На правах рукописи

Егоров Михаил Викторович

Когерентное фоторождение пар псевдоскалярных мезонов на легких ядрах

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре высшей математики и математической физики.

Научный руководитель:

Фикс Александр Иванович, доктор физико-математических наук.

Официальные оппоненты:

Недорезов Владимир Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерных исследований Российской академии наук», г. Москва, лаборатория фотоядерных реакций, заведующий лабораторией.

Топорков Дмитрий Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Защита состоится «15» сентября 2015 г. в 14.00 час на заседании диссертационного совета Д 212.269.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте http://portal.tpu.ru/council/912/worklist.

Автореферат разослан «8» июня 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Кожевников Анатолий Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Когерентные реакции фоторождения нейтральных частиц привлекают к себе внимание не только возможностью исследования с их помощью ядерных процессов в различных энергетических режимах, но и представляют собой серьезную проверку моделей строения нуклона, затрагивающих как кварк-глюонные, так и феноменологические мезон-нуклонные степени свободы.

Квантовая хромодинамика, как теория сильного взаимодействия, становится непертурбативной в области энергий, характерных для ядерных процессов. По этой причине, для интерпретации экспериментальных данных используются конституентные кварковые модели, имеющие полуфеноменологический характер. Однако, имеющиеся экспериментальные результаты показывают, что возможности таких моделей остаются довольно ограниченными и не позволяют объяснить некоторые закономерности, наблюдаемые в нуклонном спектре. Одной из наиболее существенных проблем конституентных моделей является значительное превышение числа предсказываемых теорией возбуждений трехкварковой системы над числом наблюдаемых в эксперименте резонансных состояний N^* и Δ.

Необходимо отметить, что практически вся существующая сегодня экспериментальная информация базируется на данных, полученных из упругого рассеяния и фоторождения одиночных пионов. Вместе с тем, с ростом энергии возрастает вероятность распада возбужденного бариона в многомезонные каналы. Более того, в некоторых случаях многомезонные распады оказываются более интенсивными по сравнению с одномезонными. В качестве одной из возможных причин этого явления указывается нарушение основной симметрии $SU(6) \otimes O(3)$, приводящее к подавлению одномезонных мод. Поэтому, именно исследование реакций рождения двух (и, вообще говоря, большего числа) мезонов должно дать необходимую информацию о динамике резонансных состояний, до сих пор не наблюдавшихся в экспериментах с одиночными пионами.

Сегодня усилиями ряда научных групп фактически построена общая качественная картина, описывающая процессы фоторождения пар псевдоскалярных мезонов. В первую очередь это относится к тем реакциям, которые наиболее доступны экспериментальному изучению, то есть двойному фоторождению π-мезонов, а также пар $\pi\eta$ на протонах. Однако, систематическое исследование фоторождения мезонов предполагает изучение этого процесса также на нейтронах. Ввиду отсутствия нейтронных мишеней необходимые измерения проводятся на связанных системах нуклонов – атомных ядрах.

Здесь особое значение приобретают когерентные реакции, то есть процессы, в которых конечное ядро остается невозбужденным.

К основным задачам, решение которых связывают с исследованием когерентного фоторождения двух мезонов на ядрах, можно отнести следующие. Во-первых, в то время как расчеты фоторождения двух π-мезонов в заряженных каналах демонстрируют неплохое согласие с наблюдаемым сечением, в нейтральном канале $\pi^0\pi^0$ имеются значительные расхождения, природа которых остается не выясненной. Для однозначного разрешения этой проблемы требуется, вообще говоря, проведение парциально-волнового анализа с привлечением поляризационных наблюдаемых. Однако, эта задача оказывается исключительно трудоемкой из-за большого числа частиц в конечном состоянии. По этой причине важным инструментом исследования фоторождения пар нейтральных пионов становятся процессы на ядрах. Основная идея этих исследований заключается в том, что сравнение величин сечений, полученных для ядер с различным спином и изотопическим спином, позволяет делать выводы о вкладе отдельных механизмов в амплитуду фоторождения.

Во-вторых, остается невыясненной динамика образования мезонов на ядрах в области больших переданных импульсов, где также наблюдается значительное расхождение предсказаний теории с экспериментальными данными. Для описания фоторождения в этой области учет лишь однонуклонных степеней свободы является недостаточным. Необходимо включать в рассмотрение механизмы, где в процесс фоторождения активно вовлечены группы (главным образом, пары) нуклонов. В частности, представляет интерес выяснение роли двухпионных механизмов в которых один из пионов вылетает из ядра, а второй поглощается одним из ядерных нуклонов.

Наконец, решения требует вопрос о низкоэнергетическом взаимодействии η мезонов с ядрами, и, в частности, существование связанных η-ядерных систем. Притягивающий характер ηN взаимодействия привел к появлению гипотезы о возможности образования связанных η-ядерных состояний. Однако, несмотря на проведенные в последнее десятилетие многочисленные исследования, динамика этих состояний остается плохо изученной. Одним из нерешенных вопросов является почти полное отсутствие сигнала о сильном η-ядерном взаимодействии в реакциях с образованием в конечном состоянии системы η^4He. Исследование спектра мезонов в когерентной реакции $^4\mathrm{He}(\gamma,\pi^0\eta)^4\mathrm{He}$ является одним из путей разрешения этой проблемы.

