



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2006–18  
ОЭФ

В.В. Абрамов, А.А. Волков, П.И. Гончаров, А.Ю. Калинин,  
А.В. Хмельников, А.В. Кораблев, Ю.П. Корнеев, А.В. Кострицкий,  
А.Н. Криницын, В.И. Крышкин, А.А. Марков, В.В. Талов,  
Л.К. Турчанович

**ИЗМЕРЕНИЕ АНАЛИЗИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ С БОЛЬШИМИ  
ПОПЕРЕЧНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ  
В pA-СОУДАРЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 40 ГэВ**

Направлено в ЯФ

Протвино 2006

### Аннотация

Абрамов В.В., Волков А.А., Гончаров П.И. и др. Измерение анализирующей способности заряженных адронов с большими поперечными импульсами в рА-соударениях при энергии 40 ГэВ: Препринт ИФВЭ 2006–18. – Протвино, 2006. – 12 с., 5 рис., 6 табл., библиогр.: 12.

Измерена поперечная односпиновая асимметрия для заряженных адронов ( $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$ ), образующихся в протон-ядерных соударениях. Измерения выполнены на установке ФОДС-2 с использованием поляризованного протонного пучка ИФВЭ с энергией 40 ГэВ и ядерных мишеней (C и Cu). Данные получены в диапазоне углов в с.ц.м.  $73\text{--}94^\circ$  вблизи центральной области ( $-0,01 < x_F < 0,27, 0,7 < p_T < 3,6$  ГэВ/с). Односпиновая асимметрия для  $\pi^+$ - и  $K^+$ -мезонов достигает значительной величины при больших значениях  $p_T$  и небольших положительных значениях  $x_F$ . Анализирующая способность для других адронов ( $\pi^-, K^-, p, \bar{p}$ ) совместима с нулем в исследованном диапазоне по  $p_T$ . Зависимость анализирующей способности от массового числа ядра мишени незначительная.

### Abstract

Abramov V.V., Volkov A.A., Goncharov P.I. et al. Analyzing Power Measurements of Charged Hadron Production with High Transverse Momentum in pA-Collisions at 40 GeV: IHEP Preprint 2006–18. – Protvino, 2006. – p. 12, figs. 5, tables 6, refs.: 12.

The transverse single-spin asymmetry has been measured for charged hadrons ( $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$ ), produced in proton-nucleus collisions. The measurements have been performed at FODS-2 experimental setup using IHEP 40 GeV polarized beam and nuclear targets (C and Cu). The data are obtained in c.m. angle range  $73\text{--}94^\circ$  near the central region ( $-0.01 < x_F < 0.27, 0.7 < p_T < 3.6$  GeV/c). The single-spin asymmetry for  $\pi^+$ - and  $K^+$ -mesons becomes large at high  $p_T$  values and moderate positive  $x_F$ . Analyzing power for other hadrons ( $\pi^-, K^-, p, \bar{p}$ ) is consistent with zero in the explored  $p_T$  range. The dependence of analyzing power off target nuclei mass is not significant.

## Введение

Большие поперечные односпиновые асимметрии, наблюдаемые в инклюзивных реакциях при соударении адронов высоких энергий [1–5], не получили до настоящего времени однозначного и общепринятого объяснения [6]. Возможно, происхождение односпиновых эффектов связано с взаимодействием кварков на больших расстояниях (конфайнментом) и явлением нарушения киральной симметрии в квантовой хромодинамике (КХД). Очень интересной в этом отношении является инстантонная модель [7], [8], которая учитывает взаимодействие кварков с глюонным конденсатом, что приводит к появлению у кварков эффективной динамической массы и значительного аномального хромоманнитного момента, что может проявляться в зависимости односпиновых эффектов от кинематических переменных и типа (аромата) кварков. Для выявления указанных зависимостей требуются измерения односпиновой асимметрии для различных реакций в широком диапазоне кинематических переменных.

Измерения выполнены при энергии поляризованного протонного пучка 40 ГэВ. Данная работа является продолжением цикла работ, выполненных на установке ФОДС-2 в двух сеансах 2003 г. в трех кинематических областях, соответствующих углам 90, 160 и 230 мрад между осью плеча и направлением пучка в л.с.к. [9]. В настоящей работе представлены только данные для номинального угла плеча 160 мрад, что соответствует углам образования  $\pi^\pm$ -мезонов  $73\text{--}94^\circ$  в с.ц.м. налетающего адрона и нуклона мишени. Приведены результаты измерений односпиновой асимметрии для заряженных адронов ( $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$ ), образующихся в кинематической области, соответствующей большим поперечным импульсам ( $p_T$ ) и небольшим, положительным значениям фейнмановской переменной  $x_F = p_Z^{cm}/p_{max}^{cm}$ , где  $p^{cm}$  — импульс адрона в с.ц.м. налетающего адрона и нуклона мишени.

Ранее в этой же кинематической области были получены первые данные на водородной мишени [2]. Результаты измерений в области больших значений переменной  $x_F$  (угол плеча 90 мрад), а также подробное описание установки и процедуры обработки данных можно найти в [9]. Результаты измерений односпиновой асимметрии в задней полусфере (угол плеча 230 мрад) при небольших отрицательных значениях  $x_F$  будут представлены в отдельной работе. Измерения выполнены на двух ядерных мишенях (C и Cu) для выяснения возможного влияния размеров ядра на величину односпиновых эффектов [10].

