

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Б.П. КОНСТАНТИНОВА РАН

УДК 539.121.34, 539.172.5

На правах рукописи

Козленко Николай Георгиевич

**Изучение образования нейтральных мезонов
в π^-p -взаимодействии в области энергий
 P_{11^-} , S_{11^-} , D_{13^-} -резонансов**

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Гатчина
2009

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 Г.А. Петров,
кандидат физико-математических наук,
с. н. с. Н.С. Топильская.

Ведущая организация: Институт теоретической и
экспериментальной физики.

Защита состоится “___” июля 2010 г. в 11 часов на заседании диссер-
тационного совета Д 002.115.01 при Петербургском институте ядерной
физики им. Б.П. Константинова РАН по адресу:

188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща, ПИЯФ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан 11 июня 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.А. Митропольский

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Эксперименты по изучению образования нейтральных мезонов в π^-p -взаимодействии в области $P_{11}(1440)$ -, $S_{11}(1535)$ -, $D_{13}(1520)$ -резонансов наряду с упругим $\pi^\pm p$ -рассеянием составляют экспериментальную базу спектроскопии нестранных барионов, или, иначе говоря, пион-нуклонных резонансов. Характеристики этих резонансов (масса, ширина, моды распада) являются важными физическими константами, точное знание которых позволит выполнить многопараметрический тест имеющихся кварковых моделей и выбрать из них наиболее реалистичную. Однако к настоящему времени эти характеристики известны с недостаточной точностью; более того, не установлено окончательно существование некоторых из резонансов. Причина такой ситуации двоякая: с одной стороны, несовершенство процедуры парциально-волнового анализа, с помощью которого характеристики резонансов извлекаются из экспериментальных данных, а с другой стороны, неполнота и недостаточно высокое качество этих экспериментальных данных. Анализ экспериментальной ситуации показывает, что в области низколежащих πN -резонансов $P_{11}(1440)$, $S_{11}(1535)$, $D_{13}(1520)$ создана – в основном усилиями физиков ПИЯФ [1], Лос-Аламосской мезонной фабрики (США) [2] и Резерфордской лаборатории (Великобритания) [3] – достаточно полная база данных по упругому π^+p - и π^-p -рассеянию.

Реакция перезарядки $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ также изучалась уже довольно давно (например, первые эксперименты по изучению реакции $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ были выполнены в 1967-1969 годах). Последние работы были опубликованы в 2000-х годах [4], тем не менее до настоящего времени экспериментальная информация о сечениях реакции $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ остаётся недостаточной. В особенности это относится к дифференциальным сечениям, для них в диапазоне импульсов налетающих π^- -мезонов от 500 до 750 МэВ/с данных очень мало, а многие из существующих не могут считаться надёжными. Так, в существующей базе данных в интервале по $\cos(\theta_{cm})$ от -0.9 до 0.8 в диапазоне импульсов налетающих π^- -мезонов от 500 до 750 МэВ/с существовало всего 113 точек для реакции $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$, причём эксперименты были выполнены по старым методикам с использованием искровых камер и имели большие статистические и систематические ошибки. В то время как в упругом канале $\pi^-p \rightarrow \pi^-p$ в том же диапазоне импульсов и $\cos(\theta_{cm})$ существует более 1200 точек.

Предсказания имеющихся парциально-волновых анализов для диф-

дифференциальных сечений реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ существенно отличаются друг от друга.

Мотивация для измерения сечений реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$: отсутствие систематических точных данных по перезарядке. Получение новых прецизионных данных по сечениям перезарядки позволит – путём включения этих данных при проведении нового парциально-волнового анализа – существенно улучшить наше знание парциальных амплитуд πN -рассеяния и более точно описать πN -систему через эти амплитуды. Это, в свою очередь, даст возможность уточнить параметры низколежащих пион-нуклонных резонансов $P_{11}(1440)$, $S_{11}(1535)$, $D_{13}(1520)$. Точные данные по сечениям перезарядки требуются также для более детального исследования зарядового расщепления Δ_{33} -резонанса, которое было обнаружено ранее в парциально-волновом анализе [5] на основе определения масс и ширин Δ_{33}^{++} - и Δ_{33}^0 -резонансов.

Начиная с импульса 685 МэВ/с при взаимодействии π^- -мезонов с протонами начинают рождаться η -мезоны. Изучение рождения η -мезона в реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$, так же как и реакции перезарядки, началось в конце 60-х годов, тем не менее экспериментальная информация о сечениях реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$ по-прежнему остаётся противоречивой и недостаточной, особенно около порога реакции (685 МэВ/с). В то же самое время получение точных экспериментальных данных в околопороговой области очень важно для проверки теоретических моделей описания рождения η -мезона.

Можно сформулировать несколько важных физических задач, решению которых может помочь изучение рождения η -мезона:

1. Из-за того, что нуклонные резонансы (то есть возбужденные состояния нуклона) имеют большие ширины и поэтому в значительной мере перекрываются, довольно трудно определять параметры отдельных резонансов. Эта проблема может быть решена исследованием каналов распада с определённым изотопическим спином.

