



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2004-32
ОЭФ

А.Н. Васильев, В.Н. Гришин, А.М. Давиденко, А.А. Деревщиков, Ю.А. Матуленко,
Ю.М. Мельник, А.П. Мещанин, В.В. Мочалов, Л.В. Ногач, С.Б. Нурушев,
А.Ф. Прудкогляд, П.А. Семенов, Л.Ф. Соловьев, В.Л. Соловьянов, В.Ю. Ходырев,
К.Е. Шестерманов, А.Е. Якутин

Институт физики высоких энергий, Протвино

Н.С. Борисов, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Ю.А. Плис, Ю.А. Усов, А.Н. Федоров
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

А.А. Луханин

Харьковский физико-технический институт, Харьков

**Односпиновая асимметрия
инклюзивного рождения π^0 -мезонов
в pp_{\uparrow} -взаимодействиях в области $-0.4 < x_F < -0.1$
при энергии 70 ГэВ
(Сотрудничество ПРОЗА-М)**

Направлено в ЯФ

Протвино 2004

Аннотация

Васильев А.Н. и др. Односпиновая асимметрия инклюзивного рождения π^0 -мезонов в pp_{\uparrow} -взаимодействиях в области $-0.4 < x_F < -0.1$ при энергии 70 ГэВ: Препринт ИФВЭ 2004-32. – Протвино, 2004. – 9 с., 7 рис., 1 табл., библиогр.: 20.

Представлены результаты по измерению односпиновой асимметрии инклюзивного рождения π^0 -мезонов в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 70 ГэВ в кинематической области $-0.4 < x_F < -0.1$ и $0.9 < p_T < 2.5$ ГэВ/с. Асимметрия близка к нулю в области $-0.2 < x_F < -0.1$, растет по модулю при уменьшении x_F и составляет $(-10.6 \pm 3.2)\%$ при $-0.4 < x_F < -0.2$.

Abstract

Vasiliev A.N. et al. Single-spin asymmetry of π^0 inclusive production in pp_{\uparrow} -interactions at the energy 70 GeV in the region $-0.4 < x_F < -0.1$: IHEP Preprint 2004-32. – Protvino, 2004. – p. 9, figs. 7, tables 1, refs.: 20.

Single-spin asymmetry of inclusive π^0 production in the reaction $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ at 70 GeV in the kinematic region $-0.4 < x_F < -0.1$ and $0.9 < p_T < 2.5$ GeV/c is presented. The asymmetry is close to zero in the range $-0.2 < x_F < -0.1$, grows up in absolute magnitude with x_F decreasing and is equal to $(-10.6 \pm 3.2)\%$ at $-0.4 < x_F < -0.2$.

Введение

В данной работе представлена односпиновая асимметрия A_N в реакции

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

при энергии 70 ГэВ в области переменной Фейнмана $-0.4 < x_F < -0.1$ по результатам анализа данных, полученных на ускорителе У-70 ИФВЭ в 1996 году. Ранее измерения A_N инклюзивного образования π^0 -мезонов проводились в π^-p - и pp -взаимодействиях. В π^-p_{\uparrow} -столкновениях A_N значительна и в центральной области [1], и в области фрагментации поляризованной мишени [2]. В pp_{\uparrow} -столкновениях в центральной области асимметрия близка к нулю при энергиях 70 ГэВ [3] и 200 ГэВ [4], но отлична от нуля при 24 ГэВ [5]; в области фрагментации поляризованного протонного пучка также наблюдался значительный эффект [6].

Измерения A_N в реакции (1) в области фрагментации поляризованной мишени проведены впервые. Предварительные данные по сырой асимметрии были опубликованы ранее [7].

1. Постановка эксперимента

Исследования проводились на установке ПРОЗА-М (14-й канал ускорительного комплекса У-70). Схема экспериментальной установки представлена на **Рис. 1**.

