

Односпиновая асимметрия  
в инклюзивном образовании  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов  
в эксперименте СПАСЧАРМ на У-70

В. В. Моисеев

НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ  
г. Протвино



4 июня 2026 г.

# Введение

Экспериментальные исследования на различных ускорителях показали наличие значительных спиновых эффектов в эксклюзивных и инклюзивных процессах. Например, поляризация гиперонов, выстроенность векторных мезонов и односпиновая асимметрия адронов.

Существует ряд феноменологических моделей, объясняющих отдельные особенности имеющих поляризационных данных [1—6].



# Введение

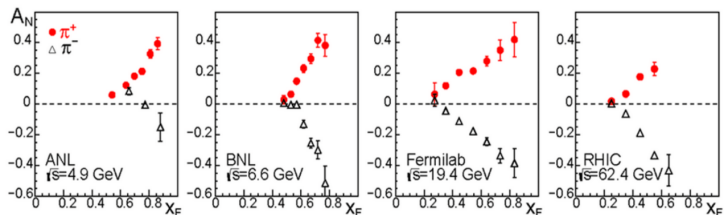
В частности, интерес представляет поперечная односпиновая асимметрия  $A_N$  в образовании адронов, которая определяется:

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

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

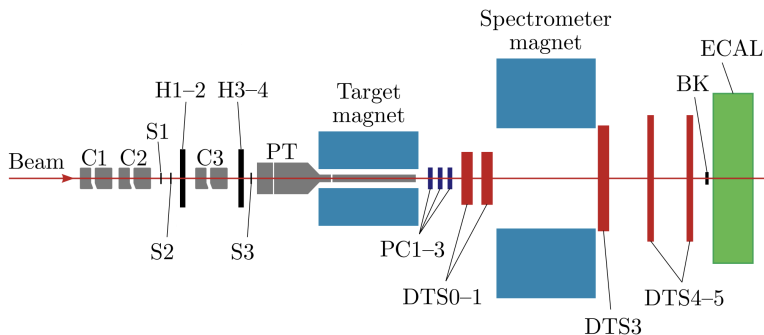
«сырая» асимметрия, где  $D$  – фактор разбавления поляризованной мишени,  $\langle P \rangle$  – средняя поляризация мишени,  $N^\uparrow$  и  $N^\downarrow$  – выходы наблюдаемого адрона, нормированные на число пучковых частиц, при поляризации мишени «вверх» ( $\uparrow$ ) и «вниз» ( $\downarrow$ ),  $\phi$  – азимутальный угол вылета вторичных частиц в л. с. о.

# Введение



Теоретические модели в рамках КХД предсказывают уменьшение односпиновой асимметрии с увеличением поперечного импульса вторичных частиц [7], но эксперименты на разных ускорителях мира показали, что односпиновая асимметрия в инклюзивном образовании заряженных пионов практически не зависит от энергии [8].

# Эксперимент СПАСЧАРМ на ускорителе У-70



Пучковая аппаратура: пороговые черенковские счетчики C1-3, годоскопы H1-4. Триггерные счетчики S1-3, BK.

Комплекс поляризованной мишени: мишенный магнит ( $\sim 0.4$  Тл·м), криостат с поляризованной мишенью (PT).

Трековая система: PC1-3 – пропорциональные камеры, DTS0-5 – станции дрейфовых трубок, магнит спектрометрический  $\sim 0.7$  Тл·м.

## Физический сеанс 2018 г.

В физическом сеансе установки СПАСЧАРМ с внутренней мишени ускорителя У-70 с импульсом 26.3 ГэВ/с выводился пучок ( $\pi^- (\approx 98.0 \%)$ ,  $K^- (\approx 1.5 \%)$  и  $\bar{p} (\approx 0.3 \%)$ ), который взаимодействовал с поляризованной пентаноловой ( $C_5H_{12}O$ ) мишенью с длиной 20 см.

