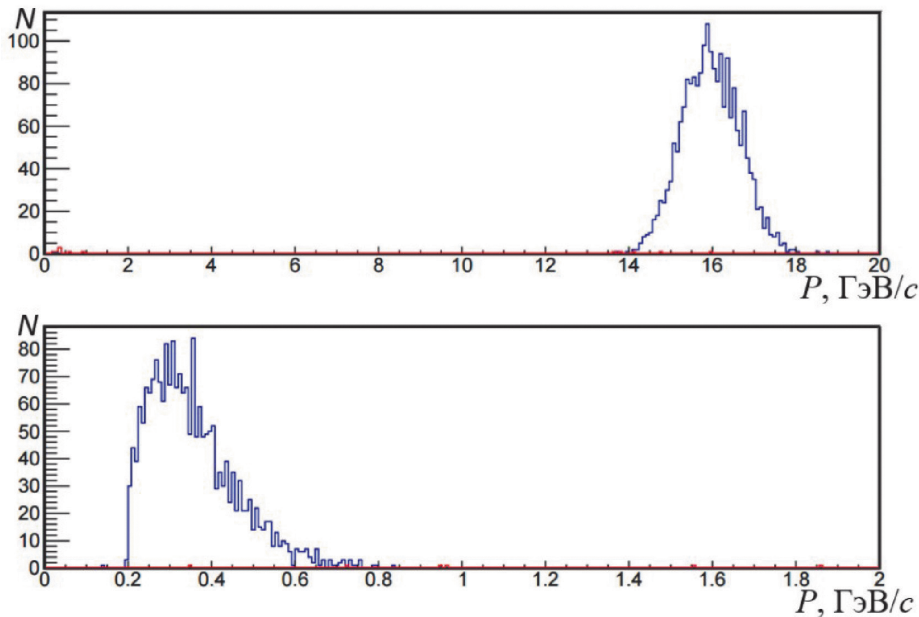


Рис. 5. Распределение по импульсу протонов рассеяния и протонов отдачи после отбора, синее распределение – все протоны, красное – только неупругие.

те СПАСЧАРМ, плотность атомов водорода $\rho_T = 0.094 \text{ г/см}^3$, $l = 20 \text{ см}$, соответственно, светимость $L \sim 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для жидководородной мишени плотностью $\rho = 0.07 \text{ г/см}^3$ и длине мишени $l = 50 \text{ см}$ светимость с поляризованным пучком антипротонов составит $\sim 6 \times 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Общее ожидаемое количество событий $N(t_0) = L d\sigma/dt(t_0) \Delta t \Delta\varphi/\varphi$ при среднем значении $t_0 = 0.3 \text{ (ГэВ/с)}^2$ для интервала $\Delta t = 0.3 \text{ (ГэВ/с)}^2$, с азимутальным аксептансом $\Delta\varphi/\varphi = 0.17$ (при использовании двухплечевого спектрометра), за 1 ч работы ускорителя на водородной мишени составит $6 \times 10^{28} \times 3.77 \times 10^{-27} \times 0.3 \times 0.17 \times 3.6 \times 10^3 = 4.2 \times 10^4$ антипротонов/час и в 6 раз меньше на поляризованной мишени. Для измерения асимметрии с относительной точностью 5% (для оценки взято значение асимметрии 5.8% из работы [14]) требуется статистика $N \sim 7.5 \times 10^5$ частиц. Таким образом, для измерения анализирующей способности в антипротон-протонном рассеянии с поляризованным пучком и неполяризованной мишени требуется около 20 ч, а с поляризованной мишенью и неполяризованным пучком – в 1.5 раза больше.

Для измерения A_N на пучке протонов требуется в 3–4 раза меньше времени, так как используемая интенсивность пучка выше.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках подготовки эксперимента СПАСЧАРМ на канале поляризованных протонов и антипротонов выполнено реалистическое моделирование методом Монте-Карло для исследования возможности (и точности) измерения упругих реакций при 16 ГэВ/с.

