

УДК 539.1.074.3:539.1.074.6

ПРОТОННАЯ И ДЕЙТРОННАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ НУКЛОТРОН–НИКА

© 2023 г. А. А. Терехин¹, *, В. П. Ладыгин¹, А. Ю. Исупов¹, И. С. Волков¹, С. Г. Резников¹,
Ю. В. Гурчин¹, А. В. Тишевский¹, К. С. Легостаева¹

¹Международная межправительственная организация “Объединенный институт ядерных исследований”,
лаборатория информационных технологий, Дубна, Россия

*E-mail: aterekhin@jinr.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Представлены результаты реализации программы модернизации существующего поляриметра и обсуждается дальнейшее развитие поляриметрии встречных пучков на коллайдере НИКА. Накоплен большой опыт в измерениях поляризации пучков протонов и дейтронов на Станции внутренних мишеней Нуклотрона, а также в моделировании процессов упругих pp -, dp - и pd -столкновений при энергиях до 1 ГэВ/нуклон. Продемонстрированы первые результаты моделирования dd -упругого рассеяния при полной энергии 4.22 ГэВ.

DOI: 10.31857/S0367676523702071, EDN: ZCGOUX

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению реакций с участием дейтрона уже много десятилетий привлекает внимание теоретиков и экспериментаторов. Несмотря на значительный накопленный материал в этой области, структура дейтрона остается до конца неизученной. Станция внутренних мишеней Нуклотрона ОИЯИ позволяет одновременно проводить поляризационные измерения в широком диапазоне углов. За последние годы была проведена серия измерений как с неполяризованными, так и с поляризованными пучками дейтронов. Были получены данные по дифференциальному сечению и анализирующим способностям dp -упругого рассеяния в энергетическом диапазоне налетающего пучка 500–2000 МэВ. Также была оценена протонная поляризация для квазиупругого pp -рассеяния. Коллайдер НИКА позволит исследовать широкий круг спин-зависимых явлений в адронных столкновениях (в частности, исследовать поляризованную глюонную структуру протона и дейтрона). Для этих целей изготавливается SPD-детектор (Spin Physics Detector), который будет расположен в одном из двух мест пересечений встречных пучков коллайдера.

В данной статье представлены текущие результаты по модернизации поляриметра на Станции внутренних мишеней Нуклотрона, дается описание нового детекторного аппарата, механики для размещения счетчиков, приводятся результаты первых тестовых измерений. Также приводятся

первые результаты моделирования dd -упругого рассеяния при полной энергии $\sqrt{s} = 4.22$ ГэВ.

ПОЛЯРИМЕТР НУКЛОТРОНА

Реализация поставленных экспериментальных программ требует тщательной подготовки, разработки и изготовления детекторной базы. Результаты последних измерений на Станции внутренних мишеней [1–3] показали возможность расширения области применения существующего поляриметра. Планируется проведение измерений с пучками поляризованных протонов при энергиях до 1 ГэВ включительно. Для этого необходима существенная модернизация всей детекторной аппаратуры, а также механики поляриметра. Были предложены схемы размещения детекторов для исследования pp - и pd -упругого рассеяния. С помощью моделирования на основе генератора событий Pluto [4] были рассчитаны оптимальные размеры новых детекторов, их количество и расстояние до мишени [5]. Разработаны три типа новых сцинтилляционных счетчиков с размерами сцинтилляторов $2.3 \times 2 \times 2$, $2.3 \times 2 \times 6$ и $3.5 \times 2 \times 6$ см³. Данные величины подбирались исходя из условий наибольшей эффективности работы поляриметра [3]. При моделировании использовались экспериментальные угловые зависимости дифференциального сечения при заданной энергии [6–8] и данные из базы SAID [9]. Также учитывались такие условия эксперимента