Сравнение результатов  $pp$ - и  $pA$ -взаимодействий позволяет также оценить влияние кваркового состава мишени на величину односпиновой асимметрии. Полное понимание того, как ядерная среда влияет на фундаментальные степени свободы — кварки и глюоны, — в настоящее время отсутствует, несмотря на многолетние исследования, проводимые практически во всех ускорительных центрах. Поляризационные измерения являются очень чувствительным инструментом, поэтому измерение асимметрии образования адронов на ядрах, в принципе, может пролить свет на те вопросы, на которые до сих пор нет однозначного ответа.

## 1. Постановка эксперимента

Поляризованный протонный пучок создан на 22-м канале ускорителя ИФВЭ. Поляризованные протоны образуются в нарушающих четность слабых распадах  $\Lambda$ -гиперонов, которые рождаются в соударениях протонов с энергией 60–70 ГэВ с бериллиевой мишенью, расположенной в начале 22-го канала [2], [6].

Средний импульс поляризованных протонов составляет 40 ГэВ/с,  $\Delta p/p = \pm 4,5\%$ , поляризация пучка  $P_B = (39 \pm 2)\%$ , интенсивность до  $3 \times 10^7$  протонов за сброс. Смена знака поляризации происходит в течение 30 с каждые 18 минут.

В конце 22-го канала расположены два пороговых черенковских счетчика для идентификации частиц, а также ионизационные детекторы для измерения положения и интенсивности пучка. Измерение  $X$ - и  $Y$ -координат пучковых частиц для каждого события производилось с помощью сцинтилляционных годоскопов с шагом 3 мм. Статистическая точность измерения средних координат пучка за экспозицию составляла 3–5 мкм, что позволило выравнять с указанной точностью средние координаты пучка при разных знаках поляризации протонного пучка и минимизировать возможную систематическую ошибку в измерениях односпиновой асимметрии.

### 1.1. Экспериментальная установка

Измерения выполнены на двухплечевом магнитном спектрометре ФОДС-2 [11]. Схема установки показана на рис. 1. В каждом плече установки имеется система дрейфовых камер (DC) для реконструкции траектории частиц, два сцинтилляционных триггерных счетчика ( $S_1$ ,  $S_2$ ), адронный калориметр (HCAL) для организации триггера на частицу с энергией выше заданного порога, спектрометр колец черенковского излучения (СКОЧ) для идентификации частиц. Внутри магнита расположены пороговые черенковские счетчики, которые работают на воздухе при атмосферном давлении и используются совместно с детекторами СКОЧ для разделения  $\pi$ - и  $K$ -мезонов.

Магнит и детекторы в каждом из плеч располагаются на подвижных платформах, что позволяет менять номинальный угол поворота плеч по отношению к оси канала в пределах 0–160 мрад для левого (если смотреть по пучку) плеча и в пределах 160–320 мрад для правого плеча. Внутри магнита расположен поглотитель из вольфрама и железа для поглощения частиц пучка, прошедших через мишень без взаимодействия, либо рассеявшихся на малые углы относительно направления пучка.

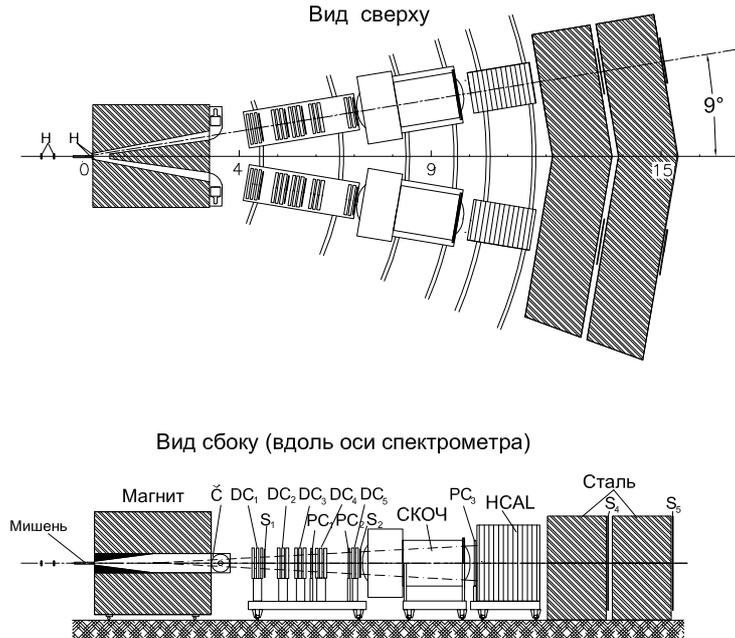


Рис. 1. Схема установки ФОДС-2.

## 1.2. Измерения

Измерения односпиновой асимметрии ( $A_N$ ) выполнены при симметричном положении плеч спектрометра ФОДС-2 под углом 160 мрад по отношению к оси пучка. Для увеличения импульсного диапазона принимаемых событий измерения проводились при двух значениях величины магнитного поля,  $B$  и  $B/2$ , где  $B$  — максимальная величина поля. Также для уменьшения возможной систематики измерения проводились при двух знаках магнитного поля. Для выравнивания статистики при различных импульсах измерения проводились при двух порогах в адронном калориметре. Основная статистика ( $22 \times 10^6$  событий) была набрана на углеродной мишени, кроме того,  $4,4 \times 10^6$  событий были получены на медной мишени (только при максимальном поле).

Данные получены в областях ( $0,7 \leq p_T \leq 3,6$  ГэВ/с,  $-0,01 \leq x_F \leq 0,27$ ) и ( $1,15 \leq p_T \leq 3,7$  ГэВ/с,  $-0,03 \leq x_F \leq 0,27$ ) на углеродной и медной мишенях соответственно.

