

# Исследование спиновых эффектов на ускорителе У-70 ИФВЭ

*В. Мочалов*

*ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ КИ*



# Содержание

- Введение – что мы знаем об односпиновых асимметриях в сильном взаимодействии
- Исследование односпиновых асимметрий на ускорителе У-70 в ИФВЭ
- Программа новых спиновых исследований в ИФВЭ
  - Возможность создания поляризованного пучка
- Сотрудничество СПАСЧАРМ
  - Возможность сотрудничества ИФВЭ и ПИЯФ
- Заключение

# Сущность спина

- Спин  $s$  в квантовой механике обозначает *собственный момент 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.
- Спин является особой и весьма нетривиальной составляющей углового момента (момента импульса) со специфическими свойствами, и его природа всё ещё - спустя почти 100 лет после открытия – остаётся тайной.
- Спин, как и момент импульса, представляется аксиальным *вектором*. Спиновое квантовое состояние частицы полностью определяется *проекцией спина на некоторую ось квантования* (часто направление этой оси в пространстве выбирается вдоль внешнего магнитного поля). Общее число проекций спина равно  $2s+1$ .

# Чем важны поляризационные исследования в сильных взаимодействиях ?

•Интерес к исследованию спиновой зависимости сильного взаимодействия связан с возможностью изучения **динамики взаимодействия и спиновой структуры адронов** через взаимодействия партонов, имеющих ненулевой спин.

•Для проведения поляризационных исследований **надо создавать пучки поляризованных частиц, использовать технику поляризованных мишеней**. В последние годы произошел заметный прогресс в экспериментальном изучении спиновых эффектов при высоких энергиях, подавляющее большинство экспериментов было проведено в области непертурбативной КХД (при умеренных поперечных импульсах).

•Развивается теоретическое осмысление спиновых эффектов. Однако сегодня **нет теории**, претендующей на полное описание всех наблюдаемых поляризационных эффектов.

•Новые экспериментальные результаты в этой трудной для теоретиков области непертурбативной КХД важны для развития теоретических подходов и возможного создания теории (модели) для описания всех спиновых эффектов.

# Что мы ~~НЕ~~ знали о роли спина в СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

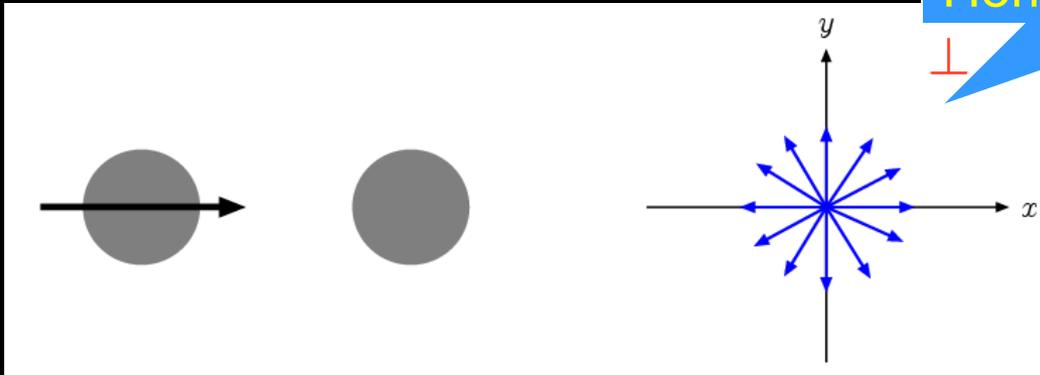
- Спиновые эффекты в сильных взаимодействиях ~~НЕ~~ малы:
  - Односпиновая асимметрия ~~НЕ~~ мала и ~~НЕ~~ падает с ростом энергии ( $m_q/\sqrt{s}$ )
  - Асимметрия ~~НЕ~~ падает с ростом поперечного импульса.
- Спин протона ~~НЕ~~ состоит из спина кварков

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

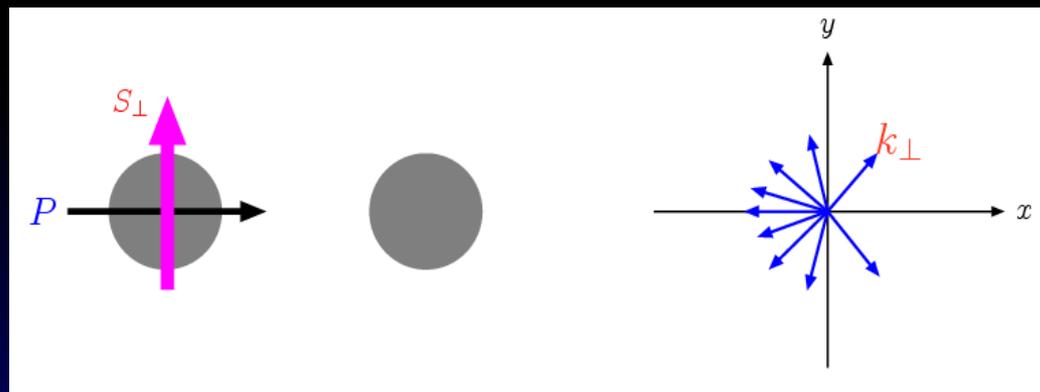
	Теория	Эксперимент
<b>Вклад спина кварков в спин протона (наивно)</b>	<b>1</b>	<b>1/3</b>
Вклад спина глюонов в спин протона	неизвестно	Близко к нулю при малых $x$
Односпиновая асимметрия адронов	$< 1\%$	До 40% в ряде реакций
Зависимость асимметрии от энергии и поперечного импульса	падает	Практически не зависит
Отношение электрического форм-фактора к магнитному	1	Падает до нуля
Спиновые эффекты в участии антипротонов	неизвестно	Практически нет данных
CP нарушение в поляризации	неизвестно	Нет данных

# Что такое односпиновая асимметрия

Поперечная плоскость



Вторичные частицы имеют азимутальную симметрию



$$d\sigma \propto \vec{S}_{\perp} \cdot (\vec{P} \times \vec{K}_{\perp})$$

$$A_N = \frac{L-R}{L+R}$$

Появляется азимутальная асимметрия

# 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;

$\phi$  – азимутальный угол;

(При малых углах  $\phi$  считается, что все вторичные частицы вылетают под азимутальным углом  $0^\circ$ ).

Измеряемая асимметрия

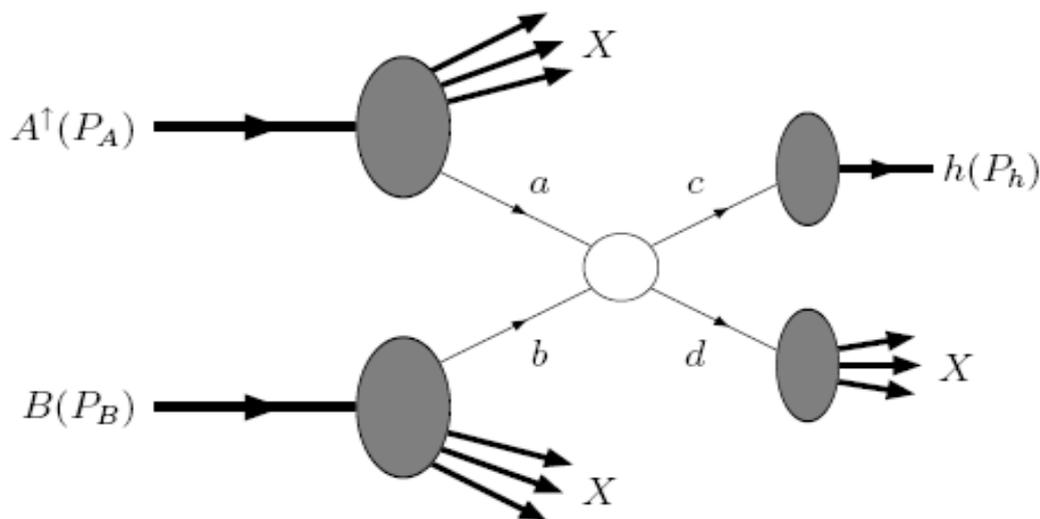
$$A_N = \frac{D(x_f, p_t)}{P_{target}} \cdot A_N^{raw}(x_f, p_t) = \frac{D(x_f, p_t)}{P_{target}} \cdot \frac{n_{\uparrow}(x_f, p_t) - n_{\downarrow}(x_f, p_t)}{n_{\uparrow}(x_f, p_t) + n_{\downarrow}(x_f, p_t)}$$

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

# Односпинная наивно

In this note we have pointed out that the asymmetry of a polarized target, and the transverse polarization of a produced quark in  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ , or in  $qq \rightarrow qq$  at large  $p_T$ , or in lepton production,

is calculable perturbatively in QCD. It is not zero and is numerically large. Radiative corrections for light quarks are small. To test the predictions. For  $P$  is small, tests of large- $p_T$  production [for  $p_T \approx 2 \text{ GeV}/c$ ], fragmentation effects are small. They cannot (by parity conservation) predict either QCD or

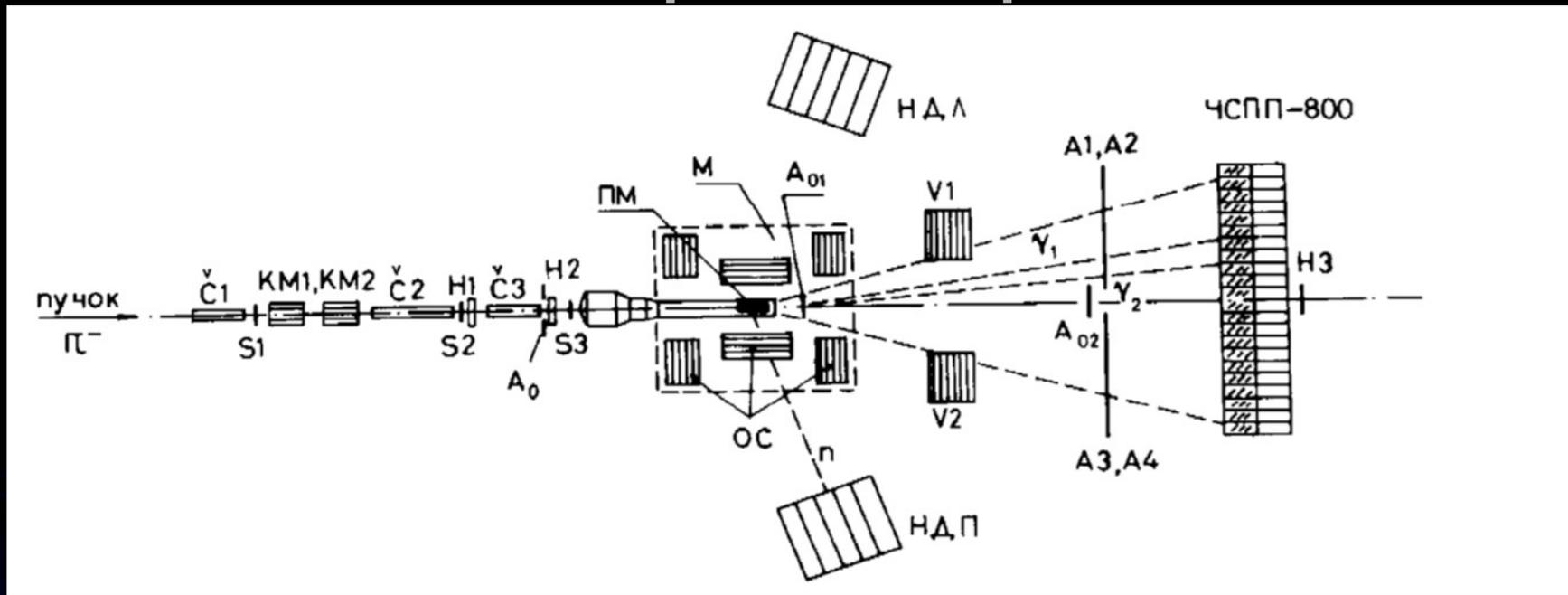


- Асимметрия по углу  $\theta$  Kane, Pumpkin and Repko PRL 41 1978

- В формуле сечения процесса  $2 \rightarrow 2$  нет спиновозависящих функций

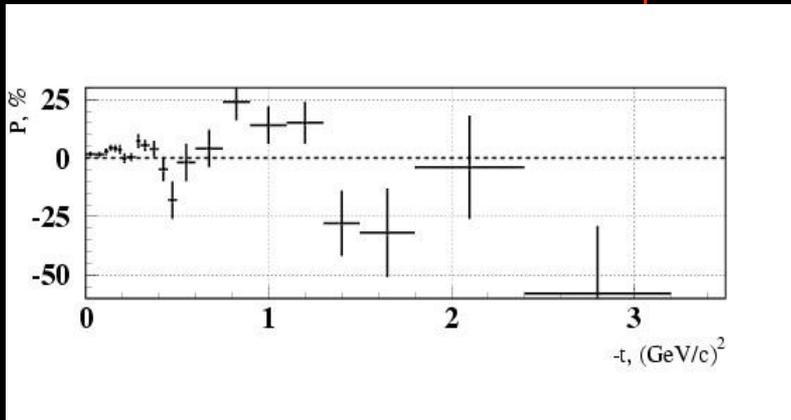
$$E_h \frac{d\sigma^{AB \rightarrow hX}}{d^3p_h} = \sum_{a,b,c,d} \int dx_a dx_b dz_h f_a(x_a) \cdot f_b(x_b) \cdot \frac{\hat{s}}{z_h^2 \pi} \frac{d\sigma^{ab \rightarrow cd}}{d\hat{t}} \delta(\hat{s} + \hat{t} + \hat{u}) \cdot D_{h/c}(z)$$