Протоны с энергией 70 ГэВ взаимодействовали с поперечно поляризованной мишенью замороженного типа с пропандиолом ($C_3H_8O_2$) в качестве рабочего вещества [8]. Для учета неполяризованного вещества в мишени проводились фоновые измерения на углеродной мишени.

Регистрация γ -квантов от распадов π^0 -мезонов осуществлялась электромагнитным калориметром ЕМС, который представлял собой матрицу 12×12 счетчиков из свинцового стекла [9]. Размеры счетчика — $3.8 \times 3.8 \times 45$ см³ (18 радиационных длин по пучку). Калориметр размещался на расстоянии 2.7 м от центра мишени и перекрывал в горизонтальной плоскости угол от 17 до 26° в лабораторной системе отсчета. Триггер обеспечивал отбор событий с энерговыделением в калориметре больше 1 ГэВ.

Подробное описание основных узлов установки приведено в работе [10].

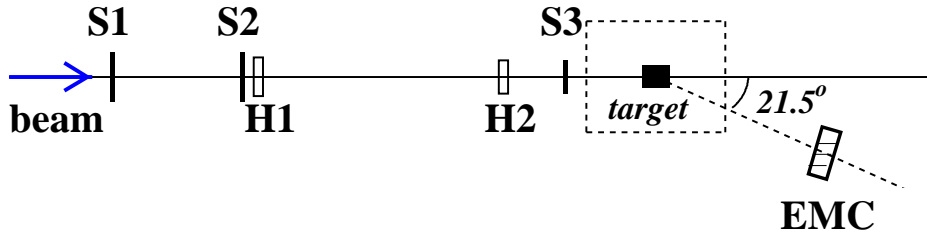


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: S1–S3 — сцинтилляционные счетчики; H1–H2 — годоскопы; *target* — поляризованная мишень; EMC — электромагнитный калориметр.

Калибровка калориметра проводилась на пучке электронов с импульсом 26.6 ГэВ/с [11]. Энергетическое разрешение калориметра при данной энергии после вычитания импульсного разброса пучка ($\approx 2\%$) составило $\sigma(E)/E \approx 3\%$. Дополнительно энергетическая шкала EMC калибровалась на массу π^0 -мезона. За пять часов измерений достигалась точность калибровки 0.1%.

За десять дней работы на поляризованной мишени было записано около 10 миллионов событий.

2. Анализ данных

Для реконструкции γ -квантов в калориметре использовался алгоритм [12], основанный на выделении электромагнитного ливня по известной форме. Особенности его применения для анализа данных с электромагнитных калориметров установки ПРОЗА-М описаны в работе [3].

Для получения физического результата отбирались только те пары γ -квантов, для которых χ^2 описания формой ливня на одну степень свободы меньше 3.0, асимметрия энергии $\alpha < 0.7$ ($\alpha = |E_1 - E_2|/(E_1 + E_2)$, где $E_{1,2}$ — энергии γ -квантов), каждый γ -квант находился на расстоянии не менее половины счетчика от края детектора и $(E_1 + E_2) > 2$ ГэВ. При этом средняя множественность в EMC составляла ≈ 1.5 γ -кванта на событие, а энергии γ -квантов находились в диапазоне от 0.5 до 10 ГэВ.

Распределение пар γ -квантов по кинематическим переменным представлено на **Рис. 2**, а двумерное распределение (p_T, x_F) на **Рис. 3а**. Вследствие узкого акцептанса EMC переменные x_F и p_T коррелированы.

На **Рис. 3б** показан характерный массовый спектр пар γ -квантов ($-0.3 < x_F < -0.2$, по p_T просуммировано). Виден четкий пик в области массы π^0 -мезона. Разрешение π^0 -мезона по массе в диапазоне поперечных импульсов от 0.9 до 2.5 ГэВ/с составляло от 11 до 15 МэВ/с².

