Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 11, с. 767 – 773

Наблюдение односпиновой асимметрии в инклюзивном образовании заряженных пионов при 26.3 ГэВ на ускорительном комплексе У-70

В. В. Моисеев[+], В. В. Абрамов[+], И. Г. Алексеев[*], Н. А. Бажанов[×], А. Н. Васильев[+○], Ю. М. Гончаренко[+], И. С. Городнов[×], А. Б. Гриднев[∇], Н. К. Калугин[+], В. А. Качанов[+], Н. Г. Козленко[∇], Ю. М. Мельник[+], А. П. Мещанин[+], Н. Г. Минаев[+], Д. А. Морозов[+], В. В. Мочалов[+○1)], А. Б. Неганов[×], В. М. Нестеров[*], Д. В. Новинский[∇], Л. В. Ногач[+], М. Б. Нурушева[○], А. Ф. Прудкогляд[+], С. В. Рыжиков[+], В. В. Рыльцов[*], А. В. Рязанцев[+], Э. И. Самигуллин[*], Д. Н. Свирида[*], П. А. Семенов[+○], Ю. А. Усов[×], А. В. Узунян[+], А. Н. Фёдоров[×], А. Е. Якутин[+]

[+]*Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", 142281 Протвино, Россия*

[*]*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия*

[×]*Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия*

[○]*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

[∇]*Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", 188300 Гатчина, Россия*

Поступила в редакцию 24 апреля 2026 г.
После переработки 30 апреля 2026 г.
Принята к публикации 30 апреля 2026 г.

Получены результаты по односпиновой асимметрии инклюзивного рождения заряженных пионов в области фрагментации пионного пучка с импульсом 26.3 ГэВ/c на установке СПАСЧАРМ ускорительного комплекса У-70 в Протвино. Измерения выполнены на поляризованной мишени в сеансе 2018 г. Средние значения асимметрии для π^-- и π^+-мезонов имеют один знак, примерно равны и составляют порядка двадцати процентов. Односпиновая асимметрия π^+-мезонов в реакции $\pi^- p^\uparrow \to \pi^+ X$ измерена впервые.

DOI: 10.7868/S3034576626060023

1. Введение. Основной задачей эксперимента СПАСЧАРМ (СПиновые АСимметрии в рождении ЧАРМония) [1] на ускорительном комплексе У-70 является систематическое изучение спиновых эффектов в инклюзивном образовании различных частиц и резонансов во взаимодействии адронов при энергиях в несколько десятков ГэВ. Эксперимент проводится при умеренных поперечных импульсах образованных частиц, что соответствует области непертурбативной квантовой хромодинамики (КХД).

Современная микроскопическая теория сильных взаимодействий КХД хорошо описывает явления, происходящие на малых расстояниях, что соответствует большим переданным импульсам. В таких режимах, благодаря явлению асимптотической свободы, константа связи сильного взаимодействия мала, что позволяет применить теорию возмущений. Но при небольших поперечных импульсах такой подход неприменим из-за роста константы связи, которая становится порядка единицы. Это непертурбативная область, трудная для теоретиков. Разработка подходов, позволяющих проводить вычисления вне рамок теории возмущений – это важнейший раздел теории сильных взаимодействий, так как большинство экспериментальных данных связаны как раз с физикой больших расстояний (процессы адронизации, фрагментации, дифракции, односпиновые асимметрии в образовании различных частиц и резонансов). Оказалось, что эффекты больших расстояний, такие как спонтанное нарушение киральной симметрии (динамическое появление большой конституентной массы кварков) и конфайнмент (пленение цветовых зарядов в бесцветных адронах), тесным образом связаны со свойствами вакуума КХД.

Вакуум КХД имеет нетривиальную структуру и кардинальным образом отличается от вакуума в квантовой электродинамике. Инстантон – одна из хорошо изученных топологических флуктуаций ва-

1) e-mail: mochalov@ihep.ru

куума КХД глюонного поля. Он может быть ответственен за многие непертурбативные эффекты, наблюдаемые в физике частиц. В случае глюонного поля, инстантон – это особый вид колебаний вакуума КХД, при котором в нем спонтанно вспыхивает и гаснет сильное глюонное поле. В работе [2] было показано, что нетривиальная топологическая структура вакуума КХД генерирует большой аномальный хромомагнитный момент кварка. Это приводит к появлению нового типа непертурбативного кварк-глюонного взаимодействия с переворотом спина, и ожидается, что он может играть важную роль в спиновой физике. В данной работе существование аномальной хромомагнитной кварк-глюонной вершины приводит к возникновению большой односпиновой асимметрии в кварк-кварковом рассеянии и, как следствие, к значительной асимметрии в инклюзивном рождении пионов.

