



Передача спина лямбда гиперону в эксперименте HERMES

D. VERETENNIKOV

Содержание доклада

- Введение. Спиновый кризис
- Мировые данные по передаче спина Λ гиперону от продольно-поляризованного лептонного пучка
- Описание эксперимента HERMES
- Восстановление Λ событий
- Метод вычисления вектора передачи спина для продольно-поляризованного пучка
- Результаты
- Выводы

Спиновый кризис

Спин протона (барионов) $S_z = \frac{1}{2} \Delta\Sigma = \frac{1}{2} \Delta\Sigma_q + \Delta G + J_q + J_g$

quarks *gluons* *orbital motion*

Constituent quark model (Naïve CQM)

$\Delta\Sigma = \Delta\Sigma_q = 1$, спин определяется только кварками,
эксперимент- магнитные моменты барионов хорошо воспроизводятся CQM

EMC (1988) эксперимент, глубоко неупругое рассеяние ГНР (DIS) поляризованных мюонов на поляризованной мишени (DIS «не видит глюонов»)

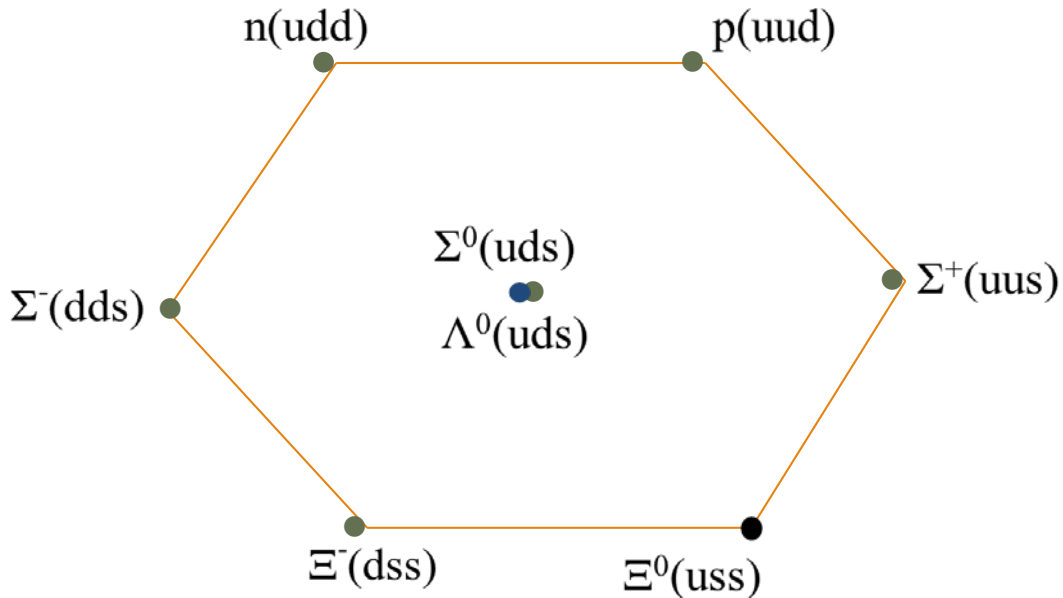
$$\Delta\Sigma_q = 0.12 \pm 0.09 \pm 0.14 \neq 1 !!!$$

Современные данные: HERMES и COMPASS эксперименты в очень хорошем согласии дают

$$\Delta\Sigma_q = 0.330 \pm 0.025_{exp} \pm 0.011_{theo} \pm 0.028_{evol} \text{ (HERMES)}$$

Λ гиперон

ΔΣ инвариант SU(3)



Naïve CQM модель

$$\Delta\Sigma=1 \quad \Delta u=\Delta d=0, \Delta s=1$$

Lattice-QCD расчет

$$\Delta\Sigma=0.64 \quad \Delta u=\Delta d=-0.02, \Delta s=0.68 (\pm 0.04)$$

Используя экспериментальные данные для протона и **SU(3)**

$\Delta\Sigma=0.33$	Δu	Δd	Δs
p(uud)	0.84	-0.43	-0.09
n(udd)	-0.43	0.84	-0.09
Λ ⁰ (uds)	-0.16	-0.16	0.64
Σ ⁺ (uus)	0.84	-0.09	-0.43
Σ ⁰ (uds)	0.375	0.375	-0.43
Σ ⁻ (dds)	-0.09	0.84	-0.43
Ξ ⁰ (uss)	-0.43	-0.09	0.84
Ξ ⁻ (dss)	-0.09	-0.43	0.84

Поляризованный распад Λ гиперона

- Распад Λ^0 “само-анализирующий”, так как происходит с нарушением четности: $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$, приводящим к асимметрии вылета продуктов распада по и против спина Λ

- Угловое распределение протонов от распада Λ^0 (в ее системе покоя):

$$\frac{dN}{d\Omega_p} = \frac{1}{4\pi} (1 + \alpha \vec{P}_\Lambda \vec{k}_p)$$

$$\alpha = 0.642 \text{ for } \Lambda$$

$$\alpha = -0.642 \text{ for } \bar{\Lambda}$$

- \vec{k}_p единичный вектор в направлении импульса протона в системе покоя Λ и \vec{P}_Λ ее поляризация.
- Измеряя асимметрию в угловом распределении протонов (пионов) можно извлечь поляризацию Λ гиперона

Коэффициент продольной передачи поляризации в ГНР

$$\vec{e} + N \rightarrow e' + \vec{\Lambda} + X$$

Кинематические переменные ГНР

$$Q^2 = (k_e - k_{e'})^2, \quad \nu = E_e - E_{e'}$$

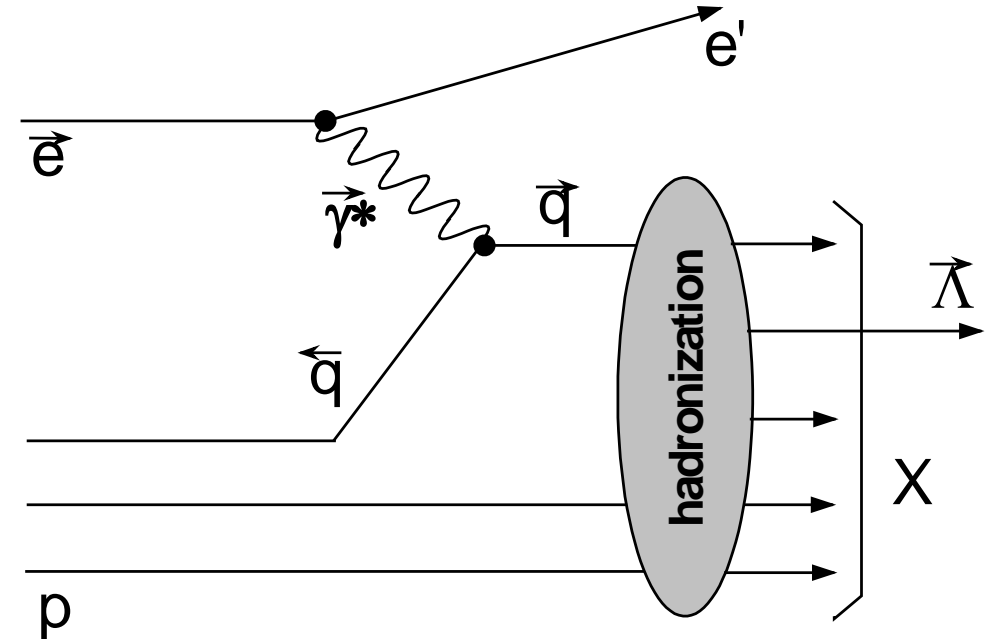
$$x = \frac{Q^2}{2M\nu}, \quad y = \frac{\nu}{E_e}, \quad z = \frac{E_\Lambda}{\nu}$$

$$P_i^\Lambda = P_B D_i(y) \mathbf{D}_{Li} \quad i = (x, y, z)$$

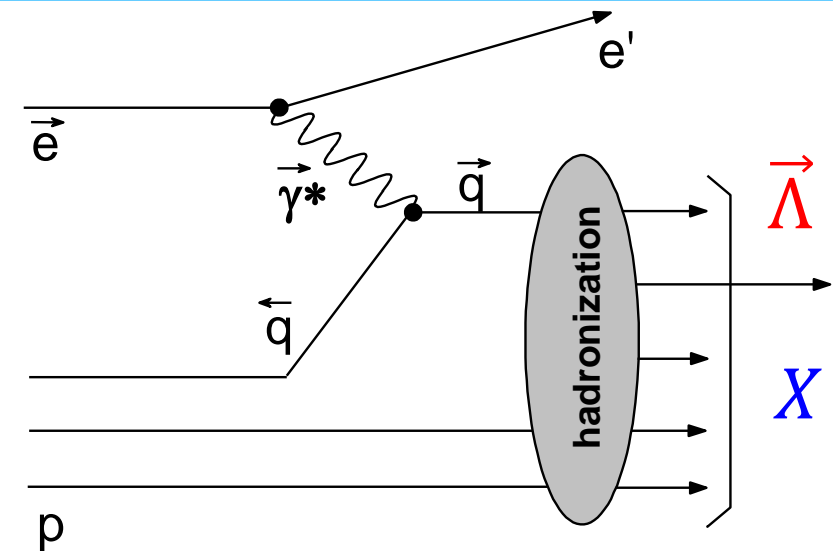
\mathbf{D}_{Li} - коэффициент передачи поляризации от фотона к Λ гиперону,

$D_i(y)$ - деполяризационный фактор

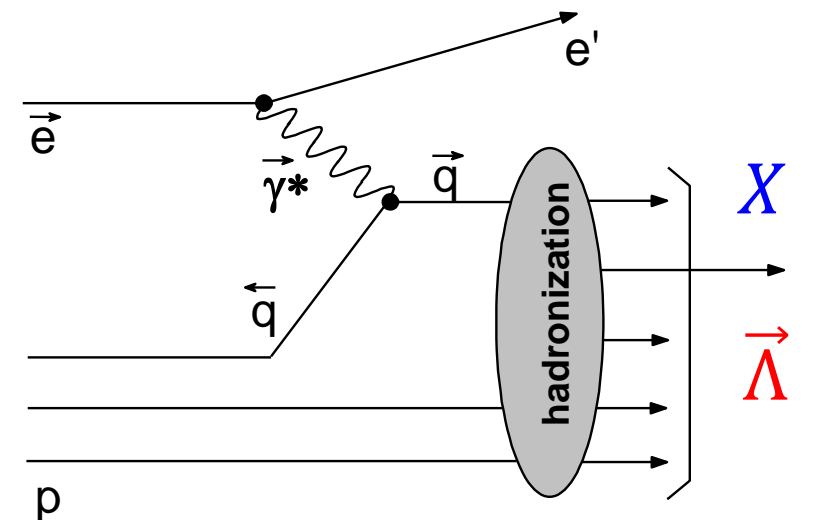
D_{Li} определен в системе покоя Λ , где поляризация \vec{P}_Λ 3-х мерный вектор, где временная компонента отсутствует, т.е. \mathbf{D}_{Li} тоже 3-х мерный вектор



Механизмы образования Λ гиперона



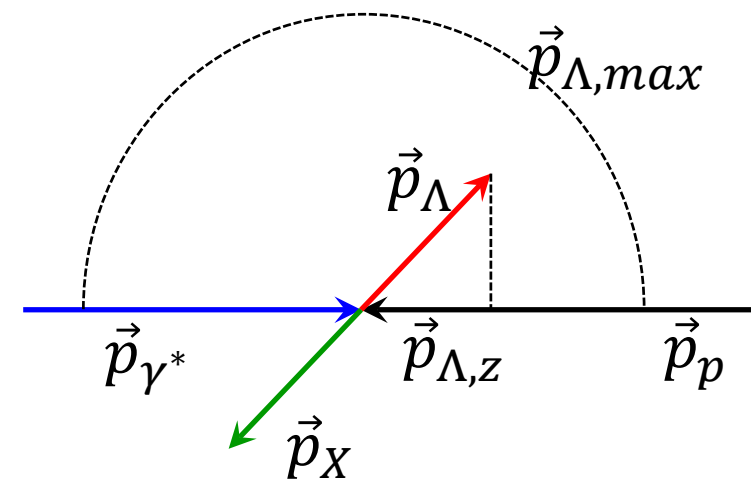
Токовая
фрагментация,
 Λ содержит
выбитый кварк
 $x_F > 0$



