

На правах рукописи

Мокеев Виктор Иванович

НУКЛОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ В РЕАКЦИЯХ ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ  
 $\pi^+\pi^-$  ПАР НА ПРОТОНЕ

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Москва — 2008



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Исследования спектра и структуры возбуждённых состояний нуклона  $N^*$  являются важной составной частью изучения эволюции динамики сильного взаимодействия от расстояний, отвечающих применимости квантовой хромодинамики (КХД) ( $< 10^{-15}$  см), до расстояний  $\sim$  размера адронов, на которых происходит адронизация кварков и глюонов. Это одна из фундаментальных проблем современной физики адронов.

Ярким проявлением динамики сильных взаимодействий в непертурбативной области является образование нуклонных резонансов  $N^*$ . Возбуждённые состояния нуклона  $N^*$  отчётливо наблюдаются в виде пиков в энергетических зависимостях сечений взаимодействия фотонов, электронов,  $\pi$ -,  $K$ -мезонов с нуклонами.

Совместный анализ данных по электромагнитным формфакторам основного и возбуждённых состояний нуклона необходим для установления динамики механизмов, формирующих барионы из кварков и глюонов, а также для изучения эволюции этих механизмов с расстоянием. Основное и возбуждённые состояния нуклона формируются единым гамильтонианом сильного взаимодействия. Следовательно, для изучения этого гамильтониана необходима информация о структуре как основного, так и полного спектра возбуждённых состояний нуклона. При этом каждое резонансное состояние даёт дополнительные данные о механизмах ответственных за формирование  $N^*$ .

Полученные из экспериментальных данных по процессам электророждения мезонов на нуклонах электромагнитные формфакторы  $N^*$  являются чисто феноменологической информацией. Для исследования фундаментальных механизмов формирования барионов из кварков и глюонов электромагнитные формфакторы нуклонных резонансов должны быть связаны с фундаментальными механизмами КХД.

В настоящее время наиболее перспективными являются два подхода, позволяющие связать феноменологическую информацию по электромагнитным формфакторам  $N^*$  с фундаментальной КХД. Это расчёты на решётках (lattice simulation) и подход, основанный на

формализме уравнений Дайсона — Швингера, дополненный методами, позволяющими связать амплитуды рассеяния кварков и одетые кварковые пропагаторы с электромагнитными формфакторами  $N^*$ .

Главной задачей феноменологического изучения структуры  $N^*$  в эксклюзивных реакциях электро рождения мезонов является определение их электромагнитных формфакторов в зависимости от виртуальности фотона  $Q^2$ . Электровозбуждение  $N^*$  исследуется в процессах, показанных на рис. 1.

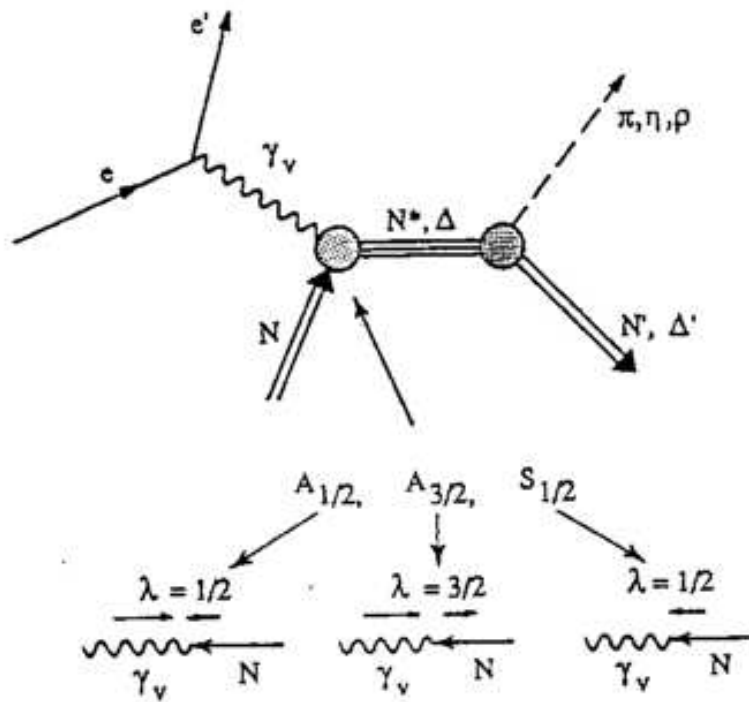


Рис. 1. Диаграммы, описывающие электровозбуждение и адронные распады  $N^*$ . Электромагнитные формфакторы  $A_{1/2}(Q^2)$ ,  $A_{3/2}(Q^2)$ ,  $S_{1/2}(Q^2)$  являются амплитудами перехода между состояниями  $\gamma_v p$  различной спиральности и  $N^*$ .

Для определения параметров  $N^*$  используются характерные особенности поведения резонансной амплитуды. Пропагатор приводит к резонансному поведению амплитуды каждого  $N^*$ . Угловые распределения продуктов распада  $N^*$  однозначно определяются  $d$ -функцией  $d_{\mu\nu}^j(\cos\theta_f)$ , зависящей от спина резонанса  $j$ . Эти особенности резонансной амплитуды позволяют выделить сигналы от  $N^*$  на фоне других процессов.

Таким образом, для определения параметров  $N^*$  необходимо разделить амплитуды резонансных и нерезонансных механизмов. Такое разделение может быть выполнено только используя феноменологические модели нерезонансных механизмов. В этой ситуации надёжная информация о параметрах  $N^*$  может быть получена лишь из совместного анализа основных эксклюзивных каналов фото и электророждения мезонов.

Для исследования электромагнитных формфакторов  $N^*$  необходимы измерения различных эксклюзивных каналов рождения мезонов на протоне реальными и виртуальными фотонами. Сечения этих эксклюзивных каналов изменяются в пределах от  $\sim 10^{-1}$  до  $\sim 10^1$  мкбн, что требует светимости установки  $> 10^{33}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>. При этом должны измеряться сечения с образованием до 4 адронов в конечном состоянии. Измерения эксклюзивных реакций подобной множественности требуют использования непрерывных пучков электронов. Измерения должны быть выполнены в диапазоне телесных углов эмиссии конечных частиц в системе центра масс близком к  $4\pi$ .

Детектор CLAS в Hall B Jefferson Lab обладает наилучшими возможностями для исследования электромагнитных формфакторов  $N^*$ . Эта установка использует непрерывный пучок электронов и тормозных фотонов ускорителя CEBAF с рекордными в мире величинами энергии, тока и поляризации пучка. Детектор CLAS обеспечивает перекрытие диапазона углов эмиссии конечных частиц в интервале  $\sim 4\pi$  в система центра масс  $\gamma_{rv}p$ . Детектор может регистрировать и различать  $e^-$ ,  $\pi$ ,  $\eta$ ,  $K$ ,  $p$ ,  $n$ ,  $d$  во всём перекрываемом кинематическом диапазоне. Непрерывный пучок электронов/фотонов делает возможным регистрацию многочастичного конечного состояния (до 6 частиц) в телесном угле  $\sim 4\pi$ . CLAS — единственный в мире детектор, способный в каждом событии определять все типы образовавшихся частиц и их четырёхимпульсы и, тем самым, измерять полную совокупность разрешённых эксклюзивных реакций под действием реальных и виртуальных фотонов на протоне и ядрах.

Исследования электромагнитных формфакторов  $N^*$  и поиск новых

типов барионных состояний является одним из ключевых направлений физической программы Hall B на детекторе CLAS. Коллаборацией CLAS получено свыше 90% мировых данных по процессам электророждения мезонов в резонансной области. Эти данные содержатся в CLAS Physics Data Base, созданной в коллаборации между Hall B - Jefferson Lab и НИИЯФ МГУ.

Каналы рождения одиночного  $1\pi$  и пар пионов  $2\pi$  вносят основной вклад в фото и электророждение мезонов на протонах в резонансной области дают дополнительную информацию о  $N^*$ .  $1\pi$  каналы чувствительны в основном к низколежащим  $N^*$  с массами менее 1,6 ГэВ. Многие из высоколежащих  $N^*$  ( $M > 1,6$  ГэВ) распадаются преимущественно с эмиссией  $\pi^-\pi^+$  пар. Сечения  $1\pi$  каналов падают с ростом  $W$  и при  $W > 1,7$  ГэВ выход  $2\pi$  канала становится максимальным из всех эксклюзивных каналов. Таким образом, исследования высоколежащих  $N^*$  ( $M > 1,6$  ГэВ) предпочтительны в канале рождения  $\pi^-\pi^+$  пар.

Современные кварковые модели, базирующиеся на  $SU_{sf}(6)$  симметрии, предсказывают значительное число резонансных состояний, не обнаруженных в экспериментах с электромагнитными и адронными пучками, т.н. “missing”  $N^*$ . Кварковые модели предсказывают преимущественные распады “missing”  $N^*$  с эмиссией пар пионов, в то время как их однопионные распады оказываются подавленными. Поэтому, изучение электророждения  $\pi^-\pi^+$  пар является весьма перспективным для поисков новых типов барионов, т.н. “missing” резонансов.

$1\pi$  и  $2\pi$  эксклюзивные каналы сильно связаны за счёт адронных взаимодействий в конечном состоянии. Сечение процесса  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  — второе по величине сечение после упругого  $\pi N$  рассеяния. Следовательно, независимо от того, в каком канале исследуются  $N^*$   $1\pi$  или  $2\pi$ , для извлечения их электромагнитных формфакторов необходимы амплитуды электророждения для обоих  $1\pi$  и  $2\pi$  лидирующих каналов. Эта информация абсолютно необходима для корректного учёта эффектов взаимодействий в конечных состояниях.

Каналы электророждения одиночных пионов являются в настоящее

время наиболее хорошо исследованными. Изучение электророждения  $N^*$  в  $2\pi$  каналах стало возможным только после появления экспериментальных результатов с детектора CLAS. Выполненные ранее эксперименты по изучению электророждения  $\pi^-\pi^+$  пар имеют почти на порядок величины худшее разрешение по  $W$  и  $Q^2$ , существенно меньший угловой аксептанс, что делает невозможным использование таких результатов для изучения  $N^*$ .

Определение электромагнитных формфакторов большинства  $N^*$ , поиск новых типов барионных состояний в реакциях электророждения  $\pi^-\pi^+$  пар на протоне являются главной целью настоящей диссертации.

### Основные цели работы.

- Измерения интегральных и полного набора неполяризованных дифференциальных сечений в реакциях рождения  $\pi^-\pi^+$  пар на протоне виртуальными фотонами. Сочетание непрерывного пучка электронов и  $4\pi$  детектора CLAS впервые позволило измерить полный набор дифференциальных сечений в  $\pi^-\pi^+p$  конечном адронном состоянии. В каждом из измеренных интервалов по  $(W, Q^2)$  получены 9 дифференциальных сечений:
  1. распределения по инвариантным массам пар конечных адронов  $d\sigma/dM_{\pi^-\pi^+}$ ,  $d\sigma/dM_{\pi^+p}$ ,  $d\sigma/dM_{\pi^-p}$ ;
  2. угловые распределения конечных адронов в системе центра масс  $d\sigma/d(-\cos\theta_{\pi^-})$ ,  $d\sigma/d(-\cos\theta_{\pi^+})$ ,  $d\sigma/d(-\cos\theta_p)$ ;
  3. угловые распределения по углам  $\alpha_i$  между парой плоскостей, образованных направлениями импульсов пар конечных адронов для 3 различных выборов пар из конечных частиц  $d\sigma/d\alpha_i$ .

Измерения выполнены в диапазоне масс конечной адронной системы  $1,3 < W < 2,1$  ГэВ, полностью перекрывающей область масс хорошо установленных  $N^*$ , и в широкой области виртуальностей фотона от 0,2 до 1,5 ГэВ<sup>2</sup>. Полученные в настоящей диссертации данные по сечениям реакции  $\gamma_v p \rightarrow \pi^-\pi^+p$  являются единственными в мире,

из которых возможно получить информацию о параметрах  $N^*$  в  $2\pi$  эксклюзивном канале.

- Создание феноменологической модели описания рождения  $\pi^-\pi^+$  пар на протоне реальными и виртуальными фотонами с целью определения электромагнитных формфакторов  $N^*$  из совместного описания всех измеренных сечений. Первые экспериментальные данные по полному набору дифференциальных сечений реакции  $\gamma_v p \rightarrow \pi^-\pi^+p$  сделали возможным, исходя из экспериментальных данных, определить основные механизмы, вносящие вклад в рождение  $\pi^-\pi^+$  пар в области энергий возбуждения  $N^*$  и виртуальностей фотона до  $1,5 \text{ ГэВ}^2$ . В развитом подходе механизмы рождения  $\pi^-\pi^+$  пар устанавливаются на основе их характерных проявлений в дифференциальных сечениях. Механизмы, не имеющие структурных особенностей, в дифференциальных сечениях устанавливались из корреляции форм отвечающих им сечений в различных измеренных наблюдаемых. В созданной модели было достигнуто хорошее описание всех имеющихся мировых данных и данных CLAS по сечениям фото- и электророждения  $\pi^-\pi^+$  пар на протонах при  $Q^2 < 1,5 \text{ ГэВ}^2$ . Таким образом, развитый подход может использоваться для определения параметров  $N^*$  из условия наилучшего воспроизведения всей совокупности измеренных сечений.
- Определение электромагнитных формфакторов  $N^*$  при виртуальностях фотона  $Q^2$  от 0.2 до  $1.5 \text{ ГэВ}^2$  для большинства хорошо установленных состояний. Изучение канала  $\gamma_v p \rightarrow \pi^-\pi^+p$  впервые позволяет установить электромагнитные формфакторы высоколежащих  $N^*$  с массами свыше  $1,6 \text{ ГэВ}$ . Большинство таких состояний распадается преимущественно с эмиссией пар пионов. Данные по  $Q^2$  зависимостям электромагнитных формфакторов для большинства возбужденных состояний нуклона имеют ключевое значение для определения фундаментальных механизмов сильного взаимодействия в непертурбативной области, ответственных за



формирование  $N^*$  из кварков и глюонов.