В модели хромомагнитной поляризации кварков (ХПК) [3, 4] показано, что наблюдаемые спиновые эффекты могут иметь непертурбативную природу, связанную со спонтанным нарушением киральной симметрии в КХД и появлением у составляющих кварков дополнительной массы порядка 300 МэВ.

В данной статье представлены результаты измерения односпиновых асимметрий в реакциях $\pi^- p^\uparrow \to \pi^- X$ и $\pi^- p^\uparrow \to \pi^+ X$ на поляризованной мишени при энергии пучка 26.3 ГэВ в эксперименте СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 в Протвино. Такие данные необходимы для развития теории в области непертурбативной КХД.

2. Процедура измерения. В физическом сеансе 2018 г. установки СПАСЧАРМ [5] с внутренней мишени ускорителя У-70 на 14-й канал с импульсом 26.3 ГэВ/c выводился пучок отрицательных адронов: π^- ($\sim$98.0 %), K^- ($\sim$1.5 %) и $\bar{p}$ ($\sim$0.3 %). Идентификация частиц проводилась тремя пороговыми черенковскими счетчиками, реконструкция углов – с помощью четырех годоскопов [6, 7].

Заряженные вторичные частицы регистрировались тремя многопроволочными пропорциональными камерами и четырьмя станциями дрейфовых трубок, их импульсы измерялись с помощью спектрометрического магнита с интегралом поля ~ 0.7 Тл $\cdot$ м [8].

Использовался триггер на взаимодействие в мишени, который формируется из совпадения трех счетчиков $S1-S3$ и антисовпадения счетчика BK в конце установки (в $\sim$10 м от мишени): $S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot \overline{BK}$.

Важнейшей особенностью экспериментальной установки СПАСЧАРМ является поляризованная мишень замороженного типа [9]. Комплекс поляризованной мишени включает в себя следующие основные компоненты: гелиевый криостат, ампулу с веществом мишени, магнитную систему и приборы для измерения криогенных температур. При накачке поляризации магнит мишени создает поле 25 кГс в рабочем объеме мишени 60 см^3 с неоднородностью поля, не превышающей 0.01 %. В мишени использован гелиевый криостат горизонтального типа с рефрижератором растворения гелия-3 в гелии-4. После накачки поляризации в поле магнита рефрижератор обеспечивает непрерывное охлаждение поляризованной мишени до температуры 0.03 К.

Рабочим веществом поляризованной мишени является пентанол ($C_5H_{12}O$) с парамагнитной добавкой TEMPO ($C_9H_{18}NO$). Фактор разбавления (отношение числа всех нуклонов к числу поляризуемых протонов) составляет 8.4. Рабочее вещество мишени в виде шариков диаметром до 2 мм, замороженных в жидком азоте, засыпается в тефлоновую ампулу диаметром 18 мм и длиной 200 мм. Количество вещества в мишени 13.2 г/см^2, что соответствует 10 % длины взаимодействия для π^--мезонов с энергией 26.3 ГэВ.

Проведены пять наборов измерений с направлением поляризации протонов в мишени вверх или вниз. Изменение знака поляризации происходило примерно один раз в двое суток, средняя поляризация составила порядка 56 %. Также были набраны данные на углеродном эквиваленте поляризованной мишени. Всего набрано порядка 500 млн триггеров.

3. Анализ данных. В анализе данных использовался программный пакет SpascharmRoot, в состав которого входят, в том числе генераторы Pythia 8.2 [10], Geant 3 и 4 [11] и пакет ROOT 5,6 [12].

Для корректной оценки выходов $\pi^\pm$-мезонов было проведено Монте-Карло (МК) моделирование. Сравнение сгенерированных и реконструированных МК событий позволяет учесть как кинематику процесса, так и характеристики детекторов, такие, как аксептанс, эффективность. Также следует отметить, что в МК данных отсутствует какая-либо асимметрия в рождении заряженных мезонов.

Сначала с помощью Pythia в режиме "минимального смещения" (*minimum bias*) генерируются вершина взаимодействия и 4-векторы частиц. Далее посредством Geant рожденные частицы распространяются через установку. Моделирование включает в себя всю геометрию, состав материалов и отклик каждого детектора. Также в программный пакет закладываются полученные из эксперимента параметры – эффективности элементов трековой системы, угловые и координатные распределения пучка, вещество мишени, также учитывается геометрическая привязка. МК данные далее обрабатываются аналогично реальным данным.

