

## ОТЗЫВ

официального оппонента Дорохова Александра Евгеньевича на диссертацию Логащенко 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.

Изучение магнитных моментов элементарных частиц и, в частности, аномальных магнитных моментов (АММ) лептонов играло и играет важнейшую роль в построении современной теории фундаментальных взаимодействий. Так изучение магнитных моментов атомов в 20-х годах 20-го века было определяющим в создании квантовой механики. В последующем релятивистская теория Дирака для элементарных фермионных полей привела к предсказанию гиромагнитного отношения для точечных фермионов равным  $g = 2$ . Важнейшим открытием для создания квантовой электродинамики (КЭД), основополагающей теории современных моделей фундаментальных взаимодействий, было открытие в 40-х годах 20-го века отклонения гиромагнитного отношения для электронов от предсказания теории Дирака. Такое отклонение задается величиной АММ фермиона  $a$ , определенной как  $a = (g - 2)/2$ . Одновременно с экспериментальным открытием (Р. Kusch and Н.М. Foley, Колумбийский Университет, США), Швингером было доказано, что это отклонение связано с радиационными поправками к форм фактору электрона, т.е. существованием виртуальных фотонов и электронов, предсказанных в КЭД.

Современная эпоха измерения АММ лептонов началась после публикаций наиболее точных измерений АММ мюона в эксперименте E821 в Брукхэйвенской Национальной Лаборатории (БНЛ, Брукхэйвен, США) в 2006 году и АММ электрона в Гарварде (США) в 2008 году. Мюонный эксперимент, благодаря более тяжелой массе мюона, гораздо более чувствителен к взаимодействиям вне КЭД. Из сравнения экспериментального значения с предсказанием стандартной модели (СМ) четко видны вклады сильных и слабых взаимодействий. Более поразительно, что уже в течение более 10 лет предсказания СМ не могут быть согласованы с результатами эксперимента в БНЛ на уровне 3-4 стандартных отклонений. Такая ситуация породила большое количество спекуляций о вкладах в АММ мюона от взаимодействий вне СМ. Ожидается, что в ближайшие годы новые более точные эксперименты по прямому измерению АММ мюона в Фермилабе (США), JPARC (Япония), а также измерений КМД-3 и СНД (ИЯФ СО РАН, Новосибирск), MUpE (ЦЕРН, Швейцария), связанных с более точным извлечением вклада адронной поляризации вакуума в АММ мюона, позволят прояснить указанную неопределенность. Наиболее новые (2018) и точные измерения тонкой константы связи из атомных экспериментов (Н. Muller и др.) в Беркли (США) показывают, что и для АММ электрона наблюдается расхождение между теорией и экспериментом на уровне 2-3 стандартных отклонений, причем это отклонение имеет противоположный знак. Поэтому интрига в экспериментальном и теоретическом изучении АММ лептонов сохраняется.

Таким образом можно сказать, что изучение АММ лептонов является фунда-

ментальной проблемой в физике элементарных частиц, СМ и поиска новых взаимодействий вне СМ. Актуальность диссертации И.Б. Логашенко связана именно с пионерскими, наиболее точными измерениями АММ мюона и сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Последний процесс имеет ключевую роль в минимизации теоретической неопределенности в вычислении вклада поляризации адронного вакуума (сильные взаимодействия) в АММ мюона.

Основу диссертации И.Б. Логашенко составляют результаты исследований, выполненных им в экспериментах коллаборации Muon ( $g - 2$ ) в БНЛ (эксперимент E821) и на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-2М с детектором КМД-2 в Институте ядерной физики СО РАН им. Г.И.Будкера (Новосибирск).

Основным методом получения результатов, представленных в диссертации, является создание алгоритмов реконструкции экспериментальных данных.

Целью диссертационной работы И.Б. Логашенко является получение новой прецизионной экспериментальной информации об АММ мюона. В его работе с соавторами получены наиболее точные экспериментальные данные по АММ мюона и сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  в области энергий до 1.4 ГэВ в системе центра масс.

Диссертация изложена на 252 страницах, состоит из введения, трех глав, заключения и содержит 249 ссылок.

Во **введении** обсуждается актуальность изучения АММ мюона для проверки СМ, приведены цель работы, научная новизна и ее практическая ценность. Очерчен личный вклад автора, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведен список публикаций, на которых основана диссертация. Кратко изложено содержание диссертации.

**В первой главе** подробно представлены история и современное состояние теории и феноменологии изучения АММ мюона.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию постановки и результатам эксперимента по измерению сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  с детектором КМД-2 (ИЯФ, Новосибирск, Россия).

Изложены основные сведения о детекторе КМД-2 и системе сбора данных детектора КМД-2. Представлены методики отбора событий, разделения событий по энерговыделению и импульсу. Дан подробный анализ различного рода поправок к сечению и систематических ошибок. Первые включают КЭД радиационные поправки и ядерные эффекты, а также поправки на эффективности реконструкции событий и триггера. Систематические ошибки имеют несколько источников, которые связаны с точностями в определении энергии накопителя, телесного угла регистрации, эффективности регистрации, процедуры разделения частиц, поправок на потерю пионов, вычисления радиационных поправок и вычитания фона.

