

# Исследование спиновой зависимости сильного взаимодействия в эксперименте СПАСЧАРМ на У-70

**А.Н. Васильев**

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
(*от имени сотрудничества СПАСЧАРМ*)



Конференция «Физика частиц при средних и высоких энергиях»

## План выступления

1. Чем интересна и важна спиновая физика в непертурбативной области КХД?
2. Сотрудничество СПАСЧАРМ
3. Экспериментальная установка СПАСЧАРМ
4. Результаты, полученные в СПАСЧАРМ :
  - а) односпиновые асимметрии на поляризованной мишени
  - б) поляризация гиперонов и антигиперонов на ядрах
  - в) спиновая выстроенность векторных мезонов на ядрах
5. Обсуждение полученных результатов
6. Планы СПАСЧАРМ на ближайшие годы
7. Планы СПАСЧАРМ на 30-е годы этого века
8. Заключение



В.В. Абрамов<sup>1</sup>, И.Г. Алексеев<sup>2</sup>, Н.А. Бажанов<sup>3</sup>, А.Н. Васильев<sup>1,4</sup>, Ю.М. Гончаренко<sup>1</sup>, И.С. Городнов<sup>3</sup>, А.Б.Гриднев<sup>5</sup>,  
Н.К. Калугин<sup>1</sup>, В.А. Качанов<sup>1</sup>, Н.Г. Козленко<sup>5</sup>, Ю.М. Мельник<sup>1</sup>, А.П. Мещанин<sup>1</sup>, Н.Г. Минаев<sup>1</sup>, В.В.  
Моисеев<sup>1</sup>, Д.А. Морозов<sup>1</sup>, В.В. Мочалов<sup>1,4</sup>, А.Б. Неганов<sup>3</sup>, В.М. Нестеров<sup>2</sup>, Д.В. Новинский<sup>5</sup>, Л.В. Ногач<sup>1</sup>, М.Б.  
Нурушева<sup>4</sup>, А.Ф. Прудкогляд<sup>1</sup>, С.В. Рыжиков<sup>1</sup>, А.В. Рязанцев<sup>1</sup>, Д.Н. Свирида<sup>2</sup>, Э. И. Самигуллин<sup>2</sup>, П.А.  
Семенов<sup>1,4</sup>, Ю.А. Усов<sup>3</sup>, А.В. Узунян<sup>1</sup>, А.Н. Федоров<sup>3</sup>, А.Е. Якутин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт», 142281, Московская область, город Протвино, пл. Науки, д. 1.

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182, Москва,  
пл. академика Курчатова, д.1.

Объединенный Институт Ядерных Исследований, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри,  
д.1

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва,  
Каширское ш., д. 31.

<sup>5</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского  
центра «Курчатовский институт», 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1.



- ❖ Спин является весьма нетривиальной составляющей полного момента импульса со специфическими свойствами, и **его природа** всё ещё - спустя более 100 лет после открытия (**опыт Штерна и Герлаха в 1922 г. и последующее введение спина Гаудсмитом и Уленбеком в 1925 г.**)– остаётся тайной.
- ❖ Спин  $s$  в квантовой механике является **собственным моментом импульса** частиц. В отличие от орбитального момента импульса, **спин не связан с перемещением в пространстве** частицы, и является её внутренней характеристикой, наподобие массы или заряда.



- ❖ Интерес к исследованию спиновой зависимости сильного взаимодействия связан с возможностью изучения **динамики взаимодействия и спиновой структуры адронов через взаимодействия партонов, имеющих ненулевой спин**. Спиновые эффекты, зависящие от аромата кварков, привлекают внимание исследователей. Например, существование мощных непертурбативных вакуумных глюонных полей (**ИНСТАНТОНОВ**) приводит к специфическим спин- и аромато-зависимым взаимодействиям между кварками и глюонами, что лежит в основе наблюдаемых эффектов.
- ❖ Вакуум КХД генерирует **большой аномальный хромагнитный момент у кварка**. Это приводит к кварк-глюонному взаимодействию с переворотом спина. В диссертации Н.С.Корчагина (2014 г, ОИЯИ) на основе этого эффекта вычислена односпиновая асимметрия в инклюзивном образовании пионов. Показано, что этот эффект может приводить к большим односпиновым асимметриям пионов.
- ❖ Спиновые эффекты в непертурбативной области КХД помогают исследовать такие фундаментальные вопросы, как **конфайнмент** (пленение цветовых зарядов в бесцветных адронах) и структура вакуума КХД, который заполнен непертурбативными флуктуациями полей.
- ❖ На сегодняшний день **нет теории**, которая бы полностью объясняла все наблюдаемые спиновые эффекты в сильных взаимодействиях.
- ❖ **Новые экспериментальные результаты в этой трудной для теоретиков области непертурбативной КХД** стимулируют теоретическое осмысление, важны для развития теоретических подходов, поиска новых моделей и возможного создания теории (модели) для описания всех наблюдаемых поляризационных эффектов.

