

P1-2006-112

В. В. Глаголев<sup>1</sup>, Г. Мартинска<sup>2</sup>, Я. Мушински<sup>1,2</sup>,  
Н. М. Пискунов<sup>1</sup>, Й. Урбан<sup>2</sup>

РЕАКЦИЯ ПЕРЕЗАРЯДКИ  $dp \rightarrow (pp)n$

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Университет им. П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия

Глаголев В. В. и др.

P1-2006-112

Реакция перезарядки  $dp \rightarrow (pp)n$

Обсуждается отношение дифференциальных поперечных сечений перезарядки на дейтроне и нуклоне в области малых переданных импульсов с целью оценки спинзависящей части амплитуды  $np \rightarrow pn$ -перезарядки.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Glagolev V. V. et al.

P1-2006-112

The Charge Exchange Reaction  $dp \rightarrow (pp)n$

An estimation of the spin dependent part of the  $np \rightarrow pn$  exchange amplitude was made on the basis of the  $dp \rightarrow (pp)n$  data, taken at 1.67 GeV/c per nucleon in a full solid angle arrangement. The  $np \rightarrow pn$  amplitude turned out to be nearly entirely spin dependent. This result shows new possibilities for the experiments in polarized deuteron beams and polarized proton target.

The investigation has been performed at the Veksler and Balдин Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время прошли дискуссии на семинарах, посвященных вопросам извлечения информации о сечениях спинзависящей части  $np$ -рассеяния из реакций перезарядки на дейтроне. Возобновился интерес к подобным исследованиям, особенно в связи с возможностями ускорения дейтронов с энергией выше 1 ГэВ на нуклон на нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ. Продолжают обсуждаться старые идеи Померанчука и Чу [1], формализованные в работах Дина и др. Эти формулы выведены в определенных предположениях, а именно, при справедливости импульсного приближения и условия полноты. В работе Ледницкого и др. [2] показано, что при релятивистских энергиях эти предположения оправданы. Кроме того, при экспериментальном исследовании взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) оказалось, что к эффекту ВКС очень чувствительны асимметрии распределений по углу  $\alpha = (\vec{p}_s \vec{q})$ , где  $\vec{p}_s$  — импульс спектатора в системе покоя дейтрона, а  $\vec{q}$  — трехмерная передача от падающего нуклона к рассеянному. В работах [3, 4] было показано, что в области  $|t| < 0,1$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> и импульсов спектаторов, меньших 0,1 ГэВ/с, асимметрии, вызванные ВКС, практически отсутствуют, что хорошо видно как для прямого развала, так и для развала дейтрона с перезарядкой на рис. 1.

Это важно учитывать при продвижении в область более высоких энергий, в которой отсутствуют экспериментальные данные по  $np$ -рассеянию. Выше 1 ГэВ имеются лишь предварительные результаты группы «Дельта-Сигма» [5]. Кроме того, в связи с развитием поляризационных методов исследований в Дубне (нуклотрон) и Юлихе (COSY) существенно расширяются возможности восстановления амплитуд и фаз нуклон-нуклонного рассеяния в области энергий до и выше 1 ГэВ. В связи со сказанным мы критически переосмысливаем представление экспериментальных данных по изучению реакции перезарядки на дейтроне  $dp \rightarrow (pp)n$ , полученных на водородной пузырьковой камере [6].

