

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Владимира Александровича Зыкунова «Радиационные эффекты в современных экспериментах в физике высоких энергий»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика в Диссертационный совет Д 720.001.01 ЛТФ им. Н.Н. Боголюбова

Диссертация посвящена актуальной проблеме современной теоретической физики – учету радиационных эффектов в экспериментах, изучающих структуру микромира при высоких энергиях, надежными и обеспечивающими необходимую точность способами. Речь идет об экспериментальных программах E-158 в Стэнфордском центре линейного ускорителя, MOLLER в Лаборатории им. Джефферсона, CMS LHC в Европейском центре ядерных исследований CERN. Следует отметить, что методы, развитые в диссертации, применимы и для других экспериментов физики лептонов и адронов. Подтверждением этому является недавно вышедшая работа соискателя с соавторами по расчету электрослабых эффектов для низкоэнергетического эксперимента Belle II.

Хорошо знаю научную школу, к которой принадлежит соискатель. Ее лидером являлся недавно ушедший из жизни профессор Николай Максимович Шумейко – научный консультант по рассматриваемой диссертации – автор эффективного ковариантного метода

Бардина–Шумейко.

В первой главе диссертации дается краткий обзор современного состояния проблемы. Описаны эксперименты, изложены основы теории в рамках Стандартной модели (СМ). Кратко описаны некоторые возможные выходы за рамки СМ. Наконец, обсуждается роль учета радиационных поправок в реализации современных экспериментов физики высоких энергий, указывается место, которое занимают в них разработки автора, проводится обзор литературы.

Во второй главе описан прецизионный расчет наблюдаемых величин в процессе поляризационного мёллеровского рассеяния, которое (раздел 2.1) представляет интерес, как для точного определения поляризации электронного пучка, так и для сверхточного определения синуса угла Вайнберга в экспериментах E-158 (SLAC) и MOLLER (JLab).

В разделе 2.2 в борновском приближении описан главный объект исследования – поляризационная асимметрия. Отмечается, что эксперимент E-158, в котором изучалось мёллеровское рассеяние поляризованных электронов с энергиями 45-48 ГэВ на неполяризованных электронах водородной мишени, дал лучшие на настоящий момент значения. Аналогичный эксперимент следующего поколения MOLLER с пучком 11 ГэВ позволит измерить асимметрию на новом уровне чувствительности.

В разделе 2.3 рассмотрены вклады в асимметрию от однопетлевых диаграмм с дополнительными виртуальными частицами. Подробно рассмотрена ренормализационная схема на массовой поверхности, требования калибровочной инвариантности и зависимость от ренормализационных условий для различных вкладов. Используется два набора: ренормусловия Деннера (РУД) и ренормусловия Холлика (РУХ). Подробно рассмотрен двухбозонный обмен, получено два варианта асимптотических формул для этого вклада в случае низких и сверхвысоких энергий (подробно описано в разделе 4.3).

В разделе 2.4 рассмотрен вклад от тормозного излучения. Подробно описано выделение и сокращение инфракрасной расходимости. Для части жестких фотонов получены формулы в ведущем логарифмическом приближении. Численно и аналитически (новым оригинальным способом) показана независимость результата от максимальной энергии мягкого тормозного фотона.

В разделе 2.5 описаны возможности разработанной численной программы прецизионного учета однопетлевых электрослабых радиационных поправок к наблюдаемой поляризованной асимметрии мёллеровского рассеяния. Физический эффект стандартно определяется с помощью относительной поправки. Все результаты получены на высоком уровне точности. В частности, сверены результаты, полученные в компактной аналитической форме и в точной форме, с применением современных компьютерных программ. В качестве тестирования точности проверена независимость численного результата от выбора ренормализационных условий РУД или РУХ в рамках схемы перенормировки на массовой поверхности, для этого подробно проанализирована структура слабых вкладов в относительную поправку к асимметрии как для низких (SLAC, JLab), так и для сверхвысоких (ILC) энергий. Расчеты в РУХ проведены с помощью FORTRAN-программы *gcAPV*. Поведение рассматриваемых однопетлевых электрослабых поправок иллюстрируется. На фоне обозначенных кинематических точек экспериментов MOLLER и E-158 отчетливо видно хорошее согласие асимптотических расчетов с расчетом методами компьютерной алгебры, как в низкоэнергетической, так и в высокоэнергетической области. Незначительное расхождение на краях обусловлено: слева - численной нестабильностью компьютерной программы точного расчета, справа - тем, что асимптотический метод перестает работать в области энергий вблизи Z -резонанса. Кроме этого, в области сверхвысоких энергий результат соискателя имеет хорошее согласие с результатами известной работы Деннера и Поццорини (EPJ C, 1999).