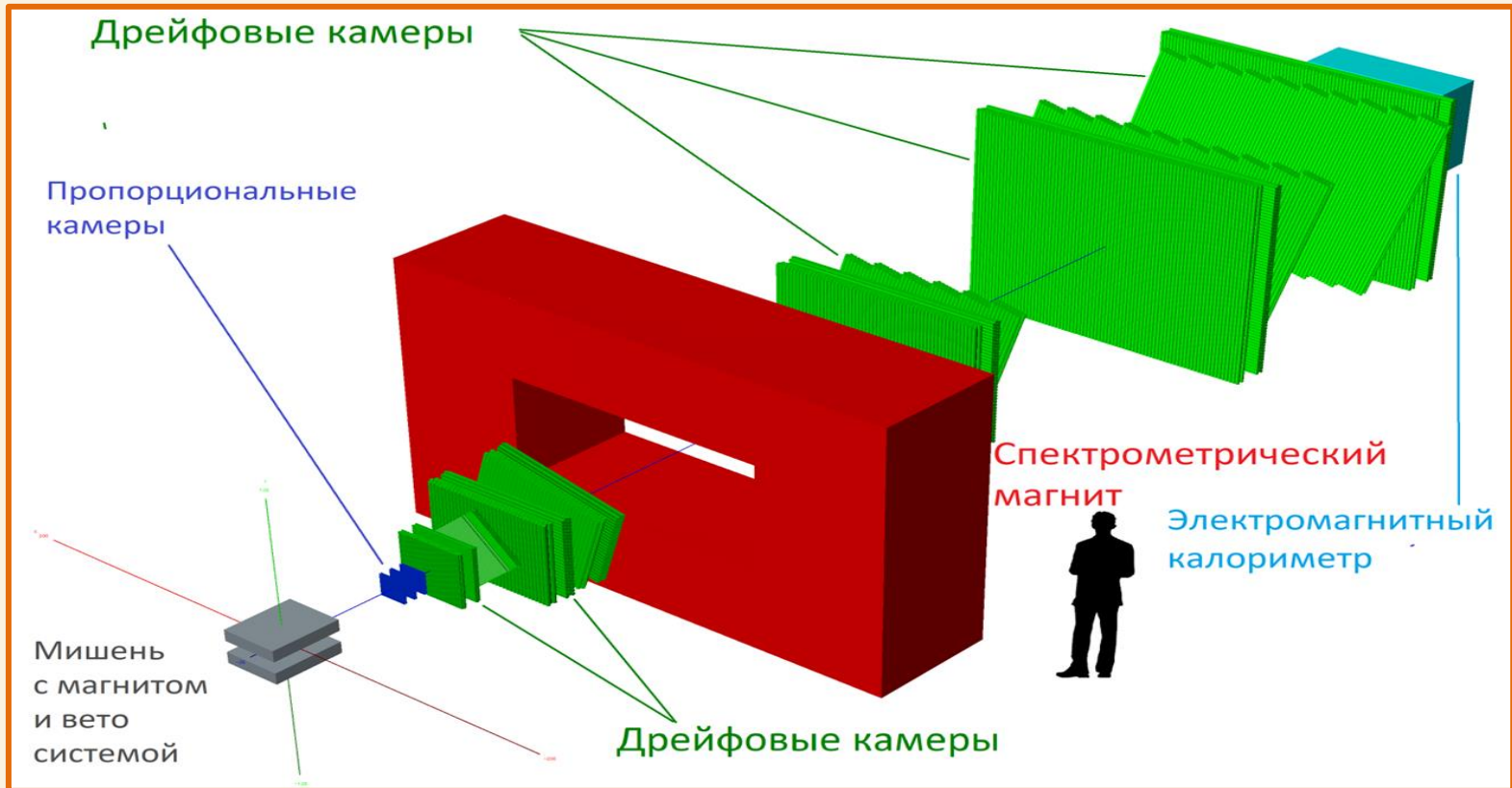


- В феноменологической модели ХПК предполагается генерация кругового поперечного хромомагнитного поля  $\mathbf{V}^a$  в области взаимодействия адронов движущимися кварками-спектаторами. Поляризационные эффекты возникают из-за действия силы Штерна-Герлаха в неоднородном поле  $\mathbf{V}^a$  на хромомагнитный момент ( $\mu^a_Q$ ) пробного кварка, который войдет в состав наблюдаемого адрона. В модели ХПК учитывается прецессия спинов кварков в хромомагнитном поле, что приводит к зависимости  $A_N(x_F)$  и  $P_N(x_F)$  от  $x_F$ , а в сильных полях к их осцилляциям. Эффект осцилляции  $A_N(x_F)$  наблюдался для реакции  $p\uparrow + A \rightarrow p X$  на установке ФОДС-2 в ИФВЭ, а для  $P_N(x_F)$  в реакциях  $p+A \rightarrow \bar{E}^- X$  и  $p + A \rightarrow \bar{E}^{+,0} X$  во FNAL. Модель ХПК предсказывает максимальную частоту осцилляции  $P_N(x_F)$  для реакций образования антигиперонов в  $pA$  соударениях. В модели ХПК интенсивность поля  $\mathbf{V}^a$  зависит от числа кварков- и антикварков-спектаторов, которые с разными весами (цветовой фактор  $\lambda$ ) дают вклад в частоту осцилляции  $A_N(x_F)$  и  $P_N(x_F)$ . При этом вклад кварков-спектаторов из мишени дополнительно подавлен фактором  $-\tau$ . Зависимость  $A_N(x_F)$  и  $P_N(x_F)$  от взвешенного числа кварков-спектаторов объясняет зависимость не только от кинематических переменных, но и от типа реакции.
- ❖ Составной частью модели ХПК является база поляризационных данных, которая включает 103 инклюзивных и 30 эксклюзивных реакций. Анализ данных позволяет выделить общие закономерности в зависимости поляризационных эффектов от типа реакции, кинематических переменных, атомного веса мишени и пучка, и множественности частиц в событии. Были получены оценки аномальных хромомагнитных моментов кварков:  $\Delta\mu^a_Q(u,c) = -0.4902 \pm 0.0008$ ,  $\Delta\mu^a_Q(d,s,b) / \Delta\mu^a_Q(u,c) = 0.81637 \pm 0.0007 \approx \sqrt{2/3}$ ,  $|\lambda|/\tau = 4.674 \pm 0.013 \approx \delta$  – постоянная Фейгенбаума = 4.669202

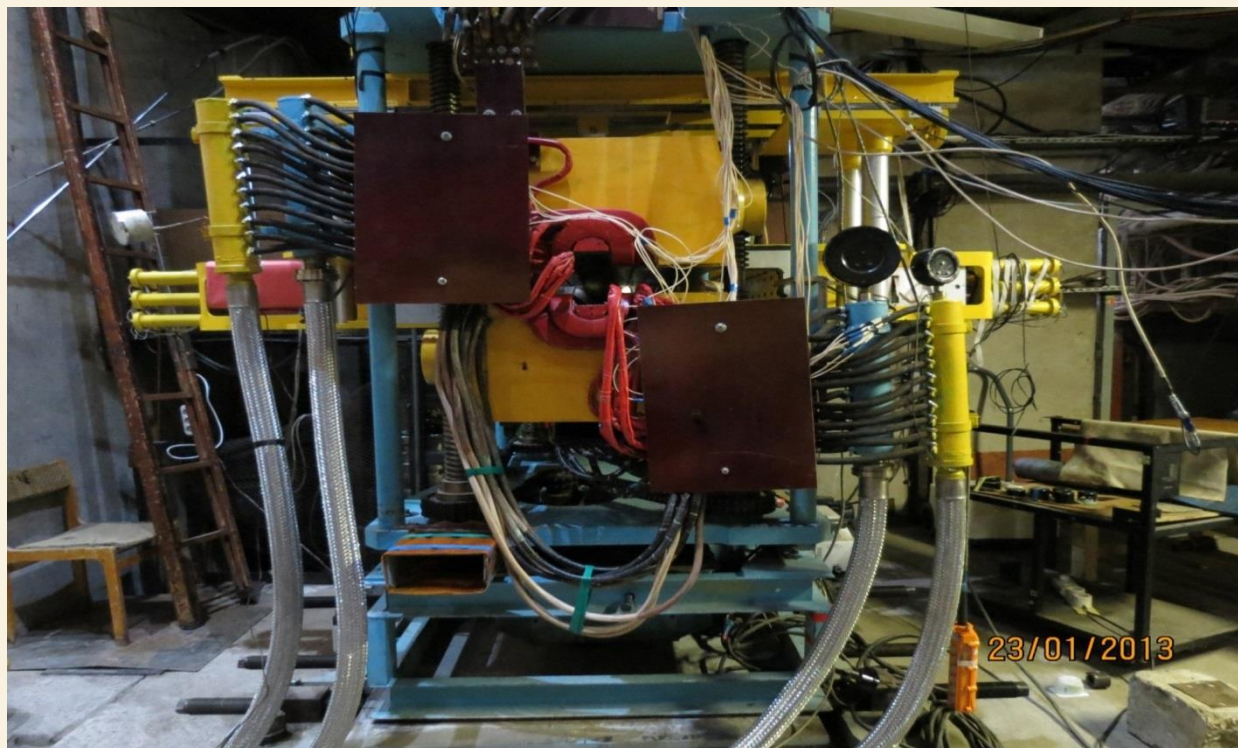


- ❖ Основной задачей проекта СПАСЧАРМ является детальное исследование различных поляризационных эффектов в процессах образования частиц и резонансов, состоящих из  $u$ ,  $d$  и  $s$ -кварков.
- ❖ Разнообразие начальных и конечных адронных состояний позволяют провести систематическое исследование десятков различных процессов.
- ❖ Анализ этих данных дает возможность выявить закономерности поведения односпиновых наблюдаемых от аромата участвующих в реакции кварков, и спиновой структуры адронов, содержащих эти кварки, и кинематических переменных.
- ❖ Сравнение с моделями всей совокупности данных может позволить сделать важный шаг в определении механизма поляризационных явлений и природе таких явлений, как конфайнмент и фрагментация кварков.
- ❖ При отсутствии поляризованной мишени исследуются поляризация гиперонов и антигиперонов и спиновая выстроенность векторных мезонов.

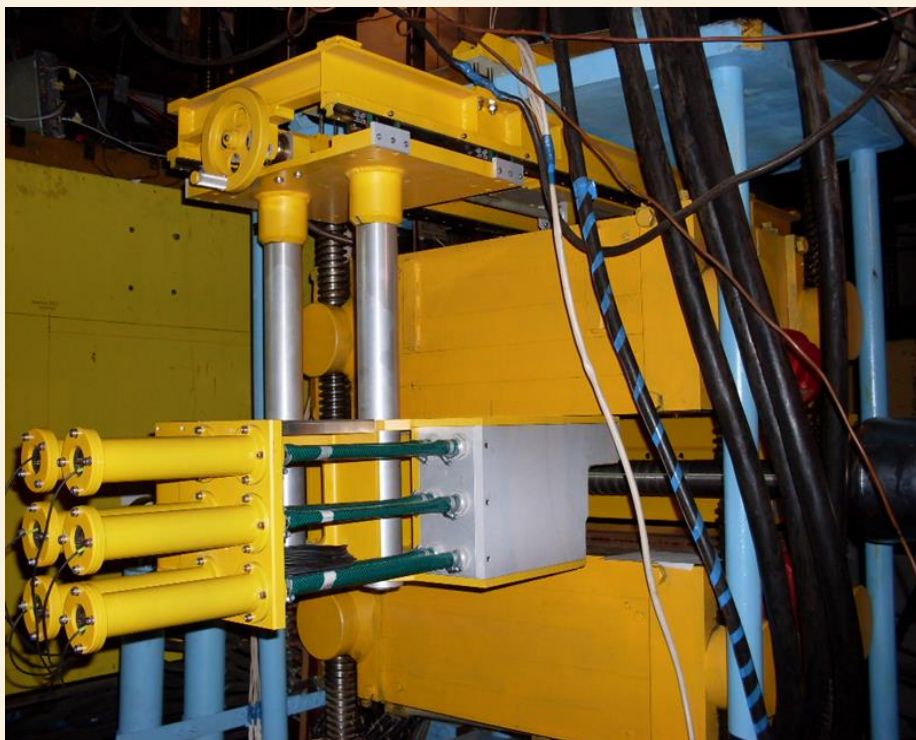
(подготовлена для поляризационных исследований, около 65 плоскостей трековых детекторов)



Energy 26,5 GeV, Particles  $\pi/K/pbar=98\%$ , 1.75%,0.15%, Intensity: up to  $10^6$   
 Charged:  $\Delta\theta_x > \pm 180$  mrad,  $\Delta\theta_y \approx \pm 120$  mrad,  $0 < x_F < 1$ ,  $p_T < \sim 2.5$  GeV/c  
 Field in spectrometer magnet 0,7 T (BxL)

