

Реакция перезарядки $dp \rightarrow (pp)n$

В. В. Глаголев¹, Г. Мартинска², Я. Мушински^{1,2},
Н.М. Пискунов¹, Й. Урбан²

¹ Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна

² Университет П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия

Аннотация

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.

1 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)² 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

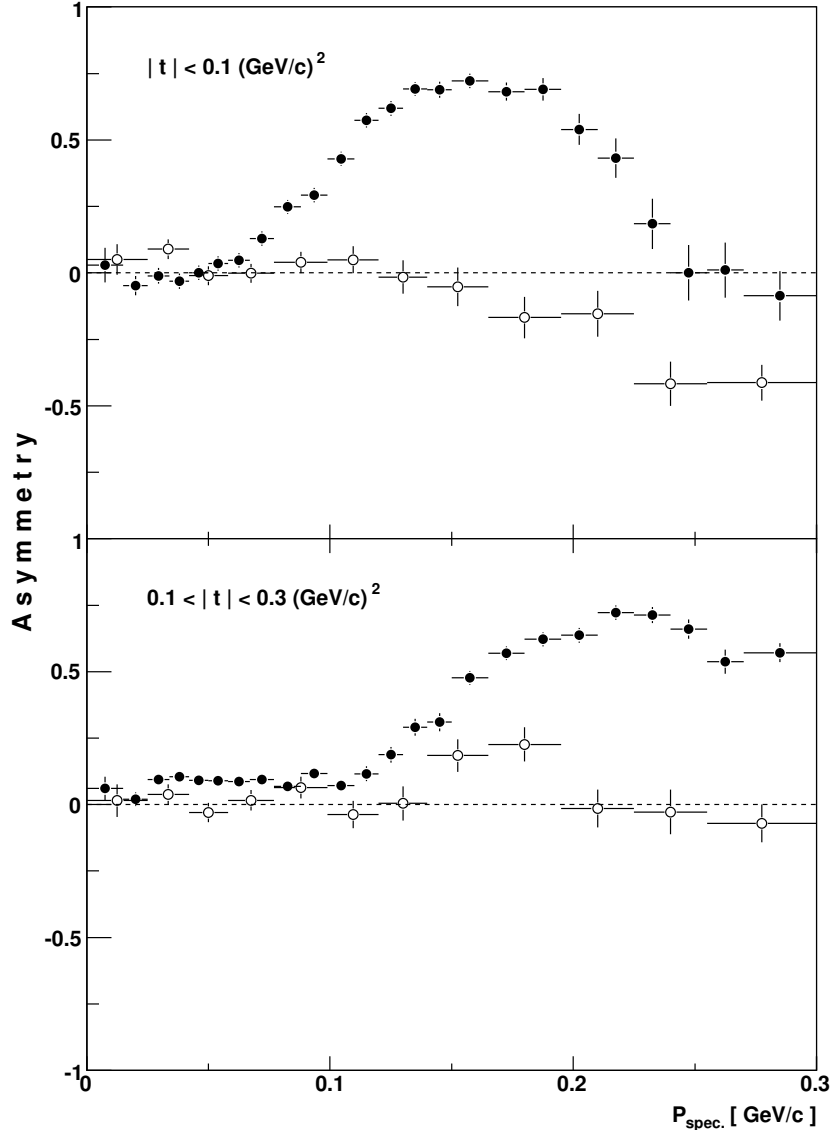


Рис. 1: Асимметрия по углу $\alpha = (\vec{p}_s \vec{q})$, где \vec{p}_s - импульс спектатора в системе покоя дейтрона, а \vec{q} - трехмерная передача от падающего нуклона к рассеянному. Пустые кружки - реакция перезарядки, сплошными кружками обозначены данные для прямого развала.

энергий до и выше 1 ГэВ'а. 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].

2 Эксперимент

Экспериментальный материал был получен с помощью 100-см водородной пузырьковой камеры на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Камера была облучена выведенным из ускорителя пучком дейтронов импульса 3.35 ГэВ/с. После стандартной процедуры просмотра, измерений и идентификации была получена в условиях 4 π -геометрии информация о 17 реакциях, представленных в таблице 1.