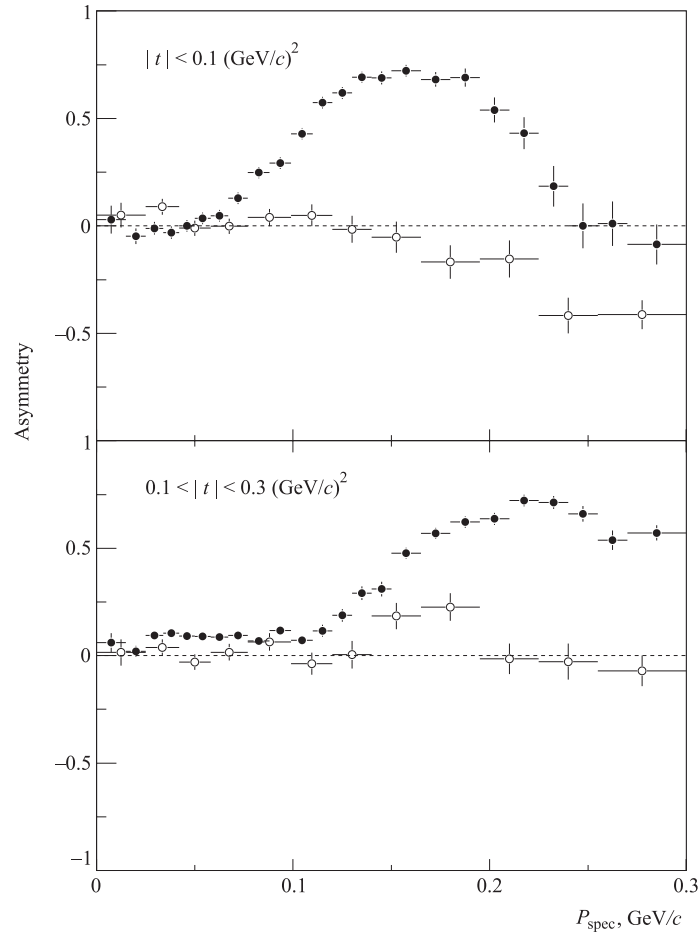


Рис. 1. Асимметрия по углу  $\alpha = (\vec{p}_s \vec{q})$ , где  $\vec{p}_s$  — импульс спектатора в системе покоя дейтрона, а  $\vec{q}$  — трехмерная передача от падающего нуклона к рассеянному. Светлые кружки — реакция перезарядки, темными кружками обозначены данные для прямого развала

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальный материал был получен с помощью 100-см водородной пузырьковой камеры на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Камера была облучена выведенным из ускорителя пучком дейтронов с импульсом 3,35 ГэВ/с. После стандартной процедуры просмотра, измерений и идентификации была получена в условиях  $4\pi$ -геометрии информация о 17 реакциях, представленных в таблице.

### Перечень наблюдаемых реакций

Реакция	Число событий
$ppn$	102778
$ppn\pi^0$	31295
$p\pi^+nn$	65284
$dp$	16184
$dp\pi^0$	3950
$dp\pi^0\pi^0$	1839
$d\pi^+n$	4963
$d\pi^+n\pi^0$	1843
$\pi^+\pi^+nn$	315
$ppp\pi^-$	5487
$ppp\pi^-\pi^0$	167
$ppp\pi^-\pi^0\pi^0$	67
$pp\pi^+\pi^-n$	1163
$pp\pi^+\pi^-n\pi^0$	49
$dp\pi^+\pi^-$	576
$dp\pi^+\pi^-\pi^0$	39
$dp\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	1414

Видно, что около половины всех событий составляла реакция безмезонного развала дейтрона  $dp \rightarrow ppn$ . Эту реакцию можно разделить на два класса — прямой развал  $dp \rightarrow (pn)p$  и перезарядку  $dp \rightarrow (pp)n$ . К перезарядке отнесены события, в которых самым быстрым из вторичных нуклонов в системе покоя дейтрона являлся нейтрон. Таких событий было 17512, что соответствовало поперечному сечению  $(5,85 \pm 0,05)$  мб. При этом миллибарн-эквивалент события определялся исходя из полного сечения  $dp$ -взаимодействий [7] с учетом потерь событий упругого  $dp$ -рассеяния. Систематическая ошибка, связанная с оценкой потерь в упругом  $dp$ -рассеянии, составляла около 4 %.

Заметим, что это сечение включает в себя часть событий квази- $pp$ -рассеяния с образованием промежуточной  $\Delta$ -изобары. Ниже мы обсудим соответствующую поправку. Инвариантную величину  $t$  экспериментально определяем как переданный 4-импульс от протона мишени к нейтрону в лабораторной системе координат.

