

**Односпиновая асимметрия инклюзивного  
образования  $\pi^0$  мезонов в центральной области  
и области фрагментации поляризованной  
мишени при энергии 40 ГэВ**

*В. Мочалов*

Специальность 01.04.23 — физика высоких энергий  
Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук  
Александр Николаевич Васильев

## Определение 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)

## Материал диссертации

- Впервые введено измерение асимметрии  $A_N$  инклюзивного рождения  $\pi^0$ -мезонов на поляризованной дейтериевой мишени.
- Впервые измерена асимметрия инклюзивного образования  $\eta$ -мезонов.
- Впервые измерена  $A_N$  в области фрагментации поляризованной мишени.
- Проведено измерение односпиновой асимметрии  $\pi^0$ -мезонов в центральной области при 70 ГэВ, дополняющие результаты исследований в ЦЕРН при 24 ГэВ и ФНАЛ при 200 ГэВ.
- Проведен анализ всех экспериментальных данных по измерению асимметрии инклюзивного рождения  $\pi$ -мезонов в зависимости от энергии в системе центра масс с целью поиска общих закономерностей, обнаружен универсальный порог появления асимметрии.

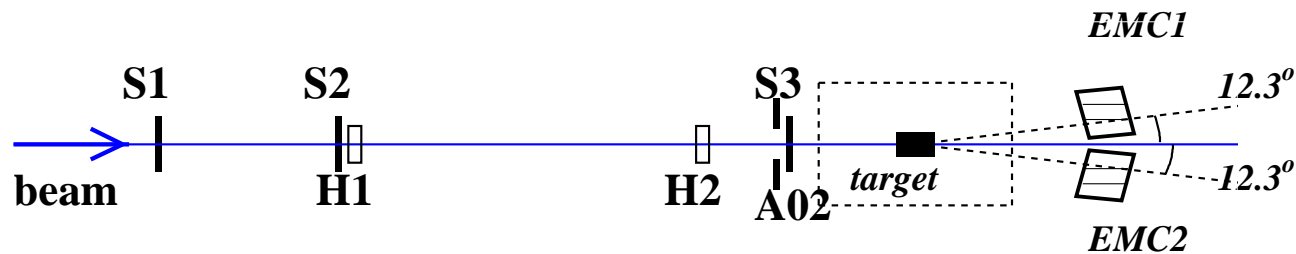
## Практическая ценность

- Проведено моделирование для учета потерь света при регистрации.
- Разработан метод измерения асимметрии  $\pi^0$ -мезонов одноплечевым детектором в случае нестабильной работы установки пика  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов.
- Реакция  $p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^0 + X$  может использоваться для измерения поляризации протонного пучка.
- Для проведения исследований впервые для ускорителя с жесткой фокусировкой протонный пучок был выведен с помощью монокристалла непосредственно из вакуумной камеры. В настоящее время метод используется для вывода пучка на несколько детекторов ускорительного комплекса У-70.

Результаты составляют половину мировой статистики по асимметрии нейтральных мезонов, опубликованы в журналах “Ядерная Физика”, “Приборы и техника эксперимента”, Physics Letters B, Phys. Rev. D, в трудах международных конференций SPIN.

# Общая постановка эксперимента

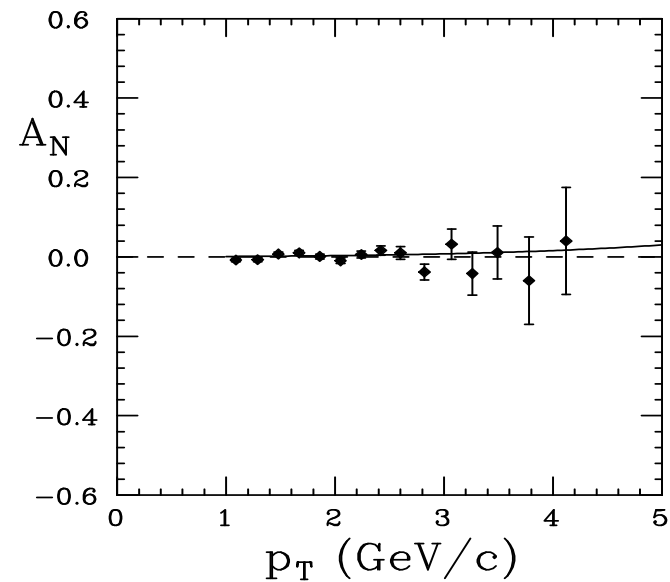
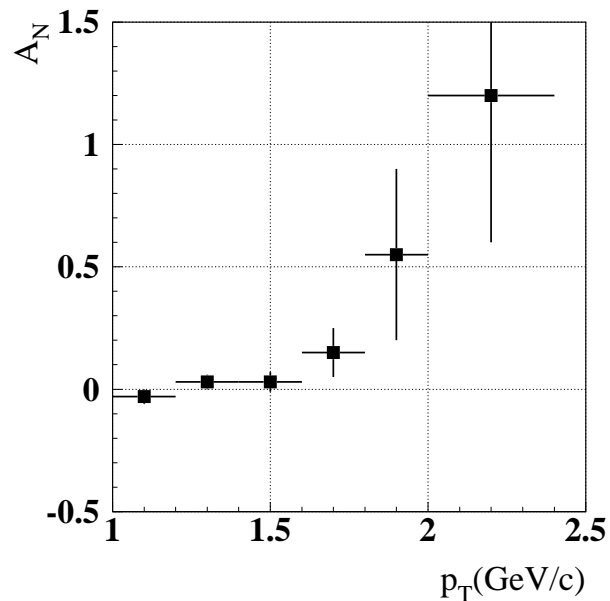
- Эксперимент проведен на 14 канале У-70 (1987-2000 гг.).
- Пучок отрицательных адронов с энергией 40 ГэВ ( $\pi^- : K^- : \bar{p} \sim 97.9 : 1.8 : 0.3(\%)$ ); интенсивность  $10^6$  част./цикл. или протонный 70 ГэВ пучок до  $10^7$  част./цикл.
- Поляризованная протонная ( $C_3D_8O_2$ ) (поляризация 80%) или дейтериевая мишень ( $C_3D_8O_2$ ) (поляризация 35%).
- $\gamma$ -кванты детектируются двумя электромагнитными калориметрами



# Измерение асимметрии в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 70 ГэВ

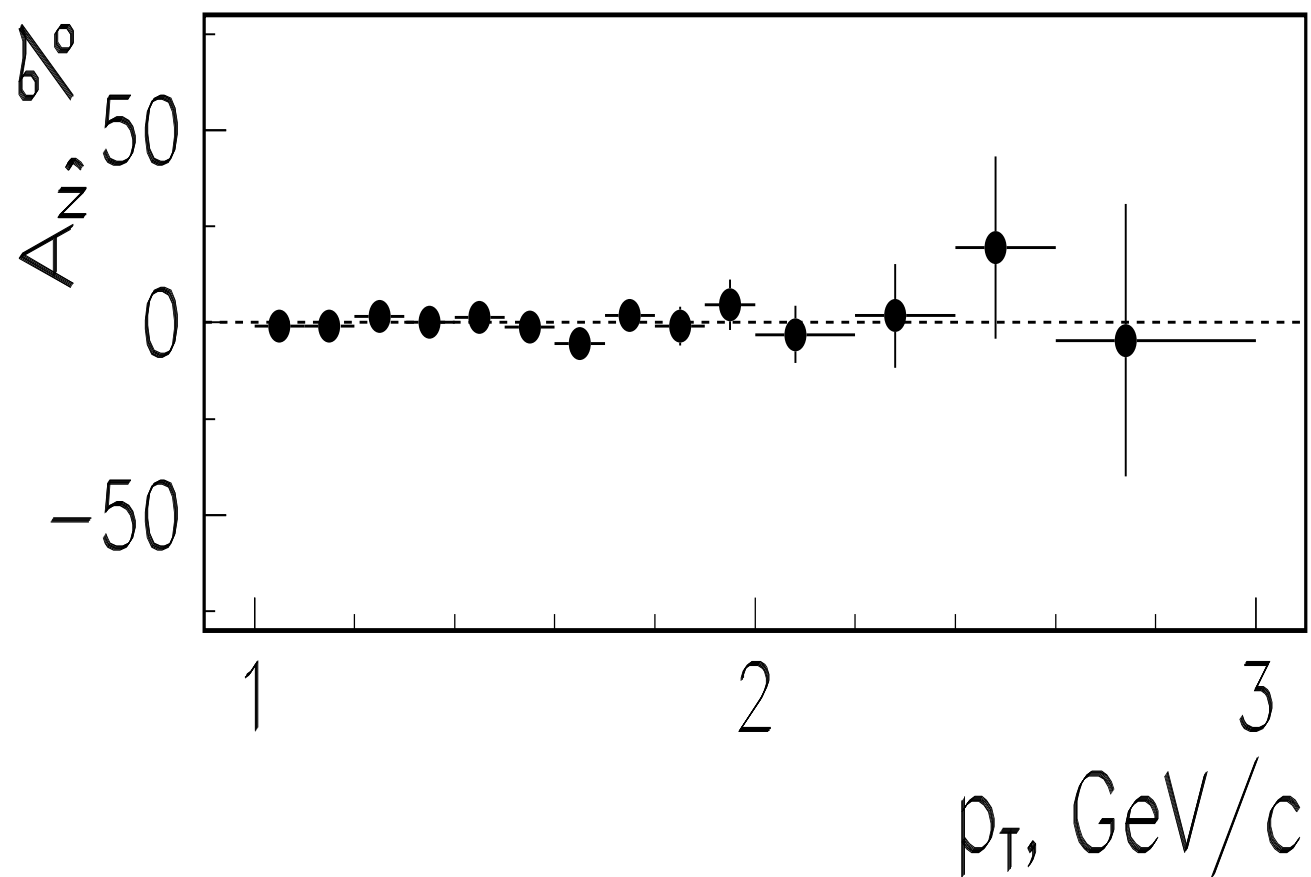
Цель эксперимента

Дополнить результаты ФНАЛ и Протвино (разные результаты) в промежуточной области энергии



Асимметрия при 24 ГэВ (ЦЕРН, слева) и 200 ГэВ (Е-704, ФНАЛ)

# Суммарная асимметрия



## Выводы по измерениям асимметрии в центральной области при 70 ГэВ

- Асимметрия в реакции  $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  при 70 ГэВ в области  $1.0 < p_T < 3.0$  ГэВ/с равна нулю в пределах ошибок, что согласуется с результатами E704 при 200 ГэВ и отличается от результатов при 24 ГэВ в ЦЕРН. Если существует зависимость асимметрии от энергии, то это происходит при изменении энергии пучка от 24 до 70 ГэВ.
- Предсказания теоретических моделей не противоречат полученным результатам.



## Исследование односпиновой асимметрии в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в центральной области при 40 ГэВ

В ЦЕРН было обнаружено указание на значительную асимметрию инклюзивного образования  $\pi^0$ -мезонов в реакции  $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  при энергии 24 ГэВ.

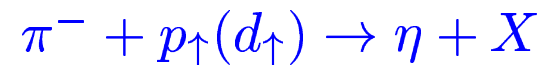
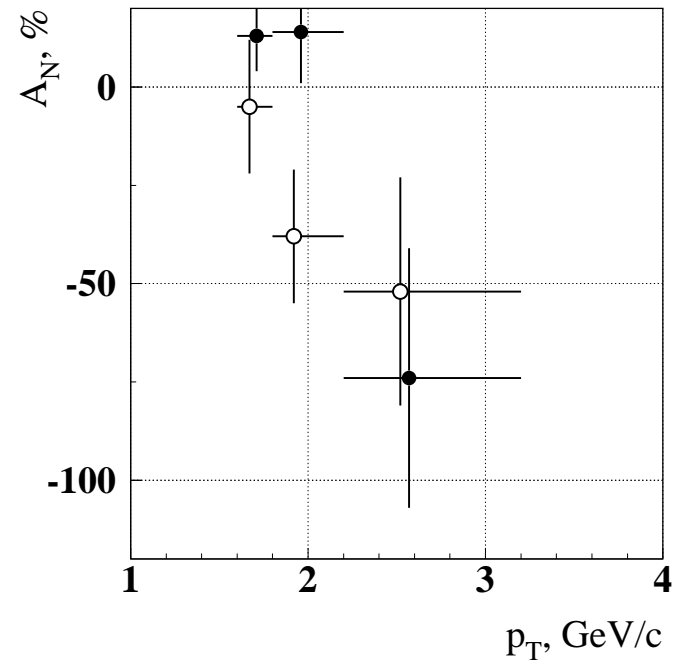
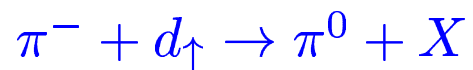
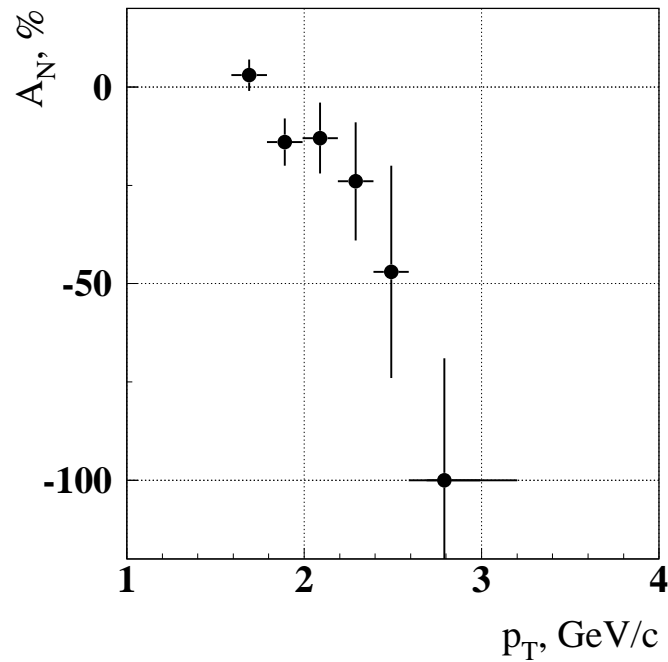
В ИФВЭ на установке ПРОЗА-М было проведено измерение асимметрии в реакции  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  при энергии пучка отрицательных частиц около 40 ГэВ, асимметрия достигает величины  $A_N$  около  $-40\%$ .

В данном эксперименте измерялась асимметрия в реакции  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ . При этом мы хотели проверить, есть ли разница, когда частицы рассеиваются на разных поляризованных мишенях.

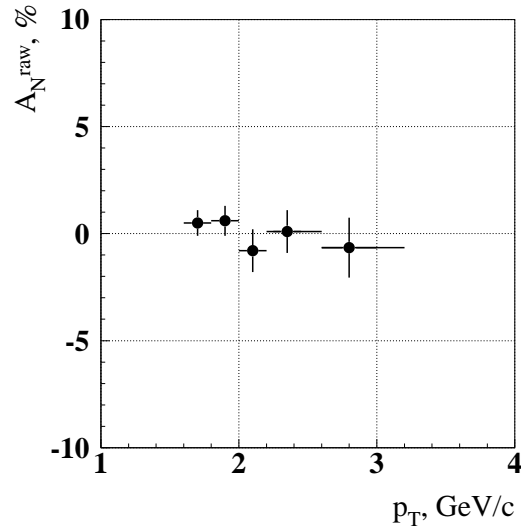
Параллельно в эксперименте была измерена асимметрия  $A_N$  в реакции:



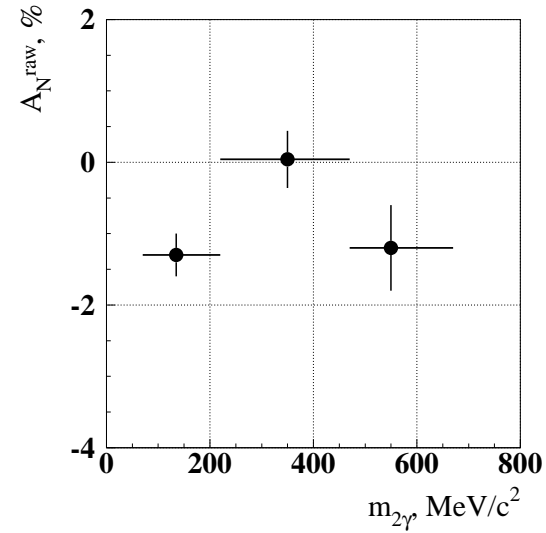
Зависимость асимметрии  $A_N$  от поперечного импульса  $p_T$



## Асимметрии вне массового пика $\pi^0$ и $\eta$ -мезонов



Асимметрия пар  $\gamma$ -квантов в диапазоне масс  $220 < m_{2\gamma} < 460$  в зависимости от поперечного импульса  $p_T$



Асимметрия пар  $\gamma$ -квантов и в зависимости от их массы при  $1.8 < p_T < 3.2$  ГэВ/с в области масс  $\pi^0$  и  $\eta$ -мезонов и между ними.

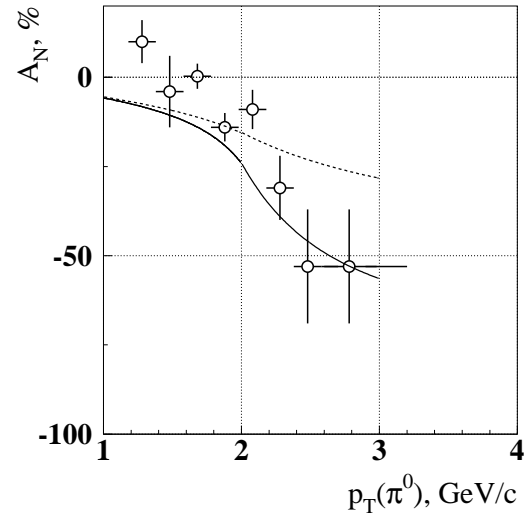
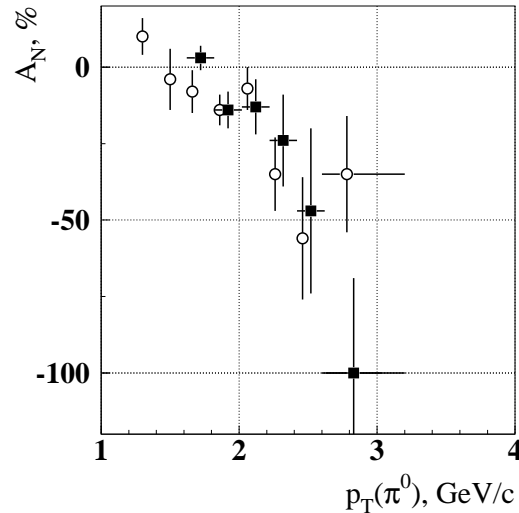
Асимметрия сравнима с нулем, а при  $p_T > 1.8$  ГэВ/с

$$A_N^{\text{raw}}(220 < m_{2\gamma} < 460) = 0.04 \pm 0.4\%.$$

## Сравнение с реакцией $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$

Зависимость  $A_N$  в реакциях  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  (пустые окружности) ( $(-39 \pm 9)\%$  при  $p_T > 2.2$  ГэВ/с) и  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  (черные квадраты) ( $(-40 \pm 12)\%$ ) от поперечного импульса  $p_T$

Суммарная асимметрия в реакции  $\pi^- + N_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ . Сплошная линия – предсказания кварковой модели для U-матрицы, пунктирная – для модели с хромомагнитным моментом кварка.

