

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **РУДЕНКО Александра Сергеевича** «ФОРМФАКТОРЫ  $f_1(1285)$  МЕЗОНА И АСИММЕТРИЯ В  $e^+e^-$ -АННИГИЛЯЦИИ И РАСПАДАХ ЧАСТИЦ», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Поиск явлений и процессов в физике элементарных частиц, выходящих за рамки Стандартной Модели (СМ), является одним из магистральных направлений в этой науке. Возникающие здесь теоретические проблемы сложны, поскольку возможные новые явления зачастую могут происходить на фоне в определённом смысле «обычных» процессов. Их теоретические оценки совершенно необходимы для выделения явлений «новой физики». Это тем более необходимо для задач в области низких и промежуточных энергий, где методы квантовой хромодинамики, основанные на теории возмущений по константе связи, не работают. Требуется подход, в котором непертурбативные эффекты учитываются эффективным способом, основанном на требованиях фундаментальных симметрий теории, таких как лоренц- и калибровочная инвариантность, изотопическая симметрия и т.д. Динамика же задачи сводится к нахождению формфакторов, которые и включают в себя детали сильных и электромагнитных взаимодействий элементарных частиц и их структуру. Диссертационная работа А.С. Руденко посвящена теоретическому анализу импульсных корреляций в редких распадах нейтральных К-мезонов, построению формфакторов и вычислению сечений рождения  $f_1(1285)$ -мезона в различных реакциях, расчёту вероятностей его сильных и электромагнитных распадов, анализу поляризационных свойств рождения в  $e^+e^-$ -аннигиляции состояния  $\Lambda\bar{\Lambda}$  и его слабого распада. Она находится в русле исследований элементарных частиц как на имеющихся установках, так и на планируемых к вводу в ближайшем будущем. Поэтому **актуальность выбранной темы** диссертации не вызывает сомнения.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста и заключения. Во введении обосновывается актуальности темы, даётся обзор современного состояния исследований, относящихся к теме работы, формулируются цели диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 проведён расчёт Т-нечётных импульсных корреляций в распадах  $K^0 \rightarrow \pi^- l^+ \nu_l \gamma$ , где  $l = e, \mu$ , обусловленных электромагнитным взаимодействием в конечном состоянии. Они возникают за счёт интерференции главного вклада и мнимой части петлевой поправки к нему. Мнимая часть однозначно рассчитывается по соотношению унитарности интегрированием по реальным промежуточным состояниям. Полученные в результате расчёта выражения позволили вычислить асимметрию вылета

конечного фотона по отношению к плоскости, в которой лежат импульсы конечных заряженных частиц. Поскольку расчёт асимметрии приближённый, с учётом вкладов  $\omega^{-1}$  и  $\omega^0$  по энергии фотона  $\omega$ , дана оценка отброшенных вкладов и установлена точность вычисления асимметрии.

В главах 2, 3 и 4 рассматриваются вопросы динамики рождения и распада аксиально-векторного С-чётного мезона  $f_1(1285)$ . Глава 2 посвящена расчёту ширины лептонного распада  $f_1(1285) \rightarrow e^+e^-$  и вычислению сечения обратного процесса рождения этого мезона в  $e^+e^-$ -аннигиляции. Параметризовав инвариантные формфакторы в вершинах петлевой диаграммы с двумя виртуальными фотонами в рамках модели векторной доминантности и установив необходимые ограничения на константы связи из данных по распадам  $f_1(1285) \rightarrow 2\pi^+2\pi^-, \rho^0\gamma$ , автор получил предсказания для лептонной ширины и сечения реакции прямого рождения  $e^+e^- \rightarrow f_1(1285)$ . Значения этих величин зависят от неизвестной относительной фазы комплексных констант связи, варьируя которую он вывел консервативные интервалы изменения измеряемых величин.

В главе 3 на основе полученных в главе 2 оценках констант связи вычислена зарядовая асимметрия в реакции  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ , возникающая благодаря интерференции С-нечётного изовекторного вклада  $e^+e^- \rightarrow \rho + \rho' \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  и изучаемого С-чётного процесса  $e^+e^- \rightarrow f_1(1285) \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ . Были получены ограничения на величину асимметрии в зависимости от относительной фазы комбинации комплексных констант связи, которые показали, что асимметрия может достигать 10%.

В главе 4 проведено обобщение изученной в главе 2 модели для формфакторов  $f_1(1285)\gamma^*\gamma^*$ , оказавшейся недостаточной для объяснения экспериментальных результатов LEP по двойному электророждению в реакции  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-f_1(1285)$ . За счёт введения мотивированного квантовой хромодинамикой дополнительного подавления формфакторов автору удалось объяснить данные LEP по этой реакции. Существенно, что и результаты измерений лептонной ширины распада  $f_1(1285)$ -мезона и сечения его прямого рождения в  $e^+e^-$ -аннигиляции также подтвердили расчёты в рамках нового согласованного выражения для формфакторов. В этой же главе получены оценки ширин распадов  $f_1(1285) \rightarrow \rho^0\pi^+\pi^-$  и  $f_1(1285) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ , в пределах ошибок согласующиеся с экспериментом.

