



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи
2006–8

Морозов Дмитрий Александрович

**ИЗМЕРЕНИЕ
ОДНОСПИНОВОЙ АСИММЕТРИИ
ИНКЛЮЗИВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
 π^0 -МЕЗОНОВ В $p\uparrow p$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ
ПРИ $\sqrt{s} = 200$ ГэВ**

01.04.23 – физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2006

УДК 539.121.4

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук А.Н. Васильев.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук С.М. Трошин (ОТФ, ИФВЭ), кандидат физико-математических наук А.П. Нагайцев (ОИЯИ, Дубна).

Ведущая организация – Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2006 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2006

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Сегодня экспериментальные исследования с поляризованными частицами ведутся в большинстве центров физики высоких энергий. Поляризованные пучки частиц используются для того, чтобы понять зависимость динамики сильного взаимодействия от спина и внутреннюю спиновую структуру нуклонов.

В настоящее время нет теоретической модели, которая могла бы полностью объяснить все имеющиеся поляризационные результаты, поэтому любые новые экспериментальные данные способствуют дальнейшему развитию теоретических моделей. Измерения в области фрагментации поляризованной (или неполяризованной) частицы позволяют сделать выбор между существующими теоретическими моделями.

Данная работа позволяет ответить на вопрос, волновавший научное сообщество на протяжении последних пятнадцати лет, — сохраняются ли значительные спиновые эффекты при повышении энергии взаимодействующих поляризованных пучков на порядок (от 20 до 200 ГэВ в системе центра масс).

Цель диссертационной работы — измерение односпиновой асимметрии в инклюзивном рождении нейтральных мезонов в обла-

стях фрагментации поляризованного и неполяризованного протона при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 200$ ГэВ в реакции $p \uparrow p \rightarrow \pi^0 X$, сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими моделями. В работу вошли измерения, проведенные в сеансах 2002 и 2003 гг. на коллайдере поляризованных протонов RHIC (Брукхэвенская национальная лаборатория, США) на установке STAR.

Научная новизна и практическая ценность работы

При выполнении диссертационной работы были получены следующие новые результаты:

- Впервые в мире наблюдались новые эффекты на коллайдере поляризованных протонов при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 200$ ГэВ, которая как минимум на порядок превосходит энергии всех предшествующих измерений в экспериментах с фиксированной мишенью.
- Впервые была измерена односпиновая асимметрия π^0 -мезонов в реакции $p \uparrow + p \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации поляризованного пучка при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. Полученные результаты позволяют провести сравнение с проведенными ранее измерениями асимметрии при более низких энергиях в экспериментах с фиксированной мишенью и сделать вывод об энергетической зависимости асимметрии нейтральных пионов.
- Впервые измерена односпиновая асимметрия π^0 -мезонов в реакции $p \uparrow + p \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации неполяризованного пучка.

В работе представлены результаты измерений асимметрии при двух различных модификациях экспериментальной установки STAR в инклюзивном рождении π^0 -мезонов в разных кинематических областях.

Следующие результаты имеют практическую ценность:

- Инклюзивное рождение π^0 -мезона в области фрагментации поляризованного протона может служить новой реакцией для

поляриметрии с установленной экспериментально анализирующей способностью. Детекторы, использовавшиеся при измерении асимметрии, можно использовать в качестве локального поляриметра эксперимента STAR.

- Разработана программа моделирования развития ливня в калориметре из свинцового стекла. Для корректной трассировки черенковского света учтены оптические свойства элементов детектора. Анализ результатов, полученных с помощью данной программы, позволил:
 - свести к минимуму зависимость энергетической шкалы калориметров из свинцового стекла от регистрируемой энергии;
 - откалибровать калориметр с высокой точностью;
 - разделять близко расположенные электромагнитные ливни и эффективно подавлять адронный фон;
 - оценить поперечные утечки энергии за пределы детектора.

Защищаемые положения:

- Результаты по измерению односпиновой асимметрии A_N в реакции $p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации поляризованного протона при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 200$ ГэВ.
- Результаты по измерению A_N в реакции $p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации неполяризованного протона при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 200$ ГэВ.
- Пакет программ для моделирования развития ливня в калориметре из свинцового стекла с учетом оптических свойств элементов детектора.

Основные публикации и апробация работы

По результатам выполненных исследований были опубликованы работы в журналах “Physical Review Letters” [1], “The European Physical Journal” [2] и “Ядерная Физика” [3], в трудах сороковой Международной конференции “Rencontres de Moriond — QCD and High Energy Hadronic Interactions” [4], в виде препринта ИФВЭ [5]. Результаты также докладывались на Международном семинаре

SPIN-2005 [6], семинарах спинового сотрудничества RHIC (БНЛ, США).

Апробация диссертации прошла в ГНЦ ИФВЭ 22 марта 2006 г.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 124 страницах печатного текста, состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 70 рисунков, 7 таблиц и список цитируемой литературы, включающий 128 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, показаны научная новизна представленных исследований и их практическая ценность, а также описана структура диссертации.

В **первой главе** приводится обзор существующих экспериментальных результатов и теоретических моделей. Анализируются измерения односпиновой асимметрии (A_N) в инклюзивном образовании пионов во взаимодействии поляризованных пучков протонов, поляризованных пучков протонов с неполяризованными мишенями, неполяризованных пучков с поляризованными мишенями.

Отдельно рассматриваются центральная кинематическая область и области фрагментации поляризованной и неполяризованной частиц. Асимметрия в центральной области сильно зависит от сорта взаимодействующих и регистрируемых частиц. В области фрагментации поляризованной частицы наблюдается значительная асимметрия, слабо зависящая от энергии пучка. A_N в области фрагментации неполяризованной частицы близка к нулю, независимо от энергии и сорта взаимодействующих и регистрируемых частиц.

За последние пятнадцать лет были разработаны модели, в которых большие односпиновые асимметрии объясняются следующими механизмами: введением дополнительного поперечного импульса в функцию распределения в начальном состоянии (корреляция между поперечным спином нуклона \mathbf{P} и поперечным импульсом партонов в нуклоне \mathbf{k}_T — механизм Сиверса) или в функцию фрагментации в

конечном состоянии (корреляция между поперечным спином кварка \mathbf{P}_q и поперечным импульсом адрона относительно фрагментирующего кварка \mathbf{k}_T — механизм Коллинза); вкладом высших твистов, учитывающих кварк-глюонные корреляции; взаимодействием цветового магнитного момента поляризованных кварков с хромо-магнитным полем; влиянием орбитального момента валентных кварков (Берлинская модель); влиянием орбитального момента кварк-антикваркового облака внутри конституентного кварка (кварковая модель для U-матрицы); образованием резонансов или возбужденных состояний.

Во **второй главе** дается описание коллайдера RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) и экспериментальных установок Переднего пиконного детектора (ППД) в сеансах 2002 и 2003 гг.

Коллайдер RHIC в Брукхэвенской национальной лаборатории (БНЛ) — это первый коллайдер поляризованных протонов в мире, рассчитанный на энергию протонов до 500 ГэВ в системе центра масс (в сеансах 2002 и 2003 гг. он работал при энергии 200 ГэВ). Он имеет два независимых накопительных кольца: “желтое” — в нем частицы движутся против часовой стрелки и “синее” — движутся по часовой стрелке.

Для получения поляризованных протонов используется источник поляризованных ионов с оптической накачкой. Затем поляризованные протоны ускоряются Линейным ускорителем и переводятся в бустер синхротрона AGS. Для измерения поляризации в каждом кольце установлены поляриметры на основе кулон-ядерной интерференции (КЯИ поляриметры). Средняя поляризация протонов, измеренная таким образом, составила 15% в 2002 г. и 30% — в 2003 г.

