



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи

2010–9

Мочалов Василий Вадимович

**Исследование односпиновой асимметрии
инклюзивного образования π^0 -мезонов
на ускорителе ИФВЭ**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Протвино 2010

УДК 539.1.07

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Б.А. Арбузов (НИИЯФ МГУ), доктор физико-математических наук В.Н. Болотов (ИЯИ РАН), доктор физико-математических наук А.Г. Литвиненко (ОИЯИ).

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

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2010 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета К 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 034.02.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2010

Общая характеристика работы

Актуальность работы

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. Чтобы действительно понять структуру нуклонов необходимо также понять их спиновую структуру, а именно, как составляющие кварки и глюоны образуют полный спин нуклона.

Основной вклад в изучение спиновой структуры протона дают эксперименты по неупругому рассеянию лептонов на нуклонах. Эксперименты с участием адронов также несут информацию о спиновой структуре нуклонов, особенно в экспериментах, когда оба нуклона поляризованы. Интерес к исследованию спиновых явлений в адрон-адронных взаимодействиях связан не только с возможностью изучения структуры адронов, но и с возможностью исследования динамики взаимодействия структурных составляющих адронов – кварков и глюонов, имеющих ненулевой спин.

Можно процитировать высказывание Дж. Бьеркена о роли спиновых явлений: “Polarization data has often been the graveyard of

fashionable theories. If theorists had their way, they might just ban such measurements altogether out of self-protection.”¹

Среди спиновых измерений односпиновые асимметрии при высоких энергиях с участием нуклонов являются наиболее загадочными и интересными. Ненулевая односпиновая асимметрия указывает на несимметричное распределение образования продуктов распада относительно начального направления спина исследуемой частицы пучка или мишени.

Долгое время считалось, что в сильном взаимодействии учет спина частиц является несущественным усложнением в теории, а спиновые эффекты в адронных взаимодействиях не превышают нескольких процентов. Однако первые же экспериментальные измерения обнаружили большие величины односпиновой асимметрии и поляризации гиперонов. В настоящее время активно развиваются теоретические модели, в которых пытаются объяснить результаты адронных поляризационных исследований. До сих пор, однако, нет теоретической модели сильного взаимодействия, которая могла бы полностью объяснить все имеющиеся поляризационные результаты, поэтому любые новые экспериментальные данные способствуют дальнейшему развитию теоретических моделей.

Экспериментальные исследования с поляризованными частицами ведутся в большинстве центров по физике высоких энергий. Измерения проводятся в различных кинематических областях и дополняют друг друга. Первой экспериментальной задачей эксперимента LHCb на Большом Адронном Коллайдере (БАК) будет исследование поляризации Λ -гиперонов.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является измерение односпиновой асимметрии A_N инклюзивного рождения π^0 -мезонов в различных кинематических областях. Исследования проводились при энергиях 40-70 ГэВ на установке ПРОЗА [1].

¹J.D. Bjorken, talk at NATO Advanced Research Workshop on QCD Hard Hadronic Processes St. Croix, 1987.

Научная новизна и практическая ценность работы

При выполнении диссертационной работы были получены следующие новые результаты:

- Измерения инклюзивного рождения мезонов с использованием дейтериевой мишени являются единственными в мире.
- Измерения асимметрии нейтральных мезонов на пучке π^- -мезонов являются единственными.
- Впервые измерена асимметрия инклюзивного рождения η -мезонов.
- Основной особенностью проведенных исследований является то, что впервые на одной установке проведены измерения в широком диапазоне кинематических переменных для разных сортов взаимодействующих частиц (протонный и пионный пучок, протонная и дейтериевая мишень), что позволяет исследовать зависимость эффектов от сорта частиц и кинематических параметров. В диссертацию вошли результаты, полученные на поляризованной мишени в следующих кинематических областях:
 - в области фрагментации неполяризованного пучка [2,3]; обнаружена ненулевая асимметрия инклюзивного рождения частиц в области фрагментации неполяризованной частицы.
 - в центральной области, то есть под углом 90° в системе центра масс [4]-[7]; впервые проведено сравнение асимметрии в π^-p_\uparrow и pp_\uparrow -взаимодействиях в одинаковых кинематических областях.
 - в области фрагментации поляризованной мишени [8]-[12]; исследования в области фрагментации поляризованной мишени проведены впервые в мире.
- По результатам исследований рассмотрены общие особенности возникновения односпиновой асимметрии в экспериментах с фиксированной мишенью [13] и один из возможных механизмов возникновения асимметрии в рамках модели конститuentных кварков [14].

Следующие результаты, полученные при проведении исследований, имеют практическую ценность:

- Развита методика вывода пучка из вакуумной камеры ускорителя с помощью изогнутого кристалла кремния. Для проведения исследований, входящих в состав диссертации, были проведены работы по получению стабильного пучка и измерению его характеристик [15,16].
- Разработан метод вычисления односпиновой асимметрии π^0 -мезонов одно-плечевым спектрометром [8].
- Разработана методика восстановления γ -квантов под большими углами [17,18].

Полученные результаты указывают на важность проведения дальнейших исследований в области энергий ускорителя ИФВЭ.

Защищаемые положения

Следующие результаты выносятся на защиту:

- Односпиновая асимметрия в области фрагментации пучка в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в области $0.7 < x_F < 1.0$ и $1.0 < p_T < 1.8$ ГэВ/с равна $[13.6 \pm 2.6$ (стат.) ± 2.0 (сист.)]%.
- Односпиновая асимметрия в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в центральной области (под углом 90° в системе центра масс) при энергии частиц пучка 70 ГэВ равна нулю во всем диапазоне измерений.
- Односпиновая асимметрии в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в центральной области при импульсе частиц пучка 40 ГэВ/с достигает значения 40% и совпадает с асимметрией в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в той же области.
- Односпиновая асимметрия $A_N = (62 \pm 22)\%$ в реакции $\pi^- + p_{\uparrow}(d_{\uparrow}) \rightarrow \eta + X$ в центральной области при энергии пучка 40 ГэВ/с и $p_T > 2.2$ ГэВ/с.
- Односпиновая асимметрия в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации поляризованной мишени равна $(6.9 \pm 2.9)\%$ при 40 ГэВ/с и $x_F < -0.3$.

- Односпиновая асимметрия $A_N = (6.2 \pm 1.5)\%$ в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации поляризованной мишени при энергии пучка 50 и 70 ГэВ.
- Получено указание на общие особенности возникновения односпиновой асимметрии в экспериментах на фиксированной мишени.

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

- Асимметрия не зависит от типа поляризованной (протонная или дейтериевая) мишени.
- Асимметрия зависит от сорта падающих частиц, при этом для симметричной реакции (pp) асимметрия вне области фрагментации поляризованной частицы совпадает с нулем, тогда как для несимметричной (πp) системы асимметрия отличается от нуля во всех областях проведенных измерений.
- Величина асимметрии слабо зависит от энергии в широком диапазоне измерений (вплоть до $\sqrt{s} = 200$ ГэВ). Таким образом, измерения при промежуточных энергиях очень важны и позволяют с хорошей точностью проводить исследования для различного сорта частиц.

Основные публикации и апробация работы

Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в работах [1]-[22], в журналах “Ядерная Физика”, “Приборы и техника эксперимента”, “Физика элементарных частиц и атомного ядра”, Physics Letters B, Physical Review, Czech. Journal of Physics, трудах международных конференций, препринтах ГНЦ ИФВЭ.

Результаты докладывались на международных конференциях и совещаниях по спиновым явлениям, сессии отделения физики РАН, Рочестерской конференции по физике высоких энергий.

Цикл работ, входящих в данную диссертацию, удостоен премии РАН и издательского дома “МАИК/Интерпериодика” за лучшую публикацию в издаваемых журналах.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложений. Объем диссертации — 230 страниц, в том числе 132 рисунка и 33 таблицы; библиография включает 226 наименований.

В **Главе 1** дается определение односпиновой асимметрии, содержится краткий обзор экспериментальных исследований и обзор теоретических моделей.

В **Главе 2** приводится описание основных элементов экспериментальной установки и методов измерения.

В **Главе 3** представлены результаты измерений односпиновой асимметрии в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации пионного пучка.

В **Главе 4** представлены результаты измерений односпиновой асимметрии в центральной области в реакциях $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ и $\pi^- + p_{\uparrow}(d_{\uparrow}) \rightarrow \eta + X$ при импульсе частиц пучка 40 ГэВ/с и в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при энергии пучка 70 ГэВ.

В **Главе 5** проводится исследование асимметрии π^0 -мезонов в области фрагментации поляризованной протонной мишени на пучках π^- -мезонов при 40 ГэВ и протонов при энергиях 50 и 70 ГэВ.