Фрагментация
мишени, Λ
содержит
остаточный
дикварк мишени
 $x_F < 0$

В с.ц.м. системе фотон-протон

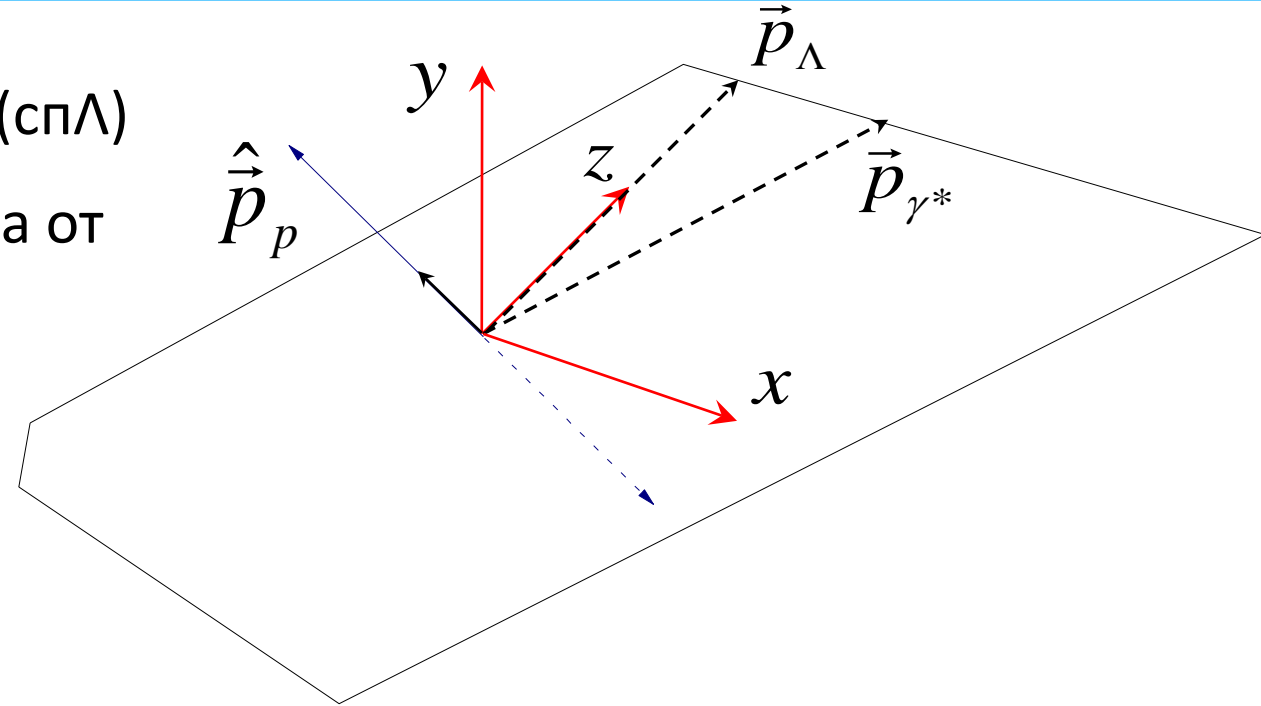
$$x_F = \frac{\vec{p}_{\Lambda,z}}{\vec{p}_{\Lambda,max}} \quad -1 < x_F < 1$$



- $x_F > 0$, \vec{p}_{Λ} направлен в ту же сторону куда и \vec{p}_{γ^*}
- $x_F < 0$, \vec{p}_{Λ} направлен в противоположную сторону от \vec{p}_{γ^*}

Системы координат рождения Λ гиперона в ГНР

- Вектор D_{Li} определен в системе покоя Λ (сп Λ)
- Импульсы виртуального фотона и протона от распада Λ транслируются в эту систему
- Импульс Λ в сп Λ равен 0, но его (след) направление сохраняется
- **Λ Production plane** - плоскость рождения задана векторами импульсов фотона и Λ
- Система координат:
 - Z вдоль импульса Λ
 - Z \rightarrow Z', вдоль импульса фотона



$$D_{LY} = 0 \leftarrow \text{сохранение четности}$$

При этом поперечная поляризация (не связанная с поляризацией пучка) не запрещается

Коэффициент передачи поляризации

Компоненты поляризации Λ гиперона могут быть расписаны как:

$$P_X^\Lambda = -P_B D_X(y) \left\{ \frac{M \sum_q e_q^2 x f_1^q(x) H_1^q(z)}{Q \sum_q e_q^2 x f_1^q(x) D_1^q(z)} + \frac{M^\Lambda \sum_q e_q^2 x f_1^q(x) \tilde{G}_1^q(z)/z}{Q \sum_q e_q^2 x f_1^q(x) D_1^q(z)} \right\} = -P_B D_X(y) D_{LX}(x, z)$$

$$P_Y^\Lambda = D_Y(y) \frac{M \sum_q e_q^2 x f_1^q(x) D_{1T}^{\perp(1)q}(z)}{Q \sum_q e_q^2 x f_1^q(x) D_1^q(z)}$$

$$P_Z^\Lambda = P_B D_Z(y) \frac{\sum_q e_q^2 x f_1^q(x) G_1^q(z)}{\sum_q e_q^2 x f_1^q(x) D_1^q(z)} = P_B D_Z(y) D_{LZ}(x, z)$$

$$D_X(y) = \frac{2y \sqrt{1 - y - \frac{\gamma^2 y^2}{4}}}{1 - y + \frac{y^2}{2} + \frac{\gamma^2 y^2}{4}}$$

$$D_Z(y) = \frac{y \left(1 - \frac{y^2}{2}\right)}{1 - y + \frac{y^2}{2} + \frac{\gamma^2 y^2}{4}}$$

P.J.Mulders and
R.D.Tangerman,
Nucl.Phys. B461
1996

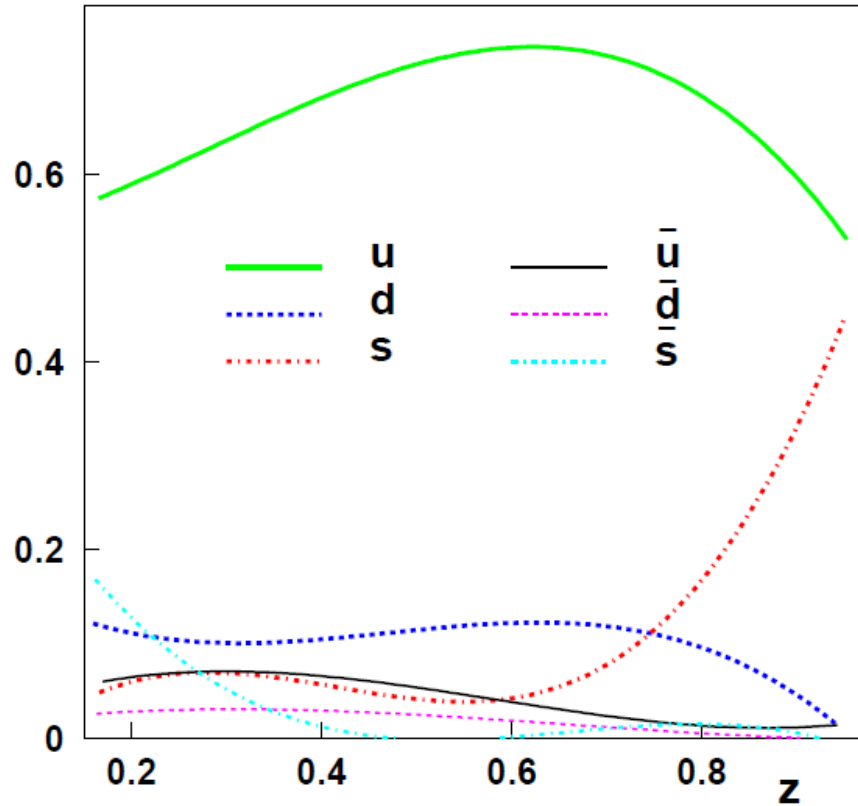
P_Y^Λ (поперечная поляризация) не зависит от поляризации пучка $P_B \rightarrow$ имеем только 2 компоненты $D_{LX}(x, z)$ и $D_{LZ}(x, z)$

Коэффициент передачи поляризации

$$D_{LZ}^{\Lambda}(x, z) = \sum_q \omega_q^{\Lambda}(x, z) D_{LZ}^{q\Lambda}(z)$$

Purity- $q\Lambda$

Парциальный коэффициент передачи спина $q \rightarrow \Lambda$



$$\omega_q^{\Lambda} = \frac{e_q^2 x f_1^q(x) D_1^q(z)}{\sum_{q'} e_{q'}^2 x f_1^{q'}(x) D_1^{q'}(z)}$$

Считаются
используя LUND MC

$$D_{LZ}^{q\Lambda}(z) = \frac{G_1^{q\Lambda}(z)}{D_1^{q\Lambda}(z)} = \frac{F^{q\Lambda\uparrow}(z) - F^{q\Lambda\downarrow}(z)}{F^{q\Lambda\uparrow}(z) + F^{q\Lambda\downarrow}(z)} \approx \frac{\Delta q^{\Lambda}}{q^{\Lambda}}$$

Jaffe, Lipkin, Ma, многие другие

Мировые данные

- **E665, $\mu N \rightarrow \mu' \Lambda X$**

E665 Collaboration, M. R. Adams et al.,
Eur. Phys. J. C17 (2000)

- **NOMAD, $\nu_{\mu} N \rightarrow \mu \Lambda X$**

NOMAD Collaboration, P. Astier et al.,
Nucl.Phys. B605(2001)

- **COMPASS, $\mu N \rightarrow \mu' \Lambda X$**

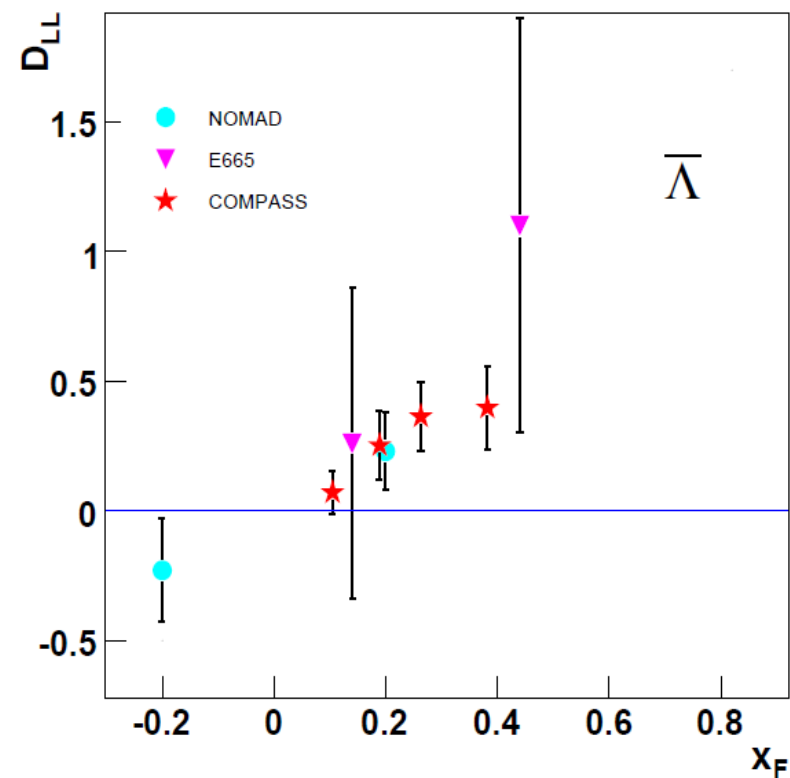
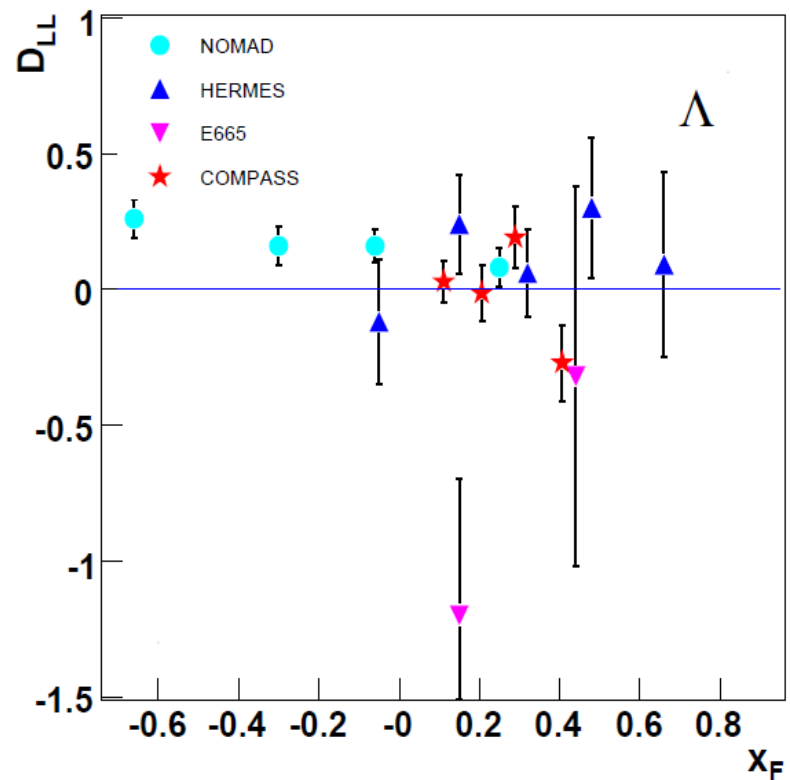
COMPASS Collaboration, M. Alekseev et al.,
Eur.Phys.J. C64 (2009)

