

УДК 539.1.074.3, 539.1.074.6

ИЗУЧЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ УПРУГОГО ДЕЙТРОН-ПРОТОННОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ 1–2 ГэВ¹

© 2020 г. А. А. Терехин¹ *, В. П. Ладыгин¹, Н. Б. Ладыгина¹, С. М. Пиядин¹,
А. Н. Хренов¹, А. К. Курилкин¹, П. К. Курилкин¹, А. Ю. Исупов¹,
С. Г. Резников¹, Ю. В. Гурчин¹

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

*E-mail: aterekhin@jinr.ru

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 25.11.2019 г.

Принята к публикации 27.12.2019 г.

Представлены результаты исследования дифференциального сечения дейтрон-протонного рассеяния при 500–1000 МэВ/нуклон на станции внутренних мишеней нуклотрона. Проведено сравнение полученных результатов с мировыми данными при близких энергиях, а также с теоретическими вычислениями, выполненными в рамках релятивистской теории многократного рассеяния.

DOI: 10.31857/S0367676520040353

ВВЕДЕНИЕ

Для понимания структуры нуклон-нуклонных и трехнуклонных взаимодействий, роли релятивистских эффектов и механизмов проявления фундаментальных степеней свободы необходимо изучать в реакциях с участием дейтрона различные наблюдаемые.

В последние годы были проведены эксперименты по исследованию dp -упругого рассеяния на станции внутренних мишеней нуклотрона ОИЯИ. Эта установка позволяет получать различные наблюдаемые в угловом диапазоне 60° – 140° в с. п. м. Измерения выполнялись в рамках проекта DSS (Deuteron spin structure) [1]. Цель этого проекта — исследование трехнуклонных систем в энергетическом диапазоне до 1000 МэВ/нуклон. Были получены данные по анализирующим способностям упругого dp -рассеяния при 440 МэВ/нуклон [2]. Так же были проведены измерения дифференциального сечения при энергиях 250–440 [3], 700 [4] и 1000 [5] МэВ/нуклон.

В данной статье приводятся данные по дифференциальному сечению dp -упругого рассеяния при 500, 750 и 900 МэВ/нуклон, полученные на станции внутренних мишеней нуклотрона.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения проводились на станции внутренних мишеней нуклотрона с использованием полиэтиленовой (CH_2) и углеродной (^{12}C) мишеней, толщиной 10 и 8 мкм соответственно. CH_2 -пленку использовали в качестве протонной мишени, а ^{12}C -проволоку — для оценки фона от углерода, содержащегося в полиэтилене.

Для детектирования рассеянных частиц были использованы сцинтилляционные детекторы на базе фотоумножителей Hamamatsu H7416MOD. Две пары дейтронных и протонных счетчиков размещались зеркально относительно оси ионопровода для регистрации рассеяний влево и вправо. Два счетчика вели мониторинг, т.е. непрерывную регистрацию продуктов реакции квазиупругого pp -рассеяния (PP -детекторы). Кроме того, один детектор использовали для подсчета актов взаимодействия пучка с мишенью. Все детекторы были расположены в горизонтальной плоскости.

Для сбора и записи данных использовали магистрально-модульную систему стандарта VME (VersaModule Eurocard), включающую набор модулей для приема и транспортировки сигналов, приходящих с детекторов. Программную поддержку осуществляли операционной системой Linux.

Основной набор данных проводился при энергиях 500, 750 и 900 МэВ/нуклон. Дополнительно были проведены измерения при 650

¹ Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на 69-ой Международной конференции “Ядро-2019” по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра.