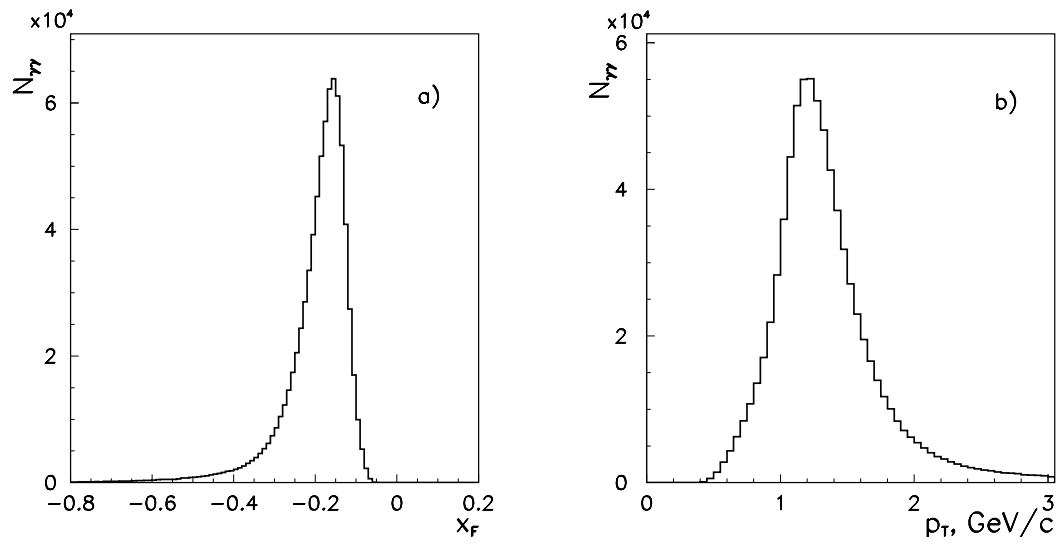


Рис. 2. Распределение пар γ -квантов по переменной Фейнмана (а) и поперечному импульсу (б).

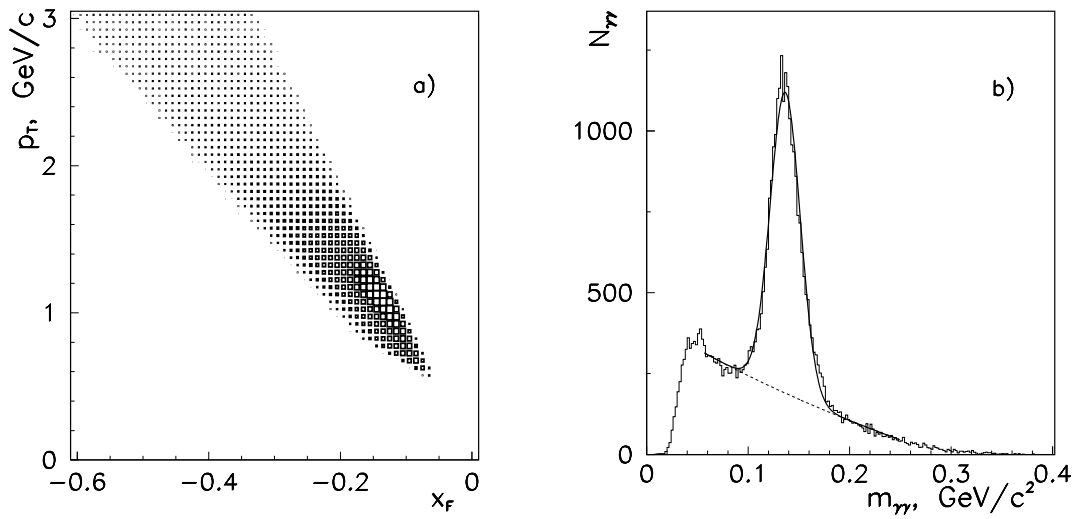


Рис. 3. а) Двумерное распределение пар γ -квантов по p_T и x_F ; б) массовый спектр пар γ -квантов в области $-0.3 < x_F < -0.2$.

