

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

ПАРЬЕВ Эдуард Яковлевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ КАОНОВ
И ЛЕГКИХ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ В ПРОТОН-ЯДЕРНЫХ
И ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ**

01.04.16–физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Москва–2007

Работа выполнена в Отделе Экспериментальной Физики Института ядерных исследований РАН

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук,
профессор
Д.Н.Воскресенский,
доктор физико–математических наук
В.Г.Недорезов,
доктор физико–математических наук
Е.А.Строковский.

Ведущая организация: ФГУП ГНЦ РФ "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова"(г.Москва).

Защита диссертации состоится ” ____ ” _____ 2007 г. в ____ час.
на заседании Диссертационного совета Д002.119.01 Института ядерных исследований РАН (Москва, 117312, проспект 60-летия Октября, д.7а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН

Автореферат разослан ” ____ ” _____ 2007 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико–математических наук

Б.А.Тулупов

Актуальность темы. Изучение рождения заряженных каонов (K^\pm) и легких векторных мезонов (ρ , ω , ϕ) при взаимодействии ядер и элементарных проб (протонов, пионов, фотонов) с ядрами стало предметом весьма интенсивных экспериментальных и теоретических исследований в течение последних примерно двадцати лет. Основным интересом к данным реакциям был обусловлен возможностью изучения в них как модификации свойств (масс, ширины распадов) самих каонов и легких векторных мезонов, предсказываемой различными теоретическими моделями (киральной теорией возмущений, релятивистскими среднеполевыми подходами, подходами, основанными на использовании эффективных KN -длин рассеяния, так называемым скейлингом Брауна–Ро, квантовохромодинамическими правилами сумм и расчетами на решетке), в горячей/плотной ядерной материи, так и свойств самой ядерной материи при высокой плотности и/или температуре (ее уравнения состояния, кварк-глюонной плазмы, каонного конденсата), а также при обычной ядерной плотности и нулевой температуре (примеси высокоимпульсной компоненты в волновой функции ядрамишени). Знание этих свойств является крайне важным, в частности, для понимания таких фундаментальных вопросов квантовой хромодинамики (КХД), астрофизики и адронной физики как наличие киральной симметрии (приближенной) у лагранжиана КХД и ее частичное восстановление не только в плотной ядерной материи, но уже и при обычных ядерных плотностях, эволюция ранней Вселенной, строение необычных звездных объектов–нейтронных звезд и их динамические и статические характеристики (момент инерции, максимальная масса, радиусы), короткодействующая часть нуклон-нуклонного потенциала. Значительный интерес к реакциям рождения каонов на ядрах в течение последних нескольких лет связан также с возможностью изучения в них экзотического пентакваркового бариона $\Theta^+(1540)$.

Среди векторных мезонов особенно интересным представляется изучение рождения ϕ мезонов как в ядро-ядерных, так и в адрон (фото)-ядерных столкновениях исходя из следующих дополнительных соображений: обнаружение изменения массы и ширины ϕ мезона в ядерной среде по сравнению с вакуумными значениями по детектированию его дикаонной или дилептонной моды распада позволит также получить важную информацию как о примеси странности в нуклоне–величине, которая плохо известна до сих пор и определение которой представляет в настоящее время большой интерес, так и о свойствах каонов в этой среде. Свойства заряженных ка-

онов и ϕ мезонов в ядерной среде могут быть изучены в реакциях их подпорогового рождения на ядрах, т.е. в процессах, запрещенных в той же кинематике при столкновении со свободным нуклоном, поскольку, например, изменения в их массах в ядерной среде будут приводить к сдвигам элементарных порогов их рождения в этой среде, что в свою очередь будет вести к сильным изменениям их выходов из ядер (по сравнению с выходами, полученными в сценарии со свободными массами) при подпороговых начальных энергиях из-за дефицита энергии столкновения. При этом адрон (фото)-ядерные реакции имеют то преимущество по сравнению с ядро-ядерными взаимодействиями, что в них возможные изменения в массах ϕ мезона, каона и антикаона (порядка 2%, 5% и 20% при нормальной ядерной плотности соответственно для ϕ мезона, каона и антикаона), а также в ширине ϕ мезона (на порядок), хотя и меньшие, чем соответствующие изменения в свойствах этих частиц в ядро-ядерных столкновениях, могут лучше контролироваться благодаря их более простой динамике (особенно при подпороговых начальных энергиях, когда дефицит энергии столкновения приводит к существенному сокращению числа возможных каналов образования адронов). Другим важным преимуществом реакций на обычных ядрах с микроскопическими пробами по сравнению с ядро-ядерными столкновениями является то, что в них спектаторная материя находится вблизи своего равновесного состояния. А это весьма существенно, поскольку теоретические предсказания о свойствах адронов в ядерной среде основываются на равновесной модели, в которой исследуемый адрон (векторный мезон) внедрен в находящуюся в равновесии холодную ядерную материю.

Для описания реакций с нуклонами, пионами, фотонами (и сложными частицами) при различных энергиях и тем самым для установления связи между экспериментом и лежащей в основе физикой часто используются динамические транспортные модели, основанные на неравновесной кинетической транспортной теории. Эти модели позволяют описать большой набор адронных и лептонных наблюдаемых в данных реакциях. Однако расчеты по ним, ввиду их сложности и используемого в них алгоритма расчета, требуют больших затрат машинного времени и усилий, в том числе и при подпороговых начальных энергиях, когда мы имеем дело с малыми сечениями. Поэтому для описания подпорогового рождения заряженных каонов в протон-ядерных взаимодействиях получили развитие более простые модели—так называемые модели свертки (или фолдинг модели).

В этих моделях использовались различные параметризации элементарных сечений рождения каонов, а также импульсного распределения нуклонов ядра-мишени. Их существенным недостатком было то, что в них полностью пренебрегалось (или учитывалось весьма грубо) немассовым поведением¹ внутриядерных нуклонов и влиянием ядерной среды на элементарные процессы образования каонов. Учет этих эффектов крайне важен при рассмотрении процессов, ограниченных по фазовому пространству. А именно к таким процессам относится подпороговое и околопороговое образование тяжелых мезонов на нуклонах ядра-мишени.

Таким образом, для более корректного описания подпорогового и околопорогового рождения заряженных каонов при взаимодействии элементарных проб (протонов, фотонов) с ядрами представлялось **необходимым, важным и актуальным** разработать новую модель, которая устраняла бы этот недостаток, а также проанализировать с ее помощью имеющиеся экспериментальные данные.

Далее, в связи с планируемыми экспериментами по обнаружению модификации ϕ мезона в ядерной среде в pA -соударениях на ускорителях COSY-Juelich, НУКЛОТРОН-Дубна, а также в связи с возможными в будущем экспериментами по изучению свойств экзотического пентакваркового бариона $\Theta^+(1540)$ в фотоядерных реакциях представлялось **важным и актуальным** обобщить эту модель на случай рождения нестабильных частиц (в частности, ϕ мезонов и Θ^+ барионов) соответственно в протон-ядерных и фотоядерных столкновениях в подпороговом и околопороговом энергетических режимах, и затем получить с помощью этой обобщенной модели предсказания для различных наблюдаемых в данных столкновениях.

Наконец, в связи с проектами сооружения сильноточных протонных ускорителей нового поколения (каонных фабрик) и проведения экспериментов на них с высокоинтенсивными каонными пучками как в области ядерной физики, так и в области физики редких каонных распадов **возникла необходимость** в детальном, систематическом и достаточно простом описании инклюзивных сечений рождения заряженных каонов в протон-протонных и протон-ядерных соударениях при больших энергиях первичных протонов (при кинетической энергии протона в лабораторной системе > 3 ГэВ).

¹Такое поведение связанных нуклонов ядра определяется их спектральной функцией $P(\mathbf{p}_t, E)$, которая дает вероятность нахождения в ядре нуклона с импульсом \mathbf{p}_t и энергией связи E .

