

МОДЕЛИРОВАНИЕ pp - И dd -РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ПУЧКОВОГО СЧЕТЧИКА ВВС ДЕТЕКТОРА SPD

А. А. Терехин^{1,*}, В. П. Ладыгин¹, И. С. Волков¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Представлены результаты моделирования протон-протонного и дейтрон-дейтронного рассеяния при значениях полной энергии столкновения $\sqrt{s} = 6$ и 10 ГэВ, полученные в рамках программного пакета SPDRoot. Обсуждается возможность отбора pp - и dd -упругих событий с использованием пучковых счетчиков путем моделирования процессов упругого и неупругого рассеяния. Сравниваются результаты, полученные с помощью двух генераторов событий, FRITIOF и Pythia8. Моделирование показывает, что вклад фоновых событий возрастает с ростом энергии. Для максимальной рассмотренной энергии приемлемый уровень фона может быть достигнут только для центральных колец.

The results of simulation of proton–proton and deuteron–deuteron scattering at total collision energies of $\sqrt{s} = 6$ and 10 GeV in the SPDRoot framework are presented. Based on the simulation of elastic and inelastic scattering processes, the possibility of selecting the pp and dd elastic scattering events using beam–beam counters is discussed. The results for the two well-known event generators, FRITIOF and Pythia8, are compared. The simulation shows that the background contribution increases with increasing energy. For the maximum considered energy, the acceptable background level can be achieved only for the central rings.

PACS: 25.40.Cm; 25.45.De

ВВЕДЕНИЕ

Активно развивающийся в последние годы проект NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1] позволит проводить передовые исследования в области физики частиц, такие как поиск и изучение новых состояний барионной материи, давать объяснение причины связанности кварков в нуклонах и др. Ключевым ускорителем этого проекта является сверхпроводящий коллайдер, имеющий две точки пересечения пучков, в которых будут расположены детекторы MPD (Multipurpose Detector) [2] и SPD (Spin Physics Detector) [3]. В частности, SPD-детектор позволит проводить измерения при столкновениях неполяризованных, продольно и поперечно поляризованных пучков протонов и дейтронов. Для реализации этой цели проектируются и разрабатываются

* E-mail: aterekhin@jinr.ru

составные части детектора, конструируются прототипы отдельных счетчиков [4–6], проводится компьютерное моделирование различных процессов столкновения частиц [7–9]. Детектор спиновой физики SPD будет включать набор торцевых и баррельных счетчиков для восстановления треков и вершин, а также идентификации вторичных частиц. Одним из таких составляющих элементов будет пара пучковых счетчиков BBC (Beam–Beam Counter), расположенных с торцов SPD, симметрично относительно его центра. Их функция заключается в обеспечении локальной поляриметрии и контроля светимости сталкивающихся пучков. Каждый модуль BBC представляет собой конструкцию из сцинтилляционных тайлов (сегментов) трапецевидной формы, внутри которых размещено спектросмещающее волокно (WLS), принимающее сигнал и передающее его на кремниевый фотоумножитель (SiPM) [4]. Геометрия счетчика схожа с дизайном детектора, используемого в эксперименте STAR [10], она включает в себя 14 концентрических слоев, разделенных по азимуту на 16 секторов. Такая высокая гранулярность позволит расширить возможности применения BBC в экспериментальной программе SPD.

В статье представлены результаты моделирования работы BBC для процессов протон-протонного и дейтрон-дейтронного столкновений при энергиях в системе центра масс $\sqrt{s} = 6$ и 10 ГэВ.

1. МОНТЕ-КАРЛО-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ BBC SPD

Компьютерное моделирование является неотъемлемой частью в подготовке и проведении экспериментов. Для проектировки SPD-детектора и изучаемых с его помощью процессов разработан специальный пакет SPDRoot [11], базирующийся на программном обеспечении FairSoft и FairRoot. Данная среда предназначена для моделирования по Монте-Карло и анализа экспериментальных данных. Как отмечалось выше, установка SPD будет включать в себя ряд подсистем, позволяющих регистрировать фотоны, адроны, измерять время пролета, восстанавливать треки частиц и пр. Для каждого такого модуля проектируется дизайн и моделируется распространение частиц через вещество детектора. Это позволяет исследовать отклики подсистем в зависимости от энергии пучков, их состава, величины магнитного поля. Таким образом подбирается оптимальная структура и конфигурация всех составляющих частей для лучшей реконструкции треков.

