

На правах рукописи



Сальников Сергей Георгиевич

# ПРИПороГОВЫЕ РЕЗОНАНСЫ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1.3.3. Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

**НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ** – доктор физико-математических наук, профессор Мильштейн Александр Ильич

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

**АУШЕВ Тагир Абдул-Хамидович** – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединённый институт ядерных исследований, главный научный сотрудник;

**ДРУЦКОЙ Алексей Георгиевич** – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник;

**ШЕСТАКОВ Георгий Николаевич** – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник;

**ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Защита диссертации состоится «16» июня 2026 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-03>.

Автореферат разослан «15» апреля 2026 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН, профессор



Фадин Виктор  
Сергеевич

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы исследования

Изучение свойств фундаментальных взаимодействий между элементарными частицами является важнейшей задачей современной физики. В частности, большой интерес представляет экспериментальное изучение деталей сильного взаимодействия между адронами на расстояниях  $\sim 1$  фм. Одной из причин такого интереса является то, что точные аналитические расчёты эффектов сильного взаимодействия при низких энергиях (менее 1 ГэВ) на сегодняшний день вызывают технические трудности из-за непертурбативного характера квантовой хромодинамики. Поэтому в большинстве случаев описание взаимодействия между адронами основано на различных феноменологических подходах. Для построения феноменологических моделей необходимо привлекать полученную из экспериментов информацию о сильном взаимодействии. Чем больше различных экспериментальных данных используется при создании модели, тем больше будет её предсказательная сила, что, в свою очередь, может быть полезно при планировании новых прецизионных экспериментов. В дальнейшем, говоря о низких энергиях, мы, как правило, будем подразумевать именно область кинетических энергий рождённых частиц менее 1 ГэВ.

Различные проявления сильного взаимодействия между адронами изучаются в самых разных процессах. К примеру, хорошо изучены процессы рассеяния нуклонов (протонов и нейтронов) друг на друге, а также пион-нуклонное рассеяние. Известно, что при низких энергиях кварковая структура адронов не играет определяющей роли, и процессы их взаимодействия можно описывать на языке мезонов и барионов (см. [1]).

В последнее время большое внимание стало уделяться изучению и других процессов, в которых в конечном состоянии рождается пара барион-антибарион или мезон-антимезон. С одной стороны, появилось много экспериментальных данных для сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ ,  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ ,  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ ,  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$  и других. Выяснилось, что зависимость сечений таких процессов от энергии вблизи порогов реакций зачастую имеет весьма нетривиальный характер. С другой стороны, теоретиками были предложены различные идеи, объясняющие наблюдаемые эффекты. Доминирующей идеей является важность учёта взаимодействия между адронами в конечном состоянии. Именно взаимодействие в конечном состоянии позволяет объяснить как резкий рост сечений на пороге реакций, так и наличие резонансных пиков или провалов в зависимости сечений от энергии.

В диссертации развивается подход к описанию взаимодействия между адронами в конечном состоянии. Обсуждается как общая идея метода, так и его применение ко многим конкретным процессам.

## Степень разработанности темы исследования

Безусловно, самым изученным из адронов является протон. Структура и свойства протона исследовались, в частности, в процессе рассеяния электронов на протонах. Используя формулу Розенблюта [2], из измерений дифференциального сечения рассеяния электронов на протонах удалось извлечь электромагнитные формфакторы протона. Зная зависимость формфакторов от величины переданного при рассеянии импульса, можно, в свою очередь, определить характерный радиус протона. Такой способ измерения радиуса протона является одним из основных и сегодня.

Кроме того, проводились многочисленные эксперименты по протон-протонному и протон-нейтронному рассеянию при различных энергиях и переданных импульсах. Для теоретического описания полученных при низких энергиях данных были предложены различные потенциальные модели нуклон-нуклонного взаимодействия. В их число входят, например, неймегенский потенциал [3], парижский потенциал [4], боннский потенциал [5], потенциал, основанный на киральной кварковой модели [6]. Все подобные модели являются феноменологическими. При этом параметры модельных потенциалов подбираются так, чтобы наилучшим образом описывать имеющиеся экспериментальные данные для полных и дифференциальных сечений рассеяния. Затем, с использованием данных моделей можно вычислять другие величины, которые сложно наблюдать в экспериментах напрямую, такие как фазы рассеяния или зависящие от спинов вклады в сечения рассеяния.

С появлением экспериментальных данных по протон-антипротонному рассеянию стали развиваться модели нуклон-антинуклонного взаимодействия. Дополнительная сложность, по сравнению с нуклон-нуклонным рассеянием, состоит в том, что в таких процессах возможна аннигиляция исходных частиц в многочисленные мезонные состояния. При этом сечение аннигиляции сравнимо с сечением упругого рассеяния из-за большого числа доступных аннигиляционных каналов. Для феноменологического описания аннигиляции зачастую используют так называемые оптические потенциалы, содержащие мнимую часть. Вещественную часть нуклон-антинуклонных потенциалов можно получить, применив преобразование  $G$ -сопряжения к известному нуклон-нуклонному потенциалу. Однако мнимая часть оптического потенциала может быть определена только из сравнения с экспериментальными данными по нуклон-антинуклонному рассеянию. Подобным образом были построены парижский [7], неймегенский [8], юлихский [9] нуклон-антинуклонные потенциалы. Развиваются также модели нуклон-антинуклонного взаимодействия в рамках киральной эффективной теории поля [10; 11] и другие.

Все упомянутые выше модели дают лишь феноменологическое описание имеющихся экспериментальных данных. При этом потенциалы нук-

лон-антинуклонного взаимодействия в рамках разных подходов имеют совершенно различную параметризацию. Параметры моделей выбираются так, чтобы наилучшим образом описать имеющиеся экспериментальные данные, включающие, как правило, полное и дифференциальное сечения упругого рассеяния, сечение процесса перезарядки  $p\bar{p} \rightarrow n\bar{n}$ , сечение аннигиляции в мезоны и некоторые другие данные. Затем с использованием полученных моделей вычисляются другие характеристики нуклон-антинуклонного взаимодействия, которые затруднительно напрямую измерить в эксперименте. По этой причине разные модели зачастую одинаково хорошо описывают те свойства взаимодействия, которые измеряются экспериментально, однако, дают существенно разные предсказания для тех характеристик, которые в экспериментах ещё не измерялись. К примеру, все нуклон-антинуклонные потенциалы хорошо воспроизводят вклады в сечения нуклон-антинуклонного рассеяния, не зависящие от спинов частиц. Однако предсказания для зависящих от спинов вкладов в сечения нуклон-антинуклонного рассеяния, полученные в рамках разных моделей, значительно отличаются друг от друга.

Влияние нуклон-антинуклонного взаимодействия проявляется не только в рассеянии, но и в процессах с рождением нуклон-антинуклонной пары из других начальных состояний. К примеру, была обнаружена резкая зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  [12–17] и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  [18–20] вблизи порогов этих реакций. Самое естественное объяснение этого эффекта — нуклон-антинуклонное взаимодействие в конечном состоянии. Резонансная форма зависимости вероятности процесса от инвариантной массы пары  $p\bar{p}$ , связанная с их взаимодействием, также наблюдается в некоторых распадах  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -мезонов [21–29]. Подобные процессы представляют собой ещё один источник информации о свойствах нуклон-антинуклонного взаимодействия. Если в процессе рассеяния нуклона на антинуклоне измеряется нуклонный формфактор в пространственноподобной области передач импульса, то в процессах с рождением нуклон-антинуклонных пар можно измерять формфакторы во времениподобной области. Кроме того, взаимодействие в конечном состоянии зависит от волновой функции системы на малых расстояниях, в то время как свойства рассеяния определяются поведением волновой функции системы на больших расстояниях.

С развитием экспериментальных возможностей выяснилось, что эффекты взаимодействия в конечном состоянии наблюдаются и в процессах с рождением пар других частиц. Речь идёт как о парах барион-антибарион ( $\Lambda\bar{\Lambda}$ ,  $\Lambda_c\bar{\Lambda}_c$  и других [30–35]), так и о парах мезон-антимезон ( $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ ,  $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$  и других [36–48]). Оказалось, что в таких процессах также наблюдается нетривиальная зависимость сечений от энергии вблизи порогов реакций, причём зачастую эта зависимость имеет резонансный харак-

тер. При этом форма наблюдаемых резонансных пиков не описывается формулами Брейта-Вигнера. Однако для объяснения результатов экспериментов не обязательно предполагать существование новых резонансов. Взаимодействие адронов в конечном состоянии само по себе может приводить к нетривиальной зависимости сечений от энергии, что объясняет множество эффектов, наблюдаемых в экспериментах.

Ещё одним интересным эффектом является резкая зависимость от энергии сечений рождения лёгких мезонов вблизи порога рождения пары адронов. К примеру, в экспериментах было обнаружено быстрое падение сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ ,  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  и некоторых других вблизи порога рождения нуклон-антинуклонных пар [14; 49–53]. Такие эффекты объясняются рождением вблизи порога виртуальной нуклон-антинуклонной пары с последующей аннигиляцией в мезоны. Взаимодействие нуклона с антинуклоном в промежуточном состоянии приводит к сильной зависимости сечений таких процессов от энергии.

Таким образом, целый ряд припороговых резонансных явлений, наблюдаемых на эксперименте, оказывается связан со взаимодействием адронов в промежуточном или конечном состоянии. Поэтому и теоретическое, и экспериментальное изучение процессов, в которых проявляются припороговые резонансы, представляет огромный интерес.

Общие закономерности, которым должны подчиняться сечения реакций вблизи порога, были выяснены ещё в работах [54–58]. Благодаря наличию малого числа важных параметров, необходимых для описания припороговых резонансов, можно использовать различные феноменологические модели. Разными группами развиваются разные подходы к описанию взаимодействия в конечном состоянии. Одни авторы используют потенциалы взаимодействия в импульсном представлении и находят амплитуды процессов, решая уравнение Липпмана-Швингера (см., например, [10; 59–61]). Другие авторы параметризуют  $K$ -матрицу рассеяния [41; 62] или используют разложение эффективного радиуса для амплитуды [63] и определяют значения параметров из сравнения результатов вычислений с экспериментальными данными. В некоторых работах резонансные вклады в амплитуду процесса вблизи порога описываются суммой функций Брейта-Вигнера (см., например, [64–66]).

