



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009-23  
ОЭФ

В.В. Мочалов, Н.И. Беликов, А.Н. Васильев, А.А. Деревщиков,  
Ю.А. Матуленко, А.П. Мещанин, Н.Г. Минаев, С.Б. Нурушев,  
А.Ф. Прудкогляд, Л.Ф. Соловьев  
*Институт физики высоких энергий, Протвино*

Н.С. Борисов, А.Б. Неганов, Ю.А. Усов, О.Н. Щевелев  
*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

**ИЗМЕРЕНИЕ ОДНОСПИНОВОЙ АСИММЕТРИИ  
В РЕАКЦИИ  $\pi^- d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 X$  В ОБЛАСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ  
ПУЧКА ПРИ 40 ГэВ И  $p_T$  ДО 2 ГэВ/с**

Направлено в ЯФ

Протвино 2009

**Аннотация**

Мочалов В.В. и др. Измерение односпиновой асимметрии в реакции  $\pi^- d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 X$  в области фрагментации пучка при 40 ГэВ и  $p_T$  до 2 ГэВ/с: Препринт ИФВЭ 2009-23. – Протвино, 2009. – 8 с., 3 рис., 1 табл.

Проведено исследование односпиновой асимметрии  $A_N$  в реакции  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  в области фрагментации пучка при энергии 40 ГэВ на установке ПРОЗА ускорителя У-70 ИФВЭ. Измеренное значение  $A_N = [13.6 \pm 2.6 \text{ (стат.)} \pm 2.0 \text{ (сист.)}]%$  в интервале  $0.7 < x_F < 1.0$  и  $1.0 < p_T < 1.8$  ГэВ/с. Результаты совпадают с величиной асимметрии  $\pi^0$ -мезонов в зарядовообменной реакции  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + n$  при тех же значениях поперечного импульса и энергии пучка.

**Abstract**

Mochalov V.V. et al. Single-spin asymmetry measurement in the reaction  $\pi^- d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 X$  in the beam fragmentation region at 40 GeV and  $p_T$  up to 2 GeV/c: IHEP Preprint 2009-23. – Protvino, 2009. – p. 8, figs. 3, tables 1.

The study of single-spin asymmetry  $A_N$  in the reaction  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  in the beam fragmentation region at 40 GeV has been carried out at the PROZA set-up at the U70 IHEP accelerator. The  $A_N$  value turned out to be  $[13.6 \pm 2.6 \text{ (stat.)} \pm 2.0 \text{ (syst.)}]%$  in the  $0.7 < x_F < 1.0$  and  $1.0 < p_T < 1.8$  GeV/c region. The obtained results are in a good agreement with the  $\pi^0$  asymmetry in the  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + n$  reaction at the same  $p_T$  values.

## Введение

Среди нескольких направлений по изучению свойств материи в сильных взаимодействиях, проводимых в ИФВЭ, эксперименты по исследованию поляризационных эффектов традиционно занимают важное место. На установке ПРОЗА был выполнен цикл исследований односпиновой асимметрии  $A_N$  как в эксклюзивных, так и в инклюзивных реакциях. При изучении различных эксклюзивных зарядообменных реакций при 40 ГэВ были обнаружены значительные эффекты [1]-[3].

При той же энергии были проведены измерения односпиновой асимметрии инклюзивного образования  $\pi^0$ -мезонов на протонной и дейтериевой мишенях в области фрагментации неполяризованного пучка в реакциях:

$$\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X; \quad (1)$$

$$\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X. \quad (2)$$

При малых значениях поперечных импульсов ( $p_T < 1$  ГэВ/с) измеренная асимметрия сравнима с нулем. Однако было получено указание на возможное возрастание асимметрии с ростом поперечного импульса [4, 5].

В данной работе представлены результаты измерения односпиновой асимметрии  $A_N$  в реакции (2) в области фрагментации пучка при более высоких значениях поперечного импульса  $p_T$ , а именно при  $1.0 < p_T < 1.8$  ГэВ/с. Одновременно измерена асимметрия в реакции  $K^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ .

## Постановка эксперимента

Исследования проводились на 14-м канале ускорительного комплекса У-70, на установке ПРОЗА. Установка подробно описана в работе [6].

Схема экспериментальной установки приведена на **Рис. 1**. Пучок отрицательных частиц, образованных на внутренней мишени ускорителя У-70, фокусировался на поляризованную мишень установки (*PT*). Сформированный пучок состоял из  $\pi^-$ -мезонов (97.9%),  $K^-$ -мезонов (1.8%) и антипротонов (0.3%). Интенсивность пучка составляла до  $3 \cdot 10^6$  частиц за десятисекундный цикл У-70 при длительности вывода пучка от 1.8 сек. Разброс частиц по импульсу (RMS) составлял около 2%. Размер пучка в центре мишени составлял  $\sigma_x \simeq \sigma_y \simeq 3.5$  мм, угловой разброс не превышал 1 мрад. Профиль пучка в центре мишени представлен на **Рис. 2**. Более 97% частиц пучка попадало в мишень.

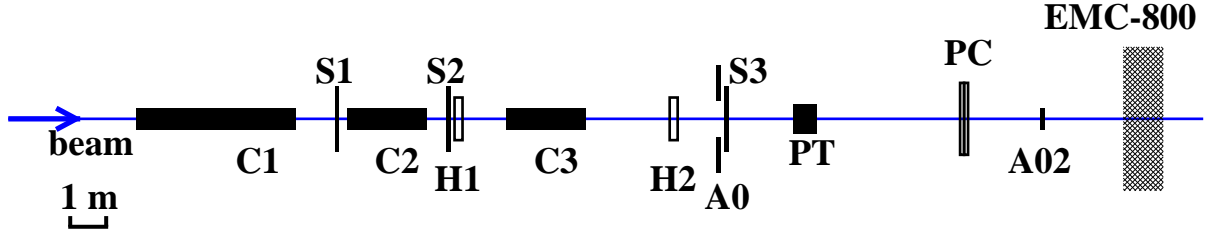


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ПРОЗА: *S1 – S3* – триггерные сцинтилляционные счетчики; *H1, H2* – годоскопы; *C1 – C3* – пороговые черенковские счетчики; *A0, A02* – счетчики антисовпадений; *PT* – поляризованная мишень; *PC* – пропорциональная камера; EMC-800 – электромагнитный калориметр.

В эксперименте использовалась поляризованная мишень замороженного типа на основе полностью дейтерированного пропандиола  $C_3D_6(OD)_2$  [7] диаметром 20 мм и длиной по пучку 200 мм. Средняя векторная поляризация ядер дейтерия в режиме набора данных составляла  $(37 \pm 2)\%$ . Время релаксации поляризации в “замороженном” режиме составляло около 500 часов. Тензорная поляризации мишени была

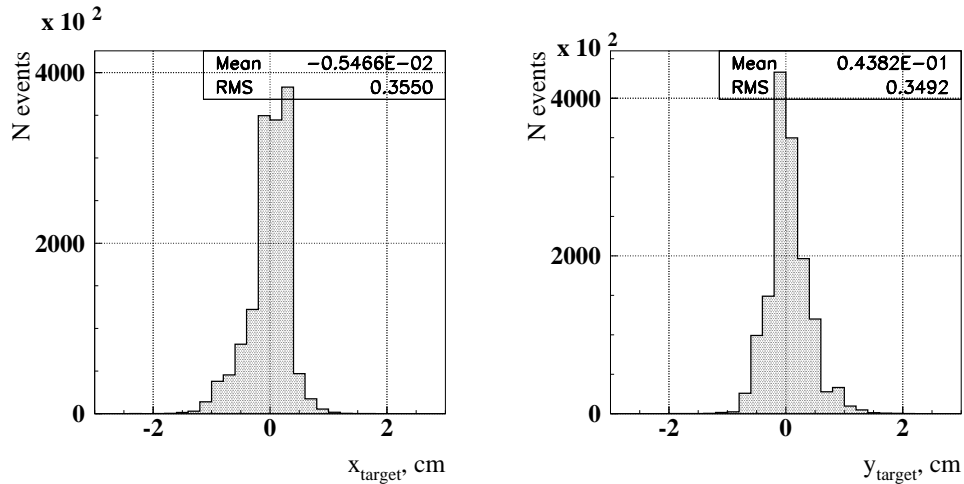


Рис. 2. Профили пучка в центре мишени по  $x$  (слева) и  $y$ .