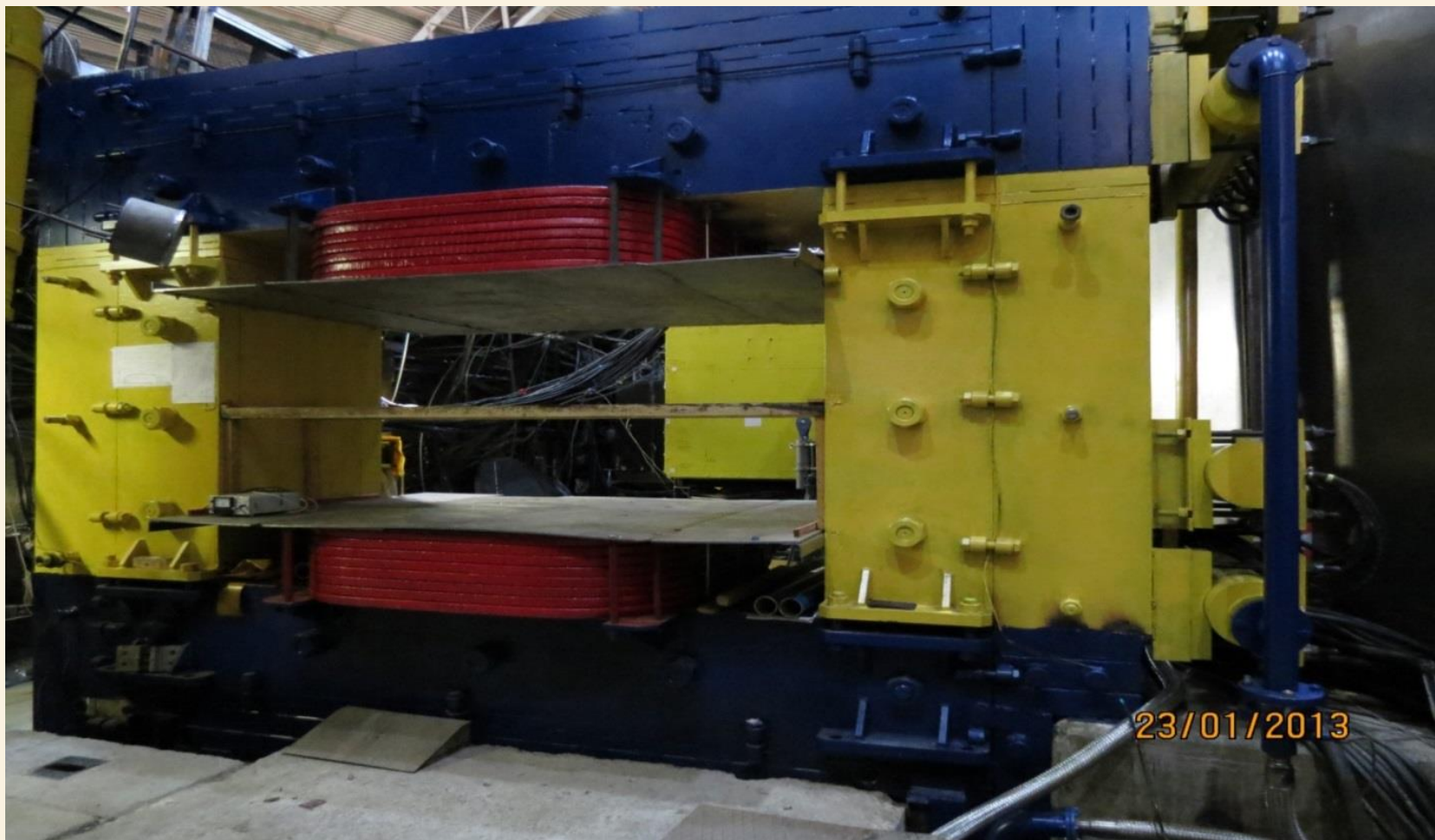


# Охранная система вокруг поляризованной мишени



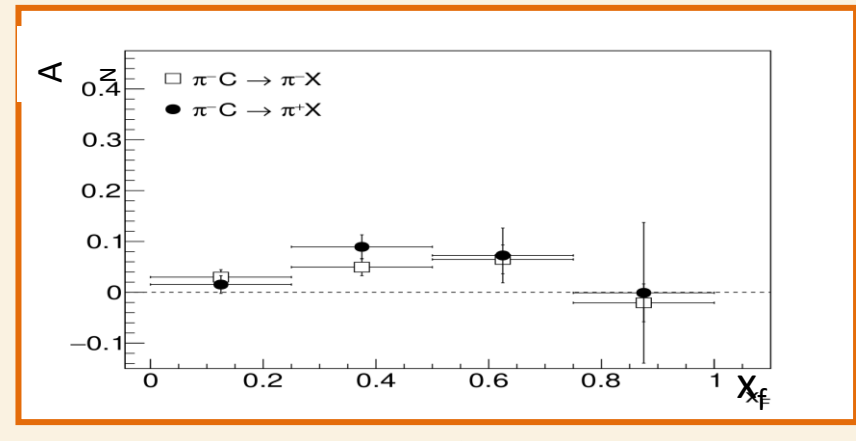
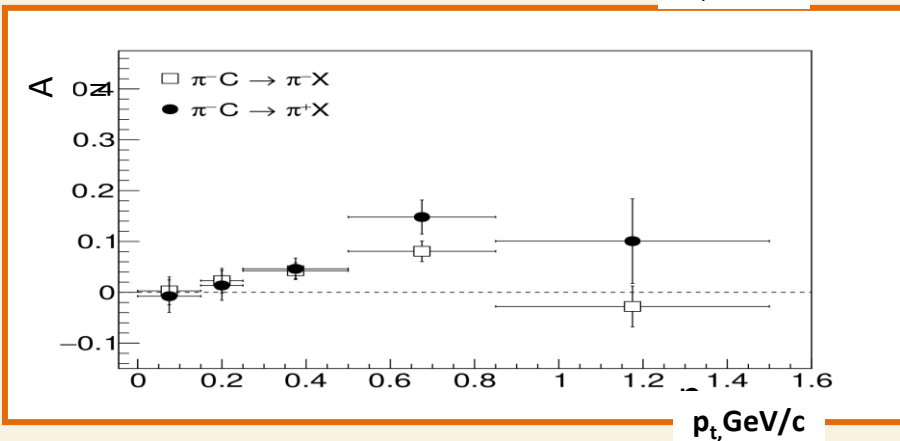
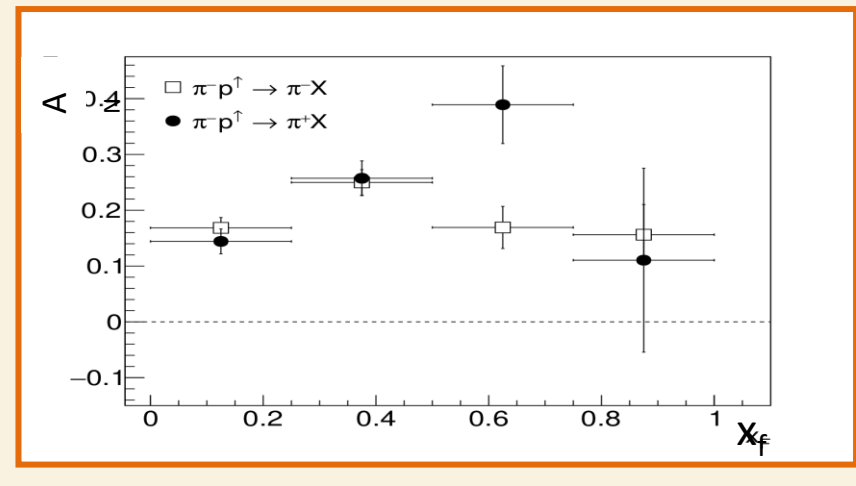
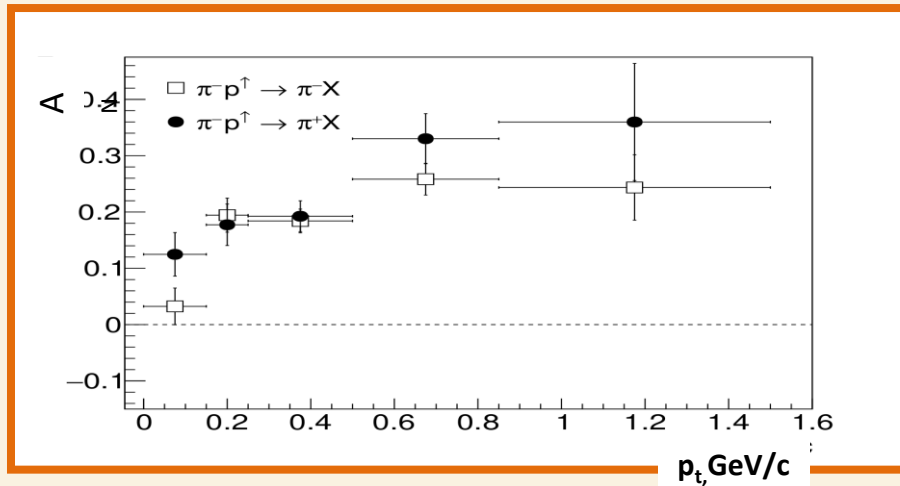


- ❖ Сеанс Март-Апрель 2018 года на ускорительном комплексе У-70. Односпиновые асимметрии в реакциях  $\pi^- + p(\uparrow) \rightarrow \pi^+/\pi^- + X$
- ❖ Поляризованная мишень – образец: 99.5% пентанола ( $C_5H_{11}OH$ ) и 0.5% ТЕМПО ( $C_3H_8NO$ ), длина образца 200 мм, диаметр 18 мм.
- ❖ Накачка поляризации идет в течение 4-5 часов на основе ЭПР. Средняя величина поляризации протонов в мишени после накачки 65-70%. Время релаксации поляризации 100 часов.