- Определение электромагнитных формфакторов  $N^*$  в совместном анализе данных  $1\pi$  и  $2\pi$  эксклюзивных каналов. Совместное описание всех наблюдаемых в основных  $1\pi$  и  $2\pi$  каналах электророждения мезонов на протонах с одинаковыми в обоих каналах электромагнитными формфакторами резонансов обеспечивает проверку надёжности феноменологического разделения резонансных и нерезонансных амплитуд и извлеченных формфакторов  $N^*$ .
- Определение сечений различных механизмов реакции  $\gamma_{rv}p \rightarrow \pi^- \pi^+ p$ . Полученная информация важна для исследований  $N^*$  в совместном анализе данных основных эксклюзивных каналов рождения мезонов на протонах. Совместный анализ основных эксклюзивных каналов должен быть выполнен в формализме связанных каналов для последовательного учёта эффектов адронных взаимодействий в конечном состоянии. В настоящее время теоретический центр Jefferson Lab развивает подобный подход.
- Поиск новых типов барионов в электророждении  $\pi^- \pi^+$  пар на протоне. Спектроскопическая информация о  $N^*$ , дополненная данными CLAS по  $Q^2$ -эволюции электромагнитных формфакторов  $N^*$ , свидетельствует о том, что  $SU_{sf}(6) \times O(3)$  может быть хорошим приближением для симметрии гамильтониана, описывающего формирование  $N^*$ . В рамках этой симметрии предсказывается значительное число  $N^*$ , до сих пор не обнаруженных в экспериментах как с реальными и виртуальными фотонами, так и с пучками мезонов. Эти состояния получили название “missing” резонансов.  $2\pi$  канал обладает большими потенциальными возможностями для обнаружения “missing” резонансов, т.к. согласно ожиданиям кварковых моделей “missing”  $N^*$  должны преимущественно распадаться с испусканием  $\pi^- \pi^+$  пар. Исследования процессов электророждения  $\pi^- \pi^+$  пар обладают дополнительными возможностями сравнительно с изучением

фоторождения при  $Q^2 = 0$ . Изменяя виртуальность фотона в процессах электророждения, можно исследовать кинематические области с существенно различным отношением резонансного сигнала к нерезонансным процессам и выбрать диапазон  $Q^2$  оптимальный для наблюдения “missing”  $N^*$ .

#### Научная новизна и практическая ценность работы.

Детальная информация о  $Q^2$ -эволюции электромагнитных формфакторов  $N^*$  является абсолютно необходимой для изучения фундаментальных механизмов сильного взаимодействия в непертурбативной области, ответственных за формирование  $N^*$  из кварков и глюонов. Реакция  $\gamma_{rv}p \rightarrow \pi^- \pi^+ p$  чувствительна к большинству хорошо установленных  $N^*$  и представляет собой предпочтительный эксклюзивный канал для изучения высоколежащих  $N^*$  с массами  $> 1,6$  ГэВ. Эта реакция также очень перспективна для поиска новых типов барионных состояний.

В диссертации получены первые и до сих пор единственные в мире данные по полному набору интегральных и дифференциальных неполяризованных сечений реакции  $\gamma_v p \rightarrow \pi^- \pi^+ p$ . Данные получены в области  $1,3 < W < 2,1$  ГэВ и при виртуальностях фотона от 0,2 до 1,5 ГэВ<sup>2</sup>. Достигнуты рекордные разрешения по  $W$ ,  $Q^2$  и кинематическим переменным конечного адронного состояния.

В диссертации развита феноменологическая модель описания реакции  $\gamma_{rv}p \rightarrow \pi^- \pi^+ p$  в области  $W < 3,0$  ГэВ и виртуальностей фотона  $0,2 < Q^2 < 1,5$  ГэВ<sup>2</sup> [8–13, 15–19, 22–30, 33–40, 42, 43]. В рамках этого подхода установлены основные механизмы фото- и электророждения  $\pi^- \pi^+$  пар в резонансной области, проявляющиеся в поведении интегральных и дифференциальных сечений. Развита модель хорошо воспроизводит как данные CLAS, так и имеющиеся мировые данные по процессам фото- и электророждения  $\pi^- \pi^+$  пар на протонах. Достигнуто надёжное феноменологическое разделение резонансных и нерезонансных механизмов. Это подтверждается в совместном анализе  $N^*$  в  $1\pi$  и  $2\pi$  эксклюзивных каналах [37], а также в хорошем описании угловых распределений  $d\sigma/d\alpha_i$  с феноменологическими параметрами модели,

определёнными из наилучшего описания 6 других дифференциальных сечений [42, 43]. Таким образом, созданная феноменологическая модель позволяет определить электромагнитные формфакторы  $N^*$  из условия наилучшего описания полного набора измеренных дифференциальных и интегральных сечений реакции  $\gamma_{rv}p \rightarrow \pi^- \pi^+ p$ . Созданная модель является единственным в мире подходом для изучения  $N^*$  в электророждении  $\pi^- \pi^+$  пар.

Впервые из анализа данных CLAS по электророждению  $\pi^- \pi^+$  пар на протоне в рамках модели, развитой в диссертационной работе, установлены сигналы от возможного нового барионного состояния  $3/2^+(1720)$  [27]. Спектроскопические квантовые числа, ширины адронных распадов на конечные состояния  $\pi\Delta$ ,  $\rho p$  и электромагнитные формфакторы состояния-кандидата определены из наилучшего описания данных CLAS по реакции  $\gamma_v p \rightarrow \pi^- \pi^+ p$ .

Впервые получены данные по электромагнитным формфакторам большинства возбуждённых состояний нуклона с массами  $< 2,0$  ГэВ при виртуальностях фотона от 0,5 до 1,5 ГэВ<sup>2</sup>. Для состояний P11(1440) и D13(1520) впервые получены данные об их электромагнитных формфакторах при малых виртуальностях  $0,2 < Q^2 < 0,6$  ГэВ<sup>2</sup> [41, 42]. Анализ данных по  $Q^2$ -зависимостям электромагнитных формфакторов  $N^*$  позволил впервые исследовать эволюцию с расстоянием активных степеней свободы в структуре  $N^*$ . Обнаружен существенный вклад мезон-барионного облака в структуру  $N^*$  на больших расстояниях, отвечающих виртуальностям фотона  $Q^2 < 0,6$  ГэВ<sup>2</sup>. В то же время, при  $Q^2 > 1,0$  ГэВ<sup>2</sup> поведение электромагнитных формфакторов  $N^*$  хорошо согласуется с предположением о преимущественном взаимодействии фотонов с 3-кварковыми конфигурациями.

#### Апробация работы.

Достоверность экспериментальных результатов полученных в диссертации обеспечивается уникальными возможностями детектора CLAS в сочетании с непрерывным пучком ускорителя CEBAF, что позволяет в каждом событии надёжно идентифицировать все образовавшиеся

частицы и определять их 4-импульсы. Тем самым оказывается возможным выполнить детальные измерения электророждения конечного многочастичного состояния  $p\pi^-\pi^+$ , недоступные в выполненных ранее экспериментах на ускорителях с импульсными пучками и детекторами малого акцептанса. Достоверность результатов феноменологического анализа обеспечивается развитыми оригинальными современными методами анализа данных. Они позволяют из детальной информации по сечениям эксклюзивного электророждения пар заряженных пионов определить основные механизмы канала реакции  $\gamma_{r,v}p \rightarrow p\pi^+\pi^-$ , обеспечить разделение резонансных и нерезонансных частей сечения и извлечь электромагнитные формфакторы  $N^*$  из наилучшего описания всей совокупности измеренных наблюдаемых. Наличие структуры в сечениях рождения пар пионов при  $W \sim 1.7$  ГэВ подтверждено данными ELSA и GRAAL по сечениям фоторождения пар нейтральных пионов. Данные ELSA подтвердили впервые обнаруженные в диссертационной работе вклады изобарных каналов  $\pi^+D^013(1520)$  и  $\pi^+F^015(1685)$ ,  $\pi^-P^{++}33(1640)$

Полученные в диссертации результаты могут найти применения в работе ведущих российских и зарубежных центров, выполняющих исследования структуры адронов: НИИЯФ МГУ, ИЯИ РАН, РНЦ ИТЭФ, ОИЯИ, С-Петербургский ИЯИ, MAMI (Mainz), ELSA (Bonn), INFN of Genova, LNF at Frascati, BEPS(China), Argonne National Lab, Jefferson Lab, University of Connecticut, University of South Carolina, Rensselaer Polytechnic Institute, the George Washington University, University of New Hampshire, Florida State University, University of Virginia.

Материалы диссертации апробированы на семинарах НИИЯФ МГУ, были многократно доложены на совещаниях Международной CLAS Collaboration, представлены в Report on Long Range Plan implementation prepared by National Science Advisory Committee for DOE and NSF (USA), доложены на совещаниях Nuclear Physics Division of American Physical Society 2006,2007, ANL  $N^*$  Workshop 2005, Jefferson Lab  $N^*$  Workshop 2006, Jefferson Lab User Group Meeting 2008 а также на международных конференциях:

1. ECT\* / TJNAF Workshop on  $N^*$  Physics and Nonperturbative QCD,

- Trento, Italy, 18-29 May 1998;
2. International Conference on Quark Nuclear Physics (QNP2000), Adelaide, Australia, 21-25 February 2000;
  3. NSTAR2000: The Physics of Excited Nucleons, Newport News, Virginia, 16-19 Feb 2000;
  4. 15th International Workshop on High-Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP 2000), Tver, Russia, 14-20 Sep 2000;
  5. 16th International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP 2001), Moscow, Russia, 6-12 Sep 2001;
  6. IX International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei Moscow 2001;
  7. NSTAR2001: Workshop on the Physics of Excited Nucleons, Mainz, Germany, 7-10 March 2001;
  8. 9th International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2001), Protvino, Russia, 25 Aug - 1 Sep 2001;
  9. 2nd International Symposium on the Gerasimov-Drell-Hearn Sum Rule and the Spin Structure of the Nucleon (GDH 2002), Genoa, Italy, 3-6 Jul 2002;
  10. 31st International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2002), Amsterdam, The Netherlands, 24-31 Jul 2002;
  11. NSTAR 2002 Workshop on the Physics of Excited Nucleons, Pittsburgh, Pennsylvania, 9-12 Oct 2002;
  12. 11th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, 21-27 Aug 2003;
  13. 17th International IUPAP Conference on Few Body Problems in Physics, Durham, NC, USA, 5-10 June 2003;
  14. NSTAR2004 Workshop, March 24-27 2004, Grenoble, France;

15. International Workshop on the Physics of Excited Baryons (NSTAR 05), Tallahassee, Florida, 10-15 Oct 2005;
16. Particles and Nuclei International Conference (PANIC 05), Santa Fe, New Mexico, 24-28 Oct 2005;
17. 2nd Meeting of the APS Topical Group on Hadronic Physics, Nashville, Tennessee, 22-24 Oct 2006;
18. Photonuclear Gordon Conference in New Hampshire, USA, August 1-5 2006;
19. XI International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei Moscow, September 21-24, 2006;
20. Workshop on the Physics of Excited Nucleons (NSTAR 2007), Bonn, Germany, 5-8 Sep 2007.
21. Международные совещания по спектроскопии и структуре атомного ядра (1997, 1998, 2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008).

#### Публикации.

Результаты опубликованы в 43 работах, список которых приводится в конце автореферата.

#### Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 235 страниц текста, 98 рисунков, 10 таблиц. Библиография содержит 145 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, обсуждается значимость исследований структуры нуклонных резонансов  $N^*$  для решения одной из ключевых задач современной физики адронов: изучение эволюции динамики сильного взаимодействия с расстоянием от размеров адронов, отвечающих конфайнменту до расстояний  $< 10^{-15}$  см, где применима КХД. Формирование нуклонных резонансов обусловлено фундаментальными механизмами сильного взаимодействия

в непертурбативной области, связанными с КХД. Единый гамильтониан описывает формирование как основного состояния нуклона так и всего спектра возбужденных состояний  $N^*$ . Поэтому даже наиболее детальной информации о структуре основных состояний нуклона оказывается недостаточно для понимания динамики сильного взаимодействия, обеспечивающей формирование нуклонов из кварков и глюонов. Она должна быть дополнена данными о структуре возбужденных состояний нуклона  $N^*$ . Детектор CLAS в Jefferson LAB открыл качественно новые возможности для изучения структуры  $N^*$ . Сочетание непрерывного пучка электронов с рекордными в мире энергиями, током, поляризацией и детектора CLAS с аксептансом близким к  $4\pi$  впервые сделало возможным исследовать большинство каналов электророждения мезонов на протонах. Каналы электророждения одиночных  $1\pi$  и пар пионов  $2\pi$  являются основными каналами электророждения мезонов в резонансной области. Эти два канала сильно связаны друг с другом адронными взаимодействиями в конечных состояниях. Совместный анализ этих каналов обеспечивает наиболее убедительную проверку надежности разделения резонансных и нерезонансных амплитуд.

