

**Измерение асимметрии и поляризации
Λ-гиперона в эксперименте СПАСЧАРМ
(ИВФЭ, Протвино)**

Эксперимент СПАСЧАРМ (ИФВЭ, У-70)

**Изучение Спиновых АСимметрий
в образовании легких резонансов и ЧАРМония на
ускорителе У-70**

**НИЦ КИ – ИФВЭ, НИЦ КИ – ПИЯФ,
НИЦ КИ – ИТЭФ, ОИЯИ, МИФИ**

Участники от ПИЯФ

В.А. Андреев, А.Б. Гриднев, Н.Г. Козленко, Д.В. Новинский,

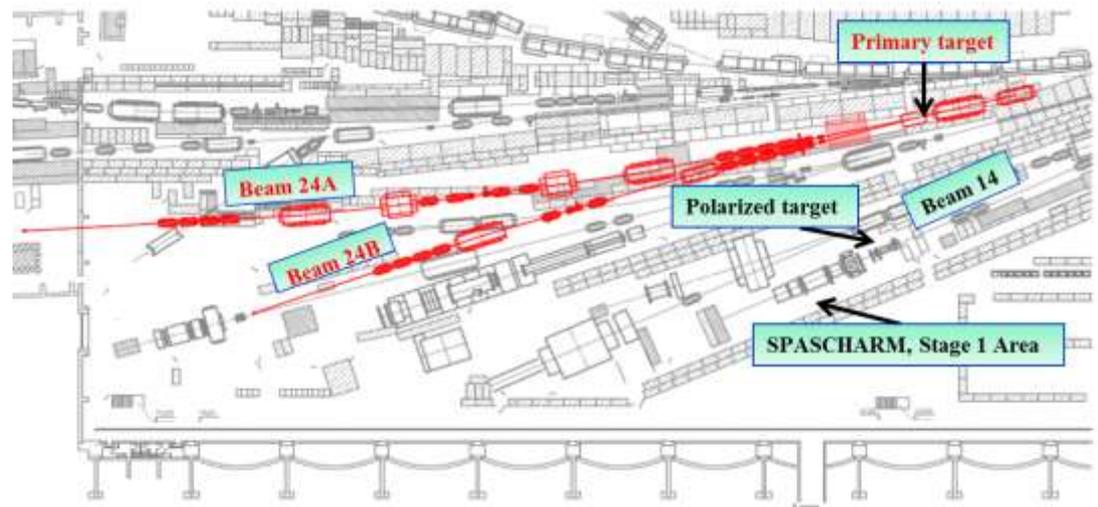
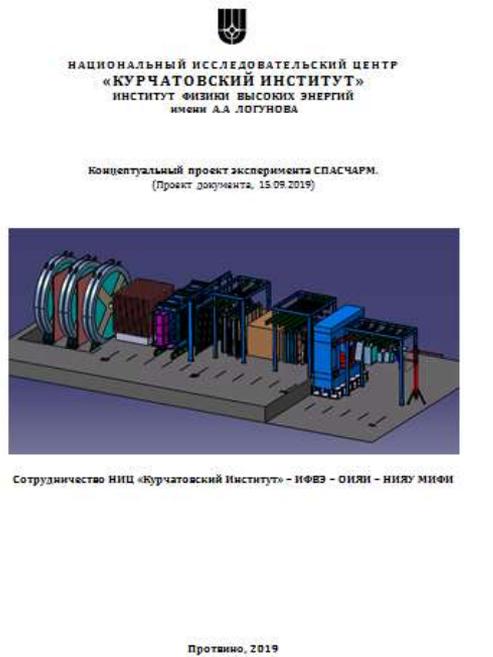
В.И. Тараканов, В.С. Темирбулатов

Стратегия эксперимента СПАСЧАРМ

➤ **Этап 1.** Действующий эксперимент на канале 14

ПРОЗА (ПРОЗА-М) → СПАСЧАРМ

➤ **Этап 2.** Создание пучка поляризованных протонов и антипротонов
(в будущем, канал 24)



Статус эксперимента (ноябрь-декабрь 2021)

- A_N measurements in charged pion, K^0 and $\omega(782)$ production with polarized target
- **were destroyed due to COVID-19 limitations in Moscow region and JINR**
- **New program:**
- **Precise study of Dilution factor**
- **A-dependence of vector-mesons and Λ -hyperon production**
(C, Si, Al, Cu, Sn, Pb, W)
- **Spin density matrix of vector mesons (ω)**
- **Λ -hyperon polarization**

Планируемая статистика

Задачи СПАСЧАРМ на канале 14 в целом (инклюзив)

<i>Final state</i>	N_{EVENTS}	<i>Final state</i>	N_{EVENTS}
π^+	$4.2 \cdot 10^9$	K^+	$6.7 \cdot 10^8$
π^-	$8.7 \cdot 10^9$	K^-	$9.0 \cdot 10^8$
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$4.3 \cdot 10^9$	p	$9.2 \cdot 10^7$
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$4.3 \cdot 10^9$	\tilde{p}	$2.6 \cdot 10^8$
$\eta \rightarrow \gamma\gamma$	$4.2 \cdot 10^8$	$K^{0*}(892) \rightarrow K^+ \pi^-$	$1.1 \cdot 10^8$
$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	$8.3 \cdot 10^5$	$\tilde{K}^{0*}(892) \rightarrow K^- \pi^+$	$4.3 \cdot 10^7$
$K^0_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$1.3 \cdot 10^7$	$K^{+*}(892) \rightarrow K^+ \pi^0$	$1.9 \cdot 10^7$
$\rho^0(770) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$4.2 \cdot 10^8$	$\tilde{K}^{-*}(892) \rightarrow K^- \pi^0$	$3.8 \cdot 10^7$
$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$5.3 \cdot 10^6$	$\phi(1020) \rightarrow K^+ K^-$	$4.3 \cdot 10^6$
$\omega(782) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$3.5 \cdot 10^7$	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$	$1.4 \cdot 10^6$
$\omega(782) \rightarrow \gamma \pi^0$	$3.8 \cdot 10^7$	$\tilde{\Lambda} \rightarrow \tilde{p} \pi^+$	$1.1 \cdot 10^6$
$\rho^+(770) \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$2.9 \cdot 10^8$	$\Delta^{++} \rightarrow p \pi^+$	$9.3 \cdot 10^6$
$\rho^-(770) \rightarrow \pi^- \pi^0$	$7.5 \cdot 10^8$	$\Delta^{--} \rightarrow \tilde{p} \pi^-$	$2.5 \cdot 10^7$
$K^0_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$1.7 \cdot 10^7$	$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$	$1.9 \cdot 10^6$
$a_0(980) \rightarrow \eta \pi^0$	$1.8 \cdot 10^7$	$\tilde{\Xi}^+ \rightarrow \tilde{\Lambda} \pi^+$	$1.6 \cdot 10^6$
$\omega(782) \rightarrow e^+ e^-$	$1.7 \cdot 10^5$	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$	$1.2 \cdot 10^6$
		$\Sigma^0(1385) \rightarrow \Lambda \pi^0$	$3.9 \cdot 10^6$

