

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Сальникова Сергея Георгиевича** “Припороговые резонансы в физике высоких энергий”, представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Актуальность исследования

Взаимодействия между частицами в конечном состоянии в процессах рассеяния или рождения стали предметом большого внимания, начиная с первых исследований πN -взаимодействия в реакциях $\gamma N \rightarrow \pi N$ и NN -взаимодействий в $\pi d \rightarrow NN\gamma$. Теоретические основы понимания взаимодействий в конечном состоянии были заложены Э. Ферми, К. М. Ватсоном, А. И. Базем, Р. Омнесом и др. в пятидесятые годы прошлого века. Первый обзор по взаимодействиям в конечном состоянии появился в 1964 году (J. Gillespie). К настоящему времени литература, касающаяся взаимодействий в конечном состоянии огромна. Всякий раз после модернизации или создания новых ускорителей и детекторов и открытия с их помощью новых процессов приходит и новая волна интереса к исследованиям взаимодействий в конечном состоянии. На новом уровне точности изучаются механизмы процессов и формы соответствующих спектров масс. Реально достижимая на современных установках огромная статистика данных позволяет существенно уточнить параметры теоретических моделей и произвести их отбор, а также эффективно продолжить начатые исследования тонких пороговых явлений, обусловленных взаимодействиями в конечном состоянии.

Диссертация С. Г. Сальникова посвящена развитию нового подхода к описанию взаимодействия между адронами в конечном состоянии. Обсуждается как общая идея метода, так и его применение ко многим конкретным процессам. 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. Автор применяет этот подход к описанию самых современных данных по припороговому поведению сечений рождения адронов в различных процессах, в частности, в процессе e^+e^- -аннигиляции. Работа была выполнена в Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук в Теоретическом Отделе, который является одним из ведущих мировых теоретических центров по физике высоких энергий и элементарных частиц. Результаты проделанной автором работы, составляющие материал диссертации, опубликованы в ведущих российских и международных научных журналах, докладывались на крупных международных конференциях, изданы в их трудах и уже хорошо известны физическому сообществу. Из всего сказанного выше следует, что тема диссертации **современна и актуальна.**

Достоверность исследования

Диссертация написана ясным языком. Изложение материала хорошо продумано. Тщательно изложены все этапы теоретических построений, используемых для объяснения результатов опытов. Полученные теоретические предсказания хорошо согласуются с данными экспериментов. Результаты диссертации опубликованы в ведущих международных научных журналах Ядерная физика, Physics Letters B, Physical Review D, Nuclear Physics A, Nuclear Physics B, Journal of High Energy Physics и в изданиях трудов международных конференций. Публикации проиндексированы в базах данных Web of Science и Scopus. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о **достоверности исследования** и **высокой степени обоснованности** научных результатов, представленных в диссертации.

Научная новизна работы

В целом диссертация С. Г. Сальникова представляет собой существенный законченный этап исследований в области теоретической физики элементарных частиц, имеющий **научную ценность**. В ней получены **оригинальные результаты**, находящиеся на современном **мировом уровне** и определяющие этот уровень. В диссертации автор продемонстрировал владение всем современным арсеналом методов теоретической квантовой физики в области высоких энергий, направленных на всестороннее изучение широкого круга явлений наблюдаемых вблизи порогов реакций. Автором развит **новый 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. В работе также предложен способ учёта влияния взаимодействия между виртуальными адронами в промежуточном состоянии на сечения процессов с рождением лёгких мезонов.

Диссертация Сергея Георгиевича Сальникова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Представленные в ней рисунки и таблицы наглядно иллюстрируют результаты сравнения проведённых автором расчётов с экспериментальными данными, а также полученные им предсказания.

Во Введении дана общая характеристика представленного диссертационного исследования, сформулированы его цели и задачи. Подробно говорится об актуальности, новизне и степени разработанности темы исследования, о предложенном в диссертации теоретическом подходе к проблеме взаимодействия адронов в конечном состоянии, о преимуществе выбранного подхода, о методологии и используемых методах исследования. Показана теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов, выносимых на защиту.

Первая глава. В начале автор в общих чертах формулирует свой взгляд на процесс рождения адронной пары вблизи порога реакции и далее переходит к рассмотрению влияния взаимодействия в конечном состоянии на амплитуду некоторого процесса с рождением пары бесспиновых адронов в состоянии с относительным орбитальным моментом L . Рассмотрение ведётся на языке квантовомеханических волновых функций для взаимодействующих адронов. В результате в разделе 1.1 представлен общий вид коэффициента \mathcal{F}_L , ответственного