2.1. Вычисление асимметрии

Односпиновая асимметрия A_N определяется выражением

$$A_N(x_F, p_T) = \frac{1}{P_{target}} \cdot \frac{1}{\langle \cos\phi \rangle} \cdot \frac{d\sigma_{\uparrow}^H(x_F, p_T) - d\sigma_{\downarrow}^H(x_F, p_T)}{d\sigma_{\uparrow}^H(x_F, p_T) + d\sigma_{\downarrow}^H(x_F, p_T)}, \quad (2)$$

где P_{target} — поляризация мишени, ϕ — азимутальный угол между нормалью к плоскости, задаваемой осью пучка и направлением вылета π^0 -мезона, и вектором поляризации мишени; $d\sigma_{\uparrow}^H$ и $d\sigma_{\downarrow}^H$ — инвариантные дифференциальные сечения образования π^0 -мезонов на водороде при противоположных направлениях вектора поляризации. В нашем случае азимутальный угол, в котором регистрировались π^0 -мезоны, находился в диапазоне $(180 \pm 15)^\circ$, поэтому значение $\langle \cos\phi \rangle$ принималось равным -1 . Среднее значение поляризации мишени во время набора статистики составляло $(80 \pm 3)\%$. Поскольку эффективность регистрации π^0 -мезонов при двух направлениях поляризации мишени одинакова, для детектора, расположенного справа от пучка, получим:

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

где A_N^{raw} — реально измеряемая в эксперименте асимметрия, D — фактор разбавления мишени, n_{\uparrow} и n_{\downarrow} — нормированные на монитор числа зарегистрированных π^0 -мезонов при противоположных направлениях поляризации мишени. Процедура вычисления D подробно описана в работе [2]. Для проверки расчетов были использованы результаты измерений фактора разбавления для данной мишени, проведенных ранее [13]. При вычислении асимметрии были взяты расчетные значения D без учета ошибок: 8.0 при $0.9 < p_T < 1.4$ ГэВ/с, 8.1 при $1.4 < p_T < 1.8$ ГэВ/с, 8.2 при $1.8 < p_T < 2.1$ ГэВ/с и 9.2 в области $2.1 < p_T < 2.5$ ГэВ/с.

При измерении A_N может возникнуть дополнительная асимметрия, связанная с дрейфом электроники триггера, просчетами мониторных счетчиков, дрейфом пучка либо другими причинами. Это приводит к возникновению систематического сдвига реальной асимметрии. Метод устранения такого сдвига, основанный на том, что асимметрия пар γ -квантов вне массового пика π^0 -мезонов равна нулю, подробно описан в работе [2].

2.2. Анализ ложной асимметрии

Ложная асимметрия определяется прежде всего дрейфом энергетической шкалы калориметра, который приводит к неточному восстановлению кинематических параметров пары γ -квантов. Изменение энергетической шкалы на 0.1% обуславливает возникновение сырой ложной асимметрии на уровне 0.2% (что, с учетом фактора разбавления и поляризации мишени $D/P_{target} \sim 10$, соответствует 2% в A_N).

Для оценки ложной асимметрии статистика при направлении вектора поляризации мишени “вверх” делилась на два равных ансамбля событий. Одному ансамблю событий условно приписывался знак вектора поляризации мишени “+”, а другому “-”, и для них находилась асимметрия. Таким же образом вычислялась асимметрия при направлении вектора поляризации “вниз” и на углеродной мишени. Для каждого из этих трех наборов данных в исследуемой кинематической области была получена нулевая асимметрия.

На **Рис. 4** представлена суммарная ложная асимметрия (ошибки несколько меньше, чем в A_N (см. **Рис. 5**), из-за дополнительной статистики на углеродной мишени).

