

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Углов Евгений Дмитриевич

**Систематическое описание четырех-бозонных
процессов в Стандартной Модели на
однопетлевом уровне**

Специальность 01.04.16 —
физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2017

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, в.н.с.
кандидат физико-математических наук, с.н.с.

Л.В. Калиновская
С.Г. Бондаренко

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, доцент
(профессор Ярославского государственного университета (г. Ярославль))
кандидат физико-математических наук
(доцент Государственного университета "МУПОиЧ Дубна"(г. Дубна))

А.А. Гвоздев
С.М. Доркин

Ведущая организация:

Самарский национальный исследовательский
университет им. академика С.П. Королева (г. Самара)

Защита диссертации состоится « » _____ 2017 г. в ____ часов на за-
седании диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической
физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследова-
ний, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
и на сайте Объединенного института ядерных исследований
(http://wwwinfo.jinr.ru/dissertation/DC_bltph.htm).

Автореферат разослан « » _____ 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 720.001.01 на базе ОИЯИ, к.ф.-м.н.

Быстрицкий Ю.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В настоящий момент в CERN работает Большой адронный коллайдер (LHC), который сталкивает между собой протоны. Энергия соударения настолько велика, что в конечном состоянии образуются новые частицы, которые позволяют нам исследовать материю на самых малых расстояниях и масштабах. Протоны в ускорителе циркулируют сгустками с более миллиардом частиц. Когда два сгустка фокусируются магнитами друг на друга в центре детекторов, таких как CMS и ATLAS, происходит соударение порядка 30 протонов. Остальные частицы пролетают дальше в ускорительное кольцо до следующего соударения.

Более частое событие с протонами немного другое. Если два протона пролетают близко друг от друга в различных направлениях, то из каждой частицы излучаются фотоны, которые могут сталкиваться между собой и рождать новые частицы.

При этом два первоначальных протона остаются практически невзаимодействующими, продолжая свой путь в ускорительном кольце LHC. Взаимодействие излученной пары фотонов отнимает лишь часть энергии протонов, заставляя их слегка отклониться от начальной траектории. Идентифицируя отклоненные протоны, можно определить, было ли такое взаимодействие фотонов. Данная схема эффективно превращает LHC в фотонный коллайдер. Также возможно взаимодействие протонов через обмен парой глюонов, что представляет интерес для КХД физики.

Идея мечения рассеянных протонов была предложена на предыдущих коллайдерах, а также на стадии LHC в 2012 и 2015 годах на низкоэнергетических пучках. Предложение исследовать данный тип физики с помощью экспериментов CMS и ATLAS на LHC впервые высказано много лет назад, но проект под именем FP420 не был реализован.

Новый проект называется CMS-TOTEM – точный протонный спектрометр (CT-PPS), цель которого в настоящее время сделать возможным изучение фотон-фотонной физики на LHC при номинальной светимости. В то время как CMS является универсальным детектором для физики LHC, CT-PPS использует два набора детекторов, расположенных в 200 метрах от точки взаимодействия в CMS для измерения протонов, рассеянных в прямом направлении. Параллельный проект называется "Прямая физика на ATLAS" (AFP), который разрабатывается в коллаборации. Оба проекта нацелены на реализацию и сбор данных в течение 2017 года во время сеансов LHC для протон-протонных соударений.

Несмотря на электрическую нейтральность фотонов, Стандартная Модель (СМ) позволяет взаимодействовать двум фотонам через обмен виртуальными заряженными частицами. Возможны несколько конечных состояний, включая пару фотонов. Процесс рассеяния света на свете хорошо известен со времен развития квантовой электродинамики (КЭД) и косвенно проверялся в нескольких экспериментах, но первые прямые наблюдения были зафиксированы в прошлом году в эксперименте ATLAS при измерении столкновения ионов свинца при низкой светимости. Так как вероятность излучения фотонов пропорциональна квадрату электрического заряда частицы, сечение рассеяния при столкновениях ионов свинца значительно выше, чем при протон-протонных соударениях. Изучая события с двумя фотонами в отсутствие других частиц в центральной части детектора, а также используя кинематические ограничения для подавления фоновых событий, была получена инвариантная масса двух фотонов в диапазоне до 10 ГэВ. Измеренное сечение рассеяния соответствовало предсказаниям КЭД, результат в эксперименте ATLAS значимых отклонений в низкоэнергетичном диапазоне масс, как и ранее ожидалось, не зафиксировал.

Однако, в экспериментах ST-PPS и AFP соударения протонов с высокой светимостью позволяют исследовать большую область масс - в диапазоне между 300 ГэВ и 2 ТэВ в случае ST-PPS. Мечение протонов возможно из-за наблюдения высокоэнергетичных систем в центральной области, при этом протоны теряют достаточно много энергии чтобы отклониться в ST-PPS детектор. Изучение взаимодействия фотонов в данной области может предоставить косвенные новые данные об электрослабом (ЭС) взаимодействии, в частности четырех-точечной константе взаимодействия, предсказанной в СМ. При данном взаимодействии два фотона аннигилируют через соударение и рождаются два W -бозона, производящих четыре частицы в той же точке. Отклонение от предсказаний СМ будет указывать на новую физику. Аналогично, как наблюдение отклонения в четырехчастичном взаимодействии в теории бета-распада Ферми в 1930 году в последующем привело к открытию W -бозона через 50 лет.