Проведены пять циклов измерений с направлением поляризации протонов в мишени вверх или вниз. Средняя поляризация протонов мишени составила порядка 56 %. Также были набраны данные на углеродном эквиваленте поляризованной мишени. Всего набрано порядка 500 млн. триггеров.



# Моделирование событий методом Монте-Карло

При изменении эффективности работы трековой системы во времени может появиться «ложная» асимметрия. Выбранные циклы измерений были разделены на части по  $\sim 5$  часов. Далее для каждого такого набора измерений были разыграны события методом Монте-Карло, всего 17 наборов по 100 млн. событий.



# Моделирование событий методом Монте-Карло

В программный пакет SpascharmRoot были заложены экспериментальные параметры каждого набора измерений. Были использованы PYTHIA 8 (minimum bias), GEANT 3.

Статистика для каждого набора была разделена:

- 36 интервалов по  $\phi$  (с шагом  $10^\circ$ );
- 5 интервалов по  $p_T$  (0.00 – 0.15 – 0.25 – 0.50 – 0.85 – 1.50 ГэВ/c);
- 4 интервала по  $x_F$  (0.00 – 0.25 – 0.50 – 0.75 – 1.00).

Для каждого набора измерений были получены поправочные коэффициенты  $\epsilon(\phi, p_T, x_F)$  (акцептанс и эффективность реконструкции).



## Отбор событий

- ▶ Наличие одного трека в пучковых годоскопах и выбор типа ( $\pi^-$ ,  $K^-$ ,  $\bar{p}$ ).
- ▶ Наличие одного и более вторичных треков в спектрометре.
- ▶ Наличие восстановленной первичной вершины, расстояние между пучковым треком и вторичными треками  $< 0.5$  см.
- ▶ Расстояние от первичной вершины до оси мишени  $< 1.5$  см.
- ▶ Координата первичной вершины лежит в пределах  $-25 - +25$  см.



# Вычисление асимметрии

- $N(\phi, p_T, x_F) = \frac{\sum_i \frac{n_i(\phi, p_T, x_F)}{\epsilon_i(\phi, p_T, x_F)} M_i}{\sum_i M_i}$  (среднее взвешенное), где  $i$  – номер набора при поляризации мишени «вверх» или «вниз»,  $n$  – выход наблюдаемого адрона ( $\pi^\pm$ ),  $\epsilon$  – поправочный коэффициент,  $M$  – число пучковых частиц.
- $\delta A(\phi) = \frac{2}{(N^\uparrow(\phi) + N^\downarrow(\phi))^2} \sqrt{N^\uparrow(\phi) \delta N^\downarrow(\phi) + N^\downarrow(\phi) \delta N^\uparrow(\phi)}$  – статистическая ошибка  $A(\phi)$ .
- $A(\cos(\phi))$  аппроксимируется линейной функцией  $A_N \frac{\langle P \rangle}{D} \cdot \cos(\phi) + C$  для извлечения искомой  $A_N$ .

# Односпиновая асимметрия в инклюзивном образовании заряженных пионов

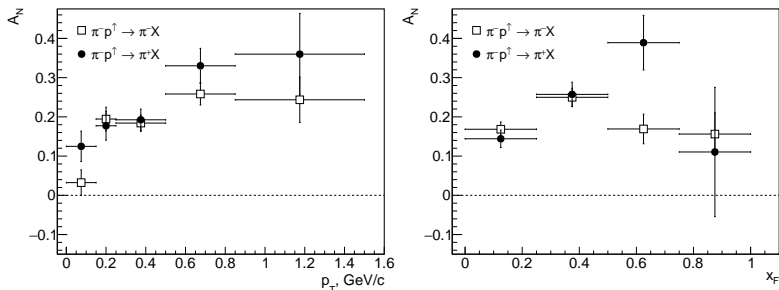


Рис.: Распределения  $A_N(p_T)$  (слева) и  $A_N(x_F)$  (справа) для  $\pi^\pm$ -мезонов ( $\pi^- p^+ \rightarrow \pi^\pm X$ ) в сеансе 2018 г. установки СПАСЧАРМ.

