

P1-2007-180

А. А. Балдин, Б. Н. Гуськов, М. Г. Кадыков, К. В. Михайлов,  
Р. А. Салмин, С. В. Семашко, Е. А. Строковский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
АСИММЕТРИЙ В ИНКЛЮЗИВНЫХ СПЕКТРАХ  $\pi^+$ ,  $p$ ,  $d$   
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ  
ПРОТОНОВ И ДЕЙТРОНОВ С УГЛЕРОДНЫМИ  
МИШЕНЯМИ НА УСТАНОВКЕ **МАРУСЯ**

Направлено в журнал «Ядерная физика»

Балдин А. А. др.

P1-2007-180

Экспериментальное исследование асимметрий в инклюзивных спектрах  $\pi^+$ ,  $p$ ,  $d$  при взаимодействии поляризованных протонов и дейтронов с углеродными мишенями на установке MARUSЯ

Представлены новые экспериментальные данные по односпиновым анализирующим способностям в реакциях с пучками поляризованных протонов с импульсом 3,3 ГэВ/с и поляризованных дейтронов — 5 ГэВ/с. Измерения продуктов реакции проведены на углеродной мишени под углом  $26^\circ$  в диапазоне импульсов 0,6–1,2 ГэВ/с.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Baldin A. A. et al.

P1-2007-180

Asymmetries in Inclusive Spectra of  $\pi^+$ ,  $p$  and  $d$  at Interaction of Polarized Proton and Deuteron Beams with Carbon Nuclei Obtained at the MARUSYA Setup

The new experimental data on one-spin analyzing powers in production of  $\pi^+$ ,  $p$ ,  $d$  at interactions of 3.3 GeV/c polarized protons and of 5 GeV/c polarized deuterons with carbon target are presented. Particles were measured at  $26^\circ$  in the momentum range of 0.6–1.2 GeV/c.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение зависимостей ядерных реакций от направления спина сталкивающихся объектов является эффективным методом исследования ядерных сил в наиболее сложной с точки зрения теоретического описания переходной области энергий. Экспериментальным исследованиям с поляризованными пучками на ускорительном комплексе Лаборатории высоких энергий ОИЯИ посвящен обзор Ф.Легара [1].

Анализирующая способность в инклюзивных реакциях под ненулевыми углами изучалась на пучках синхрофазотрона в ЛВЭ ОИЯИ в экспериментах СЯО [2], ДИСК [3] и КАСПИЙ [4]. В эксперименте [2] были наблюдаемы существенные зависимости анализирующей способности как от энергии сталкивающихся объектов, так и от импульса регистрируемых частиц, которые так и не получили адекватного теоретического описания. Измерения проводились с энергиями поляризованных дейтронов в диапазоне 0,6–2,1 ГэВ/нуклон с регистрацией протонов с импульсами 300–1200 МэВ/с под углами 75 и 120° в лабораторной системе отсчета. В данном эксперименте были установлены существенная зависимость векторной анализирующей способности от увеличения импульса регистрируемых протонов и уменьшение поляризационных эффектов с увеличением энергии сталкивающихся объектов. В экспериментах на установке ДИСК [3] проведены аналогичные исследования с регистрацией продуктов реакции под углами, близкими к 90° в лабораторной системе отсчета, но в области перехода к кинематике, запрещенной для однонуклонных соударений (кумулятивная область). В данной работе было получено экспериментальное указание на чувствительность поляризационных характеристик реакции к изменению механизмов взаимодействия, а именно при переходе в кинематическую область, когда перестает работать нуклонная модель ядра. Важным наблюдением явилось также установление различия в знаках векторной анализирующей способности для  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов.

Интересные данные по зависимостям и знакам векторной анализирующей способности были получены для спектров  $\pi^+$ -,  $\pi^-$ -,  $K^+$ -мезонов и протонов в эксперименте [4]. В отличие от вышеуказанных экспериментов, здесь вторичные частицы регистрировались под углом 24° в лабораторной системе,

что соответствует кинематике центральной области, но при значительных поперечных импульсах. Были получены аналогичные эксперименту [2] зависимости векторной анализирующей способности от энергии столкновения и импульса регистрируемых продуктов, а также установлены различия в знаках векторной анализирующей способности для протонов и пионов. Следует отметить, что эксперименты с поляризованными пучками, проведенные при высоких энергиях (ЦЕРН [5], БНЛ [6], ФНАЛ [7]), показали, что роль спиновых зависимостей не вымирает при существенно более высоких энергиях и передачах импульса. Экспериментальное изучение спиновых явлений в  $pp$ - и  $pA$ -взаимодействиях при высоких энергиях показало, что поляризационные эффекты не убывают, а возрастают с ростом  $X_F$  и  $P_{\perp}$ .

