

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Дорохова Александра Евгеньевича о диссертации **Козырева Евгения Анатольевича** на тему «Изучение процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ и $\gamma^*\gamma^*\rightarrow\eta'(958)$ в эксперименте BABAR» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Эксперимент с детектором BABAR на коллайдере PEP-II (SLAC, США) проводил набор данных в период 1999–2008 годов и оказал вплоть до настоящего времени решающее влияние на развитие Стандартной Модели и поиску физики вне Стандартной Модели. Были измерены с высокой точностью сечения в реакциях $e^+e^- \rightarrow pp$, $\pi^+\pi^-, K^+K^-, \pi^+\pi^- J/\psi, \pi^+\pi^- \psi_2s$ и многих других, найдены новые резонансы в системах с тяжелыми кварками. Отметим, что сечение реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ является базовым для вычисления вклада поляризации адронного вакуума в аномальные магнитные моменты лептонов, которые на сегодня являются самыми перспективными низкоэнергетическими величинами, используемыми для проверки Стандартной Модели. В диссертации Е.А. Козырева изучен другой важный процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, который также используется для вычисления вклада поляризации адронного вакуума в аномальные магнитные моменты лептонов, и кроме того для проверки гипотезы о сохранении векторного тока. Второй процесс $\gamma^*\gamma^*\rightarrow\eta'(958)$, рассмотренный в диссертации, связан с экспериментальным изучением переходных формфакторов псевдоскалярных мезонов. Эти формфакторы при больших виртуальностях фотонов напрямую связаны с предсказаниями из первых принципов квантовой хромодинамики (КХД), а при меньших виртуальностях дают представление о нетривиальном переходе в непертурбативную область сильных взаимодействий. Детальное исследование такого рода процессов является фундаментальной проблемой для изучения основ Стандартной Модели, так и для более глубокого понимания природы сильных взаимодействий. Кроме того, изучение переходных формфакторов важно для развития методов КХД на решетке, правил сумм КХД,夸ковых моделей и других подходов. Все это позволяет заключить, что тема диссертационной работы является **актуальной**.

Научная новизна проведенных исследований не вызывает сомнений. Основным результатом является измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$. Ранее этот процесс в области энергий в системе центра масс $E_{c.m.} = 1.15\text{--}3.00$ ГэВ изучался в экспериментах DM-2, CMD-2, CMD-3, SND, а также BABAR в других модах распада η -мезона, но точность этих результатов была ниже, чем в представленной диссертации. В диапазоне энергий $E_{c.m.} = 3.00\text{--}3.50$ ГэВ сечение измерено впервые. Другой важный результат по измерению переходного формфактора в дважды виртуальной области получен впервые и поэтому имеет особо важное значение.

Достоверность измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ подтверждается тем, что полученные результаты согласуются с измерениями, выполненными в предыдущих экспериментах DM-2, CMD-2, CMD-3, SND и BABAR в определенной кинематической области. Достоверность измерения переходного формфактора η' -мезона в дважды виртуальной области с помощью реакции $\gamma^*\gamma^*\rightarrow\eta'$, выполненного впервые, подтверждается соответствием полученного результата с предсказаниями вычислений в КХД.

Научная и практическая ценность результатов работы обусловлена значимостью прецизионных измерений для физики элементарных частиц. Полученные данные по сечению e^+e^- используются для определения параметров резонансов $\rho(1450)$, $\rho(1700)$ и $\rho(2230)$, улучшения точности вычисления адронного вклада за счет перехода $\gamma^*\rightarrow\pi^+\pi^-\eta$ в поляризацию вакуума и проверки гипотезы о сохранении векторного тока, а также позволяют улучшить среднемировую точность значения вероятности распада $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$. Измерения переходного формфактора процесса $\gamma^*\gamma^*\rightarrow\eta'(958)$ демонстрируют справедливость предсказаний КХД. Результаты работы по измерению сечений процесса

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ и $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ используются в различных научных центрах в России и за рубежом.