Систематическое исследование когерентного фоторождения двух псевдоскалярных мезонов на ядрах с малым числом нуклонов до настоящего времени не проводилось. Главным образом это объясняется довольно малым сечением этих реакций, что, вообще говоря, приводит к большой статистической погрешности измерений. Вместе с тем, совершенствование методов регистрации псевдоскалярных мезонов, в первую очередь π^0 и η мезонов, позволяет

сегодня получать данные с хорошей точностью, достаточной для извлечения из них надежной количественной информации. Поэтому теоретическое исследование этих процессов является актуальной задачей.

Цели и задачи работы

Цель работы – систематическое исследование процессов когерентного фоторождения пар псевдоскалярных мезонов на ядрах с малым числом нуклонов.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Определение вклада процессов перерассеяния $\pi^+\pi^- \to \pi^0\pi^0$ в фоторождение пар нейтральных пионов на нуклонах в области низких энергий.
2. Исследование зависимости сечения когерентного фоторождения пар $\pi^0\pi^0$ и $\pi^0\eta$ на ядрах от квантовых чисел ядра-мишени.
3. Извлечение информации об η-ядерном взаимодействии из данных по когерентному фоторождению $\pi^0\eta$ на легких ядрах.
4. Исследование роли двухпионных механизмов в фоторождении одиночных π-мезонов на ядрах в области больших переданных импульсов.

Научная новизна

Все основные результаты, полученные в работе, являются новыми. Впервые проведено теоретическое исследование реакций $A(\gamma,\pi^0\pi^0)A$ на ядрах. Определены основные особенности поведения сечений этих реакций и указана их связь с механизмами образования и распада нуклонных резонансов в двухмезонные каналы. Получена оценка вклада изоскалярных и изовекторных переходов в фоторождение двух нейтральных пионов в области второго и третьего резонансов. Впервые представлена процедура вычисления сечения процессов $A(\gamma,\pi^0\eta)A$, позволяющая учесть все наиболее важные аспекты, связанные с взаимодействием между конечными частицами. Выработан метод, позволяющий извлекать из экспериментальных данных для этих реакций сведения о роли неупругих каналов в ηN взаимодействии. Найден эффективный механизм, приводящий к значительному увеличению выхода инклюзивных реакций $^{12}\mathrm{C}(\gamma,\pi^-p)$ и $^{12}\mathrm{C}(\gamma,\pi^0p)$ в области больших переданных импульсов и, таким образом, позволяющий объяснить разногласия между теорией и экспериментом. Впервые продемонстрирована важная роль эффектов перерассеяния пионов в реакции $\gamma p \to \pi^0\pi^0 p$ в области низких энергий и развит формализм, позволяющий учесть эти эффекты.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты, полученные в диссертации, вносят значительный вклад в теорию фоторождения псевдоскалярных мезонов на ядрах с малым числом нуклонов.

Быстро развивающаяся в настоящее время экспериментальная инфраструктура, включающая непрерывные фотонные пучки высокой интенсивности, позволяет рассматривать полученные результаты как теоретическую основу исследования тех барионных резонансов, которые не наблюдаются в реакциях фоторождения одиночных мезонов.

Разработанные методы открывают новые возможности для изучения особенностей взаимодействия η мезонов с легкими и легчайшими ядрами. Наиболее перспективным в этой связи представляется исследование образования связанных состояний η мезонов с ядрами, имеющими нулевой спин.

Методология и методы исследования

В расчетах, проведенных при выполнении диссертационной работы, были использованы стандартные методы теоретической ядерной физики, квантовой теории рассеяния и релятивистской квантовой механики. В связи с тем, что в исследуемой области энергий детали кварковой структуры адронов непосредственно не проявляются в реакциях, в расчетах использовались модели, учитывающие мезонные, нуклонные и изобарные степени свободы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Фоторождение пар нейтральных π-мезонов $\pi^0\pi^0$ имеет ярко выраженный изовекторный характер. Доля изоскалярных переходов составляет менее 1% от полной вероятности перехода $\gamma \to \pi^0\pi^0$ на нуклоне. Это приводит к приблизительному равенству сечений на протоне и нейтроне и значительному подавлению интенсивности фоторождения $\pi^0\pi^0$ на ядрах с нулевым изоспином. Ввиду сильной зависимости от изоспина мишени экспериментальное исследование этих процессов должно дать надежную качественную информацию об изотопической структуре амплитуды фоторождения и, как следствие, об особенностях кварковой структуры резонансных состояний, возбуждаемых в процессах $\gamma \to \pi^0\pi^0$.

2. Эффекты взаимодействия между η-мезоном и конечным ядром играют важную роль в реакциях $A(\gamma, \pi^0\eta)A$. В том случае, когда полюс в амплитуде ηA-рассеяния близок к нулевой энергии, измерение спектра π-

мезонов (или распределения по инвариантной массе ηA-системы) позволяет с хорошей точностью оценить величину мнимой части длины ηA рассеяния $a_{\eta A}$. Полученная таким образом информация имеет важное значение для понимания роли неупругих каналов в η-ядерном взаимодействии. Когерентное фоторождение пар $\pi^0\eta$ на ядре ^{4}He предоставляет уникальную возможность исследования взаимодействия в системе η^4He.