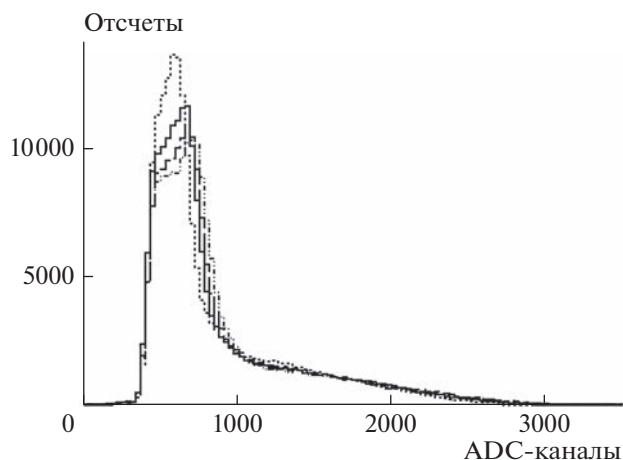


Рис. 1. Амплитудные спектры с нескольких детекторов, полученные от радиоактивного источника ^{106}Ru .

как неопределенность положения пучка и погрешность расположения счетчиков. Для исследования pp - и pd -реакций был предложен набор из 42 и 80 детекторов соответственно. Такое количество позволит разместить счетчики через каждые 5 градусов в с.ц.м., охватив угловые диапазоны для pp -рассеяния от 40 (30 — для случая pd -рассеяния) до 90 (125) градусов в с.ц.м. Результаты моделирования показали, что при подобранных размерах эффективная площадь S_{eff} детекторов будет составлять от 80% до 95% от их геометрических размеров. Отличие составляет ситуация с углами рассеяния свыше 65° в с.ц.м. для pd -реакции, где величина S_{eff} снижается до 50%. Для этой области углов был предложен дополнительный набор детектор с увеличенными размерами сцинтиллятора, который позволит увеличить значение эффективной площади до 80%. Полученные нормированные угловые зависимости генерированных событий отражают поведение экспериментальных данных по дифференциальному сечению, что свидетельствует о правильности проведенного моделирования.

Для размещения детекторов необходимо спроектировать и изготовить новую механику, обеспечивающую надежное крепление и эффективное размещение большого количества счетчиков. Была предложена двухуровневая система, состоящая из дюралевых плоскостей, совмещаемых друг с другом посредством конусных штифтов. Детекторы будут размещаться вертикально в два ряда в специальных прорезях, позволяющих перемещать счетчики вдоль выбранного радиуса относительно точки взаимодействия пучка с мишенью. Наиболее эффективные значения расстояния от точки взаимодействия до детекторов составляют 530, 560, 590 и 620 мм. В этом случае вся установка будет отвечать требованиям компактности и, в

то же время, позволит беспрепятственно установить большое количество детекторов. Разработанная механика должна будет предусматривать возможность размещения прежде использовавшихся счетчиков, предназначенных для регистрации dp -упругого рассеяния. Данные счетчики будут размещаться на первом уровне, так как и счетчики для регистрации pp -упругого рассеяния. Второй уровень предусмотрен для размещения части детекторов, предназначенных для регистрации продуктов pd -упругого рассеяния. Их количество существенно больше предыдущих детекторов, кроме того, отсутствуют кинематические ограничения на угол рассеяния в лабораторной системе координат, как в случае dp -упругого рассеяния. Следствием этого является увеличенный размер верхнего уровня механики, который позволит разместить детекторы на угол рассеяния θ_{lab} свыше 90° . Данный уровень будет использоваться в экспериментах по исследованию pd -рассеяния и будет оснащен откидным механизмом для его крепления к вертикальной плоскости относительно ионопровода в случае экспериментов по изучению dp - и pp -рассеяний.

К настоящему времени на базе фотоумножителей Hamamatsu H7415 изготовлены и протестированы с помощью радиоактивного источника около 60 новых детекторов. Сигналы отслеживались на экране осциллографа, после чего записывались в файл с помощью специально разработанной системы сбора данных. Были получены амплитудные спектры с каждого счетчика. Высоковольтное напряжение подбиралось таким образом, чтобы формы сигналов от радиоактивного источника для всех счетчиков были равны между собой (рис. 1).

