

ОТЗЫВ

официального оппонента А.А. Соколова на диссертацию

Логашенко Ивана Борисовича на тему

“Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и аномального магнитного момента мюона”

по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук

Диссертационная работа И.Б. Логашенко посвящена прямому измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в цикле экспериментов на детекторе КМД-2 на коллайдере ВЭПП-2М, а также измерению аномального магнитного момента мюона в эксперименте E821 в Брукхейвенской лаборатории (БНЛ).

Актуальность темы исследования

Целью измерений аномального магнитного момента мюона a_μ является проверка Стандартной модели и поиск новых взаимодействий. Окончательной целью экспериментов является измерение разницы $\Delta a_\mu = a_\mu(\text{experiment}) - a_\mu(\text{theory})$.

Наиболее точный на настоящий момент эксперимент E821 по измерению аномального магнитного момента $a_\mu(\text{experiment})$ был проведен в конце 90х - начале 2000х годов в Брукхейвенской Национальной лаборатории. В этом эксперименте достигнута точность 0.54 ppm.

Для измерения Δa_μ необходимо также провести с высокой точностью теоретические расчеты $a_\mu(\text{theory})$.

В Стандартной модели значимый вклад в аномальный магнитный момент мюона вносят все взаимодействия, кроме гравитационного — электромагнитное, сильное и слабое $a_\mu = a_\mu^{QED} + a_\mu^{had} + a_\mu^{weak}$. Вклад сильных взаимодействий в a_μ является значительным по сравнению с точностью эксперимента. При вычислении основной вклад в a_μ^{had} дает вклад первого порядка $a_\mu^{had, LO}$, который можно вычислить, используя полное сечение рождения адронов $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{адроны})$ при различных энергиях $\sqrt{s}$ в с.ц.м.

Для измерения $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{адроны})$ используется эксклюзивный подход. Основной вклад в $a_\mu^{had, LO}$, около 3/4, дает процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$.

Все существующие измерения сечения $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$ можно разбить на две группы — прямые измерения со сканированием энергии и измерения методом радиационного возврата. В области энергий до 2 ГэВ в с.ц.м. наиболее точные прямые измерения сечения $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$ были проведены с детекторами КМД-2 и СНД на коллайдере

ВЭПП-2М. Измерения методом радиационного возврата были проведены на В-фабрике BaBar, ϕ -фабрике KLOE и, совсем недавно, с детектором BES-3.

С учетом всех существующих на сегодняшний день измерений сечения $\sigma(e+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{адроны})$, точность вычисления a_μ в рамках Стандартной модели достигла уровня 0.3–0.4 ppm. Между результатом измерения аномального магнитного момента мюона в эксперименте E821 и его предсказанием в рамках Стандартной модели наблюдается разница на уровне 3.5–4 стандартных отклонений. Этот результат вызвал огромный интерес научного сообщества, и он на сегодняшний день является наиболее значимым наблюдением расхождения с предсказанием Стандартной модели в лабораторном эксперименте.

Новизна полученных результатов

Результаты измерения сечения $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$ являются наиболее точными прямыми измерениями в области энергий до 1.4 ГэВ в системе центра масс. Использование этих результатов позволило заметно уменьшить неопределенность величины вклада сильных взаимодействий в a_μ и достичь точности вычисления, приблизительно равной точности измерения.

Результат измерения аномального магнитного момента мюона в эксперименте E821 является наиболее точным измерением этой величины.

Наблюдается различие в 3–4 стандартных отклонения между измеренным значением a_μ и его предсказанием в рамках Стандартной модели. Это отклонение на сегодняшний день является самым существенным указанием на наличие взаимодействий за рамками Стандартной модели, наблюдаемых в лабораторных экспериментах.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается успешным функционированием разработанной автором системы автоматизации детектора в течение всего срока эксплуатации детектора КМД-2. Разработанная методика анализа данных для измерения сечения процесса $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$ и методика $e/\mu/\pi$ разделения на основе анализа энерговыведения частиц в калориметре дает экспериментальные результаты, с хорошей точностью совпадающие с результатами, полученными с помощью моделирования методом Монте-Карло.

