

Новая поляризационная программа на У-70

В. Мочалов

*НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ
от имени сотрудничества СПАСЧАРМ*

Введение

Эксперимент СПАСЧАРМ (СПиновые АСимметрии в образовании ЧАРМония) нацелен на систематическое исследование спиновой структуры нуклона и спиновой зависимости сильного взаимодействия антивещества и вещества с материей при энергиях до 45 ГэВ. В канале 24А ускорительного комплекса У-70 предполагается формирование поляризованных пучков протонов и антипротонов.

Планируется провести измерения односпиновых асимметрий, поляризации гиперонов и элементов спиновой матрицы векторных мезонов в десятках реакций, как на водороде, так и на различных ядрах. Для изучения спиновой структуры нуклона будут проведены исследования образования кваркония для определения вклада глюонов в спин протона.

Актуальность исследований

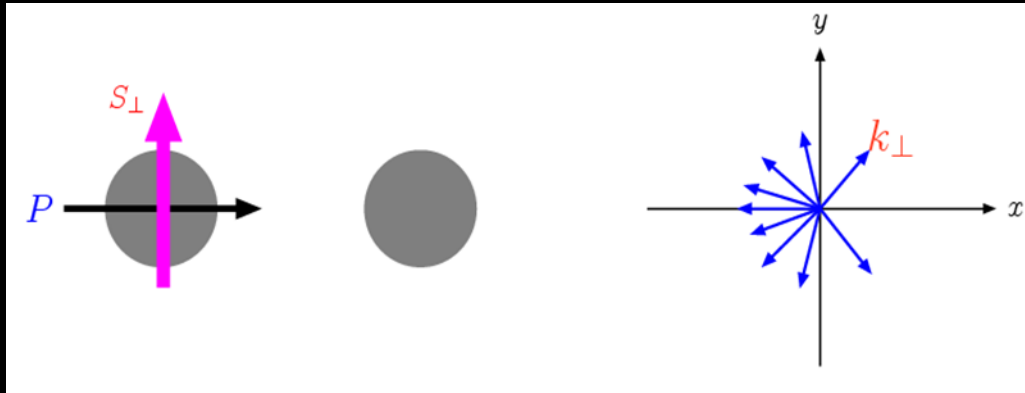
- Интерес к исследованию спиновой зависимости сильного взаимодействия связан с возможностью изучения **динамики взаимодействия и спиновой структуры адронов** через взаимодействия партонов, имеющих ненулевой спин.
- Для проведения поляризационных исследований **надо создавать пучки поляризованных частиц и/или использовать технику поляризованных мишеней.**
- 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.

Основные направления исследований

- Измерение одно (двух) спиновых поперечных асимметрий адронов с использованием поляризованного пучка протонов и антипротонов и неполяризованных пучков в инклюзивных и эксклюзивных реакциях
- Измерение поперечных поляризаций гиперонов и антигиперонов, измерение элементов матрицы плотности векторных мезонов
- Поляризация в упругом рассеянии протонов и антипротонов (полный опыт)
- Исследование спиновых эффектов в рождении кваркония

Определения

- Односпиновая асимметрия:

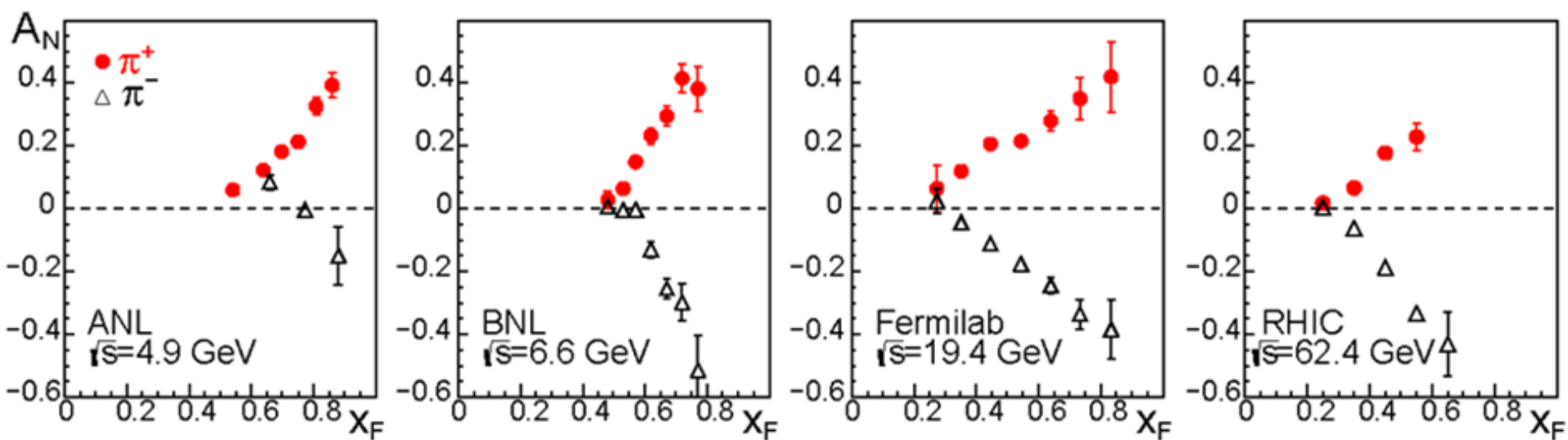


- $A_N = \frac{\sigma^{\uparrow} - \sigma^{\downarrow}}{\sigma^{\uparrow} + \sigma^{\downarrow}}$, или $A_N = \frac{\sigma_{left}^{\uparrow} - \sigma_{right}^{\uparrow}}{\sigma_{left}^{\uparrow} + \sigma_{right}^{\uparrow}}$,

- Двухспиновая асимметрия

- $A_{LL(NN)} = \frac{1}{(P_B \cdot P_T^{eff})} \cdot \frac{(I(++)-I(+-))}{(I(++)+I(+-))}$

Интерес к односпиновым исследованиям



- Асимметрия пионов большая и слабо зависит от энергии, что не объясняется СМ
- Есть возможность исследовать асимметрию для большого класса реакций

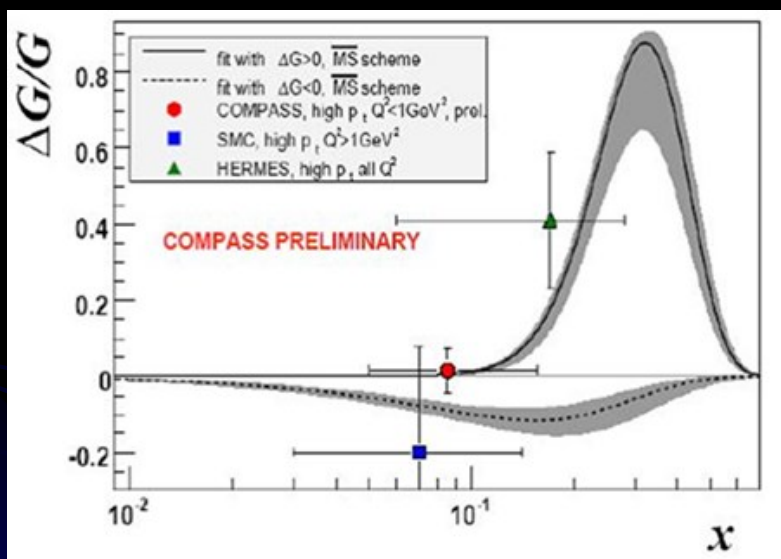
Исследование спиновой структуры протонов

Результаты исследования функции спиральности $g(x)$ показывают, что только 30% спина протона переносятся валентными и морскими кварками и антикварками.

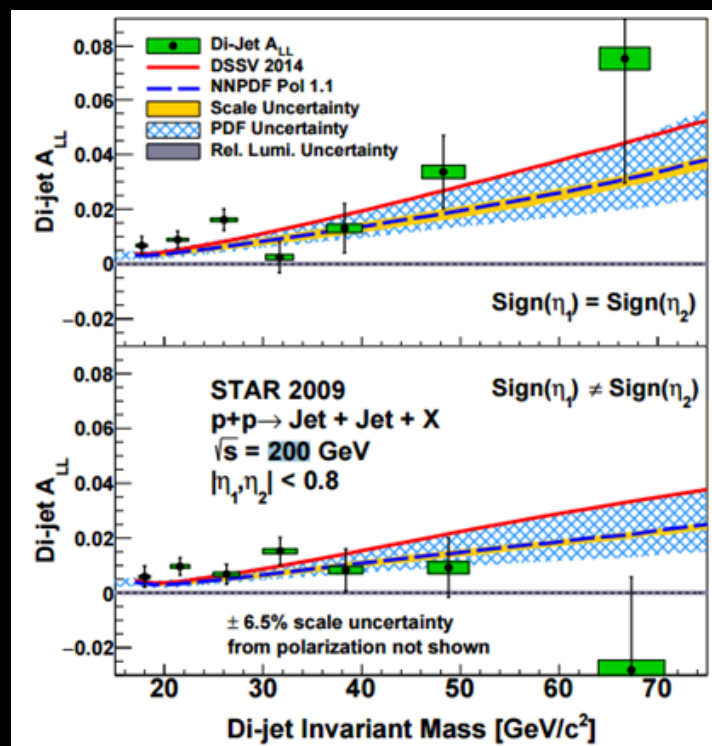
Остальные недостающие 70% спина протона могут быть объяснены вкладом глюонов и/или орбитальным моментом

Указания на ненулевую поляризацию глюонов

Глобальный анализ данных COMPASS



Данные эксперимента STAR



Концептуальный проект

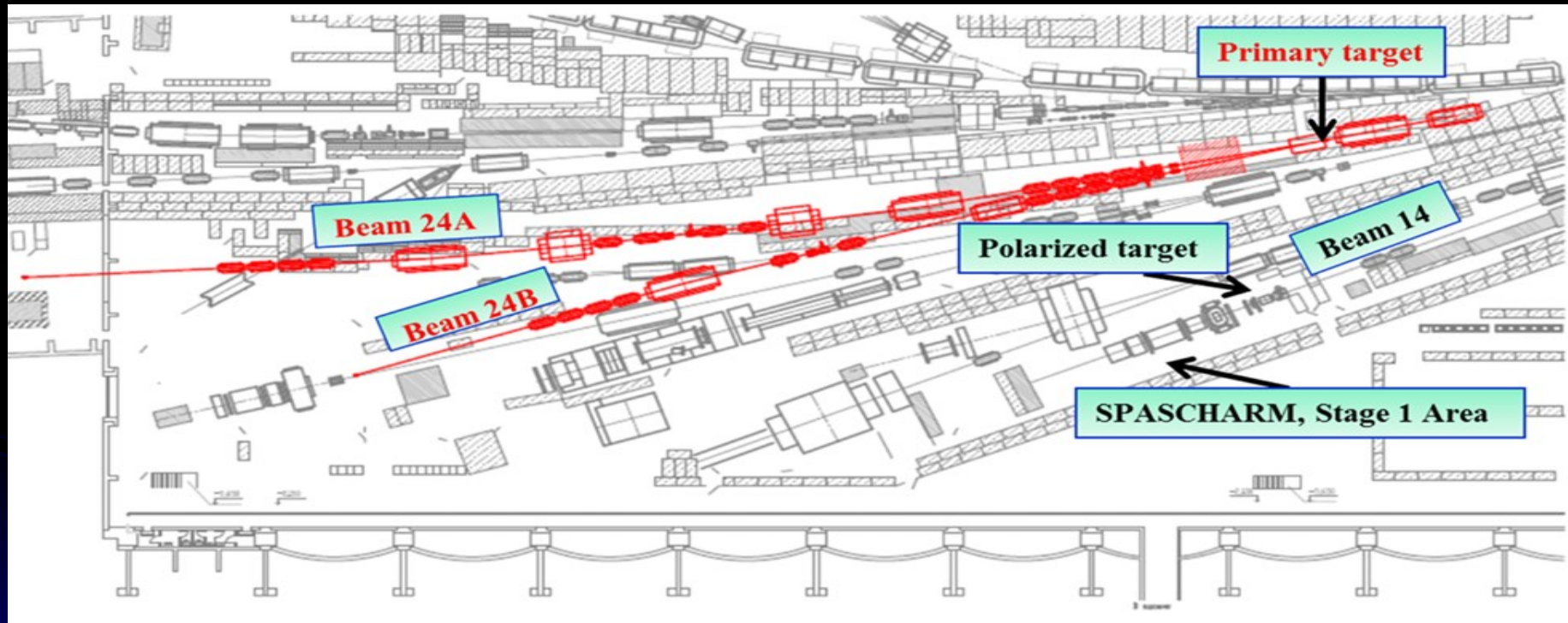
Концептуальный проект
эксперимента
СПАСЧАРМ (148 стр.) :
<http://web.ihep.su/library/prep2019/ps/2019-12.pdf>



Стадии эксперимента

- До создания канала 24 – исследования на существующем канале 14
- При начале финансирования в первой половине 2020
 - завершение рабочего проекта на канал и зону установки — 2020–2021 гг.;
 - изготовление электромагнитного калориметра типа «шашлык» — 2021–2024 гг.;
 - изготовление магнитов «змейка» и криогенного оборудования — 2021–2023 гг.;
 - изготовление детектора колец черенковского излучения — 2022–2025 гг.;
 - создание канала 24А и размещение установки на этом канале — 2023–2024 гг.;
 - создание систем измерения поляризации — 2022–2024 гг.
- Первый пробный сеанс с поляризованным пучком планируется на 2025 год.

