

### Отзыв научных руководителей

д. ф.-м. н. Калиновской Лидии Владимировны и  
к. ф.-м. н. Бондаренко Сергея Григорьевича  
на диссертацию Углова Евгения Дмитриевича  
«Систематическое описание четырех-бозонных процессов  
в Стандартной Модели на однопетлевом уровне»,  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц.

Научно-исследовательская работа Евгения Дмитриевича Углова состояла в проведении теоретических расчетов однопетлевых поправок четырех бозонных процессов типа:  $\gamma\gamma\to\gamma\gamma$ ,  $\gamma\gamma\to\gamma Z$ ,  $Z\to\gamma\gamma$ ,  $\gamma\gamma\to ZZ$  и процесса  $\text{had}\to W\gamma$ .

Все аналитические вычисления в данном исследовании проведены на языке FORM на однопетлевом уровне точности в ренормализационной схеме на массовой поверхности в  $R_{\xi}$  калибровке.

Результаты исследования представляются в виде автономных аналитических и фортранных модулей для оценок эффектов однопетлевых сечений и ширины распадов.

Изложение материала диссертации начинается с главы **Введение**. В этой главе широко освещается актуальность вычисления процесса рассеяния света на свете в связи с экспериментом на тяжелых ионах ускорителя LHC 2015 года. Отмечается возможность использования представленных расчетов в  $\gamma\gamma$  поляризационной физике ускорителей ILC и CLIC.

**В первой главе** диссертации описывается пример процедуры внедрения процесса  $\gamma\gamma\to\gamma\gamma$  в КЭД приближении через фермионную петлю в рабочую среду системы SANC.

В исследовании учитываются ненулевые массы петлевых частиц. Дается краткий теоретический обзор вычисления: вычисление однопетлевых скалярных форм факторов и спиральных амплитуд.

Тензорные структуры ковариантной амплитуды записаны через основные 14 простых тензорных строк. Показан явный вид полного базиса. Автором получены выражения для спиральных амплитуд процесса. Итогом этой главы для процесса рассеяния света на свете (КЭД часть) является создание пакета sanc\_4A\_v1.00, доступного для скачивания.

**Во второй главе** диссертации приведен расчет ЭС поправок в однопетлевом приближении в СМ для процесса  $\gamma\gamma\to\gamma\gamma$ . В данной главе описывается внедрение процесса СМ  $\gamma\gamma\to\gamma\gamma$  через фермионную и бозонную петли и соответствующие разработанные модули предвычислений в рабочей среде системы SANC. Вычисления этого процесса учитывают ненулевые массы петлевых частиц.

Представлена ковариантная амплитуда процесса в виде тензорных структур. Далее описываются спиральные амплитуды процесса. Заканчивается изложение полученными численными результатами и их сравнением с имеющимися в литературе расчетами.

**В третьей главе** диссертации приведен расчет ЭС поправок в однопетлевом приближении для процесса в каналах аннигиляции  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$  и канале распада  $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ .

Для расчетов этих процессов применялся мультиканальный подход, то есть вначале считается процесс аннигиляции в вакуум, а затем в выражениях проводится замена на реальные импульсы.

Подробно описана тензорная структура ковариантной амплитуды процесса  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ . Показаны спиральные амплитуды для различных каналов, формулы для сечений рассеяния и ширины распада соответственно. Проведено аналитическое и численное сравнение с имеющимися работами для этих процессов.

**В четвертой главе** диссертации рассматриваются результаты вычисления процесса  $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$  на однопетлевом уровне. Представлены спиральные амплитуды процесса и пример их использования в поляризованной физике.

**В пятой главе** диссертации описываются компьютерные продукты системы SANC: стандартные пакеты SANC FORTRAN для вычислений ЭС поправок в однопетлевом приближении процессов:

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ ,  
 $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ ,  $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ ;

а также библиотека специальных функций и алгоритмов, представлено описание генератора диаграмм и амплитуд SANC2.

**Шестая глава** диссертации посвящена описанию вычисления поправок к процессу  $ud \rightarrow WA$  на партонном уровне. Кроме того, рассматривается подход к аналитическому сокращению массовых и инфракрасных сингулярностей при расчете ЭС поправок.

Описаны введение и вычисление вспомогательных функций  $J$ , возникающих при отделении инфракрасных расходимостей из  $D_0$  функций в редукции Пассарино-Вельтмана для этого процесса.

**В Заключении** изложены основные результаты работы.

Результаты исследования имеют актуальное прикладное значение - как для физики LHC, так и для физики будущих ускорителей ILC и CLIC.

Измерения рассеяния света на свете оставались трудно уловимыми до недавнего времени. В 2013 году было предложено искать рассеяние света на свете в ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов на LHC. Недавно были опубликованы первые результаты эксперимента и обработки на КЭД уровне коллаборацией ATLAS. Предполагается использование стандартных SANC модулей  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  для оценки теоретической неопределенности на однопетлевом уровне точности.

Высокоточные измерения с поляризованными пучками в будущих линейных  $e^+e^-$  коллайдерах ILC и CLIC потребуют современной теоретической поддержки, и эта современная теоретическая поддержка начинает создаваться.

Поскольку измерения будут очень точными, т.е. предполагается оценка статистической погрешности ниже 0,1%, поэтому необходимо учитывать эффекты поляризации в радиационные поправки. В частности, активно развивается

программный продукт WIZARD для оценки эффектов поляризации. Однако петлевые эффекты там не учитываются.

Представленная работа имеет в том числе своей задачей создание автономных модулей аналитических выражений спиральных амплитуд четырех бозонных процессов. Знание спиральных амплитуд - это ключ к оценке эффекта поляризации в однопетлевой радиационной поправке.

В проекте SANC в генератор MCSANC пока внедрены оценки эффектов продольной поляризации процессов:  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ .

Следующий шаг - развитие ветви генератора MCSANC для учета однопетлевых поправок с учетом поперечной поляризации. В первую очередь это будут процессы  $\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}$ , исследованию которых и посвящена данная диссертация.

Проведенное Угловым Е.Д. исследование свидетельствует о том, что автор в достаточной мере владеет методами расчета однопетлевых поправок, обладает высоким уровнем компьютерной грамотности, имеет широкую эрудицию в области теоретической поддержки экспериментов физики высоких энергий.

Считаем, что диссертационная работа Углова Евгения Дмитриевича представляет собой законченное научное исследование, соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а он сам заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц по физико-математическим наукам.

**д.ф.-м.н. Калиновская Лидия Владимировна**

Адрес: 141980, ул. Жолио-Кюри, д. 6, г. Дубна, Московская область.

Телефон: 8 (496) 216-30-61.

Адрес электронной почты: [kalinov@jinr.ru](mailto:kalinov@jinr.ru)

Наименование организации: Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова, Научно-экспериментальный отдел встречных пучков.

Должность в организации: ведущий научный сотрудник.

Подпись Калиновской Л.В. заверяю.

*Уд. секретарь ЛВ*

**к.ф.-м.н. Бондаренко Сергей Григорьевич**

*Лидия / Григорьев У.В.  
С. Бондаренко*

Адрес: 141980, ул. Жолио-Кюри, д. 6, г. Дубна, Московская область.

Телефон: 8 (496) 216-35-25.

Адрес электронной почты: [bondaren@theor.jinr.ru](mailto:bondaren@theor.jinr.ru)

Наименование организации: Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, Научный отдел теории атомного ядра.

Должность в организации: старший научный сотрудник.

Подпись Бондаренко С.Г. заверяю.

*Уд. секретарь ЛТФ ОИЯИ*

*А.В. Андреев*