## 1.3. Обработка данных

Реконструированная траектория частицы после спектрометрического магнита и координаты в пучковых годоскопах используются программой обработки для определения ее импульса, углов образования и Z-координаты вершины взаимодействия в мишени. Реконструированные события обрабатываются программой идентификации частиц в спектрометрах SKOCH и пороговых черенковских счетчиках [9]. Интегральный поток протонов с поляризацией вверх ( $N^\uparrow$ ) или вниз ( $N^\downarrow$ ) измеряется ионизационной камерой. Координаты частиц, измеренные пучковыми годоскопами, используются для определения средних X- и Y-координат пучка для каждого сброса.

Выравнивание средних координат пучка в каждой экспозиции с точностью 4 мкм (путем отбраковки сбросов на краях координатных распределений) позволило снизить возможную систематическую ошибку анализирующей способности до уровня  $\epsilon = 4\%$ . Основной вклад в  $\epsilon$  вносит различие в углах падения пучковых протонов на мишень для двух знаков поляризации пучка. Заметный вклад в  $\epsilon$  также вносят ошибка измерения интегрального потока протонов, различие в интенсивностях пучков, поляризованных вверх и вниз, а также дрейф аппаратуры установки.

#### 1.4. Вычисление анализирующей способности

Выходы частиц каждого сорта, нормированные на число протонов с поляризацией вверх ( $N^\uparrow$ ) или вниз ( $N^\downarrow$ ), вычисляются отдельно в левом ( $L$ ) и правом ( $R$ ) плечах установки. Анализирующая способность в левом плече вычисляется по формуле

$$A_N^L = \frac{1}{P_B \cdot \cos\phi} \cdot \frac{N_L^\uparrow - N_L^\downarrow}{N_L^\uparrow + N_L^\downarrow}, \quad (1)$$

где  $P_B$  является средней поляризацией протонного пучка ( $39 \pm 2\%$ ),  $\cos\phi$  — средний косинус азимутального угла образования частиц. Для правого плеча ( $R$ ) знак асимметрии противоположный (1) [2].

Анализирующая способность вычисляется для каждой экспозиции с одинаковыми условиями измерений (величина и знак магнитного поля, порог по энергии в калориметре), и затем происходит усреднение результатов для двух плеч установки ( $L$  и  $R$ ), разных экспозиций и двух сеансов. Усреднение по двум плечам в симметричном положении установки позволяет уменьшить систематическую ошибку, связанную с вертикальным смещением пучка. В каждой экспериментальной точке ( $p_T, x_F$ ) к статистической ошибке суммарной статистики добавлена квадратично систематическая ошибка  $\epsilon = 4\%$ .

## 2. Результаты

Результаты измерения анализирующей способности  $A_N$ , соответствующие номинальному углу поворота каждого из плеч установки 160 мрад относительно направления пучка для инклюзивных реакций

$$p^\uparrow + A \rightarrow h + X, \quad (2)$$

на углеродной и медной мишенях показаны ниже на рисунках и представлены в таблицах для шести типов заряженных адронов ( $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$ ). В таблицах указан также средний угол образования частиц в с.ц.м. для реакции на углеродной мишени, который уменьшается при увеличении  $p_T$  и коррелированной с ней переменной  $x_F$ .

### 2.1. Анализирующая способность для реакций $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow \pi^\pm + X$

На рис. 2а и в табл. 1 представлена зависимость  $A_N$  от  $p_T$  для реакций образования  $\pi^+$ -мезонов на углеродной и медной мишенях. Величина  $A_N$  растет при увеличении  $p_T$  линейно (в пределах точности измерений) в диапазоне  $1 \leq p_T \leq 2,6$  ГэВ/с до величины порядка 16%. При  $p_T \leq 1$  ГэВ/с  $A_N$  совместима в пределах ошибок измерений с нулевой величиной.

Таблица 1.  $A_N$  и  $\theta_{cm}$  для реакций  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow \pi^\pm + X$  как функции  $p_T$  и  $x_F$ .

$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pC)	$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pCu)	$\theta_{cm}$ (pC)
0.711	-0.012	$+0.021 \pm 0.042$				$94.04^\circ$
0.857	0.007	$+0.016 \pm 0.041$	1.149	-0.032	$+0.047 \pm 0.059$	$88.04^\circ$
1.104	0.011	$+0.024 \pm 0.041$	1.267	-0.011	$+0.035 \pm 0.043$	$87.61^\circ$
1.307	0.022	$+0.032 \pm 0.040$	1.404	0.014	$+0.067 \pm 0.042$	$85.97^\circ$
1.470	0.042	$+0.053 \pm 0.040$	1.539	0.041	$+0.051 \pm 0.041$	$83.19^\circ$
1.622	0.064	$+0.065 \pm 0.041$	1.676	0.066	$+0.054 \pm 0.042$	$80.63^\circ$
1.778	0.085	$+0.070 \pm 0.041$	1.820	0.089	$+0.056 \pm 0.043$	$78.69^\circ$
1.924	0.108	$+0.113 \pm 0.042$	1.971	0.111	$+0.071 \pm 0.045$	$76.79^\circ$
2.113	0.133	$+0.129 \pm 0.043$	2.159	0.136	$+0.126 \pm 0.047$	$75.25^\circ$
2.375	0.167	$+0.129 \pm 0.051$	2.428	0.169	$+0.099 \pm 0.064$	$73.61^\circ$
2.660	0.197	$+0.218 \pm 0.072$	2.696	0.201	$+0.08 \pm 0.11$	$72.79^\circ$
2.952	0.228	$+0.17 \pm 0.11$	3.001	0.228	$+0.15 \pm 0.20$	$72.10^\circ$
3.300	0.243	$+0.05 \pm 0.15$	3.323	0.250	$-0.25 \pm 0.19$	$72.88^\circ$
3.644	0.267	$+0.02 \pm 0.21$	3.667	0.269	$-0.38 \pm 0.45$	$72.96^\circ$

