



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 97-17  
ОЭФ

Н.И.Беликов, В.И.Белоусов, А.Н.Васильев, О.А.Грачев,  
А.М.Давиденко, Ю.А.Матуленко, Ю.М.Мельник, А.П.Мещанин,  
А.И.Мысник, С.Б.Нурушев, А.И.Павлинов, А.Ф.Прудкогляд,  
Л.Ф.Соловьев, К.Е.Шестерманов, А.Е.Якутин, Л.В.Алексеева\*,  
Л.В.Ногач\*

(ИФВЭ)

Н.С.Борисов, Э.И.Бунятова, В.Ф.Буринов, В.Г.Коломиец,  
А.Б.Лазарев, В.Н.Матафонов, А.Б.Неганов, Ю.А.Плис,  
Ю.А.Усов, С.Н.Шилов, О.Н.Щевелев

(ОИЯИ)

Е.А.Андреева, А.А.Богданов, В.Ю.Кудрявцев, В.А.Окороков,  
М.Н.Стриханов

(МИФИ)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ОДНОСПИНОВОЙ АСИММЕТРИИ  $\pi^0$ -МЕЗОНОВ  
В ОБЛАСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ ПРОТОНОВ  
ПОЛЯРИЗОВАННОЙ МИШЕНИ**

**(Предложение эксперимента СЕРП-П-180, ПРОЗА-2)**

---

\*) Аспирант МГУ

### Аннотация

Беликов Н.И. и др. Экспериментальные исследования односпиновой асимметрии  $\pi^0$ -мезонов в области фрагментации протонов поляризованной мишени. (Предложение эксперимента SERP-P-180, ПРОЗА-2.): Препринт ИФВЭ 97-17. – Протвино, 1997. – 19 с., 12 рис., 2 табл., библиогр.: 26.

Предлагается программа измерений односпиновой асимметрии  $A_n$  в инклюзивном образовании  $\pi^0$ -мезонов на поперечно-поляризованной водородной мишени, облучаемой пучками  $\pi^0$ -мезонов с энергией 40 ГэВ и протонов с энергией 70 ГэВ. Измерения предполагается провести при поперечных импульсах  $p_T = 1,0-3,0$  ГэВ/с и отрицательных значениях  $x_F$  — в области фрагментации протонов поляризованной мишени, где ожидается заметная асимметрия. Исследования в области фрагментации поляризованной мишени проводятся впервые.

### Abstract

Belikov N.I. et al. Measurements of  $\pi^0$ -Mesons Single-Spin Asymmetry  $A_n$  in the Polarized Target Proton Fragmentation Region. (Proposal SERP-P-180, PROZA-2.): IHEP Preprint 97-17. – Protvino, 1997. – p. 19, figs. 12, tables 2, refs.: 26.

The measurements of single-spin asymmetry  $A_n$  in inclusive  $\pi^0$ -production on a transversely polarized hydrogen target are proposed in the paper. The experiment is supposed to be carried out on 40 GeV  $\pi^-$ -meson and 70 GeV proton-beams in the negative  $x_F$  and  $1 < p_T < 3$  GeV/c region, where a significant asymmetry is expected. It will be a first study of spin effects in the target fragmentation region at high energies.

## Введение

Интерес к исследованию спиновых явлений в адрон-адронных взаимодействиях связан с возможностью изучения структуры адронов и динамики взаимодействия структурных составляющих адронов — кварков и глюонов, имеющих ненулевой спин. Заметный прогресс в создании поляризованных мишеней и получении поляризованных пучков позволил провести в последние годы ряд поляризационных исследований при высоких энергиях. Полученные результаты были неожиданными с точки зрения существовавших представлений о спиновых процессах и заметно повлияли на развитие теории взаимодействия адронов при высоких энергиях. Однозначного теоретического описания существующих экспериментальных данных к настоящему времени нет. Проведение новых поляризационных опытов при высоких энергиях является актуальной задачей.

Односпиновая поперечная асимметрия  $A_n$  в инклюзивном образовании адронов изучалась фрагментарно при энергиях от  $\sim 12$  до 200 ГэВ в различных областях  $x_F$  и  $p_T$ . В эти исследования внесли заметный вклад и эксперименты, выполненные в ИВФЭ на У-70. Результаты показывают, что параметр  $A_n$  может достигать (10-30)%.

Имеющиеся результаты по асимметрии  $\pi^0$ - и  $\pi^+$ -мезонов под  $90^\circ$  в с.ц.м. в области энергий 13-40 ГэВ указывают на возможную масштабную инвариантность  $A_n$  в переменной  $x_T$ . Нельзя исключить и скейлинг по другой, так называемой радиальной, переменной  $x_R = (x_F^2 + x_T^2)^{1/2}$ . Для изучения этого явления необходимы экспериментальные исследования в большем энергетическом интервале и широкой области по  $x_F$  и  $p_T$ .

В данном эксперименте предлагается провести измерения односпиновой асимметрии в инклюзивном образовании  $\pi^0$ -мезонов на поляризованной мишени при двух энергиях пучков — 40 ГэВ для  $\pi^-$ -мезонов и 70 ГэВ для протонов в кинематической области  $x_F \leq 0$  и  $p_T$  до 3 ГэВ/с.

# 1. Экспериментальные результаты по исследованию $A_n$

Существуют два способа измерения асимметрии  $A_n$  в протон-протонных экспериментах с фиксированной мишенью:

1) поперечно-поляризованный пучок протонов взаимодействует с водородной мишенью;

2) поперечно-поляризованная водородная мишень “облучается” пучком обычных, неполяризованных протонов.

В обоих способах с помощью детектора определяется нормированная разность сечений инклюзивного образования частицы при двух знаках поляризации. Очевидно, что с точки зрения получаемой информации оба метода эквивалентны.

Преимуществом первого метода является чистота поляризованного пучка. Хотя измерения с поляризованной мишенью и имеют тот недостаток, что требуется вводить поправки, связанные с составом самой мишени, данный метод имеет некоторое преимущество над поляризованным пучком: здесь можно менять состав падающего на мишень пучка с протонов на  $\pi^-$ ,  $K$ -мезоны и другие частицы.

## 1.1. Данные по асимметрии в области фрагментации пучков поляризованных протонов

Наиболее точные данные по  $A_n$  получены на поляризованных пучках протонов. Рассмотрим основные закономерности поведения асимметрии заряженных пионов по результатам нескольких экспериментов, выполненных в интервале энергий 10–200 ГэВ.

1. Эксперимент в Аргонне выполнен при энергии 11,75 ГэВ [1]. На рис.1а представлена  $A_n$  для  $\pi^+$ -мезонов в зависимости от  $x_F$ . Если в области  $x_F < 0,7$   $A_n$  мала ( $\leq 10\%$ ) и слабо зависит от  $x_F$ , то, начиная с  $x_F = 0,7$ , асимметрия растет и достигает до 40% (при  $x_F \simeq 0,85$ ). Те же закономерности наблюдаются и для  $\pi^-$ -мезонов (см. рис. 1б). Отличие только в том, что при больших  $x_F$   $A_n(\pi^-)$  имеет знак, противоположный  $A_n(\pi^+)$ . Наблюдается сложная  $u$ -зависимость асимметрии в области больших  $x_F$  (см. рис.1б,г).

2. Эксперимент в БНЛ выполнен при двух энергиях — 13,3 и 18,5 ГэВ [2]. Измерения проводились в области  $p_T < 2$  ГэВ/с и при небольших  $x_F$  (0,08–0,38).  $p_T$ -зависимость асимметрии представлена на рис.2. Для  $\pi^+$ -мезонов наблюдается линейный рост  $A_n$  начиная с  $p_T \simeq 1$  ГэВ/с, и она достигает до (25–30)%. Асимметрия для  $\pi^-$ -мезонов — почти нулевая.

$A_n$  для  $\pi^+$ -мезонов при 13,3 ГэВ/с представлена на рис.3а в зависимости от  $p_T$  при фиксированных значениях  $x_F$ . Как видно, какая-либо  $x_F$ -зависимость не наблюдается. Более того, данные при двух энергиях, представленные в  $x_T$ -переменной, имеют такой же масштабно-инвариантный характер (рис.3б), правда, для очень узкого энергетического интервала.