Имея потенциал в исследовании новой физики, фотон-фотонные коллайдеры являются объектом определенного интереса уже в течение нескольких десятилетий. Например, фотон-фотонные соударения изучались на Большом электрон-позитронном коллайдере LEP в CERN, в то время как исследования на HERA в DESY и Tevatron в Fermilab сосредотачивались на взаимодействиях протонов путем обмена глюонами для изучения квантовой хромодинамики КХД в непертурбативном режиме. На LHC получены пучки с гораздо большей энергией и светимостью, чем на LEP, но ценой соударения частиц,

не являющихся элементарными. Поэтому, единичные взаимодействия между глюонами и кварками не имеют строго определенную энергию, а продукты взаимодействия включают в себя остатки от двух протонов, делая тем самым физический анализ более сложным в общем случае.

Два замечания по порядку при рассмотрении проекта ILC. Во-первых, мы рассматриваем только высокоэнергетичные фотонные коллайдеры со светимостями, представляющими реальный интерес для физики элементарных частиц. В то время как известны эксперименты для низкоэнергетичного рассеяния света на свете. В 1928-30 гг. Вавилов исследовал рассеяние видимых фотонов от двух ламп. Затем, проходили эксперименты с фотонами от лазеров, но они также провалились из-за очень маленького сечения рассеяния фотона на фотоне при низкой энергии. Существовали идеи использовать синхротронное излучение, тормозное излучение фотонов, и даже ядерный взрыв для изучения фотон-фотонного взаимодействия. Фотоны тормозного излучения действительно могут быть достаточно высокоэнергетичными, но идея их соударения сложна в реализации на практике, более вероятны соударения виртуальных фотонов в накопительном кольце при большой светимости.

Во-вторых, хорошо известно, что при соударениях в электрон-позитронном линейном коллайдере электроны и позитроны излучают жесткие фотоны, примерно один такой фотон на электрон. Таким образом, совместно с позитрон-электронном коллайдером мы бесплатно получаем фотон-фотонный коллайдер с высокой светимостью и довольно большой энергией (обычно несколько процентов от энергии пучка, но может быть и выше). При очень большой энергии средняя энергия такого фотона тормозного излучения составляет 25% от энергии электрона. В 1988 году Бланкенбеклер и Дрелл рассматривали предложение использовать такой фотон-фотонный коллайдер в режиме квантового тормозного излучения. Недостатки данного метода следующие: необходимо иметь мультитепный линейный коллайдер (или коллайдер с очень маленьким размером пучка). Светимость также ограничена нестабильностью соударения пучков, спектр фотонов достаточно широк, и в сильном поле сталкивающегося пучка, фотоны будут рождать электрон-позитронные пары. Фотонный коллайдер, основанный на обратном рассеянии Комптона, вносит вклад в изучение низко-энергетичной части спектра светимости фотон-фотонного взаимодействия и учитывается во всех моделированиях.

Возможность добавить моды фотон-фотон и фотон-электронных соударений для высокоэнергетичного электрон-позитронного линейного коллайдера увеличивает общую стоимость проекта на малую долю. Хотя светимость фотон-фотонной моды в высокоэнергетичной части спектра будет в

3-5 раз меньше, чем светимость электрон-позитронной моды, сечение рассеяния света на свете обычно при равных условиях больше на фактор 5-10 и, таким образом, интересные события могут появляться чаще, чем в электрон-позитронных соударениях. Более того, дальнейшее увеличение достигнутой светимости фотон-фотонной моды может в будущем составлять тот же порядок, что и для основной моды. Так как фотон прямо взаимодействует со всеми фундаментальными заряженными частицами – лептонами, кварками, W -бозонами, суперсимметричными частицами и так далее – фотонный коллайдер предоставляет возможность исследовать каждый аспект СМ и за ней. Кроме того, фотоны могут взаимодействовать и с нейтральными частицами (глюонами, Z -бозоном, бозоном Хиггса и так далее) через петлевую боксовскую диаграмму с заряженными частицами в пропагаторах.

Компактный линейный коллайдер (CLIC) является проектируемой мультитэвной высокоэнергетичной линейной машиной для электрон-позитронных соударений. Для оптимального использования его физического потенциала, CLIC проектируется для постройки и функционирования поэтапно с тремя стадиями наращивания энергии в системе центра масс от нескольких ГэВ до 3 ТэВ. Первая стадия будет сосредоточена на высокоточной проверке Стандартной Модели, в частности измерений свойств бозона Хиггса и топ кварка. Следующая стадия будет сосредоточена на измерениях редких процессов с бозоном Хиггса, такие как поиск новой физики, и высокоточных измерениях для следующей стадии по проверке состояний, открытых на LHC или самом CLIC. В концептуальном дизайн-отчете CLIC в 2012 году был представлен полностью оптимизированный 3 ТэВ коллайдер, в то время как низкоэнергетичная стадия была разработана с меньшим уровнем проработки деталей. Оптимизированные стадии сценария предполагают три основных этапа по энергии в системе центра масс, а именно 380 ГэВ, 1.5 ТэВ и 3 ТэВ, реализация которых займет 22 года.

Физический потенциал линейного коллайдера значительно расширяется в случае использования поляризованных пучков. Данное требование для CLIC является обязательным, так как имеются два заряженных пучка и средние токи в пучке меньше, чем в низкоэнергетичных и низкочастотных машинах.

Пучок поляризованных электронов с 80% поляризацией может быть получен с помощью фотоинжектора SLC-типа. Хотя создание интенсивного поляризованного пучка позитронов и более сложная задача, рассеяние Комптона на высокомоном лазерном луче может являться источником позитронов с 60-80% поляризацией. Экспериментальные разработки и прототипирование поляризованного позитронного источника, основанного на рассеянии

Комптона, проводились в КЕК для JLC проекта. Данная схема позволяет использовать преимущество быстроразвивающейся лазерной технологии. Геометрия транспортировочных линий пучка на CLIC и накопительного кольца выбираются таким образом, чтобы сохранялась поляризация пучка, аналогично проекту SLC. Отсутствует значительная деполяризация по пути к точке соударения.