Для понимания роли поляризационных эффектов в ядерных реакциях представляется перспективным проведение систематических экспериментальных исследований как угловых и энергетических зависимостей поляризационных эффектов, так и зависимостей от ароматов регистрируемых частиц, в особенности в переходной области энергий.

Установка МАРУСЯ [8], введенная в эксплуатацию в 2002 г., является адекватным инструментом для проведения таких исследований. В данной работе мы приводим лишь первые результаты, полученные при помощи магнитооптического спектрометра МАРУСЯ на поляризованных пучках синхротрона.

С учетом теоретических предсказаний о смене знака асимметрии при переходе в кумулятивную область кинематики наш эксперимент был нацелен на изучение асимметрий образования частиц в переходной области.

Исследовались асимметрии в образовании пионов, протонов и дейтронов в реакциях с векторно-поляризованными протонами и тензорно-поляризованными дейтронами  $p, d \uparrow + C \rightarrow \pi^+, p, d$ .

Измерения были проведены с пучками векторно-поляризованных протонов с кинетической энергией 2,5 ГэВ/нуклон и тензорно-поляризованных дейтронов с энергией 1,7 ГэВ/нуклон. Регистрировались протоны, пионы и дейтроны с импульсами от 600 до 1200 МэВ/с под углом  $26^\circ$  в лабораторной системе.

В результате проведенных измерений были набраны спектры с импульсами 600, 740, 800, 900, 1000, 1100, 1200 МэВ/с со статистической обеспеченностью: пионы —  $1-4 \cdot 10^3$ , протоны —  $1-4 \cdot 10^4$ , дейтроны —  $1-4 \cdot 10^3$  для каждого знака поляризации.

Отметим, что проведенные измерения показывают возможность изучения на установке МАРУСЯ тонких поляризационных эффектов на уровне 1% со сравнительно невысокими интенсивностями выведенных пучков  $2-5 \cdot 10^7$  ядер/цикл.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В отличие от дорогостоящих установок с геометрией, близкой к  $4\pi$ , многофункциональный магнитооптический спектрометр МАРУСЯ предназначен для целенаправленного изучения редких подпороговых и кумулятивных процессов, а также измерения реакций, требующих высокой статистической обеспеченности (в частности, исследований с поляризованными пучками) в заданном угле и энергетическом диапазоне регистрируемых продуктов ядерных реакций. Для обеспечения возможности работы спектрометра с высокими интенсивностями выведенных пучков и относительно толстыми (до  $10 \text{ г/см}^2$ ) мишенями головная часть установки снабжена бетонной и дополнительными свинцовыми и железными типами защиты.

В ноябре 2002 г. на установке МАРУСЯ был проведен первый набор экспериментальных данных по анализирующей способности инклюзивного образования  $\pi^+$ ,  $p$  и  $d$  при взаимодействии пучков поляризованных протонов и дейтронов с углеродными мишенями. Геометрия эксперимента и тип мишеней были выбраны близкими к параметрам, при которых проводились исследования на установке КАСПИЙ [4] с целью получения возможности сравнения экспериментальных данных.

Магнитный спектрометр МАРУСЯ состоит из дублета квадрупольных линз и двух дипольных магнитов (рис. 1). Первая часть магнитной системы, состоящая из двух линз K100, ML17 и магнита СП-57, является самостоятельным спектрометром для изучения низкоэнергетичных частиц (импульсы  $0,3\text{--}0,7 \text{ ГэВ}/c$ ).

Спектрометр расположен на вращающейся платформе, обеспечивающей вращение относительно мишени под углами от  $20$  до  $70^\circ$ .