В **Главе 6** изучаются общие закономерности результатов поляризационных экспериментов на фиксированной мишени в диапазоне от 13 до 200 ГэВ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

В приложениях приведены методы получения пучка, необходимые для проведения исследований, необходимые экспериментальные методы, не являющиеся новыми, важная для проведения экспериментальных исследований информация, которая не связана прямо с измерением асимметрии, а также результаты (таблицы) других экспериментов, для которых проводился анализ общих особенностей асимметрии инклюзивного рождения.

Основное содержание работы

В эксперименте измерялась односпиновая асимметрия A_N , определяемая как

$$A_N(x_F, p_T) = \frac{1}{P_{target}} \frac{1}{\langle \cos\phi \rangle} \cdot \frac{\sigma_{\uparrow}^H(x_F, p_T) - \sigma_{\downarrow}^H(x_F, p_T)}{\sigma_{\uparrow}^H(x_F, p_T) + \sigma_{\downarrow}^H(x_F, p_T)}, \quad (1)$$

где P_{target} – поляризация мишени, ϕ – азимутальный угол между нормалью к плоскости, задаваемой осью пучка и направлением вылета π^0 -мезона, и вектором поляризации мишени, σ_{\uparrow}^H и σ_{\downarrow}^H – сечения образования π^0 -мезонов на водороде при противоположных направлениях вектора поляризации мишени.

Измерения проводились на 14-м канале ускорительного комплекса У70. При проведении исследований использовались три различные модификации экспериментальной установки ПРОЗА, которые использовали одинаковые принципы регистрации частиц и аналогичные детекторы. На **рис. 1** показана схема экспериментальной установки в сеансе 1996 года.

В физических измерениях использовались пучок отрицательных адронов с импульсом 40 ГэВ/с, пучок электронов для калибровки детектора с энергией от 5 до 27 ГэВ и пучок протонов с энергией 50 или 70 ГэВ. Изогнутый монокристалл использовался для вывода протонного пучка непосредственно из вакуумной камеры ускорителя.

Пучок отрицательных частиц состоял из π^- , K^- -мезонов и \bar{p} в пропорции 97.9 : 1.8 : 0.3%. Размер пучка на мишени

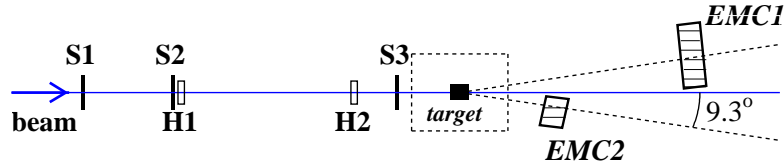


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ПРОЗА в 1996 году. S1-S3 – сцинтилляционные счетчики полного потока; H1-H2 – годоскопы; EMC1 и EMC2 – электромагнитные калориметры; *target* – поляризованная мишень.

$\sigma_x \simeq \sigma_y \simeq 3.5$ мм. Угловая расходимость пучка ± 2.5 мрад по горизонтали и вертикали.

В 1989 г. в целях расширения диапазона исследованных энергий до максимально возможного на ускорителе ИФВЭ энергии 70 ГэВ была впервые в мире реализована схема вывода первичных протонов из вакуумной камеры У-70 (ускорителя с жесткой фокусировкой) на действующую установку с помощью изогнутого монокристалла.

Интенсивность пучка протонов в сеансе 1996 года находилась в диапазоне $(3 \div 6) \cdot 10^6$ протонов/сброс. Размер пучка $\sigma_x = 4$ мм по горизонтали, и $\sigma_y = 3$ мм по вертикали. Угловые расходимости пучка соответственно 2 мрад и 1 мрад. Получение стабильного протонного пучка было одной из задач, которую необходимо было решить для проведения измерений. На **рис. 2** приведено распределение среднего значения центра тяжести пучка за сброс за время измерений в сеансе 2005 г. Стабильность положения пучка на мишени составляет доли мм. Размер протонного пучка на мишени составил $\sigma_x = 2.7$ мм по горизонтали, и $\sigma_y = 3.7$ мм по вертикали. Угловые расходимости пучка 2 мрад и 1 мрад соответственно. Для определения импульсного разрешения пучка были проведены специальные измерения [16]. На **рис. 3** приведен импульсный спектр пучка протонов, ширина

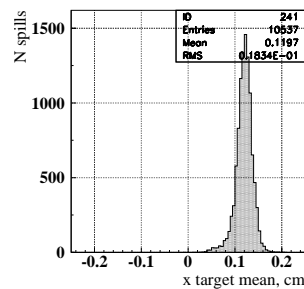


Рис. 2. Средняя величина центра тяжести протонного пучка за сброс ускорителя на мишени.

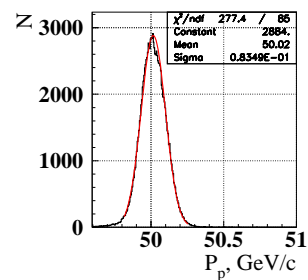


Рис. 3. Импульсный спектр протонного пучка.

которого $\Delta(p)/p = 0.17\%$. Дрейфовые камеры с координатным разрешением 135 микрон определяют разрешение трековой системы по импульсу с точностью 0.10%. Таким образом, собственно импульсный разброс пучка составляет 0.13%.

Для оценки фона использовались те же данные, что и при анализе импульсного разброса пучка. Даже считая, что в интервале энергий 48 – 49 ГэВ нет вклада от многократного рассеяния протонов на веществе камер, а все определяется фоновыми частицами, отношение фоновых событий к общему числу частиц в диапазоне импульсов 49.8 – 50.2 ГэВ не превышает 0.026%.

Пучковая аппаратура эксперимента состояла из триггерных счетчиков S1-S3 для мониторинга потока частиц; пучковых годоскопов H1-H2 для определения координат падающих на мишень заряженных частиц и пороговых черенковских счетчиков $\check{C}1 - \check{C}3$ для идентификации частиц пучка.

В установке ПРОЗА использовалась поляризованная мишень замороженного типа с пропандиолом ($C_3H_8O_2$) в качестве рабочего вещества, заключенном в тefлоновую ампулу диаметром 20 мм и длиной 200 мм. Поляризация мишени составляла 80%. Также использовалась “дейтериевая” ($C_3D_8O_2$) мишень со средним значением векторной поляризации 35%. Набор статистики при одном знаке поляризации мишени продолжался в среднем около двух суток. Реверс поляризации мишени одновременно с ее накачкой занимал около четырех часов.

В качестве детекторов γ -квантов использовались счетчики из свинцового стекла. В физических сеансах использовалось от 144 до 720 счетчиков. Конструкция калориметра позволяла перемещать светоизолированный корпус в горизонтальном и вертикальном направлениях поперек пучка для калибровки на электронном пучке. Энергетическое разрешение калориметра составляло $\sigma(E)/E = 2.5\%$ при энергии электронов 27 ГэВ.

Контроль за энергетической шкалой осуществлялся:

- мониторингом каждого счетчика электромагнитного детектора при помощи светодиода;
- мониторингом светодиода;

- дополнительной калибровкой на массу π^0 -мезона. с точностью 0.1% за 5 часов измерений.

Для регистрации энерговыделения в калориметре до 1995 г. использовались 10-битные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), позднее 12-битные АЦП. Триггером нулевого уровня (60 нс) на частицу пучка являлось совпадение сигналов с трех сцинтилляционных счетчиков S1-S3 и срабатывание в каждой из плоскостей годоскопов. Был разработан триггер первого уровня (350 нс) на суммарное энерговыделение в калориметре.

Основными особенностями системы сбора данных были параллельное считывание информации во всех каркасах с регистрирующей электроникой; введение разравнивающих запоминающих устройств в каркасах на несколько событий; предварительная обработка информации до записи в запоминающее устройство (вычитание пьедесталов для АЦП); использование специального канала для передачи информации из модулей запоминающих устройств в ЭВМ со считыванием информации.

При обработке "в линию" проводилась проверка качества работы регистрирующей электроники, осуществлялся контроль за стабильностью энергетической шкалы и поведением пучка.

В **Главе 3** представлены результаты измерений односпиновой асимметрии в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в области фрагментации неполяризованного пучка при импульсе 39.1 ГэВ/с. При восстановлении электромагнитных ливней в детекторе использовались следующие критерии:

- энерговыделение в центральном счетчике кластера должно превышать 100 МэВ;
- суммарная энергия одного ливня должна быть больше 1 ГэВ;
- форма ливня должна удовлетворять χ^2 -критерию описания ее среднестатистической формой электромагнитного ливня.