# Первые измерения односпиновой асимметрии в Протвино

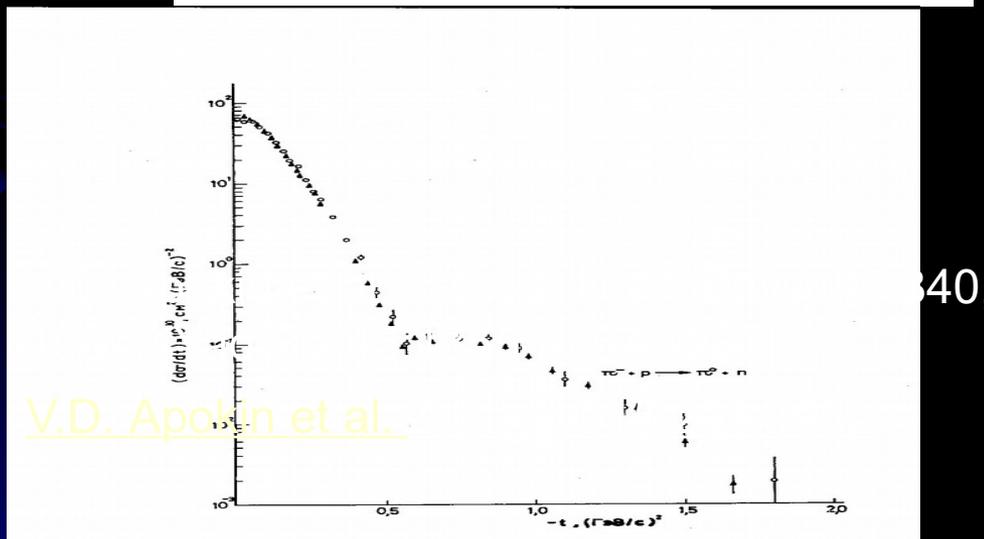


В 1978 г. (почти **40 лет!**) первые исследования с использованием поляризованной протонной мишени ИФВЭ-ОИЯИ

# Поляризация в реакции

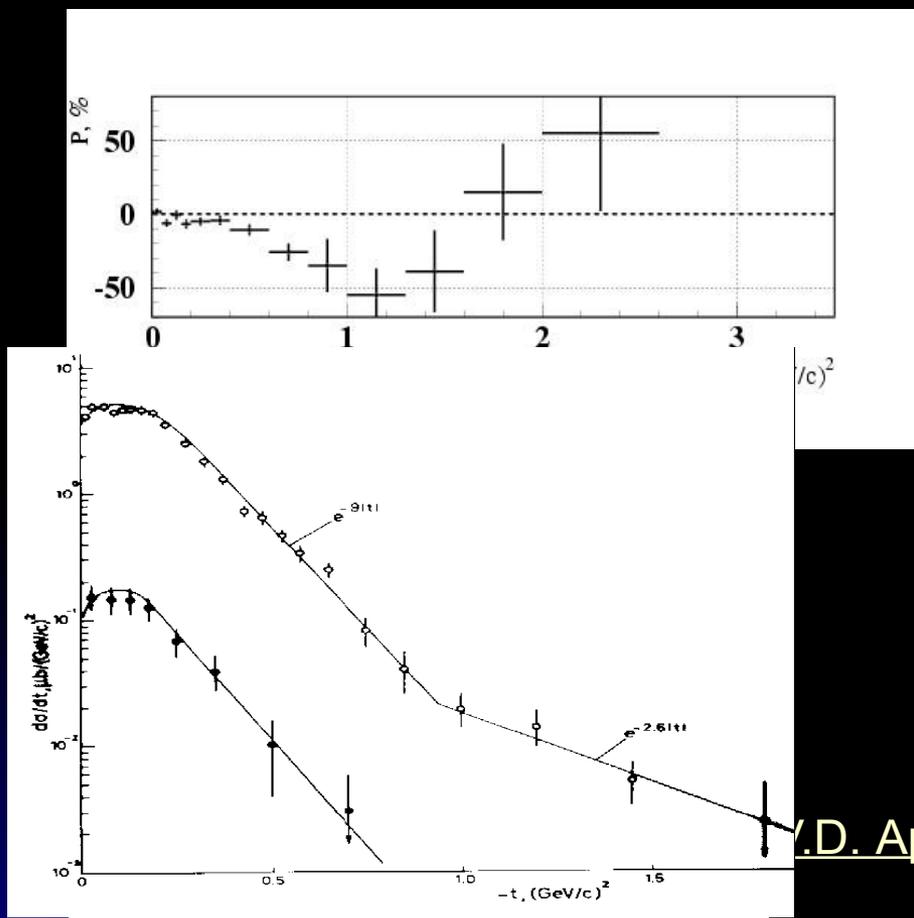


- Поляризация  $P(t)$  в области  $0 < |t| < 0.35$   $(\text{GeV}/c)^2$  равна  $(5.0 \pm 0.7)\%$ .
- Существует локальный минимум в области при  $t = -0.25$   $(\text{GeV}/c)^2$ .
- Поляризация имеет минимум в области минимума в дифференциальном сечении.
- Поляризация осциллирует.



# Поляризация в реакциях

## $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta n$ and $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta'(958) n$

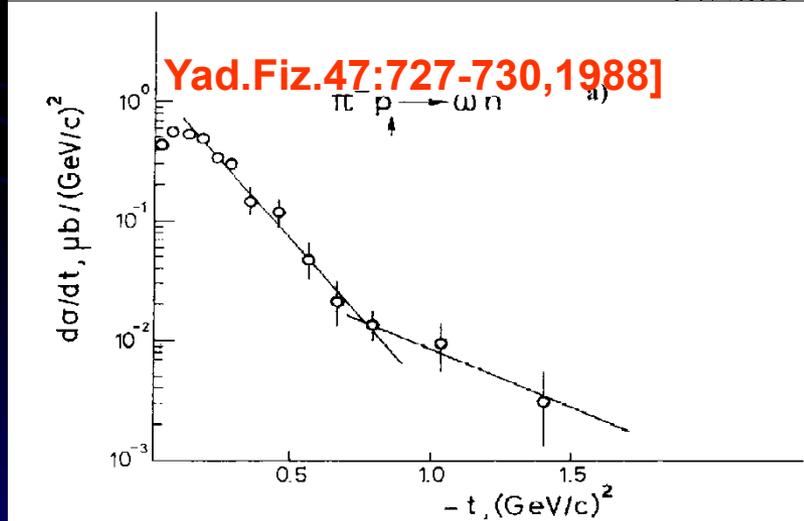
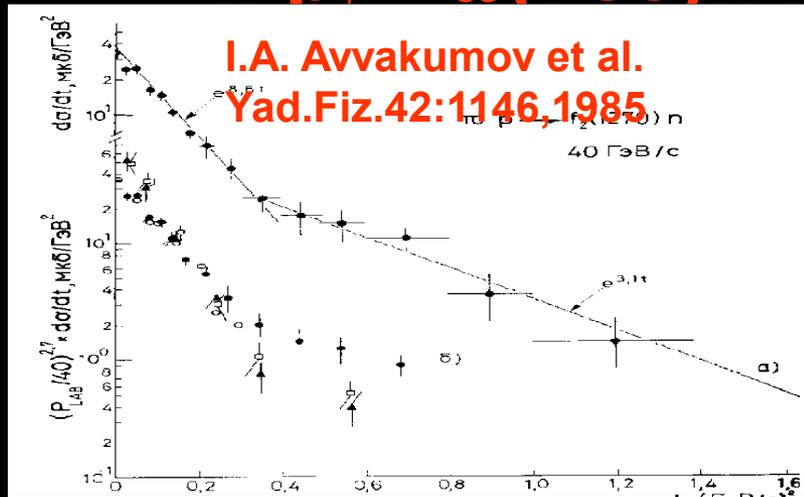


- Поляризация в реакции  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta n$  при 40 ГэВ велика в широком интервале  $0.05 < -t < 1.6$   $(\text{GeV}/c)^2$  и достигает величины  $A_N = (-44 \pm 11)\%$  в области  $|t| 0.8-1.6$   $(\text{GeV}/c)^2$
- Минимум поляризации достигается в точке изменения наклона сечения
- Поляризация меняет знак при  $-t = 1.8$   $(\text{GeV}^2/c)^2$ .
- Среднее значение поляризации в реакции  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta'(958) n$  в области  $0.05 < -t < 0.5$   $(\text{GeV}^2/c)^2$  составляет  $(-17 \pm 8)\%$ .

V.D. Apokin et al., Z.Phys.C35:173,1987.

# Асимметрия в реакциях

$\pi^- p \rightarrow \omega(783) n$  и  $\pi^- p \rightarrow f_2(1270) n$

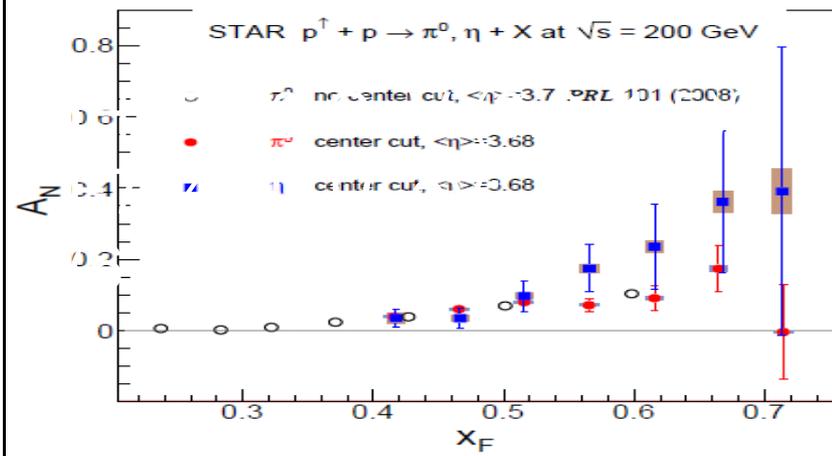
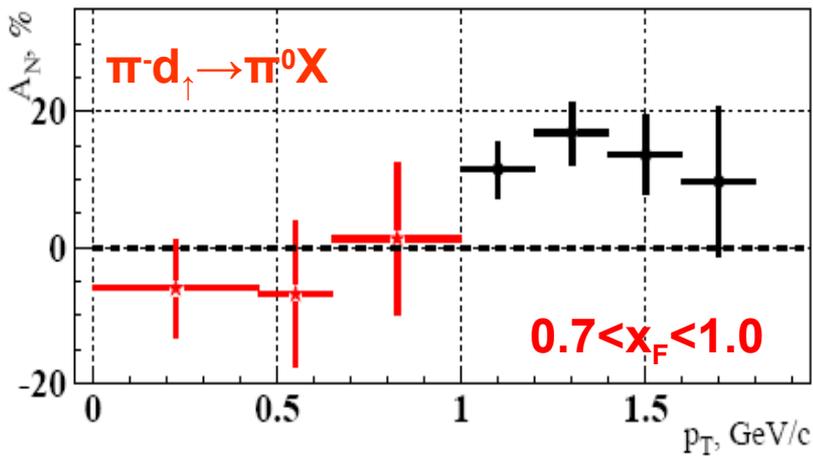
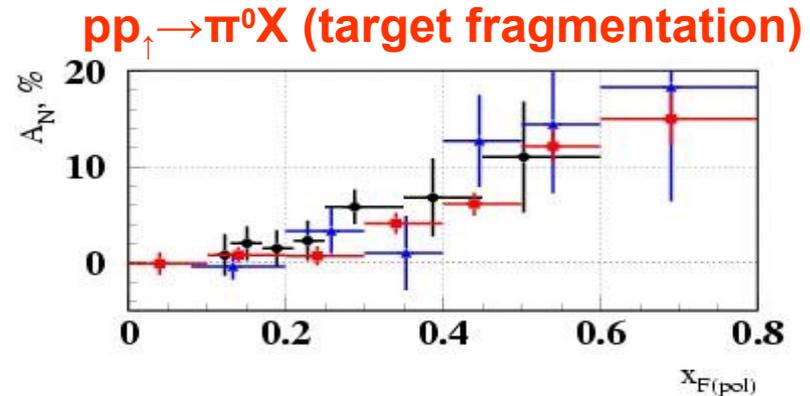
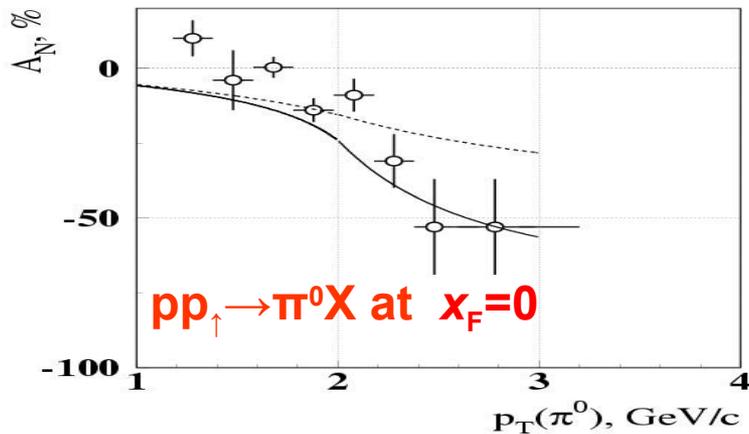


- $\omega$  регистрируется в моде распада  $\pi\gamma$  (branching 8.9%).
- Асимметрия велика в обеих реакциях
- Асимметрия минимальна примерно в области изменения наклона сечения как для  $\omega$ , так и для  $f_2$