Поляризация протонов в кольцах RHIC поддерживается благодаря использованию полной “Сибирской змейки” (дипольные магниты) при ускорении частиц от энергии инжекции до рабочей энергии 100 ГэВ. В каждом кольце было установлено по два таких магнита, которые переворачивали спин протонов, для того чтобы избавиться от деполяризующих резонансов при ускорении. В кольцах RHIC стабильным положением оси спина протонов является вертикальное положение.

В типичном цикле накопления в 2002 и 2003 гг. было 55 банчей в каждом кольце, что приводило к пересечению банчей в точке взаимодействия STAR каждые 213 нс. Средняя светимость в цикле накопления составляла в 2002 г. $1,5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($2 \times 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в пике), интегральная светимость составила $0,15 \text{ пбарн}^{-1}$. В сеансе 2003 г. средняя светимость — $3 \times 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($6 \times 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в пике), интегральная светимость — $0,9 \text{ пбарн}^{-1}$.

В каждом банче протонов в цикле заполнения частицы могут быть поляризованы в различных направлениях (вверх или вниз). Последовательность заполнения колец банчами со спином, направленным вверх или вниз, называется спиновой структурой пучка. Чередование направления поляризации необходимо для минимизации систематических ошибок при измерении асимметрий. В сеансах 2002–2003 гг. в “желтом” кольце направление спина чередовалось через каждый банч, а в “синем” — через каждые два. Кроме того, в каждом кольце было по три банча без поляризации (также в целях оценки систематики) и 5 банчей подряд были не заполнены (необходимы для гашения пучков и полезны для оценки пучкового фона).

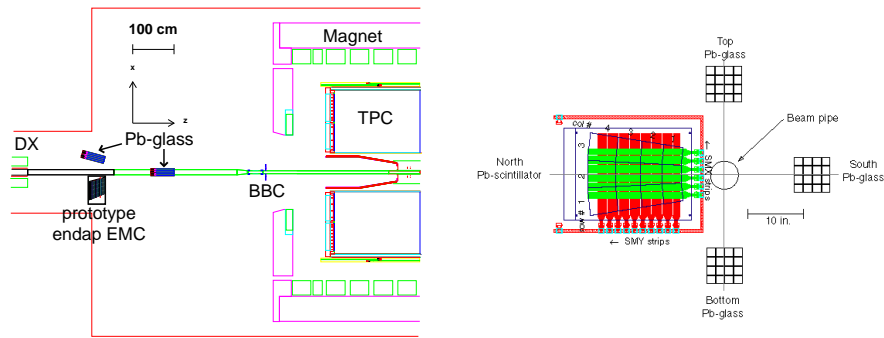


Рис. 1. Слева: восточная часть установки STAR (вид сверху) в сеансе 2002 г. Справа: схематический вид прототипа ПЖД в сеансе 2002 г. Вид “по пучку” из точки взаимодействия. Северный модуль пТЭМК — калориметр на основе свинец-сцинтиллятор; Южный, Нижний и Верхний модули — калориметры из свинцового стекла.

На рис. 1 показаны общий вид установки STAR и схематическое изображение установки ППД в сеансе 2002 г. В этом сеансе в качестве прототипа ППД использовался прототип торцевого электромагнитного калориметра (пТЭМК) STAR (Северный модуль). Он представлял собой сэмплинговый калориметр на основе свинец-сцинтиллятор, включающий также плоскости пластикового сцинтиллятора детектора максимума ливня (ДМЛ). Калориметр смонтирован в 12 оптически изолированных блоках, составляющих матрицу 4×3 . Энергетическое разрешение пТЭМК составило $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{16\%}{\sqrt{E}} + 2\%$. Для изучения возможных систематических ошибок в измерении A_N были установлены три детектора — матрицы 4×4 из блоков свинцового стекла. Их поместили справа (Южный модуль), сверху (Верхний модуль) и снизу (Нижний модуль) от входящего поляризованного протонного пучка (“желтый” пучок). Северный (пТЭМК) и Южный модули были помещены на расстоянии $\simeq 750$ см от точки взаимодействия STAR, а Верхний и Нижний модули — на расстоянии $\simeq 600$ см.

Установка STAR и детектор ППД в сеансе 2003 г. схематически изображены на рис. 2. По проекту ППД состоит из восточной и западной частей (по отношению к точке взаимодействия STAR). Каждая из частей имеет два модуля слева и справа от пучкового канала (называются Северный и Южный по их расположению), и два модуля сверху и снизу пучкового канала (называются Верхний и Нижний). Северный (или Южный) модуль состоит из матрицы 7×7 блоков свинцового стекла, расположенных параллельно пучку (горизонтально), 7 вертикальных свинцовых стекол (перед матрицей) в качестве детектора предварительного развития ливня (ДПРЛ), и две плоскости по 48 полосок пластикового сцинтиллятора в качестве детектора максимума ливня (ДМЛ) — между матрицей и ДПРЛ.

Чтобы иметь более широкий ливень в ДМЛ и, соответственно, более эффективно разделять ливни в ДМЛ, перед ДПРЛ установлено дополнительное вещество — свинцовая пластина толщиной 1,27 см. Верхний и Нижний модули состоят из 25 свинцовых стекол, уложенных в матрицу 5×5 . В этих модулях отсутствовали ДМЛ, ДПРЛ и свинцовая пластина. Энергетическое разрешение ка-

лориметров из свинцового стекла составило $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{13\%}{\sqrt{E}}$, временное — 30 нс. Перед сеансом 2003 г. была полностью завершена восточная часть ППД. В западной части были установлены только Южный и Верхний модули.

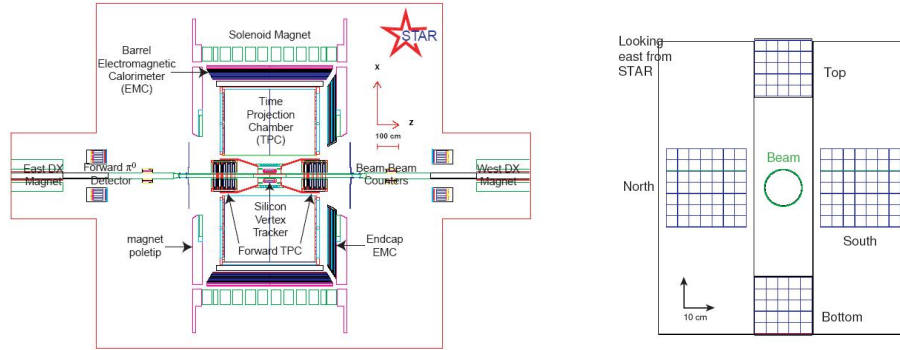


Рис. 2. Слева: установка STAR в сеансе 2003 г., вид сверху. Справа: матрицы ППД из свинцового стекла в сеансе 2003 г., вид “по пучку” из точки взаимодействия.

Пучковые счетчики — мониторы светимости (ПС) играют ключевую роль в формировании триггера STAR в pp -взаимодействиях. Также они являются хорошими локальными поляриметрами и позволяют следить за светимостью пучков. В процессе анализа данных сеансов 2002 и 2003 гг. ПС позволили свести фон от непрореагировавших частиц к 1% при наличии требования совпадения от восточного и западного ПС. Детектор ПС сделан из двух наборов шестиугольных пластиковых сцинтилляторов — 18 малых и 18 больших пластин. Всего установлено 2 детектора: один — на восточном полюсном наконечнике магнита STAR, другой — на западном.

В главе приводится детальное описание каждого элемента детектора ППД и их функционального назначения. Также подробно описываются электронная аппаратура, система сбора данных и триггер.