# Слева- станция дрейфовых трубок 3 Справа – станция дрейфовых трубок 4

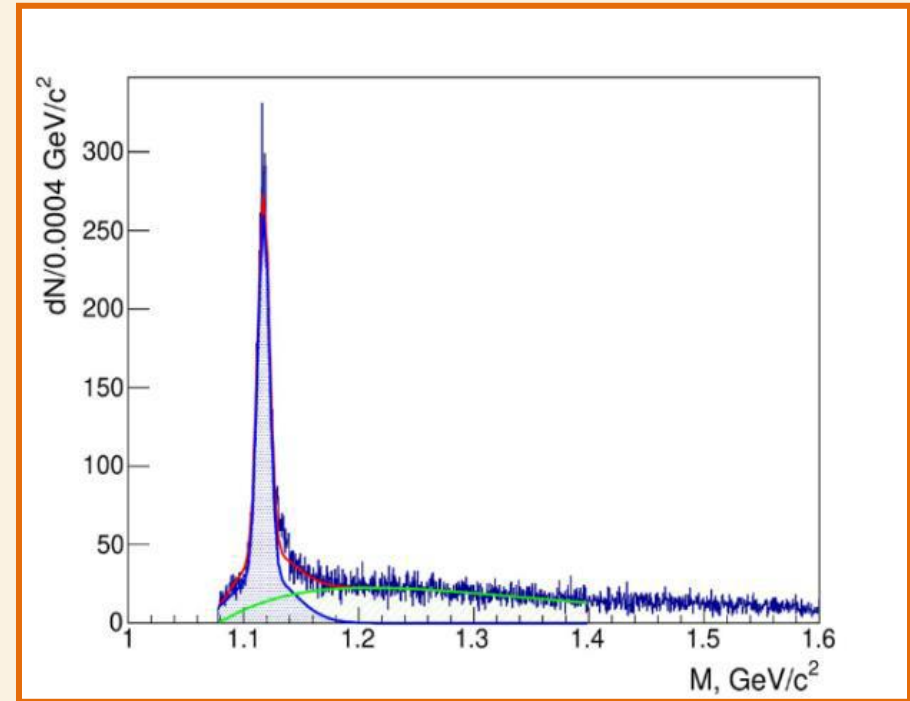
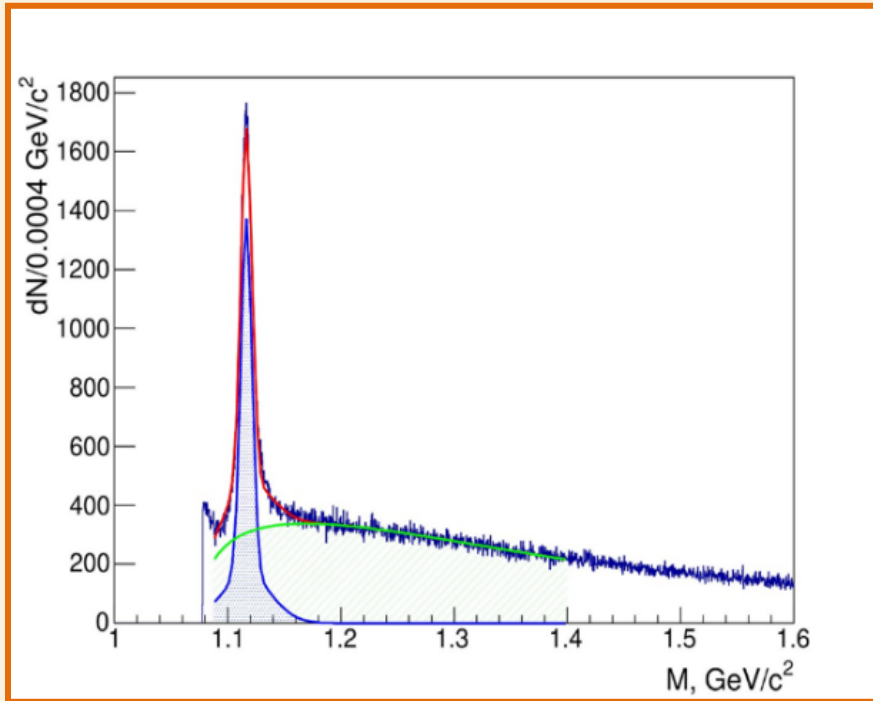




С учетом систематических ошибок односпиновые асимметрии в обеих реакциях, усредненные по области поперечного импульса от **0.2 до 1.5 ГэВ/с**, имеют один знак, равны между собой, составляют порядка **20%** и на **3 $\sigma$**  отличаются от нуля.

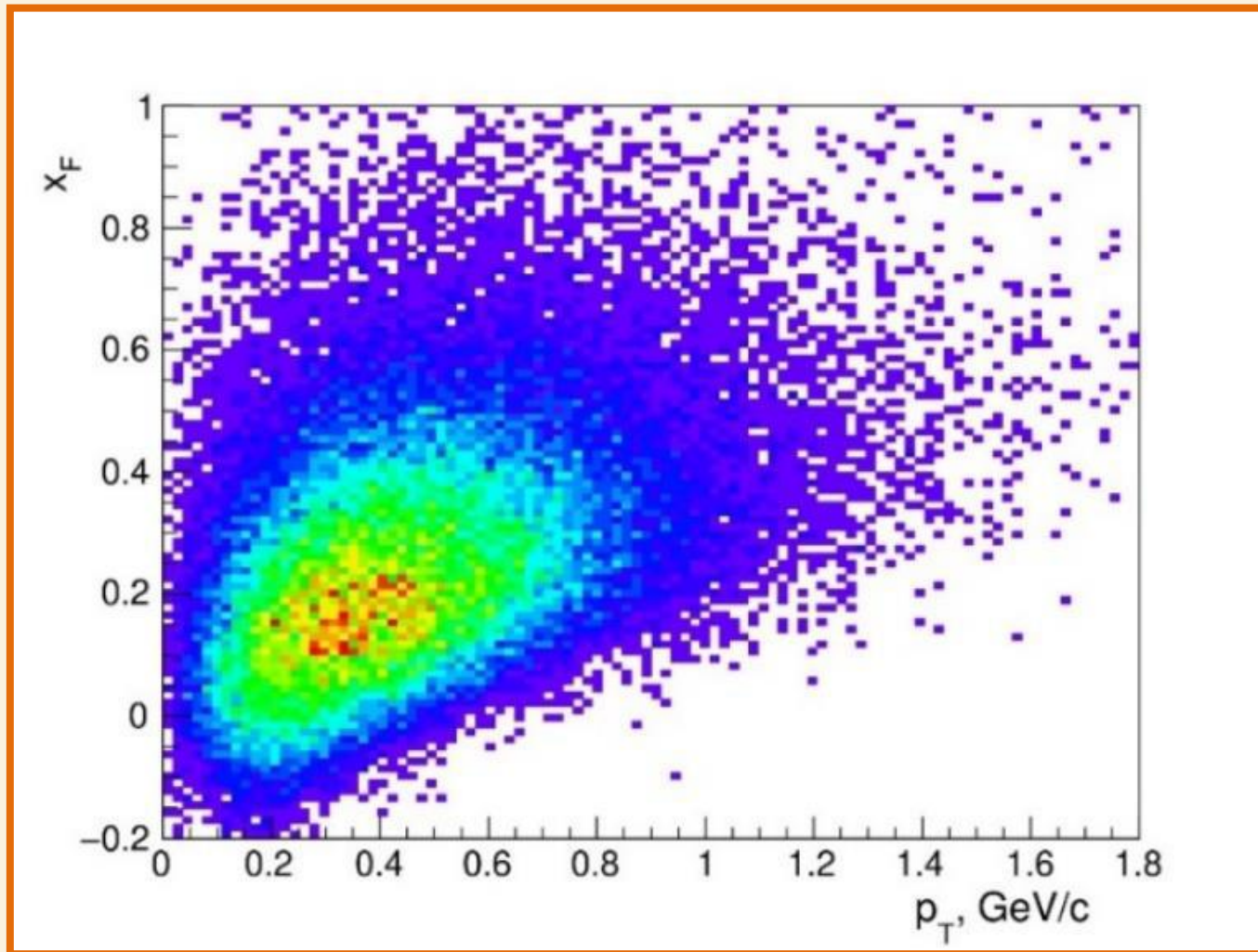
Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 11 (2026), с. 767 – 773

Доклад В.В. Моисеева на этой конференции.