Объем диссертационной работы составляет 111 страниц, включая 80 рисунков и 14 таблиц. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы, включающего 81 наименование.

Во введении дан обзор текущего состояния исследований по теме диссертационной работы, обоснована актуальность и значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, а также приведен список конференций, на которых представлены материалы диссертации.

В первой главе дано краткое описание эксперимента с детектором *BABAR* на асимметричном электрон-позитронном коллайдере PEP-II, выполненного в Стэнфордском центре линейных ускорителей (США). Сформулированы физические задачи эксперимента, приведены сведения об основных системах асимметричного коллайдера PEP-II и детектора *BABAR*. Материал этой главы носит обзорный характер, который хорошо известен специалистам из публикаций коллаборации *BABAR*.

Вторая глава посвящена изучению процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ методом ISR (initial state radiation). Подробно изложены методика ISR, моделирование и отбор сигнальных событий. Детально изучены систематические неопределенности, связанные с процедурой вычитания фона, условиями отбора, определения светимости, нахождения эффективности регистрации исследуемого процесса, включающую реконструкцию ISR фотона, треков, процессов $\pi^0, \eta \rightarrow 2\gamma$. Суммарная неопределенность в сечении составляет 4.5% в области инвариантных масс $1.35 < m_{\pi^+\pi^-\eta} < 1.8 \text{ ГэВ}/c^2$.

Основные физические результаты, полученные на эксперименте для данного процесса при использовании представленной методики, изложены во второй части второй главы. Получены значения сечения изучаемой реакции в диапазоне $E_{c.m.}=1.15\text{--}3.5 \text{ ГэВ}$ (таблица 7 и рисунки 46,50). В диапазоне энергий 1.5–2.0 ГэВ профиль сечения носит "лестничный" характер, что связано с интерференцией промежуточных состояний $\rho(770), \rho(1450), \rho(1700)$ и вышележащих резонансов. Полученные результаты в целом согласуются с другими измерениями и при этом обладают лучшей точностью. Определены произведения брэнчинга на электронную ширину, константы связи и другие параметры ρ -резонансов.

Для количественной проверки гипотезы о сохранении векторного тока было проведено сравнение экспериментального значения относительной вероятности распада $B(\tau^- \rightarrow \rho^{(\prime)}-\nu_\tau \rightarrow \pi^-\pi^0 \eta \nu_\tau)$ с величиной, определенной по теоретической формуле. Показано, что в настоящее время точность величины $B(\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^0 \eta \nu_\tau)$, полученное из прямых измерений и CVC предсказаний, недостаточна для надежного наблюдения их различия, которое может быть обусловлено, например, эффектами нарушения изоспиновой симметрии.

Из полученных результатов по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, определен вклад перехода $\gamma^* \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ в величину вклада поляризации адронного вакуума в аномальный магнитный момент мюона a_μ (формула (2.22)). Найденное значение согласуется с величиной, определенной ранее в работе [M. Davier, 2011], и имеет лучшую точность.

По спектру сигнальных событий в области массы J/ψ вычислено произведение электронной ширины и вероятности распада J/ψ и определено значение вероятности распада $B(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta)$ (формула (2.24)), которое превосходит по точности предыдущее измерение *BABAR*, и вероятности распада $B(J/\psi \rightarrow \rho(770)\eta)$ (формула (2.26)).