Усредненное значение по  $p_T$  от 0.2 до 1.5 ГэВ/с  $A_N$  для  $\pi^-$ -мезонов –  $(20.9 \pm 1.4)$  %, для  $\pi^+$ -мезонов –  $(20.3 \pm 3.4)$  %,  $\langle A_N(x_F) \rangle$  для  $\pi^-$ -мезонов –  $(19.5 \pm 1.3)$  %, для  $\pi^+$ -мезонов –  $(19.4 \pm 1.7)$  %.

# Односпиновая асимметрия в инклюзивном образовании заряженных пионов

Результаты для $\pi^-$ -мезонов	$\langle p_T \rangle$ (ГэВ/c)	$\langle x_F \rangle$	$A_N$	$\delta A_N^{stat}$	$\delta A_N^{syst}$	$N^\uparrow$	$N^\downarrow$
$p_T: (0.00, 0.15)$	0.09	0.11	0.032	$\pm 0.032$	$\pm 0.027$	455036	453143
$p_T: (0.15, 0.25)$	0.20	0.20	0.194	$\pm 0.030$	$\pm 0.024$	608042	588558
$p_T: (0.25, 0.50)$	0.37	0.32	0.184	$\pm 0.021$	$\pm 0.043$	1423265	1356094
$p_T: (0.50, 0.85)$	0.63	0.47	0.258	$\pm 0.028$	$\pm 0.081$	858100	806070
$p_T: (0.85, 1.50)$	1.03	0.58	0.244	$\pm 0.058$	$\pm 0.040$	268238	251422
$x_F: (0.00, 0.25)$	0.23	0.15	0.168	$\pm 0.019$	$\pm 0.030$	3139240	3051437
$x_F: (0.25, 0.50)$	0.46	0.35	0.250	$\pm 0.023$	$\pm 0.049$	595361	563235
$x_F: (0.50, 0.75)$	0.61	0.61	0.169	$\pm 0.038$	$\pm 0.065$	172816	162773
$x_F: (0.75, 1.00)$	0.74	0.86	0.156	$\pm 0.054$	$\pm 0.037$	110632	100594

Результаты для $\pi^+$ -мезонов	$\langle p_T \rangle$ (ГэВ/c)	$\langle x_F \rangle$	$A_N$	$\delta A_N^{stat}$	$\delta A_N^{syst}$	$N^\uparrow$	$N^\downarrow$
$p_T: (0.00, 0.15)$	0.09	0.10	0.125	$\pm 0.040$	$\pm 0.032$	401315	385301
$p_T: (0.15, 0.25)$	0.20	0.18	0.177	$\pm 0.037$	$\pm 0.029$	573314	546305
$p_T: (0.25, 0.50)$	0.36	0.27	0.193	$\pm 0.027$	$\pm 0.046$	1217056	1140351
$p_T: (0.50, 0.85)$	0.62	0.39	0.330	$\pm 0.044$	$\pm 0.148$	590762	553463
$p_T: (0.85, 1.50)$	1.02	0.53	0.360	$\pm 0.104$	$\pm 0.101$	148356	142320
$x_F: (0.00, 0.25)$	0.23	0.14	0.144	$\pm 0.022$	$\pm 0.018$	2536382	2411904
$x_F: (0.25, 0.50)$	0.46	0.34	0.257	$\pm 0.031$	$\pm 0.089$	304175	283689
$x_F: (0.50, 0.75)$	0.61	0.59	0.389	$\pm 0.070$	$\pm 0.073$	50713	47451
$x_F: (0.75, 1.00)$	0.74	0.84	0.110	$\pm 0.165$	$\pm 0.138$	7470	7213