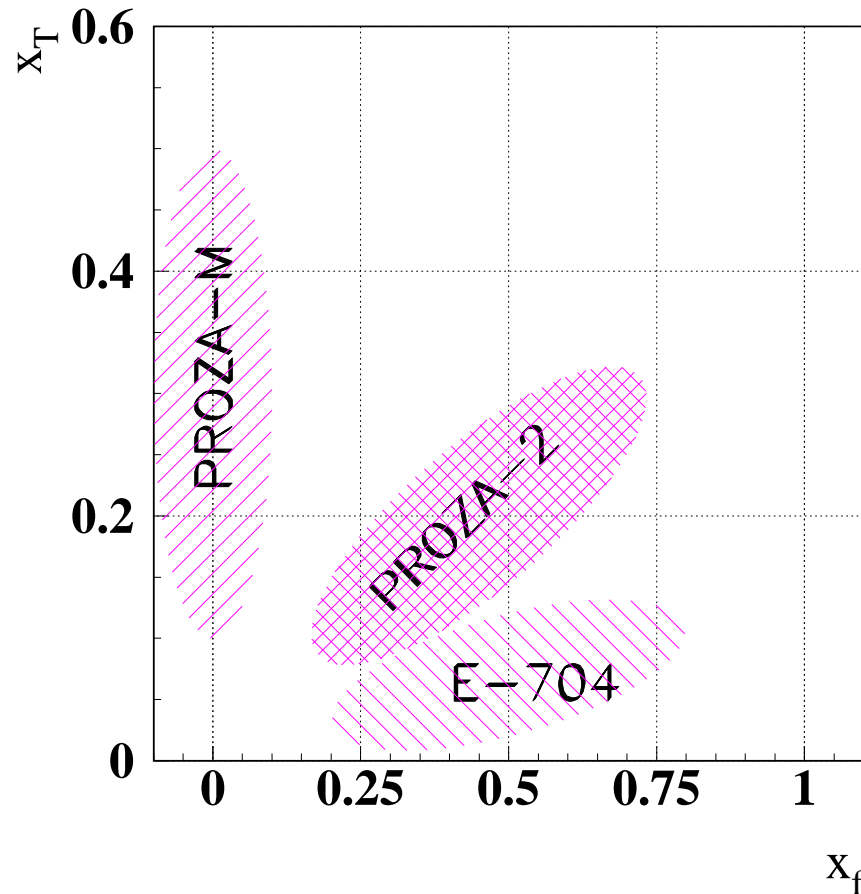


## Выводы по данной реакции

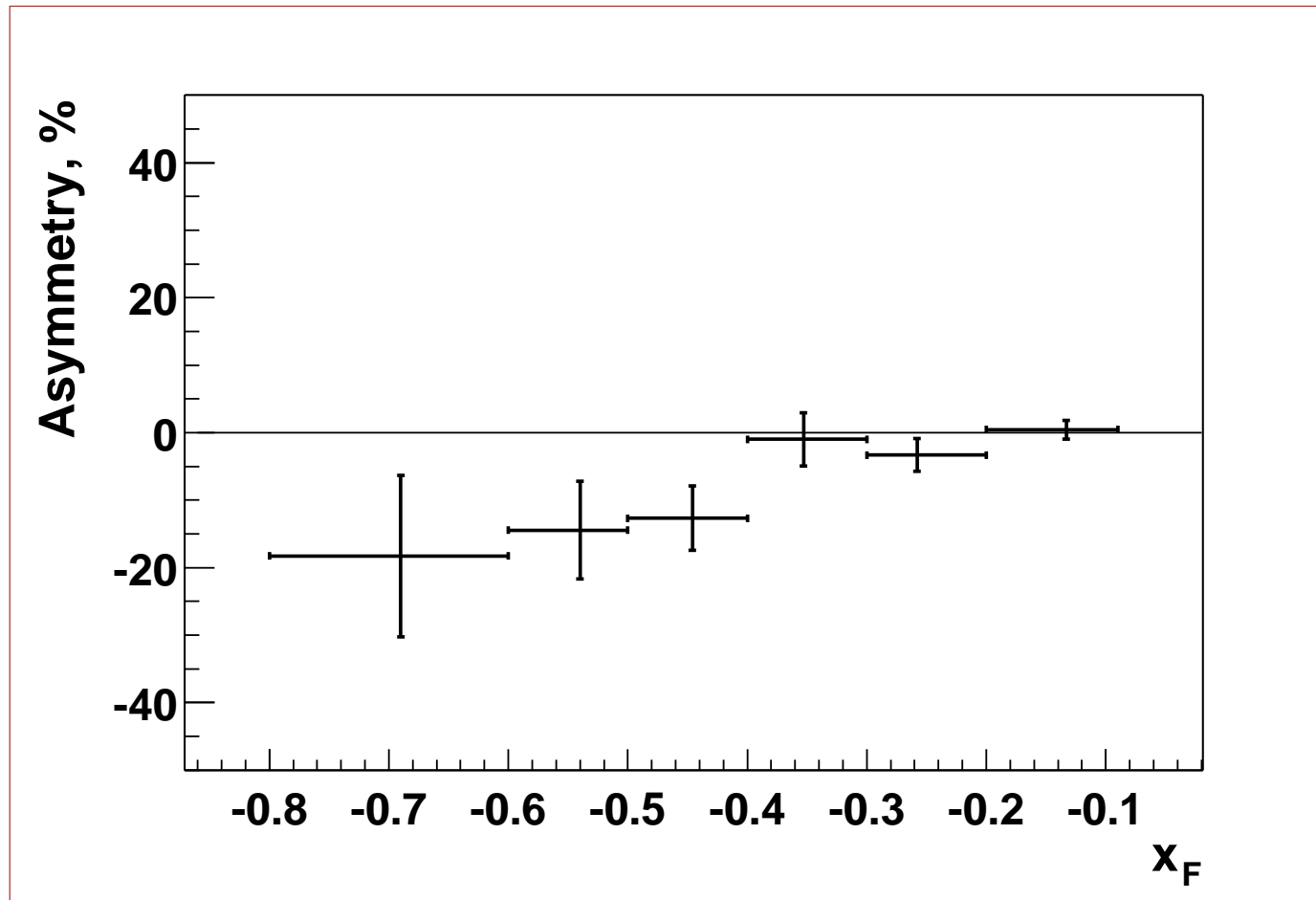
- Измерена односпиновая асимметрия  $A_N$  в реакции  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  в центральной области,  $A_N = (-40 \pm 12)\%$ , при значениях поперечного импульса  $p_T < 1.6$  асимметрия сравнима с нулем.
- Асимметрия инклюзивного рождения  $\eta$ -мезонов также велика и достигает  $(-62 \pm 22)\%$  при  $p_T > 2.2$  ГэВ/с.
- В то же время асимметрия комбинаторной пары  $\gamma$ -квантов в области масс между массами  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов совместима с нулем.
- Расчеты в рамках кварковой модели для U-матрицы хорошо описывают экспериментальные данные.
- Сравнивая представляемые результаты с измерениями асимметрии в предыдущей реакции можно сделать вывод, что асимметрия зависит от сорта взаимодействующих частиц. (Большой вклад канала  $\bar{u}u_{\uparrow}$ )
- Асимметрия не зависит от типа поляризованной мишени. Суммарное значение асимметрии  $A_N$  для реакций  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  и  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  при  $p_T > 2.2$  ГэВ/с равно  $(-39 \pm 7)\%$ . Поляризация  $u$ -кварка в нейтроне совпадает с поляризацией в протоне?

## Измерения в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$

- Впервые в мире  
поиск асимметрии  
в области фрагментации  
поляризованной мишени  
(Ожидается асимметрия,  
сходная с результатами  
в области фрагментации  
поляризованного пучка)
- Поиск асимметрии  
при одинаковых  
значениях  $|x_f|$  и  $x_T$   
(В предыдущих экспериментах  
измерения проводились  
или при  $|x_f| > x_T$  или при  $x_f \sim 0$ )



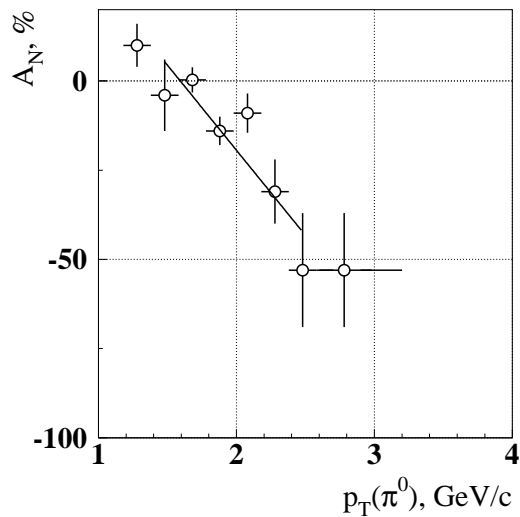
# Суммарная асимметрия



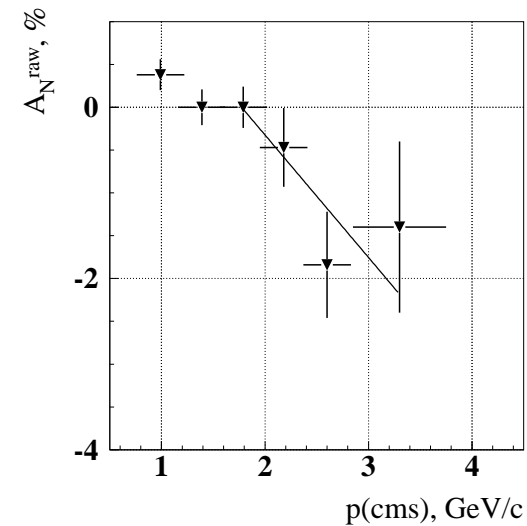
$$A_N = -13.8 \pm 3.8\% \text{ при } -0.4 < x_F < -0.1$$

## Сравнение с другими экспериментами

Эксперимент	$ A_N , \%$
E704, ФНАЛ	$12.4 \pm 1.4$
STAR, БНЛ	$14 \pm 4$
Данный эксперимент	$13.8 \pm 3.8$



Центральная область



Область фрагментации мишени



## Выводы по измерениям асимметрии в области фрагментации мишени

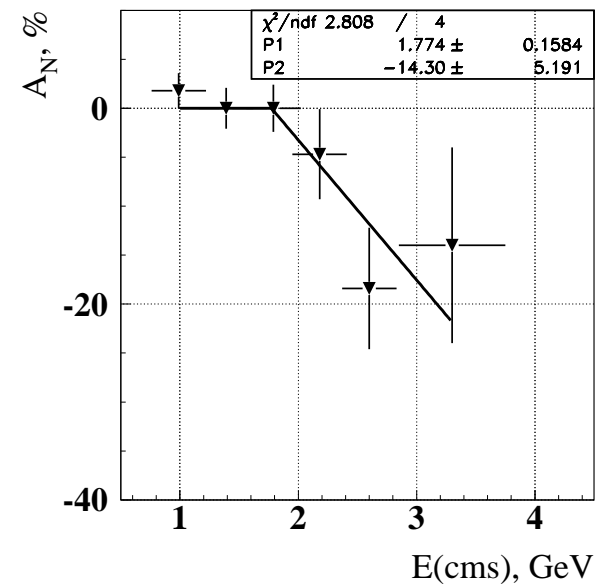
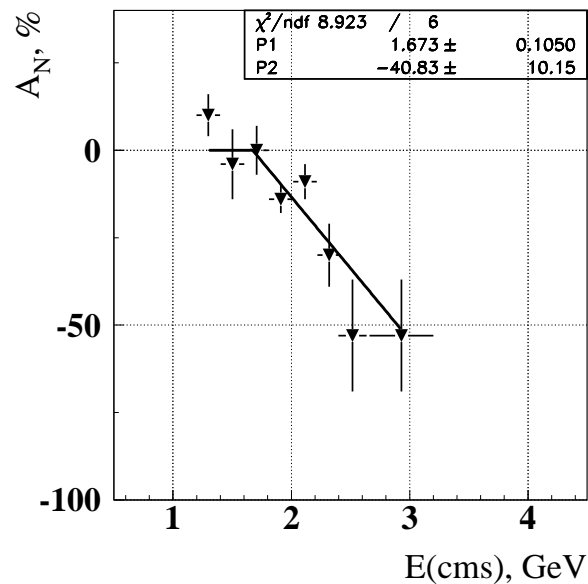
- Впервые измерена асимметрия в инклюзивной реакции в области фрагментации поляризованной мишени. Измеренная асимметрия в реакции  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  равна  $A_N = -13.8 \pm 3.8\%$  при  $-0.8 < x_F < -0.4$  и  $p_T$  в диапазоне от 1 до 2 ГэВ/с.
- При  $-0.4 < x_F < -0.1$  ГэВ/с и  $p_T$  в диапазоне от 0.5 – 1.5 ГэВ/с асимметрия сравнима с нулем.
- Измеренная нами асимметрия в области  $|x_F| > 0.4$  совместима в пределах ошибок с измерениями во ФНАЛ (E704, 200 ГэВ) и БНЛ (20 ТэВ в системе покоя мишени) в области фрагментации поляризованного протонного пучка при тех же значениях  $|x_F|$ . Экспериментально установлено, что асимметрия возникает в области фрагментации поляризованного протона и не зависит от того, является ли этот протон пучковой частицей, или частицей мишени.

## Выводы по измерениям асимметрии в области фрагментации мишени (продолжение)

- инклюзивное рождение  $\pi^0$ -мезона в области фрагментации поляризованного протона является новой реакцией для поляриметрии с установленной экспериментально анализирующей способностью  $\sim (10 - 15)\%$ .
- Из сравнения с измерениями асимметрии под  $90^\circ$  в системе центра масс, следует, что абсолютное значение асимметрии в реакции  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + X$  при 40 ГэВ начинает возрастать при одном и том же значении импульса  $\pi^0$ -мезона в системе центра масс  $p_0 = 1.7 \pm 0.15$  ГэВ/с для двух различных кинематических областей.
- Существующие теоретические модели хорошо описывают полученные данные.

## Поиск общих закономерностей

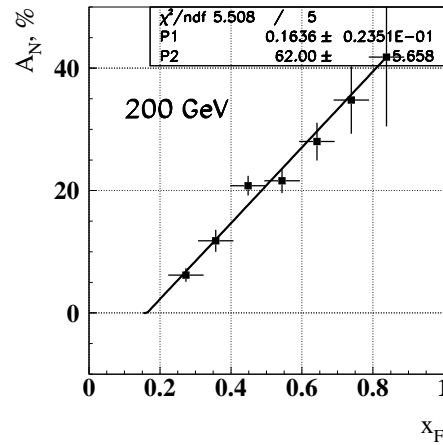
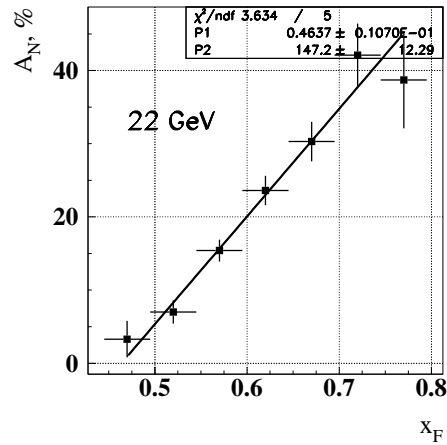
При энергии 40 ГэВ  $A_N$  в реакции  $\pi^- + p \uparrow \rightarrow \pi^0 + X$  начинает возрастать при одной энергии  $\pi^0$ -мезона в с.ц.м. (примерно 1.7 ГэВ)



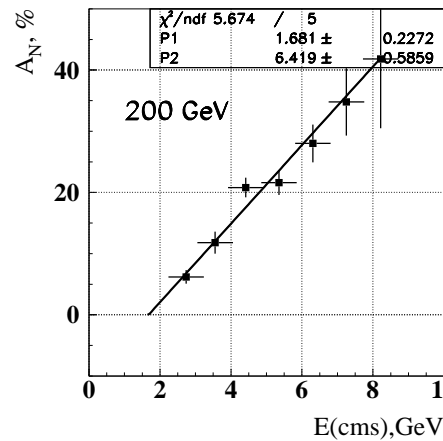
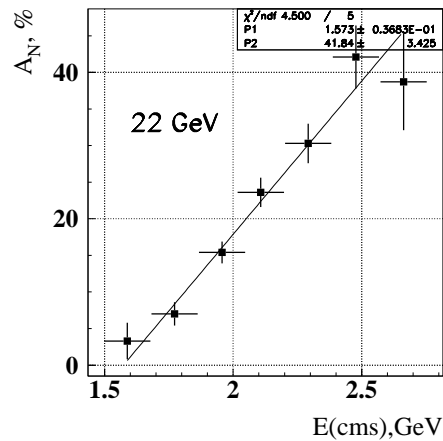
Опишем функцией

$$A_N = \begin{cases} 0 & , \text{ если } E < E_0 \\ k \cdot (E - E_0) & , \text{ если } E \geq E_0 \end{cases}$$

$A_N$  инклюзивного образования  $\pi^+$  мезонов.

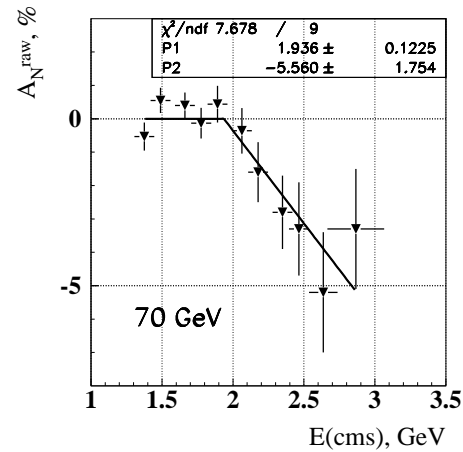
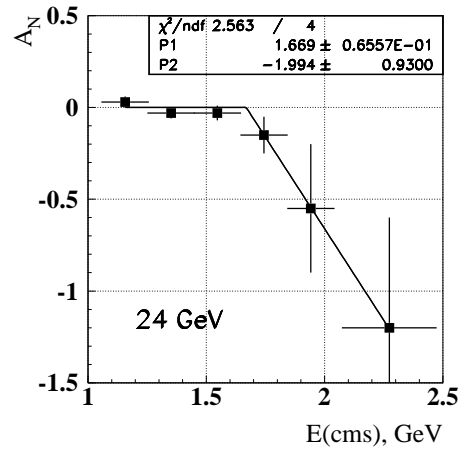


Асимметрия начинает  
расти при существенно  
разных  $x_F$ ,  
но при одной энергии  
в с.ц.м.

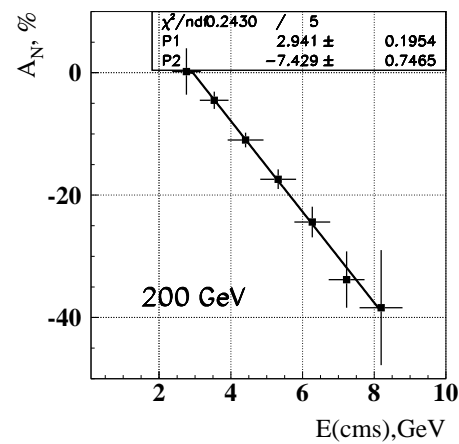
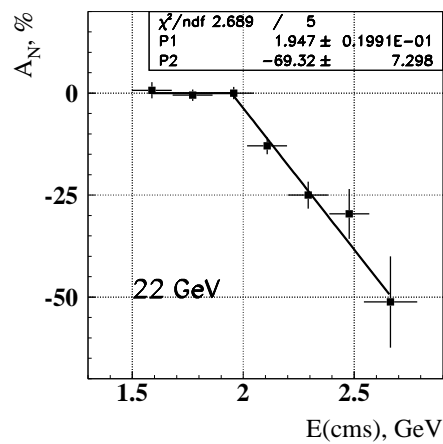


Энергия  
 $E_0^{cms} \approx 1.7$  ГэВ.  
Совпадает с  
данными при 40 ГэВ

## Другие результаты

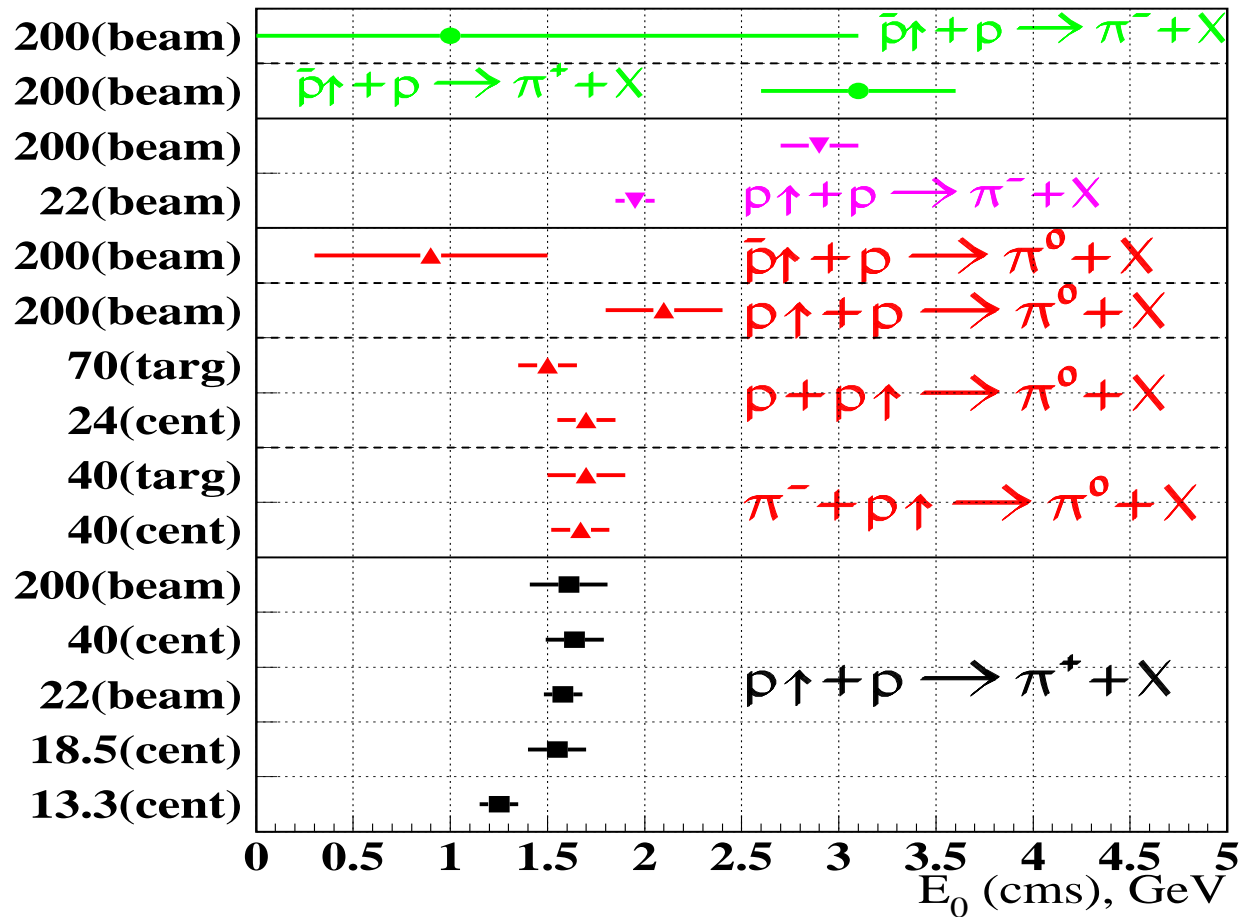


$A_N(\pi^0)$   
при 24 и 70 ГэВ



$A_N(\pi^-)$   
при 22 и 200 ГэВ

## Поиск точки пересечения во всех экспериментах



## Суммарный результат

Реакция	Энергия	$E_0^{cms}$ , ГэВ	$\chi^2/N$	$k \cdot (E_{max}^{cms} - E_0^{cms})$ , %
$p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^+ + X$	13.3	$1.26 \pm 0.1$	0.9	$52 \pm 6$
$p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^+ + X$	18.5	$1.46 \pm 0.15$	0.85	$63 \pm 16$
$p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^+ + X$	21.92	$1.57 \pm 0.1$	0.9	$68 \pm 6$
$p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^+ + X$	40	$1.64 \pm 0.15$		
$p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^+ + X$	200	$1.68 \pm 0.25$	1.1	$52 \pm 5$
$\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$	40	$1.67 \pm 0.15$	1.5	$107 \pm 26$
$\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$	40	$1.76 \pm 0.2$	0.7	$36 \pm 14$
$p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$	24	$1.7 \pm 0.15$	0.6	$334 \pm 165$
$p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$	70	$1.5 \pm 0.2$	0.15	$50 \pm 15$
$p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^0 + X$	200	$2.1 \pm 0.3$	0.5	$26 \pm 5$
$\bar{p}_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^0 + X$	200	$0.9 \pm 0.6$	0.5	$13 \pm 4$
$p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^- + X$	21.92	$1.95 \pm 0.1$	0.5	$-87 \pm 11$
$p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^- + X$	200	$2.9 \pm 0.2$	$<0.1$	$-51 \pm 6$
$\bar{p}_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^+ + X$	200	$3.1 \pm 0.5$	$<0.1$	$-59 \pm 16$
$\bar{p}_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^- + X$	200	$1.0 \pm 2.2$	0.1	$25 \pm 15$