В главе 5 решена задача вычисления угловых распределений в реакции  $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow [\Lambda \rightarrow \rho\pi^-][\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{\rho}\pi^+]$  в случае продольно поляризованных начальных электронов. Это позволило автору рассчитать лево-правую асимметрию с учётом поляризации и показать, что интересная информация, в частности, об эффективном угле Вайнберга, может быть получена в экспериментах без регистрации конечного анти-лямбда гиперона.

Изучение диссертационной работы показало, что А.С. Руденко выполнил серьёзное теоретическое исследование динамики рождения и распада С-чётного аксиально-векторного мезона  $f_1(1285)$  и произвёл расчёты асимметрий различных физических процессов, необходимых для

получения информации о справедливости Стандартной Модели физики элементарных частиц. Впервые, ещё до проведения соответствующих экспериментов, были рассчитаны лептонная ширина распада  $f_1$ -мезона и сечение его прямого рождения в  $e^+e^-$ -аннигиляции. Предложенное новое выражение для формфакторов позволило в рамках единой модели описать ряд свойств этого мезона, впервые были вычислены асимметрии вылета конечных продуктов в распадах  $K^0 \rightarrow \pi^- l^+ \nu_l \gamma$  и в реакции рождения лямбда-антилямбда пары в  $e^+e^-$ -аннигиляции. Это доказывает **новизну полученных в диссертации результатов**. Её практическая ценность обусловлена фактом использования проведённых расчётов для анализа экспериментальных данных по прямому рождению  $f_1$ -мезона в  $e^+e^-$ -аннигиляции и возможному применению в программах работы будущей супер-С-тау фабрики. **Обоснованность научных положений диссертации** подтверждается тем, что в теоретическом анализе амплитуд физических процессов распада использовалась техника построения эффективных амплитуд, основанная на фундаментальных принципах симметрии физики элементарных частиц. **Достоверность результатов, полученных в диссертации**, не вызывает сомнения, поскольку рассчитанные автором характеристики физических процессов оказались в согласии с проведёнными впоследствии экспериментами на коллайдере ВЭПП-2000. В той части, где возможно сопоставление, результаты диссертации не противоречат вычислениям независимых групп исследователей. На каждом этапе была оценена теоретическая погрешность проведённых вычислений.

Работа написана хорошо, результаты представлены с разумной краткостью. Необходимые детали вычислений могут быть восстановлены по журнальным публикациям автора, на которые даны ссылки. Вместе с тем уместно сделать ряд замечаний по способу представления материала. Так, в выражениях для эффективных амплитуд (2.4) и (2.7)держаны произведения 4-векторов поляризации на «свои» 4-импульсы, очевидно равные нулю, тогда как не выписаны аналогичные произведения на «чужие» 4-импульсы. В разделе 2.5 автору стоило бы обсудить как вычислялась вероятность распада  $f_1(1285) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ . Именно, учитывались ли все диаграммы с перестановками импульсов тождественных пионов с последующим интегрированием по фазовому объёму четырёх пионов, учитывалась ли конечная ширина  $\rho^0$ -мезонов с помощью введения Брейт-Вигнеровской функции или же ответ был получен в приближении нулевой ширины промежуточных  $\rho^0$ -мезонов? На рис. 2.6 следовало бы привести также и результат экспериментального измерения ширины распада  $f_1(1285) \rightarrow e^+e^-$ , выполненного на детекторе СНД. Разумеется, эти замечания не ставят под сомнения корректность решения поставленных задач в рамках сформулированных моделей и предположений и не умаляют мнения о высоком качестве и важности работы, представленной в диссертации. Имеющиеся ссылки на работы, на которых она основана, показывают, что практические результаты диссертации в должной мере оценены коллективом

экспериментаторов, изучающих рождение векторных и аксиальных мезонов в  $e^+e^-$ -аннигиляции.

Учитывая актуальность избранной темы, обоснованность основных научных положений диссертации, новизну и достоверность полученных результатов, их своевременную публикацию в ведущих рецензируемых международных журналах, соответствующих списку ВАК, можно заключить, что рассматриваемая работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор А.С. Руденко заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв составлен 5 сентября 2020 г.

Официальный оппонент

доктор физико-математических

А.А. Кожевников

Ведущий научный сотрудник лаборатории  
теоретической физики Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Институт математики им. С.Л. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект ак. Коптюга, 4  
телефон: +7 (383) 329-75-19; e-mail: kozhev@math.nsc.ru

Подпись А.А. Кожевникова заверяю.  
к.ф.-м.н.

И.Е. Светов

Учёный секретарь Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институт математики им. С.Л. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук,