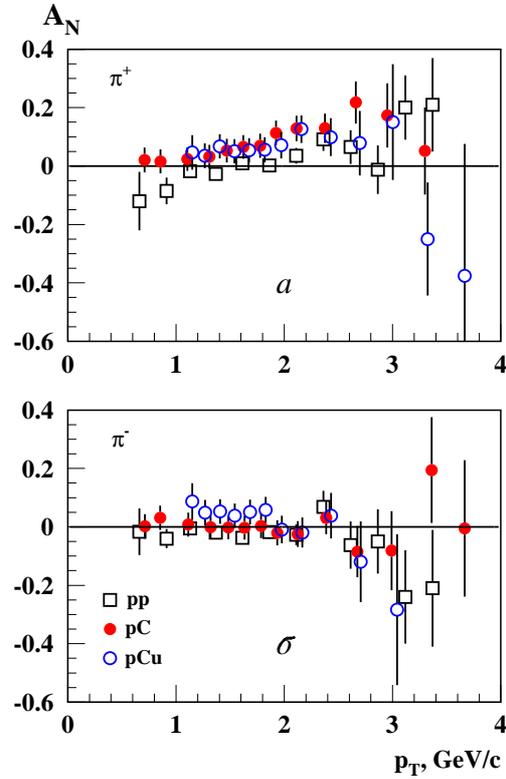


Рис. 2. Зависимости анализирующей способности от  $p_T$  для реакций  $p^\uparrow + p(C, Cu) \rightarrow \pi^+ + X$  (а) и  $p^\uparrow + p(C, Cu) \rightarrow \pi^- + X$  (б).

Следует отметить, что при увеличении  $p_T$  растет также среднее значение переменной  $x_F$  ввиду достаточно малого углового захвата каждого из плеч установки и экспоненциального падения сечений образования адронов с увеличением полярного угла. Таким

образом, рост  $A_N$ , показанный на рис. 2а, обусловлен в основном зависимостью анализирующей способности от  $x_F$  и гораздо более слабой в этой области зависимостью от  $p_T$ . В области выше  $p_T \geq 2,6$  ГэВ/с ситуация, по-видимому, меняется, и более существенной является зависимость от  $p_T$ . Подробнее этот вопрос будет рассмотрен ниже, на суммарной статистике образования  $\pi^+$ - и  $K^+$ -мезонов на двух ядерных мишенях.

Данные на двух ядерных мишенях (С и Сu), показанные на рис. 2а, не различаются в пределах экспериментальных ошибок, тогда как для данных на водородной мишени [2], полученных в той же кинематической области, величина  $A_N$  систематически ниже примерно на 0,05. Такое различие  $pp$ - и  $pA$ -данных может быть связано со значительным вкладом  $u$ -кварков из водородной мишени в центральной кинематической области, что приводит к дополнительному "разбавлению"  $A_N$  по сравнению со случаем ядерной мишени, где доля  $u$ -кварков ниже. В области фрагментации поляризованного протона значительного различия  $pp$ - и  $pA$ -данных не ожидается, поскольку вклад валентных кварков мишени здесь мал. Данные при энергии 22 ГэВ [3] подтверждают этот вывод.

Зависимость  $A_N$  от  $p_T$  для реакций образования  $\pi^-$ -мезонов на углеродной и медной мишенях показана рис. 2б и представлена в табл. 2. Величина  $A_N$  для  $\pi^-$ -мезонов согласуется в пределах ошибок с нулевой величиной для  $pp$ - и  $pA$ -соударений. Слабая зависимость  $A_N$  от типа мишени в центральной области может указывать на значительный вклад глюонов в образование  $\pi^-$ -мезонов.

Таблица 2.  $A_N$  и  $\theta_{cm}$  для реакций  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow \pi^- + X$  как функции  $p_T$  и  $x_F$ .

$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N(pC)$	$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N(pCu)$	$\theta_{cm}(pC)$
0.713	-0.013	+0.002 ± 0.042				94.33°
0.855	0.009	+0.031 ± 0.041	1.151	-0.033	+0.087 ± 0.063	87.50°
1.112	0.008	+0.008 ± 0.041	1.269	-0.011	+0.049 ± 0.043	88.29°
1.319	0.019	-0.001 ± 0.041	1.406	0.014	+0.053 ± 0.042	86.58°
1.482	0.039	-0.002 ± 0.041	1.543	0.040	+0.038 ± 0.042	83.77°
1.632	0.062	-0.003 ± 0.041	1.683	0.065	+0.051 ± 0.042	81.04°
1.786	0.084	+0.004 ± 0.041	1.827	0.089	+0.058 ± 0.044	78.95°
1.936	0.106	-0.020 ± 0.043	1.977	0.111	-0.009 ± 0.047	77.19°
2.124	0.132	-0.024 ± 0.045	2.166	0.136	-0.020 ± 0.051	75.53°
2.386	0.165	+0.032 ± 0.056	2.431	0.170	+0.038 ± 0.078	73.98°
2.675	0.195	-0.085 ± 0.088	2.705	0.201	-0.12 ± 0.14	73.16°
2.991	0.222	-0.08 ± 0.14	3.043	0.223	-0.28 ± 0.26	72.87°
3.362	0.239	+0.20 ± 0.18	3.357	0.249	-0.18 ± 0.29	73.56°
3.667	0.265	-0.01 ± 0.23	3.642	0.281	-0.04 ± 0.42	73.30°