Ожидаемые результаты исследований

- **Разнообразие типов пучков, конечных состояний и наличие нескольких измеряемых односпиновых наблюдаемых позволяют провести глобальное исследование.**
- **Анализ этих данных дает возможность выявить закономерности поведения односпиновых наблюдаемых от аромата участвующих в реакции кварков, спиновой структуры адронов, содержащих эти кварки и кинематических переменных.**
- **Сравнение с моделями (Сиверса и Коллинза, вклада высших твистов, Абрамова, хромомагнитной струны – Рыскин, вращения партонов и т.д.) всей совокупности данных может позволить сделать важный шаг в определении механизма поляризационных явлений.**

Модель ХПК (В.В. Абрамов, ИФВЭ)

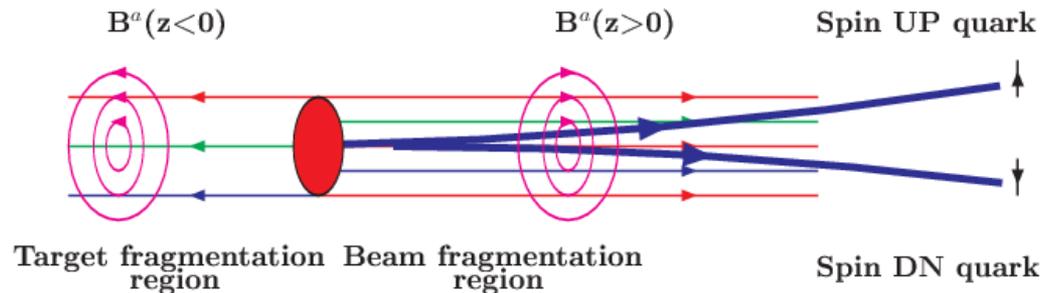
Спин является фундаментальной квантовой характеристикой частиц и мощным инструментом для их исследования.

$A \uparrow + B \rightarrow C + X$ (односпиновая асимметрия, $A_N(p_T, x_F, \sqrt{s})$).

$A + B \rightarrow C \uparrow + X$ (поляризация частицы «С», $P_N(p_T, x_F, \sqrt{s})$).

В т.в. КХД односпиновые эффекты малы: $A_N \approx \alpha_s m_Q / E_Q \leq 1\%$.

Предлагается новый квазиклассический механизм для односпиновых процессов, который основан на взаимодействии массивных составляющих кварков с эффективным хромомагнитным полем глюонных струн. **Прецессия спина кварка в цветовом поле приводит к осцилляции поляризации адронов в зависимости от кинематических переменных.**

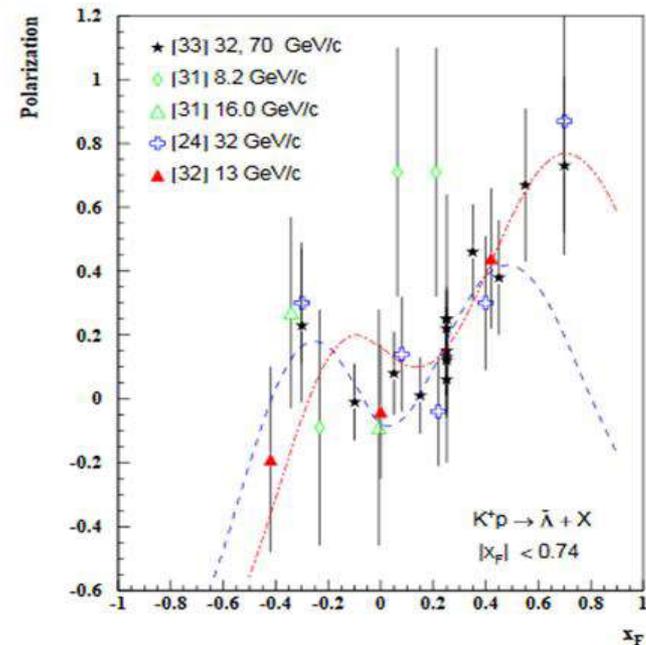
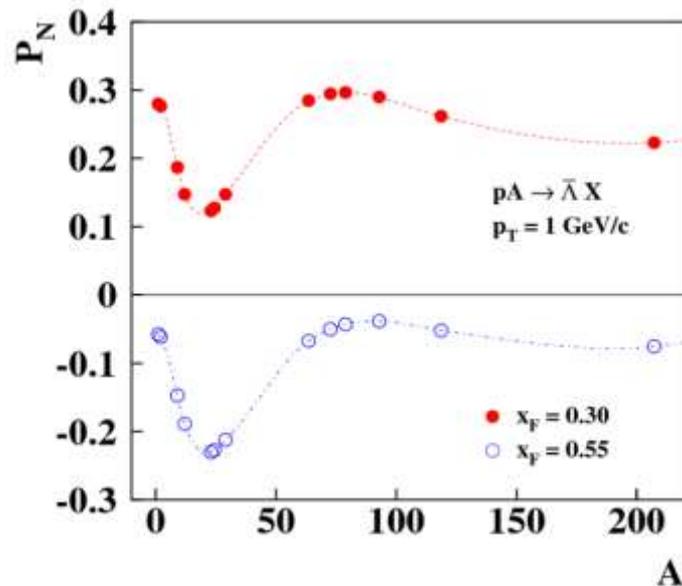


Механизм хромомагнитной поляризации кварков (микроскопический аппарат Штерна-Герлаха). Кварк-пробник отклоняется влево или вправо в неоднородном поле V^a

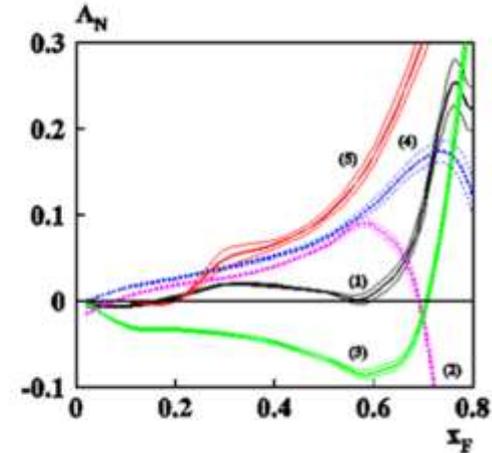
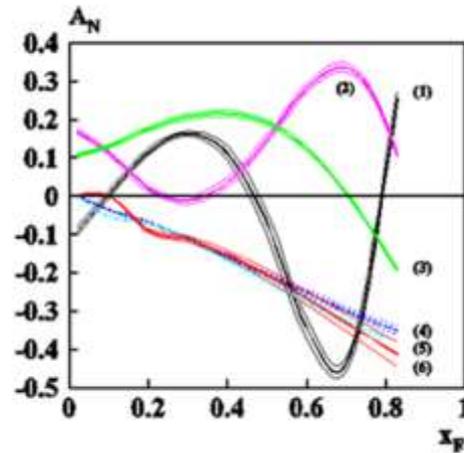
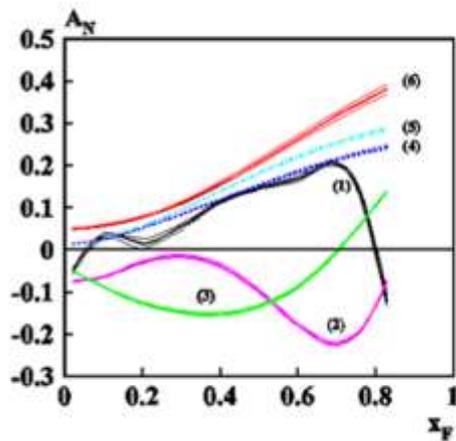
Модель ХПК (В.В. Абрамов, ИФВЭ)