## Выводы и обсуждения

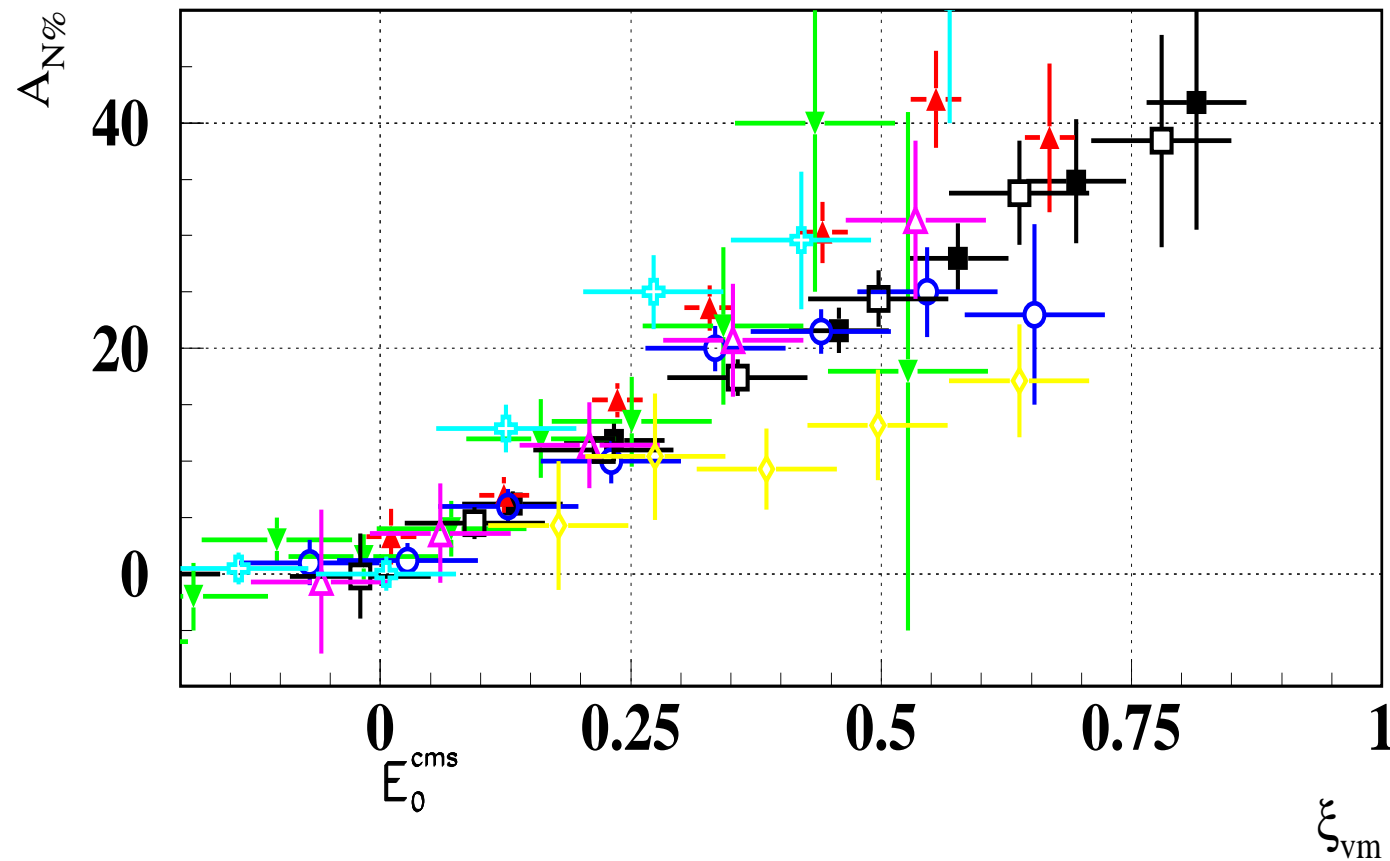
Обнаружен экспериментальный факт, что для  $\pi$ -мезона, родившегося от кварков, число которых в адроне больше и поляризация которых совпадает с поляризацией адрона, асимметрия начинает возрастать при одном и том же значении энергии  $\pi$ -мезона в системе центра масс  $E_0^{cms}$  в диапазоне  $\sim 1.5 \div 2$  ГэВ и не зависит от начальной энергии пучка.

В кварковой модели для U-матрицы данный универсальный порог может указывать на энергию возбуждения и развала конституентного кварка.

Отметим также, что для восьми экспериментов в области фрагментации поляризованной частицы, в которых измерялась асимметрия заряженных  $\pi$ -мезонов, значения  $k \cdot (E_{max}^{cms} - E_0^{cms})$  близки.

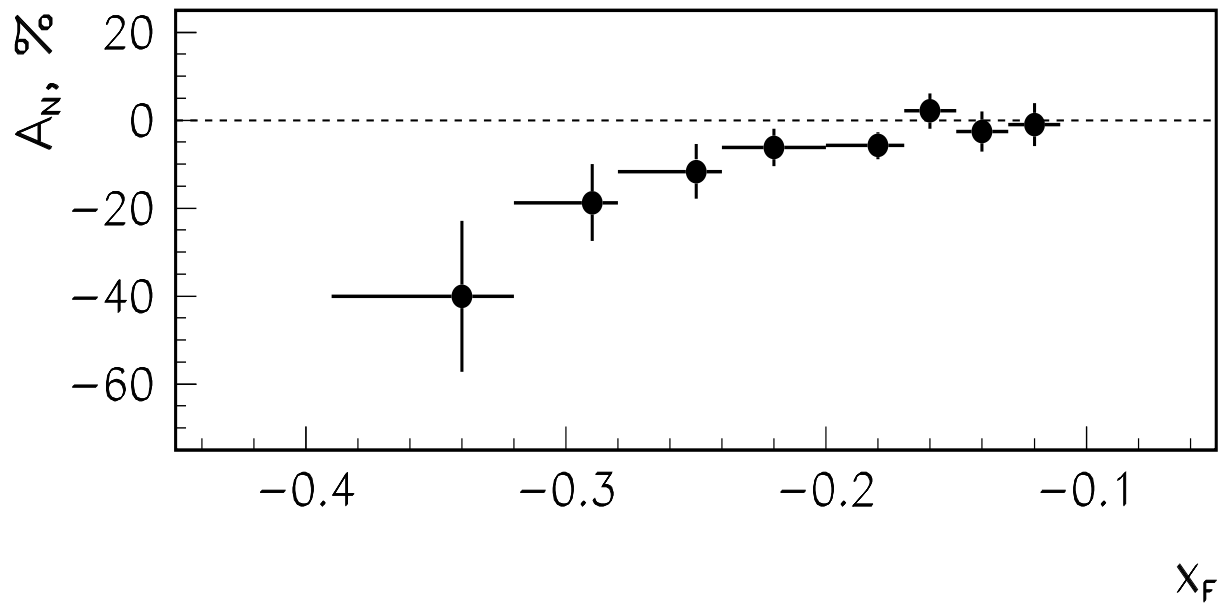


## Одинаковый наклон асимметрии



$$\xi_{vm} = (E^{cms} - E_0^{cms}) / (\sqrt{s}/2 - E_0^{cms})$$

Готовится к публикации  
(Предварительно)



Асимметрия в реакции  $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ .

$$E_0^{cms} = (1.5 \pm 0.15) \text{ ГэВ/с}$$

## Благодарности

В заключение автор хотел бы выразить глубокую признательность научному руководителю дфмн А.Н. Васильеву за постановку задач, поддержку и внимательное руководство.

Диссертант благодарен руководству ИФВЭ за поддержку в проведении исследований; Ускорительному отделению и отделу Пучков ИФВЭ за высокую эффективность работы У-70 и канала 14.

Соискатель благодарен за неоценимую помощь в подготовке и проведении измерений коллективу сотрудничеств ПРОЗА-М и ПРОЗА-2

Автор хотел бы высказать особую признательность А.Н. Васильеву, Ю.А. Матуленко, Л.В. Ногач, Л.Ф. Соловьеву, Ю.В. Харлову и К.Е. Шестерманову за помощь в подготовке программ и обработке данных.

Автор благодарен В.В. Абрамову, М. Ансельмино, А.М. Зайцеву, В.В. Киселеву, Д. Коллинзу, М. Рыскину, С. Трошину за полезные обсуждения во время подготовки статей.

## Экспериментальные данные по измерению асимметрии инклюзивного рождения $\pi^0$ -мезонов.

### Эксперименты в центральной области:

- ЦЕРН (24 ГэВ) впервые обнаружил значительную асимметрию инклюзивного образования  $\pi^0$ -мезонов в реакции  $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ .
- ПРОЗА(ИФВЭ) асимметрия рождения достигает  $-40\%$  при  $p_T \simeq 2,5-3$  ГэВ/с.
- E704(ФНАЛ) при энергии 200 ГэВ — асимметрия в рождении  $\pi^0$ -мезонов в центральной области равна 0 в интервале  $p_T = 1-3$  ГэВ/с.

### В области фрагментации поляризованного пучка

- E704 (ФНАЛ, 200 ГэВ). Асимметрия  $A_N(\pi^0)$ -мезона достигает  $15\%$  при рассеянии поляризованных протонов и антипротонов.
- Недавно опубликованная асимметрия  $\pi^0$ -мезонов в эксперименте STAR на ускорителе со встречными пучками при  $\sqrt{s}$  достигает  $14 \pm 4\%$  при больших значениях  $x_F$ .

## Краткий обзор теоретических моделей

В рамках пертурбативной КХД асимметрия не возникает  
Разработаны модели, в которых асимметрия объясняется:

- введением дополнительного поперечного импульса кварка  $k_T$ :
  - в *начальном состоянии* – несимметричность функции плотности распределения кварков для противоположных направлений поляризации протона (**механизм Сиверса**);
  - в *конечном состоянии* – несимметричность функций фрагментации для противоположных направлений поляризации протона (**механизм Коллинза**);
- вкладом высших твистов (**Ефремов, Теряев**);
- влиянием орбитального момента:
  - валентных кварков (**Берлинская модель**) ;
  - кварк-антикваркового облака внутри конституентного кварка (кварковая модель для U-матрицы – **Трошин, Тюрин**);
- взаимодействием магнитного момента кварков с хромомангнитным полем (**Рыскин, Абрамов**);
- образованием резонансов или возбужденных состояний.

# Общая постановка эксперимента

## RAMPEX at Channel 14

### Distances:

- from crystal24 to collimator.....15.0 m
- from crystal25 to collimator.....12.0 m
- from collimator to middle of Q1...1.0 m
- from Q1 to Q2.....2.1 m
- from Q2 to Q3.....1.9 m
- from Q3 to Q4.....2.1 m
- from Q4 to middle of M5.....3.65 m
- from M5 to M18.....24.996 m
- from M18 to Q21..... 15 m
- from Q21 to Q22..... 3.6 m
- from Q22 to Q27..... 13.8 m
- from Q27 to Q28..... 3.6 m
- from Q28 to hodoscope..... 5.58 m
- between hodoscopes ..... 5.73 m
- from hodoscope to polarized target... 8.8 m

### Parameters of magnets:

#### Dipole M1A (type SP150)

- Length ..... 0.5 m (in iron)  
0.55 m (in field)
- Aperture (diameter) ... 0.05 m
- Strength of field .....  $\leq 1.8$  T
- Bending angle .....  $\pm 2$  mrad or  $\pm 0.116^\circ$

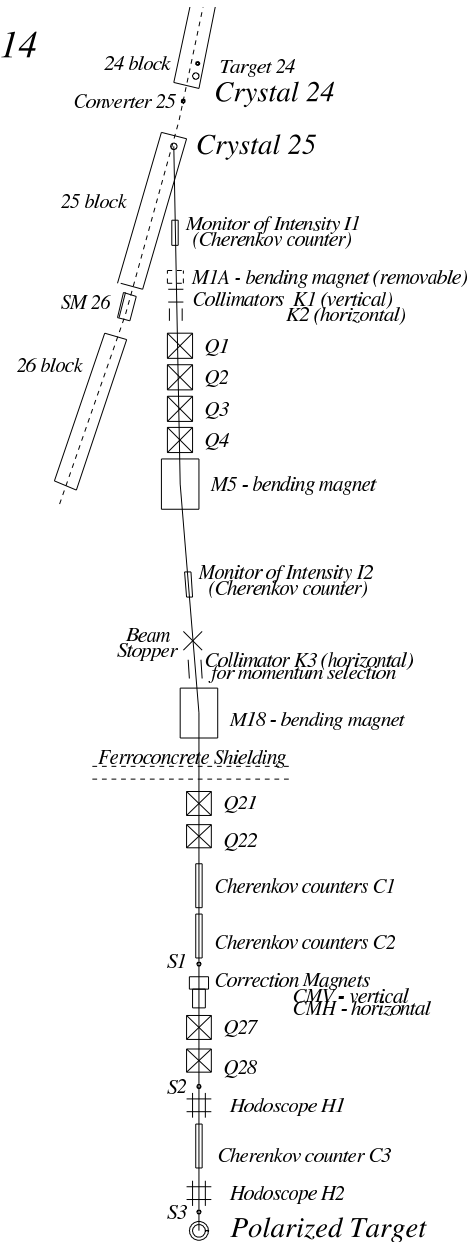
#### Dipoles M5 and M18 (type SP129)

- Length ..... 4.0 m (in iron)  
4.15 m (in field)
- Aperture (diameter) ... 0.18 m
- Strength of field .....  $\leq 1.8$  T
- Bending angle:

- at M5 is equal 13 mrad or  $0.756^\circ$  - from U-70 orbit
- at M18 is equal 22 mrad or  $1.238^\circ$  - to U-70 orbit

#### Quadrupoles :

- Q1 (type 20K100A), Q4 (type 20K200A)
- Gradient  $\leq 13$  T/m
- Aperture 0.2 m, Length 1.0 m and 2.0 m
- Q2, Q3, Q21, Q22, Q27 (type 20K100A)
- Gradient  $\leq 13$  T/m
- Aperture 0.2 m, Length 1.0 m
- Q28 (type 10K200A)
- Gradient  $\leq 0.2$  T/m
- Aperture 0.1 m, Length 2.0 m



## Регистрация частиц пучка

Пучковая аппаратура эксперимента состояла из:

- триггерных счетчиков  $S1 - S3$  ( $S1$  — диаметром 100 мм, на расстоянии 16.15 м от мишени,  $S2$  — диаметром 100 мм, 9.0 м от мишени и  $S3$  — диаметром 18 мм, 1.9 м от мишени);
- пучковых годоскопов  $H1 - H2$  на расстоянии 8.7 и 3.2 м от мишени
- пороговых черенковских счетчиков  $\check{C}1 - \check{C}3$ , Счетчик  $\check{C}1$  длиной 12 м и  $\check{C}2$  (10 м) наполнялись воздухом, работали при давлении  $p = 0.27$  атм. и использовались для регистрации сигнала от  $\pi$ -мезона; счетчик  $\check{C}3$  длиной 5.4 м, наполненный  $CO_2$  до давления  $p = 0.6$  атм., использовался для выделения  $K$ -мезонов.

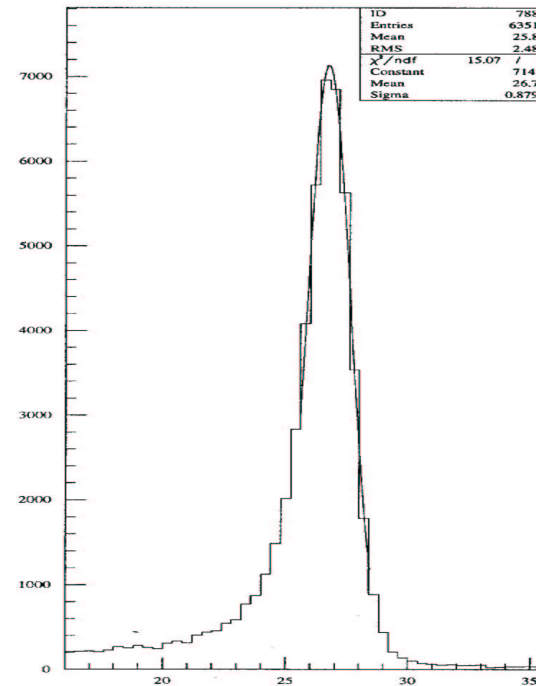
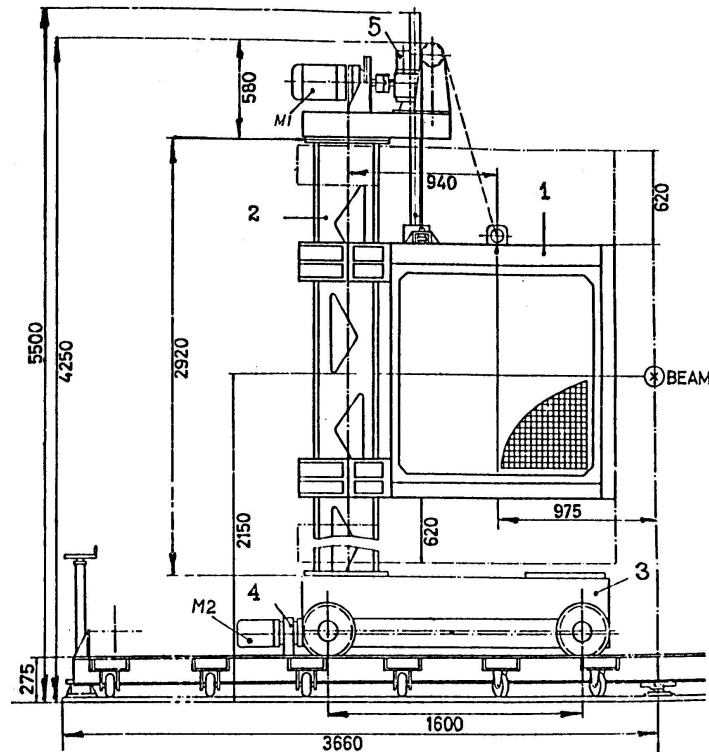
# Организация триггера

- Триггер нулевого уровня (60 нс)
  - Совпадение сигналов с трех сцинтилляционных счетчиков S1–S3
  - Срабатывание в каждой из плоскостей годоскопов
  - Отсутствие второй частицы в следующие 60 нс.
- Триггер первого уровня (350 нс)
  - Аналоговый сигнал суммарного энерговыделения в калориметре.
  - Малая часть сигнала направлялась на сумматор
  - Шунтирующие сопротивления пропорциональные  $\sin(\theta)$ , среднему для данного столбца.