В **третьей** главе представлены результаты измерения односпиновой асимметрии в реакции $p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации

поляризованного протона ($p_T \geq 1$ ГэВ/с, $x_F > 0,2$) при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 200$ ГэВ в сеансе 2002 г. Данные набирались в начале января 2002 г. в течение сеанса с поляризованным протонным пучком. Типичный цикл заполнения колец RHIC длился 6–8 часов. Всего было записано около 10 млн. событий за 10 дней работы.

Идентификация нейтральных мезонов через их распад на пару гамма-квантов требует измерения трех величин:

- полной энергии мезона E_π ,
- распределения энергии между дочерними фотонами — асимметрии энергии

$$Z_\gamma = \frac{|E_{\gamma 1} - E_{\gamma 2}|}{E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2}}, \quad (1)$$

- угла разлета двух фотонов $\phi_{\gamma\gamma}$.

Нейтральные π -мезоны реконструировались с помощью Северного модуля прототипа торцевого электромагнитного калориметра (пТЭМК) по событиям, содержащим два кластера в ДМЛ, по формуле

$$M_{\gamma\gamma} = E_\pi \sqrt{1 - Z_\gamma^2} \sin\left(\frac{\phi_{\gamma\gamma}}{2}\right) \approx E_{tot} \sqrt{1 - Z_\gamma^2} \frac{d_{\gamma\gamma}}{2z_{vtx}}. \quad (2)$$

За энергию π^0 (E_π) было принято значение полного энергосодержания в калориметре (E_{tot}). Угол разлета фотонов ($\phi_{\gamma\gamma}$) определялся по двум измеренным величинам: расстоянию до вершины (z_{vtx}), получаемому по разности времен из восточного и западного ПС, и расстоянию между гамма-квантами в калориметре ($d_{\gamma\gamma}$). Параметры $d_{\gamma\gamma}$ и асимметрия энергии Z_γ были измерены с помощью ДМЛ.

Прежде всего из значений АЦП ДМЛ вычитались значения измеренных пьедесталов. Затем проводилась калибровка откликов всех ячеек ДМЛ. Калибровочные коэффициенты подбирались таким образом, чтобы скорректированные АЦП спектры имели одинаковую форму. После этого поправленные (умноженные на соответствующий калибровочный коэффициент) сигналы АЦП сортировались по гистограммам зависимости энергосодержания от номера пластины, чтобы получить поперечные профили электромагнитных ливней в

каждом событии. Над полученными профилями проводилась серия фитов для идентификации пиков, которые могли быть произведены фотонами, попавшими в калориметр. Функция, которая описывает поперечный профиль ливня, представляет собой пару гауссовых распределений с общим средним.

Угол разлета пары гамма-квантов определяется из расстояния между ними при попадании в детектор. Эту величину можно извлечь напрямую, фитируя профили ливня, так как любые комбинаторные перестановки откликов в плоскостях ДМЛ X и ДМЛ Y приводят к одинаковым значениям расстояния между фотонами. Энергетическая асимметрия фотонов (Z_γ) определяется как отношение энергосвыделений под двумя пиками в любой из плоскостей ДМЛ X или ДМЛ Y. В ходе измерений в эксперименте на тестовом пучке было получено, что энергосвыделение в плоскости ДМЛ X (ДМЛ Y) пропорционально энергии падающего электрона. Энергетическое разрешение ДМЛ в этом эксперименте составило $\Delta E/E \approx 0,3/\sqrt{E}$.

Спектры инвариантной массы, полученные по данным с модуля пТЭМК, показаны на рис. 3.

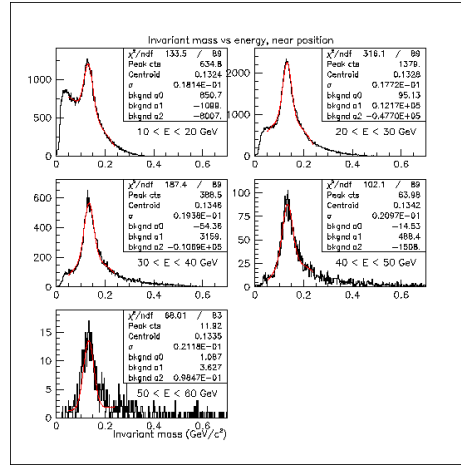


Рис. 3. Распределения по инвариантной массе в событиях, реконструированных в пТЭМК, в различных интервалах по энергии.

В главе 3 подробно описана процедура калибровки калориметров. Определение энергетической шкалы и исследование эффектов, влияющих на нее, очень важно при измерении спиновых наблюдаемых. Одним из таких эффектов может являться неопределенность z -координаты модуля пТЭМК. Она оценена на уровне 5 см. Моделирование методом Монте-Карло показало, что смещение координаты вылета π^0 -мезонов на 5 см приводит к смещению вершины массового пика на величину менее 1%. Другим эффектом, оказавшим влияние на калибровочные коэффициенты, стала заметная разница в скорости счета индивидуальных счетчиков в разных циклах заполнения RHIC. Относительные калибровочные коэффициенты были подсчитаны для каждого цикла. Они менялись в пределах 10%. Соответствующие поправки были внесены на этапе получения физического результата. Также была изучена зависимость энергетической шкалы от энергии пионов и направления спина пучка. Такая зависимость оказалась пренебрежимо малой.

Таким образом, с помощью прототипа пТЭМК удалось восстановить нейтральные пионы в диапазоне 15–80 ГэВ с массовым разрешением 20 МэВ/ c^2 . При этом энергетическая шкала детектора была известна с точностью $\sim 1\%$.

Для изучения происхождения событий, наблюдаемых в прототипе ППД при взаимодействии поляризованных протонов энергией $\sqrt{s} = 200$ ГэВ, было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования. Для анализа была создана программа, построенная на основе пакетов RUTHIA (генератор событий) и GEANT (для моделирования отклика калориметра). Применялись одни и те же алгоритмы восстановления и параметры реконструкции в моделировании и обработке экспериментальных данных. Получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных распределений по массе, углам образования, энергии и другим переменным. Это позволило удостовериться, что ППД действительно измерял π^0 -мезоны от pp -взаимодействий.

В сеансе 2002 г. детектор ППД не обладал лево-правой симметрией: слева от “желтого” пучка был установлен сэмпинговый

калориметр пТЭМК (Северный модуль), справа — матрица из свинцового стекла (Южный модуль). Поэтому для каждого из калориметров анализирующую способность A_N измеряли по отдельности, через спино-зависимую асимметрию по формуле

$$P_{beam}A_N = \frac{N_+ - RN_-}{N_+ + RN_-}, \quad (3)$$

где P_{beam} — величина поперечной поляризации пучка; $N_{+(-)}$ — число зарегистрированных π^0 -мезонов при направлении поляризации пучка вверх (вниз). Спино-зависимая относительная светимость $R = \frac{\mathcal{L}_+\mathcal{LT}_+}{\mathcal{L}_-\mathcal{LT}_-}$, где $\mathcal{L}_{+(-)}$ — светимость; $LT_{+(-)}$ — эффективность системы сбора данных детектора при различных направлениях поляризации.

Величина $\langle P_{beam} \rangle = 0,16$ была измерена с помощью КЯИ поляриметра. Ориентация спина в “желтом” пучке для событий, прошедших триггер ППД, определялась по разнице во времени между триггером ППД и битом-идентификатором спина, предоставляемым РНС. Относительная светимость взаимодействий протонов в “желтом” пучке с направлением спина вверх или вниз измерялась подсчетом числа совпадений от двух детекторов ПС, отсортированных по битам-идентификаторам направления спина “желтого” пучка. Эффективность системы сбора данных ППД было измерена по отношению числа событий, принятых системой сбора данных, к числу событий, прошедших условие триггера. Значение относительной светимости (поправка R в выражении (3)) флуктуировало в районе 1,15. Причиной этого послужили вариации интенсивности пучка от банча к банчу. Систематическая неопределенность относительной светимости составила $\sim 10^{-3}$, что в 10–20 раз меньше, чем значение $P_{beam}A_N$, измеренное ППД. Эффективность системы сбора данных не зависела от спина.

