

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ
им. А. И. АЛИХАНОВА

На правах рукописи

КРУТЕНКОВА Анна Петровна

Двойная перезарядка пионов на ядрах при высоких энергиях

Специальность 01.04.16 – Физика ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2007

УДК 539.12

Работа выполнена в ГНЦ РФ – "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова"

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН В.В. Владимирский
(ГНЦ РФ ИТЭФ им. Алиханова, г. Москва)

доктор физ.-мат. наук О.Д. Далькаров
(ФИРАН им. Лебедева, г. Москва)

доктор физ.-мат. наук Е.А. Строковский
(ЛФЧ, ОИЯИ, г. Дубна)

Ведущая организация: ПИЯФ РАН им. Константинова, г. Гатчина

Защита состоится 2 октября 2007 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 по защите докторских диссертаций в конференц-зале ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу: г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ.

Автореферат разослан 31 августа 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

В.В. Васильев

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Реакции двойной перезарядки пиона ($DCX \equiv \text{Double Charge } eXchange$) на ядрах имеют характерную особенность: в обмене двумя единицами заряда пиона ($\pi^\pm \Rightarrow \pi^\mp$) должны участвовать два нуклона одного типа. Интерес к DCX связан, прежде всего, с возможностью непосредственно изучать в таких реакциях ядерные эффекты с участием, как минимум, двух нуклонов. Дрелл, Липкин и де-Шалит в 1961 году впервые предложили процесс DCX для поиска короткодействующих нуклон-нуклонных корреляций в ядрах в рамках естественного механизма двух последовательных однократных перезарядок ($SSCX \equiv \text{Sequential Single Charge } eXchange$) на двух нуклонах ядра. Первым наблюдаемым DCX-процессом была реакция с нефиксированным конечным состоянием ядра (инклюзивный процесс). В эксперименте, который был поставлен в ОИЯИ в 1962 г., регистрировались взаимодействия π^+ -мезонов с энергией 80 МэВ с ядрами эмульсии.

С вводом в строй мезонных фабрик с пучками высокой интенсивности (до $\sim 10^9$ пионов/сек) появилась возможность изучать менее вероятные эксклюзивные реакции DCX, в которых фиксировалось конечное состояние ядра. С конца 70-х годов исследование эксклюзивных DCX-реакций стало одной из наиболее активных областей экспериментальных и теоретических исследований в физике пионов при энергиях мезонных фабрик (до 550 МэВ). Использование спектрометров с высоким разрешением позволило изучать те аспекты ядерной структуры и динамики адронов с участием двух и более нуклонов, которые труднодоступны в обычных экспериментах по упругому и неупругому рассеянию γ -квантов, электронов, протонов, тяжелых ионов и других адронов. При кинетической энергии первичного пиона в области нескольких сотен МэВ энергетическое поведение экспериментальных сечений эксклюзивной DCX-реакции на основе SSCX-механизма может быть разумно описано в глауберовском подходе с использованием πN -амплитуд, известных из фазового анализа. При больших энергиях, которые мы будем называть высокими, экспериментальные данные практически отсутствуют.

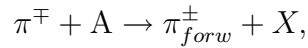
В конце 80-х годов наметилась перспективная с точки зрения поисков проявления новых механизмов DCX область в районе ~ 1 ГэВ. Стандартный SSCX-механизм предсказывает в этой области начальных энергий (0,55 – 1,3 ГэВ) очень резкий спад эксклюзивного DCX-сечения. Вывод основан на известном экспериментальном факте быстрого уменьшения с энергией амплитуды элементарного процесса однократной перезарядки пиона на нуклоне, которая входит в SSCX-сечение квадратично.

Изучение двойной перезарядки пиона в этой области энергий могло стать одной из главных целей увеличения максимальной энергии мезонной фабрики LAMPF, однако такой проект не был реализован. Поэтому экспериментальные исследования эксклюзивных DCX-процессов, в том числе и с формированием дважды изобар-аналоговых конечных состояний с относительно доступными для измерений сечениями, до сих пор остались невыполненными.

Наблюдение как эксклюзивных, так и инклюзивных DCX-реакций, отвечающих SSCX-механизму, осложнено фоном от канала с рождением дополнительных пионов,

доминирующего при таких энергиях. По этой причине, двойная перезарядка пиона в условиях действия SSCX-механизма фактически не была исследована. При высоких энергиях DCX-события наблюдались и анализировались только в двух работах (ИТЭФ, 1973, 1981), выполненных более 25 лет назад. В первой из них была получена оценка сечения при 3,7 ГэВ/с в нестандартном одноэтапном DCX-механизме Далькарова–Шапиро с отличной от SSCX-механизма кинематикой. Во втором опыте при 2,9 ГэВ/с в области действия SSCX-механизма было зарегистрировано не более шести событий этого редкого процесса, однако недостаточно высокая точность измерения импульса не позволила надежно их выделить.

Диссертантом было предложено наблюдать для изучения SSCX-механизма при высоких энергиях не эксклюзивные, а *инклюзивные DCX-процессы* в реакциях



в которых этот механизм проявляется в условиях больших сечений и не требует сверхвысокого (< 1 МэВ) разрешения.

В представленных в диссертации работах, выполненных на протонных синхротронах ИТЭФ и КЕК, осуществлены первые, и пока единственные, измерения DCX при высоких энергиях. Были обнаружены аномальные с точки зрения общепринятого SSCX-механизма физические эффекты, которые могут быть связаны с неупругими пионными перерассеяниями. Успех этих исследований был достигнут благодаря хорошему энергетическому разрешению трехметрового спектрометра ИТЭФ и сверхпроводящего спектрометра SKS (КЕК, Япония) и, прежде всего, выбору такой кинематики, в которой законом сохранения энергии-импульса отсекался фон, обусловленный рождением дополнительных пионов, не отвечающих SSCX-механизму.

Специальный выбор кинематики и достаточное энергетическое разрешение трехметрового спектрометра ИТЭФ были важными элементами и при использовании указанных инклюзивных процессов для изучения параметров распределений нуклонов в ядрах. Рассматриваемая в диссертации методика позволяет выделять эффекты экранирования отдельно на протоне и нейтроне в дейтроне и использует π^{-} - и π^{+} -пучки для раздельного измерения на протонах и на нейтронах ядер. Этот способ был предложен и опробован автором еще в 1976 г. в эксперименте на протонном синхротроне ИТЭФ У-7. Он обеспечивает относительно простое и эффективное получение сведений о протонных или нейтронных радиусах ядер на основе модельных расчетов в рамках релятивистского глауберовского подхода. Такая методика особенно важна для независимого определения нейтронных радиусов, что в случае использования адронных пробников остается актуальной задачей.

Цели и задачи диссертации

Главной целью диссертации является экспериментальное и теоретическое изучение основных свойств механизма двойной перезарядки пиона выше энергий, достигнутых на мезонных фабриках.

Другая её цель – продемонстрировать возможности метода, который позволяет разделять эффекты экранирования протона и нейтрона в дейтроне и определять радиусы распределений нуклонов разного типа в ядрах.

Общая проблема, рассматриваемая в диссертации, состоит в наблюдении и интерпретации *двух разных физических эффектов* – упругого и неупругого перерассеяний при высоких энергиях – в инклюзивных пион-ядерных реакциях, в которых вперед вылетает пион с зарядом, противоположным начальному. Оба эффекта

обусловлены соответствующими глауберовскими перерассеяниями пионов на нуклонах ядра: упругое перерассеяние отвечает за эффект экранирования, а неупругое, как следует из теоретических выводов диссертации, сильно сказывается на эффекте двойной перезарядки пионов при энергиях порядка 1 ГэВ и выше. Выбор одного или другого эффекта осуществляется соответствующим отбором зарегистрированных в этих реакциях событий путем использования двух разных кинематических областей, отличающихся энергиями детектируемых пионов.

В диссертации были сформулированы и решены следующие задачи:

I. Экспериментальное изучение процесса инклюзивной двойной перезарядки пиона на ядрах в механизме двух последовательных однократных перезарядок (SSCX) при энергиях 0,5 – 1,1 ГэВ.

II. Теоретическое описание обнаруженной в п. I аномально слабой энергетической зависимости DCX-процессов, основанное на подходе Грибова–Глаубера с учетом неупругих перерассеяний в модели однопионного обмена.

III. Наблюдение экранирования протона в дейтроне и раздельное измерение дифференциальных сечений на ядерных протонах и нейтронах для определения среднеквадратичных радиусов их распределений.

Научная новизна результатов

Впервые измерены высокоэнергетические части спектров вылетающих пионов в инклюзивной реакции $\pi^- + A \rightarrow \pi_{forw}^+ + X$ (при 0,5 ГэВ – для ядра ^{16}O , при 0,59 ГэВ – для ядер ^6Li , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O , а также для Al, Cu, In, Ta и Bi, при 0,75 и 1,1 ГэВ – для ядер ^6Li , ^7Li , ^{12}C и ^{16}O).

Впервые из полученных спектров выделены события реакции DCX, лежащие на краю спектра пионов, где отсутствует вклад от реакции с рождением дополнительного пиона. Это позволило для изучения механизма SSCX использовать инклюзивную реакцию, имеющую существенно большее сечение, чем эксклюзивная.

Впервые при 0,59 ГэВ получена зависимость DCX-сечения от атомного номера: $\sigma \propto A^\alpha$ при $\alpha = 0,68 \pm 0,04$. Наклон A -зависимости согласуется с ожидаемым в модели SSCX и с результатами LAMPF при более низких энергиях.

Обнаружена аномальная энергетическая зависимость DCX-сечений на ядрах ^{16}O , ^6Li , ^7Li и ^{12}C в интервале 0,59–1,1 ГэВ. Уменьшение сечений с энергией оказалось относительно медленным и противоречащим резкому падению, предсказанному в стандартном SSCX-механизме.

Впервые реакция DCX при высоких энергиях теоретически рассмотрена в рамках грибовского формализма описания πd -рассеяния и показано, что неупругие перерассеяния дают существенный вклад в сечение и происходят на близко расположенных нуклонах.

Впервые в подходе Грибова–Глаубера с использованием модели однопионного обмена выполнен детальный анализ амплитуд DCX-процесса и на этой основе – энергетической зависимости DCX-сечений на ядре ^{16}O . Получены количественные оценки верхней и нижней границ ожидаемого коридора сечений при энергиях 0,6 – 4,0 ГэВ.

С использованием ранее предложенного метода, использующего измерения дифференциальных сечений процессов $\pi^- + A \rightarrow \pi_{forw}^+ + (\pi^- + X')$, получены новые значения поправки на экранирование протона в дейтроне δ_p и глауберовского параметра дейтрона. Впервые определены величины сечений указанного процесса на изотопах ^6Li и ^7Li и с помощью глауберовского их описания в ядерной модели независимых частиц найдены среднеквадратичные значения радиусов этих ядер.

Научно-практическая значимость

Предложенной методикой и полученными физическими результатами диссертация *открывает два новых направления в релятивистской физике пион-ядерных взаимодействий*, относящихся к наблюдению и интерпретации инклюзивных процессов в двух специально выделенных кинематических областях. Спецификой этих процессов является детектирование вылетающих вперед пионов с зарядом, противоположным заряду начального пиона.

В случае наблюдения этих процессов в кинематической области, где рождение дополнительных пионов запрещено и имеет место явление двойной перезарядки налетающего пиона, возникла *перспектива изучения нового, релятивистского эффекта доминирования неупругих перерассеяний*, который обеспечивает возможность исследования инклюзивной двойной перезарядки в условиях достаточно традиционных измерений на магнитных спектрометрах в пучках обычных протонных синхротронов.

Тем самым, инклюзивный процесс DCX, оказавшийся уникальным с точки зрения проявления этого эффекта, становится областью экспериментального исследования неупругих перерассеяний при энергиях в районе 1 – 5 ГэВ. В этой энергетической области указанный эффект определяет всю физическую картину явления DCX, в отличие от других адрон-ядерных взаимодействий, в которых учет неупругих перерассеяний приводит лишь к поправкам к величине измеряемого сечения на уровне процентов.