Для отбора событий использовались следующие основные условия:

- Наличие одного трека (π^-) в пучковых годоскопах.
- Наличие одного и более вторичных треков в спектрометре (так как идентификации нет, считаем все заряженные частицы за $\pi^\pm$-мезоны).
- Наличие восстановленной первичной вершины, расстояние между пучковым треком и вторичными меньше 0.5 см.
- Расстояние от первичной вершины до оси мишени меньше 1.5 см (вершина в области мишени).
- Координата первичной вершины лежит в пределах от -25 см до $+25$ см по Z-координате.

Поскольку направление поляризации периодически менялось, то на этапе анализа важно было также проследить за стабильностью работы установки, в частности, трековой системы. При изменении эффективности работы трековой системы во времени может появиться "ложная" асимметрия (систематическая ошибка). Поэтому все циклы измерений были разделены на части по ~ 5 ч, всего 17 наборов. Для каждого такого набора измерений были разыграны 100 млн. МК событий. Статистика для каждого набора также была разделена на:

– 36 интервалов по азимутальному углу ϕ (с шагом 10°);

– 5 интервалов по поперечному импульсу p_T (0.00 – 0.15 – 0.25 – 0.50 – 0.85 – 1.50 ГэВ/с);

– 4 интервала по переменной Фейнмана x_F (0.00 – 0.25 – 0.50 – 0.75 – 1.00).

В итоге после всей цепочки реконструкции для каждого набора измерений были получены как выходы $n(\phi, p_T, x_F)$ $\pi^\pm$-мезонов, так и поправочные коэффициенты $\epsilon(\phi, p_T, x_F)$, учитывающие аксептанс и эффективность детекторов трековой системы.

4. Определение односпиновой асимметрии заряженных пионов. Поперечная односпиновая асимметрия A_N в инклюзивном образовании заряженных пионов (в реакции $\pi^- p^\uparrow \to \pi^\pm X$) определяется через:

$$A_N \cdot \cos(\phi) = \frac{D}{\langle P \rangle} A(\phi), \quad (1)$$

где D – фактор разбавления поляризованной мишени, величина, определяемая отношением общего числа взаимодействий к взаимодействиям на поляризованных протонах водорода, а $\langle P \rangle$ – средняя поляризация мишени,

$$A(\phi) = \frac{N^\uparrow(\phi) - N^\downarrow(\phi)}{N^\uparrow(\phi) + N^\downarrow(\phi)} - \quad (2)$$

"сырая" асимметрия, $N^\uparrow$ и $N^\downarrow$ – выходы заряженных пионов, нормированные на число пучковых частиц, при поляризации мишени "вверх" ($\uparrow$) и "вниз" ($\downarrow$) соответственно, ϕ – азимутальный угол вылета $\pi^\pm$-мезонов в лабораторной системе отсчета.

В нашем случае выходы пионов рассчитываются с учетом нескольких наборов поляризационных данных, а также поправочных коэффициентов $\epsilon(\phi, p_T, x_F)$. Таким образом, $N(\phi, p_T, x_F)$ есть среднее взвешенное по всем наборам с соответствующим знаком поляризации мишени и с весом в число пучковых частиц:

$$N(\phi, p_T, x_F) = \frac{\sum_i \frac{n_i(\phi, p_T, x_F)}{\epsilon_i(\phi, p_T, x_F)} M_i}{\sum_i M_i}, \quad (3)$$

где i – номер набора измерений при поляризации мишени "вверх" или "вниз", M – число пучковых частиц. Статистические ошибки $\delta N(\phi, p_T, x_F)$ и $\delta A(\phi, p_T, x_F)$ были вычислены с помощью формулы переноса ошибок.

Для нахождения искомой A_N получившаяся $A(\phi)$ была аппроксимирована линейной функцией $A_N \frac{\langle P \rangle}{D} \cdot \cos(\phi) + C$ в каждом интервале по p_T и x_F, где C – свободный параметр.

Для проверки алгоритма и оценки систематической ошибки односпиновой асимметрии были получены значения "асимметрии" для данных на неполяризованном углероде. Данные на углероде были разделены на два набора, далее была найдена "асимметрия" одного такого набора относительно другого.

5. Результаты и обсуждение. Результаты по односпиновой асимметрии инклюзивного образования заряженных пионов в области фрагментации пионного пучка с импульсом 26.3 ГэВ/c на установке СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 приведены в табл. 1. На рисунке 1 показана зависимость A_N от p_T и x_F.