# Выводы по эксклюзивным реакциям

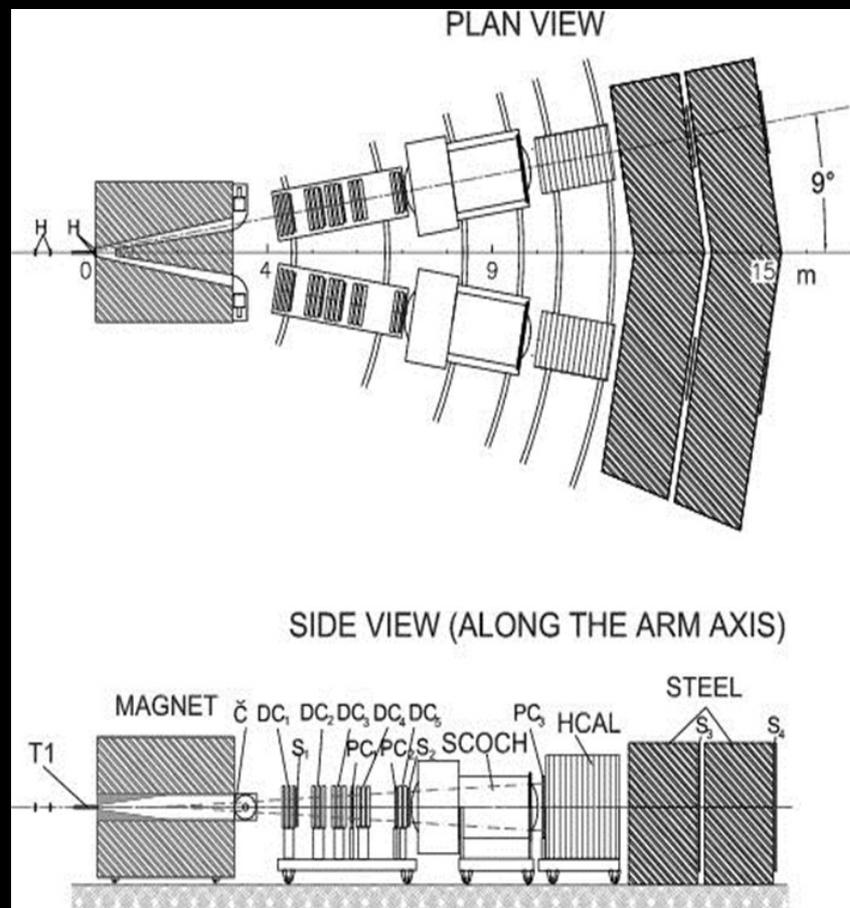
- Большие значения поляризации (асимметрии) были обнаружены при 40 ГэВ в реакциях  
 $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 n$ ,  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta n$ ,  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta'(958) n$ ,  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \omega(783) n$ ,  
 $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow f_2(1270) n$
- Для всех реакций минимум асимметрии совпадает с изменением наклона дифференциального сечения
- Во всех реакциях наблюдаются осцилляции асимметрии
- Есть указание, что асимметрия больше по величине для «тяжелых» частиц и в области  $-t=1$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> асимметрия отрицательна, тогда как для  $\pi^0$ -мезона положительна.
- **Ни одна теоретическая модель НЕ может объяснить результаты измерений.**

# Исследования инклюзивных процессов на установке ПРОЗА-М

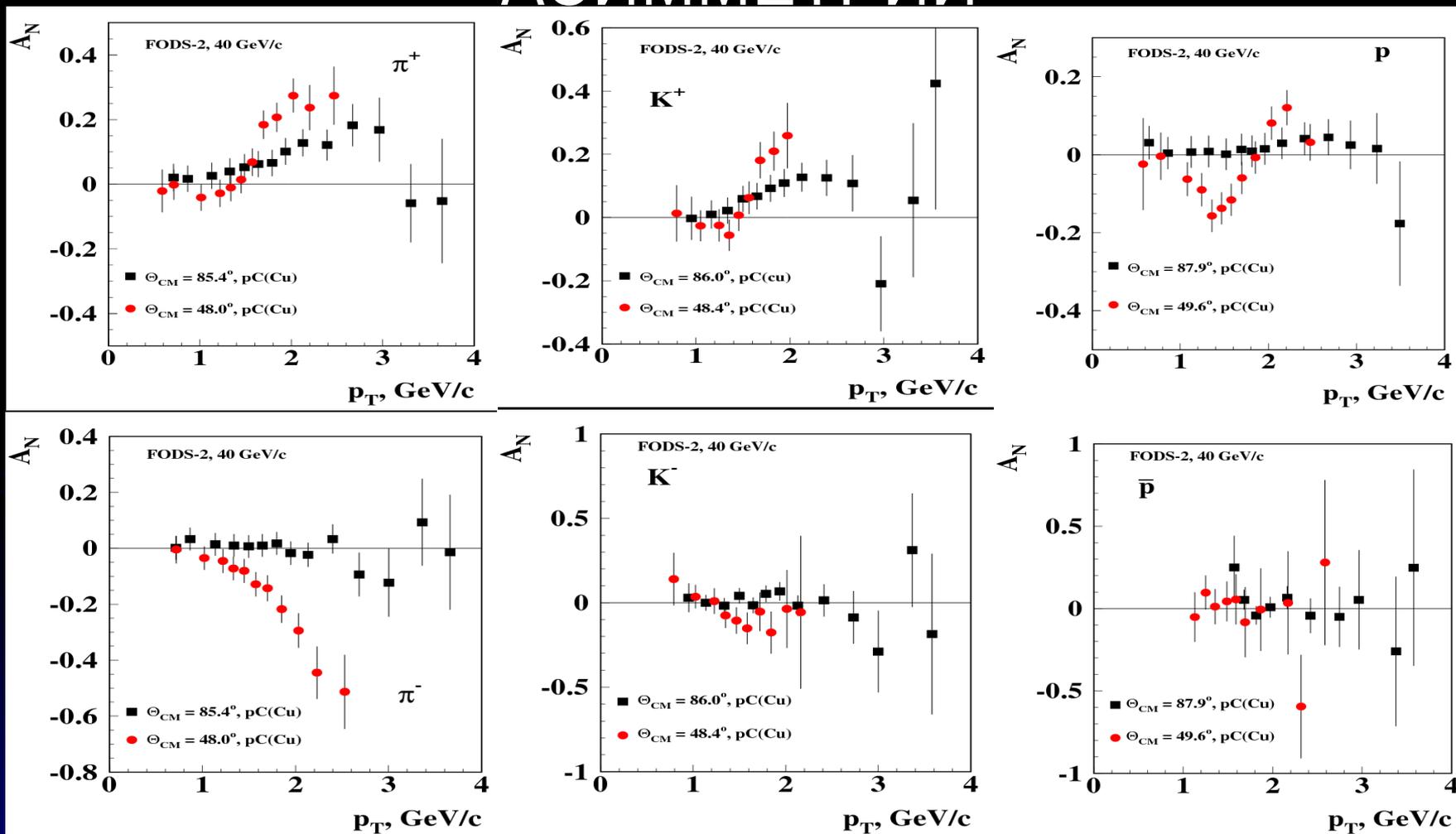


# УСТАНОВКА ФОДМ-2 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОДНОСПИНОВОЙ АСИММЕТРИИ ИНКЛЮЗИВНОГО РОЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ

- Экспериментальная установка создана для регистрации заряженных адронов под различными углами при высокой интенсивности пучка (до  $10^9$  р/цикл)
- 1994: Создан пучок поляризованных протонов (до  $3 \times 10^7$ )
- Измерение асимметрии рождения  $\pi^\pm, K^\pm, p^\pm$ :



# РЕЗУЛЬТАТЫ ФОДС ПО ОДНОСПИНОВОЙ АСИММЕТРИИ



# ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ПРОГРАММА НА УСТАНОВКЕ ФОДС

- Экспериментальная установка модифицирована таким образом, чтобы существенно (в 4 раза) увеличить апертуру и эффективность трековой системы
- Физические задачи:
  - Увеличить статистику (улучшить точность) измерений односпиновой асимметрии для изучения возможных осцилляций
  - Увеличенная апертура позволяет изучать спиновые эффекты в реакции  $p^{\uparrow} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + X$  (эффективность регистрации пионных пар возрасла в 16 раз)

# Обсуждение

- Большие значения асимметрии инклюзивного рождения пионов (ПРОЗА и ФОДС) в центральной области **НЕ** могут быть объяснены в рамках современных моделей.
- Расчеты в рамках моделей Сиверса и высших твистов предсказывают уменьшение асимметрии с ростом  $p_T$  (что противоречит экспериментам при энергиях ИФВЭ)
- Асимметрия инклюзивного рождения в области фрагментации поляризованной частицы **НЕ** зависит от энергии пучка (как и **поляризация гиперонов**), таким образом:

**Исследование спиновых эффектов при промежуточных энергиях пучка (15-60 ГэВ) – необходимый и полезный инструмент изучения поляризационных эффектов в различных реакциях**

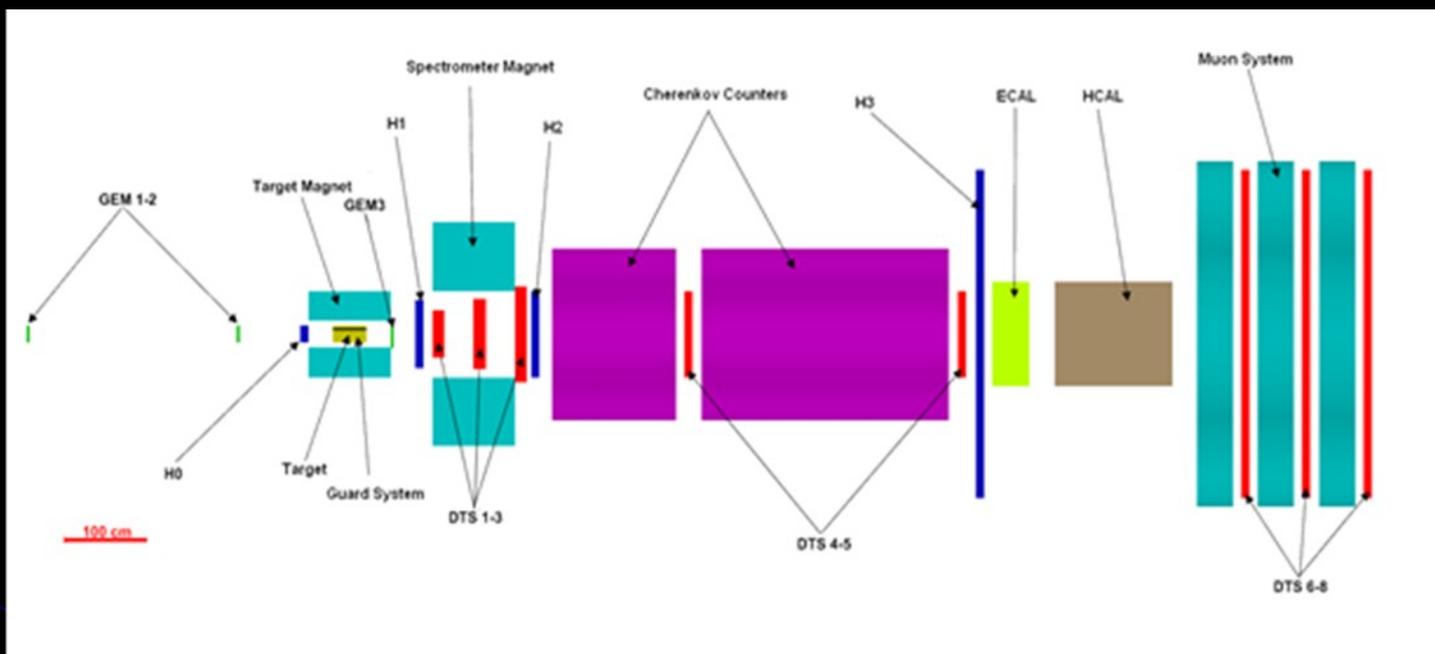
**Высокая точность измерения может быть важнее, чем высокая энергия**

# ПРОЗА – ОТВЕТЫ И ВОПРОСЫ ПО результатам инклюзивных измерений

- Асимметрия практически не зависит от энергии (E704, BNL, RHIC)
- Существенные значения асимметрии обнаружены для частиц, состоящих из легких (u- и d-) кварков.
- Асимметрия зависит от сорта взаимодействующих кварков (разная для пионных и протонных пучков). Асимметрия образования  $\eta$ -мезона больше, чем для  $\pi^0$  ? (тоже STAR)
- Асимметрия возрастает с ростом  $p_T$  в центральной области в реакциях с пионами ( $\pi p \rightarrow \pi^0 X$ )
- Наблюдается пороговый эффект и скейлинг.
- Асимметрия в области фрагментации неполяризованного пучка вблизи границы фазового объема совпадает с поляризацией эксклюзивной реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 X$
- У нас есть хорошая возможность проводить прецизионные исследования при промежуточных энергиях.
- Модели на основе PQCD не работают в этой области энергий?
- Какова асимметрия для ss-bar состояний и более тяжелых состояний ( $\phi$ -мезон и другие )?
- Большинство моделей не могут предсказать ненулевую асимметрию в центральной области и описать зависимость от поперечного момента  $p_T$ .
- It is very important to measure asymmetry in wide kinematic region in different channels to discriminate between different models.

