

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

М.В. Ломоносова

профессор



А.А.Федянин

10

2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

**Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования**

**“Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова”
(Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына)**

о диссертации **Зыкунова Владимира Александровича**

“Эффекты радиационных поправок в современных экспериментах в физике высоких энергий”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Целью работы является обеспечение ряда современных экспериментов в физике высоких энергий надежным и обеспечивающим необходимую точность учетом радиационных эффектов. Диссертация ориентирована главным образом на эксперименты по изучению параметров Стандартной модели и поиск “новой” физики в Стэнфордском центре линейного ускорителя (E-158), в Лаборатории им.Джефферсона (MOLLER), в Европейском центре ядерных исследований (CERN, CMS LHC). Методы, развитые в диссертации, могут эффективно применяться для теоретического обеспечения и других (будущих) экспериментов в физике лептонов и адронов. Возрастание точности экспериментов требует увеличения точности их теоретического описания, поэтому необходимым является учет радиационных эффектов. Это определяет **актуальность темы диссертационной работы**.

Содержание диссертации В.А.Зыкунова соответствует физико-математическим наукам и специальности 01.04.02 – теоретическая физика. Тема диссертации В.А.Зыкунова “Радиационные эффекты в современных экспериментах в физике высоких энергий” утверждена Советом Белорусского государственного университета транспорта (протокол №4 от 16.04.2014 г.). Название диссертации соответствует ее содержанию.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов и рекомендаций подтверждены применением надежно апробированных методов квантовой

теории поля, а также согласием с результатами других авторов. Отклонения от точного численного совпадения с результатами других авторов анализируются и подробно обсуждаются. Результаты использования созданных соискателем программ сопоставлялись и проверялись несколькими способами: точными расчетами с применением программ компьютерной алгебры; расчетами с применением асимптотических методов; расчетами с использованием техники Монте-Карло; расчетами с применением перенормировки с различными ренормализационными условиями. Автором были выполнены действия, являющиеся необходимыми при пертурбативных расчетах: достигнуты сокращения инфракрасной расходимости, нефизических параметров (мягкости фотона, глюона, значений кварковых масс), высших степеней коллинеарных логарифмов. Это также служит подтверждением корректности полученных результатов.

Основные результаты диссертации являются **новыми и хорошо обоснованными**, они имеют **высокую научную и практическую значимость**, которая подтверждается тем, что разработанные процедуры и методы используются для решения широкого класса актуальных задач, стоящих перед современной теоретической и экспериментальной физикой высоких энергий. Эти методы могут эффективно использоваться и для исследования задач, не рассмотренных в диссертации. Например, асимптотический метод применим для широко обсуждающихся сейчас перспектив изучения физики на будущем линейном лептонном коллайдере (ILC, CLIC); методика сложения радиационных вкладов применима для ряда поляризационных низкоэнергетических экспериментов (E-158, MOLLER, BelleII) и т. д. Практическая значимость диссертации подтверждается востребованностью полученных результатов и развитых методов у экспериментаторов. Программа учета жесткого тормозного излучения, разработанная в диссертации, была использована в обработке экспериментальных данных E-158 (SLAC), что отражается в ссылках этой коллаборации на работы соискателя. Эта программа была положена в основу кода `gsAPV`, который будет использован в обработке данных эксперимента MOLLER (запуск проекта ожидается в 2017 г.). Программа автора `READY` была разработана в рамках сотрудничества с коллаборацией RDMS CMS в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия), где соискатель работал в 2006–2007 гг. и работает с 2016 г. по н.в. Программа `READY`, без сомнения, сыграет важную роль в обработке данных экспериментов на CMS LHC с энергией 13-14 ТэВ. Имеются соответствующие препринты экспериментальных коллабораций: CERN-CMS-NOTE-2006-123, JLAB-THU-03-239, SLAC-PUB-14920, SLAC-PUB-11378.

Результаты диссертации прошли апробацию на многих конференциях республиканского и международного уровня, было сделано более 50 докладов. Из них следует выделить выступление на собрании коллаборации E-158 (Pasadena, CA, USA, 23-24 Jan., 2004), доклады на собраниях RDMS CMS (2000–2008), доклады на Рочестерских конференциях (ICHEP06, ICHP10, ICHP12, ICHP14), доклад на конференции ACAT2013.