В диапазоне углов  $20\text{--}45^\circ$  головной спектрометр сопрягается со второй частью, состоящей из магнита СП-40, что позволяет проводить регистрацию и идентификацию частиц с импульсами  $0,6\text{--}2,0 \text{ ГэВ}/c$ . Данный эксперимент проводился при фиксированном угле регистрации  $26^\circ$ .

Для регистрации и идентификации частиц использовалась стандартная времяпролетная методика на основе сцинтилляционных счетчиков S1, MS11, S11-S16, S8, S9, «Start» при настройке магнитных элементов на заданный импульс. Между магнитами СП57 и СП40 располагался дополнительный годоскоп H, состоящий из 10 вертикально расположенных сцинтилляционных счетчиков шириной 3 см каждый.

Управление и контроль магнитными полями во всех магнитных элементах спектрометра осуществлялся дистанционно на основе калиброванных датчиков Холла. Режимы работы магнитных элементов устанавливались на основе специально измеренных карт магнитных полей [9].

Максимальное время пролета измерялось на базе 13 м между счетчиками S1 и «Start».

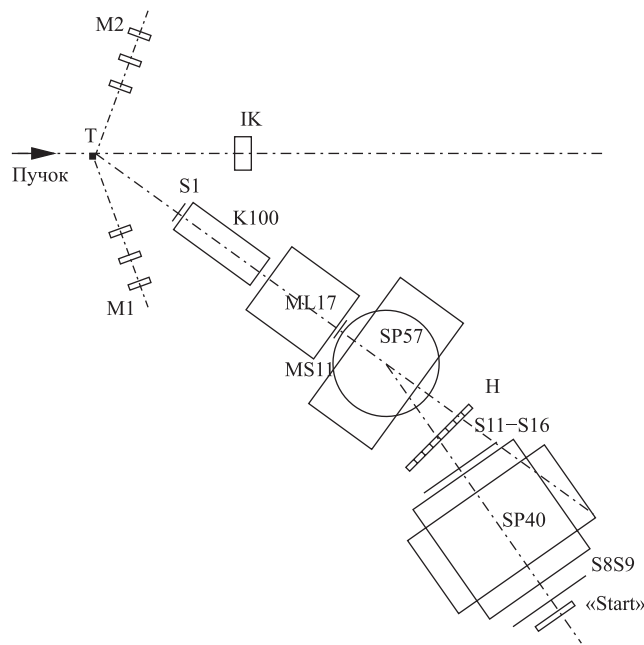


Рис. 1. Блок-схема магнитооптического спектрометра МАРУСЯ

Мишенная станция Т позволяла дистанционно менять и подстраивать точку расположения мишеней. В данной статье мы приводим данные, полученные на тонкой мишени из реакторного графита толщиной 5 мм.

Для измерений малых (единицы процентов) асимметрий особое внимание уделялось проблеме мониторинга выведенного пучка и его положения на исследуемых мишенях. Проблемы флуктуаций во времени положения пучка на мишени, описанные в работе [4] по первым экспериментам с поляризованными пучками на установке КАСПИИ, были учтены и решены на основе тройного мониторинга пучка (двух телескопов-мониторов, нацеленных на мишень справа и слева относительно оси пучка, и ионизационной камеры, расположенной за исследуемой мишенью).

Измерения проводились на пучках поляризованных протонов с импульсом 3,3 ГэВ/с, полученных методом стрипинга на бериллиевой мишени из пучка поляризованных дейтронов и тензорно-поляризованных дейтронов с импульсом 5 ГэВ/с.

Измерялись времяпролетные спектры между общим сигналом «Start» с последнего счетчика, расположенного в конце спектрометра, и счетчиками S8, S9, S11-S16, MS11, S1. Также записывалась информация с годоскопа,

мониторных счетчиков, ионизационной камеры, информация о знаке поляризации.

На рис. 2 приведена зависимость счета мониторных счетчиков от показаний ионизационной камеры. Результаты, представленные в данной статье, содержат лишь те наборы данных, которые показаны на правой картинке.