Так, например, при изучении реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$, у которой в начальном состоянии система $\pi^- p$ имеет смесь состояний с изоспином $1/2$ и $3/2$, а в конечном состоянии система ηn имеет чистое состояние с изоспином, равным $1/2$ ($I_\eta=0$, $I_n = \frac{1}{2}$), из начального взаимодействия $\pi^- p$, согласно закону сохранения изоспина, будут отобраны каналы, которые идут через образование и последующий распад N^* -резонансов, а вклад Δ -резонансов будет исключён.

2. В околопороговой области процесс рождения η -мезона идёт через образование и последующий распад $S_{11}(1535)$ -резонанса, масса ко-

торого очень близка к порогу образования η -мезона. Этот резонанс продолжает вызывать множество теоретических дискуссий из-за его необычных параметров. Вероятность распада $S_{11}(1535) \rightarrow \eta n$ ($\approx 50\%$) намного больше, чем для любого другого резонанса. Этот факт трудно объяснить в рамках большинства теоретических моделей, и даже само существование $S_{11}(1535)$ как нуклонного резонанса ставится под сомнение.

Вот почему так важно получить как можно более точные экспериментальные данные по рождению η -мезона для установления природы $S_{11}(1535)$ -резонанса и точного определения его характеристик.

3. Одной из фундаментальных констант, которые могут быть извлечены из экспериментов по рождению η -мезона, является длина ηN -рассеяния. Значение этой константы (её отличие от нуля) характеризует нарушение киральной симметрии. Так как масса странного кварка (который входит в состав η -мезона) существенно больше, чем массы u - и d -кварков, соответствующая $SU3(L) \times SU3(R)$ симметрия должна нарушаться сильнее, чем $SU2(L) \times SU2(R)$ симметрия для случая πN -взаимодействия. Таким образом, определение длины ηN -рассеяния может обеспечить дополнительную информацию о механизмах нарушения киральной симметрии.

Для определения длины ηN -рассеяния используются данные по рождению η -мезона, так как время жизни η -мезона составляет 6×10^{-19} секунды, и получить пучок свободных η -мезонов невозможно.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является изучение свойств пион-нуклонных резонансов $P_{11}(1440)$, $S_{11}(1535)$, $D_{13}(1520)$ в реакциях $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ и $\pi^- p \rightarrow \eta n$ при импульсах налетающих π^- -мезонов от 500 до 750 МэВ/с. Эксперимент был проведён на пионном канале AGS (BNL) с использованием электромагнитного калориметра "Crystal Ball", состоящего из 672 кристаллов NaI(Tl). Длина одного кристалла равнялась 15.7 радиационной длины.

В ходе эксперимента были выполнены следующие исследования:

- Измерение абсолютных дифференциальных сечений реакции перерядки $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ при импульсах налетающих π^- -мезонов от

547 до 750 МэВ/с.

- Измерение абсолютных полных и дифференциальных сечений реакции $\pi^-p \rightarrow \eta n$ при импульсах налетающих π^- -мезонов от порога 685 до 750 МэВ/с.

Научная новизна

- Впервые были систематически измерены дифференциальные сечения перезарядки $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ в практически полном угловом диапазоне при импульсах налетающих π^- -мезонов 547, 600, 645, 675, 690, 703, 720, 732, 747 МэВ/с. Статистические ошибки полученных результатов были менее 4%, систематическая ошибка 4%.
- Впервые были систематически измерены полные и дифференциальные сечения реакции $\pi^-p \rightarrow \eta n$ при импульсах 690, 703, 720, 732, 747 МэВ/с. Статистические ошибки полученных результатов были менее 5%, систематическая ошибка 5%.
- Разработан метод точной калибровки импульса пучка налетающих π^- -мезонов, использующий кинематические соотношения реакций $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ и $\pi^-p \rightarrow \eta n$.
- Впервые на основе полученных новых данных был обнаружен вклад D -волны в дифференциальные сечения реакции $\pi^-p \rightarrow \eta n$.

Положения, выносимые на защиту

1. Измерены дифференциальные сечения перезарядки $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ в практически полном угловом диапазоне при импульсах налетающих π^- -мезонов 547, 600, 645, 675, 690, 703, 720, 732, 747 МэВ/с. Статистические ошибки полученных результатов были менее 4%, систематическая ошибка 4%.
2. Измерены полные и дифференциальные сечения реакции $\pi^-p \rightarrow \eta n$ при импульсах 690, 703, 720, 732, 747 МэВ/с. Статистические ошибки полученных результатов были менее 5%, систематическая ошибка 5%.
3. Разработан метод точной калибровки импульса пучка налетающих π^- -мезонов при помощи кинематики реакций $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ и $\pi^-p \rightarrow \eta n$.