Все события, прошедшие отбор по триггеру (энерговыведение в одном из четырех калориметров $\gtrsim 15$ ГэВ) и “условию взаимодействия” ПС (см. главу 3), участвовали в дальнейшей обработке. Алгоритм подсчета асимметрии π^0 -мезонов, зарегистрированных Северным модулем ППД (пТЭМК), подробно описан в главе.

Кроме асимметрии π^0 -мезонов были подсчитаны асимметрии по полному энерговыделению в калориметре пТЭМК. Для трех модулей ППД из свинцового стекла, где не было возможности разделить ливни от пары фотонов (матрицы 4×4), асимметрия была вычислена только последним способом.

На рис. 4 (слева) представлен окончательный результат для анализирующей способности как функции от $2 \langle E_{tot} \rangle / \sqrt{s} \approx x_F$ для Северного модуля ППД.

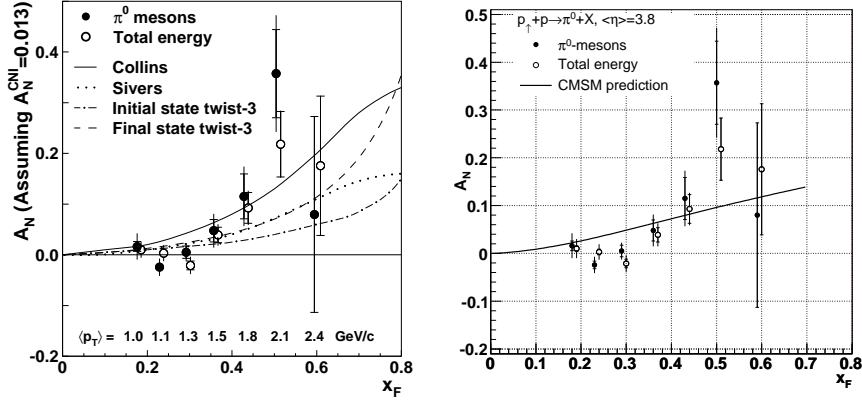


Рис. 4. Слева: анализирующая способность в зависимости от x_F для пТЭМК; \bullet — идентифицированные π^0 -мезоны; \circ — полная энергия, зарегистрированная калориметром; внутренние ошибки — статистические, внешние — квадратично просуммированные статистические и систематические; линии — предсказания теоретических моделей в рамках пертурбативной КХД, вычисленные при $p_T = 1, 5$ ГэВ/с. Справа: предсказание модели “хромо-магнитных струн” для односпиновой асимметрии π^0 -мезонов в реакции $p \uparrow p \rightarrow \pi^0 X$ при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ и $\eta = 3, 8$. Кривая — предсказание; точки — экспериментальные данные.

Перекрытая область по кинематическим переменным $\langle \eta \rangle = 3, 8$; $\langle p_T \rangle = 1, 0 - 2, 4$ ГэВ/с, $\langle x_F \rangle = 0, 2 - 0, 6$. Анализирующая способность мала при $x_F < 0, 3$, она становится положительной и растет с x_F , достигая значения $\sim 20\%$ при $x_F > 0, 3$. Средние значения p_T

коррелируют с $\langle x_F \rangle$, так как прототип ППД находился на фиксированной позиции относительно точки взаимодействия. Асимметрия A_N , полученная на детекторе из свинцового стекла справа от пучка, находится в согласии с данными, полученными на пТЭМК слева от пучка. Тогда как асимметрия сверху (Верхний модуль из свинцового стекла) и снизу (Нижний модуль из свинцового стекла) совместима с нулем, как и ожидалось.

При оценке систематических погрешностей учитывалось несколько факторов:

- наибольший вклад ($\sim 95\%$) вносила x_F -зависимая систематическая ошибка, связанная со сравнением результатов с правого и левого калориметров;
- отличие от нуля A_N для Верхнего и Нижнего модулей ($\sim 2\%$);
- зависимость эффекта от цикла заполнения RHIC ($\sim 4\%$);
- фон от взаимодействия с остаточным газом ($\sim 1\%$);
- систематика, связанная с измерением $R \sim 10^{-3}$.

Статистическая значимость роста для анализирующей способности составляет $4,7\sigma$ (включая статистические и систематические ошибки). Результат получен из линейного фита по незаштрихованным точкам на рис. 4 при $x_F > 0,27$, $\chi^2/ndf = 0,9$ при трех степенях свободы. Это является первым значительным спиновым результатом для частиц с $p_T > 1$ ГэВ/с на коллайдере поляризованных протонов.

Ранее асимметрию образования π^0 -мезонов в области фрагментации поляризованного протона в реакции $p \uparrow p \rightarrow \pi^0 X$ измеряли в двух экспериментах с фиксированной мишенью. Это эксперименты E704 при $\sqrt{s} = 20$ ГэВ и ПРОЗА-М при $\sqrt{s} = 10$ ГэВ. В табл. 1 приведены средние асимметрии в этих экспериментах вместе с результатом эксперимента STAR.

Во всех экспериментах абсолютное значение асимметрии равно нулю при $|x_F| < 0,3$, возрастает с ростом $|x_F|$ и при больших значениях $|x_F|$ достигает $\sim 20\%$. Отсюда можно заключить, что асимметрия инклюзивно образованного π^0 -мезона в области фрагментации поляризованного протона в пределах ошибок измерения практически не зависит от энергии в диапазоне 10–200 ГэВ в системе центра масс.

Таблица 1. Результаты измерений A_N в области фрагментации поляризованных протонов в трех экспериментах.

Эксперимент	$ A_N , \%$
ПРОЗА-М (ИФВЭ)	11 ± 3
E704, ФНАЛ	12 ± 2
STAR, БНЛ	14 ± 4

Кривые на рис. 4 (слева) — предсказания пертурбативных КХД моделей, полученные из данных при $\sqrt{s} = 20$ ГэВ и экстраполированные на $\sqrt{s} = 200$ ГэВ при $p_T = 1,5$ ГэВ/с. В одной модели односпиновые эффекты приписываются свертке поперечной функции распределения со спиново-зависимой функцией фрагментации Коллинза. Модель Сиверса добавляет явную спиново-зависимую k_T -зависимость в партонную функцию распределения. Остальные модели описывают спиновые эффекты партонными корреляциями в третьем порядке (твист-3) в начальном и конечном состояниях. Видно, что экспериментальные данные хорошо описываются всеми приведенными предсказаниями.

На рис. 4 (справа) представлено предсказание в рамках модели “хромом-магнитных струн” для наших данных при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ и $\eta = 3,8$. В рамках этой модели данные также описываются достаточно хорошо, хотя в области малых x_F пертурбативные КХД модели ближе к экспериментальным данным.

Качественное предсказание для асимметрии π^0 -мезонов дано в рамках кварковой модели для U-матрицы. Асимметрия нейтральных мезонов должна быть положительна (основной вклад в области фрагментации поляризованного пучка дает положительно поляризованный u-кварк) и линейно расти с x_F .

Отметим также, что при малых значениях x_F большой вклад в сечение дает глюонная компонента, поэтому асимметрия при $x_F < 0,3$ должна быть малой, так как поперечные глюонные функции распределения слабо зависят от поляризации протона.

Измеренная анализирующая способность в реакции $p\uparrow p \rightarrow \pi^0 X$ довольно высока, $\sim 15\%$, а сечение образования π^0 -мезонов велико. Таким образом, данная реакция может использоваться для измерения поляризации протонных пучков. В частности, ППД может служить локальным поляриметром STAR.

