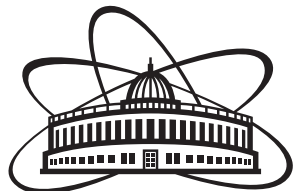


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
им. Н. Н. БОГОЛЮБОВА

На правах рукописи



**Ермольчик Виталий Леонидович**

**Радиационные поправки для экспериментов на  
лептонных коллайдерах с поляризованными пучками**

Специальность 01.04.02 —  
«Теоретическая физика»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2022

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

Научный руководитель: **Садыков Ренат Рафаилович**  
кандидат физико-математических наук,  
с.н.с. ЛЯП ОИЯИ

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу <http://dissertations.jinr.ru>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г.Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Ю. М. Быстрицкий

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Стандартная модель (СМ) взаимодействий элементарных частиц – основная на сегодняшний день теория, которая продолжает оставаться фундаментом прецизионных теоретических расчетов, необходимых для корректной интерпретации экспериментальных данных. Поиск границ области применимости СМ является одной из наиболее ценных проблем в современной фундаментальной физике. С другой стороны, глубокое исследование свойств СМ на квантовом уровне остается важной задачей, поскольку эта модель имеет значение для многих приложений в физике высоких энергий, а также в астрофизике и космологии. В течение последних десятилетий проводились многочисленные эксперименты по проверке СМ на ускорителях высоких энергий, и в пределах точности этих экспериментов были обнаружены некоторые расхождения от предсказаний СМ. Так при измерении аномального магнитного момента мюона в Fermilab с точностью до 0.14 ppm найдено отклонение со статистической значимостью в 4.2 сигма [1].

Важная роль высокоточных теоретических предсказаний в физике высоких энергий известна со времен экспериментов на LEP1 и LEP2, где точность измерений значительно превысила 0.1% и 1% соответственно. Для теоретической поддержки этих экспериментов было создано множество программ. Одним из наиболее востребованных рабочим инструментом эпохи LEP стал ZFITTER [2] и библиотека DIZET [3]. Эти программы успешно аккумулировали лучшие доступные теоретические результаты по высокоточному описанию наблюдаемых и псевдонаблюдаемых и позволили провести анализ данных вблизи пика рождения Z-бозона.

Следующее поколение электронных коллайдеров – Циклический электрон-позитронный коллайдер (СЕРС)[4], Будущий циклический коллайдер электронный(FCCEe) [5–9], Международный линейный коллайдер (ILC) [10–15], Компактный линейный коллайдер (CLIC) [16–18], обеспечат обширную программу экспериментов с уникальными возможностями как для открытий, так и для точных измерений.

Основным преимуществом линейных коллайдеров является универсальность, так как они могут работать в четырех режимах  $e^+e^-$ ,  $e^-e^-$ ,  $e^- \gamma$  и  $\gamma\gamma$ , с сильно поляризованными пучками электронов и фотонов. Высокая степень поляризации может быть получена для начального и конечного электронных пучков вплоть до  $|P_{e^-}| = 0.8 - 0.9$ . Более того, предполагает проведение исследований при энергии центра масс от нескольких сотен ГэВ до нескольких ТэВ.

Параллельно разрабатываются проекты мюон-электронных и мюон-мюонных коллайдеров. Например, низкоэнергетический эксперимент MUonE ( $\sqrt{s} \approx 405$  МэВ) является идеальной основой для измерения бегущей электромагнитной константы связи при пространственноподобных

передачах импульса и определения адронного вклада. Данное измерение позволит существенно улучшить теоретическую точность расчета аномального магнитного момента мюона. При высоких энергиях в рамках эксперимента  $\mu$ TRISTAN мюон-электронное рассеяние будет хорошей базой для исследования свойств бозона Хиггса. Предполагаемая светимость  $\mu$ TRISTAN не уступает светимости проекта ILC, но при этом отсутствуют основные фоновые процессы – рождение пар W- или Z-бозонов. Использование поляризованных пучков дает дополнительное увеличение числа рождений бозона Хиггса на 30%. На  $\mu$ TRISTAN возможен и мюон-мюонный режим работы. В целом, при энергии больше 2-3 ТэВ в с.ц.м., обеспечивая одинаковый уровень светимости, мюон-мюонные коллайдеры становятся энергоэффективней электронных.