ПРОТОТИП ПУЧКОВОГО СЧЕТЧИКА SPD

Другой установкой для проведения поляризованных экспериментов на ускорительном комплексе Нуклотрон–НИКА является SPD-детектор, который создается как универсальная установка для комплексного изучения глюонов в протонах и дейтронах при энергиях в с.ц.м. до 27 ГэВ и светимости $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Это сложная система, включающая в себя вершинный и строу детекторы, мюонные камеры, времяпролетную систему и др. Одной из составляющих его компонент будет пара пучковых счетчиков BBC (beam-beam counter), предназначенных для контроля локальной поляриметрии [10]. В текущей версии каждый BBC детектор будет состоять из около 100 сцинтилляционных трапециевидных модулей, иметь поперечный размер 169 см и располагаться на расстоянии 172 см от центра взаимодействия. 16 модулей, распложенные на одинаковом

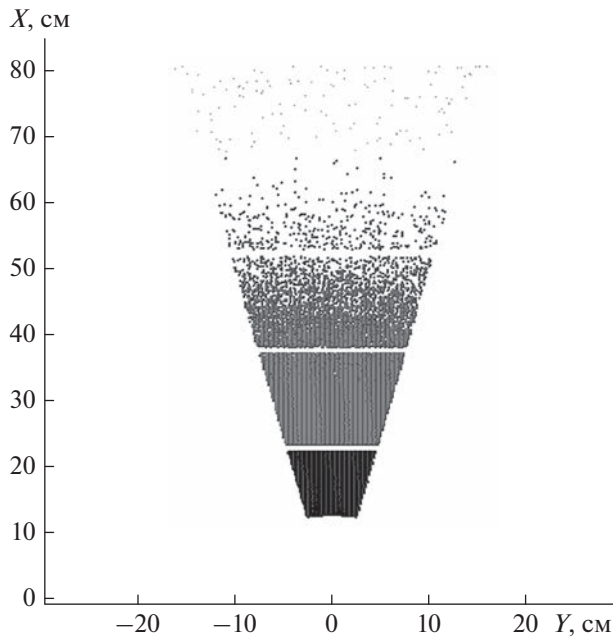


Рис. 2. Распределение моделированных событий по отдельным секторам пучкового счетчика.

радиусе образуют один кольцевой сектор. Весь детектор состоит из шести секторов. Предполагается размещение двух идентичных детекторов по обе стороны относительно точки взаимодействия вдоль оси пучков. Положение центра взаимодействия может варьироваться в пределах ± 30 см по направлению вдоль оси пучка. В данной конфигурации максимальный угол рассеяния, при котором частицы могут попасть в детектор, составляет 30° , а один и тот же угол рассеяния может соответствовать разным модулям. Максимально удаленный от центра детектора модуль может охватывать угловой диапазон от 20° до 30° .

Прототип ВВС детектора может быть использован на первом этапе поляризационной программы на NICA без SPD. Для такой конфигурации было проведено моделирование dd -упругого рассеяния при полной энергии $\sqrt{s} = 4.22$ ГэВ, что соответствует кинетической энергии сталкивающихся пучков $T = 1$ ГэВ. В качестве входных данных по угловой зависимости дифференциального сечения использовались результаты экспериментов [11]. Для данной реакции импульсные зависимости сечения существуют при энергиях до 6.5 ГэВ. Для всех данных можно подобрать аппроксимирующую функцию, состоящую из экспоненциальной и Гауссовой компоненты. Используя эту функцию, можно получить величину интегрального сечения в интересующем диапазоне импульса или угла рассеяния. Положение центра взаимодействия определялось генератором случайных чисел с равномерным распределением. Были

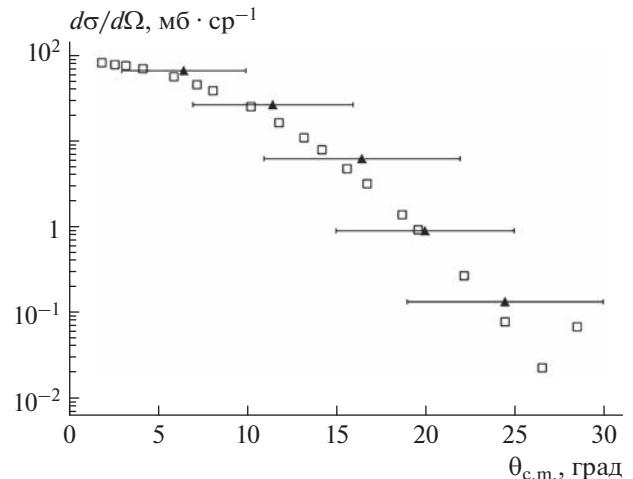


Рис. 3. Угловая зависимость нормированных моделированных событий в соответствии с поведением дифференциального сечения dd -упругого рассеяния при полной энергии $\sqrt{s} = 4.22$ ГэВ. Сплошные треугольники — результаты моделирования, квадраты — данные [10].