совместима с нулем. Накачка поляризации (одновременно с ее реверсом) занимала около четырех часов и происходила в среднем один раз в течение полутора суток.

Количество падающих на мишень частиц определялось тремя сцинтилляционными счетчиками  $S1-S3$ . Диаметр первых двух счетчиков  $S1$  и  $S2$  составлял 10 см, последнего,  $S3$ , расположенного около мишени, – 1.8 см.

Сорт частицы определялся тремя пороговыми черенковскими счетчиками  $C1-C3$ , два из которых были настроены на регистрацию  $\pi$ -мезонов, а один на регистрацию  $K + \pi$ -мезонов. При отсутствии сигнала со всех трех счетчиков пучковая частица считалась антипротоном.

Координата падающих на мишень пучковых частиц определялась двумя годоскопами  $H1$  и  $H2$ , размещенными на расстоянии 8.7 и 3.2 м до центра мишени соответственно. Годоскоп  $H1$  состоял из двух плоскостей, содержащих по 16 сцинтилляционных счетчиков размером  $5 \times 5 \times 85$  мм<sup>3</sup>; годоскоп  $H2$  – из двух плоскостей по 12 счетчиков размером  $3 \times 5 \times 40$  мм<sup>3</sup> (3 мм – в направлении перпендикулярном пучку).

Триггер нулевого уровня  $T_0$  вырабатывался при совпадении сигналов от сцинтилляционных счетчиков  $S1-S3$  в антисовпадении со счетчиками  $A0$  и  $A02$ . Информация с пороговых черенковских счетчиков  $C1-C3$  при необходимости могла использоваться для выработки триггера.

Гамма-кванты регистрировались электромагнитным калориметром полного поглощения. Детектор состоял из 796 счетчиков из свинцового стекла ТФ1-00, уложенных в виде прямоугольной матрицы (32 столбца по 25 счетчиков в каждом, 4 центральных счетчика были изъяты из матрицы, чтобы пропустить пучок). Калориметр находился на расстоянии  $\approx 8$  м от мишени. Счетчики размером  $38 \times 38 \times 450$  мм<sup>3</sup> (18 радиационных длин) были обернуты алюминизированным майларом толщиной 20 мкм. Черенковский свет, возникавший в стекле от электромагнитного ливня, регистрировался 12-диодным фотоумножителем ФЭУ-84/3 с диаметром фотокатода 34 мм. В качестве электроники амплитудного анализа использовались 10-битные аналого-цифровые преобразователи в стандарте СУММА. Напряжения на делителях ФЭУ-84 было выбрано таким образом, что регистрируемая энергия от гамма-кванта с энергией 40 ГэВ попадала в динамический диапазон АЦП.

Для определения коэффициентов, связывающих сигнал в каждой ячейке детектора с энергией, выделившейся в этом счетчике, проводилась калибровка детектора электронным пучком с энергией 26.6 ГэВ. Конструкция калориметра позволяла перемещать детектор в горизонтальном и вертикальном направлениях поперек пучка таким образом, что электронный пучок мог засветить все счетчики калориметра. Стабильность энергетической шкалы калориметра мониторировалась с помощью светоизлучающего диода. Во время набора статистики проводилась дополнительная калибровка на массу  $\pi^0$ -мезона. Она и позволяла определить окончательные значения калибровочных коэффициентов.

Для обогащения статистики событиями с поперечными импульсами вблизи границы фазового объема был подготовлен специальный триггер. Для формирования

триггерного сигнала были разработаны и изготовлены 16 специальных дискриминаторов (по одному на два столбца), так чтобы амплитуда сигнала, пропорциональная суммарной энергии, выделенной в каждой паре столбцов, превышала выбранный порог, пропорциональный  $p_T(min)$  для каждого дискриминатора. После дискриминатора сигнал с каждой пары поступал на аналоговый сумматор. Триггер вырабатывался, если суммарный поперечный импульс, определенный по 16 дискриминаторам, был выше порога.