В нашем эксперименте односпиновая асимметрия A_N в инклюзивном образовании π^+-мезонов равна (20.3 ± 3.4) %, усредненная по области поперечного импульса от 0.2 до 1.5 ГэВ/c. А для π^- A_N, усредненная по той же области, равна (20.9 ± 1.4) %. Ошиб-

Таблица 1. Односпиновая асимметрия в образовании заряженных пионов

	π^-							π^+						
	$\langle p_T \rangle$ (GeV/c)	$\langle x_F \rangle$	A_N	δA_N^{stat}	δA_N^{syst}	$N^\uparrow$	$N^\downarrow$	$\langle p_T \rangle$ (GeV/c)	$\langle x_F \rangle$	A_N	δA_N^{stat}	δA_N^{syst}	$N^\uparrow$	$N^\downarrow$
p_T: (0.00, 0.15)	0.09	0.11	0. 032	±0.032	±0.027	455036	453143	0.09	0.10	0.125	±0.040	±0.032	401315	385301
p_T: (0.15, 0.25)	0.20	0.20	0.194	±0.030	±0.024	608042	588558	0.20	0.18	0.177	±0.037	±0.029	573314	546305
p_T: (0.25, 0.50)	0.37	0.32	0.184	±0.021	±0.043	1423265	1356094	0.36	0.27	0.193	±0.027	±0.046	1217056	1140351
p_T: (0.50, 0.85)	0.63	0.47	0.258	±0.028	±0.081	858100	806070	0.62	0.39	0.330	±0.044	±0.148	590762	553463
p_T: (0.85, 1.50)	1.03	0.58	0.244	±0.058	±0.040	268238	251422	1.02	0.53	0.360	±0.104	±0.101	148356	142320
x_F: (0.00, 0.25)	0.23	0.15	0.168	±0.019	±0.030	3139240	3051437	0.23	0.14	0.144	±0.022	±0.018	2536382	2411904
x_F: (0.25, 0.50)	0.46	0.35	0.250	±0.023	±0.049	595361	563235	0.46	0.34	0.257	±0.031	±0.089	304175	283689
x_F: (0.50, 0.75)	0.61	0.61	0.169	±0.038	±0.065	172816	162773	0.61	0.59	0.389	±0.070	±0.073	50713	47451
x_F: (0.75, 1.00)	0.74	0.86	0.156	±0.054	±0.037	110632	100594	0.74	0.84	0.110	±0.165	±0.138	7470	7213

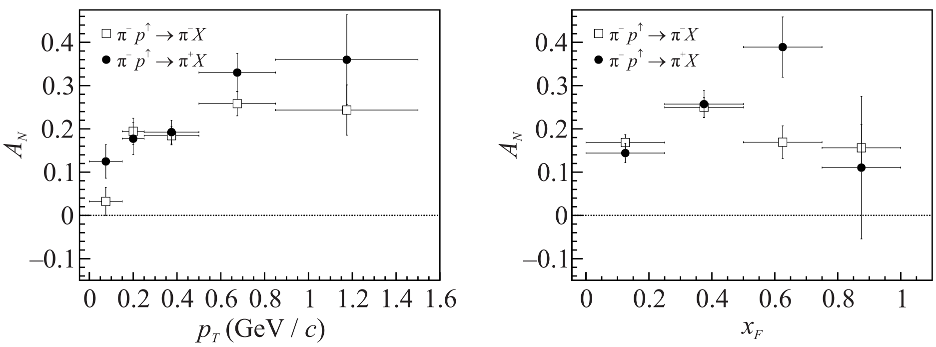

Рис. 1. Распределения $A_N(p_T)$ (слева) и $A_N(x_F)$ (справа) для $\pi^\pm$-мезонов ($\pi^- p^\uparrow \to \pi^\pm X$) в сеансе 2018 г. установки СПАСЧАРМ. Приведены только статистические ошибки

ки только статистические. Систематические ошибки оценены нами как (5–7) %. Эта оценка сделана с использованием данных, набранных на углеродном эквиваленте поляризованной мишени (см. рис. 2). С учетом систематических ошибок мы видим ненулевые асимметрии, одинаковые для пионов обоих знаков, на уровне $\sim 3\sigma$.

Как описано во Введении к данной статье, в модели с инстантонами [2] вакуум КХД генерирует большой аномальный хромомагнитный момент кварка, что приводит к появлению нового типа кварк-глюонного взаимодействия с переворотом спина, что в свою очередь приводит к большой односпиновой асимметрии в инклюзивном образовании пионов.

