

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Иванова Вячеслава Львовича** “Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ с детектором КМД-3”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Актуальность исследования

Диссертация Иванова Вячеслава Львовича посвящена экспериментальному исследованию реакции $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ и разработке новой эффективной процедуры идентификации частиц, т.е. процедуры разделения электронов, мюонов, пионов и каонов, необходимой для проведения прецизионных измерений с помощью криогенного магнитного детектора КМД-3, установленного на ускорителе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики имени академика Г. И. Будкера в городе Новосибирске. Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Первая глава посвящена подробному изучению процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ с детектором КМД-3. Во второй главе представлен разработанный и реализованный автором метод идентификации заряженных частиц с использованием многослойного жидкоксенонового (LXe) калориметра детектора КМД-3.

Прецизионные измерения различных процессов e^+e^- -аннигиляции в адроны, в частности, реакции $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$, представляют большой интерес в связи с изучением их механизмов и природы рождающихся промежуточных состояний. Кроме того, прецизионные измерения эксклюзивных адронных сечений позволяют получить полное сечение e^+e^- -аннигиляции в адроны, необходимое для вычисления адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона $(g - 2)_\mu$ в рамках Стандартной Модели. Прецизионное измерение эксклюзивных адронных сечений, как правило, требует выделения достаточно чистого набора событий для каждого изучаемого процесса при помощи надёжного и эффективного способа идентификации частиц в конечном состоянии. Разработанная автором процедура идентификации частиц является первым успешным опытом создания подобной процедуры для частиц с импульсами до 1 ГэВ и с использованием ксенона в качестве рабочего вещества калориметра. Она стимулирует интерес к калориметрам подобного типа, ключевым достоинством которых является высокое координатное разрешение.

Результаты проделанной автором работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах ИЯФ СО РАН, а также на международных конференциях, 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 высокоточных данных по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ с помощью детектора КМД-3 на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000, их последующей аппроксимации и определения параметров ϕ' -мезона — главного промежуточного резонансного состояния в этой реакции. В диссертации

тщательно изложены также все этапы разработки и применения новой процедуры идентификации заряженных частиц с использованием LXe калориметра детектора КМД-3.

Диссертация написана ясным языком. Изложение материала хорошо продумано. Результаты диссертации опубликованы в ведущих международных рецензируемых научных журналах Physics Letters B и Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, входящих в список ВАК, и в трудах международных конференций. Все публикации проиндексированы в базе данных Scopus. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о **достоверности исследования и высокой степени обоснованности** научных результатов, представленных в диссертации.

Научная новизна работы

В целом диссертация В. Л. Иванова представляет собой существенный законченный этап исследований в области экспериментальной физики элементарных частиц, 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 эксклюзивных процессов e^+e^- -аннигиляции в адроны. Им развит **новый метод** идентификации частиц на основе информации об их энерговыделении во всех слоях LXe калориметра детектора КМД-3.

Как уже отмечалось выше, диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Представленные в ней рисунки и таблицы наглядно иллюстрируют результаты проведённых измерений и всю последовательность разработки и реализации процедуры идентификации заряженных частиц, предложенной автором.

Во **Введении** дана общая характеристика представленного диссертационного исследования, сформулированы его цели и задачи, указаны современные вычислительные методы, применяемые к задаче идентификации частиц, перечислены полученные автором научные результаты, выносимые на защиту.

Первая глава начинается с описания детектора КМД-3 и набранной статистики. Далее автор переходит непосредственно к изучению реакции $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$. Для того, чтобы измерить сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$, необходимо было выделить его события и определить эффективность их регистрации. В силу ограниченного акцептанса детектора эффективность сильно зависит от промежуточных механизмов реакции, определяющих импульсные и угловые распределения конечных частиц. Для того чтобы выявить эти механизмы, отбирались события $K^+K^-\eta$ в моде распада $\eta \rightarrow \gamma\gamma$. В качестве кандидатов в события процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ рассматривались события, имеющие ровно два так называемых “хороших” трека с противоположными зарядами. В результате анализа автор приходит к представляющему физический интерес выводу о доминантности промежуточного механизма $\phi\eta \rightarrow K^+K^-\eta$ в изучаемом процессе. Из моделирования следует, что основной фоновый вклад дает процесс $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$. На имеющейся статистике не наблюдается никаких выраженных резонансных структур в распределении по массе отдачи K^\pm для событий вблизи сигнального пика. Имеется также разумное согласие моделирования с теоретически предсказываемыми формами угловых распределений событий $e^+e^- \rightarrow \phi\eta \rightarrow K^+K^-\eta$ и с данными эксперимента. Так как в процессе $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ не наблюдается вклада каких-либо других промежуточных состояний, кроме $\phi\eta$,