- **HERMES, $e N \rightarrow e' \Lambda X$**

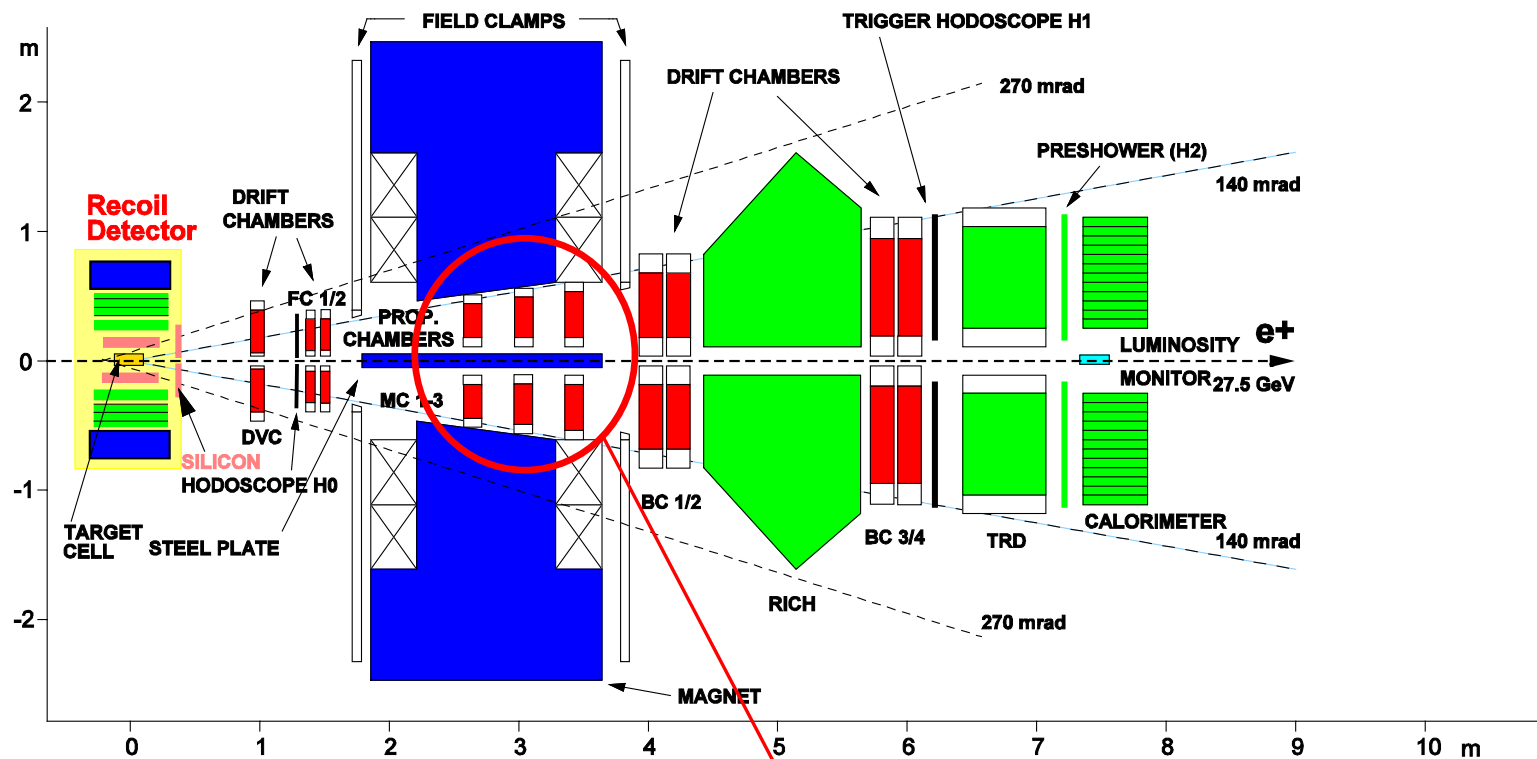
HERMES Collaboration, A. Airapetian et al.,
Phys. Rev.D74 (2006)

без $\bar{\Lambda}$, неполная статистика (до
2000 года) $N_{\Lambda}=7300$

Ось квантования (направление
вектора DLL) задавалась



Спектрометр HERMES



$$\frac{\Delta p}{p} \leq 1\% ,$$

$$\Delta\theta_x, \Delta\theta_y \leq 1\text{ mrad}$$

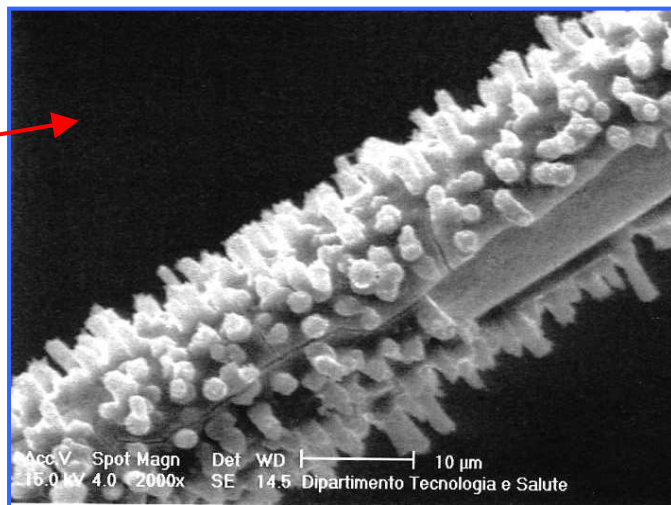
Пропорциональные («магнитные») камеры, произведены в ПИЯФ, ~9 000 каналов

- 27.6 GeV продольно-поляризованный лептонный (e⁺/e⁻) пучок
- Пучок поляризовался благодаря эффекту Соколова-Тернова
- Поляризация 20% < P_B < 70%
- Направление поляризации менялось примерно раз в месяц
- Хорошая идентификация частиц по RICH детектору и калориметру

Эффективность пропорциональных камер

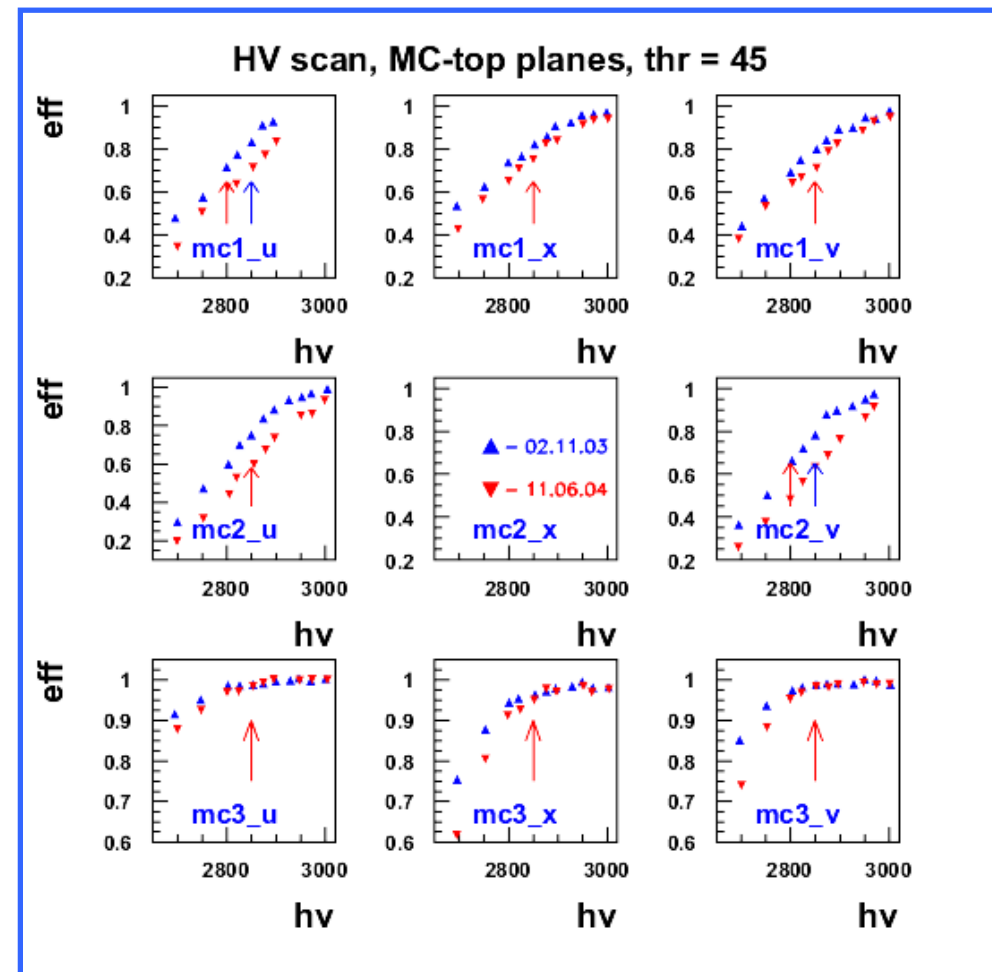
Типичная энергия электронов в лавине $E > 10$ eV, а типичная энергия химической связи 3-4 eV

Недостаточная чистота газовой смеси → «наросты» на аноде → уменьшение газового усиления



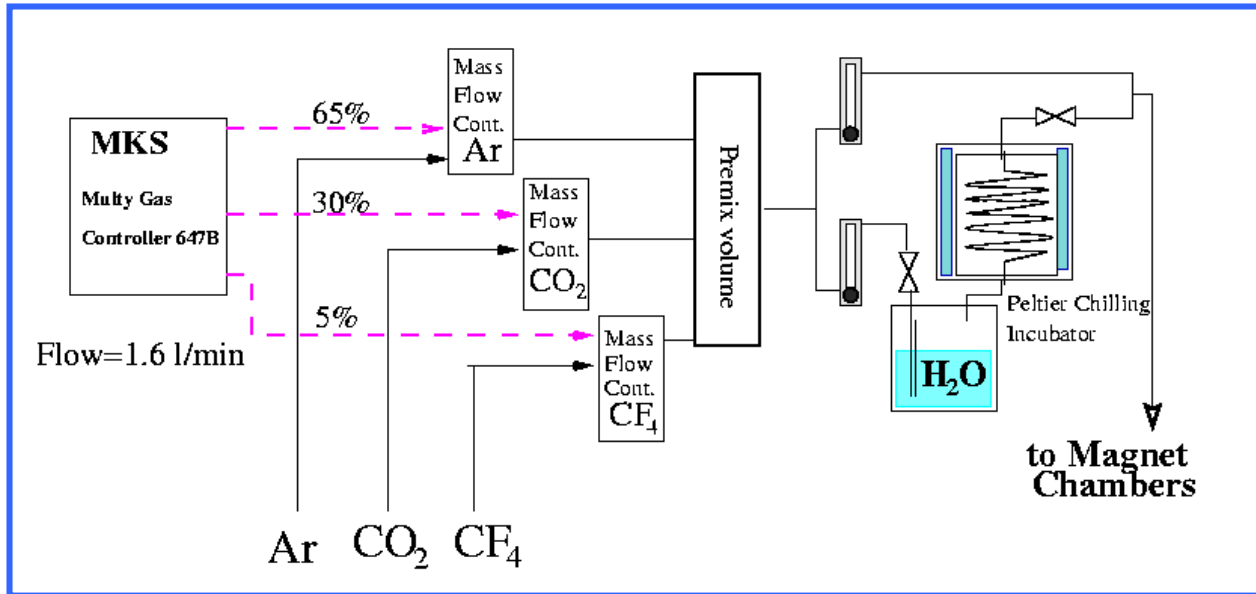
Окисление катода в результате длительной работы приводит к усилению темнового тока, и, как результат, невозможность поднять HV для компенсации падения эффективности