Для нахождения азимутальной асимметрии π^0 -мезонов отбирались комбинации пар γ -квантов в интервале эффективных масс 90–170 МэВ/ c^2 . Основным фоном при реконструкции π^0 -мезонов

являлись ливни от заряженных и нейтральных адронов, а также комбинаторный фон γ -квантов от разных π^0 -мезонов. Для подавления фона от заряженных адронов использовалась информация от пропорциональных камер. В результате фон под массовым спектром π^0 -мезона уменьшился в 2.6 раза. Для уменьшения фона от нейтральных адронов проводился анализ формы поперечного развития ливня, что позволило уменьшить количество фоновых событий еще на 30%. Одновременное применение двух процедур позволило улучшить отношение сигнал/фон в 3.2 ± 0.2 раза. При этом величина сигнала над фоном уменьшилась на $(12 \pm 1)\%$. На **рис. 4** приведены массовые спектры до и после процедур подавления фона.

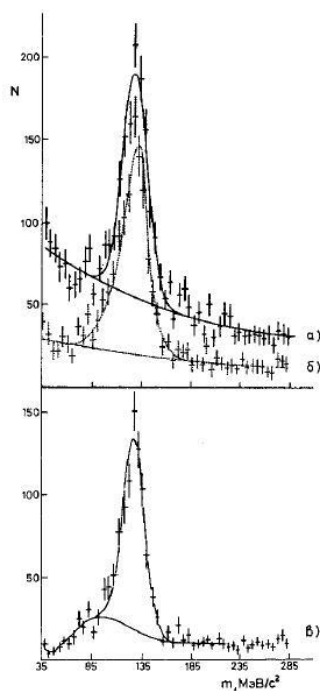


Рис. 4. Спектр масс двух гамма-квантов: а) начальный; б) после удаления заряженных треков; в) после удаления нейтральных адронов.

Электромагнитный калориметр перекрывал полный азимутальный угол $\phi = \pi$. Измеренное значение предварительной величины асимметрии $A_N^{\text{meas}}(\phi)$ получалось для нескольких значений угла ϕ согласно (1). В общем случае зависимость $A_N^{\text{meas}}(\phi)$ для установки, регистрирующей вторичные частицы во всем диапазоне азимутальных углов ϕ , фитировалась функцией

$$A_N^{\text{meas}}(\phi) = A_0 + A_N \cdot \cos(\phi), \quad (2)$$

где A_N – искомая асимметрия, а параметр A_0 – ложная асимметрия установки, связанная с геометрической несимметричностью установки и нестабильностью во времени параметров детекторов и положения пучка частиц на мишени. В нашем случае оказалось, что ложная асимметрия установки мала, поэтому параметром A_0 можно пренебречь (ложная асимметрия в интервале $0.7 < x_F < 1.0$ и $p_T > 1.2$ ГэВ/с равна $0.22 \pm 0.67\%$). Систематическая ошибка (с учетом поляризации мишени и фактора разбавления) не превышала 2%.

Для получения окончательного значения асимметрии в соответствии с формулой (1) необходимо было определить фактор разбавления мишени, для чего были проведены специальные измерения с использованием углеродной и “пустой“ мишени. Для дейтериевой мишени фактор разбавления находился в диапазоне от 2.5 до 5 и убывал с ростом x_F .

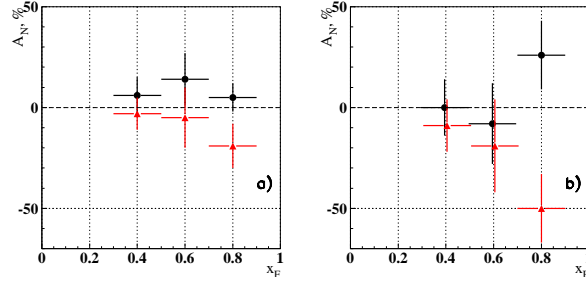


Рис. 5. Асимметрия в реакциях $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ (черные точки) и $K^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ (красные треугольники) в зависимости от x_F для двух интервалов поперечных импульсов: $p_T^2 < 0.4$ (ГэВ/с)² (а) и $0.4 < p_T^2 < 1.2$ (ГэВ/с)² (б).

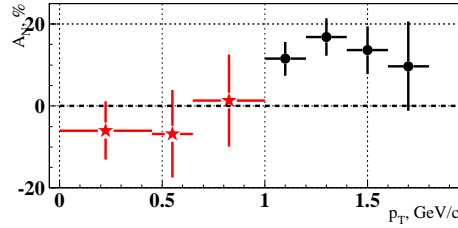


Рис. 6. Зависимость односпиновой асимметрии от поперечного импульса при $p_T > 1.0$ ГэВ/с в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ (черные точки) в области $0.7 < x_F < 1.0$. Звездочками показаны суммарные результаты измерений асимметрии при малых поперечных импульсах на протонной и дейтериевой мишенях.

На первом этапе были проведены измерения в области малых поперечных импульсов в области $0.3 < x_F < 0.9$ и $p_T^2 < 1.2$ (ГэВ/с)² (см. **рис. 5**). На втором этапе A_N была измерена в области $0.6 < x_F < 1.0$ и $1.0 < p_T < 1.8$ ГэВ/с. Зависимость асимметрии от поперечного импульса p_T приведена на **рис. 6**. $A_N = (13.6 \pm 2.6)\%$ в области $x_F > 0.7$ и $p_T > 1.0$ ГэВ/с.

Обнаружение ненулевой асимметрии достаточно неожиданно, так как логично предположить, что асимметрия в области фрагментации неполяризованной частицы близка к нулю. Подобное поведение асимметрии подтверждается результатами сотрудничества СТАР в области фрагментации неполяризованной частицы при значениях переменной Фейнмана $-0.6 < x_F < -0.2$ на коллайдере RHIC.

С другой стороны, в данном эксперименте измерения проводятся на границе фазового объема, т.е. при условиях, аналогичных эксклюзивным реакциям, где были обнаружены значительные эффекты. Величина измеренной асимметрии совместима с результатами измерения асимметрии в области фрагментации поляризованного пучка при тех же значениях переменных x_F и p_T .

В **Главе 4** представлены результаты измерений односпиновой асимметрии в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0(\eta) + X$ в центральной области при 40 ГэВ. Для вычисления асимметрии использовались только события с двумя восстановленными γ -квантами. Следующие критерии использовались для отбора “хороших” событий:

- энергия пары γ -квантов находилась в интервале 5 – 15 ГэВ;
- эффективная масса пары γ -квантов находилась в диапазоне $70 \div 220$ МэВ/ c^2 для π^0 -мезона и в диапазоне $480 \div 660$ МэВ/ c^2 для η -мезона. Массовый спектр пары γ -квантов показан на **рис. 7**. Фон под массовым пиком π^0 -мезона зависел от поперечного импульса p_T и возрастал от 10% при $p_T = 1.8$ ГэВ/ c до 20% при $p_T = 3.0$ ГэВ/ c . Фон под массовым пиком η -мезона был $\approx 50\%$;
- пары γ -квантов отбирались по углу разлета (по асимметрии энергии $A_E = |E_1 - E_2| / (E_1 + E_2)$, E_1, E_2 – энергии γ -квантов) так что, $A_E < 0.8$ для π^0 -мезона и $A_E < 0.6$ для η -мезона.

Для получения окончательного значения асимметрии согласно формуле (1) был определен фактор разбавления мишени в специальных измерениях на углеродной и на “пустой” мишени (см. **рис.7**).

Результаты измерений асимметрии A_N в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ приведены в **табл. 1** и на **рис. 8**. При $p_T > 2.2$ ГэВ/ c асимметрия велика и достигает 40%.

Асимметрия в реакции $\pi^- + p_{\uparrow}(d_{\uparrow}) \rightarrow \eta + X$ при $p_T > 2.2$ ГэВ/ c достигает 60% (см. **табл. 1** и **рис. 9**) и не зависит от типа мишени.

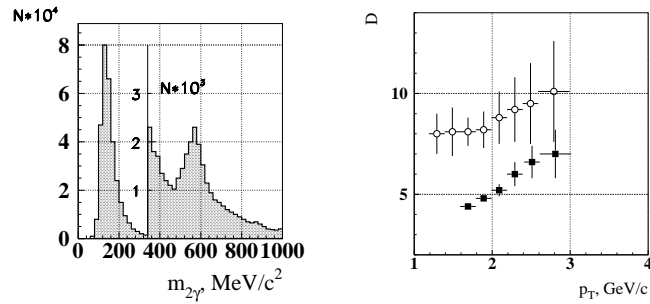


Рис. 7. Эффективные спектры масс пары γ -квантов в области масс π^0 - и η -мезона (слева). Справа зависимость фактора разбавления D водородной (пустые кружки) и дейтериевой (заполненные квадраты) мишеней в зависимости от поперечного импульса p_T .