Практическая и научная ценность диссертации

1. Создана уникальная установка для измерения реакций с рождением нейтральных частиц в π^-p -взаимодействии, центральной частью которой является спектрометр γ -квантов "Crystal Ball". Выполнена энергетическая калибровка 672 кристаллов детектора "Crystal Ball" при помощи источника ^{137}Cs .
2. Для экспериментов на детекторе "Crystal Ball" создана новая система мониторинга пучка, состоящая из мониторингового счётчика ST и четырех вето-счётчиков. Сцинтиллятор счётчика ST просматривался с противоположных сторон двумя ФЭУ, сигнал с которых шёл на формирователи и схему совпадений. Этим достигалось подавление шумов и улучшение временного разрешения сигнала.
3. Существенно дополнена мировая база данных по дифференциальным сечениям реакции $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$ в области импульсов налетающих π^- -мезонов от 547 до 750 МэВ/с. Получено с хорошей точностью 185 новых экспериментальных точек. Статистические ошибки новых данных в несколько раз меньше ошибок предыдущих экспериментов.
4. Существенно дополнена мировая база данных по полным и дифференциальным сечениям реакции $\pi^-p \rightarrow \eta n$ в области импульсов налетающих π^- -мезонов от 685 до 750 МэВ/с, получено около 100 новых экспериментальных точек.
5. Разработаны программы для обработки и анализа экспериментальных данных и при их помощи проведена обработка экспериментальных данных при девяти импульсах налетающих π^- -мезонов.
6. Разработана программа для моделирования эксперимента методом Монте-Карло и рассчитаны аксептансы в полном угловом диапазоне для 2 реакций на 9 импульсах для H_2 и CH_2 мишеней.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены:

1. Конференция "Meson 2000 Workshop" (Cracow, Poland, May 19-23 2000).

2. Конференция по физике элементарных взаимодействий (ИТЭФ, Москва, декабрь 2001 г.).
3. The 9th Int. Conference on Hadron Spectroscopy (Protvino, Russia, August 25 - September 1 2001).
4. The 10th Int. Symposium on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (Beijing, China, August 29 - September 4 2004).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из восьми глав и заключения и содержит 130 страниц, 93 рисунка, 30 таблиц и 32 библиографические ссылки.

Содержание работы

В **Главе 1** формулируется основная цель данной работы. Приводится мотивация необходимости проведения данной работы. Описывается ситуация экспериментального изучения реакций $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ и $\pi^- p \rightarrow \eta n$.

В **Главе 2** приводится краткое описание ускорителя AGS и линии пучка C6, находящихся в Брукхэйвенской национальной лаборатории (BNL), на которых был выполнен данный эксперимент. Описывается методика измерения и экспериментальная установка (Рис. 1) для изучения реакций $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ и $\pi^- p \rightarrow \eta n$.

Описывается основной детектор установки – "Crystal Ball" (Рис. 2), спроектированный и построенный в SLAC (Stanford Linear Accelerator Center, US). "Crystal Ball" состоит из двух герметичных полусфер, каждая из которых состоит из 336 кристаллов NaI(Tl) и весит примерно 3 тонны. Всего в обеих полусферах 672 кристалла (Рис. 2). Описываются мишени, используемые в экспериментах, и детекторы для регистрации пучковых частиц.

В **Главе 3** рассмотрены электроника и система сбора данных. Для приёма данных с разных детекторов экспериментальной установки были собраны электронные схемы. Использовались электронные модули в стандартах CAMAC, NIM, VME.

Сигнал с фотоумножителя просматривающего кристалл поступал на ИН-модуль (Integrated and Hold module), где интегрировался и хранился. ИН-модуль был специально сконструирован для обеспечения линейности в большом динамическом диапазоне сигналов, позволяя получать линейность при измерении энергии от 10 кэВ до 1 ГэВ.

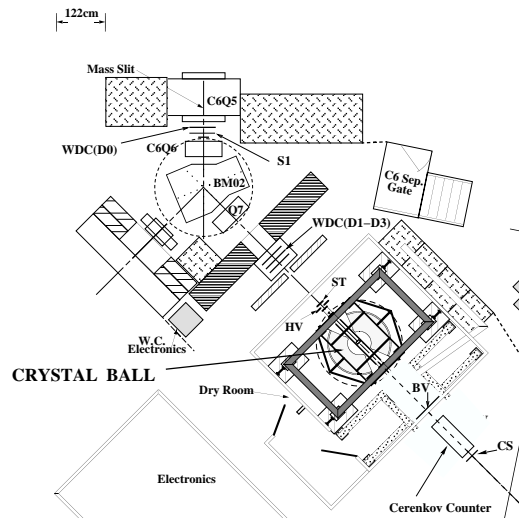
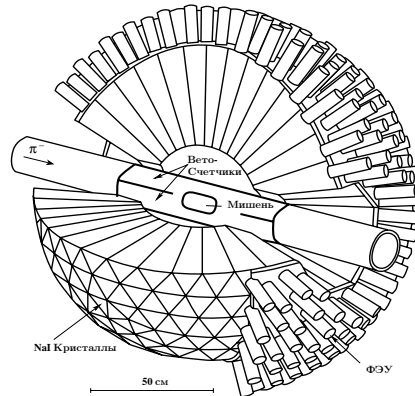


Рис. 1: Схема установки и расположение детектора "Crystal Ball" на линии C6 AGS в экспериментах 1998 и 2002 годов



672 отдельных кристаллов NaI(Tl),
 которые перекрывают 94% телесного угла,
 энерг. разрешение $\sigma/E = 2.7\% \times E^{-1/4}$ (E в ГэВ),
 $\varnothing_{\text{внеш.}} = 1.32\text{м}$, $\varnothing_{\text{внутр.}} = 0.50\text{м}$, $\sigma_{\theta} = 2^{\circ}/\sin\theta$

Рис. 2: Детектор "Crystal Ball". Мишень окружена четырьмя вето-счётчиками

В эксперименте использовались несколько типов триггеров (для регистрации нескольких типов событий):

1. "CB-calibraton" - СВ-калибровка.
2. "Scaler" - триггер в конце цикла, для чтения счётчиков.
3. "Pulser" - импульс генератора.
4. " π Beam" - триггер от частицы пучка.
5. "ToF" - для измерения времени пролёта.
6. "CB-All" - события с энерговыделением в детекторе "Crystal Ball" выше порога.
7. "CB-Charged" - события с заряженной частицей.
8. "CB-Neutral" - события только с нейтральными частицами.