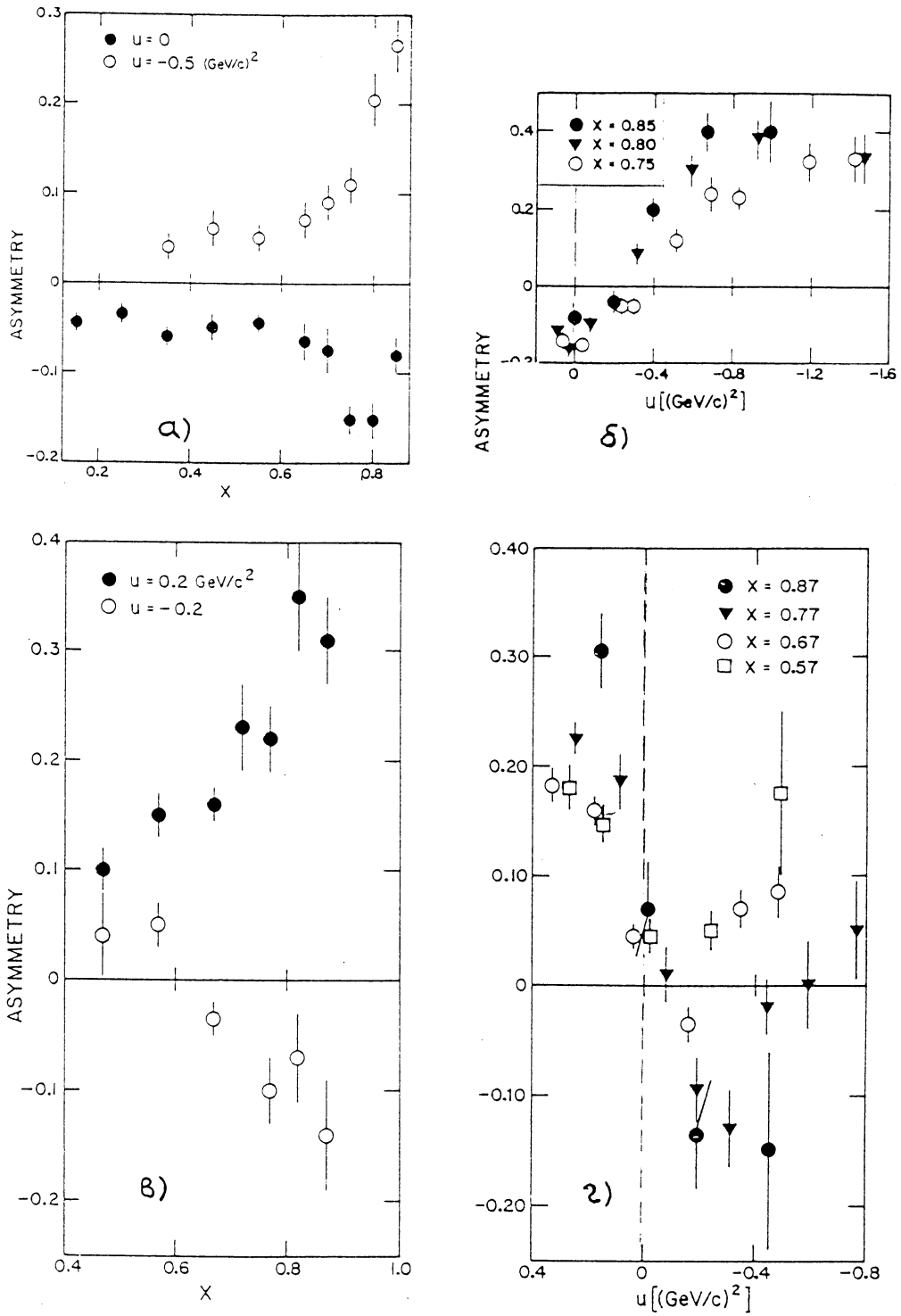


Рис. 1. Асимметрия в рождении  $\pi^+$ -мезонов в зависимости: а) от  $x_F$  и б) от  $u$ ; в, г) то же самое для  $\pi^-$ -мезонов [1].

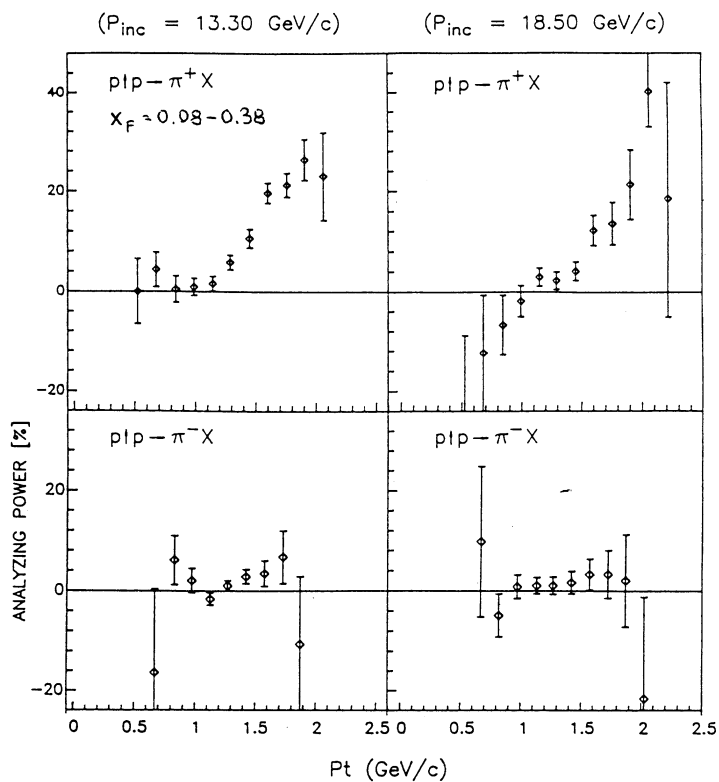


Рис. 2. Односпиновая асимметрия  $A_n$  как функция  $p_T$  для  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов при двух начальных импульсах — 13,3 и 18,5 ГэВ/с [2].

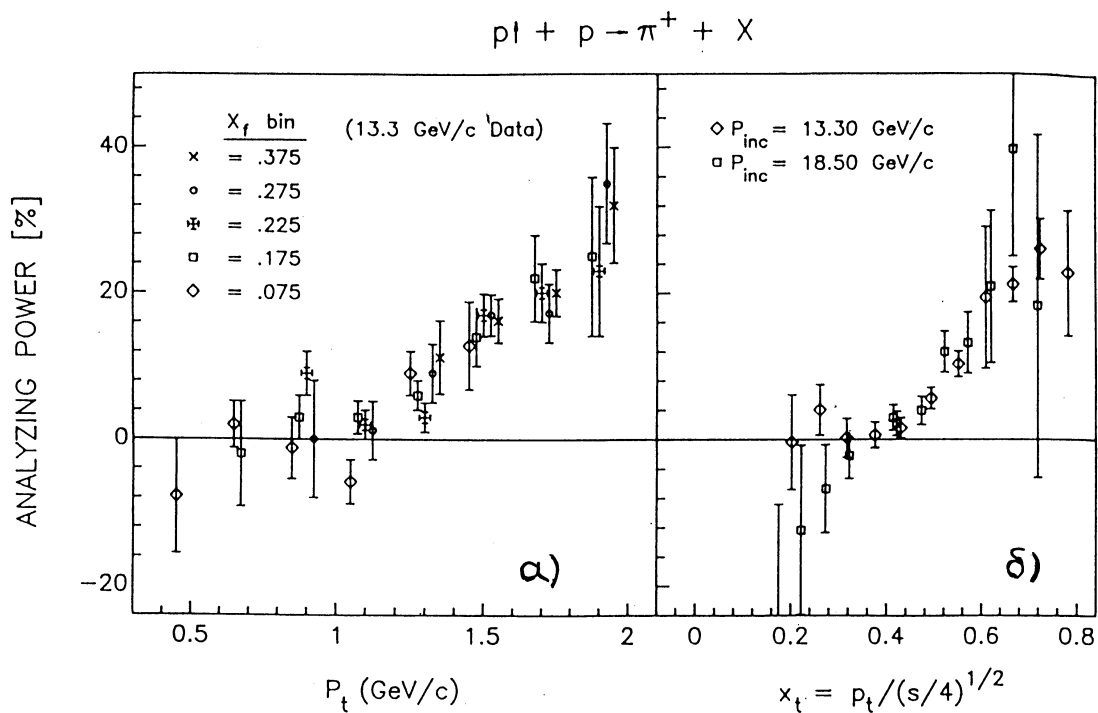


Рис. 3. Асимметрия  $A_n$   $\pi^+$ -мезонов как функция  $p_T$  при 13,3 ГэВ/с (а);  $A_n$  для  $\pi^+$ -мезонов при двух энергиях, представленная как функция  $x_T$  (б) [2].

3. Эксперимент во ФНАЛ при энергии 200 ГэВ [3] и  $x_F=0,2-0,9$  выполнен сотрудничеством E-704. Зависимость  $A_n$  от  $x_F$  для  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  и  $\pi^0$ -мезонов представлена на рис.4. Асимметрия для  $\pi^+$  остается нулевой в интервале  $0 < x \leq 0,3$ , затем растет и достигает +30% при  $x = 0,9$ . Асимметрии  $A_n(\pi^+)$  и  $A_n(\pi^-)$  практически зеркально симметричны. Как видно из этих данных, поведение  $A_n(\pi^0)$  подобно  $\pi^+$  и составляет примерно половину от  $A_n(\pi^+)$ .