Целью настоящей диссертации в свете сказанного является:

- 1) разработка модели для описания инклюзивного подпорогового и околопорогового рождения заряженных каонов при взаимодействии элементарных проб (протонов, фотонов) с ядрами, основанной на рассмотрении соответствующих прямых и двухступенчатых (через промежуточный пион) процессов образования каонов и антикаонов, и учитывающей как модификацию свойств вторичных адронов в ядерной среде, так и реалистическую спектральную функцию нуклонов ядра-мишени;
- 2) анализ на основе этой модели имеющихся экспериментальных данных по подпороговому и околопороговому рождению заряженных каонов в протон (фото)-ядерных реакциях с целью изучения механизма подпорогового и околопорогового образования каонов на ядрах, а также роли нуклон-нуклонных корреляций и эффектов среды в этом явлении;
- 3) обобщение данной модели на случай рождения нестабильных частиц, в частности, ϕ мезонов и Θ^+ барионов соответственно в протон-ядерных и фотоядерных столкновениях в подпороговом и околопороговом энергетических режимах;
- 4) получение на основе этой обобщенной модели предсказаний для различных наблюдаемых в данных столкновениях, которые могут быть использованы при обсуждении возможности постановки соответствующих экспериментов по изучению свойств ϕ мезонов и Θ^+ барионов соответственно в ядерной среде и в вакууме;
- 5) разработка детального и достаточно простого метода расчета инклюзивных сечений образования заряженных каонов в протон-протонных и протон-ядерных соударениях при больших энергиях первичных протонов соответственно на основе учета скейлингового характера инклюзивных сечений образования каонов в pp -столкновениях при высоких энергиях и на основе объединения аналитического расчета сечений их рождения на легких ядрах в прямых протон-нуклонных взаимодействиях с феноменологическим описанием сечений их образования на тяжелых ядрах-мишенях;

- б) проверка его точности и пределов применимости путем сравнения полученных с его помощью предсказаний о сечениях с экспериментальными данными.

Научная значимость работы состоит в том, что в диссертации разработана относительно простая и достаточно эффективная модель для описания инклюзивного подпорогового и околопорогового рождения заряженных каонов и легких векторных мезонов (в частности, ϕ мезонов) при взаимодействии элементарных проб (протонов, фотонов) с ядрами, которая позволяет сравнительно быстро рассчитывать инклюзивные сечения их подпорогового и околопорогового образования на ядрах, изучать роль прямого и двухступенчатого механизмов, нуклон-нуклонных корреляций и эффектов среды в этом явлении. Кроме того, в диссертации развит аналитический метод расчета инклюзивных сечений образования заряженных каонов в протон-протонных и протон-ядерных столкновениях при больших энергиях первичных протонов, который также позволяет быстро и достаточно надежно рассчитывать эти сечения в широком диапазоне энергий первичных протонов и массовых чисел ядер-мишеней (для pA -столкновений).

Научная новизна работы заключается в следующем.

1) Предложен новый подход к описанию инклюзивного подпорогового и околопорогового рождения заряженных каонов и легких векторных мезонов (в частности, ϕ мезонов) в протон-ядерных и фотоядерных взаимодействиях, основанный на рассмотрении соответствующих прямых и двухступенчатых процессов их образования и учитывающий как модификацию свойств вторичных адронов в ядерной среде, так и реалистическую спектральную функцию нуклонов ядра-мишени; в рамках данного подхода впервые сформулированы соответствующие выражения для инклюзивных сечений образования заряженных каонов и ϕ мезонов на ядре от этих процессов в виде функционалов от элементарных сечений их рождения, плотности и спектральной функции внутриядерных нуклонов.

2) На основе этого подхода проведен анализ имеющихся экспериментальных данных по инклюзивным сечениям рождения заряженных каонов в протон (фото)-ядерных реакциях в подпороговом и околопороговом энергетических режимах.

3) Впервые показано, что:

— учет влияния ядерной среды на прямые и двухступенчатые процессы образования каонов и антикаонов в протон-ядерных взаимодействиях является существенным как для описания анализируемых данных, так и дан-

ных по инклюзивным сечениям рождения заряженных пионов под малыми углами на ядрах ^{12}C протонами с энергиями от 1.05 до 2.1 ГэВ;

- для описания экспериментальных данных по энергетическим зависимостям сечений образования быстрых антикаонов в $p\text{Be}$ - и $p\text{Cu}$ -столкновениях в подпороговом режиме, полученных на ускорителе в ИТЭФ, также важным является учет взаимодействия в конечном состоянии между выходящими в прямом процессе их рождения нуклонами;
- относительная сила прямого и двухступенчатого механизмов образования каонов и антикаонов в pA -соударениях в подпороговом режиме зависит от кинематики анализируемой реакции, а именно: прямой механизм доминирует в формировании высокоэнергетических частей спектров вторичных каонов и антикаонов, тогда как двухступенчатые процессы ответственны в основном за образование мягких каонов и антикаонов;
- выход каонов от прямых процессов в протон-ядерных и фотоядерных реакциях почти полностью определяется коррелированной ("высокоимпульсной") частью спектральной функции внутриядерных нуклонов только в очень узком диапазоне импульсов каонов (для спектров каонов) или начальных энергий (для энергетических зависимостей).

4) Изучена зависимость подпорогового рождения медленных K^- мезонов в pA -взаимодействиях от глубины притягивательного антикаон-ядерного потенциала. Показано, что имеется сильная чувствительность выхода K^- мезонов с импульсами в лабораторной системе ≤ 400 МэВ/с к глубине этого потенциала. Это дает возможность определить экспериментально антикаон-ядерный потенциал путем измерения дифференциальных сечений подпорогового и околопорогового образования мягких K^- мезонов на различных ядрах-мишенях.

5) Впервые исследовано подпороговое рождение ϕ мезонов в прямом процессе и их распад через дикаонный (димюонный) канал в протон-ядерных реакциях и сделан определенный вывод о возможности экспериментального наблюдения (по дилептонному каналу) в рассматриваемых реакциях ренормализации свойств ϕ мезона уже при обычных ядерных плотностях.

6) Впервые изучена возможность определения четности Θ^+ пентакварка в реакции $\gamma d \rightarrow K^- \Theta^+ p \rightarrow K^- K^+ n p$ в пороговой области энергий первичных фотонов. Показано, что угловые распределения K^- мезонов в лабораторной системе, образованных в этой реакции, являются чувствительными к четности Θ^+ бариона и поэтому могут быть использованы в

качестве фильтра для определения его четности.

7) Впервые получены простые аналитические выражения для инклюзивных сечений образования заряженных каонов в протон-протонных и протон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях первичных протонов (при кинетической энергии протона в л.с. > 3 ГэВ). Проведено детальное сравнение расчетов по этим выражениям инклюзивных сечений с экспериментальными данными, которое продемонстрировало их эффективность для расчета указанных величин, а также их пределы применимости.

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты, полученные в диссертации, позволяют сравнительно быстро и достаточно надежно вычислять инклюзивные сечения образования заряженных каонов и легких векторных мезонов (в частности, ϕ мезонов), необходимые при анализе экспериментальных данных, при обсуждении возможности постановки соответствующих экспериментов по изучению свойств каонов и ϕ мезонов в ядерной материи, четности пентакварка $\Theta^+(1540)$, а также при решении различных задач прикладной ядерной физики.

Автор выносит на защиту:

1) Метод описания инклюзивного подпорогового и околопорогового рождения заряженных каонов и легких векторных мезонов (в частности, ϕ мезонов) в протон-ядерных и фотоядерных взаимодействиях, основанный на рассмотрении соответствующих прямых и двухступенчатых процессов их образования, учитывающий как модификацию свойств вторичных адронов в ядерной среде, так и реалистическую спектральную функцию нуклонов ядра-мишени, и включающий:

- а) выражения для инклюзивных сечений образования заряженных каонов и ϕ мезонов на ядре от этих процессов;
- б) выражения для инклюзивных сечений образования заряженных каонов и ϕ мезонов в рассматриваемых элементарных реакциях;
- в) аналитические выражения для некоррелированной и коррелированной частей спектральной функции внутриядерных нуклонов.

2) Результаты анализа имеющихся экспериментальных данных по инклюзивным сечениям рождения заряженных каонов в протон-ядерных и фотоядерных реакциях в подпороговом и околопороговом энергетических режимах, а также предсказания о сечениях их образования в этих реакциях в данных режимах.

3) Предсказания для распределений каонных (мюонных) пар по их инвариантной массе от распадов ϕ мезонов, образованных в прямом процессе $pN \rightarrow pN\phi$ протонами с энергией 2.4 ГэВ, внутри и вне ядер-мишеней ^{12}C и ^{63}Cu , а также для суммарных распределений этих пар по их инвариантной массе.

4) Предсказания для эксклюзивных и инклюзивных угловых распределений K^- мезонов в лабораторной системе, образованных в реакции $\gamma d \rightarrow K^- \Theta^+ p \rightarrow K^- K^+ np$ фотонами с энергиями 1.5 и 1.75 ГэВ.

5) Аналитические формулы для инклюзивных сечений образования заряженных каонов в протон-протонных и протон-ядерных столкновениях при высоких энергиях первичных протонов.

6) Результаты численных расчетов по этим формулам и сравнение их с экспериментом.