Предложенный в диссертации подход заключается в параметризации потенциала взаимодействия между адронами в координатном представлении и нахождении соответствующей волновой функции пары адронов путём решения уравнения Шрёдингера. Преимуществом такого подхода является то, что он позволяет наглядно интерпретировать полученные потенциалы взаимодействия, рассматривать многоканальные задачи, а также легко учитывать такие эффекты как вклад кулоновского потенциала, нарушение изотопической инвариантности и другие.

Целями диссертационной работы являются:

1. Развитие подхода к описанию взаимодействия между адронами в конечном и промежуточном состояниях в области низких энергий.
2. Описание зависимости от энергии сечений рождения пар  $p\bar{p}$ ,  $n\bar{n}$ ,  $\Lambda\bar{\Lambda}$ ,  $\Lambda_c\bar{\Lambda}_c$  в электрон-позитронной аннигиляции вблизи порогов.
3. Описание зависимости от энергии сечений рождения состояний  $3(\pi^+\pi^-)$ ,  $2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  и  $K^+K^-\pi^+\pi^-$  в электрон-позитронной аннигиляции вблизи порога рождения нуклон-антинуклонных пар.
4. Описание распределений по инвариантной массе пары  $p\bar{p}$  в распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta, \omega)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta)$  вблизи порога рождения  $p\bar{p}$ .
5. Описание зависимости от энергии сечений рождения пар  $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$  и  $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$  в электрон-позитронной аннигиляции вблизи порогов.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Разработка способа вычисления амплитуд процессов с учётом взаимодействия в конечном состоянии.
2. Получение формулы для вычисления сечений рождения пар адронов в электрон-позитронной аннигиляции в случае одного и нескольких каналов реакции с учётом взаимодействия в конечном состоянии.
3. Получение формулы для вычисления сечений рождения пар адронов с учётом тензорных сил, действующих между ними.
4. Построение моделей взаимодействия между  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$ , а также  $\Lambda_c$  и  $\bar{\Lambda}_c$ , объясняющих зависимости от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  и  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$  вблизи порогов.
5. Построение модели нуклон-антинуклонного взаимодействия, объясняющей зависимости от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  вблизи порогов, а также зависимости от энергии электромагнитных формфакторов протона и нейтрона во времениподобной области.
6. Описание зависимости от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ ,  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$  вблизи порога рождения нуклон-антинуклонных пар с использованием предложенной модели нуклон-антинуклонного взаимодействия.
7. Описание распределений по инвариантной массе  $p\bar{p}$  в распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta, \omega)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta)$  с учётом нуклон-антинуклонного взаимодействия в конечном состоянии.
8. Разработка модели взаимодействия между  $D^{(*)}$  и  $\bar{D}^{(*)}$  мезонами, объясняющей зависимости от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$ ,  $e^+e^- \rightarrow D^*\bar{D}$  и  $e^+e^- \rightarrow D^*\bar{D}^*$  вблизи порогов.
9. Построение модели взаимодействия между  $B^{(*)}$  и  $\bar{B}^{(*)}$  мезонами,

объясняющей зависимости от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$ ,  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}$  и  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*$  вблизи порогов.

## Научная новизна

1. Впервые предложен последовательный подход к вычислению эффектов взаимодействия в конечном состоянии в процессах с рождением пары адронов. Подход основан на решении уравнения Шрёдингера в координатном представлении.
2. Впервые проведён правильный учёт поправки к сечению рождения пары адронов за счёт кулоновского взаимодействия между заряженными адронами на фоне сильного взаимодействия.
3. Впервые предложен способ учёта влияния взаимодействия между виртуальными адронами в промежуточном состоянии вблизи порога рождения пары реальных адронов на сечения процессов с рождением других частиц.
4. Впервые получена простая аналитическая формула, хорошо описывающая зависимость от энергии сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  с учётом взаимодействия в конечном состоянии.
5. Впервые предложена модель взаимодействия между  $\Lambda_c$  и  $\bar{\Lambda}_c$ , описывающая экспериментальные данные детектора BESIII для сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$  и отношения  $|G_E/G_M|$  для  $\Lambda_c$ -бариона.
6. Впервые предложена модель нуклон-antinуклонного взаимодействия в конечном состоянии, учитывающая разницу масс протона и нейтрона, а также кулоновское взаимодействие между протоном и антипротоном, хорошо воспроизводящая зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  вблизи порогов, а также отношений электромагнитных формфакторов для протона и для нейтрона во времениподобной области.
7. Впервые удалось описать резкое падение сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ ,  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$  вблизи порога рождения нуклон-antinуклонных пар влиянием взаимодействия между виртуальными нуклоном и антинуклоном в промежуточном состоянии.
8. Впервые предсказаны угловые распределения в распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$  с учётом нуклон-antinуклонного взаимодействия в конечном состоянии.
9. Впервые объяснена нетривиальная зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$ ,  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}$  и  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*$  вблизи порогов, связанная со взаимодействием  $B^{(*)}$ -мезонов в конечном состоянии и переходами между разными каналами.
10. Впервые изучено взаимодействие  $D^{(*)}$ -мезонов в каналах  $D^0\bar{D}^0$ ,  $D^+D^-$ ,  $D^{*0}\bar{D}^0$ ,  $D^{*+}D^-$ ,  $D^{*0}\bar{D}^{*0}$  и  $D^{*+}D^{*-}$ , и дано объяснение

нетривиальной зависимости от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$ ,  $e^+e^- \rightarrow D^*\bar{D}$  и  $e^+e^- \rightarrow D^*\bar{D}^*$  вблизи порогов.

## Теоретическая и практическая значимость

В диссертационной работе на многих примерах показана важность учёта взаимодействия в конечном состоянии при описании сечений процессов с рождением пары адронов вблизи порога. Развита метод расчёта эффектов взаимодействия в конечном состоянии, основанный на решении уравнения Шрёдингера в координатном представлении. Такой подход представляется не только наиболее наглядным по сравнению с другими подходами, но и удобен при рассмотрении сложных многоканальных задач. Проведённые аналитические и численные расчёты показали, что во всех изученных экспериментально процессах взаимодействие между адронами в конечном состоянии объясняет резкую припороговую зависимость сечений от энергии. Речь идёт, например, о таких процессах как  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ ,  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ ,  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ ,  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$ ,  $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$  и  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ . При этом зависимость сечений таких процессов от энергии вблизи порогов определяется небольшим числом параметров, а конкретные детали взаимодействия не играют определяющей роли. В работе также предложен способ учёта влияния взаимодействия между виртуальными адронами в промежуточном состоянии на сечения процессов с рождением лёгких мезонов. Разработанные в работе идеи могут быть использованы в дальнейшем при описании многих других процессов в физике элементарных частиц.

Представленные в работе результаты показывают, что исследование зависимости от энергии сечений процессов с рождением пар адронов вблизи порога может дать уникальную информацию о взаимодействии между адронами. Проведённые расчёты могут послужить стимулом для последующего теоретического и экспериментального изучения наиболее интересных диапазонов энергии и обнаружения нетривиального поведения сечений различных процессов.

## Методология и методы исследования

В работе использовались аналитические и численные методы решения уравнения Шрёдингера, а также систем уравнений Шрёдингера для нескольких каналов. Для подбора оптимальных параметров потенциалов взаимодействия между адронами использовались различные процедуры оптимизации. В том числе, мной были разработаны специальные программы, предназначенные для численного решения различных задач, рассматриваемых в данной диссертации. Для проверки результатов вычислений большинство расчётов повторялись с использованием разных языков программирования.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Учёт взаимодействия в конечном состоянии является критически важным при описании сечений процессов с рождением пары медленных адронов вблизи порога.
2. Зависимость сечений процессов от энергии, связанная со взаимодействием в конечном состоянии определяется небольшим числом параметров, таких как энергии мелких и виртуальных уровней.
3. Взаимодействие между  $\Lambda_{(c)}$  и  $\bar{\Lambda}_{(c)}$  в конечном состоянии объясняет сильную зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  и  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$  вблизи порогов.
4. Нуклон-антинуклонное взаимодействие в конечном состоянии объясняет нетривиальную зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  вблизи порогов, а также зависимость от энергии отношений электромагнитных формфакторов для протона и для нейтрона во времениподобной области.
5. Взаимодействие виртуальных нуклона и антинуклона в промежуточном состоянии объясняет резкое падение сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ ,  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$  вблизи порога рождения реальных нуклон-антинуклонных пар.
6. Нуклон-антинуклонное взаимодействие в конечном состоянии объясняет сильную зависимость от инвариантной массы  $p\bar{p}$  вероятностей распадов  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta, \omega)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta)$  вблизи порога рождения  $p\bar{p}$ .
7. Взаимодействие между  $B^{(*)}$  и  $\bar{B}^{(*)}$  мезонами с учётом переходов между каналами  $B\bar{B}$ ,  $B^*\bar{B}$  и  $B^*\bar{B}^*$  объясняет нетривиальную зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$ ,  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}$  и  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*$  вблизи порогов. Учёт этого взаимодействия необходим при измерении разницы масс заряженных и нейтральных  $B^{(*)}$ -мезонов.
8. Взаимодействие между  $D^{(*)}$  и  $\bar{D}^{(*)}$  мезонами с учётом переходов между каналами  $D^0\bar{D}^0$ ,  $D^+D^-$ ,  $D^{*0}\bar{D}^0$ ,  $D^{*+}D^-$ ,  $D^{*0}\bar{D}^{*0}$  и  $D^{*+}D^{*-}$  объясняет нетривиальную зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^0$ ,  $e^+e^- \rightarrow D^+D^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow D^{*0}\bar{D}^0$ ,  $e^+e^- \rightarrow D^{*+}D^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow D^{*0}\bar{D}^{*0}$  и  $e^+e^- \rightarrow D^{*+}D^{*-}$  вблизи порогов.

## Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность работы подтверждается хорошим согласием теоретических предсказаний с результатами экспериментов. Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, опубликованы в ведущих международных журналах и докладывались на 5 ведущих научных конференциях:

1. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН

- РАН, посвящённая 60-летию ОИЯИ, Россия, Дубна, 2016;
2. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, посвящённая 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, Россия, Нальчик, 2017;
  3. International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2017), Австрия, Вена, 2017;
  4. The 2024 International Workshop on Future Tau Charm Facilities (FTCF2024), Китай, Хэфэй, 2024;
  5. Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, посвящённая 70-летию В.А. Рубакова, Россия, Москва, 2025.

**Личный вклад автора** в получении результатов, выносимых на защиту, является определяющим. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим. Список публикаций в журналах, рекомендованных ВАК, приведённый в конце автореферата, содержит 14 работ. Авторский вклад соискателя заключается:

в статьях 1, 2, 5 и 9 — в построении моделей нуклон-антинуклонного взаимодействия, описывающих экспериментальные данные для сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ ,  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ ,  $e^+e^- \rightarrow 6\pi$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ ;

в статье 3, 4 и 13 — в вычислении распределений по углам вылета частиц и по инвариантной массе  $p\bar{p}$  в распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta, \gamma, \omega)$ ,  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta, \gamma)$ ,  $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$  и  $J/\psi \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)\gamma$ ;

в статье 6, 8 и 12 — в построении модели взаимодействия между  $B^{(*)}$  и  $\bar{B}^{(*)}$  мезонами с учётом переходов между разными каналами, описывающей сечения процессов  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$ ,  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}$  и  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*$  вблизи порогов;

в статьях 7 и 11 — в построении модели взаимодействия между  $\Lambda_c$  и  $\bar{\Lambda}_c$ , описывающей сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$ ;

в статье 10 — в получении аналитической формулы для сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  с учётом взаимодействия в конечном состоянии и подборе параметров потенциала взаимодействия между  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$ ;

в статье 14 — в построении модели взаимодействия между  $D^{(*)}$  и  $\bar{D}^{(*)}$  мезонами с учётом переходов между разными каналами и описании сечений рождения  $D^+D^-$ ,  $D^0\bar{D}^0$ ,  $D^*+D^-$ ,  $D^{*0}\bar{D}^0$ ,  $D^{*+}D^{*-}$  и  $D^{*0}\bar{D}^{*0}$  в  $e^+e^-$  аннигиляции вблизи порогов.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации 163 страницы, включая 31 рисунок и 6 таблиц. Библиография включает 192 наименования на 26 страницах.

## Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, поставлена цель и сформулированы задачи, аргументирована научная новизна исследований, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** рассмотрена картина рождения пары адронов с суммарной кинетической энергией  $E$  в  $e^+e^-$  аннигиляции. В случае, когда кинетическая энергия адронов мала по сравнению с их массой  $M$ , описание реакции существенно упрощается. Сперва на малых расстояниях  $r \sim 1/\sqrt{s}$ , где  $s = (2M + E)^2$ , из виртуального фотона рождаются кварк и антикварк, разлетающиеся в разные стороны. По мере удаления кварка и антикварка друг от друга сильное взаимодействие между ними возрастает. На расстояниях  $r \sim 1/\Lambda_{\text{КХД}}$  цветные поля становятся настолько сильными, что из вакуума начинают рождаться новые кварк-антикварковые пары и глюоны. При объединении кварков и антикварков друг с другом формируются бесцветные адроны, которые затем разлетаются на большие расстояния. Взаимодействие между адронами при этом продолжается и на больших расстояниях  $r \gtrsim 1/\Lambda_{\text{КХД}}$ , что сказывается на вероятности рождения такой адронной системы.

Благодаря разделению масштабов ( $1/\sqrt{s} \ll 1/\Lambda_{\text{КХД}}$ ) описание процессов рождения пары адронов вблизи порога в  $e^+e^-$  аннигиляции существенно упрощается. Амплитуда рождения кварков на малых расстояниях сводится к некоторому множителю, слабо зависящему от энергии адронов, в то время как сильная зависимость от энергии сечения рождения пары адронов вблизи порога определяется в первую очередь взаимодействием адронов на расстояниях  $r \gtrsim 1/\Lambda_{\text{КХД}}$ . На таких расстояниях пара нерелятивистских адронов может быть описана с помощью некоторой волновой функции. Эта волновая функция может быть получена как решение уравнения Шрёдингера в потенциале, описывающем взаимодействие адронов между собой. Явный вид уравнения зависит от рассматриваемой системы адронов, так как он определяется квантовыми числами системы, количеством возможных конечных состояний, тем, какие силы действуют между адронами и т.д.

В рамках развиваемого подхода к описанию взаимодействия между адронами в конечном состоянии нужно найти регулярное в нуле решение радиального уравнения Шрёдингера, имеющее определённую асимптотику при  $r \rightarrow \infty$ . Тогда коэффициент усиления сечения рождения пары адронов в состоянии с относительным орбитальным моментом  $L$  пропорционален квадрату  $L$ -той производной в нуле этого решения. В диссертации рассмотрено несколько разных потенциалов взаимодействия между адронами и показано, каковы в этих случаях зависимости от энергии

сечений рождения пары вблизи порога. Продемонстрировано, что характерные особенности поведения этих сечений вблизи порога определяются небольшим числом параметров и не чувствительны к деталям взаимодействия. Также рассмотрено рождение пар адронов при наличии нескольких доступных конечных состояний с близкими пороговыми энергиями, и получены соответствующие формулы для сечений процессов.

Взаимодействие между адронами может влиять и на сечения процессов с рождением других частиц. Так в  $e^+e^-$  аннигиляции может родиться пара виртуальных адронов в промежуточном состоянии, которая затем аннигилирует в какие-либо лёгкие мезоны. Если энергия частиц такова, что адроны в промежуточном состоянии рождаются вблизи порога рождения реальной пары, то взаимодействие между ними может существенно влиять на сечение рождения лёгких мезонов. В диссертации показано, что вклад диаграмм с виртуальными адронами в промежуточном состоянии в сечения таких процессов выражается через функцию Грина уравнения Шрёдингера, описывающего взаимодействие адронов.

**Во второй главе** рассмотрены процессы  $e^+e^- \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  и  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c \bar{\Lambda}_c$ . Из экспериментов известно, что зависимость сечений этих процессов от энергии вблизи порогов сильно отличается от энергетической зависимости фазовых объёмов конечных состояний. Это указывает на необходимость учёта взаимодействия в конечном состоянии для правильного описания сечений процессов. В обоих этих процессах рождается пара барионов с нулевым изотопическим спином, что упрощает описания взаимодействия в конечном состоянии.

В случае процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  достаточно рассмотреть взаимодействие между  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$  в состоянии с относительным орбитальным моментом  $L = 0$ , суммарным спином  $S = 1$  и изоспином  $I = 0$ . В диссертации используется простая модель потенциала взаимодействия в виде прямоугольной потенциальной ямы, а также введена дипольная параметризация для формфактора барионов. Параметры потенциала подбираются таким образом, чтобы минимизировать значение  $\chi^2$ , определяемое как сумма квадратов стандартных отклонений предсказаний теории от экспериментальных данных. Используются данные, полученные на детекторах DM2 [67], BaBar [30] и BESIII [31–33]. Итоговое значение  $\chi^2/N_{\text{df}} = 1,3$ , где  $N_{\text{df}}$  — число степеней свободы, равное разнице количества экспериментальных точек и количества свободных параметров модели. Сравнение предсказаний для сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  с экспериментальными данными показано на рисунке 1(а). Учёт взаимодействия в конечном состоянии важен для получения хорошего согласия с экспериментами.

Теоретическое описание процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c \bar{\Lambda}_c$  усложняется тем, что необходимо учитывать вклад тензорных сил в потенциал взаимодействия. Тензорные силы сохраняют значение суммарного спина барионов  $S$ , а так-

же значение полного момента  $J$ , однако могут изменить значение орбитального момента  $L$  на  $\pm 2$ . В результате, состояния с  $L = 0$  и  $L = 2$  смешиваются, и взаимодействие в этих состояниях нужно учитывать совместно. В диссертации приведены формулы, описывающие влияние взаимодействия в конечном состоянии на сечения процессов с учётом тензорных сил. Важным следствием этих формул является то, что наличие тензорных сил приводит к зависимости от энергии отношения электрического и магнитного формфакторов бариона. Кроме того, между  $\Lambda_c$  и  $\bar{\Lambda}_c$  действуют кулоновские силы, которые играют важную роль при малых энергиях барионов. В диссертации предложена модель взаимодействия между  $\Lambda_c$  и  $\bar{\Lambda}_c$  в состояниях с орбитальными моментами  $L = 0, 2$ , суммарным спином  $S = 1$ , полным моментом  $J = 1$  и изоспином  $I = 0$ . Параметры модели подобраны для наилучшего описания зависимости от энергии сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c \bar{\Lambda}_c$ , а также электромагнитных формфакторов  $\Lambda_c$ -бариона. Сравнение с экспериментальными данными BESIII [34; 35] предсказаний для сечения этого процесса показано на рисунке 1(б). Соответствующее значение  $\chi^2/N_{\text{df}} = 1,38$ .