В главе 1 описаны экспериментальная установка — детектор CLAS и ускоритель электронов непрерывного действия CEBAF.

В разделе 1.1 описан ускоритель электронов непрерывного действия CEBAF. В настоящее время большая часть накопленных знаний о структуре адронов получена, в основном, в инклюзивных и полуинклюзивных реакциях. Данные ограничены электромагнитной структурой нуклона и нижними возбужденными состояниями протона. Большинство действующих в мире электронных ускорителей имеют фактор заполнения  $<$  нескольких %. Они оборудованы магнитными спектрометрами, которые вместе с высоким энергетическим разрешением  $dp/p \sim 10^{-4}$  перекрывают малый телесный угол ( $10^{-3}4\pi$ ) и малую область импульсов образовавшихся в реакции частиц  $\Delta p/p \sim 10^{-1}$ . Эти характеристики позволяют проводить прецизионные измерения в очень ограниченной кинематической области, но исключают регистрацию многих частиц в конечном состоянии с перекрытием большого углового

Таблица 1. Основные параметры непрерывного пучка электронов ускорителя CEBAF

Параметр	Величина
Максимальная энергия	6,75 ГэВ
Максимальный ток	200 мкА
Фактор заполнения	100%
Стабильность энергии пучка, $\sigma_E/E$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Диапазон энергий пучка меченых фотонов	$0,8 \div 5,5$ ГэВ
Поляризация	80 %

диапазона. Ускоритель электронов непрерывного действия в Jefferson Lab имеет рекордные в мире параметры непрерывного пучка электронов (табл. 1). Сочетание непрерывного пучка электронов и детектора CLAS в Hall B at Jefferson Lab с акцептансом близким к  $4\pi$  делает эту установку уникальной, с наилучшими в мире возможностями для исследований эксклюзивных реакций на протонах и ядрах как в процессах фото- так и электророждения.

В разделе 1.2 описан детектор CLAS. Детектор CLAS, находящийся в Hall B, был спроектирован для экспериментов, в которых конечное адронное состояние характеризуется несколькими частицами и светимость в которых ограничена возможностями надежной реконструкции треков, быстродействием системы обработки данных в реальном времени, плотностью мишени или случайным фоном. На детекторе CLAS выполняются эксперименты по детальному исследованию всех открытых эксклюзивных каналов на протонах и ядрах под действием реальных и виртуальных фотонов.

Детектор CLAS — это тороидальный магнитный спектрометр, в котором магнитное поле генерируется шестью сверхпроводящими сердечниками магнита (рис. 2) с напряженностью от 0.5 до 5 Т. Система регистрации частиц состоит из дрейфовых камер для реконструкции треков заряженных частиц, черенковских счётчиков для идентификации электронов, сцинтилляционных счётчиков (система времени пролёта) для триггера и измерения времени пролёта частиц и электромагнитного ливневого калориметра для регистрации ливневых фотонов, электронов, а также нейтронов с эффективностью 40–60%. Электромагнитный



калориметр наряду с черенковскими счетчиками обеспечивает высокую степень разделения электронов и отрицательно заряженных пионов (табл. 2). Шесть секторов детектора расположенных сферически симметрично вокруг линии пучка работают независимо и перекрывают полный азимутальный угол  $\varphi$  за исключением мертвых зон, образованных сердечниками магнита.

Дрейфовые камеры служат для измерения импульсов заряженных частиц. Трековая система детектора CLAS состоит из 18 многопроволочных дрейфовых камер сгруппированных в три зоны в каждом из шести секторов. Первая зона находится в слабом магнитном поле (0.5 Т) внутри тороидального магнита, вторая зона - зона сильного магнитного поля (5.0 Т) расположена между кольцами тороидального магнита, третья зона расположена за пределами верхней границы магнита.

В экспериментах по рассеянию электронов выход отрицательно заряженных пионов сильно растёт с увеличением угла рассеяния и становится доминирующим в большей части фазового объема, покрываемого детектором CLAS. Поэтому становится актуальной задача разделения сигналов от электронов и отрицательно заряженных пионов. Черенковский счетчик детектора CLAS является одним из основных элементов для решения этой задачи. Черенковские счётчики наполнены перфлорбутаном  $C_4F_{10}$ , который имеет коэффициент преломления равный 1.00153.

Восемь модулей электромагнитного ливневого калориметра детектора CLAS выполняют следующие функции:

1. Детектирование электронов с энергией свыше 0.5 ГэВ и формирование триггера.
2. Регистрация фотонов с энергией свыше 0.2 ГэВ, восстановление 4-импульсов  $\pi^0$  и  $\eta$  мезонов по измеренным фотонам из их  $2\gamma$  распадов.
3. Регистрация нейтронов с эффективностью 40–60% , с разделением между фотонами и нейтронами с помощью времени-пролётной методики.

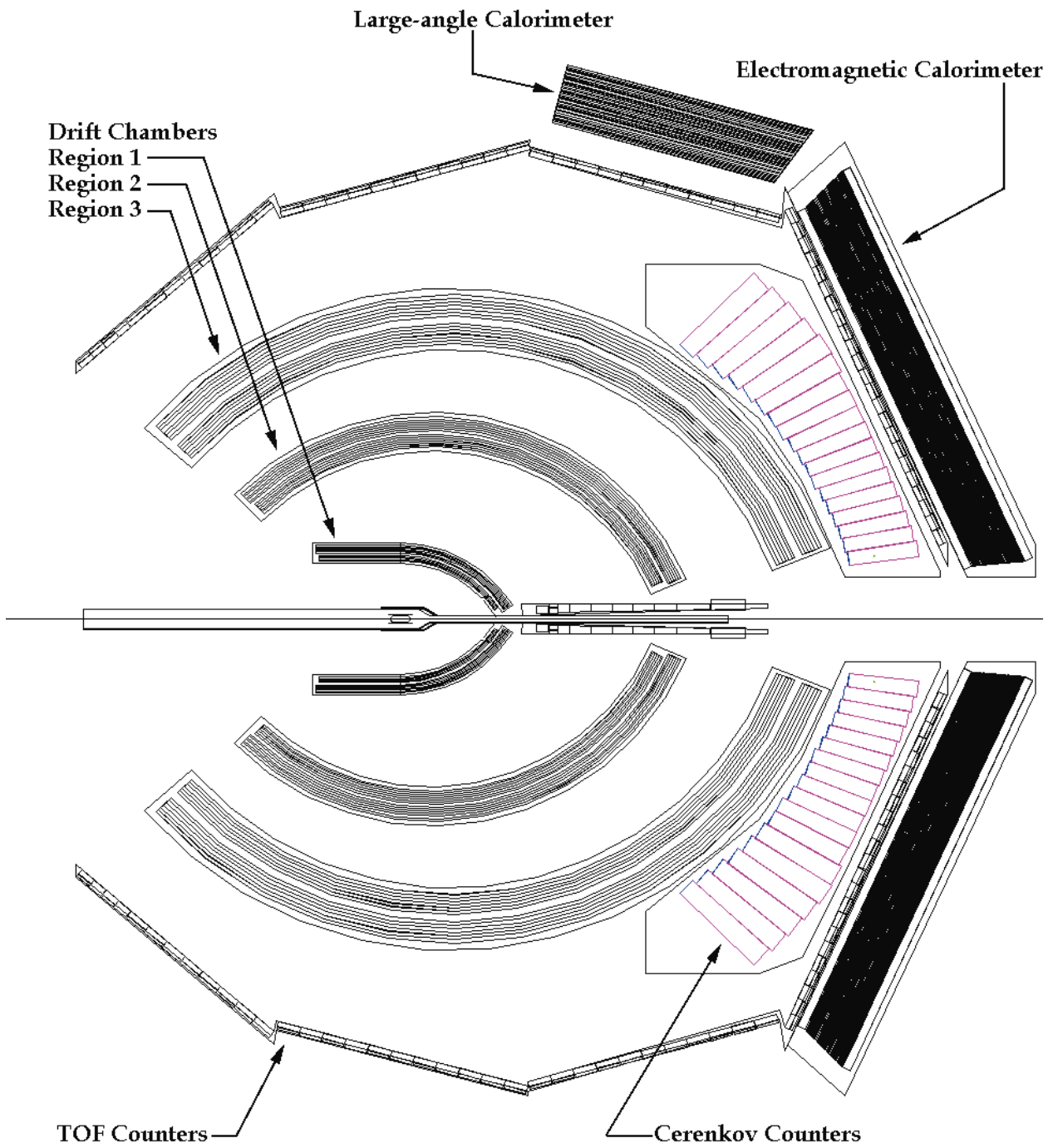


Рис. 2. Схема детектора CLAS, в разрезе по линии пучка.

В состав калориметра входят сектора для регистрации ливневых частиц и нейтронов с углами эмиссии в лаб. системе  $> 45^\circ$ . Разработка и создание этой части калориметра на большие углы были выполнены при активном и непосредственном участии автора и описаны в [2–4] и настоящей диссертационной работе.

Система сцинтилляционных счётчиков детектора CLAS позволяет измерить времена пролёта заряженных частиц и идентифицировать их. Эта система имеет высокое временное разрешение  $\sigma \sim 150$  пс. Подобное разрешение необходимо для пион–каонного разделения при импульсах до 2 ГэВ. Эта система может работать при высокой скорости отсчетов, которая при светимости  $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  может достигать 100 кГц.

Основные параметры детектора CLAS приведены в табл. 2

В главе 2 рассмотрены методы определения дифференциальных и интегральных сечений электророждения пар заряженных пионов на протонах из экспериментальных данных полученных на детекторе CLAS. В настоящей диссертации представлены данные двух экспериментов CLAS Collaboration по исследованию электророждения пар заряженных пионов на протонах: E-94-005 и E-93-006. В эксперименте E-94-005 исследовалось рождение  $\pi^-\pi^+$ -пар на протоне при  $W < 1.6$  ГэВ и  $Q^2$  от 0.2 до 0.6 ГэВ<sup>2</sup> с высоким разрешением по  $Q^2$ , составившим 0.05 ГэВ<sup>2</sup>. В этом эксперименте изучались низколежащие возбуждённые состояния нуклона с массами  $< 1.6$  ГэВ при малых виртуальностях фотона. В эксперименте E-93-006 перекрывалась вся область энергий возбуждения установленных в настоящее время резонансных состояний:  $1.4 < W < 2.1$  ГэВ. В этом эксперименте реакции  $ep \rightarrow e'p'\pi^+\pi^-$  исследовались в диапазоне виртуальностей фотона: от 0.5 до 1.5 ГэВ<sup>2</sup> с умеренным разрешением по  $Q^2 \sim 0.5$  ГэВ<sup>2</sup>.

В разделе 2.1 описана процедура отбора событий для исследуемого эксклюзивного канала. Триггер в детекторе срабатывал при совпадении сигналов в черенковском счетчике и электромагнитном калориметре. С ростом угла рассеяния выход  $\pi^-$  мезонов сильно возрастает и значительно превышает (до 50 раз) выход электронов. В связи с этим важно выделить события с рассеянными электронами, устранив фон от  $\pi^-$ ,

Таблица 2. Основные характеристики детектора CLAS

Параметры	Диапазон изменения
Кинематические области, доступные для измерений	<p>Угол эмиссии заряженных частиц в л.с.  <math>8^\circ &lt; \theta &lt; 140^\circ</math></p> <p>Модули импульсов заряженных частиц в л.с.  <math>p \geq 0.2</math> ГэВ</p> <p>Угол эмиссии фотонов в л.с.  <math>8^\circ &lt; \theta &lt; 45^\circ</math> (в 4 секторах)  <math>8^\circ &lt; \theta &lt; 75^\circ</math> (в 2 секторах)</p> <p>Энергия фотона в л.с.  <math>E_\gamma &gt; 0.1</math> ГэВ</p>
Разрешения	<p>по импульсам заряженных частиц  <math>\sigma_p/p \approx 0.5\%</math> (<math>\theta &lt; 30^\circ</math>)  <math>\sigma_p/p \approx 1.2\%</math> (<math>\theta &gt; 30^\circ</math>)</p> <p>по полярному углу  1 мрад</p> <p>по азимутальному углу  4 мрад</p> <p>временные, для заряженных частиц  100–250 псек</p> <p>по энергии фотонов  <math>\sigma_E/E \simeq 10\%/\sqrt{E}</math></p>
Идентификация частиц	<p>разделение <math>\pi/K</math>  <math>p &lt; 2</math> ГэВ</p> <p>разделение <math>\pi/p</math>  <math>p &lt; 3</math> ГэВ</p> <p>смешивание <math>e^-/\pi^-</math>  <math>&lt; 10^{-3}</math></p>
Светимость	<p>для электронного пучка  <math>10^{34}</math> см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup></p> <p>для фотонного пучка  <math>5 \cdot 10^{31}</math> см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup></p>
Система обработки информации	<p>Скорость набора событий  8 кГц</p> <p>данных  50 Мб/с</p>

ошибочно идентифицированных как электроны. Эта задача решается с использованием двух элементов детектора CLAS: электромагнитного калориметра и черенковского счётчика. Сочетание этих двух методов отбора событий позволяет подавить ошибочно идентифицированные как электроны  $\pi^-$  мезоны в несколько сотен раз. Тем самым обеспечивается надежная идентификация рассеянных электронов.