Предсказывается осциляция P_N и A_N как результат прецессии спина составляющего кварка в хромагнитном поле КХД струн.

Частота осциляции ω_A описывается правилами кваркового счета и растет по абсолютной величине при увеличении энергии \sqrt{s} и атомного веса сталкивающихся ядер.

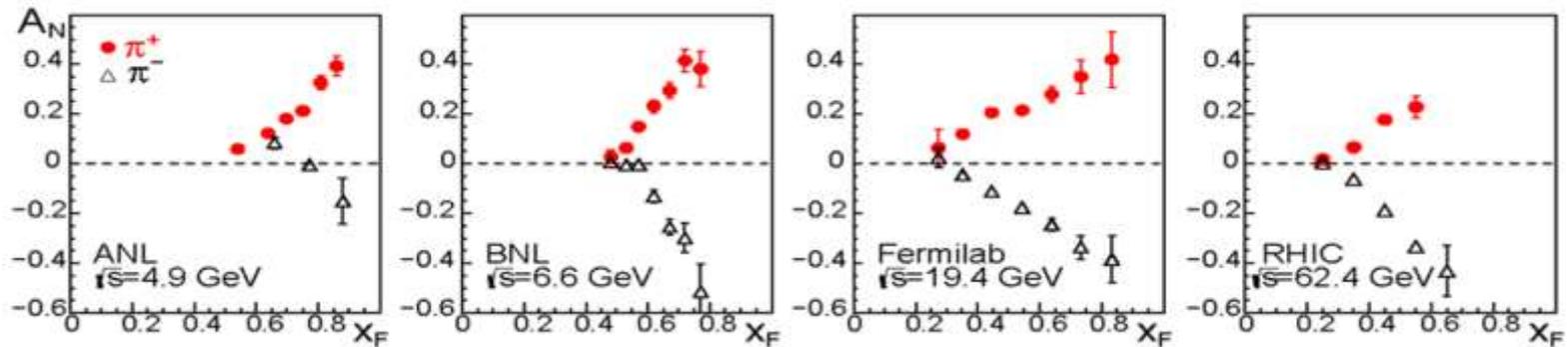


Сравнение предсказаний



- Предсказания асимметрии для реакций
- $p \uparrow + p(A) \rightarrow \pi^+ + X$ (слева),
- $p \uparrow + p(A) \rightarrow \pi^- + X$ (в центре)
- и $p \uparrow + p(A) \rightarrow \pi^0 + X$ (справа)

Мотивация проведения исследований



Асимметрия инклюзивного образования практически не зависит от энергии

На первое место в поляризационных исследованиях уже выходит не энергия, а систематическое исследование и анализ данных большого числа различных реакций.

Формула вычисления односпиновой асимметрии

Односпиновая асимметрия определяется как

$$A_N^H(x_f, p_t) = \frac{1}{P_{target}} \frac{1}{\langle \cos\phi \rangle} \cdot \frac{\sigma_{\uparrow}^H(x_f, p_t) - \sigma_{\downarrow}^H(x_f, p_t)}{\sigma_{\uparrow}^H(x_f, p_t) + \sigma_{\downarrow}^H(x_f, p_t)}$$

P_{target} – средняя поляризация мишени;

ϕ – азимутальный угол;

(При малых углах ϕ считается, что все вторичные частицы вылетают под азимутальным углом 0°).

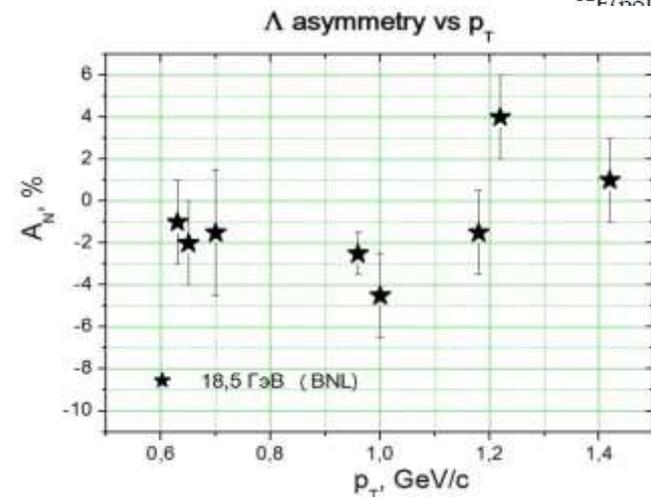
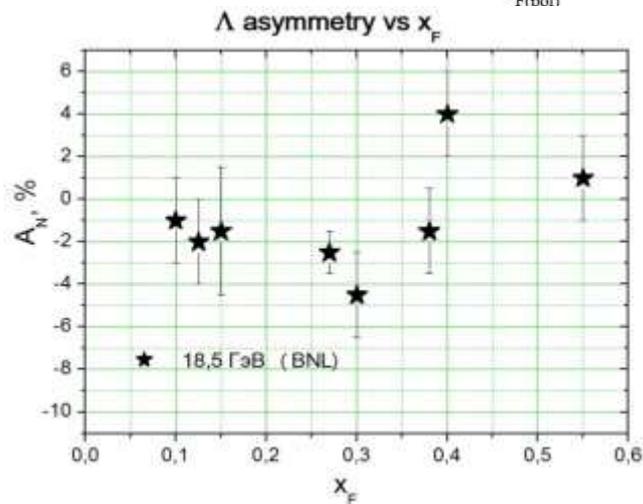
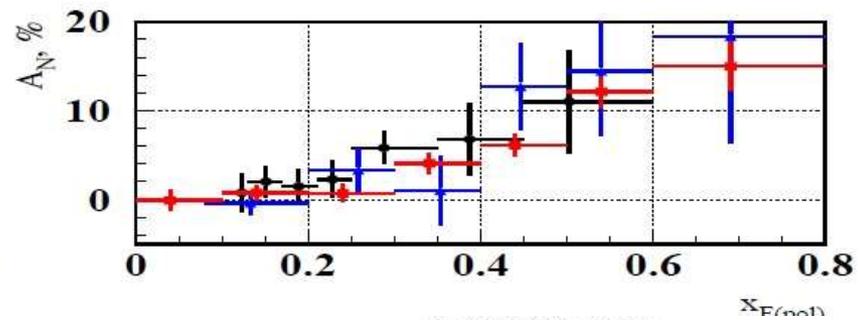
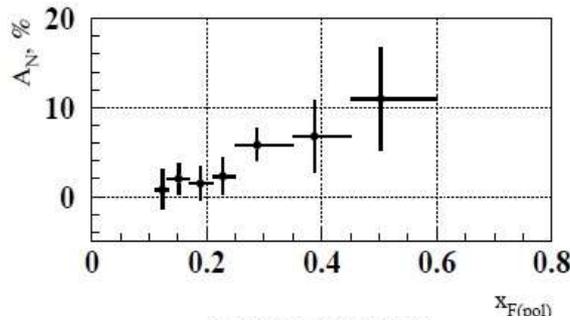
Измеряемая асимметрия