снижение эффективности на 15%



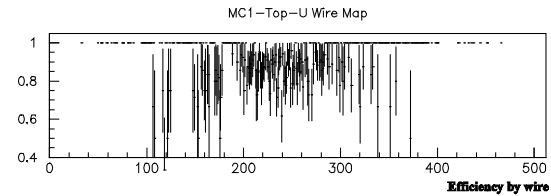
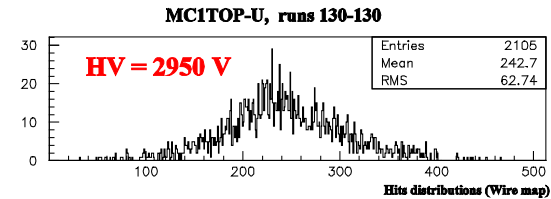
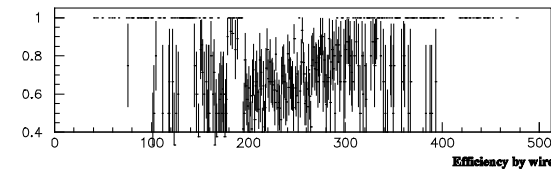
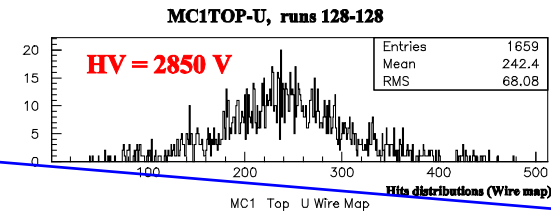
Эффективность пропорциональных камер

Добавление 1400 ppm воды очень эффективно снижает темновой ток → дает возможность поднять высокое напряжение и увеличить эффективность

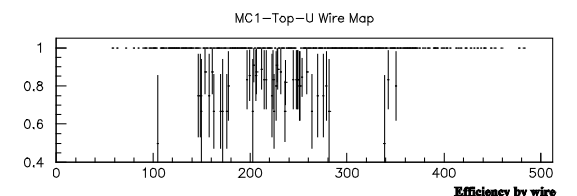
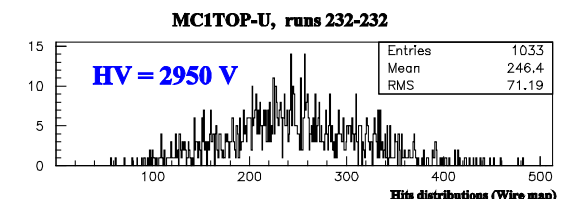
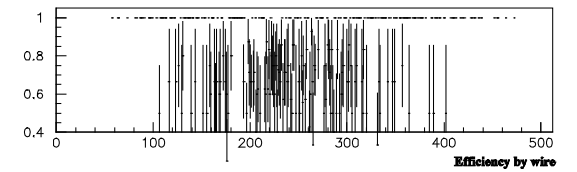
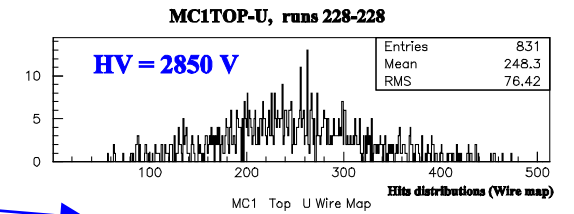


G.Gavrilov et al, Nucl.Instrum.Meth. A591 (2008)

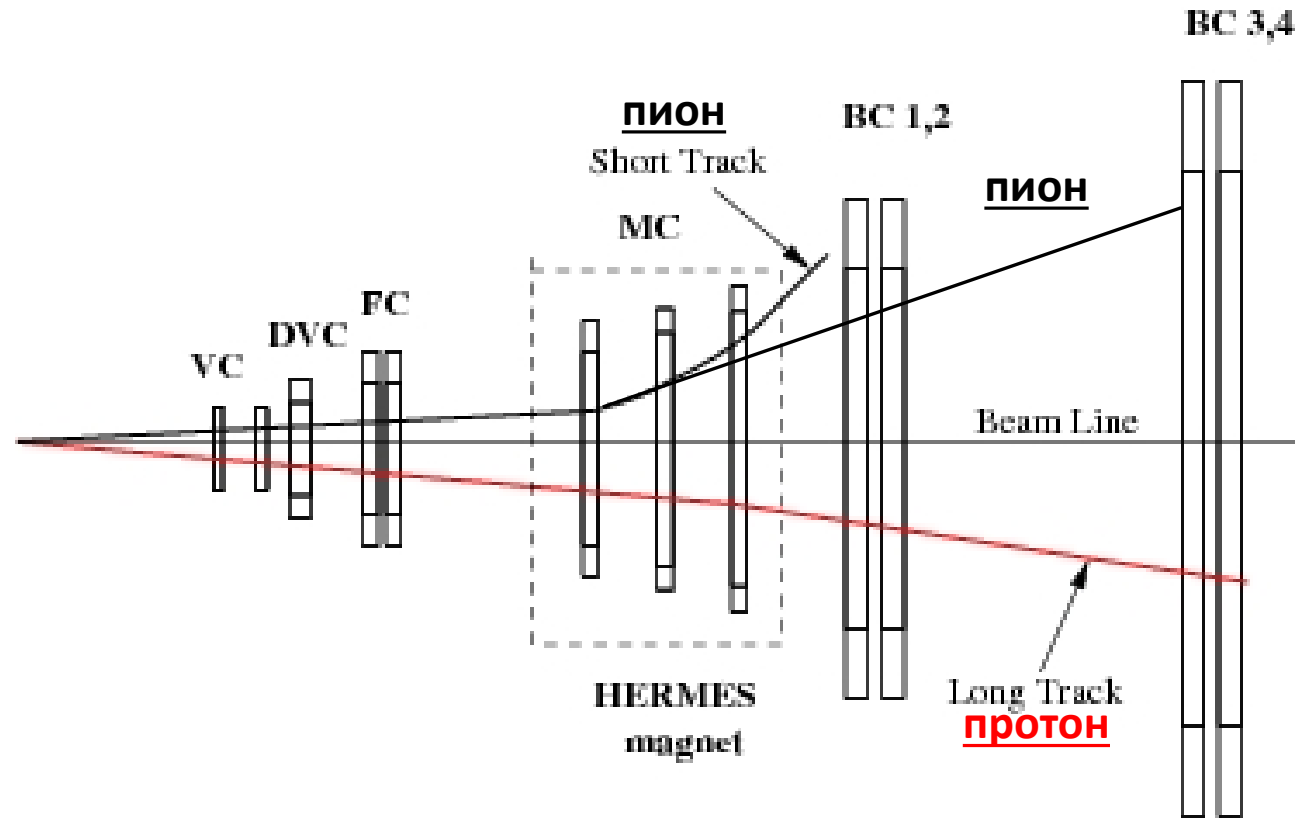
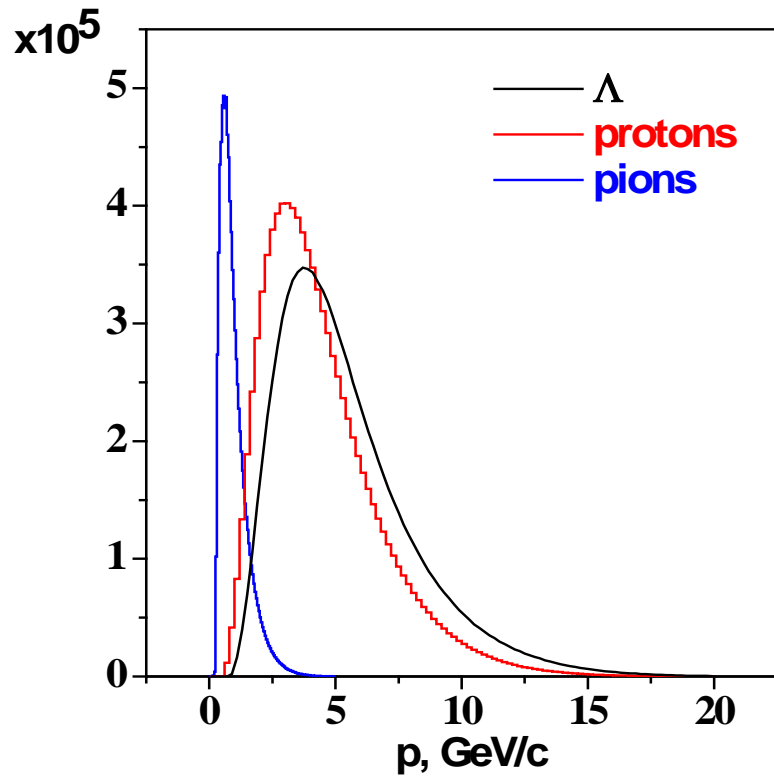
65%Ar + 30%CO₂+5%CF₄