04.10.2016

# Эксперимент СПАСЧАРМ – систематическое исследование спиновых эффектов



Детектор СПАСЧАРМ – многоцелевая установка с большой апертурой:

- исследование десятков различных реакций в большом кинематическом диапазоне,
- подавление систематических ошибок, так как исследуется зависимость от азимутального угла

# ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА СПАСЧАРМ

- **Одно-спиновые асимметрии**: систематическое исследование инклюзивных, эксклюзивных и упругих реакций в рождении частиц, состоящих из легких кварков ( $u, d, s$ )
- **Поляризация (выстроенность)** в процессах рождения гиперонов и векторных мезонов
- Изучение зависимости от кинематических параметров ( $0 < x_F < 1, 0 < p_T < 3.0, 12 < E_{\text{beam}} < 60 \text{ GeV}$ ), сорта частиц пучка, множественности, атомного номера с высокой точностью благодаря полному азимутальному углу и большой апертуре
- **Двухспиновая асимметрия**  $A_{LL}$  в рождении чармония для изучения вклада глюонов в спин протона  $\Delta G/G(x)$  при больших  $x_F$

# СТАТИСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИ- ПУЧКА

№	particle	$N_{EV}$	B/S	№	Particle	$N_{EV}$	B/S
1	$\pi^+$	$4.2 \cdot 10^9$		20	$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$5.3 \cdot 10^6$	0.2
2	$\pi^-$	$8.7 \cdot 10^9$		21	$\omega(782) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$3.5 \cdot 10^7$	0.25
3	$K^+$	$6.7 \cdot 10^8$		22	$\omega(782) \rightarrow \gamma \pi^0$	$3.8 \cdot 10^7$	2.0
4	$K^-$	$9.0 \cdot 10^8$		23	$\phi(1020) \rightarrow K^+ K^-$	$4.3 \cdot 10^6$	0.3
5	p	$9.2 \cdot 10^7$		24	$\rho^+(770) \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$2.9 \cdot 10^8$	6.0
6	$p^-$	$2.6 \cdot 10^8$		25	$\rho^-(770) \rightarrow \pi^- \pi^0$	$7.5 \cdot 10^8$	3.0
7	n	$3.2 \cdot 10^8$		26	$K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$1.7 \cdot 10^7$	3.5
8	$n^-$	$8.0 \cdot 10^7$		27	$a_0(980) \rightarrow \eta \pi^0$	$1.8 \cdot 10^7$	9.0
9	$K_L^0$	$1.0 \cdot 10^8$		28	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$	$1.4 \cdot 10^6$	0.1
10	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$4.3 \cdot 10^9$	0.1	29	$\tilde{\Lambda} \rightarrow \tilde{p} \pi^+$	$1.1 \cdot 10^6$	0.05
11	$\eta \rightarrow \gamma\gamma$	$4.2 \cdot 10^8$	0.5	30	$\Lambda \rightarrow n \pi^0$	$1.8 \cdot 10^6$	3.0
12	$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	$8.3 \cdot 10^5$	0.05	31	$\tilde{\Lambda} \rightarrow \tilde{n} \pi^0$	$7.7 \cdot 10^5$	0.45
13	$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$1.3 \cdot 10^7$	0.3	32	$\tilde{\Delta}^{++} \rightarrow p \pi^+$	$9.3 \cdot 10^6$	2.0
14	$\rho^0(770) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$4.2 \cdot 10^8$	2.5	33	$\tilde{\Delta}^{--} \rightarrow p^- \pi^-$	$2.5 \cdot 10^7$	5.5
15	$K^{0*}(892) \rightarrow K^+ \pi^-$	$1.1 \cdot 10^8$	0.7	34	$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$	$1.9 \cdot 10^6$	0.1
16	$\tilde{K}^{0*}(892) \rightarrow K^- \pi^+$	$4.3 \cdot 10^7$	2.0	35	$\tilde{\Xi}^+ \rightarrow \tilde{\Lambda} \pi^+$	$1.6 \cdot 10^6$	0.1
17	$K^{+*}(892) \rightarrow K^+ \pi^0$	$1.9 \cdot 10^7$	2.6	36	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$	$1.2 \cdot 10^6$	0.5
18	$\tilde{K}^{-*}(892) \rightarrow K^- \pi^0$	$3.8 \cdot 10^7$	1.3	37	$\Sigma^0(1385) \rightarrow \Lambda \pi^0$	$3.9 \cdot 10^6$	0.2
19	$\omega(782) \rightarrow e^+ e^-$	$1.7 \cdot 10^5$	0.5	38	$\rho^0(770) \rightarrow \mu^+ \mu^-$	$9.7 \cdot 10^4$	0.7

Большое число реакций (диссертаций?)

# СТАТИСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАОННОГО И АНТИПРОТОННОГО ПУЧКА

№	particle	$N_{EV}$	B/S	№	particle	$N_{EV}$	B/S
1	$\pi^+$	$6.7 \cdot 10^8$		13	$\rho^-(770) \rightarrow \pi^- \pi^0$	$7.5 \cdot 10^7$	3.8
2	$\pi^-$	$8.9 \cdot 10^8$		14	$\eta' \rightarrow \gamma\gamma$	$7.3 \cdot 10^5$	6.0
3	$K^+$	$8.9 \cdot 10^7$		15	$\varphi(1020) \rightarrow K^+ K^-$	$1.0 \cdot 10^7$	0.05
4	$K^-$	$4.0 \cdot 10^8$		16	$K^{0*}(892) \rightarrow K^+ \pi^-$	$1.3 \cdot 10^7$	1.2
5	p	$6.8 \cdot 10^7$		17	$\tilde{K}^{0*}(892) \rightarrow K^- \pi^+$	$6.6 \cdot 10^7$	0.8
6	$p^+$	$3.7 \cdot 10^7$		18	$K^{*-}(892) \rightarrow K^- \pi^0$	$3.4 \cdot 10^7$	2.2
7	n	$6.2 \cdot 10^7$		19	$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$	$2.5 \cdot 10^6$	0.02
8	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$4.2 \cdot 10^8$	0.13	20	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$	$1.8 \cdot 10^6$	0.02
9	$\eta \rightarrow \gamma\gamma$	$2.5 \cdot 10^7$	0.8	21	$\tilde{\Lambda} \rightarrow \bar{p} \pi^+$	$2.9 \cdot 10^5$	0.08
10	$K^0_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$2.2 \cdot 10^7$	0.25	22	$\Lambda \rightarrow n \pi^0$	$4.0 \cdot 10^5$	0.6
11	$\rho^0(770) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$6.8 \cdot 10^7$	2.7	23	$\Sigma^- \rightarrow n \pi^-$	$3.1 \cdot 10^6$	5.0
12	$K^0_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$4.2 \cdot 10^6$	1.1				

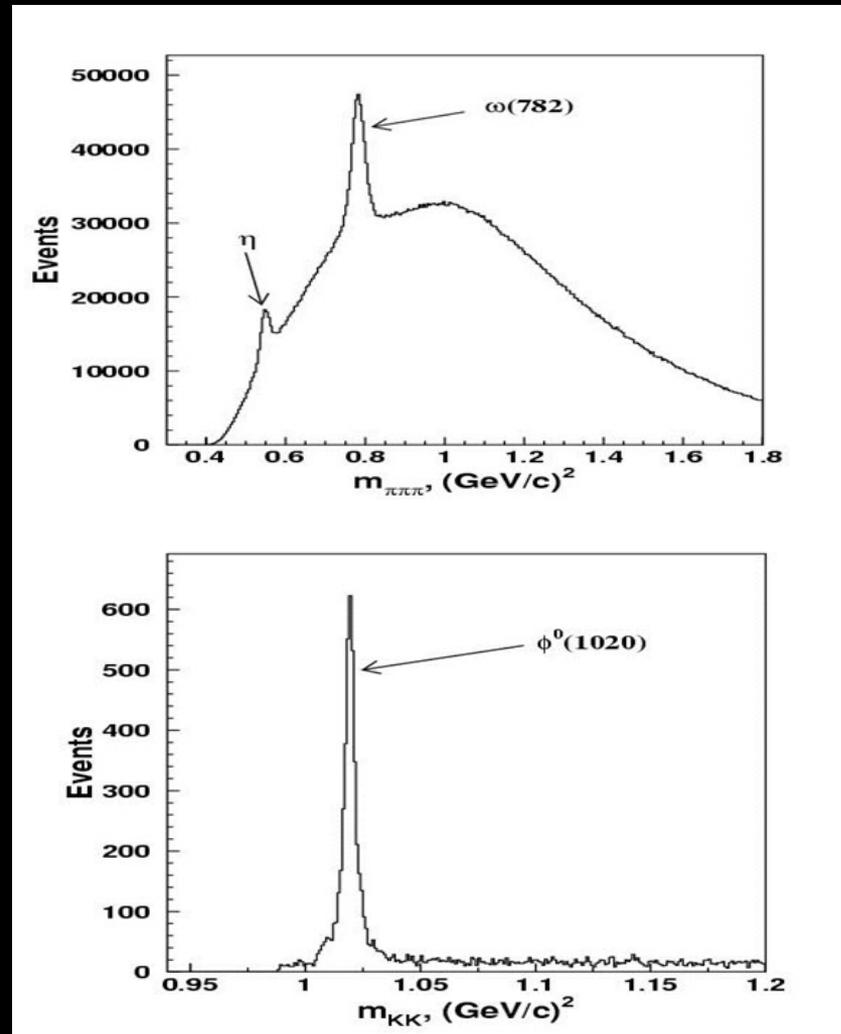
№	частица	$N_{EV}$	S/B	№	частица	$N_{EV}$	S/B
1	$\pi^+$	$2.1 \cdot 10^8$		7	n	$1.6 \cdot 10^7$	
2	$\pi^-$	$2.6 \cdot 10^8$		8	$\tilde{n}$	$1.4 \cdot 10^8$	
3	$K^+$	$1.7 \cdot 10^7$		9	$\Lambda \rightarrow \bar{p} \pi$	$2.1 \cdot 10^6$	10
4	$K^-$	$2.2 \cdot 10^7$		10	$\Lambda \rightarrow \tilde{n} \pi$	$1.1 \cdot 10^6$	0.13
5	p	$1.6 \cdot 10^7$		11	$\Delta^{--} \rightarrow \bar{p} \pi$	$4.2 \cdot 10^7$	0.14
6	$\bar{p}$	$1.8 \cdot 10^8$		12	$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$	$1.0 \cdot 10^5$	10

# СТАТИСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТОННОГО ПУЧКА (50 ГЭВ)

№	particle	$N_{EV}$	B/S	№	particle	$N_{EV}$	B/S
1	$\pi^+$	$6.1 \cdot 10^9$		17	$\rho^+(770) \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$3.0 \cdot 10^8$	2.5
2	$\pi^-$	$3.6 \cdot 10^9$		18	$\rho^-(770) \rightarrow \pi^- \pi^0$	$1.5 \cdot 10^8$	3.2
3	$K^+$	$5.5 \cdot 10^8$		19	$a_0(980) \rightarrow \eta \pi^0$	$5.7 \cdot 10^6$	0.8
4	$K^-$	$2.5 \cdot 10^8$		20	$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$7.8 \cdot 10^6$	0.25
5	$p$	$4.7 \cdot 10^9$		21	$\omega(782) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$3.0 \cdot 10^7$	0.7
6	$p^0$	$2.3 \cdot 10^6$		22	$K^{*+}(892) \rightarrow K^+ \pi^0$	$3.4 \cdot 10^7$	3.5
7	$n$	$3.5 \cdot 10^9$		23	$\tilde{K}^{*-}(892) \rightarrow K^- \pi^0$	$9.7 \cdot 10^6$	1.4
8	$n^0$	$2.5 \cdot 10^6$		24	$\omega(782) \rightarrow \gamma \pi^0$	$7.8 \cdot 10^6$	0.4
9	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$2.5 \cdot 10^9$	0.11	25	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$	$2.3 \cdot 10^7$	0.1
10	$\eta \rightarrow \gamma\gamma$	$1.3 \cdot 10^8$	0.4	26	$\Lambda \rightarrow n \pi^0$	$2.1 \cdot 10^7$	1.5
11	$\phi(1020) \rightarrow K^+ K^-$	$3.7 \cdot 10^6$	0.04	27	$\Delta^{++} \rightarrow p \pi^+$	$1.0 \cdot 10^9$	1.7
12	$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$	$3.5 \cdot 10^7$	0.02	28	$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$	$3.5 \cdot 10^7$	0.12
13	$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$6.7 \cdot 10^7$	1.1	29	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$	$3.5 \cdot 10^7$	4.0
14	$\rho^0(770) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$3.6 \cdot 10^8$	2.7	30	$\Sigma^0(1385) \rightarrow \Lambda \pi^0$	$9.8 \cdot 10^7$	1.3
15	$K^{0*}(892) \rightarrow K^+ \pi^-$	$5.8 \cdot 10^7$	1.3	31	$\omega(782) \rightarrow e^+ e^-$	$2.0 \cdot 10^5$	0.25
16	$\tilde{K}^{0*}(892) \rightarrow K^- \pi^+$	$3.1 \cdot 10^7$	0.8	32	$\rho^0(770) \rightarrow \mu^+ \mu^-$	$1.0 \cdot 10^5$	0.25

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ

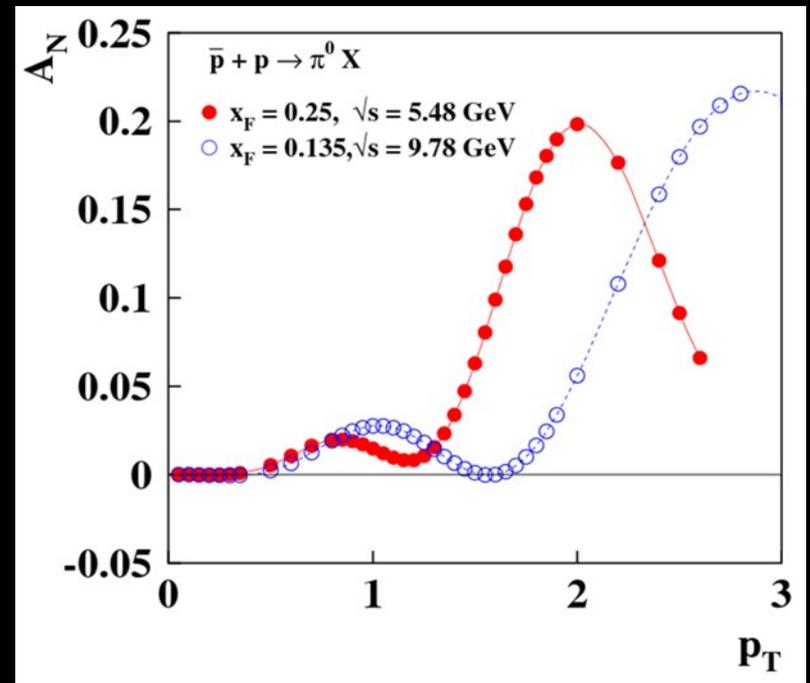
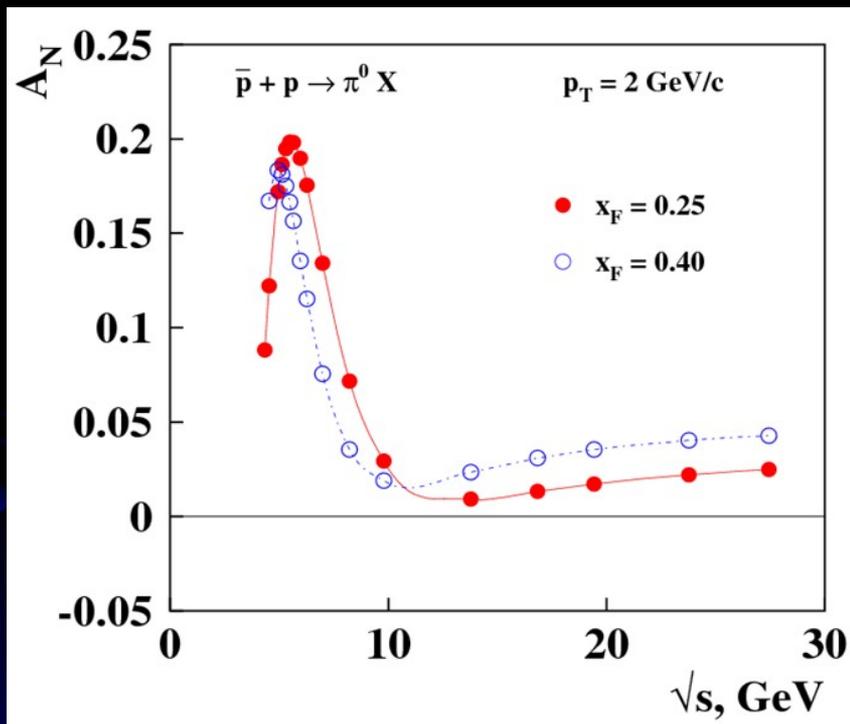
- Ошибки измерения односпиновой асимметрии в реакциях  $\pi^+ p \rightarrow \omega(782) X, \rho X, \eta'(958) X$  составят  $0.3 \div 3\%$  для различных кинематических интервалов
- Ожидаемая точность измерений в реакции  $\pi^+ p \rightarrow f_2(1270) X$  будет еще лучше ( $0.1 \div 1\%$ )