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

D - фактор разбавления мишени (отношение числа взаимодействий на всей мишени к числу взаимодействий на водороде)

Исследование односпиновой асимметрии

A_N в реакции инклюзивного рождения π^0 и Λ -гиперона:

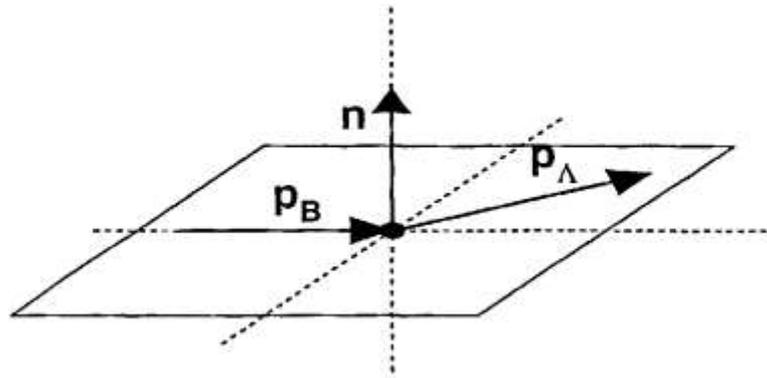


В промежуточной области согласно механизму подобия $A_N(\Lambda)$ напоминает π^0 -асимметрию (Нурушев и др.). Более точные данные необходимы для проверки таких утверждений.

Интерес к проблеме

- Зависимость от кинематики.
- Зависимость от типа частиц пучка и мишени, особенно в области фрагментации.
- Измерение поляризации гиперонов возможно благодаря наличию слабого распада, происходящего с нарушением пространственной четности

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

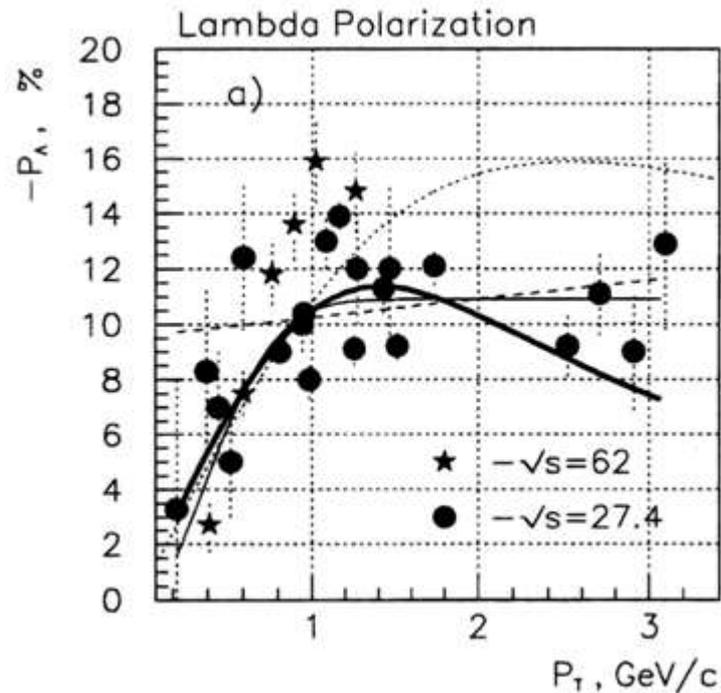


$$P_\Lambda = f_1(s) \cdot f_2(p_T) \cdot f_3(x_F)$$

Зависимость поляризации гиперона от p_T

$$P \sim |F_{sf}| / |F_{nf}|$$

- Амплитуда с переворотом спина F_{sf} должна уменьшаться при $p_T \rightarrow 0$ как p_T , согласно сохранению полного углового момента, в то время как такого ограничения не существует для амплитуды без переворота спина F_{nf}