Таким образом, во всех перечисленных экспериментах наблюдалась заметная асимметрия в области фрагментации поляризованного пучка при энергиях от  $\sim 12$  до 200 ГэВ. Из-за тождественности начальных частиц точно такие же эффекты асимметрии должны наблюдаться и в области фрагментации поляризованных протонов мишени в соответствующих кинематических областях  $x_F$  и  $p_T$ . Однако таких данных нет. Предлагаемый нами опыт является первым поляризационным экспериментом при высоких энергиях в этой кинематической области.

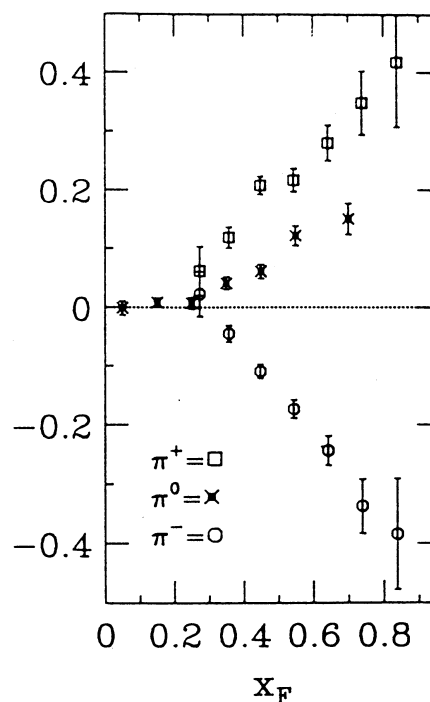


Рис. 4.  $A_n$  от  $x_F$  для  $\pi^+$  и  $\pi^-$ , проинтегрированная по  $p_T$  в интервале  $p_T = 0,7-2,0$  ГэВ/с. Здесь же показана  $A_n$  для  $\pi^0$ -мезонов [3].

## 1.2. Данные по асимметрии в центральной области, вблизи $90^\circ$ в с.ц.м.

1. Измерения асимметрии заряженных частиц в области, близкой к  $90^\circ$  в с.ц.м., были проведены на ФОДС-2 (ИФВЭ) с поляризованными протонами при энергии 40 ГэВ [4]. На рис.5а представлена  $A_n$  для  $\pi^+$ -мезонов: наблюдается линейный рост с  $x_T$  от -10% до +20% в измеренном интервале  $p_T = 0,7-3,4$  ГэВ/с. Для сравнения здесь же приведены данные [2] при 13,3 и 18,5 ГэВ/с с  $x_F < 0,18$ . Как видно из рис.5а, данные по асимметрии для  $\pi^+$ -мезонов не противоречат масштабной инвариантности в  $x_T$ -представлении в интервале энергий 13-40 ГэВ. На рис.5б представлена асимметрия для  $\pi^-$ -мезонов.

Из данных [4] интересно оценить асимметрию  $\pi^0$ -мезонов. В рамках партонной модели такой оценкой является средняя асимметрия  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов с весами, пропорциональными их сечениям рождения. Результат вычислений  $A_n(\pi^0)$  приведен в нижней части рис.6. Как видно, при 40 ГэВ максимальная асимметрия  $\pi^0$ -мезонов составляет около 10%. Кроме того, поведение  $A_n(\pi^0)$  подобно асимметрии для  $\pi^+$ -мезонов и составляет примерно половину от нее. С учетом того, что такой же вывод был сделан и в области фрагментации пучков из данных [3], можно вывести общий практический рецепт для оценок асимметрии  $\pi^0$ -мезонов — она составляет примерно  $1/2 \cdot A_n(\pi^+)$ .

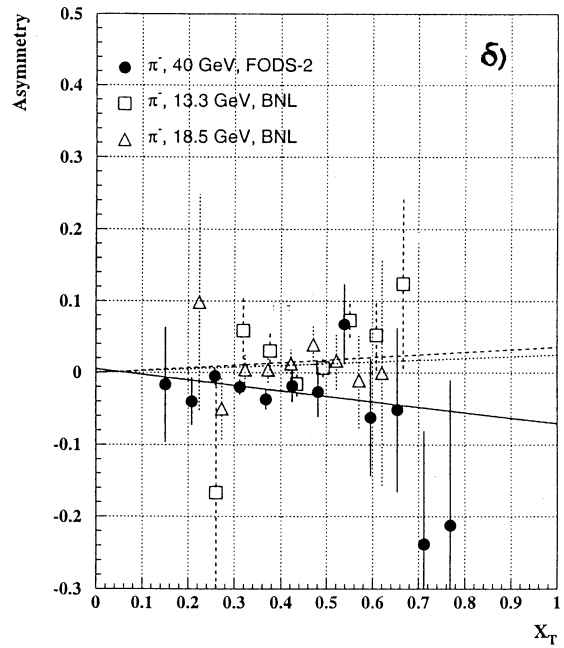
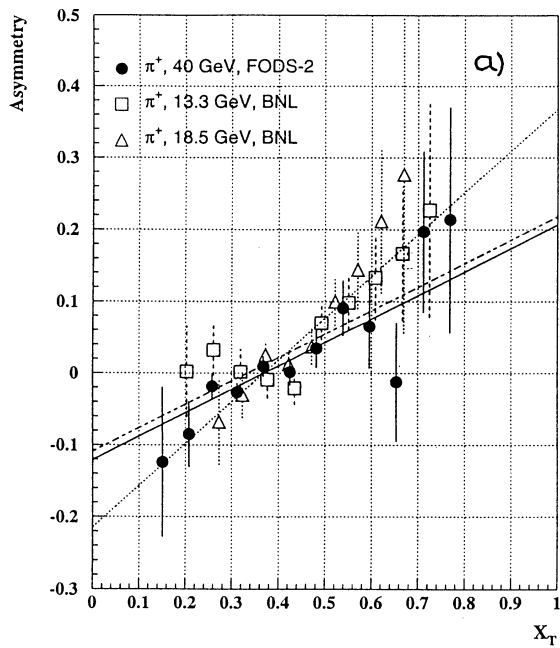


Рис. 5. Зависимость односпиновой асимметрии  $A_n$  от  $x_T$  при трех энергиях — 40, 18,5 и 13,3 ГэВ: а) для  $\pi^+$ -мезонов; б) для  $\pi^-$ -мезонов. Рисунок из работы [4].

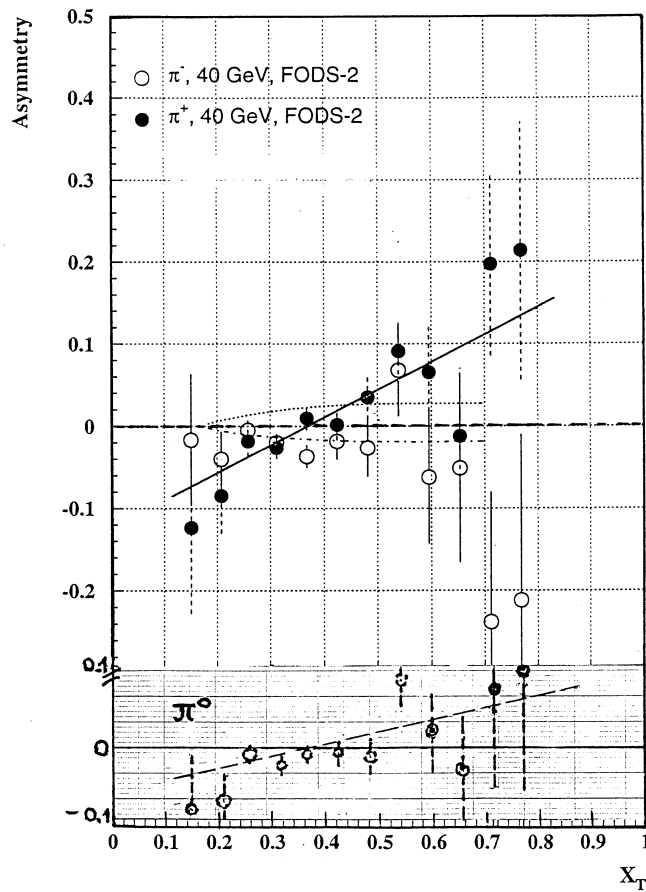


Рис. 6.  $x_T$ -зависимость асимметрии  $A_n$  для заряженных пионов в центральной области при энергии 40 ГэВ [4]. В нижней части — ожидаемая оценка асимметрии  $\pi^0$ -мезонов, полученная усреднением  $A_n$  для  $\pi^+$  и  $\pi^-$  (см. текст).