за усиление сечения за счёт взаимодействия в конечном состоянии. Далее в разделе 1.2 рассматриваются процессы другого рода, в которых сначала рождается пара виртуальных адронов в промежуточном состоянии, а затем происходит аннигиляция этих адронов в другие частицы. Взаимодействие между адронами в промежуточном состоянии сильно влияет на зависимость сечения таких неупругих процессов от энергии. Здесь результатом является удобная и важная для дальнейшего формула, связывающая полное сечение процесса рождения пары адронов с мнимой частью функции Грина уравнения Шрёдингера с оптическим потенциалом $V(r)$. В разделе 1.3 в качестве простейшего примера взаимодействия между адронами автор рассматривает потенциал в виде прямоугольной ямы. Отмечается, что подобные простые модели зачастую неплохо описывают экспериментальные данные. В этой модели получены конкретные выражения для фактора \mathcal{F}_L и парциального сечения рождения пары адронов с моментом L , подробно описаны случаи как упругого, так и неупругого рождения пары адронов в состояниях с $L = 0$ и 1 . Построение формализма для исследования более реального и более сложного случая нескольких связанных между собой каналов реакции осуществлено в разделе 1.4. Для теоретического описания соответствующих процессов вблизи порогов важно учитывать все доступные каналы реакции и возможные переходы между ними. Нетривиальные зависимости сечений от энергии здесь наглядно продемонстрированы для случаев двух и трёх связанных каналов. Таким образом в главе 1 полностью подготовлен физический и математический аппарат, используя который автор в последующих главах даёт объяснения припороговым резонансным эффектам взаимодействия адронов, обнаруженным на опыте в целом ряде конкретных процессов.

Вторая глава посвящена процессам аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ и $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$. Анализ начинается в разделе 2.1 с процесса $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$, который является наиболее простым с теоретической точки зрения. Имеющиеся экспериментальные данные прямо указывают на то, что для правильного теоретического описания энергетической зависимости сечения $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ вблизи порога необходимо учитывать сильное взаимодействие Λ -частиц в конечном состоянии. Для простоты вычислений вещественный потенциал взаимодействия $V(r)$ выбирается в виде прямоугольной ямы. Такая параметризация оказывается вполне достаточной для хорошего описания экспериментальных данных по энергетической зависимости сечения за счёт коэффициента усиления $|\mathcal{F}_0|^2$. В модели имеются три свободных параметра: глубина ямы V_0 , её ширина a и общая нормировочная константа связи g . Они определяются путём подгонки теоретической зависимости сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ от энергии к экспериментальным данным с использованием критерия χ^2 . В результате получено хорошее описание данных.

В разделе 2.2 описывается процесс $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$, в котором также наблюдаются эффекты, связанные с взаимодействием в конечном состоянии. Автор обращает внимание на важные отличия от рассмотренного ранее случая реакции $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$, связанные с зарядом Λ_c -бариона и существенным отличием от единицы отношения его электромагнитных формфакторов G_E и G_M вблизи порога. Последнее указывает на необходимость учёта не только амплитуды рождения состояний $\Lambda_c\bar{\Lambda}_c$ с орбитальным моментом $L = 0$, но и вклада состояний с $L = 2$. Поэтому следующий подраздел 2.2.1 автор посвящает подробной теоретической разработке формализма для описанию взаимодействия в конечном состоянии с учётом смешивания состояний

с разными орбитальными моментами. Смешивание возникает за счёт действия между барионами так называемых тензорных сил. И именно оно обеспечивает отличие от единицы отношения электромагнитных формфакторов G_E/G_M вблизи порога. После построения теории взаимодействия в конечном состоянии с учётом тензорных сил автор переходит в подразделе 2.2.2 непосредственно к описанию экспериментальных данных для процесса $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c \bar{\Lambda}_c$. Свободными параметрами модели являются радиусы и глубины потенциальных ям, а также затравочный S -волновой формфактор G_S , определяющий общую нормировку сечения. В результате подгонки параметров получено очень хорошее описание данных по сечению реакции $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c \bar{\Lambda}_c$, абсолютным величинам электромагнитных формфакторов $|G_E|$ и $|G_M|$ и их отношению $|G_E/G_M|$. Приводится также предсказание для зависимости от энергии фазы отношения этих формфакторов и указывается на важные особенности проявления кулоновского взаимодействия между заряженными Λ_c - и $\bar{\Lambda}_c$ -барионами, имеющими место при описании процесса $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c \bar{\Lambda}_c$. Кроме того, модель предсказывает существование связанного состояния $\Lambda_c \bar{\Lambda}_c$ при энергии около 40 МэВ ниже порога, что соответствует массе этого состояния ≈ 4530 МэВ. В целом глава производит сильное впечатление.

