

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Б.П.КОНСТАНТИНОВА

3/4 3/4 3/4 3/4 3/4 3/4 3/4 3/4 3/4 3/4

на правах рукописи

Баядилов Даир Ергалиулы

УДК 539.126.34, 539.172.5

**Измерение дифференциальных сечений  
процесса перезарядки  $p^- p^{\oplus} p^{\circ} n$  вперед  
с помощью нового спектрометра нейтральных  
мезонов**

**01.04.16** – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Гатчина  
2004

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий  
Петербургского института ядерной физики  
им.Б.П.Константинова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор, С. П. Круглов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор, В. В. Куликов

доктор физико-математических наук,  
профессор, Г. А. Петров

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2004** г. в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д**002.115.01** в Петербургском  
институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН по  
адресу:

**188300**, Ленинградская обл., г. Гачина, Орлова роща,  
ПИЯФ РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2004** г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

И. А. Митропольский

## **. Общая характеристика работы**

### **Актуальность**

Измерение дифференциальных сечений  $\pi N$ -рассеяния с перезарядкой является частью общей программы "Спектроскопия нестранных барионов на пучках  $\pi$ -мезонов в области низколежащих  $\pi N$ -резонансов", которая осуществляется в Лаборатории мезонной физики ПИЯФ начиная с 1970 года.

Последние годы характеризуются всплеском интереса к проблемам спектроскопии нестранных барионов (барионных резонансов). Это обусловлено развитием все новых теоретических моделей, предсказывающих количество барионных резонансов и их характеристики – массы, ширины, моды распада. И, как правило, число предсказываемых кварковыми моделями резонансов гораздо больше, чем найдено из экспериментальных данных. В научной литературе даже появился термин "недостающие резонансы" (missing resonances), обозначающий резонансы, полученные в теоретических моделях, но не обнаруженные при анализе экспериментальных данных по  $\pi N$ -рассеянию. Очевидно, что для решения этой проблемы необходимо, в первую очередь, точно и однозначно определить число и характеристики резонансов, извлекаемых из экспериментов по  $\pi N$ -рассеянию.

Как известно, процесс извлечения характеристик барионных резонансов из полученных в экспериментах наблюдаемых величин представляет собой двухступенчатую процедуру – сначала с помощью парциально-волнового анализа находят парциальные амплитуды пион-нуклонного рассеяния, а затем на основе этих амплитуд определяют число резонансов и их характеристики. К сожалению, приходится констатировать, что в настоящее время эти характеристики известны с недостаточной точностью, даже для таких известных и давно изучаемых резонансов как  $P_{11}(1440)$  и  $S_{11}(1535)$ ; более того, не установлено окончательно полное число резонансов. Причина такой ситуации двоякая: с одной стороны, несовершенство процедуры парциально-волнового анализа, а с

другой – неполнота и недостаточно высокое качество базы экспериментальных данных. Как показывает рассмотрение этой базы данных в области низколежащих  $\pi N$ -резонансов, основным ее недостатком является отсутствие высококачественных результатов по  $\pi^-p$ -рассеянию с перезарядкой. В первую очередь, это относится к абсолютным дифференциальным сечениям - для них в диапазоне налетающих пи-мезонов от 100 до 600 МэВ данных очень мало, а большинство из существующих результатов не могут считаться надежными.

Чтобы заполнить существующий пробел в банке данных и решить вопрос о противоречиях между имеющимися немногочисленными экспериментальными результатами, в ПИЯФ были поставлены эксперименты по измерению дифференциальных сечений  $\pi^-p$ -рассеяния с перезарядкой  $\pi^-p \rightarrow \pi^0 p$ . Измерения выполнялись на пи-мезонном канале синхроциклотрона ПИЯФ и охватывали область энергий  $\pi$ -мезонов от 300 до 585 МэВ (соответствующий интервал импульсов - от 417 до 710 МэВ/с). В первом эксперименте были измерены сечения перезарядки для рассеяния в заднюю полусферу. Эксперимент был выполнен путём детектирования нейтрона отдачи на совпадение с одним из  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ .

На следующем этапе было решено выполнить измерения дифференциальных сечений реакции перезарядки вперед. Основным стимулом при постановке этого эксперимента было то обстоятельство, что в области малых углов рассеяния (от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  в системе центра масс) экспериментальные данные по сечениям перезарядки практически отсутствуют. Положение усугубляется еще и тем, что в указанном диапазоне углов нет измерений дифференциальных сечений и для упругого  $\pi^+p$ - и  $\pi^-p$ -рассеяния – из-за малой энергии протона отдачи и из-за наличия кулон-ядерной интерференции. Следовательно, сечения  $\pi^-p$ -рассеяния с перезарядкой на малые углы не могут быть определены даже косвенным способом – из сечений упругого  $\pi^+p$ -рассеяния с помощью изоспиновых соотношений. Это означает, что при

использовании парциально-волновых анализов для получения амплитуд пион-нуклонного рассеяния (на основе которых затем вычисляются наблюдаемые величины) под нулем градусов приходится вводить дополнительные теоретические критерии и ограничения. Из-за этого в значениях дифференциальных сечений и поляризационных параметров, предсказываемых парциально-волновыми анализами, возникают неопределенности, величины которых трудно оценить. Только прямые измерения сечений  $\pi^-p$ -рассеяния с перезарядкой на малые углы помогут устранить такие неопределенности и однозначно определить амплитуду рассеяния под нулем градусов.

**Целью настоящей диссертационной работы** является измерение абсолютных дифференциальных сечений реакции перезарядки  $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$  на углах, близких к  $0^\circ$ , в диапазоне импульсов налетающих  $\pi^-$ -мезонов от 417 МэВ/с до 710 МэВ/с.

Для достижения этой цели был спроектирован и создан спектрометр нейтральных мезонов для регистрации  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов и проведен эксперимент на пионном пучке синхроциклотрона ПИЯФ.

**Научная новизна работы:**

1. Впервые при десяти импульсах пионов в диапазоне от 417 МэВ/с до 710 МэВ/с с высокой точностью измерены дифференциальные сечения процесса перезарядки  $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$  на углах, близких к  $0^\circ$ .
2. В ходе эксперимента было получено сто значений дифференциальных сечений в угловом диапазоне вылета  $\pi^0$ -мезона от  $0^\circ$  до  $11.5^\circ$  в системе центра масс при десяти импульсах налетающих  $\pi^-$ -мезонов: 417, 456, 490, 532, 547, 573, 614, 655, 685, 710 МэВ/с.

3. С помощью экстраполяции экспериментальных данных к  $0^\circ$  было получено при этих импульсах десять значений сечений  $\frac{dS}{d\Omega}(0^\circ)$ .
4. Измеренные сечения под углом  $0^\circ$  лучше согласуются с предсказаниями фазовых анализов Петербургского института ядерной физики (1995) и Вирджинского политехнического института, США (2002) и послужат основой для новых фазовых анализов  $\pi$ p-рассеяния.

**Научная и практическая ценность работы:**

1. Заполнен пробел в банке экспериментальных данных по дифференциальным сечениям  $\pi^-$ p-рассеяния с перезарядкой вперед в области низколежащих  $\pi$ N-резонансов.
2. В ПИЯФ создан спектрометр нейтральных мезонов – многосегментный электромагнитный спектрометр полного поглощения на основе 48 неорганических сцинтилляционных кристаллов CsI(Na).
3. Разработана система триггерных счетчиков и электроника спектрометра нейтральных мезонов.
4. Разработаны методы энергетической калибровки спектрометра нейтральных мезонов с помощью электронов и космических частиц.
5. Разработана система компьютерного считывания и записи информации, получаемой спектрометром нейтральных мезонов.
6. Разработан пакет программного обеспечения для обработки экспериментальной информации.
7. Разработан пакет программного обеспечения моделирования эксперимента по методу Монте-Карло для розыгрыша событий и получения значений аксептанса установки.