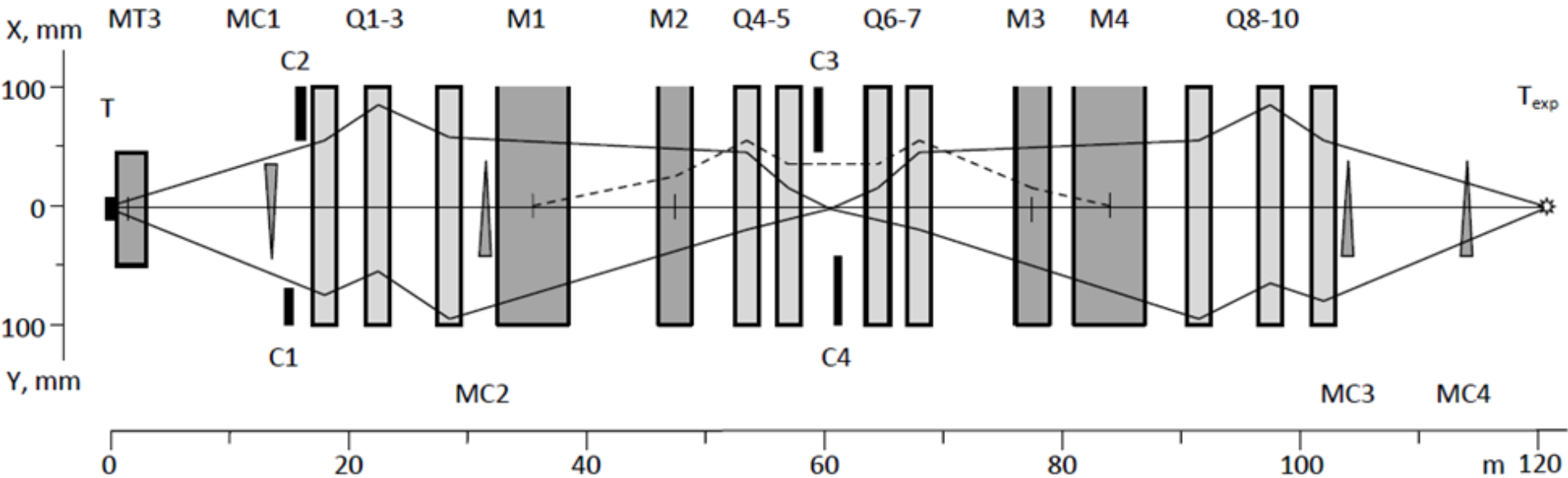
Создание канала поляризованных частиц



The polarized proton and antiproton beam project at U-70 accelerator,
Nucl.Instrum.Meth.A 901 (2018) 62-68

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890021830665X?via%3Dihub>

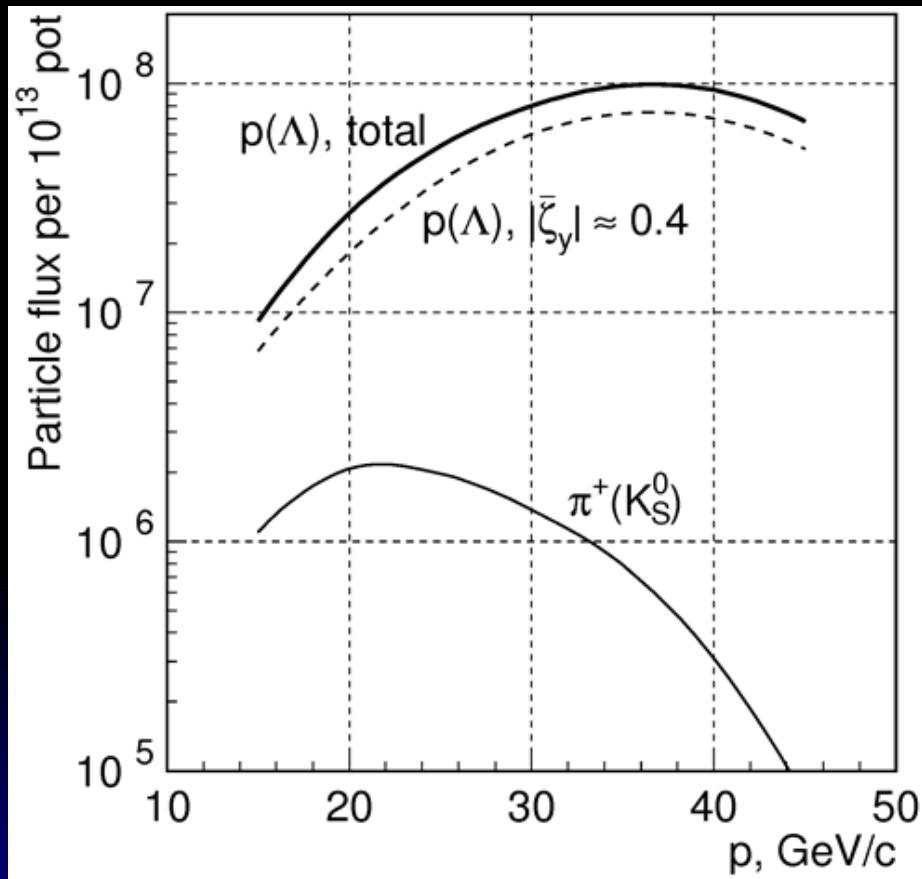
Базовая оптическая схема



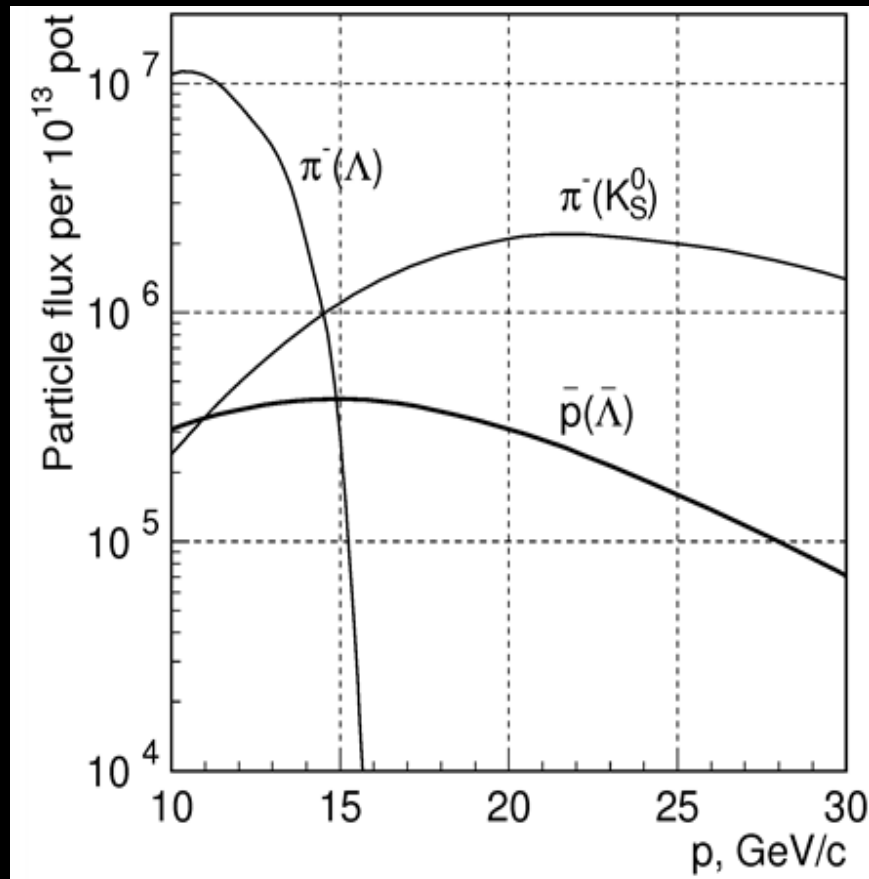
p , ГэВ/с	15		30		45	
$\sigma_{\Delta p/p}$, %	2.0	4.5	1.4	4.4	1.2	4.1
$\sigma_x \times \sigma_y$, мм	17 × 14	19 × 16	14 × 10	17 × 11	11 × 8.7	16 × 9.0
$\sigma_{x'} \times \sigma_{y'}$, мрад	1.4 × 1.5	1.3 × 1.5	1.5 × 1.8	1.3 × 1.8	1.4 × 1.7	1.4 × 1.7
I_p per 10^{13} pot	3.5×10^6	9.2×10^6	2.1×10^7	7.8×10^7	1.5×10^7	6.8×10^7

Интенсивности поляризованных пучков

Протоны

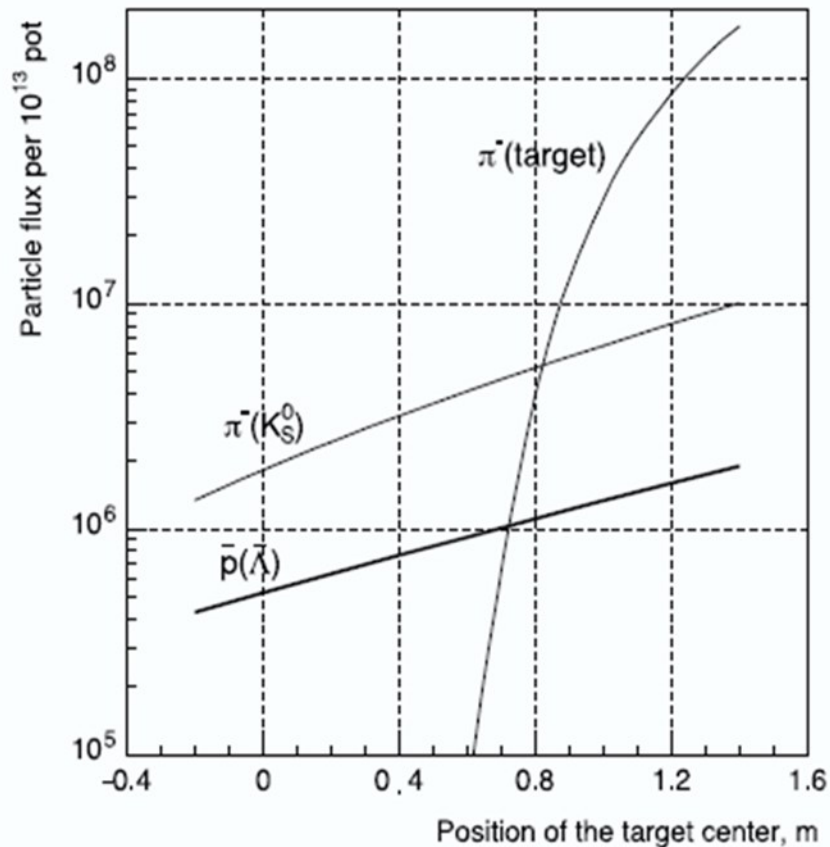


Антипротоны



**Интенсивность
поляризованного
пучка антипротонов
можно увеличить
вдвое!!!**

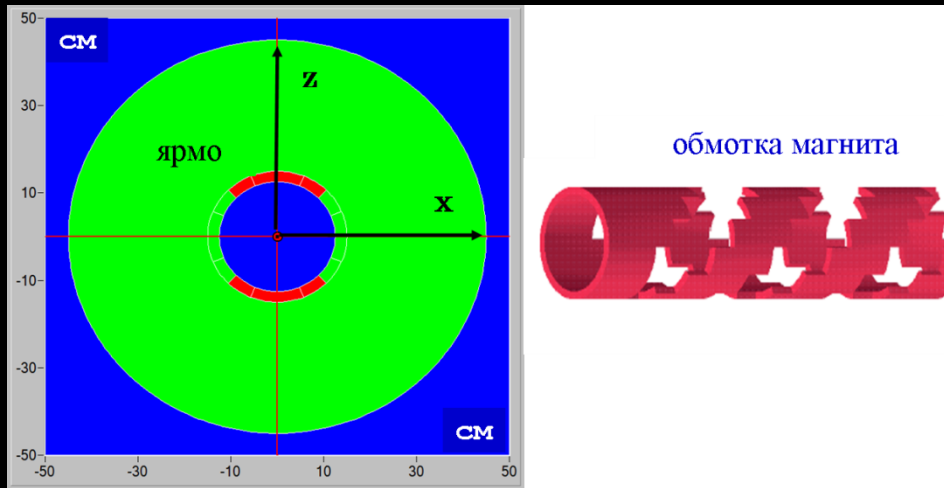
**На Рис. Зависимость
интенсивности пучка
антипротонов 16 ГэВ
от места мишени в
магните МТЗ**



Методы измерения поляризации

- Система мечения поляризации пучка в промежуточном фокусе (основана на корреляции поляризации и координаты в промежуточном фокусе)
Intern. J. of Modern Physics: Conf. Ser. Vol. 40 (2016) 1660086
- Измерение поляризации пучков
 - Абсолютный поляриметр на основе упругого рассеяния
 - J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012179
 - Journal of Physics: Conference Series **678** (2016) 012034
 - Поляриметрия на основе инклюзивных заряженных пионов (**Journal of Physics: Conference Series 678 (2016) 012028**)
 - Поляриметрия на основе эффекта Примакова

SPIN FLIPPER (TWO EXAMPLES OF IN-FLIGHT SPIN FLIPPERS, PHYS.PART.NUCL. 45 (2014) 279-282)



2 Геликоидальных магнита:

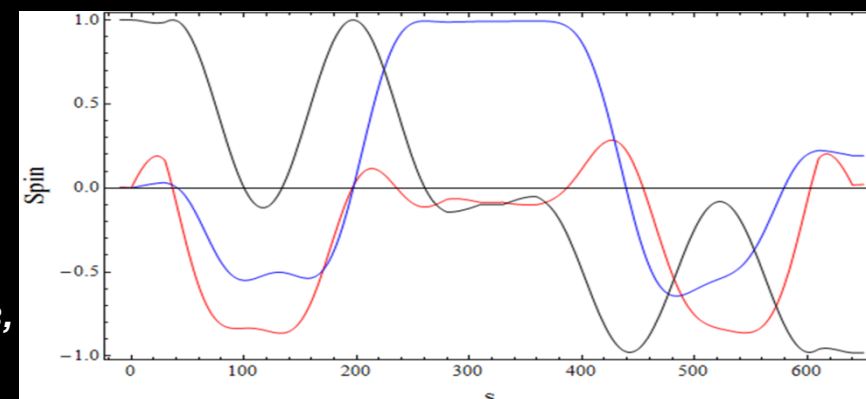
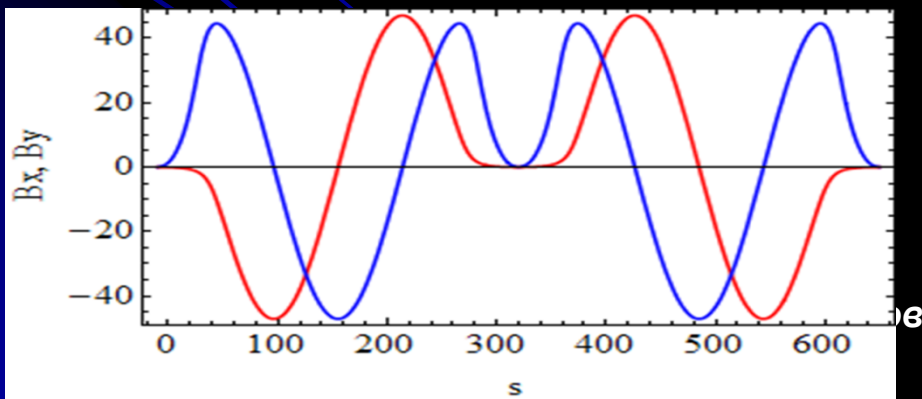
$B_{\max} = 47 \text{ kGs}$; $\lambda = 2.5 \text{ m}$

Корректоры: $L = 30 \text{ cm}$; $B = 23 \text{ kGs}$; tilt
 $= \pm 0.1 \text{ rad}$;