При соударении пучков из-за тормозного излучения и эффекта сильных полей при 3 ТэВ около 7% эффективной поляризации будет потеряно. Около половины данных потерь происходит из-за спиновой прецессии, вторая половина – из-за излучения при перевороте спина. Далее, данный пучок ускоряется до больших энергий и, таким образом, на стадию ускорения не влияет требование высокой светимости при поляризации. Поэтому подразумевается установка двух комптоновских полариметров с разных частей детектора. Измерение с точностью 0.5% для входящего пучка будет сравнимо с полученным на SLC и ожидаемым в дизайнах других проектов. Достижение подобного разрешения для высокоэнергетического пучка является сверхзадачей. Более подробно о поляризации пучка при 3 ТэВ в системе центра масс можно найти по первоисточнику.

Мода фотонных соударений рассматривалась во всех проектах линейных ускорителей CLIC. Диапазон энергий от 0.5 до 1 ТэВ идеально подходит для рассеяния света на свете с технической точки зрения: длина волны лазера должна быть около 1 мкм, то есть в области самых мощных твердотельных лазеров, и поэтому эффекты соударений не будут ограничивать светимость фотон-фотонной моды. В мультитэвной области энергий ситуация более сложная: эффекты соударений с рождением когерентной пары при рассеянии света на свете будут значительны, что может повлиять на конечную светимость. Оптимальная длина волны лазера увеличивается пропорционально выбранной энергии. В добавок, требуемая энергия вспышки лазера увеличивается из-за нелинейного Комптоновского рассеяния. Опция фотонного коллайдера на 3 ТэВ основывается на лазере с длиной волны 4-6 мкм, как показали недавние исследования.

Предложенный проект Международного линейного ускорителя (ILC) хорошо подходит для изучения физики за пределами СМ и точного предсказания структуры данной физики. Исследования могут быть более эффективными при использовании поляризованных пучков как электронов, так и позитронов. При данной опции показаны преимущества путем соответствующего анализа реакции при различных физических сценариях. Результат показывает, что использование поляризованного позитронного пучка при соответствующей экспериментальной среде и оборудовании линейного ускорителя,

позволяет улучшить потенциал поиска новых частиц и определения их динамических свойств, что открывает дорогу к изучению СМ.

Рассеяние света на свете является одним из самых фундаментальных процессов. Он происходит через однопетлевую диаграмму типа бокс, содержащую заряженные частицы. Первый результат в КЭД для низкоэнергетического предела этого процесса был получен Эйлером. Затем Карплус и Неймен нашли решения в КЭД в общем, но сложном виде. Сечение рассеяния для данного процесса в высокоэнергетическом пределе КЭД было вычислено Ахиезером. В настоящее время имеются вычисления $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ процесса для ЭС, СМ и даже двухпетлевые поправки в КХД и КЭД.

SANC – компьютерная система полуавтоматических вычислений наблюдаемых и псевдонаблюдаемых величин для различных процессов взаимодействия элементарных частиц в СМ "от лагранжиана СМ до распределения событий" на однопетлевом уровне точности для существующих и будущих ускорителей частиц — Tevatron, LHC, ILC, CLIC, мюонных фабрик и других. Для более детального изучения доступных к расчету процессов в системе SANC имеется описание системы в статье, а также на нашем сайте в ОИЯИ.

Работа, представленная в диссертации, заключается в систематическом внедрении четырех бозонных процессов в среду SANC на однопетлевом уровне точности в СМ.

Следует отметить, что полученные строительные блоки и процедуры предвычислений для диаграмм типа бокс в теории КЭД и ЭС (как $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$, $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$) являются первыми шагами в создании окружения для внедрения подобных четырех-бозонных процессов в СМ (как $\gamma\gamma \rightarrow ZH$, $gg \rightarrow \gamma\gamma$, $gg \rightarrow ZZ$, $gg \rightarrow W^+W^-$ и других).

Целью данной работы является обеспечение теоретической поддержки в анализе данных и фонов на LHC и будущих ускорителях ILC, CLIC для изучения Хиггс-бозона и Новой физики в столкновениях бозонов при $\gamma\gamma$ -моде.

Для достижения поставленной цели требовалось решение следующих **задач**: разработка вычислительной среды для аналитических и численных расчетов в рамках системы SANC четырех-бозонных процессов; выполнение расчета на однопетлевом уровне точности в рамках СМ следующих четырех-бозонных процессов: $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$, $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$, а также процесса $u\bar{d} \rightarrow W^+\gamma$ и других; создание аналитических и фортанных модулей, реализующих результаты вычислений форм-факторов, спиральных амплитуд, сечений, включение их в пакет для внешних пользователей.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана и реализована вычислительная среда процедур в системе SANC для расчета спиральных амплитуд, сечений процессов и ширин распадов четырех-бозонной физики в Стандартной Модели.
2. Получены аналитические выражения на однопетлевом уровне точности в мультиканальном подходе для спиральных амплитуд, сечений процессов и ширин распадов следующих процессов: $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$, $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$.
3. Созданы автономные аналитические и форттранные модули вычисления сечений и ширины распада четырех-бозонных процессов для получения численных результатов и тщательного сравнения с другими программными продуктами и литературой.
4. Реализовано вычисление процесса $u\bar{d} \rightarrow W^+\gamma$ на партонном уровне, найден общий метод вычисления вспомогательных функций J типа Пассарино–Вельтмана.

Научная новизна и практическая значимость.