8. Полученный экспериментальный материал по  $\frac{dS}{d\Omega}$  будет использован для проведения новых фазовых анализов.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Измерены абсолютные значения дифференциальных сечений реакции  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 p$  под нулем градусов на десяти значениях импульсов налетающих  $\pi^-$ -мезонов в интервале от 417 МэВ/с до 710 МэВ/с. Измеренные сечения под углом  $0^\circ$  лучше согласуются с предсказаниями фазовых анализов Петербургского института ядерной физики (1995) и Вирджинского политехнического института, США (2002) и не подтверждают импульсную зависимость сечений, даваемую фазовым анализом Карлсруэ-Хельсинки (1980).
2. Создан спектрометр нейтральных мезонов и исследованы его характеристики.
3. Разработаны способы энергетической калибровки спектрометра нейтральных мезонов с помощью электронов и космических частиц.
4. Разработан алгоритм отбора полезных событий, относящихся к реакции перезарядки  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 p$ .

#### **Основные результаты работы апробированы:**

1. Конференция по физике элементарных взаимодействий, декабрь 2002 г., ИТЭФ, Москва.
2. 10<sup>th</sup> International Conference on Hadron Spectroscopy, 31 August – 5 September 2003, Aschaffenburg, Germany.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из пяти глав, заключения и приложений и содержит 110 страниц, 53 рисунка, 17 таблиц и 71 библиографическую ссылку.

## 2. Содержание работы

**В первой главе** обосновывается актуальность работы. Приводится краткий обзор теоретической и экспериментальной ситуации. Ставится цель исследований и аргументируется создание спектрометра нейтральных мезонов. Один из основных аргументов – отсутствие качественных данных по дифференциальным сечениям реакции перезарядки  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ . На рис. 1 показаны результаты экспериментов, опубликованные до проведения наших исследований.

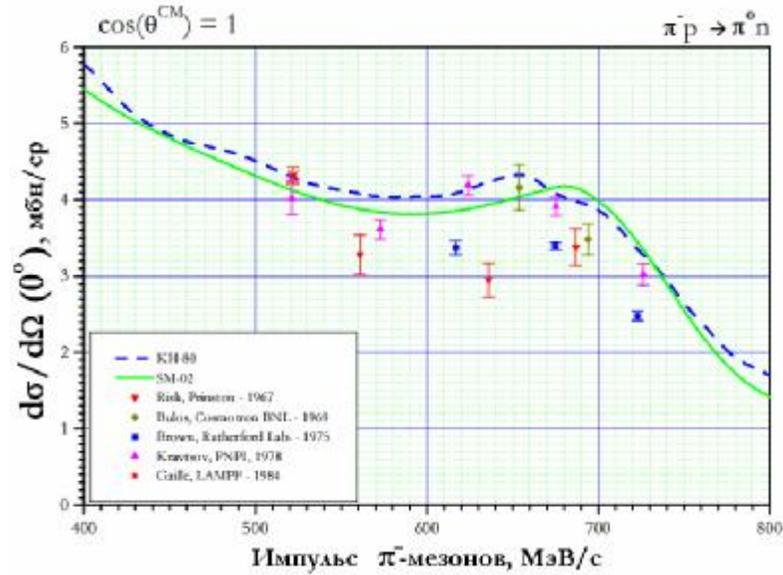


Рис. 1. Результаты экспериментов:  $\square$  - [1],  $\circ$  - [2],  $\bullet$  - [3],  $\square$  - [4],  $\times$  - [5]. Предсказания фазовых анализов: штриховая линия – КИ-80 [6], сплошная линия – SM-02 [7]

Видно ярко выраженное несоответствие данных одних экспериментов другим. Это и послужило одним из основных мотивов проведения настоящей работы.

**Во второй главе** описывается экспериментальная установка на пи-мезонном канале синхроциклотрона ПИЯФ. Описание начинается со схемы синхроциклотрона и устройства пионного пучка. Приведены параметры пучка при импульсе 614 МэВ/с. В табл. 1 даны значения процентного содержания отрицательно заряженных частиц в пучке пи-мезонного канала при разных значениях импульса [8].