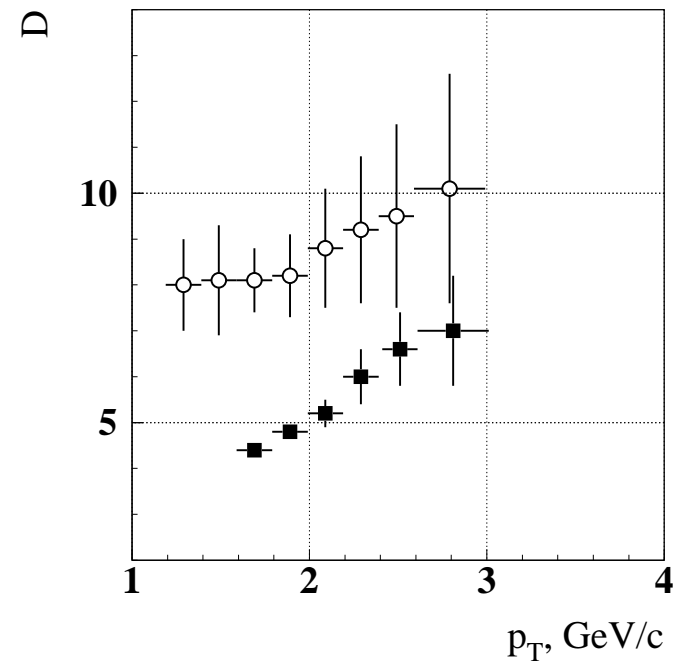
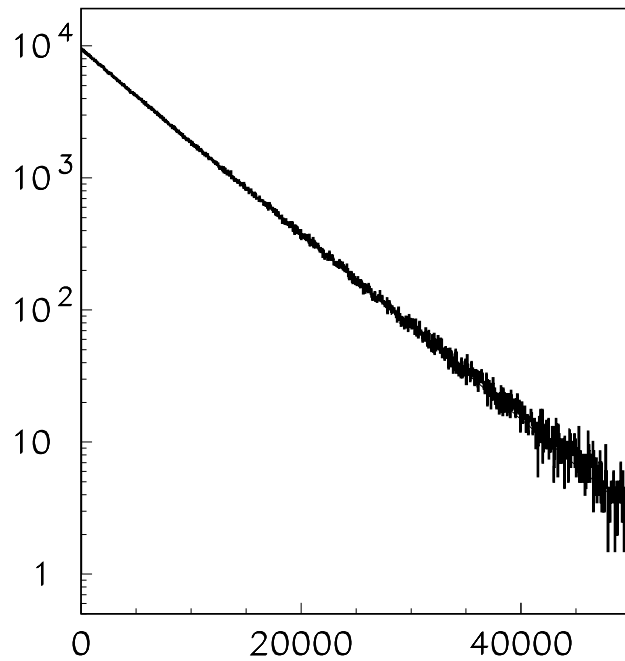
# Электромагнитный калориметр

- Свинцовое стекло  $38 \times 38 \text{ мм}^2$
- Передвижная платформа для калибровки на  $e^-$  пучке
- Разрешение калориметра  $\sigma_E/E = 2.5\%$  при 26.6 ГэВ

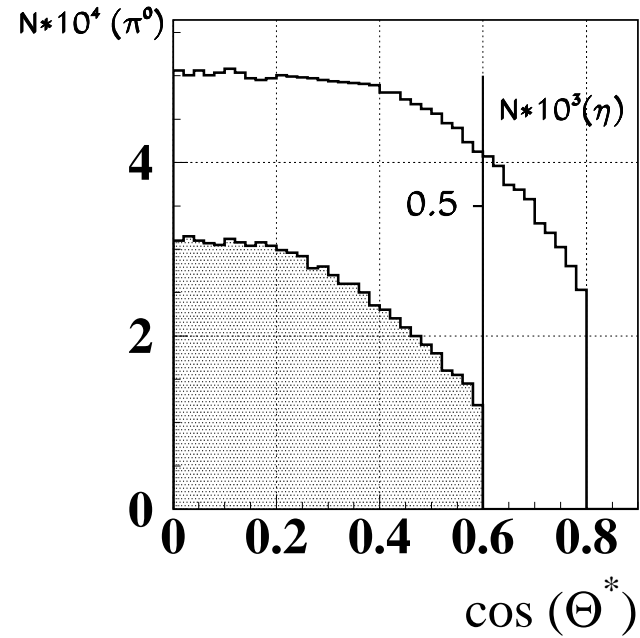
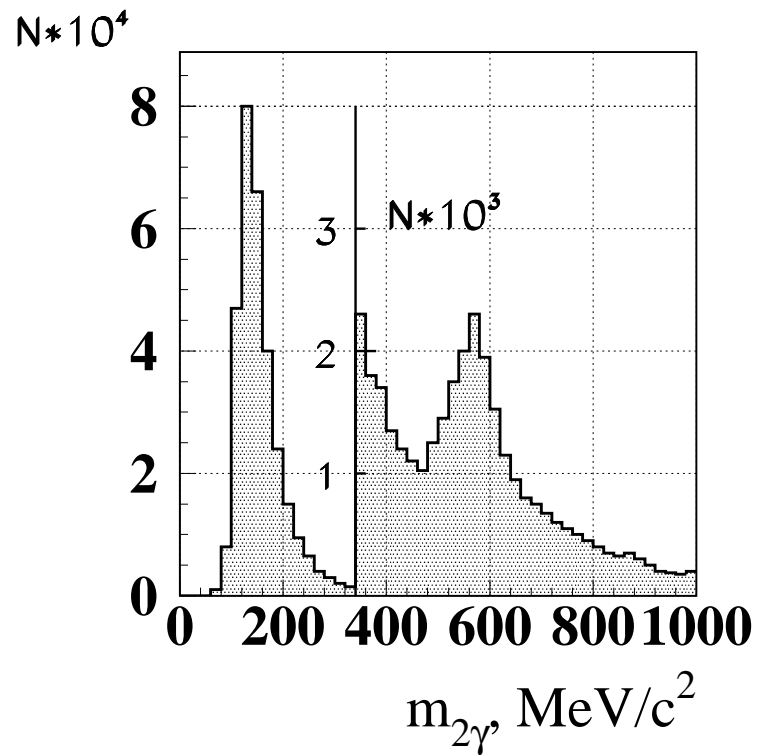


## Вычисление асимметрии

$$A_N = \frac{D}{P_{target}} \cdot A_N^{raw} = \frac{D}{P_{target}} \cdot \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}}$$



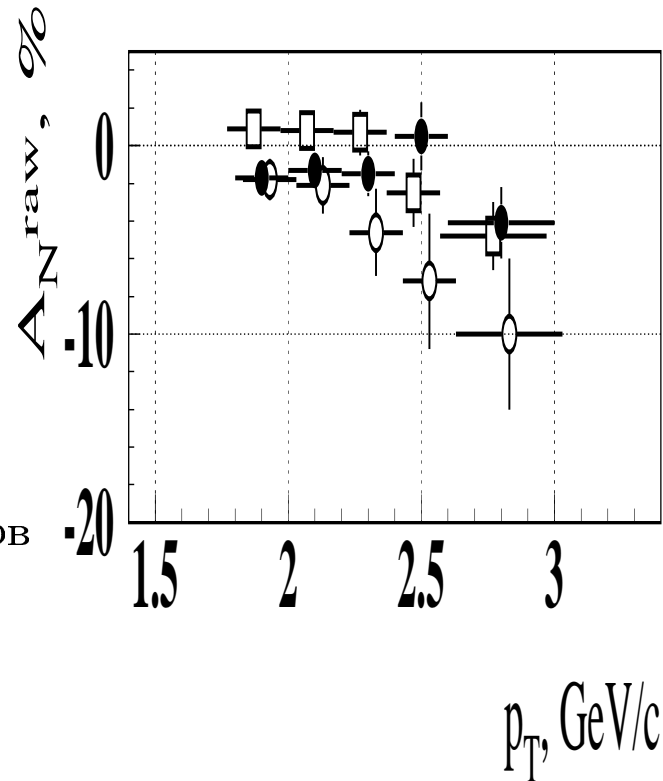
## Характеристики $\pi^0$ и $\eta$ -мезонов



## Исследование ложной асимметрии

Проверка осуществлялась несколькими способами:

- Статистика одного знака разбивалась на два ансамбля событий и находилась их асимметрия. Найденная асимметрия во всем диапазоне была сравнима с нулем.
- Сравнялось значение асимметрии для двух детекторов. (см. рисунок справа).
- Находилась асимметрия пары  $\gamma$ -квантов в диапазоне масс  $220 \div 460$  МэВ/ $c^2$



Асимметрия  $A_N$  в реакции  $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  в зависимости от поперечного импульса  $p_T$  для детектора EMC1 в сеансе 1986 года (пустые окружности) и EMC2 (закрашенные круги) в сеансе 1988 года (закрашенные круги).

## Сравнение с теоретическими моделями

Предсказания в рамках кварковой модели для  $U$ -матрицы (сплошными линиями) хорошо описывают данные.

Модели с хромомagnитным моментом тоже описывают данные, но много параметров.

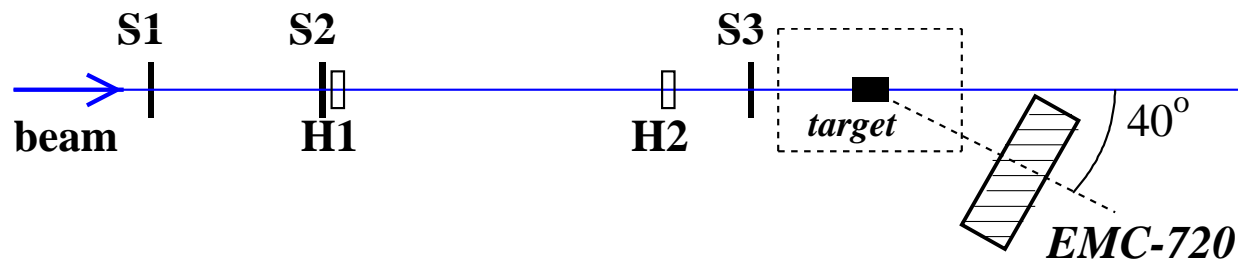
В моделях Коллинза и Сиверса ожидаются малые величины.

Поведение асимметрии в модели высших твистов убывает с ростом поперечного импульса, что противоречит представляемым экспериментальным данным.

Большая асимметрия может возникнуть при образовании  $\pi^0$ -мезона из валентных  $\bar{u}$ -кварка от падающего  $\pi^-$  мезона и  $u$ -кварка из поляризованного протона, тогда как вклад валентного  $d$ -кварка из протона в данном случае существенно подавлен (В  $pp$ -взаимодействии ожидается меньшая асимметрия).

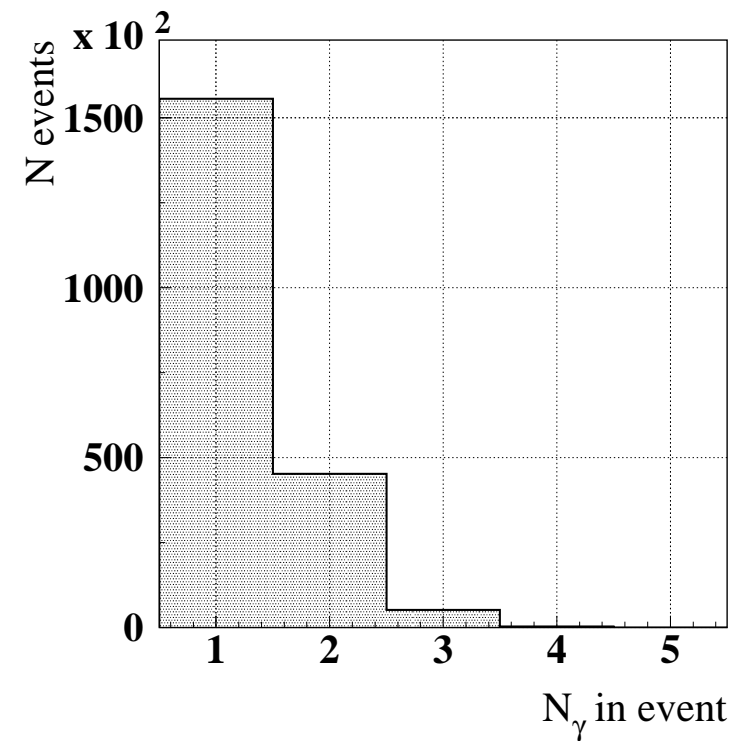
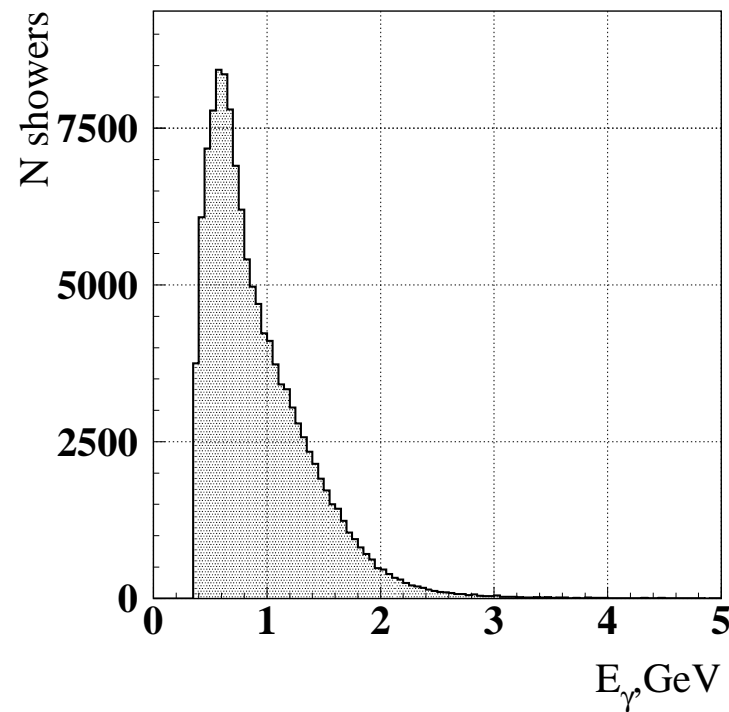
# Постановка эксперимента

- Эксперимент проведен на 14 канале У-70 (1999-2000 гг.).
- Пучок отрицательных адронов с энергией 40 ГэВ; интенсивность  $10^6$  част./цикл.
- Поляризованная протонная мишень ( $C_3H_8O_2$ ) (поляризация 80%).
- Нейтральные частицы детектируются электромагнитным калориметром ( $32 \times 24$  ячейки), расположенным под углом  $40^\circ$  ( $30^\circ$ ) на расстоянии 2.5 м от мишени.



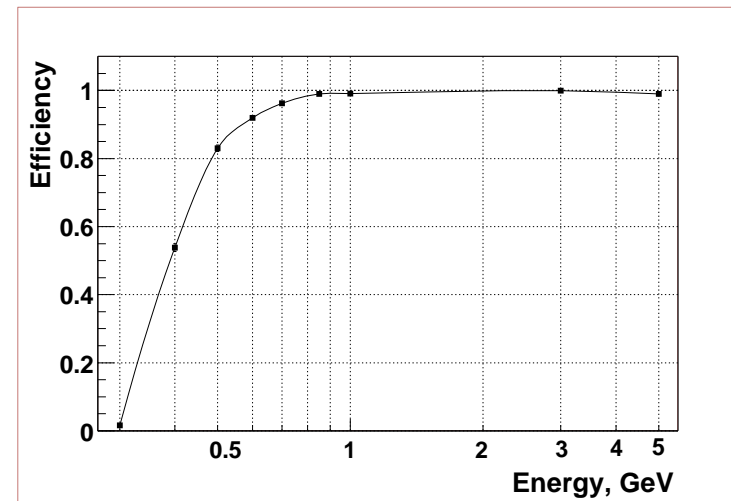
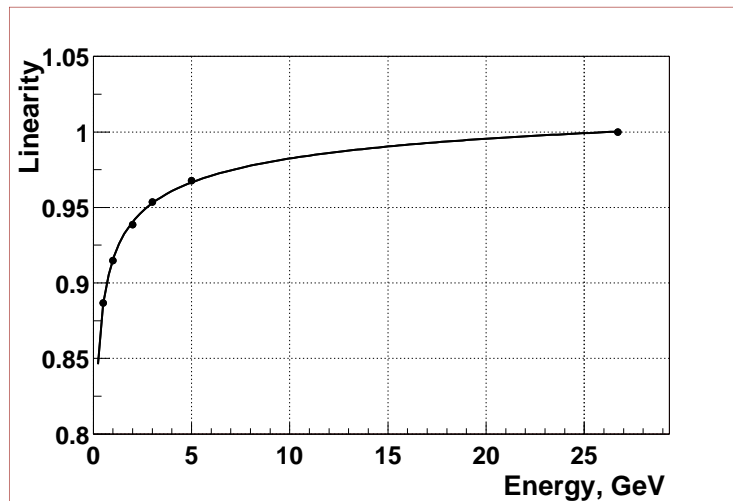
# Регистрация $\pi^0$ - мезонов

- Энергия  $\gamma$  -квантов от 0.5 до 4.5 ГэВ
- Средняя множественность  $\gamma$  -квантов – 1.3



# Моделирование энерговыделения в детекторе

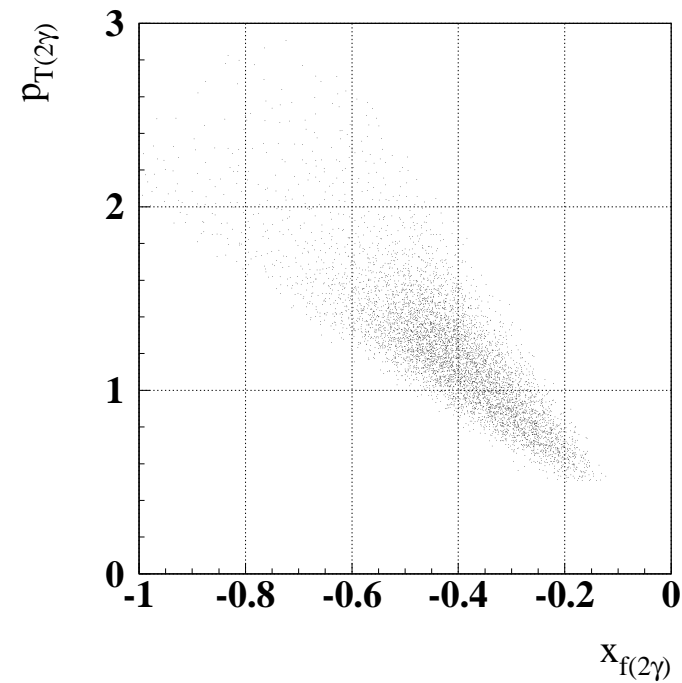
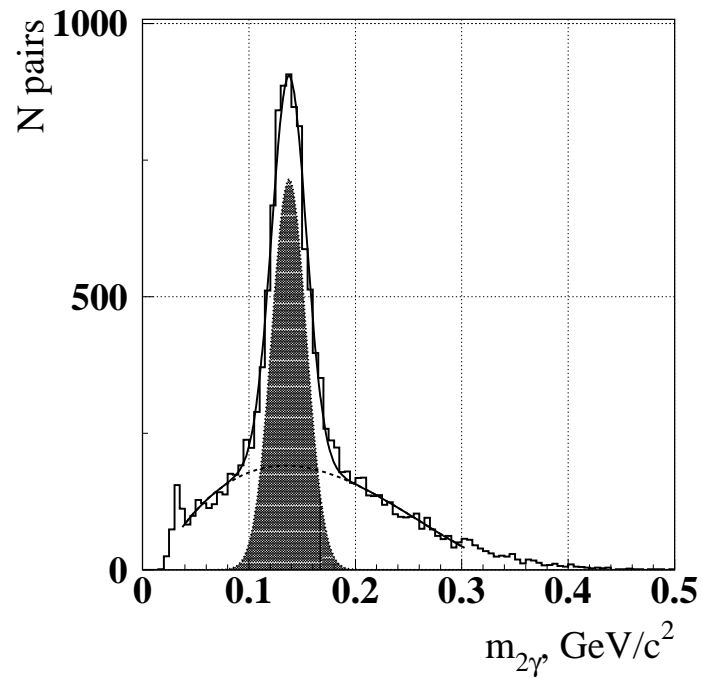
- Низкие энергии и высокий порог обрезания 20 МэВ в ячейке.
- Моделирование черенковского света в стекле.



Зависимость восстановленной энергии от истинной и эффективность алгоритма.