На следующем шаге анализа событий выполнялась идентификация положительно заряженных частиц. Для идентификации протонов и  $\pi^+$  мезонов использовалась корреляция между импульсами частиц, определенными с помощью дрейфовых камер, и временем пролёта частиц, определённым сцинтилляционными счетчиками. В результате были отобраны события, содержащие рассеянный электрон, протон и  $\pi^+$  мезон.

Окончательная идентификация реакции  $ep \rightarrow e'p'\pi^+\pi^-$  осуществлялась, используя метод недостающей массы. После выделения событий с  $e' \pi^+ p$  в конечном состоянии, вычислялись квадраты недостающей массы  $M_{\pi^-X}^2$ . Отбирались события лежащие в области пика, отвечающего квадрату массы  $\pi^-$  мезона. Тем самым отбирались события эксклюзивного канала электророждения пар заряженных пионов на протонах, отвечающие всем ограничениям налагаемым сохранением энергии-импульса.

В разделе 2.2 описана процедура определения дифференциальных и интегральных сечений. Кинематика конечного состояния  $\pi^-\pi^+p$  однозначно описывается набором 5 переменных, выбранных следующим образом:

- 2 инвариантные массы  $\pi^+\pi^-$  и  $\pi^+p$ ;
- углы вылета  $\pi^-$  в системе центра масс «виртуальный фотон-протон»  $\theta_{\pi^-}, \phi_{\pi^-}$ ;
- УГОЛ  $\alpha_{[\pi^-p_i][\pi^+p_f]}$  между двумя плоскостями, образованными импульсами пар конечных адронов  $\pi^-p$  и  $\pi^+\pi^-$ .

Угловые кинематические переменные показаны на рис. 3.

Для извлечения сечений вся кинематически доступная область разбивалась на семимерные ячейки, составленные пятью указанными

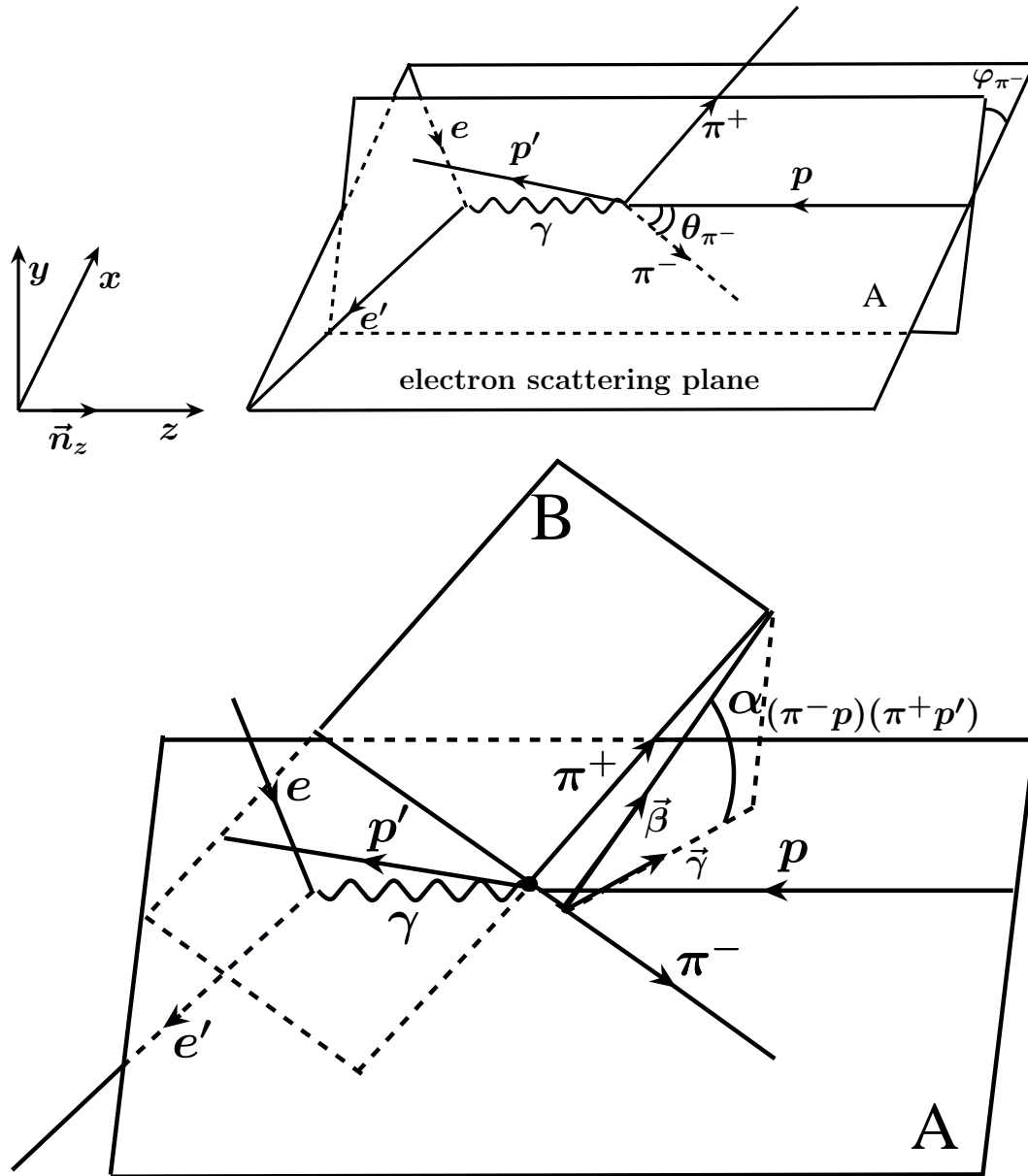


Рис. 3. Кинематические переменные для реакции  $ep \rightarrow e'p'\pi^+\pi^-$ . На верхнем рисунке показаны сферические углы эмиссии  $\pi^-$  в Ц.М. системе:  $\theta_{\pi^-}$  и  $\varphi_{\pi^-}$ . На нижнем рисунке показан угол  $\alpha_{[\pi^-p][\pi^+p']}$  между плоскостями: одной, составленной импульсами начального протона и  $\pi^-$  и другой, составленной импульсами конечного протона и  $\pi^+$ .

переменным, инвариантной массой системы адронов в конечном состоянии  $W$  и квадратом 4-импульса фотона  $Q^2$ . В качестве входной информации для расчета двухпионных сечений использовалось количество измеренных событий в семимерной ячейке.

7-дифференциальные сечения рассеяния электронов с образованием конечного адронного состояния  $\pi^- \pi^+ p$  вычислялись следующим образом:

$$\frac{d\sigma}{dW dQ^2 dM_{p\pi^+} dM_{\pi^+\pi^-} d\Omega d\alpha_{[\pi^- p_i][\pi^+ p_f]}} = \frac{1}{F \cdot F_{cherenkov} \cdot R} \frac{(\Delta N_{full} - \Delta N_{empty})}{\Delta W \Delta Q^2 \Delta \tau L_i} \quad (1)$$

где  $\Delta \tau$  представляет собой дифференциал от 5 кинематических переменных описанных выше:

$$\Delta \tau = \Delta M_{p\pi^+} \Delta M_{\pi^+\pi^-} \Delta \cos(\theta_{\pi^-}) \Delta \varphi_{\pi^-} \Delta \alpha_{[\pi^- p_i][\pi^+ p_f]} \quad (2)$$

$F$  — эффективность регистрации частиц в детекторе CLAS без учета эффективности черенковского счетчика.  $F_{cherenkov}$  — эффективность черенковского счетчика.  $R$ -фактор, учитывающий радиационные поправки к сечению рассеяния электронов. Светимость установки  $L_i$  определяется соотношением:

$$L_i = Q_i \left( \frac{l_t D_t N_A}{q_e M_H} \right) \quad (3)$$

где  $M_H$  — молярная плотность водорода ( $M_H = 1$  гр/моль),  $l_t$  — длина водородной мишени ( $l_t = 5$  см),  $N_A$  — число Авогадро ( $N_A = 6.0210^{23}$  моль $^{-1}$ ),  $Q_{tot}$  и  $Q_{tot,empty}$  — заряды, собранные цилиндром Фарадея, для наборов данных с водородной мишенью и пустым контейнером,  $i = full, empty$  отвечает светимостям для наборов данных с заполненной водородной мишенью и с пустым контейнером соответственно.

Полученные 7-мерные сечения электророждения  $\pi^- \pi^+$  пар на протоне в рамках формализма однофотонного обмена приводились к 5-мерным сечениям электророждения адронного состояния  $\pi^- \pi^+ p$  под действием виртуальных фотонов. Были получены следующие дифференциальные сечения, являющиеся интегралами от 5-дифференциальных сечений

образования  $\pi^- \pi^+ p$  состояния под действием виртуальных фотонов  $\frac{d^5\sigma}{d^5\tau}$ :

$$\begin{aligned}
\frac{d\sigma}{dM_{\pi^+\pi^-}} &= \int \frac{d^5\sigma}{d^5\tau} d\tau_{\pi^+\pi^-}; & d\tau_{\pi^+\pi^-} &= dM_{\pi^-p} d\Omega_{\pi^-} d\alpha_{[p_i, \pi^-][p_f, \pi^+]} \\
\frac{d\sigma}{dM_{\pi^+p}} &= \int \frac{d^5\sigma}{d^5\tau} d\tau_{\pi^+p}; & d\tau_{\pi^+p} &= dM_{\pi^+\pi^-} d\Omega_{\pi^-} d\alpha_{[p_i, \pi^-][p_f, \pi^+]} \\
\frac{d\sigma}{d(-\cos\theta_i)} &= \int \frac{d^5\sigma}{d^5\tau} d\tau_{\pi^-}; & d\tau_i &= dM_{\pi^+\pi^-} dM_{\pi^+p} d\varphi_i d\alpha_{[p_i, i][j', j]} \\
\frac{d\sigma}{dM_{\pi^-p}} &= \int \frac{d^5\sigma}{d^5\tau'} d\tau_{\pi^-p}; & d\tau_{\pi^-p} &= dM_{\pi^+\pi^-} d\Omega_{\pi^+} d\alpha_{[p\pi^-]} \\
\frac{d\sigma}{d(\alpha_{[p_i, k][j', j]})} &= \int \frac{d^5\sigma}{d^5\tau} d\tau_k; & d\tau_k &= dM_{\pi^+\pi^-} dM_{\pi^+p} d\Omega_k; \\
&& i = \pi^-, \pi^+, p_f k = \pi^-, \pi^+, p_f j = \pi^+, \pi^-, \pi^- j' = p_f, p_f, \pi^+ \\
&& d^5\tau' &= dM_{\pi^-p} dM_{\pi^+\pi^-} d\Omega_{\pi^+} d\alpha_{p_i \pi^-} p_f \pi^+
\end{aligned}$$

где  $p_i$  и  $p_f$  протон в начальном и конечном состоянии.

В разделе 2.1.2 обсуждаются коррекции полученных сечений. Все дифференциальные сечения, полученные в анализируемых экспериментах обнаруживают зависимость от кинематических переменных в пределах величины интервала сетки, на которой определялись сечения. В результате получались средневзвешенные по интервалу кинематической сетки величины сечений. Полученные таким образом величины сечений приписывались центральной точке интервала, в котором определялось сечение. Из-за нелинейной зависимости сечений от кинематических переменных истинная величина сечения в центральной точке интервала может отличаться от средневзвешенной по интервалу величины сечения. Были выполнены коррекции сечения, учитывающие этот эффект (binning correction) [27, 41].

В каждом интервале по  $W$  и  $Q^2$  были получены 9 дифференциальных сечений, показанных для одного из ( $W$  и  $Q^2$ ) интервалов на рис. 6.

В главе 3 обсуждаются использовавшиеся ранее методы физического анализа данных по фото- и электророждению пар заряженных пионов. Для определения электромагнитных формфакторов  $N^*$  необходимо обеспечить надежное разделение резонансных и нерезонансных механизмов. Для изолированных резонансов при малых  $W$  и кинематических



областей, в которых резонансный сигнал существенно превышает вклады нерезонансных процессов, эффективным методом для решения этой задачи является разложение по парциальным волнам  $PWA$ . Нерезонансные процессы в  $2\pi$  канале имеют вклад сравнимый или больший чем резонансные во всей кинематической области перекрываемой экспериментами, анализируемыми в настоящей диссертации. Разделение резонансных и нерезонансных механизмов в такой ситуации уже не может осуществляться простейшей параметризацией нерезонансных частей гладкими кривыми от  $W$ . Поэтому необходимы модельные подходы для разделения вкладов резонансных и нерезонансных механизмов.

В настоящее время развито значительное число модельных подходов для описания процессов фото- и электророждения  $\pi^-\pi^+$  пар на протоне. Во всех этих подходах используются мезон-барионные степени свободы. Они основаны на анализе весьма ограниченных экспериментальных данных по процессам фоторождения  $\pi^-\pi^+$  пар. Ограниченность анализируемых данных делает сложным установить всю совокупность механизмов, вносящих вклад в фото и электророждение пар заряженных пионов. Данные CLAS по электророждению  $\pi^-\pi^+$  пар позволили впервые получить информацию о полном наборе неполяризованных дифференциальных сечений для этого эксклюзивного канала. Для сравнения все другие мировые данные как правило ограничены интегральными сечениями и распределениями по инвариантным массам. Данные CLAS обеспечивают не только хорошее разрешение по кинематическим переменным конечного состояния для дифференциальных сечений и их высокую точность, но также дают информацию о рекордном числе наблюдаемых. Столь подробные экспериментальные данные впервые открыли возможность установить все значимые механизмы электророждения пар пионов, анализируя их проявления в измеренных дифференциальных сечениях. Тем самым достигается надежное разделение между резонансными и нерезонансными механизмами, необходимое для извлечения электромагнитных формфакторов  $N^*$ . Описанная выше программа была реализована в феноменологической модели JM.