В эксперименте по измерению аномального магнитного момента мюона автором был разработан основной алгоритм реконструкции данных для измерения частоты прецессии мюона и реализована система обработки данных эксперимента, включающая программное обеспечение для реконструкции и анализа данных и для организации процесса обработки. Система параллельной обработки сырых данных двумя независимыми программами, обработка данных несколькими экспериментальными группами, применяемый

метод постоянного сравнения получаемых результатов позволили получить достоверные результаты.

Материалы диссертации неоднократно докладывались на международных научных конференциях и семинарах, на их основе опубликовано 14 научных работ в ведущих зарубежных и российских научных журналах, входящих в перечень, рекомендуемый ВАК.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Результаты работы внесены в таблицы свойств элементарных частиц и базы данных сечений процессов в физике элементарных частиц.

Результаты измерения сечения $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$ используются при расчете ряда величин и функций в физике элементарных частиц: аномального магнитного момента электрона, мюона и τ -лептона, постоянной тонкой структуры при энергиях Z -бозона, электромагнитного радиуса пиона, адронной поляризации вакуума.

Разработанные методы измерения сечения $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$ легли в основу используемых в настоящее время подходов в экспериментах с детектором КМД-3.

Разработанный автором алгоритм реконструкции данных эксперимента E821 по измерению a_μ успешно использовался с модификациями в эксперименте MULAN по прецизионному измерению времени жизни мюона.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность

Диссертация является завершенной работой. Ее содержание и структура соответствуют заявленной специальности и цели исследования.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель, обсуждены научная новизна и практическая значимость представляемой работы, представлены выносимые на защиту результаты.

В **первой главе** приводится краткий обзор современного состояния проблемы по вычислению вклада сильного взаимодействия в аномальный магнитный момента мюона a_μ с помощью измерения полного сечения рождения адронов $\sigma(e+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{адроны})$ при различных энергиях $\sqrt{s}$ в с.ц.м.

Наиболее точные прямые измерения сечений рождения адронов были проведены в экспериментах КМД-2 и СНД на $e+e^-$ коллайдере ВЭПП-2М (Новосибирск). В частности, в серии измерений сечения $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$ с детектором КМД-2, подробно описанной в главе 2, была достигнута точность лучше 1%, наилучшая точность на сегодняшний день для прямых измерений.

Доминантное сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ измерено методом радиационного возврата с рекордной систематической точностью 0.5% в эксперименте BaBar. Кроме этого, серия измерений сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ проведена в эксперименте KLOE и, совсем недавно, в эксперименте BES-III.

После объединения вкладов различных взаимодействий была получена следующая оценка величины аномального магнитного момента мюона в рамках Стандартной модели:

$$a_\mu(SM) = 116\,591\,821\,(45) \times 10^{-11} \text{ (0.39 ppm)}.$$

Во **второй главе** описан цикл экспериментов с детектором КМД-2 по наиболее точному на сегодняшний день прямому измерению сечения процесса $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$, ключевого сечения для вычисления вклада сильных взаимодействий в аномальный магнитный момент мюона.

Здесь подробно описан детектор КМД-2, система его автоматизации, включающая в себя систему контроля и управления и систему сбора данных. Система сбора данных осуществляла чтение данных из крейтов КЛЮКВА, производила быстрый анализ данных и запись их на магнитную ленту. Система контроля и управления отвечала за мониторинг детектора, взаимодействие с оператором, управление работой подсистем детектора.

Набор данных с детектором КМД-2 продолжался с 1993 по 2000 год в ходе более 10 экспериментальных сезонов, каждый продолжительностью в несколько месяцев. Измерение сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ проводилось по данным, набранным в шести сеансах.

В работе подробно описана методика разделения конечных состояний и процедуры определения поправок и эффективностей, необходимых для измерения сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, а также приводится подробный анализ систематических ошибок.

В работе приведено сравнение измерений КМД-2 с предыдущими измерениями сечения $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ в экспериментах КМД и ОЛЯ, с измерением этого сечения в эксперименте SND и с результатами измерений методом радиационного возврата в экспериментах BABAR, KLOE и BES-III. Приведено сравнение как энергетической зависимости сечений, так и вкладов в дисперсионный интеграл, вычисленных с использованием измерений в различных экспериментах.

Третья глава посвящена описанию эксперимента E821 по измерению аномального магнитного момента мюона в Брукхейвенской лаборатории (БНЛ, США).