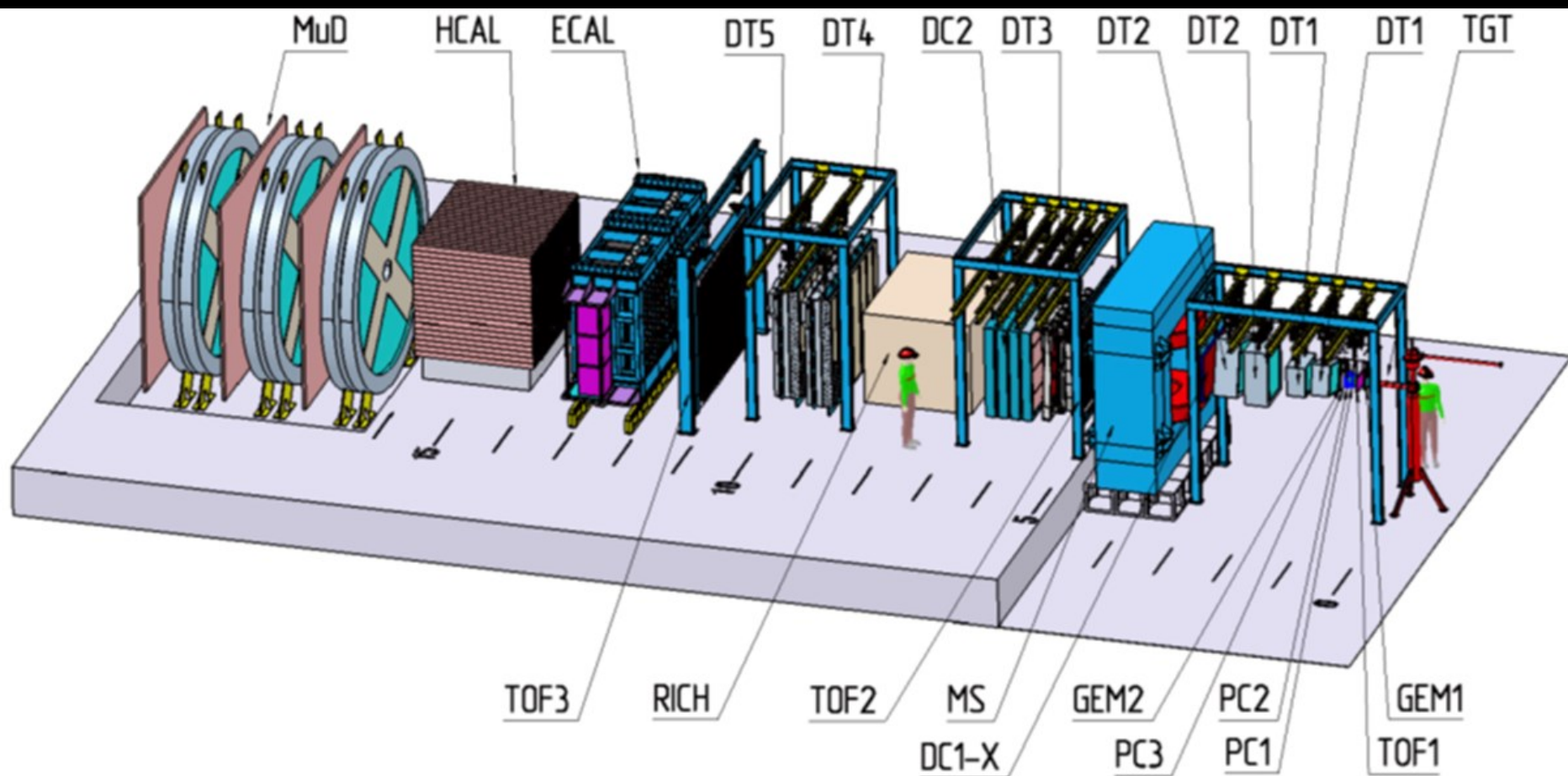
Общая длина 6.5 m

Оптика спин-флиппера практически
идентична прямому пустому
промежутку;

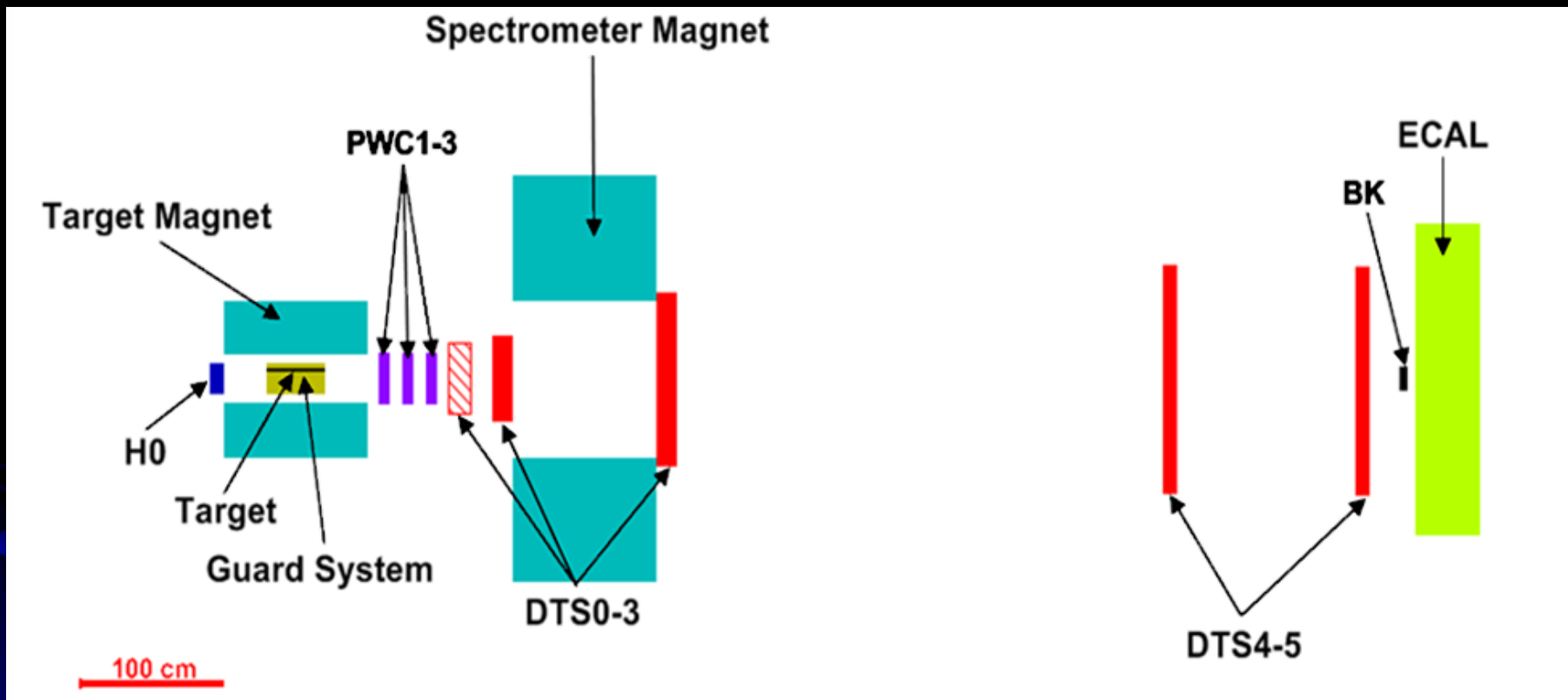
Спиновая прозрачность $\approx 97\%$



Экспериментальная установка на канале 24



Экспериментальная установка на канале 14 (в настоящее время)

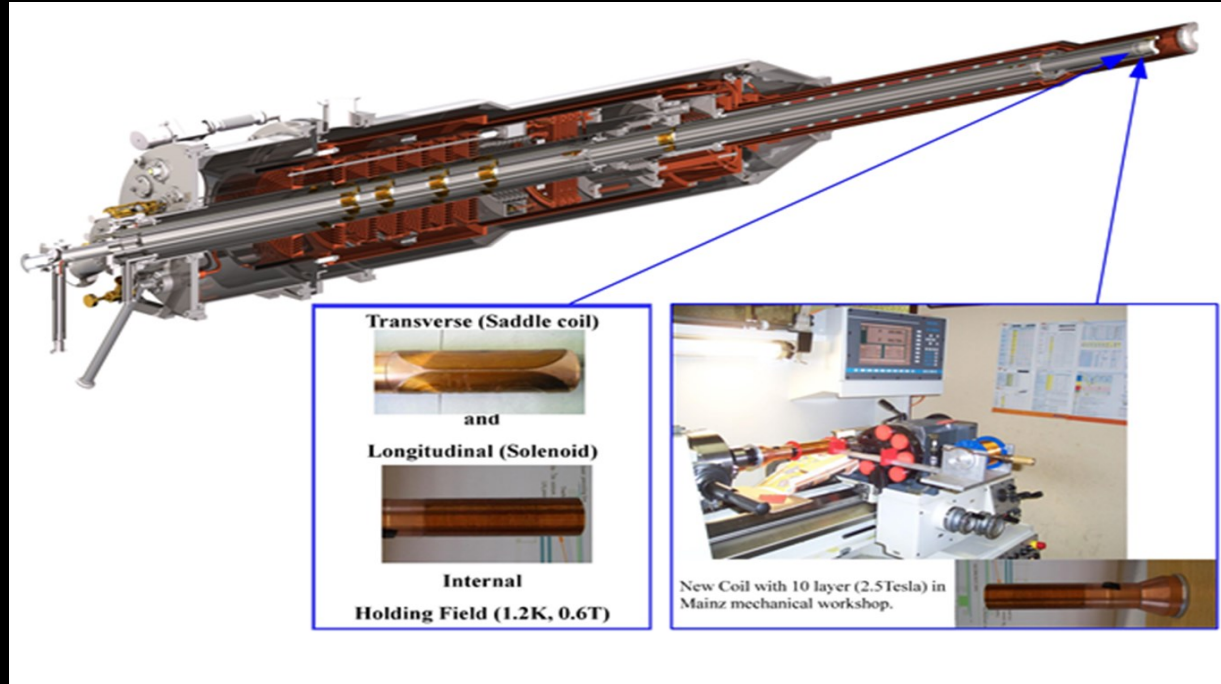


Поляризованная мишень

- Основные параметры действующей поляризованной мишени:
- химический состав — пропандиол ($C_3H_8O_2$) или пентанол ($C_5H_{12}O$);
- длина — 20 см, диаметр — 20 мм;
- поляризация — 90% для пропандиола и 75% для пентанола;
- химический фактор разбавления (отношение числа всех нуклонов к числу поляризованных протонов) — 9.5 для пропандиола и 8.4 для пентанола;
- количество вещества в мишени — 13.2 г/см^2 , что соответствует 15.2% длины взаимодействия для протонов с энергией 60 ГэВ и 10% для π^- -мезонов с энергией 34 ГэВ;
- мишень позволяет использовать в качестве рабочего вещества также аммиак, дейтерий и жидкий водород.

Мишень нового типа

The Polarized Target at the CBELSA/TAPS", NSTAR 2019, Bonn



Реализация возможности использования холодного экрана криостата для охлаждения поляризующей и удерживающей поляризацию катушек

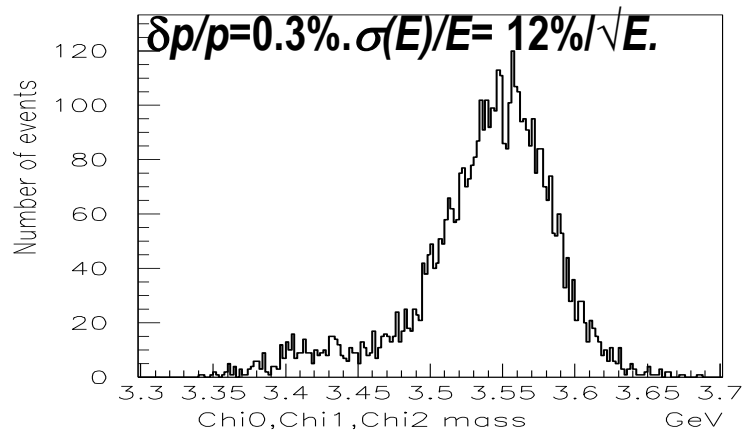
Возможность создания как продольной, так и двух поперечных (вертикальная и горизонтальная) поляризаций

Требования к установке для измерения кваркония

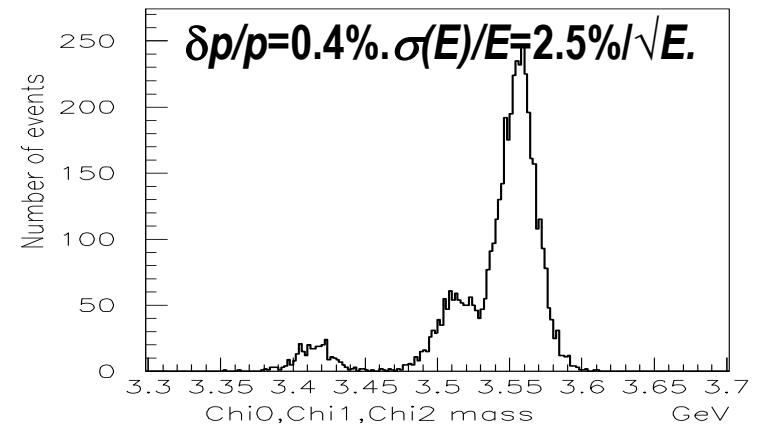
- Регистрация заряженных частиц в диапазоне от 1 до 50 ГэВ
- Регистрация гамма-квантов в диапазоне от 200 МэВ до 50 ГэВ (с возможностью перестройки энергетической шкалы при необходимости)
- Идентификация заряженных частиц в диапазоне 1÷20 ГэВ.
- Возможность регистрации распадов вторичных частиц, включая гипероны.
- Высокое координатное разрешение пучковых частиц, прежде всего для исследования упругих процессов.
- **Кроме того, для исследования чармония необходимо иметь:**
 - **Импульсное разрешение на уровне 0.4% при 10 ГэВ/с.**
 - **Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра $3\%/\sqrt{E}$.**

Необходимость высокого разрешения для исследования кваркония

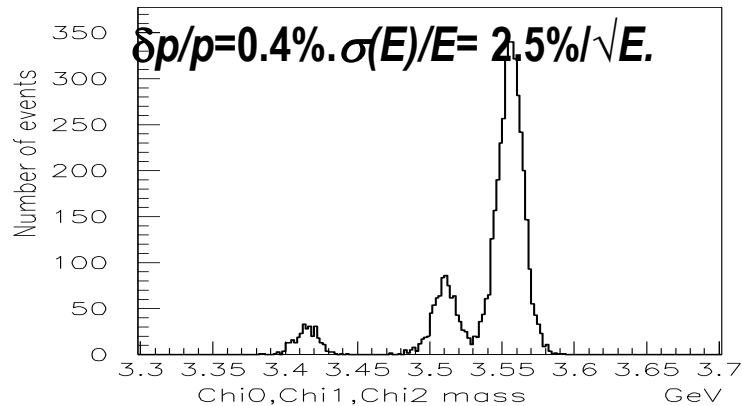
Without 1C fit.



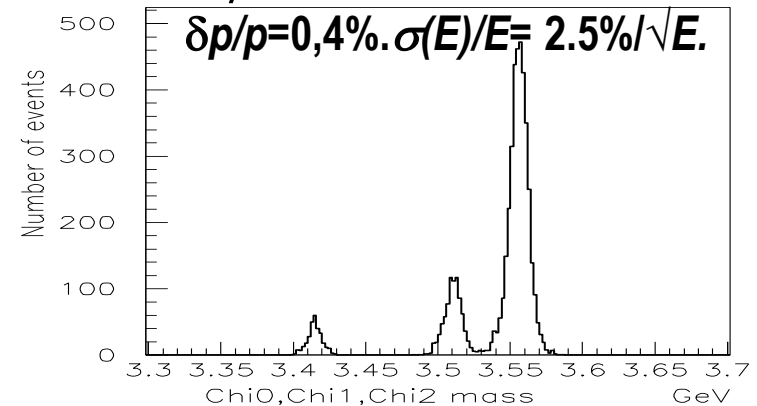
Without 1C fit.