2. На установке ПРОЗА (ИФВЭ) была измерена асимметрия рождения  $\pi^0$ -мезонов на 40 ГэВ  $\pi^-$ -пучке [5] (см.рис.7, светлые кружочки). Наблюдается линейный рост  $A_n$  с  $p_T$  (по модулю), доходящая до  $\sim 30\%$  при  $p_T \simeq 2,5-3$  ГэВ/с. Сравнивая эти результаты с оценками асимметрии рождения  $\pi^0$ -мезонов в  $pp$ -взаимодействиях [4], сделанными выше, можно ожидать, что эффект асимметрии в  $\pi^-p_{\uparrow}$  выше в два раза.

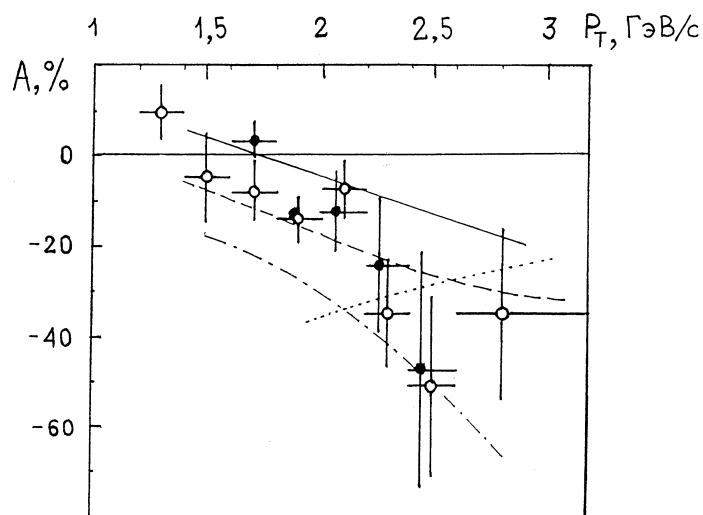


Рис. 7. Измеренная асимметрия от  $p_T$  в инклюзивном образовании  $\pi^0$ -мезонов с  $|x_F| \leq 0,2$  при 40 ГэВ/с [5] в реакциях:  $\pi^-p_{\uparrow}$  — светлые кружочки;  $\pi^-d_{\uparrow}$  — темные кружочки.

3. Измерения  $A_n$  для  $\pi^0$ -мезонов были выполнены сотрудничеством E-704 во ФНАЛ при энергии 200 ГэВ [6]. Результат эксперимента — асимметрия в рождении  $\pi^0$ -мезонов в центральной области равна 0 в интервале  $p_T = 1-3$  ГэВ/с. Если же исходить из того, что асимметрия ведет себя масштабно-инвариантным образом от  $x_T$ , то сравнение с экспериментами при более низких энергиях говорит о том, что ненулевая асимметрия при 200 ГэВ должна была появиться в области  $p_T \geq 4$  ГэВ/с. К сожалению, в E-704 эта область была статистически не обеспечена. Конкретного вывода о наличии или, наоборот, отсутствии асимметрии при таких  $p_T$  сделать нельзя.

Из рассмотрения экспериментальной ситуации по измерению  $A_n$  можно сделать следующие выводы:

1. Все данные по асимметрии, полученные при энергиях от 12 до 200 ГэВ, не противоречат утверждению о том, что поляризационные эффекты в этом интервале энергий по крайней мере не уменьшаются.

2. Асимметрия в образовании  $\pi^0$ -мезонов подобна  $A_n(\pi^+)$  и составляет около 50% от нее. Совокупность данных по  $\pi^+$ - и  $\pi^0$ -мезонам в области энергий 13-40 ГэВ указывает на масштабно-инвариантное поведение односпиновой асимметрии.

## 2. Физический интерес предлагаемых исследований $A_n$

2.1. Измерения предполагается проводить на пучке протонов ( $E_o=70$  ГэВ) и  $\pi^-$ -мезонов ( $E_o=40$  ГэВ):

$$p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X, \quad (1)$$

$$\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X, \quad (2)$$

в одинаковых кинематических областях:  $x_F < 0$  и  $p_T > 1$  ГэВ/с.

Помимо этих двух реакций, будут набираться данные и на  $K^-$ -пучке (одновременно с реакцией (2)). Варьирование ароматом валентных кварков адрона, “бомбардирующего” поляризованный протон, даст информацию об относительных спиновых вкладах данных кварков. Наличие такой возможности является достоинством экспериментов, где изучается структура протона. Уместно отметить, что, кроме  $\pi^0$ -мезонов, используемый калориметр будет одновременно детектировать и  $\eta$ -мезоны.

**2.2.** В области фрагментации протонов поляризованной мишени измерения ранее не проводились.

**2.3.** Поведение асимметрии  $A_n$  для  $\pi^+$ -мезонов, изученной в узком интервале энергий 13–40 ГэВ, не противоречит  $x_T$ -скейлингу. Имеются экспериментальные указания, что возможен и другой,  $x_R$ -скейлинг, где  $x_R = (x_T^2 + x_F^2)^{1/2}$ . Исследования в большем диапазоне энергий позволят установить более надежно возможное масштабно-инвариантное поведение асимметрии.

**2.4.** Как известно, жесткие взаимодействия описываются пертурбативной КХД (ПКХД). Но ПКХД, применяемая в области больших  $p_T$  и асимптотических энергий, предсказывает нулевые односпиновые эффекты в силу сохранения спиральности во взаимодействиях векторного типа. Как было указано выше (см.разд.1), значения  $A_n$ , измеренные при относительно небольших  $p_T$ , составляют (10-20)%. Ясно, что в измеренных областях энергий ПКХД неприменима, и при таких значениях поперечных импульсов существенна т.н. “мягкая” динамика взаимодействий. Поэтому к середине 80-х годов были предложены различные модели с учетом спиновой зависимости в рождении кварков и дикварков, качественно объясняющие наблюдаемые эффекты — односпиновую асимметрию и/или поляризацию гиперонов.

Предложенные модели основаны или на асимметрии в  $p_T$ -распределении партонов в поляризованном протоне (эффект Сиверса [7]), или на асимметрии, зависящей от спина, в партон-партонных взаимодействиях (эффект Шведа [8]), или на зависимости функции фрагментации от азимутального угла испускаемых конечных адронов (эффект Коллинза [9]).

С недавнего времени для описания лево-правой асимметрии стали использоваться полуклассические модели [10]-[12], предложенные для объяснения поляризации гиперонов. В эксперименте, выполненном в СЛАКе, было получено, что в продольно-поляризованных протонах кварки с большими  $x_B$  (т.е.  $u$ -кварки) переносят существенную долю спина протона. В партонной модели [10] предполагается, что то же самое применимо к лидирующим  $u$ -кваркам и в поперечно-поляризованных протонах. В ней делается предположение, что  $u$ - и  $d$ -кварки имеют противоположную поляризацию, что качественно подтверждается в эксперименте.

Другой полуклассический механизм основан на струнной картине взаимодействия кварков. В этой модели [11] кварк-антикварковая пара образуется в месте разрыва струны в цветовом поле, возникающем между центральной частью, где остается валентный  $u$ -кварк из пучка, и продолжающим двигаться как целое  $ud$ -дикварком. Родившаяся кварк-антикварковая пара вращается и, следовательно, имеет орбитальный момент вращения. Однако, поскольку начальный угловой

момент был равен нулю, для компенсации возникающего после разрыва струны орбитального момента вращения  $L$  пара должна обладать спином в направлении, противоположном  $L$ . Таким образом, кварк и антикварк должны быть поляризованы, и направление их поляризации связано с направлением  $L$ .

Релятивистская кварковая модель [12], используемая для феноменологического описания существующих экспериментальных данных по  $A_n$  и поляризации гиперонов, развивается берлинской группой Менг Та-Чунга. Возможность возникновения спиновых эффектов при движении кварков в хромомагнитном внешнем поле была рассмотрена в работе [13]. Получено соотношение между инклюзивным сечением и асимметрией (аналог соотношения Ферми). Наблюдается приемлемое согласие с экспериментальными данными.

Асимметрия в рождении адронов, связанная с ненулевым угловым моментом облака  $q\bar{q}$ -пар, рассмотрена в рамках кварковой модели для  $U$ -матрицы [14]. Наблюдается удовлетворительное описание наблюдаемой в работе [5] асимметрии. Недавно в рамках КХД были сделаны предсказания для асимметрии в центральной области для широкого диапазона энергий [15].