Эта феноменологическая модель [8–13, 15–19, 22–30, 33–40, 42, 43]

рассматривается в главе 4 диссертации. Развитый подход главным образом сосредоточен на извлечении электромагнитных формфакторов  $N^*$  и их эволюции с виртуальностью фотона  $Q^2$ . В JM включены лишь те механизмы, которые необходимы для описания поведения наблюдаемых.

В модели JM рождение пар пионов было описано суперпозицией следующих квазидвухчастичных каналов с формированием и последующим распадом нестабильных частиц в промежуточных состояниях:

$$\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++} \rightarrow \pi^- \pi^+ p, \quad (4)$$

$$\gamma p \rightarrow \pi^+ \Delta^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- p, \quad (5)$$

$$\gamma p \rightarrow \rho^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p, \quad (6)$$

$$\gamma p \rightarrow \pi^+ D_{13}^0(1520) \rightarrow \pi^+ \pi^- p, \quad (7)$$

$$\gamma p \rightarrow \pi^+ F_{15}^0(1685) \rightarrow \pi^+ \pi^- p, \quad (8)$$

$$\gamma p \rightarrow \pi^- P_{33}^{++}(1600) \rightarrow \pi^- \pi^+ p. \quad (9)$$

Диаграммы, отвечающие этим каналам показаны на Рис. 4. Сигналы от каналов  $\pi^- \Delta^{++}$  и  $\pi^+ \Delta^0$  отчетливо наблюдаются в данных CLAS и мировых по спектрам инвариантных масс  $\pi^+ p$ ,  $\pi^- p$  и  $\pi^- \pi^+$ . Вклады от изобарных каналов  $\pi^+ D_{13}^0(1520)$ ,  $\pi^+ F_{15}^0(1685)$ ,  $\pi^- P_{33}^{++}(1600)$  были впервые обнаружены в анализе данных CLAS выполненном в настоящей диссертации [38, 39].

Анализ данных CLAS также показал, что суперпозиция изобарных каналов (4-9) описывает от 70 до 90 % интегральных и дифференциальных  $2\pi$  сечений. Это означает, что наряду с изобарными каналами (4-9) в сечения этого эксклюзивного канала дают также вклад прямые процессы  $2\pi$  рождения, в которых конечное  $\pi^- \pi^+ p$  состояние формируется без образования промежуточных двухчастичных состояний с нестабильными адронами. Динамика этих процессов впервые установлена в анализе данных CLAS в настоящей диссертации [37, 38, 42, 43].

Полная амплитуда реакции рождения пар заряженных пионов является суперпозицией амплитуд всех изобарных каналов и амплитуд прямого рождения пар пионов.

В изобарные каналы  $\pi \Delta pp$  модели JM включены вклады нуклонных

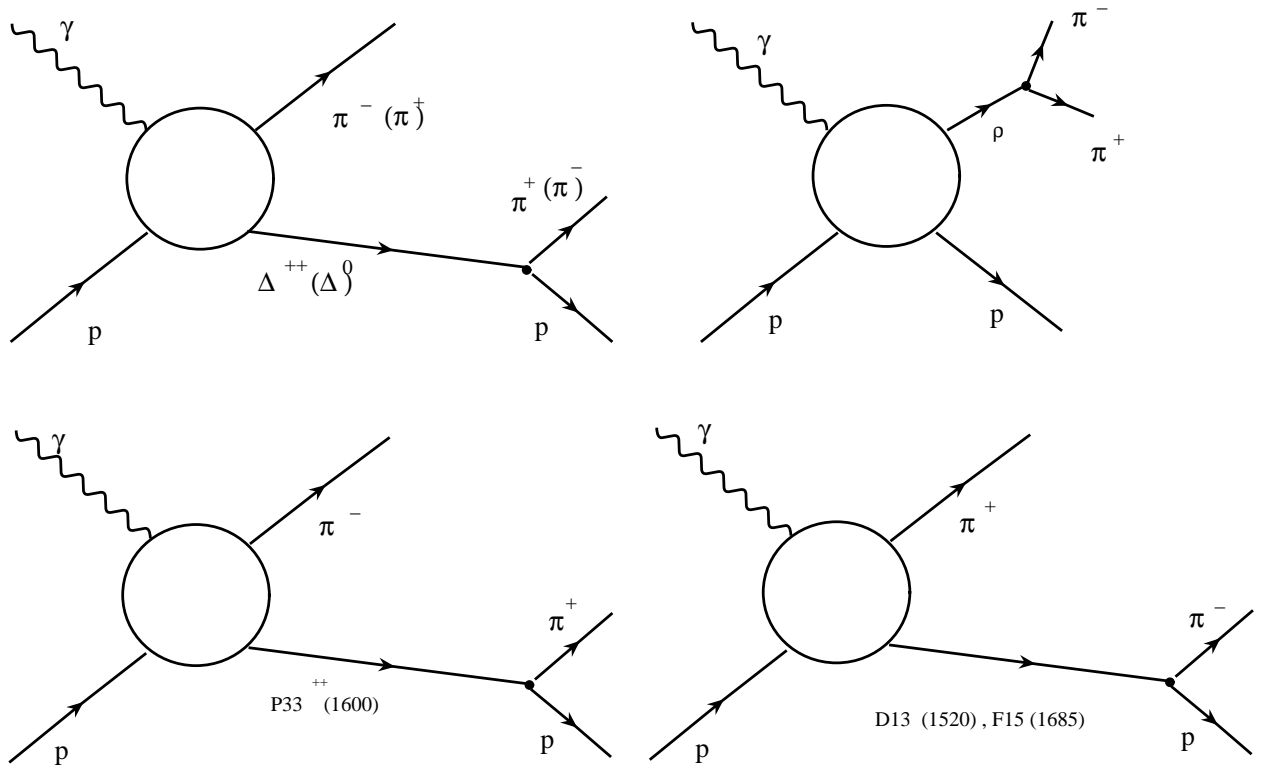


Рис. 4. Изобарные каналы JM модели.

резонансов, возбуждаемых в  $s$ -канале взаимодействующих фотона и протона. Эти резонансы распадаются на промежуточные состояния  $\pi\Delta$  и  $\rho\rho$ , давая вклады в амплитуды этих изобарных каналов. Полные амплитуды каналов  $\pi\Delta$  и  $\rho\rho$  являются суперпозицией резонансных и нерезонансных амплитуд. В JM модель включены все хорошо установленные  $N^*$ ,  $\Delta^*$  с массами менее 2.0 ГэВ и наблюдавшимися адронными распадами на состояния  $\pi\Delta$  и  $\rho\rho$ . Резонансные амплитуды в изобарных каналах  $\pi\Delta$  и  $\rho P$  вычислялись в приближении Брейта–Вигнера [10,12,16]. Электромагнитные формфакторы резонансов являлись свободными параметрами. Они определялись из условия наилучшего описания всех наблюдаемых эксклюзивного  $2\pi$  канала, измеренных на детекторе CLAS.

Нерезонансные процессы в  $\pi\Delta$  изобарных каналах описывались минимальным набором древесных диаграмм, рассмотренных в [12,29]

Для борновских членов в каналах  $\pi\Delta$  были учтены эффекты взаимодействий в начальном и конечном состояниях (ISI&FSI). Учет этих эффектов был выполнен в приближении, когда учитывалось только

поглощение падающих частиц во входном канале и испущенных частиц в выходном канале [12].

Анализ экспериментальных данных CLAS показал необходимость введения дополнительных нерезонансных механизмов помимо борновских членов. Дополнительные к борновским членам вклады в  $\pi^- \Delta^{++}$  и  $\pi^+ \Delta^0$  каналы были параметризованы контактными членами с тензорной структурой иной сравнительно с тензорной структурой контактного члена в наборе борновских членов [38, 42, 43].

Нерезонансные процессы в изобарном канале  $\rho\rho$  описывались в дифракционном приближении. Это приближение было модифицировано для того чтобы учесть особенности нерезонансного рождения  $\rho$  р конечного состояния в области энергий возбуждения  $N^*$ , где ограничения на доступное фазовое пространство приводят к заселению лишь части массового распределения  $\rho$  мезона [40].

Квазидвухчастичная амплитуда рождения  $\pi^+ D_{13}^0(1520)$  промежуточного состояния описывалась аналогично амплитудам изобарного канала  $\pi^+ \Delta^0$ , включая в эти амплитуды дополнительную  $\gamma_5$ -матрицу, с тем чтобы учесть противоположные четности  $\Delta$  и  $D_{13}^0(1520)$ . Аналогичным образом были получены амплитуды распадов промежуточного состояния  $D_{13}^0(1520)$  на конечное состояние  $\pi^- p$  [37].

3-частичные амплитуды для изобарных каналов  $\pi^- P_{33}^{++}(1640)$  и  $\pi^+ F_{15}^0(1685)$  были получены как лоренц-инвариантная свертка спин-тензоров начальных и конечных частиц. При этом распространение промежуточных нестабильных барионов описывалось экспоненциальными пропагаторами [38].

Диаграммы отвечающие механизмам прямого  $2\pi$  рождения приведены на Рис. 5.

Их амплитуды были получены как Лорентц-инвариантные свертки спин-тензоров начальных и конечных частиц. Пропагаторы в обменных процессах параметризовались в экспоненциальном приближении. Дополнительные инварианты были введены в эти амплитуды с тем чтобы обеспечить наилучшее воспроизведение данных по угловым распределениям 3 конечных адронов [42, 43].

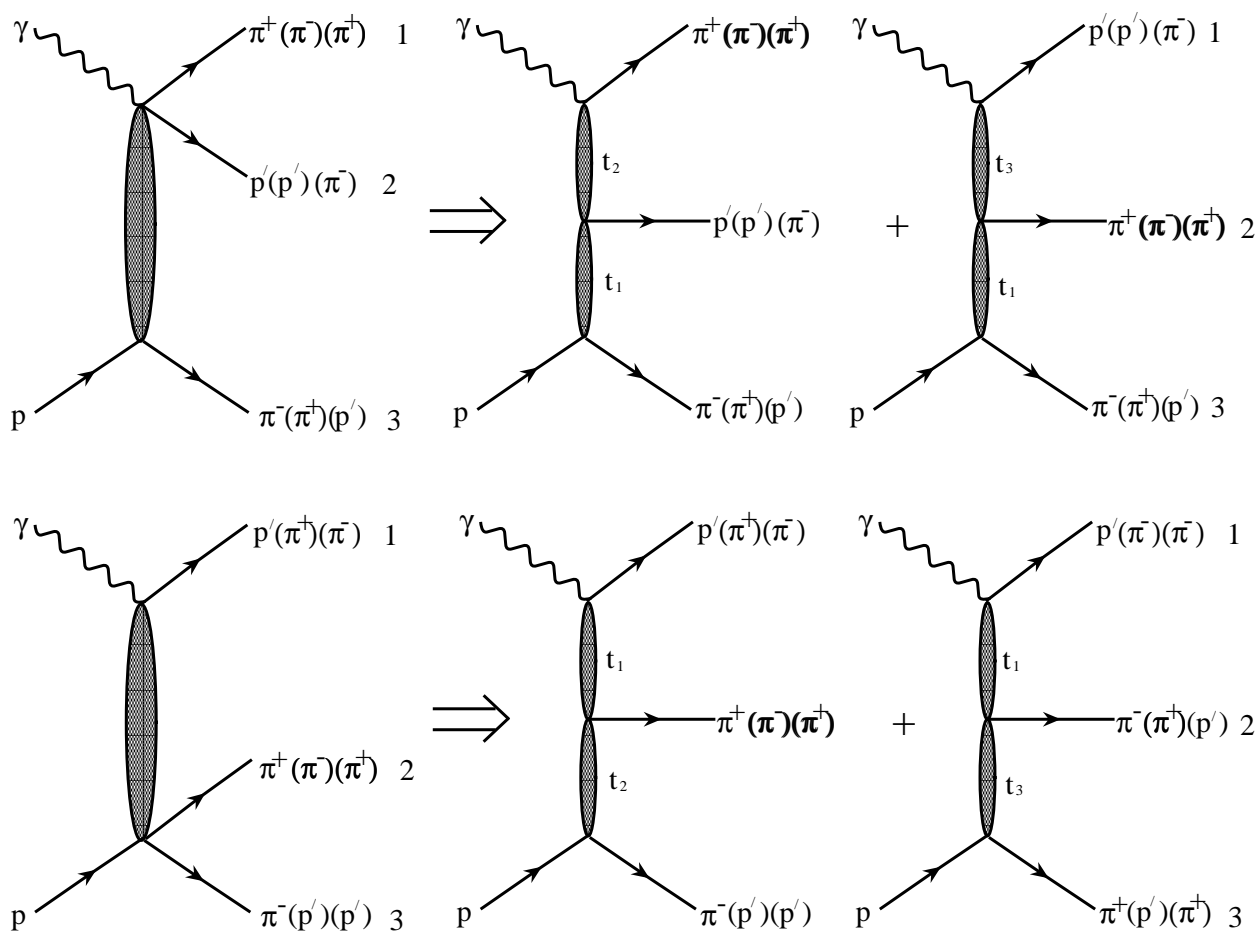


Рис. 5. Механизмы прямого рождения пар пионов в модели JM, позволяющие воспроизвести все измеренные неполяризованные дифференциальные сечения  $\pi^-\pi^+p$  эксклюзивного канала.