65%Ar + 30%CO₂ + 5%CF₄ + 1400 ppm H₂O

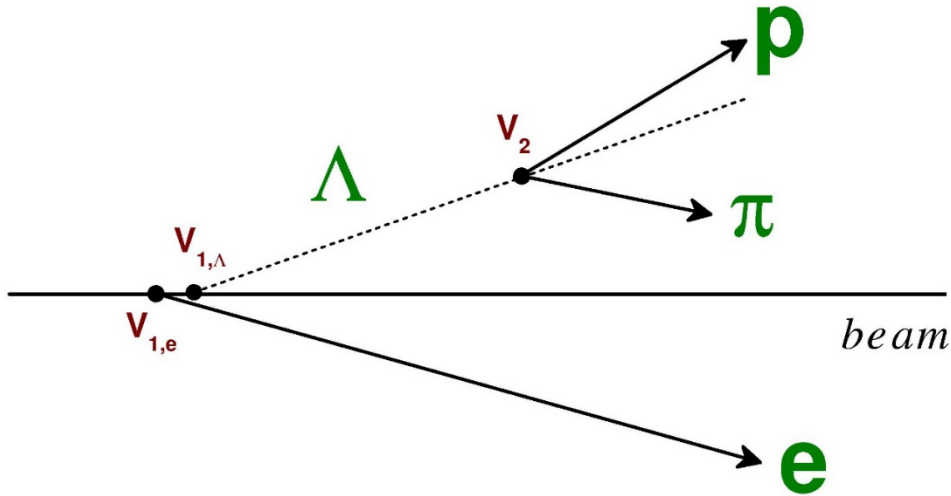


Короткие треки



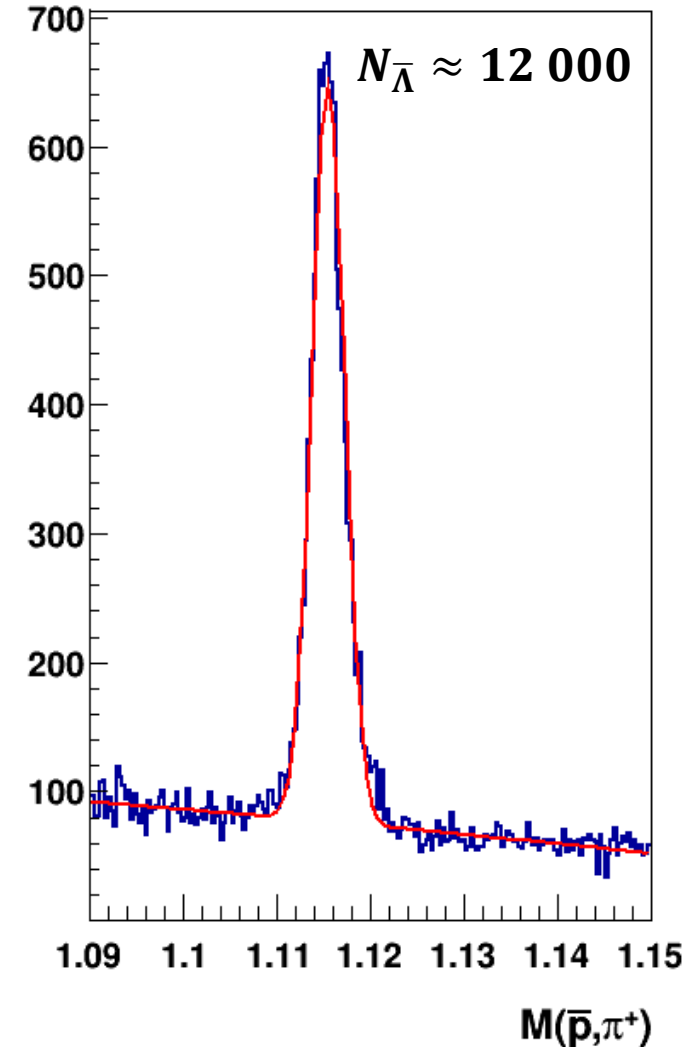
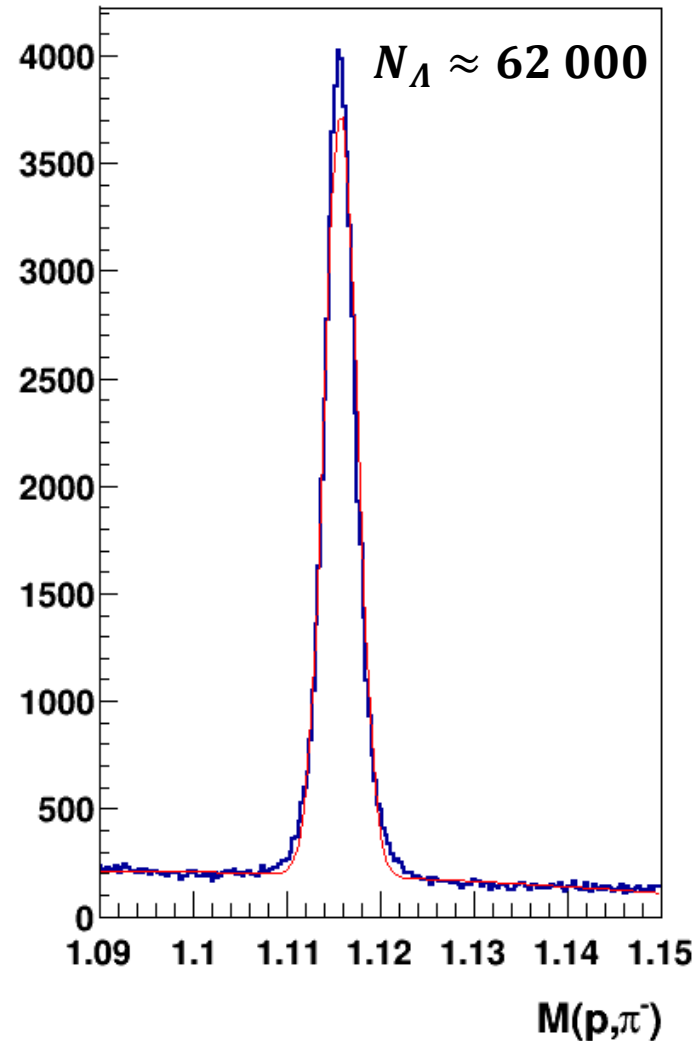
- Пион может быть как длинно-трековым, так и коротко-трековым
- Короткие треки дают примерно 50% статистики для Λ гиперона

Отбор событий с Λ гипероном

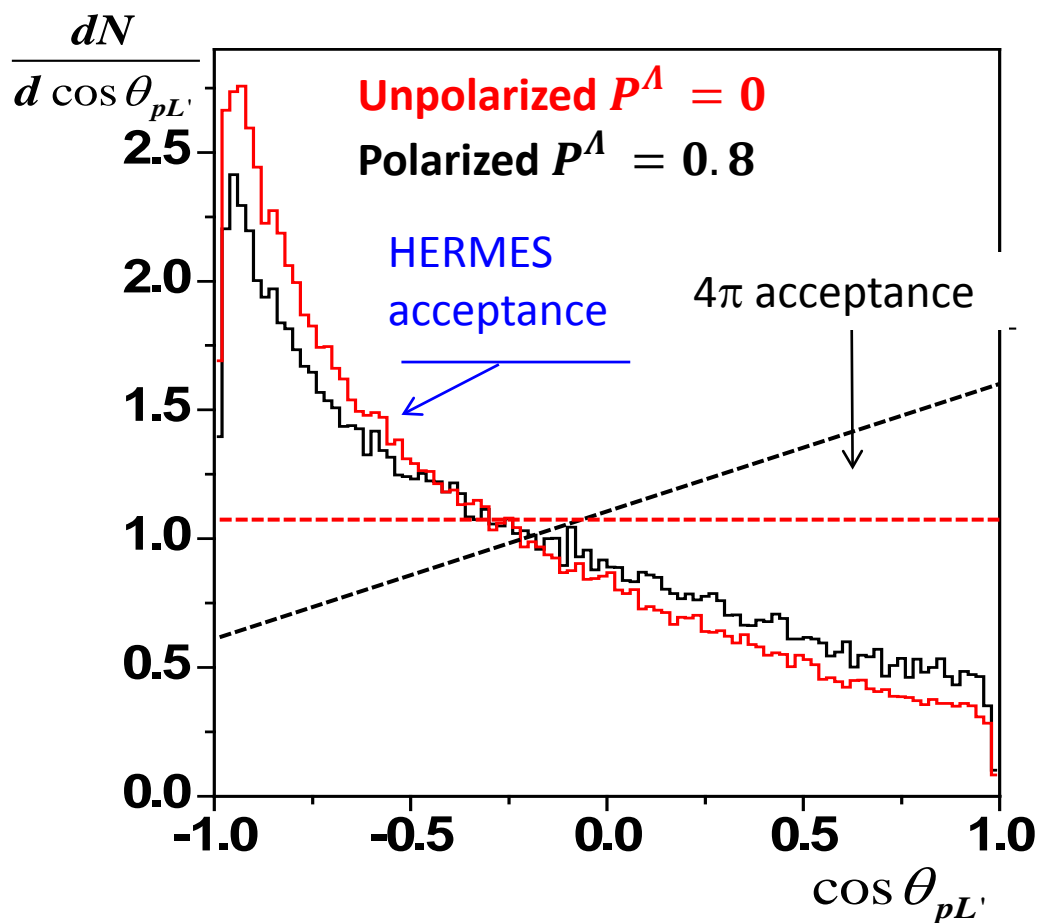


Подавление фона:

- Лидирующая частица (в HERMES кинематике это всегда протон) не должна быть пионом, проверяется по RICH детектору
- Разделение по вершинам рождения и распада, расстояние $|V_2 - V_1| > 9$ см;



Вычисление коэфф. передачи поляризации Λ гиперона



В случае 4 π детектора

$$\frac{dN}{d\Omega_p} = \frac{1}{4\pi} (1 + \alpha P_{L'}^\Lambda \cos \theta_{pL'}) \quad P_{L'}^\Lambda = \frac{\langle \cos \theta_{pL'} \rangle}{\alpha \langle \cos^2 \theta_{pL'} \rangle}$$

В случае ограниченного аксептанса детектора

Моделирование аксептанса детектора с помощью Монте-Карло (сложно оценить систематическую ошибку),

ИЛИ много лучше (!!)

исключить функцию аксептанса, используя тот факт, что она постоянна во времени, а направление поляризации пучка меняется

Вычисление передачи поляризации Λ гиперона

Рассмотрим простой одномерный случай условие $\llbracket P_B \rrbracket = \frac{1}{L} \int P_B dL = 0$

Вероятность i -го события, $\varepsilon(\theta)$ - функция акцептанса, независящая от времени

$$\omega_i = \varepsilon(\theta_i) \frac{1 + \alpha P_{B,i} D_{LZ} \cos(\theta_i)}{\int \varepsilon(\theta) (1 + \alpha P_B(t) D_{LZ} \cos(\theta)) d\Omega \cdot dt} = \varepsilon(\theta_i) \frac{1 + \alpha P_{B,i} D_{LZ} \cos(\theta_i)}{\int \varepsilon(\theta) d\Omega \cdot dt} = C \cdot \varepsilon(\theta_i) (1 + \alpha P_{B,i} D_{LZ} \cos(\theta_i))$$

$$W = \prod_i \omega_i \Rightarrow L = -\ln W = -\ln \prod_i \omega_i = -\sum_i \ln \omega_i = C_1 - \sum_i \ln [\varepsilon(\theta_i) (1 + \alpha P_{B,i} D_{LZ} \cos(\theta_i))]$$

$$\frac{\partial L}{\partial D_{LZ}} = -\sum_i \frac{\varepsilon(\theta_i) (\alpha P_{B,i} \cos(\theta_i))}{\varepsilon(\theta_i) (1 + \alpha P_{B,i} D_{LZ} \cos(\theta_i))} = 0 \Rightarrow \sum_i P_{B,i} \cos(\theta_i) (1 - \alpha P_{B,i} D_{LZ} \cos(\theta_i)) = 0$$

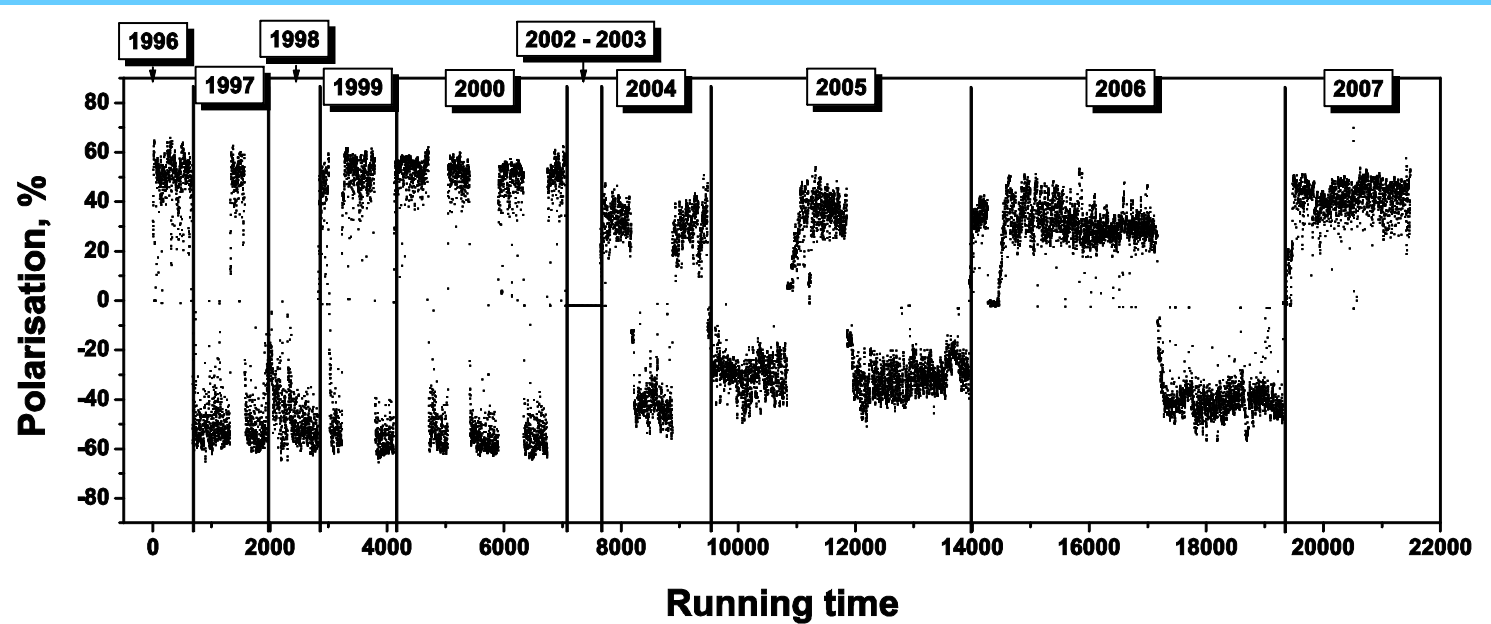
$$D_{LZ} = \frac{\langle P_B \cos \theta_{pZ} \rangle}{\alpha \llbracket P_B^2 \rrbracket \langle \cos^2 \theta_{pZ} \rangle}$$

Функция акцептанса сокращается при условии того, что она стабильна во времени и смены направления поляризации пучка

Вычисление передачи поляризации Λ гиперона

Реальные условия:

