

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по науке

федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерных исследований  
Российской академии наук (ИЯИ РАН)

доктор физ.-мат. наук



Г.И.Рубцов

11 апреля 2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук на диссертационную работу Логашенко Ивана Борисовича «Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  и аномального магнитного момента мюона», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа И.Б. Логашенко посвящена актуальной проблеме современной физики элементарных частиц – поиску вклада взаимодействий за рамками Стандартной модели в аномальный магнитный момент ( $g-2$ ) мюона. История сверхточных измерений и вычислений ( $g-2$ ) мюона началась более 60 лет назад, но и сегодня эта тема является очень активным направлением исследований. Благодаря сочетанию нескольких факторов: возможности прецизионного измерения аномального магнитного момента мюона, возможности его вычисления с очень высокой точностью и относительно большому ожидаемому вкладу взаимодействий за рамками Стандартной модели, сравнение измеренного и расчетного значений ( $g-2$ ) мюона предоставляет уникальные возможности по проверке Стандартной модели и по ограничению параметров моделей расширения Стандартной Модели.

Наиболее точное в настоящее время измерение ( $g-2$ ) мюона было проведено в БНЛ (США) в прошлом десятилетии. Чтобы рассчитать ( $g-2$ ) мюона с точностью, достигнутой в эксперименте, необходимо учитывать вклады всех взаимодействий, описанных в Стандартной модели – электромагнитных, сильных и слабых. Расчет вклада сильных взаимодействий основан на использовании сечений рождения адронов в  $e^+e^-$  аннигиляции – в заметной степени, задача теоретического расчета ( $g-2$ ) мюона сводится к экспериментальной задаче измерения адронных сечений на  $e^+e^-$  коллайдерах. Именно точность таких измерений сегодня определяет

точность теоретического предсказания величины аномального магнитного момента мюона. Наиболее важным при этом является измерение сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергий  $\rho(770)$  мезона, так как вклад этого сечения составляет около 3/4 всего вклада сильных взаимодействий.

Между результатом измерения ( $g-2$ ) мюона в БНЛ (США) и результатами наиболее точных теоретических вычислений этой величины наблюдается разница в 3—3.5 стандартных отклонений. На сегодняшний день это одно из самых интригующих отклонений от предсказаний Стандартной модели, наблюдавшихся в лабораторном эксперименте, что вызывает огромный интерес к продолжению исследований. В этом году начался набор данных в Лаборатории Ферми (США) в новом эксперименте по измерению ( $g-2$ ) мюона, в J-PARC (Япония) ведется подготовка еще одного полностью независимого эксперимента по прецизионному измерению аномального магнитного момента мюона, в ряде лабораторий, в первую очередь в ИЯФ СО РАН, ведутся эксперименты по более точному измерению адронных сечений, с использованием которых определяется вклад сильных взаимодействий в теоретическое вычисление значения ( $g-2$ ) мюона.

Диссертационная работа И.Б. Логашенко посвящена двум важным экспериментам в описанной области исследований. Целью первого эксперимента является прецизионное измерение сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции в пару пионов в области энергий до 1.4 ГэВ в системе центра масс, ключевого ингредиента при вычислении вклада сильных взаимодействий в теоретическое значение ( $g-2$ ) мюона. Измерения проводились на детекторе КМД-2 на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-2М в Институте Ядерной Физики СО РАН им. Г.И.Будкера (Новосибирск). Целью второго эксперимента являлось непосредственное измерение аномального магнитного момента мюона. Данные измерения проводились в Брукхэйвенской Национальной Лаборатории (США) с непосредственным участием экспериментаторов из ИЯФ СО РАН (Новосибирск) в рамках официального сотрудничества с коллегами из США и других стран. Одним из ключевых представителей ИЯФ СО РАН в этой коллаборации являлся автор настоящей диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении обсуждается актуальность измерений аномального магнитного момента мюона и важных с точки зрения определения теоретического значения ( $g-2$ ) мюона измерений адронных сечений на электрон-позитронных коллайдерах, формулируются предмет и цели исследования, обсуждаются научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также описана структура работы.

В первой главе приводится обзор современного состояния проблемы, как с точки зрения измерений ( $g-2$ ) мюона, так и с точки зрения теоретических вычислений. Описана история измерений аномального магнитного момента мюона и показано,

как была выработана методика измерений, используемая в современных экспериментах. Обсуждаются результаты расчетов вкладов всех взаимодействий, описанных Стандартной моделью, в  $(g-2)$  мюона и основные факторы, определяющие точность вычисления. Подробно обсуждается связь между вычислением вклада сильных взаимодействий в  $(g-2)$  мюона и измерением сечений рождения адронов в процессе электрон-позитронной аннигиляции. Приведен обзор наиболее важных для вычисления  $(g-2)$  мюона измерений адронных сечений и различных методик измерений.

Во второй главе описан цикл экспериментов с детектором КМД-2 по наиболее точному на сегодняшний день прямому измерению сечения рождения пионной пары в процессе электрон-позитронной аннигиляции, являющегося ключевым для вычисления вклада сильных взаимодействий в аномальный магнитный момент мюона. Дано краткое описание детектора КМД-2 и системы сбора данных детектора, описана методика измерений. Подробно обсуждается ключевая составляющая методики анализа – идентификация пар  $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\pi^+\pi^-$  и космического фона в детекторе. Обсуждаются процедуры определения поправок и эффективностей, необходимых для измерения сечения, а также приводится подробный анализ систематических ошибок. Показано сравнение полученных результатов с прямыми измерениями сечений, определенных в экспериментах КМД, ОЛЯ и СНД, и измерений сечений, проведенных методом радиационного возврата в экспериментах BABAR, KLOE и BES-III. Приведено сравнение как энергетической зависимости сечений, так и вкладов в определяющий адронную поправку в теоретическое значение аномального магнитного момента мюона дисперсионный интеграл, вычисленных с использованием результатов различных экспериментов.