В модели JM достигнуто хорошее описание наиболее детального набора из 9 неполяризованных дифференциальных сечений электророждения  $\pi^-\pi^+$  пар на протонах в каждом из интервалов по ( $W$  и  $Q^2$ ), измеренных на детекторе CLAS и мировых данных по неполяризованным сечениям. При этом хорошее описание данных достигнуто без необходимости введения дополнительных механизмов неизвестной природы. Это свидетельствует о том, что в модели JM установлены все существенные механизмы  $2\pi$  рождения в области энергий возбуждения нуклонных резонансов при квадратах 4-импульсов фотона от 0 до  $1.5 \text{ ГэВ}^2$ . Пример описания 9 дифференциальных сечений, измеренных на детекторе CLAS при  $W = 1.51 \text{ ГэВ}$  и  $Q^2 = 0.425 \text{ ГэВ}^2$  показан на Рис. 6.

В главе 5 представлены полученные из анализа данных CLAS по реакциям электророждения пар заряженных пионов на протонах электромагнитные формфакторы нуклонных резонансов. Данные CLAS позволили также обнаружить сигналы от состояния-кандидата  $3/2^+(1720)$ , которое может быть первым обнаруженным в эксперименте новым типом возбуждений нуклона т.н. “missing”  $N^*$ .

В разделе 5.1 обсуждается программа международной CLAS Collaboration по исследованию нуклонных резонансов. Исследования нуклонных резонансов включают два основных направления: а) поиск новых типов возбужденных состояний нуклона т.н. “missing” резонансов и б) изучение электромагнитных формфакторов для большинства возбужденных состояний нуклона в целях исследований структуры резонансов, механизмов сильного взаимодействия формирующих резонансы и их эволюции с расстоянием. Исследования эксклюзивного  $2\pi$  канала играют важную роль в обоих перечисленных выше направлениях.

В разделе 5.2 представлены результаты исследований электромагнитных формфакторов резонансов  $P_{11}(1440)$  и  $D_{13}(1520)$  при малых виртуальностях фотонов  $Q^2 < 0.6 \text{ ГэВ}^2$  [41–43]. В настоящее время это наиболее надежные данные по  $Q^2$  зависимостям электромагнитных формфакторов резонансов  $P_{11}(1440)$  и  $D_{13}(1520)$ , поскольку они были получены из 9 дифференциальных сечений рождения пар пионов

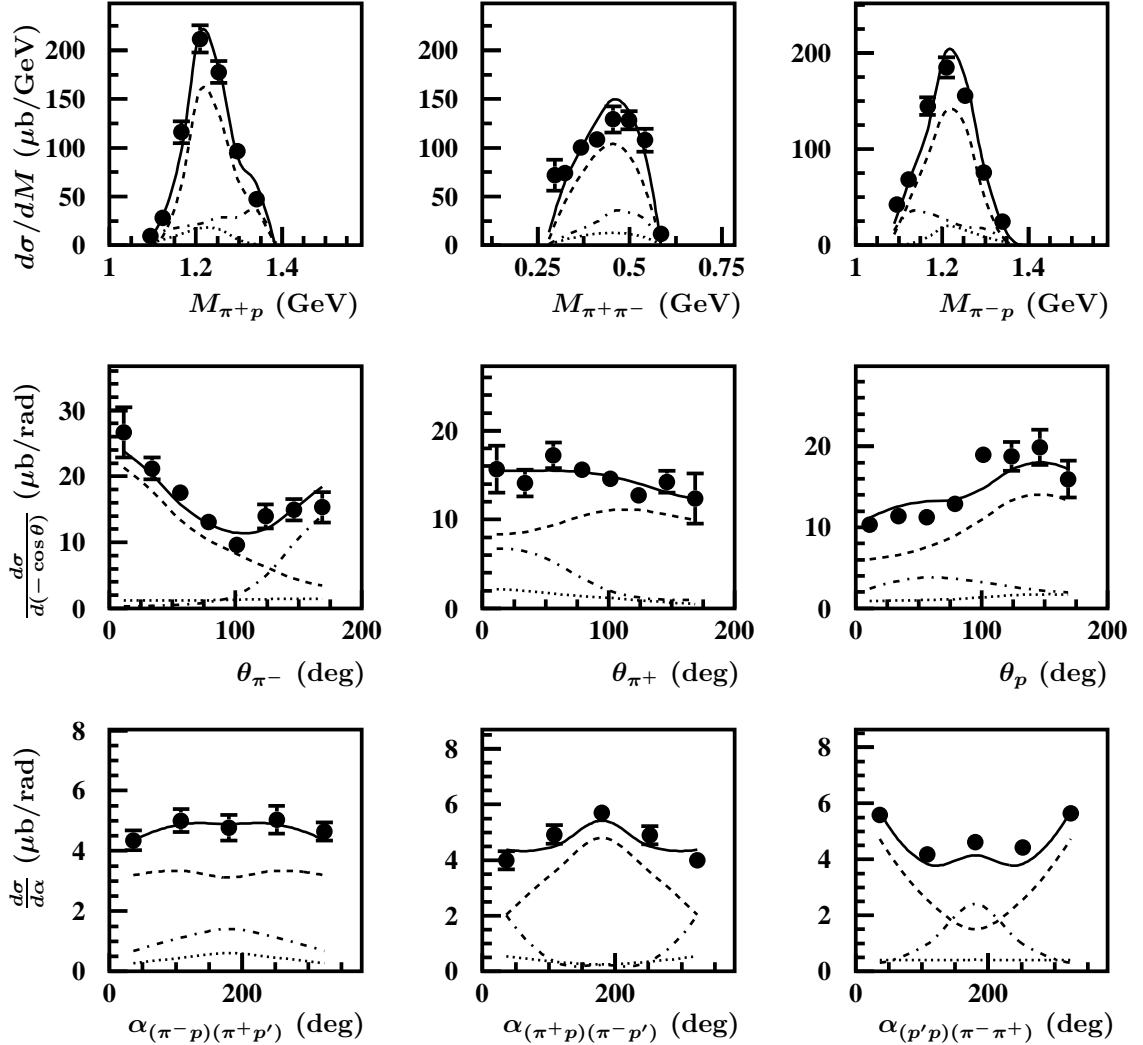


Рис. 6. Описание данных CLAS при  $W = 1.51$  ГэВ и  $Q^2 = 0.425$  ГэВ<sup>2</sup> в модели JM. Расчеты показаны сплошными линиями. Вклады в дифференциальные сечения изобарных каналов  $\pi^-\Delta^{++}$ ,  $\pi^+\Delta^0$  и прямых механизмов показаны соответственно штриховыми, пунктирными и штрихпунктирными линиями. Описание  $\alpha_i$  угловых распределений представляет собой расчет этих дифференциальных сечений с параметрами JM определенными из условия наилучшего воспроизведения 6 других дифференциальных сечений, и не варьируемых при описании  $\alpha_i$  угловых распределений.

с рекордными точностями и разрешениями. В рамках развитого в диссертационной работе феноменологического подхода (модель JM) была также извлечена информация о вкладах совокупности изобарных каналов и каждого из них в отдельности во все 9 дифференциальных сечений рождения пар пионов.

Полученные из данных CLAS по рождению пар пионов электромагнитные формфакторы резонансов  $P_{11}(1440)$  и  $D_{13}(1520)$  показаны на Рис. 7 открытыми кружками. Для сравнения также приведены электромагнитные формфакторы этих состояний, извлеченные из данных CLAS по электророждению одиночных пионов.

Хорошее совпадение данных извлеченных двумя независимыми моделями из двух основных эксклюзивных каналов с рождением одиночного и двух пионов, свидетельствует о надежности определения этих формфакторов, а также о надежности двух моделей развитых для исследований  $N^*$  в однопионном и двухпионном каналах.

Сравнение данных по электромагнитным формфакторам состояний  $P_{11}(1440)$  и  $D_{13}(1520)$  с модельными расчетами показало, что эти данные позволяют получать информацию об активных степенях свободы в структуре  $N^*$  на различных расстояниях.  $Q^2$ -эволюция электромагнитных формфакторов этих состояний свидетельствует о том что на расстояниях сравнимых с размерами нуклона в их структуру дают значительный вклад эффекты мезон-барионного одеяния. С уменьшением расстояний по мере проникновения фотона внутрь мезон-барионного облака эффекты мезон-барионного одеяния исчезают при одновременном увеличении вкладов от кварковых конфигураций. Таким образом, данные CLAS свидетельствуют о том, что низколежащие возбужденные состояния нуклона представляют собой внутреннее ядро из 3 конституентных кварков, т.н. кварковый кор, окруженный внешним облаком виртуальных мезонов и барионов.

В разделе 5.3 обсуждается поиск новых типов возбужденных состояний нуклона [21, 25–27, 31] и данные по электромагнитным формфакторам высоколежащих резонансов [21, 24, 38, 43]. Перечисленные результаты получены при исследовании реакций  $2\pi$  электророждения в области  $W$  от 1.4 до 1.9 ГэВ и виртуальностях фотонов от 0.5 до



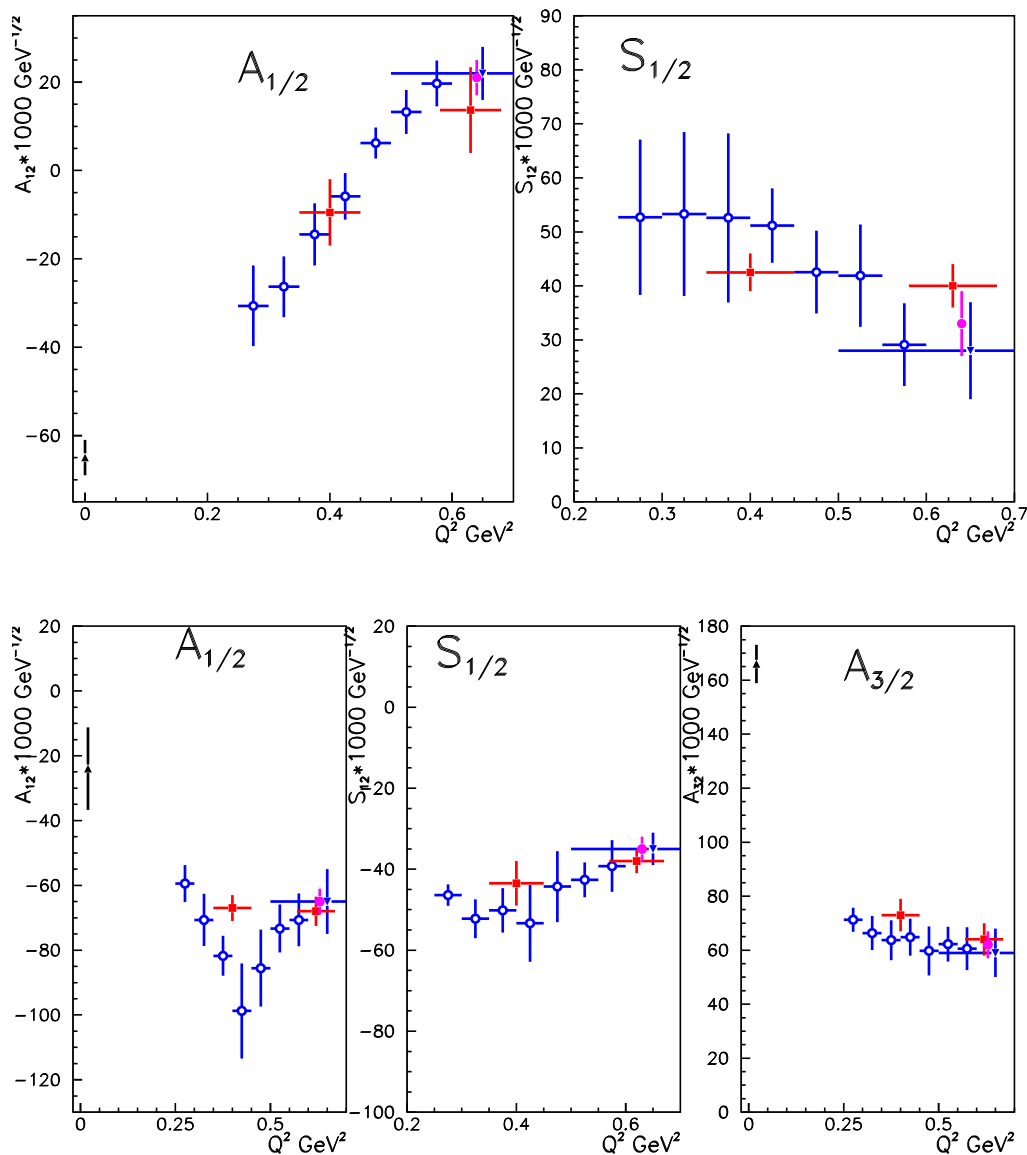


Рис. 7. Электромагнитные формфакторы резонансов  $P_{11}(1440)$  и  $D_{13}(1520)$ , извлеченные из анализа данных CLAS по электророждению одиночных и пар заряженных пионов. Открытые кружки — результаты анализа данных по рождению пар пионов [41–43], заштрихованные кружки — результаты анализа данных по рождению одиночных пионов, квадраты — результаты совместного анализа данных однопионных каналов и сечений по электророждению пар заряженных пионов [37].

1.5 ГэВ<sup>2</sup>. Достигнутое в рамках JM модели при учете вкладов лишь от известных резонансных состояний наилучшее описание данных по

Таблица 3. Параметры состояния кандидата  $3/2^+(1720)$  и ширины адронных распадов известного состояния  $P_{13}(1720)$ , полученные из условия наилучшего описания резонансной структуры в данных CLAS [27] в модели JM.