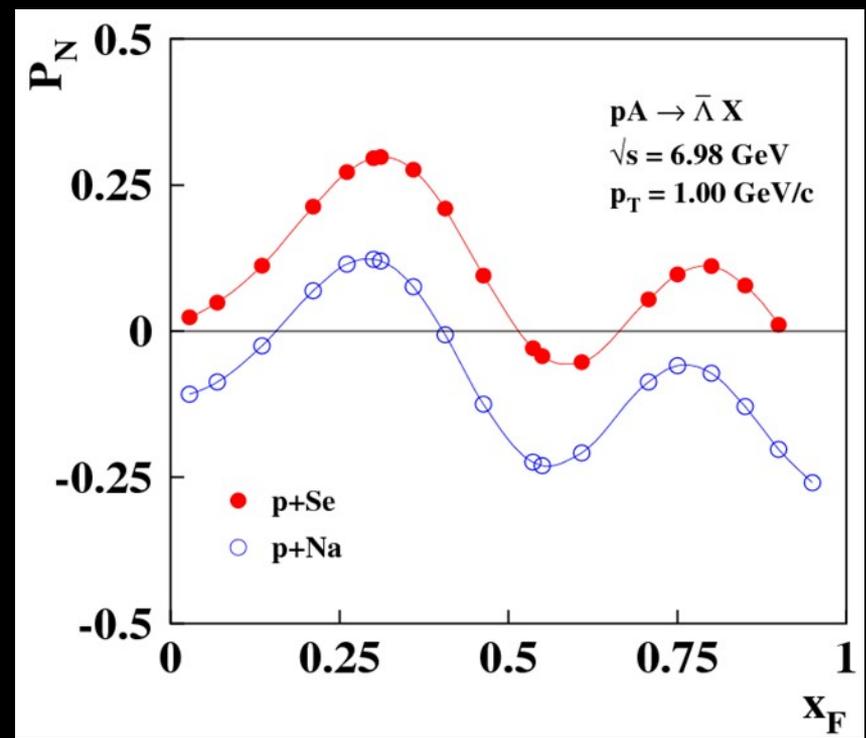
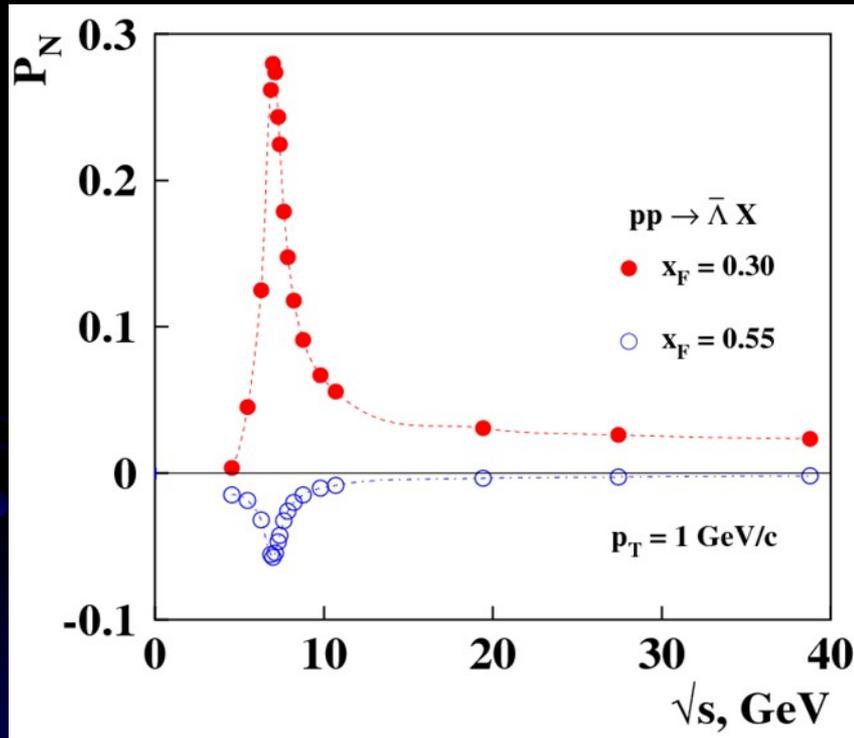
# ИЗУЧЕНИЕ ЭКСКЛЮЗИВНЫХ РЕАКЦИЙ

- Измерение в эксклюзивных реакциях с регистрацией заряженных частиц. На установке ПРОЗА в нескольких реакциях с фотонами в конечном состоянии получены значительные асимметрии, достигающие до 30-40%, и осцилляции.
- Ожидается увеличение статистики примерно на порядок в реакциях  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \omega(782)n$  и  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta'(958)n$ , а также в 3-4 раза в реакциях  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow f_2(1270)n$  и  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow a_2(1320)n$ .
- Впервые будет измерена асимметрия в реакции  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow a_0(980)n$ , когда  $a_0(980)$  распадается на  $\eta(550)$  и  $\pi^0$ . (ожидается эффект более 50%).
- Данные по эксклюзивным реакциям будут набираться параллельно с данными по инклюзивным реакциям.

# ПРЕДСКАЗАНИЯ В МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОГО ЦВЕТОВОГО ПОЛЯ



# ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ $\Lambda$ -ГИПЕРОНОВ В РР, И РА-СТОЛКНОВЕНИЯХ

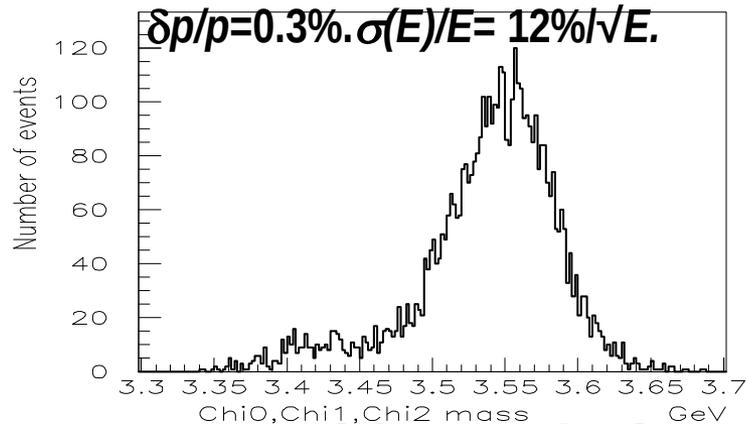


# ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА ЭТАПА 2

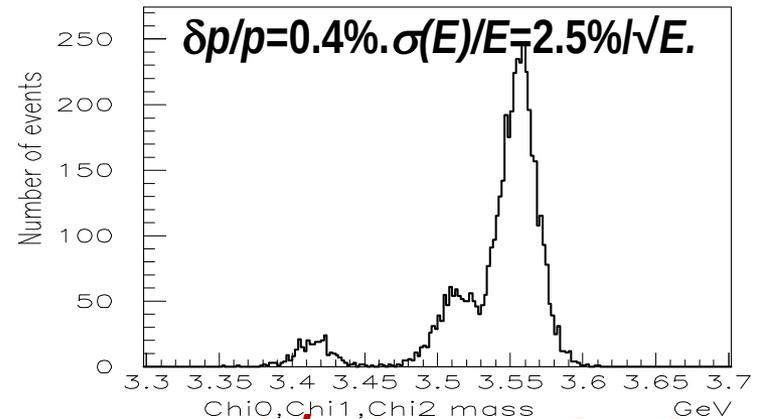
- **Этап 2** по исследованию чармония с (не)поляризованными пучками и неполяризованной мишенью:
  - Односпиновая асимметрия  $A_N$  инклюзивного рождения  $J/\psi$  и  $\chi_1/\chi_2$  на пучке поляризованных протонов. Ожидаемая статистика за 40 дней набора данных:
    - Пучок поляризованных  $p$  (40 GeV,  $5 \cdot 10^7$  p/cycle): 20000  $J/\psi$  и 2500  $\chi_1/\chi_2$  состояний.
  - Статистическая точность измерения асимметрии  $J/\psi$  - 7%
  - Измерение **соотношения сечений рождения**  $\chi_1/\chi_2$  для определения механизма рождения чармония на пучках протонов и пионов.
- **Этап 2** с поляризованными пучками и мишенью:
  - Измерение двухспиновой асимметрии  $A_{LL}$  для изучения  $\Delta G/G(x)$ .
  - Измерение  $A_{NN}$  образования пар Drell-Yan для изучения трансверсита  **$h(x)$** . Одновременно исследование  $A_{NN}$  и  $A_N$  рождения  $J/\psi$ ,  $\chi_1/\chi_2$ .
  - Двухспиновые эффекты в различных реакциях

# Моделирование рождения чармония

Without 1C fit.

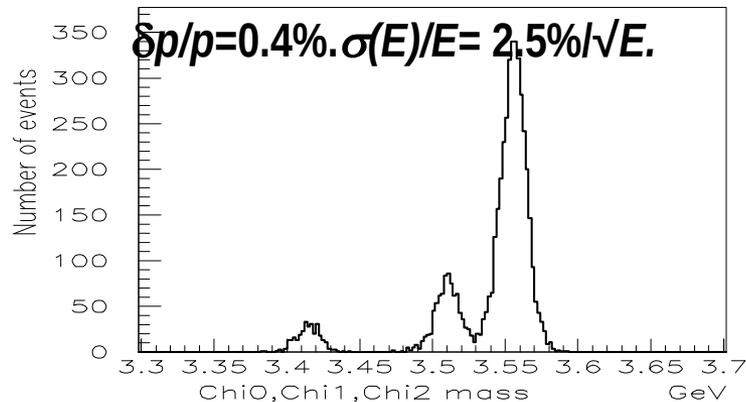


Without 1C fit.

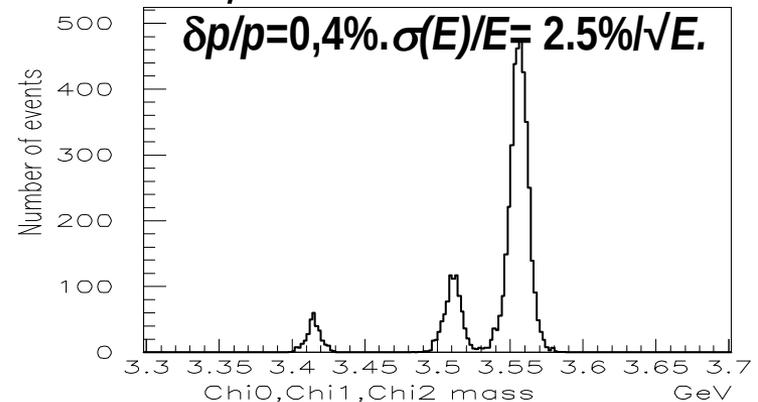


**EMC with resolution close to  $2.5\%/\sqrt{E}$  is required**

With 1C fit



$J/\psi$  momentum from PHYHIA.



# ГОТОВНОСТЬ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ - 1

- **Поляризованная мишень ОИЯИ** – настройка магнита поляризованной мишени для улучшения однородности магнитного поля
- **Охранная система** – готова к работе
- **Идентификация частиц**
  - Черенковские счетчики готовы к работе.
  - Годоскопы множественности (и TOF) – идут методические работы, возможно использование плоскости, подготовленной для эксперимента ЭПИКУР.
- **Пучковые детекторы:**
  - Три сцинтилляционных детектора, волоконный годоскоп – запуск в марте 2017 г., возможно использование камер ИТЭФ-ПИЯФ (подготовленных для ЭПИКУР).