В работе [13] изучены эффекты аномальной хромомагнитной кварк-глюонной вершины в рассеянии кварка на кварке и вычислена односпиновая асимметрия, возникающая в таком рассеянии. Оказалось, что асимметрия не зависит от энергии в с.ц.м. и имеет пороговую зависимость от поперечного импульса конечной частицы. В работе сделаны оценки для асимметрии, за счет предложенного механизма в инклюзивном рождении пионов только в pp-взаимодействиях и получено, что $A_N^{\pi^+}(p_T) \sim 0.383 \cdot A_N^q(p_T)$ и $A_N^{\pi^-}(p_T) \sim -0.327 \cdot A_N^q(p_T)$, где $A_N^q(p_T)$ – односпиновая асимметрия в рассеянии кварка на кварке. Односпиновые асимметрии в инклюзивном образовании π^+- и π^--мезонов близки по абсолютной величине, но имеют противоположные знаки в pp-взаимодействиях. У нас же в $\pi^- p$-взаимодействиях они также близки по абсолютной величине, но имеют одинаковый знак. В этой модели нет оценки таких асимметрий для $\pi^- p$-взаимодействий. Возможно, после опубликования наших результатов такие оценки будут сделаны. За исключением знаков асимметрий по порядку величин мы видим качественное согласие модели с инстантонами с нашим экспериментом.

Ненулевые односпиновые асимметрии в инклюзивном образовании заряженных пионов появляются также в модели, основанной на наличии асимметрии по внутреннему поперечному импульсу в начальном состоянии, называемой механизмом Сиверса [14, 15]. В этом подходе асимметрия в адрон-адронных взаимодействиях возникает из корреляции импульса k_T партона в поляризованном адроне с его поперечным спином. Орбитальное движение кварков и глюонов внутри адрона могут обеспечить этот механизм.

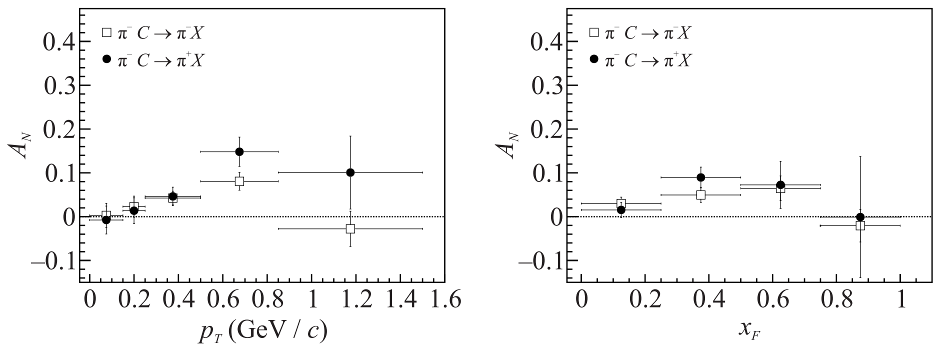

Рис. 2. Распределения $A_N(p_T)$ (слева) и $A_N(x_F)$ (справа) для $\pi^{\pm}$-мезонов ($\pi^- C \to \pi^{\pm} X$) в сеансе 2018 г. установки СПАСЧАРМ. Приведены только статистические ошибки. Эти данные далее использованы для оценки систематической ошибки асимметрии для $\pi^{\pm}$-мезонов ($\pi^- p^{\uparrow} \to \pi^{\pm} X$)

Даже если конечное состояние – это частица со спином 0, партон в этом конечном состоянии может быть поляризованным, и в процессе фрагментации его в конечный адрон (пион в нашем случае) может возникать зависимость от спина, приводящая к ненулевой односпиновой асимметрии – это механизм Коллинза [16, 17].

Механизмы, описанные выше, были основаны на лидирующем твисте-2 в КХД. Однако, возможно генерировать поперечно-спиновые эффекты, основываясь на более высоких твистах, таких как твист-3. В этом подходе имеется дополнительный глюонный пропагатор, который связан с поляризованным или неполяризованным начальным адроном или функцией фрагментации. Твист-3 эффект [18, 19] также может привести к ненулевым односпиновым асимметриям инклюзивно образованных заряженных пионов. Отметим, что подобное поведение асимметрии заряженных пионов в рамках твист-3 модели предсказано в работе [20].