	реакция	число событий
1.	ppn	102778
2.	$ppn\pi^0$	31295
3.	$p\pi^+nn$	65284
4.	dp	16184
5.	$dp\pi^0$	3950
6.	$dp\pi^0\pi^0$	1839
7.	$d\pi^+n$	4963
8.	$d\pi^+n\pi^0$	1843
9.	$\pi^+\pi^+nn$	315
10.	$ppp\pi^-$	5487
11.	$ppp\pi-\pi^0$	167
12.	$ppp\pi^-\pi^0\pi^0$	67
13.	$pp\pi^+\pi^-n$	1163
14.	$pp\pi^+\pi^-n\pi^0$	49
15.	$dp\pi^+\pi^-$	576
16.	$dp\pi^+\pi^-\pi^0$	39
17.	$dp\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	1414

Таблица 1: Перечень наблюдаемых реакций

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 ± 0.05) мбн. 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 Δ -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 спин-независящей (индекс SI) и спин-зависящей (индекс SD) частей:

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

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 σ и σ_i являются матрицами Паули падающей частицы (нейтрон) и i -того нуклона (протон), коэффициенты a_{ce} , b_{ce} , c_{ce} , d_{ce} , e_{ce} являются комплексными функциями энергии и угла рассеяния взаимодействующих частиц.

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

\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 спин-независящей и спин-зависящей частей дифференциального поперечного сечения получаем:

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

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

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

Соотношение между поперечным сечением периферической 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:

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

Здесь $S(t) = \int [\Psi(r)]^2 e^{-iqr} d^3r$ обозначает форм-фактор 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° в системе центра масс из за того, что $S(0)=1$, дифференциальное поперечное сечение равно:

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

Таким образом, реакция перезарядки неполяризованного дейтрона на неполяризованном протоне-мишени при нулевой передаче ($t=0$) полностью определяется спин-зависящей частью элементарного $np \rightarrow pn$ рассеяния назад в сдвиге (180°). 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 $|c_{ce}|^2 = \sin^2\theta = 0$ и $|b_{ce} - e_{ce}|^2 = \sin^2\theta = 0$, 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 спин-зависящую часть элементарной $np \rightarrow pn$ реакции, то есть 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].

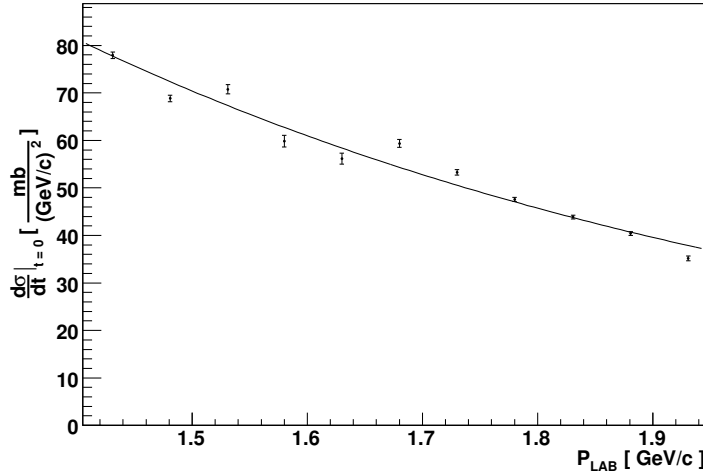


Рис. 2: Экстраполяция данных Сакле к $t = 0$.

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 $d\sigma/dt|_{t=0} = 54.7 \pm 0.2 \text{ мбн}/(\text{ГэВ}/c)^2$. К полученному значению

мы и будем в дальнейшем относить нашу оценку дифференциального поперечного сечения для квазиупругой $dp \rightarrow (pp)n$ перезарядки при $t = 0$. Заметим, что систематическая ошибка в данных Бизарда и др. составляла 5%.