Итак, интерпретация экспериментальных результатов включает в себя разные предположения о внутренней спиновой структуре поперечно-поляризованных протонов. Это приводит к различным объяснениям того, как информация о поляризации протона передается в процессе образования адрона. Таким образом, динамика возникновения спиновых эффектов остается по-прежнему неясной, и проведение новых поляризационных опытов при высоких энергиях является интересной и актуальной задачей.

### **3. Постановка эксперимента по исследованию односпиновой асимметрии**

Целью предлагаемого эксперимента является исследование односпиновой асимметрии в инклюзивном образовании  $\pi^0$ -мезонов на водородной поляризованной мишени при двух энергиях — 40 и 70 ГэВ.

При энергии 40 ГэВ используется вторичный  $\pi^-$ -мезонный пучок в канале №14, где будет размещена установка ПРОЗА-2, а при энергии 70 ГэВ — протонный пучок, выведенный из ускорителя с помощью изогнутого монокристалла кремния, размещенного в вакуумной камере У-70. Эта методика надежно работает на канале №14 с 1989 г. [16].

Проведение измерений асимметрии в инклюзивном образовании  $\pi^0$ -мезонов в области фрагментации протонов поляризованной мишени ( $x_F \leq 0$ ) с разными сортами частиц пучка является отличительной чертой данного эксперимента. Из-за требования реальности предлагаемого эксперимента мы постарались свести к минимуму финансовые затраты на подготовку установки ПРОЗА-2.

### 3.1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка ПРОЗА-2, позволяющая осуществить обсуждаемый эксперимент, представлена схематически на рис.8. В установку входят три существенных узла:

- 1) пучковая аппаратура;
- 2) поляризованная протонная мишень;
- 3) детектор для регистрации  $\pi^0$ -мезонов.

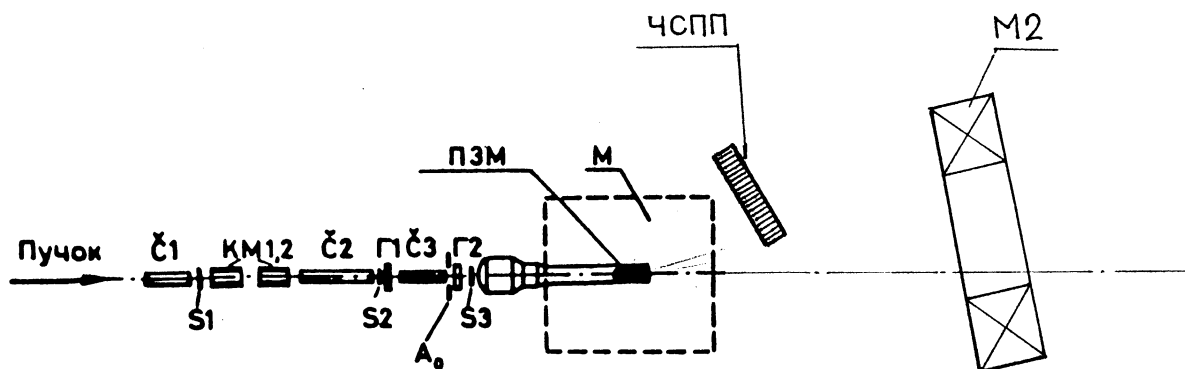


Рис. 8. Схема экспериментальной установки ПРОЗА-2:  $\check{C}1, \check{C}2, \check{C}3$  — пороговые черенковские счетчики; S1, S2, S3 — триггерные сцинтилляционные счетчики;  $A_0$  — галло счетчик; Г1 и Г2 — годоскопы; ПЗМ — поляризованная замороженная мишень; М — магнит мишени; М2 — магнит, размещенный в зоне установки (не используется); ЧСПП — электромагнитный калориметр из свинцового стекла с матрицей  $32 \times 25$  счетчиков.

В пучковую аппаратуру входят запускающие триггерные сцинтилляционные счетчики (S1, S2, S3), три пороговых черенковских счетчика ( $\check{C}1, \check{C}2, \check{C}3$ ) и два двухкоординатных годоскопа (Г1 и Г2). Эта аппаратура надежно работает уже в течение более 15-ти лет. Более подробное описание пучкового оборудования можно найти в работах [17],[18].

Одним из основных узлов установки является поляризованная протонная “замороженная” мишень (ПЗМ) с горизонтальным криостатом [19], размещенная в специальном магните с раздвижными полюсами (М). Пропандиол ( $C_3H_8O_2$ ), являющийся рабочим веществом, заключен в ампулу диаметром 20 мм и длиной 200 мм. Отношение числа поляризованных протонов водорода к неполяризованным нуклонам сложных ядер составляет  $\sim 11\%$ . Периодически (обычно через двое суток) измеряется величина поляризации мишени на основе ядерно-магнитного резонанса и осуществляется реверс поляризации без изменения направления поля магнита мишени, что уменьшает систематические ошибки эксперимента. Средняя величина поляризации мишени составляет 80%. Фоновые измерения проводятся с углеродной мишенью (безводородным эквивалентом, имеющим геометрические размеры и вес, эквивалентные основной мишени) для вычитания событий на неполяризованных сложных ядрах мишени.

Для регистрации пар  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов будет использоваться электромагнитный калориметр ЧСПП (см.рис.8), состоящий из 800 ( $32 \times 25$ ) черенковских счетчиков-радиаторов из свинцового стекла ГФ-1 размерами  $38 \times 38 \times 450$  мм<sup>3</sup> типа ГАМС [20]. Черенковский свет от электромагнитных ливней регистрируется ФЭУ-84 с торца каждого радиатора.

Для определения местоположения детектора и соответствующего выбора кинематической области регистрации  $\pi^0$ -мезонов по  $x_F$  и  $p_T$  были выполнены расчеты по оптимизации геометрической эффективности. При этом варьировались расстояние  $L$  от центра мишени до детектора в пределах от 1,5 м до 2,5 м и угол  $\phi$  между направлением пучка и центром детектора от  $20^\circ$  до  $40^\circ$ . Эти расчеты включали в себя также эффективность реконструкции  $\pi^0$ -мезонов по разработанному нами алгоритму [21]. Более подробно эти расчеты представлены в Приложении. Результаты по суммарной эффективности для реакции (1)  $pp \rightarrow \pi^0 X$  при энергии 70 ГэВ приведены на рис.9. Здесь она представлена в зависимости от  $x_F$  при разных расстояниях  $L$ : 1) 1,5 м, 2) 2 м и 3) 2,5 м. Эффективность, рассчитанная при угле  $\phi = 30^\circ$ , приведена для значений  $p_T = 3$  ГэВ/с сплошными линиями и для  $p_T = 2$  ГэВ/с — пунктиром. Результаты существенно не отличаются от приведенных и для реакции (2)  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 X$  при 40 ГэВ. Это видно и из рис.10, где показаны максимальные значения энергии (а) и углов  $\pi^0$ -мезонов в лаб. системе (б) в зависимости от  $p_T$  при фиксированных значениях  $x_F$ . Сплошные линии — данные для реакции (1) и пунктир — для реакции (2). В конечном итоге, были выбраны следующие значения для расстояния и угла:  $L = 2$  м и  $\phi = 30^\circ$ .

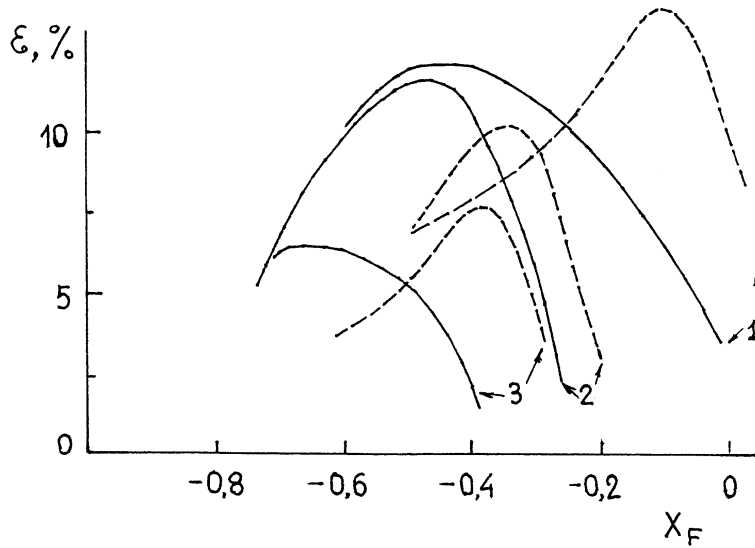


Рис. 9. Полная эффективность регистрации  $\pi^0$ -мезонов из реакции  $pp \rightarrow \pi^0 X$  при 70 ГэВ калориметром ЧСПП в зависимости от  $x_F$  для двух значений поперечного импульса  $\pi^0$ -мезонов:  $p_T=2$  ГэВ/с (пунктирные линии);  $p_T=3$  ГэВ/с (сплошные линии) при разных расстояниях от калориметра до мишени: (1) 1,5 м; (2) 2 м; (3) 2,5 м.