Впервые предложен единый подход к расчету четырех-бозонных процессов в СМ на однопетлевом уровне точности, основанный на полуавтоматических символьных вычислениях на языке FORM; впервые применен мультиканальный подход к вычислениям однопетлевых электрослабых поправок указанных процессов; предложен систематический подход для вычислений вспомогательных функций, типа D-функции Пассарино-Вельтмана (ПВ), удобных для анализа природы инфракрасных и массовых сингулярностей однопетлевых амплитуд при расчете однопетлевых поправок процесса $u\bar{d} \rightarrow W\gamma$; реализована концепция стандартных модулей, как основного экспортного программного продукта системы SANC, с вычислением спиральных амплитуд, сечений и ширины распада, подготовленных к использованию в Монте–Карло генераторах. Существующий подход дает возможность использовать результаты исследования при анализе данных поляризационных экспериментов.

Результаты исследования имеют актуальное прикладное значение как для LHC, так и для физики будущих ускорителей ILC и CLIC. Разработанные стандартные SANC модули предполагаются к использованию коллаборацией ATLAS для оценки теоретической неопределенности на однопетлевом уровне точности в прямых наблюдениях процесса рассеяния света на свете на собранной статистике в тяжелоионной моде на ускорителе LHC для поиска Новой физики с учетом эффектов поляризации. Также высокоточные измерения

с поляризованными пучками на будущих линейных e^+e^- коллайдерах ILC и CLIC потребуют современной теоретической поддержки, которая начинает создаваться.

Достоверность полученных результатов обеспечивается выбранным подходом к вычислению сечений рассматриваемых процессов в рамках Стандартной Модели с учетом однопетлевых поправок по теории возмущений, контролем сокращения калибровочных параметров и технических расходимостей, сравнением с имеющимися в литературе расчетами. Сделанные предсказания во всех случаях были весьма консервативны и осторожны.

В части сравнения предсказаний с реальными экспериментальными данными имеются опубликованные первые результаты эксперимента и обработки на КЭД уровне коллаборацией ATLAS, показывающие хорошее согласие с предсказаниями в рамках Стандартной Модели. Это позволяет считать выбранный инструментарий, в частности схемы учета неопределенностей при вычислении сечений, вполне адекватным рассматриваемым задачам.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях: CALC-2006 (Дубна, Россия, июль 2006); CALC-2009 (Дубна, Россия, июль 2009); CALC-2012 (Дубна, Россия, июль 2012); NEC-2007 (Варна, Болгария, сентябрь 2007); ACAT-2007 (Амстердам, Голландия, июль 2007); ACAT-2013 (Пекин, Китай, май 2013);

на 10-й международной байкальской школе по физике элементарных частиц и астрофизике (Иркутск, Россия, июль 2011);

на рабочем совещании по физической программе ATLAS (Дубна, февраль 2016).

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-02-01030, 12-02-91526-CERN_a.

Личный вклад. Автор был лидером разработки кода фортранных модулей четырех-бозонных процессов, принимал непосредственное участие в разработке среды аналитических процедур и кода аналитических расчетов на языке FORM для четырех-бозонного сектора системы SANC, создал библиотеку вспомогательных функций для численных расчетов, принимал участие в сравнении полученных результатов с имеющимися в литературе.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 6 печатных изданиях, входящих в список рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Полный объем диссертации **107** страниц текста с **33** рисунками и **3** таблицами. Список литературы содержит **44** наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **Первой главе** описывается процедура внедрения процессов СМ в рабочую среду системы SANC от аналитического выражения амплитуды до численных результатов для наблюдаемых на примере процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ (КЭД часть) через фермионную петлю. При вычислении процессов учитываются ненулевые массы петлевых частиц.

В разделах обсуждаются обозначения и общие выражения для сечения, диаграммы процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ и ковариантные амплитуды в виде тензорных структур и форм-факторы, затем спиральные амплитуды и их явные выражения для рассеяния света на свете в общем (массивном) и предельном (безмассовом) расчетах.

Далее кратко описывается стратегия предвычисления, положение данного процесса в дереве процессов системы SANC, внедрение аналитических результатов и концепция SANC модулей.

Дополнительно представлены выражения для частных случаев специальных ПВ функций D_0 , C_0 , и B_0 , которые необходимы для вычисления рассеяния света на свете через массивные или безмассовые петлевые частицы.

Во **Второй главе** описывается внедрение процесса СМ $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ через фермионную и бозонную петли и соответствующие модули предвычислений в рабочей среде системы SANC. Вычисления этого процесса учитывают ненулевые массы петлевых частиц.

В разделах приводятся выражения для сечения, диаграммы процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ (СМ), ковариантные амплитуды в виде тензорных структур, затем спиральные амплитуды в подходе Вега-Вудки.

Численные результаты для аналитических выражений КЭД, слабой и полной ЭС частей, полученные с помощью модулей SSFM в пакете sanc_4A_v1.00 для сечения рассеяния, сравнивались с литературой (Рис.1).

Параметры: $\cos\theta < \cos\pi/6$ — обрезания; $M_W = 80.22$ GeV; $m_t = 120$ GeV; $\alpha = 1/137.036$; другие фермионы безмассовые.

Сумма по спиральностям для сечения рассеяния вычислялась в диапазоне по энергии от МэВ до ГэВ (Рис.2) с параметрами:

$\alpha = 1/128$; $\cos \theta < \cos \pi/6$; $M_W = 80.22 \text{ GeV}$;
 $m_e = 0.51099892 \text{ MeV}$, $m_\mu = 0.105658369 \text{ GeV}$, $m_\tau = 1.77699 \text{ GeV}$;
 $m_u = 0.062 \text{ GeV}$, $m_c = 1.50 \text{ GeV}$, $m_t = 120.0 \text{ GeV}$;
 $m_d = 0.083 \text{ GeV}$, $m_s = 0.215 \text{ GeV}$, $m_b = 4.7 \text{ GeV}$.