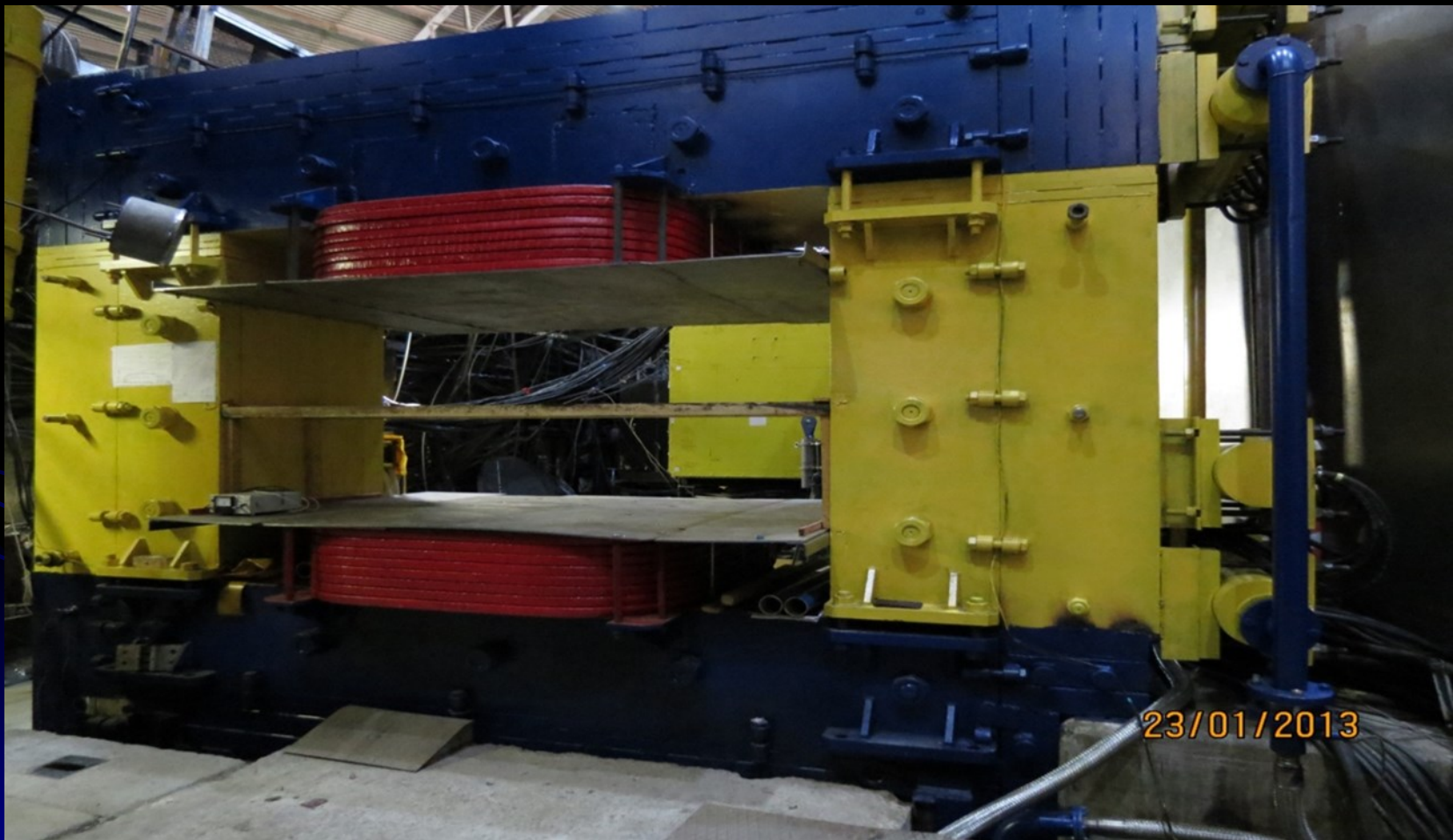
With 1C fit



J/ψ momentum from PHYHIA.



Спектрометрический магнит

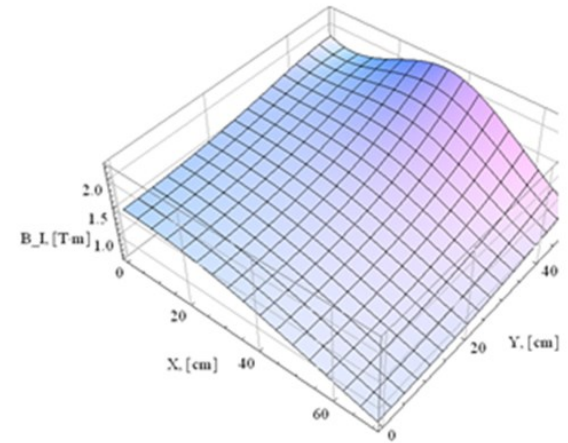
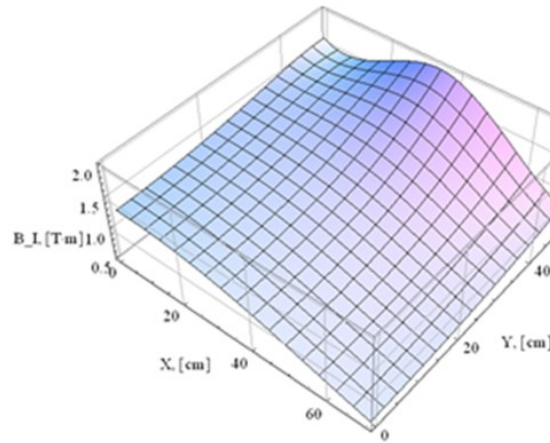
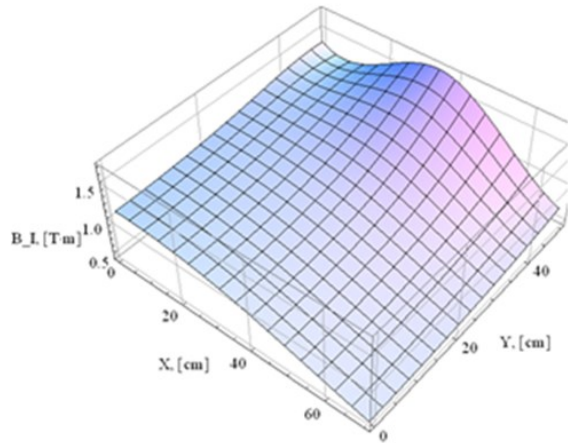


14.04.2020

В. Мочалов, XIII Черенковские чтения

23

Поле спектрометрического магнита

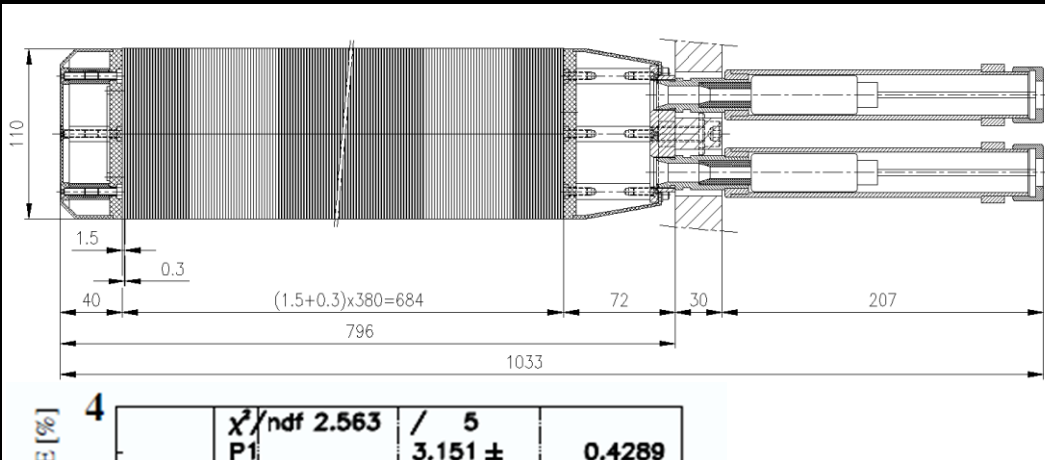


X	0	175	350	525	700
0	1.47493	1.40385	1.19856	0.89180	0.57204
100	1.49826	1.42978	1.22662	0.91376	0.58583
200	1.56563	1.50726	1.31544	0.98377	0.62758
300	1.67228	1.63846	1.48690	1.11726	0.69716
400	1.80469	1.81748	1.80361	1.34885	0.79707
500	1.86657	1.93767	2.25813	1.72721	0.93284

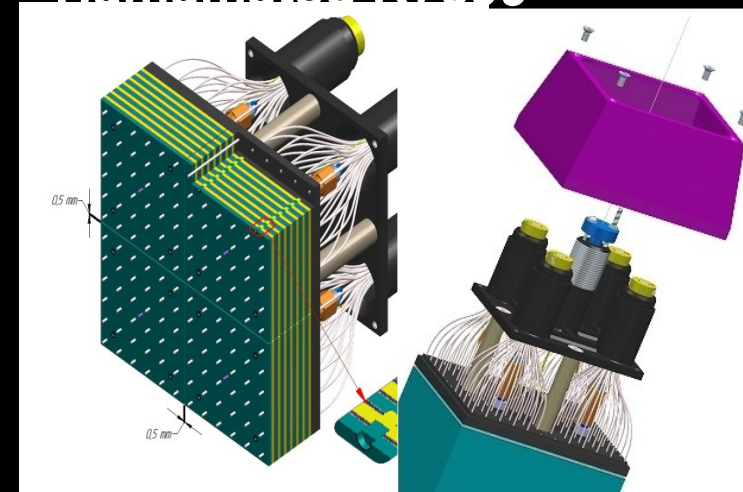
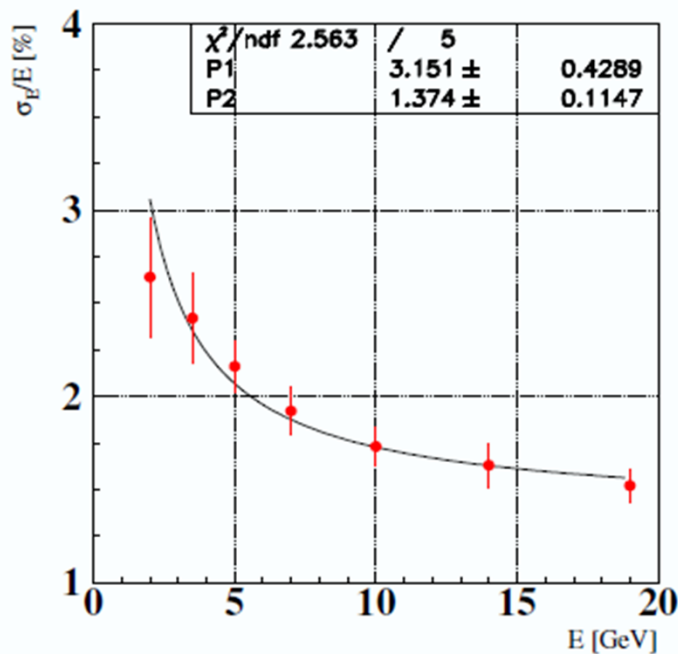
Трековая система

Detector name	Distance from target, [m]	Planes	Tube diameter, [mm]	Dimensions, Y[см]xX[см]	Channels
DTS2	1,67	X,Y,U,V	30	72 × 96	336
DTS3	5,29	X,Y,U	30	120 × 168	432
DTS4	8,07	X,Y,U	30	192 × 240	672
DTS5	9,77	X,Y,U	30	192 × 240	672
PC1	0,55	X,Y	1	20 × 20	400
PC2	0,62	X,Y	1	20 × 20	400
PC3	0,69	X,Y	1	20 × 20	400
DTS1	1,00	U,V,X,Y	15	48 × 48	384

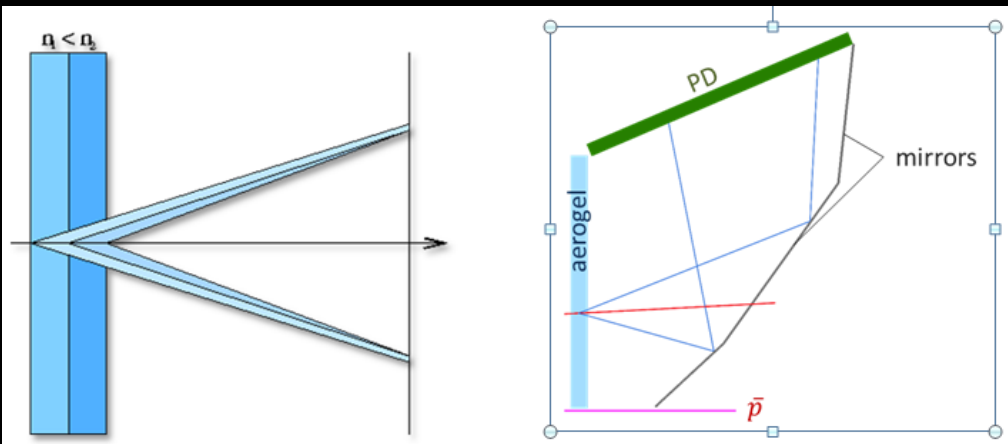
Электромагнитный калориметр



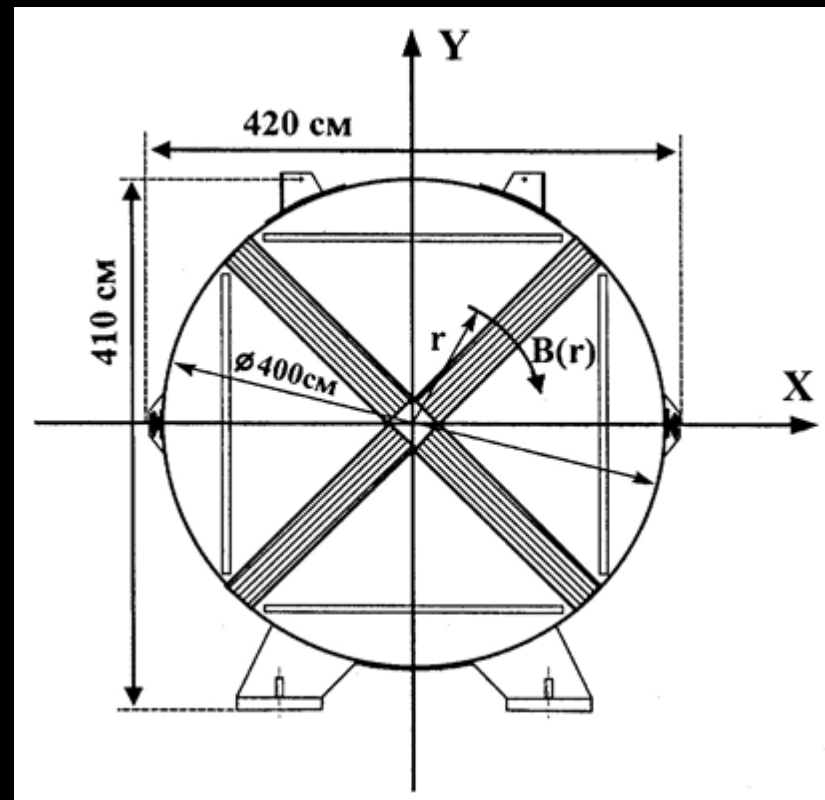
Тонкосегментированный калориметр типа «шашлык». Ячейка (380 слоев): Сцинтиллятор: 1.5 mm, Свинец: 0.3 mm 2400 ячеек размером 55×55×700 mm³, длина ~20X₀, Фотодетекторы: Hamamatsu R7899