Особый интерес к изучению эффектов неупругих перерассеяний обусловлен также тем, что, во-первых, в обычно используемых каскадных моделях они не учитываются и, во-вторых, неупругие перерассеяния, связанные с образованием промежуточных адронных систем с большими массами, играют важную роль в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Они приводят, в частности, к значительному уменьшению множественности адронов (на единицу быстроты), образующихся в этих процессах. Так, при энергии ускорителя RHIC инклюзивные сечения рождения адронов уменьшаются приблизительно вдвое по сравнению с предсказаниями модели Глаубера. С точки зрения КХД, эти явления соответствуют экранированию мягких партонов в сталкивающихся ядрах и приводят при сверхвысоких энергиях к явлению "насыщения".

Научно-практическая ценность изложенной в диссертации деятельности по DCX подкрепляется тем фактом, что Комитет по научной политике будущего протонного комплекса J-PARC на энергию 50 ГэВ (Токай, Япония) включил в список для рассмотрения планируемых работ предложение группы ИТЭФ по проведению совместного эксперимента по этой тематике. Обоснование было представлено диссертантом на заседании Комитета в приглашенном докладе (январь 2007 г.). В марте 2007 г. эксперимент прошел первую стадию одобрения и получил номер E08.

Представленные в диссертации результаты по наблюдению инклюзивных процессов в другом кинематическом интервале демонстрируют *перспективность применения нового метода получения независимых оценок эффективных радиусов распределений протонов и нейтронов в ядрах*. Определение ядерных параметров по предложенной методике не только дополняет аналогичные исследования с помощью других пучков ускорителей (γ -квантов, электронов, протонов и т. п.), но и обладает рядом преимуществ: простотой сравнительных экспериментов в пучках пионов разного знака, а в ряде случаев достижением большей относительной точности или даже уникальных результатов – для нейтронных распределений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод измерения DCX-сечений в процессах $\pi^- + A \rightarrow \pi_{forw}^+ + X$, позволяющий выделить область действия SSCX-механизма, свободную от фона реакций с рождением дополнительных пионов [1,2].
2. Результаты измерения спектров вылетающих пионов в процессе $\pi^- + A \rightarrow \pi_{forw}^+ + X$ для ядра ^{16}O [1-4] при начальных энергиях T_0 , равных 0,5 ГэВ, 0,59 ГэВ, 0,75 ГэВ и 1,1 ГэВ, а также [5] для ядер $^{6,7}\text{Li}$, ^{12}C при $T_0 = 0,59$ ГэВ, 0,75 ГэВ и 1,1 ГэВ и ядер Al, Cu, In, Ta, Bi при $T_0 = 0,59$ ГэВ; зависимость инклюзивного сечения процесса двойной перезарядки от атомного номера ядра [5, 6] при 0,59 ГэВ.
3. Обнаружение энергетической DCX-аномалии: отсутствие резкого падения сечения с энергией для ядер ^{16}O , $^{6,7}\text{Li}$, ^{12}C в интервале энергий 0,59 – 1,1 ГэВ [1, 6].
4. Оценка доминирующего вклада глауберовских неупругих перерасеяний в инклюзивную двойную перезарядку пиона при высоких энергиях [7] и указание на связь этого эффекта с короткодействующими NN -корреляциями.
5. Количественные расчеты верхней и нижней границ для энергетической зависимости инклюзивного DCX-сечения на ^{16}O [8] при энергиях 0,6 – 4 ГэВ в рамках подхода Грибова–Глаубера к неупругим перерасеяниям с учетом двухпионных промежуточных состояний в модели однопионного обмена.
6. Определение значения поправки на экранирование протона нейтроном в дейтроне и величины его глауберовского параметра ($\langle r^{-2} \rangle_d$), уточненные новыми измерениями сечения процесса $\pi^- + A \rightarrow \pi_{forw}^+ + (\pi^- + X')$ на дейтроне [9-11], и величины сечения на свободном нейтроне [10]. Результаты измерения сечений указанного процесса на ядрах $^{6,7}\text{Li}$ и определения величин $\langle r^2 \rangle_{^{6,7}\text{Li}}$ [12].

Личный вклад диссертанта

1. Постановка эксперимента на 3-метровом спектрометре ИТЭФ по изучению инклюзивного процесса двойной перезарядки пиона (DCX) на ядрах при высоких энергиях. Предложение метода для выделения области действия стандартного DCX-механизма двух последовательных однократных перезарядок (SSCX).

2. Руководство и непосредственное участие в проведении измерений, обработке данных и анализе результатов. Получение и проверка вывода о наблюдении аномалии в энергетической зависимости DCX-сечений на ядре ^{16}O , а также на ^6Li , ^7Li и ^{12}C .

3. Предложение независимого эксперимента по наблюдению DCX-аномалии на спектрометре SKS (КЕК, Япония). Руководство набором статистики и окончательный физический анализ результатов.

4. Проведение расчетов сечения DCX по MC-программам в стандартной модели SSCX и с учетом вклада неупругих перерасеяний для объяснения DCX-аномалии. Проверка применимости к DCX модели однопионного обмена, детальные расчеты амплитуд для предсказания энергетического хода DCX-сечения.

5. Предложение и проведение на 3-метровом спектрометре ИТЭФ эксперимента по разделённому измерению дифференциальных сечений инклюзивного рождения пионов пионами на протонах и нейтронах ядер для определения параметров нуклонных распределений.

6. Анализ результатов и получение в рамках глауберовского подхода величины поправки на экранирование протона в дейтроне, его глауберовского параметра и

протонных rms-радиусов ядер изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$, а также идея оценки отношения нейтронных и протонных радиусов среднетяжелых ядер.

Апробация работ

Выполненные с помощью трехметрового спектрометра ИТЭФ измерения, приведшие к обнаружению DCX-аномалии, получили подтверждение в эксперименте T459 в КЕК (Tsukuba, Japan), поставленном на SKS в 1999 г. коллаборацией ИТЭФ/КЕК по предложению диссертанта и её коллег из ИТЭФ.

Конкретные результаты с наблюдением DCX-аномалии и её теоретической интерпретацией [1-8] и [13-20] (Части I и II диссертации) докладывались диссертантом и публиковались в трудах следующих международных конференций: Mesons and Nuclei at Intermediate Energies (Dubna, 1994) [13], Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics (Dubna, 1994, 1996) [14, 15], Mesons and Light Nuclei (Straž pod Ralskem, 1995; Prague, 2001) [16, 17], "Meson 96" Workshop (Cracow, 1996) [18], 6th Conf. Intersections of Particle and Nuclear Phys., CIPANP97 (Big Sky, USA, 1997) [19], XVII Particles and Nuclei Intern. Conf. PANIC05 (Santa Fe, USA, 2005) [20].

Отдельные материалы по изучению DCX были представлены в секционных докладах на сессиях отделения РАН (1994-2004); обзорные материалы докладывались диссертантом на международных рабочих совещаниях и семинарах – в Phys. Inst., Univ. Tübingen (Oberjoch, Germany, 1993, 1998), в ИТЭФ (Москва, 1994, 2003), в Univ. of Valencia (Valencia, Spain, 1995), в I. Inst. Experimentalphys., Univ. Hamburg (Hamburg, Germany, 1998), в ПИЯФ (С.-Петербург, 2003) и в Lab. Nucl. Science, MIT (Boston, USA, 2005).

Коллектив трехметрового спектрометра представлял аналогичную приведенной выше информацию в следующих докладах: Intern. Conf. on Physics with GeV-Particle Beams (Juelich, Germany, 1994) [21], Nuclear and Particle Physics with Meson Beams in the 1-GeV Region (INS, Tokyo, Japan, 1995) [22], XIV Intern. Conf. on Particles and Nuclei (Williamsburg, USA, 1996) [23], 7th Intern. Symp. on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (Vancouver, B.C., Canada, 1997) [24].

Результаты [9-12], изложенные в Части III, были представлены частично в виде докладов диссертанта и опубликованы в трудах конференций молодых ученых в Нор-Амберде (1979) и Ташкенте (1981) и Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра в Алма-Ате (1984). Основные сведения по измерению экранирования протонов докладывались на секционных заседаниях сессий ОЯФ АН СССР (1978-1984); более подробные сведения были изложены диссертантом на семинарах в ЛИЯФ (1979), ИФВЭ (1979), ЛВЭ ОИЯИ (1979), ИЯИ ММФ (1979), ЛЯП ОИЯИ (1980).

Публикации автора по теме диссертации

Основные работы автора по новым экспериментальным и теоретическим результатам, цитированным в диссертации, перечислены в предыдущих подразделах (см. [1–24] в *Списке работ, включенных в диссертацию*). Полный список публикаций по материалам диссертации включает также работы с участием автора [25–26], связанные с трехметровым спектрометром и методикой обработки экспериментальных результатов.

Основные материалы диссертации публиковались в таких реферируемых журналах, как *Письма в ЖЭТФ*, *Ядерная физика*, *Nuclear Physics A*, *Nuclear Physics B*, *Journal of Physics G*, *Physical Review C* и в других изданиях (из них семь публикаций – в журналах из перечня ВАК 2006 г.), а также в трудах российских и международных конференций.

Краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, трех частей, содержащих 9 глав, заключения и списка цитированных работ (157 наименований) – всего 157 страниц.

Введение состоит из трех разделов. Первый раздел “*Теоретические основы диссертации*” посвящен краткому теоретическому рассмотрению эффектов пион-нуклонных перерассеяний, которые лежат в основе интерпретации изучаемых процессов, – двойной перезарядке пиона и экранирования нуклонов в ядре с разделением вкладов протонов и нейтронов. Их объединяет единый теоретический подход, а именно – описание взаимодействий адронов с ядрами с учетом *упругого и неупругого перерассеяний* налетающего адрона на отдельных нуклонах. Это описание сформулировано на примере πd -рассеяния в рамках нерелятивистской квантовой механики в известной работе Глаубера и обобщено в квантово-полевом рассмотрении Грибовым. Как известно, упругое глауберовское перерассеяние определяет суммарный эффект экранирования протона нейтроном и нейтрона протоном в дейтроне, что приводит к дефекту полного πd -сечения (по сравнению с суммой сечений на протоне и нейтроне). Глауберовская теория связывает дефект сечения с размером дейтрона (глауберовским параметром); в подходе Грибова устанавливается область применимости и точность формулы Глаубера и, кроме того, учитывается эффект неупругого перерассеяния.

Во втором разделе “*Методические и экспериментальные основы диссертации*” сформулирована методика, позволившая провести измерения и интерпретацию в формально единой инклюзивной реакции

$$\pi^\mp + A \rightarrow \pi_{forw}^\pm + X \quad (1)$$

двух разных эффектов перерассеяния пионов на нуклонах, которые лежат в основе двух независимых явлений, являющихся предметом рассмотрения диссертации. Первое явление, главное по научной значимости, связано с изучением вклада *неупругих перерассеяний* в стандартный механизм SSCX двойной перезарядки пиона на ядре. Второе явление, обусловленное процессами, в которых проявляются *упругие перерассеяния* при экранировании нуклона нуклонами, является составной частью предложенного диссертантом способа оценки пространственных размеров распределений нуклонов в ядрах.

Каждому из этих эффектов отвечают измерения процессов (1) в кинематических областях DCX и SCR (screening), отличающихся энергиями детектируемых пионов. В приближении взаимодействия пион-нуклон соответствующие кинематические интервалы по квадрату недостающей к пиону массе M_X^2 в (1) являются смежными:

$$m_N^2 \leq M_X^2(DCX) \leq (m_N + m_\pi)^2 \leq M_X^2(SCR) \leq (m_N + 2m_\pi)^2. \quad (2)$$

Для двойной перезарядки интервал DCX правильнее представить в виде ограничения на величину передаваемой ядру энергии $\Delta T \equiv T_0 - T$ (T_0 и T – кинетические энергии начального и конечного пионов):

$$0 \leq \Delta T(DCX) \leq m_\pi \simeq 140 \text{ МэВ}. \quad (3)$$

В интервале (3) рождение дополнительного пиона в процессах (1) запрещено законом сохранения энергии-импульса. Поэтому использование кинематики (3) является естественным для изучения инклюзивных реакций двойной перезарядки пиона в механизме SSCX.