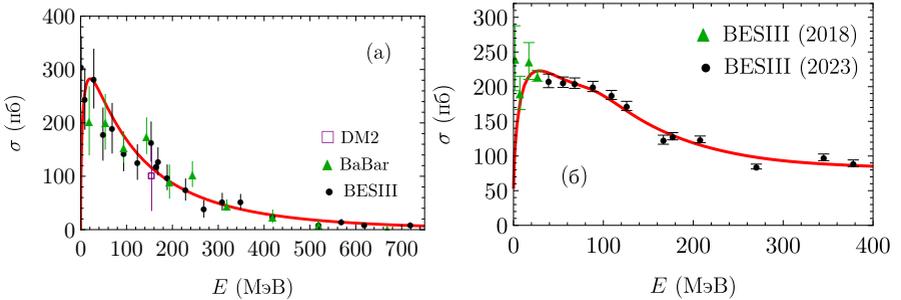


Рисунок 1 — Зависимости от энергии сечений процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  (а) и  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$  (б). Экспериментальные данные взяты из работ [30–33; 67] и [34; 35], соответственно

**Третья глава** посвящена описанию влияния нуклон-антинуклонного взаимодействия в конечном и промежуточном состояниях на сечения различных процессов. Одними из таких процессов являются процессы  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ . Из экспериментов известно, что для описания сечений этих процессов необходимо учитывать взаимодействие в конечном состоянии. Описание взаимодействия усложняется тем, что нуклон-антинуклонные пары могут рождаться как в состоянии с изоспином  $I = 0$ , так и в состоянии с  $I = 1$ . Эти изоспиновые состояния перемешиваются за счёт эффектов, нарушающих изотопическую инвариантность, таких как кулоновское взаимодействие и разница масс протона и нейтрона.

Тензорные силы также играют важную роль в потенциале нуклон-антинуклонного взаимодействия, приводя к смешиванию состояний с орбитальными моментами  $L = 0$  и  $L = 2$ . В результате, для полноценного учёта нуклон-антинуклонного взаимодействия в процессах  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  вблизи порогов нужно одновременно рассматривать 4 квантовых состояния, а именно состояния  $p\bar{p}$  и  $n\bar{n}$ , находящиеся в  $S$ -волне и в  $D$ -волне. Причём потенциал взаимодействия содержит мнимую часть, которая описывает аннигиляцию  $N\bar{N}$  пары в лёгкие мезоны. В диссертации приведены формулы для сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  вблизи порогов, учитывающие взаимодействие в конечном состоянии. Также получены выражения для электромагнитных формфакторов протона и нейтрона, которые зависят от энергии из-за действия тензорных сил.

В диссертации предложена простая модель нуклон-антинуклонного взаимодействия в парциальных волнах  $^3S_1$  и  $^3D_1$ , которая хорошо описывает имеющиеся экспериментальные данные. Для определения оптимальных параметров модели минимизировалось значение  $\chi^2$ , вычисленное по экспериментальным данным для сечений рождения  $p\bar{p}$  и  $n\bar{n}$  в  $e^+e^-$  аннигиляции, электромагнитных формфакторов протона и нейтрона во времениподобной области, а также парциальных сечений протон-антипротонного рассеяния и процесса перезарядки  $p\bar{p} \rightarrow n\bar{n}$ . Использовались парциальные сечения нуклон-антинуклонного рассеяния, полученные нейменгенской группой в работе [8]. Развита модель нуклон-антинуклонного взаимодействия довольно хорошо воспроизводит все перечисленные экспериментальные данные, поскольку значение  $\chi^2/N_{\text{df}} = 1,19$ . Предсказания для сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ , а также отношений формфакторов для протона и для нейтрона показаны на рисунке 2.

В третьей главе также рассмотрено влияние нуклон-антинуклонного взаимодействия в промежуточном состоянии на сечения процессов  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ ,  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ . Это влияние связано с тем, что виртуальная нуклон-антинуклонная пара может родиться в промежуточном состоянии, а затем аннигилировать в лёгкие мезоны. Предложенная модель нуклон-антинуклонного взаимодействия предсказывает, что вблизи порога рождения реальных нуклон-антинуклонных пар полное сечение рождения изовекторных состояний (то есть сумма сечений рождения реальных и виртуальных пар с  $I = 1$ ) испытывает резкий скачок. Этот скачок проявляется в некоторых процессах, где конечное мезонное состояние может иметь изоспин  $I = 1$ . При этом предполагается, что другие промежуточные состояния, не содержащие виртуальную нуклон-антинуклонную пару, будут давать слабо зависящий от энергии вклад в сечения. Сравнение предсказаний для сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$  с экспериментальными данными [14; 49–53] показано на рисунке 3.

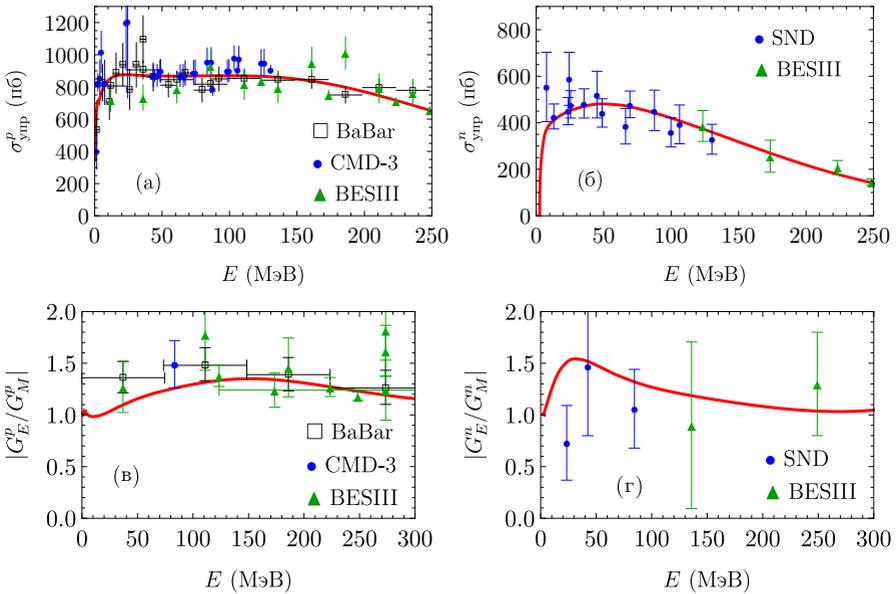


Рисунок 2 — Зависимости от энергии сечений рождения  $p\bar{p}$  (а) и  $n\bar{n}$  (б) в  $e^+e^-$  аннигиляции, а также отношения электромагнитных формфакторов для протона (в) и для нейтрона (г). Экспериментальные данные взяты из работ [12–20]

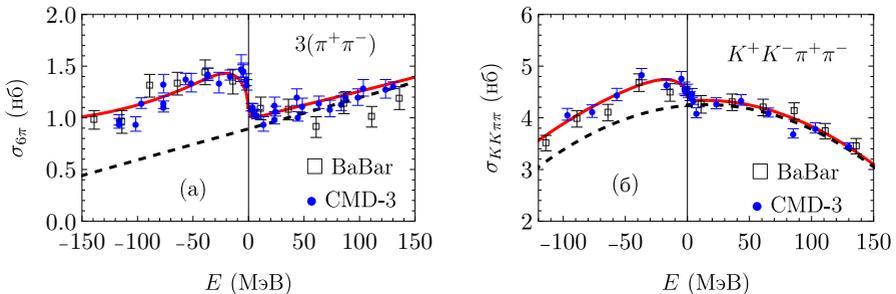


Рисунок 3 — Зависимости от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ . Сплошными линиями показаны предсказания модели, а пунктирными линиями показаны вклады в сечения процессов, не связанные с рождением виртуальной  $N\bar{N}$  пары. Экспериментальные данные взяты из работ [14; 49–53]

В четвёртой главе обсуждаются проявления нуклон-antinуклонного взаимодействия в распадах  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$  мезонов. Экспериментально было обнаружено усиление вероятностей распадов  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\omega, \pi^0, \eta)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta)$  в случае, когда инвариантная масса пары  $p\bar{p}$  близка к пороговому значению [21–29]. Такое усиление может быть объяснено взаимодействием в конечном состоянии. Основной вклад в вероятности распадов  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\omega)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma$  вблизи порога по инвариантной массе  $p\bar{p}$  даёт состояние пары с относительным орбитальным моментом  $L = 0$  и суммарным спином  $S = 0$ . При этом в распаде  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\omega$  пара  $p\bar{p}$  рождается в состоянии с изоспином  $I = 0$ , а в распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma$  возможны как  $I = 0$ , так и  $I = 1$ .

В диссертации используется простая модель нуклон-antinуклонного взаимодействия в парциальной волне  $^1S_0$ , в рамках которой потенциалы взаимодействия в каждом изоспиновом состоянии представляют собой прямоугольные потенциальные ямы. Такая модель позволяет получить аналитические выражения для распределений по инвариантной массе пары  $p\bar{p}$  в распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\omega)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma$ . Оптимальные параметры потенциала нуклон-antinуклонного взаимодействия были определены путём минимизации значения  $\chi^2$ , вычисленного с учётом экспериментальных данных для распадов  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\omega)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma$ , а также парциальных сечений нуклон-antinуклонного рассеяния, полученных неймегенской группой [8]. Сравнение предсказаний для распределений по инвариантной массе  $p\bar{p}$  в рассматриваемых распадах с экспериментальными данными [21–23] показано на рисунке 4, а значение  $\chi^2/N_{\text{df}} = 1,06$ .

