

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Белобородова Константина Ивановича “Изучение процессов $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ и $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ на детекторе СНД”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Актуальность исследования

Диссертация Белобородова Константина Ивановича посвящена экспериментальным исследованиям механизмов рождения пар заряженных и нейтральных K -мезонов в реакциях $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ и $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$, проведённым с помощью сферического нейтрального детектора (СНД) на ускорительных комплексах со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М и ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера в городе Новосибирске. Исследования сечений эксклюзивных процессов e^+e^- аннигиляции в адроны является одним из основных источников информации о C -нечётных векторных мезонных резонансах. На основе полученных данных возможно выяснить механизмы их рождения и взаимодействия друг с другом, узнать их массы, а также сильные и электромагнитные ширины распадов в связанные каналы. Современный уровень подобных исследований отличает высокое качество данных, которое обеспечивается высокой статистикой событий реакций — производительностью ускорителя, и возможностями их надёжной детальной обработки — чувствительностью детектора. Современные экспериментальные исследования отдельных реакций встраиваются в общий огромный комплекс влияющих друг на друга физических исследований. В диссертации К.И. Белобородова представлены результаты, которые определяют мировой уровень экспериментальных данных по реакциям $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ и $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$, а также результат первого измерения энергетической зависимости неупругой ядерной длины K_L -мезона при низких энергиях. Каждый из этих результатов нацелен на перспективу. Разработанные для их получения методики будут непосредственно применяться в новых экспериментах с детектором СНД на установке ВЭПП-2000. Более того, данные по длине неупругого ядерного взаимодействия K_L -мезона уже используются для настройки программ моделирования в экспериментах на ВЭПП-2000.

Об основных результатах работы её автор докладывал на российских и международных конференциях. Из всего сказанного выше следует, что тема диссертации современна и **актуальна**.

Достоверность исследования

В диссертации изложены все этапы получения данных по реакциям $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ и $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ с помощью детектора СНД на e^+e^- -коллайдерах ВЭПП-2М и ВЭПП-2000. Главное внимание уделено описанию способов выделения и реконструкции полезных событий, критериям их отбора, способам отделения фоновых процессов, процедуре определения борновских сечений, анализу источников систематических ошибок и их оценкам, описанию данных с помощью феноменологических моделей и сравнению с результатами измерений других экспериментов. Диссертацию приятно читать. Она написана ясным языком. Изложение чётко продумано. Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, таких как

Журнал экспериментальной и теоретической физики, Physical Review и Journal of Instrumentation. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о **достоверности исследования** и **высокой степени обоснованности** научных результатов, представленных в диссертации.

Научная новизна работы

В целом диссертация К.И. Белобородова 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 зрелое владение всем **современным** арсеналом методов экспериментальной физики высоких энергий, направленных на изучение процессов e^+e^- аннигиляции в адроны.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она хорошо иллюстрирована и снабжена полезными таблицами данных.

Во **Введении** описывается, с чем в настоящее время связан интерес к экспериментам со встречными электрон-позитронными пучками в области энергий до 2-х ГэВ. Дается краткий обзор всех предыдущих и недавних измерений реакций $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ и $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$, описывается содержания глав, формулируется цель диссертации и основные результаты, которые выносятся на её защиту.

В **первой главе** рассказывается об ускорительных комплексах ВЭПП-2М и ВЭПП-2000 и их основных характеристиках.

Во **второй главе** дается описание детектора СНД во время его работы на ВЭПП-2М с 1995 по 2000 год. Здесь подробно описан электромагнитный калориметр детектора, играющий основную роль в анализе процесса $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ с распадом $K_S \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$. Подчеркнута высокая эффективность калориметра при регистрации многочастичных событий. Например, для шестифотонного события вероятность раздельной регистрации всех частиц события оказывается около 60%. Для работы на новом коллайдере ВЭПП-2000, сменившем ВЭПП-2М, детектор СНД был модифицирован в период с 2000 по 2008 год, после чего он фактически стал универсальным детектором, позволяющим хорошо идентифицировать фотоны и разделять заряженные пионы и каоны. Автор подробно описывает трековую систему и черенковский счётчик, установленные на модифицированном детекторе СНД, данные с которых принципиально важны для анализа процесса $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$. В конце этой главы дается обзор всех экспериментов с детектором СНД за время его работы на ВЭПП-2М, а также, кратко, экспериментов, проведённых с 2010 по 2013 год с помощью модифицированного детектора СНД на ВЭПП-2000. Приводится распределение интегральной светимости по энергии, накопленной детектором СНД за указанный период и дается её сравнение с эффективной светимостью, используемой в измерениях методом радиационного возврата в экспериментах на знаменитой установке BABAR в Стэнфорде (США). Из рис. 2.9 видно, что уровни светимости на СНД и BABAR соизмеримы. Указано также, на данных каких экспериментов с СНД основаны измерения сечений процессов $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$, $e^+e^- \rightarrow K^+ K^-$ и неупругой ядерной длины K_L -мезона.