Фит ложной асимметрии функцией $a + b * x_F$ дает следующие значения параметров: $a = (-1.7 \pm 5.9)\%$, $b = (-3 \pm 32)\%$. Видно, что ложная асимметрия не зависит от x_F и в пределах ошибок равна нулю. Из фита этих же данных константой получаем значение $c = (-1.1 \pm 1.5)\%$. Как было отмечено ранее, основным источником ложной асимметрии является дрейф энергетической шкалы калориметра, который корректируется непрерывной перекалибровкой на табличное значение массы π^0 -мезона. По результатам фита можно сделать вывод, что абсолютная систематическая ошибка для каждого значения физически наблюдаемой односпиновой асимметрии A_N после этой поправки составляет не более 3%.

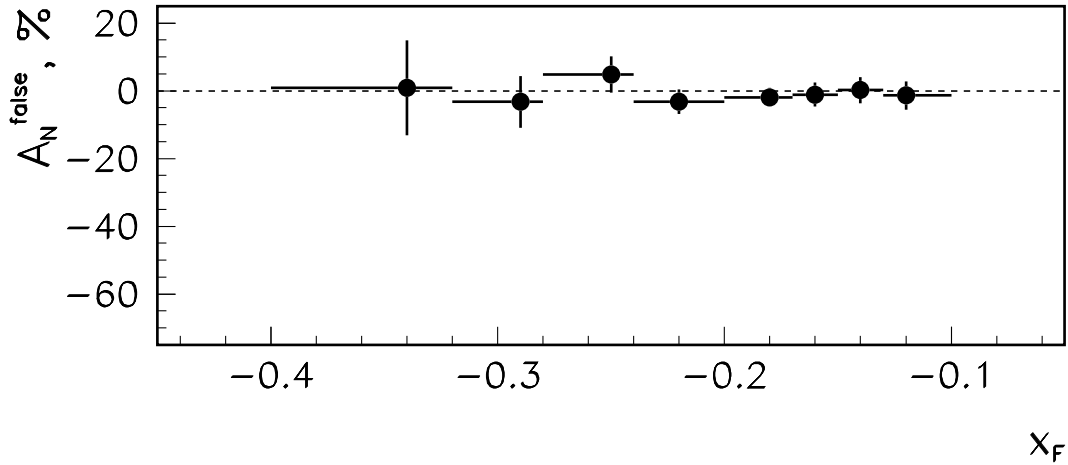


Рис. 4. Ложная асимметрия в зависимости от x_F . Горизонтальные линии показывают x_F -интервалы, точка соответствует среднему значению x_F в данном интервале, по p_T про-суммировано.

3. Результаты и их обсуждение

Физическая наблюдаемая — асимметрия A_N — представлена на **Рис. 5** и в **Таблице 1**. Указаны только статистические ошибки. Абсолютная систематическая ошибка для каждого значения A_N не превышает 3% и в тех интервалах x_F , где A_N отлична от нуля, значительно меньше статистической ошибки. Относительная систематическая ошибка всех значений A_N , связанная с точностью определения фактора разбавления и величины поляризации мишени, по нашей оценке, не более 10%.

Асимметрия составляет $(-2.5 \pm 2.0)\%$ в области $-0.2 < x_F < -0.1$ ($\langle p_T \rangle \approx 1.1$ ГэВ/ c) и $(-10.6 \pm 3.2)\%$ при $-0.4 < x_F < -0.2$ ($\langle p_T \rangle \approx 1.7$ ГэВ/ c). Значение $x_F \approx -0.2$ является пороговой точкой возникновения A_N . Как было отмечено в работе [14], асимметрия инклюзивного образования π -мезонов в большинстве экспериментов сравнима с нулем до значения энергии π -мезона в системе центра масс $E_{cms} = E_0 \approx 1.5$ – 2.0 ГэВ, а затем начинает увеличиваться по модулю. На **Рис. 6** показана измеренная в нашем эксперименте асимметрия в зависимости от E_{cms} .