Идентификация частиц

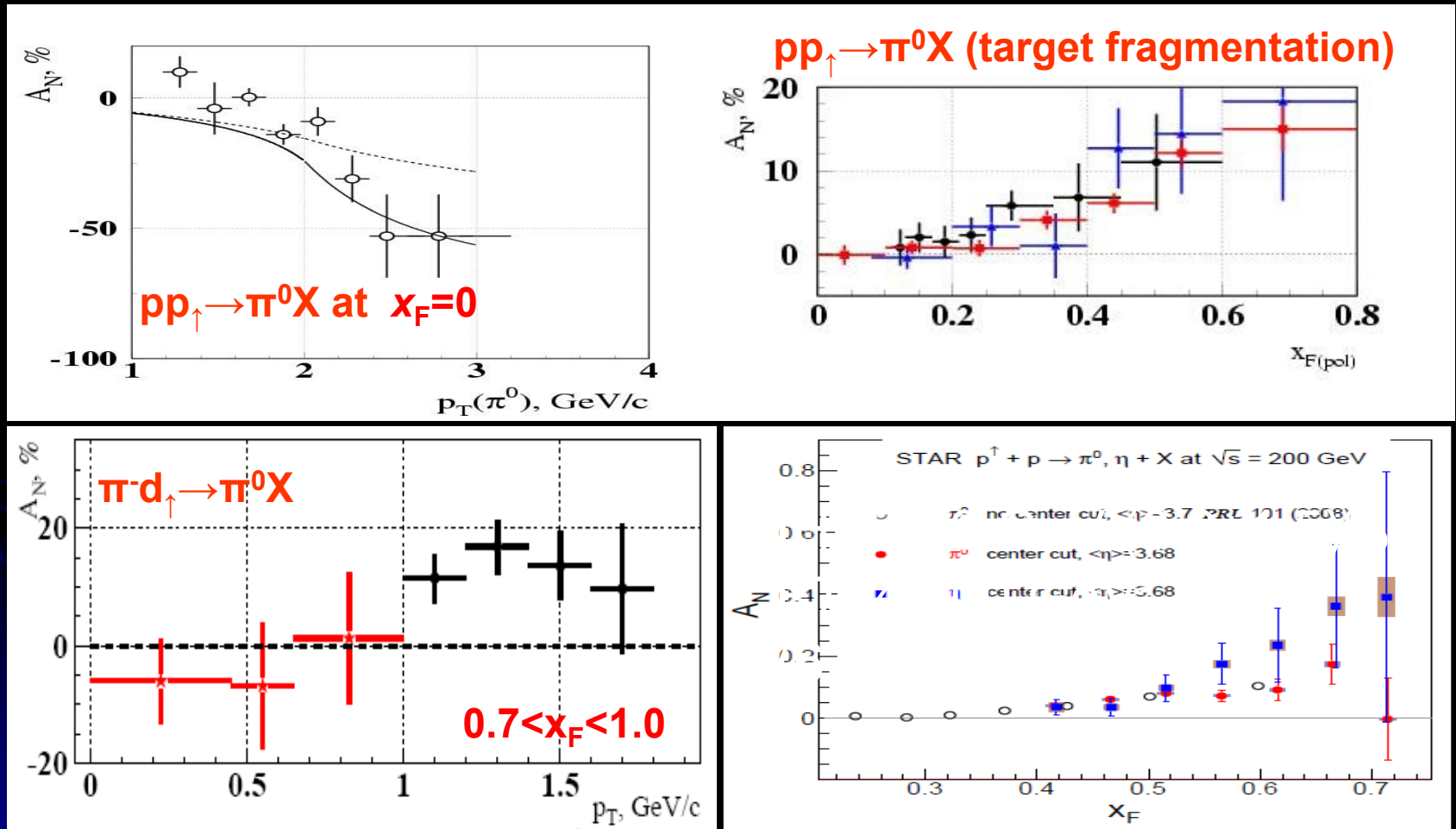


PANDA type detector, Phys.Usp. 58 (2015) no.5, 503-511,
Usp.Fiz.Nauk 185 (2015) no.5, 540-548



Мюонная система (дрейфовые трубки)

Интерес к измерениям на канале 14



Программа измерений на канале 14

- Подготовка и настройка установки для дальнейших исследований на канале 24
- Детальное исследование различных поляризационных эффектов в инклюзивных процессах образования частиц и резонансов, состоящих из легких u , d и s -кварков. Эксперименты с использованием мезонных пучков обнаружили отличную от нуля односпиновую асимметрию, как в центральной области, так и в области фрагментации пучка:
 - **Измерение инклюзивных и эксклюзивных каналов в области фрагментации неполяризованного пучка**
Непосредственно сейчас (в ближайшем сеансе)
измерение инклюзивного рождения π , K , ω мезонов

Реакции для канала 14

№	particle	N_{EV}	B/S	№	Particle	N_{EV}	B/S
1	π^+	$4.2 \cdot 10^9$		20	$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$5.3 \cdot 10^6$	0.2
2	π^-	$8.7 \cdot 10^9$		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	$\varphi(1020) \rightarrow K^+ K^-$	$4.3 \cdot 10^6$	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	$K^0_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$1.7 \cdot 10^7$	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^0_L	$1.0 \cdot 10^8$		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	$K^0_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$1.3 \cdot 10^7$	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	$\Delta^{--} \rightarrow p^- \pi^-$	$2.5 \cdot 10^7$	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

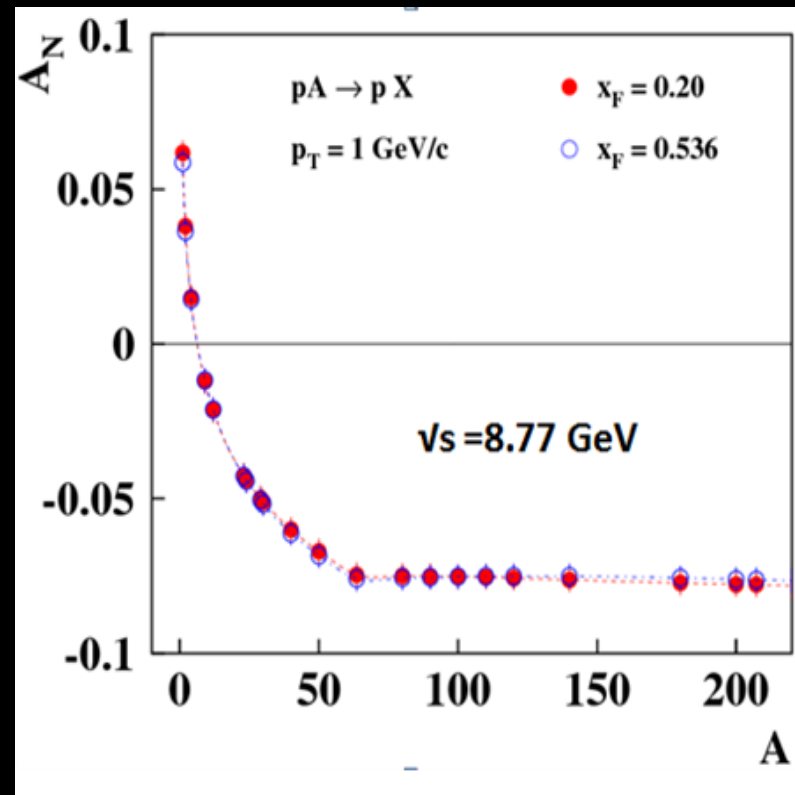
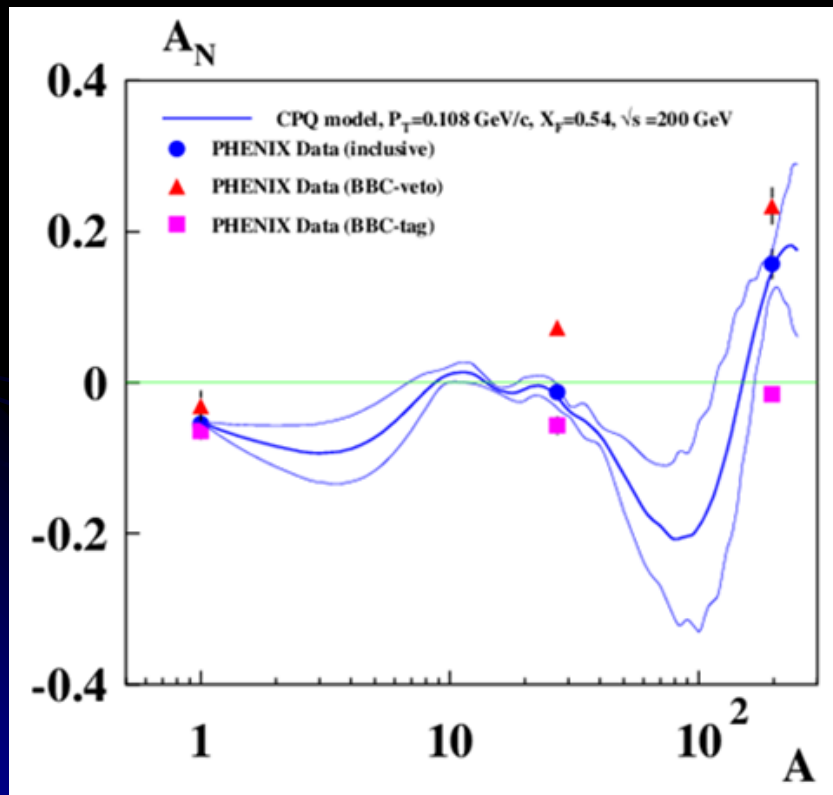
Измерения инклюзивных односпиновых эффектов на канале 24

- Сравнение поляризационных эффектов при взаимодействии частиц и античастиц с веществом при одной и той же энергии и в одной и той же кинематической области
- Высокая интенсивность поляризованного пучка протонов позволяет значительно улучшить точность и расширить кинематический диапазон. При этом становится возможным разделить зависимость эффектов от кинематических параметров.
- Исследования можно проводить в области энергии пучка $10 \div 45$ ГэВ.
- Возможность исследовать асимметрии на ядрах

Интерес для исследования на ядрах

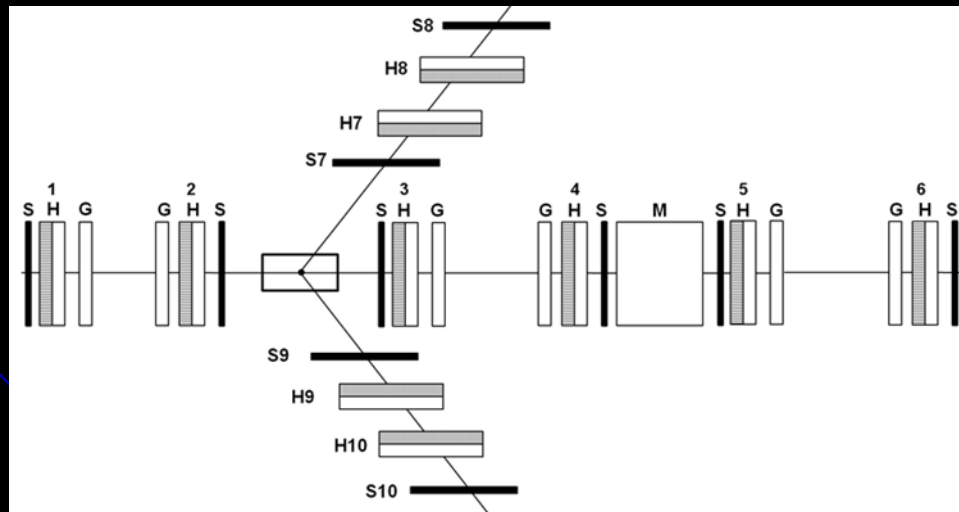
Данные ФЕНИКС

Предсказания для канала 24
V.V. Abramov, J. Phys.: Conf. Series 938 (2017) 012038



Исследование упругих реакций

- Возможность измерения упругих реакций - требуется для поляриметрии (**KnE Energ.Phys. 3 (2018) 326-332**)
- Возможность провести даже полный опыт (восстановить все амплитуды упругого рассеяния), причем как для протон-протонных, так и антипротон-протонного рассеяния. (**J. Phys.Conf. Ser. 1390 (2019) 1, 012032; J.Phys.Conf.Ser. 1435 (2020) 1, 012044**)



Исследование кваркония

- Исследования чармония с (не)поляризованными пучками и неполяризованной мишенью:
 - Односпиновая асимметрия A_N инклюзивного рождения J/ψ и χ_1/χ_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/ψ и 2500 χ_1/χ_2 состояний.
 - Статистическая точность измерения асимметрии J/ψ - 7%
 - Измерение **отношения сечений рождения** χ_1/χ_2 для определения механизма рождения чармония на пучках протонов и пионов.
- Исследования 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/ψ , χ_1/χ_2 .
 - Двухспиновые эффекты в различных реакциях

Преимущества эксперимента СПАСЧАРМ (1)

- Обширная физическая программа и систематическое исследование поляризационных явлений (типа периодической таблицы или PDG).
- Разнообразии пучков: поляризованные протоны и антипротоны, неполяризованные пучки π^\pm , K^\pm , p^\pm , d , C .
- Регистрация и идентификация нейтральных и заряженных вторичных частиц, включая γ , π^0 , π^\pm , K^\pm , p^\pm , d и резонансы.
- Исследование десятков реакций одновременно.
- Поперечно- и продольно-поляризованные и ядерные мишени.

Преимущества эксперимента СПАСЧАРМ (1)

- Исследование различных спиновых наблюдаемых: A_N , P_N , A_{NN} , A_{LL} , D_{NN} , $\rho_{ik} \dots$
- Исследование поляризационных эффектов в зависимости от различных переменных: \sqrt{s} , p_T , x_F , атомного номера, множественности, реакции...
- Полный азимутальный угол, позволяющий минимизировать систематические ошибки.
- Система магнитов "змейка" (spin-flipper), позволяющая получить как поперечную, так и продольную поляризацию и менять их направление, что также важно для уменьшения систематических ошибок.

Сотрудничество

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



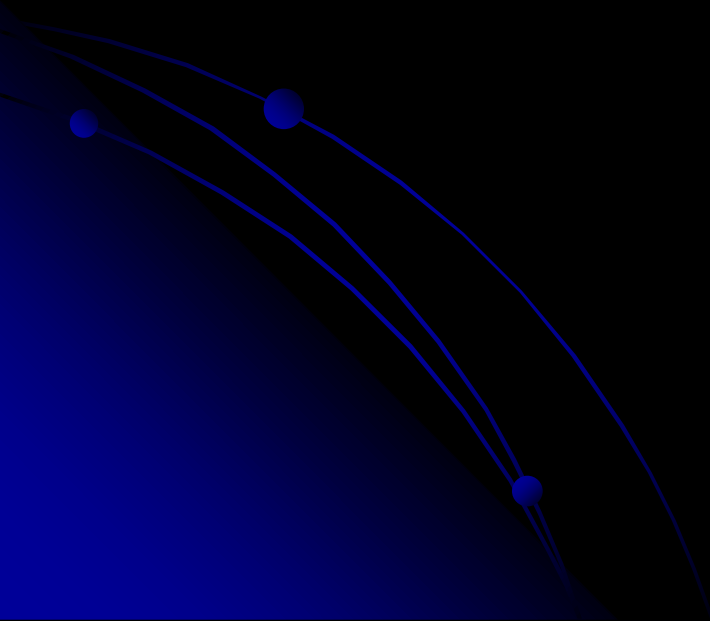
Создание канала и получение пучков поляризованных частиц привлечет к исследованиям на ускорительном комплексе ученых из различных стран — прежде всего из Германии, Чехии и Италии.