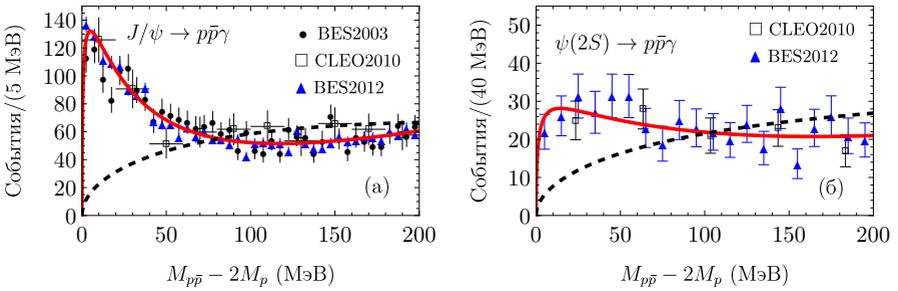


Рисунок 4 — Зависимости от энергии вероятностей распадов  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma$ ,  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma$  в сравнении с экспериментальными данными [21–23]. Сплошными линиями показаны предсказания модели, а штриховыми линиями показаны зависимости вероятностей распадов от энергии без учёта взаимодействия в конечном состоянии

В распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$  могут рождаться пары  $p\bar{p}$  с разными наборами квантовых чисел. Вблизи порога по инвариантной

массе  $p\bar{p}$  основной вклад в вероятности этих распадов должны давать нуклон-антинуклонные состояния либо с  $S = 1, L = 0, 2$ , либо с  $S = 0, L = 1$ . Потенциал нуклон-антинуклонного взаимодействия в парциальных волнах  ${}^3S_1 - {}^3D_1$ , смешанных за счёт действия тензорных сил, был определён в главе 3. Однако анализ показал, что для описания распадов  $\psi$ -мезонов одновременно с процессами  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  учёта лишь этих парциальных волн недостаточно. Необходимо также учитывать влияние нуклон-антинуклонного взаимодействия в конечном состоянии в парциальной волне  ${}^1P_1$ . Выбором подходящих параметров потенциала взаимодействия в этой парциальной волне удалось получить хорошее описание распределений по инвариантной массе  $p\bar{p}$  в распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$ . Соответствующее значение  $\chi^2/N_{df} = 1,22$ . Сравнение предсказаний с экспериментальными данными [22–29] показано на рисунке 5. В рамках модели влияние  $N\bar{N}$  взаимодействия в  $P$ -волне оказывается существенным уже при инвариантных массах  $p\bar{p}$ , довольно близких к порогу, хотя доступный фазовый объём при этом стремится к нулю.

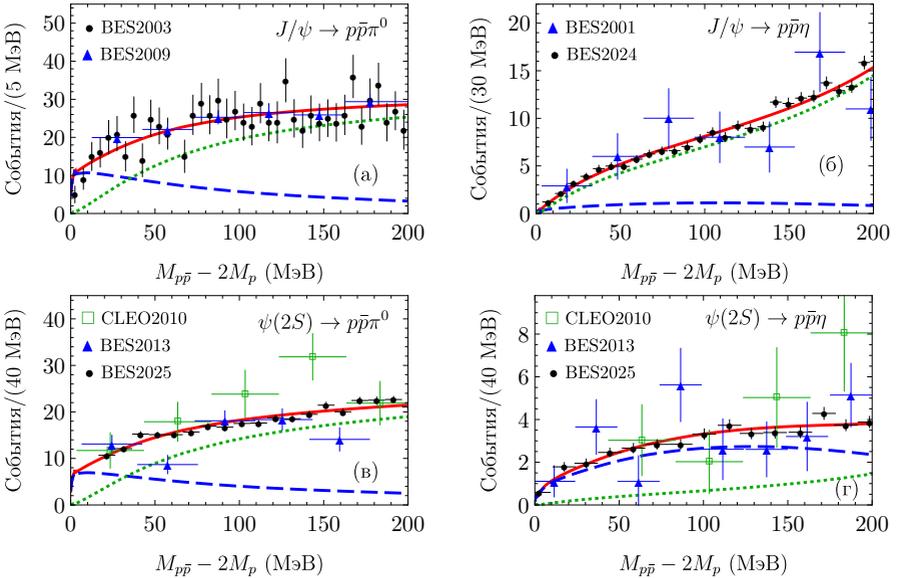


Рисунок 5 — Зависимости вероятностей распадов  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ ,  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\eta$ ,  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\pi^0$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\eta$  от инвариантной массы пары  $p\bar{p}$  в сравнении с экспериментальными данными [22–29]. Штриховыми линиями показаны вклады в вероятности, связанные с  $N\bar{N}$  взаимодействием с состояниями  ${}^3S_1 - {}^3D_1$ , пунктирными линиями показаны вклады состояний  ${}^1P_1$ , а сплошными линиями — суммарные вероятности

**Пятая глава** посвящена рассмотрению взаимодействия в конечном состоянии между мезонами в процессах  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$  и  $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ . Экспериментально была обнаружена нетривиальная зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$ ,  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}^*$  и  $e^+e^- \rightarrow D^*\bar{D}^*$ , а также  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$ ,  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}^*$  и  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*$  вблизи порогов соответствующих реакций. В диссертации показано, что наблюдаемые особенности поведения сечений этих процессов могут быть объяснены взаимодействием в конечном состоянии. Особенностью рассматриваемых процессов является наличие нескольких каналов реакции с близкими порогами. Действительно, пороги рождения  $D\bar{D}^*$  и  $D^*\bar{D}^*$  отстоят от порога рождения  $D\bar{D}$  примерно на 145 МэВ и 290 МэВ, соответственно. Пороги рождения  $B\bar{B}^*$  и  $B^*\bar{B}^*$  отстоят от порога рождения  $B\bar{B}$  всего на 45 МэВ и 90 МэВ. Из-за того, что квантовые числа  $J^{PC}$  всех конечных состояний в системе  $D^{(*)}$ -мезонов (или  $B^{(*)}$ -мезонов) одинаковы, возможные переходы между разными конечными состояниями играют важную роль.

В процессах  $e^+e^-$  аннигиляции в пару  $D^{(*)}$ -мезонов рассматривается шесть возможных  $C$ -нечётных конечных состояний:  $D^0\bar{D}^0$ ,  $D^+D^-$ ,  $(D^0\bar{D}^{*0} + \bar{D}^0D^{*0})/\sqrt{2}$ ,  $(D^+D^{*-} + D^-D^{*+})/\sqrt{2}$ ,  $D^{*0}\bar{D}^{*0}$  и  $D^{*+}D^{*-}$ . В экспериментах были измерены как сечения рождения пар заряженных мезонов, так и сечения рождения пар нейтральных мезонов. Поэтому используемая модель взаимодействия в конечном состоянии учитывает эффекты нарушения изотопической инвариантности (различие масс заряженных и нейтральных мезонов, а также кулоновское взаимодействие между заряженными мезонами). Потенциал взаимодействия в многоканальной задаче описывает не только взаимодействие между мезонами в каждом конкретном канале, но и переходы между всеми возможными каналами реакции. Оптимальные параметры потенциала были определены путём минимизации значения  $\chi^2$ , вычисленного по имеющимся экспериментальным данным для сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$  вблизи порогов. Сравнение предсказаний с результатами экспериментов [36–43] показано на рисунке 6. Видно, что модель хорошо воспроизводит характерные особенности зависимости рассматриваемых сечений от энергии, такие как наличие резких пиков или провалов вблизи порогов рождения  $D\bar{D}^*$  и  $D^*\bar{D}^*$ .

В настоящее время для сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$  практически нет экспериментальных данных, различающих заряженные и нейтральные  $B^{(*)}$ -мезоны. Известно отношение вероятностей распада  $\Upsilon(4S)$  на пары  $B^+B^-$  и  $B^0\bar{B}^0$  при энергии резонанса [68–73], но этих данных недостаточно, чтобы надёжно разделить сечения рождения заряженных и нейтральных  $B^{(*)}$ -мезонов. Поэтому в диссертации используется несколько упрощённая модель взаимодействия в системе  $B^{(*)}$ -мезонов, в которой различаются три возможных конечных состояния:  $B\bar{B}$ ,  $(B^*\bar{B} + B\bar{B}^*)/\sqrt{2}$  и  $B^*\bar{B}^*$ . При этом сечения рождения пар заряженных и нейтральных ме-

зон в каждом состоянии суммируются. Для определения оптимальных параметров модели используются экспериментальные данные для эксклюзивных сечений рождения  $B\bar{B}$ ,  $B^*\bar{B}$  и  $B^*\bar{B}^*$  [46; 47], а также данные для сечения рождения ботомония  $b\bar{b}$  [44; 45; 48], которое в данном диапазоне энергий совпадает с суммой сечений рождения  $B\bar{B}$ ,  $B^*\bar{B}$  и  $B^*\bar{B}^*$ . Итоговое значение  $\chi^2/N_{\text{df}} = 1,5$ . Сравнение предсказаний модели с перечисленными экспериментальными данными показано на рисунке 7.

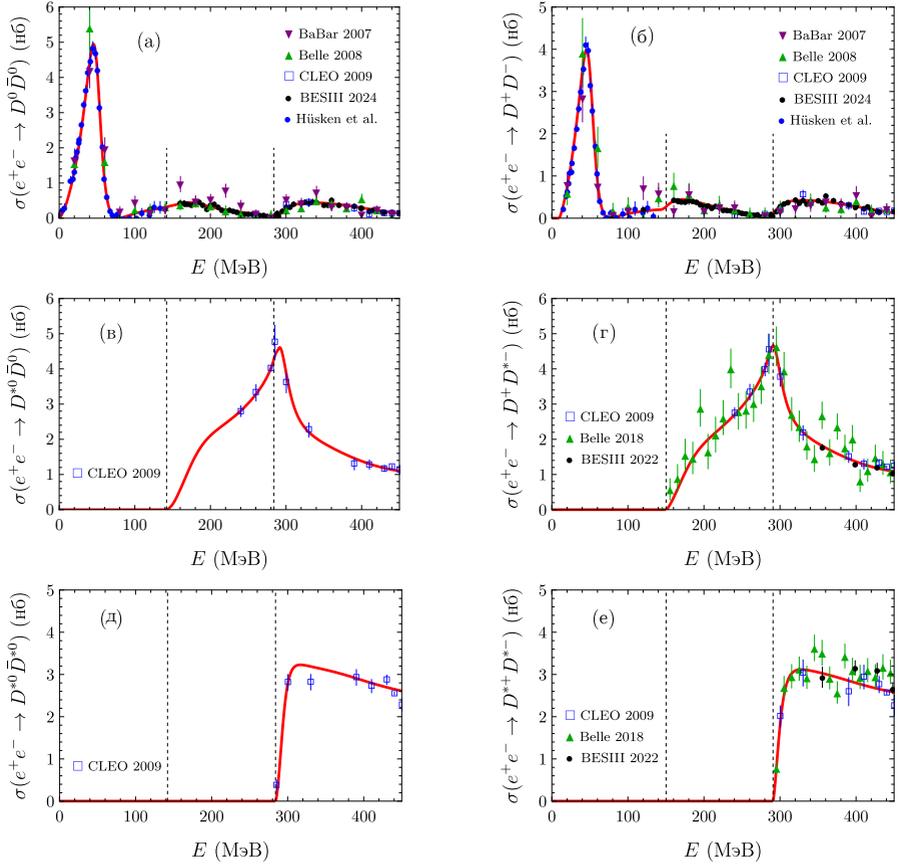


Рисунок 6 — Сравнение с экспериментальными данными [36–43] предсказаний для зависимости от энергии сечений рождения пар нейтральных и заряженных  $D^{(*)}$ -мезонов. Вертикальными штриховыми линиями показаны пороги рождения  $D^*\bar{D}$  и  $D^*\bar{D}^*$