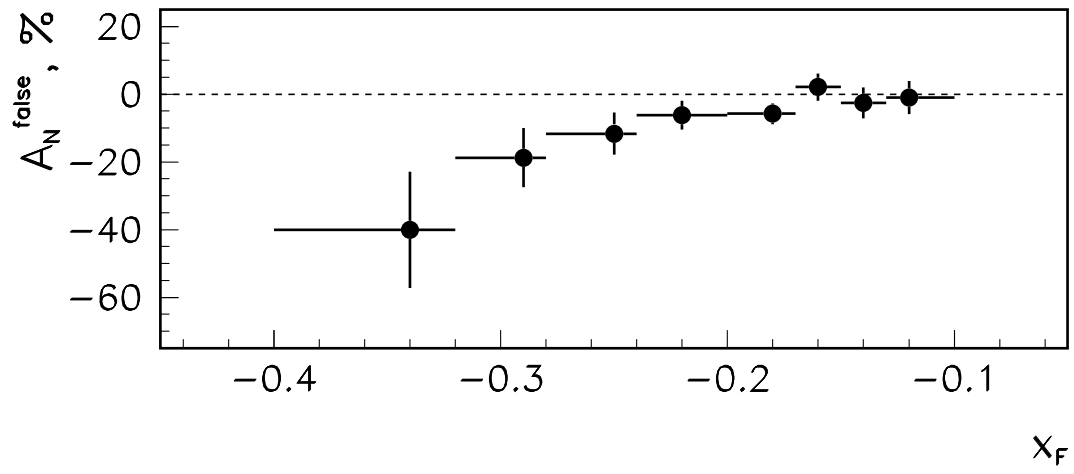


Рис. 5. Асимметрия A_N в зависимости от x_F .

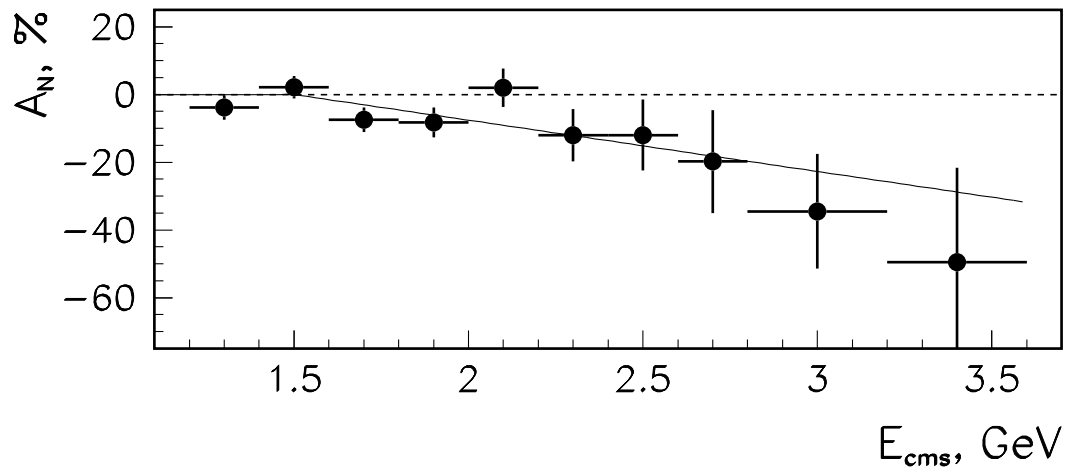


Рис. 6. Асимметрия A_N в зависимости от энергии π^0 -мезона в системе центра масс.

Таблица 1. Асимметрия A_N в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 70 ГэВ.

$\langle x_F \rangle$	$\langle p_T \rangle, GeV/c$	$A_N, \%$
-0.12	0.97	-1.0 ± 4.9
-0.14	1.05	-2.6 ± 4.5
-0.16	1.15	2.1 ± 4.0
-0.18	1.28	-5.8 ± 4.1
-0.22	1.49	-6.3 ± 4.3
-0.25	1.69	-11.6 ± 6.2
-0.29	1.93	-18.8 ± 8.7
-0.34	2.27	-40.0 ± 17.1

Фит A_N функцией

$$A_N = \begin{cases} 0 & \text{при } E_{cms} < E_0 \\ k \cdot (E_{cms} - E_0) & \text{при } E_{cms} \geq E_0 \end{cases} \quad (4)$$

дает значение $E_0 = (1.5 \pm 0.1)$ ГэВ, что хорошо согласуется с выводами указанной работы. Параметр наклона k равен -15 ± 4 .