# ГОТОВНОСТЬ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ - 2



04.10.2016

В. Мочалов, Семинар ОФВЭ ПИЯФ

33

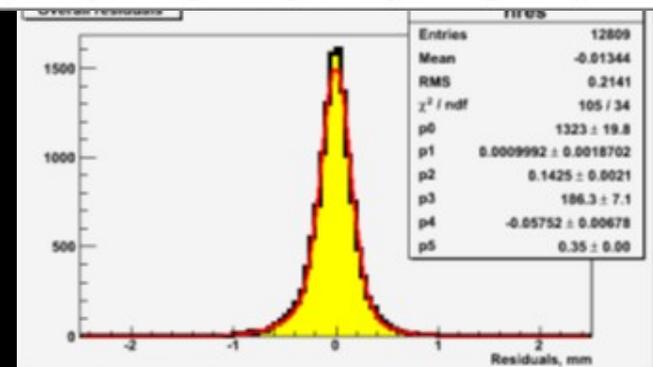
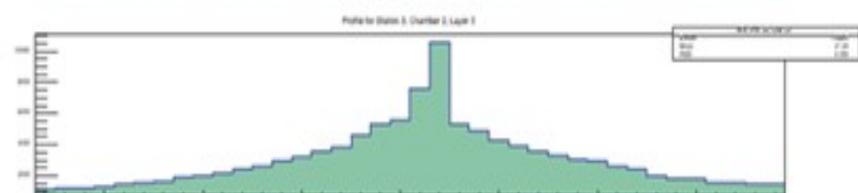
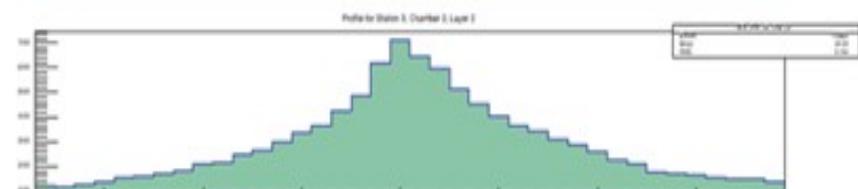
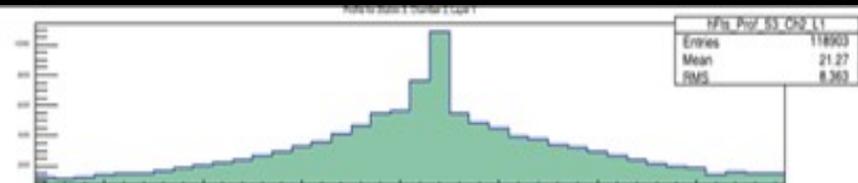
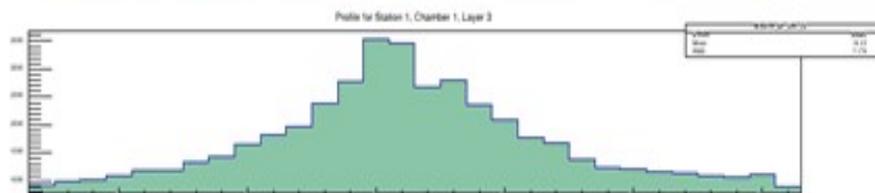
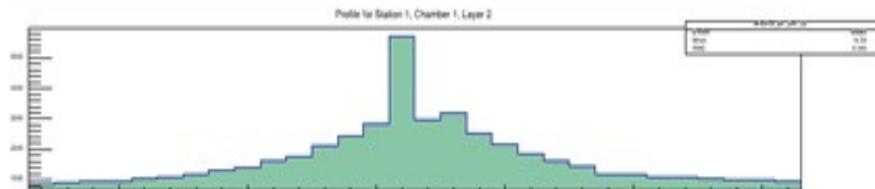
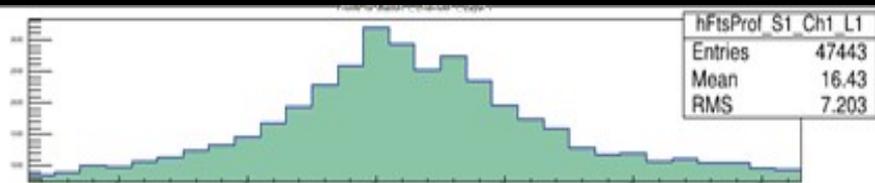
# СИСТЕМА ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР

4 станции дрейфовых трубок диаметром 3 см. изготовлены, 3 из них запущены, одна – запуск в ноябре 2016 г.

Одна станция трубок диаметром 1.5 см – готовится прототип  
Обсуждается использование камер ИТЭФ-ПИЯФ,  
подготовленных для ЭПИКУР.

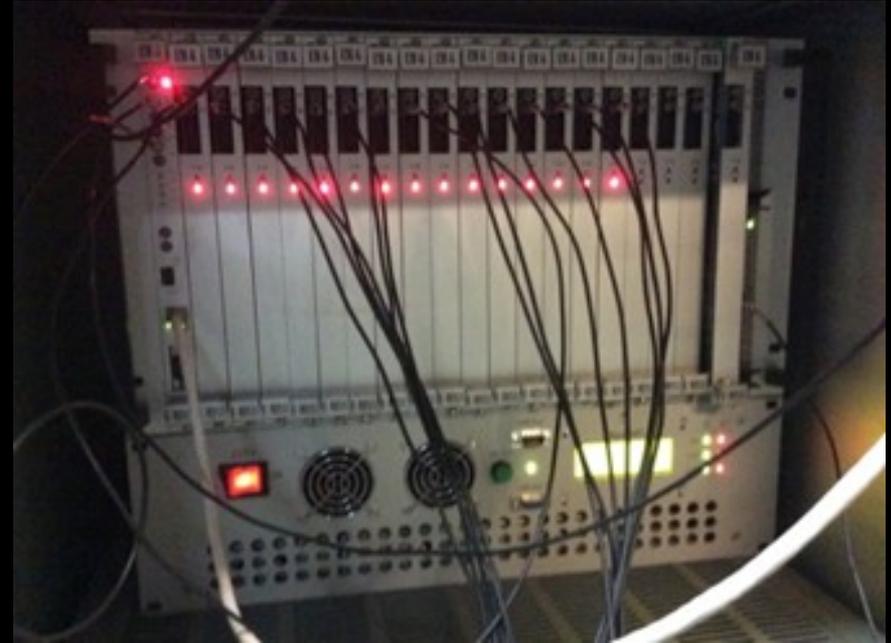


# ПРИМЕР ПРОФИЛЯ С КАМЕР



# СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

- Новая система сбора данных с параллельным считыванием крейтов:
- крейт с новыми АЦП (на рисунке) – 6-20 мсек/событие
- 2 крейта с новыми ВЦП (30-50 мсек/событие)
- новые регистры для пучковых годоскопов и пересчетки
- Достигнуто на сегодня 10000 событий/0.8 сек



**Ожидаемые значения – до 50 кЕв/цикл (фактор 2.5 –цикл длиной 2 сек., фактор 2 – улучшение работы АЦП)**

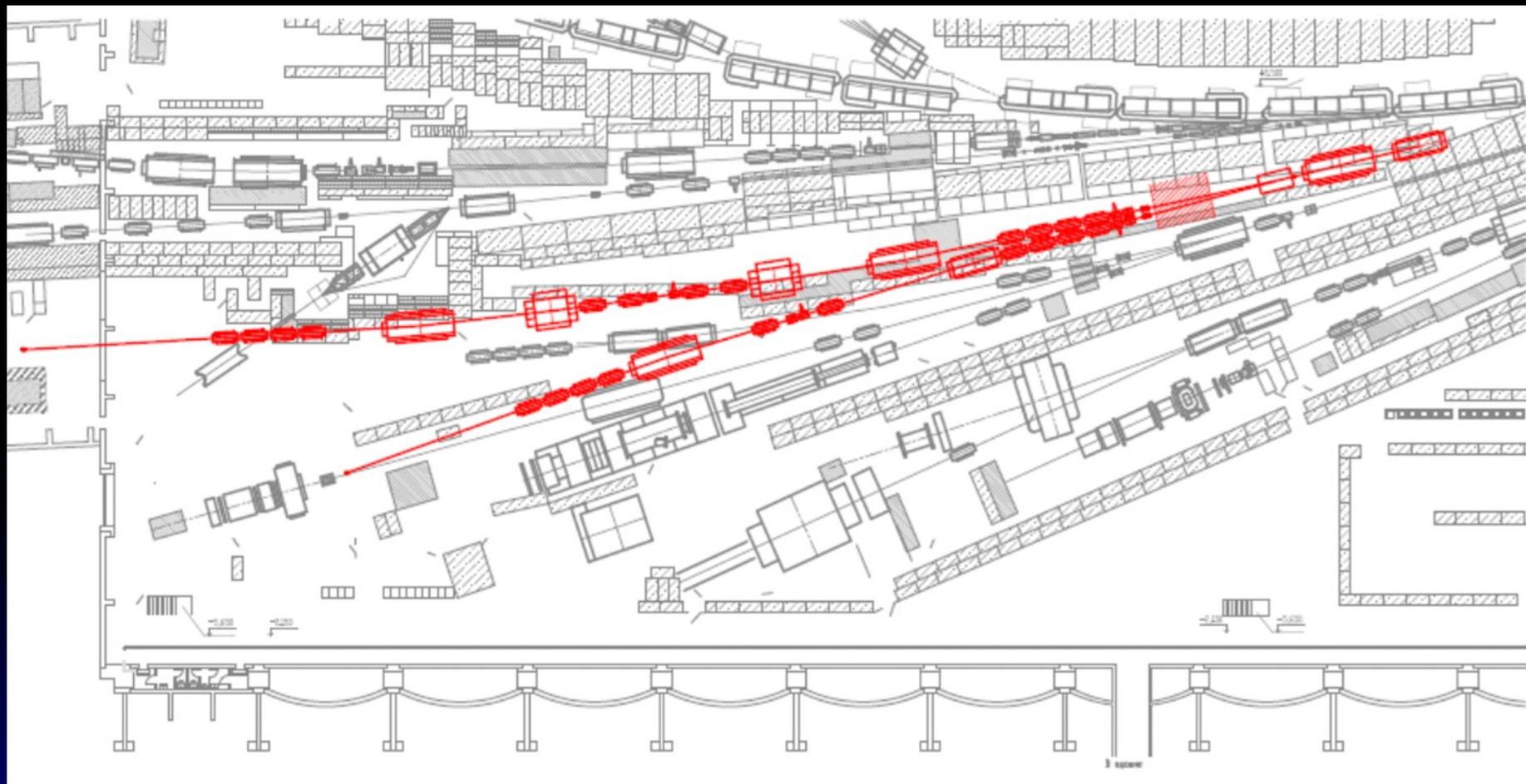
# ТЕКУЩИЕ ПЛАНЫ РАБОТ 2016-2017

- 2016 осень – настройка дрейфовой станции номер 5, настройка магнита поляризованной мишени, пробный набор с «пионами» (без черенковских счетчиков): измерение односпиновой асимметрии  $h+$ ,  $h-$ ,  $\rho(770)$ ,  $\omega(782)$ ,  $\eta'(958)$ ,  $f_0(980)$ ,  $a_0(980)$ ,  $f_2(1270)$ .  $\omega$ ,  $\delta$  isobars
- 2017 весна – исследование прототипа камеры 1 (диаметром 1.5 см), полный набор данных с «пионми»
- 2017 осень – добавление одного черенковского счетчика для исследования каонов, включая  $\phi$ -мезон
- 2017-2019 – Подготовка канала поляризованных частиц
- 2020 – перенос экспериментальной установки на канал 24

# Возможность создания поляризованного пучка протонов и антипротонов

- В настоящее время в ИФВЭ серьезно рассматривается вопрос о создании вторичных пучков в канале 24 от пучка, выведенного на внешнюю мишень (до  $2 \cdot 10^{13}$  р/цикл.)
- 24А – канал поляризованных частиц (поляризованные протоны и антипротоны, неполяризованные адроны и электроны)
- 24В – пучки адронов и электронов

# Размещение канала 24 в зале 1БВ



# Мишенная станция

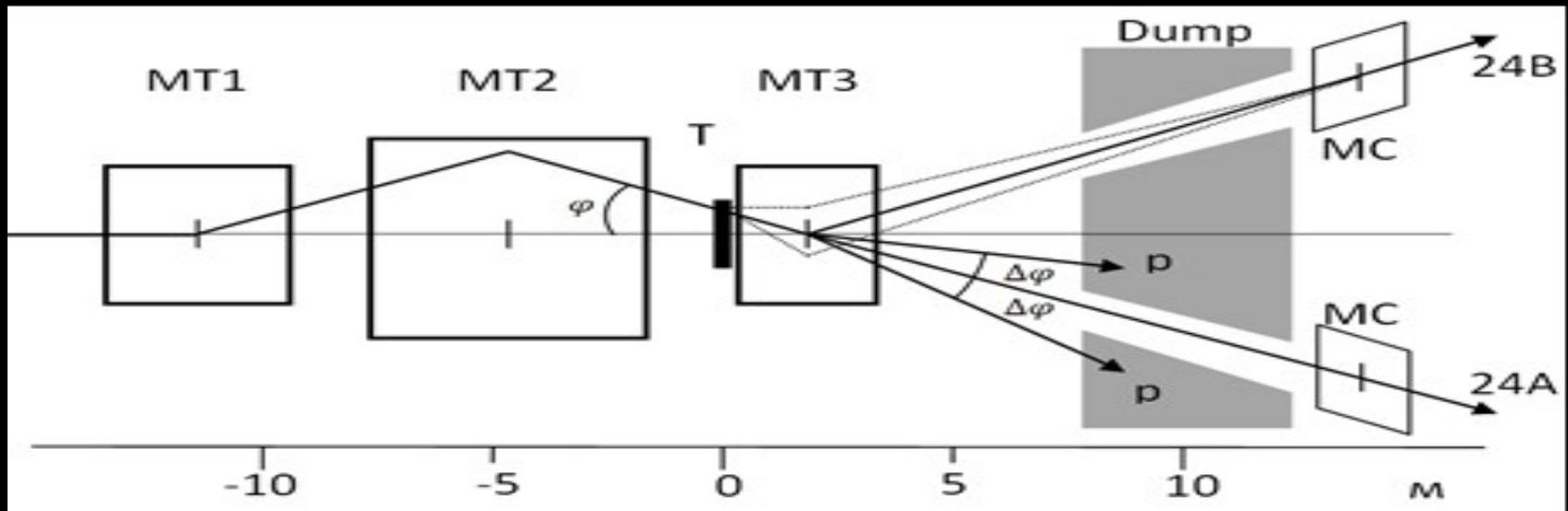
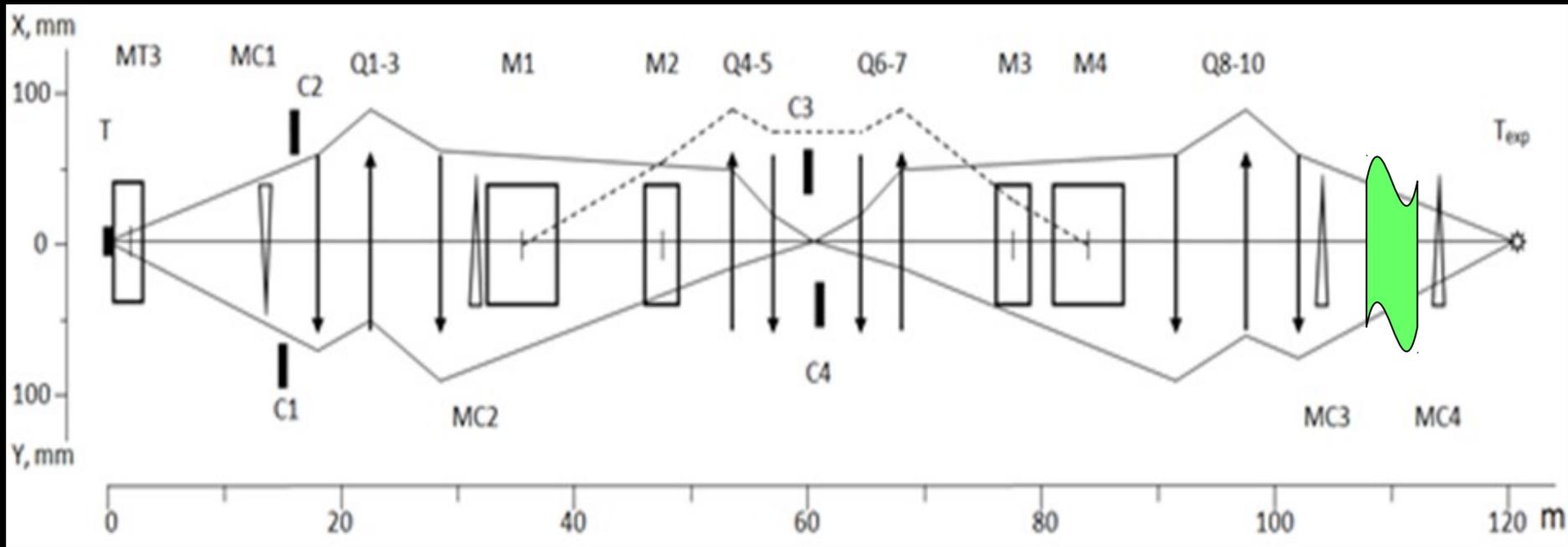