Таблица 1

Состав пучков отрицательно заряженных частиц

Импульс, МэВ/с	417	456	490	532	547	573	614	655	685	710
Пионы	66,5	74,5	80,5	85,5	88,3	89,7	92	93,8	95,1	96
Электроны	26	19	14	10	7,5	6,5	5	3,5	2,5	2
Мюоны	7,5	6,5	5,5	4,5	4,2	3,8	3	2,7	2,4	2

Далее рассказывается об устройстве и принципе действия жидководородной мишени безопасного типа [9]. В третьем параграфе второй главы описаны спектрометр нейтральных мезонов и схема постановки эксперимента [10]. На рис.2. показана схема такого эксперимента. Спектрометр собран на основе

сцинтилляционных кристаллов CsI(Na) и предназначен для регистрации обоих  $\gamma$ -квантов от распада нейтрального мезона (время жизни  $\pi^0 \sim 10^{-16}$  с., вероятность распада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma \sim 99\%$ ). В каждом из плеч спектрометра содержится по 24 кристалла, составленные в матрицы  $6 \times 4$ . Черным цветом помечены центральные кристаллы, участвующие в триггере.

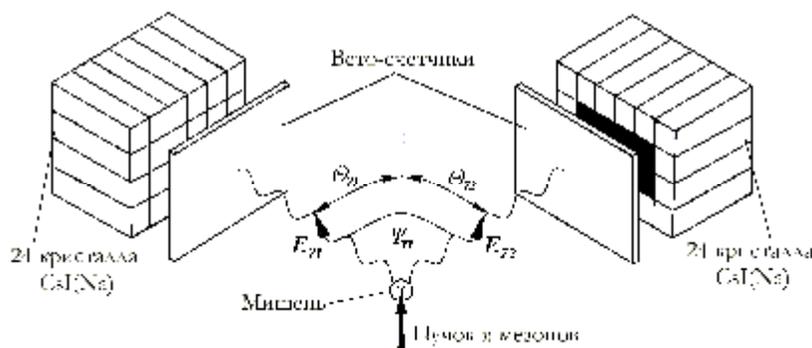


Рис. 2. Схема постановки эксперимента с применением спектрометра нейтральных мезонов

После того как произошло событие реакции перезарядки и оно было зарегистрировано, можно восстановить энергии  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$   $\gamma$ -квантов и угол между ними  $Y_{gg}$ .

Далее с использованием формулы 1, можно восстановить инвариантную массу  $\pi^0$ -мезона:

$$M_{p^0}^2 = 2E_{g1}E_{g2}(1 - \cos \Psi_{gg}), \quad (1)$$

энергия  $\pi^0$ -мезона в Л-системе определяется по формуле:

$$E_{p^0} = \left[ \frac{2M_{p^0}^2}{(1 - \cos \Psi_{gg})(1 - X^2)} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $X = (E_{g1} - E_{g2})/(E_{g1} + E_{g2})$  – параметр, характеризующий распределение энергии  $\pi^0$ -мезона между  $\gamma$ -квантами.

В следующем параграфе следует описание конструкции отдельного элемента спектрометра нейтральных мезонов. Индивидуальные размеры сцинтилляционных кристаллов CsI(Na)  $60 \times 60 \times 300$  мм<sup>3</sup>. ФЭУ-97 – тип фотоэлектронного умножителя, применяемого в спектрометре для получения электрического сигнала от сцинтилляций в кристалле. Каждый ФЭУ снабжен индивидуальным источником высокого напряжения (ИВН).

Далее описывается система тонких пластиковых сцинтилляционных счетчиков. На их основе построена триггерная логика эксперимента. Затем идет полное описание принципов действия модульной электроники стандарта КАМАК.

**В третьей главе** описываются проведенные в работе методические эксперименты, в ходе которых были исследованы характеристики спектрометра нейтральных мезонов. Было установлено, что:

- Прототип калориметра из 9 кристаллов, составленный в матрицу 3×3, собирает 96% энергии электрон-позитронного ливня, возникающего при попадании  $\gamma$ -кванта в центральный кристалл.

- Энергетическое разрешение калориметров спектрометра, как и предполагалось, является функцией энергии и плавно улучшается с ростом поглощенной в калориметрах энергии. На уровне 300 МэВ разрешение составляет  $\sim 4,5\%$  ( $\sigma$ ).