Для моделирования физических процессов в SPDRoot используются генераторы событий Pythia8 [12], FRITIOF [13], UrQMD [14] и др. Для реконструкции распространения частиц в детекторе применяется пакет Geant4. Общий алгоритм выглядит следующим образом. Выбирается конфигурация установки путем добавления или исключения различных модулей (вершинный, мюонный, аэрогельный детекторы, строу-трекер, пучковые счетчики и др.). Задается конфигурация магнитной подсистемы. Определяется генератор первичной вершины. Тип реакции, энергия,

количество событий для генерации прописываются либо непосредственно в общем скрипте, либо в отдельном файле. Сгенерированные события взаимодействия пучков транспортируются через SPD с помощью пакета Geant4. Выходной output-файл сохраняется в формате root. Анализ результатов моделирования происходит путем пособытийной итерации по дереву TTree.

Для пучкового счетчика BBC моделирование выполнялось при полной энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 6$ и 10 ГэВ. В качестве вершинных генераторов использовались Pythia8, FRITIOF и Pluto [15]. Генерировалось 10^6 протон-протонных (pp) и 10^5 дейтрон-дейтронных (dd) столкновений. Неопределенность положения точки взаимодействия определялась равной ± 30 см.

2. ВЫДЕЛЕНИЕ СОБЫТИЙ pp -УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ

Моделирование pp -рассеяния выполнялось с помощью генераторов Pythia8 и FRITIOF. Особый интерес представляет возможность выделения упругого pp -рассеяния. Данный канал взаимодействия можно использовать в целях контроля поляриметрии сталкивающихся пучков. Кроме того, в силу своего большого импульса упругие протоны мало чувствительны к магнитному полю. Ранее был проведен анализ [7], показывающий роль упругого рассеяния при энергиях $\sqrt{s} < 10$ ГэВ. Сравнение анализирующих способностей протонов A_N^{proton} и пионов A_N^{π} [7] показывает, что поведение A_N^{eff} определяется величиной A_N^{proton} . Поэтому выделение упругого канала представляет интерес для оценки его вклада в поведение A_N^{eff} и A_N^{proton} . Для этой цели может быть использована временная информация хитов в кинематически соответствующих тайлах пучковых счетчиков BBC. События упругого pp -рассеяния могут быть предварительно выбраны путем отбора хитов, присутствующих одновременно в обоих BBC. Для этой цели были проанализированы временные спектры для первых пяти слоев. На рис. 1, а представлены загрузки кинематически соответствующих друг другу тайлов первых слоев пучковых счетчиков. Для каждой такой пары строилась разность времен хитов, зарегистрированных в обоих тайлах внутри одного события. Просуммированный результат для всех событий изображен на рис. 1, б.

Данный результат был получен при разных параметрах моделирования. В первом случае время прихода каждого хита фиксировалось без изменений. Во втором случае величина времени размывалась функцией Гаусса с параметром $\sigma = 1$ нс. Данное значение соответствует максимальному временному разрешению, которое суммируется из характеристик материала тайлов, спектросмещающего волокна (WLS) и системы сбора данных [5]. Таким образом, можно приблизить моделирование к условиям эксперимента. Значение $\sigma = 0$ отвечает нулевому разбросу по времени. Соответствующие результаты показаны на рис. 1, б сплошной ($\sigma = 0$) и пунктирной ($\sigma = 1$ нс) гистограммами. Сравнение показывает,