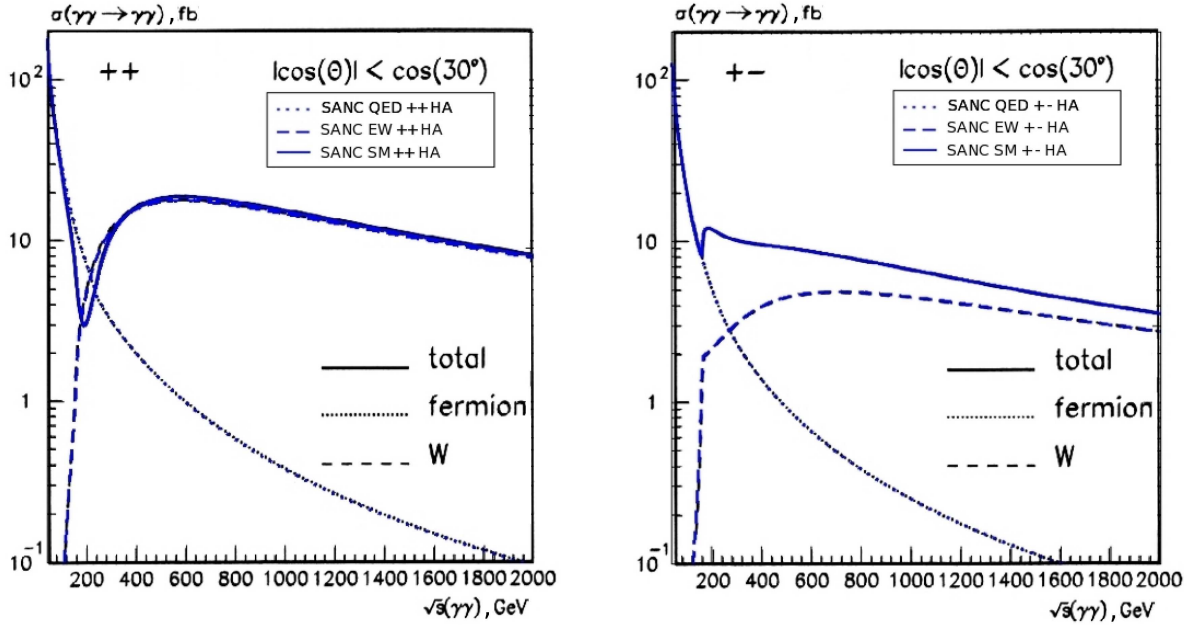


Рис. 1: Сечение рассеяния для $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ SANC ("++" и "+-").

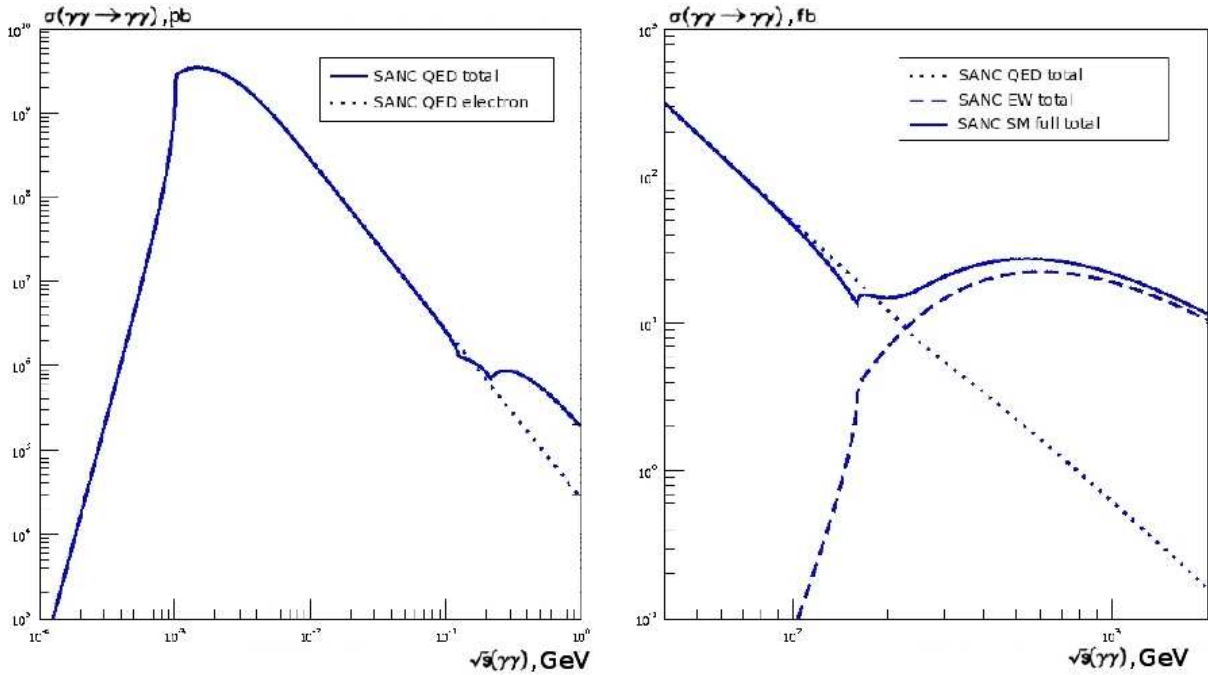


Рис. 2: $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ SANC полное сечение рассеяния.

В Третьей главе описывается внедрение в систему SANC процесса рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$, и распада $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$, в СМ на однопетлевом уровне точности в R_ξ -калибровке с учетом всех масс частиц (Z -бозона и других виртуальных частиц).

Процессы интересны тем, что вычисление сечения рассеяния и ширины распада включает в себя расчет только петлевых диаграмм и не содержит диаграмм на древесном уровне или диаграмм тормозного излучения. Вычисления раскрывают мультиканальный подход, реализуемый в системе SANC в секторе четырех-бозонной физики, когда все внешние частицы считаются входящими, и идет расчет процесса аннигиляции в вакуум $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$.