С появлением новых ускорителей появляется возможность проверки СМ с точностью  $\approx 0.01\%$ , что предполагает выполнение теоретических расчетов с еще большей точностью, чтобы не вносить дополнительную систематическую погрешность при сравнении результатов экспериментов с предсказаниями теории. Это потребует соответствующих теоретических предсказаний, т.е. обязательным условием будет учет на уровне двухпетлевых (NNLO) расчетов в электрослабом секторе (ЭС) СМ, а в КХД секторе СМ – трехпетлевых поправок.

Процедура вычисления радиационных поправок должна учитывать специфику эксперимента. Не всегда удаётся сделать это аналитически, как, например, это было сделано в программе ZFITTER. Современным стандартом теоретической поддержки экспериментов являются Монте-Карло (МК) генераторы. В настоящее время существуют следующие генераторы Монте-Карло с учетом поляризации, но без расчетов петлевых поправок: AMEGIC++ [19] использует подход спиральных амплитуд и является частью SHERPA; CALCHEP [20] использует традиционные методы квадрирования матричных элементов, учитывает только поляризацию начальных пучков; система GRACE [21] (основные пакеты BASES и SPRING), которая использует вычисление матричных элементов с помощью метода спиральных амплитуд; WHIZARD [22] - программная система, предназначенная для эффективного расчета сечений рассеяния с большим количеством частиц в конечном состоянии и симулирования событий, поляризация обрабатывается как для начального и так и конечного состояний. Существуют и МК генераторы только одного типа процессов, например, генератор KKMC для процесса  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ , генератор MERADGEN [23] для поляризованного мёллеровского рассеяния в рамках КЭД теории.

Современные Монте-Карло генераторы должны обеспечивать учет полных однопетлевых ЭС радиационных поправок и поправок высших порядков. Вычисление полных ЭС радиационных поправок является несравненно более сложной задачей, чем КЭД радиационных поправок, из-за присутствия большого числа диаграмм и энергетических масштабов (массы

бозонов, топ-кварка). В силу этих причин в последние годы стала актуальной проблема автоматизации вычислений ЭС радиационных поправок. Известными примерами компьютерных систем, автоматизировавших эти вычисления, являются `FeynArts/FeynCalc` и `GRACE-loop`.

В течение ряда последних лет в ЛЯП ОИЯИ была создана и продолжает развиваться компьютерная система `SANC`, вычисляющая однопетлевые ЭС и КХД радиационные поправки на базе собственных процедур к множеству процессов, исследуемых в экспериментах на современных ускорителях высоких энергий с учетом поляризации. Проведены однопетлевые расчеты для нескольких процессов  $e^+e^-$ ,  $e^-e^-$ ,  $e^-\gamma$  и  $\gamma\gamma$  мод. Однако основной задачей проекта являлось создание продвинутого Монте-Карло генератора событий для этих мод с учетом поляризации начального и конечного состояний, поправок высших порядков, работой в полном фазовом объеме и, по возможности, полным учетом масс частиц.

В настоящей диссертации представлены результаты работ по теоретической поддержке экспериментов физики высоких энергий.

**Целью** данной диссертации является описать теоретическую поддержку для будущих экспериментов на лептонных коллайдерах с высокими энергиями.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Полное аналитическое вычисление однопетлевых ЭС поправок к упругому рассеянию поляризованных мюонов и электронов как теоретическая поддержка экспериментов `MUonE` (ЦЕРН) и  `$\mu$ TRISTAN` (КЕК).
2. Аналитические вычисления однопетлевых ЭС поправок для анализа процесса Мёллера с учетом масс.
3. Аналитические вычисления КЭД поправок для анализа процесса  $e^+e^- \rightarrow HZ$ . Создание автономных модулей компьютерной системы `SANC` по аналитическому расчёту такого рода вкладов.
4. Создание универсального Монте-Карло генератора событий `ReneSANCe`.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые вычислены полные однопетлевые ЭС поправки к поляризованному упругому мюон-электронному рассеянию.
2. Впервые вычислены полные однопетлевые ЭС поправки к поляризованному процессу Мёллера и мюон-мюонному рассеянию с учетом масс лептонов.
3. Предложена схема учета отдельных универсальных поправок высших порядков для t- и u-канальных четырехфермионных процессов через параметр  $\Delta\rho$ .