Напомним некоторые из теоретических формул [8, 9]. Дифференциальное поперечное сечение  $np \rightarrow pn$ -рассеяния может быть представлено в виде суммы спиннезависящей (индекс SI) и спинзависящей (индекс SD) частей:

$$(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn} = (d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{\text{SI}} + (d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{\text{SD}}$$

Амплитуда элементарной реакции перезарядки  $pn \rightarrow np$  может быть записана как

$$f_{ce} = a_{ce} + b_{ce}(\sigma\vec{n})(\sigma_i\vec{n}) + c_{ce}[(\sigma\vec{n}) + (\sigma_i\vec{n})] + d_{ce}[(\sigma\vec{m})(\sigma_i\vec{m})] + e_{ce}[(\sigma\vec{l})(\sigma_i\vec{l})],$$

где операторы  $\sigma$  и  $\sigma_i$  являются матрицами Паули падающей частицы (нейтрон) и  $i$ -го нуклона (протон), коэффициенты  $a_{ce}$ ,  $b_{ce}$ ,  $c_{ce}$ ,  $d_{ce}$ ,  $e_{ce}$  являются комплексными функциями энергии и угла рассеяния взаимодействующих частиц,

$$\vec{n} = \frac{\vec{k} \cdot \vec{k}'}{|\vec{k} \cdot \vec{k}'|}, \quad \vec{m} = \frac{\vec{k}' - \vec{k}}{|\vec{k}' - \vec{k}|}, \quad \vec{l} = \frac{\vec{k}' + \vec{k}}{|\vec{k}' + \vec{k}|},$$

$\vec{k}$  и  $\vec{k}'$  — импульсы падающего и рассеянного нуклонов в CMS.

Заметим, что имеются по крайней мере два инвариантных относительно обращения времени и пространства типа представления матрицы рассеяния — это представление Гольдбергера [10] и представление Быстрицкого, Легара, Винтерница [11], которые равнозначны.

Для спиннезависящей и спинзависящей частей дифференциального поперечного сечения получаем

$$(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{\text{SI}} = (\pi/p^2)|a_{ce}|^2,$$

$$(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{\text{SD}} = (\pi/p^2)[|b_{ce}|^2 + |c_{ce}|^2 + |d_{ce}|^2 + |e_{ce}|^2],$$

где  $p$  — импульс в системе центра масс  $NN$ -системы.

Соотношение между поперечным сечением перезарядки на дейтроне  $dp \rightarrow (pp)n$  и процессом элементарной перезарядки  $pn \rightarrow np$  обсуждалось во многих работах. Математический формализм, развитый в [8, 9], позволяет в рамках импульсного приближения записать дифференциальное поперечное сечение перезарядки на дейтроне в виде

$$(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} = [1 - S(t)](d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{\text{SI}} + [1 - 1/3S(t)](d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{\text{SD}}.$$

Здесь  $S(t) = \int [\Psi(r)]^2 e^{-iqr} d^3r$  обозначает формфактор дейтрона и  $q^2 = t$  — квадрат четырехмерного переданного импульса. Из этой формулы следует, что при нулевом переданном импульсе от протона-мишени к нейтрону, т.е. при угле рассеяния  $180^\circ$  в системе центра масс, из-за того, что  $S(0) = 1$ , дифференциальное поперечное сечение равно

$$(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} = 2/3(d\sigma/dt)_{np \rightarrow pn}^{\text{SD}}.$$

Таким образом, реакция перезарядки неполяризованного дейтрона на неполяризованном протоне-мишени при нулевой передаче ( $t = 0$ ) полностью

определяется спинзависящей частью элементарного  $np \rightarrow pn$ -рассеяния назад в с. ц. и. ( $180^\circ$ ). То есть дейтрон выступает как спиновый фильтр. Следует заметить, что этот результат остается справедливым и при учете  $D$ -состояния дейтрона [2].

В условиях коллинеарной кинематики  $|c_{ce}|^2 \sim \sin^2\theta \sim 0$  и  $|b_{ce} - e_{ce}|^2 \sim \sin^2\theta \sim 0$ , т. е. для рассеяния назад (перезарядки), получим

$$(d\sigma/dt)_{dp \rightarrow (pp)n} = 2/3(\pi/p^2)[2|b_{ce}|^2 + |d_{ce}|^2].$$

Таким образом, изучение процесса  $dp \rightarrow (pp)n$  при малых переданных импульсах позволяет оценить спинзависящую часть элементарной  $np \rightarrow pn$ -реакции, т. е. сумму амплитуд  $2|b_{ce}|^2 + |d_{ce}|^2$ .

Из наших экспериментальных данных мы оцениваем величину дифференциального поперечного сечения для перезарядки на дейтроне при  $t = 0$  и сравниваем ее с имеющимися в литературе данными по этой величине для  $np \rightarrow pn$ -рассеяния при той же энергии. Самыми близкими по энергии данными являются измерения на ускорителе «Сатурн», сделанные Бизардом и др. [12, 13].