Так как основной целью эксперимента E913 было измерение нейтральных частиц, образованных в результате π^-p -взаимодействия, то основным приоритетом имело событие "CB-Neutral". Все остальные события, использованные во время набора данных, были поделены (прорежены) с помощью электронного делителя импульсов (за исключением триггера "Scaler", который генерируется один раз в конце сброса пучка).

Число падающих на мишень π^- -мезонов (монитор), которое получалось совпадением сигналов с задающих сцинтилляционных счётчиков перед мишенью и сосчитанных за время цикла, считывалось также по триггеру "Scaler" в конце каждого цикла.

В **Главе 4** описывается процедура энергетической калибровки детектора "Crystal Ball". Линейность отклика детектора "Crystal Ball" была проверена на электронных пучках ещё во время его изготовления в лаборатории SLAC US. На Рис. 3 показана зависимость энергии, зарегистрированной в детекторе "Crystal Ball" от энергии падающего пучка электронов. Видна хорошая линейность во всём диапазоне энергий падающих электронов, к тому же в нашем эксперименте диапазон энергий рождающихся γ -квантов не превышает 1 ГэВ.

Предварительная калибровка перед экспериментом проводилась с помощью источника ^{137}Cs , помещённого в центр детектора "Crystal Ball". Снимался спектр сигналов с каждого кристалла.

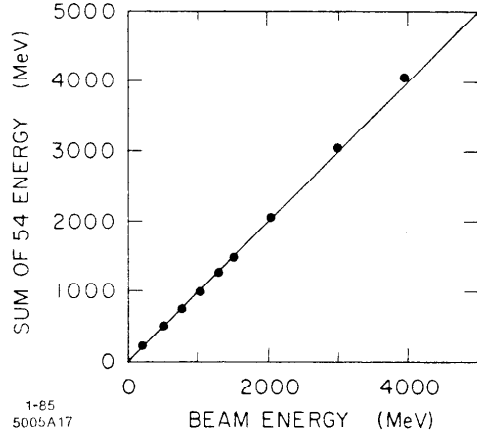


Рис. 3: Зависимость энергии, зарегистрированной в детекторе "Crystal Ball", от энергии падающего пучка электронов

Во время эксперимента калибровка проводилась с помощью восстановленных инвариантных масс π^0 -мезона и η -мезона. Полученные результаты калибровки совпали с результатами калибровки, полученными ранее в лаборатории SLAC US, где создавался детектор "Crystal Ball", и подтвердили линейность энергетической калибровки в нашем диапазоне энергий. Было прокалибровано 672 кристалла.

В **Главе 5** изложена процедура обработки. Описана программа анализа полученных данных, алгоритм поиска нужных событий (Рис. 4), расчёт акцептанса. Когда фотон попадает в детектор, он образует электромагнитный ливень, который, развиваясь, проникает в соседние кристаллы. Поэтому возникает задача нахождения группы кристаллов, в которых одним фотоном был рождён ливень и была выделена энергия. Такую группу кристаллов мы назовём кластером и полную энергию такого кластера, полученную как сумму энергий, выделившихся в кристаллах, принадлежащих этому кластеру, примем за измеренную энергию налетающего фотона. Программа, занимающаяся поиском кластеров, является частью программы "Analyser", и её целями является нахождение групп кристаллов, соответствующих отдельным фотонам, и определение энергий и направлений фотонов. Программа по определённому алгоритму находит кристалл с максимальной выделенной энергией и суммирует его энергию с энергией соседних кристаллов (Рис. 5), получая в результате энергии и направления γ -квантов, зарегистрированных детектором "Crystal Ball". Направление γ -кванта

Цикл №10258,
 Событие №445,
 Нейтральный триггер,
 $E_{cl1+cl2}^{tot} = 0.6622$ ГэВ,
 Инвариантная масса
 (1+2 кластера)
 $M_{\eta} = 0.55$ ГэВ.