На **Рис. 7** представлен наш результат (знак A_N изменен на противоположный для удобства сравнения), а также данные предыдущих экспериментов по измерению односпиновой асимметрии инклюзивного образования π^0 -мезонов в области фрагментации поляризованного протона. Видно, что в пределах ошибок A_N в pp -взаимодействии при 70 ГэВ и в π^-p -взаимодействии при 40 ГэВ одинаковы, тогда как при 200 ГэВ наблюдается более медленный рост асимметрии с увеличением энергии π^0 -мезона.

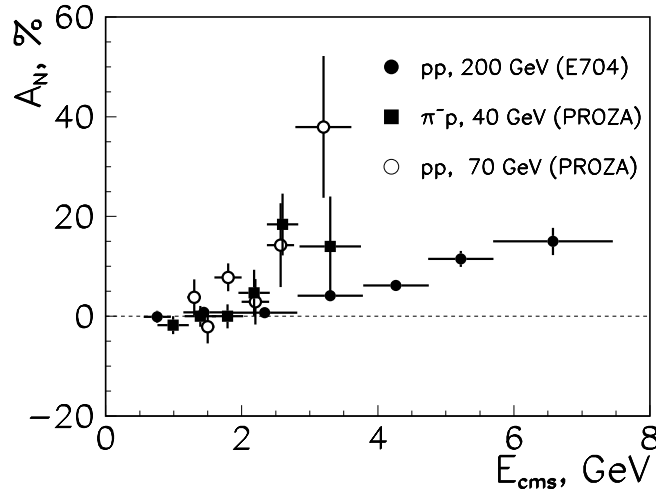


Рис. 7. Асимметрия A_N в реакции $hp_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 X$ в зависимости от сорта частицы h (π^- или p) и энергии взаимодействия.

Как известно, в рамках теории жестких взаимодействий — пертурбативной КХД — нет объяснения большим односпиновым эффектам. Для реакции $pp \rightarrow \pi^0 X$ из теоремы факторизации имеем

$$d\sigma = \sum_{a,b,c} f_{a/p} \otimes f_{b/p} \otimes d\sigma(ab \rightarrow c...) \otimes D_{\pi/c}, \quad (5)$$

где $f_{a/p}$ и $f_{b/p}$ — функции распределения партонов в сталкивающихся протонах, $d\sigma(ab \rightarrow c...)$ — сечение элементарного процесса и $D_{\pi/c}$ — функция фрагментации партона в пион. Для асимметрии $A_N \sim (d\sigma_{\uparrow} - d\sigma_{\downarrow})$ в силу сохранения спиральности получим

$$A_N \sim \frac{m_q}{\sqrt{s}} \cdot \alpha_s \sim 0. \quad (6)$$

После обнаружения в ряде экспериментов значительных по величине A_N был предложен ряд моделей, основанных на обобщении теоремы факторизации с включением:

- корреляционных функций более высоких твистов в функции распределения (например, твист-3 в моделях Кью-Штермана [15] и Ефремова-Теряева [16]);
- внутреннего k_T и спиновой зависимости функций распределения (модель Сиверса [17]);
- внутреннего k_T и спиновой зависимости функции фрагментации (модель Коллинза [18]).

Также были разработаны так называемые “полуклассические” модели, основанные на введении орбитального углового момента кварка [19,20]. Все эти модели хотя и не претендуют на роль всеобъемлющей спиновой теории, предлагая различные механизмы возникновения односпиновых асимметрий, но удовлетворительно описывают экспериментальные данные.