Рассмотрено общее требование к экспериментальным установкам – хорошее энергетическое разрешение. Кроме того, относительная узость кинематических областей импульсов детектируемых частиц в *DCX* и *SCR* и присущая редкому процессу двойной перезарядки малость сечения обуславливают необходимость использования интенсивных пучков пионов и применения методов эффективного выделения сигнала в присутствии достаточно больших фонов. В значительной мере эти требования удалось выполнить в экспериментах в ИТЭФ и КЕК на установках с магнитными спектрометрами, которые работали на пионных пучках протонных синхротронов, соответственно в Москве и в Цукубе (Япония).

Представлено описание этих установок и даны их основные характеристики. Большая часть экспериментальных работ выполнена на базе универсального трехметрового магнитного трекового спектрометра ИТЭФ, который создавался в конце 60-х годов и был позднее модернизирован и использовался для всех измерений в кинематике *SCR* и, главным образом, для изучения *DCX*-механизма. Детектирующими элементами установки являлись шесть больших узкозазорных искровых камер, помещенных внутри магнита с максимальным полем 1,7 Тл в рабочем объеме 100 см×50 см×300 см. Съем информации с камер осуществлялся быстрым стереофотоаппаратом с использованием системы зеркал. Оцифровка снимков проводилась "офф-лайн" на автоматическом сканирующем устройстве, использовавшем малую ЭВМ для записи результатов.

DCX-эксперимент, аналогичный выполненному на 3-м спектрометре, был проведен на современном каонном спектрометре SKS (КЕК) со сверхпроводящим дипольным магнитом с максимальным полем 3 Тл, полюсным зазором 50 см, длиной центральных траекторий частиц в поле до 5 м и углом их отклонения до 100°. Детектирующими элементами на входе и выходе магнита служили четыре набора дрейфовых камер для определения импульсов входящих и выходящих частиц и триггерные счетчики трех типов для выделения и идентификации частиц.

Третий раздел *"Сведения о диссертации: краткое представление работ"* содержит изложение материалов по актуальности тематики, основным целям и задачам диссертации, научной новизне результатов, их научно-практической значимости и апробации работ.

В **Части I** *"Экспериментальное исследование инклюзивной двойной перезарядки пионов на ядрах при энергиях 0,5 – 1,1 ГэВ"*, состоящей из четырех глав, представлено основное экспериментальное содержание диссертации. Для изучения двойной перезарядки пиона в механизме *SSCX* в реакции (1) используется кинематическая область (3).

В **Главе 1** *"Процесс двойной перезарядки пиона (DCX) на ядрах: краткий обзор"* дана краткая история экспериментальных и теоретических исследований пионных *DCX*-процессов, начиная с первых измерений 1962 г. группы Ю.А.Батусова и др. в ОИЯИ.

При $T_0 \lesssim 0.5$ ГэВ энергетическое поведение экспериментального сечения эксклюзивной *DCX* на ядрах может быть разумно описано в рамках *SSCX*-механизма. При больших энергиях, в интервале $T_0 \approx 0,6 - 1$ ГэВ, в рамках этого механизма предсказывалось падение *DCX*-сечения вперед приблизительно на два порядка. Это падение связано с известным резким уменьшением амплитуды однократной перезарядки пиона. Ожидалось, что на фоне такого резкого падения сечения может проявиться вклад других возможных механизмов *DCX*, в частности, связанных с двухнуклонными корреляциями. Хотя мысль о такой возможности была высказана более десятка лет назад, измерения энергетического хода сечения эксклюзивной реакции *DCX* при таких

энергиях до сих пор не были выполнены. Это связано, прежде всего, с отсутствием в мире пионных пучков необходимой энергии, имеющих достаточную интенсивность.

Диссертантом было предложено изучать в интервале энергий 0,6 – 1,1 ГэВ не эксклюзивный, а *инклюзивный* DCX-процесс, энергетическая зависимость которого в SSCX-механизме также обусловлена поведением амплитуды однократной перезарядки пиона. Его сечение в SSCX-механизме, так же как для эксклюзивной реакции, должно падать с энергией. Но инклюзивный процесс имеет большее сечение, чем эксклюзивный, и его регистрация не требует высокого импульсного разрешения установки. Однако это разрешение должно быть достаточным для отбора событий в высокоэнергетической части спектра вылетающего пиона, где вклад SSCX-механизма является чистым, т. е. свободным от фона реакции с рождением дополнительного пиона.

Изложение этих исследований – подготовки, проведения и анализа результатов – представлено в **Главе 2** “DCX-эксперимент на трехметровом магнитном спектрометре ИТЭФ”. Даны сведения о параметрах модернизированной установки, отборе событий и вычислении сечений по зарегистрированным спектрам π^+ на примере инклюзивной реакции (1) на ядре ^{16}O . Интенсивность π^- -пучка составляла $(1-5)\cdot 10^5$ пионов/сек. Основная аппаратура располагалась в магнитном поле: мишень находилась в центре магнита, траектории начальной и конечной частиц регистрировались в многозачеренковых камерах. Разрешение спектрометра – $\Delta p/p \simeq 1\%$. Заряженные пионы отделялись от фона электронов и позитронов с помощью черенковских счетчиков, а вылетающие пионы от протонов – по времени пролета.

Сводка суммарных результатов измерений на ядре ^{16}O дана в табл. 1; использовались два триггера – S_π и S'_π . В первом из них (в отличие от второго) был задействован газовый черенковский счетчик высокого давления для подавления и измерения основного фона к вылетающим вперед пионам. Этот фон обусловлен позитронами, рождающимися за счет различных электромагнитных процессов, сопутствующих взаимодействиям первичного пучка с мишенью и элементами детектирующей аппаратуры. Во втором триггере этот фон учитывался поправочным коэффициентом на основании измерений, сделанных с первым триггером.

Таблица 1: Сечения реакции $\pi^- \text{ }^{16}\text{O} \rightarrow \pi^+ X$, проинтегрированные по области ΔT от 0 до 80 МэВ (используемой для сравнения с результатами LAMPF при меньших энергиях), $\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{80}$, и по области ΔT от 0 до 140 МэВ, $\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{140}$

	$\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{80}$, мкбн/ср			$\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{140}$, мкбн/ср		
T_0 , ГэВ	0.59	0.75	1.1	0.59	0.75	1.1
S_π	18.8 ± 2.1	11.6 ± 2.3	11.4 ± 4.0	80.2 ± 4.3	43.4 ± 5.1	23.3 ± 6.5
S'_π		10.5 ± 2.7	6.4 ± 1.9		41.4 ± 6.5	31.4 ± 4.7
$\langle S_\pi + S'_\pi \rangle$	18.8 ± 2.1	11.1 ± 1.8	7.3 ± 1.7	80.2 ± 4.3	42.6 ± 4.0	28.6 ± 3.8

Глава 3 “DCX-эксперимент на каонном магнитном спектрометре SKS (КЕК)” содержит информацию по эксперименту T459 на протонном синхротроне КЕК (Цукуба, Япония) с энергией 12 ГэВ, поставленному для независимой проверки результатов трехметрового спектрометра ИТЭФ по инициативе диссертанта, проведенному с ее участием и проанализированному под ее руководством.

Методика выполнения опыта ИТЭФ/КЕК, его цель и обработка результатов измерений – такие же, как и на У-10 в ИТЭФ. Специфическими условиями работы

SKS являлись: на порядок большая интенсивность π^- -пучка и современная аппаратура детектирования частиц, работающая в рамках многолетней программы по гиперядерной физике и обеспечивающая существенно лучшее энергетическое разрешение (< 3 МэВ (FWHM)).

Основной проблемой, при отсутствии широкоапертурного газового черенковского счетчика типа примененного в ИТЭФ, было определение параметра R , учитывающего фон позитронов, для решения которой проводился отдельный сеанс с использованием специально созданного аэрогелевого черенковского счетчика. По измеренным спектрам π^+ получены значения сечений (см. табл. 2); приведенные ошибки учитывают как статистические погрешности, так и неопределенности, связанные с определением R .

Таблица 2: Сечения реакции $\pi^- \text{ }^{16}\text{O} \rightarrow \pi^+ X$, проинтегрированные по ΔT от 0 до 80 МэВ, $\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{80}$, и от 0 до 140 МэВ, $\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{140}$, с учетом их статистических ошибок и неопределенности в значениях R

	$\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{80}$, мкб/ср		$\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{140}$, мкб/ср	
T_0 , ГэВ	0,50	0,75	0,50	0,75
$I_{SKS} = 145/272$ А	$15,1 \pm 3,5$	$12,7 \pm 1,6$	$96,2 \pm 17,5$	$53,2 \pm 5,2$
$I_{SKS} = 175/320$ А	$16,6 \pm 3,6$	$15,5 \pm 1,8$		$59,0 \pm 5,7$
среднее значение	$15,9 \pm 3,2$	$14,1 \pm 1,5$	$96,2 \pm 17,5$	$56,1 \pm 5,4$

Для интервала 0 – 80 МэВ, оба источника вносят в ошибки сравнимый по величине вклад, тогда как для 0 – 140 МэВ неопределенности в R преобладают по сравнению со статистикой. Результаты двух измерений при разных значениях тока I_{SKS} в спектрометре SKS находятся в хорошем согласии; поэтому в последней строке приведены также средние значения сечений.

Глава 4 "Спектры пионов в DCX-экспериментах ИТЭФ и ИТЭФ/КЕК, А-зависимость и аномалия в энергетической зависимости DCX-сечений" содержит результирующую информацию, полученную в этих опытах на всех использованных ядрах-мишенях, и её анализ. Представлены результаты следующих измерений спектров π_{forw}^+ : на ^{16}O (при 0,5, 0,59, 0,75 и 1,1 ГэВ), на ^6Li , ^7Li и ^{12}C (0,59, 0,75 и 1,1 ГэВ), на Al, Cu, In, Ta и Bi (0,59 ГэВ) и, при расширенном диапазоне по ΔT , на ^6Li , ^7Li , ^{16}O (0,59 ГэВ). На рис. 1 форма найденных ΔT -зависимостей сопоставлена с теоретической (сплошная кривая), вычисленной для SSCX-механизма в рамках каскадной MC-модели, которая была разработана для описания (при энергиях выше 0,4 ГэВ и на основе данных фазового πN -анализа) совокупности различных каналов пион-ядерных взаимодействий с учетом ферми-движения нуклонов и поглощения пионов. В использованном варианте модели учтен также (штриховая кривая) эффект перенормировки во внутриядерной материи πN -амплитуд однократной перезарядки. Следует заметить, что теоретические расчеты в SSCX-механизме воспроизводят имеющуюся в литературе информацию по спектрам лишь на качественном уровне, поскольку эффект ядерной среды в пионных процессах учитывается модельным образом. Абсолютные величины дифференциальных сечений при 0,75 и 1,1 ГэВ в экспериментах ИТЭФ и ИТЭФ/КЕК в несколько раз превышают ожидаемые значения. При этом эффект внутриядерной среды только уменьшает теоретические предсказания, а условия измерений отвечают области $\Delta T < 140$ МэВ, в которой нет фона рождения мезона мезоном (т. е. $\pi \notin X$ в наблюдаемой инклюзивной реакции) и работает SSCX-механизм. Поэтому из данных по спектрам

следует, что никакого резкого падения инклюзивных DCX-сечений с увеличением энергии ожидать не приходится.

По измеренным спектрам при 0,59 ГэВ на указанных выше ядрах-мишенях представлены результаты по зависимости дифференциальных DCX-сечений от атомного номера A . Использованная для описания данных каскадная MC-программа расчетов в механизме SSCX хорошо описывает наблюдаемую A -зависимость, которая соответствует закономерности A^α с $\alpha \approx 2/3$ и сопоставима с полученной нами зависимостью по результатам LAMPF при 0,24 ГэВ и 25° . Тем самым данные опытов ИТЭФ находят подкрепление и со стороны независимых результатов по A -зависимости.