# Систематическая ошибка односпиновой асимметрии в инклюзивном образовании заряженных пионов

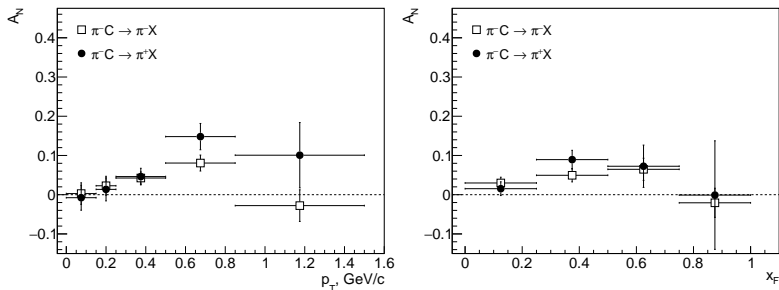
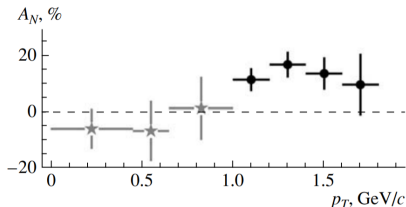


Рис.: Распределения  $A_N(p_T)$  (слева) и  $A_N(x_F)$  (справа) для  $\pi^\pm$ -мезонов ( $\pi^- C \rightarrow \pi^\pm X$ ) в сеансе 2018 г. установки СПАСЧАРМ.

$\langle A_N(p_T) \rangle$  и  $\langle A_N(x_F) \rangle$  для  $\pi^-$ -мезонов и  $\pi^+$ -мезонов – (5 – 7) %.

## Сравнение с другими экспериментами

Положительный знак и величина в  $\sim 20\%$  (при  $p_T \sim 1$  ГэВ/с) асимметрии наблюдались ранее в реакциях  $\pi^- d^\uparrow \rightarrow \pi^0 X$  [9],  $\pi^- p^\uparrow \rightarrow \pi^0 X$  [10] и  $pp^\uparrow \rightarrow \pi^0 X$  [11, 12].



**Рис.:** Распределение  $A_N(p_T)$  для инклюзивного рождения  $\pi^0$  ( $\pi^- d^\uparrow \rightarrow \pi^0 X$ ) на установке ПРОЗА (Протвино).

# Заключение

Получены результаты по односпиновой асимметрии заряженных пионов в области фрагментации пионного пучка с импульсом 26.3 ГэВ/с на установке СПАСЧАРМ в реакциях  $\pi^- p^\uparrow \rightarrow \pi^- X$  и  $\pi^- p^\uparrow \rightarrow \pi^+ X$ . Асимметрия в реакции  $\pi^- p^\uparrow \rightarrow \pi^+ X$  измерена впервые.

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

# Список литературы

- [1] B. Andersson. B: *J. Phys. G* 17 (1991), с. 1507. DOI: 10.1088/0954-3899/17/10/005.
- [2] T. A. DeGrand и H. I. Miettinen. B: *Phys. Rev. D* 31 (1985), с. 661. DOI: 10.1103/PhysRevD.31.661.
- [3] D. Sivers. B: *Phys. Rev. D* 41 (1990), с. 83. DOI: 10.1103/PhysRevD.41.83.
- [4] J. Collins. B: *Nucl. Phys. B* 396 (1993), с. 161. DOI: 10.1016/0550-3213(93)90262-N.
- [5] M.G. Ryskin. B: *Yad. Fiz.* 48 (1988), с. 1114.
- [6] V.V. Abramov. B: *Yad. Fiz.* 72 (2009), с. 1933.
- [7] G. L. Kane et al. B: *Phys. Rev. Lett.* 41 (1978), с. 1689. DOI: 10.1103/PhysRevLett.41.1689.
- [8] C. A. Aidala et al. B: *Rev. Mod. Phys.* 85 (2013), с. 655—691. DOI: 10.1103/RevModPhys.85.655.
- [9] V.V. Mochalov et al. B: *Phys. Atom. Nuclei* 73 (2010), с. 2017.
- [10] V. D. Apokin et al. B: *Sov. J. Nucl. Phys.* 49 (1989), с. 103.
- [11] V.V. Mochalov et al. B: *Phys. Atom. Nucl.* 77 (2014), с. 595.
- [12] A. N. Vasiliev et al. B: *Phys. Atom. Nucl.* 68 (2005), с. 1790.