и 700 МэВ/нуклон при таких же углах рассеяния для получения нормировочных коэффициентов.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Обработка данных начиналась с анализа амплитудной и временной информации, полученной с детекторов. При прохождении слоя сцинтиллятора дейтрон и протон оставляют разное количество энергии. Данные об энергетических потерях записываются в виде амплитуд сигналов с дейтронного и протонного счетчиков. По корреляции этих сигналов можно выделить область упругого взаимодействия дейтрона с протоном. Соответствующие корреляции временных сигналов позволяют провести выборку полезных событий путем наложения ограничений по времени прихода сигналов. Данные ограничения позволяют уменьшить количество фоновых событий в амплитудных спектрах дейтронных счетчиков. После этого амплитудный углеродный спектр вычитали из спектра, набранного на полиэтиленовой мишени (CH₂-C). Вычитание проводили путем нормировки обоих спектров в области, где количество полезных событий пренебрежительно мало. Таким образом, вычислялось количество упругих *dp*-событий N_{dp} .

ВЫЧИСЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Дифференциальное сечение вычисляли формуле:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{c.m.} = \frac{N_{dp}}{d\Omega_{lab}^D} \frac{k_{pp}}{N_{CH_2}} J_D C_{norm}. \quad (1)$$

Здесь N_{dp} – количество упругих *dp*-событий (после проведения вычитания углеродного фона), $d\Omega_{lab}^D$ – эффективный телесный угол дейтронного детектора в лабораторной системе, N_{CH_2} – количество восстановленных событий для мониторинговых РР-счетчиков, k_{pp} – поправочный коэффициент, учитывающий содержание примеси рассеяния на углероде в величине N_{CH_2} , C_{norm} – коэффициент нормировки, J_D – якобиан перехода от лабораторной системы к с.ц.м.

Для вычисления величин $d\Omega_{lab}^D$ использовали генератор событий Pluto [6], который является стандартным инструментом моделирования для различных экспериментов. Pluto представляет собой библиотеку классов C++, созданных в рамках пакета моделирования реакций адронной физики. Запуск данного программного пакета осуществляется в среде ROOT. Величину $d\Omega_{lab}^D$ рассчитывали как отношение эффективной площади детектора к

квадрату расстояния от детектора до мишени. Якобиан перехода J_D , определяемый отношением $J_d = d\Omega_{lab}^D / d\Omega_{c.m.}^D$, также рассчитывали с помощью Pluto-моделирования. Коэффициент k_{pp} вычисляли как отношение полного количества квазиупругих *pp*-событий, полученных на полиэтиленовой мишени без вычитания углеродного фона, к событиям после вычитания для суммарной статистики по всем углам упругого *dp*-рассеяния.

Коэффициент нормировки для 500 и 900 МэВ/нуклон вычислили, используя данные, полученные для 700 МэВ/нуклон. Измерения при этой энергии проводили при угле рассеяния $\theta_{c.m.} = 75.8^\circ$. Полученный результат для дифференциального сечения нормировали на данные [4] при таком же угле рассеяния.

Коэффициенты нормировки $C_{norm}^{500(900)}$ для 500 и 900 МэВ/нуклон вычисляли как C_{norm}^{700} / R , где R – отношение дифференциальных сечений для упругого *pp*-рассеяния при 700 и 500(900) МэВ в области углового захвата мониторингового РР-счетчика:

$$R = \frac{\int \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_{c.m.}}\right)^{700} d \cos \theta_{c.m.}}{\int \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_{c.m.}}\right)^{500(900)} d \cos \theta_{c.m.}}. \quad (2)$$

Здесь интегрирование проводится в пределах углового захвата мониторингового (?) детектора при 700 и 500 (900) МэВ соответственно. Данные по угловым зависимостям дифференциального сечения упругого *pp*-рассеяния взяты из [7].

Аналогичным образом вычислялся коэффициент нормировки для энергии 750 МэВ/нуклон. Для этого использовались данные, полученные при 650 МэВ/нуклон, которые нормировали на данные при 641 МэВ/нуклон [8]. Вычисленные значения для коэффициентов C_{norm}^{500} , C_{norm}^{750} и C_{norm}^{900} составляют $1.4 \cdot 10^{-2} \pm 2.6 \cdot 10^{-3}$ мб, $3.4 \cdot 10^{-2} \pm 7.9 \cdot 10^{-3}$ мб и $2.9 \cdot 10^{-3} \pm 3.9 \cdot 10^{-4}$ мб, соответственно.