## 2.2. Анализирующая способность для реакций $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow K^\pm + X$

На рис. 3а и в табл. 3 представлена зависимость  $A_N$  от  $p_T$  для реакций образования  $K^+$ -мезонов в  $pC$ - и  $pCu$ -соударениях. Как и в случае  $\pi^+$ -мезонов,  $A_N$  положительна и растет при  $p_T \geq 1,2$  ГэВ/с до величины порядка 0,16 при  $p_T = 2$  ГэВ/с. При более высоких  $p_T$  дальнейший рост  $A_N$  прекращается. Подобное поведение  $A_N$  связано, возможно, с доминированием валентных поляризованных  $u$ -кварков в процессах образования  $\pi^+$ - и  $K^+$ -мезонов в области малых положительных  $x_F$ . В пределах ошибок измерений не наблюдается систематической зависимости  $A_N$  от типа мишени (p, C, Cu).

Величина  $A_N$  впервые измерена для  $K^-$ -мезонов при энергиях выше 18,5 ГэВ [4]. На рис. 3б и в табл. 4 показана зависимость  $A_N$  от  $p_T$ . В пределах экспериментальных ошибок  $A_N$  согласуется с нулевой величиной, что и ожидается в большинстве моделей, поскольку  $K^-$ -мезон не имеет валентных кварков, общих с валентными кварками поляризованного протона. По этой же причине не наблюдается зависимости  $A_N$  от типа мишени. Равенство  $A_N$  нулю в диапазоне  $1 \leq p_T \leq 2,4$  ГэВ/с, где точность измерений достаточно высока, свидетельствует об отсутствии существенной систематики в измерении анализирующей способности.

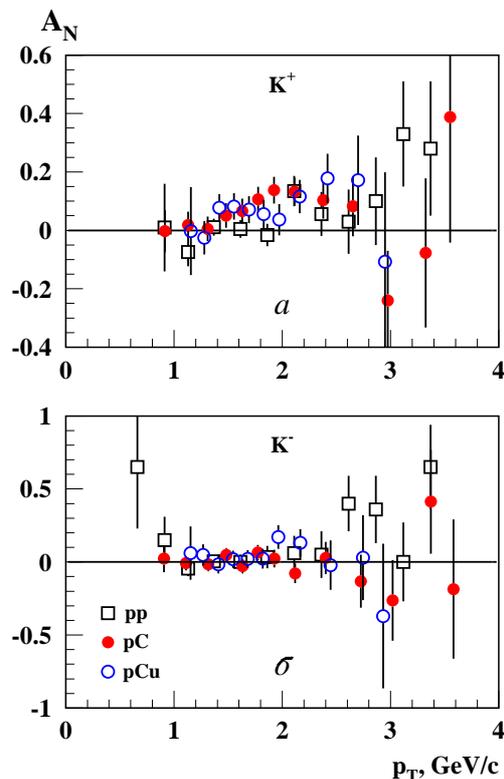


Рис. 3. Зависимости анализирующей способности от  $p_T$  для реакций  $p^\uparrow + p(C, Cu) \rightarrow K^+ + X$  (а) и  $p^\uparrow + p(C, Cu) \rightarrow K^- + X$  (б).

### 2.3. Анализирующая способность для реакции $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow p + X$

На рис. 4а и в табл. 5 представлена зависимость  $A_N$  от  $p_T$  для реакций образования протонов в  $pC$ - и  $pCu$ -соударениях. В пределах точности измерений  $A_N$  не зависит от  $p_T$  и типа ядерной мишени и совместима с нулевой величиной. Значение  $A_N$  в  $pp$ -соударениях примерно на 0,05 меньше, чем на ядерных мишенях.

Сравнение результатов измерений при меньших углах образования в с.ц.м. порядка  $55^\circ$  [9] и углах порядка  $98^\circ$  в данной работе (что соответствует  $p_T \sim 1,3$  ГэВ/с) указывает существенное возрастание спиновых эффектов при уменьшении угла  $\theta_{cm}$ . Более детальное исследование  $A_N$  в области углов  $\theta_{cm} \leq 90^\circ$  поможет прояснить механизм происхождения односпиновых эффектов.

Таблица 3.  $A_N$  и  $\theta_{cm}$  для реакций  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow K^+ + X$  как функции  $p_T$  и  $x_F$ .

$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pC)	$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pCu)	$\theta_{cm}$ (pC)
0.917	-0.017	$-0.003 \pm 0.072$	1.157	-0.057	$-0.00 \pm 0.15$	$94.38^\circ$
1.130	-0.018	$+0.019 \pm 0.045$	1.281	-0.031	$-0.025 \pm 0.057$	$93.76^\circ$
1.310	0.003	$+0.005 \pm 0.042$	1.417	-0.005	$+0.077 \pm 0.046$	$89.46^\circ$
1.480	0.025	$+0.051 \pm 0.042$	1.554	0.024	$+0.082 \pm 0.045$	$86.01^\circ$
1.631	0.049	$+0.066 \pm 0.042$	1.691	0.050	$+0.071 \pm 0.046$	$82.93^\circ$
1.777	0.074	$+0.106 \pm 0.043$	1.827	0.077	$+0.056 \pm 0.049$	$80.24^\circ$
1.924	0.098	$+0.138 \pm 0.046$	1.972	0.101	$+0.037 \pm 0.053$	$78.12^\circ$
2.113	0.126	$+0.132 \pm 0.048$	2.160	0.128	$+0.116 \pm 0.057$	$76.17^\circ$
2.377	0.161	$+0.103 \pm 0.063$	2.417	0.163	$+0.178 \pm 0.084$	$74.38^\circ$
2.652	0.193	$+0.08 \pm 0.10$	2.699	0.196	$+0.17 \pm 0.15$	$73.28^\circ$
2.974	0.215	$-0.24 \pm 0.17$	2.948	0.228	$-0.11 \pm 0.31$	$73.38^\circ$
3.323	0.234	$-0.08 \pm 0.26$				$73.79^\circ$
3.550	0.282	$+0.39 \pm 0.43$				$71.84^\circ$

Таблица 4.  $A_N$  и  $\theta_{cm}$  для реакций  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow K^- X$  как функции  $p_T$  и  $x_F$ .