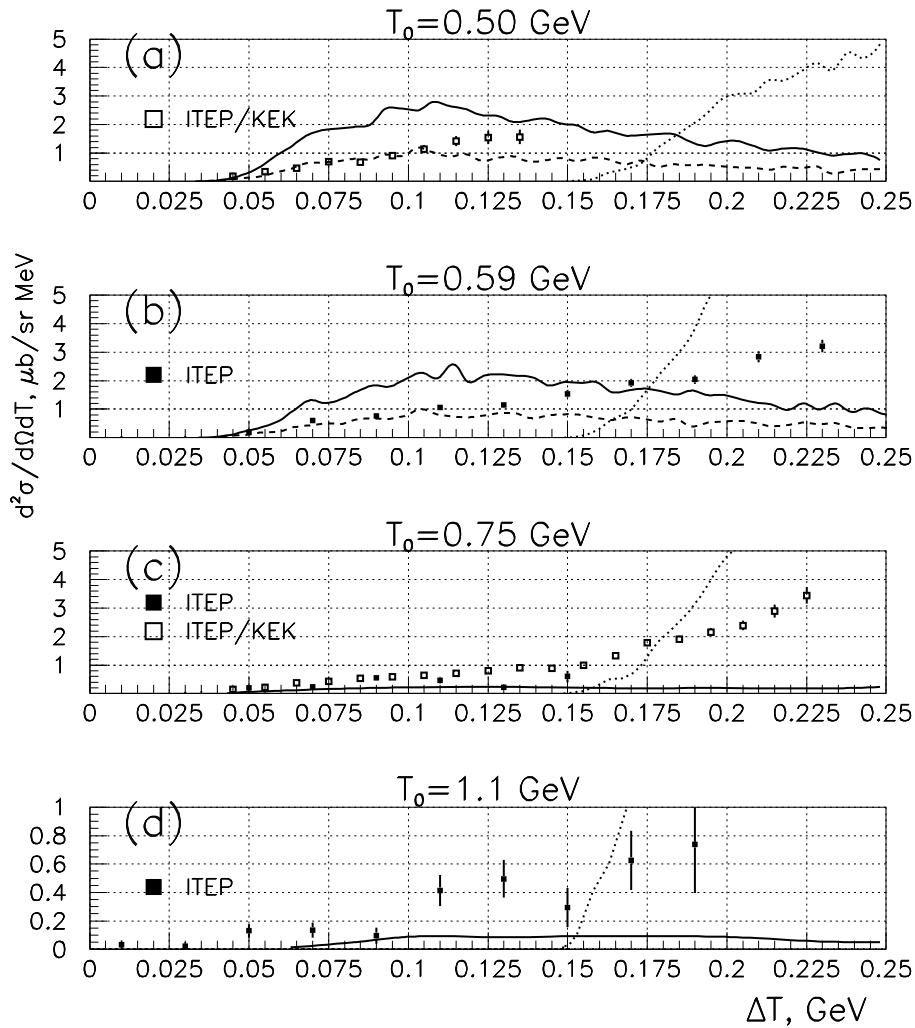


Рис. 1: Спектры π^+ по переменной $\Delta T = T_0 - T$ в реакции $^{16}\text{O}(\pi^-, \pi^+)X$ при $\langle \theta \rangle = 5^\circ$ (T_0 и T – кинетические энергии начального и вылетающего пионов, соответственно). Показаны только статистические ошибки. Сплошная и штриховая кривые отвечают, соответственно, стандартному SSCX-механизму (без учета и с учетом эффекта перенормировки πN -амплитуд однократной перезарядки). Точечная кривая относится к реакции рождения дополнительного пиона.

Рис. 2 указывает на относительно слабое уменьшение сечений с ростом энергии начального пиона, которое противоречит теоретическим ожиданиям; сплошная кривая отвечает верхней границе предсказаний SSCX-механизма, без учета ядерной среды. Энергетический ход инклюзивных DCX-сечений на ядрах ^6Li , ^7Li , ^{12}C (см. рис. 3)

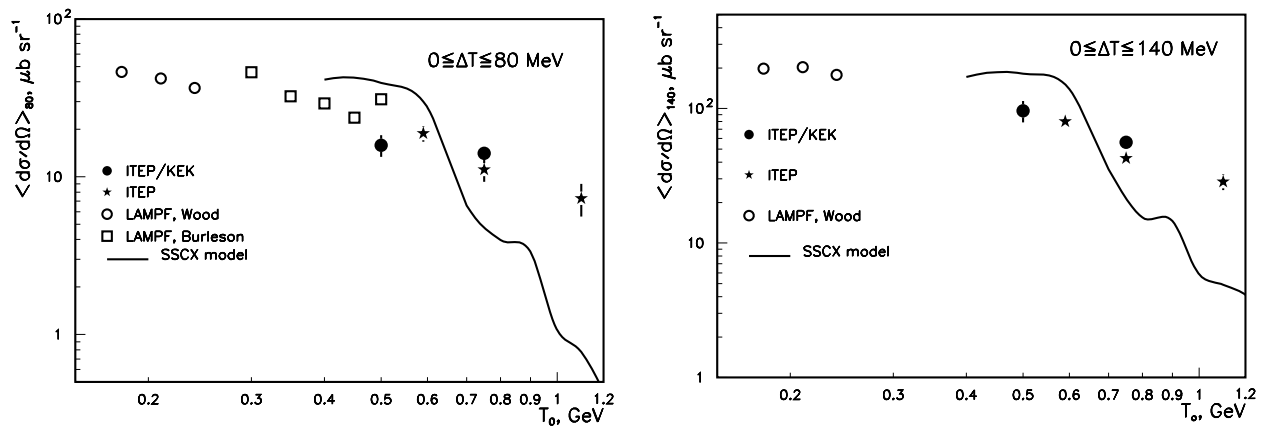


Рис. 2: Энергетическая зависимость сечения реакции $\pi^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow \pi^+ + X$ при $\langle \theta \rangle = 5^\circ$, проинтегрированного по интервалам ΔT от 0 до 80 МэВ и от 0 до 140 МэВ, по результатам измерений ИТЭФ (звездочки), ИТЭФ/КЕК (черные кружочки), LAMPF (белые квадратики для зарядово-симметричной реакции ${}^{16}\text{O}(\pi^+, \pi^-)X$ и, под углом 25° , – белые кружочки). Здесь кривая отвечает стандартному SSCX-механизму без учета эффекта перенормировки πN -амплитуд однократной перезарядки.

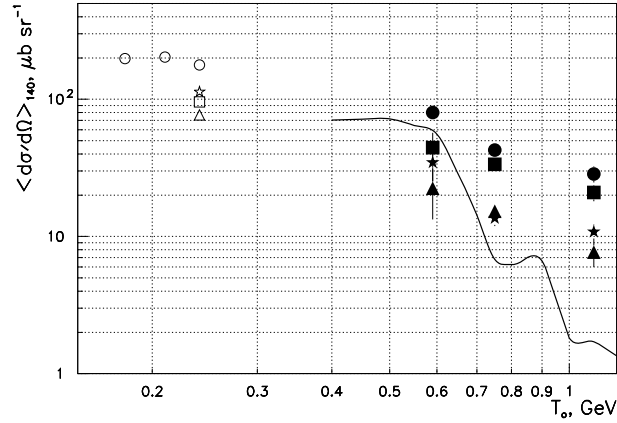


Рис. 3: Энергетическая зависимость сечения реакций $\pi^- + A \rightarrow \pi^+ + X$ при $\langle \theta \rangle = 5^\circ$, проинтегрированное по интервалу ΔT от 0 до 140 МэВ: кружочки – $A = {}^{16}\text{O}$, звездочки – ${}^{12}\text{C}$, квадратики – ${}^7\text{Li}$, треугольники – ${}^6\text{Li}$; черные значки – ИТЭФ ($\langle \theta \rangle = 5^\circ$), белые – LAMPF ($\langle \theta \rangle = 25^\circ$). Кривая отвечает стандартному SSCX-механизму на ядре ${}^{16}\text{O}$, но с учетом эффекта перенормировки πN -амплитуд однократной перезарядки.

– во всей области измерений ИТЭФ такой же, как было обнаружено на ядре ${}^{16}\text{O}$. Суммарные экспериментальные результаты первой части диссертации приведены в табл. 3; представлены данные измерений DCX-сечений для ядра ${}^{16}\text{O}$ группами ИТЭФ и ИТЭФ/КЕК и их расчетов в рамках SSCX-механизма, в том числе с учетом эффекта перенормировки в ядерной материи (nuclear matter effect: NME) πN -амплитуд однократной перезарядки. В приведенных в этой таблице значениях экспериментальных ошибок первыми указаны статистические, вторыми – систематические погрешности; точность теоретического расчета мы оцениваем величиной $\approx 30\%$. Данные табл. 3 фиксируют два впервые обнаруженных на опыте явления:

- (i) экспериментальные сечения *существенно превышают их теоретические оценки* при энергиях 0,75 и 1,1 ГэВ;
- (ii) наблюдаемое падение сечений с ростом энергии является *относительно медленным*. Оба результата интерпретируются как энергетическая DCX-аномалия, обусловленная вкладом нового механизма.

Таблица 3: Полный перечень измеренных и рассчитанных (в SSCX-механизме, а также с учетом NME) сечений реакции $\pi^- \text{}^{16}\text{O} \rightarrow \pi^+ X$, проинтегрированных от 0 до 80 МэВ и от 0 до 140 МэВ

	$\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{80}$, мкбн/ср			
T_0 , ГэВ	0,50	0,59	0,75	1,12
ИТЭФ		$18,8 \pm 2,1 \pm 1,9$	$11,1 \pm 1,8 \pm 1,1$	$7,3 \pm 1,7 \pm 0,7$
ИТЭФ/КЕК	$15,9 \pm 1,6 \pm 2,8$		$14,1 \pm 0,6 \pm 1,3$	
LAMPF	31			
SSCX	39,4	28,7	5,28	0,77
SSCX+NME	15,7	11,0	1,55	0,37

	$\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{140}$, мкбн/ср			
T_0 , ГэВ	0,50	0,59	0,75	1,12
ИТЭФ		$80,2 \pm 4,3 \pm 8,0$	$42,6 \pm 4,0 \pm 4,3$	$28,6 \pm 3,8 \pm 2,9$
ИТЭФ/КЕК	$96,2 \pm 5,4 \pm 16,7$		$50,6 \pm 1,3 \pm 5,2$	
SSCX	181,9	143,6	25,4	4,89
SSCX+NME	71,9	57,26	6,81	1,71

Часть II “Теоретическая интерпретация энергетической DCX-аномалии” содержит теоретические расчеты и оценки энергетического поведения инклюзивных DCX-сечений выше 0,6 ГэВ в рамках расширенного SSCX-механизма и других модельных подходов.

В **Главе 5** “Неупругие перерасеяния : DCX в квантово-полевом подходе Грибова к адрон-ядерным процессам” кратко формулируется квантово-полевой формализм Грибова в применении к процессу двойной перезарядки пиона в механизме SSCX.

Рассмотрена наиболее общая диаграмма для DCX пиона на ядрах, показанная на рис. 4. Интегрирование по продольным импульсам нуклонов p_i, p'_i ($i = 1, 2$) переписывается в виде интеграла по $M_H^2 = (p_\pi + p_1 - p'_1)^2 = (p'_\pi + p'_2 - p_2)^2$, квадрату инвариантной массы промежуточной адронной системы, которое проводится, как обычно, в комплексной плоскости M_H^2 . При определенных допущениях о свойствах амплитуд процесса эта диаграмма может быть сведена к сумме отдельных диаграмм: полюсных вкладов от π^0 и η^0 (упругое и квазиупругое перерасеяние, см. рис. 5, (a) и (b)) и вкладов от неупругих перерасеяний (IR) с многопионными промежуточными состояниями (рис. 5, (c)+...).

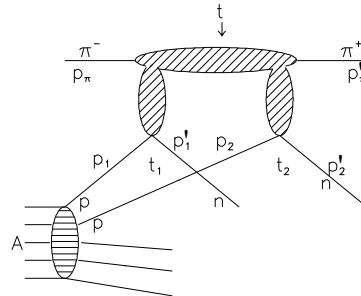


Рис. 4: Двойная перезарядка пиона на ядре (наиболее общая диаграмма).