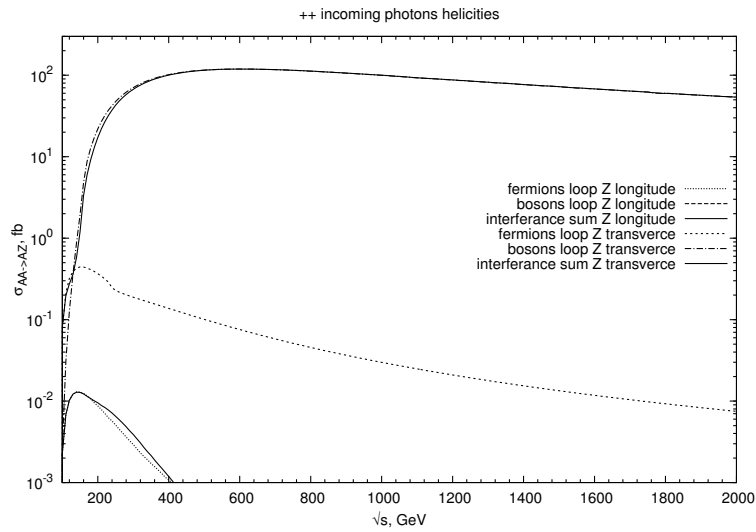


Рис. 3: Сечение рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ при ” ++” поляризации начальных фотонов (стандартный набор параметров).

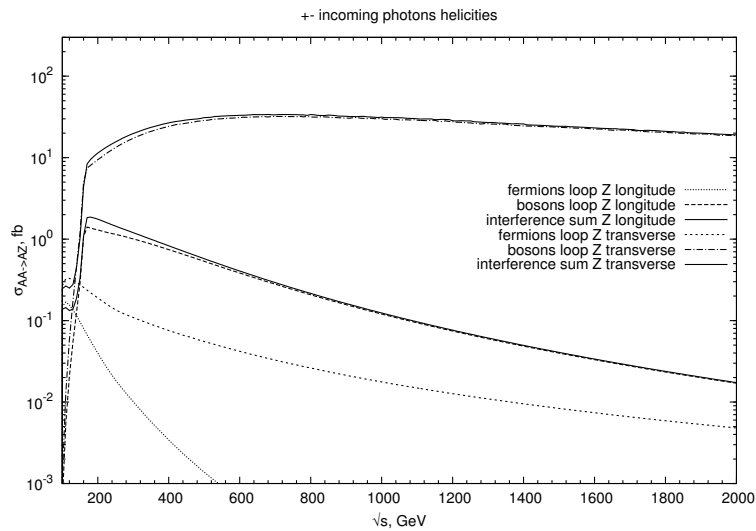


Рис. 4: Сечение рассеяния $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ при ” +-” поляризации начальных фотонов (стандартный набор параметров).

Приводятся ковариантные амплитуды однопетлевых диаграмм в терминах Лоренцевых структур на основе базиса и скалярных форм-факторов (ФФ \mathcal{F}_i), обсуждается вид выражений и доказывается нулевой вклад аксиальной части фермионных однопетлевых диаграмм.

Показаны спиральные амплитуды для различных каналов, формулы для сечений рассеяния и ширины распада соответственно, сравнение с имеющимися данными из литературы.

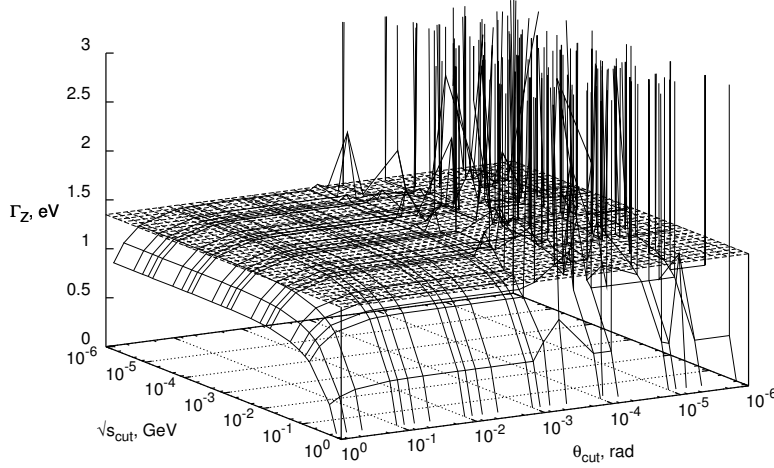


Рис. 5: Ширина распада $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ — плато стабильности.

С помощью пакета `sanc_4b_v1.00`, доступного для скачивания на странице `SANC`, можно получать численные результаты для различного набора параметров.

В **Четвертой главе** приводятся результаты вычисления процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ согласно подходу предыдущих расчетов с учетом поляризационной физики. Показаны ковариантные и спиральные амплитуды, дифференциальные сечения рассеяния, сравнение результатов с имеющимися в литературе данными.

Ковариантная амплитуда процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ равна:

$$\mathcal{A}_{\gamma\gamma \rightarrow ZZ} = 4e^4 Q_f^4 \sum_{i=1}^{20} [\mathcal{F}_i^{\text{bosons}}(s, t, u) + \mathcal{F}_i^{\text{fermions}}(s, t, u)] T_i^{\alpha\beta\mu\nu}.$$

Выражения для ФФ \mathcal{F}_i фермионного и бозонного вкладов данного процесса приведены в пакете, доступном для скачивания на домашней странице системы `SANC`.

Общее число спиральных амплитуд для данного процесса равно 36. За счет использования соотношений между спиральными амплитудами благода-

ря четности и Бозе симметриям, а также преобразованию четности и соответствующему вращению вокруг u -оси, получаем сокращение числа независимых спиральных амплитуд до восьми.