$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pC)	$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pCu)	$\theta_{cm}$ (pC)
0.908	-0.017	$+0.023 \pm 0.092$	1.153	-0.056	$+0.06 \pm 0.18$	$94.33^\circ$
1.111	-0.013	$-0.008 \pm 0.048$	1.269	-0.033	$+0.048 \pm 0.073$	$92.71^\circ$
1.316	0.002	$-0.017 \pm 0.046$	1.410	-0.003	$-0.017 \pm 0.061$	$89.65^\circ$
1.484	0.024	$+0.049 \pm 0.047$	1.544	0.025	$+0.018 \pm 0.059$	$86.25^\circ$
1.634	0.050	$-0.029 \pm 0.049$	1.680	0.054	$+0.021 \pm 0.061$	$82.94^\circ$
1.775	0.076	$+0.065 \pm 0.052$	1.819	0.081	$+0.023 \pm 0.067$	$80.17^\circ$
1.926	0.100	$+0.023 \pm 0.061$	1.962	0.105	$+0.171 \pm 0.080$	$78.13^\circ$
2.118	0.126	$-0.077 \pm 0.067$	2.167	0.130	$+0.131 \pm 0.094$	$76.46^\circ$
2.400	0.160	$+0.03 \pm 0.11$	2.446	0.166	$-0.02 \pm 0.17$	$74.90^\circ$
2.727	0.181	$-0.13 \pm 0.18$	2.746	0.194	$+0.03 \pm 0.29$	$74.96^\circ$
3.019	0.216	$-0.26 \pm 0.28$	2.933	0.235	$-0.37 \pm 0.50$	$73.85^\circ$
3.372	0.232	$+0.41 \pm 0.36$				$74.44^\circ$
3.580	0.285	$-0.19 \pm 0.48$				$72.14^\circ$

Данные других экспериментов получены при более низких энергиях и  $p_T \leq 1$  ГэВ/с, либо при  $\theta_{cm} \geq 90^\circ$ , где они имеют незначительную односпиновую асимметрию [3–5].

#### 2.4. Анализирующая способность для реакции $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow \bar{p} + X$

На рис. 4б и в табл. 6 представлена зависимость  $A_N$  от  $p_T$  для реакций образования антипротонов в  $pp$ -,  $pC$ - и  $pCu$ -соударениях. Как и в случае образования  $K^-$ -мезонов,  $A_N$  в образовании антипротонов совместима в пределах ошибок измерений с нулем. Антипротоны не имеют общих с поляризованным протоном кварков, и это может быть причиной незначительной односпиновой асимметрии, а также ее независимости от типа мишени. Ранее было известно единственное измерение  $A_N$  для антипротонов, выполненное на установке ФОДС-2 в  $p^\uparrow p$  соударениях, где асимметрия также близка к нулю [2].

Таблица 5.  $A_N$  и  $\theta_{cm}$  для реакций  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow pX$  как функции  $p_T$  и  $x_F$ .

$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pC)	$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pCu)	$\theta_{cm}$ (pC)
0.643	-0.143	$+0.031 \pm 0.043$				$133.61^\circ$
0.842	-0.095	$+0.003 \pm 0.041$	1.073	-0.108	$+0.025 \pm 0.055$	$115.79^\circ$
1.102	-0.072	$+0.002 \pm 0.041$	1.207	-0.077	$+0.030 \pm 0.043$	$105.63^\circ$
1.305	-0.048	$+0.003 \pm 0.041$	1.386	-0.048	$+0.027 \pm 0.042$	$98.95^\circ$
1.502	-0.025	$-0.005 \pm 0.041$	1.570	-0.023	$+0.020 \pm 0.042$	$94.08^\circ$
1.681	0.001	$+0.006 \pm 0.040$	1.721	0.006	$+0.035 \pm 0.041$	$89.85^\circ$
1.796	0.036	$-0.005 \pm 0.041$	1.845	0.040	$+0.041 \pm 0.042$	$85.09^\circ$
1.944	0.062	$+0.005 \pm 0.041$	1.992	0.065	$+0.038 \pm 0.042$	$82.22^\circ$
2.138	0.091	$+0.043 \pm 0.041$	2.184	0.095	$-0.002 \pm 0.042$	$79.67^\circ$
2.396	0.129	$+0.041 \pm 0.043$	2.443	0.132	$+0.043 \pm 0.046$	$77.01^\circ$
2.665	0.163	$+0.060 \pm 0.049$	2.711	0.167	$+0.013 \pm 0.057$	$75.32^\circ$
2.921	0.199	$+0.058 \pm 0.069$	2.958	0.201	$-0.052 \pm 0.096$	$73.73^\circ$
3.216	0.231	$-0.07 \pm 0.10$	3.273	0.233	$+0.27 \pm 0.17$	$72.90^\circ$
3.473	0.264	$-0.34 \pm 0.18$	3.562	0.260	$+0.44 \pm 0.34$	$71.97^\circ$