Апробация работы. Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих международных конференциях и совещаниях:

- 1) "Mesons and Nuclei at Intermediate Energies". Dubna, Russia, 3–7 May 1994;
- 2) "Physics with GeV-Particle Beams". Juelich, Germany, 22–25 August 1994;
- 3) "Mesons and Light Nuclei". Czech Republic, 3–7 July 1995;
- 4) The 25th INS Int. Symposium on "Nuclear and Particle Physics with High-Intensity Proton Accelerators". Tokyo, Japan, 3–6 December 1996;
- 5) Int. Conference on "Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP97)". BNL, Upton, NY, 13–18 October 1997;
- 6) "International Nuclear Physics Conference (INPC/98)". Paris, France, 24–28 August 1998;
- 7) Workshop on "Strangeness Nuclear Physics (SNP'99)". Seoul, Korea, 19–22 February 1999;
- 8) The 2nd KEK-Tanashi Int. Symposium on "Hadron and Nuclear Physics with Electromagnetic Probes". Tokyo, Japan, 25–27 October 1999;
- 9) 7th Conference on "The Intersections of Particle and Nuclear Physics (CIPANP2000)". Quebec, Canada, 22–28 May 2000;
- 10) 7th Int. Conference on "Nucleus-Nucleus Collisions (NN2000)". Strasbourg, France, 3–7 July 2000;

- 11) 2nd ANKE Workshop on "Strangeness Production in pp and pA Interactions at ANKE". PNPI, Gatchina, Russia, 21–22 June 2001;
- 12) The Fourth Int. Conference on "Modern Problems of Nuclear Physics". Tashkent, Uzbekistan, 25–29 September 2001;
- 13) "XIII NADES Collaboration Meeting". Nicolosi, Italy, 3–6 December 2003;

а также обсуждались на научных семинарах в ИЯИ РАН, ОИЯИ (ЛВЭ, ЛФЧ) и Институте ядерной физики Центра Физических Исследований (Юлих, Германия).

Публикации. По результатам диссертации опубликованы одна книга и 37 статей.

Структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключение, содержит 252 страницы печатного текста, 58 рисунков, 4 таблицы. Список цитированной литературы включает 488 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении дано обоснование актуальности и важности исследуемой проблемы, сформулированы цель работы и основные новые результаты, полученные в диссертации, излагается ее краткое содержание.

Первая глава диссертации посвящена разработке метода расчета инклюзивных сечений образования K^+ мезонов в протон-ядерных взаимодействиях в широком диапазоне энергий первичных протонов.

В первой части этой главы развивается метод описания инклюзивного подпорогового и околопорогового рождения каонов в pA -столкновениях, основанный на рассмотрении как прямого механизма образования каонов, так и двухступенчатого механизма с пионами в промежуточном состоянии, и учитывающий модификацию свойств вторичных адронов в ядерной среде, а также реалистическую спектральную функцию нуклонов ядра-мишени.

В разделе 1.1.1 обсуждается современное состояние проблемы, излагаются полученные ранее в этой области исследований результаты.

В разделе 1.1.2 рассматриваются прямые процессы образования K^+ мезонов: $pN \rightarrow K^+YN$, $Y = \Lambda, \Sigma$. Эти процессы имеют наименьшие свободные пороги (соответственно 1.58 и 1.78 ГэВ) и потому дают основной вклад в сечение в области энергий падающих протонов $\epsilon_0 \leq 3$ ГэВ. В рамках импульсного приближения в пренебрежении упругими перерассеяниями рожденных в этих процессах каонов на нуклонах ядра и их поглощением в

ядре (что справедливо в интересующем нас случае легких ядер и каонов с импульсами ≤ 1.3 ГэВ/с) сформулировано выражение для инклюзивного сечения рождения K^+ мезонов в pA -взаимодействиях от прямых процессов в виде функционала от сечений их рождения в ядре в данных процессах, плотности и спектральной функции нуклонов ядра-мишени. На основе модели трехчастичного релятивистского фазового объема найдены простые выражения для инклюзивных инвариантных сечений образования каонов в ядерной среде в рассматриваемых прямых процессах. Эти выражения учитывают как немассовое поведение внутриядерных нуклонов, на которых происходят акты рождения каонов, так и модификацию масс вторичных адронов (нуклонов и гиперонов) и 4-импульса падающего протона в этой среде. Приведена используемая в наших расчетах полученная нами параметризация полных свободных сечений образования K^+ мезонов в рассматриваемых прямых процессах, которая неплохо описывает в интересующем нас диапазоне энергий экспериментальные данные о этих сечениях. В частности продемонстрировано, что она довольно хорошо фитирует мировой набор данных для реакции $pp \rightarrow K^+ \Lambda p$ в околопороговой области энергий. Эта реакция дает основной вклад в сечение рождения каонов на ядре от прямых процессов в подпороговой области энергий первичных протонов.

В разделе 1.1.3 на основе стандартной оболочечной модели и так называемой конволюционной модели (C. Ciofi degli Atti and S. Simula, Phys. Rev. C **53**, 1689 (1996)) получены простые аналитические выражения для одночастичной (некоррелированной) $P_0(\mathbf{p}_t, E)$ и коррелированной (учитывающей нуклон-нуклонные корреляции) $P_1(\mathbf{p}_t, E)$ частей спектральной функции $P(\mathbf{p}_t, E)$ нуклонов ядер-мишеней ${}^9\text{Be}$ и ${}^{12}\text{C}$. Эти выражения использовались в наших расчетах сечений рождения заряженных каонов и ϕ мезонов на данных ядрах-мишенях налетающими протонами и фотонами.

В разделе 1.1.4 рассматриваются следующие двухступенчатые процессы образования K^+ мезонов: $pN \rightarrow NN\pi$, $NN2\pi$; $\pi N \rightarrow K^+ Y$. Эти процессы могут давать вклад в сечение рождения каонов на ядре при энергии первичного протона ≤ 3 ГэВ. В рамках тех же самых предположений, что использовались при получении выражения для инклюзивного сечения рождения каонов в pA -взаимодействиях от прямых процессов, сформулировано соответствующее выражение для дифференциального сечения образования K^+ мезонов в этих взаимодействиях от рассматриваемых двухступенчатых процессов. Дан рецепт по вычислению элементарных сечений рождения пионов и каонов в ядре соответственно в pN - и πN -соударениях, входящих в

это выражение. Продемонстрирована применимость развитой нами модели для описания высокоэнергетических частей спектров заряженных пионов, измеренных под малыми углами в лабораторной системе при энергиях первичных протонов, лежащих в диапазоне между 1 и 2 ГэВ (что вселяет в нас уверенность в том, что наш подход является достаточно реалистичным для описания рождения K^+ мезонов в πN -столкновениях, поскольку именно такие пионы ответственны за образование каонов в этих столкновениях в подпороговой области энергий налетающих протонов).

Раздел 1.1.5 посвящен обсуждению результатов анализа на основе предложенной модели имеющихся экспериментальных данных по инклюзивным сечениям рождения K^+ мезонов в $p^9\text{Be}$ - и $p^{12}\text{C}$ -взаимодействиях в подпороговом и околопороговом энергетических режимах. При этом в нем детально обсуждается роль эффектов среды (эффективных нуклон-ядерных и гиперон-ядерных потенциалов) в подпороговом рождении каонов в этих взаимодействиях. Показано, что учет влияния ядерной среды на прямые и двухступенчатые процессы образования каонов является принципиально важным для описания рассматриваемых экспериментальных данных. Кроме того, в нем подробно исследуется механизм подпорогового образования каонов на данных легких ядрах. Показано также, что относительная сила инициированных первичным протоном и промежуточным пионом процессов образования K^+ мезонов в таких ядрах в подпороговом энергетическом режиме определяется главным образом кинематикой анализируемой реакции, а именно: прямые процессы доминируют в образовании высокоэнергетических ("жестких") вторичных каонов, тогда как вклады от прямых и двухступенчатых процессов в образовании низкоэнергетических ("мягких") K^+ мезонов являются сравнимыми. В этом разделе также обсуждается роль NN -корреляций в подпороговом рождении каонов на рассматриваемых ядрах-мишенях. Продемонстрировано, что основной вклад в сечение рождения K^+ мезонов на ядре от двухступенчатого механизма дает некоррелированная часть нуклонной спектральной функции, а выход каонов от прямого механизма почти полностью определяется коррелированной частью этой функции только в очень узком диапазоне импульсов каонов (для спектров каонов) или начальных энергий (для энергетических зависимостей), что затрудняет извлечение детальной информации о ней из анализируемых данных.

Во второй части первой главы разрабатывается метод расчета инклюзивных сечений образования K^+ мезонов в протон-протонных и

протон-ядерных соударениях при больших энергиях первичных протонов.