	Кластер 1	Кластер 2
Полная энергия кластера (ГэВ)	0.4494	0.2128

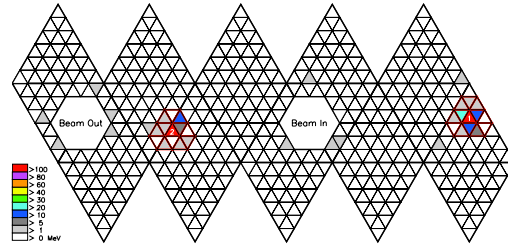


Рис. 4: Представлена развернутая карта расположения кристаллов и типичное событие реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$, зарегистрированное детектором "Crystal Ball", показанное на этой карте. Справа – кластер 1, слева – кластер 2. Белыми шестиугольниками на карте ("Beam in" и "Beam out") показаны отверстия для входа и выхода пучка налетающих частиц

рассчитывалось как направление от центра мишени до центра кластера. Потом программа, используя информацию о направлении и энергии

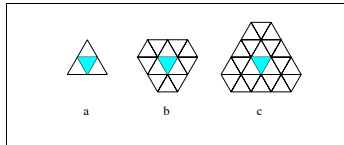


Рис. 5: Схема расположения: а) кристалла, в котором выделилась максимальная энергия, и трёх его ближайших соседей; б) кристалла и всех двенадцати касающихся его соседей; в) группа из 22 кристаллов

γ -квантов, восстанавливает инвариантные массы и 4-импульсы частиц, распавшихся на эти γ -кванты, и впоследствии заполняются гистограммы дифференциальных сечений.

В **Главе 6** уделено особое внимание системе мониторинга пучка налетающих π^- -мезонов линии Сб, т.к. для получения абсолютных дифференциальных сечений необходимо точно знать число налетающих π^- -мезонов.

В **Главе 7** приведены результаты измерений дифференциальных сечений процесса $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$, полученные при импульсах налетающих π^- -мезонов: $P_{\pi^-} = 547, 600, 645, 675, 690, 703, 720, 732$ и 747 МэВ/с на водородной мишени. Всего представлено 185 новых экспериментальных точек. Измерения также выполнены на полиэтиленовой мишени (см. Рис. 6).

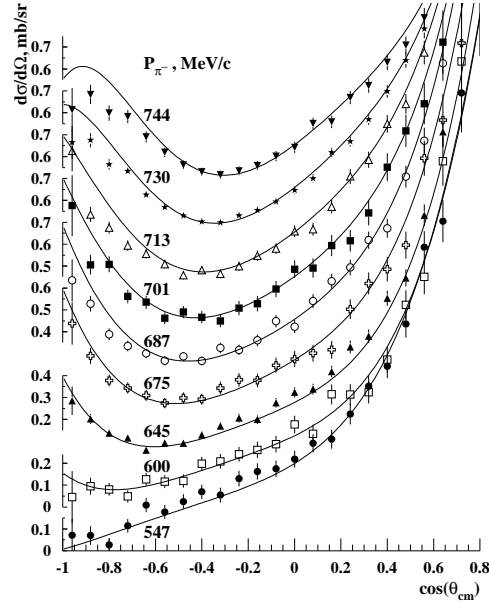


Рис. 6: Дифференциальные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ для импульсов налетающих π^- -мезонов в диапазоне от 547 до 750 МэВ/с, измеренные на полиэтиленовой мишени. Для каждого импульса использовалась своя шкала по оси ординат. Статистические ошибки составляют от 2 до 4% в зависимости от импульса и $\cos(\theta_{cm})$. Линиями показаны предсказания парциально-волнового анализа FA02

Сравнение дифференциальных сечений процесса $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ с предсказаниями парциально-волнового анализа FA02, выполненного группой из Университета им. Дж. Вашингтона (США), показало, что в целом с точностью 5% наблюдается согласие на большинстве измеренных импульсов. Только при импульсах налетающих π^- -мезонов выше

685 МэВ/с и $\cos(\theta_{\text{cm}}) < -0.45$ появляется расхождение. Это видно на Рис. 6 - 8.

На Рис. 7 чёрными точками показаны дифференциальные сечения в зависимости от импульса налетающих π^0 -мезонов для четырёх $\cos(\theta_{\text{cm}})$: -0.96, -0.88, -0.80, -0.72, а линией показаны предсказания парциально-волнового анализа FA02. Видны большие отличия экспериментальных данных от предсказаний парциально-волнового анализа на импульсах выше порога образования η -мезона.

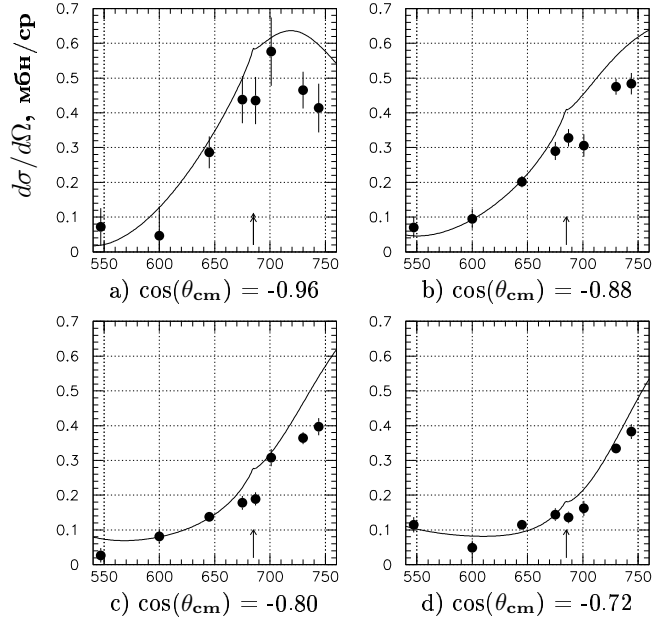


Рис. 7: Дифференциальные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ в зависимости от импульса налетающих π^- -мезонов для нескольких $\cos(\theta_{\text{cm}})$, соответствующих вылету π^0 -мезона назад в системе центра масс. Линией показаны предсказания парциально-волнового анализа FA02 для тех же значений $\cos(\theta_{\text{cm}})$. Стрелками отмечен импульс 685 МэВ/с (порог рождения η -мезона)