автором был предложен и реализован инклюзивный подход к изучению процесса $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$, состоящий в рассмотрении η -мезона в качестве частицы отдачи, т.е. без реконструкции η в какой-либо моде распада. Далее автор переходит к описанию разделения сигнальных и фоновых событий с двумя противоположно заряженными каонами с помощью распределений по параметру ΔE , представляющему собою “дисбаланс” энергии в $K^+K^-\eta$ -событии. Такой способ разделения является весьма эффективным. Затем описывается вычисление эффективности регистрации событий изучаемого процесса. Находится специальная поправка к эффективности отбора конечного состояния $K^+K^-\eta$ для областей полярных углов вылета K^\pm -мезонов $\theta < 1.0$ и $\theta > \pi - 1.0$ рад. После этого автор приступает к вычислению и аппроксимации сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \phi\eta \rightarrow K^+K^-\eta$. Здесь выписаны все необходимые формулы для связи борновского сечения с видимым сечением и радиационной поправкой, а также с числом сигнальных событий, светимостью и эффективностью регистрации. Статистика сигнальных событий была набрана в области энергий e^+e^- -пучков в системе их центра масс от 1.594 ГэВ до 2.0066 ГэВ. Борновская амплитуда процесса $e^+e^- \rightarrow \phi\eta \rightarrow K^+K^-\eta$ аппроксимируется когерентной суммой вкладов от $\phi'(1680)$ -резонанса, являющегося главным источником $\phi\eta$ -событий, и от очень небольшого плавного фона. Окончательные результаты по измерению сечения $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ и определению параметров ϕ' -резонанса приведены в таблицах 1.1–1.4 и на рисунке 1.26. Они находятся в согласии с результатами предыдущих измерений, но имеют лучшую статистическую точность. В заключение этой главы проведён подробный анализ систематических ошибок и вычислен вклад в $(g-2)_\mu$ от процесса $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$.

Вторая глава диссертации посвящена идентификации заряженных частиц e^\pm , μ^\pm , π^\pm и K^\pm с помощью LXe калориметра детектора КМД-3. В качестве инструмента идентификации автор предложил использовать энерговыделение dE/dx_{LXe} , произведенное частицей в каждом слое LXe калориметра, нормированное на ожидаемую длину пролета d_{LXe} частицы в слое, оцениваемую через экстраполяцию трека частицы из дрейфовой камеры. Разработанная им процедура идентификации базируется на различии спектров dE/dx_{LXe} (т.е. зависимостей dE/dx_{LXe} от импульса) для различных типов частиц. Указанный метод идентификации частиц требует согласия спектров dE/dx_{LXe} в моделировании и эксперименте для всех типов частиц. Для достижения такого согласия требуется адекватное моделирование отклика полосковых каналов, а также процедура их калибровки с точностью $< 1\%$. Решению этих задач посвящены параграфы 2.3 и 2.4. Сначала описывается моделирование отклика полосковых каналов LXe калориметра на ионизацию. Здесь для приложения к случаю реальных катодов, в которых присутствуют зазоры в полосковой структуре, решена красивая вспомогательная электродинамическая задача. Затем приводится описание процедуры калибровки калориметра, то есть перевода его отклика на ионизацию, произведенную частицей, в термины энерговыделения, выраженного в мегаэлектронвольтах (МэВ). Процедура калибровки разбивается на три этапа: выравнивание амплитуд сигналов от полосок внутри каждого из семи слоев калориметра, выравнивание средних амплитуд сигналов от кластеров (представляющих собой объединения сигналов от групп сработавших полосок) и вычисление в каждом захвате так называемой цены канала. Далее речь идёт о настройке отклика полосковых каналов в моделировании для минимально ионизирующих частиц. Сравнение спектров dE/dx_{sum} для космики в эксперименте и моделировании указало на наличие уширения спектра в эксперименте. Для учета этого уширения в моделировании автор добавляет к амплитудам сигналов,

