

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Зыкунова Владимира Александровича “Эффекты радиационных поправок в современных экспериментах физики высоких энергий”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 “Теоретическая физика”.

Диссертация Зыкунова Владимира Александровича посвящена весьма актуальной проблеме исследования роли радиационных поправок квантовой электродинамики и теории электрослабых взаимодействий Стандартной модели (СМ) в процессах мёллеровского рассеяния и процессах Дрелла-Яна.

Необходимость прецизионных расчетов в рамках Стандартной Модели вызвана тем, что возросшие энергии современных ускорителей позволяют исследовать Стандартную Модель и ее параметры в еще неизученных новых кинематических областях, а также значительное увеличение точности и сложности современных экспериментов предъявляют очень высокие требования к теоретическому описанию процессов физики высоких энергий. Для того, чтобы при интерпретации экспериментальных данных, не вносить дополнительную “теоретическую” систематику, современная экспериментальная физика высоких энергий требует проведения высокоточных теоретических расчетов. Современное теоретическое сопровождение всегда базируется на интенсивном использовании компьютерных технологий как при планировании эксперимента, так и при обработке экспериментальных данных. Необходимым же условием применения высокоточных расчетов в интерпретации экспериментальных данных является их доведение до уровня компьютерных программ, а в идеале их реализация в виде соответствующих Монте Карло генераторов. Тогда можно говорить о “теоретической поддержке” эксперимента.

Автор диссертации хорошо известен работами по теоретической поддержке экспериментов физики высоких энергий в связи с экспериментами на LHC.

Рассматриваемая диссертация основана на работах по теоретической поддержке экспериментов, выполненных за последние 20 лет.

Логически диссертация подразделяется на две части: во-первых, это исследования однопетлевых и двухпетлевых радиационных поправок для мёллеровского рассеяния для экспериментов на SLAC и ILC и, во-вторых, это исследования однопетлевых электрослабых и КХД радиационных эффектов для процесса Дрелла-Яна (DY) для эксперимента CMS ускорителя LHC.

**Цель** данной диссертации состоит в теоретической поддержке различных современных экспериментов физики высоких энергий путем создания программных продуктов с удобными интерфейсами, в которых реализованы расчеты соответствующих наблюдаемых на однопетлевом (мёллеровское рассеяние и процесс DY) и двухпетлевом уровне (мёллеров-

ское рассеяние) точности в СМ с теоретической неопределенностью лучшей, чем экспериментальные ошибки.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, двух приложений и перечня цитируемой литературы. Текст диссертации составляет 216 страниц, диссертация содержит 16 таблиц и 32 рисунка.

Перейдем к краткому анализу содержания диссертации по Главам и Разделам. Каждая Глава диссертации состоит из Разделов. Как правило, Раздел описывает отдельное исследование.

**В Первой главе** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется основная цель и задачи, возникающие при ее достижении, рассматривается научная новизна проведенных исследований, а также представляется краткий обзор достижений в данной области.

**Во Второй главе** диссертации описан прецизионный расчет наблюдаемых величин в процессе поляризационного мёллеровского рассеяния  $e(k_1) + e(p_1) \rightarrow e(k_2) + e(p_2)$ .

Далее в разделе 2.2 описана поляризационная асимметрия в борновском приближении. 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: либо ренормализационные условия А. Деннера либо В. Холлика. Подробно рассмотрен двухбозонный обмен и для него получено два варианта асимптотических формул: в случае низких и сверхвысоких энергий. Во втором случае результат получен приближённо, т. е. разложением по степеням судаковских логарифмов, для чего использовался асимптотический метод. В разделе 2.4 рассмотрен вклад в процесс от тормозного излучения. Описано выделение и сокращение инфракрасной расходимости. Для устранения инфракрасных расходимостей учтены вклады мягкого тормозного излучения. Вычислены вклады жесткого тормозного излучения в ведущем логарифмическом приближении. Внедрение описанных в данной главе расчетов в программу `gsAPV` представлены в разделе 2.5. Здесь описаны возможности разработанной численной программы `gsAPV` для прецизионного учета однопетлевых электрослабых радиационных поправок к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния. Приведены численные результаты для низких E-158 (SLAC), MOLLER (JLab) и для планируемых сверхвысоких энергий на ILC.