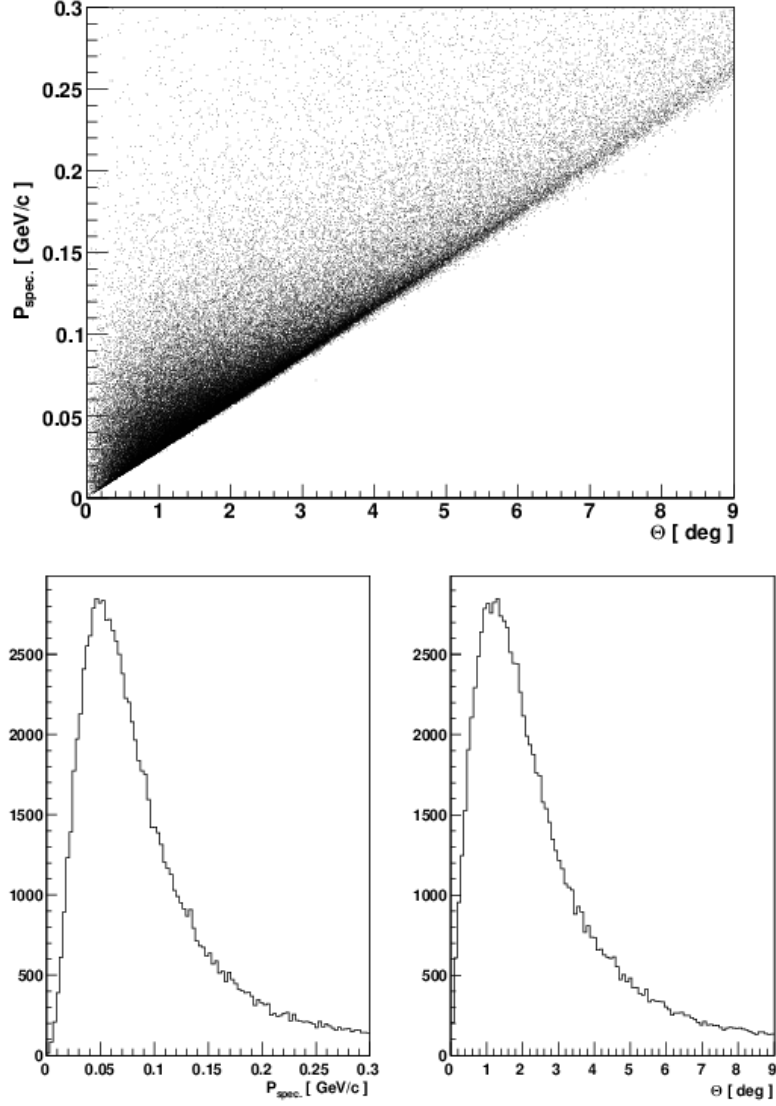


Рис. 3: Диаграмма: импульс нуклона-спектатора в системе покоя дейтрона в зависимости от угла его вылета в лабораторной системе координат. Под диаграммой показаны ее проекции. Масштаб распределений выбран таким, чтобы показать их подобие.

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

Видно, что при углах меньших 5 градусов 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° , 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 Δ -изобарой [14, 4], основная часть которых является следствием квази-pp столкновений, идущих через Δ^{++} и Δ^{+-} изобары (см. диаграммы а) и б) на рис. 4), необходимо было бы ввести поправку на квази-протонные столкновения.

