



УДК 539.1.07

## КАЛИБРОВКА ПУЧКОВОГО ПОЛЯРИМЕТРА НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Л. С. Ажгирей<sup>а</sup>, А. А. Жданов<sup>б</sup>, В. Н. Жмыров<sup>а</sup>, В. П. Ладыгин<sup>а</sup>,  
Ф. Легар<sup>в</sup>, А. Н. Прокофьев<sup>б</sup>, Г. Д. Столетов<sup>а</sup>

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

<sup>б</sup> Петербургский институт ядерной физики РАН, Гатчина, Россия

<sup>в</sup> DAPNIA, CEA/Saclay, Gif-sur-Yvette Cedex, France

Описаны результаты калибровки поляриметра, предназначенного для измерения векторной компоненты поляризации пучка дейтронов на синхрофазотроне ОИЯИ. Приводятся данные об анализирующей способности упругого  $pp$ -рассеяния на угол  $14^\circ$  в л.с. в области импульсов протонов от 1,18 до 3,46 ГэВ/с и эффективной анализирующей способности рассеяния протонов на полиэтиленовой мишени на тот же угол при импульсах протонов между 1,4 и 2,8 ГэВ/с. Полученные результаты использовались для измерения поляризации пучка дейтронов в опытах по измерению разности полных сечений  $np$ -рассеяния продольно-поляризованных нейтрона и протона с различными ориентациями спинов.

The results of calibration of the polarimeter for the measurement of the vector component of the polarization of the deuteron beam at the JINR Synchrophasotron are presented. The data on the analyzing power of the elastic  $pp$  scattering at an angle of  $14^\circ$  (lab. syst.) in the range of proton momenta from 1.18 to 3.46 GeV/c and on the effective analyzing power of the proton scattering on polyethylene target at proton momenta between 1.48 and 2.79 GeV/c are given. The data obtained were used to measure the deuteron beam polarization during experiment on the measurement of the total cross section difference  $\Delta\sigma_L$  in  $np$  transmission.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование поляризационных явлений в ядерных реакциях на синхрофазотроне ОИЯИ [1–6] потребовало создания поляриметра для мониторингирования векторной компоненты поляризации пучка дейтронов, поставляемых ионным источником [7]. С этой целью на канале медленного вывода синхрофазотрона был сооружен поляриметр, измеряющий асимметрию рассеяния протонов на полиэтиленовой мишени [8].

Поляриметр состоит из мишени и направленных на нее четырех телескопов, каждый из которых содержит по два сцинтилляционных счетчика. Обе пары телескопов устанавливаются в горизонтальной плоскости (вектор спина дейтронов ориентирован вертикально) под углами относительно падающего пучка, соответствующими кинематике упругого  $pp$ -рассеяния для рассеянной частицы и частицы отдачи. Таким образом, четырехкратные совпадения сигналов со сцинтилляционных счетчиков позволяют выделять события, соответствующие упругому (и квазиупругому)  $pp$ -рассеяниям, и одновременно регистрировать случаи рассеяния направо и налево, определяющие асимметрию рассеяния. Более детальное описание поляриметра приводится в [8].

Основанием для создания этого поляриметра послужило то, что, с одной стороны, поляризация протонов (и нейтронов), вылетающих вперед в результате развала дейтронов на мишени, равна поляризации дейтронного пучка; с другой стороны, известно, что анализирующие способности упругого и квазиупругого  $pp$ -рассеяний в широкой области энергий одинаковы [9].

Помимо относительного мониторингирования поляризации пучка, поляриметр может использоваться и для измерения абсолютной величины поляризации; для этого, однако, он должен быть прокалиброван. Проблеме калибровки пучкового поляриметра и посвящено настоящее сообщение.

### КАЛИБРОВКА ПОЛЯРИМЕТРА

Предварительная калибровка пучкового поляриметра (т.е. определение величины  $A(\text{CH}_2)$  — анализирующей способности для рассеяния на полиэтиленовой мишени) была выполнена [10] по результатам измерения векторной поляризации пучка дейтронов в экспериментах по определению разности полных сечений  $\Delta\sigma_L$   $np$ -рассеяния в сеансах 1995 г. [1] и 1997 г. [4]. Абсолютная величина векторной поляризации пучка была получена в сеансе 1997 г. по результатам измерения асимметрии для разности  $\text{CH}_2$ –С и известной анализирующей способности  $pp$ -рассеяния протонов с импульсом 1,48 ГэВ/с на угол  $14^\circ$ . Отсюда была определена эффективная анализирующая способность для рассеяния на  $\text{CH}_2$ . Далее, привязываясь к этой величине, на основании измерений асимметрии на  $\text{CH}_2$  в сеансах 1995 и 1997 гг. нашли импульсную зависимость  $A(\text{CH}_2)$  для рассеяния протонов на угол  $14^\circ$  в интервале от 1,48 до 3,0 ГэВ/с. Таким образом, абсолютные значения  $A(\text{CH}_2)$  были получены, по существу, по измерениям при одном импульсе дейтронов, 2,96 ГэВ/с.