Таблица 1. Асимметрия A_N при энергии 40 ГэВ и $x_F \approx 0$

p_T , ГэВ/с	$A_{d\uparrow}^{\pi^0}$, %	$A_{N\uparrow}^{\eta}$, %	A_N^{raw} (фон), %
1.6 – 1.8	-3 ± 4	-9 ± 8	-0.5 ± 0.6
1.8 – 2.0	14 ± 6	5 ± 10	-0.6 ± 0.7
2.0 – 2.2	13 ± 9		0.8 ± 1.0
2.2 – 2.4	24 ± 15		-0.1 ± 1.0
2.4 – 2.6	47 ± 27	62 ± 22	
2.6 – 3.2	100 ± 31		0.65 ± 1.4

Ложная асимметрия при всех значениях поперечного импульса была сравнима с нулем. Так, $A_N^{false} = (0.04 \pm 0.4)\%$ при $p_T > 1.8$ ГэВ/с и $220 < m_{2\gamma} < 460$ (МэВ/с²) (См. рис 10).

Поведение асимметрии π^0 -мезонов в изучаемой реакции и в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ совпадает. Так, асимметрия при $p_T > 2.2$ ГэВ/с равна $(40 \pm 12)\%$ для реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ и $(39 \pm 9)\%$ для реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$. Суммарное взвешенное значение асимметрии A_N для двух реакций при $p_T > 2.2$ ГэВ/с равно $(39 \pm 7)\%$.

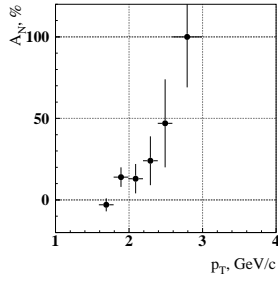


Рис. 8. Зависимость асимметрии A_N в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ от поперечного импульса p_T при $x_F \approx 0$.

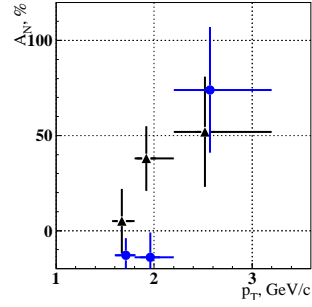


Рис. 9. Зависимость асимметрии A_N в реакциях $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \eta + X$ (черные треугольники) и $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \eta + X$ (синие кружки).

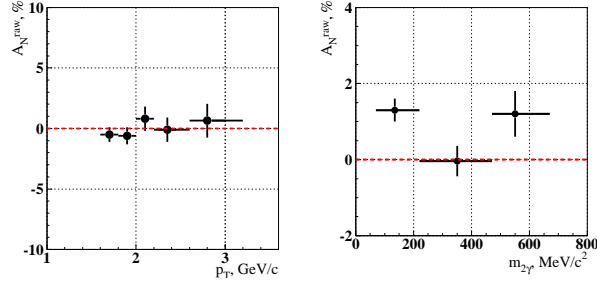


Рис. 10. Слева: асимметрия пар γ -квантов в диапазоне масс $220 < m_{2\gamma} < 460$ (МэВ/с²). Справа: асимметрия пар γ -квантов в зависимости от их массы при $1.8 < p_T < 3.2$ (ГэВ/с) в области масс π^0 и η -мезонов и между ними.

Было сделано несколько попыток объяснить возникновение асимметрии в данной области. Предсказания моделей Трошина-Тюрина и Рыскина хорошо описывают данные. В моделях Коллинза и Сиверса ожидаются малые величины асимметрии. Асимметрия в модели высших твистов убывает с ростом поперечного импульса.

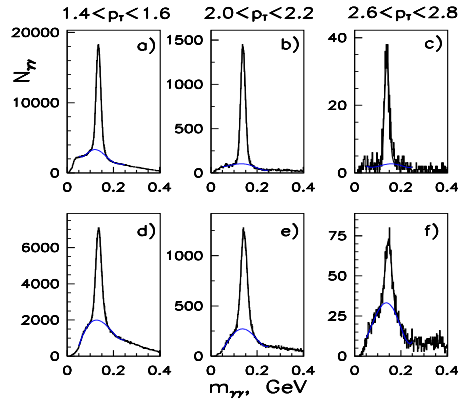


Рис. 11. Массовые спектры для EMC1 ($a - c$) и EMC2 ($d - f$) для разных интервалов поперечных импульсов p_T .

В этой же главе представлены результаты измерения асимметрии в реакции $p+p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0+X$ в центральной области при энергии 70 ГэВ. Чтобы восстановить π^0 -мезоны при энергиях больше 10 ГэВ был использован специальный алгоритм восстановления ливней, основанный на выделении электромагнитного ливня по известной форме. Данный алгоритм позволял разделять перекрывающиеся ливни даже в том случае, если расстояние между ними не превышало один счетчик (см. **рис. 11**).

На **рис. 12** показана асимметрия, просуммированная для двух калориметров. Во всем диапазоне измерений асимметрия совпадает с нулем. Асимметрия инклюзивного рождения π^0 -мезонов в pp взаимодействии в центральной области ранее измерялась в двух экспериментах (при 24 и 200 ГэВ – см. на том же рисунке). Таким образом, если существует зависимость величины асимметрии от энергии, то измерения с целью поиска ненулевой асимметрии следует проводить при энергиях между 24 и 70 ГэВ.

С другой стороны, при 40 ГэВ в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ в той же области асимметрия велика, что указывает на зависимость асимметрии от сорта взаимодействующих частиц. Мы должны предположить значительный вклад взаимодействия валентных кварков в рождение π^0 -мезонов. Если рассматривать вклад в асимметрию взаимодействия валентных кварков, то в pp_{\uparrow} -взаимодействии из-за

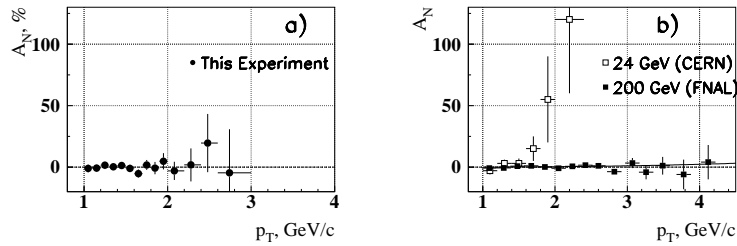


Рис. 12. а) Зависимость суммарной асимметрии A_N от поперечного импульса. б) Асимметрия при 24 ГэВ (ЦЕРН) и 200 ГэВ (Е704) в центральной области; кривая показывает расчеты Ансельмино для 200 ГэВ и $x_F = 0$.

противоположных по знаку значений поляризации u - и d -кварков в протоне и перемешивания каналов из поляризованного и неполяризованного протона происходит сокращение асимметрии. В случае $\pi^- p_\uparrow$ взаимодействия большая асимметрия может возникнуть при образовании π^0 -мезона из валентных \bar{u} -кварка от падающего π^- -мезона и u -кварка из поляризованного протона, тогда как вклад валентного d -кварка из протона в данном случае существенно подавлен.

Глава 5 посвящена измерениям в области фрагментации поляризованной мишени. Калориметр находился на расстоянии ~ 2.3 м от мишени под углом 40° в лаб. системе. При анализе отбирались γ -кванты с энергией от 0.5 до 3.5 ГэВ. Регистрация гамма-квантов в этой области была затруднена двумя факторами – низкая энергия частиц и большой угол падения частиц на детектор. Были проведены специальные исследования, позволившие правильно восстановить параметры гамма-квантов.

На **рис.13** показан массовый спектр пары гамма-квантов, ширина которого σ_m составляет $17 \text{ МэВ}/c^2$. На этом же рисунке показана

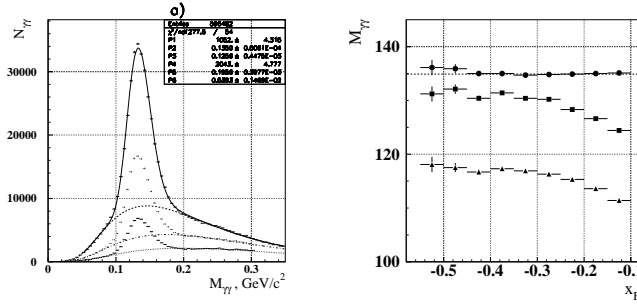


Рис. 13. Слева распределения 2γ -событий в зависимости от их массы $M_{\gamma\gamma}$ при трех значениях x_F : - 0.225, - 0.275 и - 0.325. Справа зависимость массы π^0 -мезона от x_F . Крестиками (верхний набор данных) показан результат восстановления массы π^0 -мезонов после введения всех необходимых функций коррекции, квадратами (средний набор) – без учета угловой зависимости (учтены потери энергии), треугольниками – данные без введения поправок.

зависимость массы от переменной Фейнмана. Поправки к энергии ливня, полученные при моделировании, и уточнение координаты частиц позволили правильно восстановить энергию и массу π^0 -мезона.