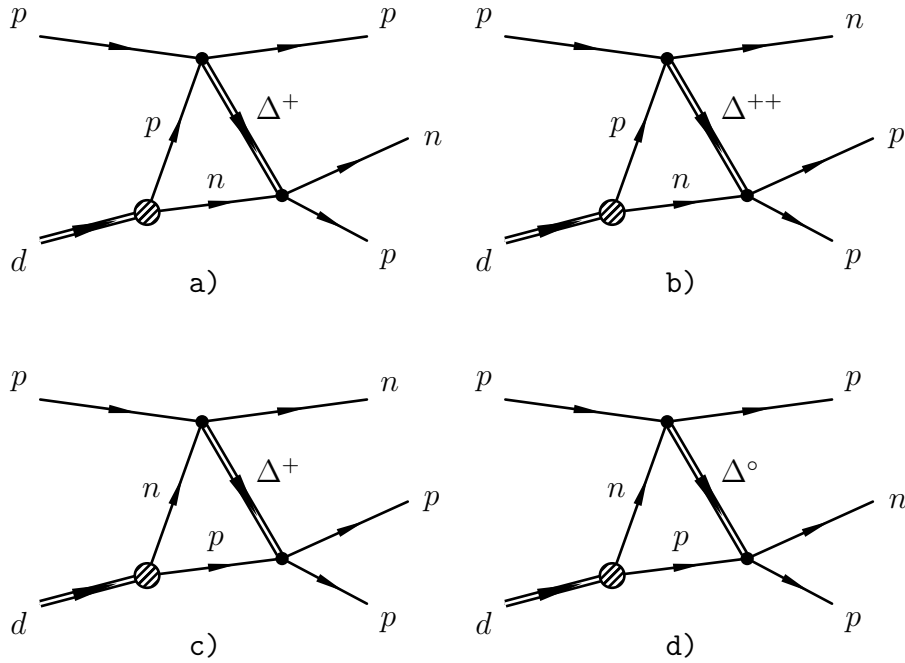


Рис. 4: Диаграммы Фейнмана для реакции $dp \rightarrow ppn$ с участием промежуточной Δ -изобары

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 рисунков 3 и 5 видно, что этот избыток находится в области импульсов больших 0.2 ГэВ/с, т.е. вне конуса с углом раствора до 5 градусов 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 $d\sigma/dt|_{t=0} = 30.2 \pm 4.1$ мбн/(ГэВ/с)².

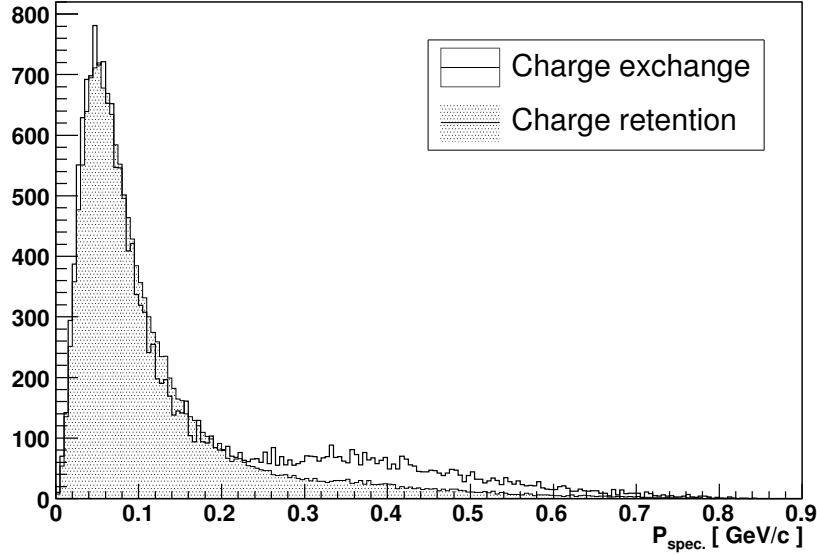


Рис. 5: Импульсные распределения спектаторов из прямого канала и перезарядки нормированные на максимум.

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 высказанных выше предположениях оно может быть приравнено к $\frac{2}{3} \times \frac{(d\sigma/dt)_{np}^{SD}}{(d\sigma/dt)_{np}}$ и, соответственно, доля спиннезависящей части сечения упругой $np \rightarrow pn$ перезарядки $R_{np}^{ID} = \frac{(d\sigma/dt)_{np}^{SI}}{(d\sigma/dt)_{np}^{SD}} = \frac{2}{3 \times R} - 1 = 0.21 \pm 0.17$.

3 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 нулем градусов в реакции $dp \rightarrow (pp)n$ и $np \rightarrow pn$: $R = 0.55 \pm 0.08$, что свидетельствует о преобладающем вкладе спин-зависящей части сечения $np \rightarrow pn$ рассеяния.
3. Важным является продолжение исследований в области более высоких энергий на установке Стрела.