Проведенное моделирование продемонстрировало возможность измерения анализирующей способности с требуемой точностью при импульсе пучка 16 ГэВ/с. Использование пропорциональных камер вместо стандартных для таких измерений сцинтилляционных годоскопов позволяет в 3 раза увеличить эффективность регистрации, при этом увеличение эффективности регистрации происходит за счет регистрации протонов отдачи в области малых импульсов, в которой анализирующая способность больше.

Анализирующая способность может быть измерена как в pp , так и в $\bar{p}p$ упругом рассеянии. Относительная точность измерения 5% может быть достигнута за 5–6 ч для p -рассеяния и за 1–2 сут в $\bar{p}p$ -рассеянии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в НИЦ КИ–ИФВЭ при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00164). Работа сотрудников НИЯУ “МИФИ” поддержана и частично профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ, проект “Новые явления в физике элементарных частиц и ранней Вселенной” № FSWU-2023-0073.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. V. Abramov, I. L. Azhgirey, A. A. Borisov, S. I. Bukreeva, A. N. Vasiliev, V. I. Garkusha, Yu. M. Goncharenko, A. M. Gorin, A. A. Derevshchikov, V. N. Zapolsky, A. N. Isaev, N. K. Kalugin, V. A. Kachanov,

- A. S. Kozhin, A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky, et al., *Phys. Part. Nucl.* **54**, 69 (2023), doi: 10.1134/S1063779623010021
2. A. Bazilevsky, I. Alekseev, E. Aschenauer, G. Atoyan, A. Bravar, G. Bunce, K. Boyle, R. Gill, H. Huang, S. Lee, Y. Makdisi, B. Morozov, I. Nakagawa, H. Okada, D. Svirida, and A. Zelenski, *J. Phys.: Conf. Ser.* **295**, 012096 (2011), doi: 10.1088/1742-6596/295/1/012096
 3. I. G. Alekseev, A. Bravar, G. Bunce, S. Dhawan, K. O. Eyster, R. Gill, W. Haerberli, H. Huang, O. Jinnouchi, A. Kponou, Y. Makdisi, I. Nakagawa, A. Nass, H. Okada, N. Saito, E. J. Stephenson, et al., *Phys. Rev. D* **79**, 094014 (2009), doi: 10.1103/PhysRevD.79.094014
 4. STAR Collab. (L. Adamczyk, G. Agakishiev, M. M. Aggarwal, Z. Ahammed, A. V. Alakhverdyants, I. Alekseev, J. Alford, C. D. Anson, D. Arkhipkin, E. Aschenauer, G. S. Averichev, J. Balewski, A. Banerjee, Z. Barnovska, D. R. Beavis, R. Bellwied, et al.), *Phys. Lett. B* **719**, 62 (2013), doi: 10.1016/j.physletb.2013.01.014
 5. V. V. Abramov, I. L. Azhgirey, V. I. Garkusha, V. P. Kartashev, V. V. Mochalov, S. B. Nurushev, V. L. Rykov, P. A. Semenov, A. N. Vasiliev, V. N. Zapolsky, and V. G. Zarucheisky, *Nucl. Instrum. Methods A* **901**, 62 (2018), doi: 10.1016/j.nima.2018.05.050
 6. A. A. Bogdanov, M. A. Chetvertkov, V. A. Chetvertkova, B. I. Garkusha, A. P. Meshchanin, V. V. Mochalov, M. B. Nurusheva, S. B. Nurushev, V. L. Rykov, M. F. Runzo, P. A. Semenov, M. N. Strikhanov, A. N. Vasiliev, and V. N. Zapolsky, *J. Phys.: Conf. Ser.* **798**, 012179 (2017), doi: 10.1088/1742-6596/798/1/012179
 7. A. A. Bogdanov, M. A. Chetvertkov, V. A. Chetvertkova, V. I. Garkusha, A. P. Meshchanin, V. V. Mochalov, M. B. Nurusheva, S. B. Nurushev, A. V. Ridiger, V. L. Rykov, P. A. Semenov, M. N. Strikhanov, A. N. Vasiliev, and V. N. Zapolsky, *J. Phys.: Conf. Ser.* **678**, 012034 (2016), doi: 10.1088/1742-6596/678/1/012034