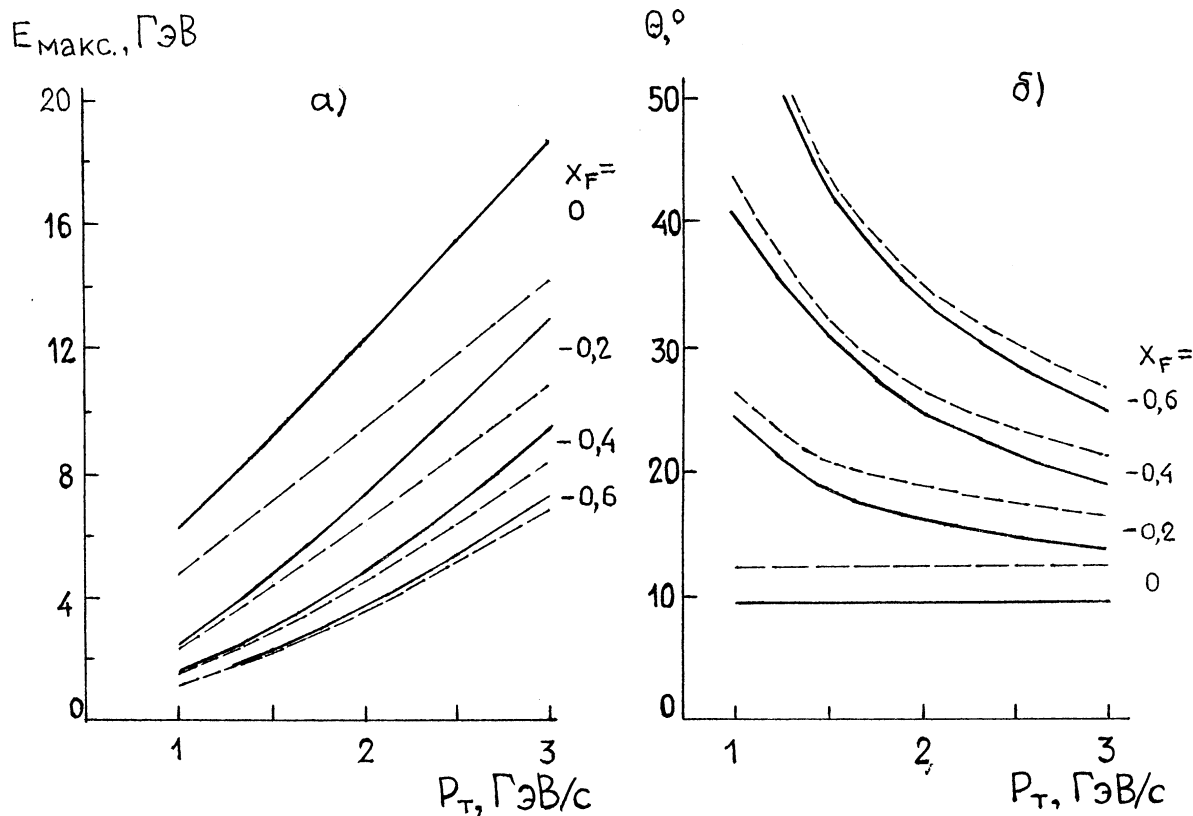


Рис. 10. Максимальные значения энергий (а) и углов (б)  $\pi^0$ -мезонов в лаб. системе в зависимости от  $p_T$  при фиксированных значениях  $x_F$ . Сплошные линии — для реакции  $pp \rightarrow \pi^0 X$ , пунктирные — для  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 X$ .

На рис.11 представлены несколько характерных распределений при выбранных значениях  $L$  и  $\phi$  той же самой геометрической программой с полной реконструкцией событий. Значения  $p_T$  разыгрывались равномерно в интервале 1–3,5 ГэВ/с, а  $x_F$  — в интервале от 0 до -0,9. Кроме того, накладывалось условие, чтобы минимальная энергия гамма-квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов была не ниже 500 МэВ.

Выполненные расчеты показывают, что:

- область  $x_F - p_T$ , перекрываемая детектором, достаточно широкая (рис.11.1);
- “заселенность” детектора в  $XU$ -плоскости  $\pi^0$ -мезонами имеет несколько специфический характер (рис.11.2);
- энергии регистрируемых детектором  $\pi^0$ -мезонов не превышают 11-12 ГэВ (рис.11.3-4).

Триггер предполагается организовать следующим образом. Триггером нулевого уровня является традиционный на установке ПРОЗА сигнал  $S_1 S_2 S_3 \cdot \Gamma_1 (> 0) \cdot \Gamma_2 (> 0)$ . При этом пучковая частица проходит через мишень и срабатывают все четыре плоскости годоскопов. Триггер первого уровня основан на быстром аналоговом сигнале ( $\sim 350$  нсек) суммарного энерговыделения, зарегистрированного в электромагнитном калориметре. Этот аналоговый  $E$ -триггер в зависимости от порога

значительно “прореживает” поток событий, но имеет “jitter”. При анализе данных приходится применять более жесткий порог по  $E$ , что приводит к использованию лишь небольшой доли событий, записанных на ленту.

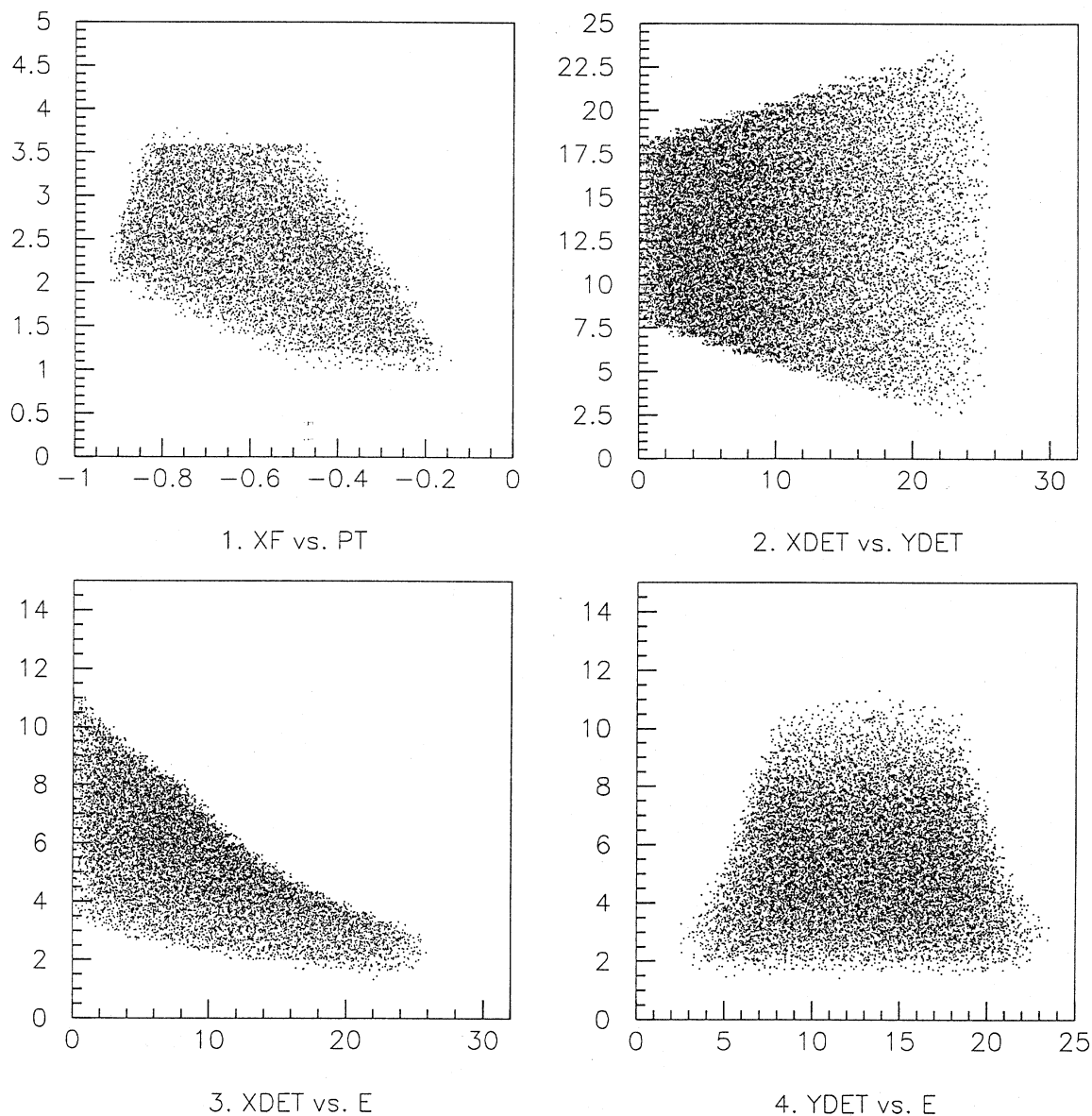


Рис. 11. Распределения  $\pi^0$ -мезонов из реакции  $pp \rightarrow \pi^0 X$  при выбранной геометрии спектрометра (см. текст): 1)  $(x_F - p_T)$ -распределение; 2) “заселенность”  $\pi^0$ -мезонов в  $XU$ -плоскости детектора; 3) энергетическое распределение по  $X$ -плоскости; 4) то же самое по  $Y$ -плоскости.