Электромагнитные калориметры с небольшим аксептансом, какими являются ППД в эксперименте STAR, можно также использовать в качестве поляриметра, где анализирующей способностью является асимметрия инклюзивно рожденных фотонов. Впервые это было показано нами на основе данных эксперимента E704 [3]. A_N в реакции $p\uparrow p \rightarrow \gamma X$ в области фрагментации поляризованного пучка протонов энергией 200 ГэВ составила $(3 \pm 1)\%$ в области $x_F = 0,3 - 0,6$ и $p_T = 0,5 - 1,0$ ГэВ/с. К преимуществам поляриметра на γ -квантах по сравнению с π^0 -мезонными можно отнести: отсутствие необходимости восстановления пионов; наличие в статистике для поляриметрии событий, когда регистрируется только один фотон (например жесткий фотон от распада π^0 , η и т.п.).

Перечисленные аспекты позволяют применять поляриметр на γ -квантах в ограниченных пространствах (типичная проблема в коллайдерных экспериментах), а также ускорить измерение поляризации за счет более простой процедуры обработки данных.

Исследования, подобные приведенным в работе [3], можно провести на установке ППД в эксперименте STAR при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ.

В **четвертой главе** описываются результаты измерения анализирующей способности π^0 -мезонов в реакции $p\uparrow p \rightarrow \pi^0 X$ при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ в сеансе 2003 г. В отличие от 2002 г., измерения проводились на пучках со средней поляризацией $\sim 30\%$, с обновленным детектором ППД и в несколько другой кинематической области $\langle \eta \rangle = 4,1$. Более того, наличие детекторов на обеих сторонах STAR позволило измерить A_N двумя независимыми способами. Кроме этого, впервые измерена асимметрия A_N в отрицательной области x_F .

Данные с поперечно-поляризованными пучками протонов набирались в апреле/мае 2003 г. в течение 16 дней. Типичный цикл заполнения РНЭС длился 7–8 часов. Всего было записано около 17 млн. событий, из которых 12 млн. использовались в обработке.

Нейтральные пионы реконструировались во всех шести модулях калориметра ППД по формуле (2). За энергию π^0 принималось значение полного энергосодержания в калориметре: матрица 7×7 + ДПРЛ в модулях слева и справа, матрица 5×5 в модулях сверху и снизу (ДПРЛ отсутствовал в этих детекторах). Относительная координата вершины z_{vtx} определялась по информации с время-проекционной камеры или (при отсутствии этой информации в событии) по разности времен срабатывания восточной и западной частей ПС.

Параметры Z_γ , $d_{\gamma\gamma}$ вычислялись исключительно по откликам счетчиков калориметров (без использования ДМЛ). Ячейки группировались в кластеры вокруг ячеек с максимальным энергосодержанием. Для получения координат и энергий фотонов, попавших в детектор, в пределах каждого кластера отклики в ячейках фитировались известной функцией (так называемая форма ливня).

Для изучения формы электромагнитного ливня в калориметре из свинцового стекла были проведены экспериментальные исследования на электронном пучке ИФВЭ, а также создана программа моделирования электромагнитных ливней. В программу, основанную на пакете GEANT, была внесена полная геометрия детектора, включая обертки из майлара, фотокатода ФЭУ, дискретность АЦП (см. главу 4 и [5]). Свинцовые стекла являются черенковскими счетчиками, поэтому для адекватного воспроизведения отклика калориметра необходимо знать оптические свойства элементов детектора. Квантовая эффективность и коэффициент преломления фотокатода, коэффициент отражения майлара, длина поглощения и коэффициент преломления свинцового стекла были измерены в диапазоне длин волн 300–600 нм. Данные распределения также внесены в программу моделирования. Формы ливня, полученные моделированием, совпали с экспериментальными в пределах ошибок.

Так же, как и при калибровке прототипа ППД в сеансе 2002 г., метод калибровки энергетической шкалы калориметров из свинцового стекла был основан на реконструкции инвариантной массы пары гамма-квантов от распада π^0 -мезонов. Процедура имела итерационный характер и сходилась примерно за 10 итераций. Тот же алгоритм применялся для калибровки 7 стекол ДРПЛ. Массовые спектры в этом случае сортировались по максимальному энергосделению среди счетчиков ДРПЛ. Процедура сходилась примерно за 15 итераций. Обе процедуры подробно описаны в главе 4.

Было проведено исследование эффектов, влияющих на энергетическую шкалу калориметров. Значимыми для калориметров ППД оказались два — зависимость энергетической шкалы от энергии пионов и зависимость от времени (т.е. от экспозиции к экспозиции в течении сеанса с изменением светимости). После коррекции значения инвариантной массы были приведены к табличному значению массы π^0 во всех интервалах энергии с точностью 2%.

Таким образом, с помощью калориметров ППД удалось восстановить нейтральные пионы в диапазоне от 20–80 ГэВ с массовым разрешением 16–20 МэВ/ c^2 .

Так же, как и при анализе данных с сеанса 2002 г., для контроля качества калибровки проводилось моделирование отклика калориметров ППД. Программа моделирования была основана на пакетах RUTHIA и GEANT. Обработка данных моделирования и эксперимента проводилась одной программой с одинаковыми критериями отбора событий. Было получено хорошее согласие распределений по инвариантной массе пар фотонов, псевдобыстроте π^0 -мезонов, азимутальному углу и другим переменным. Модель Монте-Карло адекватно воспроизводит кинематические переменные.

В сеансе 2003 г. односпиновая асимметрия в образовании π^0 -мезонов измерялась двумя способами. Один способ, подробно описанный в главе 3, основан на формуле (3). Он применялся для калориметра слева от пучка на западной стороне установки STAR, так как в этом сеансе модуль справа отсутствовал и установка не обладала лево-правой симметрией. На восточной стороне STAR были установлены оба детектора, установка обладала симметрией. Поэто-

му был применен метод геометрического среднего, основанный на формуле

$$P_{beam}A_N = \frac{\sqrt{N_+^L \cdot N_-^R} - \sqrt{N_+^R \cdot N_-^L}}{\sqrt{N_+^L \cdot N_-^R} + \sqrt{N_+^R \cdot N_-^L}}, \quad (4)$$

где P_{beam} — величина поперечной поляризации “желтого” пучка; $N_{+(-)}^L$ — число зарегистрированных мезонов в левом от “желтого” пучка модуле при положительной (отрицательной) поляризации “желтого” пучка; $N_{+(-)}^R$ — число зарегистрированных мезонов в правом от “желтого” пучка модуле при положительной (отрицательной) поляризации “желтого” пучка. Преимущество метода геометрического среднего состоит в том, что поправки, связанные с относительной светимостью и эффективностью системы сбора данных, сокращаются (входят как множители при $N_{+(-)}^{L(R)}$).

По направлениям спина “желтого” пучка (при измерении асимметрии первым методом) и “синего” пучка (при измерении вторым методом) проводилось усреднение. Такой пучок назывался неполяризованным, сопряженный ему — поляризованным. В сеансе 2003 г. были проведены измерения асимметрии как для положительных значений x_F нейтральных пионов, так и для отрицательных. Положительное (отрицательное) значение x_F приписывалось π^0 -мезону с тем же (противоположным) направлением продольного импульса, что и поляризованный пучок. Положительное значение A_N соответствует тому, что большее количество нейтральных пионов зарегистрировано слева от поляризованного пучка для обоих знаков x_F . Для отрицательных x_F усреднение по спину проводилось для пучков, импульс частиц в которых направлен к детектору.

Средняя поляризация пучков $\langle P_{beam} \rangle$, измеренная КЯИ поляриметром, составила $\sim 30\%$ для обоих пучков. Ориентация спина в “синем” и “желтом” пучках определялась по битам-идентификаторам спина для каждого банча, предоставляемым RHIC. Так как в сеансе 2003 г. система сбора данных ППД была встроена в общую систему STAR, не было необходимости отслеживать задержки между триггером ППД и этими битами.