- 3-х мерный случай
- $\langle\langle P_B \rangle\rangle \neq 0$



$$\sum_{k=x,z} D_{Lk} \left\langle \frac{D_k(y) D_i(y) \cos\theta_k \cos\theta_i}{1 + \alpha \langle\langle P_B \rangle\rangle \sum_{j=x,z} D_j(y) D_{Lj} \cos\theta_j} \right\rangle = \frac{1}{\alpha} \frac{\langle P_B D_i(y) \cos\theta_i \rangle - \langle\langle P_B \rangle\rangle \langle D_i(y) \cos\theta_i \rangle}{\langle\langle P_B^2 \rangle\rangle - \langle\langle P_B \rangle\rangle^2}$$

Система уравнений $D_{Lk} a_{ik} = c_i$, решается методом итераций

$$D_{Lk}^{(0)} \xrightarrow{\text{вычисление } a_i^k} a_i^{k(0)} \xrightarrow{\text{решение } a_i^k D_{Lk} = c_i} D_{Lk}^{(1)} \rightarrow \dots$$

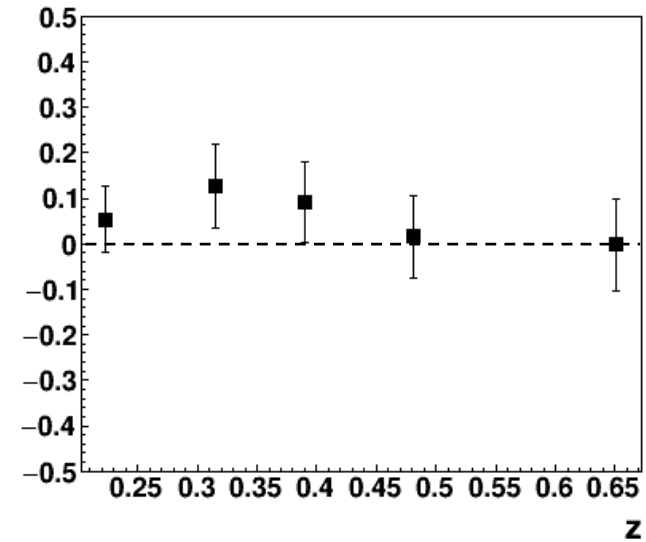
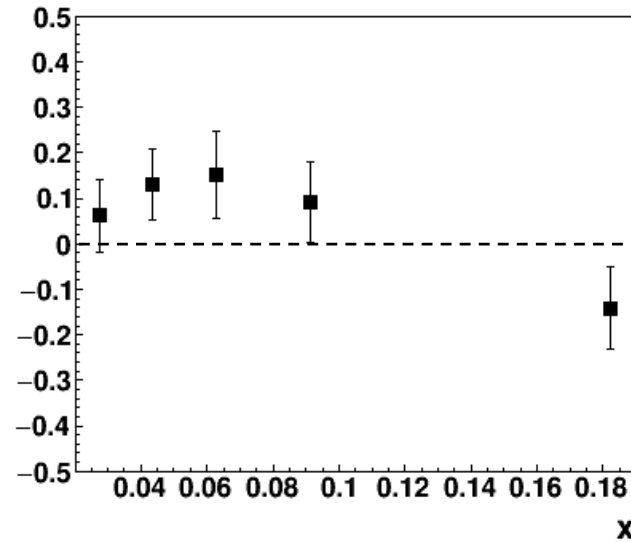
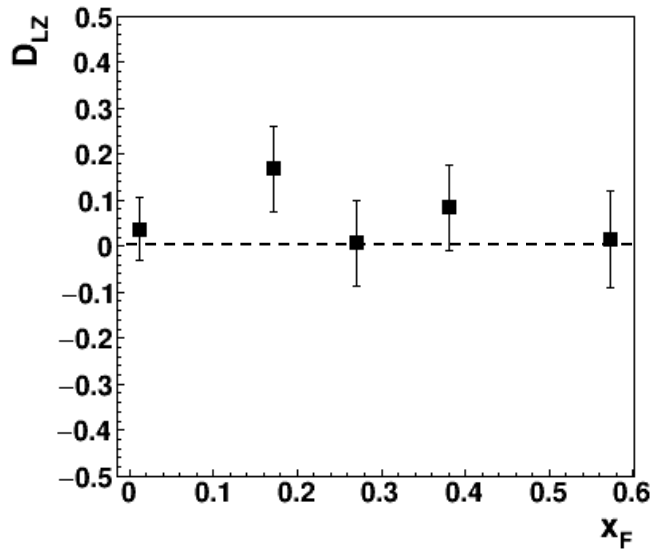
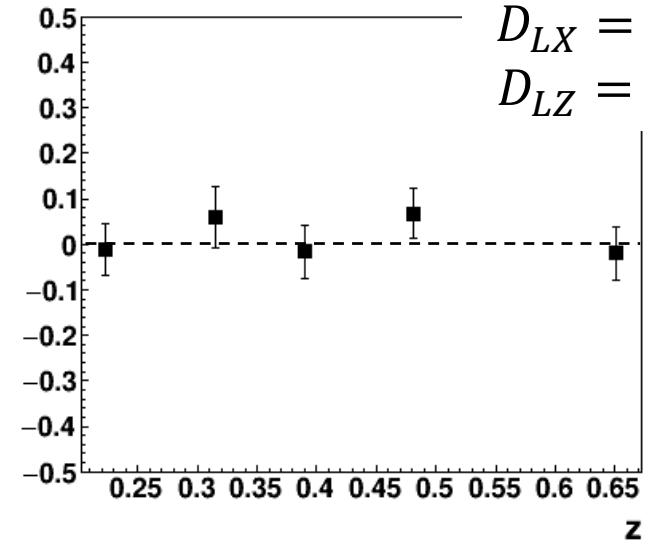
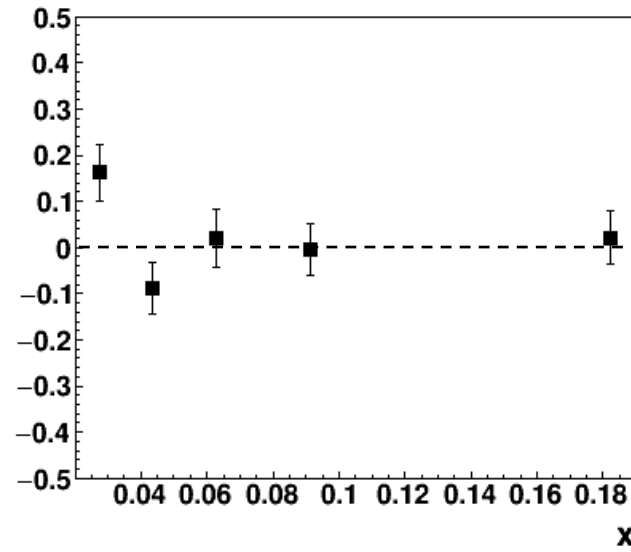
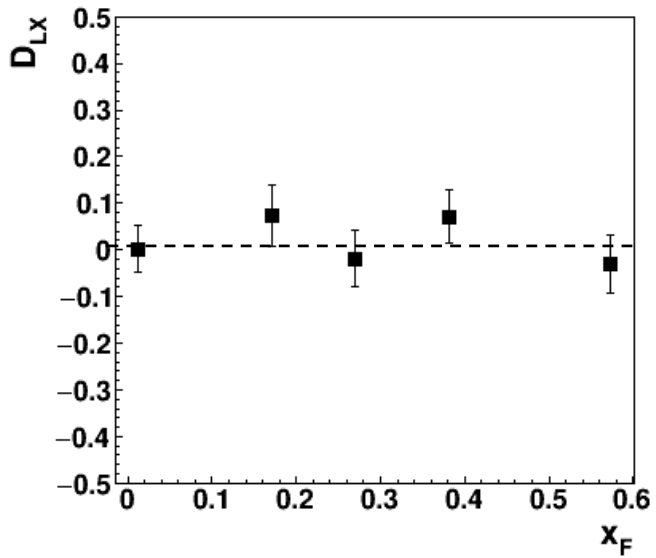
Для дополнительного контроля метода также вычислялся компонент $D_{LY} \equiv 0$ (обсуждалось выше), полученный результат $D_{LY} = 0.013 \pm 0.029$ подтвердил правильность метода

Передача спина к Λ гиперону

Integrated result

$$D_{LX} = 0.023 \pm 0.027$$

$$D_{LZ} = 0.074 \pm 0.039$$

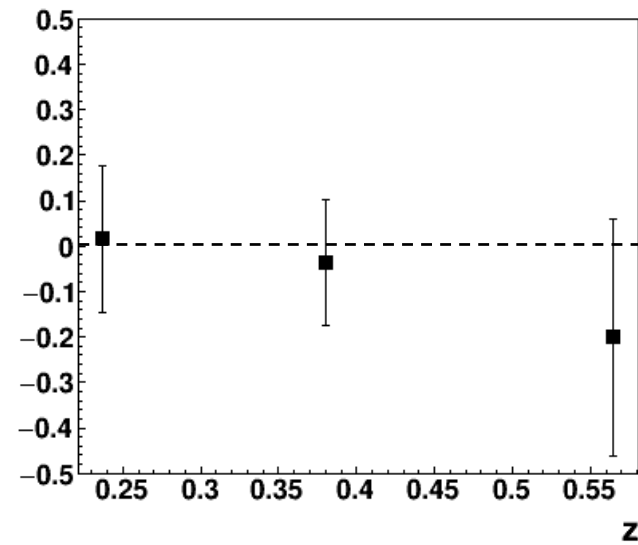
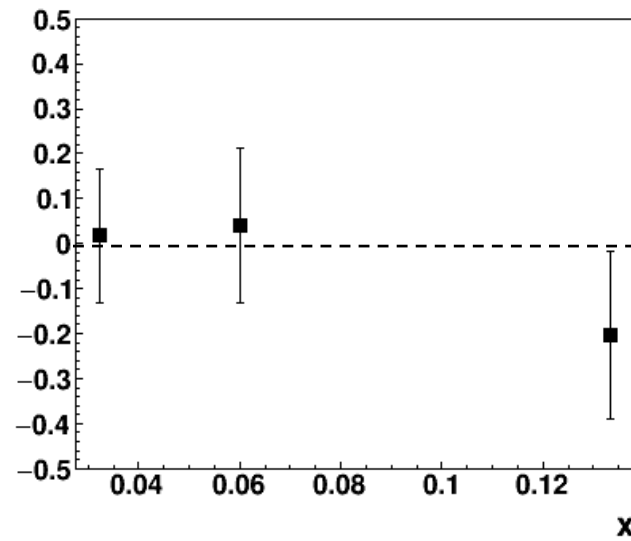
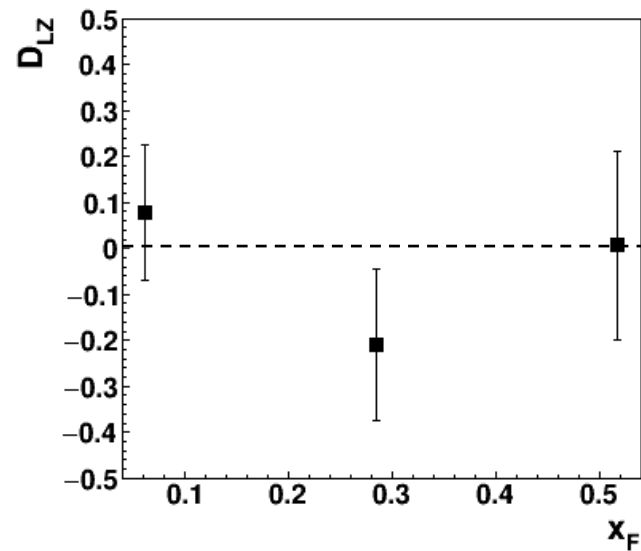
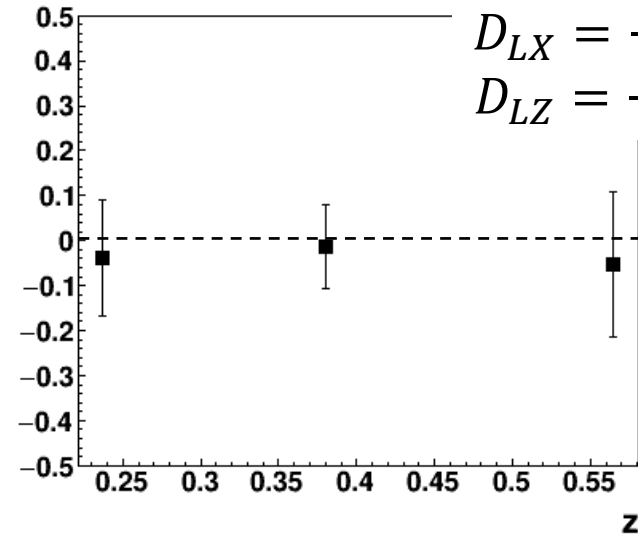
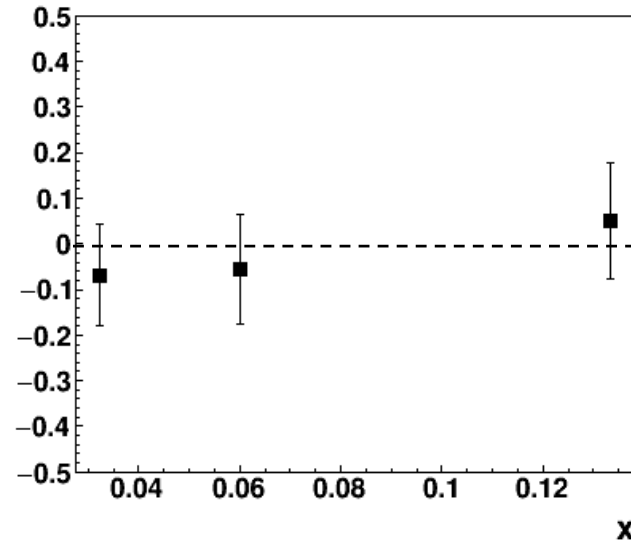
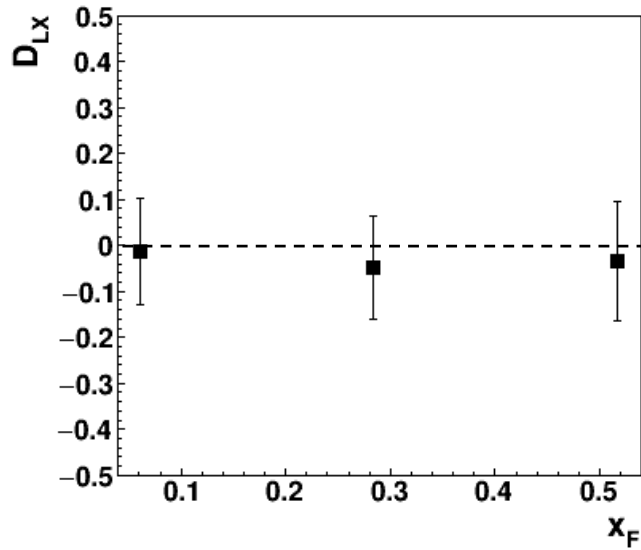