В разделе 1.2.1 на основе развитой нами в первой части настоящей главы модели и предположения, что основную долю каонов, образующихся при столкновениях протонов высоких энергий (начиная с энергии ~ 3 ГэВ) с легкими ядрами, составляют каоны от прямых протон-нуклонных взаимодействий, получено простое выражение для инклюзивного сечения образования K^+ мезонов на легких ядрах под действием протонов больших энергий. Это выражение представляет собой произведение эффективного числа нуклонов ядра-мишени, участвующих в прямых протон-нуклонных соударениях, и инклюзивного инвариантного сечения рождения каонов в свободных pp -столкновениях. Для последнего сечения на основе анализа экспериментальных данных и учета его порогового и скейлингового поведения найдена простая параметризация, позволяющая неплохо (с точностью $\sim 20\%$) рассчитать это сечение в широком диапазоне энергий первичных протонов при поперечных импульсах K^+ мезонов $p_{\perp} \leq 1.5$ ГэВ/с.

Раздел 1.2.2 посвящен обобщению полученной в разделе 1.2.1 формулы для инклюзивного сечения образования каонов на легких ядрах на случай тяжелых ядер-мишеней на основе использования экспериментальной A -зависимости их сечения рождения, а также сравнению результатов расчетов инклюзивных сечений рождения K^+ мезонов в pA -взаимодействиях по полученным в диссертации формулам с экспериментом при различных энергиях первичных протонов. Показано, что эти формулы позволяют удовлетворительно рассчитать инклюзивные сечения рождения K^+ мезонов на ядрах под наиболее интересными малыми углами в л.с. протонами больших энергий. Кроме того, в этом разделе приведены предсказания для инклюзивных инвариантных сечений рождения K^+ мезонов под нулевым углом в лабораторной системе протонами различных энергий соответственно в pp -, $p\text{Be}$ - и $p\text{Pb}$ -столкновениях, показывающие, что мягкая часть спектров каонов в этих столкновениях не сильно зависит от энергии ϵ_0 налетающего протона в интервале энергий $\epsilon_0 \geq 30$ ГэВ, что свидетельствует в пользу выбора энергии $\epsilon_0 \sim 30\text{--}50$ ГэВ в качестве оптимальной энергии первичного пучка протонов ускорителей нового поколения типа каонных фабрик.

Краткий итог выполненных в первой главе исследований подведен в разделе 1.3.

Во второй главе диссертации развитая в предыдущей главе модель обобщается на случай рождения K^- мезонов в протон-ядерных столкновениях.

В первой части этой главы рассматривается инклюзивное подпороговое и околопороговое образование K^- мезонов в pA -соударениях.

В разделе 2.1.1 детально обсуждается современное состояние исследований в этой области ядерной и адронной физики.

В разделе 2.1.2 рассматривается прямой механизм образования K^- мезонов: $pN \rightarrow NNKK^-$. Реакция $pN \rightarrow NNKK^-$ имеет наименьший свободный порог (2.50 ГэВ) и потому дает основной вклад в сечение при энергиях налетающих протонов $\epsilon_0 \leq 3$ ГэВ. В рамках импульсного приближения сформулировано выражение для инклюзивного сечения рождения антикаонов в pA -взаимодействиях за счет прямого механизма в виде функционала (как и в разделе 1.1.2 для инклюзивного сечения образования K^+ мезонов в pA -соударениях в прямых процессах) от элементарного сечения их рождения в ядре за счет данного механизма, плотности и спектральной функции внутриядерных нуклонов. В отличие от случая образования K^+ мезонов это выражение учитывает сильное поглощение рожденных антикаонов в ядерной среде. На основе модели четырехчастичного релятивистского фазового объема и соответствующей теории Мигдала–Ватсона найдено относительно простое выражение для инклюзивного инвариантного сечения образования K^- мезонов в ядерной среде в прямом процессе, которое учитывает (как и полученные ранее выражения для инклюзивных сечений образования K^+ мезонов в ядерной материи в прямых процессах) немассовое поведение внутриядерного нуклона, на котором происходит акт рождения антикаона, а также модификацию масс вторичных адронов (двух нуклонов, каона и антикаона) и 4-импульса падающего протона в этой среде. Кроме того, это выражение учитывает взаимодействие в конечном состоянии между ненаблюдаемыми продуктами прямого процесса (главным образом между выходящими нуклонами, так как KN -взаимодействие является довольно слабым по сравнению с сильным NN -взаимодействием), поскольку относительные импульсы этих продуктов, как правило, малы в интересующих нас кинематических условиях. Приведена используемая в наших расчетах полученная нами параметризация полного свободного сечения образования K^- мезона в рассматриваемом прямом процессе. Показано, что эта параметризация неплохо описывает в околопороговой области энергий экспериментальные данные о полном сечении реакции $pp \rightarrow ppK^+K^-$.

В разделе 2.1.3 в рамках фермигазовой модели ядра получено простое аналитическое выражение для некоррелированной части спектральной функ-

ции нуклонов ядра ^{208}Pb ². Это выражение использовалось в наших расчетах сечений рождения K^- мезонов в $p^{63}\text{Cu}$ - и $p^{197}\text{Au}$ -взаимодействиях в подпороговом энергетическом режиме.

В разделе 2.1.4 рассматривается двухступенчатый механизм образования K^- мезонов: $pN \rightarrow NN\pi$, $\pi N \rightarrow NK^-$. Этот механизм может давать вклад в сечение рождения антикаонов в pA -столкновениях в рассматриваемом диапазоне энергий налетающих протонов ($\epsilon_0 \leq 3$ ГэВ). С учетом полученной в разделе 1.1.4 формулы для дифференциального сечения рождения K^+ мезонов в pA -столкновениях от двухступенчатых процессов сформулировано соответствующее выражение для аналогичного сечения образования K^- мезонов в pA -взаимодействиях за счет двухступенчатого механизма. В рамках модели трехчастичного релятивистского фазового объема найдено инклюзивное инвариантное сечение образования K^- мезона в ядре в πN -столкновениях, входящее в это выражение и включающее в себя рассматриваемые эффекты среды. Приведены используемые в наших расчетах полученные нами на основе анализа экспериментальных данных параметризации полных свободных сечений образования антикаонов в πN -соударениях и дифференциальных сечений образования высокоэнергетических пионов под малыми углами на ядрах ^9Be и ^{63}Cu протонами промежуточных энергий.

Раздел 2.1.5 посвящен обсуждению результатов анализа на основе развитой модели имеющихся экспериментальных данных по подпороговому образованию антикаонов в $p^9\text{Be}$ -, $p^{63}\text{Cu}$ - и $p^{197}\text{Au}$ -взаимодействиях. Показано, что учет взаимодействия в конечном состоянии между выходящими в прямом процессе образования K^- мезонов нуклонами является важным для описания данных по рождению "жестких" антикаонов в $p^9\text{Be}$ - и $p^{63}\text{Cu}$ -соударениях в случае, когда влияние ядерных притягивательных нуклонного и антикаонного эффективных потенциалов как на этот процесс, так и на вторичный процесс образования K^- мезонов учтено, а влиянием на них отталкивательного каонного потенциала пренебрегается. С другой стороны, NN -эффекты взаимодействия в конечном состоянии оказались несущественными при описании данных по рождению сравнительно "мягких" K^- мезонов в $p^{197}\text{Au}$ -столкновениях благодаря доминированию здесь, в противоположность к предыдущему случаю, вторичного канала образования антикаонов. Кроме того, в данном разделе представлены пред-

²Общее выражение для коррелированной части спектральной функции внутриядерных нуклонов было получено в первой главе в разделе 1.1.3.

сказания нашей модели для инклюзивных инвариантных сечений рождения K^- мезонов под углом 10.5° в лабораторной системе от индуцированных первичным протоном и промежуточным пионом каналов в реакции $p + {}^9\text{Be} \rightarrow K^- + X$ при энергии протонов 2.25 ГэВ. Продемонстрирована чувствительность этих сечений к величине притягивательного антикаон-ядерного потенциала. В частности показано, что имеется сильная чувствительность данных сечений к величине K^-A потенциала при импульсах антикаонов $p_{lab} \approx 0.2-0.3$ ГэВ/с. Это дает возможность определить экспериментально антикаон-ядерный потенциал (по крайней мере, сделать выбор в пользу либо мелкого, либо глубокого антикаонного потенциала) путем измерения дифференциальных сечений подпорогового и околопорогового образования "мягких" K^- мезонов на различных ядрах-мишенях.

Во второй части второй главы рассматривается инклюзивное образование K^- мезонов в pp - и pA -столкновениях при высоких энергиях первичных протонов.