**Практическая значимость** Созданный программный продукт `ReneSANCe` нацелен на теоретическую поддержку анализа данных в экспе-

риментях FCCee, CEPC, ILC, MUonE, c-tau фабрик, Bell, BESIII,  $\mu$ TRISTAN. Генератор опубликован и выложен в свободный доступ. Таким образом результаты расчетов могут напрямую использоваться для моделирования распределений наблюдаемых величин в условиях экспериментов.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые вычислены полные однопетлевые ЭС поправки к поляризованному упругому мюон-электронному рассеянию. Исследовано поведение КЭД и слабых поправок при больших значениях энергии в эксперименте  $\mu$ TRISTAN (КЕК), а также при условиях эксперимента MUonE (ЦЕРН).
2. Впервые вычислены полные однопетлевые ЭС поправки к поляризованному процессу Мёллера и мюон-мюонному рассеянию с учетом масс лептонов. Проанализировано поведение КЭД и слабых поправок в широком диапазоне энергий.
3. Предложена схема учета отдельных универсальных поправок высших порядков для t- и u-канальных четырехфермионных процессов через параметр  $\Delta\rho$ .
4. Проведено вычисление ведущих логарифмических КЭД поправок вплоть до  $O(\alpha^4 L^4)$  к полному сечению  $e^+e^- \rightarrow HZ$ .
5. Создан Монте-Карло генератор ReneSANCe, позволяющий эффективно разыгрывать события в широких кинематических пределах.

Достоверность полученных результатов обеспечивается многочисленными внутренними тестами: проверено сокращение калибровочных параметров в  $R_\xi$ -калибровке, выполнение тождеств Уорда и т.п. Численные результаты во всех возможных случаях сравнивались с результатами вычислений других групп.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. CEPC Topical Workshop: Theoretical Uncertainty Controls for the CEPC measurements, Beijing, China, 04 April 2019.
2. 13th APCTP-BLTP JINR Joint Workshop, г. Дубна, РФ, 14-20 Июля 2019 г.
3. 3rd FCC Physics and Experiments Workshop, Geneva, Switzerland, 13-17 January 2020.
4. 4th FCC Physics and Experiments Workshop, Geneva, Switzerland, 10-13 November 2020.
5. The Joint Workshop of the CEPC Physics, Software and New Detector Concept, Yangzhou, China, 14-17 April 2021.
6. Workshop on future Super c-tau factories, Novosibirsk, Russia, 15-17 November 2021.

Личный вклад. Автор принимал активное участие в формулировании цели и постановке задач данной работы. Все основные результаты получены при определяющем или значительном личном вкладе автора.

Автор рассчитал спиральные амплитуды и формфакторы для процессов  $\mu^\pm e^- \rightarrow e^- \mu^\pm$ ,  $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$  и  $\mu^+ \mu^+ \rightarrow \mu^+ \mu^+$ , реализовал учет поправок высших порядков, разработал Монте-Карло генератор событий **ReneSANCe** и реализовал в нем полученные теоретические результаты.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 4 статьях в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК (входящих в базы данных Scopus и Web of Science).

1. R. Sadykov, A. Arbuzov, S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, I. Novikov, L. Rumyantsev, V. Yermolchik, “MCSANCee generator with one-loop electroweak corrections for processes with polarized  $e^+e^-$  beams”, J. Phys. Conf. Ser. 1525 012012 (2020).
2. R. Sadykov and V. Yermolchik, “Polarized NLO EW  $e^+e^-$  cross section calculations with ReneSANCe-v1.0.0”, Comp.Phys.Comm. 256, 107445 (2020).
3. A. Arbuzov, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, R. Sadykov and V. Yermolchik, “Electroweak Effects in  $e^+e^- \rightarrow ZH$  Process”, Symmetry 13, no. 7, 1256 (2021).
4. A. Arbuzov, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, L. Rumyantsev and V. Yermolchik, “Electroweak effects in polarized muon-electron scattering”, Physical Review D 105, no. 3, 033009 (2022).
5. S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, L. Rumyantsev and V. Yermolchik, “One-loop electroweak radiative corrections to polarized Møller scattering”, arXiv:2203.10538 [hep-ph].