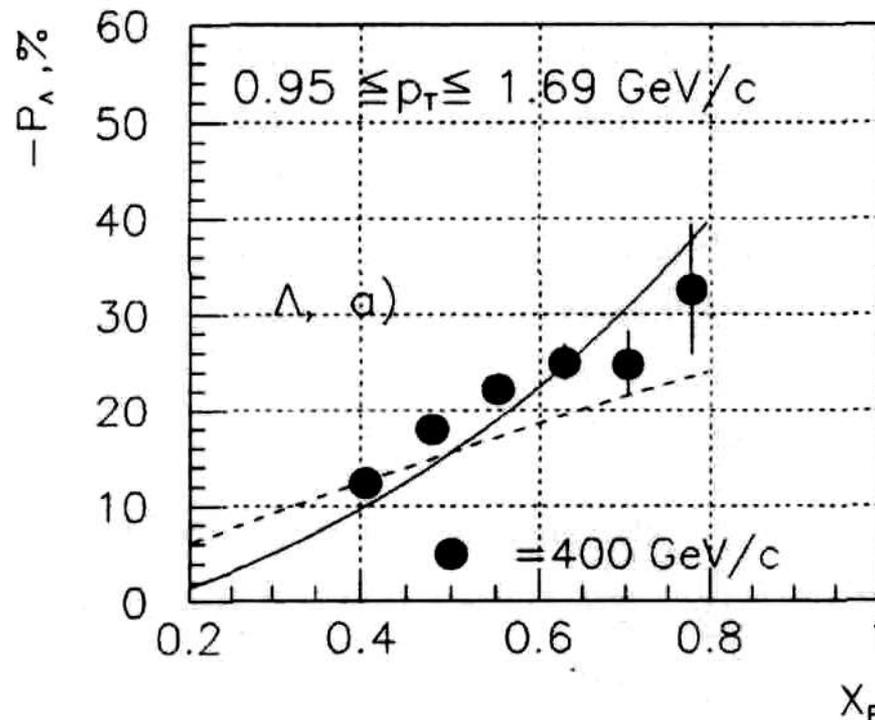


Исследование поляризации гиперонов

Зависимость поляризации гиперона от x_F

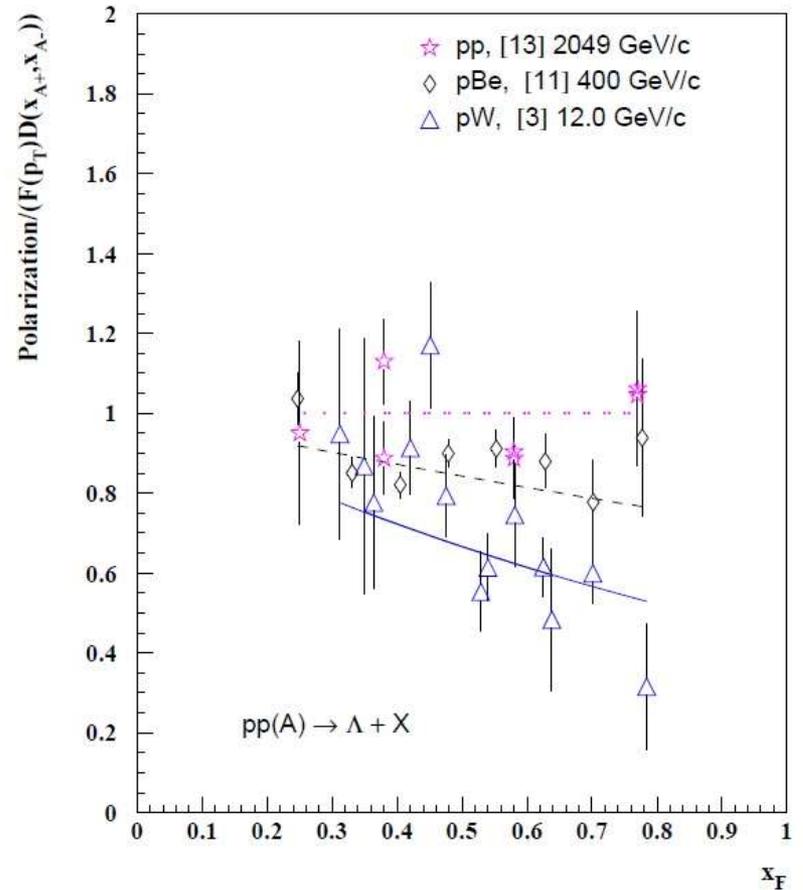
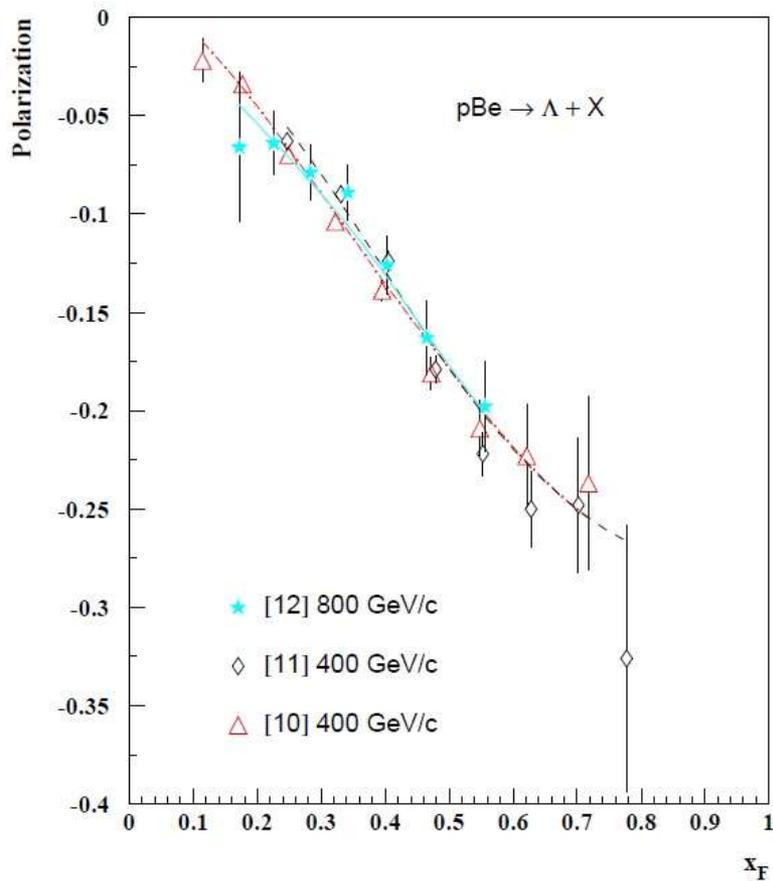
$$P_{\Lambda} = -A \cdot (x_F, p_T) \cdot p_T, \quad A(x_F, p_T) = f(x_F) \cdot g(x_F, p_T)$$

- предсказывается почти линейная зависимость поляризации Λ -гиперонов от x_F с небольшими поправками на более высокие степени x_F и p_T

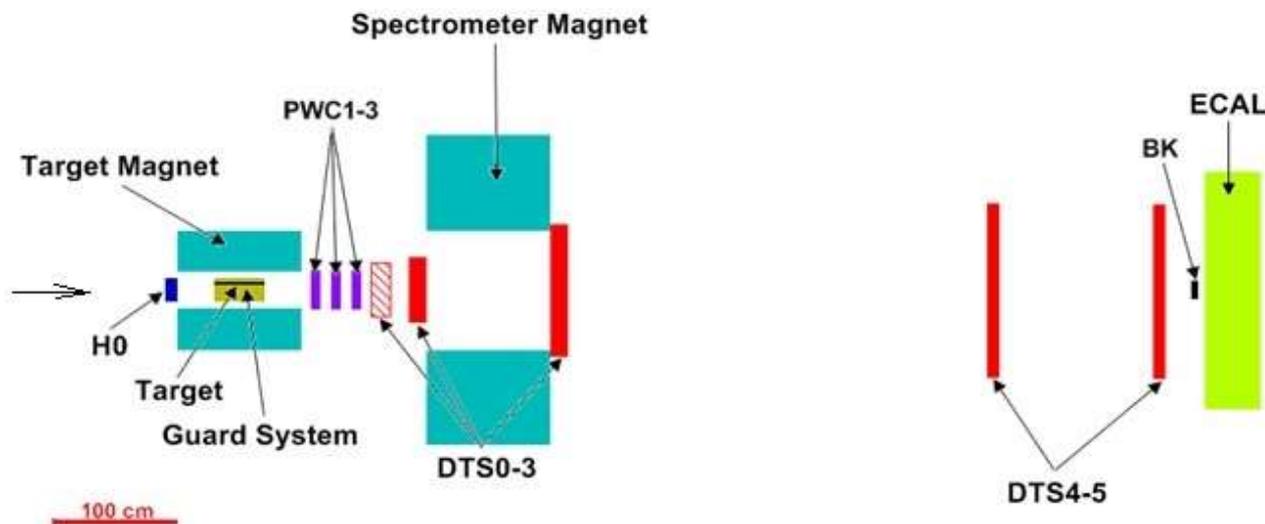


Исследование поляризации гиперона от А

■ Сравнение с моделью ХПК (Абрамов)



Установка СПАСЧАРМ



Пучковая аппаратура, в т.ч. волоконный годоскоп (H0).