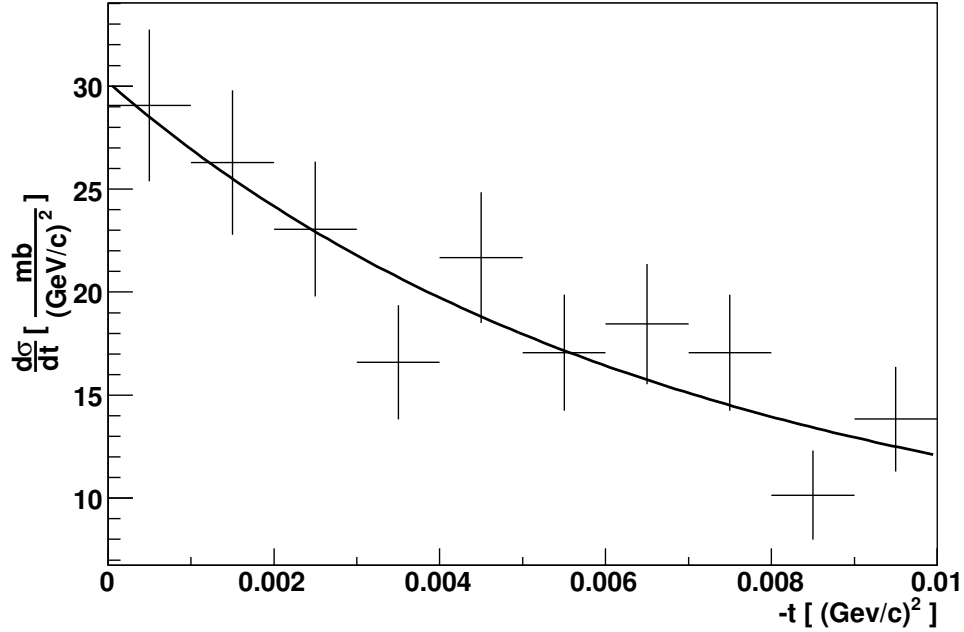


Рис. 6: Экстраполяция дифференциального сечения к $t = 0$.

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.

Список литературы

- [1] I. Pomeranchuk, Sov. JETF 21 (1951) 1113; G.F.Chew, Phys.Rev. 84 (1951)710
- [2] R.Lednicky, V.L.Lyuboshitz, V.V.Lyuboshitz, ISHEPP...2004
- [3] B.S.Aladashvili et al, J.Phys.G: Nucl.Phys., Vol.3, (1977)pp.7-20
- [4] B.S.Aladashvili et al, J.Phys.G: Nucl.Phys.(1977)pp.1225-1240
- [5] V.I.Sharov et al. Czech.J.Phys.55(2005) A283-A305
- [6] V.V.Glagolev et al, Eur.Phys.J A 15, 471-475 (2002)
- [7] D.V.Bugg et al, Phys.Rev. 146, pp 980-992 (1966)
- [8] N.W.Dean, Phys.Rev.D 5 (1972)pp. 1661,2832.
- [9] D.Bugg, C.Wilkin, Nucl.Phys. A 467 (1987) 575

- [10] M.Goldberger, K.Watson, Collision Theory,Wiley, New York (1966)
- [11] J.Bystrycky, F.Lehar and P.Winternitz,J.Phys. (Paris) 39 (1978) 1.
- [12] G.Bizard et al Nuclear Physics B85(1975) 14-30
- [13] J.Bystrycky,F.Lehar, Nucleon-Nucleon Scattering data,editors H.Behrens and G.Ebel, Fachinformationszentrum Karlsruhe,1978 Edition,N 11-1, p.521
- [14] B.S.Aladashvili et.al, Nucl.Phys. A274,486 (1976)

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

V. V. Glagolev ¹, G. Martinská ², J. Mušínský ^{1,2},
N. M. Piskunov ¹, J. Urbán ²

¹ Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

² University of P. J. Šafárik, Jesenná 5, 04154 Košice, Slovak Republic

Abstract

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.