Алгоритм восстановления ливней в гамма-детекторе подробно описан в работе [8]. При восстановлении электромагнитных ливней в детекторе использовались следующие критерии:

- энергovyделение в счетчике должно превышать 100 МэВ;
- суммарная энергия одного ливня должна быть больше 1 ГэВ;
- форма ливня должна удовлетворять  $\chi^2$  критерию описания ее среднестатистической формой электромагнитного ливня.

Для нахождения азимутальной асимметрии  $\pi^0$ -мезонов отбирались комбинации пар  $\gamma$ -квантов в интервале эффективных масс 90-170 МэВ/ $c^2$ .

Основным фоном при реконструкции  $\pi^0$ -мезонов являлись ливни от заряженных и нейтральных адронов, а также комбинаторный фон  $\gamma$ -квантов от разных  $\pi^0$ -мезонов.

Для подавления фона от заряженных адронов использовалась информация от пропорциональных камер (РС) [9]. Трек заряженной частицы определялся по координатам пучковой частицы и координате в камере в предположении, что взаимодействие произошло в центре поляризованной мишени (в направлении по пучку). Данный трек экстраполировался на плоскость калориметра, в котором проводился поиск максимума ливня в радиусе 1.25 счетчика вокруг найденной координаты трека. При обнаружении ливня данные в радиусе трех счетчиков относительно выбранного максимума считались принадлежащими ливню от заряженного адрона и не использовались для поиска электромагнитного ливня. В результате применения такого алгоритма фон под массовым спектром  $\pi^0$ -мезона уменьшился в 2.6 раза.

Для уменьшения фона от нейтральных адронов проводился анализ формы поперечного развития ливня и исключались ливни, сильно отличающиеся от среднестатистической. Процедура подавления нейтральных адронных ливней по форме ливня позволила уменьшить количество фоновых событий еще на 30% [9].

Одновременное применение двух процедур позволило улучшить отношение сигнал/фон в  $3.2 \pm 0.2$  раза. При этом величина сигнала над фоном уменьшилась на  $(12 \pm 1)\%$ . Подробно процедура подавления фона и распределения двухмассовых событий приведена в работе [4].

Электромагнитный калориметр перекрывал полный азимутальный угол  $2\pi$ . Значение “сырой” асимметрии  $A_N^{raw}(\phi)$  измерялось для нескольких значений  $\langle \cos\phi \rangle$ :

$$A_N^{meas}(\phi) = \frac{D}{P_{target}} \cdot A_N^{raw}(\phi) = \frac{D}{P_{target}} \cdot \frac{n_{\uparrow}(\phi) - n_{\downarrow}(\phi)}{n_{\uparrow}(\phi) + n_{\downarrow}(\phi)}, \quad (3)$$

где  $D$  – фактор “разбавления” мишени,  $n_{\uparrow}$  и  $n_{\downarrow}$  – нормированные на монитор числа  $\pi^0$ -мезонов, образованных на мишени при противоположных направлениях вектора поляризации для выбранного интервала  $\cos\phi$ .

Зависимость  $A_N^{meas}(\phi)$  фитировалась функцией

$$A_N^{meas}(\phi) = A_0 + A_N \cdot \cos(\phi), \quad (4)$$

где  $A_N$  – искомая асимметрия.

Такой способ измерения асимметрии позволяет избежать систематических ошибок, связанных с геометрической несимметричностью установки и “плаванием” во времени ее параметров.

Для получения окончательного значения асимметрии согласно формуле (3) необходимо было определить фактор разбавления мишени, для чего были проведены специальные измерения с использованием углеродной и “пустой” мишени. Процедура измерения описана (для водородной мишени) в работе [4]. Для дейтериевой мишени фактор разбавления находился в диапазоне от 2.5 до 5 и убывал с ростом  $x_F$  [5].