Для увеличения доли полезной информации, записываемой на магнитную ленту, был разработан и введен в строй цифровой процессор для триггера второго уровня. Использовался специализированный контроллер, позволяющий считывать информацию из АЦП П-267, вычитать пьедесталы и производить вычисление суммы  $E_0$  взвешенных амплитуд считываемой информации.

Величина  $E_o$  вычисляется по формуле:

$$E_o = \sum_i A_i C_i,$$

где  $A_i$  — значение амплитуды,  $C_i$  — весовой коэффициент,  $i$  — номер канала. Вычисление величины  $E_o$  выполнялось во время считывания амплитуд из АЦП. Выработка решения происходила через 200 нс после вычитывания последнего канала АЦП. При положительном решении триггера информация переписывалась в буферную память, при отрицательном обнулялась. При превышении триггерного сигнала над порогом накладывается электронное вето на анализ следующего события и производится считывание информации с детектора в память.

Система сбора данных, основанная на разработанном к настоящему времени оборудовании [22]-[25], позволяет:

- производить параллельное считывание информации во всех каркасах с регистрирующей электроникой;
- использовать специальный канал для передачи информации из модулей запоминающих устройств в ЭВМ параллельно со считыванием информации;
- производить предварительную обработку информации до записи в запоминающее устройство (вычитание пьедесталов, вычисление  $E$  или  $p_T$ ).

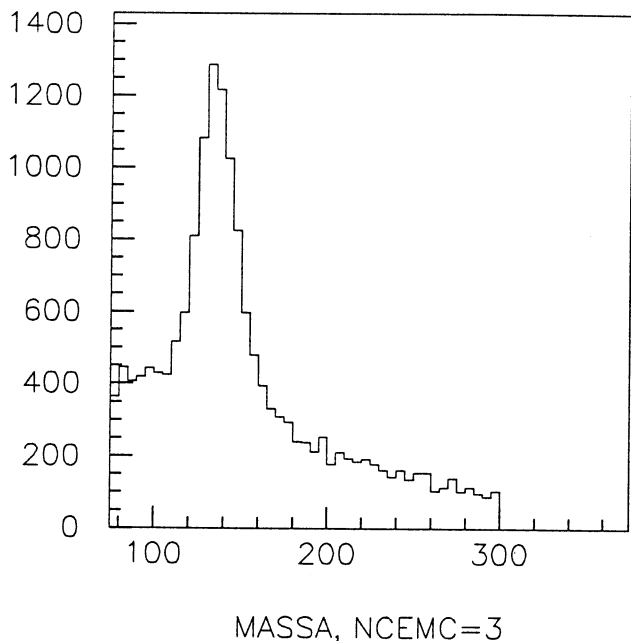


Рис. 12. Массовый спектр  $\pi^0$ -мезонов под  $90^\circ$  в с.д.м. в интервале  $p_T = 1-2$  ГэВ/с, полученный калориметром ЧСПП в реакции  $pp \rightarrow \pi^0 X$ .

Мертвое время системы съема информации составляет  $\sim 0,35$  мс (время съема информации с каркаса АЦП, содержащего 256 каналов регистрации, при наличии информации в 20% каналов и времени вычисления  $E$  или  $p_T$ ).

Предполагается, что информация будет поступать на персональный компьютер РС-486, где будет записываться на 8-мм видеомагнитофон. По Ethernet часть информации будет поступать на вторую РС-486 для анализа “в линию”.

К настоящему времени проведена большая модернизация установки:

- а) в качестве регистрирующей электроники для калориметра использованы 12-битные АЦП на бывших советских компонентах П-267 на 800 каналов, дающие разрешение по энергии 12 МэВ/бит;
- б) установлен контроль за стабильностью работы светодиодов с точностью  $2 \cdot 10^{-3}$ ;
- в) отлаживается цифровой триггер 2-го уровня;
- г) отлажен и установлен полный пакет программ для работы “в линию” и “вне линии” для анализа данных и получения физических результатов.



Основная часть установки ПРОЗА-2 уже отработала в весеннем сеансе 1996 г. и показала свою работоспособность. Как результат этого сеанса, на рис.12 представлен характерный массовый спектр  $\pi^0$ -мезонов, образованных под  $90^\circ$  в с.ц.м. на протонном пучке с энергией 70 ГэВ. Как видно, разрешение по массе составляет 12 МэВ (полуширина на полувысоте).

В заключение стоит подчеркнуть, что одним из основных преимуществ предлагаемого эксперимента ПРОЗА-2 является то, что все детекторы, электроника и компьютеры имеются в наличии, что делает постановку эксперимента реальной в условиях сегодняшней тяжелой финансовой ситуации.

### 3.2. Условия измерений и оценки необходимого времени на пучке

Для оценки времени работы на 70 ГэВ пучке протонов мы использовали инвариантные сечения в реакции  $pp \rightarrow \pi^0 X$  как результат фита, представленного в работе Дональдсон и др. [26]. В этом эксперименте, проведенном во ФНАЛ, измерения были выполнены при 100, 200 и 300 ГэВ.

Величины сечений для реакции (1) при разных значениях  $p_T$  и  $x_F$  представлены в таблице 1.

Таблица 1. Инвариантные сечения  $\epsilon \frac{d^3\sigma}{dp^3}$  в  $\text{см}^2/\text{ГэВ}^2$  для реакции  $pp \rightarrow \pi^0 X$  при 70 ГэВ

$p_T$ , ГэВ/с	$ x_F =0$	0,2	0,4	0,6	0,8
1	2,9E-28	1,9E-28	6,1E-29	1,1E-29	5,5E-31
2	8,8E-31	6,2E-31	2,2E-31	3,8E-32	1,1E-33
3	6,6E-33	5,0E-33	1,7E-33	1,5E-34	7,9E-36

В таблице 2 приведены вычисленные статистические ошибки измерений односпиновой асимметрии в реакции  $pp \rightarrow \pi^0 X$  за 100 смен работы на У-70. Расчеты выполнены при следующих предположениях:  $\Delta x = 0,2$ ,  $\Delta p_T = 0,2$  при  $p_T=1$  и 2 ГэВ/с и  $\Delta p_T = 0,5$  при  $p_T=3$  ГэВ/с. Фактор разбавления мишени равен 8. Средняя поляризация мишени 80%. Сечение на пропандиоловой мишени было взято равным сечению на ядрах углерода, которое, в свою очередь, предполагалось в  $A^{2/3}$  раза больше, чем на водороде ( $A=12$ ). Эффективность регистрации в области  $-0,8 < x_F \leq 0$  равна 7% для всех  $p_T$  ( $\epsilon_{геом.} \times \epsilon_{реконстр.}$ ). Эффективность работы ускорителя и установки в сумме составляет 70%. Интенсивность протонного пучка  $5 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$  и 400 циклов У-70 в час. Одна смена равна шести часам.

Таблица 2. Статистическая ошибка асимметрии  $\sigma A_n$  в % в реакции  $pp \rightarrow \pi^0 X$  при 70 ГэВ/с (подробности расчетов в тексте)

$p_T$ , ГэВ/с	$ x_F =-0,8$	-0,6	-0,4	-0,2	0
1	2,4	0,5	0,2	0,1	0,1
2	54	9,2	3,8	1,4	1,2
3	-	-	27	10	8

Ожидается, что в реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 X$  при 40 ГэВ ошибки измерений будут такого же порядка. В среднем, система сбора данных будет принимать в ЭВМ 500 событий за цикл У-70.

#### 4. Сотрудничество ПРОЗА-2

Сотрудничеством накоплен большой опыт в проведении поляризационных исследований как на нашем ускорителе, так и за рубежом. В течение двадцати лет выполнены экспериментальные программы ГЕРА (совместно с французскими физиками) и ПРОЗА совместно с физиками из ОИЯИ и ТГУ. Многие члены сотрудничества ПРОЗА-2 участвовали в эксперименте E704 во ФНАЛе, где были проведены поляризационные исследования с использованием уникальных поляризованных пучков с энергией 200 ГэВ. В настоящее время многие члены сотрудничества участвуют в подготовке экспериментальной поляризационной программы на коллайдере RHIC при энергии 500 ГэВ в с.ц.м. Накопленный за двадцать лет сотрудничеством опыт является важным при подготовке новой поляризационной программы на У-70.