3. Вследствие большой интенсивности образования пар $\pi^+\pi^-$, влияние эффектов перерассеяния $\pi^+\pi^- \to \pi^0\pi^0$ в процессах $\gamma p \to \pi^0\pi^0 p$ оказывается важным. Их учет позволяет значительно улучшить согласие теории с имеющимися экспериментальными данными.

4. В процессах фоторождения одиночных пионов на ядрах $A(\gamma, \pi N)$ в области больших переданных импульсов роль механизма, в котором происходит образование пионной пары $\pi^-\pi^+$ с последующим поглощением положительного пиона на одном из нуклонов, является незначительной. Его включение приводит к общему увеличению выхода мезонов лишь на 1-2 %. Наиболее заметный вклад (60-80 % от результирующего сечения) возникает от нуклон-нуклонного взаимодействия в процессах выбивания двух нуклонов. Этот механизм во многом определяет динамику реакций $A(\gamma, \pi N)$ в области больших импульсов.

Степень достоверности

Научные положения и выводы полностью обоснованы. Достоверность результатов, полученных в диссертации, определяется корректным применением строгого математического аппарата и апробированных методов, а также согласием с результатами, опубликованными в работах российских и зарубежных ученых. В большинстве случаев имеется хорошее согласие количественных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Личный вклад автора

Все результаты, вошедшие в диссертацию, получены при личном участии автора в постановке задач и вычислениях. Совместно с научным руководителем были сформулированы цели и задачи исследования. Анализ современной литературы по тематике диссертации, проведение расчетов, а также апробация результатов на российских и международных конференциях проводились автором лично.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на конференциях:

- IX Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, апрель 2012 г.;
- X Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, апрель 2013 г.;
- XX Международная конференция студентов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, апрель 2013 г.;
- XXII Международный семинар по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика», Дубна, 15-20 сентября 2014 г.,

а также на научных семинарах кафедры высшей математики и математической физики Томского политехнического университета и института ядерной физики Томского политехнического университета.

По теме диссертации опубликовано 5 статей в отечественной и зарубежной научной печати.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, одного приложения, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 146 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 152 страницы. Работа содержит 30 рисунков.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, проведен обзор литературы, установлена связь результатов, представленных в диссертации, с результатами работ других ученых, описана структура диссертации и сформулированы ее основные задачи.

В **главе 1** дано краткое изложение формализма изобарной модели применительно к образованию двух π^0-мезонов а также пар $\pi^0\eta$ на нуклонах. Основной материал главы посвящен исследованию роли процессов перерассеяния $\pi^+\pi^- \to \pi^0\pi^0$ в фоторождении пар нейтральных пионов на протонах в области энергий ниже резонанса $D_{13}(1520)$. Наблюдаемый в эксперименте практически линейный рост полного сечения в этой области можно считать

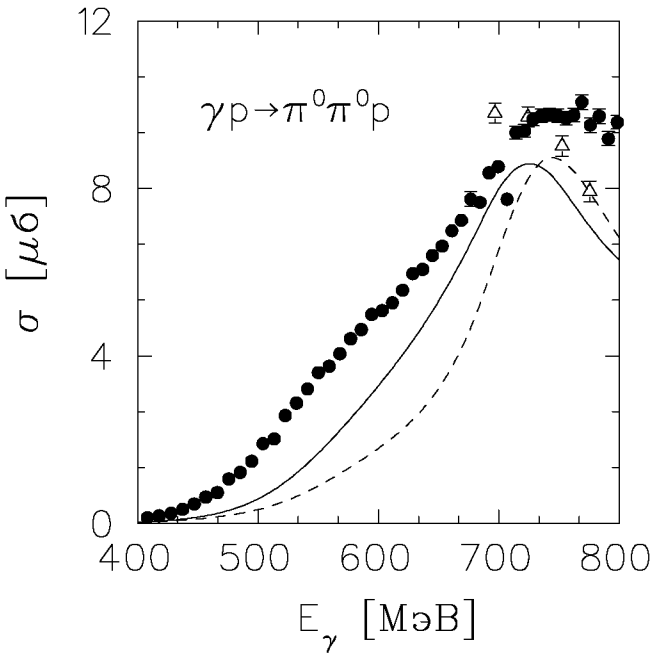

Рис. 1: Полное сечение фоторождения двух π^0-мезонов на протонах во второй резонансной области. Результаты, показанные штриховой и сплошной кривой, получены, соответственно, с учетом и без учета перерассеяния $\pi^+\pi^- \to \pi^0\pi^0$.

указанием на преимущественно s-волновой характер механизма фоторождения, в то время как теория, не учитывающая перерассеяние, предсказывает существенное подавление образования s-волновых мезонов. Вычислены поправки к амплитуде процесса $\gamma p \to \pi^0\pi^0 p$, возникающие в случае, когда переход в канал $\pi^0\pi^0$ происходит в результате образования пары $\pi^+\pi^-$ с последующим рассеянием в состояние $\pi^0\pi^0$. В отличие от более ранних работ рассматриваемая область энергий не ограничивается околопороговыми значениями. Описан способ включения в формализм эффектов взаимодействия образующихся мезонов. Динамика самого рассеяния в s-волне аппроксимирована путем образования и распада скаляр-изоскалярного мезона σ. В конце главы обсуждаются результаты учета эффектов перерассеяния в полном сечении (Рис. 1).