В разделе 2.2.1 в рамках тех же самых предположений, что использовались в разделе 1.2.1 при получении выражения для инклюзивного сечения рождения K^+ мезонов на легких ядрах под действием протонов больших энергий, найдено аналогичное выражение для инклюзивного сечения образования антикаонов на таких ядрах протонами высоких энергий. Как и прежде для K^+ мезонов, это выражение представляет собой произведение эффективного числа нуклонов ядра-мишени, участвующих в прямых протон-нуклонных столкновениях, и инклюзивного инвариантного сечения рождения K^- мезонов в свободных pp -соударениях. Для последнего сечения, как и в случае с K^+ мезонами, на основе анализа экспериментальных данных и учета его порогового и скейлингового поведения получена простая параметризация, позволяющая в целом неплохо (с точностью $\sim 30\%$) рассчитать это сечение в широком диапазоне энергий первичных протонов при поперечных импульсах K^- мезонов $p_\perp \leq 1.5$ ГэВ/с.

Раздел 2.2.2 посвящен обобщению найденной в разделе 2.2.1 формулы для инклюзивного сечения образования антикаонов на легких ядрах на случай тяжелых ядер-мишеней на основе использования, как и прежде для K^+ мезонов, экспериментальной A -зависимости их сечения рождения, а также сравнению результатов расчетов инклюзивных сечений рождения K^- мезонов в pA -взаимодействиях по полученным простым аналитическим формулам с экспериментом при различных энергиях налетающих протонов. Показано, что эти формулы (аналогичные полученным в разделе 1.2.1 формулам

для K^+ мезонов) позволяют удовлетворительно рассчитать инклюзивные сечения рождения K^- мезонов под малыми углами на ядрах протонами высоких энергий. Кроме того, в нем даны предсказания для инклюзивных инвариантных сечений рождения K^- мезонов под нулевым углом в лабораторной системе протонами различных энергий соответственно в pp -, $p\text{Be}$ - и $p\text{Pb}$ -столкновениях, показывающие, что мягкая часть спектров антикаонов в этих столкновениях (так же, как и аналогичная часть спектров каонов в таких столкновениях) не сильно зависит от энергии первичного протона в диапазоне энергий $\epsilon_0 \geq 30$ ГэВ, что дополнительно свидетельствует в пользу выбора энергии $\epsilon_0 \sim 30\text{--}50$ ГэВ в качестве оптимальной энергии первичного пучка протонов ускорителей типа каонных фабрик.

В разделе 2.3 сформулированы основные результаты, полученные во второй главе диссертации.

Третья глава диссертации посвящена обобщению развитой в первых двух главах модели на случай рождения нестабильных частиц (в частности, ϕ мезонов) в протон-ядерных соударениях в подпороговом и околопороговом энергетических режимах с учетом модификации их свойств в ядерной среде.

В разделе 3.1 детально обсуждается современное состояние исследований в данной области ядерной и адронной физики.

В разделе 3.2.1 рассматривается спектральная функция ϕ мезона в вакууме и в ядерной среде—релятивистское распределение Брейта–Вигнера с входящей в него соответственно полной вакуумной шириной ϕ мезона и его полной шириной, возмущенной ядерной средой вследствие резонанс-нуклонного рассеяния и возможной модификации (масс) каонов и ρ мезона этой средой. Приведены используемые в наших расчетах простые аналитические выражения для парциальных ширин $\Gamma_{\phi \rightarrow K\bar{K}}$, $\Gamma_{\phi \rightarrow \rho\pi}$ основных каналов распада ϕ мезона: $\phi \rightarrow K\bar{K}$ ($\text{BR}(\phi \rightarrow K\bar{K}) \approx 83\%$), $\phi \rightarrow \rho\pi$ ($\text{BR}(\phi \rightarrow \rho\pi) \approx 17\%$) в вакууме и в ядерной материи, для обусловленной его взаимодействием с внутриядерными нуклонами столкновительной ширины, а также для парциальной ширины $\Gamma_{\phi \rightarrow \mu^+\mu^-}$ его распада по каналу $\phi \rightarrow \mu^+\mu^-$. В частности показано, что полная ширина ϕ мезона достигает величины, примерно равной 30 МэВ при нормальной плотности ядерной материи. Это приводит к возможности распада медленного ϕ мезона (имеющего импульс $p_\phi \sim 100$ МэВ/с) уже внутри ядра-мишени.

В разделе 3.2.2 в рамках предложенной модели сформулированы выражения для двойных дифференциальных сечений рождения каонных (мю-

онных) пар от распадов ϕ мезонов, образованных в прямом процессе $pN \rightarrow pN\phi$ и летящих по направлению движения первичного пучка протонов в лабораторной системе, внутри и вне ядра-мишени без учета изменения инвариантной массы K^+K^- ($\mu^+\mu^-$) пары от распада ϕ мезона внутри ядра-мишени при ее движении из ядра в вакуум за счет действия на нее кулоновских и ядерных полей. С их помощью вычислены импульсные распределения ϕ мезонов, образованных в прямом процессе при начальных энергиях 2.4 и 2.7 ГэВ и распадающихся как внутри, так и вне ядра ^{63}Cu , а также распределения K^+K^- ($\mu^+\mu^-$) пар по их инвариантной массе от распадов ϕ мезонов внутри ("внутренняя" компонента) и вне ("внешняя" компонента) ядер-мишеней ^{12}C и ^{63}Cu , суммарные распределения этих пар по их инвариантной массе при энергии налетающих протонов 2.4 ГэВ и в различных сценариях для ширины ϕ мезона и параметра обрезания по его импульсу. В частности показано, что ширина результирующего распределения мюонных пар по их инвариантной массе на ядре ^{12}C лишь незначительно превышает вакуумную ширину ϕ мезона в случае, когда используется учитывающая эффекты среды полная ширина ϕ мезона, а также применено обрезание по его импульсу на уровне 100 МэВ/с. Тогда как на ядре ^{63}Cu это превышение достигает величины порядка 2 и потому является уже наблюдаемым. Для более тяжелых ядер-мишеней оно должно быть даже бóльшим, поскольку отношение димюонной "внутренней" компоненты к соответствующей "внешней" компоненте, как показали наши расчеты, увеличивается с ростом массового числа ядра-мишени. Это дает возможность экспериментального изучения модификации свойств ϕ мезонов уже при обычной ядерной плотности по измерению выходов дилептонов (димюонов или диэлектронов) от распадов медленных ϕ мезонов, образованных при взаимодействии протонов со средними и тяжелыми ядрами. Показано также, что суммарное распределение каонных пар по их инвариантной массе оказалось слабочувствительным к свойствам ϕ мезона в ядерной материи вследствие сильного поглощения рападных антикаонов в этой материи.

Раздел 3.2.3 посвящен оценке величины изменения инвариантной массы K^+K^- пары от распада ϕ мезона внутри ядра-мишени при ее движении из ядра в вакуум за счет действия на нее кулоновских и ядерных каонных потенциалов и влияния учета этого изменения на результирующее распределение каонных пар по их инвариантной массе. Показано, что в этом случае данное распределение уширяется и сдвигается в сторону бóльших инвариантных масс. Отмечается, что измерение такого широкого распределения

с асимметрией при более высоких инвариантных массах дало бы дополнительное свидетельство в пользу гипотезы о модификации свойств каонов и антикаонов в ядерной среде.

Краткий итог выполненных в третьей главе исследований подведен в разделе 3.3.

В четвертой главе изучается фоторождение заряженных каонов на ядрах на основе развитого нами в предыдущих главах диссертации подхода, использующего спектральную функцию нуклонов ядра-мишени.

В первой части этой главы рассматривается инклюзивное подпороговое и околопороговое образование K^+ мезонов в γA -взаимодействиях.

В разделе 4.1.1 кратко обосновывается необходимость экспериментальных и теоретических исследований в данной области ядерной физики.

В разделе 4.1.2 рассматриваются прямые процессы образования K^+ мезонов: $\gamma N \rightarrow K^+ Y$, $Y = \Lambda, \Sigma$. Они имеют наименьшие свободные пороги (соответственно 0.91 и 1.05 ГэВ) и потому дают основной вклад в сечение в области энергий налетающих фотонов $E_\gamma \leq 1.4$ ГэВ. В пренебрежении влиянием ядерной среды на эти процессы, а также взаимодействием первичных фотонов в начальном и вторичных каонов в конечном состояниях сформулировано выражение для инклюзивного сечения рождения K^+ мезонов в γA -столкновениях от рассматриваемых прямых процессов в виде функционала от свободных инклюзивных сечений рождения каонов в данных процессах и спектральной функции внутриядерных нуклонов. Для последних сечений, учитывая двухчастичную кинематику и полученные нами параметризации полных сечений прямых процессов, найдены простые выражения. Приведено используемое в наших расчетах сечений образования K^+ мезонов в γd -взаимодействиях выражение для спектральной функции нуклонов, входящих в состав дейтрона.