В 2001 г., в сеансе измерений разности  $\Delta\sigma_L$  представилась возможность провести более детальную калибровку пучкового поляриметра для рассеяния на  $\text{CH}_2$  на угол  $14^\circ$ . Измерения асимметрии  $pp$ -рассеяния по разности  $\text{CH}_2$ –С были выполнены при кинетических энергиях протонов 1,4, 1,7, 1,9 и 2,0 ГэВ. Анализирующая способность упругого  $pp$ -рассеяния в интересующей нас области энергий протонов была определена по мировым данным о поляризации, возникающей при рассеянии неполяризованного пучка на неполяризованной мишени, и по данным об анализирующей способности упругого  $pp$ -рассеяния, полученным на поляризованной мишени. С этой целью использовались результаты измерений угловых зависимостей поляризации в упругом  $pp$ -рассеянии в интервале углов рассеяния  $\Theta^*$  в с.ц.м., включающих угол  $14^\circ$  в л.с., из работ [11–33], приведенные в базе данных [34]; данные об анализирующей способности  $A_{00n0}(pp)$  в окрестности 2,2 ГэВ/с [35]; результаты недавних измерений функции возбуждения анализирующей способности  $pp$ -рассеяния на ускорителе COSY [36].

Угловые зависимости аппроксимировались выражением

$$P(\Theta^*) = \sum_{i=1}^n a_i (\Theta^*)^i, \quad (1)$$

где  $a_i$  — подгоняемые параметры; угловые зависимости из базы данных [34], измеренные при импульсах  $\leq 1,7$  ГэВ/с, фитировались до значения  $n = 2$ , остальные данные — до

значения  $n = 4$ . Из угловых зависимостей  $A_{00n0}(pp)$ , приведенных в [36], интересующие нас значения под углом  $14^\circ$  в л.с. при импульсах выше 1,910 ГэВ/с были найдены путем интерполяции, а ниже этого значения — путем экстраполяции. Что касается работ [31] и [35], в которых измерения проводились под углом  $13,9^\circ$  в л.с., предполагалось, что эти данные можно отнести к углу  $14^\circ$ , допустив лишь незначительную ошибку. Параметры, вычисленные в результате аппроксимации всех упомянутых данных выражением (1), позволили найти значения поляризации  $P_{pp}(14^\circ)$ .

Найденные значения, численно равные анализирующей способности  $A_{00n0}$  упругого  $pp$ -рассеяния на угол  $14^\circ$ , оказалось возможным аппроксимировать плавной зависимостью от импульса протонов в интервале от 1,185 до 3,464 ГэВ/с:

$$A(p) = (0,6658 \pm 0,0066) - (0,1236 \pm 0,0055)p + (0,0077 \pm 0,0012)p^2 \quad (2)$$

при отношении  $\chi^2/ndf = 270,7/142$  для 145 значений поляризации. Линейная аппроксимация дает результат

$$A(p) = (0,7056 \pm 0,0041) - (0,1605 \pm 0,0015)p \quad (3)$$

при отношении  $\chi^2/ndf = 278,7/143$ . Экспериментальные данные и результат аппроксимации показаны на рис. 1, а. На рис. 1, б показаны данные и аппроксимирующая зависимость в интервале импульсов от 2,7 до 3,5 ГэВ/с; эта область дает наибольший вклад в величину  $\chi^2$ .