Статистическая ошибка дифференциального сечения определялась погрешностями величин ΔN_{dp}^{stat} , ΔN_{CH_2} и Δk_{pp}^{stat} . Систематическую ошибку складывали из неопределенностей ΔN_{dp}^{sys} , Δk_{pp}^{sys} , ΔC_{norm} , $\Delta d\Omega_{lab}^D$ и ΔJ_D , ее среднее значение составляет 30%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные угловые зависимости дифференциального сечения при 500, 750 и 900 МэВ/нуклон представлены на рис. 1–3 соответственно. Темными квадратами обозначены результаты,

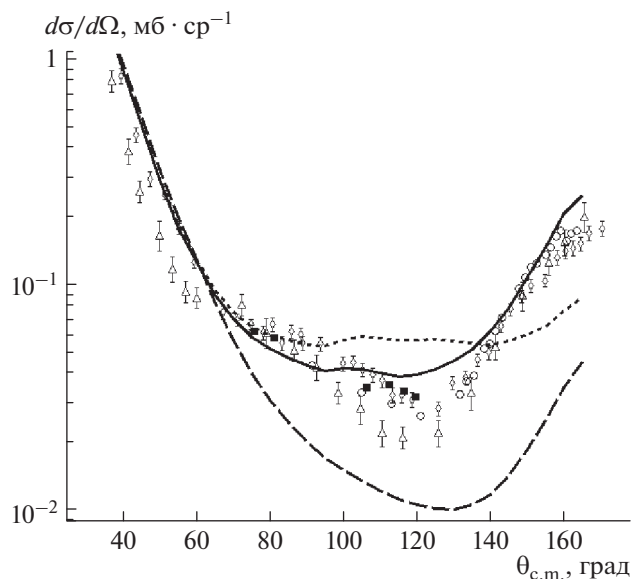


Рис. 1. Дифференциальное сечение упругого dp -рассеяния при 500 МэВ/нуклон. Темные квадраты — данные, полученные на нуклотроне, ромбы — данные при 425 МэВ/нуклон [9], треугольники — данные при 580 МэВ/нуклон [11], светлые кружки — данные при 470 МэВ/нуклон [10]. Штриховая, пунктирная и сплошная линии — вычисления ONE + SS, ONE + SS + DS и ONE + SS + DS + Δ соответственно, выполненные в рамках релятивистской модели многократного рассеяния [14].

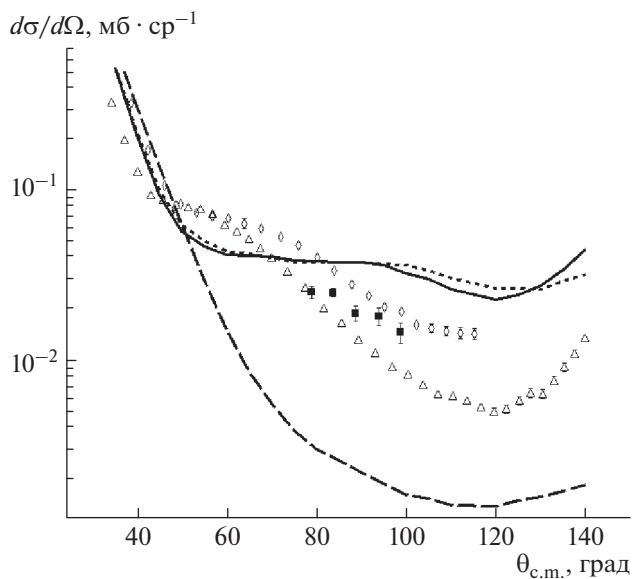


Рис. 2. Дифференциальное сечение упругого dp -рассеяния при 750 МэВ/нуклон. Темные квадраты — результаты измерений на нуклотроне, кружки и треугольники — данные при 641 и 800 МэВ/нуклон [8]; обозначения теоретических расчетов такие же, как на рис. 1.