- Угловое разрешение находится на уровне  $1^\circ$  ( $\sigma$ ).

- Временное разрешение сигналов от спектрометра нейтральных мезонов находится на уровне 4,5 нс ( $\sigma$ ).

В ходе калибровочного эксперимента были набраны спектры от электронов на пяти разных энергиях и от космических частиц (космические частицы пролетают преимущественно вертикально через калориметры). Были получены калибровочные зависимости номера канала в преобразователе заряд-код от энерговыделения в кристалле. Из этих зависимостей было установлено, что положению пика в спектре потерь энергий от космических частиц соответствует энергия 36 МэВ, выделяемая электронами. Это значение послужило репером при обработке экспериментального материала, полученного в эксперименте по перезарядке [11].

**В четвертой главе** описывается проведение самого эксперимента по исследованию процесса перезарядки, приведена

логическая схема эксперимента. Объясняется, как записывалась информация со спектрометра нейтральных мезонов. Показаны типы гистограмм, получаемые программой on-line обработки данных.

**В пятой главе** рассказывается об алгоритме обработки данных, о том, какие программы были написаны и использованы в ходе обработки. Для получения значений сечения применялась формула:

$$\frac{dS^{cm}}{d\Omega} = \frac{N_{p^0}}{N_{p^-} \cdot A \cdot N_p \cdot 2p \cdot \Delta \cos q^{cm}}, \quad (3)$$

$N_{p^0}$  – количество зарегистрированных  $\pi^0$ -мезонов, вылетевших в телесный угол  $2\pi\Delta\cos\theta^{cm}$ ,  $N_{p^-}$  – количество  $\pi^-$ -мезонов, прошедших через мишень за время набора статистики на определенной энергии и зарегистрированное монитором,  $N_p$  – количество протонов в мишени на  $\text{см}^2$ ,

$A$  – аксептанс установки, получаемый из Монте-Карло моделирования. Программа для моделирования была написана с использованием Церновской библиотеки GEANT.

На рис. 3. показана зависимость дифференциальных сечений от угла вылета  $\pi^0$ -мезона в системе центра масс для импульса налетающих  $\pi^-$ -мезонов 614 МэВ/с.

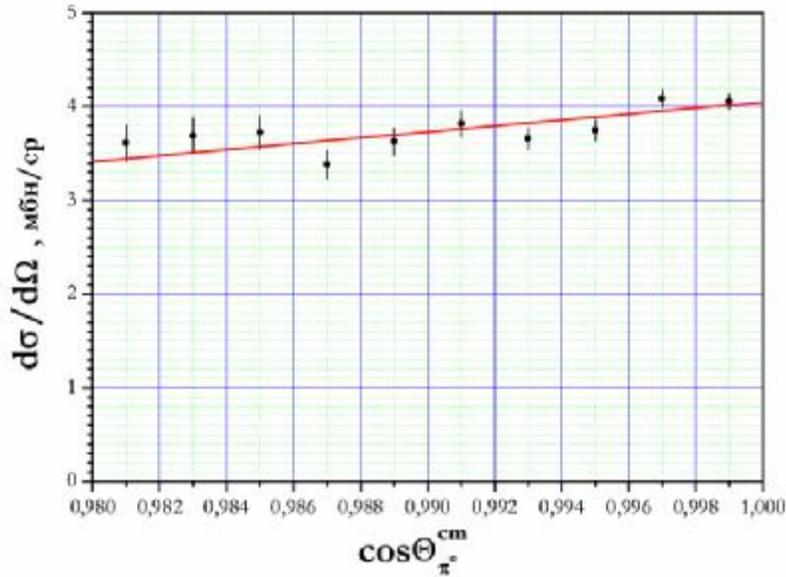


Рис. 3. Угловая зависимость дифференциального сечения перезарядки для импульса налетающих  $\pi^-$ -мезонов 614 МэВ/с

Такие зависимости были измерены для всех десяти значений импульсов пионов.