## 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, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена расчету полных однопетлевых электрослабых радиационных поправок (РП) для упругого мюон-электронного рассеяния в двух каналах

$$\mu^\pm(p_1, \chi_1) + e^-(p_2, \chi_2) \rightarrow e^-(p_3, \chi_3) + \mu^\pm(p_4, \chi_4) (+\gamma(p_5, \chi_5)), \quad (1)$$

с произвольной поляризацией начальных частиц ( $\chi$  соответствует спиральности частиц).

Проводится детальное сравнение с другими кодами результатов вычисления для сечения с учетом излучения жесткого фотона. Выполнена проверка численной зависимости борновского сечения и сечения с учетом

поправок от степени поляризации мюона и электрона. Представлены результаты для условий экспериментов MUnE и  $\mu$ TRISTAN [24]. Особое внимание уделено учету масс лептонов, так как ультрарелятивистское приближение не выполняется при  $\sqrt{s} \approx 405$  МэВ. Кроме того, вычислены ведущие поправки высших порядков (ПВП)  $\mathcal{O}(G_\mu^2)$  и  $\mathcal{O}(G_\mu \alpha_s)$  через параметры  $\Delta\rho$  и  $\Delta\alpha$ .

Для корректного учета универсальных поправок, связанных с бегущими константами связи, использовался подход по одновременному варьированию параметров  $\delta\alpha$  и  $\delta\rho$ .

Учет этих эффектов в системе SANC сводится к следующему изменению электрослабых формфакторов:

$$\begin{aligned}\tilde{F}_\gamma &\rightarrow 1 + \Delta\alpha(t) + \Delta\alpha(t)^2, \\ \tilde{F}_{LL} &\rightarrow (1 + \Delta\alpha(t) + \Delta\alpha(t)^2)(1 + \Delta\rho + \Delta\rho^2)\left(1 - \frac{c_w^2}{s_w^2}\Delta\rho + \frac{c_w^4}{s_w^4}\Delta\rho^2\right), \\ \tilde{F}_{LQ} &\rightarrow (1 + \Delta\alpha(t) + \Delta\alpha(t)^2)(1 + \Delta\rho + \Delta\rho^2), \\ \tilde{F}_{QL} &\rightarrow (1 + \Delta\alpha(t) + \Delta\alpha(t)^2)(1 + \Delta\rho + \Delta\rho^2), \\ \tilde{F}_{QQ} &\rightarrow (1 + \Delta\alpha(t) + \Delta\alpha(t)^2)(1 + \Delta\rho + \Delta\rho^2)\left(1 + \frac{c_w^2}{s_w^2}\Delta\rho\right).\end{aligned}$$

Для избежания двойного счета, необходимо удалить вклады, присутствующие в однопетлевом электрослабом результате:  $\Delta\rho \rightarrow \left(\Delta\rho - \Delta\rho^{(1)}\right)^{\alpha(0)}$  и  $\Delta\alpha(t) \rightarrow 0$ .

В таблице 1 представлен результат расчета поправок для процесса  $\mu^+e^- \rightarrow e^-\mu^+(\gamma)$  при энергии 250 ГэВ. Величина сечения и поправки сильно зависят от поляризации.

Таблица 2 позволяет оценить эффект от учета поправок высших порядков. При их учете существенно уменьшается разница между результатами, полученными в разных схемах входных параметров  $\alpha(0)$  и  $G_\mu$ .

**Вторая глава** посвящена расчету полных однопетлевых электрослабых радиационных поправок для процессов  $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$  и  $\mu^+\mu^+ \rightarrow \mu^+\mu^+$  с произвольной поляризацией начальных частиц и с учетом масс лептонов.



$P_{\mu^+}, P_{e^-}$	0,0	-1, -1	-1, +1	+1, -1	+1, +1
$\alpha(0)$ EW scheme					
$\sigma^{\text{Born}}$ , pb	66.487(1)	55.333(1)	73.186(1)	82.097(1)	55.333(1)
$\delta^{\text{QED}}$ , %	-1.936(1)	-0.481(1)	-2.933(1)	-3.013(1)	-0.482(1)
$\delta^{\text{VP}}$ , %	11.466(1)	13.729(2)	10.151(1)	9.586(1)	13.729(2)
$\delta^{\text{weak}} - \text{VP}$ , %	-0.396(1)	-1.758(1)	2.297(1)	-0.962(1)	-1.758(1)
$\delta^{\text{ho}}$ , %	1.032(1)	0.929(1)	0.895(1)	1.295(1)	0.929(1)
$G_\mu$ EW scheme					
$\sigma^{\text{Born}}$ , pb	71.458(1)	59.470(1)	78.658(1)	88.234(1)	59.470(1)
$\delta^{\text{QED}}$ , %	-1.935(2)	-0.481(2)	-2.930(2)	-3.007(2)	-0.482(2)
$\delta^{\text{VP}}$ , %	5.568(1)	6.705(1)	4.899(1)	4.630(1)	6.705(2)
$\delta^{\text{weak}} - \text{VP}$ , %	-0.391(1)	-0.626(1)	1.656(1)	-1.891(1)	-0.626(1)
$\delta^{\text{ho}}$ , %	-0.456(1)	-0.512(1)	-0.520(1)	-0.322(1)	-0.512(1)