Раздел 4.1.3 посвящен обсуждению результатов анализа на основе предложенной модели имеющихся экспериментальных данных по дифференциальному сечению образования каонов в реакции $\gamma + {}^{12}\text{C} \rightarrow K^+ + X$ при различных энергиях налетающих фотонов, а также представлению полученных с ее помощью предсказаний для инклюзивных сечений рождения K^+ мезонов в $\gamma^2\text{H}$ -, $\gamma^{12}\text{C}$ - и $\gamma^{208}\text{Pb}$ -взаимодействиях в подпороговом и околопороговом энергетических режимах. В частности показано, что наша модель позволяет в целом неплохо описать анализируемые в этом разделе данные по дифференциальному сечению образования K^+ мезонов в $\gamma^{12}\text{C}$ -соударениях, хотя и дает энергетическую зависимость, слегка отлич-

ную от экспериментальной, что, по-видимому, связано с пренебрежением в ней возможной модификацией элементарных реакций $\gamma N \rightarrow K^+ Y$ в ядерной среде. Также показано, что выход каонов от этих реакций полностью определяется одночастичной частью $P_0(\mathbf{p}_t, E)$ спектральной функции нуклонов ядра ^{12}C при всех рассматриваемых энергиях первичных фотонов ($0.8 \text{ ГэВ} \leq E_\gamma \leq 1.3 \text{ ГэВ}$), что делает трудным извлечение информации о коррелированной части $P_1(\mathbf{p}_t, E)$ этой функции из анализируемых в нем экспериментальных данных

Во второй части четвертой главы рассматривается образование K^- мезонов в реакции $\gamma d \rightarrow K^- \Theta^+ p \rightarrow K^- K^+ np$ около порога в зависимости от четности Θ^+ пентакварка.

В разделе 4.2.1 детально обсуждается современное состояние проблемы.

В разделе 4.2.2 в рамках модели спектатора найдены выражения для эксклюзивных и инклюзивного угловых распределений K^- мезонов в лабораторной системе, образованных в реакции $\gamma d \rightarrow K^- \Theta^+ p \rightarrow K^- K^+ np$, для двух возможных значений четности Θ^+ бариона, а также как с соответствующим обрезанием тех частей фазового пространства, где вклад от основных источников фона, связанных с рождением $\phi(1020)$, $\Lambda(1520)$ и $K^- p$ -перерасеянием в конечном состоянии, ожидается быть доминирующим, так и без этого обрезания.

В разделе 4.2.3 представлены результаты расчетов по полученным в этой главе выражениям эксклюзивных и инклюзивных угловых распределений K^- мезонов в лабораторной системе при энергиях первичных фотонов 1.5 и 1.75 ГэВ. Продемонстрирована зависимость этих результатов от четности Θ^+ бариона. Показано, что в выбранной кинематике они являются чувствительными к этой четности и поэтому могут быть использованы в качестве фильтра для ее определения.

Краткий итог выполненных в четвертой главе исследований подведен в разделе 4.3.

В Заключение сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен и развит новый метод описания инклюзивного подпорогового и околопорогового рождения заряженных каонов в протон-ядерных соударениях, основанный на рассмотрении соответствующих прямых и двухступенчатых процессов образования K^+ и K^- мезонов и учитывающий модификацию свойств вторичных адронов в ядерной среде, реалистическую спектральную функцию нуклонов ядра-мишени, а также взаимодействие в конечном состоянии между участвующими в прямом процессе образования антикаонов вторичными нуклонами:

— сформулированы выражения для инклюзивных инвариантных сечений образования каонов и антикаонов в протон-ядерных реакциях от этих процессов в виде функционалов от инклюзивных инвариантных сечений их рождения в ядре в данных процессах, плотности и спектральной функции внутриядерных нуклонов;

— в рамках модели релятивистского фазового объема найдены выражения для инклюзивных инвариантных сечений образования K^+ и K^- мезонов в элементарных реакциях с тремя и четырьмя частицами в конечном состоянии с учетом влияния на эти реакции ядерной среды; выражения для аналогичных сечений рождения K^+ мезонов в процессах с двумя частицами в конечном состоянии определены, используя двухчастичную кинематику этих процессов и имеющиеся в литературе параметризации дифференциальных сечений образования каонов в с.ц.м.;

— получены простые аналитические выражения для одночастичной (некоррелированной) и коррелированной (учитывающей нуклон-нуклонные корреляции) частей спектральной функции нуклонов ядра-мишени, использование которых существенно упрощает расчеты сечений образования каонов и антикаонов в протон-ядерных столкновениях.

2. На основании полученных формул составлена программа расчета инклюзивных сечений образования заряженных каонов при взаимодействии протонов с энергиями ≤ 3 ГэВ с ядрами.

3. Проведено детальное сравнение результатов расчетов по этой программе с имеющимися экспериментальными данными по инклюзивным сечениям рождения K^+ мезонов в $p^9\text{Be}$ -, $p^{12}\text{C}$ -столкновениях и K^- мезонов в $p^9\text{Be}$ -, $p^{63}\text{Cu}$ -, $p^{197}\text{Au}$ -соударениях в подпороговом и околопороговом режимах.

4. Показано, что:

а)

— учет влияния ядерной среды на прямые и двухступенчатые процессы образования каонов является существенным как для описания анализируемых данных, так и данных по инклюзивным сечениям рождения заряженных пионов под малыми углами на ядрах ^{12}C протонами с энергиями от 1.05 до 2.1 ГэВ;

— относительная сила прямого и двухступенчатого механизмов образования K^+ мезонов на легких ядрах в подпороговом энергетическом режиме определяется кинематикой анализируемой реакции, а именно: прямой механизм доминирует в образовании высокоэнергетических ("жестких") вторичных каонов, тогда как вклады от прямого и двухступенчатого механизмов в образовании низкоэнергетических ("мягких") каонов являются сравнимыми;

— основной вклад в сечение рождения каонов на ядре от двухступенчатых процессов как в подпороговой, так и в околопороговой областях энергий первичных протонов дает некоррелированная часть нуклонной спектральной функции;

— выход каонов от прямых процессов почти полностью определяется коррелированной частью этой функции только в очень узком диапазоне импульсов каонов (для спектров каонов) или начальных энергий (для энергетических зависимостей), что, с одной стороны, затрудняет извлечение детальной информации о ней из анализируемых данных, а с другой стороны, указывает на необходимость проведения дальнейших измерений инклюзивных сечений подпорогового образования жестких K^+ мезонов на ядрах с целью получения этой информации;

б)

— учет взаимодействия в конечном состоянии между выходящими в прямом процессе образования K^- мезонов нуклонами и влияния на эти нуклоны ядерной среды (эффективного притягивательного нуклон-ядерного потенциала) является существенным для описания анализируемых данных по дифференциальным сечениям рождения быстрых антикаонов в $p^9\text{Be}$ - и $p^{63}\text{Cu}$ -соударениях в подпороговом режиме, полученных на ускорителе в ИТЭФ, тогда как каонный и антикаонный потенциалы играют незначительную роль;

— в отличие от случая образования быстрых K^- мезонов, влияние этих эффектов на выход сравнительно медленных антикаонов, рожденных в $p+^{197}\text{Au}$ взаимодействиях при энергии протонов 2.5 ГэВ, является незначительным, тогда как влияние на него антикаонного потенциала является

доминирующим (особенно при импульсах K^- мезонов в лабораторной системе ≤ 400 МэВ/с);

— основной вклад в сечение подпорогового образования быстрых K^- мезонов на исследуемых ядрах ${}^9\text{Be}$ и ${}^{63}\text{Cu}$ дает, как и в случае рождения жестких K^+ мезонов, прямой механизм, тогда как двухступенчатый процесс с промежуточным пионом играет основную роль в формировании спектра сравнительно мягких антикаонов, рожденных в $p + {}^{197}\text{Au}$ столкновениях при энергии протонов 2.5 ГэВ;

— лучшее описание анализируемых данных по подпороговому образованию K^- мезонов на ядрах достигается в предположении отсутствия модификации каонов ядерной средой.

5. Изучена зависимость подпорогового рождения медленных K^- мезонов в p - ${}^9\text{Be}$ -соударениях от глубины притягивательного антикаон-ядерного потенциала. Показано, что имеется сильная чувствительность выхода K^- мезонов с импульсами в лабораторной системе ≤ 400 МэВ/с к глубине этого потенциала. Это дает возможность экспериментально антикаон-ядерный потенциал (по крайней мере сделать выбор в пользу либо мелкого, либо глубокого антикаонного потенциала) путем измерения дифференциальных сечений подпорогового и околопорогового образования мягких K^- мезонов на различных ядрах-мишенях.