На рис. 2 мы приводим дифференциальные поперечные сечения из этой работы в области импульсов (1,4–1,95) ГэВ/с, экстраполированные к  $t = 0$  выражением

$$d\sigma/dt = a \exp(bt + ct^2).$$

Экспоненциальный фит этих значений дал для нашей энергии 1,675 ГэВ/с на нуклон величину  $d\sigma/dt|_{t=0} = 54,7 \pm 0,2$  мб/(ГэВ/с)<sup>2</sup>. К полученному значению мы и будем в дальнейшем относить нашу оценку дифференциального

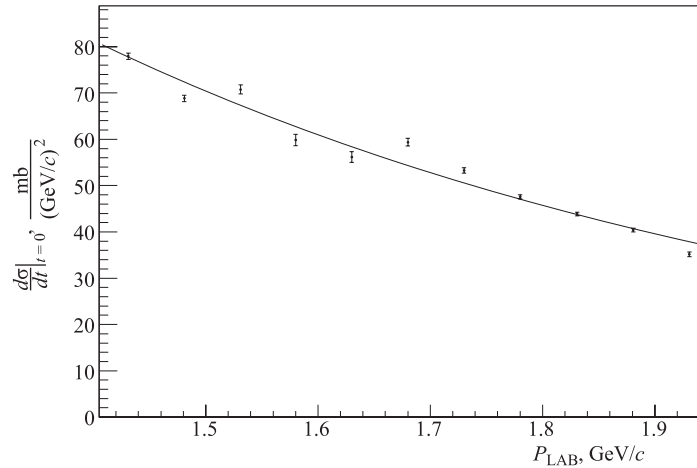


Рис. 2. Экстраполяция данных Сакле к  $t = 0$

поперечного сечения для квазиупругой  $dp \rightarrow (pp)n$ -перезарядки при  $t = 0$ . Заметим, что систематическая ошибка в данных Бизарда и др. составляла 5 %.

Воспользуемся кинематической корреляцией между полярным углом вылета нуклона-спектора в лабораторной системе координат и его импульсом в системе покоя дейтрона (рис. 3).

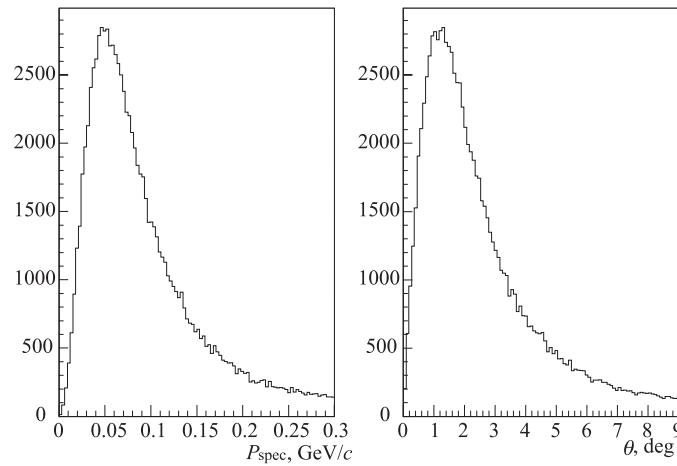
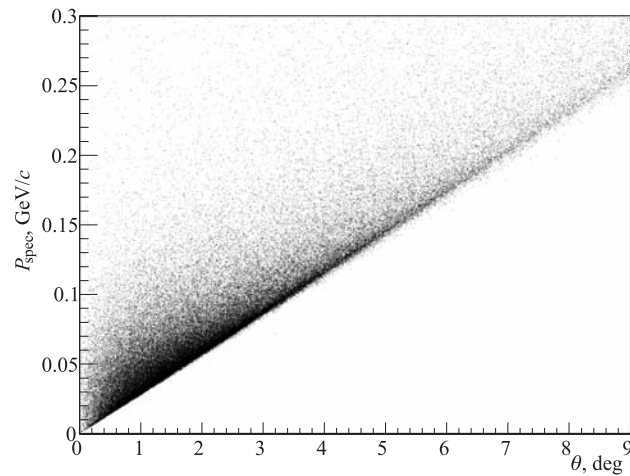