При измерении A_N может возникнуть дополнительная аппаратная асимметрия, связанная с дрейфом электроники триггера, просчетами мониторных счетчиков либо другими причинами. Измеренная асимметрия является суммой реальной асимметрии A_N и аппаратной асимметрии. Для того, чтобы избавиться от этого систематического сдвига асимметрии, был разработан метод, основанный на допущении, что асимметрия фона равна нулю. Для проверки сходимости метода были проведены специальные исследования – асимметрия фитировалась различными функциями и в разных интервалах. Результаты одного из исследований приведены в **таблице 2**. Даже при двукратной ошибке в определении мониторных счетов при одном знаке поляризации мишени, вычисленное значение асимметрии мало искажается.

Таблица 2. Зависимость асимметрии от способа фитирования.

Метод фитирования	$A_N^{raw}, \%$
Стандартный метод, фитирование в диапазоне масс 75-400 МэВ/ c^2 , ширина бина фитирования 5 МэВ/ c^2	$-(0.83 \pm 0.28)$
Ширина бина фитирования 10 МэВ/ c^2	$-(0.81 \pm 0.35)$
Ширина бина фитирования 15 МэВ/ c^2	$-(0.76 \pm 0.43)$
Сдвиг асимметрии -10% (монитор 2 умножен на 1.2)	$-(0.83 \pm 0.29)$
Сдвиг асимметрии -35% (монитор 2 умножен на 2.0)	$-(0.75 \pm 0.30)$
Сдвиг асимметрии 35% (монитор 2 умножен на 0.5)	$-(0.73 \pm 0.29)$

Результаты измерения асимметрии в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ представлены на **рис. 14**. Асимметрия в области $-0.8 < x_F < -0.4$ составляет $(13.8 \pm 3.8)\%$, при этом $A_N = 6.9 \pm 2.9\%$ в области $-0.6 < x_F < -0.3$. Ошибки определения фактора разбавления D и поляризации мишени, которые составляют около 10%, не учитывались. При $-0.4 < x_F < -0.1$ асимметрия сравнима с нулем.

В этой же главе диссертации представлены результаты измерения A_N в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при энергиях пучка 50 и 70 ГэВ.

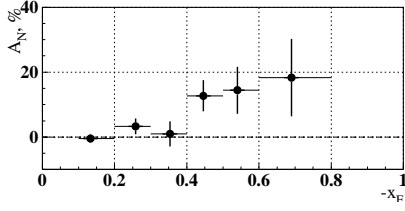


Рис. 14. Асимметрия A_N в реакции $\pi^- p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 X$ при 40 ГэВ.

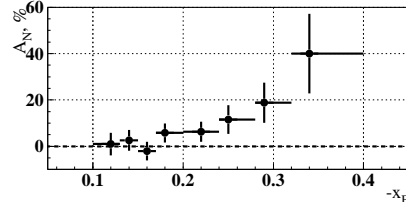


Рис. 15. Асимметрия A_N в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 70 ГэВ.

При энергии пучка 70 ГэВ (см. **рис. 15**) асимметрия составляет $(2.5 \pm 2.0)\%$ в области $-0.2 < x_F < -0.1$ ($\langle p_T \rangle \approx 1.1$ ГэВ/с) и $(10.6 \pm 3.2)\%$ при $-0.4 < x_F < -0.2$ ($\langle p_T \rangle \approx 1.7$ ГэВ/с).

При энергии протонного пучка 50 ГэВ асимметрия была измерена в области $-0.6 < x_F < -0.1$ и $0.7 < p_T < 2.0$ ГэВ/с. Результаты измерения асимметрии в сеансах 2005 и 2007 гг. приведены на **рис. 16**. Асимметрия в области $-0.6 < x_F < -0.25$ и $0.7 < p_T < 2.0$ ГэВ/с составляет $(6.2 \pm 1.5)\%$. Данный результат совпадает с результатами измерений в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ ($6.9 \pm 2.8\%$) и с данными эксперимента E-704 в области фрагментации поляризованного протонного пучка ($6.3 \pm 0.7\%$) (см. **рис. 17**).

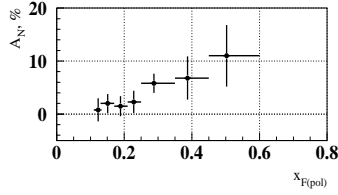


Рис. 16. Суммарная асимметрия в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 50 ГэВ по сеансам 2005-2007 гг.

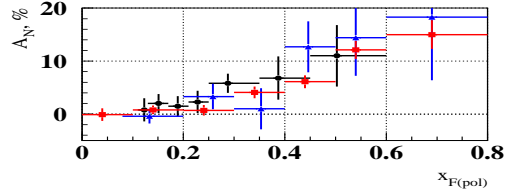


Рис. 17. A_N для трех различных реакций: $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ — черные точки; данные E-704 при 200 ГэВ — красные квадраты; $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 40 ГэВ — синие треугольники.

В области фрагментации поляризованного протона, в отличие от центральной области, асимметрия инклюзивного образования π^0 -мезона одинакова в π^-p и pp -взаимодействиях. Величина асимметрии также слабо зависит от энергии пучка.

Полученные в области фрагментации поляризованной мишени результаты не противоречат теоретическим моделям, описывающим спиновые эффекты в hp_{\uparrow} -взаимодействиях.

Из сравнения с измерениями асимметрии под 90° в системе центра масс, следует, что абсолютное значение асимметрии в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 40 ГэВ начинает возрастать при одном и том же значении импульса π^0 -мезона в системе центра масс $p_0 = 1.7 \pm 0.15$ ГэВ/с для двух различных кинематических областей. Отрыв A_N от нуля в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ наблюдается при энергии π^0 -мезона в системе центра масс около 1.5 ГэВ.

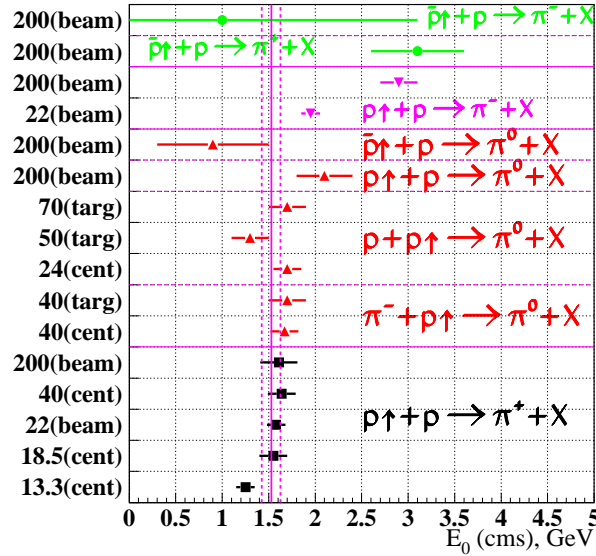


Рис. 18. Точки "отрыва" асимметрии для разных экспериментов. *cent* – эксперименты в центральной области (при $x_f \approx 0$), *targ* – в области фрагментации мишени, *beam* – в области фрагментации пучка.

Глава 6 посвящена поиску общих закономерностей. Как отмечено ранее, в реакции $\pi^- + p \uparrow \rightarrow \pi^0 + X$ было обнаружено, что асимметрия начинает возрастать при значении $E_{cm,s}^0 \approx 1.7$ ГэВ. Были проанализированы данные экспериментов на фиксированной мишени в интервале энергий 13-200 ГэВ. Установлено, что асимметрия начинает возрастать при одном и том же значении $E_{cm,s}^0 \sim 1.5 \div 2$ ГэВ. Результаты приведены на **рис. 18**. Не анализировались эксперименты, в которых асимметрия равна нулю. Обнаруженная универсальность величины $E_{cm,s}^0$ может указывать на существование универсальных подструктур в адронах — конститuentных кварков. Концепция конститuentных кварков широко обсуждалась в начале кварковой эры, но только недавно получила возможное прямое экспериментальное подтверждение в лаборатории им. Джефферсона.

Основные результаты диссертации

На установке ПРОЗА ускорителя У70 Института Физики Высоких Энергий проведено измерение односпиновой асимметрии инклюзивно рожденных π^0 -мезонов в различных кинематических областях. При этом проводились исследования с использованием различных видов пучков и различных мишеней. Эксперимент ПРОЗА является первым экспериментом, в котором односпиновая асимметрия измерена в трех различных кинематических областях:

- области фрагментации неполяризованной частицы (пучка);
- центральной области;
- области фрагментации поляризованной частицы (мишени).

В этих трех областях получены следующие экспериментальные результаты:

1. Проведено измерение односпиновой асимметрии A_N в области фрагментации неполяризованного пучка в реакции $\pi^- d \uparrow \rightarrow \pi^0 X$.
 - При малых значениях поперечного импульса $p_T < 1.0$ ГэВ/с асимметрия совпадает с нулем.

