

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ботова Александра Анатольевича “Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  в области энергии от 1.34 до 2.00 ГэВ”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

### Актуальность исследования

Диссертация Ботова Александра Анатольевича посвящена измерению сечения реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  в области энергии от 1.34 до 2.00 ГэВ и составляющих её сечений рождения мезонных пар  $\omega\eta$ ,  $\phi\eta$ ,  $a_0\rho$  и бесструктурной (nres)  $\pi^+\pi^-\pi^0\eta$ -системы, проведённому с помощью сферического нейтрального детектора (СНД) на ускорительном комплексе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики имени Г.И. Буддера в городе Новосибирске. Измерение сечений эксклюзивных процессов  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны является одним из основных источников информации о семействах  $C$ -нечётных векторных мезонов. В данной работе исследуются свойства и определяются параметры возбуждённых векторных изоскалярных мезонов  $\omega(1650)$  и  $\phi(1680)$ , представляющих принципиальный интерес для кварковой модели и многочисленных её феноменологических приложений.

В диссертации А.А. Ботова представлены результаты, которые определяют мировой уровень экспериментальных данных по сечению реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  — оно измерено с наилучшей в мире точностью — и по сечениям составляющих его подпроцессов. Автором создано программное обеспечение для работы с электронной первичного триггера детектора СНД и для моделирования первичного триггера. Следует подчеркнуть, что это уже улучшило проведение большого числа экспериментов с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000. Такую же ценную практическую роль играет разработанное автором программное обеспечение для учёта наложений на физические события фоновых срабатываний детектора от частиц, выбывающих из пучков коллайдера, на физические события.

Об основных результатах работы её автор докладывал на целом ряде международных конференций, труды которых изданы в периодических научных изданиях. Из всего сказанного выше следует, что тема диссертации современна и актуальна.

### Достоверность исследования

В диссертации изложены все этапы получения данных по реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  и составляющим её подпроцессам с помощью детектора СНД на  $e^+e^-$ -коллайдере ВЭПП-2000. Главное внимание удалено описанию созданного автором нового программного обеспечения для работы с первичным триггером детектора СНД и программы добавления к моделированию пучкового фона, анализу источников систематических ошибок и их оценкам, подробному анализу результатов измерений с помощью феноменологических моделей и сравнению полученных данных по сечениям с измерениями других групп. Диссертация написана ясным языком. Изложение хорошо продумано. Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, таких как *Physical Review D* и *Nuclear Instruments and Methods A*. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о **достоверности исследования и высокой степени обоснованности** научных результатов, представленных в диссертации.

## Научная новизна работы

В целом диссертация А.А. Ботова представляет собой существенный законченный этап исследований в области экспериментальной физики, 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 экспериментальной физики высоких энергий, направленных на всестороннее изучение процессов  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Она хорошо иллюстрирована графиками, демонстрирующими результаты измерений, и снабжена полезными таблицами с данными.

Во **Введении** обосновывается важность и актуальность новых измерений сечений  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны в области энергий до 2-х ГэВ. Поясняется роль коллайдера ВЭПП-2000 в современном сообществе ускорительных лабораторий. Даётся краткий обзор всех предыдущих и недавних измерений реакций  $e^+e^-$ -аннигиляции в многочастичные адронные конечные состояния с участием  $\eta$ -мезона. Обращается внимание на сложную внутреннюю структуру этих состояний и обсуждается информация, которую можно извлечь из их анализа. Описывается содержание глав, формулируется цель диссертации и основные результаты, которые выносятся на её защиту.

В начале **первой главы** рассказывается об ускорительном комплексе ВЭПП-2000. Приводятся данные о  $e^+e^-$ -пучках, светимости и способах контроля и калибровки энергии коллайдера. Далее описывается модифицированный универсальный сферический немагнитный детектор СНД. Так как при изучении процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  основную роль играют электромагнитный калориметр и трековая система, то эти составляющие детектора, их характеристики, а также предназначения дрейфовой и пропорциональной камер, автор описывает особенно детально. В заключение этой главы приводятся сведения о наборе статистики с помощью детектора СНД в интервале энергий, доступных коллайдеру ВЭПП-2000.