В **Главе 2** исследуются процессы когерентного фотообразования пар нейтральных псевдоскалярных мезонов $\pi^0\pi^0$ и $\pi^0\eta$ на ядрах s- и p-оболочки. В первой части главы изучена зависимость сечения когерентного фоторождения $\pi^0\pi^0$ от квантовых чисел ядра-мишени. В первую очередь проводится исследование изотопической структуры амплитуды фоторождения двух π^0-мезонов, которая определяется относительным вкладом изовекторных и изоскалярных переходов в элементарном процессе $\gamma N \to \pi^0\pi^0 N$. Для реше-

ния задачи используются экспериментальные данные, полученные при измерении полного сечения $\gamma p \to \pi^0\pi^0 p$, а также результаты эксперимента $d(\gamma, \pi^0\pi^0 n)p$, в котором выбитый нейтрон регистрировался на совпадение с парой $\pi^0\pi^0$. Для проведения расчетов используется модель, в рамках которой амплитуда процесса на протоне $\gamma p \to \pi^0\pi^0 p$ была получена на основе парциально-волнового анализа имеющихся экспериментальных угловых распределений частиц. Свободным параметром модели является отношение

$$\alpha = \frac{t_0}{t_{\gamma p}},$$

где $t_{\gamma p}$ и t_0 – соответственно амплитуда фоторождения $\pi^0\pi^0$ на протоне ее изоскалярная часть. При известном значении амплитуды $t_{\gamma p}$, полученном из анализа экспериментальных данных, параметр α однозначно задает изотопическую структуру перехода $\gamma \to \pi^0\pi^0$. Величина α определяется из условия наилучшего согласия рассчитанных значений полного сечения, а также угловых распределений в реакции $\gamma d \to \pi^0\pi^0 np$ с экспериментальными данными. Полученное таким образом значение равно $\alpha = 0.08$. Согласно приведенным расчетам сечение на ядре ^{3}He должно более чем на порядок превышать сечение на дейтроне (Рис. 2). Кроме того, сильное подавление фоторождения $\pi^0\pi^0$ на заполненной s-оболочке позволяет с хорошей точностью оценить сечение $^7\mathrm{Li}(\gamma, \pi^0\pi^0)^7\mathrm{Li}$ по известному сечению реакции $^3\mathrm{He}(\gamma, \pi^0\pi^0)^3\mathrm{He}$ (результат приведен справа на Рис. 1). Экспериментальная проверка этого факта явилась бы хорошим тестом наших знаний о спин-изоспиновой структуре нуклонных возбуждений, лежащих во второй и третьей резонансных областях.

Во второй части главы 2 исследовано когерентное фоторождение пар псевдоскалярных мезонов $\pi^0\eta$ на s-оболочечных ядрах. Рассмотрены наиболее важные вопросы динамики этих реакций, в первую очередь влияние на их сечение взаимодействия в конечном состоянии. Для этой цели используются решения трехчастичных динамических уравнений для ηNN и $\eta - 3N$ систем. Базовым элементом модели, лежащей в основе расчетов, является сепарабельное представление затравочных NN и ηN взаимодействий. Для построения матрицы ηN рассеяния используется стандартная изобарная модель. В качестве основного механизма взаимодействия выступает возбуждение резонанса $S_{11}(1535)$. Для включения взаимодействия в NN-секторе используется сепарабельное представление парижского потенциала, хорошо воспроизводящее не только фазы NN рассеяния но и исходный потенциал во внеэнергетической области вплоть до значений кинетической энергий $T = 500\,\mathrm{МэВ}$ в лабораторной системе отсчета.

При включении эффектов пион-ядерного взаимодействия в расчетах учитывалось лишь поглощение π-мезонов ядром. Использование такого приближения оправдано тем, что дифракционное рассеяние пионов на поверхности

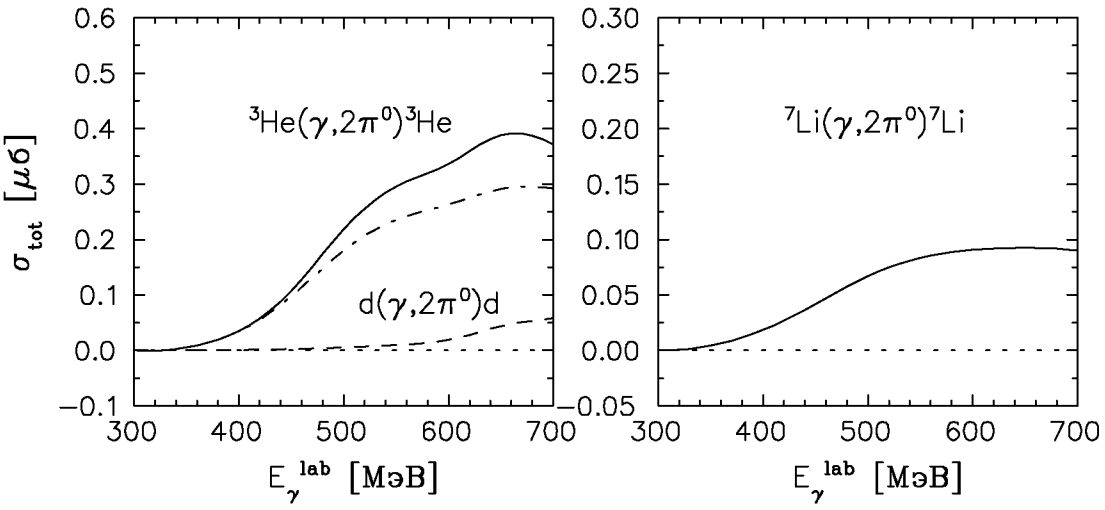

Рис. 2: Сечения процессов когерентного фоторождения $\pi^0\pi^0$ на ядрах d, ^{3}He и ^{7}Li. Штрих-пунктирная кривая на левой части рисунка расшифровывается в тексте работы [5]