Корректность аналитических результатов подтверждается несколькими факторами: независимостью $\Phi\Phi \mathcal{F}_i$ от калибровочных параметров (все вычисления выполнены в R_ξ калибровке), ковариантная амплитуда удовлетворяет тождеству Варда, численные значения и распределения для амплитуд и дифференциальных сечений, полученных в системе SANC, имеют хорошее согласие с независимыми вычислениями, представленными в литературе.

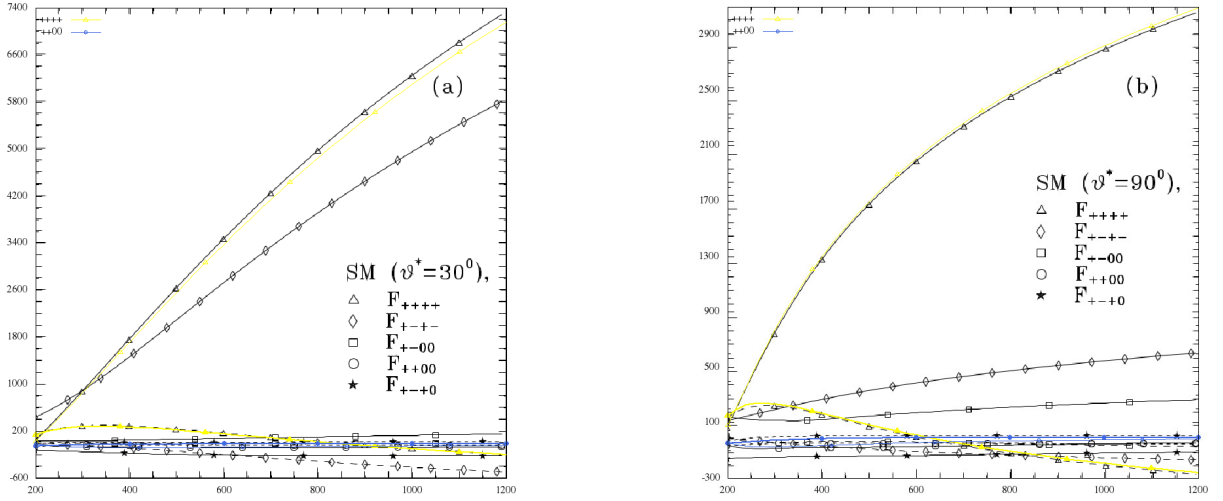


Рис. 6: Распределение доминирующих спиральных амплитуд процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ в СМ при $\vartheta^* = 30^\circ$ и $\vartheta^* = 90^\circ$ с учетом вершины Hff.

В анализе использовались следующие формулы для дифференциальных сечений процессов, учитывающие спиральности частиц:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_0}{d\cos\vartheta^*} &= \left(\frac{\beta_Z}{64\pi s}\right) \sum_{\lambda_3\lambda_4} [|\mathcal{H}_{++\lambda_3\lambda_4}|^2 + |\mathcal{H}_{+-\lambda_3\lambda_4}|^2], \\ \frac{d\sigma_{22}}{d\cos\vartheta^*} &= \left(\frac{\beta_Z}{64\pi s}\right) \sum_{\lambda_3\lambda_4} [|\mathcal{H}_{++\lambda_3\lambda_4}|^2 - |\mathcal{H}_{+-\lambda_3\lambda_4}|^2], \\ \frac{d\sigma_{33}}{d\cos\vartheta^*} &= \left(\frac{\beta_Z}{64\pi s}\right) \sum_{\lambda_3\lambda_4} \text{Re} [\mathcal{H}_{+-\lambda_3\lambda_4} \mathcal{H}_{-+\lambda_3\lambda_4}^*], \\ \frac{d\sigma_3}{d\cos\vartheta^*} &= \left(\frac{-\beta_Z}{32\pi s}\right) \sum_{\lambda_3\lambda_4} \text{Re} [\mathcal{H}_{++\lambda_3\lambda_4} \mathcal{H}_{-+\lambda_3\lambda_4}^*], \end{aligned}$$

где

$$\beta_Z = 1 - \frac{M_Z^2}{s}.$$

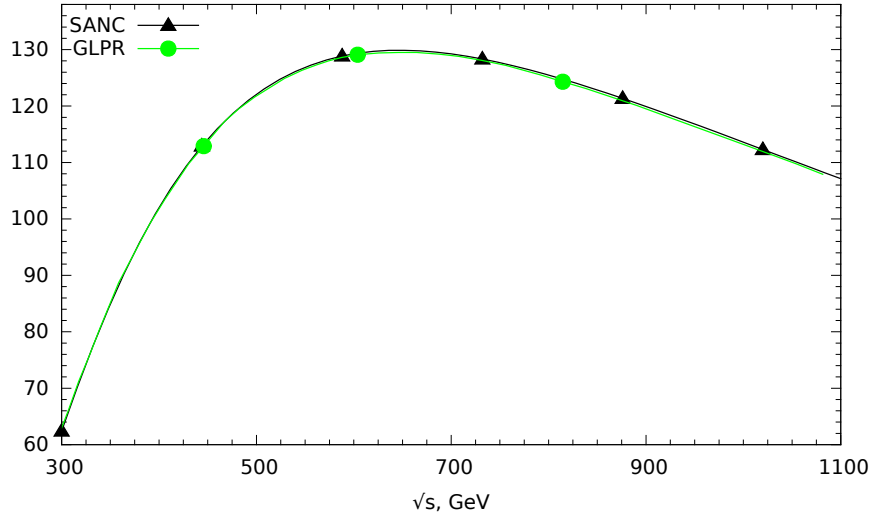


Рис. 7: Распределение сечения σ_0 процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$.