Схема мишенной станции каналов 24А и 24Б. Т – мишень, MT1÷MT3 – дипольные магниты, MC – магниты-корректоры, Dump – поглотитель. Приведенный на схеме мишенной станции вариант наведения протонного пучка на мишень соответствует отбору нейтральных вторичных частиц в канал 24А и положительно (отрицательно) заряженных частиц в канал 24Б. Пунктирными линиями показаны траектории вторичных заряженных частиц, отбираемых с канал 24Б с ненулевыми углами рождения в мишени.

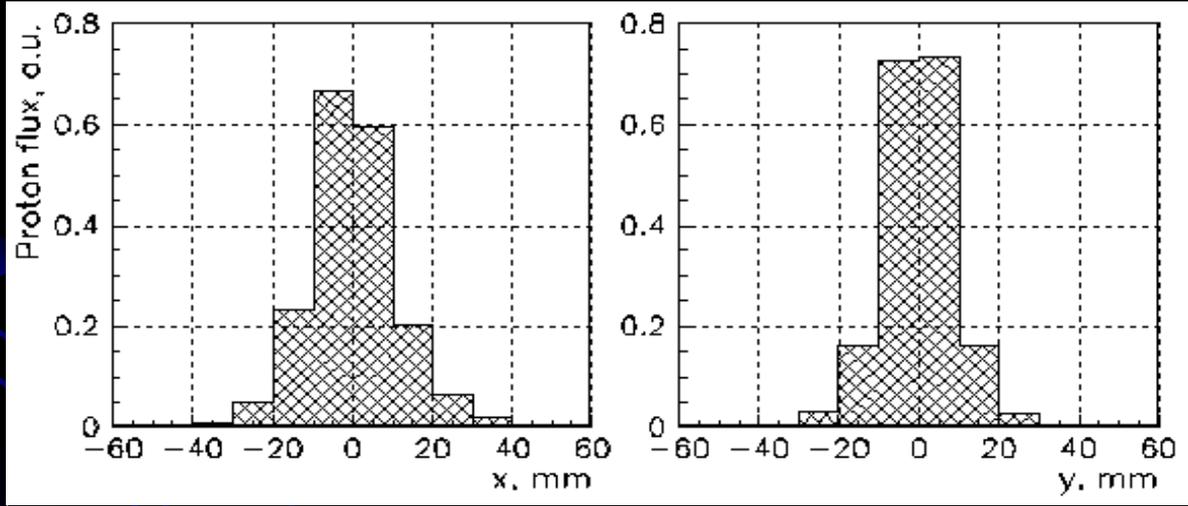
# ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА КАНАЛА 24А



Базовая оптическая схема канала 24А пучков ретоннов и антипротонов от распада  $\Delta(\Lambda)$ -гиперонов. Q – квадрупольные линзы, M – дипольные магниты, C – коллиматоры, MC – магниты-корректоры, T и T<sub>exp</sub> – мишени канала и экспериментальной установки, пункт p – дисперсия в горизонтальной плоскости для  $\Delta p/p = 10\%$ .

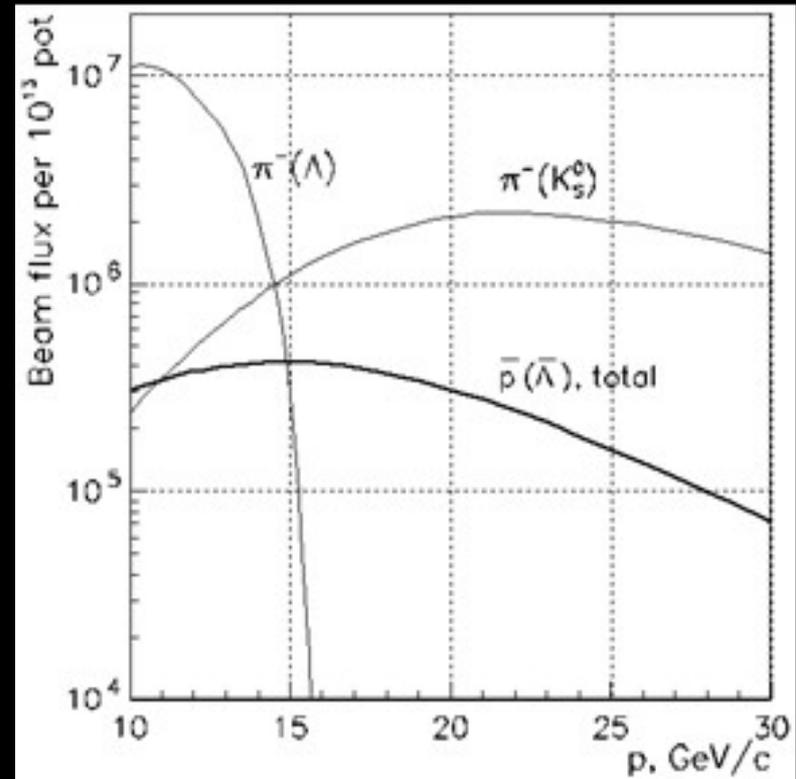
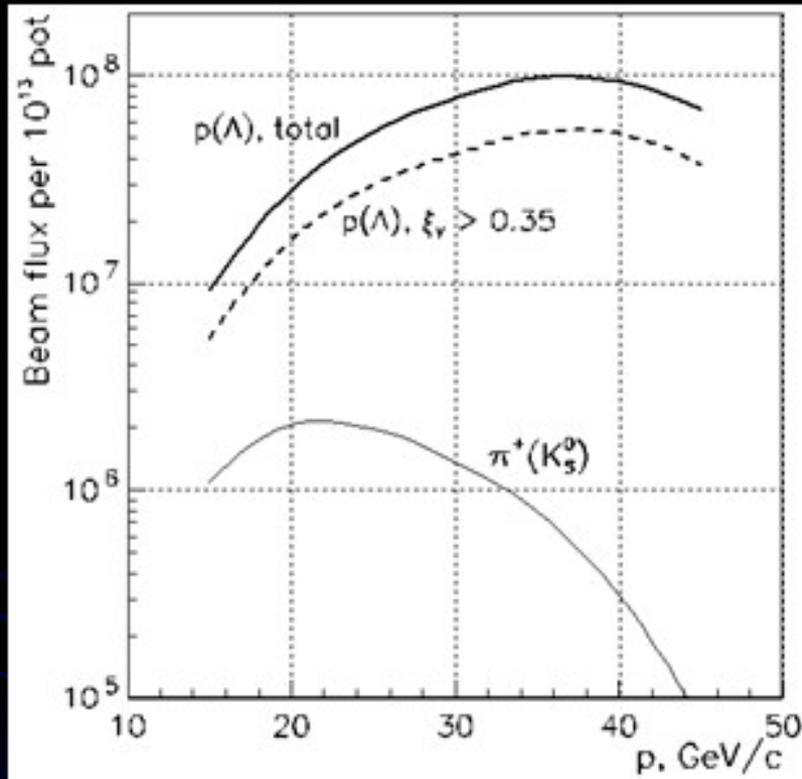
# Параметры пучка поляризованных протонов в конце канала.

	15			30			45																	
$p, \text{ГэВ}/c$	2.0	4.5	1.4	4.4	1.2	4.1	<b>15</b>			<b>30</b>			<b>45</b>											
$\sigma_x \times \sigma_y, \text{мм}$	17 × 14	19 × 16	14 × 10	17 × 11	11 × 8.7	16 × 9.0	<b>17 × 14</b>			<b>19 × 16</b>			<b>14 × 10</b>			<b>17 × 11</b>			<b>11 × 8.7</b>			<b>16 × 9.0</b>		
$\sigma_x \times \sigma_y, \text{мрад}$	1.4 × 1.5	1.3 × 1.5	1.5 × 1.8	1.3 × 1.8	1.4 × 1.7	1.4 × 1.7	<b>1.4 × 1.5</b>			<b>1.3 × 1.5</b>			<b>1.5 × 1.8</b>			<b>1.3 × 1.8</b>			<b>1.4 × 1.7</b>			<b>1.4 × 1.7</b>		
$I_p \text{ per } 10^{13} \text{ pot}$	3.5 × 10 <sup>6</sup>	9.2 × 10 <sup>6</sup>	2.1 × 10 <sup>7</sup>	7.8 × 10 <sup>7</sup>	1.5 × 10 <sup>7</sup>	6.8 × 10 <sup>7</sup>	<b>3.5 × 10<sup>6</sup></b>			<b>9.2 × 10<sup>6</sup></b>			<b>2.1 × 10<sup>7</sup></b>			<b>7.8 × 10<sup>7</sup></b>			<b>1.5 × 10<sup>7</sup></b>			<b>6.8 × 10<sup>7</sup></b>		



Профили пучка на мишени экспериментальной установки для  $p = 4.5 \text{ ГэВ}/c$  и  $\sigma_{\Delta p/p} = 1.2\%$ .

# Зависимость интенсивности и фонов протонного и **анти**протонного пучков



# Возможности повышения интенсивности антипротонного пучка

- использование мишени, помещенной внутри магнита МТЗ таким образом, чтобы ее центр находился на расстоянии  $\sim 0.7$  м от входного торца МТЗ
- использование в качестве МТЗ сверхпроводящего магнита длиной 1 м с полем  $4.5\div 5.0$  Тл.

# Система измерения поляризации

- 7 двух-координатных годоскопов для настройки пучка, измерения поляризации (в районе промежуточного фокуса) и импульса пучковых частиц (особенно важно для антипротонного пучка)
- 2 или 3 пороговых черенковских счетчика для подавления фона от пионов

# План работ по 24 каналу.

- Проект канала и установки на канале 24 готовы, готовятся рабочие чертежи, большинство элементов есть в наличии
- Проект магнита мишени готов, ведутся переговоры с возможными изготовителями
- Финансирование ожидается с 2018 г. (ФЦП)

# Сотрудничество СПАСЧАРМ

- ИФВЭ – основной состав исполнителей (несколько отделов)
- ОИЯИ – поляризованная мишень, интерпретация данных (Теор. отдел)
- МИФИ – участие в сеансах и обработке данных, электроника для GEM, создание поляризованного пучка, системы измерения поляризации
- Пражский Университет, Университет Триеста – исследования с поляризованным пучком
- ИТЭФ – обсуждается использование в эксперименте оборудования ЭПИКУРа

# Возможности сотрудничества ИФВЭ и ПИЯФ

- Участие в экспериментальных исследованиях с использованием аппаратуры ЭПИКУРа
- Участие в обработке данных
  - Новое программное обеспечение основано на FAIRRoot (AliceRoot)
- Привлечение студентов и аспирантов для участия в исследованиях

# Заключение

- В ИФВЭ начинается эксперимент по систематическому исследованию поляризованных явлений сильного взаимодействия в десятках реакций в широкой кинематической области.
- Важным элементом исследований представляется создание пучка поляризованных протонов и **антипротонов**.
-

# Backup slides



# Модели, объясняющие поперечные спиновые эффекты

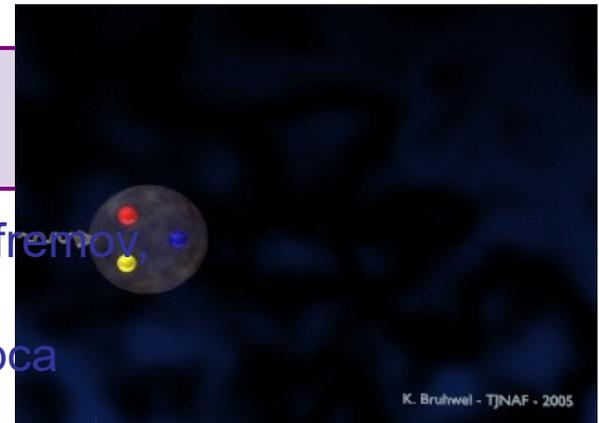
- Основные модели, объясняющие возникновение поперечной односпиновой асимметрии
- Спин-зависящая поперечная Функция фрагментации (Эффект Коллинза)

$$D_{h/q}^{\uparrow}(z, p_{\perp}) = D_{h/q}(z, p_{\perp}) + \frac{1}{2} \Delta^N D_{h/q}^{\uparrow}(z, p_{\perp}) S_q \cdot \hat{p}_{\perp}$$