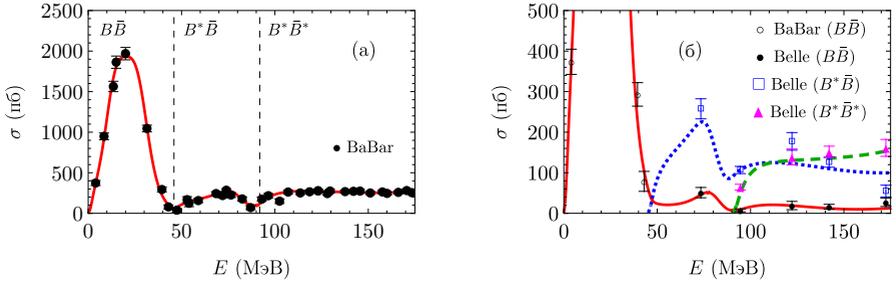


Рисунок 7 — Зависимость от энергии предсказаний для суммы сечений рождения  $B\bar{B}$ ,  $B^*\bar{B}$  и  $B^*\bar{B}^*$  в  $e^+e^-$  аннигиляции (а) и для эксклюзивных сечений (б) для процессов  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$  (сплошная линия),  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}^*$  (пунктирная линия) и  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*$  (штриховая линия). Данные для сечений взяты из работ [45–47]. Штриховыми линиями показаны пороги рождения состояний  $B^*\bar{B}$  и  $B^*\bar{B}^*$

С использованием полученного потенциала взаимодействия между  $B^{(*)}$ -мезонами, в диссертации изучено влияние нарушения изотопической инвариантности на зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ . Расчёты показывают, что пики в каналах с рождением пар заряженных мезонов смещены на  $2 \div 4$  МэВ ниже по энергии относительно пиков в каналах с рождением пар нейтральных мезонов. Это смещение возникает по двум причинам. Во-первых, массы заряженных  $B^{(*)}$ -мезонов немного меньше, чем массы нейтральных  $B^{(*)}$ -мезонов. Во-вторых, кулоновское притяжение между заряженными  $B^{(*)}$ -мезонами приводит к смещению вниз по энергии всех пиков в энергетической зависимости сечений. Разную зависимость от энергии сечений рождения пар заряженных и нейтральных  $B^{(*)}$ -мезонов в  $e^+e^-$  аннигиляции, связанную со взаимодействием в конечном состоянии, важно учитывать при измерении масс этих мезонов.

## Заключение

Основными результатами работы являются:

1. Предложен последовательный подход к вычислению эффектов взаимодействия в конечном состоянии в процессах с рождением пары адронов, основанный на решении в координатном представлении уравнения Шрёдингера или системы уравнений Шрёдингера.
2. Развитый подход применён к описанию взаимодействия в конечном состоянии в задачах различной сложности, включая многоканальные задачи, а также системы с наличием тензорных сил и кулонов-

ского взаимодействия.

3. Получена простая аналитическая формула, хорошо описывающая зависимость от энергии сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  с учётом взаимодействия в конечном состоянии.
4. Предложена модель взаимодействия между  $\Lambda_c$  и  $\bar{\Lambda}_c$ , описывающая зависимость от энергии сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$ , а также отношение электромагнитных формфакторов  $\Lambda_c$ -бариона.
5. Предложена модель нуклон-antinуклонного взаимодействия в конечном состоянии, учитывающая разницу масс протона и нейтрона, а также кулоновское взаимодействие между протоном и антипротоном. Модель хорошо воспроизводит зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  вблизи порогов и отношений электромагнитных формфакторов для протона и для нейтрона.
6. Резкое падение сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ ,  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  и  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$  вблизи порога рождения нуклон-antinуклонных пар объяснено влиянием взаимодействия между виртуальными нуклоном и антинуклоном в промежуточном состоянии.
7. С учётом нуклон-antinуклонного взаимодействия в конечном состоянии описаны зависимости от инвариантной массы  $p\bar{p}$  вероятностей распадов  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta, \omega)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma(\pi^0, \eta)$ , а также предсказаны угловые распределения в распадах  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$  и  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$ .
8. Объяснена сложная зависимость от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$ ,  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}$  и  $e^+e^- \rightarrow B^*\bar{B}^*$  вблизи порогов, связанная с взаимодействием  $B^{(*)}$  и  $\bar{B}^{(*)}$  мезонов и переходами между разными каналами. Предсказана зависимость от энергии отношения сечений рождения заряженных и нейтральных  $B^{(*)}$ -мезонов.
9. Изучено взаимодействие  $D^{(*)}$  и  $\bar{D}^{(*)}$  мезонов в каналах  $D^0\bar{D}^0$ ,  $D^+D^-$ ,  $D^{*0}\bar{D}^0$ ,  $D^{*+}D^-$ ,  $D^{*0}\bar{D}^{*0}$  и  $D^{*+}D^{*-}$ , и дано объяснение нетривиальной зависимости от энергии сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$ ,  $e^+e^- \rightarrow D^*\bar{D}$  и  $e^+e^- \rightarrow D^*\bar{D}^*$  вблизи порогов.

## Цитированная литература

1. Эрикссон Т., Вайзе В. Пионы и ядра / под ред. И. С. Шапиро. — М. : Наука, 1991. — 512 с.
2. Rosenbluth M. N. High energy elastic scattering of electrons on protons // Physical Review. — 1950. — Vol. 79, no. 4. — P. 615–619. — DOI: 10.1103/PhysRev.79.615.
3. Construction of high-quality  $NN$  potential models / V. G. J. Stoks, R. A. M. Klomp, C. P. F. Terheggen, J. J. de Swart // Physical Review

- C. — 1994. — Vol. 49, no. 6. — P. 2950–2962. — DOI: 10.1103/PhysRevC.49.2950.
4. Parametrization of the paris  $N$ - $N$  potential / M. Lacombe, B. Loiseau, J. M. Richard, [et al.] // Physical Review C. — 1980. — Vol. 21, no. 3. — P. 861. — DOI: 10.1103/PhysRevC.21.861.
  5. *Machleidt R.* High-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential // Physical Review C. — 2001. — Vol. 63, no. 2. — P. 024001. — DOI: 10.1103/PhysRevC.63.024001.
  6. *Entem D. R., Fernández F., Valcarce A.* Chiral quark model of the  $NN$  system within a Lippmann-Schwinger resonating group method // Physical Review C. — 2000. — Vol. 62, no. 3. — P. 034002. — DOI: 10.1103/PhysRevC.62.034002.
  7. Paris  $N\bar{N}$  potential constrained by recent antiprotonic-atom data and  $\bar{n}p$  total cross sections / B. El-Bennich, M. Lacombe, B. Loiseau, S. Wycech // Physical Review C. — 2009. — Vol. 79, no. 5. — P. 054001. — DOI: 10.1103/PhysRevC.79.054001.
  8. *Zhou D., Timmermans R. G. E.* Energy-dependent partial-wave analysis of all antiproton-proton scattering data below 925 MeV/c // Physical Review C. — 2012. — Vol. 86, no. 4. — P. 044003. — DOI: 10.1103/PhysRevC.86.044003.
  9. *Mull V., Holinde K.* Combined description of  $\bar{N}N$  scattering and annihilation with a hadronic model // Physical Review C. — 1995. — Vol. 51, no. 5. — P. 2360–2371. — DOI: 10.1103/PhysRevC.51.2360.
  10. *Kang X.-W., Haidenbauer J., Meißner U.-G.* Antinucleon-nucleon interaction in chiral effective field theory // Journal of High Energy Physics. — 2014. — Vol. 2014, no. 2. — P. 113. — DOI: 10.1007/JHEP02(2014)113.
  11. *Dai L.-Y., Haidenbauer J., Meißner U.-G.* Antinucleon-nucleon interaction at next-to-next-to-next-to-leading order in chiral effective field theory // Journal of High Energy Physics. — 2017. — Vol. 2017, no. 7. — P. 78. — DOI: 10.1007/JHEP07(2017)078.
  12. Study of  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  via initial-state radiation at BABAR / J. P. Lees, V. Poireau, V. Tisserand, [et al.] // Physical Review D. — 2013. — Vol. 87, no. 9. — P. 092005. — DOI: 10.1103/PhysRevD.87.092005.
  13. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  in the c.m. energy range from threshold to 2 GeV with the CMD-3 detector / R. Akhmetshin, A. Amirkhanov, A. Anisenkov, [et al.] // Physics Letters B. — 2016. — Vol. 759. — P. 634–640. — DOI: 10.1016/j.physletb.2016.04.048.
  14. Observation of a fine structure in  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$  production at the nucleon-antinucleon threshold / R. Akhmetshin, A. Amirkhanov, A. Anisenkov, [et al.] // Physics Letters B. — 2019. — Vol. 794. — P. 64–68. — DOI: 10.1016/j.physletb.2019.05.032.

15. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  via initial state radiation at BESIII / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // Physical Review D. — 2019. — Vol. 99, no. 9. — P. 092002. — DOI: 10.1103/PhysRevD.99.092002.
16. Measurement of proton electromagnetic form factors in  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  in the energy region 2.00 – 3.08GeV / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — Vol. 124, no. 4. — P. 042001. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.042001.
17. Measurement of proton electromagnetic form factors in the time-like region using initial state radiation at BESIII / M. Ablikim, M. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // Physics Letters B. — 2021. — Vol. 817. — P. 136328. — DOI: 10.1016/j.physletb.2021.136328.
18. Oscillating features in the electromagnetic structure of the neutron / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // Nature Physics. — 2021. — Vol. 17, no. 11. — P. 1200–1204. — DOI: 10.1038/s41567-021-01345-6.
19. Experimental study of the  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  process at the VEPP-2000  $e^+e^-$  collider with the SND detector / M. N. Achasov, A. Y. Barnyakov, K. I. Beloborodov, [et al.] // The European Physical Journal C. — 2022. — Vol. 82, no. 8. — P. 761. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10696-0.
20. Measurements of the electric and magnetic form factors of the neutron for timelike momentum transfer / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // Physical Review Letters. — 2023. — Vol. 130, no. 15. — P. 151905. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.151905.
21. Spin-parity analysis of  $p\bar{p}$  mass threshold structure in  $J/\psi$  and  $\psi(3686)$  radiative decays / M. Ablikim, M. N. Achasov, D. Alberto, [et al.] // Physical Review Letters. — 2012. — Vol. 108, no. 11. — P. 112003. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.112003.
22. Observation of a near-threshold enhancement in the  $p\bar{p}$  mass spectrum from radiative  $J/\psi \rightarrow \gamma p\bar{p}$  decays / J. Bai, Y. Ban, J. Bian, [et al.] // Physical Review Letters. — 2003. — Vol. 91, no. 2. — P. 022001. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.022001.
23. Study of  $\psi(2S)$  decays to  $\gamma p\bar{p}$ ,  $\pi^0 p\bar{p}$ , and  $\eta p\bar{p}$ , and search for  $p\bar{p}$  threshold enhancements / J. P. Alexander, D. G. Cassel, S. Das, [et al.] // Physical Review D. — 2010. — Vol. 82, no. 9. — P. 092002. — DOI: 10.1103/PhysRevD.82.092002.
24. Study of  $N^*$  production from  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\eta$  / J. Bai, Y. Ban, J. Bian, [et al.] // Physics Letters B. — 2001. — Vol. 510, no. 1–4. — P. 75–82. — DOI: 10.1016/S0370-2693(01)00605-0.
25. Partial wave analysis of  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0$  / M. Ablikim, J. Bai, Y. Bai, [et al.] // Physical Review D. — 2009. — Vol. 80, no. 5. — P. 052004. — DOI: 10.1103/PhysRevD.80.052004.

26. Partial wave analysis of  $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\eta$  / M. Ablikim, M. N. Achasov, O. Albayrak, [et al.] // *Physical Review D*. — 2013. — Vol. 88, no. 3. — P. 032010. — DOI: 10.1103/PhysRevD.88.032010.
27. Observation of two new  $N^*$  resonances in the decay  $\psi(3686) \rightarrow p\bar{p}\pi^0$  / M. Ablikim, M. N. Achasov, D. J. Ambrose, [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2013. — Vol. 110, no. 2. — P. 022001. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.022001.
28. Measurement of the branching fraction of the decay  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\eta$  / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // *Physical Review D*. — 2024. — Vol. 110, no. 7. — P. 072021. — DOI: 10.1103/PhysRevD.110.072021.
29. Partial wave analyses of  $\psi(3686) \rightarrow p\bar{p}\pi^0$  and  $\psi(3686) \rightarrow p\bar{p}\eta$  / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // *Physical Review D*. — 2025. — Vol. 111, no. 3. — P. 032011. — DOI: 10.1103/PhysRevD.111.032011.
30. Study of  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}, \Lambda\bar{\Sigma}^0, \Sigma^0\bar{\Sigma}^0$  using initial state radiation with BABAR / B. Aubert, M. Bona, D. Boutigny, [et al.] // *Physical Review D*. — 2007. — Vol. 76, no. 9. — P. 092006. — DOI: 10.1103/PhysRevD.76.092006.
31. Observation of a cross-section enhancement near mass threshold in  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  / M. Ablikim, M. N. Achasov, S. Ahmed, [et al.] // *Physical Review D*. — 2018. — Vol. 97, no. 3. — P. 032013. — DOI: 10.1103/PhysRevD.97.032013.
32. Complete measurement of the  $\Lambda$  electromagnetic form factors / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2019. — Vol. 123, no. 12. — P. 122003. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.122003.
33. Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  cross section from threshold to 3.00 GeV using events with initial-state radiation / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // *Physical Review D*. — 2023. — Vol. 107, no. 7. — P. 072005. — DOI: 10.1103/PhysRevD.107.072005.
34. Precision measurement of the  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$  cross section near threshold / M. Ablikim, M. N. Achasov, S. Ahmed, [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2018. — Vol. 120, no. 13. — P. 132001. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.132001.
35. Measurement of energy-dependent pair-production cross section and electromagnetic form factors of a charmed baryon / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2023. — Vol. 131, no. 19. — P. 191901. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.191901.
36. Study of the exclusive initial-state-radiation production of the  $D\bar{D}$  system / B. Aubert, M. Bona, D. Boutigny, [et al.] // *Physical Review*

- D. — 2007. — Vol. 76, no. 11. — P. 111105. — DOI: 10.1103/PhysRevD.76.111105.
37. Measurement of the near-threshold  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$  cross section using initial-state radiation / G. Pakhlova, I. Adachi, H. Aihara, [et al.] // Physical Review D. — 2008. — Vol. 77, no. 1. — P. 011103. — DOI: 10.1103/PhysRevD.77.011103.
  38. Measurement of charm production cross sections in  $e^+e^-$  annihilation at energies between 3.97 and 4.26 GeV / D. Cronin-Hennessy, K. Y. Gao, J. Hietala, [et al.] // Physical Review D. — 2009. — Vol. 80, no. 7. — P. 072001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.80.072001.
  39. *Dong X.-K., Wang L.-L., Yuan C.-Z.* Derived Born cross sections of  $e^+e^-$  annihilation into open charm mesons from CLEO-c measurements // Chinese Physics C. — 2018. — Vol. 42, no. 4. — P. 043002. — DOI: 10.1088/1674-1137/42/4/043002.
  40. Precise measurement of Born cross sections for  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$  at  $\sqrt{s} = 3.80 - 4.95$  GeV / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // Physical Review Letters. — 2024. — Vol. 133, no. 8. — P. 081901. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.133.081901.
  41. Poles and poltergeists in  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$  data / N. Hüsken, R. F. Lebed, R. E. Mitchell, [et al.] // Physical Review D. — 2024. — Vol. 109, no. 11. — P. 114010. — DOI: 10.1103/PhysRevD.109.114010.
  42. Angular analysis of the  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)\pm}\bar{D}^{\mp\pm}$  process near the open charm threshold using initial-state radiation / V. Zhukova, G. Pakhlova, P. Pakhlov, [et al.] // Physical Review D. — 2018. — Vol. 97, no. 1. — P. 012002. — DOI: 10.1103/PhysRevD.97.012002.
  43. Cross section measurements of the  $e^+e^- \rightarrow D^{*+}D^{*-}$  and  $e^+e^- \rightarrow D^{*+}D^-$  processes at center-of-mass energies from 4.085 to 4.600 GeV / M. Ablikim, M. N. Achasov, P. Adlarson, [et al.] // Journal of High Energy Physics. — 2022. — Vol. 05, no. 5. — P. 155. — DOI: 10.1007/JHEP05(2022)155.
  44. Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$  cross section between  $\sqrt{s} = 10.54$  and 11.20 GeV / B. Aubert, M. Bona, Y. Karyotakis, [et al.] // Physical Review Letters. — 2009. — Vol. 102, no. 1. — P. 012001. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.012001.
  45. Hadronic cross section of  $e^+e^-$  annihilation at bottomonium energy region / X.-K. Dong, X.-H. Mo, P. Wang, C.-Z. Yuan // Chinese Physics C. — 2020. — Vol. 44, no. 8. — P. 083001. — DOI: 10.1088/1674-1137/44/8/083001.
  46. Measurement of the energy dependence of the  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}, B\bar{B}^*$  and  $B^*\bar{B}^*$  exclusive cross sections / R. Mizuk, A. Bondar, I. Adachi, [et al.] // Journal of High Energy Physics. — 2021. — Vol. 2021, no. 6. — P. 137. — DOI: 10.1007/JHEP06(2021)137.

47. Measurement of the energy dependence of the  $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}, B\bar{B}^*,$  and  $B^*\bar{B}^*$  cross sections at Belle II / I. Adachi, L. Aggarwal, H. Ahmed, [et al.] // Journal of High Energy Physics. — 2024. — Vol. 2024, no. 10. — P. 114. — DOI: 10.1007/JHEP10(2024)114.
48. Measurements of the  $\Upsilon(10860)$  and  $\Upsilon(11020)$  resonances via  $\sigma(e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-)$  / D. Santel, K. Kinoshita, P. Chang, [et al.] // Physical Review D. — 2016. — Vol. 93, no. 1. — P. 011101. — DOI: 10.1103/PhysRevD.93.011101.
49. The  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ , and  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-K^+K^-$  cross sections at center-of-mass energies 0.5 – 4.5 GeV measured with initial-state radiation / B. Aubert, R. Barate, D. Boutigny, [et al.] // Physical Review D. — 2005. — Vol. 71, no. 5. — P. 052001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.71.052001.
50. The  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ ,  $2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  and  $K^+K^-2(\pi^+\pi^-)$  cross sections at center-of-mass energies from production threshold to 4.5 GeV measured with initial-state radiation / B. Aubert, R. Barate, D. Boutigny, [et al.] // Physical Review D. — 2006. — Vol. 73, no. 5. — P. 052003. — DOI: 10.1103/PhysRevD.73.052003.
51.  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ ,  $K^+K^-\pi^0\pi^0$  and  $K^+K^-K^+K^-$  cross sections measured with initial-state radiation / B. Aubert, M. Bona, D. Boutigny, [et al.] // Physical Review D. — 2007. — Vol. 76, no. 1. — P. 012008. — DOI: 10.1103/PhysRevD.76.012008.
52. Study of the process  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$  in the c.m. energy range 1.5–2.0 GeV with the CMD-3 detector / R. Akhmetshin, A. Anisenkov, S. Anokhin, [et al.] // Physics Letters B. — 2013. — Vol. 723, no. 1–3. — P. 82–89. — DOI: 10.1016/j.physletb.2013.04.065.
53. Investigation of the processes  $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$  and  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$  with the aid of the CMD-3 detector / P. A. Lukin, A. V. Anisenkov, V. M. Aulchenko, [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2015. — Vol. 78, no. 3. — P. 353–357. — DOI: 10.1134/S1063778815020209.
54. *Wigner E. P.* On the behavior of cross sections near thresholds // Physical Review. — 1948. — Vol. 73, no. 9. — P. 1002–1009. — DOI: 10.1103/PhysRev.73.1002.
55. *Breit G.* Energy dependence of reactions at thresholds // Physical Review. — 1957. — Vol. 107, no. 6. — P. 1612–1615. — DOI: 10.1103/PhysRev.107.1612.
56. *Базь А. И.* Энергетическая зависимость сечения рассеяния вблизи порога реакции // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 1957. — Т. 33, № 4. — С. 923–928.
57. *Базь А. И.* Резонансные эффекты при рассеянии частиц вблизи порога реакции // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 1959. — Т. 36, № 6. — С. 1762–1770.