Рис. 3. Диаграмма: импульс нуклона-спектора в системе покоя дейтрона в зависимости от угла его вылета в лабораторной системе координат. Под диаграммой показаны ее проекции. Масштаб распределений выбран таким, чтобы показать их подобие



Видно, что при углах, меньших  $5^\circ$ , лежит основная часть событий, соответствующих квазинуклонному рассеянию. В случае  $t = 0$  два протона в лабораторной системе координат имеют практически одинаковые импульсы  $\vec{p}_1 = \vec{p}_2 = (1/2)\vec{p}_d$ . Для набора пар протонов, попадающих в конус с раствором  $5^\circ$ , строится распределение  $d\sigma/dt$  с учетом миллибарн-эквивалента и поправки на поток, равной отношению полного числа спектаторных нуклонов к числу спектаторов в конусе.

В связи с заметным вкладом событий с промежуточной  $\Delta$ -изобарой [14, 4], основная часть которых является следствием квази- $pp$ -столкновений, идущих через  $\Delta^{++}$ - и  $\Delta^+$ -изобары (см. диаграммы *a* и *b* на рис. 4), необходимо было бы ввести поправку на квазипротонные столкновения.

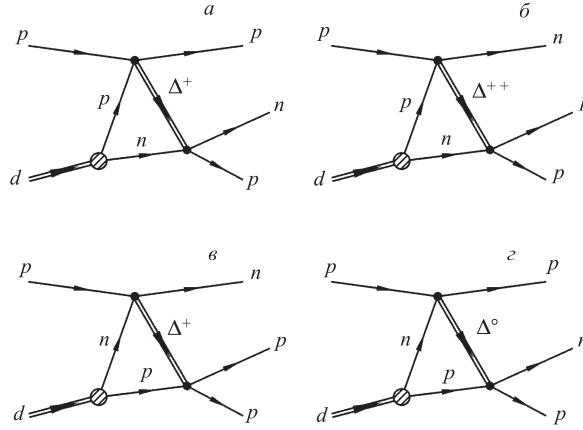


Рис. 4. Диаграммы Фейнмана для реакции  $dp \rightarrow ppn$  с участием промежуточной  $\Delta$ -изобары

На рис. 5 приведено сравнение распределений по импульсам спектаторов из прямого развала и перезарядки. Виден относительный избыток в спектре протонов-спектаторов из перезарядки, связанный с вкладом промежуточных изобарных состояний. Из сопоставления рис. 3 и 5 видно, что этот избыток находится в области импульсов, больших  $0,2 \text{ ГэВ}/c$ , т. е. вне конуса с углом раствора до  $5^\circ$ , и не влияет на дифференциальное сечение при  $t = 0$ .

Дифференциальное сечение, фитированное тем же способом, как данные  $np \rightarrow pn$ , приводится на рис. 6. Экстраполяция к  $t = 0$  дала значение  $d\sigma/dt|_{t=0} = 30,2 \pm 4,1 \text{ мб}/(\text{ГэВ}/c)^2$ .

Введем отношение дифференциальных сечений для рассеяния вперед (перезарядка) на дейтроне и протоне  $R = \frac{(d\sigma/dt)_{dp}}{(d\sigma/dt)_{np}} = 0,55 \pm 0,08$ . В выска-

занных выше предположениях оно может быть приравнено к  $\frac{2}{3} \frac{(d\sigma/dt)_{np}^{SD}}{(d\sigma/dt)_{np}}$

и, соответственно, доля спиннезависящей части сечения упругой  $np \rightarrow pn$ -перезарядки  $R_{np}^{\text{ID}} = \frac{(d\sigma/dt)_{np}^{\text{SI}}}{(d\sigma/dt)_{np}^{\text{SD}}} = \frac{2}{3R} - 1 = 0,21 \pm 0,17$ .