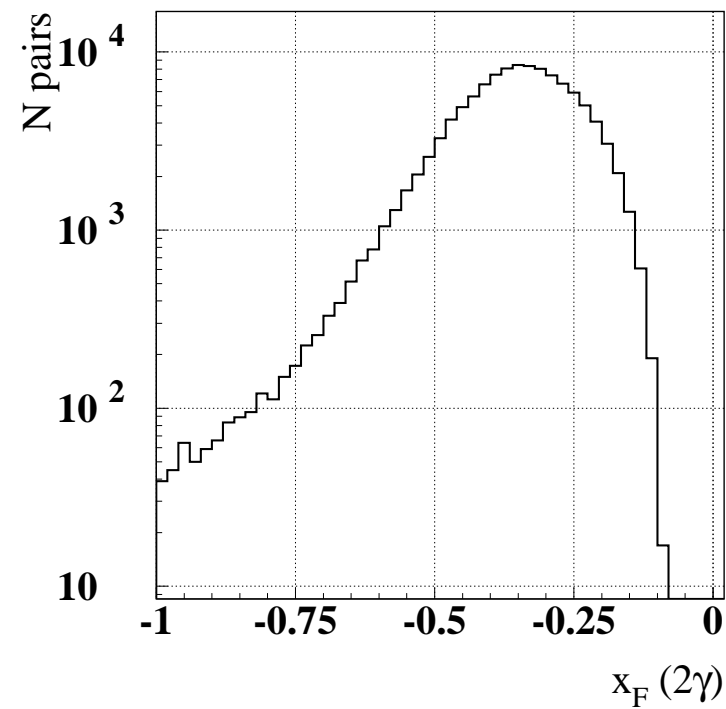
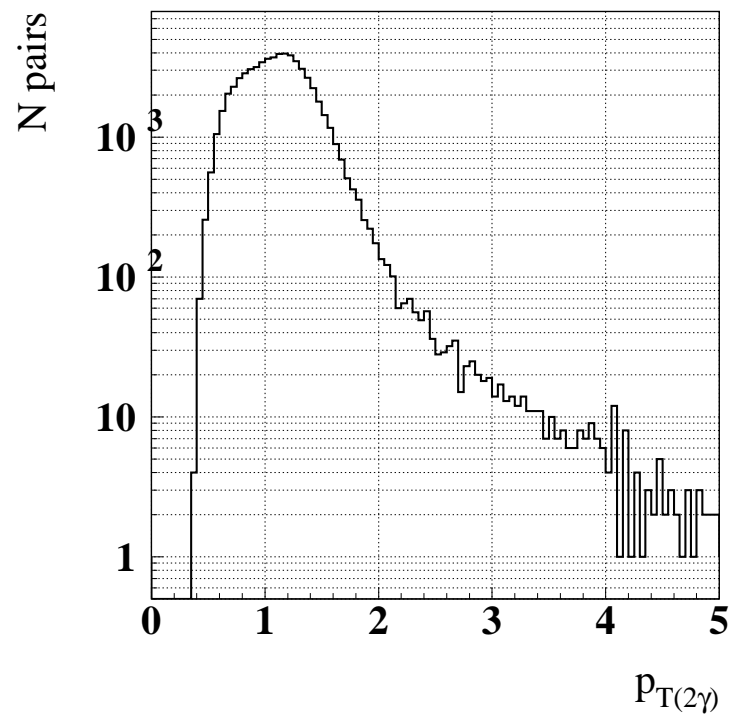


# Масса $2\gamma$ после поправок энергии

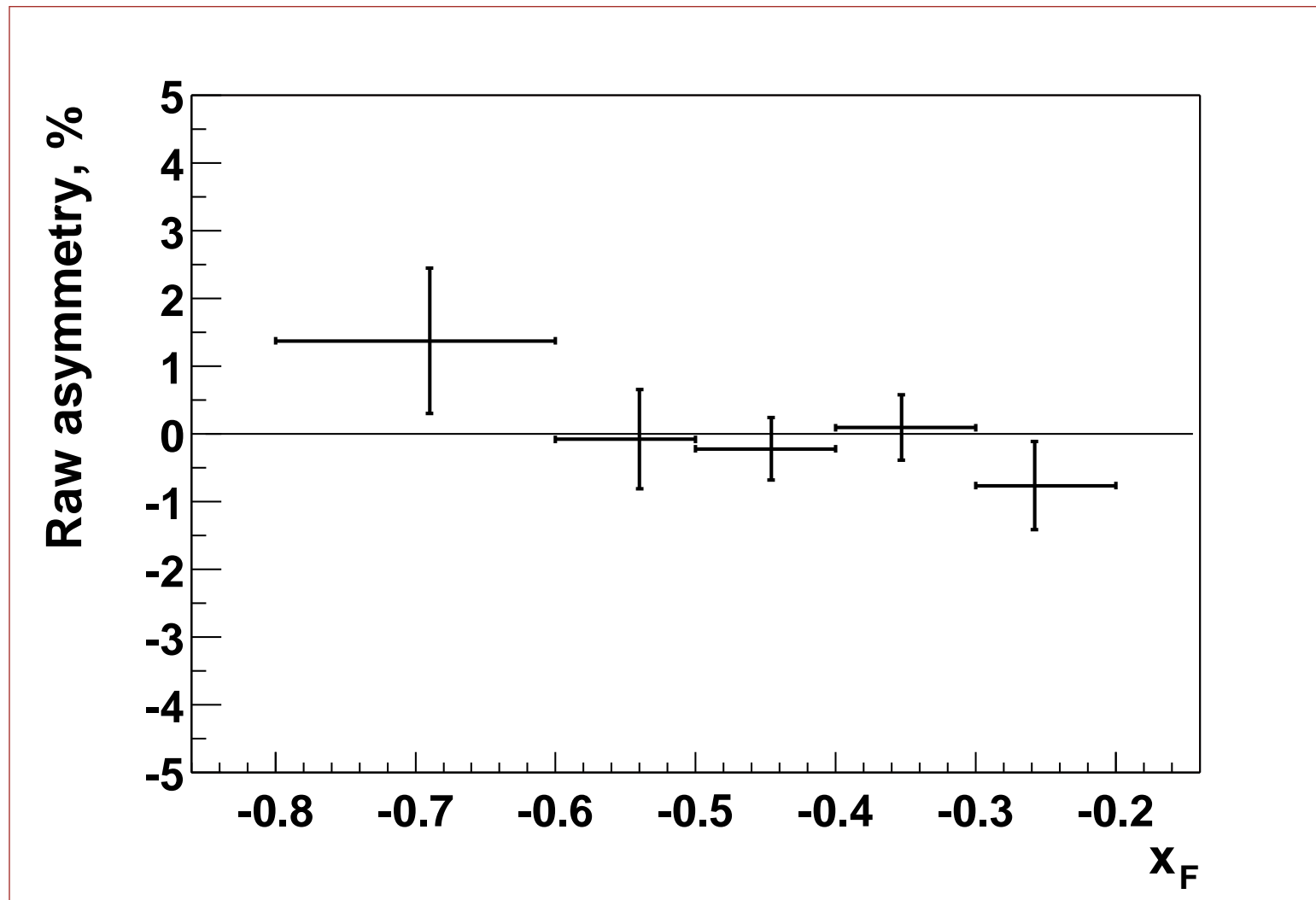


$$\sigma_m = 15 \text{ МэВ.}$$

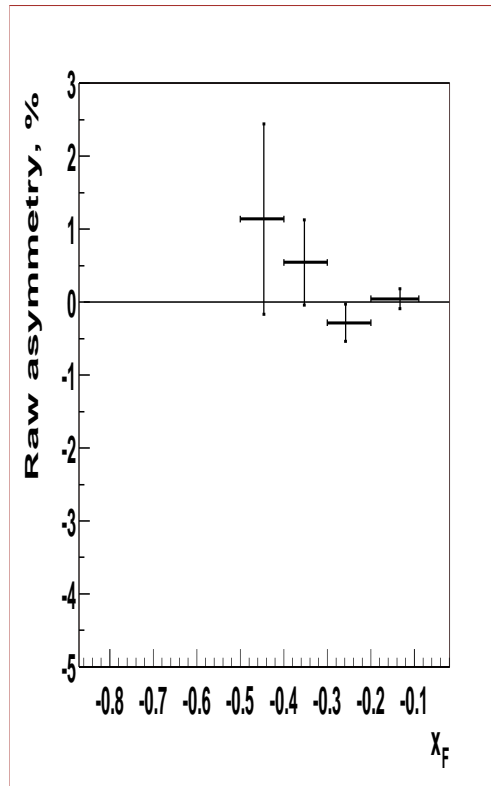
# Кинематика данных



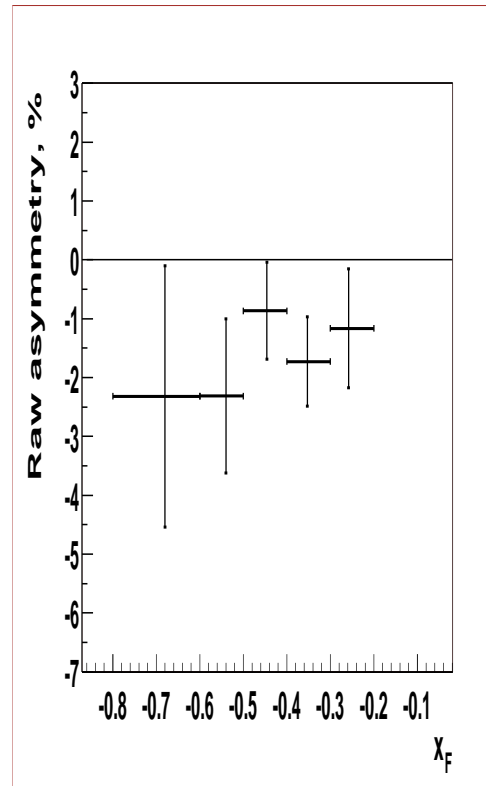
# Ложная асимметрия



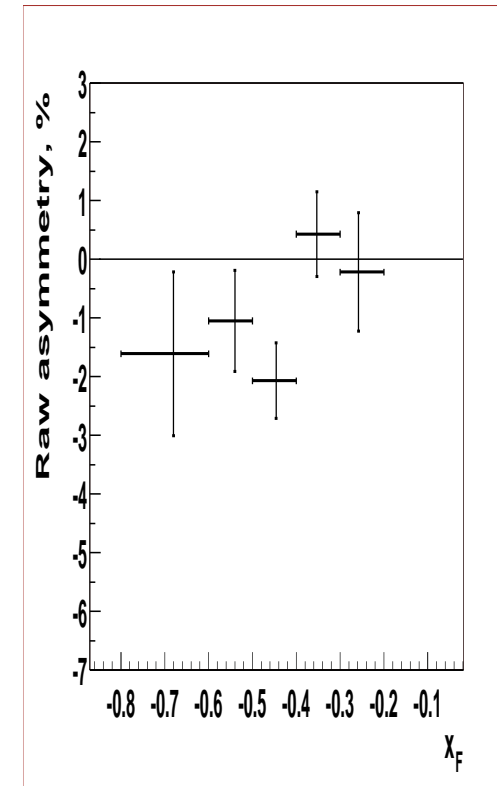
# Результаты по асимметрии в трех разных сеансах



весна-1999

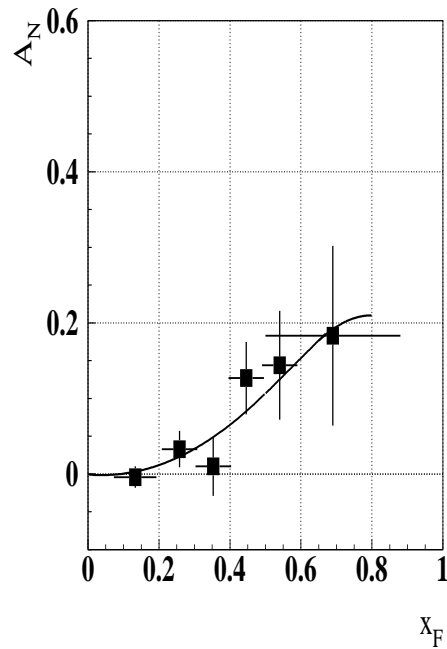


весна-2000

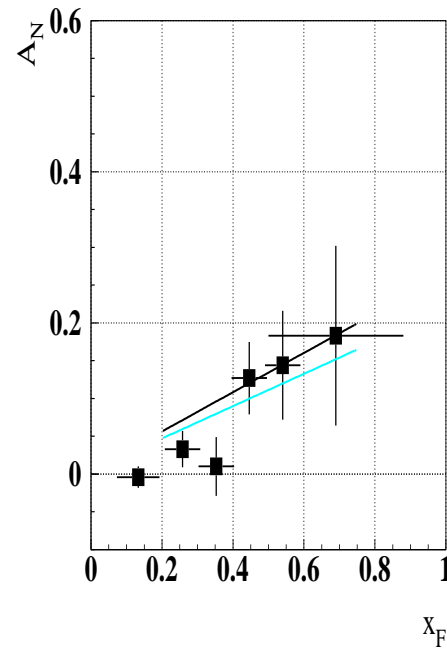


осень-2000

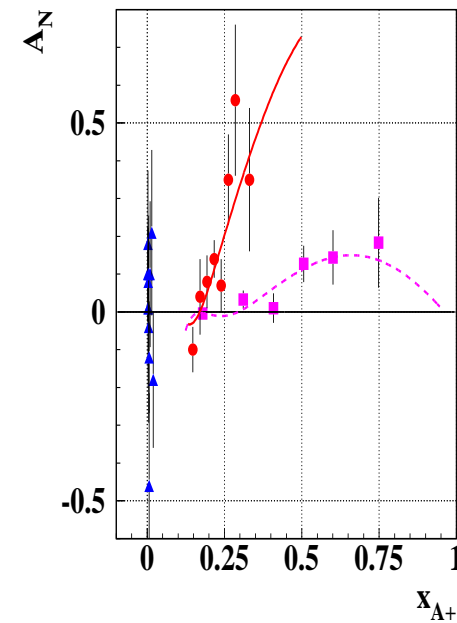
# Сравнения с теоретическими моделями



Модель Коллинза

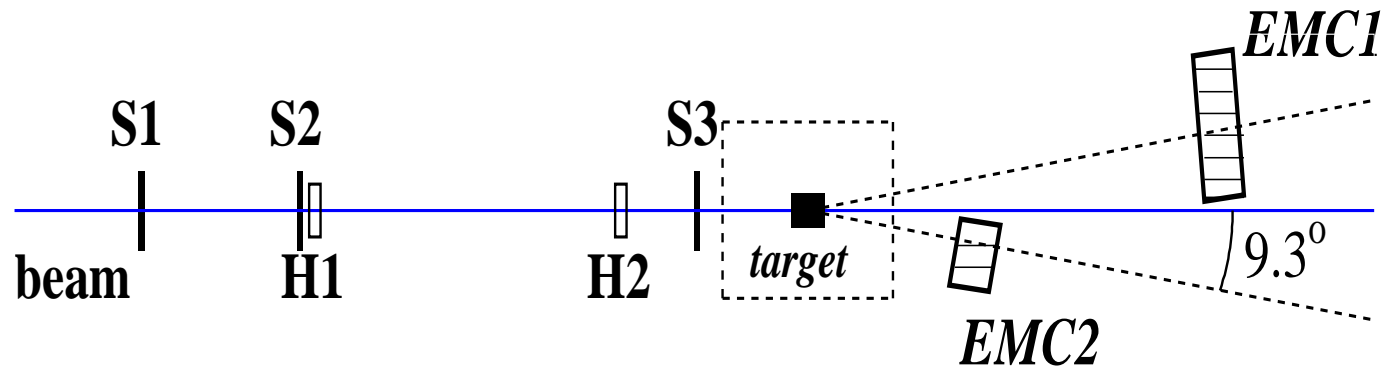


U-матрица



Абрамов

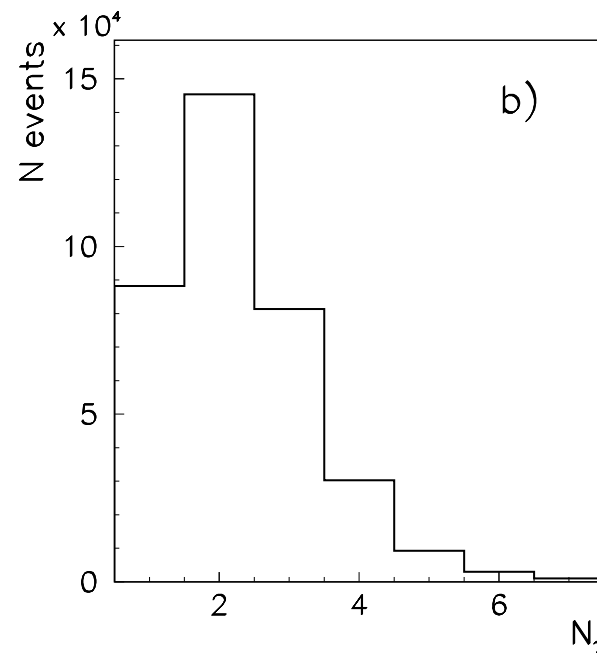
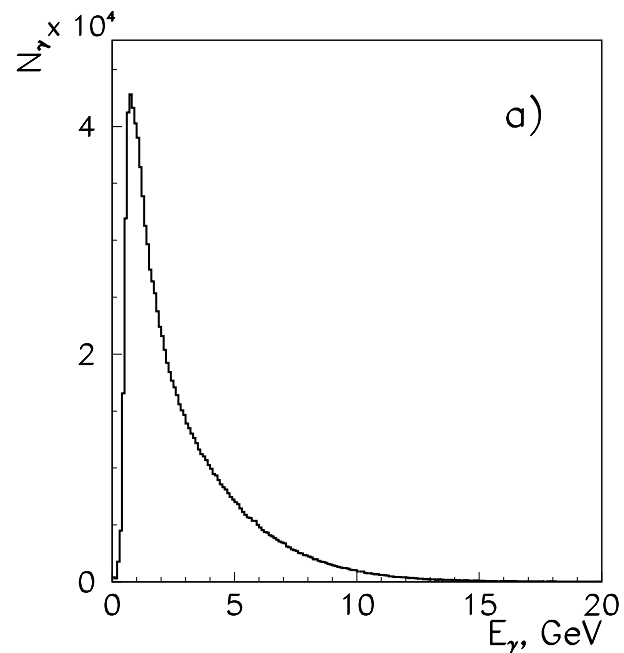
## Экспериментальная установка при 70 ГэВ



- EMC1 и EMC2: электромагнитные калориметры на 480 (7 м от мишени) и 144 (2.8 м) каналов, расположенные симметрично.
- Впервые в мире из ускорителя с жесткой фокусировкой выведен пучок протонов из вакуумной камеры через кристалл (интенсивность до  $10^7$  частиц/цикл)

# Регистрация $\pi^0$ - мезонов

- Энергия  $\gamma$  -квантов от 1 до 20 ГэВ
- Средняя множественность  $\gamma$  -квантов – 2.3



# Массовые спектры

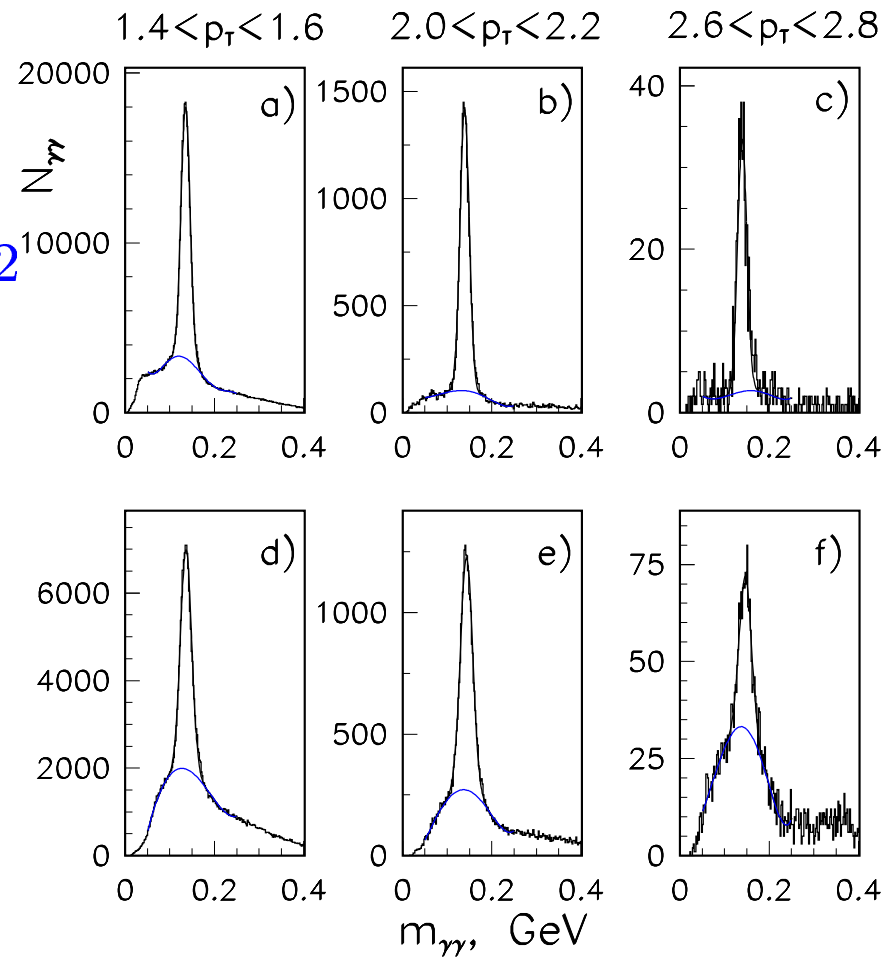
Ширина  $\pi^0$ -мезона:

<11 МэВ для EMC1

от 12 до 17 МэВ для EMC2

для разных  $p_T$

Сигнал/фон >7





# Кинематические распределения .

$x_F$  (слева) и  $p_T$

распределения  $\gamma$ -пар

для EMC1 (верхний ряд)

и EMC2 (нижний ряд)