6. Найдены простые аналитические формулы для инклюзивных сечений образования заряженных каонов в pp - и pA -взаимодействиях при высоких энергиях первичных протонов (при кинетической энергии протона в л.с. $\epsilon_0 > 3$ ГэВ). Проведено сравнение расчетов по найденным формулам инклюзивных сечений с экспериментом в широком диапазоне начальных энергий первичных протонов и массовых чисел ядер-мишеней (для pA -взаимодействий). Показано, что эти формулы позволяют удовлетворительно (с ошибкой в пределах двойки) рассчитать инклюзивные сечения образования вторичных каонов и антикаонов под малыми углами в л.с. протонами больших энергий. Поэтому можно считать, что предсказания о сечениях, полученные с их помощью, окажутся достаточно надежными и могут быть использованы как в связи с проектами сооружения сильноточных протонных ускорителей типа каонных фабрик, так и для интерпретации экспериментов по рождению K^+ и K^- мезонов в протон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях при различных энергиях.

7. В качестве примеров подобного предсказания приведены инклюзивные инвариантные сечения образования K^+ и K^- мезонов под нулевым

углом в л.с. протонами различных энергий в pp -, pBe - и pPb -соударениях в зависимости от импульса каона. Показано, что выходы относительно медленных K^+ и K^- мезонов (с импульсом $p_K \sim 0.5\text{--}1$ ГэВ/с) в этих соударениях не сильно зависят от энергии первичного протона при $\epsilon_0 \geq 30$ ГэВ, что свидетельствует в пользу выбора энергии $\epsilon_0 \sim 30\text{--}50$ ГэВ в качестве оптимальной энергии первичного пучка протонов ускорителей типа каонных фабрик.

8. Проведено обобщение развитого метода на случай рождения нестабильных частиц (в частности, ϕ мезонов) в протон-ядерных взаимодействиях в подпороговом режиме с учетом модификации их свойств в ядерной среде. Сформулированы выражения для двойных дифференциальных сечений образования $K^+K^- (\mu^+\mu^-)$ пар от распадов ϕ мезонов, образованных в прямом процессе $pN \rightarrow pN\phi$ и летящих по направлению движения первичного пучка протонов в л.с., внутри и вне ядра-мишени. С их помощью вычислены импульсные распределения ϕ мезонов, образованных в этом процессе при начальных энергиях 2.4 и 2.7 ГэВ и распадающихся как внутри, так и вне ядра ^{63}Cu , а также распределения $K^+K^- (\mu^+\mu^-)$ пар по их инвариантной массе от распадов ϕ мезонов внутри и вне ядер-мишеней ^{12}C и ^{63}Cu , суммарные распределения этих пар по их инвариантной массе при энергии налетающих протонов 2.4 ГэВ и в различных сценариях для ширины ϕ мезона и параметра обрезания по его импульсу.

9. Показано, что:

— медленные ϕ мезоны (с импульсом $p_\phi \leq 100$ МэВ/с) распадаются главным образом внутри ядра ^{63}Cu , тогда как быстрые ϕ мезоны (с импульсом $p_\phi > 100$ МэВ/с) распадаются в основном в вакууме;

— распределение $K^+K^- (\mu^+\mu^-)$ пар по их инвариантной массе, соответствующее распадам ϕ мезонов вне ядра-мишени, характеризуется их вакуумной шириной и потому является довольно узким, тогда как аналогичное распределение от распадов ϕ мезонов внутри ядра-мишени возмущено ядерной средой вследствие резонанс-нуклонного рассеяния и возможной модификации каонов и ρ мезона этой средой и потому является умеренно широким;

— относительная сила "внутреннего" и "внешнего" распределений зависит от используемого сценария для ширины ϕ мезона и параметра обрезания по его импульсу.

10. Исследована зависимость ширины суммарного распределения $K^+K^- (\mu^+\mu^-)$ пар по их инвариантной массе от используемого сценария

для ширины ϕ мезона и параметра обрезания по его импульсу. Продемонстрировано, что ширина результирующего распределения мюонных пар по их инвариантной массе на ядре ^{12}C лишь незначительно превышает вакуумную ширину ϕ мезона в случае, если используется учитывающая эффекты среды полная ширина ϕ мезона и применено обрезание по его импульсу на уровне 100 МэВ/с. Тогда как на ядре ^{63}Cu это превышение достигает величины порядка 2 и поэтому является уже наблюдаемым. Теоретически обосновано, что для более тяжелых ядер-мишеней оно должно быть даже бóльшим. Отмечено, что это дает возможность экспериментально изучить (например, на установке HADES, Германия) модификацию свойств ϕ мезонов уже при обычной ядерной плотности путем измерения выходов дилептонов (димюонов или диэлектронов) от распадов медленных ϕ мезонов, образованных при взаимодействии протонов промежуточных энергий со средними и тяжелыми ядрами.

Продемонстрировано, что результирующее распределение каонных пар по их инвариантной массе оказалось слабочувствительным к свойствам ϕ мезона в ядерной материи вследствие сильного поглощения распадных антикаонов в этой материи. С другой стороны, показано, что в случае учета изменения инвариантной массы K^+K^- пары при ее движении из ядра в вакуум за счет действия на нее главным образом каон-ядерных потенциалов это распределение уширяется и сдвигается в сторону бóльших инвариантных масс. Отмечено, что измерение такой модификации этого распределения дало бы дополнительное доказательство в пользу гипотезы о ренормализации свойств каонов и антикаонов в ядерной среде. На основании полученных результатов сделан вывод, что, даже применяя низкоимпульсное обрезание, невозможно наблюдать изменение свойств ϕ мезонов в ядерной среде через K^+K^- массовые спектры в pA -соударениях. Также отмечено, что развитая в диссертации модель может быть еще использована (после ее очевидной незначительной модификации) при интерпретации результатов планируемого на установке HADES эксперимента по рождению ϕ мезонов в пион-ядерных взаимодействиях.

11. На основе развитого подхода, использующего спектральную функцию нуклонов ядра-мишени, исследовано фоторождение заряженных каонов на ядрах. Вычислены полные и дифференциальные сечения образования K^+ мезонов в прямых процессах ($\gamma N \rightarrow K^+ Y$, $Y = \Lambda, \Sigma$) в реакциях $\gamma + d \rightarrow K^+ + X$, $\gamma + ^{12}\text{C} \rightarrow K^+ + X$ и $\gamma + ^{208}\text{Pb} \rightarrow K^+ + X$ в околопороговом и подпороговом энергетических режимах. Проведено сравнение

результатов расчетов с первыми экспериментальными данными по дифференциальным сечениям рождения K^+ мезонов в $\gamma^{12}\text{C}$ -взаимодействиях в околопороговой и подпороговой областях энергий первичных фотонов, полученными в Институте ядерных исследований Токийского Университета. Показано, что наш расчет в целом неплохо описывает эти данные, хотя и дает энергетическую зависимость, слегка отличную от экспериментальной, что, по-видимому, связано с пренебрежением в нем возможной модификацией элементарных реакций $\gamma N \rightarrow K^+ Y$ в ядерной среде. Исследована роль высокоимпульсной компоненты нуклонной спектральной функции в подпороговом фоторождении каонов на ядрах. Показано, что в случае $\gamma + d \rightarrow K^+ + X$ реакции вычисленные сечения образования K^+ мезонов полностью определяются низкоимпульсной частью ($p_t < 0.5$ ГэВ/с) распределения импульсов нуклона в дейтроне. Тогда как в случае $\gamma + ^{12}\text{C} \rightarrow K^+ + X$ и $\gamma + ^{208}\text{Pb} \rightarrow K^+ + X$ реакций полученные сечения почти полностью определяются коррелированной частью нуклонной спектральной функции только при начальных энергиях, лежащих вблизи абсолютных порогов рождения каонов на ядрах ^{12}C и ^{208}Pb , что затрудняет, как и в случае образования каонов в протон-ядерных реакциях, извлечение детальной информации об этой части из измерений полных и дифференциальных сечений рождения K^+ мезонов в фотоядерных реакциях при подпороговых энергиях налетающих фотонов.

12. В рамках модели спектатора изучена возможность определения четности Θ^+ пентакварка в реакции $\gamma d \rightarrow K^- \Theta^+ p \rightarrow K^- K^+ np$ в пороговой области энергий. Представлены предсказания для эксклюзивных и инклюзивных угловых распределений K^- мезонов в лабораторной системе, образованных в этой реакции, вычисленные для двух возможных значений четности Θ^+ резонанса при энергиях первичных фотонов 1.5 и 1.75 ГэВ как с соответствующим обрезанием тех частей фазового пространства, где вклад от основных источников фона, связанных с рождением $\phi(1020)$, $\Lambda(1520)$ и $K^- p$ -перерасеянием в конечном состоянии, ожидается быть доминирующим, так и без этого обрезания. Показано, что в выбранной кинематике эти распределения являются чувствительными к четности Θ^+ бариона и поэтому могут быть использованы в качестве фильтра для определения его четности.