Заключение

Поляризационный проект СПАСЧАРМ отличается глобальный, систематический подход в изучении системы **антипротон**-протон (ядро) и протон-протон (ядро), включая проведение обзорного поляризационного эксперимента и одновременное исследование десятков реакций и нескольких физических наблюдаемых, зависящих от многих переменных. Ожидаемая высокая точность измерений, минимальные систематические ошибки в сочетании с широким набором пучков, мишеней, вторичных заряженных и нейтральных частиц выгодно отличает этот проект от других поляризационных проектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-02-00006

Backup slides



В.В. Абрамов, И.Л. Ажгирей, В.И. Бармин, Н.И. Беликов, А.А. Борисов, С.И. Букреева, А.Н. Васильев, В.И. Гаркуша, Ю.М. Гончаренко, А.А. Деревщиков, В.Н. Запольский, В.Г. Заручейский, Н.К. Калугин, В.А. Качанов, А.С. Кожин, В.А. Кормилицын, А.К. Лиходед, Е.В. Маслова, В.А. Маишеев, Ю.М. Мельник, А.П. Мещанин, Н.Г. Минаев, В.В. Моисеев, Д.А. Морозов, В.В. Мочалов, К.Д. Новиков, Л.В. Ногач, А.О. Орешков, В.С. Петров, С.В. Пославский, А.Ф. Прудкогляд, С.В. Рыжиков, А.В. Рязанцев, П.А. Семенов, В.А. Сенько, С.Р. Слабоспицкий, М.М. Солдатов, Л.Ф. Соловьев, А.В. Узунян, Р.М. Фахрутдинов, Н.А. Шаланда, В.И. Якимчук, А.Е. Якутин

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино

Н.А. Бажанов, Н.С. Борисов, С.В. Голоскоков, И.С. Городнов, А.С. Должиков, А.Б. Лазарев, А.Б. Неганов, Ю.А. Плис, О.В. Теряев, А.Н. Фёдоров, Ю.А. Усов, Ю.Н. Узиков

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна

А.А. Богданов, А.В. Клепиков, М.Б. Нурушева, В.А. Окороков, М.Ф. Рунцо, В.Л. Рыков, В.М. Самсонов, М.Н. Стриханов

Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ, Москва

И.Г. Алексеев, Б.В. Морозов, В.М. Нестеров, В.В. Рыльцов, Д.Н. Свирида, В.В. Тясин

НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Москва

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

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина

В.И. Криворучко

АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина», Фрязино

"Experiments with spin have killed more theories than any other single physical parameter"

Elliot Leader, Spin in Particle Physics, Cambridge U. Press (2001)

"Polarisation data has often been the graveyard of fashionable theories. If theorists had their way they might well ban such measurements altogether out of self-protection."

J. D. Bjorken, Proc. Adv. Research Workshop on QCD Hadronic Processes, St. Croix, Virgin Islands (1987).

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°).

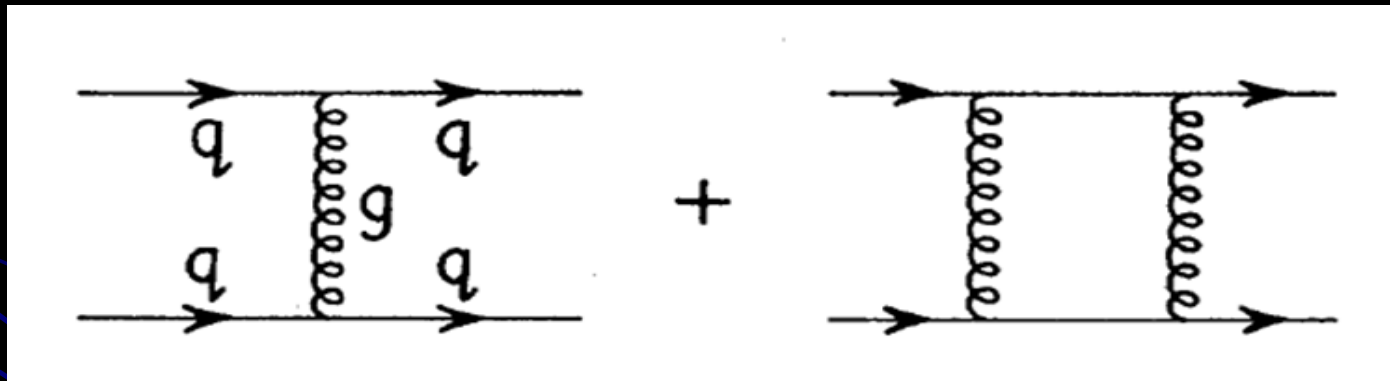
Измеряемая асимметрия

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

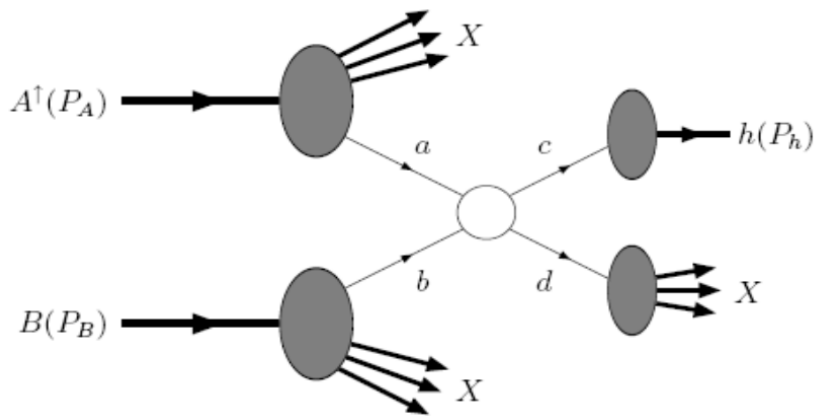
D - фактор разбавления мишени (отношение числа взаимодействий на всей мишени к числу взаимодействий на водороде)

Односпиновая асимметрия в наивной партонной модели

- В жестких процессах наивная партонная модель позволяет объяснить только очень небольшие значения: (G. Kane et al, 1978)



- Асимметрия подавлена фактором $\alpha_s m_q / \sqrt{s}$



In this note we have pointed out that the asymmetry off 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 leptonproduction, should all be calculable perturbatively in QCD. The result is zero for $m_q = 0$ and is numerically small if we calculate m_q/\sqrt{s} corrections for light quarks. We discuss how to test the predictions. At least for the cases when P is small, tests should be available soon in large- p_T production [where currently $P(\Lambda) = 25\%$ for $p_T \approx 2 \text{ GeV}/c$], and e^+e^- reactions. While fragmentation effects could dilute polarizations, they cannot (by parity considerations) induce polarization. Consequently, observation of significant polarizations in the above reactions would contradict either QCD or its applicability.

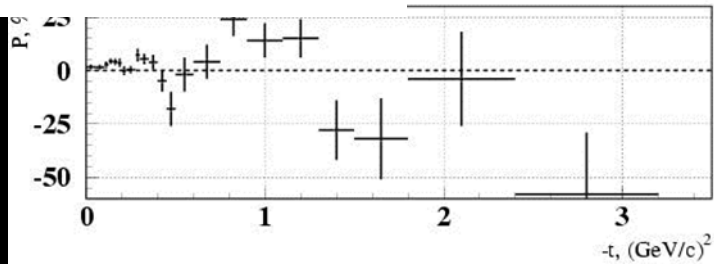
Kane, Pumpkin and Repko PRL 41 1978

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

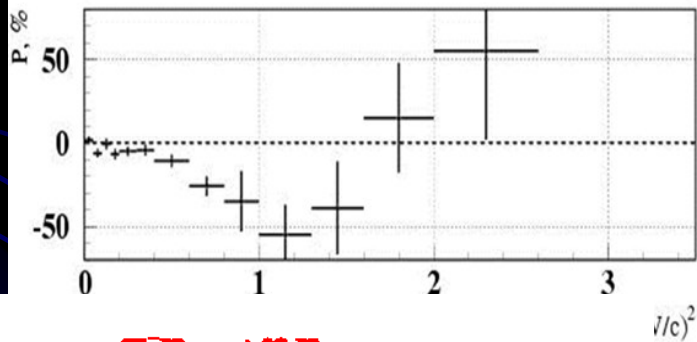
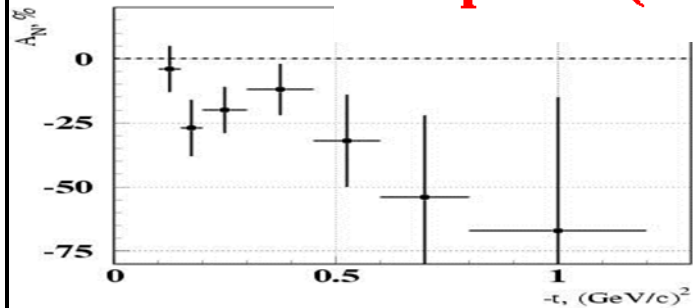
$$E_h \frac{d\sigma^{AB \rightarrow hX}}{d^3p_h} = \sum_{a,b,c,d} \int dx_a dx_b dz_h f_a(x_a) \cdot f_b(x_b) \cdot \frac{\hat{s}}{z_h^2 \pi} \frac{d\sigma^{ab \rightarrow cd}}{d\hat{t}} \delta(\hat{s} + \hat{t} + \hat{u}) \cdot D_{h/c}(z)$$

Данные в эксклюзивных каналах

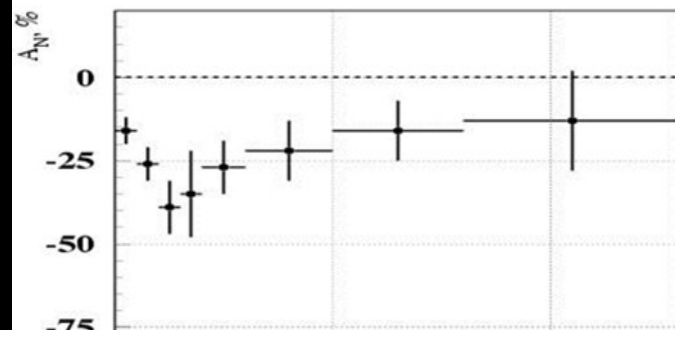
$\pi p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 n$



$\pi p_{\uparrow} \rightarrow \omega(782) n$



$\pi p_{\uparrow} \rightarrow \eta n$



$\pi p_{\uparrow} \rightarrow f_2(1270) n$

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 π^0 . (ожидается эффект более 50%).
- Данные по эксклюзивным реакциям будут набираться параллельно с данными по инклюзивным реакциям.

СТАТИСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАОННОГО И АНТИПРОТОННОГО ПУЧКА

№	particle	N_{EV}	B/S	№	particle	N_{EV}	B/S
1	π^+	$6.7 \cdot 10^8$		13	$\rho^-(770) \rightarrow \pi^- \pi^0$	$7.5 \cdot 10^7$	3.8
2	π^-	$8.9 \cdot 10^8$		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	$\tilde{\Lambda} \rightarrow \tilde{p} \pi^+$	$2.9 \cdot 10^5$	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	π^+	$2.1 \cdot 10^8$		7	n	$1.6 \cdot 10^7$	
2	π^-	$2.6 \cdot 10^8$		8	\tilde{n}	$1.4 \cdot 10^8$	
3	K^+	$1.7 \cdot 10^7$		9	$\tilde{\Lambda} \rightarrow \tilde{p} \pi^+$	$2.1 \cdot 10^6$	10
4	K^-	$2.2 \cdot 10^7$		10	$\tilde{\Lambda} \rightarrow \tilde{n} \pi^0$	$1.1 \cdot 10^6$	0.13
5	p	$1.6 \cdot 10^7$		11	$\tilde{\Delta}^- \rightarrow \tilde{p} \pi^-$	$4.2 \cdot 10^7$	0.14
6	\tilde{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	π^+	$6.1 \cdot 10^9$		17	$\rho^+(770) \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$3.0 \cdot 10^8$	2.5
2	π^-	$3.6 \cdot 10^9$		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^*	$2.3 \cdot 10^6$		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^*	$2.5 \cdot 10^6$		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

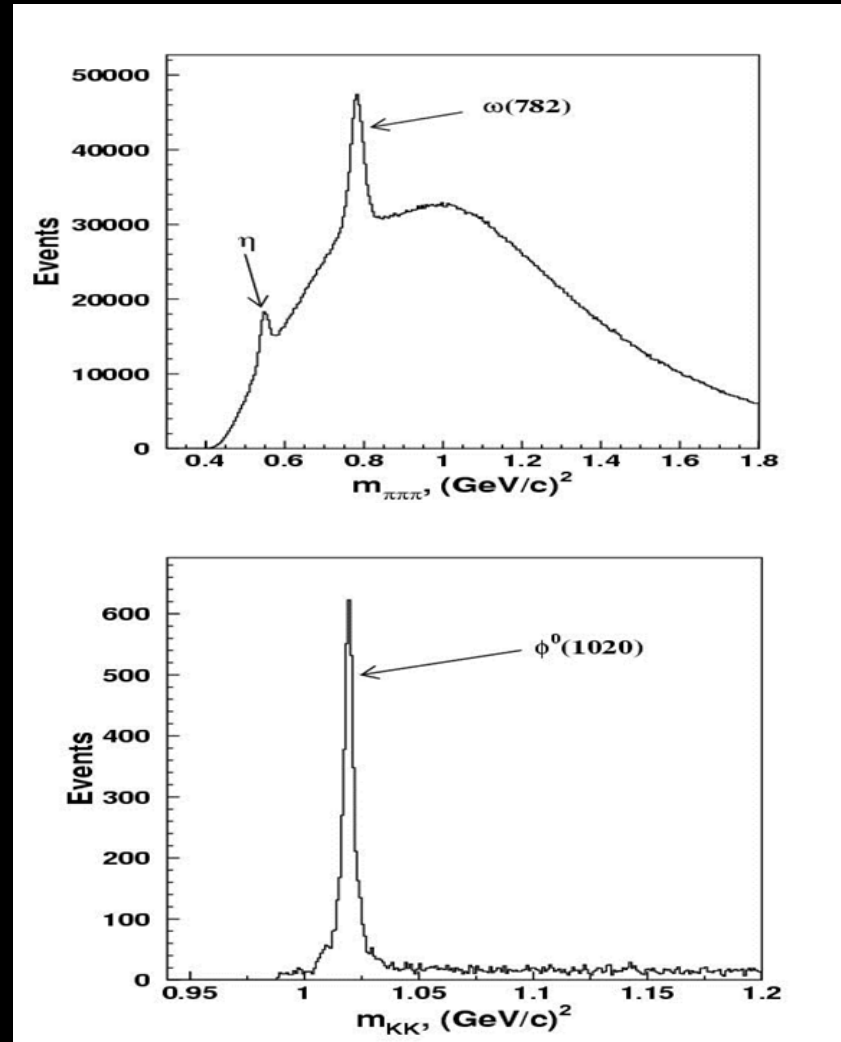
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ

- Ошибки измерения односпиновой асимметрии в реакциях

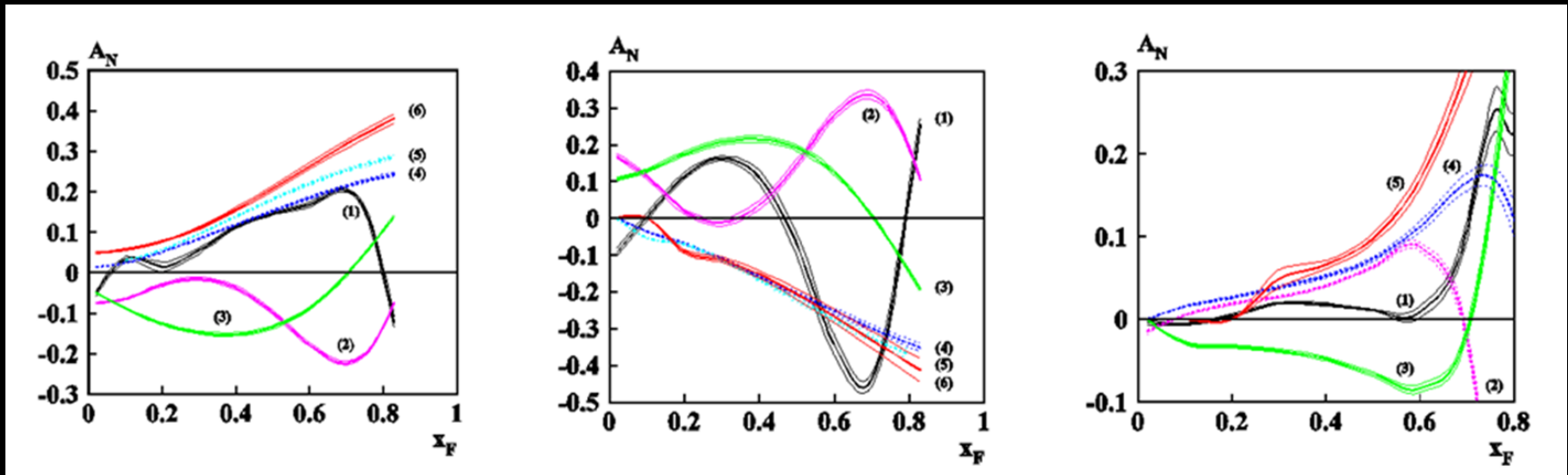
$\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \omega(782) X, \rho X, \eta'(958) X$ составят $0.3 \div 3\%$ для различных кинематических интервалов

- Ожидаемая точность измерений в реакции $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow f_2(1270) X$ будет еще лучше ($0.1 \div 1\%$)

- В. Мочалов, XIII Черенковские чтения



Некоторые предсказания



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)

Мишенная станция

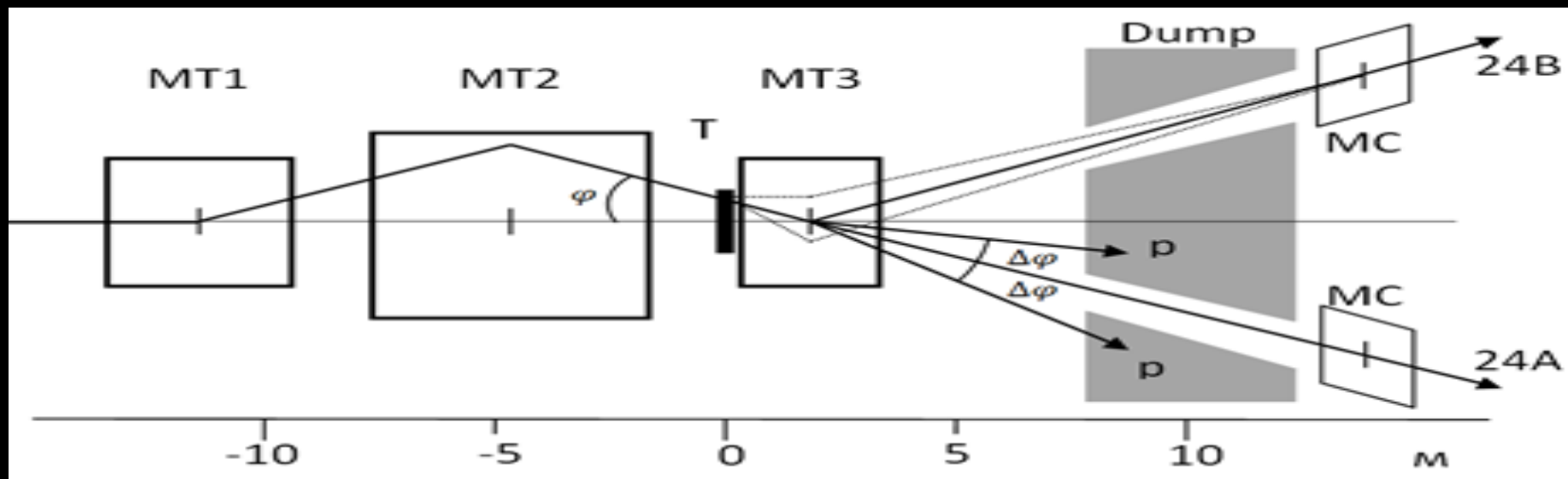
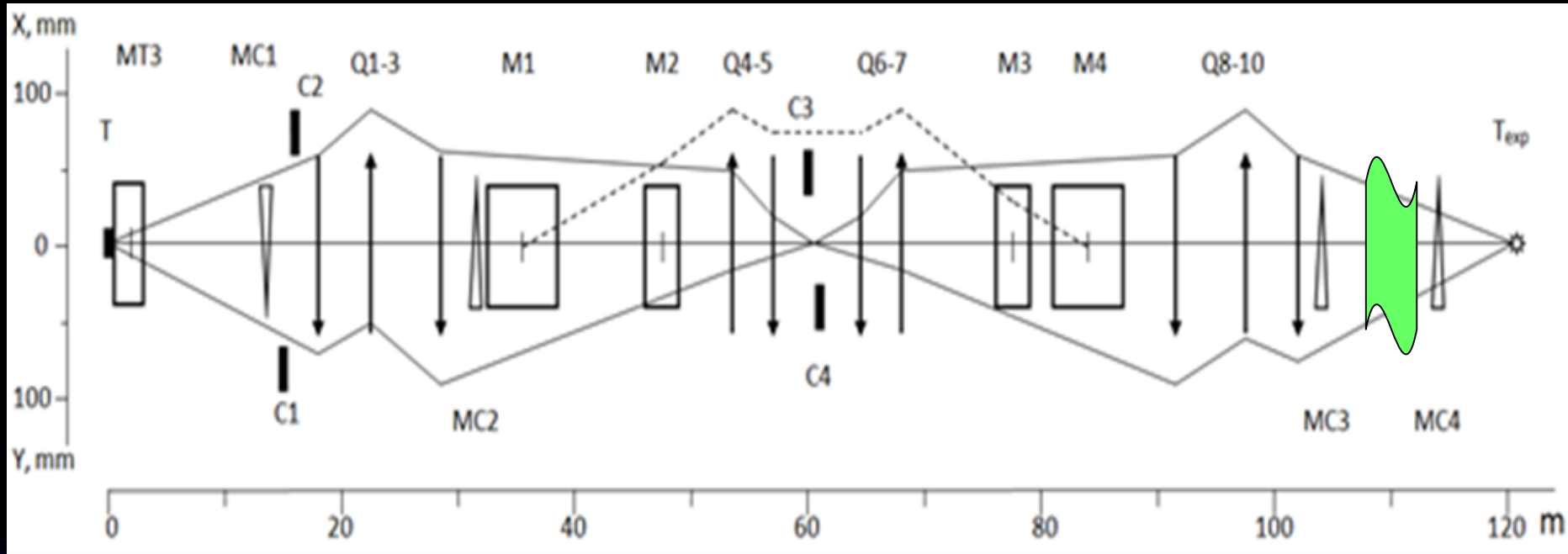


Схема мишенной станции каналов 24А и 24Б. Т – мишень, МТ1÷МТ3 – дипольные магниты, МС – магниты-корректоры, Dump – поглотитель. Приведенный на схеме мишенной станции вариант наведения протонного пучка на мишень соответствует отбору нейтральных вторичных частиц в канал 24А и положительно (отрицательно) заряженных частиц в канал 24Б. Пунктирными линиями показаны траектории вторичных заряженных частиц, отбираемых с канал 24В с ненулевыми углами рождения в мишени.

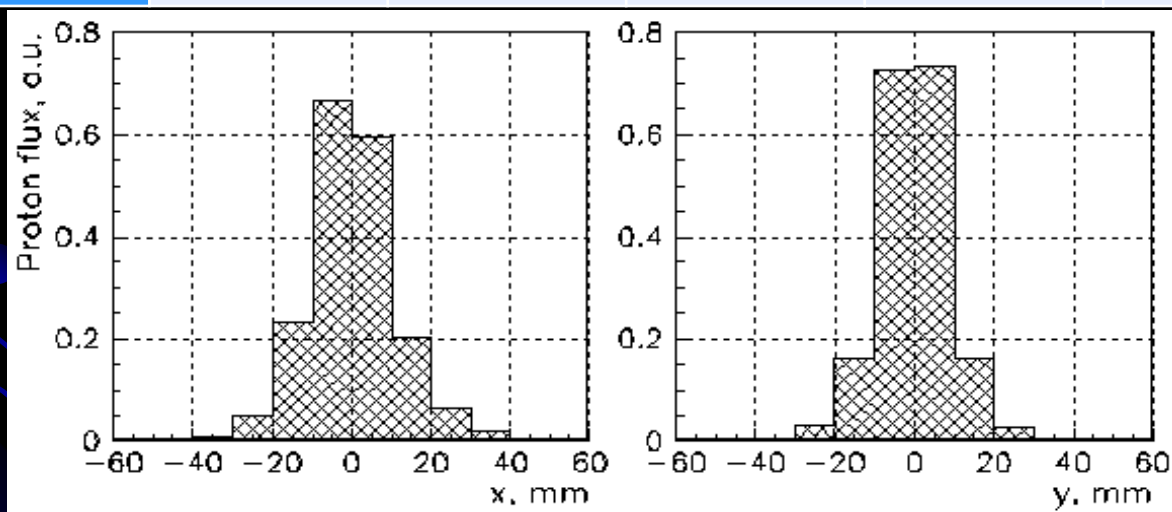
ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА КАНАЛА 24А



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

Параметры пучка поляризованных протонов в конце канала.

p , ГэВ/с	15		30		45	
$\sigma_{\Delta p/p}$, %	2.0	4.5	1.4	4.4	1.2	4.1
$\sigma_x \times \sigma_y$, мм	17 × 14	19 × 16	14 × 10	17 × 11	11 × 8.7	16 × 9.0
$\sigma_{x'} \times \sigma_{y'}$, 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
I_p per 10^{13} pot	3.5×10^6	9.2×10^6	2.1×10^7	7.8×10^7	1.5×10^7	6.8×10^7



Профили пучка на мишени экспериментальной установки для $p = 45$ ГэВ/с и $\sigma_{\Delta p/p} = 1.2\%$.

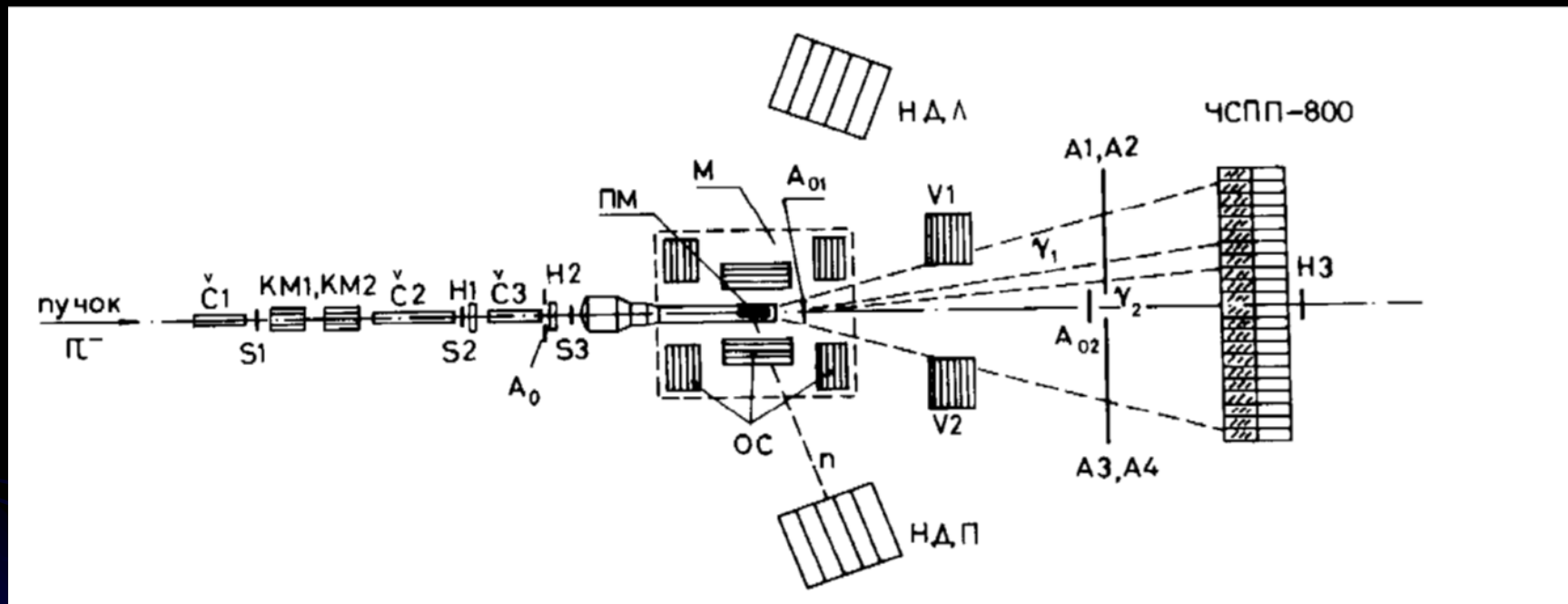
новая физика с пучком антипротонов

- Исследование $\Delta\sigma^\perp \propto (\vec{p} \cdot [\vec{\zeta}_p \times \vec{\zeta}_{\bar{p}}])$, здесь \vec{p} - вектор импульса протона, а $\vec{\zeta}_p$ и $\vec{\zeta}_{\bar{p}}$ - векторы поляризации протона и антипротона. Эта асимметрия может быть наблюдаена в столкновениях поперечно-поляризованных частиц с взаимно ортогональными поляризациями. При смене знака одной из поляризаций также меняет знак. Присутствие вклада $\Delta\sigma^\perp$ с детектированием в конечном состоянии истинно нейтральной подсистемы в акцептансе, симметричном относительно $x_F=0$, было бы однозначным свидетельством CP-нарушения. К числу таких экспериментов с истинно нейтральными по всем зарядам конечными состояниями можно отнести, в частности, измерения упругого, неупругого и полного сечения в - взаимодействия или сечения инклюзивного рождения истинно нейтральных резонансов и частиц, например π^0 - мезонов, в симметричном по x_F акцептансе.