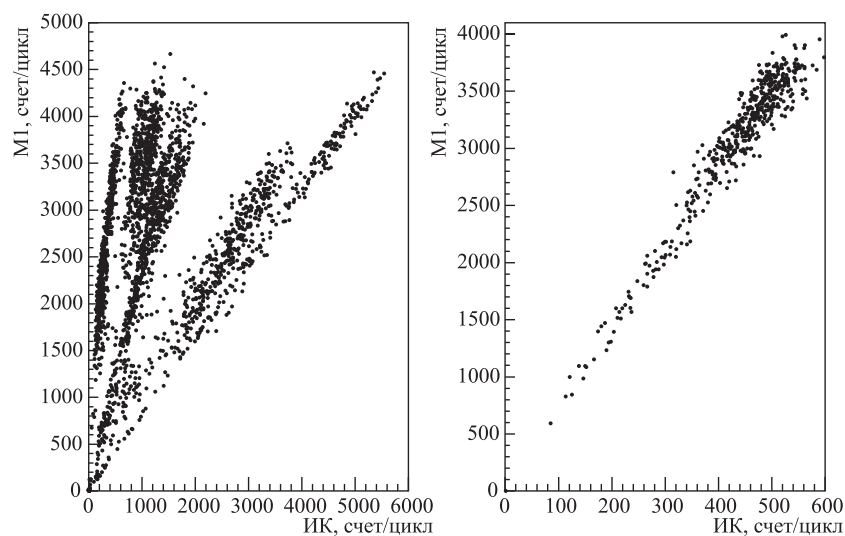


Рис. 2. Корреляция между отсчетами мониторных счетчиков и показаниями ионизационной камеры

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

При обработке данных мы руководствовались следующим отбором критериев:

- рассматривались только длительные непрерывные измерения, не менее 30 мин (при интенсивности пучка  $10^9$ ), что соответствует 200 сбросам ускорителя;
- исключались наборы с нестабильными параметрами пучка (негладкие зависимости показаний мониторов от номера сброса ускорителя);
- анализировалась корреляция между отсчетами ионизационной камеры и мониторными счетчиками (рис. 2);
- исключались наборы с «веерной» структурой, как это показано на рис. 2 слева;

— для наборов с пучками поляризованных протонов рассматривались данные только при наличии одного отсчета в годоскопе для зарегистрированного события.

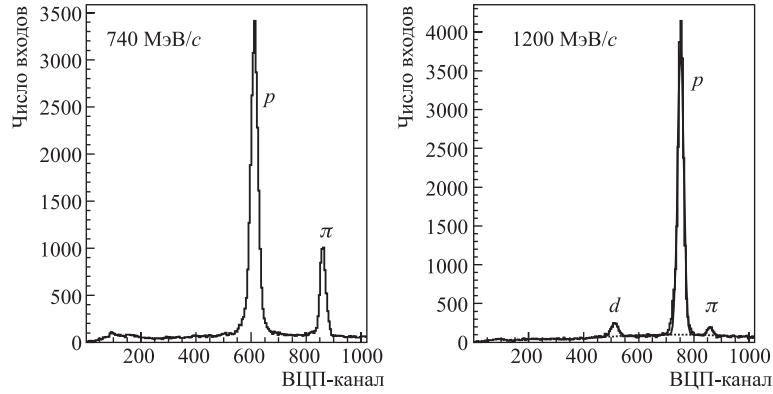


Рис. 3. Времяпролетный спектр между счетчиками «Start» и S1

На рис. 3 показан времяпролетный спектр между счетчиками «Start» и S1.

Пики дейтронов, протонов и пионов хорошо согласуются с распределениями их расчетных положений (рис. 3). Цена канала 68 пс. Времяпролетные распределения фитировались суммой трех гауссианов с квадратичным полиномом ( $\chi^2/n$  для всех обработанных данных не хуже 1,5). Далее подсчитывалось число событий в каждом пике в интервале  $\pm 3\sigma$  для каждого знака поляризации. Для интервала импульсов регистрируемых частиц более 1 ГэВ/с для протонов и пионов брались интервалы  $\pm 2\sigma$ . Фон исключался на основе интеграла от фитированного полинома в пределах выбранного интервала под пиком, и считалось, что фоновые события нечувствительны к знаку поляризации.

Полученные значения нормировались на мониторные отсчеты с телескопов мониторных счетчиков. Использовались следующие соотношения:

$$M^+ = M_1^+ + kM_2^+, M^- = M_1^- + kM_2^-,$$

$$k = (M_1^+ + M_1^-)/(M_2^+ + M_2^-).$$

Здесь  $M_1^\pm, M_2^\pm$  — счет левого и правого телескопов мониторов для заданного знака поляризации.