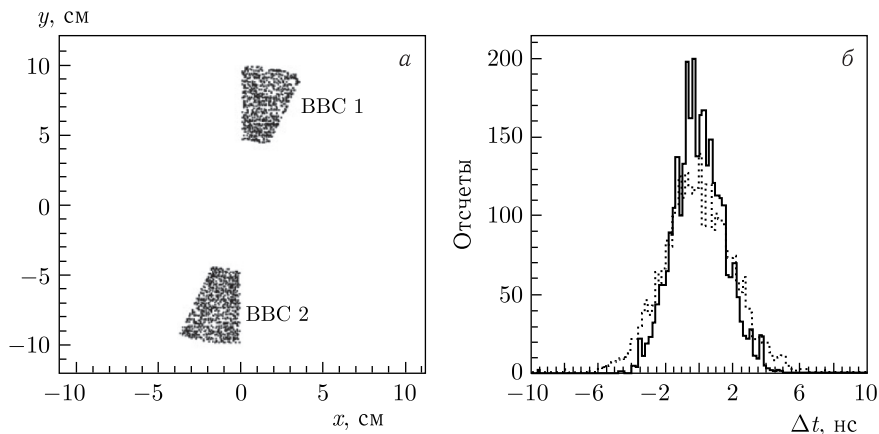


Рис. 1. а) Загрузки кинематически соответствующих друг другу тайлов первых слоев пучковых счетчиков ВВС. б) Разница времен прихода хитов, зарегистрированных в обоих тайлах для каждого события. Сплошной и пунктирной гистограммами обозначены результаты, полученные при значениях $\sigma = 0$ и $\sigma = 1$ нс соответственно

что учет временного разрешения экспериментальной установки размывает спектр, делая его более широким, однако основная часть статистики остается в пределах ± 4 нс. Посредством суммирования полученной статистики для всех пар кинематически сопряженных тайлов вычисляется общее количество кандидатов в упруго рассеянные протоны для каждого слоя ВВС.

Следующим этапом моделирования является оценка процентного содержания фоновых совпадений в полученных результатах. Для этого проводилось моделирование pp -упругого и pp -неупругого рассеяния при одинаковых условиях. Приведенная процедура отбора хитов была реализована для первых пяти слоев ВВС, в результате чего получены зависимости полезных и фоновых совпадений от номера слоя. На рис. 2, а и б приведены данные для первого и пятого слоев в случае упругого и неупругого рассеяния соответственно. Сравнение показывает, что количество упруго рассеянных протонов резко падает от первого слоя к пятому, что обусловлено поведением дифференциального сечения реакции pp -упругого рассеяния. В то же время количество фоновых совпадений (от pp -неупругого взаимодействия) незначительным образом возрастает.

Для вычисления отношения R величины сигнала к фону необходимо ввести нормировочный коэффициент, исходя из соотношения полных сечений pp -упругого и неупругого рассеяний. Для полной энергии $\sqrt{s} = 10$ ГэВ, согласно данным [16], полные сечения $\sigma_{\text{tot}}^{\text{el}} = 7,33$ мб и $\sigma_{\text{tot}}^{\text{inel}} = 30,93$ мб, а их отношение $\sigma_{\text{tot}}^{\text{el}}/\sigma_{\text{tot}}^{\text{inel}} = 0,237$. Следовательно, домножая полученное для каждого слоя отношение полезных и фоновых совпадений на этот коэффициент, можно вычислить зависимость отноше-

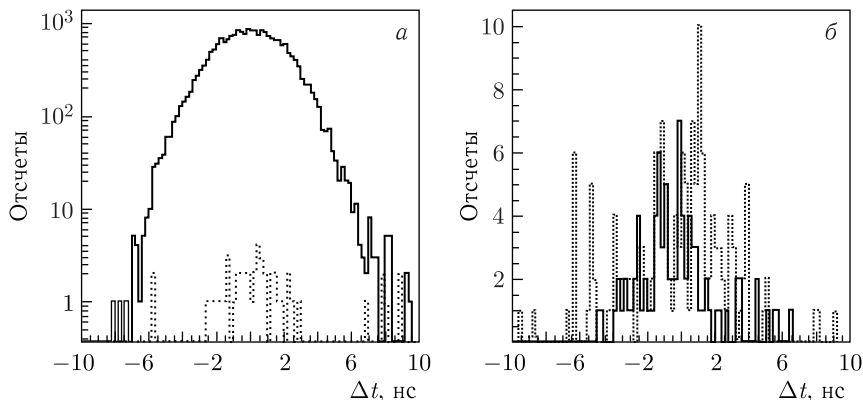


Рис. 2. Количество совпадений для кинематически-сопряженных тайлов для случая pp -упругого (а) и pp -неупругого (б) рассеяния. Сплошными и пунктирными гистограммами обозначены данные для тайлов первого и пятого слоев соответственно

ния сигнала к фону. Полученный результат показывает, что при данной энергии, в выделенном количестве кандидатов на события pp -упругого рассеяния, процентное содержание фоновых совпадений в четвертом слое ВВС уже составляет $\sim 60\%$. Следовательно, выделение pp -упругого рассеяния возможно только до третьего слоя включительно, где процент фона оценивается в $\sim 19\%$.