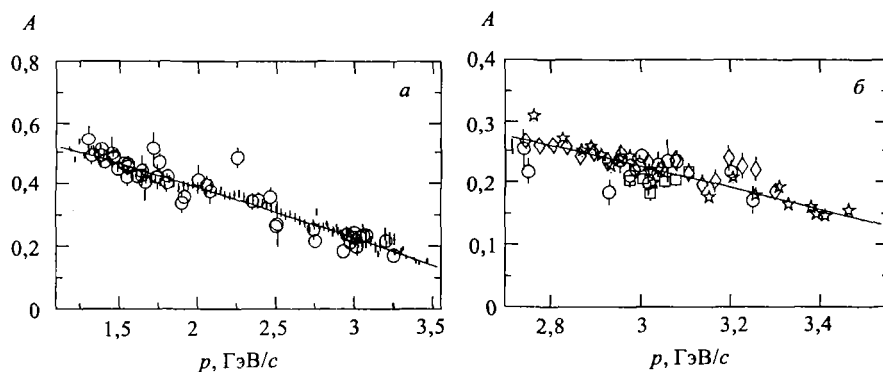


Рис. 1. Зависимость анализирующей способности упругого  $pp$ -рассеяния на угол  $14^\circ$  в л.с. от импульса протонов. Экспериментальные данные: а) светлые кружки — [34]; темные точки — [31, 35, 36]; б) светлые кружки — [34]; звездочки — [31]; квадраты — [35]; ромбы — [36]

Найденная зависимость  $A(p)$  для  $pp$ -рассеяния и результаты измерения асимметрии для разности  $CN_2 - C$  позволили определить эффективную анализирующую способность для рассеяния на мишени  $CN_2$  при кинетических энергиях протонов 1,4, 1,7, 1,9 и 2,0 ГэВ.

Кроме этого, были заново проанализированы результаты измерения асимметрии для разности  $CN_2 - C$  в сеансе 1997 г. при рассеянии протонов с импульсом 1,48 ГэВ/с на угол  $14^\circ$ . Уточненные значения составили: асимметрия в  $pp$ -рассеянии  $\epsilon(pp) = 0,273 \pm 0,008$ ;

Таблица 1. Эффективные анализирующие способности  $A(\text{CH}_2)$  для рассеяния протонов на угол  $14^\circ$ , измеренные пучковым поляриметром

$p_d$ , ГэВ/с	$T_p$ , ГэВ	$\epsilon(\text{CH}_2)$	$A(\text{CH}_2)$	Работа
2,96	0,81	$0,231 \pm 0,005$	$0,395 \pm 0,008$	Перенорм. [10]
4,28	1,40	$0,156 \pm 0,005$	$0,301 \pm 0,012$	Настоящая работа
4,28	1,40	$0,151 \pm 0,008$	$0,275 \pm 0,015$	Настоящая работа
4,72	1,60	$0,168 \pm 0,003$	$0,286 \pm 0,009$	Перенорм. [10]
4,93	1,70	$0,121 \pm 0,004$	$0,225 \pm 0,009$	Настоящая работа
5,14	1,80	$0,144 \pm 0,004$	$0,246 \pm 0,009$	Перенорм. [10]
5,36	1,90	$0,113 \pm 0,004$	$0,206 \pm 0,013$	Настоящая работа
5,57	2,00	$0,103 \pm 0,002$	$0,187 \pm 0,005$	Настоящая работа
6,00	2,20	$0,086 \pm 0,003$	$0,147 \pm 0,007$	Перенорм. [10]

определенная из соотношения (2) анализирующая способность  $pp$ -рассеяния 0,466; поляризация пучка  $P = 0,586 \pm 0,017$  (что согласуется с результатами работы [10]); асимметрия в рассеянии на  $\text{CH}_2$   $\epsilon(\text{CH}_2) = 0,2314 \pm 0,0054$ ; эффективная анализирующая способность при 1,48 ГэВ/с  $A(\text{CH}_2) = 0,395 \pm 0,008$ .

$A(\text{CH}_2)$

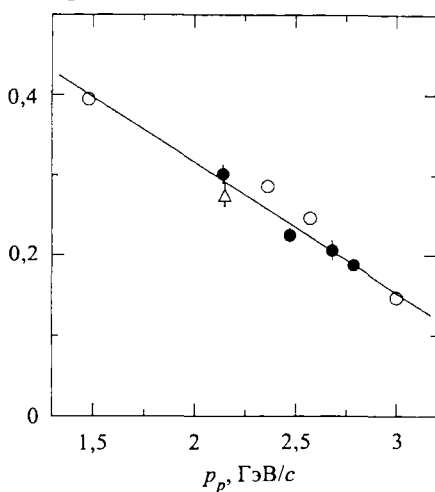


Рис. 2. Зависимость эффективной анализирующей способности  $A(\text{CH}_2)$  для рассеяния на угол  $14^\circ$  в л.с. от импульса протонов. Светлыми кружками показаны перенормированные данные работы [10], темными кружками и светлым треугольником — данные настоящей работы

по эффективной анализирующей способности для рассеяния на  $\text{CH}_2$ , включая перенормированные данные работы [10] и данные, полученные в сеансе 2001 г., приведены в табл. 1 и показаны на рис. 2 в зависимости от импульса протонов.

