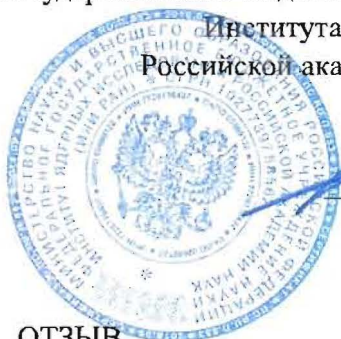


УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора по науке
федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований
Российской академии наук (ИЯИ РАН)
доктор физ.-мат. наук



А.В.Фещенко
01 сентября 2020 г

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук на диссертационную работу Козырева Евгения Анатольевича "Изучение процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ и $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \eta'(958)$ в эксперименте BABAR", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертация Е.А.Козырева посвящена измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ в диапазоне энергий $E_{c.m.}=1.15-3.50$ ГэВ и измерению переходного формфактора $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \eta'(958)$ при виртуальностях фотонов $q^2_1, q^2_2 < 0$. История исследований реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ с различными дальнейшими модами распада η -мезона уходит далеко в прошлое с непрерывной тенденцией увеличения точности. На момент публикации диссертации результат, выдвинутый на защиту, имел наибольшую мировую статистику в моде распада $\eta \rightarrow 2\gamma$. Активное изучение реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ связано с тем, что ее сечение составляет около 5% от полного сечения e^+e^- в адроны при $E_{c.m.}=1.5$ ГэВ, поэтому ее прецизионное экспериментальное измерение позволит уточнить вычисление адронного вклада в поляризацию вакуума в диапазоне энергии 1.15–3.5 ГэВ. Этот вклад нужно учитывать при расчете аномального магнитного момента мюона и значения бегущей константы электромагнитного взаимодействия на массе Z -бозона. Также исследуемый процесс играет ключевую роль в определении параметров таких резонансов, как $\rho(1450)$, $\rho(1700)$ и более высоких возбужденных состояний. Следует отметить, что в диапазоне энергий $E_{c.m.}=3.00-3.50$ ГэВ сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ измерено впервые.

Вторая часть диссертации посвящена измерению переходного формфактора псевдоскалярного η' -мезона. Рассмотрение процесса $\gamma^*\gamma^* \rightarrow \eta'(958)$ в рамках КХД на основе факторизационной теоремы было разбито на два этапа. Первый этап, "жесткий", поддается расчету на основе теории возмущений и состоит в конвертации пары фотонов в кварк-антикварковую пару. Вторым этапом, "мягким", отвечает за адронизацию кварков и их переход в конечное состояние — η' -мезон. Особенностью данной работы является то, что в рассматриваемом диапазоне виртуальностей квадрат амплитуды реакции можно считать нечувствительным к амплитуде "мягкого" этапа на уровне статистических ошибок. То есть сравнение экспериментальных данных с теорией служит проверкой теоремы о факторизации. Таким образом, фундаментальная

значимость полученных в диссертации результатов и актуальность исследований не вызывают никаких сомнений. Также следует отметить тот факт, что на этапах проектирования эксперимента BABAR и начального набора данных не предполагалось исследование процессов, рассмотренных в диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор предыдущих экспериментов, формулируются цель, научная новизна и возможные области применения результатов.

В первой главе дается обзор эксперимента BABAR. Подробно описаны основные задачи эксперимента, экспериментальная установка, начиная от ускорительного комплекса и заканчивая описанием элементов детектора для регистрации сигнальных и фоновых событий. Также особое внимание уделено описанию аппаратных триггеров для набора данных, используемых для изучения процессов, рассматриваемых в диссертации.

Вторая глава содержит подробное описание анализа процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, используя метод радиационного возврата. В начале главы описан метод измерения исследуемого процесса и получено конечное выражение для вычисления сечения в рамках конкретного анализа, из которого явно видно какие величины необходимо экспериментально измерить для получения конечного результата. Рассмотрены основные источники фона и детально описаны методы моделирования фоновых процессов, начиная с уровня генератора событий и заканчивая откликом детектора. Отдельное внимание уделено моделированию сигнальных событий. Структура и уровень фона сильно зависят от массы системы $\pi^+\pi^-\eta$, поэтому анализ был разделен на две кинематические области. Определены критерии отбора исследуемого процесса для каждой области. Показано каким образом примененные критерии отбора снижают уровень фона и определена их эффективность. Описаны методы нормировки и вычитания фона для получения чистых сигнальных событий. Значительная часть главы посвящена изучению систематических ошибок, связанных с эффективностями реконструкции треков и нейтральных частиц. После измерения всех необходимых значений вычислено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ и приведено сравнение полученного результата с результатами предыдущих экспериментов. Обсуждается модельная неопределенность в вычислении эффективности регистрации в связи с отличием спектров двухпионной инвариантной массы для экспериментальных событий и моделирования сигнала. Показана систематическая неопределенность сечения. Дана количественная проверка гипотезы о сохранении векторного тока. Используя полученные результаты по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, определен вклад перехода $\gamma^* \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ в расчет величины адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона. Также улучшена точность предыдущего измерения вероятности распада $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$.