- В области $0.7 < x_F < 1.0$ и $1.0 < p_T < 1.8$ ГэВ/с асимметрия равна $[13.6 \pm 2.6(\text{стат}) \pm 2.0(\text{сист})]\%$, то есть (без учета систематической ошибки) отличается от нуля на $\approx 5\sigma$.
- Наличие асимметрии в области фрагментации неполяризованной частицы не объясняется существующими теоретическими моделями. В рамках двухреджеонного обмена можно было бы ожидать большое значение асимметрии только в области малых поперечных импульсов. В дальнейшем асимметрия должна была бы падать с ростом p_T .
- Полученное значение асимметрии согласуется с результатами измерений в области фрагментации *поляризованного* протонного пучка в инклюзивном рождении π^0 -мезонов.
- Асимметрия совместима с величиной поляризации в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + n$ в той же области переданных импульсов.

2. Измерена односпиновая асимметрия A_N в центральной области.

- Асимметрия в реакции $\pi^- + d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при энергии пучка 40 ГэВ и $p_T < 1.6$ равна нулю.
- В этой же реакции $A_N = (40 \pm 12)\%$ при $p_T > 2.2$ ГэВ/с. Асимметрия совпадает с данными измерений на протонной мишени. Суммарное значение асимметрии равно $(39 \pm 7)\%$. Асимметрия начинает возрастать при $p_T^0 = 1.67 \pm 0.15$.
- Асимметрия инклюзивного рождения η -мезонов при энергии пионного пучка 40 ГэВ при $p_T > 2.2$ ГэВ/с равна $(62 \pm 22)\%$. Впервые получено указание, что асимметрия η -мезонов больше по величине, чем асимметрия π^0 -мезонов.
- Асимметрия комбинаторной пары γ -квантов в области масс между массами π^0 - и η -мезонов совместима с нулем.
- Асимметрия в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 70 ГэВ в области $1.0 < p_T < 3.0$ ГэВ/с равна нулю, что хорошо согласуется с результатами E704 при 200 ГэВ и отличается от результатов, полученных при 24 ГэВ в ЦЕРН.

Теоретические предсказания не противоречат полученным результатам в данной реакции.

3. Впервые измерена асимметрия в инклюзивной реакции в области фрагментации поляризованной мишени:

- A_N в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ равна $(13.8 \pm 3.8)\%$ при $-0.8 < x_F < -0.4$ и p_T в диапазоне от 1 до 2 ГэВ/с; при $-0.4 < x_F < -0.1$ ГэВ/с и p_T в диапазоне от 0.5–1.5 ГэВ/с асимметрия сравнима с нулем. Полученный результат в области $|x_F| > 0.4$ совместим с измерениями во ФНАЛ (E704, 200 ГэВ) и БНЛ (20 ТэВ в системе покоя мишени) в области фрагментации поляризованного протонного пучка.
- Односпиновая асимметрия в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при энергии пучка 70 ГэВ и $0.9 < p_T < 2.5$ ГэВ/с равна нулю в пределах ошибок при $-0.2 < x_F < -0.1$ и составляет $(10.6 \pm 3.2)\%$ в области $-0.4 < x_F < -0.2$.
- Односпиновая асимметрия в реакции $p + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ при 50 ГэВ в области $-0.6 < x_F < -0.25$ и $0.7 < p_T < 2.0$ ГэВ/с составляет $(6.2 \pm 1.5)\%$, что совместимо с результатами измерений в реакции $\pi^- + p_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 + X$ ($6.9 \pm 2.8\%$) при 40 ГэВ и с данными эксперимента E-704 в области фрагментации поляризованного протонного пучка ($6.3 \pm 0.7\%$) при 200 ГэВ.
- В экспериментах с фиксированной мишенью экспериментально установлено, что асимметрия возникает в области фрагментации поляризованного протона и не зависит от того, является ли этот протон пучковой частицей, или частицей мишени. Таким образом, инклюзивное рождение π^0 -мезона в области фрагментации поляризованного протона является новой реакцией для поляриметрии с установленной экспериментально анализирующей способностью $\sim (10 - 15)\%$.
- В области фрагментации поляризованного протона, в отличие от центральной области, асимметрия инклюзивного образования π^0 -мезона в пределах точности измерений

одинакова в $\pi^- p$ и pp -взаимодействиях. Величина асимметрии слабо зависит от энергии пучка.

- Из сравнения с измерениями асимметрии под 90° в системе центра масс, следует, что абсолютное значение асимметрии в реакции $\pi^- + p_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$ при 40 ГэВ начинает возрастать при одном и том же значении импульса π^0 -мезона в системе центра масс $p_0 = 1.7 \pm 0.15$ ГэВ/с для двух различных кинематических областей. Отрыв A_N от нуля в реакции $p + p_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$ наблюдается при энергии π^0 -мезона в системе центра масс pp -взаимодействия около 1.5 ГэВ при 70 ГэВ и при 1.3 ± 0.2 ГэВ при 50 ГэВ.
- Полученный результат описывается различными теоретическими моделями.

Из совокупности всех проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- Сравнивая результаты в реакциях $\pi^- + p_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$ и $\pi^- + d_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$ можно заметить, что асимметрия не зависит от изотопического спина в начальном состоянии.
- Сравнивая результаты в pp_\uparrow и $\pi^- p_\uparrow$ взаимодействиях в центральной области, можно сделать вывод, что асимметрия зависит от сорта частиц в начальном состоянии. Иначе следует предположить значительное изменение динамики взаимодействия при изменении энергии пучка от 40 до 70 ГэВ.
- Большое значение асимметрии в реакции $\pi^- + d_\uparrow \rightarrow \pi^0 + X$ может указывать на значительный вклад валентных кварков в инклюзивное рождение π^0 -мезонов.
- Сравнивая результаты измерений асимметрии в различных экспериментах отмечено, что асимметрия начинает возрастать при одной энергии вторичной частицы в системе центра масс в диапазоне 1.5 – 2.0 ГэВ/с. Данный универсальный порог может служить указанием на наличие конститuentных кварков.
- Проведенные исследования указывают, что асимметрия слабо зависит от энергии. В таком случае, эксперименты при энергиях ускорителя У-70 становятся уникальными, так как дают воз-

возможность проводить исследования поляризационных эффектов в широком кинематическом диапазоне и для большого класса реакций, что особо важно для дискриминации моделей. Эту задачу может решить подготавливаемый эксперимент нового поколения СПАСЧАРМ. Следует отметить, что особенно ценными стали бы исследования с использованием поляризованного протонного пучка.

Сравнивая результаты экспериментов с существующими теоретическими подходами можно отметить, что наиболее полно отражают существующие экспериментальные данные модели с использованием орбитального момента кварков и эффективного цветового поля, тогда как модели на основе механизмов Сиверса, Коллинза и высших твистов хорошо объясняют результаты только в области фрагментации поляризованной частицы.

При подготовке и выполнении экспериментальных исследований был выполнен значительный объем методических исследований:

- Впервые в мире проведены экспериментальные исследования на пучке протонов, выведенном с помощью изогнутого монокристалла из ускорителя с жесткой фокусировкой. Проведены работы по получению стабильного протонного пучка и проведено измерение характеристик пучка.
- Подготовлен пакет программ для анализа данных “в линию” и “вне линии”. При подготовке программного обеспечения разработаны методы:
 - учета потерь при регистрации электромагнитных ливней низкой энергии;
 - коррекция энергии и координаты при падении гамма-квантов на детектор под большими углами;
 - получение односпиновой асимметрии в одноплечевом спектрометре при возможном “сдвиге” асимметрии.

В заключение автор хотел бы выразить благодарность руководству ИФВЭ за поддержку в проведении исследований; Ускорительному отделению и Отделу пучков ИФВЭ за высокую эффективность работы У-70 и канала 14.

Соискатель благодарен за неоценимую помощь в подготовке и проведении измерений всему коллективу сотрудничества ПРОЗА. Особую признательность хотелось бы высказать проф. Нурушеву, благодаря которому получили развитие экспериментальные исследования спиновых эффектов в ИФВЭ. Успешное проведение данных исследований стало возможно только благодаря руководству экспериментом А.Н. Васильевым.

Работа выполнена в рамках контрактов с ГК “Росатом“ при поддержке РФФИ (гранты 06-02-16919, 09-02-00198, 08-02-904550) и Агентства по науке и инновациям (контракт 02.740.11.0243).