13. Установлено, что развитый в диссертации подход также является эффективным инструментом для изучения подпорогового и околопорогового рождения как других частиц (ω , η , \bar{p}) в протон-ядерных взаимодей-

ствиях, так и заряженных каонов в пион-ядерных столкновениях.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. С. В. Ефремов, М. В. Казарновский, и Э. Я. Парьев. Рождение K^+ мезонов в pp - и pA -взаимодействиях при различных энергиях. ЯФ **55**, вып. 2, 521–534 (1992).
2. S. V. Efremov, M. V. Kazarnovsky, and E. Ya. Paryev. Production of K^+ mesons in the pp and pA interactions at different energies. Z. Phys. A **344**, 181–190 (1992).
3. Б. В. Криппа и Э. Я. Парьев. Инклюзивное рождение η и ω мезонов в протон-ядерных реакциях. ЯФ **56**, вып. 5, 172–180 (1993).
4. Ye. S. Golubeva, A. S. Iljinov, E. Ya. Paryev, and I. A. Pshenichnov. Subthreshold η production on nuclei by protons. Z. Phys. A **345**, 223–226 (1993).
5. С. В. Ефремов и Э. Я. Парьев. Образование K^- мезонов в протон-протонных и протон-ядерных взаимодействиях при различных энергиях. ЯФ, т.**57**, н.3, 563–573 (1994).
6. S. V. Efremov and E. Ya. Paryev. Production of K^- mesons in proton-proton and proton-nucleus interactions at various energies. Z. Phys. A **348**, 217–225 (1994).
7. A. S. Iljinov, M. V. Kazarnovsky, and E. Ya. Paryev. Intermediate Energy Nuclear Physics. CRC Press Inc. Boca Raton (1994).
8. E. Ya. Paryev. Subthreshold K^- production in proton-nucleus reactions. Proc. of the Int. Conf. on "Physics with GeV-Particle Beams" (22–25 August 1994, Julich, Germany). Edited by H. Machner and K. Sistemich. World Scientific, Singapore, p.483–488 (1995).
9. S. V. Efremov and E. Ya. Paryev. Subthreshold K^- production in pion-nucleus reactions. Z. Phys. A **351**, 447–452 (1995).
10. С. В. Ефремов и Э. Я. Парьев. Подпороговое рождение K^- мезонов в пион-ядерных реакциях. ЯФ, т.**58**, н.10, 1796–1802 (1995).

11. S. V. Efremov and E. Ya. Paryev. Subthreshold K^+ production on nuclei by π^+ mesons. *Few-Body Systems Suppl.* **9**, 285–292 (1995).
12. S. V. Efremov and E. Ya. Paryev. Subthreshold K^+ production on nuclei by π^+ mesons. *Z. Phys. A* **354**, 219–228 (1996).
13. С. В. Ефремов и Э. Я. Парьев. Подпороговое рождение K^+ мезонов в π^+ - A -взаимодействиях. *ЯФ*, т.**59**, н.12, 2143–2153 (1996).
14. S. V. Efremov and E. Ya. Paryev. Subthreshold K^+ meson production in proton-nucleus reactions and nucleon spectral function. *Proc. of the 25th INS Int. Symp. on "Nuclear and Particle Physics with High-Intensity Proton Accelerators"*. Edited by T. K. Komatsubara, T. Shibata and T. Nomura. World Scientific, Singapore, p.405–406 (1998).
15. S. V. Efremov and E. Ya. Paryev. Subthreshold K^+ meson production in proton-nucleus reactions and nucleon spectral function. *Nucl. Phys. A* **639**, 181c–184c (1998).
16. S. V. Efremov and E. Ya. Paryev. Subthreshold K^+ meson production in proton-nucleus reactions and nucleon spectral function. *Yad. Fiz.* **61**, no. 4, 612–629 (1998).
17. S. V. Efremov and E. Ya. Paryev. Subthreshold K^+ meson production in proton-nucleus reactions and nucleon spectral function. *Eur. Phys. J. A* **1**, 99–114 (1998).
18. E. Ya. Paryev. Subthreshold and near threshold K^+ meson production on light nuclei by protons. *Eur. Phys. J. A* **5**, 307–319 (1999).
19. A. V. Akindinov, M. M. Chumakov, Yu. T. Kiselev, A. N. Martemyanov, K. R. Mikhailov, E. Ya. Paryev, Yu. V. Terekhov, and V. A. Sheinkman. Experimental study of subthreshold K^- production in proton-nucleus collisions and the calculation of this production in frame of the modern models. Preprint ITEP, Moscow, no.**41–99**, (1999).
20. E. Ya. Paryev. Antikaon production and medium effects in proton-nucleus reactions at subthreshold beam energies. *Eur. Phys. J. A* **9**, 521–536 (2000).
21. E. Ya. Paryev. Antikaon production and medium effects in proton-nucleus reactions at subthreshold beam energies. *Proc. of the 7th Conf. CIPANP 2000 on "Intersections of Particle and Nuclear Physics"*. Editors: Z. Parsa

- and W. J. Marciano. AIP Conf. Proc., Melville, New York, vol. **549**, p. 425–429 (2000).
22. F. F. Guber, E. Ya. Paryev, and A. I. Reshetin. Kaon and antikaon production in nucleus-nucleus and hadron-nucleus reactions in the threshold energy region. Preprint INR-1051/2000, Moscow, (2000).
 23. E. Ya. Paryev. Subthreshold and near threshold K^+ meson photoproduction on nuclei. Eur. Phys. J. A **7**, 127–137 (2000).
 24. E. Ya. Paryev. Subthreshold and near threshold K^+ meson photoproduction on nuclei. Yad. Fiz. **63**, 1870–1880 (2000).
 25. E. Ya. Paryev. Subthreshold and near threshold K^+ meson photoproduction on nuclei. Proc. of the Second KEK–Tanashi Int. Symp. on "Hadron and Nuclear Physics with Electromagnetic Probes". Editors: K. Maruyama and H. Okuno. ELSEVIER, p.107–111 (2000).
 26. E. Ya. Paryev. Subthreshold and near threshold K^+ meson production on light nuclei by protons. Yad. Fiz. **63**, no. 2, 348–364 (2000).
 27. E. Ya. Paryev. Subthreshold and near threshold K^+ meson production on light nuclei by protons. Proc. of the APCTP Workshop (SNP'99) on "Strangeness Nuclear Physics". Edited by Il-T. Cheon, S.-W. Hong and T. Motoba. World Scientific, Singapore, p.364–371 (2000).
 28. E. Ya. Paryev. Subthreshold and near threshold K^+ meson production on light nuclei by protons. Proc. of the 2nd ANKE Workshop on "Strangeness Production in pp and pA Interactions at ANKE". Edited by M. Büscher, V. Kleber, P. Kulessa and M. Nekipelov. Fz. Jülich, Institut für Kernphysik, p.133–150 (2001).
 29. E. Ya. Paryev. Antikaon production and medium effects in proton-nucleus reactions at subthreshold beam energies. Yad. Fiz. **64**, 2016–2032 (2001).
 30. E. Ya. Paryev. Antikaon production and medium effects in proton-nucleus reactions at subthreshold beam energies. The Fourth Int. Conf. on "Modern Problems of Nuclear Physics". Tashkent, 25–29 September 2001. Book of Abstracts, p. 61 (2001).
 31. E. Ya. Paryev. Subthreshold K^- meson production in proton-nucleus reactions revisited. Yad. Fiz. **65**, 1929–1938 (2002).

32. E. Ya. Paryev. Subthreshold K^- meson production in proton-nucleus reactions revisited. *Eur. Phys. J. A* **17**, 145–152 (2003).
33. E. Ya. Paryev. Subthreshold ϕ meson production and medium effects in proton-nucleus reactions. Preprint INR-1119/2004, Moscow (2004).
34. E. Ya. Paryev. Subthreshold ϕ meson production and medium effects in proton-nucleus reactions. *Eur. Phys. J. A* **23**, 453–471 (2005).
35. E. Ya. Paryev. Subthreshold ϕ meson production and medium effects in proton-nucleus reactions. *Yad. Fiz.* **69**, 354–377 (2006).
36. E. Ya. Paryev. Antikaon angular distributions in the reaction $\gamma d \rightarrow K^- \Theta^+ p \rightarrow K^- K^+ np$ near the threshold and the parity of the Θ^+ pentaquark. Preprint INR-1151/2005, Moscow (2005); nucl-th/0602015.
37. E. Ya. Paryev. Antikaon angular distributions in the reaction $\gamma d \rightarrow K^- \Theta^+ p \rightarrow K^- K^+ np$ near the threshold and the parity of the Θ^+ pentaquark. *Yad. Fiz.* **69**, 747–759 (2006).
38. Yu. T. Kiselev and E. Ya. Paryev. Antiproton absorption in nuclei. Nucl-th/0601036.