ядра в рассматриваемой области энергий менее важно, чем искажение импульсного распределения пионной волны, вызванное взаимодействием с нуклонами ядра. Как известно из пион-ядерной физики, поглощение приводит к общему подавлению пионной волны, причем эффект зависит практически лишь от скорости относительного движения пиона и ядра. Результаты для дифференциальных сечений фоторождения $\pi^0\eta$ на дейтроне приведены на Рис. 3.

Также большое внимание во второй части главы 2 уделено роли неупругих каналов в η-ядерном взаимодействии. Их роль, особенно в реакциях образования связанных эта-ядерных состояний, является предметом дискуссий на протяжении последних десяти лет и имеет ключевое значение для понимания особенностей взаимодействия η мезонов и ядер. Вклад неупругих каналов приводит к появлению мнимой части в длине ηA рассеяния $a_{\eta A}$. Интерес к самой величине мнимой части связан с тем, что в случае η^3He взаимодействия существуют значительные расхождения между предсказанием теории и измеренными значениями по реакциям $pd \to \eta^3$He. Согласно последним, величина $\mathcal{I}m\, a_{\eta^3 He}$ оказывается на порядок меньше чем $\mathcal{R}e\, a_{\eta^3 He}$, и, таким образом, теоретическое значение $\mathcal{I}m\, a_{\eta^3 He}$ существенно переоценивает величины, полученные на основе измерений. Сильное подавление неупругого ηN взаимодействия в ядре, которое следует из анализа этих данных, также находится в противоречии с интуитивным ожиданием роста неупругих эффектов с увеличением числа нуклонов. Представленные в работе результаты показывают, что экспериментальное исследование спектров образующихся η мезонов позволит определить роль неупругих процессов в ηN взаимодействии.

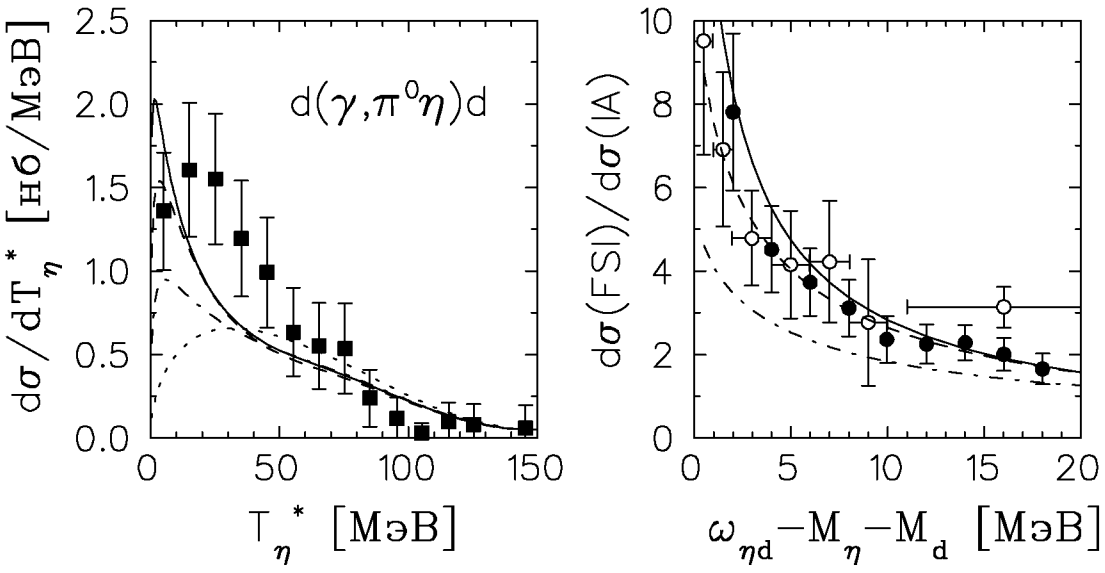

Рис. 3: На левом рисунке приведено распределение по относительной кинетической энергии η-мезона и дейтрона в конечном состоянии реакции $d(\gamma,\pi^0\eta)$d, усредненное в области энергий фотонов $E_\gamma = 0.9 - 1.1$ ГэВ. Точечная кривая получена без включения ηd взаимодействия. Штрихованная, штрихпунктирная и сплошная кривые, включающие эффект ηd взаимодействия, получены с использованием различных наборов параметров ηN рассеяния. На правом рисунке показано отношение сечения с учетом взаимодействия в конечном состоянии к плосковолновому сечению как функция относительной кинетической энергии η-мезона и ядра.