В главе 3 произведена оценка двухпетлевых радиационных эффектов в эксперименте MOLLER. Необходимость в расчете двухпетлевых поправок обусловлена его высокой экспериментальной точностью. Дифференциальное сечение на двухпетлевом уровне представлено в виде суммы сечения в борновском приближении, сечения с точностью до однопетлевой ЭСП (глава 2), Q -части двухпетлевой поправки (квадрат однопетлевых диаграмм), T -части двухпетлевой поправки (произведения борновских и двухпетлевых диаграмм).

В разделе 3.3 описана структура амплитуд и решается проблема сокращения инфракрасной расходимости на одно- и двухпетлевом уровнях. Оригинальным авторским методом рассчитывается вклад двух тормозных фотонов и проводится анализ физического вклада мнимой части амплитуды.

В разделе 3.4 представлен анализ структуры относительных поправок к асимметрии в Q - и T -частях и проведен численный анализ. В T -часть включены дающие значимый для MOLLER вклады калибровочно-инвариантного набора вершин и собственных бозонных энергий. Получены компактные аналитические выражения для относительных поправок к сечению и поляризованной асимметрии от отдельных вкладов. Вклады для относительных поправок к неполяризованному сечению и асимметрии для центральной кинематической точки MOLLER для удобства сведены в таблицу, которая иллюстрирует изменение суммарной поправки к асимметрии при добавлении различных вкладов (экспериментально разделить которые невозможно) и то, что Q -часть и T -часть не компенсируют друг друга (для обеих введенных относительных поправок), так что суммарный эффект значителен.

Предложена оригинальная методика учета ЭСП для наблюдаемой в MOLLER асимметрии, заключающаяся в предварительном расчете аддитивных относительных поправок значимых вкладов (на этом этапе крайне удобно тестировать расчет, поскольку каждый отдельный вклад в относительные поправки имеет простую аналитическую форму), затем сложить их (в силу аддитивности), наконец, рассчитать по предварительно выведенной формуле физический эффект, т.е. поправку к асимметрии. Проведенный численный анализ позволяет сделать однозначный вывод: в экспериментальной программе MOLLER учет двухпетлевых поправок необходим.

В главе 4 рассчитаны электрослабые поправки для процесса Дрелла-Яна при больших инвариантных массах дилептона (больше 1 ТэВ), который интересен (см. раздел

4.1) с точки зрения возможности нахождения следов НФ в экспериментах на LHC. В настоящий момент имеются измерения дифференциального сечения по инвариантной массе M и дважды дифференциального сечения (по M и быстрой дилептона) при энергии 7 ТэВ, M больше 1.5 ТэВ и светимости 4.5/fb, которые находятся в согласии с предсказаниями CM при учете радиационных поправок с помощью FEWZ и POWHEG. Чтобы оценить поправки быстро и точно (что важно на краях кинематической области, особенно при больших S и M , где могут возникнуть вычислительные проблемы), полезно иметь компактные, не зависящие от нефизических параметров формулы. Для формул слабой части в главах 4–6 активно используется язык судаковских логарифмов, для КЭД-части – коллинеарных логарифмов.

В разделе 4.2 вводятся обозначения и рассчитывается борновское сечение процесса Дрелла–Яна. Как и другие вклады с безрадиационной кинематикой оно формируется по конволюционной формуле и рассчитывается в разделе 4.3. 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. Метод основан на эффективном преобразовании, позволяющем выделить часть, дающую численно значимый эффект в области высоких энергий. Он работает для расчета всех каналов, как для вершинных, так и для боксовских (здесь он особенно эффективен) электрослабых диаграмм. Проведенное отдельное исследование на партонном уровне показывает хорошее согласие всех вкладов в ЭСП, рассчитанных соискателем, в том числе предлагаемым асимптотическим методом с известными результатами групп SANC и ZGRAD. В конце главы вычислено сечение мягких тормозных фотонов.

В главе 5 изучаются радиационные эффекты в ведущем логарифмическом приближении для процесса Дрелла–Яна. В разделе 5.2 разобрана радиационная кинематика и фазовый объем реакции с тормозным фотоном. Далее объяснено, как сечение перестраивается в трижды дифференциальную форму: вычисляются необходимые якобианы перехода (как для безрадиационной, так и для радиационной частей).

В разделе 5.3 получены формулы в ведущем логарифмическом приближении для реакции Дрелла–Яна. Вычислены пики излучения из начального, из конечного состояния, а также все интерференционные слагаемые. Проблема массовой сингулярности кварков решается в рамках схемы с минимальным вычитанием.

Далее, в разделе 5.4 с помощью разработанной соискателем программы READY проводится расширенный численный анализ. Используется стандартный набор предписаний эксперимента CMS LHC. Доказывается независимость результата от максимальной энергии мягкого фотона и кварковых масс. Приведено сравнение результатов READY для дифференциального по M сечения с учетом ЭСП с результатами групп HORACE, SANC, ZGRAD2, которое показывает хорошее согласие (на уровне процента) при M больше 1 ТэВ. Исследуется относительная поправка для трижды дифференциального сечения. Зависимости ее от значений M , y и угла вылета антилептона подробно анализируются и для сводятся в таблицы.