Предлагается следующее распределение обязанностей между участниками сотрудничества:

Пучковая аппаратура — О.А.Грачев, А.П.Мещанин, А.И.Мысник.

Поляризованная мишень — Н.С.Борисов, Э.И.Бунятова, В.Ф.Буринов, В.Г.Коломиец, А.Б.Лазарев, В.Н.Матафонов, Ю.М.Мельник, А.Б.Неганов, Ю.А.Плис, А.Ф.Прудкогляд, Ю.А.Усов, С.Н.Шилов, О.Н.Щевелев, А.Е.Якутин.

Электромагнитные калориметры — О.А.Грачев, В.А.Кормилицын, А.П.Мещанин, А.И.Мысник.

Триггерная и регистрирующая электроника — Н.И.Беликов, Ю.М.Гончаренко, А.М.Давиденко, С.Б.Нурушев, Н.Е.Михалин.

Система сбора данных и комплекс программ для обработки “в линию” — В.И.Белоусов, А.М.Давиденко, М.Н.Стриханов.

Физический анализ данных — А.Н.Васильев, Ю.А.Матуленко, А.И.Павлинов, А.Е.Андреева, А.А.Богданов, В.Ю.Кудрявцев, В.А.Окороков, Л.Ф.Соловьев, К.Е.Шестерманов.

#### 5. Запрашиваемое время на пучке

Для выполнения предлагаемой физической программы мы запрашиваем:

1. 60 смен ускорительного времени на комплексную настройку аппаратуры и оптимизацию условий эксперимента (пробный набор статистики во вновь выбранной геометрии).

2. 120 смен на набор статистики с протонным пучком при энергии 70 ГэВ.

3. 120 смен на  $\pi^-$ -мезонах при энергии 40 ГэВ.

## Заклучение

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по изучению односпиновых асимметрий в инклюзивном образовании адронов в  $pp$ -взаимодействиях, когда поляризован протон пучка или протон мишени. Целью данного проекта эксперимента является изучение инклюзивного образования  $\pi^0$ -мезона в области фрагментации протонов поляризованной мишени. Новизна проекта — проведение эксперимента в новой кинематической области с разными сортами адронов пучка —  $p, \pi, K$ . Предлагаемый опыт позволит исследовать масштабную инвариантность асимметрии, указания на которую дают существующие данные при  $90^\circ$  в с.ц.м. Преимуществом установки является ее компактность и относительная дешевизна в отличие, например, от магнитного спектрометра для измерения асимметрии в образовании заряженных частиц в области фрагментации мишени.

В данном проекте предлагается в течение 300 смен работы на У-70 исследовать односпиновую асимметрию в инклюзивном образовании  $\pi^0$ -мезонов на поляризованной мишени при энергиях 40 и 70 ГэВ в области  $x_F \leq 0$  и  $p_T \leq 3$  ГэВ/с. Детектор, поляризованная мишень, электроника, компьютеры и пакет программ для физического анализа данных имеются в наличии, что делает постановку предлагаемого эксперимента реальной в условиях сегодняшней тяжелой финансовой ситуации в науке.

Работа поддержана грантом РФФИ (номер проекта 97-02-16010).

## Список литературы

- [1] Dragoset W. et al. // Phys. Rev., 1978, v.D18, p.3939.
- [2] Saroff E.S. et al. // Phys. Rev. Lett., 1990, v.64, p.995.
- [3] Adams D.L. et al. // Zeit. Phys., 1992, v.C56, p.181.  
Adams D.L. et al. // Phys. Lett., 1991, v.B264, p.462.
- [4] Abramov V.V. et al. – Preprint IHEP 96-82, Protvino, 1996. Subm. to Nucl. Phys. B.
- [5] Apokin V.D. et al. // Phys. Lett., 1991, v. B243, p.461.
- [6] Adams L.D. et al. – Preprint IHEP 94-88, Protvino, 1994.
- [7] Sivers D. // Phys. Rev., 1990, v.D41, p.83.
- [8] Szwed J. // Phys. Lett., 1981, v.B105, p.403.
- [9] M.Anselmino et al.- Preprint DFTT 48/94,INFNCA-TH-94-27, December 1994.
- [10] De Grand T.A. and Miettinen H.I. // Phys.Rev., 1981, v.D24, p.2419.

- [11] Anderson B., Gustafson G. and Ingelman G. // Phys. Lett., 1979, v.B85, p.417.
- [12] Boros C., Zuo-tang L. and Meng Ta-chung. // PRL, 1993, v.70, p.1751; Phys. Rev., 1995, v.D51, p.4867.
- [13] Ryskin M.G. // Nucl. Phys., (Soviet), 1988, v.48, p.1119.
- [14] Troshin S.M. and Tyurin N.E. // Zeit. Phys., 1989, v.C45, p.171.
- [15] Troshin S.M. and Tyurin N.E. // Phys. Rev., 1995, v.D52, p.3862.
- [16] Aseev A.A. et al. // NIM, 1993, v.A330, p.39.
- [17] Аввакумов И.А. и др. // ПТЭ, 1987, № 5, с.46.
- [18] Apokin V.D. et al. // Nucl. Phys., 1985, v.B255, p.253.
- [19] Борисов Н.С. и др. – Препринт ОИЯИ-1-80-98, Дубна, 1980.
- [20] Akopdjanov G.A. et al. // Nucl. Instr. and Meth., 1977, v.140, p.441.
- [21] Адамс Д.Л. и др. – Препринт ИФВЭ 91-99, Протвино, 1991.
- [22] Леоненко Д.А. и др. – Препринт ИФВЭ 82-175, Серпухов, 1982.
- [23] Бушнин Ю.Б. и др. – Препринт ИФВЭ 82-176, Серпухов, 1982.
- [24] Ермолин Ю.В. и др. – Препринт ИФВЭ 84-8, Серпухов, 1984.
- [25] Беликов Н.И. и др. – Препринт ИФВЭ 87-58, Серпухов, 1987.
- [26] Donaldson G. et al. // Phys. Lett., 1978, v.B73, p.375.

*Рукопись поступила 2 апреля 1997 г.*

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Расчеты эффективности регистрации $\pi$ -мезонов

Методом Монте-Карло была рассчитана эффективность регистрации  $\pi^0$ -мезонов калориметром ЧСПП.

Для определенных значений  $x_F$  и  $p_T$  в диапазонах  $\Delta x_F$  и  $\Delta p_T$  разыгрывался распад  $\pi^0$ -мезона на два  $\gamma$ -кванта, которые трассировались до детектора. Если оба  $\gamma$ -кванта попали внутрь детектора на расстоянии от границ больше, чем один счетчик, то дальше применялась следующая процедура. Энергия каждого ливня разыгрывалась около своих начальных значений в пределах флуктуаций. Эти пределы выбирались так, чтобы удовлетворить экспериментальным разрешениям по

энергии и массе. При этом менялись как суммарная энергия, так и энергосодержание в отдельных счетчиках. Затем производилось оцифрование информации в шкале аналого-цифровых преобразователей П-267 с плотностью 12 МэВ на канал. Как бы полностью имитировалось “сырое” событие, поступившее на регистрирующую электронику в рабочем формате.

После этого подключался пакет программ реконструкции [21], который будет использован для физического анализа в будущем. На реконструированную пару  $\gamma$ -квантов накладывались ограничения:

а) асимметрия энергии между двумя ливнями  $(E_1 - E_2)/(E_1 + E_2) < 0,8$ , где  $E_1$  и  $E_2$  — восстановленные программой энергии  $\gamma$ -квантов;

б)  $\chi^2 < 0,1$  для обеих ливней, где  $\chi^2$  — критерий описания каждого ливня среднестатистической формой электромагнитного ливня;

в) инвариантная масса пары  $\gamma$ -квантов была между 100 и 175 МэВ/ $c^2$ .

Найденная таким образом эффективность регистрации учитывала и акцептанс калориметра и эффективность реконструкции  $\pi^0$ -мезонов.

Н.И.Беликов и др.

Экспериментальные исследования односпиновой асимметрии  $\pi^0$ -мезонов в области фрагментации протонов поляризованной мишени. (Предложение эксперимента СЕРП-П-180, ПРОЗА-2.).

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 04.04.97. Формат  $60 \times 84/8$ .      Офсетная печать.

Печ.л. 2,37.    Уч.-изд.л. 1,82.    Тираж 240.    Заказ 1026.    Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