Заключение

Измерена односпиновая асимметрия инклюзивного рождения π^0 -мезонов в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в кинематической области $-0.4 < x_F < -0.1$ и $0.9 < p_T < 2.5$ ГэВ/с при энергии 70 ГэВ. Асимметрия равна нулю в пределах ошибок при $-0.2 < x_F < -0.1$, затем растет по модулю с уменьшением x_F и составляет $(-10.6 \pm 3.2)\%$ в области $-0.4 < x_F < -0.2$.

Отрыв A_N от нуля наблюдается при энергии π^0 -мезона в системе центра масс pp -взаимодействия около 1.5 ГэВ.

В области фрагментации поляризованного протона, в отличие от центральной области, асимметрия инклюзивного образования π^0 -мезона в пределах точности измерений одинакова в π^-p и pp -взаимодействиях.

Полученный результат не противоречит теоретическим моделям, описывающим спиновые эффекты в hp_{\uparrow} -взаимодействиях.

Благодарности

Авторы глубоко признательны руководству ИФВЭ за поддержку в проведении исследований; Ускорительному отделению и отделу Пучков ИФВЭ за высокую эффективность работы У-70 и 14-го канала; Н.И. Беликову, Ю.М. Гончаренко, В.А. Кормилицыну, Н.Е. Михалину, А.И. Мыснику за техническую поддержку во время проведения сеанса.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 03-02-16919.

Список литературы

- [1] V.D. Apokin et al. // Phys.Lett. B243 (1990), 461.
- [2] А.Н. Васильев и др. — Препринт ИФВЭ 2003-21, Протвино, 2003.
- [3] А.Н. Васильев и др. — Препринт ИФВЭ 2003-22, Протвино, 2003.
- [4] D.L. Adams et al. // Phys.Rev. D53 (1996), 4747.
- [5] J. Antille et al. // Phys.Lett. B94 (1980), 523.
- [6] D.L. Adams et al. // Z.Phys. C56 (1992), 181.
- [7] Н.И. Беликов и др. — Препринт ИФВЭ 97-51, Протвино, 1997.
- [8] Н.С. Борисов и др. — Препринт ОИЯИ 1-80-98, Дубна, 1980.
- [9] G.A. Akopdjanov et al. // Nucl.Instr.Meth., 1977, v.40, p.441;
F. Binon et al. // Nucl.Instr.Meth., 1981, v.188, p.507.
- [10] В.Д. Апокин и др. // ПТЭ, 41 (1998), 464.
- [11] Д.Л. Адамс и др. — Препринт ИФВЭ 91-99, Протвино, 1991.
- [12] А.А. Леднев. — Препринт ИФВЭ 93-153, Протвино, 1993.
- [13] Н.С. Амоглобели и др. // ЯФ, 50 (1989), 695.
- [14] А.Н. Васильев, В.В. Мочалов. — Препринт ИФВЭ 2003-26, Протвино, 2003;
e-Print Archive: hep-ex/0312007.
- [15] J. Qui and G. Sterman. // Phys.Rev. D59 (1999) 014004.
- [16] A.V. Efremov, V.M. Korotkiyan and O.V. Teryaev. // Phys.Lett. B348 (1995) 577.
- [17] D. Sivers. // Phys.Rev. D41 (1990) 83; Phys.Rev. D43 (1991) 261.
- [18] J.C. Collins. // Nucl.Phys. B396 (1993) 161.
- [19] C. Boros, L. Zuo-Tang and M. Ta-chung. // Phys.Rev.Lett. 67 (1993) 1751.
- [20] S.M. Troshin and N.E. Tyurin. // Phys.Rev. D52 (1995) 3862; Phys.Rev. D54 (1996) 838.

Рукопись поступила 6 августа 2004 г.

А.Н. Васильев и др.

Односпиновая асимметрия инклюзивного рождения π^0 -мезонов в pp_{\uparrow} -взаимодействиях в области $-0.4 < x_F < -0.1$ при энергии 70 ГэВ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **ИТЭХ**.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 11.08.2004. Формат $60 \times 84/8$.
Офсетная печать. Печ.л. 1,125. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 130. Заказ 294.
Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