**В заключении** сформулированы выводы о проделанной работе и обосновывается ценность полученного экспериментального материала. Впервые при десяти импульсах пионов в диапазоне от 417 до 710 МэВ/с с высокой точностью измерены дифференциальные сечения процесса перезарядки  $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$  на углах, близких к  $0^\circ$ . Данные получены при импульсах налетающих  $\pi^-$ -мезонов 417, 456, 490, 532, 547, 573, 614, 655, 685, 710 МэВ/с и представлены в таблице 2. Систематические ошибки не превышают 5%.

Таблица 2

Значения дифференциальных сечений реакции перезарядки  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  под нулем градусов, полученные в настоящей работе

<b>Импульс, МэВ/с</b>	<b>Дифференциальное сечение (<math>0^\circ</math>), мбн/ср</b>
<b>417</b>	<b><math>5,27 \pm 0,09</math></b>
<b>456</b>	<b><math>4,43 \pm 0,06</math></b>
<b>490</b>	<b><math>4,08 \pm 0,07</math></b>
<b>532</b>	<b><math>3,75 \pm 0,09</math></b>
<b>547</b>	<b><math>3,79 \pm 0,09</math></b>
<b>573</b>	<b><math>3,88 \pm 0,05</math></b>
<b>614</b>	<b><math>4,05 \pm 0,07</math></b>
<b>655</b>	<b><math>4,13 \pm 0,10</math></b>
<b>685</b>	<b><math>4,53 \pm 0,13</math></b>
<b>710</b>	<b><math>4,07 \pm 0,08</math></b>

На рис. 4. приведены результаты, полученные в настоящем эксперименте в сравнении с предсказаниями фазовых анализов [6,7,12].

Видно, что полученные данные не согласуются полностью ни с одним из фазовых анализов.

По форме импульсной зависимости сечений наши результаты лучше согласуются с предсказаниями фазовых анализов Петербургского института ядерной физики (PNPI-95) и

Вирджинского политехнического института, США (SM-02) и не подтверждают фазовый анализ КН-80.

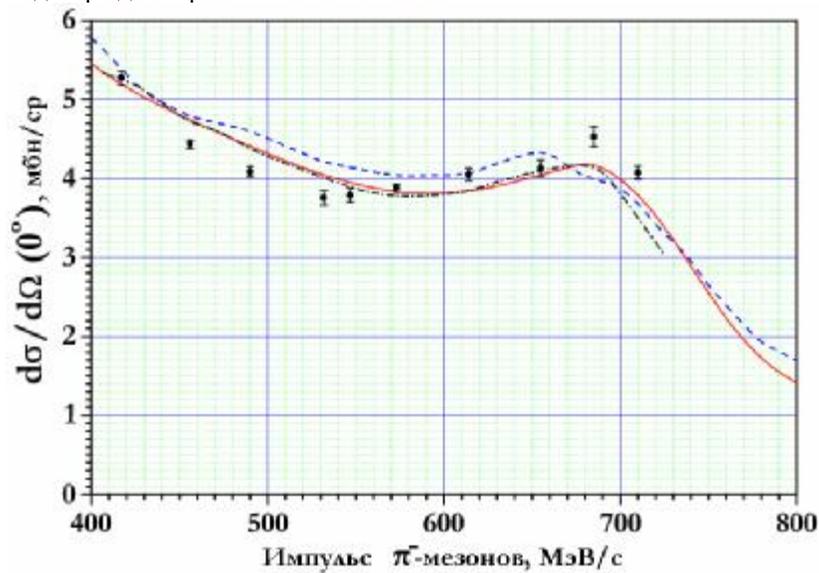


Рис. 4. Результаты обсуждаемого эксперимента (•) в сравнении с предсказаниями фазовых анализов: штриховая линия – КН-80 [6], сплошная линия – SM-02 [7], штрих-пунктирная линия PNPI-95 [12]

В области импульсов 450÷550 МэВ/с результаты наших экспериментов также лучше согласуются с фазовыми анализами PNPI-95 и SM-02 и хуже согласуются с КН-80.