		$M, \text{ MeV}$	$\Gamma_{tot}, \text{ MeV}$	$\Gamma_{\pi\Delta}/\Gamma_{tot}, \%$	$\Gamma_{\rho N}/\Gamma_{tot}, \%$
$P_{13}(1720)$ изменёнными адронными распадами	c	$1725 \pm 20$	$114 \pm 19$	$63 \pm 12$	$19 \pm 9$
$P_{13}(1720)$ параметрами	c PDG	1650–1750	100–200	не обнаружено	70–85
Адронные параметры состояния кандидата $3/2^+(1720)$		$1720 \pm 20$	$88 \pm 17$	$41 \pm 13$	$17 \pm 10$

сечениям электророждения пар пионов показано на Рис. 8 пунктирными линиями.

Модель JM хорошо воспроизводит данные [27] как по проинтегрированным, так и по дифференциальным сечениям во всей кинематической области, за исключением резонансной структуры при  $W \approx 1.7$  ГэВ. Эта структура не воспроизводится расчетами в рамках JM, если в модели используются только известные резонансы с параметрами адронных распадов установленными в анализе экспериментов с пучками пионов. Анализ данных показал, что наблюдаемая резонансная структура не может быть воспроизведена изменением параметров нерезонансных механизмов. Хорошее описание данных CLAS достигается с ширинами адронных распадов  $P_{13}(1720)$ , существенно отличающимися от полученных в экспериментах на пучках пионов и приведенных во 2 строке табл. 3.

Таким образом, структура при  $W \approx 1.7$  ГэВ, впервые наблюдавшаяся в данных CLAS [27] может быть описана вкладом известного состояния  $P_{13}(1720)$ , однако с ширинами адронных распадов полностью отличающимися от установленных во всех ранее выполненных экспериментах.

Поэтому была также рассмотрена и другая возможность описания этих данных, когда вариация ширин адронных распадов всех включенных

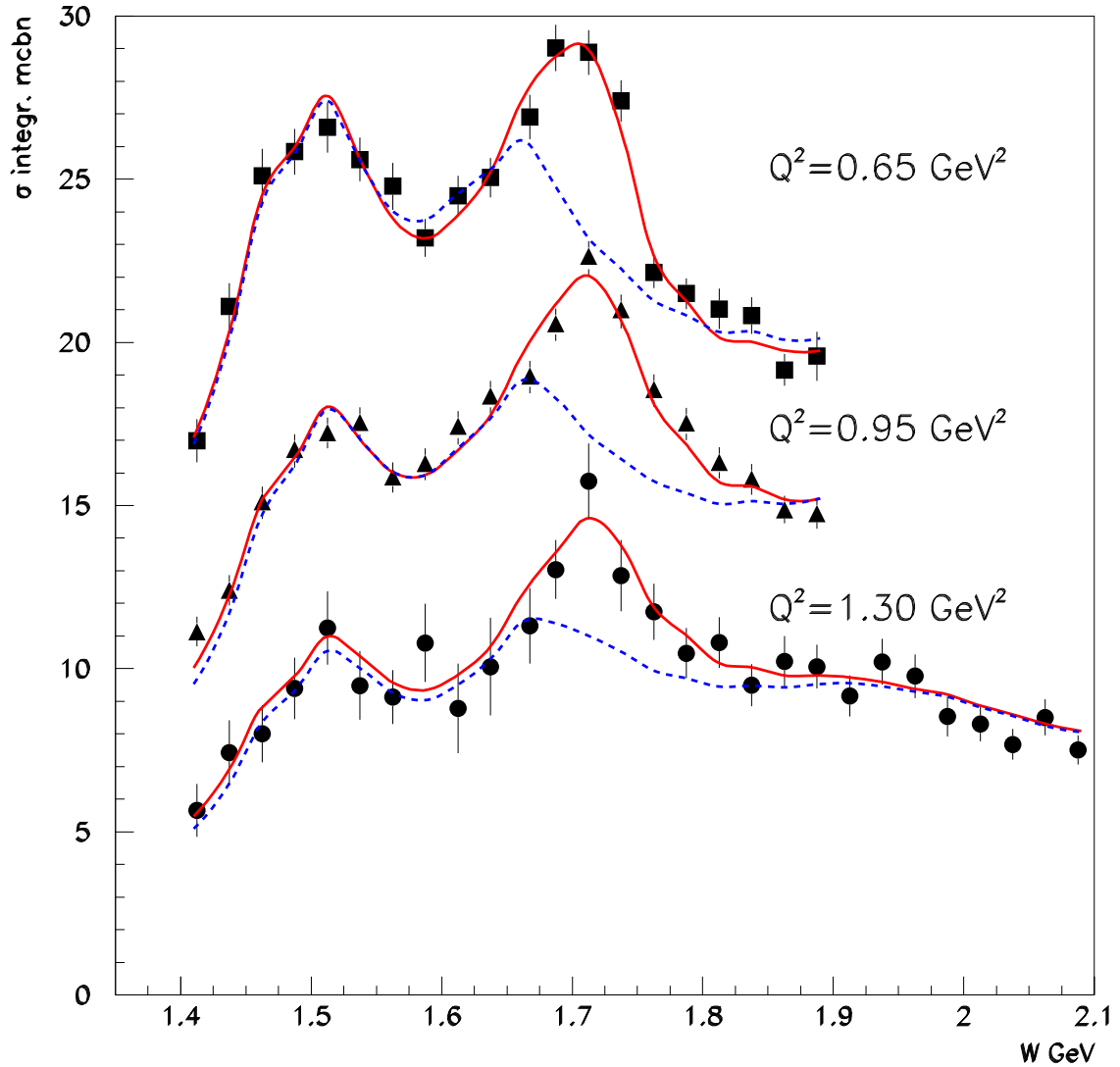


Рис. 8. Проинтегрированные сечения электророждения пар заряженных пионов на протоне [27] и их описание в модели JM. Пунктирные линии - без учета вклада состояния кандидата  $3/2^+(1720)$  или модификации ширины адронных распадов резонанса  $P_{13}(1720)$ . Сплошные линии - с учетом вклада состояния кандидата  $3/2^+(1720)$  или после модификации ширины адронных распадов резонанса  $P_{13}(1720)$  представленной в табл. 3.

в модель JM резонансов ограничена неопределенностями PDG. В этом случае для описания данных CLAS требуется ещё один резонанс. Так как все предсказанные в кварковых моделях обычные резонансы с массами менее 1.8 ГэВ обнаружены в экспериментах, новое состояние, должно быть новым типом  $N^*$ , т.н. “missing” резонансом. Параметры известных резонансов и дополнительного нового состояния определялись из условия наилучшего воспроизведения данных CLAS. Описание проинтегрированных и дифференциальных сечении  $2\pi$  электророждения с состоянием-кандидатом  $3/2^+(1720)$  было таким же, как и в случае изменения адронных параметров известного состояния  $P_{13}(1720)$ .

Данные CLAS по электророждению пар пионов позволили впервые получить информацию о  $Q^2$  эволюции электромагнитных формфакторов высоколежащих нуклонных резонансов с массами 1.6-2.1 ГэВ. До представленных в настоящей диссертации экспериментов имевшаяся информация о электромагнитных формфакторах этих резонансов вследствие больших неопределенностей носила чисто индикативный характер.

Анализ данных CLAS по электророждению пар заряженных пионов впервые позволил получить электромагнитные формфакторы резонанса  $D_{33}(1700)$  с хорошей точностью. Электромагнитные формфакторы состояний  $S_{31}(1620)$ ,  $D_{13}(1700)$ ,  $P_{13}(1720)$  были определены в настоящей диссертации впервые.

Был выполнен совместный анализ данных CLAS по рождению одиночных и пар пионов при виртуальностях фотона  $Q^2 = 0.65 \text{ ГэВ}^2$  [37]. Было достигнуто хорошее описание всех измеренных наблюдаемых в  $1\pi$  и  $2\pi$  каналах с общими в обоих каналах параметрами  $N^*$ . Это свидетельствует о надежности определения электромагнитных формфакторов  $N^*$  а также о надежном разделении резонансных и нерезонансных механизмов для  $1\pi$  и  $2\pi$  эксклюзивных каналов, достигаемом в моделях развитых CLAS Collaboration. Развита в настоящей диссертационной работе модель JM принята Международной CLAS Collaboration в качестве основного метода анализа данных по электророждению пар заряженных пионов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. На детекторе CLAS, в рамках коллаборации НИИЯФ МГУ и Hall B в Jefferson Lab, впервые получены наиболее детальные данные по интегральным и дифференциальным сечениям рождения пар заряженных пионов на протонах виртуальными фотонами. Данные получены в обширной кинематической области: диапазон изменения инвариантных масс конечной адронной системы  $\pi^-\pi^+p$  от 1.3 ГэВ до 2.1 ГэВ и квадратах 4-импульсов фотона от 0.2 ГэВ<sup>2</sup> до 1.5 ГэВ<sup>2</sup>. Достигнутое разрешение по  $W$  и  $Q^2$  почти на порядок величины превышает достигнутое в выполненных ранее в DESY исследованиях электророждения пар пионов. Впервые в каждом из интервалов по ( $W$  и  $Q^2$ ) получено 9 дифференциальных сечений.
2. Детальная информация по дифференциальным и интегральным сечениям рождения пар заряженных пионов на протоне виртуальными фотонами, полученная в настоящей диссертации, сделала впервые возможным установить все значимые механизмы этого эксклюзивного канала, исследуя их проявление в наблюдаемых. В рамках такого подхода была создана феноменологическая модель описания рождения пар заряженных пионов на протонах реальными и виртуальными фотонами — JM. Модель хорошо описывает все имеющиеся данные CLAS и мировые данные для этого эксклюзивного канала во всей области энергий возбуждения  $N^*$  и для квадратов 4-импульсов фотона от 0 до 1.5 ГэВ<sup>2</sup>. Из анализа данных CLAS в рамках модели JM были впервые установлены вклады изобарных каналов  $\pi^+D_{13}(1520)$ ,  $\pi^+F_{15}(1685)$ ,  $\pi^-P_{33}(1640)$  в реакцию  $ep \rightarrow e'p'\pi^+\pi^-$ . Впервые определены вклады и установлена динамика механизмов прямого рождения пар заряженных пионов, когда конечное  $\pi^-\pi^+p$  состояние формируется напрямую, без образования промежуточных состояний с нестабильными адронами. Надежность механизмов, установленных из анализа экспериментальных данных в модели JM подтверждается совместным описанием всех измеренных на детекторе CLAS

наблюдаемых в основных  $1\pi$  и  $2\pi$  эксклюзивных каналах с одинаковыми значениями параметров  $N^*$  при  $Q^2 = 0.65 \text{ ГэВ}^2$ . Адекватное описание всех значимых механизмов  $2\pi$  канала в модели JM также подтверждается хорошим воспроизведением 3 угловых распределений по углам между плоскостями, составленными парами импульсов конечных адронов, с параметрами JM, определенными из условия наилучшего описания данных по 6 другим наблюдаемым. Таким образом, модель JM обеспечивает надёжное разделение вкладов различных механизмов, в том числе между резонансными и нерезонансными амплитудами, необходимое для определения параметров  $N^*$ . Развита в диссертации модель JM является единственным в мире подходом, позволяющим получать информацию об электромагнитных формфакторах  $N^*$  из анализа данных по электророждению пар заряженных пионов на протонах.

3. В результате анализа экспериментальных данных CLAS по электророждению пар заряженных пионов была впервые обнаружена резонансная структура в зависимости интегральных сечений от  $W$ . Модель JM хорошо описывает экспериментальные данные по дифференциальным и интегральным сечениям во всей кинематической области, за исключением структуры при  $W \sim 1.7 \text{ ГэВ}$ . Было показано, что модификацией нерезонансных механизмов не удастся воспроизвести интегральные и дифференциальные сечения в области структуры при  $W \sim 1.7 \text{ ГэВ}$ . Было найдено 2 способа описания этих сечений за счет модификации параметров  $N^*$ . Хорошее описание  $2\pi$  данных CLAS всюду, включая структуру при  $1.7 \text{ ГэВ}$ , достигается в предположении о преимущественном распаде состояния  $P_{13}(1720)$  по каналу  $\pi\Delta$ . Однако, анализ данных на пучках  $\pi$  мезонов показал, что основной модой распада состояния  $P_{13}(1720)$  является канал  $\rho\rho$ , в том время как распады по  $\pi\Delta$  каналу обнаружены не были. Тем не менее, гипотеза о преимущественных распадах  $P_{13}(1720)$  резонанса по каналу  $\pi\Delta$  не может быть отвергнута, из-за низкой систематической

точности данных экспериментов с адронными пучками при  $W > 1.6$  ГэВ. Если же предполагать параметры адронных распадов состояния  $P_{13}(1720)$  и других  $N^*$ , вносящих вклад в структуру при 1.7 ГэВ, такими как они установлены в экспериментах с адронными пучками, то для описания структуры при 1.7 ГэВ в данных CLAS необходимо вводить новое барионное состояние. Определены квантовые числа состояния  $3/2^+(1720)$ . Электромагнитные формфакторы, ширины адронных распадов с эмиссией пары пионов для этого состояния были установлены из условия наилучшего описания данных CLAS.