Векторная анализирующая способность вычислялась по формуле

$$A_y = \frac{1}{P_z} \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-},$$



где  $n^+$ ,  $n^-$  — число зарегистрированных частиц с соответствующим знаком поляризации пучка,  $P_z$  — величина векторной поляризации пучка.

Приведем общую формулу для сечения реакции с поляризованным пучком:

$$\sigma_{\text{pol}} = \sigma_0 \left( 1 + \frac{3}{2} P_z A_y + \frac{1}{2} P_{zz} A_{yy} \right),$$

где  $P_{zz}$  — величина тензорной поляризации пучка,  $A_{yy}$  — тензорная анализирующая способность.

Источник поляризованных дейтронов ПОЛЯРИС [10] для случая тензорной поляризации выдает смесь векторной и тензорной поляризации. В данном режиме работы поляризация  $P_{zz}$  для каждого цикла ускорения меняет знак, в то время как векторная поляризация не меняет [11]. Таким образом, можно использовать следующие формулы для определения анализирующих способностей:

$$A_y = \frac{1}{P_z} \frac{n^+ + n^- - 2n^0}{3n^0},$$

$$A_{yy} = \frac{1}{P_{zz}} \frac{n^+ - n^-}{n^0}.$$

Сначала для каждого набора данных при заданных типе реакции и импульсе регистрируемых частиц вычислялась асимметрия. Затем вычислялась асимметрия для всех наборов данных измерения данной реакции с учетом весов согласно формулам

$$A = \frac{\sum_i A_i (1/\sigma_i^2)}{\sum_i (1/\sigma_i^2)},$$

$$\sigma A = \sqrt{\frac{1}{\sum_i (1/\sigma_i^2)}}.$$

Для определения анализирующей способности асимметрия нормируется на величину поляризации пучка, которая определялась специально в группах профессора Л. С. Золина и В. Н. Жмырова.

Значения поляризации пучка, использованные нами при вычислении анализирующих способностей: для дейтронного пучка —  $P_z = 0,175 \pm 0,06$ ;  $P_{zz} = 0,743 \pm 0,02$ ; для протонного пучка —  $P_z = 0,552 \pm 0,021$ .

Ввиду значительных статистических ошибок, полученных нами в данной серии измерений, систематические ошибки измерения величины поляризации пучка не учитывались.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты представлены на рис. 4–7 и в табл. 1–3.

Для пионов прослеживается тенденция уменьшения векторной анализирующей способности с увеличением их импульса и изменения знака асимметрии.

На рис. 5 приведены данные, ранее полученные на установке КАСПИЙ [4] в близких по кинематике условиях. Данные эксперимента [4] были получены при меньшей 1,23 и большей 2,5 ГэВ/нуклон энергии пучка поляризованных

**Таблица 1. Векторная анализирующая способность в реакциях  $\vec{p}C \rightarrow \pi^+, p, dX$**

$P, \text{МэВ}/c$	$A_y(pC \rightarrow \pi^+ X)$	$A_y(pC \rightarrow pX)$	$A_y(pC \rightarrow dX)$
600	$0,034 \pm 0,018$	$-0,047 \pm 0,017$	—
740	$0,032 \pm 0,014$	$-0,001 \pm 0,011$	—
1000	$0,021 \pm 0,032$	$-0,013 \pm 0,018$	$-0,145 \pm 0,076$