Исходными для дальнейших вычислений являлись формулы для аддитивных вкладов в DCX-сечение

$$\frac{d\sigma_{DCX}^H}{d\Omega} \propto \left(\int \int \frac{d^2\sigma_{\pi \rightarrow H}}{dt dM^2} dt dM^2 \right)^2, \quad H = \pi^0, \eta^0, \dots, \quad (4)$$

где интегрирование ведется по квадрату массы промежуточного состояния H . Рассматривались квазиупругая и неупругие “поправки” Δ_H за счет учета различных состояний H . При этом предполагается отсутствие интерференции между разными диаграммами, что справедливо при представлении $\pi\pi$ -амплитуд в модели однопионного обмена.

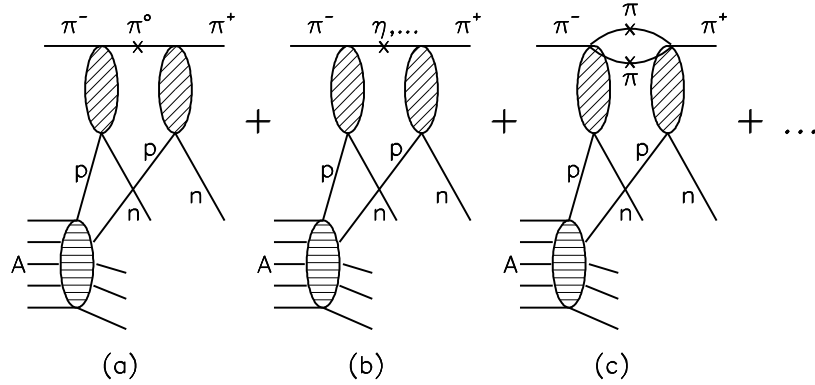


Рис. 5: Диаграммы SSCX-механизма двойной перезарядки пиона (с двумя последовательными перезарядками): (a) – упругое перерассеяние с промежуточным состоянием $H^0 = \pi^0$, (b) – квазиупругое перерассеяние ($H^0 = \eta, \dots$), (c) – неупругие перерассеяния ($H^0 = \pi^+\pi^-$), +

Сами поправки выражаются в виде отношений квадратов соответствующих полных сечений к квадрату полного сечения в обычном упругом SSCX-механизме с π^0 в промежуточном состоянии:

$$\Delta_H = \left(\int \frac{d\sigma_{\pi^-p \rightarrow Hn}}{dt_1} dt_1 \right)^2 / \left(\int \frac{d\sigma_{\pi^-p \rightarrow \pi^0n}}{dt_1} dt_1 \right)^2. \quad (5)$$

Для получения таким методом качественных оценок величин Δ_H использовались известные экспериментальные данные (см. рис. 6) по соответствующим полным сечениям. Оказалось, что Δ_η мало, а самая важная поправка от промежуточного состояния $\pi^+\pi^-$ уже при 0,7 ГэВ превосходит по величине 2, а при 1,1 ГэВ равна 6; учет отвечающих эксперименту ограничений по t мало изменил эти оценки.

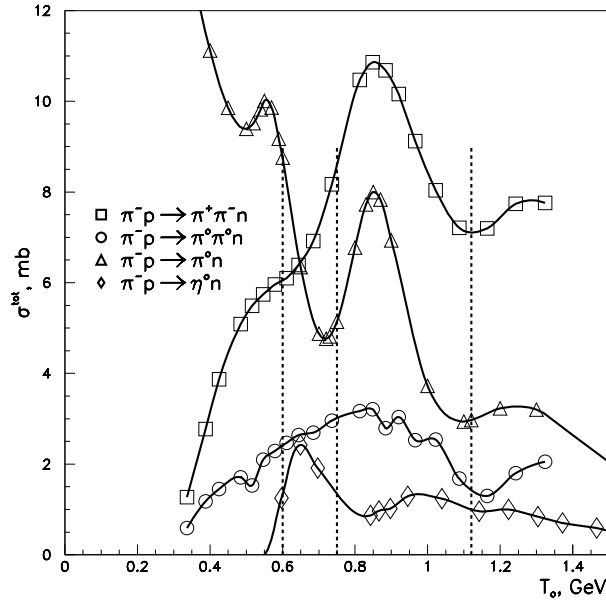


Рис. 6: T_0 -зависимость полных сечений процессов $\pi^-p \rightarrow H^0n$ (по литературным данным). Вертикальные штриховые прямые указывают энергии инклюзивных DCX-измерений ИТЭФ.

Таким образом, первые грубые оценки подтвердили теоретические ожидания важности учета неупругих перерассеяний (IR) в области энергий ~ 1 ГэВ для правильного

понимания работы SSCX-механизма. Полученный результат легко понять, если вспомнить, что вероятность DCX определяется, прежде всего, величиной амплитуды однократной перезарядки, которая может быть извлечена из полных сечений таких главных конкурирующих процессов, как $\pi^- p \rightarrow n\pi^0$ и $\pi^- p \rightarrow n\pi^+\pi^-$. Рис. 6 содержит информацию об энергетическом ходе такого типа реакций, которая указывает на факт доминирования выше $\approx 0,75$ ГэВ второго процесса.

Глава 6 “DCX-аномалия как следствие доминирования неупругих перераспределений: подход Грибова-Глаубера в рамках модели однопионного обмена” посвящена детальным количественным расчетам относительной величины IR-вклада за счет промежуточных 2π -состояний в DCX-сечение на ядре ^{16}O .

Исходной является формула типа (4) с пределами интегрирования, учитывающими условия эксперимента:

$$\frac{d\sigma_{DCX}^{\pi\pi}}{d\Omega} \propto \left(\int_{4m_\pi^2}^{M^2(t_{max})} dM^2 \int_{t_{min}(M^2)}^{t_{max}} dt \text{Im} A_{\pi \rightarrow 2\pi}^{forward}(M^2, t) \right)^2. \quad (6)$$

На основании полученных в предыдущей главе оценок DCX-процесс при $T_0 \gtrsim 0,6$ ГэВ определяется, в основном, двумя конкурирующими диаграммами – с промежуточными состояниями $H = \pi^0$ и $H = \pi\pi$. Далее предполагается, что переход во второе из них можно описывать моделью однопионного обмена (OPE: см. рис. 7).

В отличие от обычного π^- -А-рассеяния (с диагональным переходом $\pi^- \Rightarrow \pi^-$) в двойной перезарядке осуществляется недиагональный переход $\pi^- \Rightarrow \pi^+$. В этом случае, как видно из рис. 7, диаграмме отвечает мнимая часть амплитуды $\pi^- \pi^+$ -рассеяния назад, а не мнимая часть для упругого $\pi^- \pi^+$ -рассеяния вперед. Различие между ними связано с интерференцией между $\pi\pi$ -состояниями с четными и нечетными угловыми моментами и может быть учтено при использовании данных фазового анализа, на которых основаны все дальнейшие вычисления амплитуд и проверка соответствия OPE-модели экспериментальным данным по реакции $\pi^- p \rightarrow n\pi^+\pi^-$.

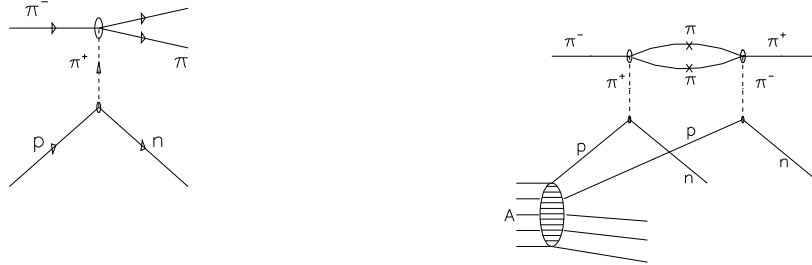


Рис. 7: Модель однопионного обмена: процесс $\pi^- p \rightarrow \pi\pi$ (слева) и двойная перезарядка пиона на ядре с промежуточным $\pi\pi$ -состоянием (справа)

Следующий раздел **Главы 6** посвящен изложению результатов упомянутой проверки модели OPE. Было получено полное согласие формы двух зависимостей $\sigma_{\pi\pi}^{tot}(M^2)$ – теоретической, полученной в модели OPE на основе данных фазового анализа $\pi\pi$ -рассеяния, и экспериментальной, выделенной из данных по угловым распределениям, измеренным в пузырьковой камере. Экспериментальные зависимости полного сечения $\pi \Rightarrow 2\pi$ от энергии определили кинематические области, в которых модель OPE согласуется с опытом: для $\Delta T < 140$ МэВ – это энергии выше 1 ГэВ. Что касается зависимости $d\sigma_{\pi \rightarrow 2\pi}(M^2)/dM^2$, она плохо воспроизводится в модели OPE (при малых M^2) для энергии $T_0 = 1,21$ ГэВ, несколько лучше – для 1,45 ГэВ и вполне удовлетворительно для 2,12 и 3,86 ГэВ, где она определяется ρ - и f_2 -резонансами.

Итог сравнения ОРЕ с опытом таков, что имеется хорошее согласие для больших энергий, а для меньших – только в той области изменения t , которая соответствует экспериментальным ограничениям по ΔT . Однако при $T_0 < 1,5$ ГэВ теория дает сильно заниженные оценки, так что в дальнейших ДСХ-вычислениях нами используются в этой области данные по амplitудам, основанные на эксперименте. Для больших энергий был выполнен детальный ОРЕ-расчет для реальных и мнимых частей инвариантной амплитуды $A_{\pi\pi}(M^2, z)$ для рассеяния вперед ($z = 1$) и назад ($z = -1$) в интервале M^2 от 0 до $3,2$ ГэВ² (т. е. величины $M^2|_{max}$ для наибольшей энергии используемых экспериментальных данных). Результаты расчета показаны на рис. 8, из которого следует, что $\text{Re}A_{\pi+\pi-}(M^2, z = -1)$ осциллирует, но не мала по сравнению с $\text{Im}A_{\pi+\pi-}(M^2, z = -1)$, поэтому ее вклад должен быть учтен при энергиях ~ 1 ГэВ. Это значит, что интегралом от $\text{Re}A_{\pi+\pi-}(M^2, z = -1)$ нельзя пренебречь; то же справедливо для интеграла по большому полукругу в комплексной плоскости M^2 . Амплитуда назад оказывается отличной от амплитуды вперед для различных интервалов M^2 . Вычисленные амплитуды были использованы при оценке энергетического хода

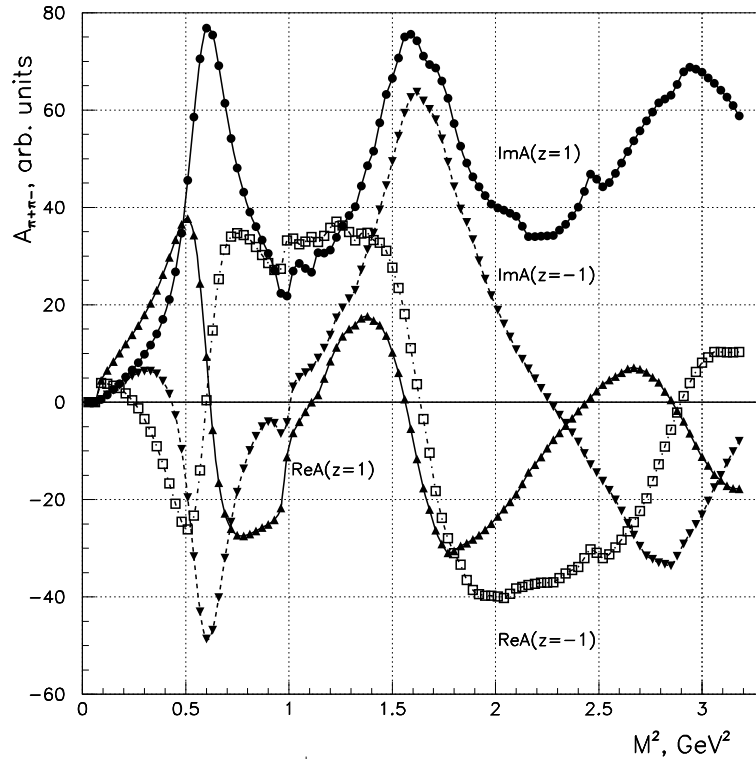


Рис. 8: Инвариантные амплитуды $\pi^+\pi^-$ -рассеяния, вычисленные в рамках модели ОРЕ.