Интерес представляет оценка изменения отношения полезного сигнала к фону в зависимости от энергии сталкивающихся пучков, в частности, при $\sqrt{s} < 10$ ГэВ. В этой области энергий генератор событий Pythia8 не работает. Моделирование выполнялось с помощью генератора

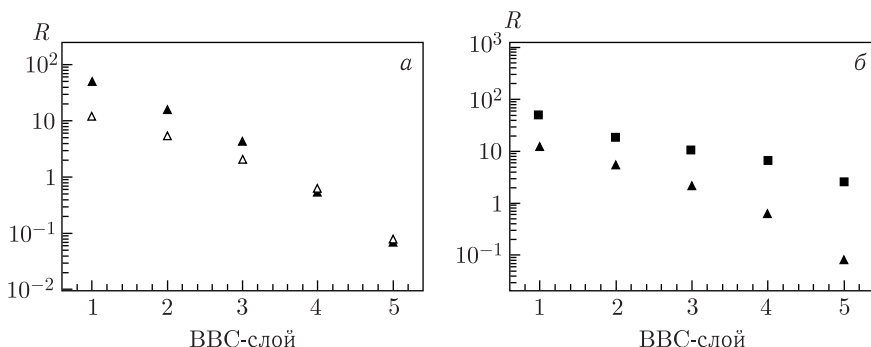


Рис. 3. а) Отношение R величины сигнала к фону, полученное с помощью генераторов Pythia8 (светлые символы) и FRITIOF (темные символы). б) Зависимость величины R от слоя ВВС при $\sqrt{s} = 6$ ГэВ (квадраты) и $\sqrt{s} = 10$ ГэВ (треугольники)

FRITIOF. Предварительно было проведено сравнение работы этих двух генераторов при энергии 10 ГэВ. Анализ импульсных распределений и распределений загрузок ВВС в зависимости от его радиуса для протонов и пионов, полученных с помощью обоих генераторов, показывает расхождение для случая pp -неупругого рассеяния для первых трех слоев (рис. 3, а), что обусловлено разными процессами распада частиц, заложенными в Pythia8 и FRITIOF.

Результаты оценки величины отношения сигнала к фону при $\sqrt{s} = 6$ ГэВ показывают, что выделение pp -упругого рассеяния возможно вплоть до четвертого слоя ВВС включительно, где процентное содержание фоновых совпадений составляет 16 %. Таким образом, вклад совпадений от неупругих процессов возрастает с ростом энергии (рис. 3, б).

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ dd -РАССЕЯНИЯ

Моделирование dd -взаимодействия проводилось при полной энергии $\sqrt{s} = 6$ ГэВ. Данный выбор обуславливался наличием существующих экспериментальных данных вблизи этого значения. В качестве генераторов событий использовались FRITIOF и Pluto. Первый позволяет моделировать dd -неупругое рассеяние, включая каналы безмезонного и мезонного развала дейтрона, квазиупругое рассеяние и др. Второй, напротив, позволяет воспроизводить только события dd -упругого взаимодействия. Для получения физической картины в генератор Pluto закладывается угловая зависимость дифференциального сечения dd -упругого рассеяния. Для этой реакции экспериментальные данные, а также теоретические расчеты существуют в диапазоне полной энергии $\sqrt{s} = 4,2\text{--}6,4$ ГэВ [17–21]. В настоящей работе использовались результаты экспериментов при $\sqrt{s} = 6,1$ ГэВ [17, 18]. Получены импульсные, временные и координатные распределения для всех заряженных вторичных частиц и для дейтронов, в частности. Аналогичным способом, как и в случае pp -рассеяния, с использованием временной информации хитов, попавших в кинематически соответствующие друг другу тайлы, было оценено количество dd -упругих и фоновых совпадений. Для вычисления отношения R полезного сигнала к фону необходимо использование данных по полному сечению dd -упругого и неупругого рассеяний. Однако таких измеренных значений нет. Для этой цели был проведен анализ энергетической зависимости полных сечений pp -, pd - и dd -взаимодействий [16, 22–24]. В работе [20] приводится зависимость от импульса налетающего дейтрона полного сечения dd -рассеяния. Данные ограничиваются диапазоном $P_{\text{lab}} = 1,5\text{--}4$ ГэВ/с, однако, исходя из поведения величины сечения, можно оценить его значение для импульса, соответствующего полной энергии $\sqrt{s} = 6$ ГэВ. Экстраполированное значение составляет $\sigma_{\text{tot}}^{dd} \sim 160$ мб. Величина полного сечения dd -упругого рассеяния оценивалась путем экстраполяции экспериментальных данных по дифференциальному сечению [17, 18] и последующего их интегриро-