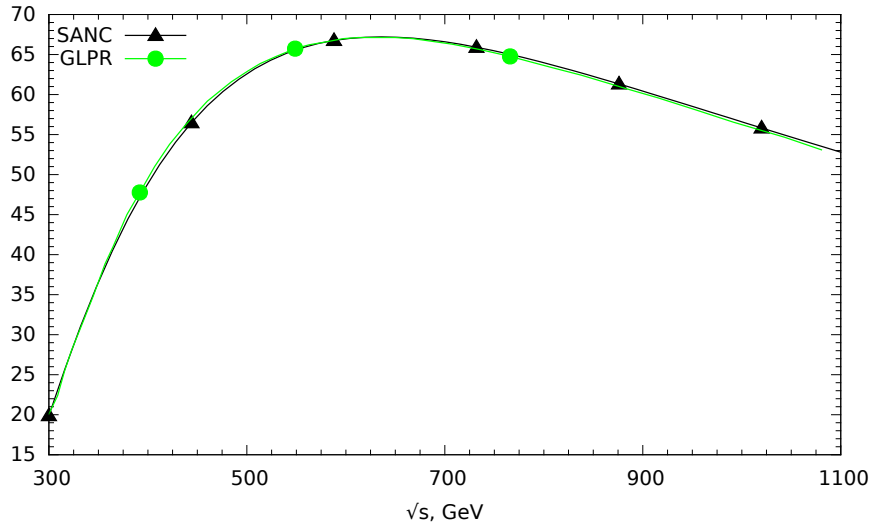


Рис. 8: Распределение сечения σ_{22} процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$.

В **Пятой главе** описывается компьютерная часть системы SANC. Дается домашняя Интернет-страница проекта, на которой расположены продукты для скачивания. Приводится техническое описание пакета `sanc_4b_v1.10`, с помощью которого получены численные результаты для описанных четырех-бозонных процессов. Кратко описывается генератор диаграмм и амплитуд на древесном и однопетлевом уровне, разработанный в рамках реализации концепции SANC2.

Пакет `sanc_4b_v1.10` состоит из следующего набора файлов:

1. `bbbb_main.F` — основной файл,
2. `bbbb_ha_11_11.F` — спиральные амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в SANC,
3. `bbbb_ha_11_12.F` — спиральные амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ в SANC,
4. `bbbb_ha_2_111.F` — спиральные амплитуды процесса $Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ в SANC,

5. `bbbb_ha_11_22.F` — спиральные амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ в SANC,
6. `*.f` — библиотека специальных функций и алгоритмов,
7. `*_input.h` — набор различных настроек входных параметров,
8. README, INSTALL и другие файлы инструкции.

В README и INSTALL файлах находятся инструкции по использованию пакета. Основные параметры можно изменить в файле `bbbb_main.F` — основном файле вычислений. Конечным результатом работы пакета являются искомые распределения, формируемые согласно выбранным флагам.

В рамках реализации концепции SANC2 — перехода на автоматическое вычисление однопетлевых процессов, разработан генератор диаграмм и амплитуд. Генератор реализован на RUBY с привлечением FORM для аналитических преобразований, а также pdflatex для автоматического построения всех диаграмм как основного результата.

Использование генератора происходит посредством локального Web-интерфейса. Процесс задается перечнем начальных и конечных частиц из предлагаемого списка всех частиц, а также выбором уровня вычислений (древесный или однопетлевой) и теории (СМ, КЭД, ЭС, КХД, выборочная). Выбор теории ограничивает список частиц, используемых в процессе генерации диаграмм — подбора допустимых пропагаторов и вершин согласно правилам Фейнмана, тем самым сокращая время генерации. Генерация для процессов два в два на однопетлевом уровне точности в СМ занимает в среднем несколько минут. Сгенерированные выражения для диаграмм (амплитуды процессов) выдаются в стандартных обозначениях системы SANC, поэтому с помощью имеющихся процедур из среды SANC далее возможно применить стандартную последовательность вычислений.

В **Шестой главе** представлен результат внедрения процессов $f\bar{f} \rightarrow W\gamma$ в систему SANC в ЭС теории. Массы фермионов считаются легкими так, что пренебрегаются в пределе равным нулю везде, кроме аргументов в логарифмических функциях.

Также описан универсальный подход для аналитических расчетов определенного класса J -функций для шести топологий типа бокс процесса $ud \rightarrow W\gamma$.

В **Заключении** подведены основные итоги работы, выносимые на защиту.

Список литературы

- [1] Bardin D., Kalinovskaya L., Uglov E. Standard Model light-by-light scattering in SANC: analytic and numeric evaluation // Ядерная физика. — 2010. — Vol. 73. — P. 1878–1888.
- [2] Bardin D. Yu., Kalinovskaya L. V., Uglov E. D. $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$ processes in SANC // Ядерная физика. — 2013. — Vol. 76. — P. 1339–1344.
- [3] Andonov A. D., Kolesnikov V. A., Uglov E. D. The SANC project status and plans // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2011. — Vol. 8. — P. 765–767.
- [4] SANC system and its applications for LHC / R. Sadykov, A. Arbuzov, E. Uglov et al. // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. — Vol. 523. — P. 012043 (8 pp).
- [5] J functions for the process $ud \rightarrow WA$ / D. Yu. Bardin, L. V. Kalinovskaya, E. D. Uglov, W. von Schlippe // Ядерная физика. — 2016. — Vol. 79, no. 1. — P. 95–107.
- [6] SANC: the process $AA \rightarrow ZZ$ / D. Yu. Bardin, S. Bondarenko, E. D. Uglov et al. // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2017. — Vol. 14, no. 6.