Третья глава посвящена описанию нуклон-антинуклонного взаимодействия в рамках рассматриваемого подхода. Эффекты, связанные с $N\bar{N}$ -взаимодействием как в конечном, так и в промежуточном состоянии, видны на опыте во многих процессах. В подразделах 3.1.1 и 3.1.2 подготовлены формулы для описания сечений рождения $p\bar{p}$ и $n\bar{n}$ в e^+e^- -аннигиляции и сечений нуклон-антинуклонного рассеяния соответственно. Показано, что теоретическое описание $N\bar{N}$ -взаимодействия устроено значительно сложнее, чем описание взаимодействия $\Lambda\bar{\Lambda}$ и $\Lambda_c\bar{\Lambda}_c$. В подразделе 3.1.3 представлена адекватная модель $N\bar{N}$ -взаимодействия и с её помощью проведено описание экспериментальных данных. Параметры модели (т.е. глубины и радиусы короткодействующих оптических потенциалов, а также комплексные коэффициенты, определяющие амплитуды вероятности рождения $N\bar{N}$ -пары на малых расстояниях) подбирались так, чтобы наилучшим образом описать имеющиеся экспериментальные данные, полученные при изучении нуклон-антинуклонного рассеяния и процессов рождения нуклон-антинуклонных пар в e^+e^- -аннигиляции. Здесь автором представлены впечатляющие результаты описания данных. Рисунки 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 последовательно иллюстрируют сравнение предсказаний модели для парциальных сечений нуклон-антинуклонного рассеяния с результатами анализа, проведённого неймегенской группой, зависимость от энергии сечений рождения $p\bar{p}$ и $n\bar{n}$ в e^+e^- -аннигиляции, зависимость от энергии электромагнитных формфакторов протона и нейтрона и зависимость от энергии их отношений, а также предсказания для зависимости от энергии фаз отношений электромагнитных формфакторов протона и нейтрона.

Эффекты нуклон-антинуклонного взаимодействия проявляются не только в процессах с прямым рождением нуклон-антинуклонных пар. Например, в процессах рождения ряда мезонных состояний в электрон-позитронной аннигиляции наблюдалось характерное резкое падение сечений на пороге рождения нуклон-антинуклонных пар. В разделе 3.2 показано, что естественное количественное объяснение подобным эффектам, наблюдаемым в реакциях $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$, $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-\pi^0)$ и $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$, даёт взаимодействие виртуальных нуклон-антинуклонных пар в промежуточном состоянии в канале с изотопическим

спином $I = 1$, рассчитанное в рамках развитого автором модельного подхода.

В Четвёртой главе речь идёт о проявлении нуклон-антинуклонного взаимодействия в распадах J/ψ - и $\psi(2S)$ -мезонов. А именно, было экспериментально 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 $2M_p$. Поскольку эта область инвариантных масс соответствует малым относительным скоростям протона и антипротона, естественным объяснением усиления вероятностей распадов является упругое нуклон-антинуклонное взаимодействие в конечном состоянии. Использование простейшего представления потенциалов $N-\bar{N}$ -взаимодействия в каждом изоспиновом канале в виде прямоугольной ямы позволяет получить аналитические выражения для волновых функций нуклон-антинуклонной пары, а значит и для вероятностей распада ψ -мезона в различные конечные состояния. Рисунки 4.1 и 4.2 в разделе 4.1 показывают, что модель хорошо воспроизводит неймегенские парциальные сечения нуклон-антинуклонного рассеяния и распределения по инвариантной массе $p\bar{p}$, наблюдаемые в распадах $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\gamma$, $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\gamma$ и $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\omega$. В пункте 4.2 обсуждаются распады $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'\pi^+\pi^-$ и $J/\psi \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)\gamma$, в которых наблюдаются нетривиальные распределения по инвариантным массам $\eta'\pi^+\pi^-$ и $3(\pi^+\pi^-)$ -систем в области $N\bar{N}$ -порогов. Автор показывает, что представленная им простая модель неупругого нуклон-антинуклонного взаимодействия в промежуточном состоянии с суммарным спином нуклона и антинуклона $S = 0$ и $L = 0$ позволяет довольно хорошо описать имеющиеся данные по указанным неупругим процессам.

В разделе 4.3 исследуются распады $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$ и $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\eta)$. Оказалось, что в этих распадах ψ -мезонов с рождением протон-антипротонной пары необходимо учитывать как смешанные $p\bar{p}$ -состояния ${}^3S_1 - {}^3D_1$ (которые уже были рассмотрены в разделе 3.1), так и состояния 1P_1 . После получения формул для дифференциальных вероятностей распада ψ -мезона по инвариантной массе $p\bar{p}$ -пары и углам вылета протона и псевдоскалярного мезона и выбора параметризации для нуклон-антинуклонного взаимодействия в канале 1P_1 , автор проводит подробное сравнение модели со всеми имеющимися данными. Главный результат анализа состоит в том, что для описания спектров обсуждаемых распадов ψ -мезонов необходимо учесть существенный вклад состояний, соответствующих рождению пары $p\bar{p}$ с квантовыми числами $S = 0$ и $L = 1$. Из графиков на рисунке 4.6 видно, что в рамках рассматриваемой модели уже при инвариантной массе $p\bar{p}$ -пары, превышающей пороговое значение на 50 МэВ, P -состояния дают доминирующий вклад в вероятности распадов $J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0$, $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ и $\psi(2S) \rightarrow p\bar{p}\eta$. Обсуждаются также предсказания модели для угловых распределений в рассматриваемых распадах ψ -мезонов.