На Рис. 8 показано отношение дифференциальных сечений реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ к предсказаниям парциально-волнового анализа FA02 при 720 МэВ/с. Из этого рисунка видно, что при $\cos(\theta_{\text{cm}}) > -0.45$ есть хорошее согласие (с точностью 5 %) эксперимента с фазовым анализом. Но для $\cos(\theta_{\text{cm}}) < -0.45$ экспериментальные данные лежат ниже (до 20%) предсказаний парциально-волнового анализа FA02.

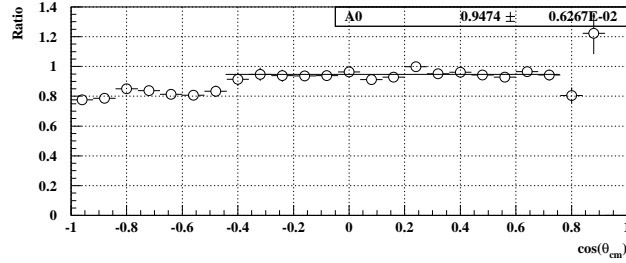


Рис. 8: Отношение дифференциальных сечений реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ при импульсе налетающих π^- -мезонов 720 МэВ/с, к предсказаниям парциально-волнового анализа FA02

В **Главе 8** приведены результаты измерений полных сечений процесса $\pi^- p \rightarrow \eta n$ при импульсах налетающих η -мезонов $P_{\pi^-} = 687, 701, 713, 732$ и 744 МэВ/с. Полные сечения, полученные в этой работе, находятся в согласии с предыдущими экспериментами, но значительно превосходят все опубликованные экспериментальные данные в статистической точности (см. Рис. 9).

Также в этой главе приведены результаты измерений дифференциальных сечений процесса $\pi^- p \rightarrow \eta n$ при импульсах налетающих η -мезонов 690, 703, 720, 732 и 747 МэВ/с (см. Рис. 10). Представлено около 100 новых экспериментальных точек.

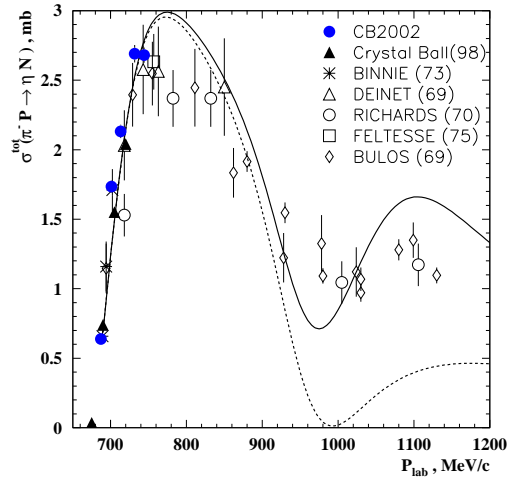
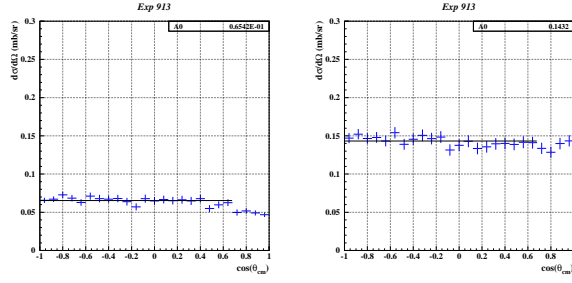
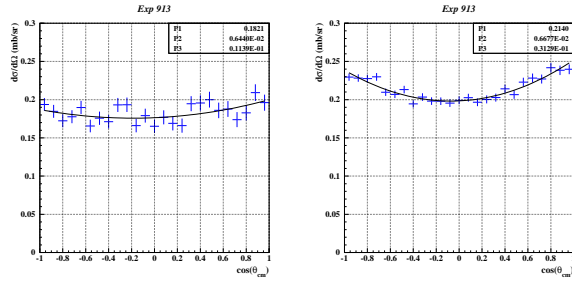


Рис. 9: Полные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$. Сравнение данных, полученных в 2002 году на полиэтилене (мишень C_2H_4), с данными, полученными в 1998 году на жидководородной мишени, а также с другими экспериментами, выполненными ранее в 1969-1975 годах. Сплошная линия соответствует вычислениям [8], включающим S - и P -волны. Пунктирная линия соответствует только S -волновому вкладу