Все результаты получены на хорошем уровне точности, достигается хорошее согласие с результатами других работ (А. Деннер и С. Поцторини).

**В Главе 3** произведена оценка двухпетлевых радиационных эффектов в эксперименте MOLLER. Необходимость в расчете двухпетлевых поправок обусловлена его высокой экспериментальной точностью. В разделе 3.2 приведены основные обозначения, объяснена кинематика и структура сечений. Далее в разделе 3.3 в единых обозначениях описана структура амплитуд и решается проблема сокращения инфракрасной расходимости на одно- и двухпетлевом уровнях. Проведен анализ физического вклада мнимой части амплитуды. В разделе 3.4 представлен анализ структуры относительных поправок к асим-

метрии и проведен численный анализ. Получены компактные аналитические выражения для относительных поправок к сечению и поляризационной асимметрии от отдельных вкладов. Проведенный численный анализ демонстрирует необходимость учета двухпетлевых поправок в экспериментальной программе MOLLER.

**В Главе 4** детально рассматриваются электрослабые поправки для процесса  $DY$  при больших инвариантных массах дилептона, который интересен с точки зрения возможности нахождения следов новой физики (композитности фермионов и калибровочных бозонов, сценариев с дополнительными размерностями и дополнительными калибровочными бозонами) в экспериментах на LHC. Для формул слабой части в главах 4-6 используются судакские логарифмы, для КЭД-части коллинеарные логарифмы. В разделе 4.2 вводятся обозначения и рассчитывается борновское сечение процесса  $DY$ . В разделе 4.3 рассчитываются вклады в электрослабую поправку процессов с безрадиационной кинематикой. На примере расчета вклада прямых боксов с массивными ( $W, Z$ ) бозонами в разделе подробно описан новый асимптотический метод, позволяющий получить компактные, удобные для анализа и быстрой оценки выражения для электрослабых поправок и, в то же время, обеспечить требуемую точность в области высоких энергий. Представлено сравнение результатов на партонном уровне с мировой литературой: SANC и ZGRAD. Следует отметить, что аналитические расчеты SANC проводились в другой метрике и в  $R_\xi$  калибровке. Получено хорошее численное согласие всех вкладов в электрослабую поправку.

**В Главе 5** изучаются радиационные эффекты в ведущем логарифмическом приближении для процесса  $DY$ . В разделе 5.2 описана радиационная кинематика и фазовый объем реакции тормозного излучения. Далее в разделе 5.3 получены формулы в ведущем логарифмическом приближении для реакции  $DY$ . Проблема массовой сингулярности кварков решается в рамках MS-схемы. Полученные результаты были внедрены в программу READY (Radiative corrections to Large invariant mass Drell Yan process радиационные поправки для процесса  $DY$  с большими инвариантными массами). Раздел 5.4 посвящен численному анализу исследуемых радиационных поправок с помощью программы READY. Сравнение результатов READY для дифференциального сечения процесса с результатами групп HORACE, SANC, ZGRAD2 показывает согласие на уровне одного процента. Исследуется относительная поправка для трижды дифференциального сечения.

**В Главе 6** изучены однопетлевые КХД поправки для процесса  $DY$  на LHC. В разделе описана радиационная кинематика и получены формулы для ведущего логарифмического приближения. Излучение обратных глюонов рассчитано в разделе 6.3. В разделе 6.4 изучается зависимость относительных КХД-поправок при фиксированном партонном распределении.

**В Заключение** кратко излагаются научные результаты, представленные в диссертации, и формулируются основные положения, выносимые на защиту.

Проведенные в диссертации исследования несомненно интересны и актуальны, а программные продукты gsAPV и READY востребованы.

К наиболее значимым результатам диссертационной работы Зыкунова Владимира Александровича следует отнести те, что выносятся на защиту:

- Расчет полных однопетлевых и лидирующих двухпетлевых электрослабых радиационных поправок к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния.
- Создание и применение программы прецизионного учета  $g_2^{APV}$  этих поправок для современных экспериментов на SLAC и для планируемых экспериментов на ILC. Успешно проведено сравнение с результатами других групп. Численно и аналитически доказана независимость полученного результата от нефизических параметров и независимость от ренормализационных условий в рамках схемы перенормировки на массовой поверхности. Исследована зависимость радиационных эффектов от экспериментальных ограничений.
- Рассчитаны двухпетлевые электрослабые радиационные поправки: квадрат однопетлевых вкладов и вкладов, образующих калибровочно-инвариантный набор двухпетлевых вершинных диаграмм и бозонных собственных энергий, к наблюдаемой поляризационной асимметрии мёллеровского рассеяния для эксперимента MOLLER (JLab). Достигнуто согласие результатов для двухпетлевого вклада, обусловленного квадратом однопетлевых диаграмм, полученных независимо с применением аналитических методов в компактной форме, удобной для анализа.
- Впервые проведен анализ физического вклада мнимой части амплитуды. Подробно разобрана структура относительной поправки к асимметрии, выработана новая эффективная методика сложения различных вкладов в наблюдаемую поляризационную асимметрию от одно- и двухпетлевых радиационных эффектов, которая позволяет контролировать точность учета радиационных эффектов. Проведена численная оценка одно- и двухпетлевых радиационных эффектов.
- Разработан новый асимптотический метод, позволяющий получить компактные, удобные для анализа и быстрой оценки электрослабые поправки к различным типам диаграмм. Проведенное отдельное исследование показывает хорошее согласие с результатами групп SANC, ZGRAD для всех вкладов в электрослабую поправку.
- Произведен новый детальный расчет в ведущем логарифмическом приближении жесткого тормозного излучения фотонов, глюонов и инверсного глюонного излучения для процесса DY и расчет жесткого тормозного излучения фотонов для поляризационного мёллеровского рассеяния при произвольных энергиях.
- Создан программный пакет READY для быстрой и точной оценки однопетлевых электрослабых и КХД радиационных эффектов в процессе DY при больших инвариантных массах лептонной пары для экспериментов на коллайдере LHC с учетом экспериментальных условий установки CMS.
- Произведено полное описание возможностей программы READY, приведены все формулы для вкладов в сечения и кинематических ограничений. Изюминкой пакета

READY является использование трижды дифференциальных сечений, дающее возможность гибко корректировать данные в любой кинематической области.

В качестве замечаний следует отметить, что авторскому стилю присущи некоторая фрагментарность изложения, а также использование жаргона, например: тормозной глюон и т. п. Также, возможно, вынесение некоторых технических подробностей в приложения упростило бы изложение материала. Представляется излишним приложение со справочными формулами, касающиеся свойств дилогарифма Спенса.

Однако, отмеченные небольшие недостатки не меняют общей положительной оценки представленной работы. Диссертация является законченным научным трудом. Ее практическая и научная ценность состоит в широком использовании созданных программных продуктов в процедурах анализа данных в современных экспериментах на ЛНС. Достоверность результатов, полученных автором диссертации, не вызывает сомнения и подтверждается многочисленными тестами и, там где это было возможно, сравнением с существующими результатами расчетов других групп.

Результаты, полученные в диссертации, являются новыми и оригинальными, с достаточной полнотой опубликованы в реферируемых научных журналах, неоднократно докладывались на международных научных семинарах, совещаниях и конференциях, они имеют весьма хорошую цитируемость. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат в целом верно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Зыкунова Владимира Александровича “Эффекты радиационных поправок в современных экспериментах физики высоких энергий”, соответствует специальности 01.04.02 “Теоретическая физика” и отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, а ее автор Зыкунов Владимир Александрович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник ЛЯП ОИЯИ  
место работы: НЭОВП ЛЯП ОИЯИ  
рабочий телефон: 21 63061

рабочий почтовый адрес: 141980, Жолио Кюри 6, г. Дубна, Московская область.  
e-mail: kalinov@cern.ch

Калиновская Лидия Владимировна

10.10.2016

Подпись заверяю,  
Ученый секретарь ЛЯП ОИЯИ



Титкова Ирина Викторовна