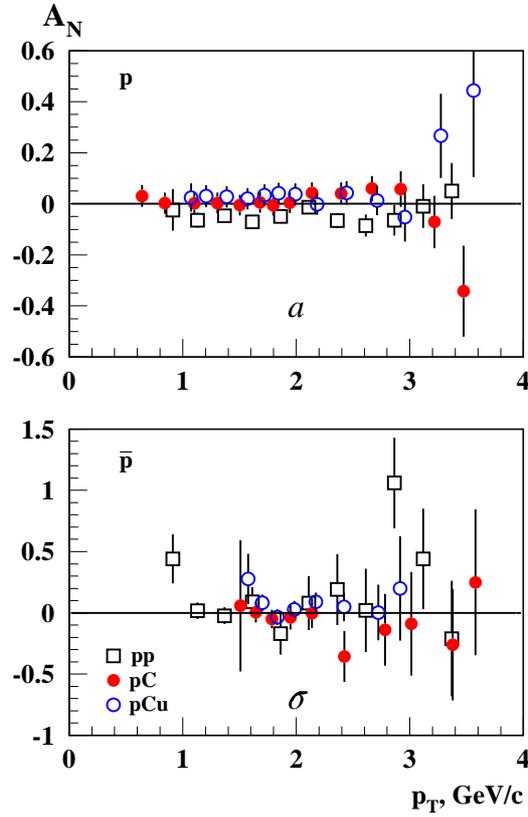


Рис. 4. Зависимости анализирующей способности от  $p_T$  для реакций  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow p + X$  (а) и  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow \bar{p} + X$  (б).

Таблица 6.  $A_N$  и  $\theta_{cm}$  для реакций  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow \bar{p}X$  как функции  $p_T$  и  $x_F$ .

$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pC)	$p_T$ (ГэВ/с)	$x_F$	$A_N$ (pCu)	$\theta_{cm}$ (pC)
1.508	0.000	$+0.06 \pm 0.54$	1.577	-0.002	$+0.28 \pm 0.21$	$90.00^\circ$
1.644	0.020	$+0.006 \pm 0.085$	1.700	0.021	$+0.081 \pm 0.069$	$87.30^\circ$
1.785	0.040	$-0.051 \pm 0.075$	1.832	0.047	$-0.036 \pm 0.064$	$85.04^\circ$
1.949	0.067	$-0.038 \pm 0.099$	1.984	0.075	$+0.027 \pm 0.070$	$82.42^\circ$
2.137	0.100	$-0.00 \pm 0.12$	2.172	0.109	$+0.089 \pm 0.076$	$79.73^\circ$
2.423	0.138	$-0.36 \pm 0.21$	2.420	0.151	$+0.05 \pm 0.12$	$77.57^\circ$
2.781	0.159	$-0.14 \pm 0.29$	2.724	0.183	$+0.00 \pm 0.23$	$77.52^\circ$
3.014	0.204	$-0.09 \pm 0.42$	2.914	0.223	$+0.20 \pm 0.43$	$75.32^\circ$
3.378	0.229	$-0.26 \pm 0.45$				$75.30^\circ$
3.577	0.280	$+0.25 \pm 0.60$				$73.15^\circ$

### 3. Обсуждение результатов

Измерения анализирующей способности в процессах инклюзивного образования адронов поперечно-поляризованным протонным пучком показали наличие значительной положительной величины  $A_N$  для  $\pi^+$ - и  $K^+$ -мезонов в области малых положительных значений  $x_F \leq 0,27$  и больших  $p_T \leq 3,6$  ГэВ/с. Указанные выше частицы образуются в основном при фрагментации поляризованных валентных  $u$ -кварков из налетающего протона. Поскольку  $A_N$  для  $\pi^+$ - и  $K^+$ -мезонов не отличается в пределах ошибок измерений (рис. 2а и 3а), данные для этих двух частиц и двух мишеней (С и Cu) усреднены и показаны на рис. 5 в зависимости от  $p_T$ .

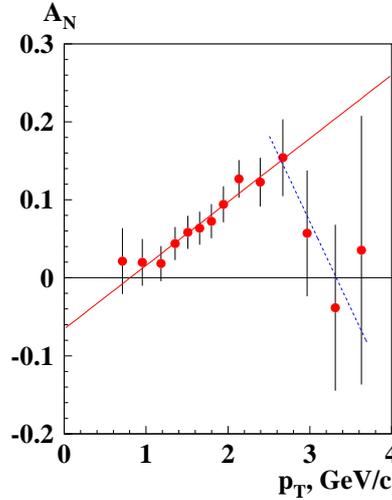


Рис. 5. Среднее значение анализирующей способности в зависимости от  $p_T$  для четырех реакций:  $p^\uparrow + C(Cu) \rightarrow \pi^+(K^+) + X$ .

В области  $1 \leq p_T \leq 2.6$  ГэВ/с наблюдается линейная зависимость от  $p_T$ , которая может быть аппроксимирована функцией  $A_N = (0,081 \pm 0,017)(p_T - 0,81 \pm 0,20)$ , где  $p_T$  измеряется в ГэВ/с. Выше  $p_T^0 = 2.6$  ГэВ/с наклон становится отрицательным,  $A_N = (-0.22 \pm 0.14)(p_T - 3.32 \pm 0.33)$ . Результаты аппроксимации показаны на рис. 5

сплошной линией (для точек ниже  $p_T^0$ ) и пунктирной линией (для точек выше  $p_T^0$ ). Вероятность, что три точки с максимальными  $p_T$  на рис. 5 описываются сплошной линией с фиксированными параметрами, составляет 3,1% ( $\chi^2 = 8,646$  для трех степеней свободы). Среднее значение  $A_N$  выше 2,7 ГэВ/с равно  $0,024 \pm 0,060$ , тогда как экстраполяция сплошной линией в точку  $p_T = 3,3$  ГэВ/с дает величину порядка 0,2.