Материалы диссертации полностью изложены в 61 публикации, из них статей в научных журналах – 34. Без соавторов опубликовано: статей в научных журналах – 13, в материалах научных конференций – 12. Общий объем опубликованных материалов составляет 66,0 авторских листов. Уровень журналов, в которых публиковались материалы диссертации, высокий. Имеются 4 публикации в *Physical Review D* (одна из

них, посвященная приложению асимптотического метода к процессу Дрелла-Яна, написана без соавторов, имеет более 50 цитирований), 3 публикации в *European Physical Journal C*, 18 публикаций в журналах российского издательства МАИК (ЭЧАЯ, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, *Ядерная Физика*), имеются 4 препринта экспериментальных коллабораций. Диссертация состоит из 6 глав; содержит введение, заключение, два приложения. Список цитируемых публикаций насчитывает 328 наименований. Оформление диссертации соответствует требованиям ВАК.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи проводимых исследований.

В **первой главе** сделан обзор современной физики высоких энергий, обсуждается роль учета радиационных поправок в реализации современных экспериментов физики высоких энергий, приводится обзор литературы по этому вопросу, указывается место, которое занимают разработки автора в современной теоретической и экспериментальной физике высоких энергий.

Во **второй главе** описан прецизионный расчет наблюдаемых величин в процессе поляризационного мёллеровского рассеяния, которое представляет интерес как для для точного определения поляризации электронного пучка (поляриметрии), которое осуществлялось, например, в экспериментах: SLC, E-143 и E-154 в SLAC, в ряде экспериментов JLab, MIT-Bates, COMPASS, так и для сверхточного определения важнейшего параметра SM – синуса угла Вайнберга – в экспериментах E-158 и MOLLER (JLab).

В **главе 3** произведена оценка двухпетлевых радиационных эффектов в эксперименте MOLLER. Описана структура одно- и двухпетлевых амплитуд, и решается проблема сокращения инфракрасной расходимости на одно- и двухпетлевом уровнях. Подробно рассчитывается вклад тормозного излучения двух тормозных фотонов. Проведен анализ физического вклада мнимой части амплитуды. Представлен анализ структуры относительных поправок к асимметрии в Q - и T -частях и проведен численный анализ.

В **главе 4** рассчитаны электрослабые поправки для процесса Дрелла-Яна при больших инвариантных массах дилептона (больше 1 ТэВ). На примере расчета вклада “прямых боксов” с массивными Z -бозонами подробно описан новый асимптотический метод, позволяющий получить компактные, удобные для анализа и быстрой оценки электрослабые поправки к различным типам диаграмм и, в то же время, обеспечить требуемую точность в области высоких энергий.

В **главе 5** изучаются радиационные эффекты в ведущем логарифмическом приближении для процесса Дрелла-Яна. Объяснено как сечение перестраивается в трижды дифференциальную форму: вычисляются необходимые якобианы перехода (как для безрадиационной, так и для радиационной частей). Проблема массовой сингулярности кварков решается в рамках схемы с минимальным вычитанием. С помощью разработанной соискателем программы READY проводится расширенный численный анализ с использованием стандартного набора предписаний эксперимента CMS LHC.

В **главе 6** изучены однопетлевые КХД-поправки для процесса Дрелла-Яна на LHC. Рассчитано инверсное глюонное излучение, выделена его ведущая логарифмическая часть, изучены все пики и интерференционные слагаемые. Аналитически и численно доказана независимость от нефизических параметров: максимальной энергии мягких

глюононов и кварковых масс.

В приложениях приведены справочные формулы, касающиеся свойств дилогарифма Спенса и громоздкие выражения для сечения тормозного излучения в процессе Дрелла-Яна.

В заключении кратко сформулированы основные научные результаты диссертации и рекомендации по ее практическому использованию.

Докторская диссертация представляется впервые, она выполнена В.А.Зыкуновым самостоятельно при научном консультировании профессором Н.М.Шумейко. Личный вклад автора в решение рассматриваемых в диссертации задач является определяющим. Основная часть положений, выносимых на защиту, опубликована в статьях, написанных автором индивидуально. В диссертации и автореферате конкретно указано, какую часть работы из совместно написанных статей проделали соавторы; этот материал не содержится в положениях, выносимых на защиту и выводах диссертации, корректно приведены ссылки на публикации других авторов и собственные публикации. В выносимых на защиту положениях и выводах настоящей докторской диссертации материалы кандидатской диссертации автора не использованы. Автореферат правильно отражает содержание диссертации, её защищаемые положения и основные результаты.