**Таблица 2. Векторная и тензорная анализирующие способности в реакциях  $\vec{d}C \rightarrow \pi^+, pX$**

$P, \text{МэВ}/c$	$A_y(dC \rightarrow \pi^+ X)$	$A_{yy}(dC \rightarrow \pi^+ X)$	$A_y(dC \rightarrow pX)$	$A_{yy}(dC \rightarrow pX)$
600	$0,084 \pm 0,030$	$-0,045 \pm 0,020$	$-0,048 \pm 0,017$	$-0,009 \pm 0,014$
740	$0,015 \pm 0,009$	$-0,061 \pm 0,014$	$0,013 \pm 0,006$	$-0,013 \pm 0,007$
820	$0,034 \pm 0,020$	$0,008 \pm 0,028$	$0,031 \pm 0,012$	$-0,022 \pm 0,011$
900	$0,038 \pm 0,019$	$-0,020 \pm 0,024$	$0,041 \pm 0,014$	$-0,008 \pm 0,008$
1000	$-0,187 \pm 0,062$	$0,006 \pm 0,027$	$0,020 \pm 0,008$	$-0,010 \pm 0,007$
1100	$-0,131 \pm 0,054$	$0,021 \pm 0,059$	$0,012 \pm 0,008$	$-0,015 \pm 0,013$
1200	$-0,043 \pm 0,027$	$-0,043 \pm 0,042$	$0,046 \pm 0,015$	$-0,021 \pm 0,006$

**Таблица 3. Векторная и тензорная анализирующие способности в реакции  $\vec{d}C \rightarrow dX$**

$P, \text{МэВ}/c$	$A_y(dC \rightarrow dX)$	$A_{yy}(dC \rightarrow dX)$
1000	$-0,074 \pm 0,030$	$-0,023 \pm 0,031$
1100	$0,064 \pm 0,036$	$-0,048 \pm 0,052$
1200	$-0,078 \pm 0,029$	$0,051 \pm 0,025$

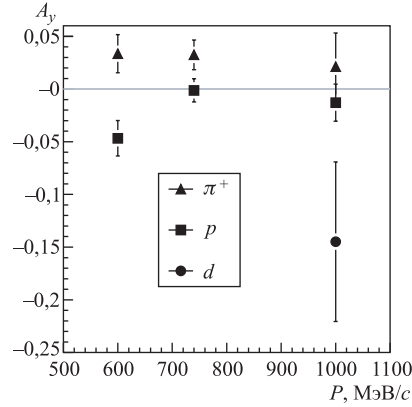


Рис. 4. Векторные анализирующие способности для реакций  $\bar{p}C \rightarrow \pi^+, p, dX$

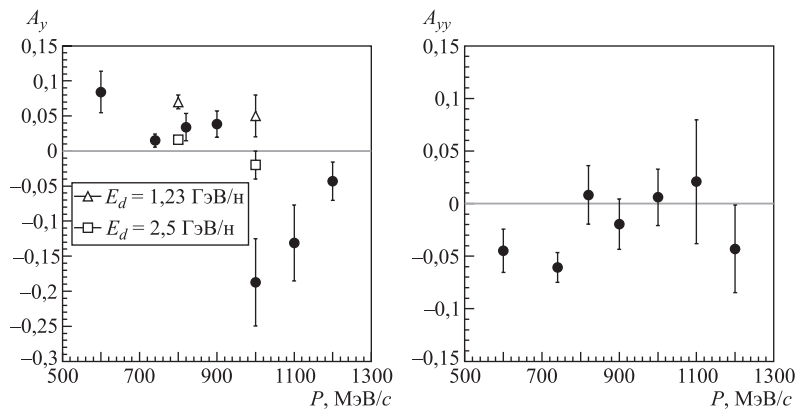


Рис. 5. Векторная и тензорная анализирующая способности в реакции  $\bar{d}C \rightarrow \pi^+ X$

дейтронов. Таким образом, видно, что новые данные для пионов вполне согласуются с ранее полученными. Для протонов (рис. 6) наблюдается тенденция к увеличению векторной анализирующей способности с увеличением импульса регистрируемых протонов и наблюдается изменение знака асимметрии.

В заключение следует отметить, что в настоящее время развиты система сбора данных, оснащённость детекторами, а также система настройки магнитной оптики спектрометра МАРУСЯ, что привело к увеличению акцептанса в пять раз по сравнению с тем, как проводились исследования, представленные в данной работе. Это позволяет проводить измерения с меньшими интенсивностями поляризованных пучков, значительно ускорить время набора данных