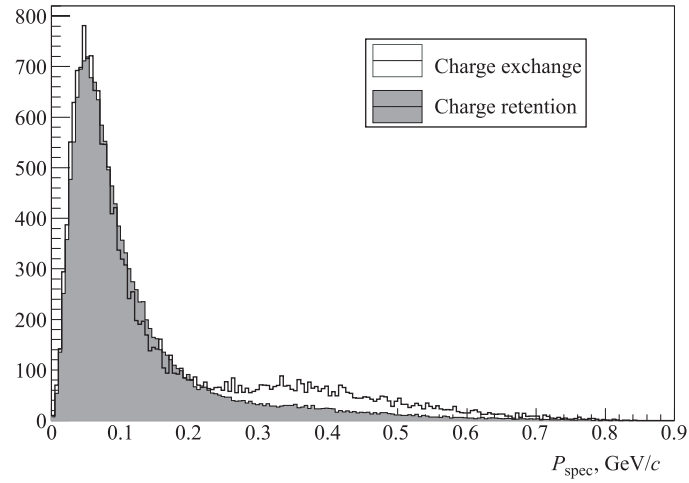


Рис. 5. Импульсные распределения спектров из прямого канала и перезарядки, нормированные на максимум

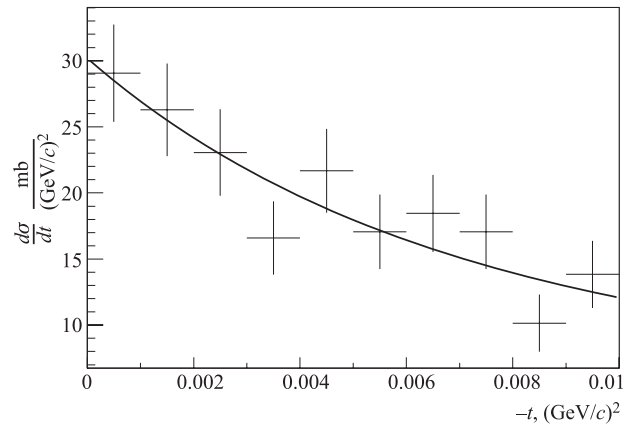


Рис. 6. Экстраполяция дифференциального сечения к  $t = 0$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Критически переработано представление экспериментальных данных по реакции  $dp \rightarrow (pp)n$ , полученных на водородной пузырьковой камере.

2. Получено отношение дифференциальных сечений перезарядки под углом  $0^\circ$  в реакциях  $dp \rightarrow (pp)n$  и  $np \rightarrow pn$ :  $R = 0,55 \pm 0,08$ , что свидетельствует о преобладающем вкладе спинзависящей части сечения  $np \rightarrow pn$ -рассеяния.

3. Важным является продолжение исследований в области более высоких энергий на установке «Стрела».

Авторы благодарят за полезные обсуждения Н. Б. Ладыгину, Ф. Легара и В. Л. Любошица.

Данная работа выполнена при поддержке Slovak grant agency 1/1020/04.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Pomeranchuk I.* // Sov. JETP. 1951. V. 21. P. 1113;  
*Chew G. F.* // Phys. Rev. 1951. V. 84. P. 710.
2. *Lednický R., Lyuboshitz V. L., Lyuboshitz V. V.* // Proc. of the XVI Intern. Baldin Seminar on HEP Problems (ISHEPP XVI). Dubna, 2004. V. 1. P. 199–211.
3. *Aladashvili B. S. et al.* // J. Phys. G: Nucl. Phys. 1977. V. 3. P. 7–20.
4. *Aladashvili B. S. et al.* // Ibid. P. 1225–1240.
5. *Sharov V. I. et al.* // Czech. J. Phys. 2005. V. 55. P. A283–A305.
6. *Glagolev V. V. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2002. V. 15. P. 471–475.
7. *Bugg D. V. et al.* // Phys. Rev. 1966. V. 146. P. 980–992.
8. *Dean N. W.* // Phys. Rev. D. 1972. V. 5. P. 1661, 2832.
9. *Bugg D., Wilkin C.* // Nucl. Phys. A. 1987. V. 467. P. 575.
10. *Goldberger M., Watson K.* Collision Theory. New York: Willey, 1966.
11. *Bystrický J., Lehar F., Winternitz P.* // J. Phys. 1978. V. 39. P. 1.
12. *Bizard G. et al.* // Nucl. Phys. B. 1975. V. 85. P. 14–30.
13. *Bystrický J., Lehar F.* // Nucleon-Nucleon Scattering data / Eds. H. Behrens and G. Ebel. Karlsruhe: Fachinformationszentrum, 1978. P. 521.
14. *Aladashvili B. S. et al.* // Nucl. Phys. A. 1976. V. 274. P. 486.

Получено 3 августа 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 26.10.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,64. Тираж 375 экз. Заказ № 55523.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)