инклюзивного ДСХ-сечения на ядре ^{16}O , которое бралось в виде суммы вкладов двух промежуточных состояний, π^0 и 2π :

$$\langle d\sigma_{\text{DCX}}/d\Omega \rangle_{80(140)} = \langle d\tilde{\sigma}_{\text{DCX}}^{\pi^0}/d\Omega \rangle_{80(140)} + \langle d\sigma_{\text{DCX}}^{\pi\pi}/d\Omega \rangle_{80(140)}. \quad (7)$$

Первый вклад, $\langle d\tilde{\sigma}_{\text{DCX}}^{\pi^0}/d\Omega \rangle_{80(140)}$, вычислялся в каскадной МС-модели согласно SSCX-механизму и с учетом ферми-движения и эффектов поглощения. Вычисление IR-эффекта с $\pi\pi$ -состояниями, $\langle d\sigma_{\text{DCX}}^{\pi\pi}/d\Omega \rangle_{80(140)}$, нормированного на вклад от π^0 в точке $T_0 = 0,6$ ГэВ при $\Delta T = 140$ МэВ, выполнялось в двух вариантах (из показанных на рис. 9 четырех вариантов (А)–(Г)): (А) согласно (6), (Г) с учетом как мнимой, так и действительной части амплитуды $A_{\pi\pi}(M^2, z = -1)$. Вариант (А) рассматривался *при* $T_0 < 1$ ГэВ в качестве верхней границы вклада неупругих перерассеяний в ДСХ-сечение, вариант (Г) – как нижняя его граница во всем рассмотренном интервале энергий. Напомним, что эта верхняя граница описывается, как сказано выше, на основе данных эксперимента

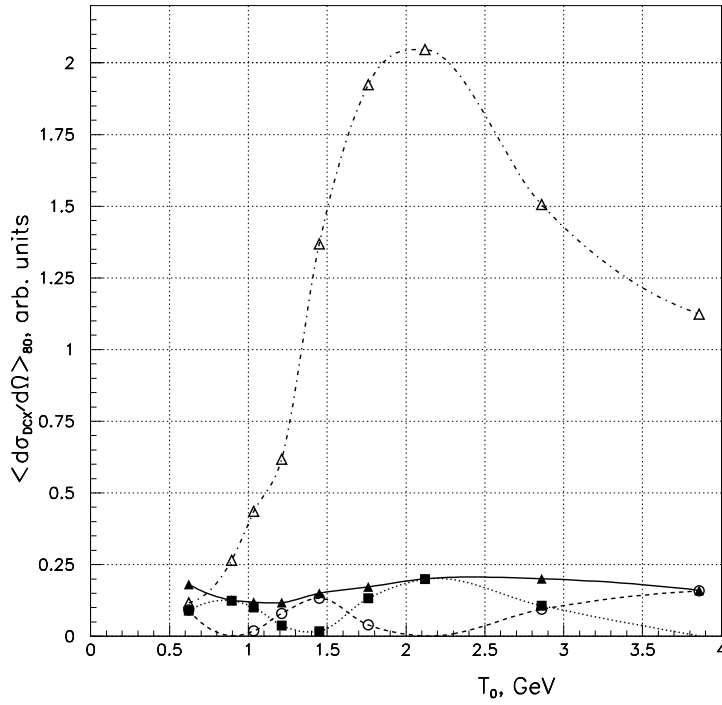


Рис. 9: Сечение $\langle d\sigma_{DCX}^{\pi\pi}/d\Omega \rangle_{140}$, вычисленное с использованием: (А) $\text{Im}A(0)$ – по формуле (6) (светлые треугольники – верхняя кривая), (Б) $\text{Im}A(z = -1)$ (черные квадратики), (В) $\text{Re}A(z = -1)$ (светлые кружочки), (Г) как $\text{Re}A(z = -1)$, так и $\text{Im}(z = -1)$ (черные треугольники – сплошная кривая) .

при малых энергиях и поэтому включает возможный вклад $\pi\pi$ -рождения в прямом канале реакции $\pi^-p \rightarrow \pi\pi n$, который не учитывается моделью ОРЕ. Заключение о нижней границе связано с тем фактом, что в модели ОРЕ имеется существенная разница между интегралами от амплитуд $A_{\pi\pi}(M^2, z)$ вперед и назад, определяющими зависимость $d\sigma_{DCX}^{\pi\pi}/d\Omega$ от энергии. При малых энергиях, где доминирует $\pi\pi$ -рождение в s -волне, эта разница переоценивается моделью, особенно при $T_0 \lesssim 1$ ГэВ, о чем свидетельствует эксперимент, указывающий на гораздо большее s -волновое рождение, чем предсказывается. Следовательно, вклады от амплитуд вперед и назад, равные в s -волне, должны, согласно опыту, отличаться меньше, чем в модели ОРЕ. Наличие неучтенного моделью вклада, например от прямого рождения барионных резонансов, означает, что второй вариант действительно соответствует оценке ИР-эффекта снизу. С увеличением энергии ДСХ-сечение должно приближаться к этой границе, поскольку надежность ОРЕ-оценок возрастает. На рис. 10, помимо приведенного выше на рис. 2 экспериментального хода сечения для интервала $0 < \Delta T < 140$ МэВ, представлены результаты расчета сечения $\langle d\sigma_{DCX}/d\Omega \rangle_{140}$:

- 1) без учета ИР-эффекта – сплошная кривая (т. е. $\langle \frac{d\sigma_{DCX}}{d\Omega} \rangle_{140} = \langle \frac{d\tilde{\sigma}_{DCX}^0}{d\Omega} \rangle_{140}$);
- 2) по формуле (7) с учетом ИР-эффекта в варианте (А) – точечная кривая, т. е. верхняя граница сечения;
- 3) по формуле (7) с учетом ИР-эффекта в варианте (Г) – штриховая кривая, т. е. нижняя граница сечения.

Представленные выше материалы свидетельствуют, что изучение процессов $\pi^\mp + A \rightarrow \pi_{forw}^\pm + X$ при энергиях выше 1 ГэВ открывает совершенно новую область исследований, которая дает возможность наблюдать эффект неупругих перерассеяний в практически чистом виде, т. к. в кинематике $\Delta T \leq m_\pi$ он регистрируется на опыте в условиях отсутствия фона от других наиболее вероятных адронных процессов. Здесь следует отметить связь ИР с NN -корреляциями. Вклад таких корреляций, который, однако, не проявляется в явной форме, присутствует во всех ДСХ-моделях. Так например,

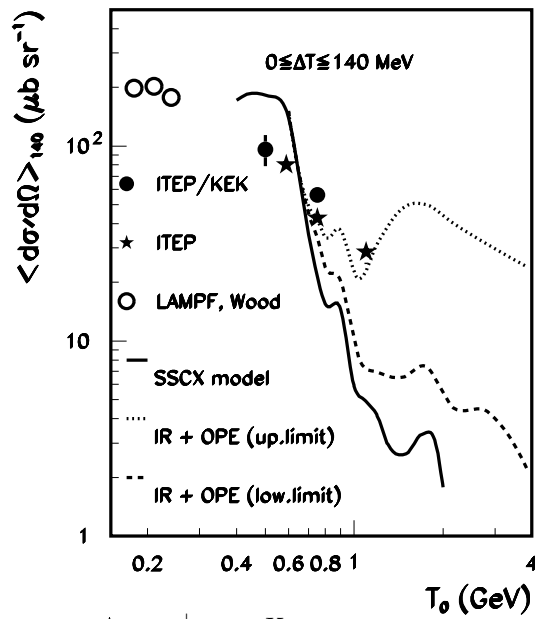


Рис. 10: Сечение реакции $\pi^- + A \rightarrow \pi_{forw}^+ + X$, проинтегрированное по ΔT от 0 до 140 МэВ.

в SSCX-механизме с включением IR представлены как дальние, так и ближние NN -корреляции. Основываясь на необходимости учета в таком подходе обеих частей амплитуд DCX (мнимых и действительных) при интегрировании по M^2 (см. (4)) и на факте существенности области $M^2 \sim M^2|_{max}$, можно заключить, что средние эффективные NN -расстояния относительно малы: $d \sim 1/\sqrt{2m_N\Delta T} \approx 0,56$ Фм. (При малых d эффект поглощения в промежуточных $\pi\pi$ -состояниях, по-видимому, также мал). Участвующие в DCX нуклоны оказываются, таким образом, тесно скоррелированными; их можно поэтому считать единой шестикварковой системой.

Глава 7 “Альтернативные подходы к объяснению DCX-аномалии” содержит анализ возможностей объяснения наблюдаемой энергетической аномалии в рамках известных альтернативных моделей DCX. Первый раздел посвящен рассмотрению DCX-процессов в модели с обменными мезонными токами (МЕС). Опубликованные оценки DCX-сечений при высоких энергиях основаны на расчете сечения DIAS-перехода $^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{N}$ в глауберовском подходе к многократному рассеянию. Оказалось, что МЕС-механизм дал почти независимый от энергии вклад в сечение на уровне 0,1 мкбн/ср, что при 0,5 ГэВ составляет $\sim 1\%$ от вклада стандартного SSCX-механизма и только при 1 ГэВ сравнивается с ним по порядку величины без учета IR. Амплитуда $\pi^-\pi^+$ -рассеяния (МЕС-диаграмма (а) рис. 11) дает малый вклад в DCX, в то время как амплитуда перехода $\pi^-pp \rightarrow \pi^+nn$ в ОРЕ-модели, вычисленная в главе 6, не мала. Основное различие этих двух подходов к учету $\pi\pi$ -взаимодействия заключается в том,

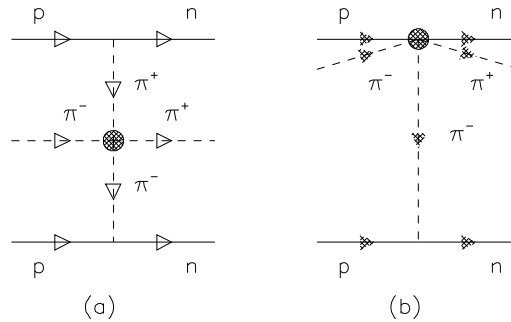


Рис. 11: Двойная перезарядка пиона в модели мезонных обменных токов.

что в модели ОРЕ амплитуда процесса рассматривается как функция M^2 и по этой переменной производится интегрирование, а в модели МЕС амплитуда $\pi^-\pi^+$ -рассеяния

аппроксимируется точечным взаимодействием, взятым на пороге ($M = 2m_\pi$). Согласно теоремам о мягких пионах, эта амплитуда мала; в то же время в главе 6 учитывается как действительная, так и мнимая части амплитуды $\pi^-\pi^+$ в областях M^2 , где они не малы. Кроме того, известно, что включение диаграммы (b) на рис. 11 приводит к уменьшению суммарного вклада.

Помимо механизмов SSCX и MEC, возможны альтернативные подходы к описанию DCX на основе участия виртуальных барионных резонансов. Можно условно выделить три варианта таких моделей, отличающихся способом передачи двойного заряда пиону и двойного заряда нуклонам ядра. Ниже эти варианты представлены на примере использования Δ -резонанса в качестве переносчика заряда; верхние строки трех показанных схем отвечают DCX-реакциям в пучке π^+ , нижние – в пучке π^- .