Передача спина к $\bar{\Lambda}$

Integrated result

$$D_{LX} = -0.033 \pm 0.074$$

$$D_{LZ} = -0.109 \pm 0.102$$

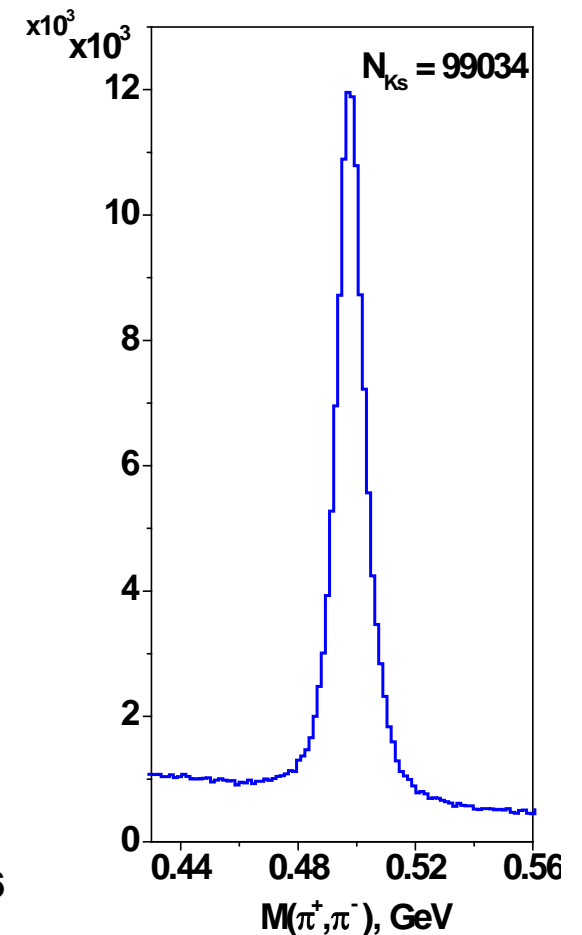
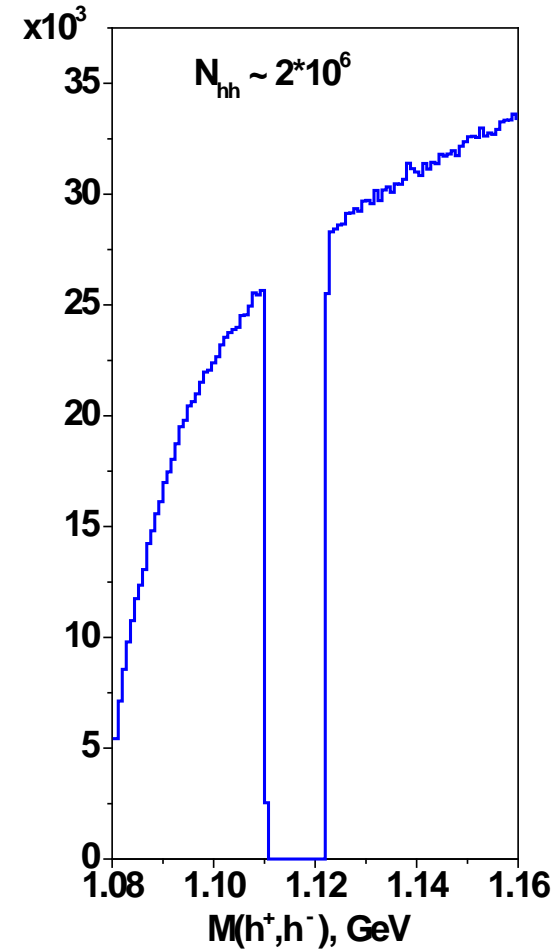


Оценка систематической ошибки

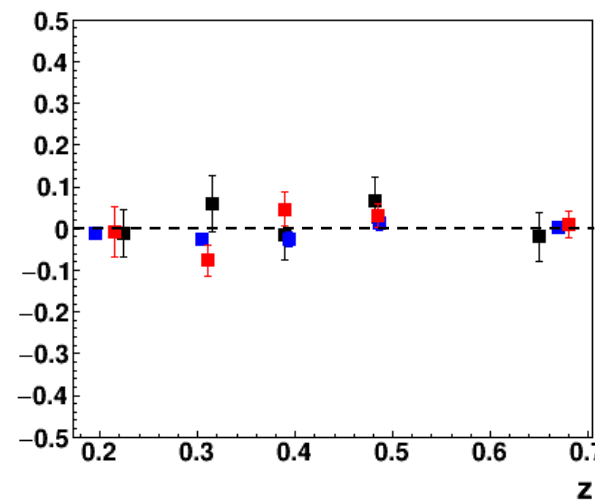
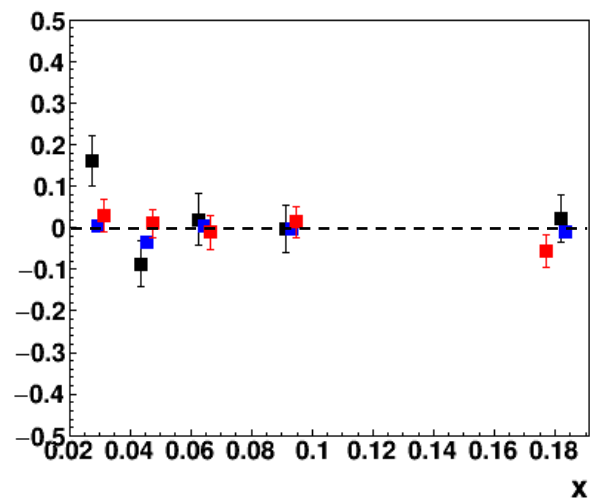
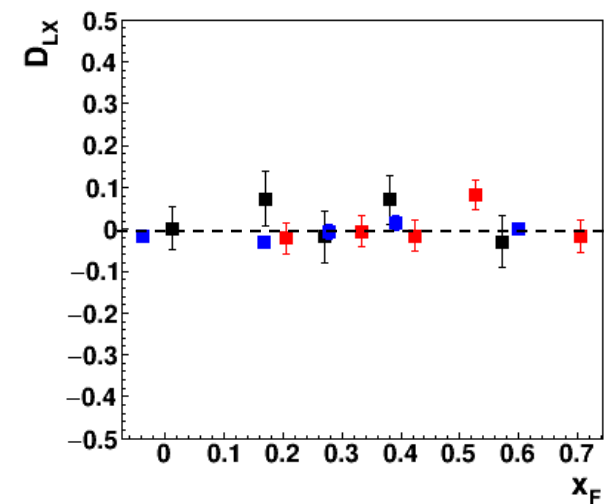
Для оценки систематической ошибки
использовались:

- Пары противоположно заряженных адронов летящих из мишени (h^+h^- pairs), т.к для них отсутствует асимметрия углового распределения «вперед-назад», которая коррелировала бы с поляризацией пучка
- Короткоживущие каоны (K_s), т.к. спин $K_s = 0$, то коэффициент передачи тоже должен быть равен нулю

**Хороший способ контроля ложной асимметрии:
нестабильность функции акцептанса детектора даст
ненулевое значение коэффициента передачи
поляризации**

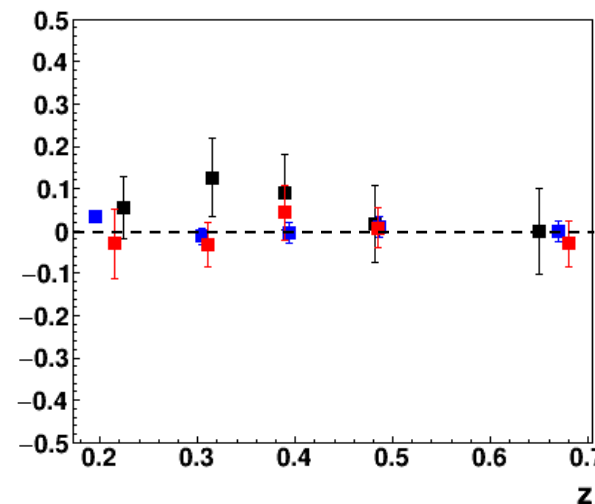
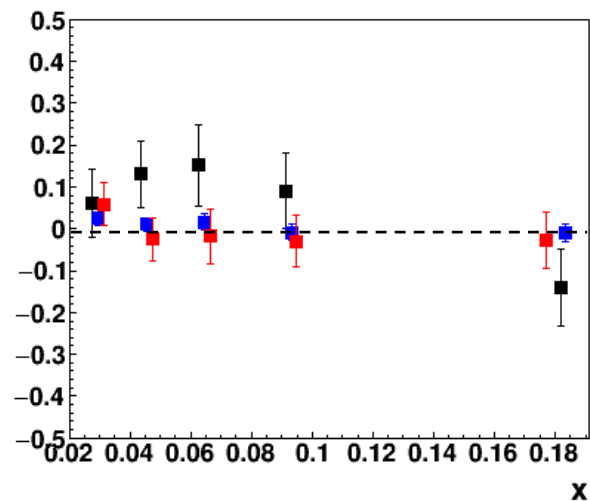
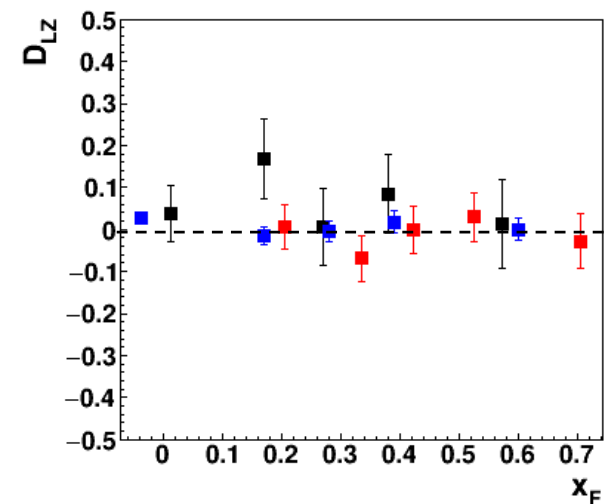