В модели ХПК предполагается, что в области взаимодействия адронов на короткое время возникает круговое поперечное хромомагнитное поле, которое создается движущимися с релятивистскими скоростями кварками и антикварками – спектаторами. Кварки спектаторы – это все те кварки, которые не войдут в состав регистрируемого адрона. Эффективное хромомагнитное поле является неоднородным, по аналогии с магнитным полем внутри проводника с током. Хромомагнитный момент поляризованного кварка, который войдет в состав наблюдаемого адрона, испытывает действие силы Штерна–Герлаха со стороны неоднородного хромомагнитного поля, что сообщает этому кварку дополнительный поперечный импульс в направлении градиента поля и приводит к односпиновой асимметрии на уровне кварка. В дальнейшем этот кварк рекомбинирует с антикварком и образует мезон, который частично сохраняет односпиновую асимметрию кварка. Хромомагнитный момент кварка пропорционален цветному заряду кварка q_c, хромомагнитному множителю Ланде g_c, и обратно пропорционален массе составляющего кварка M_q, которая порядка 300 МэВ и возникает благодаря явлению спонтанного нарушения киральной симметрии в КХД. Благодаря наличию у кварка хромомагнитного момента он испытывает явление ларморовской прецессии спина в хромомагнитном поле, что меняет величину и направление силы Штерна–Герлаха и влияет на наблюдаемую односпиновую асимметрию, приводя к ее зависимости от переменной Фейнмана x_F в сильных полях. При высоких энергиях кварка частота прецессии его спина пропорциональна аномальному хромомагнитному моменту кварка $a_c = (g_c - 2)/2 \approx -0.4$ [2]. Столь большая и отрицательная величина a_c возникает благодаря явлению спонтанного нарушения киральной симметрии в КХД. Поляризация кварков в поляризованном протоне зависит от типа кварка. Она положительная для u-кварка и отрицательная для d-кварка.

Еще 50 лет назад было показано [21], что в реакции $\pi^+ p \to \pi^- X$ число "первично" рожденных π^--мезонов составляет от 10 до 30 %. В реакциях $\pi^- p^{\uparrow} \to \pi^{\pm} X$ доминирует, видимо, процесс первичного образования ρ^0-мезонов и других нейтральных мезонов, с их последующим распадом на $\pi^{\pm}$-мезоны. Поэтому можно ожидать одинаковый знак и близкую величину односпиновой асимметрии A_N в исследуемой реакции. Положительный знак и величина в $\sim$20% (при $p_T \sim 1$ ГэВ/c) асимметрии наблюдались ранее в реакциях $\pi^- p^{\uparrow} \to \pi^0 X$ [22], $\pi^- d^{\uparrow} \to \pi^0 X$ [23] и $pp^{\uparrow} \to \pi^0 X$ [24, 25].

6. Заключение. Измерены односпиновые асимметрии заряженных пионов при энергии 26.3 ГэВ на поляризованной мишени установки СПАСЧАРМ в области фрагментации пионного пучка в реакциях $\pi^- p^\uparrow \to \pi^- X$ и $\pi^- p^\uparrow \to \pi^+ X$.

Односпиновая асимметрия в реакции $\pi^- p^\uparrow \to \pi^+ X$ измерена впервые.

С учетом систематических ошибок односпиновые асимметрии в обеих реакциях, усредненные по области поперечного импульса от 0.2 до 1.5 ГэВ/c, имеют один знак, равны между собой, составляют порядка 20 % и на 3σ отличаются от нуля.

Проведено сравнение с теоретическими моделями. В модели ХПК, например, ожидается одинаковый знак асимметрий в обеих исследованных нами реакциях и близкая величина асимметрии, что хорошо согласуется с нашими экспериментальными данными.

Полученные новые экспериментальные данные могут способствовать развитию известных теоретических моделей, упомянутых в этой работе, а также появлению новых моделей описания односпиновых асимметрий в сильном взаимодействии в непертурбативной области, где неприменим аппарат теории возмущения.

Авторы выражают свою признательность сотрудникам Отделения ускорительного комплекса, Отдела пучков, Отделения экспериментальной физики и Дирекции НИЦ "Курчатовский институт" – ИФВЭ за содействие и поддержку данной работы.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". Работа сотрудников Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект "Изучение физических явлений микро- и макромира для разработки технологий будущего" # FSWU-2026-0010 и программа "Приоритет-2030".