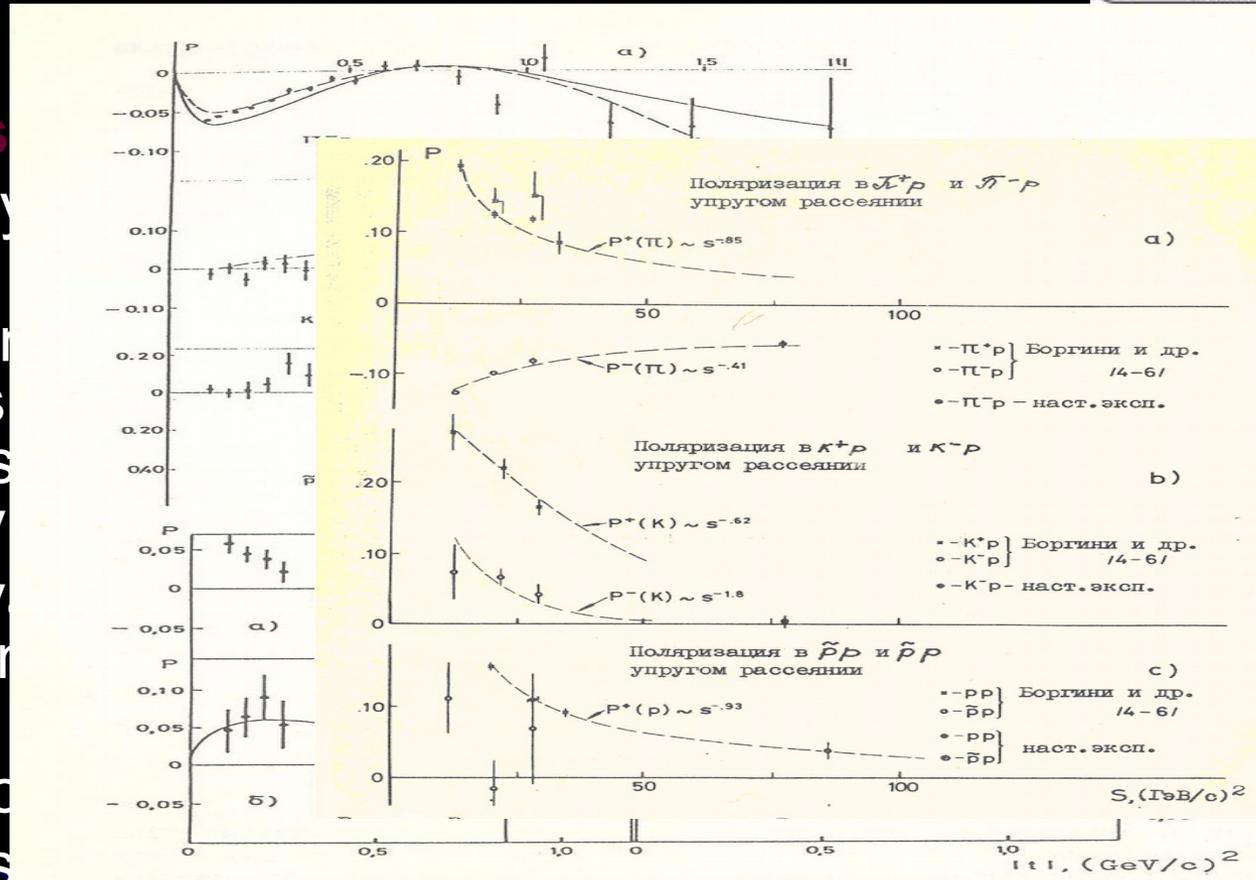
- Функция распределения партонов внутри поперечно поляризованного протона (Функция Сиверса)
  - Причина возникновения не обсуждается, например орбитальный момент

$$f_{q/p}^{\uparrow}(x, \mathbf{k}_{\perp}) = f_{q/p}(x, \mathbf{k}_{\perp}) + \frac{1}{2} \Delta^N f_{q/p}^{\uparrow}(x, \mathbf{k}_{\perp}) \mathbf{S}_T \cdot (\hat{\mathbf{P}}_{\perp} \times \mathbf{k}_{\perp})$$

- Вклад высших (Twist-3) диаграмм (Qiu-Sterman, Efremov, Koike)
  - Данные вычисления связаны с функцией Сиверса
- Комбинация разных эффектов



- Polarization of antiparticles
- Pomeron may be experimental
- Polarization in antiparticle is in general, as [S.M. Bilenky
- The energy of particles and
- Spin rotation Yang model of
- Chirality conservation



# PROZA – answers and questions

## exclusive

- Essential polarization (asymmetry) was found in all reactions
- There is indication on asymmetry oscillations
- There is a minimum at "crossover" effect region in  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 n$   
Polarization changes sign in the dip region in the differential cross-section
- Simple Regge model can not describe polarization modification required:
  - U matrix with pomeron spin-flip
  - Odderon pole is required in addition to  $\rho$ -pole
  - Prediction:  $P(\pi^0) + 2P(\eta) = P(\eta')$
  - $a_0(980)$  – see Achasov.
- Does the asymmetry magnitude increase with meson mass?
- Is it real effect for all particles? Better accuracy is required.
- Is it valid for other reactions?
- What is theoretical explanation of this effect?
- How we can discriminate between models?
- There is no predictions for the most of the reactions except  $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 n$  and:
- It is very interesting to measure these processes with good accuracy.

# ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ (ОДНОСПИНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ)

- Происхождение односпиновых асимметрий в адронных реакциях не ясно. Тем не менее, в современных феноменологических моделях есть отдельные успехи описания спиновых эффектов в непертурбативной области КХД.
  - Модели Сиверса и Коллинза.
  - В киральной кварковой модели Трошина-Тюрина описывается качественное поведение односпиновой асимметрии инклюзивных пионов и поляризации гиперонов в столкновениях неполяризованных адронов.
  - В модели эффективного цветового поля с использованием заметного числа параметров удалось описать асимметрию в нескольких десятках реакций, а также поляризацию гиперонов, антигиперонов и выстроенность (поляризация) векторных мезонов

# ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА С ПОЛЯРИЗОВАННОЙ МИШЕНЬЮ

- Детальное исследование различных поляризационных эффектов в инклюзивных процессах образования частиц и резонансов, состоящих из легких  $u$ ,  $d$  и  $s$ -кварков.
- Основной задачей проекта на первом этапе является детальное исследование поляризационных эффектов в инклюзивных процессах. Эксперименты с использованием мезонных пучков обнаружили отличную от нуля односпиновую асимметрию, как в центральной области, так и в области фрагментации пучка. Значительные эффекты можно ожидать вблизи границы фазового объема.

# 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 всей совокупности данных может позволить сделать важный шаг в определении механизма поляризационных явлений и природе таких явлений, как конфайнмент, фрагментация кварков и спонтанное нарушение киральной симметрии.

# FODS – EXPERIMENT: SINGLE SPIN ASYMMETRY OF CHARGE PARTICLES USING POLARIZED PROTON BEAM

	Value
Primary Beam Intensity, p/cycle	$10^{13}$
Beam Intensity	$3 \times 10^7$
Polarization	$39 \pm 2\%$ (theoretical)
Momentum	40 GeV
$\Delta P/P$	4.5% (theoretical)
Beam dimensions at the target region	
$\sigma$ (X)	10.6 mm
$\sigma$ (Y)	8.1 mm
$\Theta$ (X)	$\pm 6.5$ mrad
$\Theta$ (Y)	$\pm 6.0$ mrad
$\pi$ - contamination	0.8%

# МАГНИТ МИШЕННОЙ СТАНЦИИ

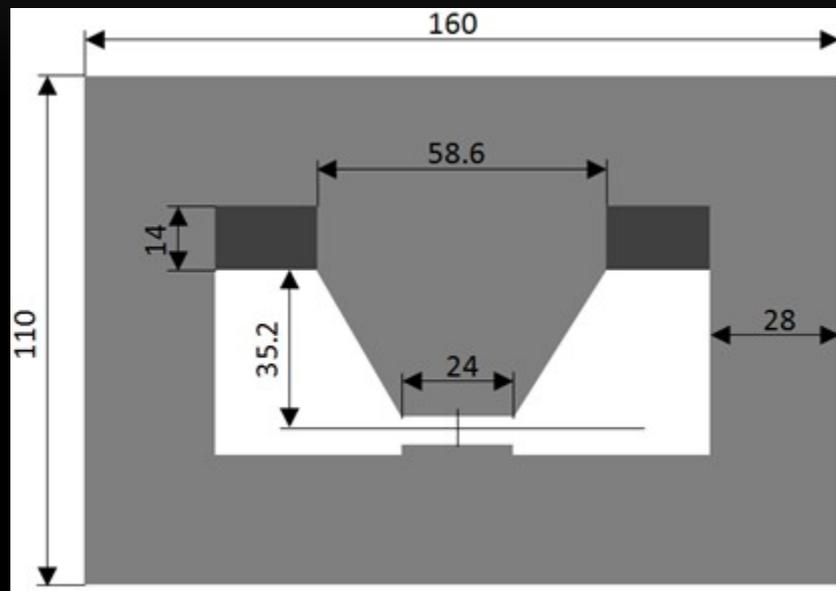


Схема поперечного сечения магнита МТЗ.  
Все размеры приведены в см

# ПАРАМЕТРЫ ПРОТОННОГО ПУЧКА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Центральный импульс пучка, ГэВ/с	15	30	45
Центральный импульс пучка, ГэВ/с	15	30	45
Размер эффективного источника протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	13.8	10.0	8.5
Коэффициент увеличения ( $y/y_0$ ) для центрального импульса пучка	1.40	2.00	2.40
Размер пучка протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	20.6 (22.1)	20.9 (21.9)	21.2 (21.7)
Размер пучка протонов в горизонтальной плоскости ( $\sigma_x$ ), мм	10.0 (32.2)	7.7 (37.0)	6.6 (35.0)
Центральный импульс пучка, ГэВ/с	15	30	45
Размер эффективного источника протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	13.8	10.0	8.5
Коэффициент увеличения ( $y/y_0$ ) для центрального импульса пучка	1.40	2.00	2.40
Размер пучка протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	20.6 (22.1)	20.9 (21.9)	21.2 (21.7)
Размер пучка протонов в горизонтальной плоскости ( $\sigma_x$ ), мм	10.0 (32.2)	7.7 (37.0)	6.6 (35.0)
Центральный импульс пучка, ГэВ/с	15	30	45
Размер эффективного источника протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	13.8	10.0	8.5
Коэффициент увеличения ( $y/y_0$ ) для центрального импульса пучка	1.40	2.00	2.40
Размер пучка протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	20.6 (22.1)	20.9 (21.9)	21.2 (21.7)
Размер пучка протонов в горизонтальной плоскости ( $\sigma_x$ ), мм	10.0 (32.2)	7.7 (37.0)	6.6 (35.0)
Центральный импульс пучка, ГэВ/с	15	30	45
Размер эффективного источника протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	13.8	10.0	8.5
Коэффициент увеличения ( $y/y_0$ ) для центрального импульса пучка	1.40	2.00	2.40
Размер пучка протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	20.6 (22.1)	20.9 (21.9)	21.2 (21.7)
Размер пучка протонов в горизонтальной плоскости ( $\sigma_x$ ), мм	10.0 (32.2)	7.7 (37.0)	6.6 (35.0)
Центральный импульс пучка, ГэВ/с	15	30	45
Размер эффективного источника протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	13.8	10.0	8.5
Коэффициент увеличения ( $y/y_0$ ) для центрального импульса пучка	1.40	2.00	2.40
Размер пучка протонов в вертикальной плоскости ( $\sigma_y$ ), мм	20.6 (22.1)	20.9 (21.9)	21.2 (21.7)
Размер пучка протонов в горизонтальной плоскости ( $\sigma_x$ ), мм	10.0 (32.2)	7.7 (37.0)	6.6 (35.0)

# Система измерения поляризации

Центральный импульс пучка (p), ГэВ/с	15	45	15	45
Размеры пучка ( $\sigma_x \times \sigma_y$ ), мм	9.6 × 8.1	2.8 × 1.6		
Расходимость пучка ( $\sigma'_x \times \sigma'_y$ ), мрад	0.50 × 0.57	0.13 × 0.24	9.6 × 8.1	2.8 × 1.6
Потери частиц, %	16	13		
Центральный импульс пучка (p), ГэВ/с	15	45	0.50 × 0.57	0.13 × 0.24
Размеры пучка ( $\sigma_x \times \sigma_y$ ), мм	9.6 × 8.1	2.8 × 1.6		
Расходимость пучка ( $\sigma'_x \times \sigma'_y$ ), мрад	0.50 × 0.57	0.13 × 0.24	16	13
Потери частиц, %	16	13		
Центральный импульс пучка (p), ГэВ/с	15	45	16	13
Размеры пучка ( $\sigma_x \times \sigma_y$ ), мм	9.6 × 8.1	2.8 × 1.6		
Расходимость пучка ( $\sigma'_x \times \sigma'_y$ ), мрад	0.50 × 0.57	0.13 × 0.24	16	13
Потери частиц, %	16	13		
<b>Потери частиц, %</b>			<b>16</b>	<b>13</b>

# SPIN FLIPPER (SHATUNOV TALK)

2 Helical magnets:

$B_{\max} = 47$  kGs;  $\lambda = 2.5$  m

Correctors:  $L = 30$  cm;  $B = 23$  kGs;

tilt =  $\pm 0.1$  rad;

Total length 6.5 m

Flipper optics: practically is equal to empty straight 6.5 m;

Spin transparency  $\approx 97\%$