Оценка систематической ошибки



$$\Lambda$$
$$D_{LX} = 0.023 \pm 0.027$$
$$D_{LZ} = 0.074 \pm 0.039$$

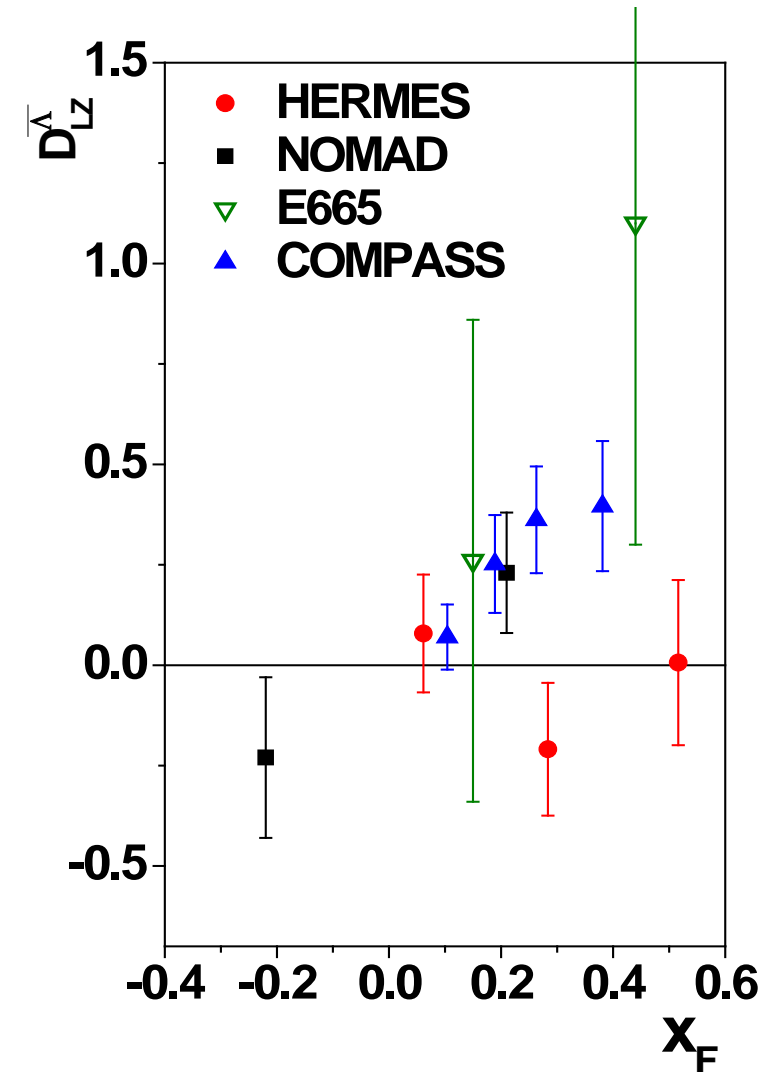
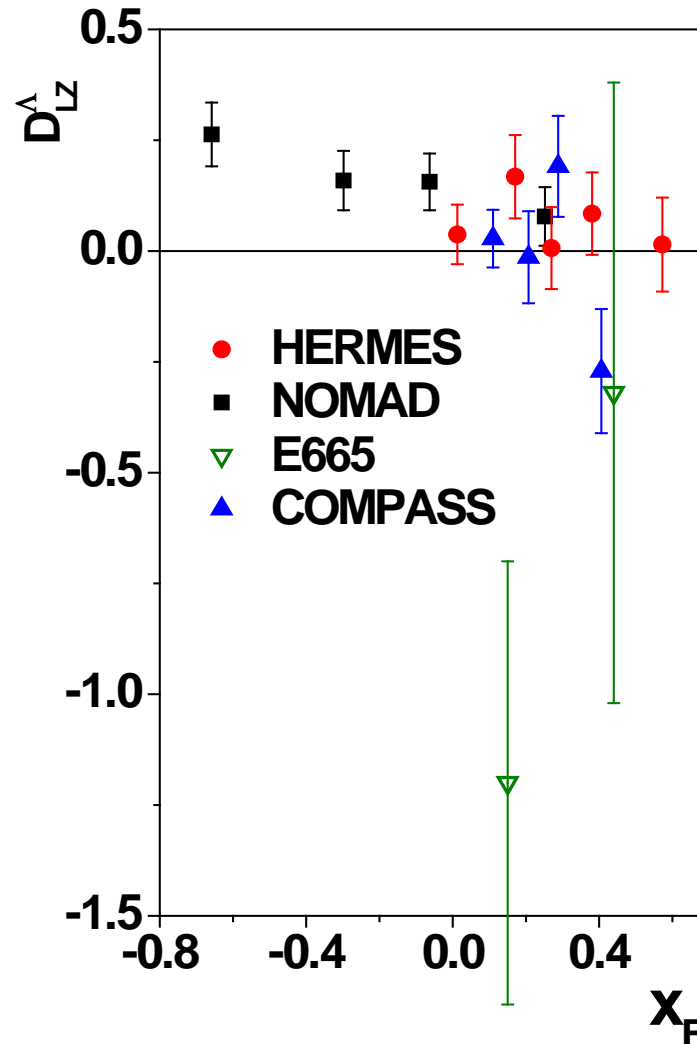
$$Ks$$
$$D_{LX} = 0.001 \pm 0.019$$
$$D_{LZ} = -0.016 \pm 0.027$$



$$hh\text{-pairs}$$
$$D_{LX} = -0.011 \pm 0.006$$
$$D_{LZ} = 0.009 \pm 0.008$$

Сравнение с мировыми данными

- HERMES: результат готов к публикации в Phys.Rev.D
- В области токовой фрагментации существенны данные экспериментов HERMES и COMPASS
- Данные HERMES и COMPASS согласованны, среднее значение равно нулю
- Данные HERMES покрывают область больших значений x_F



Выводы

✓ Коэффициент передачи поляризации для Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов:

$$\bullet D_{Lx}^{\Lambda} = 0.023 \pm 0.027 \quad D_{Lx}^{\bar{\Lambda}} = -0.033 \pm 0.074$$

$$\bullet D_{Lz}^{\Lambda} = 0.074 \pm 0.039 \quad D_{Lz}^{\bar{\Lambda}} = -0.109 \pm 0.102$$

• Систематическая ошибка на уровне 0.01

✓ Коэффициент передачи спина слабо зависит от кинематических переменных

✓ Значение для коэффициента передачи D_{Lz} не противоречат с данными эксперимента COMPASS

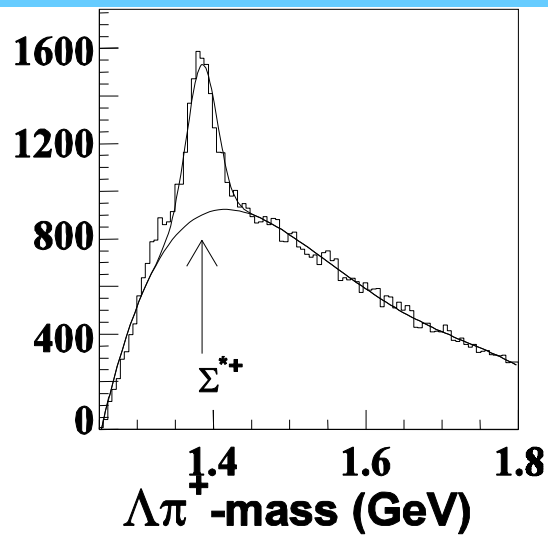
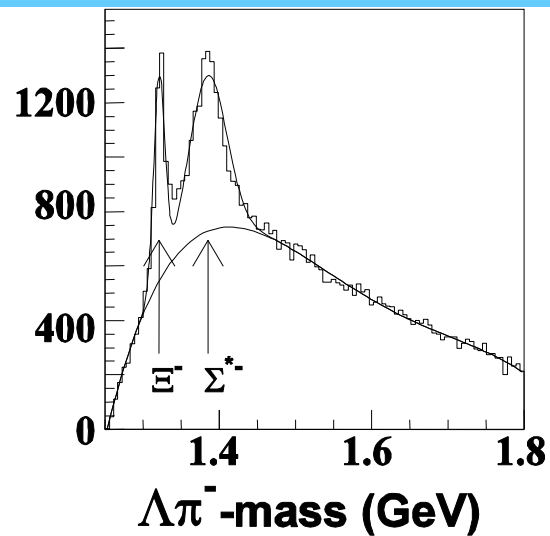
✓ Продольный компонент D_{Lz} дает возможность оценить отношение $\frac{G_1^q}{D_1^q}$

✓ Поперечный компонент D_{Lx} дает оценку отношения $\frac{H_1^q}{D_1^q}$ и $\frac{\tilde{G}_1^q}{D_1^q}$ для функций фрагментации рождения Λ гиперона в модели П.Малдерса и др.

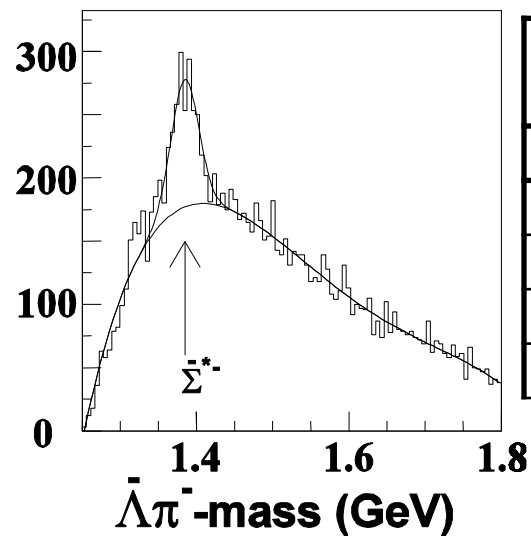
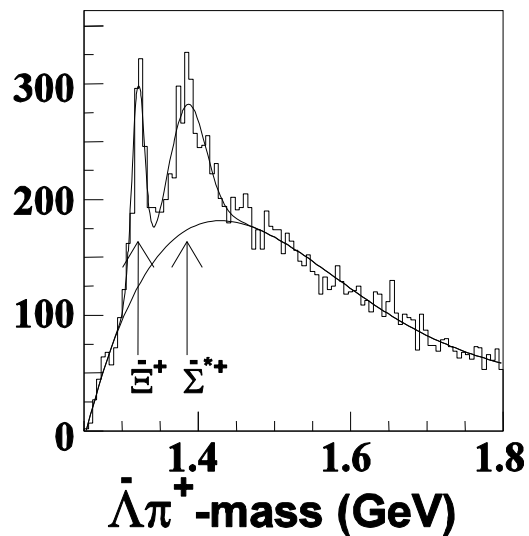
Результаты работы, вынесенные на защиту

- Измерен коэффициент передачи поляризации в области токовой фрагментации ($x_F > 0$) для всего объема данных эксперимента HERMES
- Впервые в области токовой фрагментации измерен поперечный компонент передачи D_{LX} для Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов
- Разработан метод извлечения поляризации в 3-х мерном случае
- Метод для извлечения коэффициента передачи поляризации обобщен на случай несбалансированной поляризации пучка
- Впервые для оценки ложной асимметрии использовались пары разноименно зараженных адронов
- Проведены исследования и разработана методика для восстановления эффективности пропорциональных камер в эксперименте HERMES
- Существующая программа для инициализации и сбора данных с пропорциональных камер эксперимента HERMES была перенесена на новую платформу

Λ (anti- Λ) from hyperon (anti-hyperon) decays (quasi-real photoproduction regime)



Parent particles	Λ Contribution to production (%)
String(direct)	40
Σ^0	18
Ξ^- and Ξ^0	4
$\Sigma^{*+} \Sigma^{*0} \Sigma^{*-}$	38



Hyperon	Decay mode, %	Hyperon yield	Antihyperon Yield
Λ^0 (1116)	$p \pi^-$ (63.9)	386000	72000
Σ^0 (1193)	$\Lambda^0 \gamma$ (100)	19000	5200
Ξ^- (1321)	$\Lambda^0 \pi^-$ (99)	2500	650
Σ^{*+} (1393)	$\Lambda^0 \pi^+$ (88)	5700	820
Σ^{*-} (1388)	$\Lambda^0 \pi^-$ (88)	6300	1200