Список литературы

- [1] В.Д. Апокин, Н.И. Беликов, А.Н. Васильев, Ю.М. Гончаренко, О.А. Грачев, В.Н. Гришин, А.М. Давиденко, А.А. Деревщиков, Ю.А. Ильин, В.А. Кормилицин, Ю.А. Матуленко, В.А. Медведев, Ю.М. Мельник, А.П. Мещанин, Н.Е. Михалин, **В.В. Мочалов** А.И. Мысник, С.Б. Нурушев, Д.И. Паталаха, А.Ф. Прудкогляд, В.Л. Рыков, Л.Ф. Соловьев, В.Л. Соловьянов, Ю.В. Харлов, В.Ю. Ходырев, Б.В. Чуйко, К.Е. Шестерманов, А.С. Якутин, Л.В. Алексеева, Л.В. Ногац, Н.С. Борисов, Э.И. Бунятова, Ю.М. Казаринов, Ю.Ф. Киселев, В.Г. Коломиец, М.Ю. Либург, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Б.С. Неганов, Ю.А. Плис, Ю.А. Усов, А.Н. Федоров, **Установка ПРОЗА-М для исследования односпиновых асимметрий в инклюзивном образовании нейтральных мезонов на ускорительном комплексе ИФВЭ, ПТЭ N4, 23 (1998)**
- [2] В.Д. Апокин, О.В. Астафьев, Ю.Ш. Багатурия, Н.И. Беликов, Н.С. Борисов, Э.И. Бунятова, А.Н. Васильев, Л.Н. Глonti, О.А. Грачев, А.А. Деревщиков, Ю.В. Ермолин, Ю.М. Казаринов, М.Ю. Либург, В.Н. Матафонов, М.Ю. Матвеев, Ю.А. Матуленко, А.П. Мещанин, А.А. Морозов, **В.В. Мочалов**, А.И. Мысник, В.К. Мяслицын, А.Б. Неганов, С.Б. Нурушев, А.И. Очерашвили, А.Ф. Прудкогляд, В.Л. Рыков, Т.М. Сахелашвили, Л.Ф. Соловьев, В.Л. Соловьянов, А.Н. Сытин, Ю.А. Усов, Б.А. Хачатуров, Б.В. Чуйко, **Первые результаты по измерению азимутальной асимметрии рождения π^0 -мезонов в области фрагментации пучка на поляризованных дейтронах**, ЯФ 49, 164 (1989).
- [3] **В.В. Мочалов**, Н.И. Беликов, Н.С. Борисов, А.Н. Васильев, А.А. Деревщиков, Ю.А. Матуленко, А.П. Мещанин, Н.Г. Минаев, А.Б. Неганов, С.Б. Нурушев, А.Ф. Прудкогляд, Л.Ф. Соловьев, Ю.А. Усов, А.Н. Федоров, О.Н. Щевелев **ИЗМЕРЕНИЕ ОДНОСПИНОВОЙ АСИММЕТРИИ В РЕАКЦИИ $\pi^- d_{\uparrow} \rightarrow \pi^0 X$ В ОБЛАСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ ПУЧКА ПРИ**

40 ГЭВ И p_T ДО 2 ГЭВ/ c , Препринт ИФВЭ 2009-23, Принято к публикации в ЯФ.

- [4] V.D. Apokin, Yu.I. Arestov, O.V. Astafev, N.I. Belikov, B.V. Chuiko, A.A. Derevshchikov, O.A. Grachov, Yu.A. Matulenko, A.P. Meshchanin, A.A. Morozov, **V.V. Mochalov**, A.I. Mysnik, S.B. Nurushev, D.I. Patalakha, A.F. Prudkoglyad, V.L. Rykov, L.F. Solovev, V.L. Solovyanov, A.N. Vasilev, N.S. Borisov, Yu.M. Kazarinov, B.A. Khachaturov, M.Yu. Liburg, V.N. Matafonov, A.B. Neganov, Yu.A. Usov, Yu.Sh. Bagaturiya, L.N. Glonti, G.G. Macharashvili, A.I. Ocherashvili, T.M. Sakhelashvili (Tbilisi State U.), **OBSERVATION OF SIGNIFICANT SPIN EFFECTS IN HARD COLLISIONS AT 40-GEV/C.**, Phys.Lett.B243:461-464,1990
- [5] M.S. Amaglobeli, Yu.Sh. Bagaturiya, L.N. Glonti, G.G. Macharashvili, A.I. Ocherashvili, T.M. Sakhelashvili, B.G. Chiladze (Tbilisi State U.), V.D. Apokin, Yu.I. Arestov, O.V. Astafev, N.I. Belikov, A.N. Vasilev, O.A. Grachov, A.A. Derevshchikov, G.V. Zholobov, Yu.A. Matulenko, A.P. Meshchanin, N.G. Minaev, A.A. Morozov, **V.V. Mochalov**, A.I. Mysnik, S.B. Nurushev, D.I. Patalakha, A.F. Prudkoglyad, V.V. Rykalin, V.L. Rykov, L.F. Solovev, V.L. Solovyanov, V.Yu. Khodyrev, B.V. Chuiko (Serpukhov, IHEP), N.S. Borisov, Yu.M. Kazarinov, M.Yu. Liburg, V.N. Matafonov, A.B. Neganov, Yu.A. Usov, B.A. Khachaturov (Dubna, JINR), **MEASUREMENT OF THE SINGLE-SPIN ASYMMETRY IN INCLUSIVE PRODUCTION OF π^0 AND ETA MESONS IN THE CENTRAL REGION AT MOMENTUM 40-GEV/C.**, Sov.J.Nucl.Phys.50:432-437,(1989) [ЯФ 50:695-704,(1989)].
- [6] V.D. Apokin, Yu.I. Arestov, O.V. Astafev, N.I. Belikov, B.V. Chuiko, A.A. Derevshchikov, O.A. Grachov, Yu.A. Matulenko, A.P. Meshchanin, A.A. Morozov, **V.V. Mochalov**, A.I. Mysnik, S.B. Nurushev, D.I. Patalakha, A.F. Prudkoglyad, V.L. Rykov, L.F. Solovev, V.L. Solovyanov, A.N. Vasilev (Serpukhov, IHEP), N.S. Borisov, Yu.M. Kazarinov, B.A. Khachaturov, M.Yu. Liburg, V.N. Matafonov, A.B. Neganov, Yu.A. Usov (Dubna, JINR), Yu.Sh. Bagaturiya, L.N. Glonti, G.G. Macharashvili, A.I. Ocherashvili, T.M. Sakhelashvili (Tbilisi State U.), **REVEALING OF ESSENTIAL SPIN EFFECTS IN HARD COLLISIONS AT 40-GEV.**, Proceedings SPIN-1988 in Minneapolis, vol. 1 149.
- [7] А.Н. Васильев, В.Н. Гришин, А.М. Давиденко, А.А. Деревщиков, Ю.А. Матуленко, Ю.М. Мельник, А.П. Мещанин, **В.В. Мочалов**, Л.В. Ногац, С.Б. Нурушев, П.А. Семенов, Л.Ф. Соловьев, **В.Л. Соловьянов**, В.Ю. Ходырев, К.Е. Шестерманов, А.Е. Якутин Н.С. Борисов, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Ю.А. Плис, Ю.А. Усов, А.Н. Федоров, А.А. Луханин, **Поиск односпиновой асимметрии в инклюзивном рождении π^0 мезонов в центральной области при энергии протонов 70 ГЭВ.**, ЯФ 67, 1512, (2004) [Physics of Atomic Nuclei, 67, 1487 (2004)].