58. *Базь А. И.* Энергетическая зависимость сечений вблизи «порога» рождения нестабильной частицы // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 1961. — Т. 40, № 5. — С. 1511–1515.
59. *Haidenbauer J., Kang X.-W., Meißner U.-G.* The electromagnetic form factors of the proton in the timelike region // Nuclear Physics A. — 2014. — Vol. 929. — P. 102. — DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2014.06.007.
60. *Dai L.-Y., Haidenbauer J., Meißner U.-G.* Re-examining the  $X(4630)$  resonance in the reaction  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^-$  // Physical Review D. — 2017. — Vol. 96, no. 11. — P. 116001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.96.116001.
61. *Haidenbauer J., Meißner U.-G., Dai L.-Y.* Hyperon electromagnetic form factors in the timelike region // Physical Review D. — 2021. — Vol. 103, no. 1. — P. 014028. — DOI: 10.1103/PhysRevD.103.014028.
62. *Hüsken N., Mitchell R. E., Swanson E. S.*  $K$ -matrix analysis of  $e^+e^-$  annihilation in the bottomonium region // Physical Review D. — 2022. — Vol. 106, no. 9. — P. 094013. — DOI: 10.1103/PhysRevD.106.094013.
63. *Zhang L., Kang X.-W., Guo X.-H.* Composite nature of  $Z_b$  states from data analysis // The European Physical Journal C. — 2022. — Vol. 82, no. 4. — P. 375. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10332-x.
64. *Lichard P.* Common explanation of the behavior of some  $e^+e^-$  annihilation processes around  $\sqrt{s} = 1.9$  GeV // Physical Review D. — 2018. — Vol. 98, no. 11. — P. 113011. — DOI: 10.1103/PhysRevD.98.113011.
65. *Lichard P.* Manifestation of kaonium in the  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$  process // Physical Review D. — 2020. — Vol. 101, no. 11. — P. 111501. — DOI: 10.1103/PhysRevD.101.111501.
66. *Lichard P., Juráň J.* Subthreshold poles in electron-positron annihilation.  $D_s^+ D_s^-$  final state. — 2025. — DOI: 10.48550/arXiv.2507.05181. — URL: <http://arxiv.org/abs/2507.05181> (visited on 11/11/2025). — Pre-published.
67. Baryon pairs production in  $e^+e^-$  annihilation at  $\sqrt{s} = 2.4$  GeV / D. Bisello, G. Busetto, A. Castro, [et al.] // Zeitschrift für Physik C Particles and Fields. — 1990. — Vol. 48, no. 1. — P. 23–28. — DOI: 10.1007/BF01565602.
68. Measurement of the relative branching fraction of  $\Upsilon(4S)$  to charged and neutral  $B$ -meson pairs / J. P. Alexander, R. Baker, C. Bebek, [et al.] // Physical Review Letters. — 2001. — Vol. 86, no. 13. — P. 2737–2741. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.2737.
69. Measurement of branching fractions for exclusive  $B$  decays to charmonium final states / B. Aubert, D. Boutigny, J.-M. Gaillard, [et al.] //

- Physical Review D. — 2002. — Vol. 65, no. 3. — P. 032001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.65.032001.
70. Measurement of the ratio of branching fractions of the  $\Upsilon(4S)$  to charged and neutral  $B$  mesons / S. B. Athar, P. Avery, H. Stoeck, [et al.] // Physical Review D. — 2002. — Vol. 66, no. 5. — P. 052003. — DOI: 10.1103/PhysRevD.66.052003.
71. Studies of  $B^0 - \bar{B}^0$  mixing properties with inclusive dilepton events / N. C. Hastings, K. Abe, K. Abe, [et al.] // Physical Review D. — 2003. — Vol. 67, no. 5. — P. 052004. — DOI: 10.1103/PhysRevD.67.052004.
72. Measurement of the  $B^+/B^0$  production ratio from the  $\Upsilon(4S)$  meson using  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$  and  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$  decays / B. Aubert, R. Barate, D. Boutigny, [et al.] // Physical Review D. — 2004. — Vol. 69, no. 7. — P. 071101. — DOI: 10.1103/PhysRevD.69.071101.
73. Measurement of the  $B^+/B^0$  production ratio in  $e^+e^-$  collisions at the  $\Upsilon(4S)$  resonance using  $B \rightarrow J/\psi(l)K$  decays at Belle / S. Choudhury, S. Sandilya, K. Trabelsi, [et al.] // Physical Review D. — 2023. — Vol. 107, no. 3. — P. L031102. — DOI: 10.1103/PhysRevD.107.L031102.

### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

- A1. Isoscalar amplitude dominance in  $e^+e^-$  annihilation to  $N\bar{N}$  pair close to the threshold // Physics of Atomic Nuclei. — 2014. — Vol. 77, no. 9. — P. 1173–1177. — DOI: 10.1134/S1063778814080043.
- A2. *Dmitriev V. F., Milstein A. I., Salnikov S. G.* Real and virtual  $N\bar{N}$  pair production near the threshold // Physical Review D. — 2016. — Vol. 93, no. 3. — P. 034033. — DOI: 10.1103/PhysRevD.93.034033.
- A3. *Dmitriev V. F., Milstein A. I., Salnikov S. G.* Angular distributions in  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$  decays // Physics Letters B. — 2016. — Vol. 760. — P. 139–142. — DOI: 10.1016/j.physletb.2016.06.056.
- A4. *Milstein A. I., Salnikov S. G.* Interaction of real and virtual  $p\bar{p}$  pairs in  $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma(\rho, \omega)$  decays // Nuclear Physics A. — 2017. — Vol. 966. — P. 54–63. — DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2017.06.002.
- A5. *Milstein A. I., Salnikov S. G.* Fine structure of the cross sections of  $e^+e^-$  annihilation near the thresholds of  $p\bar{p}$  and  $n\bar{n}$  production // Nuclear Physics A. — 2018. — Vol. 977. — P. 60–68. — DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2018.06.002.
- A6. *Milstein A. I., Salnikov S. G.* Coulomb effects in the decays  $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$  // Physical Review D. — 2021. — Vol. 104, no. 1. — P. 014007. — DOI: 10.1103/PhysRevD.104.014007.
- A7. *Milstein A. I., Salnikov S. G.* Final-state interaction in the process  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$  // Physical Review D. — 2022. — Vol. 105, no. 7. — P. 074002. — DOI: 10.1103/PhysRevD.105.074002.

- A8. Effects of isospin violation in the  $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$  cross sections // A. E. Bondar, A. I. Milstein, R. V. Mizuk, S. G. Salnikov // Journal of High Energy Physics. — 2022. — Vol. 2022, no. 5. — P. 170. — DOI: 10.1007/JHEP05(2022)170.
- A9. *Milstein A. I., Salnikov S. G.*  $N\bar{N}$  production in  $e^+e^-$  annihilation near the threshold revisited // Physical Review D. — 2022. — Vol. 106, no. 7. — P. 074012. — DOI: 10.1103/PhysRevD.106.074012.
- A10. *Мильштейн А. И., Сальников С. Г.* Естественное объяснение недавних результатов исследования  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 2023. — Т. 117, № 12. — С. 901–903. — DOI: 10.31857/S1234567823120054.
- A11. *Salnikov S. G., Milstein A. I.* Near-threshold resonance in  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$  process // Physical Review D. — 2023. — Vol. 108, no. 7. — P. L071505. — DOI: 10.1103/PhysRevD.108.L071505.
- A12. *Salnikov S. G., Bondar A. E., Milstein A. I.* Coupled channels and production of near-threshold  $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$  resonances in  $e^+e^-$  annihilation // Nuclear Physics A. — 2024. — Vol. 1041. — P. 122764. — DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2023.122764.
- A13. *Salnikov S. G., Milstein A. I.* Meson production in  $J/\psi$  decays and  $J/\psi \rightarrow N\bar{N}\gamma$  process // Nuclear Physics B. — 2024. — Vol. 1002. — P. 116539. — DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2024.116539.
- A14. *Salnikov S. G., Milstein A. I.* Production of  $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$  near the thresholds in  $e^+e^-$  annihilation // Physical Review D. — 2024. — Vol. 109, no. 11. — P. 114015. — DOI: 10.1103/PhysRevD.109.114015.

Сальников Сергей Георгиевич

**Припороговые резонансы  
в физике высоких энергий**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

---

Сдано в набор 19.02.2026.

Подписано в печать 20.02.2026.

Формат 60×90 1/16 Объём 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 3

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН  
*630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11*