В заключительной части главы 2 исследуется зависимость результатов расчетов от выбора адронных и электромагнитных констант связи. Показано значительное изменение предсказаний полных сечений с использованием двух наборов констант не только для протона и дейтрона, но также для ядер ^{3}He, ^{7}Li и ^{12}C. В расчетах использовалась модель p-оболочки с промежуточной связью. Весовые коэффициенты расчитывались по известным таблицам в $LS-$представлении. Эффекты пион-ядерного взаимодействия на протяжении всей главы расчитывались на базе потенциальных моделей, в рамках которых для простоты учитывалось только поглощение пиона. Эффект пионной перезарядки, с включением Δ-кролл-рудермановского механизма рождения заряженной пары учитывался для ядер с ненулевым изоспином ^{3}He и ^{7}Li. В главе также продемонстрирована зависимость величины эффекта перерассеяния от выбора констант связей в мезон-адронных и электромагнитных вершинах.

В **главе 3** фоторождение пар π мезонов рассмотрено в качестве одного из возможных механизмов, приводящих к большому выходу одиночных π^- мезонов в инклюзивной реакции $A(\gamma,\pi^- p)$ в области больших переданных импульсов. Как продемонстрировано в первой части главы, модель спектатора, которая, как правило, используется в расчетах сечений, может удовлетворительно описать данные лишь в области малых переданных импульсов, которым соответствует максимум в передней области углов протона θ_p. Вместе с тем, эта модель, учитывающая лишь однонуклонные степени свободы в ядрах, неспособна объяснить относительно большой выход мезонов при больших значениях угла θ_p. В этой области образование мезона требует наличия большого импульса нуклона в начальном ядре, который, ввиду довольно низкой плотности атомных ядер, в ядерной волновой функции появляется лишь с малой вероятностью. По этой причине для описания фоторождения в области больших переданных импульсов необходимо включать в рассмотрение механизмы, где в процесс фоторождения активно вовлечены группы нуклонов. Одним из таких механизмов является процесс, в котором поглощение фотона приводит к образованию пары $\pi\pi$, сопровождающемуся поглощением одного из π мезонов на другом нуклоне. Также детально рассмотрена роль других двухнуклонных механизмов. В расчеты были включены наиболее существенные из них – взаимодействие в конечном состоянии в системах NN и πN. В связи с тем, что затравочным процессом является фоторождение мезона на паре нуклонов, во второй части главы подробно рассматривается фоторождение мезонов на дейтроне $\gamma d \to \pi NN$. В этом случае использование в качестве мишени простого по структуре ядра дает возможность наиболее полно исследовать физические особенности реакции, не прибегая к использованию сложных ядерных моделей. Малое число нуклонов и малая энергия связи дейтрона позволяют на основе сравнительно простого формализма добиться хорошего количественного уровня результатов. Полученные результаты облегчают понимание роли аналогичных механизмов в более сложных ядрах, которым посвящена третья часть главы, где в качестве примера рассмотрен процесс $^{12}\mathrm{C}(\gamma,\pi^- p)$. Непосредственные расчеты сечения $\gamma d \to \pi^- pp$ показывают, что включение двухнуклонных механизмов в расчеты сечения реакции $^{12}\mathrm{C}(\gamma,\pi^- p)$ значительно увеличивает выход мезонов в области больших переданных импульсов и, таким образом, улучшает количественное описание существующих экспериментальных данных (сплошная кривая на Рис. 4).

В заключительной части главы 3 представлены сечения процессов когерентного фоторождения π^+ мезона на ядре ^{3}He. Показано, что учет лишь s-волновой части в ядерном матричном элементе приводит к переоценке дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega_\pi$ при $\theta_\pi = 137^\circ$ уже для импульсного приближения. В то же время более корректный расчет ядерного матричного элемента приводит к хорошему согласию с экспериментальными данными. Учет