Усиление сотрудничества СПАСЧАРМ

- ОИЯИ – новые группы - интерпретация и анализ данных + Теор. отдел + группа Савина
- МИФИ – новая группа по разработке электроники для GEM.
- ИЯФ (Новосибирск) – сибирская змейка и Черенковский счетчик
- ПИЯФ – трековые детекторы
- Интерес высказали: группы экспериментов COMPASS (Университет Триеста, Карлов Университет) и PANDA (немецкие группы, включая группы по PWA-анализу – Майнц)

Первые измерения односпиновой асимметрии в Протвино



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

Модели, объясняющие поперечные спиновые эффекты

- Основные модели, объясняющие возникновение поперечной односпиновой асимметрии

- Спин-зависящая поперечная Функция фрагментации (Эффект Коллинза)

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

- Функция распределения партонов внутри поперечно поляризованного протона (Функция Сиверса)

- Причина возникновения не обсуждается, например орбитальный момент

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

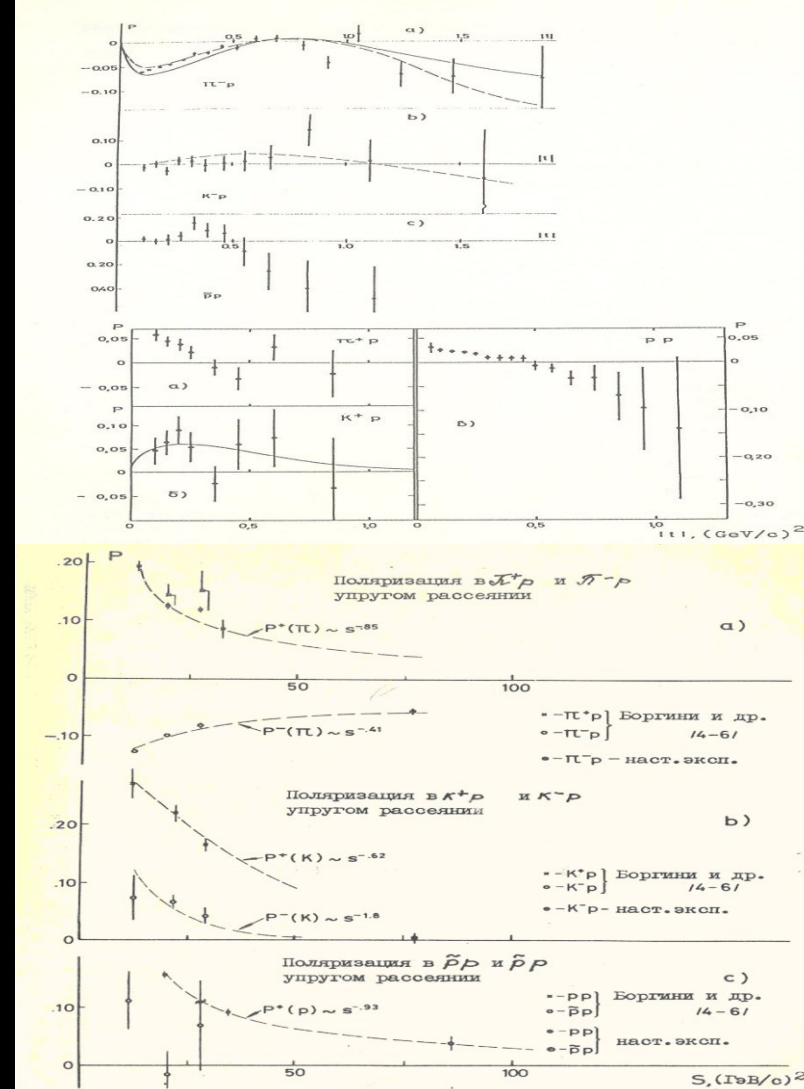
- Вклад высших (Twist-3) диаграмм (Qiu-Sterman, Efremov, Koike)

- Данные вычисления связаны с функцией Сиверса

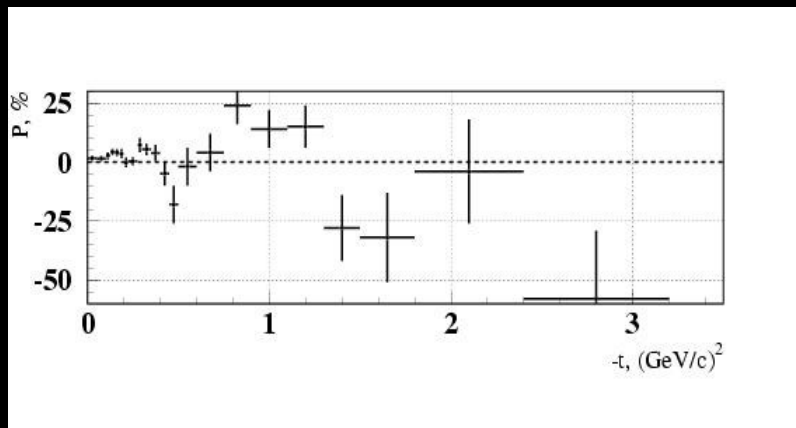
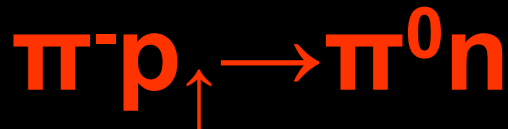
- Комбинация разных эффектов

HERA Collaboration (France-USSR)

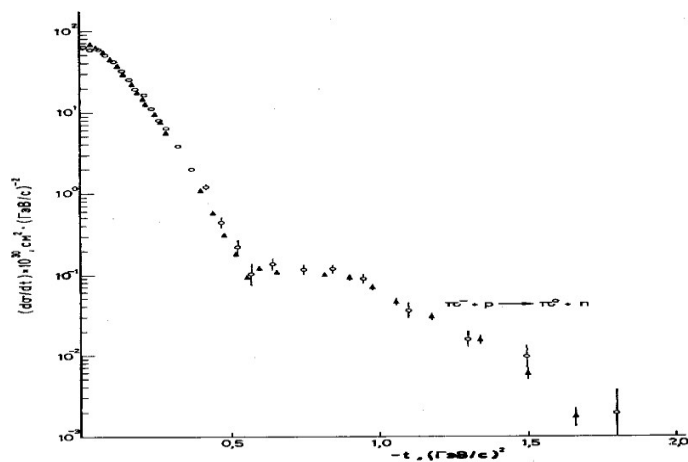
- Polarization in elastic scattering of particles and antiparticles on polarized protons at 40 and 45 GeV.
- Pomeron may carry the spin flip interaction (the first experimental hint)
- Polarization in the elastic scattering of particle and antiparticle is not equal each to other with opposite sign in general, as it was predicted in the asymptotic model [S.M. Bilenky et al. 1963]
- The energy variation of polarization depends on the type of particles and the magnitude of t .
- Spin rotation parameter is consistent with the Chou - Yang model of rotating hadronic matter.
- Chirality conservation hypothesis does not work



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.

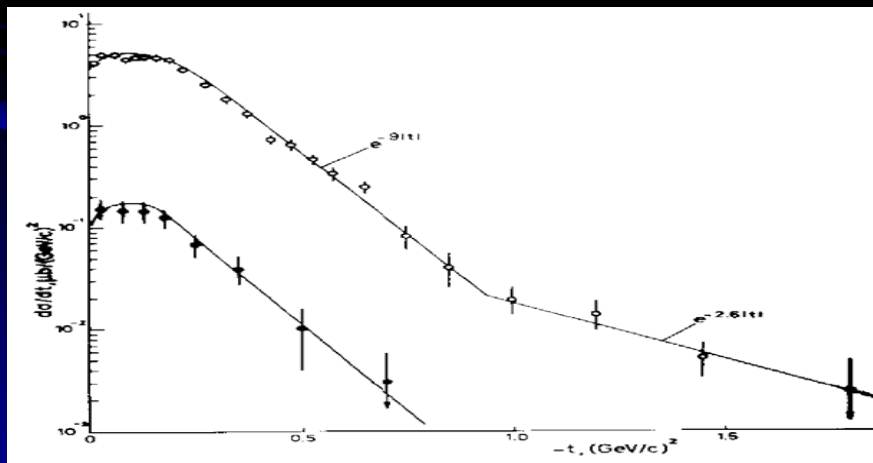
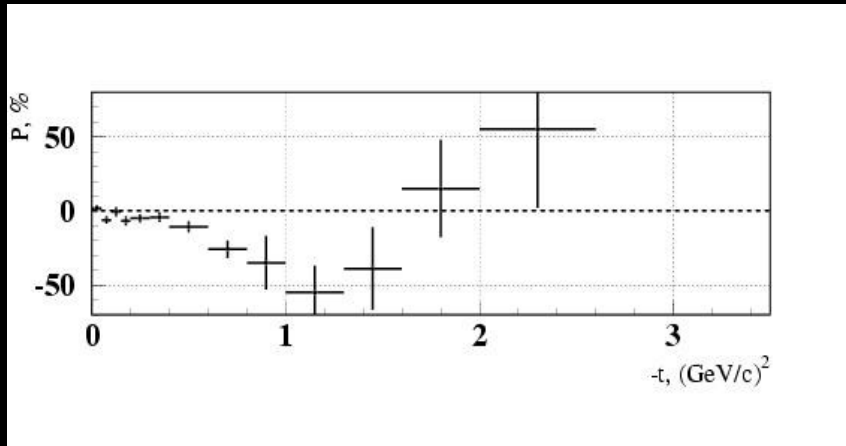


V.D. Apokin et al., Sov. J. Nucl. Phys. 45:840, 1987, [Yad.Fiz.45:1355-1357, 1987]

V.D. Apokin et al. Z.Phys.C15:293, 1982

Поляризация в реакциях

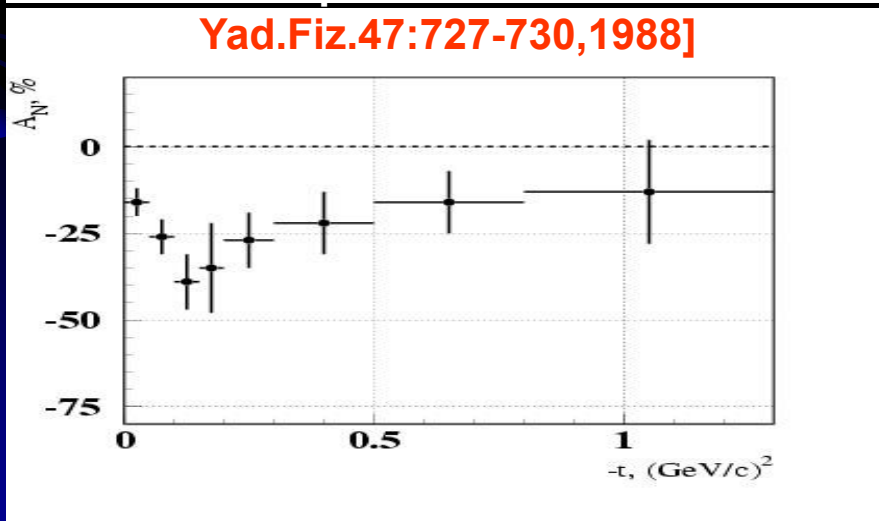
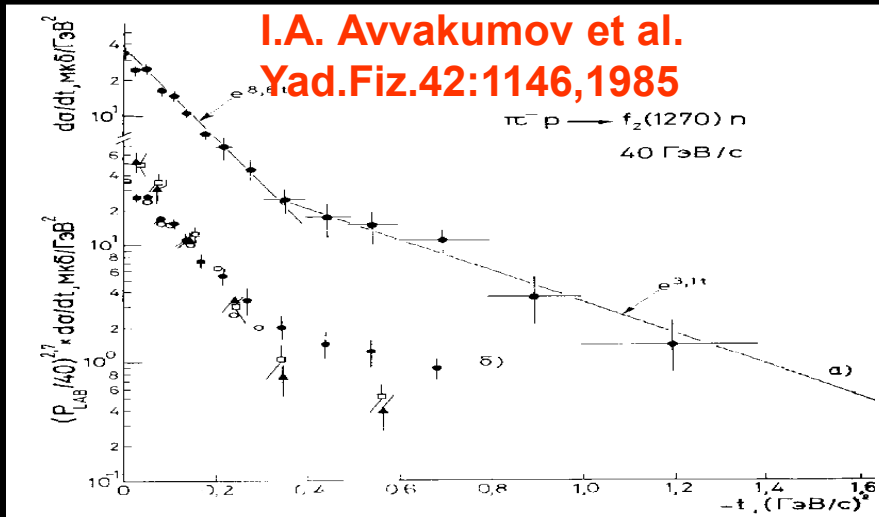
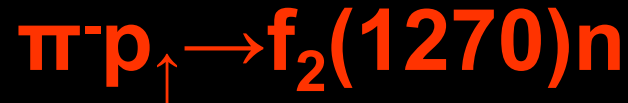
$\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta n$ and $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta'(958) n$



- 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 $-t = 1.8$ $(\text{GeV}/c)^2$.
- Среднее значение поляризации в реакции $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \eta'(958) n$ в области $0.05 < -t < 0.5$ $(\text{GeV}/c)^2$ составляет $(-17 \pm 8)\%$.

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

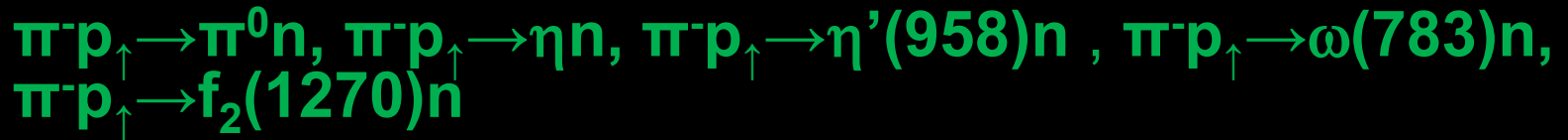
Асимметрия в реакции



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

Выводы по эксклюзивным реакциям

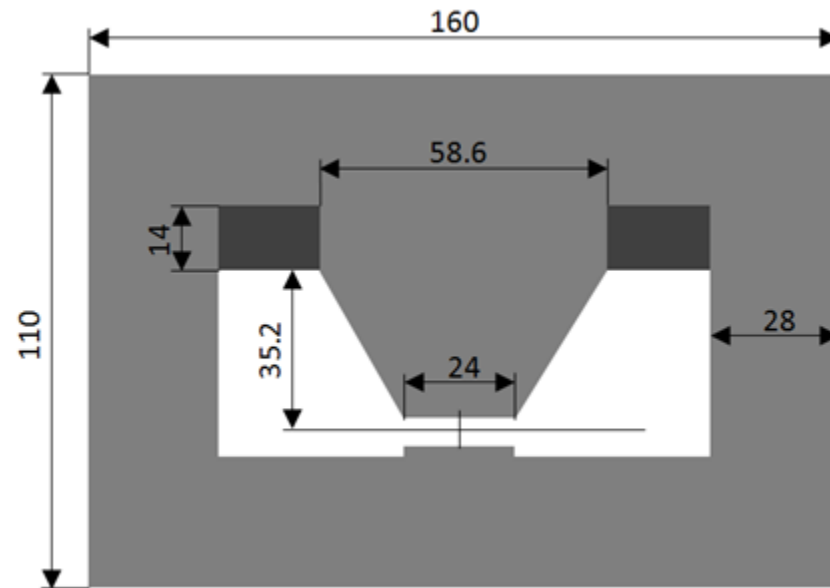
- Большие значения поляризации (асимметрии) были обнаружены при 40 ГэВ в реакциях



- 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)² асимметрия отрицательна, тогда как для π^0 -мезона положительна.
- **Ни одна теоретическая модель НЕ может объяснить результаты измерений.**

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



ПАРАМЕТРЫ ПРОТОННОГО ПУЧКА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Центральный импульс пучка, ГэВ/с	15	30	45
Размер эффективного источника протонов в вертикальной плоскости (σ_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 (σ_y), мм	20.6 (22.1)	20.9 (21.9)	21.2 (21.7)
Размер пучка протонов в горизонтальной плоскости (σ_x), мм	10.0 (32.2)	7.7 (37.0)	6.6 (35.0)