Комплекс поляризованный мишени, включая магнит «Динозавр» и охранную систему для эксклюзивных реакций (Guard System).

Широко-апертурный спектрометрический магнит СПАСЧАРМ.

Трековая система, включая **6 плоскостей проп.камер** (PWC1-3), – DT - 18 ($\uparrow 30$) плоскостей до магнита и 27 плоскостей после магнита
Электромагнитный калориметр ЧСПП-720 из свинцового стекла.

Пучковая аппаратура

Состав пучка ($3 \cdot 10^6$ част./с, 28 ГэВ):

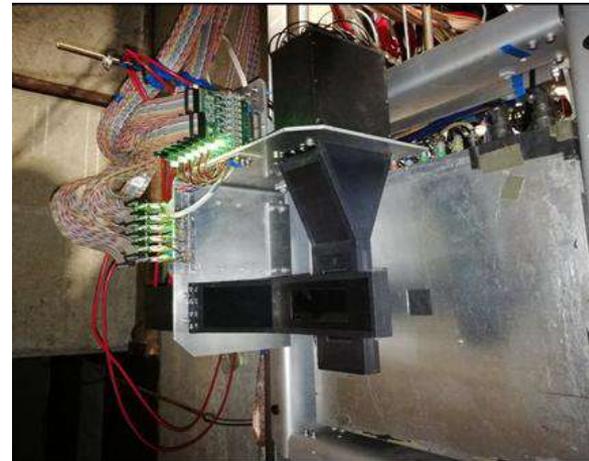
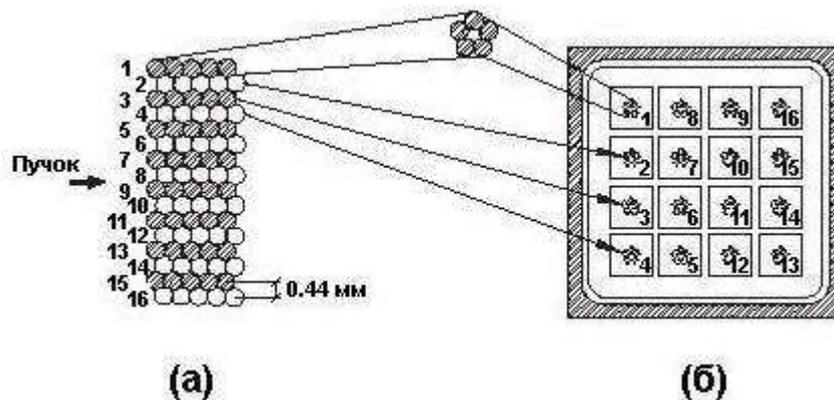
97.5% π^- , 1.45% K^- , 0.22% \bar{p} .

Пучковая аппаратура:

пороговые черенковские счетчики $\check{C}1$ - $\check{C}3$

- π^- любые два из $\check{C}1$ - $\check{C}3$;
- K^- $\check{C}1 \cdot \check{C}2 \cdot \check{C}3$
- \bar{p} $\bar{\check{C}}1 \cdot \bar{\check{C}}2 \cdot \bar{\check{C}}3$

Волоконный годоскоп с разрешением **125 мкм** :



Поляризованная мишень



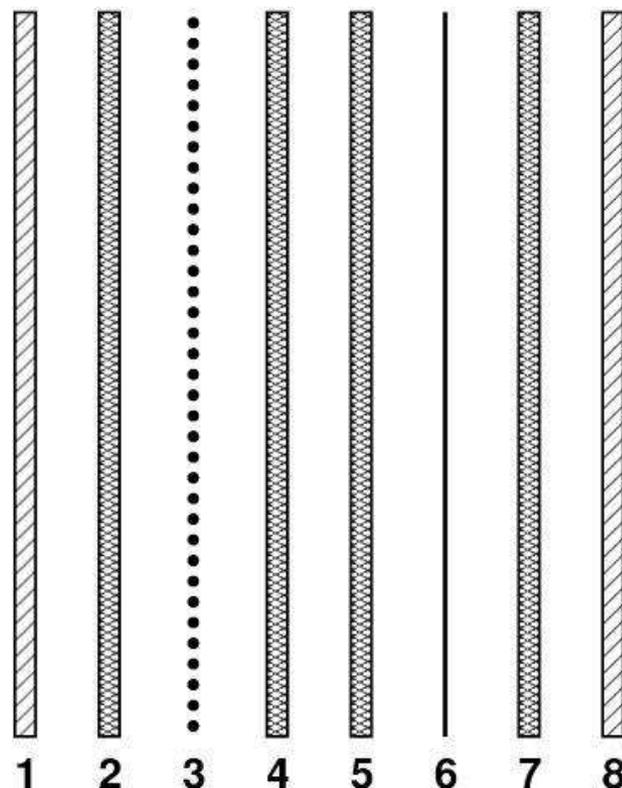
- ***Target material:*** pentanol $C_5H_{12}O$ with TEMPO radical
- ***Polarization value:*** up to **75%**
- ***Dilution factor*** **7.3**
- ***Target dimensions:*** length **200 mm**, diameter **18 mm**
- ***Target thickness:*** **13.2 g/cm²** which is **~10% of interaction length** for 28 GeV pions and **~15%** - for 50 GeV protons

Polarized target operates at extremely low temperature achieved by dilution of He₃ in He₄:

- ***The RF-pumping*** of polarization takes place in **2.4 T** magnetic field at RF-frequency of **~70 GHz** at the temperature of **~ 100 mK**
- ***Polarization decay time is*** **~1000-2000 hours** in **0.4 T** magnetic field at the temperature of **30-40 mK**- ***Polarization reversal:*** every 1-2 days