Рост  $A_N(p_T)$  при умеренно больших  $p_T \leq 1,2$  ГэВ/с, который сменяется падением  $A_N(p_T)$  в области  $p_T \geq 1,2$  ГэВ/с, ожидается в инстантонной модели [12]. Положение максимума в зависимости  $A_N$  от  $p_T$  определяется размером инстантона в КХД вакууме. Ввиду недостаточной точности существующих данных при максимальных значениях  $p_T \geq p_T^0$  планируются дальнейшие исследования в области больших поперечных импульсов, которые помогут прояснить достоверность утверждения о наличии (или отсутствии) максимума в зависимости  $A_N(p_T)$  при  $p_T = 2,6$  ГэВ/с.

Анализирующая способность для других адронов ( $\pi^-$ ,  $K^-$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ) в области больших  $p_T$  и небольших положительных  $x_F \leq 0,27$  незначительна. Для  $K^-$  и  $\bar{p}$  этого ожидать естественно ввиду малости поляризации для морских кварков в протоне.

Анализирующая способность для  $\pi^-$ -мезонов близка к нулю, что может быть результатом значительных вкладов в сечение в этой области глюонов и  $u$ -кварков протонов пучка, что приводит к компенсации отрицательного вклада в  $A_N$   $d$ -кварков. Вклад неполяризованных составляющих мишени также дает нулевую односпиновую асимметрию.

Нулевую анализирующую способность для протонов с  $p_T \leq 1,7$  ГэВ/с естественно связать с тем, что  $x_F \leq 0$  в этой области, и здесь доминируют процессы фрагментации неполяризованных кварков мишени. В области более высоких  $p_T$  (соответствующих  $x_F \geq 0$ ) наблюдается незначительная положительная величина  $A_N$ , совместимая с нулем в пределах существующих ошибок. Заметим, что при больших  $x_F$  при этих же значениях  $p_T$  наблюдается положительная анализирующая способность [9].

Таким образом, можно сделать вывод, что односпиновая асимметрия при заданном  $p_T$  возрастает при увеличении  $x_F$  (уменьшении угла образования). Подобную закономерность естественно ожидать, если основным механизмом происхождения односпиновой асимметрии является фрагментация поляризованных валентных кварков протонов пучка.

Зависимость от массового числа ядра мишени для большинства реакций незначительная, что также согласуется с доминированием механизма фрагментации. Различие в величине  $A_N$  на разных мишенях ( $p$ ,  $C$ ,  $Cu$ ) согласуется по порядку величины с предсказаниями модели, учитывающей нарушение цветовой прозрачности [10].

## Заключение

Впервые получены данные по односпиновой асимметрии заряженных адронов при больших (до 3,6 ГэВ/с) поперечных импульсах и небольших положительных значениях  $x_F \leq 0,27$  в  $pC$ - и  $pCu$ -соударениях. В данной кинематической области только  $\pi^+$ - и  $K^+$ -мезоны обладают значительной, положительной анализирующей способностью, достигающей 16%. Получено первое указание на уменьшение  $A_N$  при поперечных импульсах выше 2,6 ГэВ/с. Анализирующая способность для других адронов ( $\pi^-$ ,  $K^-$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ) в указанной кинематической области незначительна. Также незначительна зависимость  $A_N$  от массового числа ядра мишени, что естественно ожидать, если происхождение односпиновой асимметрии связано с фрагментацией поляризованных валентных кварков пучка.

Авторы выражает благодарность сотрудникам подразделений ИФВЭ за помощь в подготовке и проведении эксперимента, а также дирекции ИФВЭ за поддержку данной работы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 05-02-08039).

### Список литературы

- [1] Adams D.L. *et al. Phys. Lett.* **B264**, 462 (1991).
- [2] Abramov V.V., Dyshkant A.S., Evdokimov V.N. *et al. Nucl.Phys.* **B492**, 3 (1997).
- [3] Allgower C.E. *et al. Phys. Rev.* **D65**, 092008 (2002).
- [4] Saroff S. *et al. Phys. Rev. Lett.* **64**, 995 (1990).
- [5] Dragoset W.H. *et al. Phys. Rev.* **D18**, 3939 (1978).
- [6] Абрамов В.В. *ЯФю* **68** (2005) 414.
- [7] N.I. Kochelev. *Phys. Lett.* **B426**, 149 (1998); Н.И. Кошелев. *Письма в ЖЭТФ.* **83**, 621 (2006); hep-ph/0606091.
- [8] D. Diakonov. *Prog.Part.Nucl.Phys.* **51**, 173 (2003); hep-ph/0212026.
- [9] В.В. Абрамов, А.А.Волков, П.И.Гончаров и др. Препринт ИФВЭ 2006-09. – Протвино, 2006. (Направлено в ЯФ.)
- [10] N.I. Kochelev, M.V.Tokarev. *Phys. Lett.* **B309**, 416 (1993);
- [11] Абрамов В.В., Балдин Б.Ю., Бузулуцков А.Ф. и др. *Приборы и техника эксперимента.* **35**, 1006 (1992). Препринт ИФВЭ 91-144. – Протвино, 1991.
- [12] Н.И. Кошелев. *Письма в ЖЭТФ.* **72**, 691 (2000); hep-ph/9905497.

*Рукопись поступила 21 августа 2006 г.*