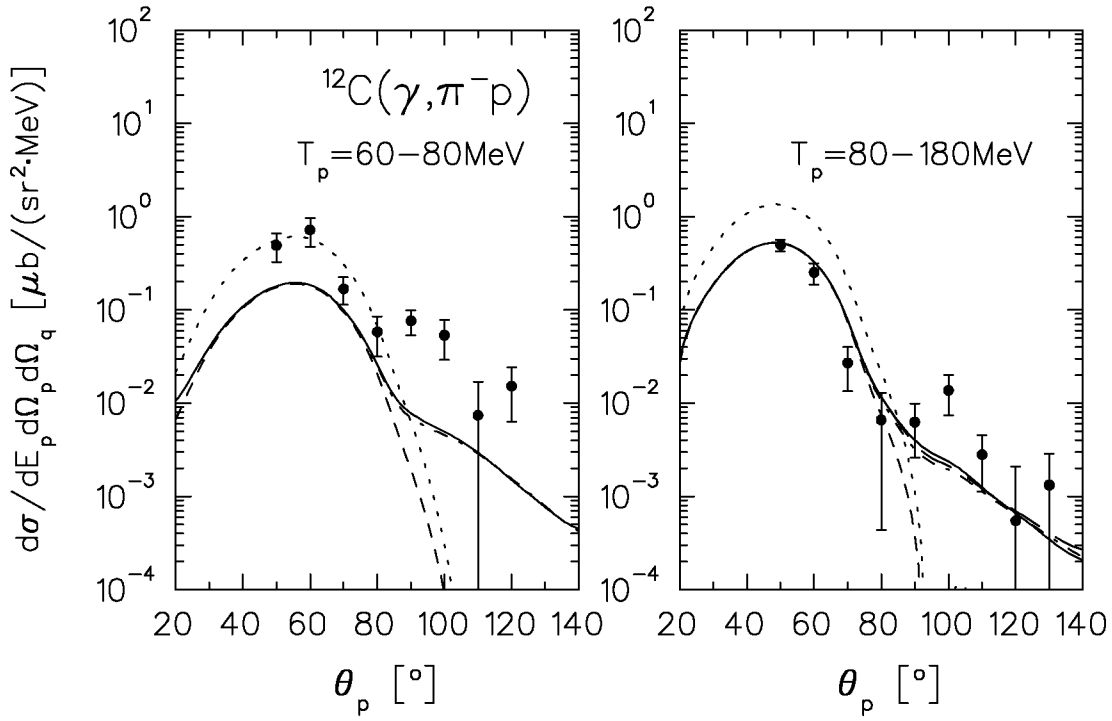

Рис. 4: Дифференциальное сечение реакции $^{12}\mathrm{C}(\gamma,\pi^-p)$ как функция полярного угла вылета протона θ_p, усредненное в интервале кинетической энергии протона T_p=60–80 МэВ (слева) и T_p=80–180 МэВ (справа). Точечная и штриховая кривые получены без учета и с учетом поглощения образующихся частиц. Штрихпунктирная кривая включает эффект нуклон-нуклонного взаимодействия, сплошная кривая получена с учетом всех двухнуклонных механизмов, рассмотренных в работе. Кривая с длинным штрих-пунктиром на правой части рисунка расшифровывается в тексте работы [2].

двухпионного механизма в данном процессе оказывается заметным в области больших переданных импульсов, но величина результирующего сечения недостаточна для объяснения экспериментальных данных.

В **Заключении** резюмируются основные результаты диссертации, выносимые на защиту. Приложения содержат формальный материал, который использовался для вычислений.

Основные результаты работы

В работе впервые получены следующие результаты:

1. Проведено исследование когерентного фоторождения двух нейтральных π-мезонов $A(\gamma,\pi^0\pi^0)A$ на s- и p-оболочечных ядрах. Показано, что процесс фоторождения пар $\pi^0\pi^0$ имеет преимущественно изовекторный характер. Продемонстрирована сильная зависимость сечений когерентных процессов $\gamma \to \pi^0\pi^0$ от изоспина ядра-мишени. На основании результатов сделан вывод о возможности выделения из экспериментальных данных информации об изотопической структуре амплитуды фоторождения и, как следствие, об особенностях кварковой структуры барионных резонансов, возбуждаемых в процессах $\gamma \to \pi^0\pi^0$.

2. Получен удобный метод вычисления сечения процессов $A(\gamma,\pi^0\eta)A$, позволяющий учесть наиболее важные аспекты, связанные с взаимодействием между конечными частицами. Продемонстрированы принципиальные различиия эффектов пион-ядерного и η-ядерного взаимодействия, которые объясняются как значительно меньшей массой пиона по сравнению с η-мезоном, так и особенностями πN и ηN взаимодействий. Выполнено корректное включение η-ядерного взаимодействия ссохранением всех особенностей достаточно сложной многочастичной динамики рассеяния η-мезона на системе нуклонов. Соответствующая t-матрица получена путем решения уравнений Фаддеева и Фаддеева-Якубовского для случая, когда затравочные NN и ηN взаимодействия имеют сепарабельный вид.

3. Исследована зависимость сесчений $A(\gamma,\pi^0\eta)A$ от квантовых чисел ядер. Поскольку сечения процессов $A(\gamma,\pi^0\eta)A$ слабо зависят от изоспипа мишени, эффект когерентности изоскалярной и изовекторной компоненты однонуклонной амплитуды максимален для ядер с массовым чисом $A \geq 2$. Доминирующую роль в фоторождении $\pi^0\eta$ играет резонанс $D_{33}(1700)$. В этой связи, среди всех рассмотренных s-оболочечных ядер наибольший выход η-мезонов ожидается на ядре ^{4}He.

4. Проанализированы эффекты взаимодействия между η-мезоном и конечным ядром в области низких энергий в системе ηA. Показано, что в случае, когда полюс в амплитуде ηA-рассеяния близок к нулевой энергии, измерение спектра π-мезонов (или распределения по инвариантной массе ηA-системы) позволяет с хорошей точностью оценить величину мнимой части длины ηA рассеяния $a_{\eta A}$. Эта информация имеет важное значение для понимания роли неупругих каналов в η-ядерном взаимодействии, а следовательно и для ответа на вопрос о возможности существования связанных η-ядерных систем.

5. Проведено теоретическое исследование процессов фоторождения одиночных пионов на ядрах в области больших переданных импульсов. Показано, что роль механизма, в котором происходит образование пионной па-

ры $\pi^-\pi^+$ с последующим поглощением положительного пиона на одном из нуклонов является незначительной. Его включение приводит к общему увеличению выхода мезонов на 1-2 %. Продемонстрирована исключительная важность учета нуклон-нуклонного взаимодействия в процессах выбивания двух нуклонов и, как следствие, ключевая роль этого механизма в инклюзивных реакциях $A(\gamma, \pi N)$.