Распределение по массе пары ( $p\pi^-$ ) при использовании всех критериев отбора для  $\pi^-$ -мезонного (слева) и  $K^-$ -мезонного (справа) пучка в сеансах 2021 и 2022 гг.

# Распределение $\Lambda$ -гиперонов по кинематическим параметрам $p_T$ и $x_F$

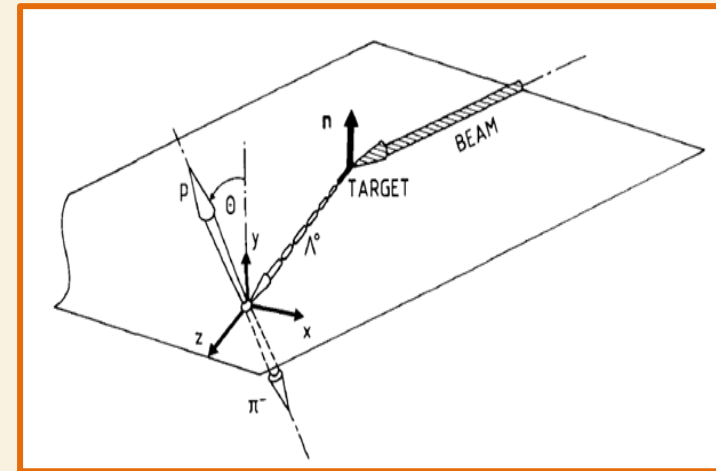


Поляризация адронов определяется из угловых распределений продуктов распада. Частичное нарушение четности в слабых распадах гиперонов приводит к определенной зависимости углового распределения продуктов их распада.

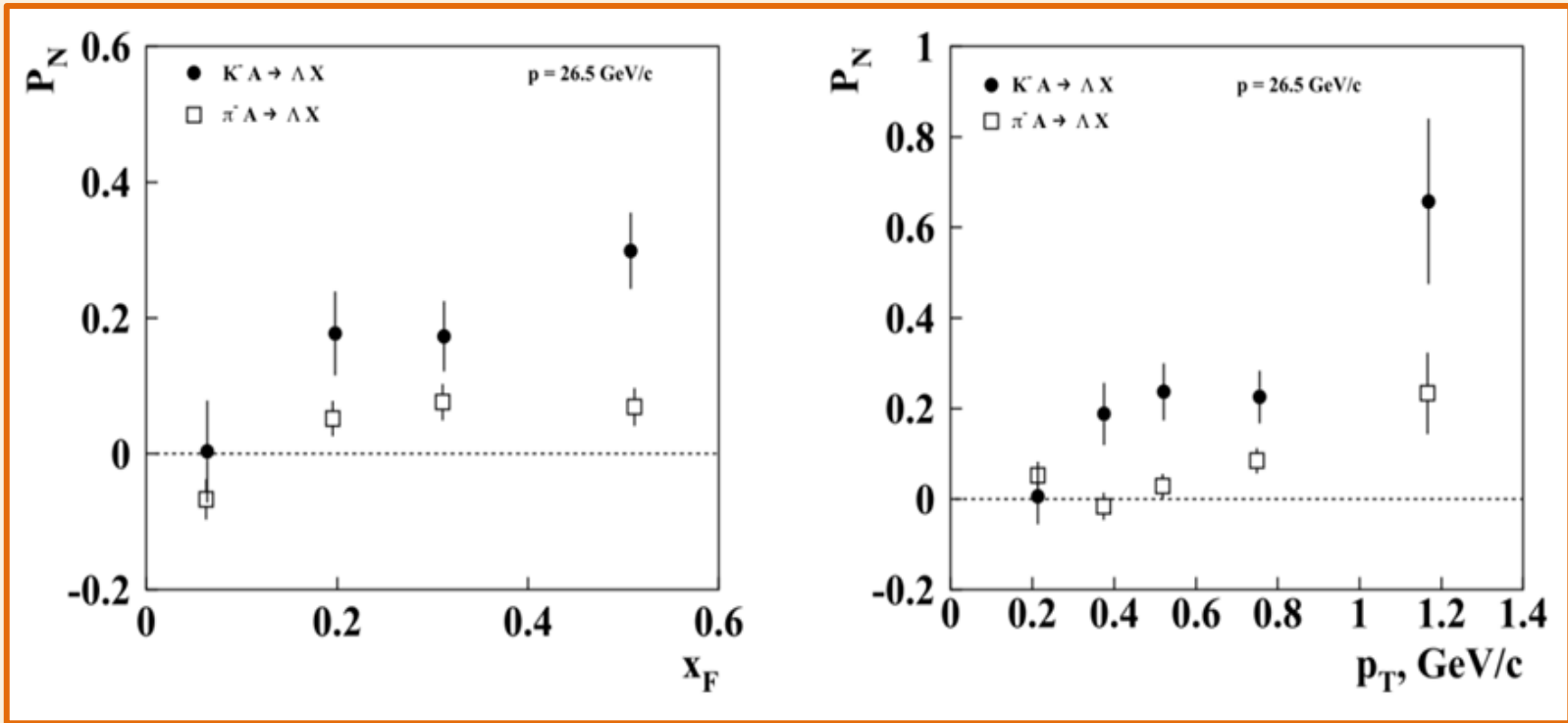
В случае распада  $\Lambda$ -гиперона из состояния с поляризацией  $P$ , на  $\pi^-$ -мезон и протон, зависимость вероятности вылета протона под углом  $\theta_p$  к направлению вектора поляризации гиперона  $P$  имеет вид:

$$dN/d\Omega = (1 + \alpha P e_p) / 4\pi = (1 + \alpha P \cos\theta_p) / 4\pi.$$

где  $e_p$  — единичный вектор в направлении движения протона в системе покоя гиперона.

