

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Аушева Тагира Абдул-Хамидовича

на диссертационную работу

Сальникова Сергея Георгиевича

«Припороговые резонансы в физике высоких энергий»,

представленную в диссертационный совет 24.1.162.03 на базе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

на соискание учёной степени доктора физико-математических наук

по специальности 1.3.3. Теоретическая физика

Актуальность темы исследования

Диссертация С.Г. Сальникова посвящена теоретическому исследованию резонансной зависимости сечений различных процессов с рождением пары адронов вблизи порогов. Благодаря развитию экспериментальных возможностей в последние годы было детально изучено множество подобных процессов, таких как $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$, $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$, $e^+e^- \rightarrow D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$, $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ и многих другие. Выяснилось, что зависимость от энергии сечений этих процессов вблизи порогов зачастую имеет нетривиальный вид, выражающийся в наличии нескольких резонансных пиков либо чрезвычайно быстром росте сечений. В диссертационной работе показано, что подобные особенности поведения сечений могут быть объяснены взаимодействием между адронами в конечном состоянии.

В работе С.Г. Сальникова был развит новый подход к описанию взаимодействия между медленными адронами в конечном состоянии. Этот подход основан на параметризации потенциала взаимодействия между адронами и решении уравнения Шрёдингера в координатном представлении. Благодаря этому удаётся совместить наглядность полученных результатов с относительной простотой учёта различных эффектов, таких как кулоновское взаимодействие, тензорные силы, различие масс частиц. В работе продемонстрированы некоторые общие закономерности, которым подчиняются сечения процессов при наличии мелких либо виртуальных уровней в потенциале взаимодействия адронов. Кроме того, в диссертации рассмотрены конкретные процессы электрон-позитронной аннигиляции в пару адронов, а также некоторые распады J/ψ и $\psi(2S)$ мезонов с рождением протон-антипротонной пары, и показано, что предложенные модели взаимодействия хорошо описывают экспериментальные данные.

В связи с важностью рассмотренных в диссертации вопросов её **актуальность** не вызывает сомнений.

Практическая значимость полученных результатов

В диссертационной работе на многих примерах показана важность учёта взаимодействия в конечном состоянии при описании сечений процессов с рождением пары адронов вблизи порога. Развита новая методика расчёта эффектов взаимодействия в конечном состоянии, основанная на решении системы уравнений Шрёдингера в координатном представлении. Такой подход является наглядным, а также удобен при рассмотрении сложных

многоканальных задач. Во всех изученных в работе процессах взаимодействие между адронами в конечном состоянии объясняет наблюдаемую в экспериментах резкую припороговую зависимость сечений от энергии. В работе также предложен способ учёта влияния взаимодействия между виртуальными адронами в промежуточном состоянии на сечения процессов с рождением лёгких мезонов. Разработанные в диссертационной работе идеи могут быть использованы в дальнейшем при изучении различных процессов в физике элементарных частиц.

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

Всё это свидетельствует о большой **практической значимости** диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы

В диссертационной работе развит новый последовательный подход к учёту взаимодействия между медленными адронами в конечном или промежуточном состояниях. Применение данного подхода ко многим процессам позволило автору получить важные и актуальные результаты. Так впервые была предложена модель нуклон-антинуклонного взаимодействия, учитывающая как тензорные силы, так и нарушение изотопической инвариантности, которая хорошо описывает наблюдаемые зависимости сечений процессов $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ и $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$ от энергии вблизи порогов. В работе впервые удалось описать резкое падение сечений процессов $e^+e^- \rightarrow \pi\pi$ и $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ вблизи порога рождения нуклон-антинуклонных пар, связанное с влиянием взаимодействия между виртуальными нуклоном и антинуклоном в промежуточном состоянии. Впервые было изучено взаимодействие между $B^{(*)}$ и $\bar{B}^{(*)}$ мезонами, а также $D^{(*)}$ и $\bar{D}^{(*)}$ мезонами с учётом переходов между разными каналами, и была показана важность учёта этого взаимодействия для описания сечений рождения соответствующих пар мезонов вблизи порогов.

Эти и другие полученные в диссертационной работе результаты подтверждают её **новизну**.