полученные на нуклотроне. Экспериментальные данные при 425 [9], 470 [10] и 580 [11] МэВ/нуклон обозначены ромбами, светлыми кружками и треугольниками соответственно. Данные для энергий 641.3, 792.7 [8] и 800 МэВ/нуклон [12] обозначены светлыми ромбами, кружками и треугольниками соответственно. Мировые данные при 1000 МэВ/нуклон [13] обозначены звездочками. Экспериментальные результаты сравнивали с теоретическими вычислениями, выполненными в рамках релятивистской теории многократного рассеяния [14]. В расчетах учитывали влияние на амплитуду рассеяния вклада двукратного рассеяния, а также возбуждения Δ -изобары в промежуточном состоянии. Дифференциальное сечение вычисляли для трех случаев: включая диаграммы только однонуклонного обмена и однократного рассеяния (ONE + SS); с добавлением вклада двукратного рассеяния (ONE + SS + DS); и полные расчеты с учетом вклада от возбуждения Δ -изобары (ONE + SS + DS + Δ). На рис. 1–3 вычисления ONE + SS, ONE + SS + DS и ONE + SS + DS + Δ обозначены штриховой, пунктирной и сплошной линиями соответственно.

Из сравнения с экспериментальными данными видно, что расчеты с включением только вкладов ONE + SS не совпадают с результатами эксперимента при углах рассеяния $\theta_{c.m.} > 50^\circ$. Учет вклада DS позволяет приблизиться к описанию поведения сечения в имеющемся угловом диапазоне. Влияние вклада от возбуждения Δ -изобары

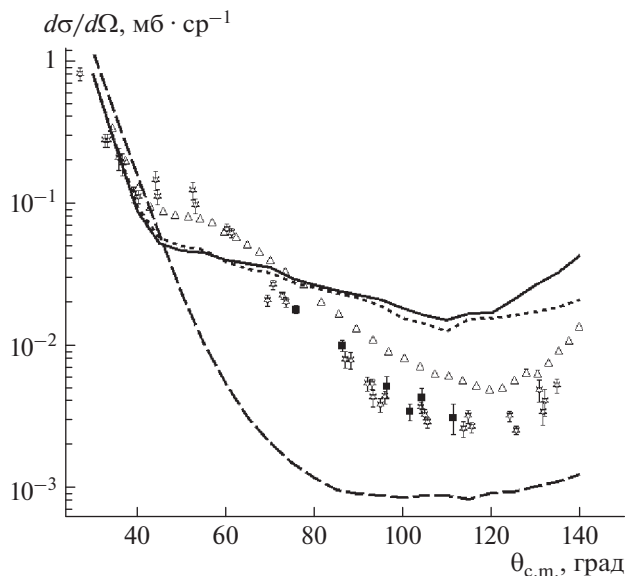


Рис. 3. Дифференциальное сечение упругого dp -рассеяния при 900 МэВ/нуклон. Темные квадраты — результаты измерений на нуклотроне, треугольники — данные при 800 МэВ/нуклон [8], звездочками обозначены данные при 1000 МэВ/нуклон [13]; обозначения теоретических расчетов такие же, как на рис. 1.