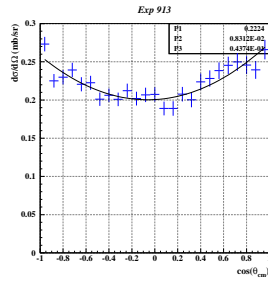
(a) $P_{\pi^-} = 690 \text{ МэВ}/c$

(b) $P_{\pi^-} = 703 \text{ МэВ}/c$



(c) $P_{\pi^-} = 720 \text{ МэВ}/c$

(d) $P_{\pi^-} = 732 \text{ МэВ}/c$



(e) $P_{\pi^-} = 747 \text{ МэВ}/c$

Рис. 10: Дифференциальные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$ при импульсах налетающих π^- -мезонов 690, 703, 720, 732 и 747 МэВ/с. Линией показан фит полиномами Лежандра

Полученные дифференциальные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$ были подогнаны функцией, являющейся полиномом Лежандра:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = a_0 + a_1 P_1(\cos \theta^*) + a_2 P_2(\cos \theta^*). \quad (1)$$

Коэффициенты разложения $d\sigma/d\Omega(\pi^- p \rightarrow \eta n)$ по полиномам Лежандра в зависимости от импульса налетающих π^- -мезонов показаны на Рис. 11. Из рисунка видно, что основной вклад в дифферен-

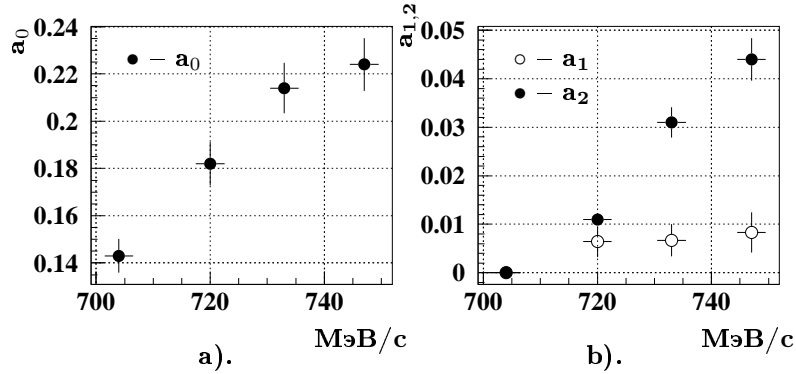


Рис. 11: (Рис. а) a_0 - коэффициент разложения по полиномам Лежандра нулевой степени (см. Уравнение 1), (Рис. б) a_1 коэффициент первой степени (белые точки) и a_2 коэффициент второй степени (чёрные точки)

циальные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$ даёт S -волна (коэффициент a_0). Вклад P -волны (коэффициент a_1) является незначительным, в то же время вклад D -волны (коэффициент a_2) возрастает с ростом импульса налетающих π^- -мезонов и достигает $\approx 20\%$ от вклада S -волны при $P_{\pi^-} = 747$ МэВ/с. Таким образом, обнаружен значительный вклад D -волны, который можно объяснить присутствием $D_{13}(1520)$ -резонанса ($P_{\pi^-} = 739$ МэВ/с) в этой области.

Также приведено сравнение полученных дифференциальных сечений реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$ с предсказаниями парциально-волнового анализа SP06. Обнаружено, что существует разногласие предсказаний парциально-волнового анализа SP06 с нашими данными. Предсказания

парциально-волнового анализа SP06 для дифференциальных сечений идут ниже на 15-20%, хотя по форме дифференциальных сечений наблюдается неплохое согласие. Из этого следует, что надо выполнить новый фазовый анализ с использованием новых данных.

Приведено сравнение дифференциальных сечений процесса $\pi^- p \rightarrow \eta n$ с работой Deinet *et al.* [6] при импульсах 720 и 747 МэВ/с (Рис. 12). Как видно, данные не согласуются в области вылета η -мезона назад в

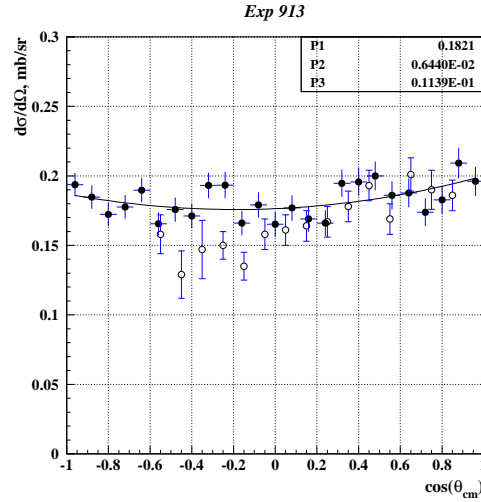


Рис. 12: Чёрными точками показаны результаты данной работы при 720 МэВ/с, а белые точки – результат работы Deinet *et al.* при 718 МэВ/с. Сплошная кривая – фит наших данных полиномом Лежандра второй степени

системе центра масс, а в области вылета вперед наблюдается согласие в пределах ошибок. Необходимо отметить, что точность наших результатов выше, чем у работы Deinet *et al.*

В **Заключении** подводятся итоги и обосновывается ценность новых данных.