Во **второй главе** подробно описывается система аппаратного отбора событий — устройство так называемого первичного триггера (ПТ) детектора СНД. В связи с модернизацией электроники детектора была фактически полностью переделана часть ПТ, связанная с обработкой информации о срабатываниях трековой системы, изменения коснулись и калориметрической части триггера, был также произведён переход на новое программное обеспечение. Автором диссертации были написаны новые программы для конфигурирования электроники ПТ и моделирования его работы. Сначала описан пакет программ для работы с конфигурацией, включающий программы для её создания и загрузки в базу данных, для её извлечения из базы данных и загрузки в электронику. Затем описана суть программ моделирования ПТ, важных для корректного определения эффективности регистрации событий, отбираемых с помощью систем, составляющих Сферический нейтральный детектор. В конце главы приведён пример конфигурации триггера, использованной при записи экспериментальных данных, по которым проводился анализ реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$ , и представлены графики эффективности срабатывания ПТ для моделевых событий до и после применения условий отбора.

**Третья глава** посвящена учёту фоновых событий от частиц, выбывающих из пучков коллайдера и искажающих отклик систем детектора на полезные события.

Согласно оценке, вероятность наложения “ложного” трека на событие от изучаемых физических процессов составляет  $\sim 10\%$ . Автор отмечает, что игнорирование в моделировании учёта таких наложений может привести к существенной ошибке в определении эффективности регистрации, и, как следствие, к систематической ошибке в итоговых результатах. Чтобы избежать этого, Александром Анатольевичем была написана новая программа для учёта фоновых событий в моделировании. Немаловажным является также добавление в систему запуска для фоновых событий синхронизации внешнего генератора с моментом столкновения пучков. В тексте главы последовательно объясняется, каким образом реализуется идея учёта наложения фоновых срабатываний на моделированные (полезные) срабатывания в калориметре, дрейфовой и пропорциональной камерах, в мюонной системе и в черенковских счётчиках. Далее исключительно положительные результаты новой программы наглядно иллюстрируются сравнениями экспериментальных данных по реакциям  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  и  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  с результатами моделирования с учётом наложений и без них. Приведено также сравнение моделированного энерговыделения в калориметре и эффективности регистрации с наложениями и без них для событий процесса  $e^+e^- \rightarrow p\bar{n}$  при энергии 1.9 ГэВ. Глава производит цельное впечатление.