получены распределения $3 \cdot 10^6$ сгенерированных событий в зависимости от угла рассеяния и расстояния от оси пучка в плоскости, перпендикулярной плоскости кольца ускорителя. Данные распределения были получены для дейтронов, рассеянных как вперед, так и назад. С удалением от оси пучка количество частиц, попадающих в детектор, уменьшается согласно поведению сечения реакции. В задачи моделирования входила оценка загрузки каждого из секторов ВВС при минимальной планируемой светимости $10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Для этой цели вычислялось количество частиц в каждом секторе, нормируемое на полное сечение реакции в исследуемом диапазоне углов рассеяния. Таким образом оценивалось количество попадающих в секунду частиц. На рис. 2 представлено распределение моделированных событий по отдельным секторам ВВС. Также была получена угловая зависимость нормированных событий в соответствии с поведением дифференциального сечения dd -упругого рассеяния. Результат представлен на рис. 3. Нормированные выходы событий для каждого сектора показаны треугольниками. Размеры погрешностей по оси $\theta_{\text{ц.м.}}$ соответствуют координатным размерам секторов детектора. Перекрытия связаны с наличием неопределенности положения точки взаимодействия относительно расстояния до детектора, в связи с чем один и тот же угол рассеяния может соответствовать разным секторам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема модернизации поляриметра Станции внутренних мишеней Нуклотрона с целью измерения поляризации пучка протонов. Изготовлены и протестированы около 60 новых детекторов.

Проведено моделирование dd -упругого рассеяния при энергии $\sqrt{s} = 4.22$ ГэВ на уровне генератора событий с учетом особенностей конструкции и расположения прототипа пучкового счетчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ladygin V.P., Averyanov A.V., Chernykh E.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1435. Art. No. 012039.
2. Ladygin V.P., Isupov A.Yu., Janek M. et al. // PoS SPIN2018. 2019. P. 150.
3. Terekhin A.A., Ladygin V.P., Gurchin Yu.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1435. 012051.
4. Froehlich I., Dohrmann F., Galatyuk T. et al. // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 45. P. 401.
5. Terekhin A.A., Gurchin Yu.V., Isupov A.Yu. et al. // AIP Conf. Proc. 2021. V. 2377. Art. No. 030016.
6. Ermish K., Amir-Ahmadi H.R., van den Berg A.M. et al. // Phys. Rev. C. 2003. V. 68. 051001.
7. Vincent J.S., Roberts W.K., Boschitz E.T. et al. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24. No. 5. P. 236.
8. Bennet G.W., Friedes J.L., Palevsky H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. P. 387.
9. <http://gwdac.phys.gwu.edu>.
10. Goshaw A.T., Oddone P.J., Bazin M.J., Sun C.R. // Phys. Rev. Lett. 197. V. 25. P. 249.
11. Abazov V.M. et al. (SPD proto Collaboration) // ArXiv: 2102.00442. 2021.

Proton and deuteron polarimetry at Nuclotron—NICA

A. A. Terekhin^{a, *}, V. P. Ladygin^a, A. Y. Isupov^a, I. S. Volkov^a, S. G. Reznikov^a,
Y. V. Gurchin^a, A. V. Tishevsky^a, K. S. Legostaeva^a

^a Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

*e-mail: aterekhin@jinr.ru

Extensive experience has been accumulated in deuteron and proton beam polarization measurements as well as in the simulation of the pp -, pd - and dp -elastic scattering up to 1 GeV/nucleon for polarimeter upgrade at the Nuclotron Internal Target Station. Further development of the pp -, pd - and dd -colliding beams polarimetry at NICA is discussed. The first results of the simulation of dd -elastic scattering at the total energy 4.22 GeV are presented.