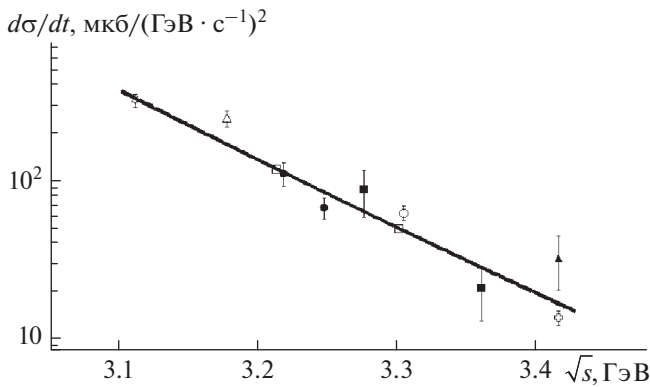


Рис. 4. Дифференциальное сечение упругого dp -рассеяния для угла рассеяния $\theta_{c.m.} \approx 95^\circ$. Темные символы – данные, полученные на нуклотроне, светлые символы – мировые данные. Сплошная и штриховая линии – результат аппроксимации экспериментальных данных зависимостями $\sim s^{-n}$ и $\sim s^{-16}$ соответственно.

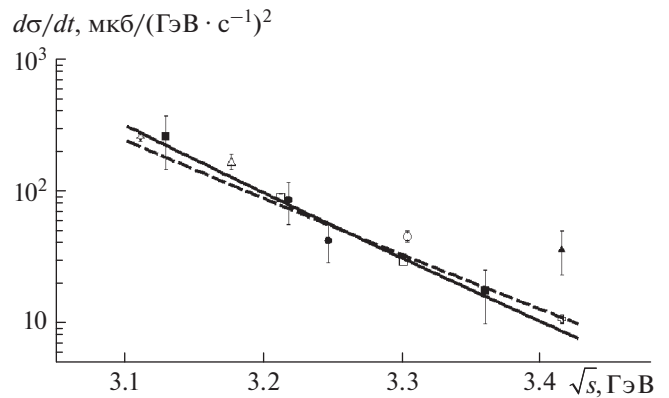


Рис. 5. Дифференциальное сечение упругого dp -рассеяния для угла рассеяния $\theta_{c.m.} \approx 106^\circ$. Обозначения такие, как на рис. 4.

при различных энергиях подробно описывается в [14], он становится существенным при углах рассеяния $\theta_{c.m.} > 110^\circ$. Наилучшее согласие теории с экспериментом наблюдается при 500 МэВ/нуклон. Учет Δ -изобары позволяет приблизиться к описанию данных области минимума сечения, а также при рассеянии назад. Расхождение экспериментальных данных и теоретических расчетов увеличиваются с ростом энергии. При 750 и 900 МэВ/нуклон расчеты без учета и с учетом Δ -изобары совпадают при $\theta_{c.m.} < 75^\circ$. При больших углах учет Δ -изобары позволяет уменьшить теоретическую величину сечения, однако расхождение с результатами экспериментов остаются существенными.

При высоких энергиях и больших поперечных импульсах правила кваркового счета (ПКС) [15, 16] предсказывают зависимость дифференциального сечения для бинарных реакций как $1/s^{n-2}$, где n – полное количество фундаментальных констант, входящих в реакцию. Для шести фиксированных углов рассеяния в с. ц. м. ($\theta_{c.m.} \approx 75^\circ, 82^\circ, 95^\circ, 100^\circ, 106^\circ, 111^\circ$) получено дифференциальное сечение упругого dp -рассеяния в диапазоне кинетической энергии в лаб. системе 0.47–1 ГэВ/нуклон, соответствующем диапазону полной энергии $\sqrt{s} = 3.1\text{--}3.42$ ГэВ. На рис. 4, 5 представлена зависимость сечений от энергии для $\theta_{c.m.} \approx 95^\circ$ и $\theta_{c.m.} \approx 106^\circ$. Сплошными символами обозначены данные, полученные на нуклотроне, светлыми символами – мировые данные [8–13]. Сплошная и штриховая линии – результат аппроксимации