4. Из анализа данных CLAS в рамках модели JM были извлечены электромагнитные формфакторы  $N^*$ . Для состояний  $P_{11}(1440)$  и  $D_{13}(1520)$  при квадратах 4-импульсов фотонов от 0.2 до 0.6 ГэВ<sup>2</sup> электромагнитные формфакторы были получены из анализа 9 дифференциальных сечений. Из анализа 3 распределений по инвариантным массам и угловым распределений  $\pi^-$  мезонов в ЦМ системе в модели JM были извлечены электромагнитные формфакторы для всех установленных  $N^*$  с массами  $< 1.9$  ГэВ, распадающихся с эмиссией пар пионов. Данные получены при  $Q^2$  от 0.5 до 1.5 ГэВ<sup>2</sup>. Надежность данных по извлеченным формфакторам была подтверждена в совместном анализе основных  $1\pi$  и  $2\pi$  эксклюзивных каналов. Сравнение извлеченных из экспериментальных данных величин электромагнитных формфакторов с предсказаниями кварковых моделей показало что модель, удовлетворительно воспроизводящая данные для одного или нескольких состояний, может расходиться с данными для других состояний. Таким образом, для доступа к механизмам, ответственным за формирование барионов из фундаментальных конститuentов, необходима информация о электромагнитных формфакторах полного спектра основного и возбужденных состояний нуклона. Сравнение данных по электромагнитным формфакторам  $N^*$  с кварковыми моделями позволило впервые изучить эволюцию с расстоянием различных степеней свободы

в структуре  $N^*$ . Это сравнение показало, что на расстояниях сравнимых с размерами нуклона ( $Q^2 < 1.0 \text{ ГэВ}^2$ ) структура  $N^*$  определяется суперпозицией мезон-барионных взаимодействий, формирующих периферийное мезон-барионное облако, и кварковых степеней свободы, сосредоточенных во внутренней области бариона. По мере увеличения квадрата 4-импульса фотона кварковые степени свободы начинают играть все более возрастающую роль. Для доступа к кварковым степеням свободы в структуре  $N^*$  необходимы эксперименты при больших  $Q^2$ .

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] M.Ripani, M.Taiuti, ...,V.I.Mokeev, et.al. Two pion decay of electroproduced baryon resonances. //  $N^*$  Group in CLAS Collaboration, CEBAF-PROPOSAL-93-006, Apr1993, 33pp.
- [2] V.I. Mokeev, M.Taiuti, M.Anghinolfi, et.al. Monte Carlo code for simulation of the large angle electromagnetic shower calorimeter for CLAS detector. // Preprint INFN-BE-95-02, Feb 1995, 36pp.
- [3] M. Taiuti, V.I.Mokeev, M.Anghinolfi, et. al. The large angle electromagnetic shower calorimeter for CLAS:Module desing and optimization of performances. // Preprint INFN-BE-95-03, Mar 1995, 13pp.
- [4] M.Taiuti, M.Anghinolfi,...,V.I.Mokeev, et.al. Performance of the optical readout system for the large electromagnetic shower calorimeter for CLAS. // Nucl. Instrum. Meth. V.A357 (1995) P. 344-349.
- [5] Е.Н.Головач, В.С.Замиралов,..., В.И.Мокеев и др. Феноменологическая модель реакций  $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$  и  $\gamma p \rightarrow \rho p$  под действием реальных и виртуальных фотонов // Препринт НИИЯФ МГУ 97-37/488 СС.31.
- [6] P.Rossi, E.Polli,...,V.I.Mokeev, et.al. Performance of the new plastic scintillator NE110A for the CLAS large angle calorimeter. // Nucl. Instrum. Meth. V.A381 (1996) P.32-38.



- [7] M.Ripani, M.Anghinolfi,...,V.I.Mokeev, et.al. Choice and test of the photomultipliers for the Large Angle electromagnetic shower Calorimeter on the CLAS detector at CEBAF // Nucl. Instrum. Meth. V.A406 (1998) P. 403-410.
- [8] Е.Н.Головач, В.С.Замиралов,..., В.И.Мокеев и др. Определение электромагнитных формфакторов нуклонных резонансов из данных по сечениям реакций  $\gamma p \pi^- \Delta^{++}$  и  $\gamma p \rho^0 p$ . // Вестник Московского Университета, сер. Физика/Астрономия Т.54 (1999) С. 34-35.
- [9] V.Mokeev, M.Anghinolfi, B.S.Ishkhanov, et.al. Description of two pion production on proton by real and virtual photons in  $N^*$  excitation region // Few Body Syst.Suppl. V.11 (1999) 292-297
- [10] М.Ангинолфи, Б.С.Ишханов,...,В.И.Мокеев и др. Исследования структуры нуклонных резонансов в эксклюзивных реакциях рождения пар пионов на протонах реальными и виртуальными фотонами. // ЯФ Т.62 (1999) С. 1437-1448.
- [11] Е.Н.Головач, В.С.Замиралов,..., В.И.Мокеев и др. Эффекты взаимодействий в начальном и конечном состояниях на образование  $\pi^- \Delta^{++}$  реальными и виртуальными фотонами. // Вестник Московского Университета, сер. Физика/Астрономия Т.54 (1999) С. 16-23.
- [12] M.Ripani, V.I.Mokeev, B.S.Ishkhanov, et. al. A Phenomenological description of pi- Delta++ photoproduction and electroproduction in nucleon resonance region. // Nucl.Phys. V.A672 (2000) P.220-248.
- [13] М.Ангинолфи, Б.С.Ишханов, ...,В.И.Мокеев и др. Описание взаимодействий в начальном и конечных состояниях в реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$  в области энергий возбуждения нуклонных резонансов. // ЯФ Т.63 (2000) С. 76-81.
- [14] M.Anginolfi, M.Battaglieri,...,V.I.Mokeev, et.al. Response to cosmic rays of the large electromagnetic shower calorimeter of the CLAS detector. // Nucl. Instrum. Meth. V.A447 (2000) P. 424-431.

- [15] M.Battaglieri, E.Anciant,...,V.I.Mokeev, et. al. Photoproduction of vector mesons off the proton at high momentum transfer. // Nucl.Phys. V.A680 (2000) P. 286-289.
- [16] М.Рипани, В.И.Мокеев, Б.С.Ишханов и др. Рождение пар пионов на протоне фотонами в области энергий возбуждения нуклонных резонансов. // ЯФ Т.63 (2000) С. 2036-2040.
- [17] V.I.Mokeev, M.Ripani, B.S.Ishkhanov, et. al. Isobar model for studies of  $N^*$  excitation in charged double pion production by real and virtual photons. // Newport News 2000, Excited nucleons and hadronic structure P.234-241.
- [18] V.I.Mokeev, E.N.Golovach, M.V.Osipenko et. al. Double charged pion production model for studies of  $N^*$  structure and strong interaction dynamics in nonperturbative domain. // Tver 2000, High energy physics and quantum field theory P.414-418
- [19] V.I.Mokeev, M.Ripani, B.S.Ishkhanov, et. al. Application of model for double charged pion production to studies of  $N^*$  and strong interaction dynamics in non-perturbative domain. // Proceedings of the 9-th Seminar Electromagnetic Interactions of Nuclei at Low and Medium Energies, September 20-22 2000, P.184-194.
- [20] M.Battaglieri, E.Anciant,...,V.I.Mokeev, et. al. Photoproduction of the  $\rho_0$  meson on the proton at large momentum transfer. // Phys.Rev.Lett V.87 (2001) P. 172002-172007.
- [21] E. Golovach, V.I.Mokeev, B.S.Ishkhanov, et. al. High lying  $N^*$  studies in the phenomenological analysis of charged double pion production. // Moscow 2001, High energy physics and quantum field theory P. 414-419.
- [22] V.I.Mokeev, M.Ripani, B.S.Ishkhanov, et. al. Phenomenological analysis of  $N^*$  excitation in charged double pion production. // NSTAR2001 Proceedings of Workshop on the Physics of Excited Nucleons ed by D.Drechsel and L. Tiator, P.181-188.
- [23] В.И.Мокеев, М.Рипани, Б.С.Ишханов и др. Феноменологическая модель для описания рождения пар пионов на протоне виртуальными

фотонами в области энергий возбуждения нуклонных резонансов // ЯФ Т.64 (2001) С. 1368-1375.

- [24] V.I.Mokeev, M.Ripani, B.S.Ishkhanov, et. al. High lying  $N^*$  studies in electromagnetic double charged pion production. // AIP Conf.Proc. V.619 (2002) P.505-509.
- [25] E. Golovach, V.D.Burkert, V.I.Mokeev, et. al. Polarization degrees of freedom in charged double pion production by virtual photons. // Genoa 2002, Gerasimov-Drell-Hearn sum rule and the spin structure of the nucleon P.321-325.
- [26] V.I.Mokeev, V.D.Burkert, B.S.Ishkhanov, et. al. Recent studies of high lying  $N^*$  in double charged pion electroproduction. // Pittsburgh 2002, Physics of excited nucleons P.246-250.
- [27] M.Ripani, V.D.Burkert, V.I.Mokeev, et. al. Measurement of  $e p \rightarrow e p \pi^+ \pi^-$  and baryon resonance analysis. // Phys.Rev.Lett V.91 (2003) P. 022002-022008.
- [28] V.D.Burkert, R. De Vita,..., V.I.Mokeev, et. al. Single quark transition model analysis of electromagnetic nucleon resonance transitions in the  $[70,1^-]$  supermultiplet. // Phys.Rev. V.C67 (2003) P.035204-035213.
- [29] В.И.Мокеев, М.Рипани, Б.С.Ишханов и др. Спиральные компоненты сечений в рождении пар заряженных пионов реальными фотонами на протонах. // ЯФ Т.66 (2003) С. 1322-1328.
- [30] В.Буркерт, В.И.Мокеев, Б.С.Ишханов и др. Новые возможности для изучения нуклонных резонансов из поляризационных наблюдаемых и угловых распределений вне плоскости рассеяния. // ЯФ Т.66 (2003) С. 2199-2208.
- [31] E. Golovach, V.D.Burkert, V.I.Mokeev, et. al. Measurement of high lying nucleon resonances and search for a missing state in double charged pion electroproduction off the proton. // Nucl. Phys. V.B117(2003) 668-670.
- [32] V.D.Burkert, V.I.Mokeev, G.V. Fedotov, et. al. Phenomenological analysis of  $ep \rightarrow ep\pi^-\pi^+$  data in the nucleon resonance region // Nucl. Phys. V.A737 (2004) P.S231-S233.

- [33] V.I.Mokeev, V.D.Burkert, L.Elouadrhiri, et. al. Baryon studies in double charged pion photo and electroproduction // NSTAR2004 Proceedings of the Workshop on the Physics of Excited Nucleons. P.321-324.
- [34] В.Буркерт, Б.С.Ишханов, В.И.Мокеев и др. Новые возможности для исследований нуклонных резонансов в рождении  $\pi^+\pi^-$  пар поляризованными электронами на неполяризованном протоне. // ЯФ Т.67 (2004) С. 1940-1944.
- [35] M.Anghinolfi, H.Avakian,....,V.I.Mokeev, et.al. The CLAS electromagnetic calorimeter at large angles. // Nucl. Instrum. Meth. V.A537 (2005) P.562.
- [36] S.Strauch, B.L.Berman,....,V.I.Mokeev, et. al. Beam-helicity asymmetries in double-charged-pion photoproduction on the proton. // Phys.Rev.Lett. V.95 (2005) P.162003-162008.
- [37] I.G.Aznauryan, V.D.Burkert,....,V.I.Mokeev, et. al. Electroexcitation of nucleon resonances at  $Q^2 = 0.65 - (\text{GeV}/c)^2$  from a combined analysis of single- and double-pion electroproduction data. // Phys.Rev.V.C72 (2005) 045201-045212.
- [38] V.I.Mokeev, V.D.Burkert, B.S.Ishkhanov, et.al. Phenomenological analysis of the clas data on double charged pion photo and electro-production. // Tallahassee 2005, Physics of excited nucleons P. 47-56.
- [39] V.I.Mokeev, V.D.Burkert. Nucleon resonance studies in phenomenological analysis of the CLAS data on double charged pion photo and electroproduction. // AIP Conf.Proc. V.842 (2006) P.339-341.
- [40] В.Буркерт, Н.В.Шведунов, В.И.Мокеев и др. Изобарные каналы в рождении  $\pi^-\pi^+$  пар на протоне виртуальными фотонами. // ЯФ Т.70 (2007) С.457-469.
- [41] Г.В.Федотов, В.Буркерт,....,В.И.Мокеев и др. Исследования низколежащих нуклонных резонансов в реакциях электророждения  $\pi^-\pi^+$  пар на протоне фотонами. // Известия РАН сер. физ. Т71 (2007) С.328-333.

- [42] V.I.Mokeev, V.D.Burkert. Phenomenological studies of double charged pion electroproduction from the CLAS data. // J.Phys.Conf.Ser V69 (2007) P.012019-012021
- [43] V.I.Mokeev, V.D.Burkert, L.Elouadrhiri, et. al. Analysis of CLAS data on double charged pion electroproduction. // Proceedings of the 11th Workshop on the Physics of Excited Nucleons. NSTAR2007, Springer, ed. by H-W. Hammer, V.Kleber, U.Thoma, H.Schmieden, P.76-80.

Мокеев Виктор Иванович

НУКЛОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ В РЕАКЦИЯХ ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ

$\pi^+\pi^-$  ПАР НА ПРОТОНЕ

(автореферат)

Работа поступила в ОНТИ 14.10.2008 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии КДУ

Тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: [press@kdu.ru](mailto:press@kdu.ru)