При измерении асимметрии с использованием одного детектора (ЮЗ модуля) необходимо знать спино-зависимую относительную светимость R в “синем” пучке — для положительных x_F и в “желтом” — для отрицательных. Эта величина была измерена с помощью ПС, по отношению числа совпадений, отсортированных по битам-идентификаторам спина. R отличается от единицы и зависит от времени. Статистическая ошибка измерений: $\delta R_{stat} \sim 10^{-4} - 10^{-3}$, систематическая: $\delta R_{syst} < 10^{-3}$. Эффективность системы сбора данных не учитывалась, так как ее зависимость от спина ничтожно мала.

Для событий, прошедших условие отбора по триггеру, применялись два алгоритма вычисления анализирующей способности, подробно описанные в главе 4.

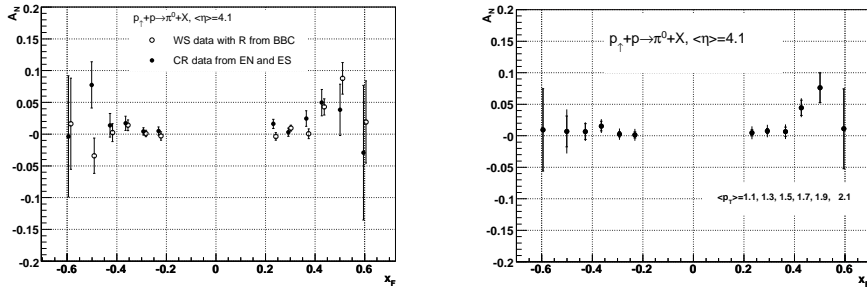


Рис. 5. Слева: анализирующая способность π^0 -мезонов как функция x_F ; \circ — асимметрия для модуля ЮЗ ППД; \bullet — асимметрия, полученная методом геометрического среднего для модулей СВ и ЮВ. Справа: окончательный результат для анализирующей способности π^0 -мезонов как функция x_F ; точки — усредненные значения, измеренные двумя независимыми методами; внутренние ошибки — статистические, внешние — статистические и систематические, сложенные квадратично.

На рис. 5 (слева) представлены результаты для анализирующей способности инклюзивного рождения π^0 -мезонов в $p_1 p$ взаимодействии по данным сеанса 2003 г. На рисунке отдельно показаны x_F -зависимости A_N , полученные методом геометрического среднего для

модулей СВ, ЮВ и методом (3) — для модуля ЮЗ. Приведены измерения как для положительных, так и для отрицательных значений x_F . Результаты этих двух независимых измерений совпадают в пределах ошибок.

На рис. 5 (справа) показаны окончательные результаты анализирующей способности, полученные комбинированием результатов двух методов. Точки соответствуют среднему значению псевдобыстроты $\langle \eta \rangle = 4,1$. Перекрытый диапазон по поперечному импульсу $p_T = 0,9 - 2,2$ ГэВ/с. A_N для положительных значений x_F совместимо с нулем до $x_F \sim 0,35$, затем растет с увеличением x_F , достигая значений 8–10%. Данный результат подтверждает ранее измеренную A_N в сеансе 2002 г. (см. главу 3 и [1]). Анализирующая способность для отрицательных x_F измерена впервые, она оказалась совместима с нулем в пределах ошибок.

При оценке систематических погрешностей учитывались следующие факторы:

- фон от взаимодействия с остаточным газом (вклад $\sim 18\%$);
- зависимость эффекта от номера экспозиции ($\sim 45\%$);
- отличие от нуля A_N , измеренной с помощью верхней и нижней групп пластин ПС ($\sim 20\%$);
- отличие результатов двух методов (для большинства точек 0);
- систематика, связанная с измерением $R \sim 10^{-3}$.

Результаты сеанса 2003 г. по односпиновой асимметрии в образовании π^0 -мезонов в области фрагментации поляризованного протона подтвердили существование ненулевой асимметрии при больших x_F , обнаруженной в сеансе 2002 г. Измерения проводились на разных детекторах, с разной электроникой и системой сбора данных. Отличались и кинематические области. В сеансе 2002 г. среднее значение псевдобыстроты нейтральных пионов составило $\langle \eta \rangle = 3,8$, в 2003 г. — $\langle \eta \rangle = 4,1$. Измерения в сеансе 2003 г. проводились при более низких значениях p_T . С одной стороны, эти обстоятельства не позволили объединить статистику с обоих сеансов, с другой, — позволили сравнить результаты по сути двух независимых экспериментов и повысить их достоверность.

Измерение асимметрии в области фрагментации неполяризованного протона в реакции $p \uparrow p \rightarrow \pi^0 X$ проведено впервые в мире. В других экспериментах измеряли асимметрию в иных реакциях (см. главу 1). Отметим, что результат (асимметрия равна нулю) не зависит от сорта регистрируемых мезонов (π^+ , π^- , π^0), от сорта взаимодействующей с поляризованным протоном частицы (π^- , K^- , \bar{p} , p , ядра C и Cu), а также от энергии взаимодействия (от 10 до 200 ГэВ в системе центра масс).

Предсказания теоретических моделей и сравнение с результатами измерения асимметрии в области фрагментации поляризованного протона представлены в главе 1. В рамках всех приведенных моделей измеренная асимметрия описывалась достаточно хорошо. Однако последние теоретические работы поставили под сомнение возможность описания больших значений асимметрии в области больших положительных x_F в рамках механизма Коллинза. В этих работах утверждается, что не существует такой функции фрагментации Коллинза, при выборе которой можно описать экспериментальные данные, учитывая вклад только механизма Коллинза. В главе 1 обсуждались трудности описания данных эксперимента E704 в рамках механизма Коллинза. В кинематической области STAR наибольший вклад в асимметрию π^0 -мезонов дает механизм Сиверса (преимущественно кварковый). Вклад механизма Коллинза (максимально возможный) подавлен как минимум в три раза. В кинематической области эксперимента E704 (при положительных значениях x_F) тоже наблюдается подобное подавление.

На рис. 6 (слева) показано сравнение результатов сеанса 2003 г. с теоретическим предсказанием в рамках механизма Сиверса. Кривая хорошо описывает экспериментальные данные.

В области фрагментации неполяризованного протона валентные кварки из неполяризованного протона не могут дать асимметрию и основную роль при фрагментации играют морские кварки из поляризованного протона и глюоны.

В кинематической области эксперимента E704 играет роль только механизм Сиверса от таких кварков и глюонов. Последние, в частности дают значения A_N до 10% (морские кварки — до 5%).

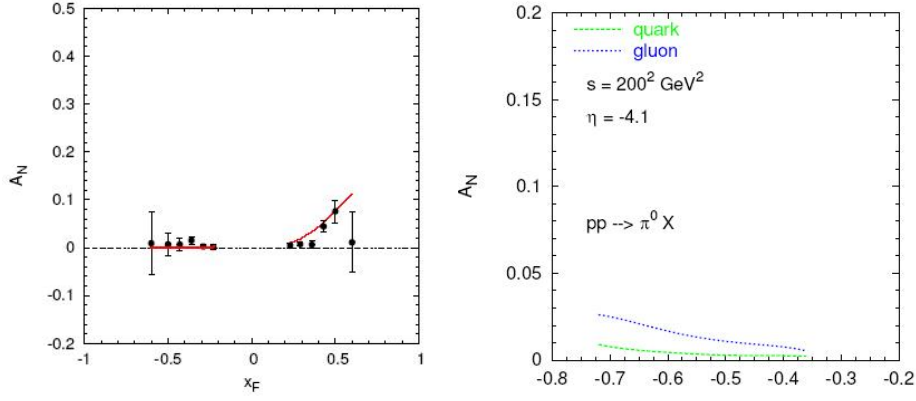


Рис. 6. Слева: асимметрия A_N как функция от x_F в реакции $p_{\uparrow}p \rightarrow \pi^0 X$ при $|\eta| = 4,1$ и $\sqrt{s} = 200$ ГэВ, измеренная ПЖД; точки — экспериментальные данные сеанса 2003 г., кривые — теоретическое предсказание в рамках модели Сиверса. Справа: максимальные вклады в A_N как функция x_F для реакции $p_{\uparrow}p \rightarrow \pi^0 X$ в области $x_F < 0$ в эксперименте STAR; линии: сверху — глюонная функция Сиверса, внизу — кварковая функция Сиверса.