 8. A. Gaidot, C. Bruneton, J. Bystricky, G. Cozzika, J. Deregél, A. Derevschikov, Y. Ducros, Yu. M. Kazarinov, M. Yu. Kazarinov, V. P. Kanavets, F. Khantine-Langlois, B. Khatchaturov, F. Lehar, A. De Lesquen, Yu. Matulenko, J. P. Merlo, et al., *Phys. Lett. B* **61**, 103 (1976), doi: 10.1016/0370-2693(76)90574-8
 9. P. A. Semenov, A. A. Bogdanov, S. I. Bukreeva, M. A. Chetvertkov, V. A. Chetvertkova, V. I. Garkusha, A. P. Meshchanin, V. V. Mochalov, S. B. Nurushev, M. B. Nurusheva, M. F. Runzo, A. V. Ridiger, V. L. Rykov, S. V. Ryzhikov, M. N. Strikhanov, A. N. Vasiliev, and V. N. Zapolsky, *Int. J. Mod. Phys.: Conf. Ser.* **40**, 1660086 (2016), DOI: 10.1142/S2010194516600867
 10. V. V. Abramov, A. A. Bogdanov, M. A. Chetvertkov, V. A. Chetvertkova, V. V. Mochalov, V. V. Moiseev, K. D. Novikov, S. B. Nurushev, M. B. Nurusheva, V. A. Okorokov, P. A. Semenov, M. N. Strikhanov, and A. N. Vasiliev, *J. Phys.: Conf. Ser.* **938**, 012006 (2017), doi: 10.1088/1742-6596/938/1/012006
 11. Stefano Spataro (for the PANDA Collab.), *J. Phys.: Conf. Ser.* **331**, 032031 (2011), doi: 10.1088/1742-6596/331/3/032031
 12. Д. П. Еремеев, А. В. Ивашин, В. Д. Матвеев, Е. В. Назаров, Ю. А. Хохлов, Е. В. Чернов, А. А. Шумаков, Препринт ИФВЭ 2024-3 (2024), <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2024/ps/2024-3.pdf>
 13. Yu. M. Antipov, V. A. Bezzubov, Yu. P. Gorin, S. P. Denisov, F. A. Ech, A. A. Lebedev, A. I. Petrukhin, S. A. Polovnikov, V. N. Roinishvili, and D. A. Stoyanova, Preprint ИФЭП 76-95 (1976).
 14. M. Corcoran, S. C. Ems, S. W. Gray, R. M. Lepore, H. A. Neal, H. A. Ogren, R. O. Polvado, D. R. Rust, J. R. Sauer, and G. A. Walters, *Phys. Rev. D* **22**, 2624 (1980), doi: 10.1103/PhysRevD.22.2624

MEASUREMENT OF THE ANALYZING POWER OF pp AND $\bar{p}p$ ELASTIC SCATTERING AT THE SPASCHARM FACILITY AT U-70

A. A. Bogdanov^{1),2)}, V. P. Ladygin³⁾, V. V. Moiseev⁴⁾,
V. V. Mochalov^{1),4)}, M. B. Nurusheva¹⁾, P. A. Semenov^{1),4)}

¹⁾*National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia*

²⁾*School of Cooperation, Moscow, Russia*

³⁾*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

⁴⁾*NRC “Kurchatov institute” – IHEP, Protvino, Russia*

The study of spin effects in elastic proton-proton and antiproton-proton scattering in the SPASCHARM experiment at U-70 accelerator facility (NRC “Kurchatov institute” – IHEP, Protvino) is discussed. Polarized beams or a polarized target of the experiment will be used to measure the analyzing power A_N of elastic scattering of protons and antiprotons. The possibility of using two different types of the detectors to register recoil particles of elastic scattering of protons is analyzed. In the first case, it is proposed to use scintillation counters, the second option is a detector based on proportional chambers. A comparison of the registration efficiency of elastic pp -scattering for two configurations of the experimental setup is carried out, and the required measurement time is determined.