Новые экспериментальные результаты послужат, таким образом, основой для будущих фазовых анализов, и это позволит более верно определить амплитуду  $\pi p$ -взаимодействия при рассеянии под малыми углами.

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

- И.В.Лопатин, Н.Г.Козленко, С.П.Круглов, А.А.Кулбардис, А.Б.Старостин, В.В.Сумачев, Е.А.Филимонов, Д.Е.Баядилов.  
Энергетическая калибровка гамма-детекторов на электронных пучках пи-мезонного канала синхроциклотрона ПИЯФ.  
Препринт ПИЯФ-2268, Гатчина, 2000, 24 с.
- D.E.Bayadilov, V.S.Bekrenev, Yu.A.Beloglazov, S.P.Kruglov, I.V.Lopatin.  
Eta spectrometer for PNPI experimental program “Physics with  $h$  mesons”.  
PNPI Research Report 1998-1999, Part 1, Gatchina, 2000, p. 22.
- D.E.Bayadilov, V.S.Bekrenev, Yu.A.Beloglazov, E.A.Filimonov, A.B.Gridnev, M.R.Kan, N.G.Kozlenko, S.P.Kruglov, A.A.Kulbardis, I.V.Lopatin, D.V.Novinsky, A.K.Rad'kov, A.B.Starostin, V.V.Sumachev.  
Baryon spectroscopy at pion beams: experiments at PNPI.  
PNPI Main Scientific Activity 1997–2001, HEPD, Gatchina, 2002, p. 51.
- D.E.Bayadilov, Yu.A.Beloglazov, E.A.Filimonov, M.R.Kan, N.G.Kozlenko, S.P.Kruglov, I.V.Lopatin, D.V.Novinsky, A.K.Rad'kov, V.V.Sumachev.  
Forward-angle differential cross sections of  $p\bar{p}$  charge exchange scattering in the momentum range from 417 to 710 MeV/c.  
Preprint PNPI–2530, Gatchina, 2003, 20 с.
- Д.Е.Баядилов, Ю.А.Белоглазов, М.Р.Кан, Н.Г.Козленко, С.П.Круглов, И.В.Лопатин, Д.В.Новинский, Ф.К.Радьков, В.В.Сумачев, Е.А.Филимонов.  
Измерение дифференциальных сечений  $p\bar{p}$ -рассеяния с перезарядкой в области малых углов рассеяния.  
Ядерная физика 67, № 3, 512 (2004).

- D.E.Bayadilov, Yu.A.Beloglazov, E.A.Filimonov, M.R.Kan, N.G.Kozlenko, S.P.Kruglov, I.V.Lopatin, D.V.Novinsky, A.K.Rad'kov, V.V.Sumachev.  
Study of  $p\bar{p}$  charge exchange scattering for forward angles. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Hadron Spectroscopy (31 August – 5 September 2003, Aschaffenberg, Germany), AIP Proceedings, 2004.

#### Список цитируемой литературы

1. W.S. Risk, Phys. Rev. **167**, 1249 (1968)
2. F.Bulos *et al.*, Phys. Rev. **187**, 1827 (1969)
3. R.M.Brown *et al.*, Phys. Rev. B **117**, 12 (1976)
4. A.V.Kravtsov *et al.*, Nucl. Phys. B **140**, 279 (1978)
5. F.C. Gaille *et al.*, Phys. Rev. D **30**, 2408 (1984)
6. G. Höhler, "Pion Nucleon Scattering", in Landolt-Börnstein, vol.9b (Springer-Verlag, 1980)
7. R.A.Arndt *et al.*, Phys. Rev. C **69**, 035213 (2004)
8. В.П.Коптев и др., Препринт ЛИЯФ-196, Л., 1975, 40.
9. S.P.Kruglov *et al.*, Prib. Tekh. Eksp. **No 6**, 213 (1997)
10. D.E.Bayadilov *et al.*, Preprint PNPI-2530, Gatchina, 2003. 20 p.
11. D.E.Bayadilov *et al.*, Ядерная физика **67**, № 3, 512 (2004).
12. V.V.Abaev, S.P.Kruglov, Z. Phys., A352, No.1, p.85-96, (1995)