Набор данных был произведен в ходе 5 независимых сезонов, с 1997 по 2001 год, при этом основная статистика была набрана в двух последних сезонах, в 2000 году для отрицательно заряженного мюона и в 2001 году для положительно заряженного мюона.

Описана общая схема эксперимента. На ускорителе протонов с импульсом 24 ГэВ/с формировался практически полностью поляризованный пучок мюонов, $P_\mu \approx 95\%$. Этот

пучок мюонов инжектировался в накопительное кольцо. В накопительном кольце было сформировано однородное магнитное поле, в котором мюоны движутся по круговой орбите радиусом 711 мм. Частота прецессии спина относительно направления движения мюона $\omega_a = \omega_s - \omega_c$, оказывается прямо пропорциональной величине аномального магнитного момента $a_\mu = (g_\mu - 2)$: $\omega_a = a_\mu \cdot eB/m$. Здесь ω_c циклотронная частота обращения мюонов по орбите, ω_s частота вращения спина в однородном магнитном поле.

Поляризация мюонов измеряется с помощью регистрации энергии электронов, рожденных при распаде мюона. В системе покоя мюона существует корреляция между направлением вылета электрона и направлением спина мюона. В лабораторной системе, эта корреляция проявляет себя как связь доли электронов с энергией выше некоторой и углом между направлением спина и импульса, что проявляется как модуляция регистрируемого числа электронов с энергией, выше пороговой, с частотой прецессии: $N(t) = N_0 \exp(-t/\gamma\tau_\mu) [1 - A \cos(\omega_a t + \varphi)]$. Цель эксперимента состоит в прецизионном измерении $N(t)$ и определении ω_a .

В работе приведен подробный анализ эффектов, дающих вклады в систематическую ошибку измерения ω_a .

Окончательный результат измерения аномального магнитного момента мюона в эксперименте E821 составляет: $a_\mu(E821) = 11\,659\,208.9(6.3) \times 10^{-10}$ (0.54 ppm).

Разница между измеренным значением a_μ и результатом его расчета в рамках Стандартной модели составляет $\Delta a_\mu = a_\mu(E821) - a_\mu(SM) = (268 \pm 77) \times 10^{-11}$ (3.5σ).

Использование других расчетов вклада сильных взаимодействий приводит к несколько другим значениям $a_\mu(SM)$, но это не меняет общую картину: разница между измеренным и расчетными значениями остается в пределах между 3.5 и 4.3 стандартных отклонений.

В **заключении** приведены основные положения, которые выносятся на защиту:

1. Разработана система автоматизации детектора КМД-2, включающая в себя комплекс программного обеспечения, предназначенного для выполнения следующих задач: чтения данных из электроники детектора; анализа данных в режиме реального времени и реализации на его основе третичного триггера и системы оперативного контроля качества данных; организации системы мониторинга детектора; организации системы управления детектором. Система автоматизации успешно проработала в течение всего срока эксплуатации детектора КМД-2.
2. Разработана методика измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ с детектором КМД-2, включая методики отбора и идентификации событий и вычисления необходимых поправок. Проведен анализ возможных вкладов в систематическую ошибку.

3. Проведен цикл экспериментов с детектором КМД-2 по измерению сечения процесса $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$. Набран интеграл светимости в диапазоне энергий от 0.37 до 1.38 ГэВ в системе центра масс. Достигнута наилучшая в мире систематическая точность прямого измерения сечения процесса $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$. Результаты измерений используются для вычисления адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона.
4. Разработаны алгоритмы реконструкции и калибровки данных с калориметров эксперимента E821. Реализован комплекс программного обеспечения для обработки данных эксперимента. Проведен анализ возможных вкладов в систематическую ошибку измерения частоты прецессии мюона, связанных с реконструкцией данных и с наложением сигналов от нескольких электронов.
5. Проведен цикл экспериментов по измерению аномального магнитного момента мюона. Достигнута точность измерения 0.54 ppm, что в 14 раз лучше точности предыдущих измерений.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. В автореферате обоснована актуальность темы, приведены цели работы, кратко изложено основное содержание работы, представлены результаты работы и список публикаций, содержащий основные результаты работы.