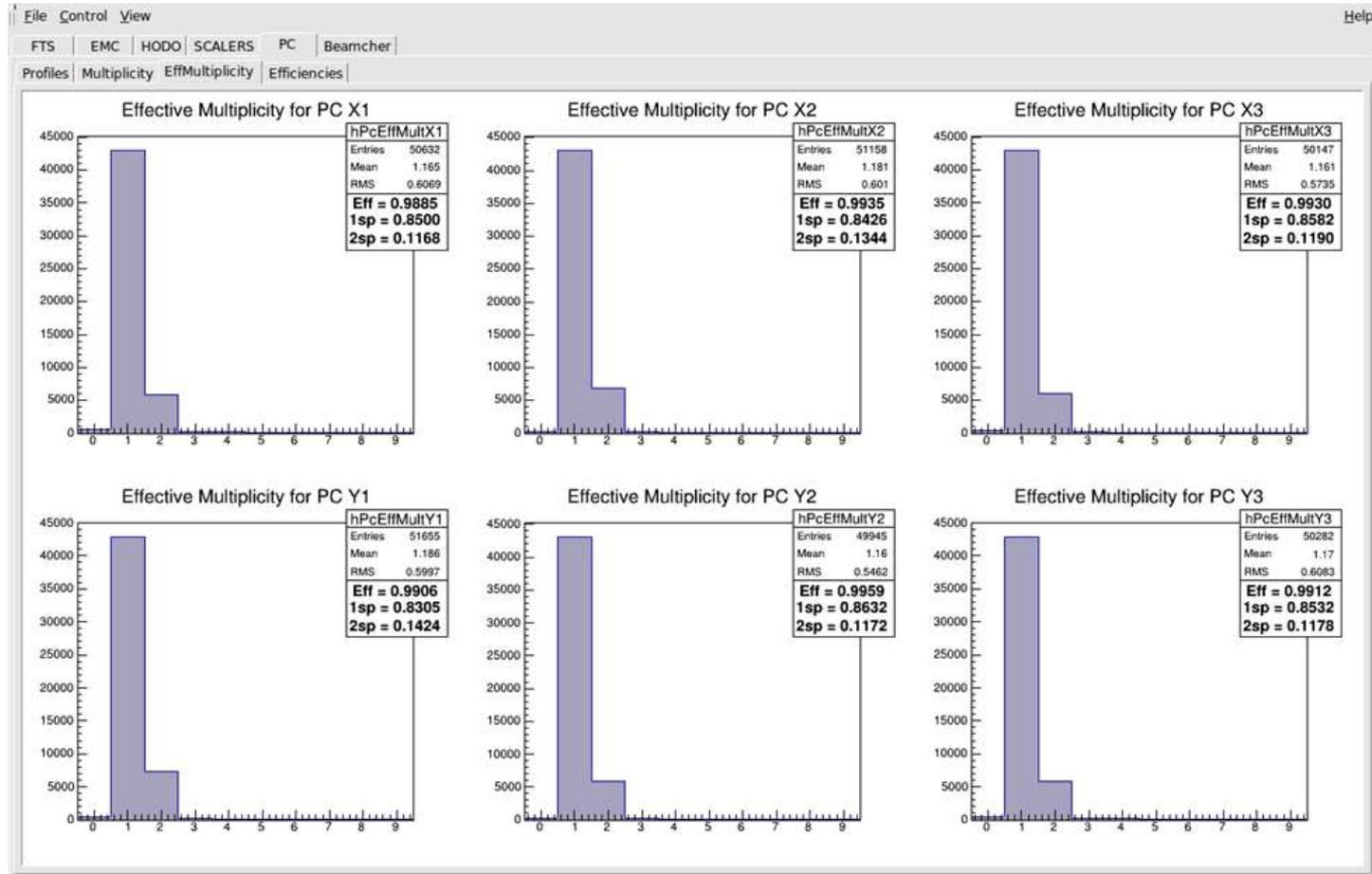


Трековая система, пропкмеры



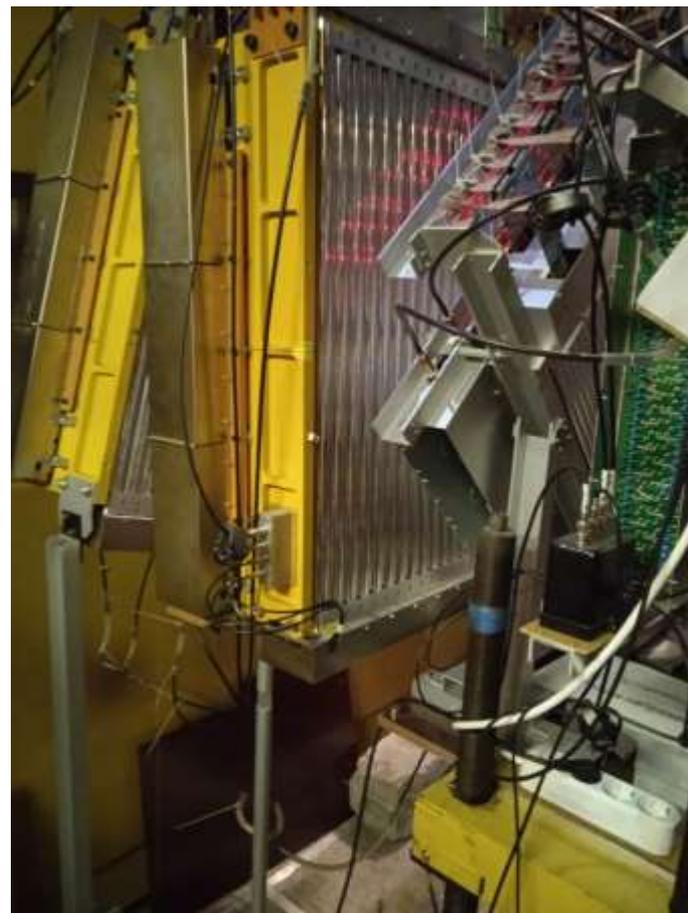
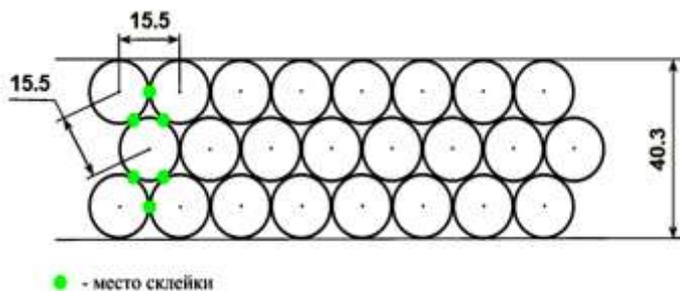
3, 6 — плоскости сигнальных проволочек,
2, 4, 5, 7 — высоковольтные электроды,
1, 8 — майларовые окна, ограничивающие газовый объем.

Пропкамеры, эффективность



Экспериментальная установка (I этап)

Трековая система. Спектрометрический магнит.