Таблица 1 — Интегральное борновское сечения и относительные поправки для  $\mu^+e^- \rightarrow e^-\mu^+(\gamma)$  рассеяния при энергии  $\sqrt{s} = 250$  ГэВ в с.ц.м. в ЭС схемах  $\alpha(0)$  и  $G_\mu$ .

$P_{\mu^+}, P_{e^-}$	0,0	-1, -1	-1, +1	+1, -1	+1, +1
$\sigma_{\alpha(0)}^{\text{weak}}$ , pb	73.846(1)	61.956(1)	82.295(1)	89.175(1)	61.956(1)
$\sigma_{G_\mu}^{\text{weak}}$ , pb	75.156(1)	63.084(1)	83.812(1)	90.642(1)	63.084(1)
$\delta_{G_\mu/\alpha(0)}^{\text{weak}}$ , %	1.77	1.82	1.84	1.65	1.82
$\sigma_{\alpha(0)}^{\text{weak+ho}}$ , pb	74.533(1)	62.471(1)	82.951(1)	90.240(1)	62.471(1)
$\sigma_{G_\mu}^{\text{weak+ho}}$ , pb	74.830(1)	62.779(1)	83.405(1)	90.359(1)	62.779(1)
$\delta_{G_\mu/\alpha(0)}^{\text{weak+ho}}$ , %	0.40	0.50	0.55	0.13	0.50

Таблица 2 — Сечения с учетом чисто слабых поправок и дополнительно с поправками высших порядков для  $\mu^+e^- \rightarrow e^-\mu^+(\gamma)$  рассеяния при энергии  $\sqrt{s} = 250$  ГэВ в с.ц.м в ЭС схемах  $\alpha(0)$  и  $G_\mu$ .

Получен результат в полностью массивном LQD базисе:

$$\begin{aligned}
A_\gamma^{\text{IBA}} &= i \frac{4\pi Q_e Q_f}{s} \alpha(s) \gamma_\mu \otimes \gamma_\mu, \\
\mathcal{A}_Z^{\text{IBA}} &= i e^2 \frac{\chi_Z(s)}{s} \cdot \\
&\left\{ I_e^{(3)} I_f^{(3)} \gamma_\mu \gamma_+ \otimes \gamma_\mu \gamma_+ F_{LL}(s, t) + \delta_e I_f^{(3)} \gamma_\mu \otimes \gamma_\mu \gamma_+ F_{QL}(s, t) \right. \\
&+ I_e^{(3)} \delta_f \gamma_\mu \gamma_+ \otimes \gamma_\mu F_{LQ}(s, t) + \delta_e \delta_f \gamma_\mu \otimes \gamma_\mu F_{QQ}(s, t) \\
&+ I_e^{(3)} I_f^{(3)} \gamma_\mu \gamma_+ \otimes (-im_f D_\mu) F_{LD}(s, t) + \delta_e I_f^{(3)} \gamma_\mu \otimes (-im_f D_\mu) F_{QD}(s, t) \\
&+ I_e^{(3)} I_f^{(3)} (-im_e D_\mu) \otimes \gamma_\mu \gamma_+ F_{DL}(s, t) + I_e^{(3)} \delta_f (-im_e D_\mu) \otimes \gamma_\mu F_{DQ}(s, t) \\
&\left. + I_e^{(3)} I_f^{(3)} (-im_e D_\mu) \otimes (-im_f D_\mu) F_{DD}(s, t) \right\}.
\end{aligned}$$

Формфакторы вычислялись в  $R_\xi$ -калибровке. Проводилось выделение калибровочно инвариантных наборов и проверялось сокращение калибровочных параметров.