Перенормировка значений  $A(\text{CH}_2)$  для  $T_p$ , равных 1,6, 1,8 и 2,2 ГэВ, требует отдельного пояснения. Дело в том, что в процессе обработки данных сеанса 1997 г. было замечено уменьшение величины поляризации пучка в ходе измерения параметра  $\Delta\sigma_L$ , и это доказывает необходимость непрерывного мониторинга поляризации. Полученные в процессе мониторинга значения асимметрии в рассеянии на  $\text{CH}_2$  затем были экстраполированы к «нулевому» моменту времени в предположении, что поляризация в ходе всего сеанса уменьшалась линейно; именно эти экстраполированные значения и приведены в табл. 1 и на рис. 1 работы [10]. Сейчас, однако, ясно, что предположение о линейном дрейфе величины поляризации в течение всего сеанса достаточно произвольно, этот дрейф характерен только для периода мониторинга, поэтому вместо экстраполированных значений следует использовать измеренные значения асимметрии, указав возможные систематические ошибки. Все данные

Данные об эффективной анализирующей способности для рассеяния на  $\text{CH}_2$  можно аппроксимировать зависимостью

$$A_{\text{CH}_2}(p_p) = (0,642 \pm 0,016) - (0,163 \pm 0,006)p_p. \quad (4)$$

Отметим, что в табл. 1 и на рис. 2 указаны чисто статистические ошибки. Разброс значений на рис. 2 относительно аппроксимирующей прямой позволяет оценить возможную систематическую ошибку этих данных, которая составляет около 8%, как это и указывалось в работе [10]. Следует также отметить, что телесный угол поляриметра в сеансах 2001 г. был несколько меньше, чем в сеансах 1995 и 1997 гг., что не сказалось на полученных результатах.

Другой способ калибровки пучкового поляриметра (или же определения поляризации пучка по известной анализирующей способности) основан на измерении зависимости числа совпадений сигналов от счетчиков, регистрирующих рассеянную частицу и частицу отдачи, от угла, под которым расположен сопряженный телескоп.

Такие измерения были проведены в июне 2001 г. на пучке векторно-поляризованных дейтронов с импульсом 4,28 ГэВ/с. Угол рассеяния был выбран равным  $14^\circ$ , при этом частица отдачи в упругом  $pp$ -рассеянии вылетает под углом  $66,5^\circ$ . Более подробные измерения, к сожалению, не могли быть выполнены в ходе этого эксперимента, однако полученные результаты, показанные на рис. 3, в достаточной мере иллюстрируют описываемый способ калибровки.

Измеренные угловые зависимости аппроксимировались выражением

$$N/\text{монитор} = N_0 \exp(-((\Theta - \Theta_0)/\sigma_0)^2/2) + A(1 + B\Theta). \quad (5)$$

Здесь первый и второй члены представляют, соответственно, вклады от рассеяния на ядрах водорода и нуклонах углерода, составляющих мишень  $\text{CH}_2$ . По 24 значениям отношений  $N/\text{монитор}$  были определены 11 параметров (параметры  $\Theta_0$ ,  $\sigma_0$  и  $B$  для всех четырех распределений были одинаковы). Поскольку площади под пиками на рис. 3 пропорциональны произведению  $N_0\sigma_0$ , асимметрия рассеяния на водороде представляется в виде

$$\epsilon_{pp} = \frac{L^+R^- - L^-R^+}{(L^+ + L^-)(R^+ + R^-)}, \quad (6)$$

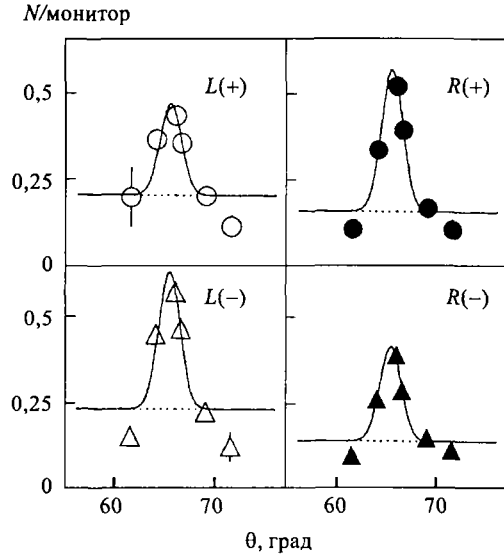


Рис. 3. Зависимости отношений числа четырехкратных совпадений к числу отсчетов монитора от углов, под которыми расположены сопряженные телескопы поляриметра, для разных ориентаций спина дейтронов относительно горизонтальной плоскости. Светлые и темные кружки (треугольники) соответствуют рассеянию налево и направо частиц со спином, направленным вверх (вниз)