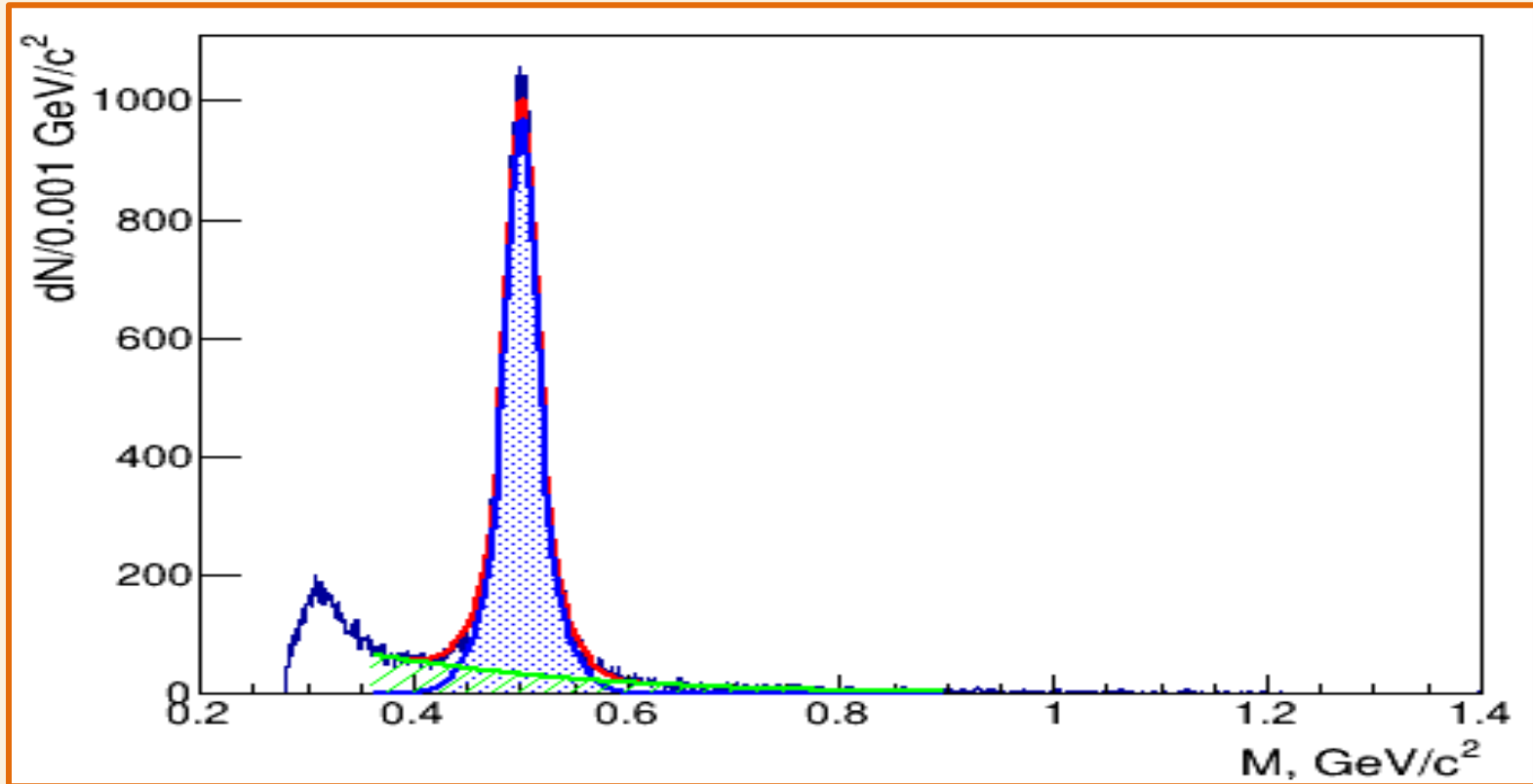


# Поляризация $\Lambda$ -гиперонов на пучке каонов и пионов



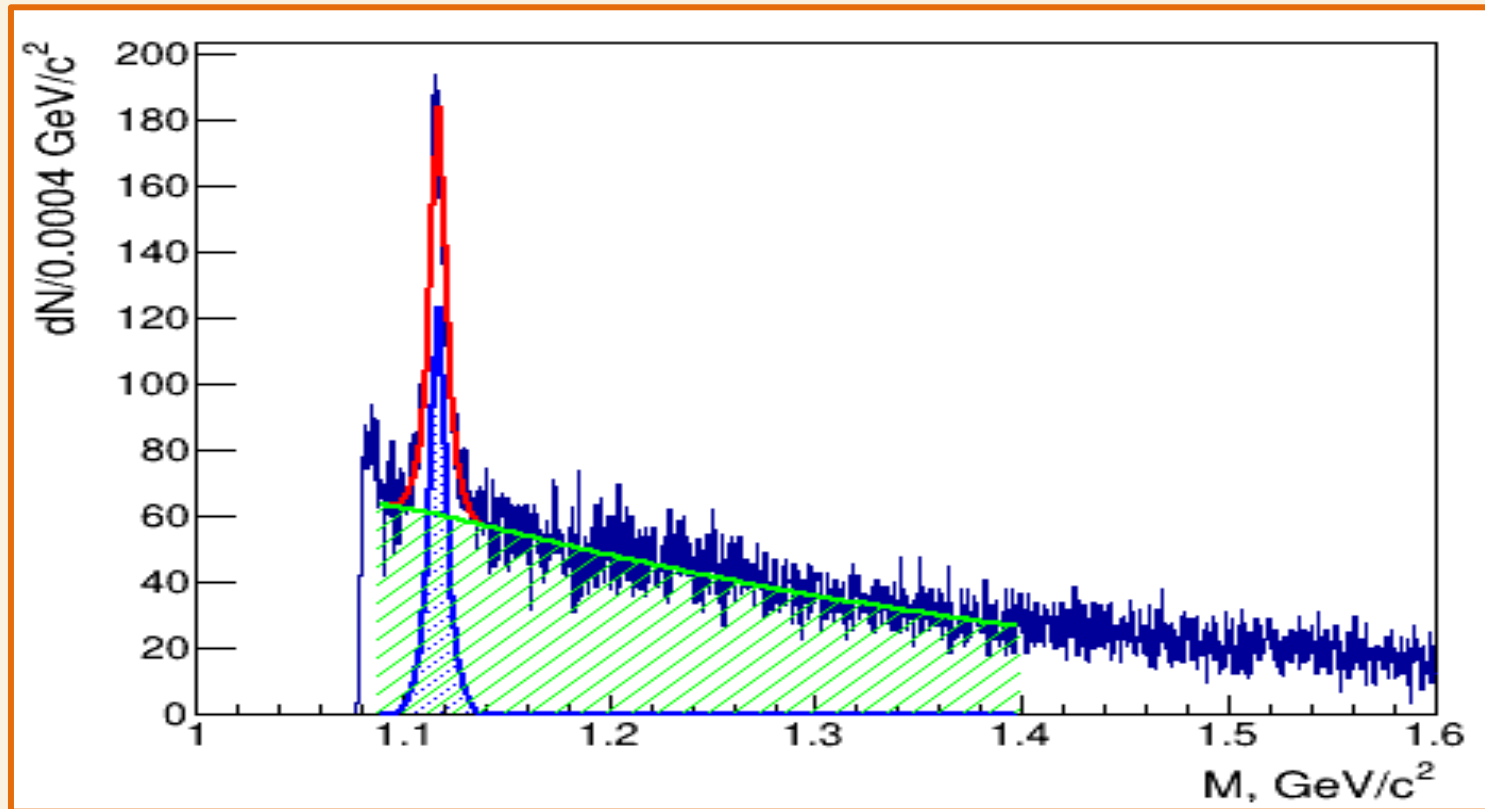
Данные на  $\pi^-$ -пучке указывают на незначительную среднюю ( $\langle P_N \rangle = (4.1 \pm 1.4)\%$ ) поперечную поляризацию гиперонов, за исключением области  $p_T > 1$  ГэВ/с, где поляризация равна  $(23 \pm 9)\%$ . Поляризация  $\Lambda$ -гиперонов на  $K^-$ -пучке, имеющем валентные  $s$ -кварки в своем составе, в отличие от данных на  $\pi^-$ -пучке, имеет значительную среднюю ( $\langle P_N \rangle = (18 \pm 3)\%$ ) положительную величину и растет с увеличением  $x_F$  и  $p_T$ . В области  $p > 1$  ГэВ/с  $P_N$  достигает  $(66 \pm 18)\%$ .

Письма в ЖЭТФ, том 120, вып. 6 (2024), с. 393 – 399

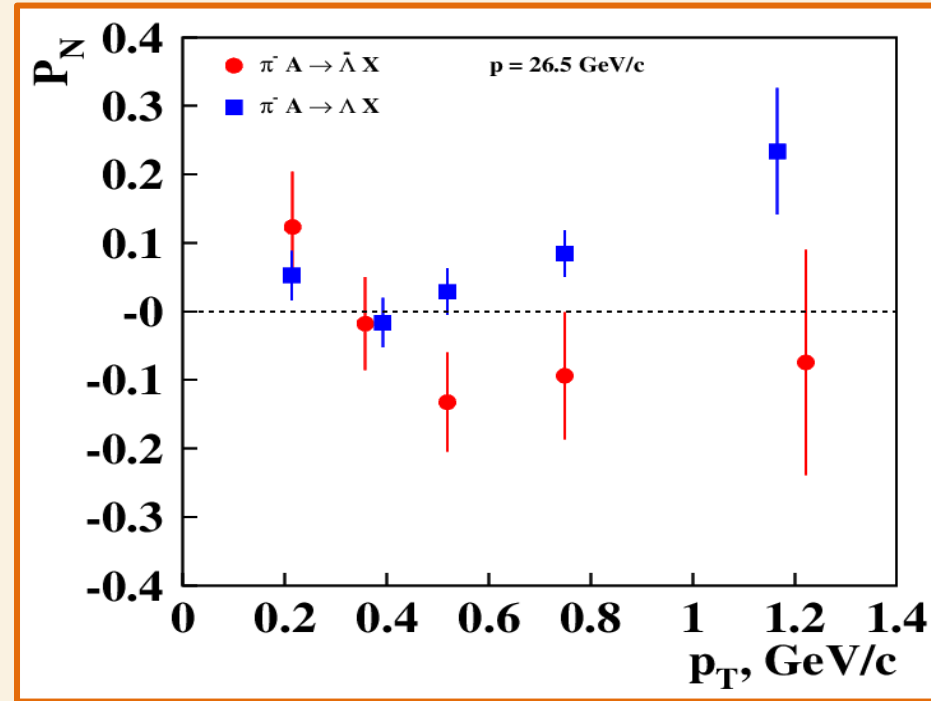
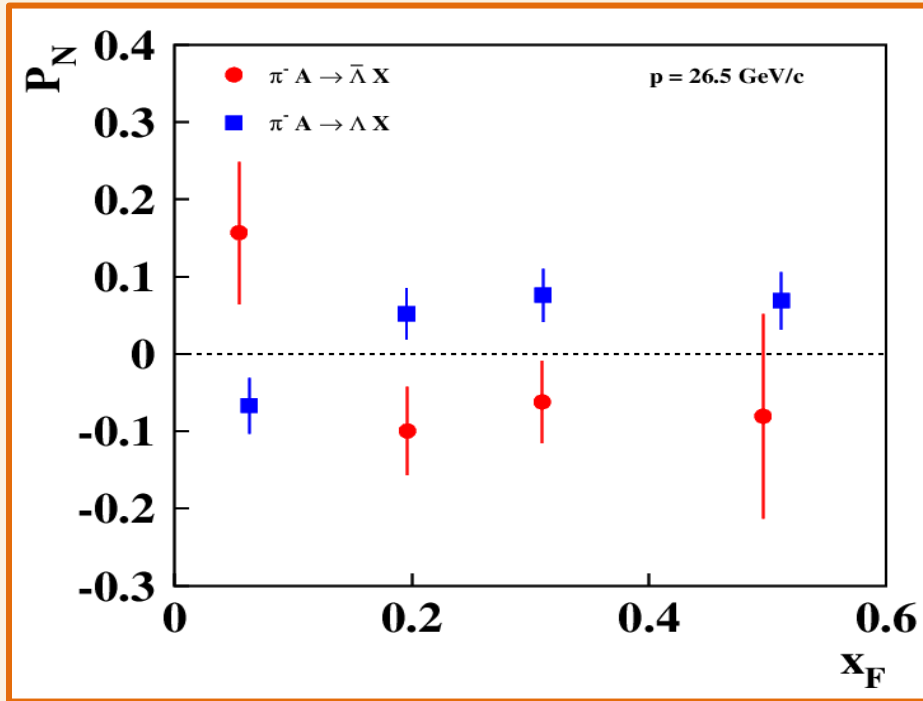