(1)	$\pi^+n \rightarrow \Delta^{++}\pi^-, \quad \Delta^{++}n \rightarrow pp$ $\pi^-p \rightarrow \Delta^-\pi^+, \quad \Delta^-p \rightarrow nn$	<i>механизм Далькарова–Шапиро с “треугольной” диаграммой</i>
(2)	$\pi^+n \rightarrow \Delta^+, \quad \Delta^+n \rightarrow \Delta^0p, \quad \Delta^0 \rightarrow p\pi^-$ $\pi^-p \rightarrow \Delta^0, \quad \Delta^0p \rightarrow \Delta^+n, \quad \Delta^+ \rightarrow n\pi^+$	
(3)	$\pi^+n \rightarrow \Delta^+, \quad \Delta^+n \rightarrow pp\pi^-$ $\pi^-p \rightarrow \Delta^0, \quad \Delta^0p \rightarrow nn\pi^+$	

Кинематика моделей с участием нуклонных резонансов не способствует эффективному попаданию вылетающих π^\pm в высокоэнергетическую часть их спектра. Кроме того, как известно из имеющихся экспериментальных данных, амплитуды реакций первых этапов приведенных выше вариантов начинают резко уменьшаться выше 0,6 ГэВ. Оба эти факта не обеспечивают возможности конкуренции таких механизмов с неупругими перерасcеяниями. Представленные аргументы можно также отнести к модели с двойной перезарядкой на Δ -изобарах, виртуально присутствующих в виде примеси в начальной волновой функции ядра (механизм Морриса).

В последнем разделе **Главы 7** кратко изложены сведения о моделях с близкими NN -корреляциями. Кварковым степеням свободы в ядрах посвящено большое количество теоретических работ. Однако для DCX конкретные расчеты в рамках такого подхода, сформулированного Миллером, были выполнены при энергиях до 0,55 ГэВ и оказались неконструктивными. Процессы DCX описывались как реакции с поглощением и испусканием пиона двумя нуклонами, которые рассматриваются в модели шестикваркового “мешка”. Попыток модификации кваркового рассмотрения и распространения его на область высоких энергий предпринято не было.

Итог представленного в **Главах 5 – 7** теоретического анализа таков: *известные DCX-механизмы*, включая стандартный механизм SSCX (связанный с двухэтапным превращением $\pi^\mp \Rightarrow \pi^0 \Rightarrow \pi^\pm$), *не описывают обнаруженное аномально медленное падение инклюзивного DCX-сечения с энергией*.

Отсутствие на опыте резкого падения DCX-сечения, ожидаемого в рамках SSCX-механизма с реальным или виртуальным π^0 в промежуточном состоянии, может быть объяснено появлением при увеличении начальной энергии нового открытого DCX-канала с двухпионными промежуточными состояниями ($\pi^\mp \Rightarrow \pi^+\pi^- + \pi^0\pi^0 \Rightarrow \pi^\pm$).

В квантово-полево́м формализме Грибова возрастание роли неупругих перерасcеяний с ростом энергии еще в 60-е годы рассматривалось как важное явление в общей картине адрон-ядерных взаимодействий. Проявление этого эффекта в процессах рассеяния вперед ожидалось при энергиях выше ~ 5 ГэВ. Специфика двойной перезарядки пиона состоит в том, что без перерасcеяния этот процесс невозможен. Вклад упругого перерасcеяния падает с энергией, в связи с чем неупругие перерасcеяния проявляются значительно раньше – в области энергий ~ 1 ГэВ.

Материалы **Части III** “Измерение сечений процессов $\pi^\mp + A \rightarrow \pi_{forw}^\pm + (\pi^\mp + X')$: экранирование нуклонов и радиусы их распределений в ядрах” представлены в **Главах 8 и 9**, содержание которых объединено единой методикой получения и интерпретации экспериментальных данных по спектрам вылетающих вперед пионов в процессах (1). Все дифференциальные сечения измерены при начальном импульсе 2,6 ГэВ/с в кинематическом интервале *SCR*, который выделяет среди зарегистрированных событий этих процессов взаимодействия только с протонами или нейтронами в зависимости от знака заряда первичного пиона. Поэтому реакции (1) при $M_X^2 \geq (m_N + m_\pi)^2$ являются процессами более узкого типа,

$$\pi^\mp + A \rightarrow \pi_{forw}^\pm + (\pi^\mp + X'). \quad (8)$$

Величины указанных сечений использованы затем для определения радиусов распределений протонов/нейтронов в ядрах на основе формул глауберовского типа. В **Главе 8** “Определение среднеквадратичных размеров дейтрона и других ядер по измерениям экранирования протонов” даны результаты измерений на протонном синхротроне У-10 спектров π_{forw}^+ в π^- -пучке на дейтроне (и протоне) и на ядрах ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. Данные по d (и p) (на рис. 12 представлена разность соответствующих сечений и показан интервал *SCR*) дали возможность определить значения поправки на экранирование протона в дейтроне и глауберовского параметра дейтрона: $\delta_p = 0,154 \pm 0,016$, $\langle r^{-2} \rangle_d = 0,32 \pm 0,04 \text{ Фм}^{-2}$.

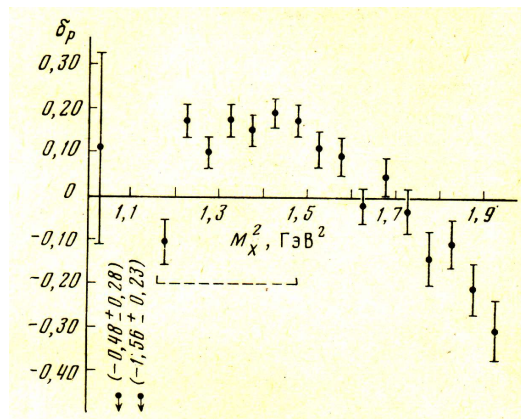


Рис. 12: M_X^2 -зависимость поправки δ_p ; штриховой линией показан интервал между порогами реакций $\pi^-p \rightarrow \pi^+X^-$ и $\pi^-n \rightarrow \pi^+X^{--}$.

Кроме того, из теоретических формул для δ_p и δ_n и из известных экспериментальных данных удастся найти с хорошей точностью величину $\delta_n \approx \delta_p$ и, используя ее, определить зависимость от M_X^2 сечения реакции $\pi^-n \rightarrow \pi^+X^{--}$ на свободном нейтроне в области $M_X^2 \geq (m_N + 2m_\pi)^2$; сечение на нейтроне оказалось приблизительно вдвое меньшим, чем на протоне. Количественный результат, относящийся к изотопам ${}^6,7\text{Li}$, – оценка $\langle r^2 \rangle$ для этих ядер на основе расчета величин $d^2\sigma/d\Omega dM_X^2$ для реакции (1) в интервале *SCR* в глауберовском подходе. Сопоставления этих расчетов с измеренными сечениями дали оценки значения осцилляторного параметра a_0 , который в модели независимых частиц характеризует распределение нуклонов в этих ядрах. Поскольку параметр a_0 непосредственно связан со среднеквадратичным радиусом ядра ($\langle r^2 \rangle = a_0^2(5/2 - 4/A)$), итогом работы были следующие результаты, хорошо согласующиеся с измерениями $\langle r^2 \rangle$ другими методами:

$$\begin{aligned} d\sigma/d\Omega|_{{}^6\text{Li}} &= (0,634 \pm 0,009) \text{ мбарн/стерад}, \quad \sqrt{\langle r^2 \rangle_{{}^6\text{Li}}} = 2,46 \pm 0,03 \text{ Фм}; \\ d\sigma/d\Omega|_{{}^7\text{Li}} &= (0,564 \pm 0,008) \text{ мбарн/стерад}, \quad \sqrt{\langle r^2 \rangle_{{}^7\text{Li}}} = 2,41 \pm 0,03 \text{ Фм}. \end{aligned}$$

В **Главе 9** “Определение протонных и нейтронных радиусов ядер по реакциям $\pi^\mp + A \rightarrow \pi_{forw}^\pm + (\pi^\mp + X')$ и другими методами” продолжено изложение сведений по

измерениям дифференциальных сечений этих реакций в интервале SCR по переменной M_X^2 для более тяжелых ядер. Используется чувствительность результирующих сечений к значениям среднеквадратичных радиусов распределений как протонов, так и нейтронов в ядре: ввиду сильного поглощения пионов в ядерном веществе относительный вклад периферии более тяжелых ядер в сечения значителен. Поэтому величины сечений эффективно характеризуют $\langle r^2 \rangle$ для распределений протонов/нейтронов; одновременное (в одном опыте) измерение сечений на пучке π^-/π^+ дает основу для надежной теоретической оценки отношения $\langle r^2 \rangle_p/\langle r^2 \rangle_n$, в значительной мере лишенную ошибок эксперимента, и теоретического расчета связи сечения с $\langle r^2 \rangle$.

Результат измерения M_X^2 -зависимости дифференциальных сечений $d^2\sigma(\pi^+)/d\Omega dM_X^2$ и $d^2\sigma(\pi^-)/d\Omega dM_X^2$ на С и Вi соответственно в π^+ - и π^- -пучках состоит в следующем. Для легкого изоскалярного ядра ^{12}C величины сечений в этих пучках приблизительно одинаковы, а интегралы от них, I_+ и I_- по измеренному интервалу $1,2 \text{ ГэВ}^2 \leq M_X^2 \leq 1,7 \text{ ГэВ}^2$, в пределах статистических ошибок почти не отличаются. Для ^{209}Bi характерной является величина отношения I_+ к I_- , соответствующая той области, в которой процесс идет, соответственно, только на нейтронах или на протонах:

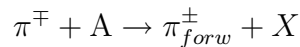
$$I_+/I_- \Big|_{(1,0 \text{ ГэВ}^2 < M_X^2 < 1,5 \text{ ГэВ}^2)} = 1,33 \pm 0,04.$$

Отношение чисел нейтронов и протонов в ядре ^{209}Bi ($N/Z \simeq 1,5$) превышает эту величину, что может быть связано с неучтенными эффектами ферми-движения и кулоновского взаимодействия, которые "размывают" спектры в области, сравнимой по величине с шириной интервала, в котором I_+/I_- измеряется. Поэтому интерпретация величины этого отношения в терминах нуклонных радиусов нуждается в тщательном теоретическом анализе, обычно осуществляемом и в других методиках извлечения размеров ядер из сечений адрон-ядерных взаимодействий.

В конце **Главы 9** содержится краткий обзор методов определения $\langle r_p^{-2} \rangle$ и $\langle r_{p, n}^2 \rangle$ ядер и рассматриваются специфика и преимущества примененного в представленных выше работах нового метода, в котором измеряемые спектры обусловлены взаимодействиями только с протонами или нейтронами экспонируемых ядер.

Основные результаты диссертации

В диссертации представлены исследования при высоких энергиях процессов



в двух разных кинематических областях, в которых работают различные механизмы и измеряются сечения, соответственно, для реакции двойной перезарядки пиона (DCX),



и реакций рождения дополнительного пиона только на протонах или на нейтронах ядра,



1. Впервые предложен и использован метод измерения DCX-сечений в инклюзивных реакциях при высокой энергии, позволяющий выделить область, где следует изучать действие основного SSCX-механизма двух последовательных однократных перезарядок пиона на двух однотипных нуклонах ядра.
2. На трехметровом спектрометре ИТЭФ впервые измерены спектры π^+ -мезонов, вылетающих вперед ($\langle \theta \rangle \sim 5^\circ$) из реакции (DCX) на ядрах от ^6Li , до Вi при следующих значениях начальных импульсов (кинетических энергий) и разницы

ΔT энергий начального и конечного пионов:

(i) для ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ и ${}^{16}\text{O}$ при 0,72 ГэВ/с (0,59 ГэВ), $\Delta T = 0 - 250$ МэВ (и отдельно для ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, Al, Cu, In, Ta и Bi при $\Delta T = 0 - 150$ МэВ);

(ii) для ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ при 0,89 ГэВ/с (0,75 ГэВ), $\Delta T = 0 - 150$ МэВ;

(iii) для ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ при 1,25 ГэВ/с (1,1 ГэВ), $\Delta T = 0 - 150$ МэВ.