Третья глава посвящена описанию эксперимента E821 по измерению аномального магнитного момента мюона в Брукхейвенской лаборатории (БНЛ). Описана общая конфигурация эксперимента, методика генерации и удержания мюонного пучка, методика измерения магнитного поля. В работе подробно обсуждается методика измерения частоты прецессии спина мюона, в частности, методика регистрации электронов и позитронов, рожденных в распаде мюонов, и определения времени их прилета в детекторы с систематической ошибкой лучше 10 пс. Приведен подробный анализ различных вкладов в систематическую ошибку, в частности, вкладов, связанных с реконструкцией данных с калориметров и связанных с наложением сигналов от электронов, одновременно попавших в калориметр.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Научная новизна диссертации заключается в проведении наиболее точных в настоящее время измерения  $(g-2)$  мюона и новых измерений сечений рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции, определяющих вклад сильных взаимодействий в теоретическое значение этой фундаментальной величины .

Научная и практическая значимость диссертации связана прежде всего с высокой точностью измерений. Измерение ( $g-2$ ) мюона в БНЛ является наиболее точным в мире. Измерение сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  с детектором КМД-2 является наиболее точным прямым измерением, уступающим только косвенному измерению этого сечения методом радиационного возврата в эксперименте BaBar. Методики и алгоритмы, разработанные в ходе работы, сегодня успешно применяются в начавшемся недавно новом эксперименте по измерению ( $g-2$ ) мюона (автор является участником этого эксперимента) и в проводимых в различных научных центрах мира измерениях адронных сечений на основе экспериментальных данных, полученных на электрон-позитронных коллайдерах (как уже закончивших свою работу, так и ныне действующих).

Хотя оба описанных в диссертации измерения проводились большими коллективами авторов, определяющий личный вклад И.Б. Логашенко в получении приведенных результатов не вызывает сомнения. В обоих экспериментах автор активно участвовал в подготовке экспериментов, в наборе экспериментальной статистики, в анализе данных. В экспериментах с детектором КМД-2 автором была разработана методика измерения сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  и проведено само измерение. 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, был проведен анализ различных вкладов в систематическую ошибку этого эксперимента.

Достоверность полученных в работе результатов не вызывает сомнений. Разработанные методы и программное обеспечение доказали свою правильность и эффективность в течение многих лет успешной эксплуатации в экспериментах по физике элементарных частиц.

Диссертационная работа не свободна от недостатков. К ним относится неразъясненное изложение экспериментального определения в различных экспериментах нормированного полного сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции в адроны, определенного в формулах (1.43)-(1.45) с некоторыми различиями. К сожалению в работе отсутствуют ключевые ссылки на теоретические работы, связанные с тематикой диссертации: классическое независимое вычисление двух-петлевых поправок в аномальный магнитный момент электрона с использованием дисперсионной техники (см М.В. Терентьев, ЖЭТФ 43 (1962) 619), одно из первых определений с правильным знаком значения адронной поправки в аномальный магнитный момент мюона, характеризуемой кварковой петлей, вставленной в диаграмму Фейнмана с одним внешним фотоном и тремя внутренними – диаграмма типа рассеяния света-на свете (см А.А. Пивоваров, ЯФ 66 (2003) 934, hep-ph/0110248). Жаль, что в диссертации также отсутствует обсуждение интересной теоретической работы коллег из Новосибирска – A.I. Milstein and A.S. Yelkhovsky, Vacuum polarization and magnetic

moment of a heavy nucleus, Phys. Lett. B223 (1989) 11-15. Ее результаты используются при оценке важных теоретических вкладов КЭД в  $(g-2)$  мюона (см например A.L. Kataev , Phys. Rev. D74 (2006) 073011).

Сделанные замечания не снижают чрезвычайно благоприятного отношения к данной диссертации. Ее материал хорошо изложен и мог бы послужить в будущем основой интересного научного обзора, который можно было бы подготовить для печати в одном из ведущих мировых научных обзорных журналов.

Основные работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в российских и международных журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация И.Б. Логашенко является законченным научным исследованием, в котором получены новые фундаментальные результаты, и отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (п.9-14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации N842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор, Логашенко Иван Борисович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв на диссертацию подготовил:

доктор физ.-мат. наук,  
ведущий научный сотрудник ИЯИ РАН  Андрей Львович Катаев  
телефон: 8(495)133-65-33  
Адрес электронной почты: kataev@inr.ac.ru

Диссертационная работа И.Б. Логашенко заслушана на семинаре Отдела теоретической физики ИЯИ РАН 9 апреля 2018 года. Отзыв на диссертацию одобрен на заседании Ученого совета Отдела теоретической физики ИЯИ РАН 9 апреля 2018 г, протокол №1.

Секретарь Ученого совета  
ОТФ ИЯИ РАН  
канд.физ.-мат наук, с.н.с.



С.В. Демидов

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: 8 916-139-29-97(канц.), 8(495)850-42-16 (канц.)  
Адрес электронной почты: [inr@inr.ru](mailto:inr@inr.ru)  
<http://www.inr.ru>