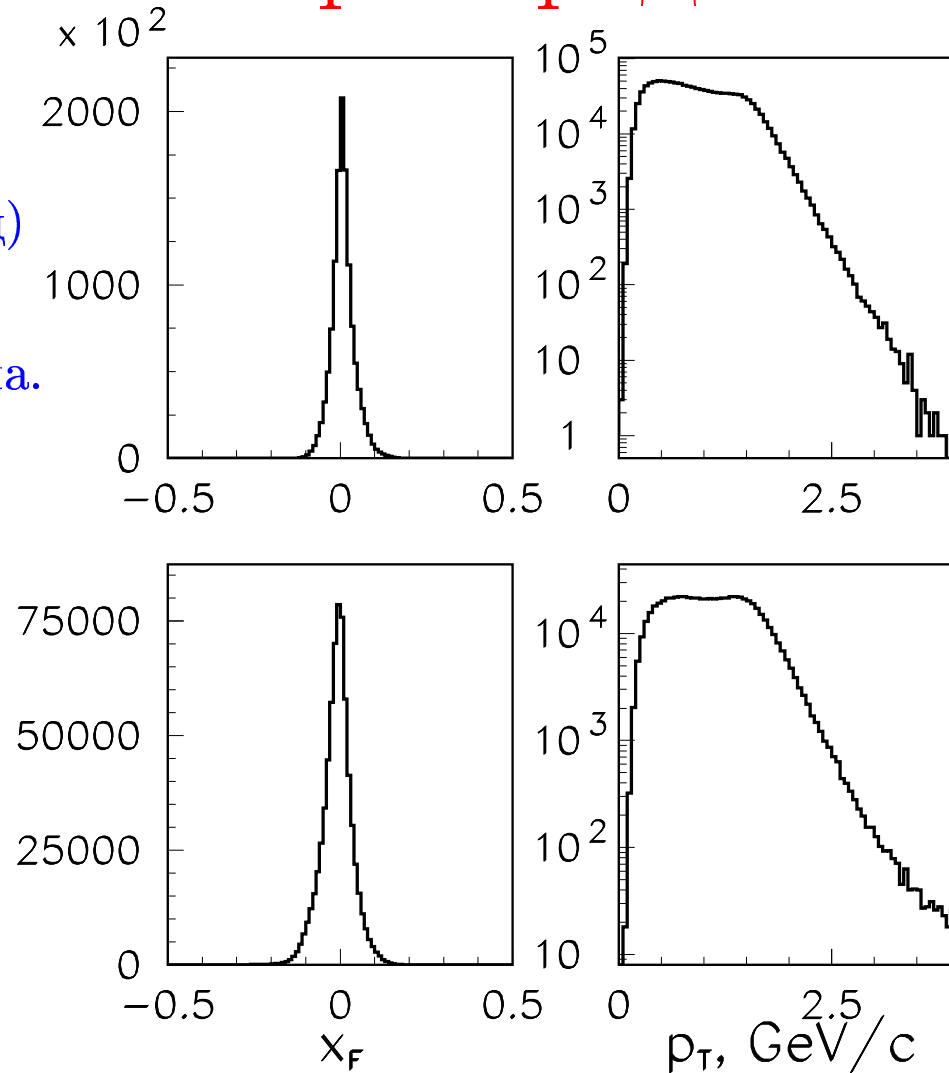
в области масс  $\pi^0$ -мезона.

Распределение по  $p_T$

приведено без учета

эффективности

регистрации  $\pi^0$  мезона



## Кинематические распределения (продолжение)

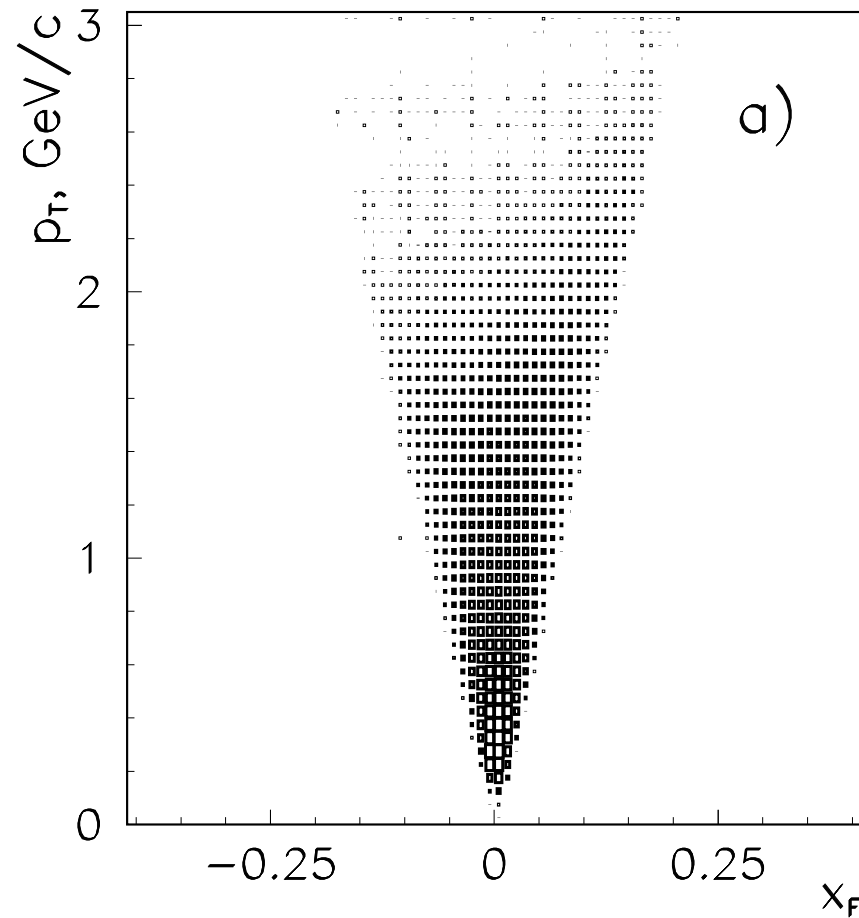
Двумерное распределение

$\pi^0$ -мезонов по  $p_T$  и  $x_F$

Распределение почти

симметрично

относительно  $x_F$

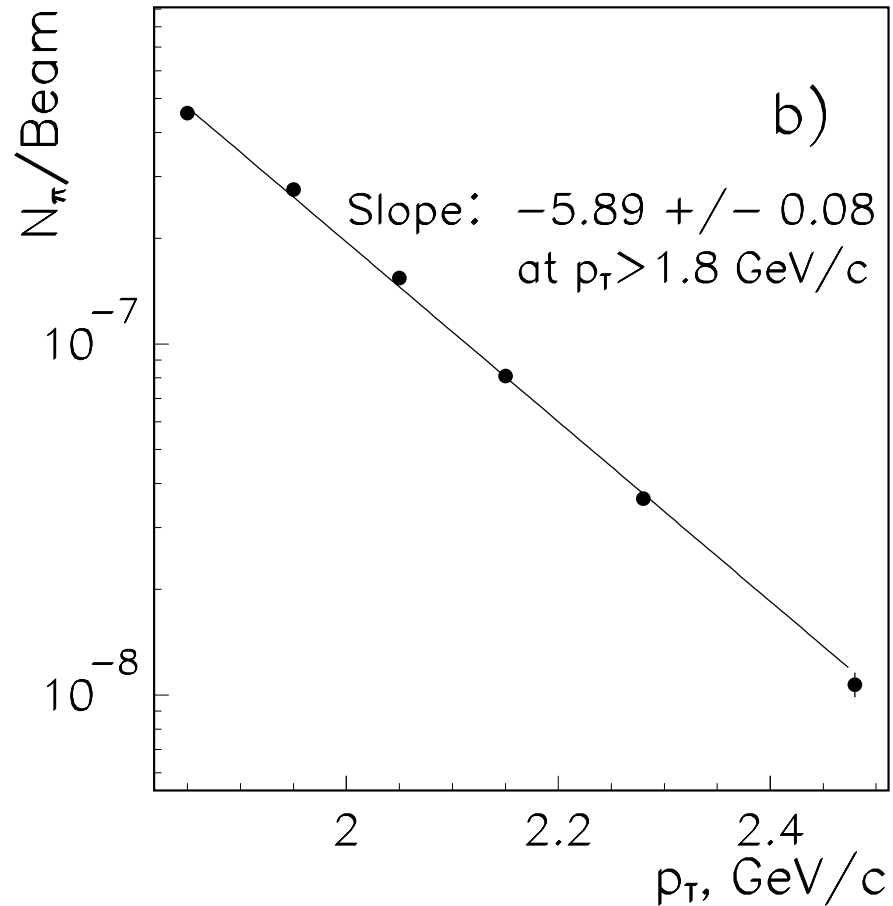


# Наклоны по $p_T$

Наклоны инвариантных сечений при  $p_T > 1.8$  (ФОДС) при 70 ГэВ (В.Абрамов и др., Препринт ИФВЭ 84-88)

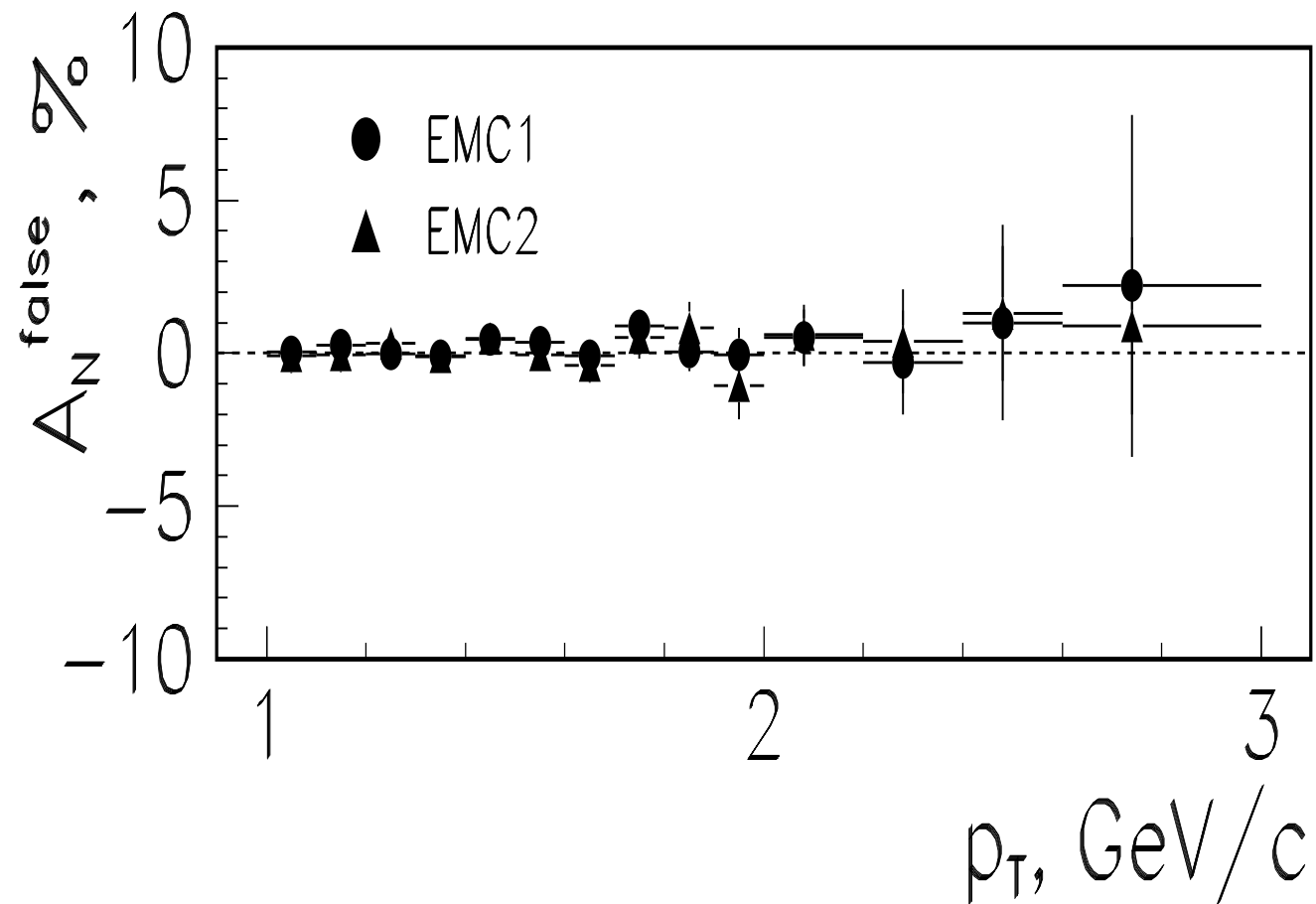
$-5.68 \pm 0.02$  для  $\pi^+$

$-5.88 \pm 0.02$  для  $\pi^-$

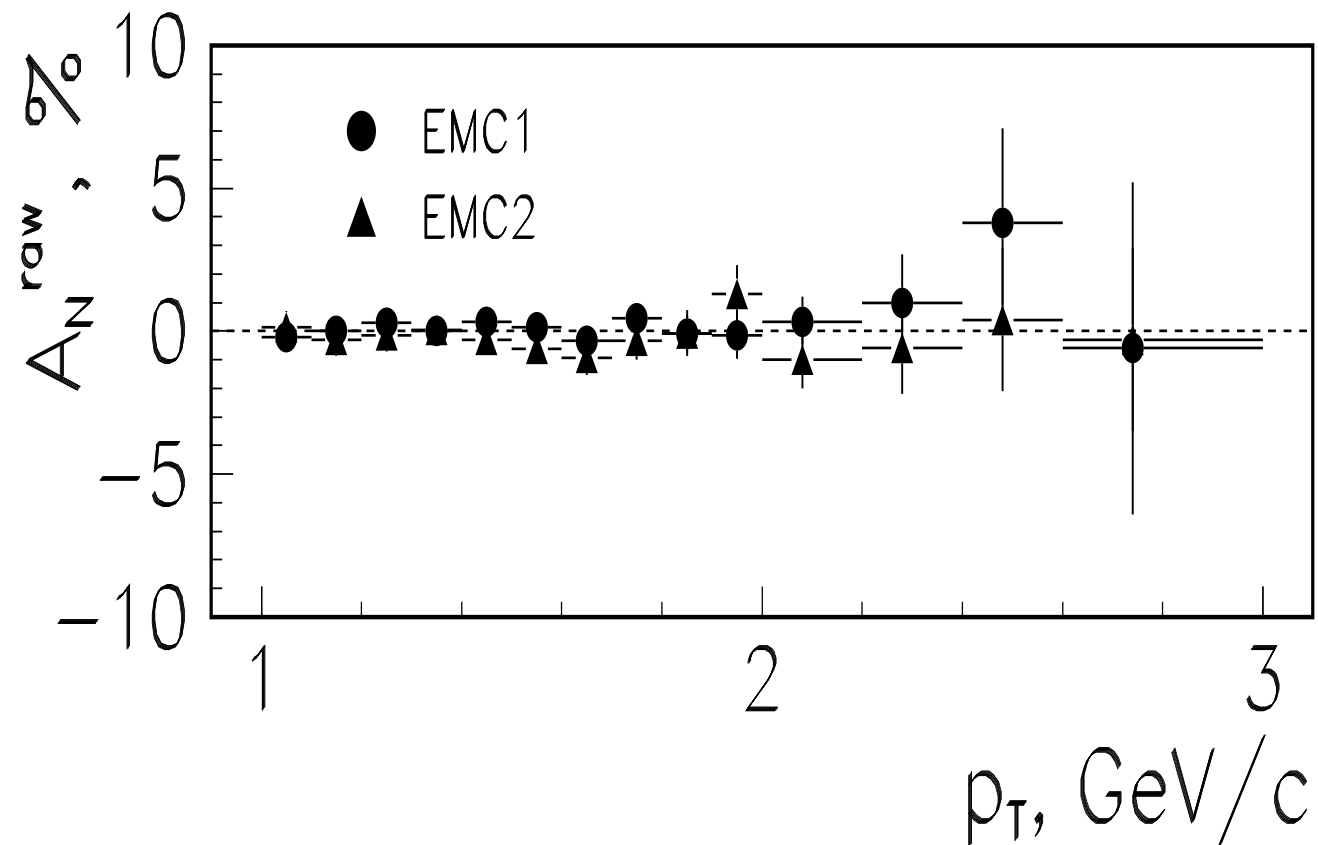


Разрешение по  $p_T$  0.08 ГэВ/с

# Ложная асимметрия



# Асимметрия для двух разных детекторов



## Основные результаты и выводы диссертации.

При решающем вкладе диссертанта на установках ПРОЗА-М и ПРОЗА-2 ускорителя У70 Института Физики Высоких Энергий проведено измерение односпиновой асимметрии инклюзивно рожденных  $\pi^0$ -мезонов в области фрагментации поляризованной мишени и под углом  $90^\circ$  в системе центра масс:

— Подготовлена экспериментальная установка ПРОЗА-М, проведен набор данных и их исследование в реакции  $\pi^- + d_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$  в сеансах 1986-1988 годов:

- Измерена  $A_N$  в реакции  $\pi^- + d_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$  в центральной области при энергии пучка 40 ГэВ (при  $p_T > 2.2$  ГэВ/с  $A_N = (-40 \pm 12)\%$ ).
- симметрия не зависит от типа поляризованной мишени. Суммарное значение асимметрии  $A_N$  для реакций  $\pi^- + p_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$  и  $\pi^- + d_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$  при  $p_T > 2.2$  ГэВ/с равно  $(-39 \pm 7)\%$ .
- При значениях поперечного импульса  $p_T < 1.6$  асимметрия сравнима с нулем.
- Асимметрия инклюзивного рождения  $\eta$ -мезонов также велика и достигает  $(-62 \pm 22)\%$  при  $p_T > 2.2$  ГэВ/с.
- В то же время асимметрия комбинаторной пары  $\gamma$ -квантов в области масс между массами  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов совместима с нулем.
- Расчеты в рамках кварковой модели для U-матрицы хорошо описывают экспериментальные данные.

— Подготовлена экспериментальная установка ПРОЗА-2 и проведен набор данных в реакции  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  в сеансах 1999-2000 годов. Соискателем подготовлен пакет программ для анализа данных “в линию” и “вне линии”. При решающем вкладе диссертанта подготовлены алгоритмы реконструкции событий и проведен анализ набранных данных.

- Впервые измерена асимметрия в инклюзивной реакции в области фрагментации поляризованной мишени. Измеренная асимметрия в реакции  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  равна  $A_N = -13.8 \pm 3.8\%$  при  $-0.8 < x_F < -0.4$  и  $p_T$  в диапазоне от 1 до 2 ГэВ/с.
- При  $-0.4 < x_F < -0.1$  ГэВ/с и  $p_T$  в диапазоне от 0.5 – 1.5 ГэВ/с асимметрия сравнима с нулем.
- Измеренная нами асимметрия в области  $|x_F| > 0.4$  совместима в пределах ошибок с измерениями во ФНАЛ (Е704, 200 ГэВ) и БНЛ (20 ТэВ в системе покоя мишени) в области фрагментации поляризованного протонного пучка при тех же значениях  $|x_F|$ . Тем самым в эксперименте с фиксированной мишенью экспериментально установлено, что асимметрия возникает в области фрагментации поляризованного протона и не зависит от того, является ли этот протон пучковой частицей, или частицей мишени.
- инклюзивное рождение  $\pi^0$ -мезона в области фрагментации поляризованного протона является новой реакцией для поляриметрии с установленной экспериментально анализирующей способностью  $\sim (10 - 15)\%$ .
- Существующие теоретические модели хорошо описывают полученные данные.

— Проведен набор данных в реакции  $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  в центральной области. При этом впервые в мире проведены исследования на пучке протонов, выведенном с помощью изогнутого монокристалла из ускорителя с жесткой фокусировкой. Основные выводы измерений в данной реакции заключаются в следующем:

- Асимметрия в реакции  $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  при 70 ГэВ в области  $1.0 < p_T < 3.0$  ГэВ/с равна нулю в пределах ошибок, что хорошо согласуется с результатами E704 при 200 ГэВ и отличается от результатов, полученных при 24 ГэВ в ЦЕРН. Асимметрия в области энергий от 70 до 200 ГэВ действительно мала.
- Предсказания теоретических моделей не противоречат полученным результатам.

— Из совокупности всех проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- Из сравнения результатов измерений асимметрии в реакции  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  ( $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ ) в центральной области и в области фрагментации мишени следует, что абсолютное значение асимметрии при 40 ГэВ начинает возрастать при одном и том же значении импульса  $\pi^0$ -мезона в системе центра масс  $p_0 = 1.7 \pm 0.15$  ГэВ/с для двух различных кинематических областей.
- Сравнивая результаты в реакции  $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  при 70 ГэВ и реакциях  $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$  ( $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ ) при 40 ГэВ в одной и той же



кинематической области (под углом  $90^\circ$  в системе центра масс), можно сделать вывод, что асимметрия зависит от сорта взаимодействующих частиц.