наведенных на полоски с обеих сторон катода, случайный гауссовский шум, амплитуда которого выбирается одинаковой во всех слоях. Этот метод позволяет смоделировать спектры dE/dx_{sum} для космики, согласующиеся с экспериментом. Здесь же находятся реальные значения коэффициентов прозрачности для всех катодов. После выравнивания положения пиков в dE/dx_{diff} в эксперименте и моделировании наблюдаемое относительное уширение спектров dE/dx_{diff} в эксперименте учитывается в моделировании похожим упомянутому выше методом — добавлением гауссовского шума к амплитудам, наведенным на верхние и нижние стороны полосок. Затем обсуждается настройка отклика для электромагнитных ливней, порождаемых в калориметре электронами и позитронами из процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Для этого случая расхождения между экспериментом и моделированием в спектрах dE/dx_{sum} устраняется путем простого линейного преобразования амплитуд в моделировании.

После калибровки полосок и настройки моделирования автор производит необходимое сравнение получающихся спектров откликов классификаторов (специально разработанных машинных программ, помогающих идентификации различных типов частиц) на события в эксперименте и моделировании. Такое сравнение спектров производится для: 1) e^\pm из процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, 2) μ^\pm из событий космики, 3) π^\pm из процесса $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ и 4) K^\pm из процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$. Для всех типов частиц наблюдается согласие моделирования с экспериментом. Разделение событий, отвечающих π - и K -мезонам, на основе dE/dx_{LXe} особенно важно при изучении адронных конечных состояний с K^\pm . Отмечается, что π/K -разделение по dE/dx_{LXe} оказывается достаточно эффективным в диапазоне импульсов от 650 МэВ до 900 МэВ, т.е. там, где разделение по dE/dx_{DC} (данным дрейфовой камеры) не работает.

Наконец, автор демонстрирует применение разработанной им процедуры идентификации на примерах разделения конечных состояний $e^+e^-(\gamma)$ и $\pi^+\pi^-(\gamma)$ при энергиях $E_{\text{с.м.}} < m_\phi$ и отборе конечного состояния K^+K^- при $E_{\text{с.м.}}$ в области 2 ГэВ. Подчеркивается, что при энергиях в с.ц.м. выше 1.5 ГэВ измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ с КМД-3 возможно исключительно с использованием идентификации по dE/dx_{LXe} .

В **Заключении** перечислены основные результаты данной работы по изучению процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ и разработке процедуры идентификации заряженных частиц с использованием LXe калориметра детектора КМД-3. Указаны перспективы обоих направлений исследований. Так, развитие методики идентификации частиц с LXe калориметром детектора КМД-3 может заключаться в создании единой системы идентификации, использующей информацию с других подсистем детектора: дрейфовой камеры, CsI калориметра, мюонной системы. Помимо этого, в связи с разрабатываемым в настоящее время в ИЯФ СО РАН проектом детектора Супер Чарм-Тау Фабрики рекомендуется изучить возможность и целесообразность использования в последнем ионизационного калориметра на основе сжиженного благородного газа по типу LXe калориметра детектора КМД-3.

Подводя итог, скажу, что каких-то принципиальных замечаний по физике дела у меня нет. Здесь всё хорошо. Работа представляет собой современное важное нацеленное на перспективу научное исследование. В принципе, для удобства чтения такой большой и сложной работы было бы полезно расположить на отдельной странице список сокращений, которые эффективно используются в тексте, вместе с их расшифровками.

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 международных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Иванова Вячеслава Львовича является законченной научной работой, она соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, и её автор, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Я, Шестаков Георгий Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Иванова Вячеслава Львовича, и их дальнейшую обработку.

Отзыв предоставил официальный оппонент

Шестаков Георгий Николаевич,

 Г. Н. Шестаков

доктор физико-математических наук, специальность
01.04.0.2 — Теоретическая физика, доцент,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения
Российской академии наук, ведущий научный сотрудник
Лаборатории теоретической физики,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 4,
телефон: 8(383)3297612, e-mail: shestako@math.nsc.ru

19 апреля 2023 г.

Подпись Г. Н. Шестакова заверяю

Учёный секретарь ИМ СО РАН
кандидат физико-математических наук

19 апреля 2023 г.





Н. А. Даурцева