В главе 6 изучены однопетлевые КХД поправки для процесса Дрелла–Яна на LHC. Часть сечения, ответственную за ISR, получена в разделе 6.2 из результатов КЭД с использованием замены постоянной тонкой структуры на константу сильного взаимодействия. Далее приведена радиационная кинематика и фазовый объем реакции с тормозным глюоном, получены формулы для ведущего логарифмического приближения. Инверсное глюонное излучение (IGE) рассчитано в разделе 6.3. Выделена ведущая логарифмическая часть инверсного глюонного излучения, изучены все пики и интерференционные слагаемые. Устранение кварковой сингулярности из сечения IGE проводится аналогично результатам предыдущей главы. Аналитически и численно

доказана независимость от нефизических параметров: максимальной энергии мягких глюонов и кварковых масс.

В разделе 6.4 изучается зависимость относительных КХД-поправок от значений M , u и угла вылета антилептона.

В приложении А приведены справочные формулы, касающиеся свойств дилогарифма Спенса. В приложении Б приводятся громоздкие выражения для сечения тормозного излучения. В Заключении кратко сформулированы основные научные результаты диссертации (5) и рекомендации (3) по ее практическому использованию.

Не вызывает сомнения достоверность полученных результатов, поскольку ряд численных оценок был подтвержден согласием с результатами других авторов, в том числе с представителями группы SANC. Так, сверены результаты по расчету 1) бозонных собственных энергий 4-фермионного процесса в s -канале, 2) электрослабых вершинных функций, 3) s -канальных электрослабых боксов. Отклонения от точного численного совпадения в диссертации проанализированы и подробно обсуждены. Были использованы и другие способы для проверки результатов работы созданных соискателем программ, например, аналитические расчеты с применением асимптотических методов проверялись программами компьютерной алгебры. Отдельного упоминания заслуживает примененная соискателем с соавторами техника расчетов с применением различных ренормализационных условий. Соискателем соблюдены все стандартные условия, необходимые при пертурбативных расчетах электрослабых радиационных эффектов: полностью обработана инфракрасная расходимость, устранены зависимости от нефизических параметров, таких как «мягкость» фотона (глюона) и значения кварковых масс.

Результаты, полученные в диссертации являются новыми. Наиболее важные из них коротко перечислю:

- 1) В главе 2 разработана и реализована в виде нового компьютерного кода `gsAPV` процедура учета ЭСП к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния.
- 2) В главе 3 создана новая методика суммирования радиационных вкладов в поляризационные наблюдаемые величины.
- 3) В главе 4 развит новый асимптотический метод получения удобных для анализа и оценки ЭСП, обеспечивающий высокую точность в области высоких энергий.
- 4) В главах 5 и 6 получены новые аналитические формулы ведущего логарифмического приближения для жесткого тормозного излучения фотонов, глюонов и инверсного глюонного излучения в процессе Дрелла-Яна и жесткого тормозного излучения фотонов в мёллеровском рассеянии (глава 2).
- 5) В главах 4-6 разработана и реализована в виде кода `READY` процедура учета ЭСП и КХД поправок в процессе Дрелла-Яна при больших инвариантных массах лептонной пары.

Практическая значимость диссертации подтверждается востребованностью результатов и развитых методов у экспериментаторов. Программа учета жесткого тормозного излучения, разработанная в диссертации, была использована в обработке данных эксперимента E-158, 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. Программа автора `READY` была разработана в рамках сотрудничества с коллаборацией RDMS CMS в ОИЯИ, где соискатель работал в 2006-2007 гг. Код `READY`, без сомнения, сыграет важную роль в обработке данных экспериментов на CMS LHC с планируемой энергией 13-14 ТэВ.

Результаты диссертации прошли **апробацию** на многих конференциях республиканского и международного уровня, было сделано более 50 докладов. Из них следует выделить собрания коллаборации E-158 (Pasadena, 23-24 Jan., 2004), доклады на

собраниях коллаборации RDMS CMS, доклады на Рочестерских конференциях (ICHER06–ICHER14), доклады на конференциях ACAT2013 и ACAT2016.

Материалы диссертации **полностью** изложены в 61 публикации. Уровень журналов, в которых публиковались материалы диссертации (всего 34 журнальные публикации), высокий. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Название диссертации соответствует ее содержанию, содержание – специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация В.А. Зыкунова отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам диссертант безусловно заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
проблем ядерной физики и безопасности
Государственного научного учреждения
«Объединенный институт энергетических
и ядерных исследований – Сосны»
Национальной академии наук Беларуси



В.И.Кувшинов

e-mail: v.kuvshinov@sosny.bas-net.by

Объединенный институт энергетических
и ядерных исследований – Сосны»,
220109, Минск, а/я 119
Республика Беларусь

21 июня 2016 г.

Подпись удостоверяю
Ученый секретарь



А.В.Радкевич