Распределение по массе  $M$  пары вторичных частиц ( $\pi^+\pi^-$ ), на пучке  $\pi^-$ .  
**Зеленая** кривая описывает фон  $B(M)$ , а сплошная **красная** – сумму сигнала и фона,  $S(M)+B(M)$ . Данные сеанса 2021 г. в интервале  $0.61 < p_T < 1$  ГэВ/с.  
**Поляризация  $K_s^0$  получилась нулевая.**

# Распределение по массе $M$ пары вторичных частиц ( $\tilde{p} + \pi^+$ )



Распределение по массе  $M$  пары вторичных частиц ( $\tilde{p} + \pi^+$ ), на пучке  $\pi^+$ . Зеленая кривая описывает фон  $B(M)$ , а сплошная красная – сумму сигнала и фона,  $S(M)+B(M)$ . Отношение сигнала к фону,  $S/B = 1.039 \pm 0.026$  в интервале масс  $1.105 - 1.125$  ГэВ/ $c^2$ .



Данные на  $\pi^-$  пучке указывают на возможную отрицательную поперечную поляризацию  $\tilde{\Lambda}$ -гиперонов в области фрагментации пучка, тогда как для  $\Lambda$ -гиперонов наблюдается положительная поляризация в области  $x_F > 0.2$

Среднее значение поляризации  $\tilde{\Lambda}$ -гиперонов на  $\pi^-$  пучке в области поперечных импульсов 0.3-1.2 ГэВ/с составило  $(-7.7 \pm 4.2)\%$ . Впервые получены данные в области больших значений  $0.3 \leq x_F \leq 0.5$ .

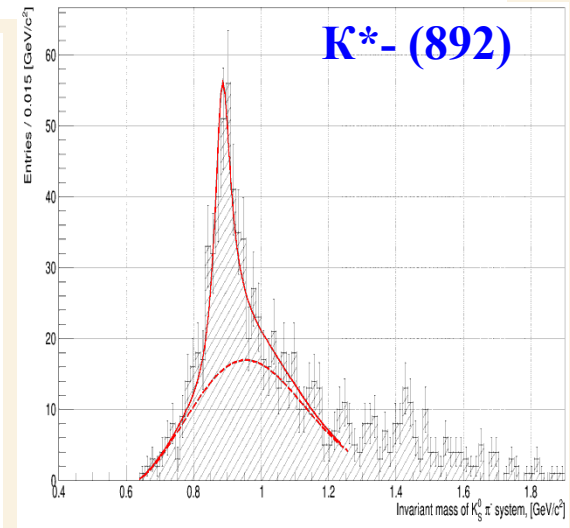
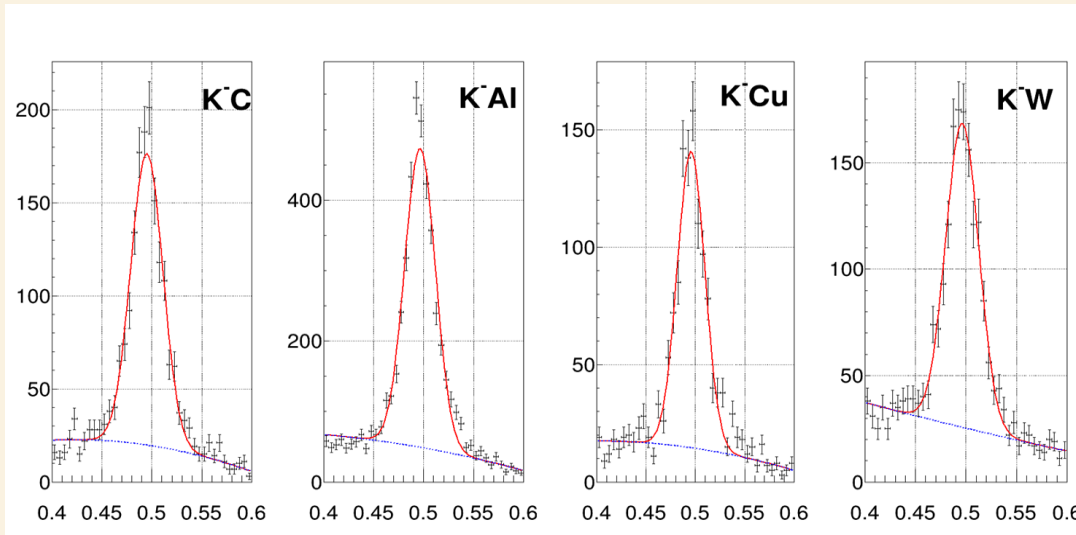
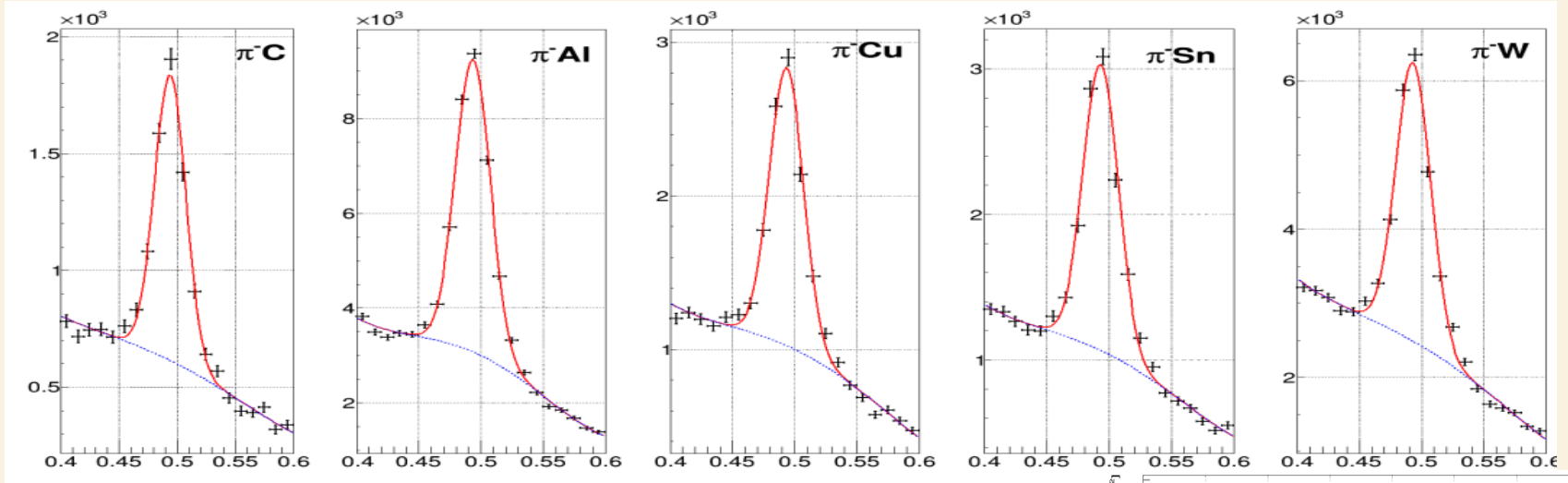
Письма в