В конце Главы представлены основные результаты по измерению сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  как функции энергии и оценки вклада этого сечения в АММ мюона. Теоретическая оценка основана на использовании оптической теоремы, которая не основана ни на каких модельных предположениях, за исключением использования сечения процесса как феноменологических входных данных, что и являлось основной

целью данных измерений.

Дано сравнение результатов, полученных в эксперименте с детектором КМД-2, с результатами экспериментов КМД, ОЛЯ и СНД (ИЯФ, Новосибирск, Россия), КЛОЕ (Фраскатти, Италия), BABAR (SLAC, США), BES-III (Пекин, Китай), некоторые из которых были выполнены позднее и имеют более высокую точность, но согласованы с КМД-2 в пределах ошибок. Приведены различные теоретические оценки вклада поляризации адронного вакуума в АММ мюона, основанные на отличающихся процедурах сглаживания экспериментальных данных.

**Третья глава** диссертации посвящена описанию постановки и результатам эксперимента E821 (БНЛ, США) по прямому измерению АММ мюона. Представлены основные функциональные схемы установки по генерации и накоплению мюонов, магнитной системе накопительного кольца, детекторам электронов и позитронов, реконструкции данных с электромагнитных калориметров, измерению частоты прецессии спина мюона  $\omega_a$ .

В конце приведен основной результат: АММ мюона, который получен усреднением данных по  $\mu^-$  и  $\mu^+$  лептонам. Полученный результат по точности значительно превосходит все экспериментальные результаты, полученные ранее.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации и представлены работы, на основе которых она написана.

Представленная диссертация является плодом многолетней работы И.Б. Логашенко в экспериментах E821 и КМД-2. В обоих экспериментах автор внес определяющий вклад в создание алгоритмов реконструкции экспериментальных данных.

Так 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 идентификации  $e, \mu, \pi$  разделения на основе анализа энерговыделения частиц в калориметре.

В эксперименте по измерению АММ мюона И.Б. Логашенко разработал основной алгоритм реконструкции данных для измерения частоты прецессии спина мюона и систему обработки данных эксперимента, включающую программное обеспечение для реконструкции и анализа данных и для организации процесса обработки. Автор провел анализ систематических ошибок измерения частоты прецессии спина мюона, связанных с реконструкцией данных, наложением сигналов, калибровкой калориметров.

В обоих экспериментах И.Б. Логашенко лично участвовал в наборе экспериментальной статистики и проводил анализ данных.

Результаты экспериментов и программы обработки данных, разработанные автором, неоднократно докладывались на международных конференциях.

В целом диссертация написана блестяще и представляет хороший обзор как по текущему состоянию проблемы, так и по описанию экспериментальных установок и методик обработки данных. В качестве критических замечаний можно отметить

следующее:

- список результатов диссертации, которые выносятся на защиту, представлен во введении. Однако в основном тексте диссертации ссылки на результаты автора отсутствуют и не всегда вполне ясно, какое положение в методике достигнуто при решающем вкладе автора.
- В первой главе дан подробный анализ текущей экспериментальной и теоретической ситуации по изучению АММ мюона. Однако, опущено обсуждение некоторых важных теоретических работ, например, по вкладу рассеяния света на свете в АММ мюона. Смотри А.Е. Dorokhov, А.Е. Radzhabov, А.С. Zhevlakov, Eur.Phys.J., C75 (2015) 417 и ссылки в этой работе.
- В тексте диссертации встречаются опечатки, например, на стр. 94 написано "с учетками" вместо "с учетом", на стр. 160 "бысто" вместо "быстро", на стр. 7 автореферата "следующщих" вместо "следующих".
- Оппоненту не вполне ясно, зачем повторять во Введении и в Заключение основные результаты, выносимые на защиту, и список литературы по диссертации.

В то же время указанные замечания не умаляют ценности диссертации.

Текст автореферата диссертации правильно отражает ее содержание. Все результаты, представленные в диссертации, опубликованы в рецензируемых научных журналах с высоким импакт-фактором. Материалы диссертации многократно докладывались автором на международных конференциях по физике высоких энергий. Работы, на основании которых написана диссертация, широко цитируются в научной литературе. Результаты диссертации могут быть использованы при анализе ведущихся и планировании будущих экспериментов как в России (ИЯФ, Новосибирск), так и в зарубежных научных центрах физики высоких энергий (Фермилаб, США; JPARC, Япония) и других.

Диссертация И.Б. Логашенко отвечает всем требованиям Высшей аттестационной комиссии, установленным в п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней в части, касающейся докторских диссертаций, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16–Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент:  
д.ф.-м.н.

А.Е. Дорохов

Подпись внс Дорохова А.Е. заверяю:  
заместитель директора ЛТФ ОИЯИ



А.П. Исаев

«26» августа 2018 г.

Сведения об оппоненте:

Дорохов Александр Евгеньевич  
доктор физико-математических наук, без звания,  
ведущий научный сотрудник  
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова  
Объединенного института ядерных исследований,  
адрес: 141980, Московская обл.,  
г.Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6,  
Телефон: +7(496)2162730  
Адрес электронной почты: dorokhov@theor.jinr.ru