Пятая глава посвящена изучению нетривиальных зависимостей сечений процессов $e^+e^- \rightarrow D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ и $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ от энергии, наблюдаемых вблизи их порогов. В разделе 5.1 рассматривается взаимодействие в конечном состоянии во всех шести связанных между собой $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ -каналах в реакциях $e^+e^- \rightarrow D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$. В качестве простой параметризации потенциалов изоскалярного и изовекторного обменов, которые содержат всю информацию о взаимодействии в системе $D^{(*)}$ -мезонов, автор использует прямоугольные ямы. При этом анализ показывает, что возможность аннигиляции пар $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ в другие

состояния не существенна для рассматриваемой задачи, т.е. все потенциалы можно считать вещественными. Одновременный учёт всех вкладов в потенциал взаимодействия (как диагональных, так и недиагональных) оказался важным для получения хорошего описания имеющихся экспериментальных данных, демонстрирующих весьма сложную зависимость от энергии сечений реакций $e^+e^- \rightarrow (D^0\bar{D}^0, D^{*0}\bar{D}^0, D^{*0}\bar{D}^{*0}, D^+D^-, D^+D^{*-}, D^{*+}\bar{D}^{*-})$. Интересно, что такой яркий объект в сечении рождения $D\bar{D}$, как резонанс $\psi(3770)$, в используемом подходе возникает из-за наличия виртуального уровня в системе взаимодействующих D -мезонов в данной многоканальной задаче. В разделе 5.2 описываются процессы рождения $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ в e^+e^- -аннигиляции. Характерной особенностью поведения суммарного сечения $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ является то, что наблюдаются глубокие провалы на порогах рождения $B^*\bar{B}$ и $B^*\bar{B}^*$. Автор показывает, что такие провалы возникают из-за возможности переходов между состояниями $B\bar{B}$, $B^*\bar{B}$ и $B^*\bar{B}^*$. Благодаря этому в сечениях проявляется интерференция нескольких амплитуд, что и приводит к их нетривиальной зависимости от энергии. Известный резонанс $\Upsilon(4S)$ (подобно резонансу $\psi(3770)$) также возникает в рассматриваемой модели из-за наличия виртуального уровня в системе взаимодействующих B -мезонов в данной многоканальной задаче.

Рассматривая заряженные и нейтральные $B^{(*)}$ -мезоны как разные частицы с отличающимися массами и слегка разными потенциалами взаимодействия (за счёт кулоновских сил), возможно предсказать некоторые эффекты, связанные с нарушением изотопической инвариантности, что автор и делает в подразделе 5.2.1. В частности, обращается внимание экспериментаторов на то, что 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 содержит краткие формулировки девяти основных результатов, полученных в диссертационной работе.

Подводя итог, скажу, что каких-то принципиальных замечаний по физике дела у меня нет. Здесь всё хорошо. Работа представляет собой современное важное нацеленное на перспективу научное исследование, результаты которого востребованы физическим сообществом. Отмечу лишь, что в разделе 2.1 можно было бы для сравнения привести результат расчёта сечения $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ с использованием решения Омнеса для формфактора Λ -гиперона, а в разделах 3.2 и 4.2 обсудить возможный вклад интерференции механизма $N\bar{N}$ -аннигиляции с другими плавными амплитудами. Указанные замечания не влияют на научную значимость результатов, полученных в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях, соответствующих списку ВАК РФ, они хорошо известны специалистам в области физики высоких энергий как теоретикам, так и экспериментаторам, и докладывались автором на международных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Сальникова Сергея Георгиевича является законченной научной работой, она соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства

Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, и её автор, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Я, Шестаков Георгий Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Сальникова Сергея Георгиевича, и их дальнейшую обработку.

Отзыв предоставил официальный оппонент
Шестаков Георгий Николаевич,

 Г. Н. Шестаков

доктор физико-математических наук, специальность
01.04.0.2 — Теоретическая физика, доцент,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения
Российской академии наук, ведущий научный сотрудник
Лаборатории теоретической физики,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 4,
телефон: 8(383)3297612, e-mail: shestako@math.nsc.ru
21 апреля 2026 г.

Подпись Г. Н. Шестакова заверяю
Учёный секретарь ИМ СО РАН

кандидат физико-математических наук
21 апреля 2026 г.



Н. А. Даурцева