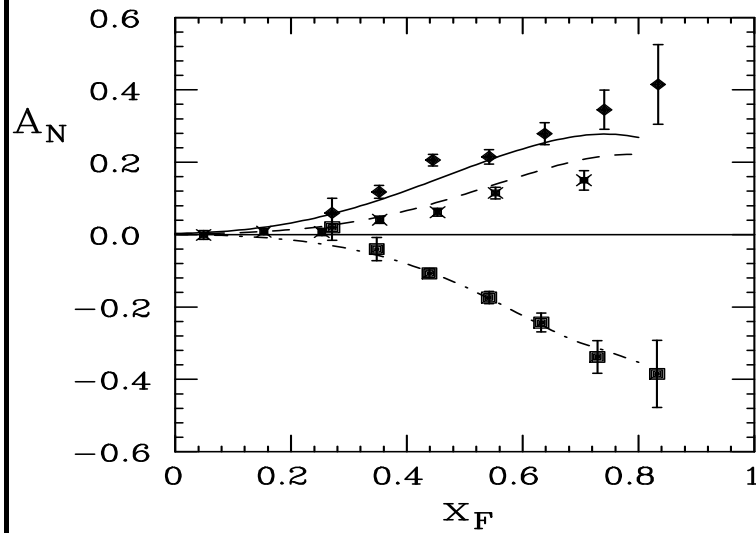
- Таким образом, большое значение асимметрии в реакции  $\pi^- + d_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$  указывает на значительный вклад валентных кварков в инклюзивное рождение  $\pi^0$ -мезонов при поперечных импульсах  $p_T > 2.2$  ГэВ/с и  $x_F \approx 0$ . В  $pp_\uparrow$ -взаимодействии может происходить сокращение асимметрии, в случае  $\pi^- p_\uparrow$  взаимодействия большая асимметрия может возникнуть при образовании  $\pi^0$ -мезона из валентных  $\bar{u}$ -кварка от падающего  $\pi^-$  мезона и  $u$ -кварка из поляризованного протона.
- Модели, где большие эффекты объясняются орбитальным моментом кварков наиболее полно отражают существующие экспериментальные данные.

— Диссертантом проведен анализ всех существующих данных инклюзивного рождения  $\pi$ -мезонов. Обнаружен экспериментальный факт, что асимметрия начинает возрастать при энергии  $\pi$ -мезона в системе центра масс в диапазоне  $1.5 - 2.0$  ГэВ/с. Это не зависит от начальной энергии пучка и угла вылета частицы.

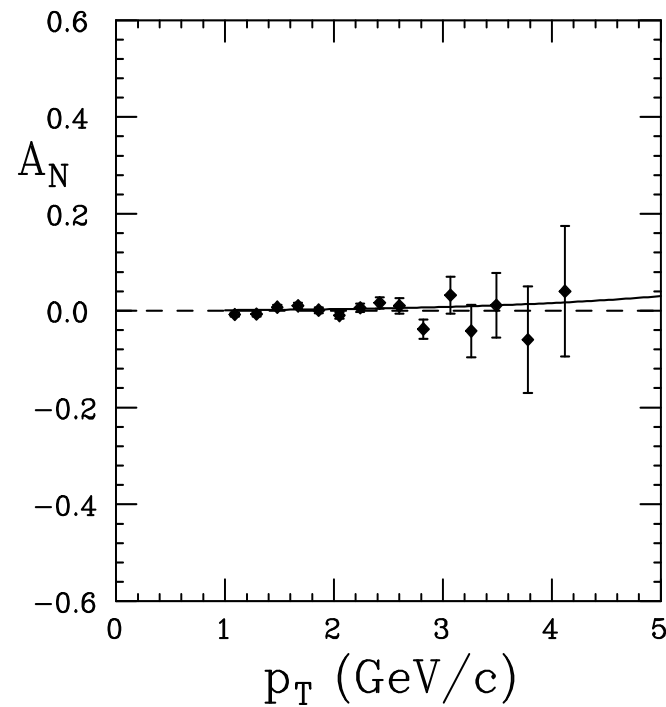
— В рамках кварковой модели для  $U$  матрицы данный порог обозначает энергию возбуждения и развала конституентного кварка.

## Приложение

## Предсказания моделей (Ансельмино)



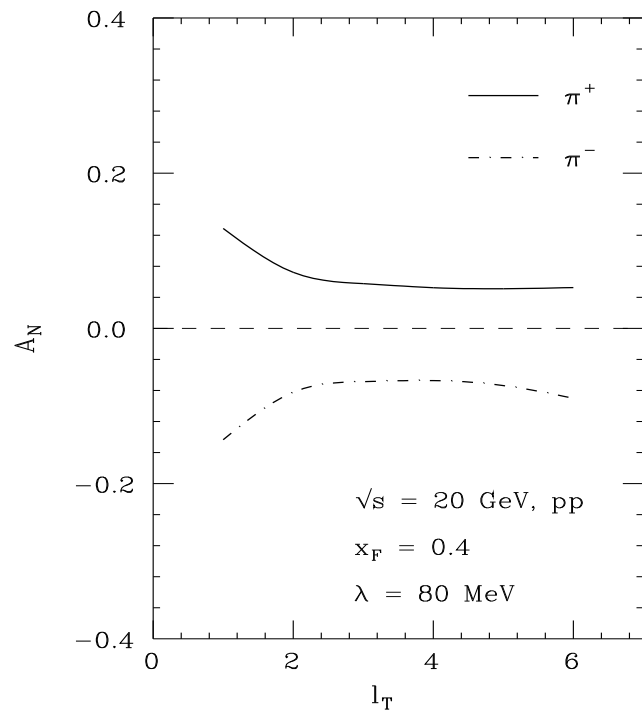
Фит экспериментальных данных по односпиновой асимметрии  $A_N$  для процесса  $p^{\uparrow} p \rightarrow \pi X$ , за счет механизма Сиверса



Односпиновая асимметрия  $A_N$  для реакции  $p^{\uparrow} p \rightarrow \pi^0 X$  в центральной области

## Приложение

## Предсказания моделей 2



Односпиновые асимметрии для инклюзивного образования  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов на пучке протонов в зависимости от поперечного момента  $l_T$  (Кью и Штерман).

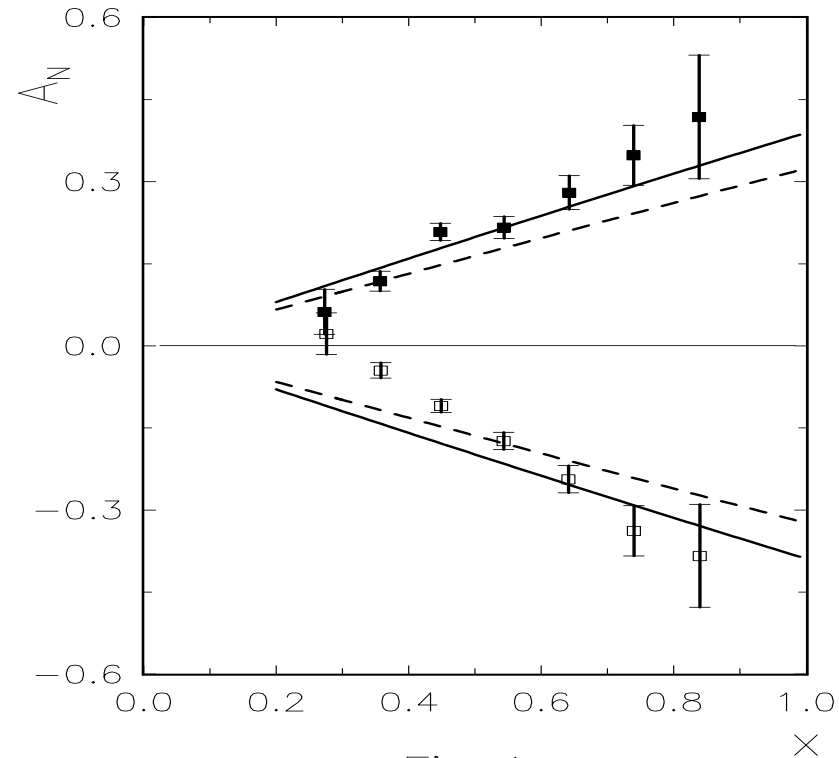


Fig. 1

Асимметрия  $A_N$  в образовании  $\pi^+$  (положительные величины) и  $\pi^-$ -мезонов (отрицательные значения) в  $p \uparrow$  взаимодействии при 200 ГэВ/с (Трошин, Тюрин).

## Приложение

## Характеристика пучков

- Пучок отрицательных частиц с энергией  $\approx 40$  ГэВ состоял из  $\pi^-$ ,  $K^-$ -мезонов и  $\bar{p}$  в пропорции 97.9 : 1.8 : 0.3%. Размер пучка на мишени составляет  $\sigma_x \simeq \sigma_y \simeq 3.5$  мм. Угловая расходимость пучка  $\pm 2.5$  мрад по горизонтали и  $\pm 2.5$  мрад по вертикали.
- Электронный пучок энергией от 1 до 45 ГэВ

Энергия	1 ГэВ	2 ГэВ	5 ГэВ	10 ГэВ	27 ГэВ	45 ГэВ
Доля электронов	82%	77%	50%	34%	77%	91%

- Интенсивность пучка протонов в сеансе 1996 года находилась в диапазоне  $3 \div 13 \cdot 10^6$  протонов/сброс. Размер пучка составил  $\sigma_x = 4$  мм по горизонтали, и  $\sigma_y = 3$  мм по вертикали. Угловые расходимости пучка составили соответственно 2 мрад и 1 мрад. Разброс пучка по импульсу  $\Delta p/p \sim 10^{-3}$ .

Приложение

Характеристика пучка отрицательных частиц

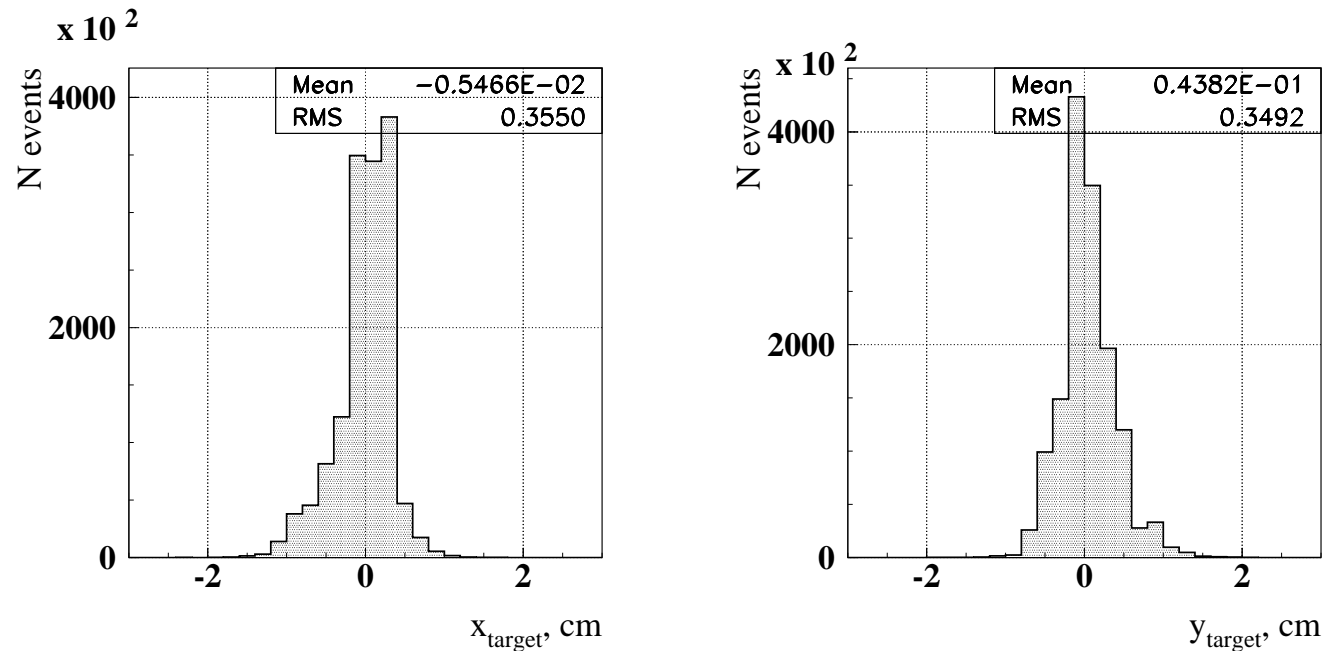


Рис. 1: Профили пучка отрицательных частиц с импульсом 40 ГэВ/с в области мишени по  $x$  (слева) и  $y$ .

Приложение

Спектр электронного пучка

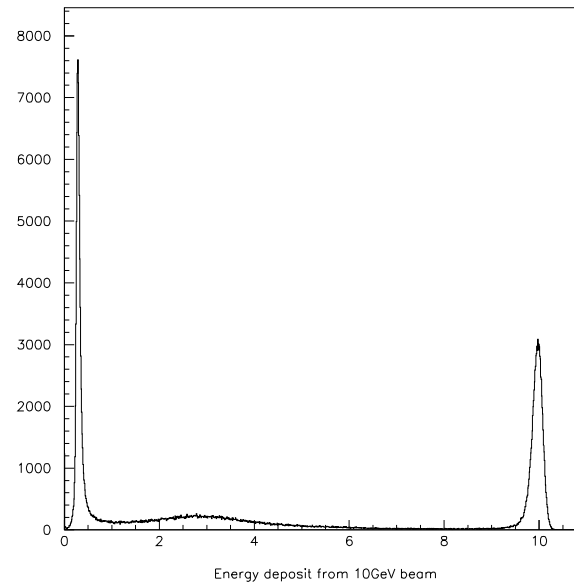


Рис. 2: Спектр зарегистрированных электромагнитным калориметром частиц при импульсе пучка электронов с энергией 10 ГэВ (наихудшая ситуация с точки зрения чистоты пучка).

Приложение

Характеристика протонного пучка

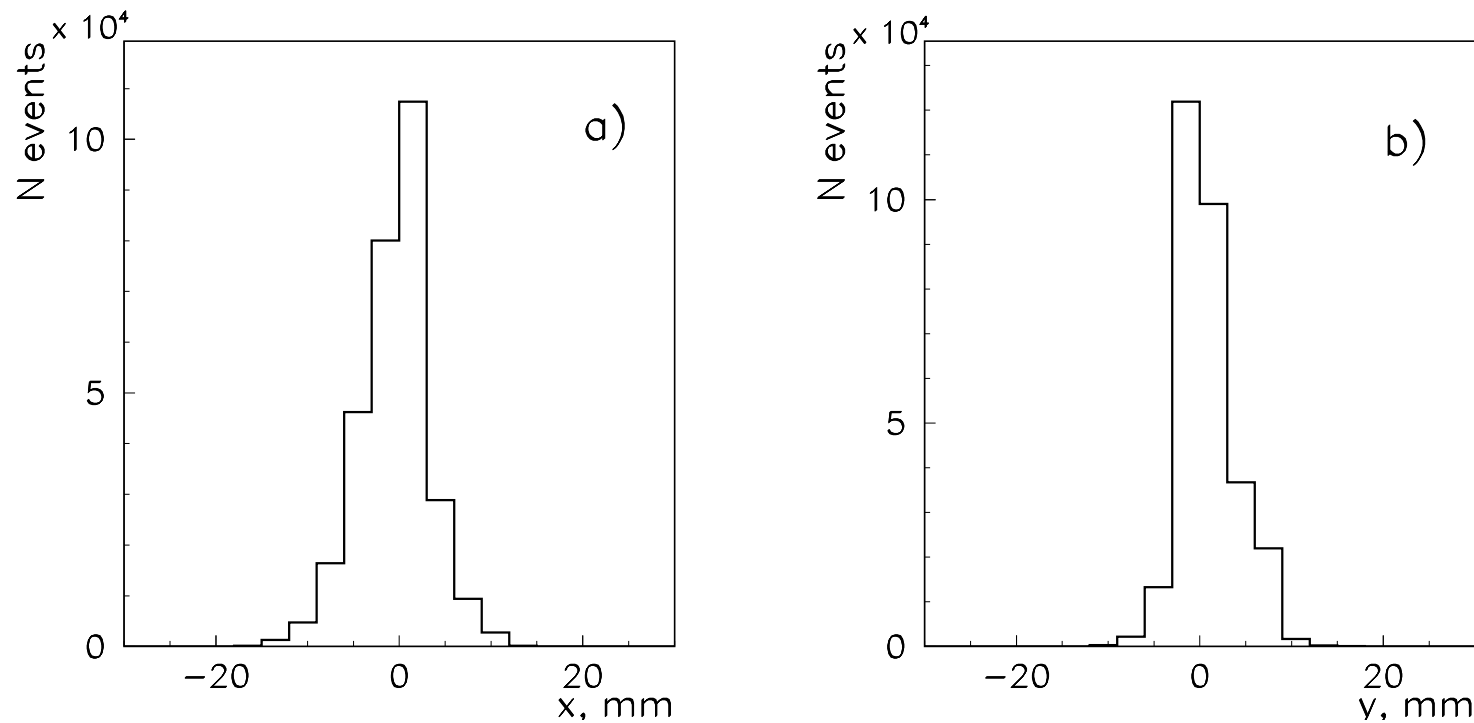


Рис. 3: Профили протонного пучка в области мишени по  $x$  (а) и  $y$  (b).

## Приложение

## Стабильность протонного пучка

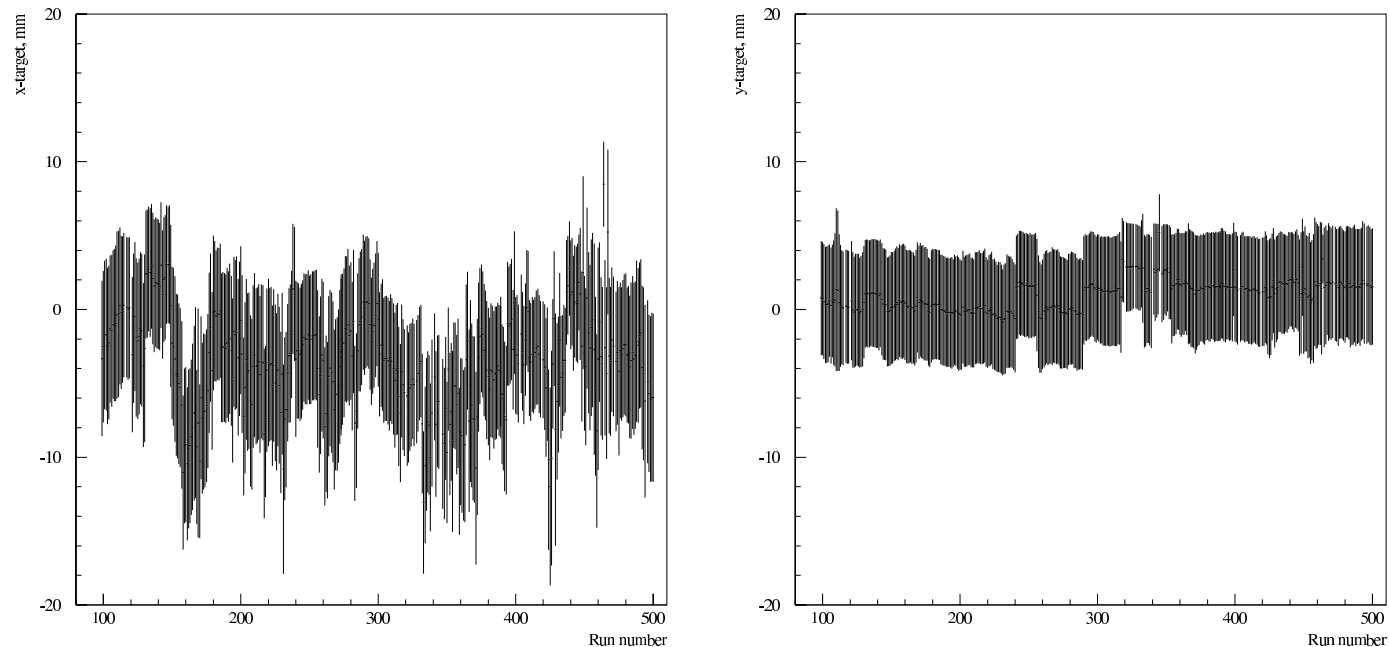


Рис. 4: Зависимость среднего значения и ширины горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) координат выведенного протонного пучка на мишени установки ПРОЗА-М от номера Run-а (каждая точка соответствует примерно интервалу времени 30 минут) в сеансе 1996 г. Центр мишени расположен при  $X_{\text{target}} = 0$  мм и  $Y_{\text{target}} = 0$  мм. Размер ошибок соответствует ширине ( $3\sigma$ ) пучка.