Самая большая **четвёртая глава** диссертации посвящена изучению процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  с распадом  $\pi^0/\eta \rightarrow \gamma\gamma$  и составляющих его четырёх подпроцессов, различающихся промежуточными состояниями,  $e^+e^- \rightarrow \omega\eta \rightarrow 3\pi\eta$ ,  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta \rightarrow 3\pi\eta$ ,  $e^+e^- \rightarrow a_0\rho \rightarrow 3\pi\eta$ ,  $e^+e^- \rightarrow n_{res} \rightarrow 3\pi\eta$ , динамика каждого из которых представляет самостоятельный интерес. Измеренное сечение  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  при энергии в районе 1.7 ГэВ достигает примерно 5 нбн, что составляет заметную часть ( $\sim 8\%$ ) от полного адронного сечения. Здесь представлены данные о числе отобранных событий, интегральной светимости, эффективности регистрации, и подробно описаны формулы, использованные для моделирования указанных четырёх подпроцессов и основного фонового процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ . Значения масс и ширин резонансов, использованные при моделирование, брались из данных Particle Data Group (PDG). Среди них, пожалуй, наименее определённым является значение полной ширины  $a_0(980)$ -мезона ( $\Gamma_{a_0}$ ). PDG приводит для  $\Gamma_{a_0}$  интервал от 50 до 100 Мэв. В принципе, желательно было бы указать, какое именно значение  $\Gamma_{a_0}$  использовалось в работе. Кроме того,  $a_0(980)$  имеет существенную связь с  $K\bar{K}$ -каналом распада, что также могло бы быть включено в формулы, хотя и представленное эффективное описание  $a_0(980)$ -резонанса является вполне рабочим. Автор детально описывает условия отбора полезных событий и процедуру отделения их вклада от вклада фоновых процессов. Приводятся важные результаты работы: суммарное распределение экспериментальных событий по инвариантной массе двухфотонной пары — кандидата в  $\eta$ -мезон (рис. 4.5), аппроксимация спектров по массе  $\eta$ -мезона в 13 энергетических интервалах с определением числа событий рождения  $\eta$ -мезона (рис. 4.7–4.9), оценки систематических ошибок и данные о числе зарегистрированных событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$  и фоновых событий. Далее автор приступает к описанию разделения вкладов промежуточных состояний  $\omega\eta$ ,  $\phi\eta$ ,  $a_0\rho$  и бесструктурной  $\pi^+\pi^-\pi^0\eta$ -системы. Приводятся впечатляющие данные о спектрах по массе отдачи  $\eta$ -мезона в различных энергетических интервалах, на которых чётко проявляются пики от  $\omega$ - и  $\phi$ -резонансов. Наличие процесса  $e^+e^- \rightarrow a_0\rho \rightarrow 3\pi\eta$  подтверждается пиками в распределениях по инвариантным массам  $\eta\pi^0$ - и  $\eta\pi^\pm$ -систем, показанных на рис. 4.16. Отмечу, что как в данных, так и в моделирование прослеживается некоторое различие форм  $\eta\pi^0$ - и  $\eta\pi^\pm$ -спектров масс при ожидаемой для них на основе изотопической

инвариантности одинаковости в пределах ошибок. Представлены данные об эффективности регистрации, описание борновского сечения и его аппроксимация в модели векторной доминантности, параметры  $\omega(1650)$ - и  $\phi(1680)$ -резонансов, найденные из подгонок данных, и приведены итоговая таблица 4.3 и рис. 4.19(а)–4.19(г) с результатами измерений сечений всех изученных в диссертации процессов. Очень интересно найденное в данном эксперименте увеличение примерно на 30% отношения доли распада  $\phi(1680) \rightarrow \phi\eta$  к доли распада  $\phi(1680) \rightarrow K^*\bar{K} + c.c.$ , по сравнению с известным ранее.

**Заключение** содержит краткое перечисление основных результатов диссертации, для получения которых автором была проделана огромная работа по созданию нового программного обеспечения для детектора СНД и анализу процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$ . Здесь отмечается, что новое программное обеспечение для первичного триггера детектора СНД удовлетворяет необходимым требованиям и работает без сбоев, а пакет программ для учёта в моделировании фоновых срабатываний существенно улучшает согласие моделирования с экспериментом.

Я также хочу отметить несомненное практическое значение диссертации Александра Анатольевича. Разработанное им программное обеспечение для моделирования первичного триггера и учёта в моделировании фоновых срабатываний детектора от частиц, выбывающих из пучков коллайдера, используется сейчас во всех работах коллектива СНД по набору и анализу данных по реакциям  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны.

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

Таким образом, диссертация Ботова Александра Анатольевича является законченной научной работой, она удовлетворяет всем требованиям (п.9, 11, 14), которые предъявляет ВАК РФ к кандидатским диссертациям, и её автор безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент,  
доктор физ.-мат. наук, доцент  
лаборатория теоретической физики  
Института математики им. С.Л. Соболева  
Сибирского Отделения РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 4  
e-mail: shestako@math.nsc.ru  
телефон: 8(383)3297612

Отзыв Г.Н. Шестакова заверяю  
Учёный секретарь ИМ СО РАН  
кандидат физ.-мат. наук  
10 октября 2019 г.

*Шестаков Ю.Н.* Г.Н. Шестаков



И.Е. Светов