В третьей главе рассказывается об измерении переходного формфактора $\gamma^*\gamma^*\rightarrow\eta'(958)$ в дважды виртуальной области с помощью реакции $e^+e^-\rightarrow e^+e^-\eta'(958)$, где все частицы в конечном состоянии регистрируются в детекторе. Первая часть главы посвящена теоретическим представлениям исследуемого переходного формфактора. Далее описываются методы моделирования сигнальных двухфотонных событий, описаны необходимые критерии отбора таких событий. Рассмотрены механизмы основных фоновых процессов. После детального изучения каждого источника фона сделан вывод, что суммарный фон пренебрежимо мал. Изучена эффективность критериев отбора и их систематическая ошибка. В результате измерено сечение процесса $e^+e^-\rightarrow e^+e^-\eta'$ и определен переходный формфактор. Приводятся систематические неопределенности измерений. Обсуждается модельная неопределенность, связанная с различными моделями переходного формфактора.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научная новизна предоставленных в диссертационной работе результатов связана, во-первых, с проведением более точных измерений сечения процесса $e^+e^-\rightarrow\pi^+\pi^-\eta$ в диапазоне энергий $E_{c.m.}=1.15\text{--}3.50$ ГэВ, а во-вторых, с первыми в мире измерениями сечения процесса $e^+e^-\rightarrow\pi^+\pi^-\eta$ в диапазоне энергий $E_{c.m.}=3.00\text{--}3.50$ ГэВ и переходного формфактора псевдоскалярного мезона в дважды виртуальной области с помощью реакции $e^+e^-\rightarrow e^+e^-\eta'(958)$ при регистрации конечного электрона и позитрона.

Научная и практическая значимость диссертации связана с высокой точностью измерений, позволяющей улучшить некоторые среднемировые величины (сечение процесса $e^+e^-\rightarrow\pi^+\pi^-\eta$ и широким диапазоне энергий, вероятность распада $J/\psi\rightarrow\pi^+\pi^-\eta$), улучшить точность вычислений адронного вклада перехода $\gamma^*\rightarrow\pi^+\pi^-\eta$ в поляризацию вакуума и проверки гипотезы о сохранении векторного тока. Результаты, полученные в диссертационной работе также могут быть использованы для определения параметров резонансов $\rho(1450)$, $\rho(1700)$, $\rho(2230)$.

Работа выполнена автором в составе международной коллаборации BABAR, однако все изложенные результаты получены им лично либо при его определяющем вкладе.

По представленной диссертации можно сделать ряд замечаний:

1. В главе 1.2 указано, что используется асимметричный e^+e^- коллайдер, однако нет четкого объяснения необходимости использования именно асимметричных пучков.
2. На рис.12 видно, что смоделированное распределение не совпадает с экспериментальными данными не только в области малых энергий фотонов, но и для любой энергии. Однако несоответствие объяснено только для малых энергий. Также неясно как делалась нормировка для смоделированных событий, чтобы сравнивать их с данными.
3. На странице 26 указано, что для различных областей анализа применяется различное условие на χ^2_{dof} , но отсутствует определение этого параметра. В дальнейшем этот параметр также активно используется.
4. В целом по ходу диссертации упоминается множество генераторов моделирования сигнальных и фоновых событий, но нет четкого объяснения почему нужны

различные генераторы событий для разных процессов, почему нельзя генерировать их с помощью одного пакета?

Сделанные замечания не являются принципиальными и не снижают ценность представленной автором работы. Диссертационная работа Козырева Евгения Анатольевича представляет собой полноценное оригинальное исследование, посвященное решению актуальной задачи физики элементарных частиц. В результате работы были получены новые фундаментальные результаты. Заявленные и поставленные цели достигнуты. Представленные результаты были лично доложены автором на международных и российских семинарах и конференциях. Практически полное отсутствие опечаток облегчает восприятие и демонстрирует ответственное отношение диссертанта к работе.

Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Козырева Евгения Анатольевича является законченным научным исследованием, в котором получены новые фундаментальные результаты, и отвечает требованиям п. 9 “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Козырев Евгений Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв на диссертацию подготовил:

кандидат физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник ИЯИ РАН А. Шайхиев – Шайхиев Артур Тагирович
телефон +7(495)850-42-47
Адрес электронной почты: shaykhiev@inr.ru

Диссертационная работа заслушана на научном семинаре Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН 8 июля 2020 года. Отзыв на диссертацию одобрен на заседании Ученого совета Отдела физики высоких энергий ИЯИ РАН 08.07 2020 г., протокол № 3.

Секретарь Ученого совета
ОФВЭ ИЯИ РАН
кандидат физ.-мат. наук, с.н.с. М.М. Хабибуллин Хабибуллин М.М.

Контакты ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

Адрес: 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а

Телефон: 8(499)135-77-60, 8(495)850-42-00

Адрес электронной почты: inr@inr.ru

<http://www.inr.ru/>