Основные результаты следующие:

1. Получены с помощью детектора "Crystal Ball" новые прецизионные данные (статистические ошибки меньше 4%, систематические ошибки 4%) по дифференциальным сечениям реакции перезаряд-

ки $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ при импульсах налетающих π^- -мезонов: $P_{\pi^-} = 547, 600, 645, 675, 690, 703, 720, 732$ и 747 МэВ/с. Импульсный разброс налетающих π^- -мезонов в пучке составлял $\frac{\Delta P}{P}(\sigma) \approx 1\%$. Всего было получено 185 новых точек, что значительно превышает число экспериментальных точек для этой реакции, имевшихся до этого в мировой базе данных в этом импульсном интервале.

2. Результаты эксперимента для реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ не подтверждают предсказаний парциально-волнового анализа SAID FA02 в области углов вылета π^0 -мезона назад в системе центра масс для импульсов налетающих π^- -мезонов выше порога образования η -мезона 685 МэВ/с. Из этого следует вывод, что необходимо проведение нового парциально-волнового анализа с использованием новых данных по перезарядке и по образованию η -мезонов.
3. Получены полные и дифференциальные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$ при импульсах налетающих π^- -мезонов: $P_{\pi^-} = 690, 703, 720, 732$ и 747 МэВ/с, превышающие по точности все предыдущие эксперименты (статистические ошибки меньше 5%, систематические ошибки 5%). Всего представлено 100 новых экспериментальных точек по дифференциальным сечениям реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$.
4. Предсказания парциально-волнового анализа SP06 по дифференциальным сечениям реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$ систематически отличаются от наших данных примерно на 10–15% в меньшую сторону, хотя форма сечений совпадает. Это снова указывает на необходимость выполнить новый парциально-волновой анализ с использованием новых данных.
5. Впервые на основе новых полученных данных был обнаружен существенный рост вклада D -волны в области импульсов налетающего π^- -мезона от порога образования η -мезона 685 до 750 МэВ/с в дифференциальные сечения реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$, который можно объяснить присутствием $D_{13}(1520)$ -резонанса ($P_{\pi^-} = 739$ МэВ/с) в этой области.
6. В ходе проведения эксперимента проведена энергетическая калибровка 672 кристаллов NaI, входящих в детектор "Crystal Ball". Была создана, установлена и отлажена система мониторинговых пучковых счётчиков, используемая для определения числа падающих на мишень π^- -мезонов.

7. Усовершенствована программа "Analyser" для проведения обработки результатов эксперимента. Разработана программа для моделирования эксперимента методом Монте-Карло и рассчитаны акцептансы для 2 реакций на 9 импульсах для H_2 и CH_2 мишеней.

**Основные результаты диссертации опубликованы
в следующих работах**

1. A.V. Gridnev and N.G. Kozlenko, Eur. Phys. J. A **4** (1999) 187.
2. N.G. Kozlenko *et al.*, Acta Physica Polonica **31** (2000) 2239.
3. N.G. Kozlenko. Measurements of the differential cross sections of the reaction $\pi^- p \rightarrow \eta n$ using the Crystal Ball detector. Proc. The 9th Int. Conference on Hadron Spectroscopy (Protvino, Russia, 25 August-1 September 2001), AIP Conference Proceedings, vol. 619 (2002) 697.
4. Н.Г. Козленко и др. Измерение полных и дифференциальных сечений реакции $\pi^- p \rightarrow \eta n$ с помощью детектора Crystal Ball. Ядерная физика, т. **66** (2003) 112.
5. N.G. Kozlenko *et al.* Measurements of the total and differential cross sections of the reaction $\pi^- p \rightarrow \eta n$ using a polyethylene target and the Crystal Ball detector. Preprint PNPI-2542, Gatchina, 2003, 27 p.
6. V. Abaev, V. Bekrenev, N. Kozlenko *et al.* Study of $\pi^- p$ reactions with neutral particles in the final states using the Crystal Ball at AGS. Основные результаты научных исследований ПИЯФ 2000-2004, Гатчина, 2005, с. 95.
7. Н.Г. Козленко и др. Измерение дифференциальных сечений реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ на полиэтиленовой мишени с помощью детектора "Crystal Ball" в диапазоне импульсов налетающих π -мезонов от 547 МэВ/с до 750 МэВ/с. Препринт ПИЯФ-2684, Гатчина, 2006, 56 с.
8. V.V. Abaev, V.S. Bekrenev, N.G. Kozlenko *et al.* Experiments of Crystal Ball collaboration at BNL. PNPI, High Energy Physics Division. Main Scientific Activity 2002-2006, Gatchina, 2007, p. 118.

Список литературы

- [1] S.P. Kruglov, πN Newsletter **4** (1991) 14.
- [2] M.E. Sadler, in Proceedings of International Conference on Meson and Nuclei at Intermediate Energies, Dubna, 1994 (World Sci., Singapore, 1994) p. 3.
- [3] J.F. Martin *et al.*, Nucl. Phys. B **89** (1975) 253.
- [4] И.В. Лопатин, Ядерная Физика, **65**, N 2 (2002) 260-268.
- [5] V.V. Abaev, S.P. Kruglov, Z. Phys. A **352** (1995) 85-96.
- [6] W. Deinet *et al.*, Nucl. Phys. B **11** (1969) 495.
- [7] Chiu *et al.*, Phys. Rev. **156** 5 (1967) 1415-1426.
- [8] A.B. Gridnev and N.G. Kozlenko, Eur. Phys. J. A **4** (1999) 187.