Зависимость дифференциального сечения от косинуса угла вылета лептона рассматривается на рисунке 1. Поправка для мюонного рассеяния меньше, чем для электронного, так как из-за большей массы мюона ниже тормозное излучение. Поправка максимальна в перпендикулярном пучку направлении и достигает 15% для рассеяния мюонов.

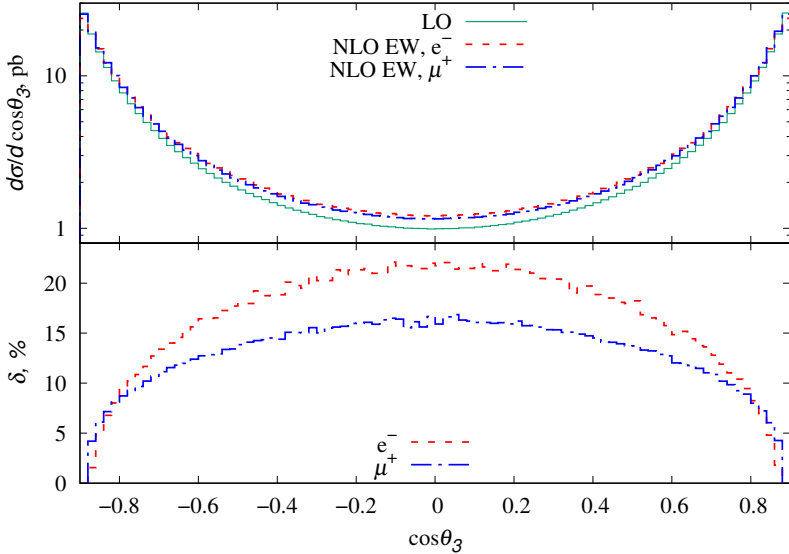


Рис. 1 — Борновское (LO) и однопетлевое сечение (NLO EW) (вверху) и относительные поправки (внизу) в  $e^-$ - и  $\mu^+$ -каналах для энергии  $\sqrt{s} = 1000$  ГэВ как функция  $\cos\theta_3$

В **Третьей главе** на примере процесса  $e^+ + e^- \rightarrow Z + H$  реализованы КЭД поправки высших порядков в ведущем логарифмическом приближении (ВЛП) [25]. Проводится анализ величины различных вкладов высших порядков. Отдельно рассмотрены чисто фотонные поправки и остальные, включающие в себя эффекты излучения лептонных пар и смешанные эффекты. Для эффектов излучения лептонных пар учитывались как несинглетные, так и синглетные поправки. Проведена оценка результирующей теоретической неопределенности и проверка необходимости включения других поправок высших порядков.

Кроме того, реализован подход с экспоненцированными структурными функциями. Чтобы избежать двойного счета, проведено вычитание

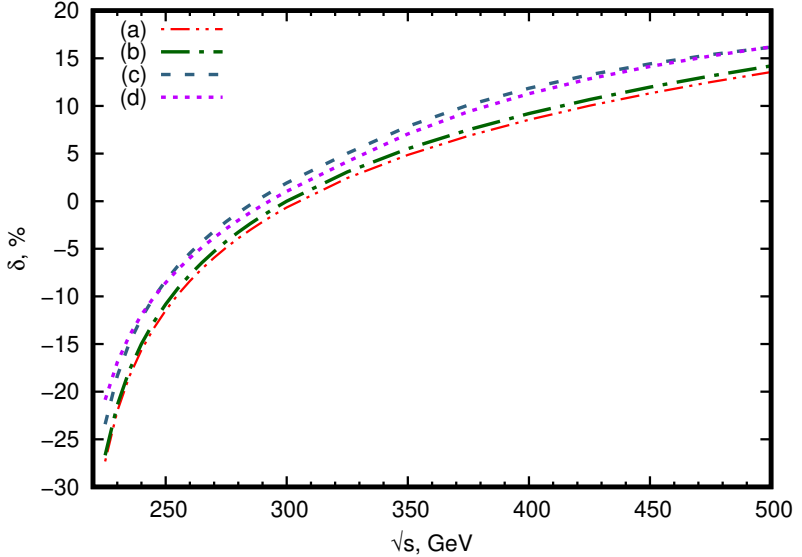


Рис. 2 — Относительные поправки (в %): (a) для  $\mathcal{O}(\alpha L)$ , (b) для КЭД  $\mathcal{O}(\alpha)$ , (c) для полного однопетлевого и (d) для суммы (c) и  $\sum_{n=2}^4 \mathcal{O}(\alpha^n L^n)$  ISR вкладов в зависимости от энергии.