где  $L^+$ ,  $L^-$ ,  $R^+$  и  $R^-$  суть значения параметров  $N_0$ , причем  $L$  и  $R$  соответствуют рассеяниям налево и направо, а индексы «+» и «-» — знакам поляризации.

Полученное в этих измерениях значение  $\epsilon_{pp} = 0,2011 \pm 0,0082$  приводит к поляризации пучка, равной  $0,550 \pm 0,022$ . Асимметрия рассеяния на  $\text{CH}_2$  оказалась равной  $0,1512 \pm 0,0085$ , откуда анализирующая способность  $A(\text{CH}_2) = 0,275 \pm 0,015$ . Это значение приведено в табл. 1 и в виде светлого треугольника показано на рис. 2. Видно, что оно согласуется со значением, полученным при этом же импульсе протонов другим способом. Точность результатов можно было бы и повысить, если бы удалось выполнить измерения на крыльях угловых зависимостей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

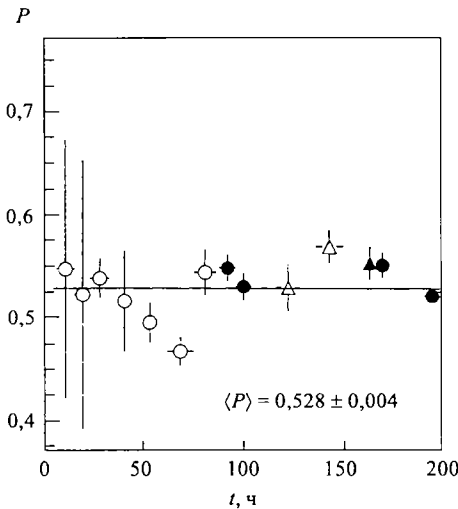


Рис. 4. Результаты измерения векторной поляризации пучка дейтронов в сеансе 2001 г. при разных импульсах дейтронов: светлые кружки — 4,28 ГэВ/с; темные кружки — 4,93 ГэВ/с; светлые треугольники — 5,36 ГэВ/с; темные треугольники — 5,57 ГэВ/с

В заключение приведем результаты измерения поляризации векторно-поляризованного пучка дейтронов в сеансе 2001 г., во время измерений разности полных сечений  $pp$ -рассеяния  $\Delta\sigma_L$  на продольно-поляризованных пучке и мишени, полученные с помощью пучкового поляриметра. Измерения проводились для начальных импульсов дейтронов 4,18; 4,93; 5,36 и 5,57 ГэВ/с. Угол рассеяния в поляриметре был выбран равным  $14^\circ$ , измерения проводились по разности от мишеней  $\text{CH}_2$  и  $\text{C}$ , использовались значения анализирующей способности  $pp$ -рассеяния в соответствии с соотношением (1). Результаты измерений, соответствующие разным значениям импульса протонов, в хронологическом порядке показаны на рис. 4.

Поскольку в течение большей части сеанса использовался пучок с двумя модами поляризации, на рис. 4 приведены усредненные по модам поляризации значения. Среднее значение поляризации в течение указанного времени измерений составило  $\langle P \rangle = 0,528 \pm 0,004$ .

Измерения с тремя модами поляризации пучка дают возможность определить значения поляризации, отвечающие различным ориентациям

спина дейтронов относительно горизонтальной плоскости; такие измерения также проводились несколько раз в ходе сеанса. Условия измерений и полученные результаты приведены в табл. 2.

Отметим, что приведенные в табл. 2 данные, полученные 11 и 13.10.2001, в результате усреднения приводят к значениям, показанным в виде первой и пятой точек на рис. 4. Измерения 19.10.2001 г. проводились с помощью поляриметра, расположенного в фокусе F3 канала медленного вывода ВП-1.

Таблица 2. Поляризация пучка дейтронов с противоположными ориентациями спина

Время измерений	$p_d$ , ГэВ/с	Угол рассеяния	Мишень	$A$	$P(+)$	$P(-)$
06.10.2001	7,6	8°	CH <sub>2</sub>	0,212	0,533 ± 0,073	-0,628 ± 0,072
11.10.2001	4,28	14°	CH <sub>2</sub> -C	0,366	0,568 ± 0,037	-0,612 ± 0,037
					0,544 ± 0,032	-0,601 ± 0,041
13.10.2001	4,28	14°	CH <sub>2</sub> -C	0,366	0,433 ± 0,051	-0,544 ± 0,050
					0,448 ± 0,035	-0,518 ± 0,032
19.10.2001	3,5	14°	CH <sub>2</sub>	0,357	0,314 ± 0,020	-0,441 ± 0,020
					0,305 ± 0,014	-0,490 ± 0,014
					0,322 ± 0,048	-0,495 ± 0,041

Исследования были частично поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (грант №01-02-17299).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adiasevich B. P. et al. // Z. Phys. C. 1996. V. 71. P. 65.*
2. *Afanasiev S. V. et al. // Phys. Lett. B. 1998. V. 434. P. 21.*
3. *Ажгирей Л. С. и др. // ЯФ. 1999. Т. 62. С. 1796.*
4. *Sharov V. I. et al. // Eur. Phys. J. C. 2000. V. 13. P. 255.*
5. *Ladygin V. P. et al. // Eur. Phys. J. A. 2000. V. 8. P. 409.*
6. *Ажгирей Л. С. и др. // ЯФ. 2001. Т. 64. С. 2046.*
7. *Anishchenko N. G. et al. // Proc. of the 5th Intern. Symp. on High Energy Spin Physics, Brookhaven, 1982. AIP Conf. Proc. 1983. V. 95. P. 445.*
8. *Ажгирей Л. С. и др. // ПТЭ. 1997. Т. 1. С. 51; transl.: Instr. and Exp. Tech. 1997. V. 40. P. 43.*
9. *Ball J. et al. // Eur. Phys. J. C. 1999. V. 11. P. 51; references therein.*
10. *Ажгирей Л. С. и др. // Крат. сообщ. ОИЯИ. 1999. №3[95]. С. 20.*
11. *Azhgirey L. S. et al. // Sov. J. Nucl. Phys. 1966. V. 2. P. 636.*
12. *Albrow M. G. et al. // Nucl. Phys. B. 1970. V. 23. P. 445.*
13. *Betz F. W. et al. // Phys. Rev. 1966. V. 148. P. 1289.*
14. *McNaughton M. W. et al. // Phys. Rev. C. 1982. V. 23. P. 1128.*
15. *Barlett M. L. et al. // Phys. Rev. C. 1983. V. 27. P. 682.*
16. *Cozzika G. et al. // Phys. Rev. 1967. V. 164. P. 1672.*

17. *Lehar F. et al.* // Nucl. Phys. B. 1987. V. 294. P. 1013.
18. *Perrot F. et al.* // Ibid. P. 1001.
19. *Borisov N. S. et al.* // JETP Lett. 1981. V. 34. P. 130.
20. *Homer R. J. et al.* // Nuovo Cim. 1962. V. 23. P. 690.
21. *Vovchenko V. G. et al.* // JETP Lett. 1979. V. 29. P. 87.
22. *Garçon M. et al.* // Phys. Lett. B. 1987. V. 183. P. 273.
23. *Marshak M. L. et al.* // Phys. Rev. C. 1987. V. 18. P. 331.
24. *Bell D. A. et al.* // Phys. Lett. B. 1980. V. 94. P. 310.
25. *Miller D. et al.* // Phys. Rev. D. 1977. V. 16. P. 2016.
26. *Diebold R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 35. P. 632.
27. *Makdisi Y. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 1529.
28. *Neal H. A. et al.* // Phys. Rev. 1967. V. 161. P. 1374.
29. *Grannis P. et al.* // Phys. Rev. 1966. V. 148. P. 1297.
30. *Parry J. H. et al.* // Phys. Rev. D. 1973. V. 8. P. 45.
31. *Allgower C. E. et al.* // Nucl. Phys. A. 1998. V. 637. P. 231.
32. *Bareyre P. et al.* // Nuovo Cim. 1961. V. 20. P. 1049.
33. *Arvieux J. et al.* // Z. für Physik C. 1997. V. 76. P. 465.
34. Access via <http://nn-online.sci.kun.nl>
35. *Ball J. et al.* // Eur. Phys. J. C. 1999. V. 10. P. 409.
36. *Altmeier M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 1819.

Получено 11 июня 2002 г.