## Результаты измерений

Асимметрия была измерена в области  $0.6 < x_F < 1.0$  и  $1.0 < p_T < 1.8$  ГэВ/с. Результаты измерений асимметрии  $A_N$  для различных интервалов переменных  $x_F$  и  $p_T$  приведены в **Таблице 1**. Знак асимметрии выбран для системы *поляризованной* частицы, чтобы находиться в согласии с результатами экспериментов с поляризованным протонным пучком.

Таблица 1.  $A_N$  в реакции  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  в зависимости от  $x_F$  и  $p_T$

$x_F / p_T$ , ГэВ/с	1.0-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	1.6-1.8	1.0-1.8
0.6-0.7	$-8.6 \pm 8.0$	$2 \pm 10.0$	$-23.0 \pm 16.0$	$2.0 \pm 25.0$	<b><math>-6.5 \pm 5.7</math></b>
0.7-0.8	$17.0 \pm 8.0$	$30.0 \pm 9.5$	$24.0 \pm 11.0$	$6.0 \pm 16.0$	<b><math>21.1 \pm 5.1</math></b>
0.8-0.9	$7.0 \pm 6.6$	$19.0 \pm 8.0$	$8.9 \pm 8.7$	$13.0 \pm 15.0$	<b><math>11.3 \pm 4.2</math></b>
0.9-1.0	$12.4 \pm 6.9$	$8.0 \pm 7.0$	$10.7 \pm 10.8$		<b><math>10.3 \pm 4.5</math></b>
0.7-1.0	$11.5 \pm 4.1$	$16.8 \pm 4.6$	$13.6 \pm 5.8$	$9.7 \pm 10.9$	<b><math>13.6 \pm 2.6</math></b>

Асимметрия в области  $x_F > 0.7$  и  $p_T > 1.0$  ГэВ/с составляет  $(13.6 \pm 2.6)\%$ .

Малое значение систематической ошибки подтверждается измерением ложной асимметрии эксперимента. “Сырая” ложная асимметрия определялась для событий

с одним знаком поляризации мишени. Во всем диапазоне ложная асимметрия близка к нулю, а в интервале  $0.7 < x_F < 1.0$  и  $p_T > 1.2$  ГэВ/с составляла  $(0.22 \pm 0.67)\%$ . Систематическая ошибка (с учетом поляризации мишени и фактора разбавления) не превышала 2%.

Установка позволяла одновременно проводить измерения на пучке отрицательных пионов и отрицательных каонов. В области  $0.6 < x_F < 0.9$  была измерена асимметрия в реакции



$A_N$  в реакции (5) равна  $(-0.4 \pm 6.1)\%$  при  $0.6 < p_T < 1.2$  ГэВ/с и равна  $(11 \pm 14)\%$  при  $p_T > 1.2$  ГэВ/с.

На **Рис. 3** приведена зависимость односпиновой асимметрии от поперечного импульса  $p_T$ . Помимо результатов данных измерений, приведены также просуммированные результаты проведенных ранее измерений асимметрии в реакциях (1),(2) в области малых поперечных импульсов по данным работ [4, 5]. Суммирование данных работ [4, 5] выполнено при предположении, что асимметрии в реакциях (1) и (2) одинаковы. Основанием к такому предположению является то, что для этих двух реакций асимметрии в центральной области совпадают [10, 11].

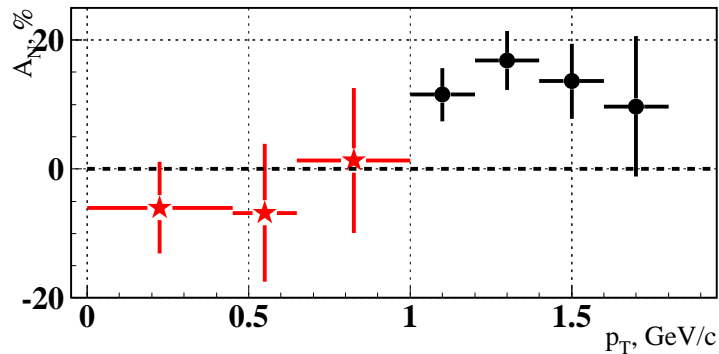


Рис. 3. Зависимость  $A_N$  от поперечного импульса при  $p_T > 1.0$  ГэВ/с в реакции  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  (черные точки) в области  $0.7 < x_F < 1.0$ . Звездочками показаны суммарные результаты измерений асимметрии при малых поперечных импульсах на протонной и дейтериевой мишенях по данным работ [4, 5].