3. Впервые получена зависимость сечений реакции (DCX) от атомного номера при 0,59 ГэВ. Эта зависимость хорошо описывается законом A^α при величине $\alpha = 0,68 \pm 0,04$, близкой к $2/3$.
4. Обнаружено аномальное энергетическое поведение сечений реакции (DCX) в диапазоне 0,59 – 1,1 ГэВ на ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$: измеренные сечения уменьшаются с энергией относительно медленно и превышают расчетные в стандартном SSCX-механизме по крайней мере в 2–5 раз при 0,75 – 1,1 ГэВ.
В эксперименте на SKS (КЕК) измерены такие же как в п.(2.) спектры на ${}^{16}\text{O}$ при 0,62 ГэВ/с (0,5 ГэВ), $\Delta T = 0 - 165$ МэВ, и при 0,89 ГэВ/с (0,75 ГэВ), $\Delta T = 0 - 300$ МэВ). Полученные на основе этих спектров значения сечений подтверждают заключение о наличии DCX-аномалии.
5. В рамках MC-программы каскадного типа для SSCX-механизма с дополнительным учетом влияния внутриядерной среды впервые выполнены расчеты ΔT -спектров и энергетического хода инклюзивного DCX-сечения на ${}^{16}\text{O}$ для энергий 0,4 – 2 ГэВ, а также A -зависимости DCX-сечения при 0,59 ГэВ.
6. Впервые в рамках формализма Грибова для описания инклюзивных адрон-ядерных процессов обнаружен преобладающий вклад нового DCX-механизма с учетом неупругих перерассейаний (IR) и связь IR с короткодействующими NN-корреляциями. В рамках модели OPE для DCX и подходе Грибова-Глаубера впервые выполнен расчет коридора энергетического хода инклюзивного DCX-сечения на ${}^{16}\text{O}$ до энергии 4 ГэВ на основе SSCX-механизма с включением эффекта IR и получено заключение о возможности объяснения DCX-аномалии.
7. Обоснована возможность при энергиях ~ 1 ГэВ и выше прямого исследования эффектов неупругих перерассейаний пиона на нуклонах в ядерной материи на базе использования уникальных свойств инклюзивных DCX-процессов, в которых эти эффекты доминируют.
8. В π^- -пучке протонного синхротрона У-10 с импульсом 2,6 ГэВ/с на водороде и дейтерии измерены спектры вылетающих вперед π^+ для реакции (SCR) с рождением дополнительного пиона. Из найденного значения поправки на экранирование протона определена величина глауберовского параметра дейтрона $\langle r^{-2} \rangle_d = 0,32 \pm 0,04 \text{ Фм}^{-2}$, согласующаяся с известными данными, полученными другими методами. Впервые с учетом экранирования нейтрона протоном в дейтроне получены сведения о M_X^2 -спектре процесса $\pi^- + n \rightarrow \pi^+ + X^{--}$ на свободном нейтроне и его сечении в области $M_X^2 > (m_N + 2m_\pi)^2$. Впервые серия измерений была осуществлена на двух литиевых мишенях, содержащих ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. На основе описания ядер в модели независимых частиц были получены rms-радиусы этих изотопов, хорошо согласующиеся с известными по литературе.
9. В попеременно используемых π^+ - и π^- -пучках при 2,6 ГэВ/с были впервые измерены M_X^2 -зависимости дифференциальных сечений $d^2\sigma(\pi^+)/d\Omega dM_X^2$ и $d^2\sigma(\pi^-)/d\Omega dM_X^2$ и интегралы от них, I_+ и I_- на ядрах C и Bi. Определение I_+/I_- в одном опыте на пучках π^+/π^- (при введении поправок на эффекты ферми-движения и на кулоновское взаимодействие) позволят развить независимый способ определения отношения $\langle r^2 \rangle_n / \langle r^2 \rangle_p$, в значительной мере лишенный ошибок эксперимента и теоретического расчета связи сечения с $\langle r^2 \rangle$.

Список работ, включенных в диссертацию

- [1] B.M.Abramov, ..., A.V.Kaidalov, A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov, ..., L.Alvarez-Ruso, M.J.Vicente Vacas. Inclusive pion double charge exchange on ^{16}O at 0.6–1.1 GeV. Nucl. Phys., **A723** (2003) 389; nucl-ex/0211016
- [2] Б.М.Абрамов, ..., М.Х.Висенте-Вакас, ..., А.П.Крутенкова, В.В.Куликов и др. Инклюзивная двойная перезарядка π^- -мезонов на ядре ^{16}O при энергиях 600 и 750 МэВ. ЯФ, **59** (1996) 399
- [3] А.П.Крутенкова, О.Хашимото, Т.Ватанабе, Х.Ноуми, П.К.Саха, Д.Абе, А.Б.Кайдалов, В.В.Куликов и др. Измерение инклюзивной двойной перезарядки пиона на ^{16}O при $T_0 \geq 0.5$ ГэВ на спектрометре SKS в КЕК. ЯФ, **68** (2005) 495
- [4] A.P.Krutenkova, T.Watanabe, D.Abe, Y.Fujii, O.Hashimoto, V.V.Kulikov et al. Inclusive pion double charge exchange on ^{16}O above the Δ resonance. Phys. Rev., **C72** (2005) 037602; nucl-ex/0502017
- [5] Б.М.Абрамов, Л.Альварец-Русо, ... , М.Х.Висенте-Вакас, ... , А.П.Крутенкова, В.В.Куликов и др. Спектры быстрых π^+ -мезонов из реакции $\pi^- A \rightarrow \pi^+ + X$ на ядрах кислорода и лития при 0.59 ГэВ. ЯФ, **65** (2002) 253
- [6] Б.М.Абрамов, Л.Альварец-Русо, ... , М.Х.Висенте-Вакас, ... , А.П.Крутенкова, В.В.Куликов и др. А-зависимость инклюзивной двойной перезарядки пиона. ЯФ, **68** (2005) 1336
- [7] A.V.Kaidalov and A.P.Krutenkova. Pion double charge exchange on nuclei and inelastic rescatterings. Yad. Fiz., **60** (1997) 1334
- [8] A.V.Kaidalov and A.P.Krutenkova Implications of inelastic rescattering for pion double charge exchange on nuclei. J. Phys., **G27** (2001) 893
- [9] B.M.Abramov, I.A.Dukhovskoy, V.S.Fedorets, V.V.Kishkurno, L.A.Kondratyuk, A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov et al. Measurement of the proton screening correction in a deuteron for reactions $\pi^- + p(d) \rightarrow \pi^+ + X$. Nucl. Phys., **B157** (1979) 189
- [10] Б.М.Абрамов, И.А.Духовской, В.В.Кишкурно, Л.А.Кондратюк, А.П.Крутенкова, В.В.Куликов и др. Сечение процессов $\pi^- p \rightarrow \pi^+ X^-$ $\pi^- d \rightarrow \pi^+ X^-$ и поправка на экранирование протона. Труды IV Конференции молодых ученых ЕрФИ (Нор-Амберд, 1979), Ереван, 1980, стр. 52-57
- [11] Б.М.Абрамов, И.А.Духовской, В.В.Кишкурно, Л.А.Кондратюк, А.П.Крутенкова, В.В.Куликов и др. Об эффекте экранирования протона в дейтроне в реакции двойной перезарядки π^- -мезона. ЯФ, **33** (1981) 733
- [12] Б.М.Абрамов, И.А.Духовской, В.В.Кишкурно, Л.А.Кондратюк, А.П.Крутенкова, В.В.Куликов, М.А.Мацюк, П.А.Мурат и др. Об определении $\langle r^2 \rangle$ ядер изотопов лития из данных по реакциям $^{6,7}\text{Li}(\pi^-, \pi^+)X$. Научно-технич. сб. "Проблемы ядерной физики и космических лучей" (Харьков, 1987, № 27), стр. 53-57
- [13] B.M.Abramov, ... , A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov, ... , M.J.Vicente Vacas. Inclusive pion double charge exchange on oxygen-16 at intermediate energies. Intern. Conf. on Mesons and Nuclei at Intermediate Energies (Dubna, May 1994); World Sci., 1995, p. 516-519

- [14] B.M.Abramov, I.A.Dukhovskoy, V.S.Fedorets, ..., A.P.Krutenkova, et al. Inclusive pion double charge exchange on light nuclei above 500 MeV. XII Intern. Seminar on High Energy Physics Problems (ISHEPP XII, Dubna, 1994), Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics, Dubna, 1997, Vol.I, p. 305-308
- [15] A.B.Kaidalov and A.P.Krutenkova. Inelastic Glauber rescatterings and pion double charge exchange on nuclei. XIII Intern. Seminar on High Energy Physics Problems (ISHEPP XIII, Dubna, 1996), Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics, Dubna, 1998, Vol.II, p. 53-57
- [16] B.M.Abramov, ... , A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov, ... , M.J.Vicente Vacas. Inclusive pion double charge exchange on light nuclei above 0.5 GeV. Mesons and Light Nuclei (Straž pod Ralskem, Czech Republic, 1995); Few-Body Systems Suppl., **9** (1995) 237-240
- [17] B.M.Abramov, L.Alvarez-Ruso, ... , A.B.Kaidalov, A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov, ... , M.J.Vicente Vacas. The ITEP study of inclusive pion double charge exchange: experiment and interpretation. Mesons and Light Nuclei (8th Conf., Prague, 2-6 July 2001), AIP Conf. Proc., Melville, N.Y., **603**(2001) 515-518
- [18] B.M.Abramov, ... , A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov, ... , M.J.Vicente Vacas. An anomaly in inclusive pion double charge exchange on ^{16}O at about 1 GeV. "Meson 96" Workshop (Cracow, 1996), Acta Phys. Polon., B27 (1996) 3051-3054
- [19] A.B.Kaidalov and A.P.Krutenkova. Pion double charge exchange on nucleus and the two-pion intermediate states. 6th Conf. on Intersections of Particle and Nuclear Phys., CIPANP 97 (Big Sky, MT, USA, 27 May - 2 Jun 1997) AIP Conf. Proc., Woodbury, N.Y., **412** (1997) 720-721
- [20] A.P.Krutenkova (for the SKS/KEK-ITEP Collaboration). Does inclusive pion DCX drop rapidly above 0.5 GeV ? XVII Particles and Nuclei Intern. Conf. (PANIC05, Santa Fe, USA, 2005); Melville, New York, 2006, p. 516-518
- [21] B.M.Abramov, ... , A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov, ... , M.J.Vicente Vacas. Inclusive pion double charge exchange on light nuclei near 1 GeV. Intern. conf. on Physics with GeV-Particle Beams (Juelich, Germany, 1994); World Sci., 1995, p. 447-451
- [22] B.M.Abramov, S.A.Bulychjov, I.A.Dukhovskoy, ... , A.P.Krutenkova, et al. Inclusive pion double charge exchange on Oxygen-16 at 590 и 750 MeV. Proc. 23rd INS Int.l Symposium on Nuclear and Particle Physics with Meson Beams in the 1-GeV/c Region. Tokyo, Japan, 15-18 Mar 1995. Nuclear and Particle Physics with Meson Beams in the 1-GeV Region (INS, Tokyo, Japan, 1995). Univ. Academy Press. Tokyo, Japan, 1995, p. 343-344
- [23] B.M.Abramov, ... , A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov, ... , M.J.Vicente Vacas. Inclusive pion double charge exchange on light nuclei above the delta resonance region. (PANIC-96, Williamsburg, USA, 1996). World Sci., 1996, p. 317-318
- [24] V.V.Kulikov et al. (for 3m magnet spectrometer group) Measurement of inclusive DCX and d' search at ITEP. 7th Intern. Symp. on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (Vancouver, B.C., Canada, 1997); πN Newsletter, **No. 13** (1997) 259-262
- [25] И.А.Духовской, В.В.Кишкурно, А.П.Крутенкова, В.В.Куликов, ... , И.А.Радкевич, В.В.Соколовский и др. 3-х метровый магнитный спектрометр. ПТЭ, 1974 (депонировано в ВИНТИ: №897-74 Деп.) 1-29

- [26] B.M.Abramov, I.A.Dukhovskoy, V.V.Kishkurno, A.P.Krutenkova, V.V.Kulikov, M.A.Matsyuk et al. Energy dependence of backward π^-d elastic scattering in the 1-2 GeV region. Nucl. Phys., A372 (1981) 301-316