экспериментальных данных зависимостями $\sim s^{-n}$ и $\sim s^{-16}$ соответственно. Для всех углов результаты, полученные на нуклотроне, находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными ранее. Наилучшее согласие экспериментальных данных с предсказаниями ПКС наблюдается при $\theta_{c.m.} \approx 95^\circ$. При некоторых углах имеются существенные расхождения, которые указывают на необходимость новых точных систематических измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены систематические данные по дифференциальным сечениям реакции упругого dp -рассеяния при энергиях 500, 750 и 900 МэВ/нуклон. Результаты находятся в разумном согласии с мировыми данными при близких значениях энергий.
2. Полученные угловые зависимости сравнивались с теоретическими вычислениями, выполненными в рамках модели многократного рассеяния. Учет в расчетах двукратного рассеяния позволяет достичь лучшего согласия с экспериментальными данными. Наилучшее согласие теории с экспериментом наблюдается при 500 МэВ/нуклон. Вклад Δ -изобары становится заметным при $\theta_{c.m.} > 80^\circ$. Расхождение экспериментальных данных и предсказаний теории увеличивается с ростом энергии.
3. Получены энергетические зависимости дифференциального сечения упругого dp -рассеяния для шести фиксированных углов рассеяния в с. ц. м. в диапазоне кинетической энергии в лаб. системе 0.47–1 ГэВ/нуклон, соответствующем диапазону полной энергии $\sqrt{s} = 3.1\text{--}3.42$ ГэВ. Результаты находятся в разумном согласии с мировыми данными, а также с предсказаниями ПКС. Однако имеются расхождения результатов экспериментов с пред-

сказаниями ПКС, что свидетельствует о необходимости новых систематических измерений.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 16-02-00203а и № 19-02-00079а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ladygin V.P., Gurchin Yu. V., Piyadin S.M. et al.* // *Few-Body Systems*. 2014. V. 55. P. 709.
2. *Kurilkin P.K., Ladygin V.P., Uesaka T. et al.* // *Phys. Lett. B*. 2012. V. 715. P. 61.
3. *Gurchin Yu.V., Isupov A.Yu., Janek M. et al.* // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 2013. V. 245. P. 271.
4. *Терехин А.А., Ладыгин В.П., Гурчин Ю.В. и др.* // *ЯФ*. 2017. Т. 80. № 6. С. 594; *Terekhin A.A., Ladygin V.P., Gurchin Yu.V. et al.* // *Phys. Atom. Nucl.* 2017. V. 80. P. 1061.
5. *Terekhin A.A., Gurchin Yu.V., Isupov A.Yu. et al.* // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12. № 5. P. 695.
6. *Froehlich I., Dohrmann F., Galatyuk T. et al.* // *Eur. Phys. J. A*. 2010. V. 45. P. 401.
7. *Albers D., Bauer F., Bisplinghoff J. et al.* // *Eur. Phys. J. A*. 2004. V. 22. P. 125.
8. *Gulmez E., Beedoe S., Jaroszewicz T. et al.* // *Phys. Rev. C*. 1991. V. 43. P. 2067.
9. *Booth N.E., Dolnick C., Esterling R.J. et al.* // *Phys. Rev. D*. 1971. V. 4. P. 1261.
10. *Alder J.C.* // *Phys. Rev. C*. 1972. V. 6. P. 2010.
11. *Vincent J.S.* // *Phys. Rev. Lett.* 1970. V. 24. № 5. P. 236.
12. *Winkelmann E., Bevington P.R., McNaughton M.W. et al.* // *Phys. Rev. C*. 1980. V. 21. P. 2535.
13. *Bennet G.W., Friedes J.L., Palevsky H. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 1967. V. 19. P. 387.
14. *Ladygina N.B.* // *Eur. Phys. J. A*. 2016. V. 52. P. 199.
15. *Matveev V.A., Muradyan R.M., Tavkhelidze A.N.* // *Lett. Nuovo Cimento*. 1973. V. 7. P. 719.
16. *Polchinski J., Strassler M.J.* // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. Art. № 031601.