Третья глава посвящена изучению процесса $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ в области энергий в системе центра масс e^+e^- от 1.04 до 1.38 ГэВ с помощью детектора СНД на ВЭПП-2М. Поскольку в этом опыте импульсы заряженных частиц не измерялись, то для наилучшего способа выделения событий процесса $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$, слабо зависящего

от взаимодействия K_L -мезона, использовался способ идентификации K_S -мезона по его нейтральной моде распада $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0 \rightarrow 4\gamma$. Автор подробно описывает процедуру отбора соответствующих событий их кинематическую реконструкцию, определение вкладов фоновых процессов, не содержащих K_S -мезонов, и анализ основного фонового процесса, содержащего K_S -мезон, т.е. процесса “возврата” на ϕ -мезон $e^+e^- \rightarrow \phi\gamma \rightarrow K_L K_S \gamma$, в котором фотон испускается начальными частицами. Для решения проблемы разделения процессов $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ и $e^+e^- \rightarrow K_L K_S \gamma$ был применён специальный способ аппроксимации данных по так называемому видимому сечению $\sigma_{vis,i}$. При этом потребовалось параметризация эффективности регистрации исследуемого процесса как функции двух кинематических переменных. В результате были определены (измерены) представляющие физический интерес значения борновского сечения реакции $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ вместе со значениями радиационной поправки и эффективности регистрации. Далее автор приводит подробные оценки возможных систематических ошибок, связанных с определениями светимости установки и эффективности регистрации, отделением фона и модельной зависимостью, обусловленной, в частности, некоторым произволом в выборе модели для описания энергетической зависимости борновского сечения. В заключении этой главы приводится наглядное сравнение полученных результатов по сечению реакции $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ с данными других экспериментов и описание поведения сечения $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ в зависимости от энергии в модели, в которой к резонансам ρ , ω и ϕ добавлен тяжёлый ϕ' -резонанс. Автор также отмечает, что сейчас ведётся анализ новых данных с большей статистикой, накопленной на детекторе СНД на ВЭПП-2000, с применением методики, развитой для измерения сечения $e^+e^- \rightarrow K_L K_S$ в эксперименте на ВЭПП-2М и описанной в этой главе. Глава производит цельное впечатление.

В **четвёртой главе** представлены результаты первого измерения энергетической зависимости λ_{in} — длины ядерного неупругого взаимодействия K_L -мезона с веществом калориметра СНД при низких энергиях и их сравнение с программами моделирования. Полученный здесь результат является важным. Благодаря ему выяснилось, что программа, используемая для моделирования детектора СНД на ВЭПП-2000, имеет завышенное сечение взаимодействия K_L -мезона с веществом детектора. А это сильно усложняет анализ процессов с нейтральными каонами в конечном состоянии. Поэтому в настоящее время ведётся установка новой версии программы моделирования, в которой модели ядерного взаимодействия были улучшены в согласии с результатами автора диссертации. Метод извлечения величины λ_{in} подробно описан. Детально проанализированы источники систематических погрешностей. Измеренную зависимость λ_{in} от энергии автор сравнил с выполненным им расчетом, в котором были использованы данные о полном сечении взаимодействия K_L с ядром бериллия (Be), полученные на ускорителе в Принстоне и на ВЭПП-2М с помощью криогенного магнитного детектора. Рисунок 4.9 наглядно показывает, что измеренная длина λ_{in} статистически согласуется с расчётом. Мне представляется, что здесь автор несколько поспешил на описание деталей проделанного им пересчёта данных по взаимодействию K_L Be на случай вещества NaI(Tl), используемого в калориметре детекторе СНД.

Пятая глава диссертации посвящена анализу процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ в области энергий в системе центра масс e^+e^- от 1.05 до 2.00 ГэВ с помощью детектора СНД на коллайдере ВЭПП-2000. Автор отмечает, что этот анализ является первой работой, использующей систему пороговых черенковских счётчиков, установленных на модифицированном детекторе СНД, и демонстрирующей её возможности для эф-

эффективного исследования процессов с участием заряженных каонов. Далее подробно описываются условия отбора полезных событий, оценки различного сорта фоновых вкладов, определение эффективности регистрации, определение борновского сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ и радиационной поправки. Последняя вычислялась при аппроксимации видимого сечения изучаемого процесса с использованием модели векторной доминантности. Результаты собраны в таблицы и представлены на рисунках. Для связи видимого и борновского сечений в главе 5 используется формула (5.3), см. стр. 94, вид которой несколько отличается от подобной формулы, приведённой ранее на стр. 50 в главе 3. Отмечу, что объяснение этого отличия в тексте опущено. После получения экспериментальных значений борновского сечения автор детально анализирует систематические погрешности. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ приведено на рис. 5.7. Здесь же для сравнения указаны данные эксперимента BABAR. Измерения СНД на ВЭПП-2000 находятся в согласии с результатами BABAR и имеют сравнимые с ними или лучшие точности. Отмечу, что новые данные СНД по реакции $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ уже цитируются в литературе в связи с анализом проблемы аномального магнитного момента мюона.

Заключение посвящено краткому перечислению основных результатов диссертации, для получения которых была проделана огромная работа, и перспективам их использования уже в ближайших новых опытах с детектором СНД на ускорителе ВЭПП-2000.

Следует отметить, что Константин Иванович является соавтором более ста работ, выполненных коллективом физиков, работающих на СНД. Первые физические результаты с детектора СНД на установке ВЭПП-2М были получены с его участием ещё в 1997 году.

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 российских и международных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Он очень хорошо написан.

Таким образом, диссертация Белобородова Константина Ивановича 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

24 апреля 2017 г.

Г.Н. Шестаков



И.Е. Светов