Данные в этой области могли бы дать ограничения на глюонную функцию Сиверса, но в эксперименте E704 асимметрия при $x_F < 0$ не была измерена. Аналогичные оценки в кинематической области STAR дают намного меньшие значения A_N , достигающие максимум 2% (в пять раз меньше, чем при $\sqrt{s} = 20$ ГэВ, см. рис. 6 (справа)). Это не позволяет установить ограничения на глюонную функцию Сиверса без увеличения статистики в наших измерениях. Однако, как видно из рис. 6 (слева), данные по A_N при $x_F < 0$ хорошо описываются кварковой функцией Сиверса. Вклады всех остальных эффектов исчезающе малы.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Впервые наблюдались спиновые эффекты на коллайдере поляризованных протонов при энергии в системе центра масс

- $\sqrt{s} = 200$ ГэВ, которая, как минимум, на порядок превосходит энергии всех предшествующих измерений в экспериментах с фиксированной мишенью.
2. Впервые измерена односпиновая асимметрия π^0 -мезонов (A_N) в реакции $p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации поляризованного пучка при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ, $x_F = 0,2 - 0,8$, $p_T = 1,0 - 2,4$ ГэВ/с. A_N сравнима с нулем при $x_F < 0,3$, она становится положительной и растет с x_F , достигая значения $\sim 20\%$ при $x_F > 0,3$.
 3. Измеренная асимметрия совместима в пределах ошибок с измерениями экспериментов E704 ($\sqrt{s} \approx 20$ ГэВ) и ПРОЗА-М ($\sqrt{s} \approx 10$ ГэВ) в той же кинематической области. Тем самым в эксперименте на коллайдере установлено, что в пределах ошибок измерения асимметрия не зависит от энергии взаимодействующих протонов.
 4. Инклюзивное рождение π^0 -мезона в области фрагментации поляризованного протона может служить новой реакцией для поляриметрии с установленной экспериментально анализирующей способностью $\sim 15\%$. Калориметры переднего пионного детектора (ППД) можно использовать в качестве локального поляриметра эксперимента STAR. Также потенциальной возможностью является использование ППД в качестве поляриметра с анализирующей способностью инклюзивного образования γ -квантов.
 5. Впервые измерена односпиновая асимметрия π^0 -мезонов в реакции $p_{\uparrow} + p \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации неполяризованного пучка ($-0,8 < x_F < -0,2$, $p_T = 0,9 - 2,2$ ГэВ/с). Эксперимент проведен при рекордной энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. A_N сравнима с нулем во всем диапазоне по x_F .
 6. Измерения в области фрагментации поляризованного протона в сеансе 2003 г. подтвердили существование ненулевой асимметрии, обнаруженной в эксперименте STAR в сеансе 2002 г. на калориметре ППД другой конструкции. При $x_F < 0,35$ асимметрия совместима с нулем, при $x_F > 0,35$ A_N растет и достигает значений 10%.

7. Модели на основе теоремы факторизации КХД хорошо описывают полученные экспериментальные данные в области фрагментации поляризованного протона. Вероятнее всего наличие асимметрии объясняется совокупностью эффектов, вытекающих из данных моделей. При этом вклад механизма Коллинза значительно подавлен по сравнению с вкладами других механизмов. Модель “хромо-магнитных струн” удовлетворительно описывает наши данные. Предсказания киральной кварковой модели для U -матрицы не противоречат полученным результатам.
8. В области фрагментации неполяризованного протона существующие теоретические модели хорошо описывают полученные данные.
9. На электронных пучках ИФВЭ проведены измерения формы электромагнитного ливня в калориметре из свинцового стекла при наличии существенного вещества (~ 4 радиационные длины) перед детектором.
10. Разработана программа моделирования развития ливня в калориметре из свинцового стекла. Для корректной трассировки черенковского света учтены оптические свойства элементов детектора (стекло, катод фотоумножителя, обертка из майлара). В программу внесены полные геометрии установок FPD и ПРОЗА-М. Формы ливня, полученные моделированием, совпали с измеренными экспериментально. Анализ результатов, полученных с помощью данной программы, позволил:
 - свести к минимуму зависимость энергетической шкалы калориметров ППД от регистрируемой энергии;
 - откалибровать ППД с точностью лучше 2%;
 - иметь форму электромагнитного ливня с веществом перед калориметром в широком диапазоне энергий фотона или электрона, попавшего в калориметр из свинцового стекла, не прибегая к дополнительным методическим исследованиям;
 - разделять близко расположенные электромагнитные ливни и подавлять адронный фон более эффективно;

- оценить поперечные утечки энергии за пределы детектора.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 06-02-16119.

Список литературы

- [1] J. Adams, C. Adler, M.M. Aggarwal, Z. Ahammed, J. Amonett, B.D. Anderson, M. Anderson, D. Arkhipkin, G.S. Averichev, S.K. Badyal, J. Balewski, O. Barannikova, L.S. Barnby, J. Baudot, S. Bekele, V.V. Belaga, R. Bellwied, J. Berger, B.I. Bezverkhny, S. Bharadwaj, P. Bhaskar, A.K. Bhati, H. Bichsel, A. Billmeier, L.C. Bland, C.O. Blyth, B.E. Bonner, M. Botje, A. Boucham, A.V. Brandin, A. Bravar, R.V. Cadman, X.Z. Cai, H. Caines, M. Calderon, J. Carrol, J. Castillo, M. Castro, D. Cebra, P. Chaloupka, S. Chattopadhyay, H.F. Chen, Y. Chen, S.P. Chernenko, M. Cherney, A. Chikanian, H.A. Choi, W. Christie, J.P. Coffin, T.M. Cormier, J.G. Cramer, H.J. Crawford, D. Das, S. Das, A.A. Derevschikov, L. Didenko, T. Dietel, W.J. Dong, X. Dong, J.E. Draper, F. Du, A.K. Dubey, V.B. Dunin, J.C. Dunlop, M.R. Dutta Mazumdar, V. Eckardt, L.G. Efimov, V. Emelianov, J. Engelage, G. Eppley, B. Erazmus, M. Estienne, P. Fachini, V. Faine, J. Faivre, R. Fatemi, K. Filimonov, P. Filip, E. Finch, Y. Fisyak, D. Flierl, K.J. Foley, J. Fu, C.A. Gagliardi, N. Gagunashvili, J. Gans, M.S. Ganti, L. Gaudichet, M. Germain, F. Geurts, V. Ghazikhanian, P. Ghosh, J.E. Gonzalez, O. Grachov, V. Grigoriev, S. Gronstal, D. Grosnick, M. Guedon, S.M. Guertin, A. Gupta, E. Gushin, T.D. Gutierrez, T.J. Hallman, D. Hardtke, J.W. Harris, M. Heinz, T.W. Henry, S. Hepplemann, T. Herston, B. Hippolyte, A. Hirsch, E. Hjort, G.W. Hoffmann, M. Horsley, H.Z. Huang, S.L. Huang, T.J. Humanic, G. Igo, A. Ishihara, P. Jacobs, W.W. Jacobs, M. Janik, H. Jiang, I. Johnson, P.G. Jones, E.G. Judd, S. Kabana, M. Kaneta, M. Kaplan, D. Keane, V.Yu. Khodyrev, J. Kiryluk, A. Kisiel, J. Klay, S.R. Klein, A. Klyachko, D.D. Koetke, T. Kollegger, M. Kopytine, L. Kotchenda, A.D. Kovalenko, M. Kramer, P. Kravtsov, V.I. Kravtsov, K. Krueger, C. Kuhn, A.I. Kulikov, A. Kumar, G.J. Kunde, C.L. Kunz, R.Kh. Kutuev, A.A. Kuznetsov, M.A.C. Lamont, J.M. Landgraf, S. Lange, C.P. Lansdel, B. Lasiuk, F. Laue, J. Lauret, A. Lebedev, R. Lednicky, M.J. LeVine, C. Li, Q. Li, S.J. Lindenbaum, M.A. Lisa, F. Liu, L. Liu, Z. Liu, Q.J. Liu, T. Ljubicic, W.J. Llope, H. Long, R.S. Longacre, M. Lopez-Noriega, W.A. Love, Y. Lu, T. Ludlam, D. Lynn, J. Ma, Y.G. Ma, D. Magestro, S. Mahajan, L.K. Mangotra, D.P. Mahapatra, R. Majka, R. Manweiler, S. Margetis, C. Markert, L. Martin, J. Marx, H.S. Matis, Yu.A. Matulenko, T.S. McShane, F. Meissner, Yu. Melnick, A. Meschanin, M. Messer, M.L. Miller, Z. Milosevich, N.G. Minaev, C. Mironov, D. Mishra, J. Mitchell, B. Mohanty, L. Molnar, C.F. Moore, M.J. Mora-Corral, **D.A. Morozov**, V. Morozov, M.M. de Moura, M.G. Munhoz, B.K. Nandi, S.K. Nayak, T.K. Nayak, J.M. Nelson, P. Nevski, V.A. Nikitin, L.V. Nogach, B. Norman, S.B. Nurushev, G. Odyniec, A. Ogawa, V. Okorokov, M. Oldenburg, D. Olson, G. Paic, S.U.