Приложение

## Поляризованная протонная мишень

- Поляризованная водородная или дейтериевая мишень замороженного типа
- Вещество - пропандиол ( $C_3H_8O_2$  или  $C_3D_8O_2$ ), длина - 20 см, диаметр 18 мм)
- Поле  $> 2.5$  Т с однородностью  $\Delta B/B = \pm 10^{-4}$  при накачке
- Поле в режиме набора статистики 0.25 Т
- Средняя поляризация мишени  $80 \pm 5\%$  (35% для дейтерия).
- Тонкостенный горизонтальный криостат
- Мишень выдерживает интенсивность пучка до  $10^7$  частиц/цикл
- Время релаксации - 1000 часов для водородной и более 300 часов для дейтериевой мишени.
- Температура  $0.33^\circ$  К в режиме накачки поляризации и до  $0.16^\circ$  К в режиме замороженной мишени.
- Накачка поляризации (с реверсом) около четырех часов (один раз за 48 часов)

## Приложение

Количество вещества и относительные сечения при  
весе мишени 40 г с учетом стенок мишени

Вещество	Масса (г)	Доля в мишени	A	Вклад по массе	Вклад в сечение ( $\alpha = 0.9$ )
H	3.730	0.093	1	1	1
C	16.81	0.418	12	4.51	3.5
O	15.50	0.385	16	4.19	3.2
K	0.41	0.010	39	0.11	0.08
Cr	0.54	0.013	52	0.15	0.10
Fe	0.23	0.006	56	0.06	0.04
$^4\text{He}$	2.80	0.070	4	0.75	0.65
$^3\text{He}$	0.20	0.005	3	0.05	0.04
Всего	40.23	1.00			8.6

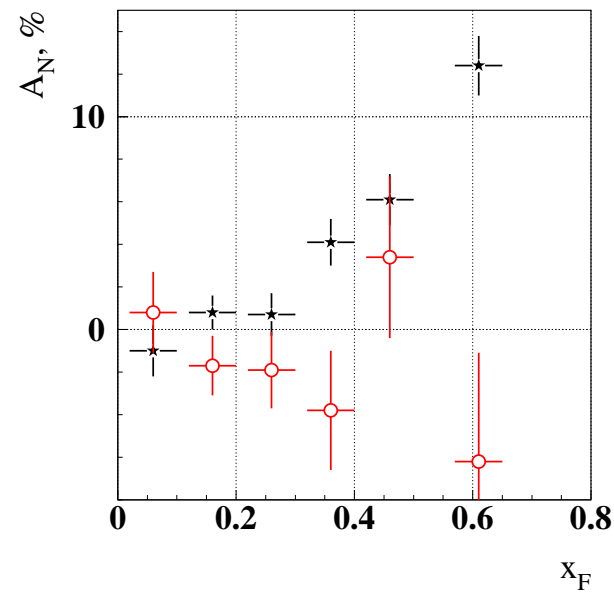
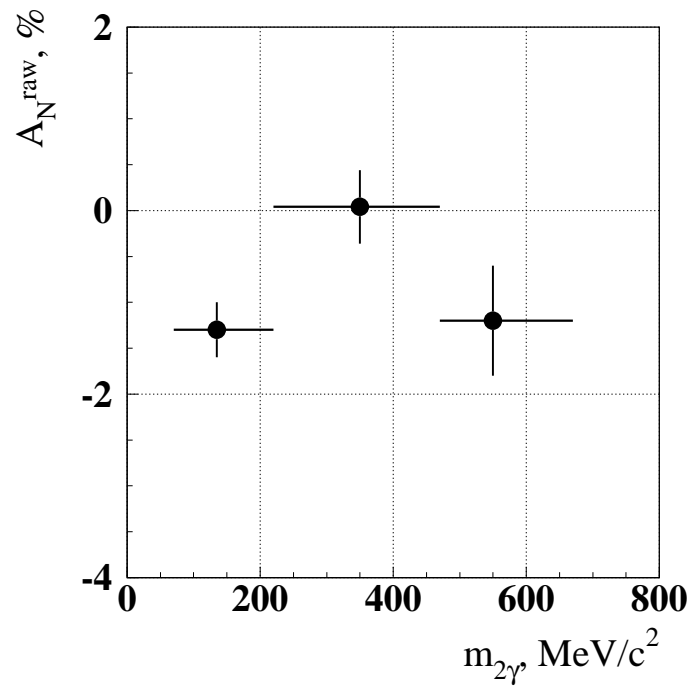
## Приложение

## Зависимость фактора разбавления от поперечного импульса

$p_T$	$D$ для водорода	$D$ для дейтерия
$1.2 < p_T < 1.4$	$8.0 \pm 1.0$	—
$1.4 < p_T < 1.6$	$8.1 \pm 1.2$	—
$1.6 < p_T < 1.8$	$8.1 \pm 0.7$	$4.4 \pm 0.1$
$1.8 < p_T < 2.0$	$8.2 \pm 0.9$	$4.8 \pm 0.1$
$2.0 < p_T < 2.2$	$8.8 \pm 1.3$	$5.2 \pm 0.3$
$2.2 < p_T < 2.4$	$9.2 \pm 1.6$	$6.0 \pm 0.6$
$2.4 < p_T < 2.6$	$9.5 \pm 2.0$	$6.6 \pm 0.8$
$2.6 < p_T < 3.2$	$10.1 \pm 2.5$	$7. \pm 1.2$

# Алгоритм вычисления асимметрии

Асимметрия пары гамма квантов вне массового пика  $\pi^0$  мезонов  $A_{backgr}$  равна 0 (результаты E-704 и ПРОЗЫ):

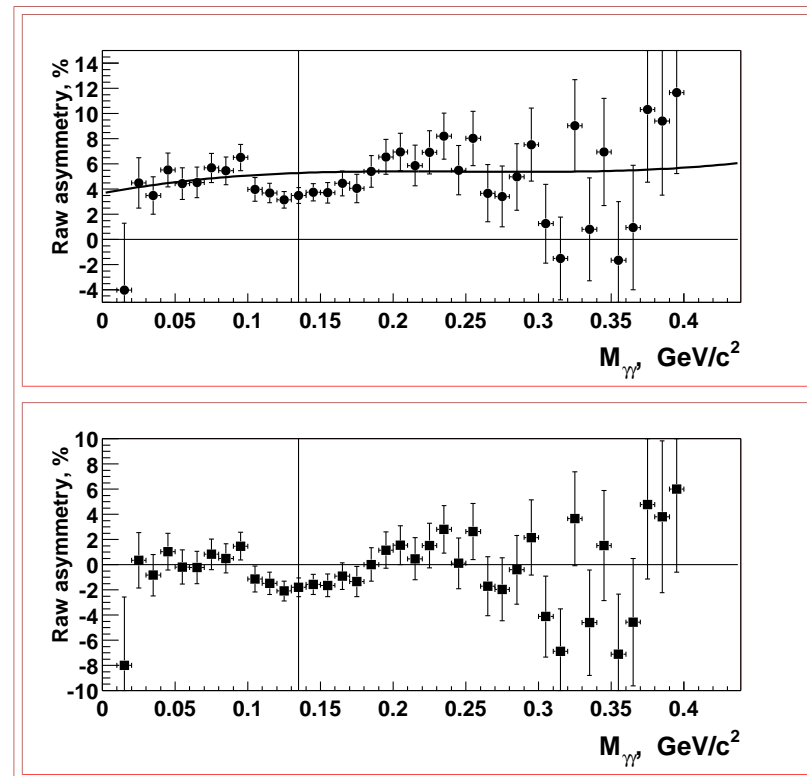


# Алгоритм вычисления асимметрии

- При наличии ложной асимметрии (долговременная нестабильность):

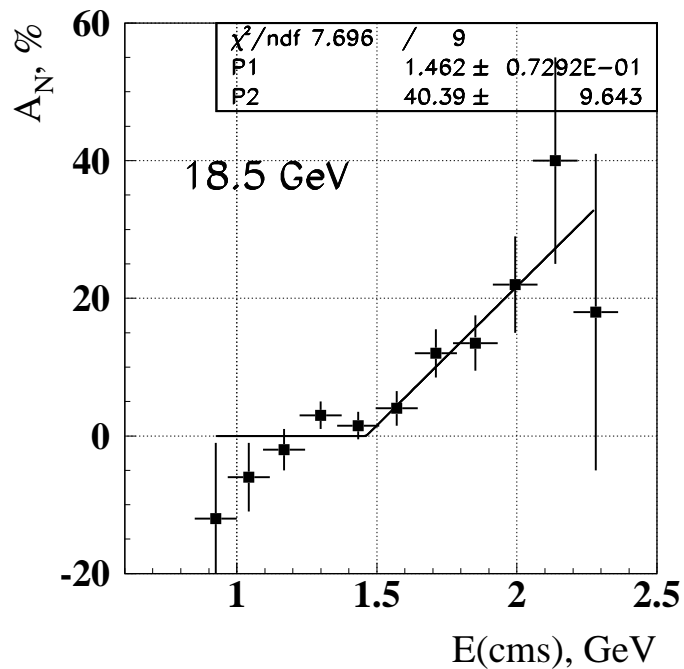
$$A_{\pi^0}^{measured} = k \times A_{\pi^0}^{real} + A_{backgr}$$

- $A_{backgr}$  фитируется вне массового пика
- Полученная  $A_{backgr}$  вычитается из  $A_{2\gamma}^{measured}$
- Результат фитируется (с учетом веса по Гауссу)

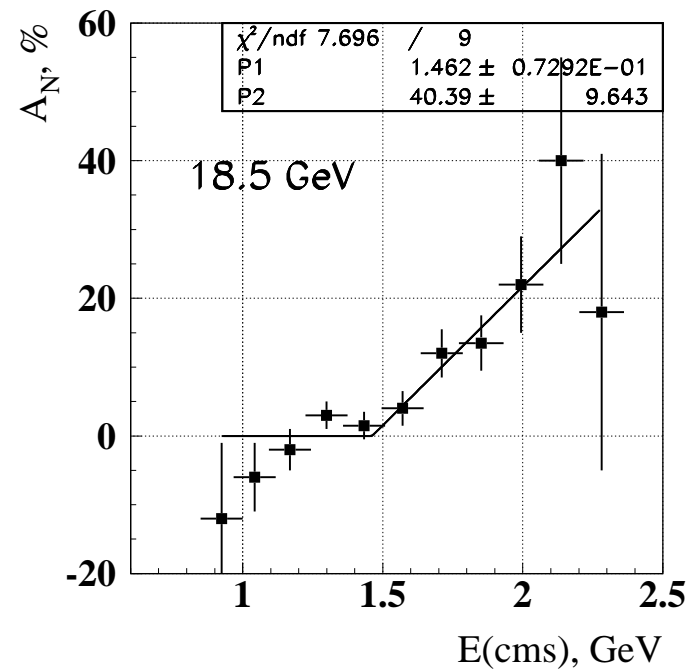


Приложение

Асимметрия  $\pi^+$ -мезонов при 13.3 и 18.5 ГэВ



13 ГэВ

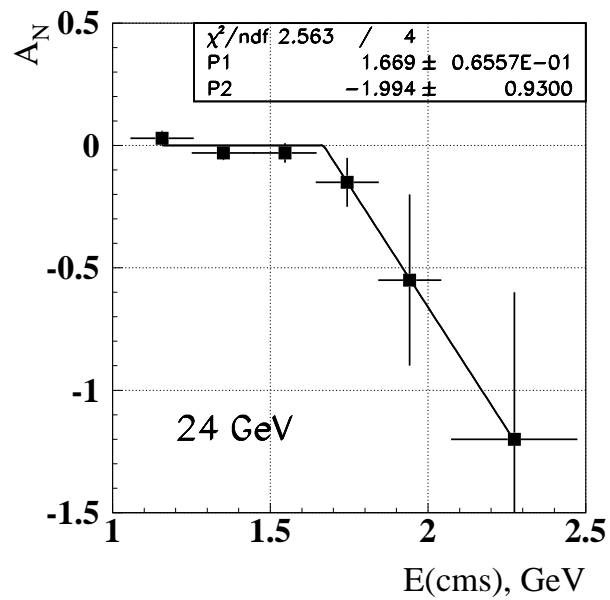


18 ГэВ

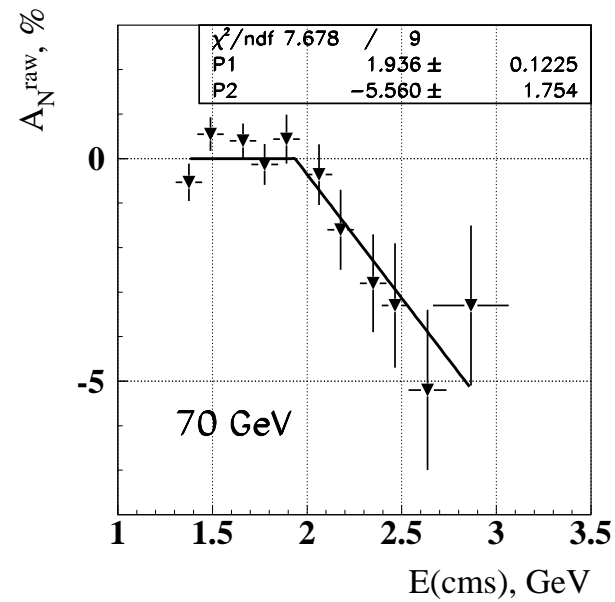
Асимметрия  $\pi^-$ -мезонов сравнима с нулем

Приложение

Асимметрия  $\pi^0$ -мезонов при 24 и 70 ГэВ



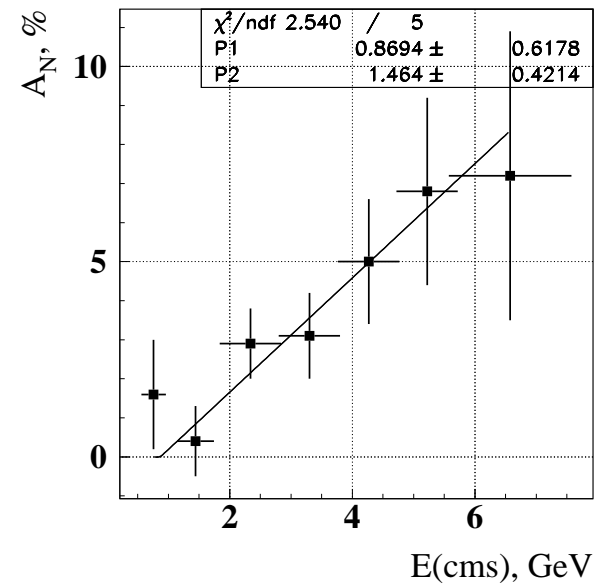
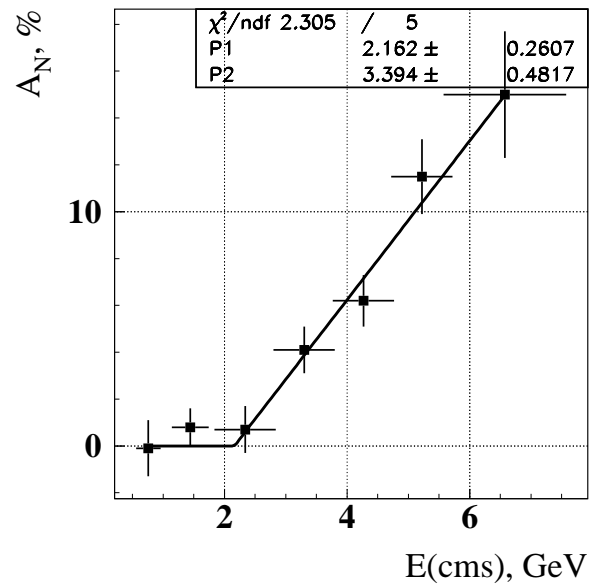
24 ГэВ



70 ГэВ

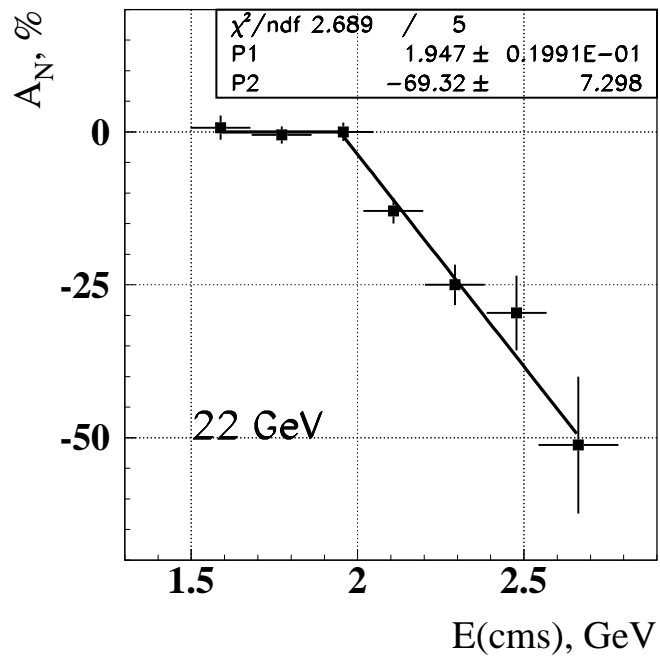
Приложение

Асимметрия  $\pi^0$ -мезонов при 200 ГэВ

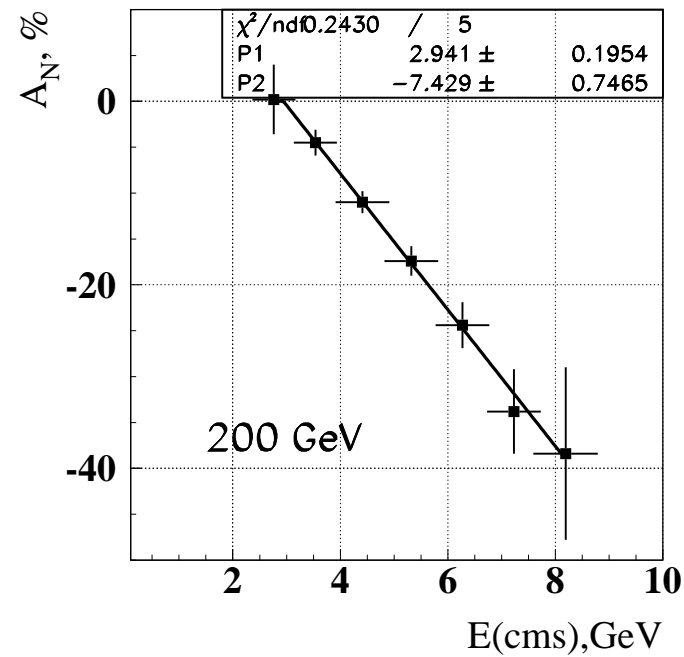




## Приложение

Асимметрия  $\pi^-$ -мезонов при 22 и 200 ГэВ

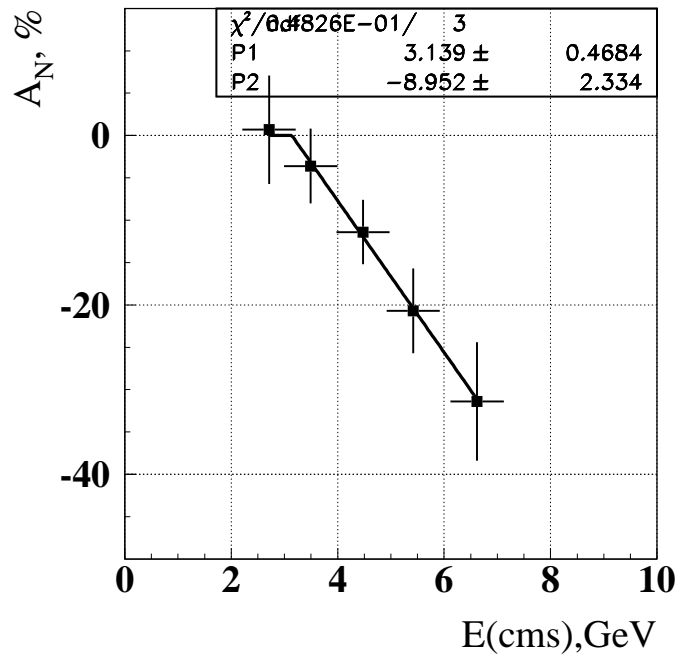
22 ГэВ



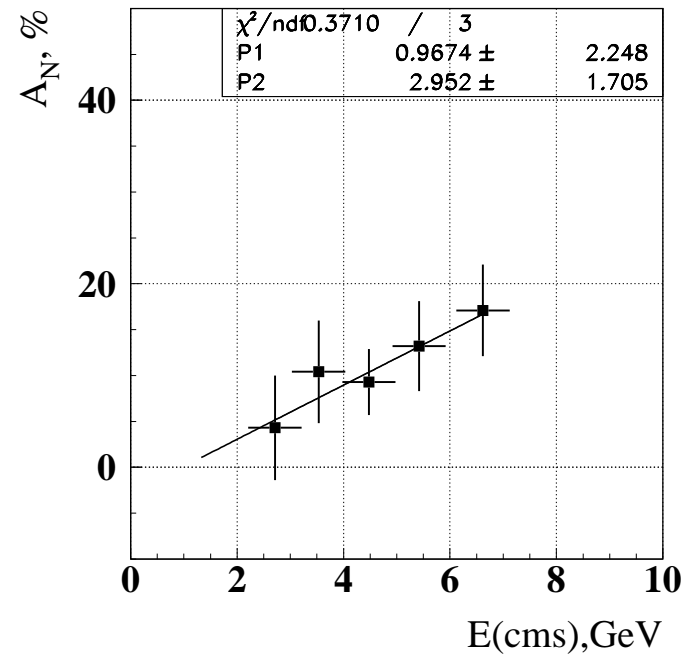
200 ГэВ

Приложение

Асимметрия  $\pi$ -мезонов при 200 ГэВ ( $\bar{p}$ пучок)



$\pi^+$



$\pi^-$