вания. Полученное значение оценивается в $(\sigma^{dd})_{\text{tot}}^{\text{el}} \sim 18$ мб. Таким образом, можно вычислить отношение $(\sigma^{dd})_{\text{tot}}^{\text{el}}/(\sigma^{dd})_{\text{tot}}^{\text{inel}}$, которое составляет $\sim 0,13$. Это значение использовалось для получения зависимости отношения сигнала к фону без оценки процентного содержания последнего, в силу отсутствия генератора, способного генерировать события полного dd -взаимодействия. Тем не менее полученная зависимость показывает, что уже для первого слоя BBC отношение полезных совпадений к фоновым не дает возможности выделить события dd -упругого рассеяния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование процессов pp -рассеяния при полной энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 6$ и 10 ГэВ для пучкового счетчика BBC детектора спиновой физики SPD коллайдера NICA. Оценена возможность выделения событий упругого рассеяния протонов на основе анализа временной информации с использованием кинематически сопряженных тайлов. Проведена оценка процентного содержания фона путем моделирования pp -упругого и pp -неупругого рассеяния. При энергии 10 ГэВ выделение упруго рассеянных протонов с помощью BBC возможно в первых трех слоях счетчика. При $\sqrt{s} = 6$ ГэВ вклад фоновых событий меньше, выделение pp -упругого рассеяния возможно до четвертого слоя включительно. Таким образом, вклад совпадений от неупругих процессов возрастает с ростом энергии.

Проведен первый этап моделирования dd -рассеяния для BBC в среде SPDRoot при энергии дейтрона $\sqrt{s} = 6$ ГэВ. В качестве генераторов событий использовались FRITIOF и Pluto. Проведена оценка возможности выделения событий dd -упругого рассеяния. Полученные значения отношения полезного сигнала к фоновому для первых пяти слоев BBC показывают значительный вклад событий от неупругого взаимодействия, что делает невозможным выделение упругого канала с использованием только BBC.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А. С. Галоян, В. В. Ужинскому, А. О. Гридину и В. Воронюку за помощь в работе с программными пакетами FRITIOF и Pluto.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G., Butenko A., Golovatyuk V. et al.* NICA Heavy-Ion Collider at JINR (Dubna). Status of Accelerator Complex and First Physics at NICA // J. Phys.: Conf. Ser. 2023. V. 1. 012013.
2. *Abgaryan V., Acevedo Kado R., Afnasyev S. V. et al. (MPD Collab.).* Status and Initial Physics Performance Studies of the MPD Experiment at NICA // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58, No. 140. P. 1–50; doi: 10.1140/epja/s10050-022-00750-6.