- Pandey, S.K. Pal, Y. Panebratsev, S.Y. Panitkin, A.I. Pavlinov, T. Pawlak, V. Perevoztchikov, C. Perkins, W. Peryt, V.A. Petrov, S.C. Phatak, R. Picha, M. Planinic, J. Pluta, N. Porile, J. Porter, A.M. Poskanzer, M. Potekhin, E. Potrebenikova, B.V.K.S. Potukuchi, D. Prindle, C. Pruneau, J. Putschke, G. Rai, G. Rakness, R. Raniwala, S. Raniwala, O. Ravel, R.L. Ray, S.V. Razin, D. Reichhold, J.G. Reid, G. Renault, F. Retiere, A. Ridiger, H.G. Ritter, J.B. Roberts, O.V. Rogachevskiy, J.L. Romero, A. Rose, C. Roy, L.J. Ruan, R. Sahoo, I. Sakrejda, S. Salur, J. Sandweiss, I. Savin, J. Schambach, R.P. Scharenberg, N. Schmitz, L.S. Schroeder, K. Schweda, J. Seger, D. Seliverstov, P. Seyboth, E. Shahaliev, M. Shao, M. Sharma, K.E. Shestermanov, S.S. Shimanskiy, R.N. Singaraju, F. Simon, G. Skoro, N. Smirnov, R. Snellings, G. Sood, P. Sorensen, J. Sowinski, H.M. Spinka, B. Srivastava, S. Stanislaus, R. Stock, A. Stolpovsky, M. Strikhanov, B. Stringfellow, C. Struck, A.A.P. Suaide, E. Sugarbaker, C. Suire, M. Sumbera, B. Surrow, T.J.M. Symons, A. Szanto de Toledo, P. Szarwas, A. Tai, J. Takahashi, A.H. Tang, D. Thein, J.H. Thomas, V. Tikhomirov, M. Tokarev, M.B. Tonjes, T.A. Trainor, S. Trentalange, R.E. Tribble, M.D. Trivedi, V. Trofimov, O. Tsai, T. Ullrich, D.G. Underwood, G. Van Buren, A.M. Vander Molen, A.N. Vasiliev, M. Vasiliev, S.E. Vigdor, Y.P. Viyogi, S.A. Voloshin, W.T. Waggoner, F. Wang, G. Wang, X.L. Wang, Z.M. Wang, H. Ward, J.W. Watson, R. Wells, G.D. Westfall, C. Whitten Jr., H. Wieman, R. Willson, S.W. Wissink, R. Witt, J. Wood, J. Wu, N. Xu, Z. Xu, Z.Z. Xu, E. Yamamoto, P. Yepes, V.I. Yurevich, Y.V. Zanevski, I. Zborovsky, H. Zhang, W.M. Zhang, Z.P. Zhang, P.A. Zolnierczuk, R. Zoukarneev, J. Zoukarneeva, and A.N. Zubarev (STAR Collaboration): **Cross Sections and Transverse Single-Spin Asymmetries in Forward Neutral-Pion Production from Proton Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV**. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 171801 (2004).
- [2] F. Bieser, L.C. Bland, R.L. Brown, H.J. Crawford, A.A. Derevshchikov, J.L. Drachenberg, J. Engelage, L. Eun, C.A. Gagliardi, S. Heppelmann, E.G. Judd, V.I. Kravtsov, Yu.A. Matulenko, A.P. Meschanin, **D.A. Morozov**, L.V. Nogach, S.B. Nurushev, A. Ogawa, C. Perkins, G. Rakness, K.E. Shestermanov, A.N. Vasiliev: **Future of low-x forward physics at RHIC**. *Eur. Phys. J. C* **43**, 427 (2005).
- [3] Yu.V. Kharlov, **D.A. Morozov**, S.B. Nurushev, A.N. Vasiliev: **Single-spin asymmetry of inclusive γ -production in $p_{\uparrow}p$ interactions at 200 GeV/c**. *AΦ* **67**, 1344 (2004).
- [4] **D.A. Morozov** (for the STAR Collaboration): **Spin Effects in Forward π^0 -Production in Polarized Proton-Proton Collisions at STAR**. Proceedings of the XXXXth Rencontres de Moriond – "QCD and Hadronic Interactions", La Thiule, Italy, March 12-19, 2005, The Gioi Publishers (2005), page 251.

- [5] L.C. Bland, Y.A. Matulenko, V.V. Mochalov, **D.A. Morozov**, L.V. Nogach, A. Ogawa, G. Rakness, K.E. Shestermanov, A.N. Vasiliev: **Electromagnetic shower profile in lead-glass calorimeter in the energy range of 3 – 23 GeV**. IHEP Preprint 2005-46, 2005 (Protvino).
- [6] **D.A. Morozov** (for the STAR Collaboration): **Spin effects in large rapidity π^0 production at STAR**. To be published in proceedings of the XI Workshop on High Energy Spin Physics, Dubna, Russia, September 27 - October 1, 2005; e-Print Archive (hep-ex/0512013).

Рукопись поступила 13 июня 2006 года.

Д.А. Морозов.

Измерение односпиновой асимметрии инклюзивного образования π^0 -мезонов в $p\uparrow p$ -взаимодействиях при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ .

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Редактор Н.В. Ежела.

Подписано к печати 16.06.2006. Формат $60 \times 84/8$.
Офсетная печать. Печ.л. 1,75. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 100. Заказ 68.
Индекс 3649. ЛР т020498 17.04.97.

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

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2006–8, И Ф В Э, 2006