Личный вклад автора

Оба эксперимента проводились коллективами, состоящими из нескольких десятков человек. В обоих экспериментах автор внес существенный вклад. В экспериментах с детектором КМД-2 автором была разработана система сбора данных и система управления, обеспечена эксплуатация и текущая модернизация системы на протяжении всего жизненного цикла детектора. Автором была разработана методика анализа данных для измерения сечения процесса $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$ и методика $e/\mu/\pi$ разделения на основе анализа энергосодержания частиц в калориметре. Автор лично участвовал в наборе экспериментальной статистики и проводил анализ данных. В эксперименте по измерению аномального магнитного момента мюона автором был разработан основной алгоритм реконструкции данных для измерения частоты прецессии мюона и реализована система обработки данных эксперимента, включающая программное обеспечение для реконструкции и анализа данных и для организации процесса обработки. Автор лично участвовал в наборе экспериментальной статистики, проводил анализ данных, провел анализ систематиче-

ских ошибок измерения частоты прецессии мюона, связанных с реконструкцией данных, наложением сигналов, калибровкой калориметров.

Замечания по диссертации

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. Раздел 2.3. “В области высоких энергий сечение процесса $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$ становится меньше сечения процесса $e+e^- \rightarrow \mu+\mu^-$, и одновременно изменяется структура фона. Все это приводит к тому, что методика анализа данных существенно отличается для указанных трех диапазонов энергий.” В работе желательно было бы сравнить методики анализа данных для различных диапазонов энергий.
2. Раздел 2.3. В работе желательно привести сравнение статистических и систематических ошибок в области энергий ρ -мезона для сканов 1994-1995 гг. и 1998 г.
3. Раздел 2.4. Для определения числа событий космического фона N_{bg} использовались две методики. В работе не указано, какая из этих двух методик использовалась для определения числа пучковых событий $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$, $e+e^- \rightarrow e+e^-$ и $e+e^- \rightarrow \mu+\mu^-$. Использовались ли расхождения результатов этих методик для определения систематической ошибки?
4. Раздел 2.5.2. Подписи к рис. 2.21, 2.22 не полностью отражают их содержание.
5. Раздел 2.5.3. Необходимо дать определение g_* в формуле (2.14).
6. Стр. 102, строка 7. Необходимо заменить “была получено” -> “была получена”.
7. Раздел 2.5.3. На рис. 2.23а приведены значения подгоночных параметров P_i фитирующей функции. На рис. 2.23б, в, г подобные значения не приведены или приведены частично. Желательно иметь единый подход к оформлению данных рисунков.
8. Раздел 2.6. На рис. 2.28, а также в тексте не приведено значение χ^2/ndf , характеризующее качество аппроксимации импульсного распределения фитирующей функцией.
9. Раздел 2.8.4. “Было проведено специальное исследование, в котором было показано, что FLUKA лучше описывает взаимодействие пионов с веществом детектора в исследуемой области энергии.” В работе желательно было бы описать это исследование.
10. На рис. 2.43 подписи к вертикальным осям не соответствуют их обозначению в общей подписи к рисунку.
11. В разделе 3.1.1 (стр. 156) желательно привести конкретную долю пионов, распавшихся в пионном (распадном) канале.

Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на качество исследования, а также на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты. Результаты диссертации имеют большую практическую ценность и могут быть использованы при проведении других экспериментов подобного типа.

Рассмотренная диссертация является законченной научно-исследовательской работой и характеризуется высоким научным уровнем. Работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в рецензируемых научных изданиях и являются достоверными и оригинальными.

Диссертация И.Б. Логашенко на соискание учёной степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, посвященной прямому измерению сечения процесса $e+e^- \rightarrow \pi+\pi^-$ в цикле экспериментов на детекторе КМД-2 на коллайдере ВЭПП-2М, а также измерению аномального магнитного момента мюона в эксперименте E821 в Брукхейвенской лаборатории (БНЛ). Считаю, что диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент,

Соколов Анатолий Александрович,

доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1,

тел. (4967) 71-35- 28,

адрес электронной почты: sokolov_a@ihep.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова

Научного исследовательского центра «Курчатовский институт»,

ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики.

«23» августа 2018

А.А. Соколов

Подпись Соколова Анатолия Александровича заверяю

Ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ



Н.Н.Прокопенко