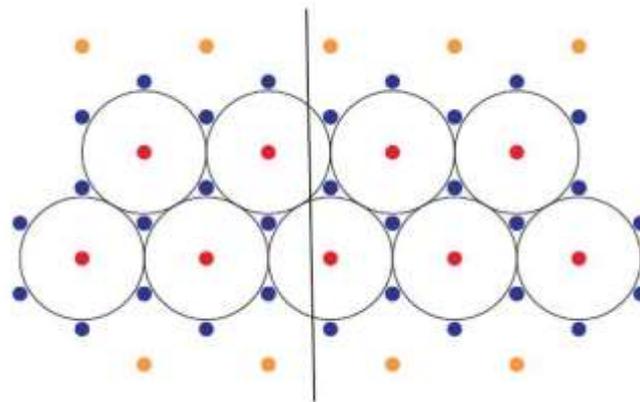


Drift Chamber

- ✧ Точность позиции горизонтали 30 мкм
- ✧ Точность позиции по вертикали 60 мкм
- ✧ Усредненная точность 32 мкм
- ✧ Размер рабочей области ~ 1,2*2,4 м²

- ✧ Гексагональная структура ДК
- ✧ Радиус ячейки 10 мм
- ✧ Расстояние между сигнальными проволочками ~ 17 мм

**Разрешение ~ 0,2 мм
(ИТЭФ, Бонн)**



Экспериментальная установка

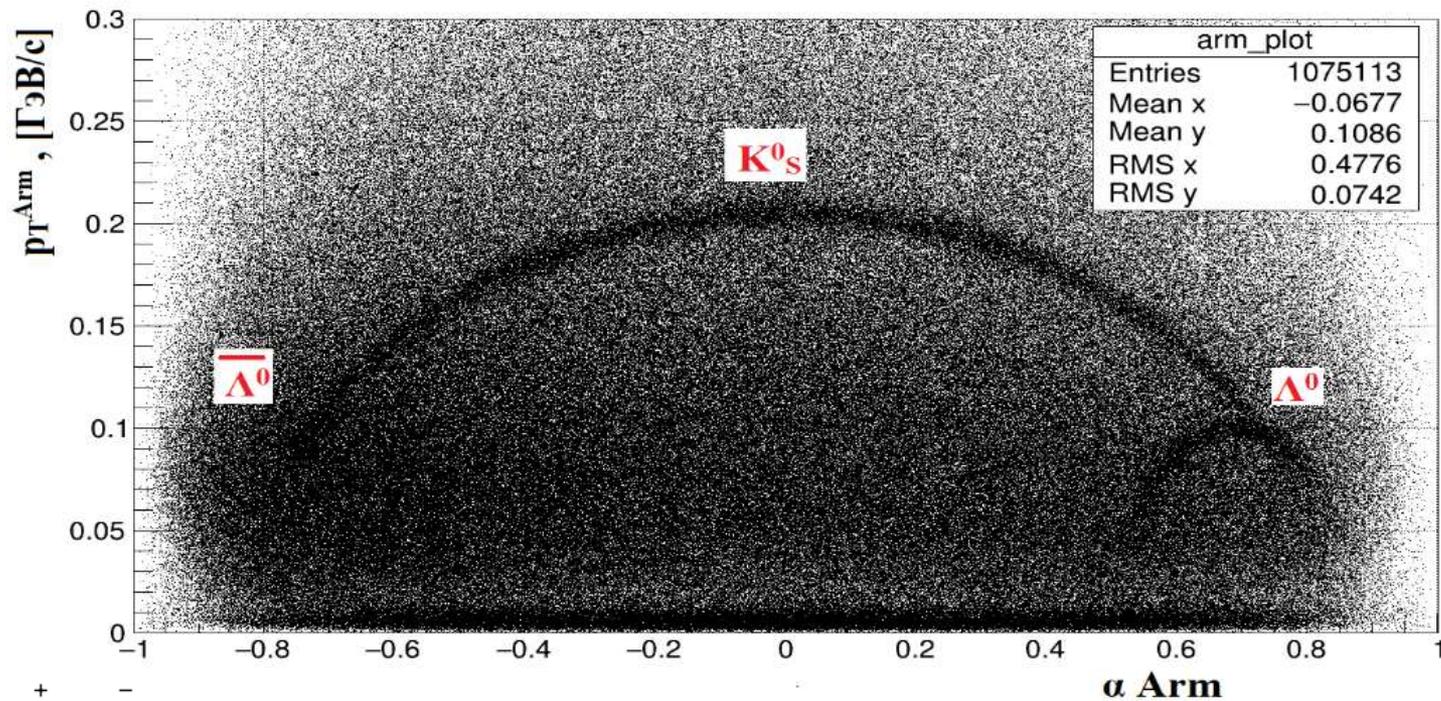
Expected statistics and accuracy

GeV/c	$0 < p_Z \leq 4.0$	$4.0 < p_Z \leq 8.0$	$8.0 < p_Z \leq 12.0$	$12.0 < p_Z \leq 16.0$	$p_Z > 16.0$
$0 < p_T \leq 0.25$	$6.6 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^6$	$5.0 \cdot 10^5$	$9.3 \cdot 10^4$	$3.2 \cdot 10^4$
$0.25 < p_T \leq 0.5$	$3.0 \cdot 10^5$	$2.4 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$
$0.5 < p_T \leq 1.0$	$3.0 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$	$4.6 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^5$
$p_T > 1.0$	-	$4.9 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^4$

GeV/c	$0 < p_Z \leq 4.0$	$4.0 < p_Z \leq 8.0$	$8.0 < p_Z \leq 12.0$	$12.0 < p_Z \leq 16.0$	$p_Z > 16.0$
$0 < p_T \leq 0.25$	0.016	0.01	0.018	0.043	0.073
$0.25 < p_T \leq 0.5$	0.024	0.008	0.012	0.024	0.039
$0.5 < p_T \leq 1.0$	0.237	0.013	0.011	0.019	0.033
$p_T > 1.0$	-	0.186	0.039	0.039	0.058

Кинематический анализ

Критерий Арментероса-Подольянского, $\pi^- p \rightarrow \Lambda^0(\pi^- p) K^0_s(\pi^+\pi^-)$



$$\alpha = \frac{p_L^+ - p_L^-}{p_L^+ + p_L^-}$$

Методика определения V^0 -событий:

The Z-coordinate of the secondary vertex = 7,9 cm from the primary vertex

Distance between h+ and h- tracks < 0.6 cm

The criterion of Armenteros-Podolyansky

Планируемые статьи на 2022-2023 гг.

- **1. Выстроенность (spin alignment) и инвариантные сечения $\rho(770)$ - и $\omega(782)$ - мезонов в инклюзивном образовании при взаимодействии пионов и каонов с энергией 28 ГэВ с ядрами.**
- **2. Поляризация и инвариантные сечения Λ -гиперонов в области фрагментации пучка пионов и каонов с энергией 28 ГэВ при взаимодействии с ядрами.**
- **3. A -зависимость инвариантных сечений инклюзивно образованных K_s - мезонов на пучках пионов и каонов с энергией 28 ГэВ.**
- **4. A -зависимость инвариантных сечений инклюзивно образованных π^+ , π^- и π^0 -мезонов на пучках пионов, каонов и антипротонов с энергией 28 ГэВ.**
- **5. Экспериментальная установка СПАСЧАРМ для исследования спиновых эффектов во взаимодействии адронов при энергиях У-70.**

Выводы и планы

- В ИФВЭ на канале №14 синхротрона У-70 выполняется эксперимент по систематическому исследованию поляризационных явлений сильного взаимодействия в двух десятках реакций в широкой кинематической области.
- За 2 физические экспозиции набрано около 2 млрд. соб.
- Первые месяцы 2022 г. – испытания ДК и их перевозка в Протвино.
- Участие в наборе данных, моделирование и анализ в реакции рождения Λ
- (Темирбулатов В.С., диссертация,

Спасибо за внимание!