- [8] А.Н. Васильев, В.Н. Гришин, А.А. Деревщиков, В.И. Кравцов, Ю.А. Матуленко, В.А. Медведев, Ю.М. Мельник, А.П. Мещанин, Д.А. Морозов, **В.В. Мочалов**, Л.В. Ногащ, С.Б. Нурушев, А.Ф. Прудкогляд, П.А. Семенов, Л.Ф. Соловьев, В.Л. Соловьянов, М.Н. Уханов, В.Ю. Ходырев, К.Е. Шестерманов, А.Е. Якутин, Н.С. Борисов, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Ю.А. Плис, Ю.А. Усов, А.Н. Федоров, А.А. Луханин, **Измерение односпиновой асимметрии при 40 ГэВ в инклюзивном рождении π^0 -мезонов в области фрагментации поляризованной мишени.**, ЯФ 67, 1520 (2004) [Physics of Atomic Nuclei, 67, 1487 (2004)].
- [9] А.Н. Васильев, В.Н. Гришин, А.А. Деревщиков, В.И. Кравцов, Ю.А. Матуленко, В.А. Медведев, Ю.М. Мельник, А.П. Мещанин, Д.А. Морозов, **В.В. Мочалов**, А.И. Мыслик, Л.В. Ногащ, С.Б. Нурушев, А.Ф. Прудкогляд, П.А. Семенов, Л.Ф. Соловьев, В.Л. Соловьянов, М.Н. Уханов, Ю.В. Харлов, В.Ю. Ходырев, Б.В. Чуйко, К.Е. Шестерманов, А.Е. Якутин, Н.С. Борисов, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Ю.А. Плис, Ю.А. Усов, А.Н. Федоров, А.А. Луханин, **Односпиновая асимметрия инклюзивного рождения π^0 -мезонов в $p + p_{\uparrow}$ -взаимодействиях в области $-0.4 < x_F < -0.1$ при энергии 70 ГэВ.** ЯФ 68, 1852 (2005) [Physics of Atomic Nuclei, 68, 1790 (2005)].
- [10] A.M. Davidenko, V.N. Grishin, V.Yu. Khodyrev, V.I. Kravtsov, Yu.A. Matulenko, V.A. Medvedev, Yu.M. Melnick, A.P. Meschanin, **V.V. Mochalov**, D.A. Morozov, L.V. Nogach, S.B. Nurushev, P.A. Semenov, K.E. Shestermanov, V.L. Solovianov, L.F. Soloviev, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, N.S. Borisov, A.N. Fedorov, V.N. Matafonov, A.B. Neganov, Yu.A. Plis, Yu.A. Usov, A.A. Lukhanin, **Recent Results from Protvino Polarized Experiment PROZA-M**, ЭЧАЯ 35, 211 (2004) [Phys.Part.Nucl. 35, 211 (2004)].
- [11] **V.V Mochalov**, A.N. Vasiliev, N.A. Bazhanov, N.I. Belikov, A.A. Belyaev, N.S. Borisov, V.N. Grishin, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, V.G. Kolomiets, V.I. Kravtsov, A.B. Lazarev, A.A. Lukhanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnik, A.P. Meschanin, N.G. Minaev, D.A. Morozov, A.B. Neganov, L.V. Nogach, S.B. Nurushev, Yu.A. Plisb, A.F. Prudkoglyad, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, O.N. Shchevelev, L.F. Soloviev, Y.A. Usov, A.E. Yakutin, **Spin physics program At IHEP-Protvino**, AIP Conf.Proc.1149:637-644,2009.
- [12] **V.V. Mochalov**, A.N. Vasiliev, N.A. Bazhanov, N.I. Belikov, A.A. Belyaev, N.S. Borisov, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, V.N. Grishin, A.B. Lazarev, A.A. Lukhanin, Yu.A. Matulenko, Yu.M. Melnik, A.P. Meschanin, N.G. Minaev, D.A. Morozov, A.B. Neganov, L.V. Nogach, S.B. Nurushev, Yu.A. Plis, A.F. Prudkoglyad, P.A. Semenov, L.F. Soloviev, O.N. Shchevelev, Yu.A. Usov, A.E. Yakutin, **THE COMPLETION OF SINGLE-SPIN ASYMMETRY MEASUREMENTS AT THE PROZA SETUP**, XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-09) Proc., 254 (2010).

- [13] А.Н. Васильев, **В.В. Мочалов**, **Общие особенности односпиновой асимметрии инклюзивного рождения π -мезонов в экспериментах с фиксированной мишенью**, ЯФ 67, 2193 (2004) [Physics of Atomic Nuclei, 67, 2169 (2004)].
- [14] **V. Mochalov**, S.Troshin, A.Vasiliev, **Indication on the universal hadron substructure — constituent quarks**. Phys.Rev.D69:077503,2004.
- [15] А.П. Бугорский, А.Н. Васильев, В.Н. Гришин, **В.В. Мочалов**, А.В. Минченко, П.А. Семенов, В.Л. Соловьянов, А.Г. Уфимцев, М.Н. Уханов, Ю.С. Федотов, Ю.В. Харлов, **Вывод протонного пучка 70 ГэВ на установку РАМПЭКС с помощью кристалла кремния**, ПТЭ N1, 14 (2001) [Instrum.Exp.Tech.44, 1(2001)]
- [16] **В.В. Мочалов**, А.Н. Васильев, А.В. Рязанцев, П.А. Семенов, Ю.М. Гончаренко, А.А. Деревщиков, А.С. Константинов, В.А. Маишеев, Ю.А. Матуленко, Ю.М. Мельник, А.В. Минченко, А.П. Мещанин, Д.А. Морозов, Л.Ф. Соловьев, А.Е. Якутин, Ю.А. Чесноков, **Измерение импульсного разброса протонного пучка, выведенного из ускорителя У-70 методом канализования**, Препринт ИФВЭ 2009-22, принято к публикации в ПТЭ.
- [17] А.Н. Васильев, В.Н. Гришин, Ю.А. Матуленко, **В.В. Мочалов**, А.И. Павлинов, Л.Ф. Соловьев, В.Л. Соловьянов, **Экспериментальное изучение угловой зависимости электромагнитного ливня**, ПТЭ ?4, стр. 37 (1999).
- [18] А.Н. Васильев, **В.В. Мочалов**, Л.Ф. Соловьев, **Реконструкция координат наклонных ливней в электромагнитных калориметрах из свинцового стекла**, ПТЭ N 4, 35 (2007) [Instrum.Exp.Tech. 50, 458 (2007)].
- [19] V.D. Apokin, Yu.I. Arestov, O.V. Astafev, N.I. Belikov, B.V. Chuyko, A.A. Derevshchikov, O.A. Grachev, V.Yu. Khodyrev, Yu.A. Matulenko, A.P. Meshchanin, N.G. Minaev, A.A. Morozov, **V.V. Mochalov**, A.I. Mysnik, S.B. Nurushev, D.I. Patalakha, A.F. Prudkoglyad, V.V. Rykalin, V.L. Rykov, L.F. Solovlev, V.L. Solovyanov, A.N. Vasilev, G.V. Zholobov, N.S. Borisov, Yu.M. Kazarinov, B.A. Khachaturov, M.Yu. Liburg, V.N. Matafonov, A.B. Neganov, Yu.A. Usov, N.S. Amaglobeli, Yu.Sh. Bagaturiya, B.G. Chiladze, L.N. Glonti, G.G. Macharashvili, A.I. Ocherashvili, T.M. Sakhelashvili, **MEASUREMENT OF ONE-SPIN ASYMMETRIES IN INCLUSIVE π^0 AND η PRODUCTION AT 90° CMS IN THE REACTIONS $\pi^- p \uparrow \rightarrow \pi^0(\eta) + X$ AT 40 GEV/C.**, Proc. 3rd Intern Workshop on High Energy Spin Physics, 163, Protvino, 1990.
- [20] А.М. Davidenko, V.N. Grishin, V.Yu. Khodyrev, V.I. Kravtsov, Yu.A. Matulenko, V.A. Medvedev, Yu.M. Melnick, A.P. Meschanin, **V.V. Mochalov**, D.A. Morozov, L.V. Nogach, S.B. Nurushev, P.A. Semenov, K.E. Shestermanov, V.L. Solovianov, L.F. Soloviev, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, N.S. Borisov, A.N. Fedorov, V.N. Matafonov, A.B. Neganov, Yu.A. Plis, Yu.A. Usov, A.A. Lukhanin, **Single-Spin Asymmetry in Inclusive π^0 Production Measured at the Protvino 70 GeV Accelerator** Presented

at "ADVANCED STUDIES INSTITUTE – SYMMETRIES AND SPIN"(SPIN-Praha-2003). Czech.J.Phys.54, B167 (2004).

- [21] **V.V. Mochalov**, S.V. Ivanov, V.I. Garkusha, A.S. Gurevich, V.I. Kravtsov, O.P. Lebedev, N.I. Minaev, L.V. Nogach, S.B. Nurushev, A.N. Vasiliev, A.V. Otboev, Yu.M. Shatunov, D.K. Toporkov, A.S. Belov, **Spin physics with light and heavy neutral mesons at Protvino**, Czech.J.Phys.56, F151 (2006).
- [22] **V.V. Mochalov**, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.Y. Khodyrev, V.I. Kravtsov, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.G. Minaev, D.A. Morozov, L.V. Nogach, S.B. Nurushev, L.F. Prudkoglyad, P.A. Semenov, L.F. Soloviev, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, N.L. Bazhanov, N.S. Borisov, A.N. Fedorov, V.G. Koloimiets, A.B. Lazarev, A.B. Neganov, Y.A. Plis, O.N. Shchevelev, Y.A. Usov, **Single spin asymmetries in inclusive π^0 production in $p + p_{\uparrow}$ and $\pi^- + p_{\uparrow}$ interactions at 40-70 GeV**, *Moscow 2006, ICHEP*, 631-634 (2006).

Рукопись поступила 28 июня 2010 г.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

В.В. Мочалов

Исследование односпиновой асимметрии инклюзивного образования π^0 -мезонов на ускорителе ИФВЭ.

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

Подписано к печати 02.07.2010. Формат 60 × 84/16.
Офсетная печать. Печ.л. 2,1. Уч.-изд.л. 1,65. Тираж 100. Заказ 28.
Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