Полученный результат является достаточно неожиданным, так как логично было предположить, что асимметрия в области фрагментации *неполяризованной* частицы близка к нулю. Подобное поведение асимметрии подтверждалось результатами, в частности, эксперимента СТАР в области фрагментации неполяризованной частицы [12] при значениях переменной Фейнмана  $-0.6 < x_F < -0.2$  на коллайдере RHIC.

С другой стороны, в данном эксперименте измерения проводятся ближе к границе фазового объема, то есть при условиях, аналогичных эксклюзивным реакциям, где были обнаружены значительные эффекты [1, 2]. При этом обнаруженное значение асимметрии близко по величине к поляризации в реакции  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + n$  в области переданных импульсов  $-t \approx 1$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> [1].



Величина измеренной асимметрии также совместима с результатами измерения асимметрии в области фрагментации поляризованного пучка при тех же значениях переменных  $x_F$  и  $p_T$  [13].

## Заключение

Проведено измерение односпиновой асимметрии  $A_N$  в области фрагментации неполяризованного пучка в реакции  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  в области  $0.7 < x_F < 1.0$ . При малых значениях поперечного импульса асимметрия равна нулю, а в интервале  $1.0 < p_T < 1.8$  ГэВ/с равна  $[13.6 \pm 2.6$  (стат.)  $\pm 2.0$  (сист.)]%, то есть (без учета систематической ошибки) отличается от нуля на  $\approx 5\sigma$  и совместима с величиной поляризации в реакции  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + n$  в той же области переданных импульсов.

Авторы глубоко признательны руководству ИФВЭ за поддержку в проведении исследований; Ускорительному подразделению и Отделу пучков за высокую эффективность работы У-70 и канала 14; А.К. Лиходеду за полезные обсуждения, Ю.М. Гончаренко, В.А. Кормилицыну и Н.Е. Михалину за техническую поддержку во время подготовки и проведения исследований.

Работа выполнена в рамках контракта с Росатомом Н.4е.03.09.1031 при поддержке грантами РФФИ 09-02-00198 и 08-02-90455-Укр\_а.

## Список литературы

- [1] В.Д. Апокин *и др.*// ЯФ **45**, 1355 (1987).
- [2] V.D. Apokin *et al.*// Z.Phys. **C35**, 173 (1987).
- [3] В.Д. Апокин *и др.*// ЯФ **47**, 727 (1988).
- [4] В.Д. Апокин *и др.*// ЯФ **49**, 156 (1989).
- [5] В.Д. Апокин *и др.*// ЯФ **49**, 164 (1989).
- [6] В.Д. Апокин *и др.*// ПТЭ 1987(1), стр.46.
- [7] Н.С. Борисов *и др.* – Препринт ОИЯИ 1-85-252, Дубна, (1980).
- [8] А.Н. Васильев *и др.* – Препринт ИФВЭ 82-29.
- [9] А.Н. Васильев *и др.* – Препринт ИФВЭ 87-152.
- [10] Н.С. Амаглобели *и др.*// ЯФ **50**, 695 (1989).
- [11] V.D. Apokin *et al.*// Phys. Lett. **B243**, 461 (1990).

[12] B.I. Abelev *et al.*// Phys. Rev. Lett. **102**, 052302 (2009).

[13] D. L. Adams *et al.*// Z. Phys. **C56** (1992) 181.

*Рукопись поступила 25 декабря 2009 г.*

В.В. Мочалов и др.

Измерение односпиновой асимметрии в реакции  $\pi^- d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 X$  в области фрагментации пучка при 40 ГэВ и  $p_T$  до 2 ГэВ/с.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати 13.01.10. Формат 60 × 84/8.      Офсетная печать.  
Печ.л. 0.625.    Уч.-изд.л. 0.96.    Тираж 80.    Заказ 29.    Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

П Р Е П Р И Н Т 2009–23,            И Ф В Э,            2009

---