3. *Abazov V., Abramov V., Afanasyev L. et al. (SPD Collab.)*. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // *Natural Sci. Rev.* 2024. V. 1. P. 1.
4. *Tishevskiy A. V., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Khrenov A. N., Kulevoy T. V., Ladygin V. P., Polozov P. A., Reznikov S. G., Terekhin A. A., Volkov I. S.* Development of the Scintillation Detector Prototypes with SiPM Readout for SPD at NICA // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1690, No. 1. 012051.
5. *Tishevskiy A. V., Dubinin F. A., Isupov A. Yu., Ladygin V. P., Nigmatkulov G. A., Reznikov S. G., Teterin P. E., Volkov I. S., Zakharov A. M., Zhurkina A. O.* Development of the SPD Beam–Beam Counter Scintillation Detector Prototype with FERS-5200 Front-End Readout System // *Phys. At. Nucl.* 2024. V. 87, No. 4. P. 451–458.
6. *Mosolova E., Kuznetsova E.* Implementation of the Straw Tracker Realistic Simulation and Straw Hit Reconstruction in SPDRoot Package // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2025. V. 3089, No. 1. 012004.
7. *Terekhin A. A., Abramov V. V., Ladygin V. P., Kurmanaliev J., Volkov I. S.* The pp -Scattering Simulation for the Beam–Beam Counter at SPD, NICA // *Phys. At. Nucl.* 2024. V. 87, No. 1. P. 44–48.
8. *Galoyan A., Ribon A., Uzhinsky V.* Possible Studies of Two-Particle Transverse Momentum Correlations in Proton–Proton and Deuteron–Deuteron Interactions at NICA Energies // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024. V. 88, No. 11. P. 1782–1788.
9. *Ospennikov N. Yu., Shipilova A. V.* The Study of Backgrounds in Direct Photon Production at SPD NICA Energies // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21, No. 4. P. 687–690.
10. *Yitao Wu, Zheng L., Kaifeng C. et al.* A Novel Silicon Photomultiplier Detector with High Light Yield and Low-Leakage Current for the Cherenkov Detector for Super-K // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2020. V. 968. 163970.
11. <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>
12. <https://pythia.org/>
13. *Andersson B., Gustafson G., Pi H.* The FRITIOF Model for Very High Energy Hadronic Collisions // *Z. Phys. C.* 1993. V. 57. P. 485–494.
14. <https://itp.uni-frankfurt.de/~bleicher/index.html?content=urqmd>
15. *Froehlich I., Dohrmann F., Galatyuk T. et al.* // *Eur. Phys. J. A.* 2010. V. 45. P. 401.
16. <https://pdg.lbl.gov/2022/hadronic-xsections/>
17. *Goshaw A. T., Oddone P. J., Bazin M. J., Chih-Ree Sun.* Deuteron–Deuteron Elastic Scattering at 2.2 and 7.9 GeV/c — Experimental Study // *Phys. Rev. Lett.* 1970. V. 25. P. 249–253.
18. *Devenski P. A., Zayachki V. J., Kanazirski Kh. M., Traikova M. D., Zhidkov N. K., Nikitin V. A., Shavlovski M.* Elastic dd Scattering under Small Angles at the Momentum of 4.6 GeV/c // *Yad. Fiz.* 1981. V. 34. P. 1302.
19. *Ажгирей Л. С., Взоров И. К., Жмыров В. Н., Зрелов П. В., Иванов В. В., Иенатенко М. А., Кожевников Ю. А., Кузнецов А. С., Мулас Э., Разин С. В., Столетов Г. Д.* Спектры дейтронов, испускаемых с большими поперечными импульсами в соударениях дейтронов с ядрами водорода, дейтерия и углерода при 9 ГэВ/с. Препринт ОИЯИ Р1-88-23. Дубна, 1988.

20. Alberi G., Bertocchi L., Bialkowski G. High-Energy Deuteron-Deuteron Elastic Scattering and Quadrupole Deformation // Nucl. Phys. B. 1970. V. 17. P. 621–633.
21. Whipple E. T., Perez-Mendez V., Sagle A. L., Talaga R. L., Zarbakhsh F., Carroll J. B., Igo G. J., McClelland J. B., Bleszynski M., Ganezer K. Measurement of Deuteron-Deuteron Elastic Scattering at 5.75 GeV/c // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. P. 774–777.
22. Beznogikh G. G., Bujak A., Nikitin V. A., Shafranov M. G., Sviridov V. A., Bien Truong, Vikhlyantseva V. I., Zayachki V. I., Zolin L. S. Total Elastic pp , pd , pn Cross-Sections in the Energy Range of 1–70 GeV // Phys. Lett. B. 1973. V. 43. P. 85–88.
23. Akimov Y., Golovanov L., Mukhin S., Sandacz A., Takhtamyshev G., Tsarev V., Malamud E., Yamada R., Zimmerman P. D., Cool R., Goulianos K. A., Sticker H., Gross D., Melissinos A., Nitz D., Olsen S. Proton-Deuteron Elastic Scattering at Small Momentum Transfer from 50 to 400 GeV/c // Phys. Rev. D. 1975. V. 12. P. 3399.
24. Kishida T., Ishikawa K., Kuze M., Sai F., Yamamoto S. S., Maki T., Arai I., Manabe A., Nunokawa H., Koiso H., Tsuboyama T. Measurement of Deuteron-Deuteron Total Cross-Sections in the Incident Momentum Range 1.5–4 GeV/c // Phys. Rev. C. 1990. V. 41. P. 180–192.