6. Исследованы эффекты перерассеяния пионов в реакции $\gamma p \to \pi^0\pi^0 p$ в области низких энергий. Показано, что вследствие большой интенсивности образования пар $\pi^+\pi^-$, учет перерассеяния является важным и приводит к заметному улучшению согласия теории с экспериментальными данными.

7. Выявлена сильная чувствительность сечения процесса $\gamma p \to \pi^0\pi^0 p$ к параметрам $\pi\pi$ рассеяния.

Публикации по теме диссертации:

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России, и в библиографическую базу Web of Science:

1. Егоров, М. В. Роль $\pi\pi$ взаимодействия в парном фоторождении π^0 мезонов на протоне / **М. В. Егоров**, А. И. Фикс // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54, № 4. – С. 58-63. – 0,4 п.л / 0,3 п.л.

   переводная версия: Egorov, M. V. Role of the $\pi\pi$ interaction in the pairwise photoproduction of π^0 mesons on a proton / **M. V. Egorov**, A. I. Fiks // Russian Physics Journal. – 2011. – Vol. 54, № 4. – P. 458-464. – 0,33 п.л / 0,25 п.л. DOI:10.1007/s11182-011-9639-7 (Web of Science)

2. Егоров, М. В. Роль двухнуклонных механизмов в фоторождении π мезонов на ядрах в области больших переданных импульсов / **М. В. Егоров**, А. И. Фикс // Ядерная физика. – 2013. – Т. 76, № 5. – С. 628-633. – 0,4 п.л / 0,33 п.л.

3. Егоров, М. Coherent $\pi^0\eta$ photoproduction on s-shell nuclei / **M. Egorov**, A. Fix // Physical Review C. – 2013. – Vol. 88. – P. 054611(1-10) – 0,63 п.л / 0,4 п.л. DOI:10.1103/PhysRevC.88.054611 (Web of Science)

4. Егоров, М. В. Когерентное фоторождение пар нейтральных пионов на ядрах / **М. В. Егоров**, А. И. Фикс // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 16-21. – 0,4 п.л / 0,3 п.л.

переводная версия: Egorov, M. V. Coherent photoproduction of pairs of neutral pions on nuclei / **M. V. Egorov**, A. I. Fix // Russian Physics Journal. – 2014. – Vol. 57, № 8. – P. 1016-1022. – 0,33 п.л / 0,25 п.л. DOI: 10.1007/s11182-014-0339-y (Web of Science) (Web of Science)

5. Egorov, M. Coherent $\pi^0\pi^0$ photoproduction on lightest nuclei / **M. Egorov**, A. Fix // Nuclear Physics A. – 2015. – Vol. 933. – P. 104-113. – 0,63 п.л / 0,4 п.л. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2014.10.002 (Web of Science)

Работы опубликованные по материалам международных конференций:

1. Егоров, М. В. Взаимодействие π мезонов на протоне в конечном состоянии / М. В. Егоров // Наука и образование : Всероссийская с международным участием конференция студентов, аспирантов и молодых ученых : материалы конференции – Томск : Изд-во Том. гос. педагог. ун-та, 2011. - Т. 1 : Естественные и точные науки – С.5-10.

2. Егоров, М. В. Двухпионный механизм в фоторождении π^- мезонов на дейтроне и ядре ^{12}C в области больших переданных импульсов [Электронный ресурс] / М. В. Егоров // Перспективы развития фундаментальных наук : труды IX Международной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 24-27 апреля 2012 г. / под ред. Г. В. Ляминой, Е. А. Вайтулевич. – Электрон. текст. дан. – Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, 2012. – Режим доступа: http://science-persp.tpu.ru/Previous%20Materials /Konf_2012.pdf – С.539-541.

3. Егоров, М. В. Изотопическая структура когерентных реакций $(\gamma, \pi^0\pi^0)$ на легких ядрах [Электронный ресурс] / М. В. Егоров // Перспективы развития фундаментальных наук : труды X Международной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 23-26 апреля 2013 г. / под ред. Г. В. Ляминой, Е. А. Вайтулевич. – Электрон. текст. дан. – Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, 2013. – Режим доступа: http://science-persp.tpu.ru/Previous%20Materials /Konf_2013.pdf – С.534-536.

4. Егоров, М. В. Изотопическая структура основных барионных резонансов в процессах двойного фоторождения нейтральных пионов [Электронный ресурс] / М. В. Егоров // Международный молодежный научный форум «Ломоносов» : труды XX Международной конференции студентов и молодых ученых «Ломоносов», секция Физика. Москва, 8-13 апреля 2013 г. / отв. ред. А. И. Андреев, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, К. К. Андреев, М. В. Чистякова. – Электрон. текст. дан. – МАКС Пресс, 2013. – Режим доступа: http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2013/2274/SectionPhysics_2013.pdf – С.344-346.

5. Egorov, M. Double photoproduction of neutral pions on light nuclei in coherent reactions [Электронный ресурс] / M. V. Egorov // Baldin ISHEPP XXII : XXII International Baldin Seminar on High energy Physics Problems. Moscow, 15-20 сентября 2014 г. / отв. ред. A. Breskin, M. Henneaux, V. Mukhanov. – Электрон. текст. дан. – Proceedings of Science, 2014. – Режим доступа: http://pos.sissa.it/archive/conferences /225/050/Baldin%20ISHEPP%20XXII_050.pdf

Подписано в печать 19.05.2015 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 01/06-15
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050, г. Томск, пр. Ленина 34а