Достоверность исследования

Диссертация хорошо написана, материал изложен достаточно подробно и продуманно. Полученные в работе теоретические предсказания хорошо согласуются с экспериментальными данными. Результаты диссертации были опубликованы во многих ведущих международных журналах, таких как Nuclear Physics A, Physics Letters B, Physical Review D, Journal of High Energy Physics и других. Некоторые из результатов докладывались на международных конференциях. Всё это говорит о **достоверности** проведённого исследования.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. 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 подробно описан предлагаемый автором подход к вычислению эффектов взаимодействия в конечном состоянии. Дан вывод основных формул как для одноканальных, так и для многоканальных задач, а также на примере некоторых типичных потенциалов взаимодействия продемонстрированы особенности зависимости сечений от энергии, которые могут проявляться и в реальных процессах.

Вторая глава посвящена описанию процессов $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ и $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c\bar{\Lambda}_c$. На этих простейших для теоретического рассмотрения примерах показана важность учёта взаимодействия в конечном состоянии для правильного описания экспериментальных данных. В этой главе также приведены формулы, с помощью которых учитывается тензорное взаимодействие между Λ_c -барионами. Это взаимодействие необходимо для описания зависимости отношения электромагнитных формфакторов бариона от энергии.

В третьей главе изучено нуклон-antinуклонное взаимодействие в конечном состоянии в процессах $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ и $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$. Характерной особенностью зависимости сечений этих процессов от энергии является чрезвычайно быстрый рост сечения вблизи порога. Предложенная в работе модель нуклон-antinуклонного взаимодействия успешно объясняет этот эффект, а также описывает зависимости от энергии отношения электромагнитных формфакторов для протона и для нейтрона. Кроме того, в работе показано, что взаимодействие виртуальных нуклона и антинуклона в промежуточном состоянии может приводить к сильной зависимости от энергии сечений процессов с рождением лёгких мезонов вблизи порога рождения реальной нуклон-antinуклонной пары. Этот эффект позволил объяснить наблюдаемое в экспериментах поведение сечений процессов $e^+e^- \rightarrow 6\pi$ и $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$.

В четвёртой главе рассмотрены распады J/ψ и $\psi(2S)$ мезонов на $p\bar{p}$ пару и фотон, псевдоскалярный мезон (π, η) или векторный мезон (ω). Здесь учёт взаимодействия между нуклоном и антинуклоном также позволяет объяснить наблюдаемые в этих распадах распределения по инвариантной массе $p\bar{p}$.

Пятая глава посвящена изучению процессов $e^+e^- \rightarrow D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ и $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$. Особенностью этих процессов является возможность рождения нескольких различных конечных состояний с ненулевыми амплитудами перехода между ними. Поскольку пороги рождения всех конечных состояний в этих процессах достаточно близки друг к другу, для описания взаимодействия между мезонами в конечном состоянии необходимо решать многоканальную задачу. В диссертации показано, что именно наличие переходов между разными каналами приводит к нетривиальной зависимости сечений этих процессов от энергии.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

К замечаниям можно отнести отсутствие анализа применимости результатов работы для будущего эксперимента Super Tau-Charm Factory (STCF). Работа посвящена взаимодействию адронов в конечном состоянии вблизи порогов рождения, что является одной из ключевых задач физической программы проектируемого STCF. Однако в тексте отсутствует явное обсуждение того, какие именно из полученных результатов могут быть верифицированы или уточнены на STCF. Полученные в диссертации зависимости сечений от энергии вблизи порогов могли бы также служить дополнительным фактором для выбора оптимальных точек сканирования по энергии на STCF.

Разумеется, указанные замечания никак не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертационная работа «Припороговые резонансы в физике высоких энергий» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор Сальников Сергей Георгиевич, безусловно, **заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук** по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Я, Аушев Тагир Абдул-Хамидович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Сальникова Сергея Георгиевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Аушев Тагир Абдул-Хамидович

Профессор, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.23 — физика высоких энергий,

главный научный сотрудник,

Международная межправительственная научно-исследовательская организация

Объединённый институт ядерных исследований,

адрес: 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

тел.: +7 (496) 216-53-06

эл. почта: tagir.aushev@gmail.com

Аушев Тагир Абдул-Хамидович

22 мая 2026 г.

Подпись Т.А.-Х. Аушева заверяю

Учёный секретарь ЛФВЭ ОИЯИ

Чеплаков Александр Павлович