Перечислим **новые научные результаты**, полученные в диссертации:

1. Разработана и реализована в виде новой ФОРТРАН-программы `gsAPV` процедура прецизионного учета полных однопетлевых и лидирующих двухпетлевых электрослабых радиационных поправок к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния для современных экспериментов: E-158, MOLLER и для планируемых экспериментов на ILC в мёллеровской моде.
2. Создана новая методика суммирования радиационных вкладов в поляризационные наблюдаемые величины (например, нарушающую четность асимметрию в экспериментах типа MOLLER), позволяющая контролировать точность учета радиационных эффектов.
3. Развита новый асимптотический метод получения удобных для анализа и быстрой (простой) оценки электрослабых поправок к вкладам различных типов, обеспечивающий высокую точность расчета в области высоких энергий.
4. Получены новые аналитические формулы ведущего логарифмического приближения для жесткого тормозного излучения фотонов, глюононов и инверсного глюонного излучения в процессе Дрелла-Яна и жесткого тормозного излучения фотонов в мёллеровском рассеянии.
5. Разработана и реализована в виде новой ФОРТРАН-программы `READY` процедура прецизионного учета однопетлевых электрослабых и КХД-радиационных эффектов в процессе Дрелла-Яна при больших инвариантных массах лептонной пары для экспериментов на LHC с учетом экспериментальных условий установки

CMS. В программе впервые реализована возможность последовательного использования трижды дифференциальных сечений, что дает возможность корректировать экспериментальные данные в любой кинематической области.

К недостаткам работы можно отнести следующие моменты:

- Во второй главе не уделено достаточного внимания описанию деталей отличия перенормировочных схем Холлика и Деннера, которые могут быть интересны читателю. Было бы также полезно сравнение с этой точки зрения методов, которые используют ведущие авторы, работающие в настоящий момент в области расчета электрослабых поправок.
- Автор активно вводит собственную терминологию, хотя в ряде случаев возможно использование стандартных терминов.
- В главах 5 и 6, к сожалению, проводится анализ только с т.н. “bare” setup, не учитывающим возможности детектирования частиц (т.н. “calo” setup).
- В главе 6 не обсуждается влияние выбора факторизационного масштаба на величину КХД-поправок.
- Желательно было бы вынесение в приложение некоторых разделов, представляющих отдельный интерес, например, расчет сечения двух “мягких” фотонов, расчет якобиана радиационного процесса для коллинеарной кинематики и др.
- Текст диссертации содержит некоторое количество стилистических ошибок, что несколько затрудняет чтение.

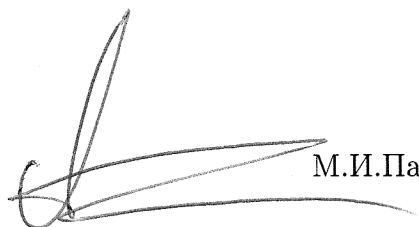
Данные замечания не умаляют достоинства работы, высокой оценки ее качества и сделанных выводов.

В заключение отметим, что диссертация Зыкунова Владимира Александровича “Эффекты радиационных поправок в современных экспериментах в физике высоких энергий”, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика, является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Результаты диссертации обсуждались на российских и зарубежных конференциях в течение последних лет и могут быть использованы в экспериментальных и теоретических исследованиях в российских научных центрах: ОИЯИ, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ПИЯФ, ИТЭФ, ИФВЭ, а также в зарубежных институтах.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор Зыкунов Владимир Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

В ведущей организации работа заслушана и одобрена на семинаре Отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ 3 октября 2016 г.

Директор НИИЯФ МГУ,
доктор физико-математических наук,
профессор




М.И.Панасюк

Заведующий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ,
доктор физико-математических наук,
профессор



Э.Э.Боос

Отзыв составил:
ведущий научный сотрудник ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ,
доктор физико-математических наук



А.М.Снигирев

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова" (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына)
Адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2
Телефон: +7 (495) 939-1257
E-mail: snigirev@lav01.sinp.msu.ru