ЖЭТФ – 2026



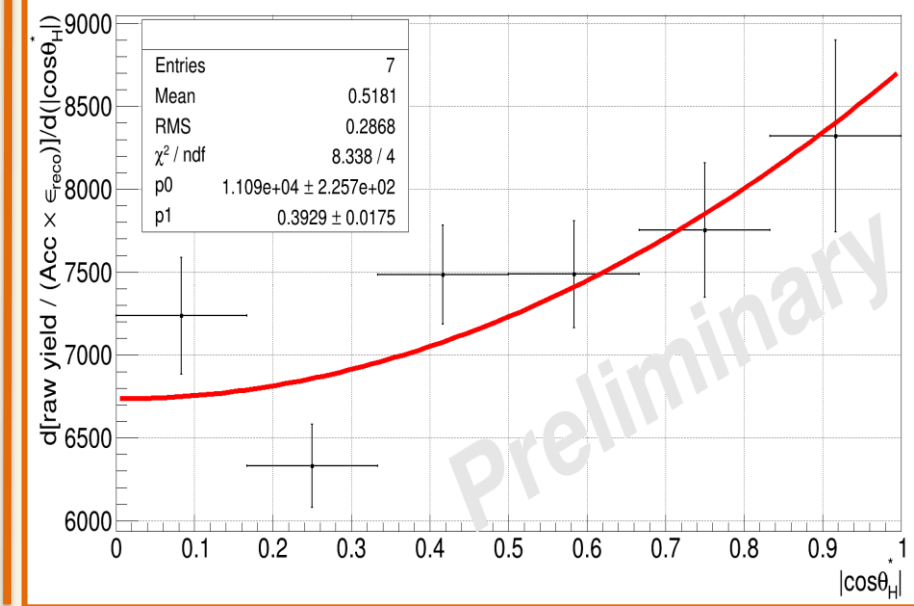
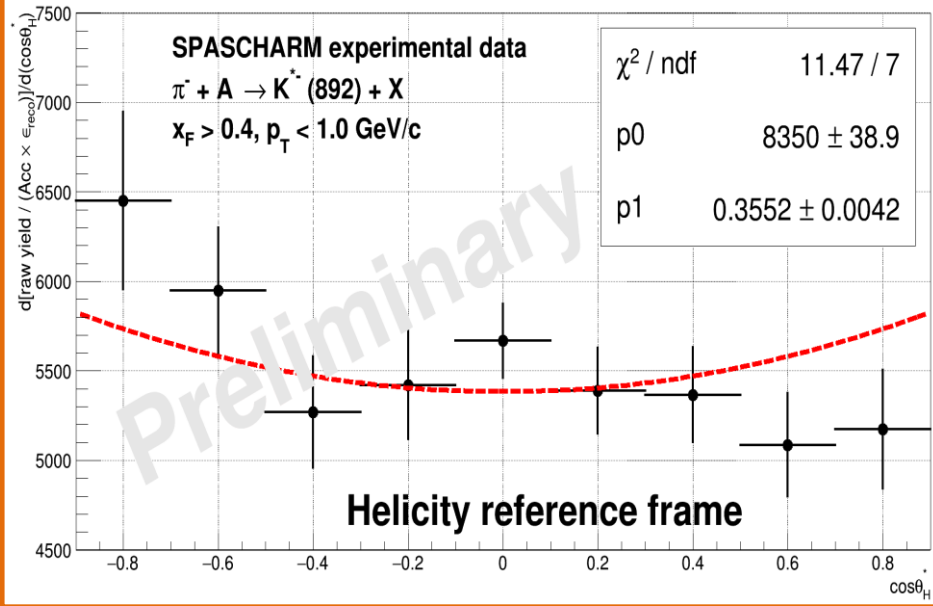
- Спиновые свойства векторных мезонов описываются в терминах матрицы спиновой плотности (эрмитова матрица  $3 \times 3$ ). Спин = 1  $\rightarrow$  три проекции на выбранную ось квантования.
- Диагональные элементы этой матрицы  $\rho_{00}, \rho_{11}, \rho_{1-1}$  представляют собой относительные вероятности мезону иметь 0, +1, -1 проекции спина на ось квантования.
- Если нет спиновой выстроенности при рождении векторного мезона, то никакое из направлений проекции спина не выделено. Проекция спина равновероятны, ( $\rho_{00} = \rho_{11} = \rho_{1-1} = 1/3$ ), т.е., еще раз - для вектора спина нет выделенного направления в пространстве. В противном случае говорят о наличии спиновой выстроенности вдоль оси квантования (spin alignment).
- Элементы матрицы могут быть определены из измерений угловых распределений продуктов распада векторного мезона.

# $K_s$ reconstruction [ $K^{*-} (892) \rightarrow K_s + \pi^-$ ]



на пионном пучке  
 $0.355 \pm 0.004$   
 (или  $0.022 \pm 0.004$ ),  
 5.5-б эффект

на каонном пучке  
 $0.393 \pm 0.018$   
 (или  $0.060 \pm 0.018$ ),  
 3-б эффект



Ошибки только статистические

Доклад Н.К. Калугина на этой конференции



**На 14-ом канале** с пучками от ВМ и кристалла в 2026-2030 годах планируется провести два цикла исследований:

- ❖ На пучках  $\pi^-$ ,  $K^-$ , анти- $p$  с энергией 26.5 ГэВ и на пучке протонов с энергией 50 ГэВ при взаимодействиях на ядрах завершить исследование поляризации  $\Lambda$ -(анти- $\Lambda$ )- гиперонов и спиновой выстроенности векторных  $\rho_0(770)$ - и  $K^*(892)$ -мезонов.
- ❖ На пучках  $\pi^-$ ,  $K^-$ , анти- $p$  с энергией 26.5 ГэВ и на пучке протонов с энергией 50 ГэВ при взаимодействиях на поляризованной мишени исследование односпиновой асимметрии в инклюзивном образовании частиц и резонансов.

## **На 24-ом канале**

- ❖ В 2032-2040 годах и (возможно) далее планируется провести цикл исследований различных поляризационных физических наблюдаемых во многих реакциях с использованием **поляризованных протонного и антипротонного пучков** и различных мишеней, включая поляризованные мишени (*Доклад В.В. Мочалова далее*).



В 2026-2030 годах планируется модернизация экспериментальной установки СПАСЧАРМ и введение в ее состав ряда детекторов :

- ❖ **Прецизионный волоконный пучковый годоскоп.** Рабочая область  $\sim 8.3 \text{ см} * 8.3 \text{ см}$ . Поперечный размер «палочки» 0.86 мм (состоит из двух объединенных колонок волокон по 0.43 мм). Всего 196 каналов электроники (Две плоскости, X и Y по 98 каналов каждая).
- ❖ **Электромагнитный калориметр типа «Шашлык» на 2400 каналов** и рабочей областью  $3.3 \text{ м} * 2.2 \text{ м}$ . Ожидается энергетическое разрешение со стохастическим членом  $\sim 3\%/ \sqrt{E}$  (получено нами на прототипе и опубликовано в нашей работе: [\*NIM A606\(2009\), p.p.432-438\*](#)).
- ❖ Большие дрейфовые камеры ПИЯФ-ИТЭФ (ныне НИЦ КИ – ККТЭФ). Две двухплоскостные камеры уже в составе установки. Еще две камеры на подходе.
- ❖ Разработка и исследование на пучках прототипа **многоканального черенковского детектора на аэрогели** с разделением  $\pi/K$  до 10 ГэВ/с совместно с ИЯФ СО РАН (г.Новосибирск). Прототип **ФАРИЧ** исследован у нас на канале в весеннем сеансе 2026 года.
- ❖ Мюонный детектор (планируется создание в ИФВЭ с основным участием группы Р.М. Фахрутдинова)

## Получены первые спиновые результаты на установке СПАСЧАРМ при 26.5 ГэВ

- ❖  $\pi^+ p \rightarrow \pi^+/\pi^- X$  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. (Это был сеанс 2018 года на поляризованной мишени). Продолжим исследования в этих реакциях уже на новой поляризованной мишени.

### В сеансах 2021 и 2022 годов на ядрах:

- ❖  $\pi^- (K^-) A \rightarrow \Lambda X$  Данные на  $\pi^-$ -пучке указывают на незначительную среднюю ( $\langle P_N \rangle = (4.1 \pm 1.4)\%$ ) поперечную поляризацию гиперонов, за исключением области  $p_T > 1$  ГэВ/с, где поляризация равна  $(23 \pm 9)\%$ . Поляризация  $\Lambda$ -гиперонов на  $K^-$ -пучке, имеющем валентные s-кварки в своем составе, в отличие от данных на  $\pi^-$ -пучке, имеет **значительную среднюю ( $\langle P_N \rangle = (18 \pm 3)\%$ )** положительную величину и растет с увеличением  $x_F$  и  $p_T$ . В области  $p_T > 1$  ГэВ/с  $P_N$  достигает  $(66 \pm 18)\%$ .
- ❖  $\pi^- A \rightarrow \tilde{\Lambda}^+ X$  Данные на  $\pi^-$  пучке указывают на возможную отрицательную поперечную поляризацию  $\tilde{\Lambda}$ -гиперонов в области фрагментации пучка, тогда как для  $\Lambda$ -гиперонов наблюдается положительная поляризация в области  $x_F > 0.2$ . Среднее значение поляризации  $\tilde{\Lambda}$ -гиперонов на  $\pi^-$  пучке в области поперечных импульсов 0.3-1.2 ГэВ/с составило  $(-7.7 \pm 4.2)\%$ . **Впервые получены данные в области больших значений  $x_F$   $0.3 \leq x_F \leq 0.5$ .**

❖ Получены первые указания на ненулевую спиновую выстроенность:

Спиновая выстроенность  $K^*(892)$  на пионном пучке  $0.355 \pm 0.004$  (или  $0.022 \pm 0.004$ ) 5.5-б эффект (ошибки только статистические).

Спиновая выстроенность  $K^*(892)$  на каонном пучке  $0.393 \pm 0.018$  (или  $0.060 \pm 0.018$ ) 3-б эффект (ошибки только статистические).

Анализ набранных данных на ядрах в 2023-2025 годах в этих реакциях продолжится.

Статистики в эти годы набрано в несколько раз больше, чем в сеансах 2021 и 2022 годов.

**Новые экспериментальные результаты в трудной для теоретиков области непертурбативной КХД стимулируют теоретическое осмысление, важны для развития теоретических подходов, поиска новых моделей и возможного создания теории (модели) для описания всех наблюдаемых поляризационных эффектов.**