В третьей главе с помощью экспериментальных данных по реакции $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ извлечен переходный формфактор η' -мезона в дважды виртуальной области. Дано определение переходного формфактора для псевдоскалярных мезонов и приведена формула (3.8), выведенная в КХД и справедливая в области больших виртуальностей

фотонов. При этом чтобы эффективно моделировать события, реконструируемые детектором, Монте Карло моделирование сигнального процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta'$ выполняется с требованием $Q^2_{e^-}(Q^2_{e^+}) > 2 \text{ ГэВ}^2$. В моделировании учитываются радиационные поправки к борновскому сечению в главном и следующем за главным приближениях. Для реконструкции η' -мезона используется цепочка распада $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\eta \rightarrow \pi^+\pi^-2\gamma$. Все отобранные события были разделены на пять областей в плоскости $Q^2_{e^-}$ и $Q^2_{e^+}$. Показано, что модельная неопределенность настоящего измерения связана с зависимостью от выбора модели для ПФФ, в значительной степени минимизируется, потому что значения ПФФ находятся как отношение сечений в эксперименте и моделировании. Окончательные результаты приведены в Таблице 11 и на Рисунке 79. Полученные результаты также приведены в сравнении с предсказаниями КХД и модели векторной доминантности. Сделано важное заключение, что экспериментальные данные свидетельствуют в пользу КХД предсказаний и не поддерживают предсказания по наивной модели векторной доминантности.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в работе.

В целом диссертация написана подробно, ясно, хорошо проиллюстрирована рисунками и таблицами. Для результатов измерений проводится систематическое сравнение с известными теоретическими оценками и экспериментальными результатами. К тексту диссертации имеется ряд **замечаний**, в качестве которых можно отметить следующие:

1. При обсуждении результатов на Рис. 61, во-первых, при меньших виртуальностях более важными становятся степенные поправки. За счет этих поправок, в области малых Q^2 неопределенность теоретических предсказаний (желтая полоса на Рис. 61) должна расширяться, а не сужаться.
2. Сравнение данных по ПФФ с наивной моделью векторной доминантности выглядит немного архаично. В настоящее время известно модельное описание ПФФ из работы [Knecht,Nyffeler Phys Rev D65 (2002)] и других, которое более реалистично для обработки экспериментальных данных.
3. В Заключении было бы желательно определить перспективы как развития экспериментов по извлечению ПФФ псевдоскалярных мезонов (в том числе на Супер С-Тай фабрике в Новосибирске), так и продолжения теоретических исследований.
4. Модельная неопределенность в электронной ширине $\rho(1700)$ оценивается в работе как 100%. Однако не предприняты попытки уменьшить данную неопределенность, например, с помощью привлечения других экспериментальных данных.
5. Некоторые важные ссылки нуждаются в обновлении, например, M. Davier Eur.Phys.J. 80 (2020) 241; Particle Data Group, Phys. Rev.D98 (2018) 030001. Важной для понимания связи измеренных переходных формфакторов псевдоскалярных мезонов и амплитудами распределений мезонов являются работы A.E. Dorokhov JETP Lett 92 (2010) 707; Nucl.Phys.B Proc. 225-227 (2012) 141.
6. В тексте диссертации встречаются опечатки, например, в выражениях (3.24), (3.27) нижняя статистическая ошибка указана со знаком “+” вместо “-”. На стр. 58 стоит «качественно» вместо «качественном». В ссылке [70] вместо «Kaptaria» надо “Kaptari”

Отмеченные недостатки не влияют на значимость результатов, описанных в диссертации.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи. Работы, на основании которых написана диссертация, широко цитируются в научной литературе. Результаты диссертации могут быть использованы при

анализе ведущихся и планировании будущих экспериментов как в российских ИЯФ (Новосибирск), ОИЯИ (Дубна), так и в зарубежных научных центрах физики высоких энергий.

Представленная диссертационная работа Козыревым Е. А. «Изучение процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ и $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \eta'$ (958) в эксперименте BABAR» является законченным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических и критериям, установленным в пункте 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор Евгений Анатольевич Козырев, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник сектора №5
Научного отдела теории фундаментальных взаимодействий
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований
Дорохов Александр Евгеньевич

М.Е. Дорохов

Контактные данные:
тел.: +7(49621) 6-27-30, e-mail: dorokhov@theor.jinr.ru
Специальность, по которой защищена диссертация:
01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:
141980, Россия, Московская обл., г. Дубна, ул Жолио-Кюри, д. 6,
Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова