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

---

1. В. В. Абрамов, И. Л. Ажгирей, А. А. Борисов и др., "Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ", ЭЧАЯ **54**(1), 6 (2023) [V. V. Abramov, I. L. Azhgirey, A. A. Borisov et al. (Collaboration), "Conceptual design of the SPASCHARM experiment", Phys. Part. Nucl. **54**(1), 69 (2023)].
2. N. I. Kochelev, "Anomalous quark chromomagnetic moment induced by instantons", Phys. Lett. B **426**, 149 (1998).
3. В. В. Абрамов, "Феноменология односпиновых эффектов в образовании адронов при высоких энергиях", ЯФ **72**(11), 1933 (2009) [V. V. Abramov, "Phenomenology of single-spin effects in hadron production at high energies", Phys. Atom. Nucl. **72**(11), 1872 (2009)].
4. V. V. Abramov, "Polarization of hyperons produced by meson beams", Phys. Atom. Nucl. **87**(1), 38 (2024).
5. В. В. Абрамов, Г. Д. Алексеев, И. Г. Алексеев и др., "Экспериментальная установка СПАСЧАРМ для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70", ПТЭ **67**(6), 4 (2024) [V. V. Abramov, G. D. Alekseev, I. G. Alekseev et al. (Collaboration), "SPASCHARM experimental setup for studying the spin effects in hadron collisions at the U-70 accelerator complex", Instrum. Exp. Tech. **67**(6), 1065 (2024)].
6. А. В. Рязанцев, А. Н. Васильев, Ю. М. Гончаренко, А. П. Мещанин, В. В. Моисеев, В. В. Мочалов, П. А. Семенов, "Двухкоординатный сцинтилляционный годоскоп на базе ФЭУ-85 эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70", ПТЭ **68**(1), 16 (2025) [A. V. Ryazantsev, A. N. Vasiliev, Yu. M. Goncharenko, A. P. Meschanin, V. V. Moiseev, V. V. Mochalov, and P. A. Semenov, "Two-dimensional scintillation hodoscope based on FEU-85 of the SPASCHARM experiment at the U-70 accelerator complex", Instrum. Exp. Tech. **68**(1), 14 (2025)].
7. А. В. Рязанцев, С. И. Букреева, А. Н. Васильев, А. М. Горин, Ю. М. Гончаренко, В. В. Моисеев, В. В. Мочалов, П. А. Семенов, "Сцинтилляционный волоконный годоскоп эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70", ПТЭ **66**(4), 48 (2023) [A. V. Ryazantsev, S. I. Bukreeva, A. N. Vasiliev, A. M. Gorin, Yu. M. Goncharenko, V. V. Moiseev, V. V. Mochalov, and P. A. Semenov, "A scintillating fiber hodoscope for the SPASCHARM experiment at the U- 70 accelerator complex", Instrum. Exp. Tech. **66**(4), 563 (2023)].
8. A. P. Meschanin, A. N. Vasiliev, Yu. M. Goncharenko, V. A. Kormilitsyn, N. G. Minaev, V. V. Mochalov, V. L. Rykov, A. D. Ryabov, T. D. Ryabova, A. V. Ryazantsev, P. A. Semenov, S. A. Semin, and Z. G. Simonova, "Magnets of the SPASCHARM experiment at the U-70 accelerator facility", Phys. Atom. Nucl. **85**(12), 2043 (2022).
9. Н. С. Борисов, Э. И. Бунятова, А. Г. Володин, М. Ю. Либург, В. Н. Матафонов, А. Б. Неганов, Б. С. Неганов, Ю. А. Усов, "Протонная поляризованная "замороженная" мишень для вторичных пучков частиц высокой энергии", Препринт ОИЯИ 1-80-98 (ОИЯИ, Дубна, 1980) [N. S. Borisov, E. I. Bunyatova, A. G. Volodin, M. Yu. Liburg, V. N. Matafonov, A. B. Neganov, B. S. Neganov, and Yu. A. Usov, "Proton polarized "frozen" target for secondary beams of high energy particles", JINR Preprint 1-80-98 (1980)].

10. T. Sjöstrand, S. Ask, J.R. Christiansen, R. Corke, N. Desai, P. Ilten, S. Mrenna, S. Prestel, C.O. Rasmussen, and P.Z. Skands, "An introduction to PYTHIA 8.2", Comput. Phys. Commun. **191**, 159 (2015).
11. T. Basaglia, Z.W. Bell, D. D'Agostino, P.V. Dressendorfer, S. Giani, M.G. Pia, and P. Saracco, "Geant4: a game changer in high energy physics and related applicative fields", arXiv:2405.12159.
12. R. Brun and F. Rademakers, "ROOT – an object oriented data analysis framework", Nucl. Instrum. Meth. A **389**, 81 (1997).
13. N. Kochelev and N. Korchagin, "Anomalous quark chromomagnetic moment and single-spin asymmetries", Phys. Lett. B **729**, 117 (2014).
14. D. Sivers, "Single spin production asymmetries from the hard scattering of point-like constituents", Phys. Rev. D **41**, 83 (1990).
15. D. Sivers, "Hard scattering scaling laws for single spin production asymmetries", Phys. Rev. D **43**, 261 (1991).
16. J.C. Collins, S.F. Heppelmann, and G.A. Ladinsky, "Measuring transversity densities in singly polarized hadron hadron and lepton – hadron collisions", Nucl. Phys. B **420**, 565 (1994).
17. J.C. Collins, "Fragmentation of transversely polarized quarks probed in transverse momentum distributions", Nucl. Phys. B **396**, 161 (1993).
18. А.В. Ефремов, О.В. Теряев, "О спиновых эффектах в квантовой хромодинамике", ЯФ **36**, 242 (1982) [A.V. Efremov and O.V. Teryaev, "On spin effects in quantum chromodynamics", Sov. J. Nucl. Phys. **36**, 140 (1982)].
19. А.В. Ефремов, О.В. Теряев, "Поперечная поляризация в квантовой хромодинамике", ЯФ **39**, 1517 (1984) [A.V. Efremov and O.V. Teryaev, "The transversal polarization in quantum chromodynamics", Sov. J. Nucl. Phys. **39**, 962 (1984)].
20. A.V. Efremov, V.M. Korotkiyan, and O.V. Teryaev, "The twist - three single spin asymmetries of pion production", Phys. Lett. B **348**, 577 (1995).
21. H. Grassler, H. Laven, P. Sixel et al. (Collaboration), "A study of direct and indirect pion production in π^+p interactions at 16 GeV/c", Nucl. Phys. B **132**, 1 (1978).
22. В.Д. Апокин, О.В. Астафьев, Ю.Ш. Багатурия и др., "Первые результаты по измерению азимутальной асимметрии рождения π^0-мезонов в области фрагментации пучка на поляризованных дейтронах", ЯФ **49**, 165 (1989) [V.D. Apokin, O.V. Astafev, Yu.Sh. Bagaturiya et al. (Collaboration), "Results on azimuthal asymmetry measurement of π^0 mesons produced in beam fragmentation region on polarized deuterons", Sov. J. Nucl. Phys. **49**, 103 (1989)].
23. В.В. Мочалов, Н.И. Беликов, Н.С. Борисов, А.Н. Васильев, А.А. Деревщиков, Ю.А. Матуленко, А.П. Мещанин, Н.Г. Минаев, А.Б. Неганов, С.Б. Нурушев, А.Ф. Прудкогляд, Л.Ф. Соловьев, Ю.А. Усов, А.Н. Федоров, О.Н. Щевелев, "Измерение односпиновой асимметрии в реакции $\pi^- d_\uparrow \to \pi^0 X$ в области фрагментации пучка при 40 ГэВ и p_T до 2 ГэВ/c", ЯФ **73**(12), 2072 (2010) [V.V. Mochalov, N.I. Belikov, N.S. Borisov, A.N. Vasiliev, A.A. Derevschikov, Yu.A. Matulenko, A.P. Meschanin, N.G. Minaev, A.B. Neganov, S.B. Nurushev, A.F. Prudkoglyad, L.F. Soloviev, Yu.A. Usov, A.N. Fedorov, and O.N. Shchevelev, "Measurement of the single-spin asymmetry in the reaction $\pi^- d_\uparrow \to \pi^0 X$ in the beam-fragmentation region at 40 GeV and p_T of up to 2 GeV/c", Phys. Atom. Nucl. **73**(12), 2017 (2010)].
24. В.В. Абрамов, Н.И. Беликов, А.Н. Васильев и др., "Анализирующая способность в реакции $p + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ в области фрагментации поляризованной мишени при энергии 50 ГэВ", ЯФ **77**(5), 629 (2014) [V.V. Abramov, N.I. Belikov, A.N. Vasiliev et al. (Collaboration), "Analyzing power in the reaction $p + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ in the polarized-target fragmentation region at an energy of 50 GeV", Phys. Atom. Nucl. **77**(5), 595 (2014)].
25. А.Н. Васильев, В.Н. Гришин, А.М. Давиденко 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", ЯФ **68**, 1852 (2005) [A.N. Vasiliev, V.N. Grishin, A.M. Davidenko et al. (Collaboration), "Single-spin asymmetry of inclusive neutral-pion production in $pp_\uparrow$ interactions at 70 GeV in the region $-0.4 < x_F < -0.1$", Phys. Atom. Nucl. **68**, 1790 (2005)].