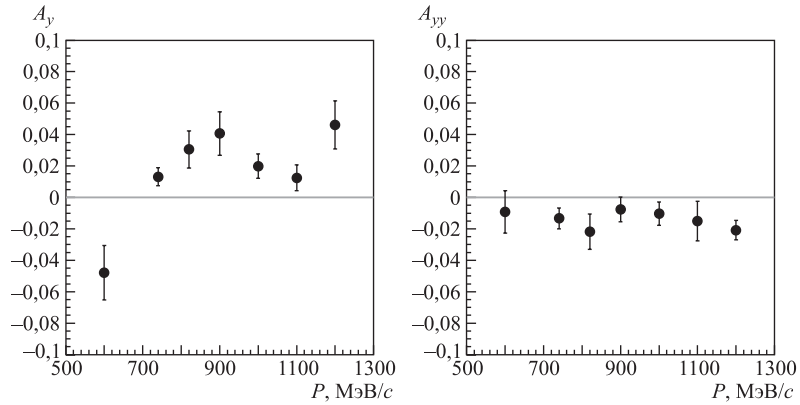


Рис. 6. Векторная и тензорная анализирующие способности в реакции  $\vec{d}\vec{C} \rightarrow pX$

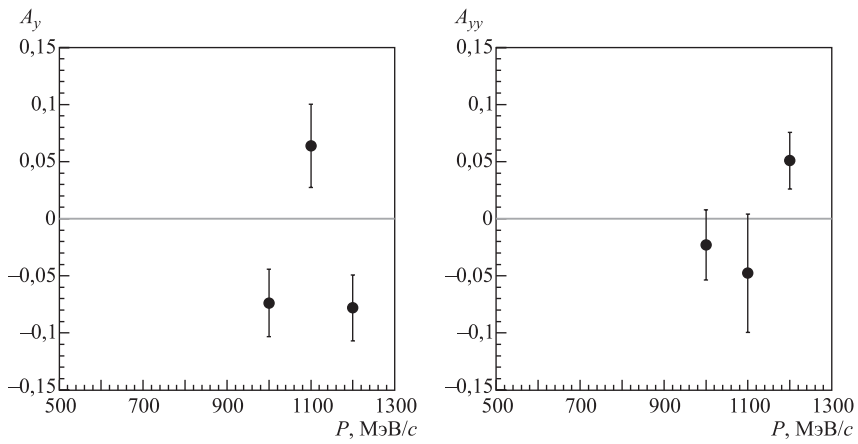


Рис. 7. Векторная и тензорная анализирующие способности в реакции  $\vec{d}\vec{C} \rightarrow dX$

и существенно повысить качество и статистическую обеспеченность будущих исследований.

Нам приятно выразить благодарность Л. С. Золину и В. Н. Жмырову за предоставленные данные о поляризации пучков. Считаем своим долгом выразить благодарность коллегам, предоставившим нам возможность (используя выведенный пучок одновременно с установками МГУ и СФЕРА) провести наши исследования. Мы искренне благодарны всем специалистам ускорительного комплекса ЛВЭ, обеспечившим последний сеанс работы синхрофазотрона с поляризованными пучками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Легар Ф.* // ЭЧАЯ. 2005. т. 36, вып. 5. С. 955–997.
2. *Безногих Г. Г. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ №4[50]-91. Дубна, 1991. С. 5–11.
3. *Аверичев Г. С. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ №1[69]-95. Дубна, 1995. С. 27–36; ЯФ. 1997. Т. 60, №10. С. 1643.
4. *Балдин А. А. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ №5[73]-95. Дубна, 1995. С. 41–50.
5. *Antille J. et al.* // Phys. Lett. 1980. B94. P. 523.
6. *Saroff S. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. P. 995.
7. *Adams D. L. et al.* // Phys. Lett. 1991. B261. P. 201; Phys. Lett. 1991. B264. P. 462.
8. *Арефьев В. А. и др.* Сообщение ОИЯИ P1-2001-277. Дубна, 2001.
9. *Балдин А. А. и др.* Препринт ОИЯИ P-13-2006-67. Дубна, 2006.
10. *Anishchenko N. G. et al.* // Proc. 6<sup>th</sup> Int. Symp. on High Energy Spin Phys., Marseille, 1984; J. Phys. (Paris) coll. C2, 1985. suppl., No. 2, V. 46. P. C2–703.
11. *Ableev V. G. et al.* // NIM. 1991. V. A306. P. 73–82.

Получено 7 декабря 2007 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 05.02.2008.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,01. Тираж 375 экз. Заказ № 56047.

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/)