ведущих логарифмических членов первого порядка из полных однопетлевых поправок.

Сравнение двух подходов показало совпадение результатов с точность  $10^{-4}$  при учете поправок до  $\mathcal{O}(\alpha^4 L^4)$  порядка.

В **Четвертой главе** приведено описание созданного Монте-Карло генератора событий **ReneSANCe** (**Renewed SANC Monte Carlo event generator**), который обеспечивает точное в однопетлевом приближении (NLO) электрослабое (EW) описание некоторых важных процессов на лептонных коллайдерах с учетом поляризационных эффектов. Кроме того, в генератор добавлен учет некоторых универсальных поправок высших порядков, обсуждаемых во второй и четвертой главе диссертации: поправки к бегущей константе связи, поправки в формализме КЭД структурных функций в ведущем логарифмическом приближении, поправки для четырехфермионных процессов через параметр  $\Delta\rho$ .

Для генерации событий использовалась многоканальная стратегия с преобразованием переменных. В генераторе реализовано два подхода, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Первый предполагает ручное разыгрывание канала. Для каждого канала создается свой экземпляр сэмплера. Это дает возможность более гибкой настройки, но требует дополнительный этап для вычисления весов ветвления. Во втором

подходе используется один экземпляр сэмплера, что достигается путем создания искусственной дополнительной размерности интеграла с фиксированными точками деления. При разыгрывании событий в первую очередь решается задача обеспечения близости весов к единице, а не уменьшение дисперсии интеграла. Использование модульной архитектуры при построении генератора обеспечило возможность быстро расширять функционал генератора и добавлять поддержку новых процессов.

В Заключении приведены основные результаты работы.

## Список литературы

1. Muon (g-2) Technical Design Report / J. Grange [et al.]. — 2015. — Jan. — arXiv: [1501.06858](https://arxiv.org/abs/1501.06858) [[physics.ins-det](#)].
2. ZFITTER: A Semi-analytical program for fermion pair production in e+ e- annihilation, from version 6.21 to version 6.42 / A. B. Arbuzov [et al.] // Comput. Phys. Commun. — 2006. — Vol. 174. — P. 728—758. — arXiv: [hep-ph/0507146](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0507146).
3. Dizet: A Program Package for the Calculation of Electroweak One Loop Corrections for the Process e+ e- -> f+ f- Around the Z0 Peak / D. Y. Bardin [et al.] // Comput. Phys. Commun. — 1990. — Vol. 59. — P. 303—312.
4. CEPC homepages — <http://cepc.ihep.ac.cn>.
5. FCC-ee homepage — <http://tlep.web.cern.ch>.
6. HE-LHC: The High-Energy Large Hadron Collider Volume / A. Abada [et al.] // Eur. Phys. J. ST. — 2019. — Vol. 228, no. 5. — P. 1109—1382.
7. FCC Physics Opportunities / A. Abada [et al.] // Eur. Phys. J. — 2019. — Vol. C79, no. 6. — P. 474.
8. *Blondel, A.* Circular and Linear e+e- Colliders: Another Story of Complementarity / A. Blondel, P. Janot. — 2019. — arXiv: [1912.11871](https://arxiv.org/abs/1912.11871) [[hep-ex](#)].
9. Standard model theory for the FCC-ee Tera-Z stage / A. Blondel [et al.] // Mini Workshop on Precision EW and QCD Calculations for the FCC Studies : Methods and Techniques CERN, Geneva, Switzerland, January 12-13, 2018. Vol. 3. — CERN. Geneva : CERN, 2019. — arXiv: [1809.01830](https://arxiv.org/abs/1809.01830) [[hep-ph](#)].
10. ILC homepage — <https://www.linearcollider.org/ILC>.
11. Complementarity between ILC250 and ILC-GigaZ / A. Irlles [et al.] // Linear Collider Community Meeting Lausanne, Switzerland, April 8-9, 2019. — 2019. — arXiv: [1905.00220](https://arxiv.org/abs/1905.00220) [[hep-ex](#)].

12. Physics at the  $e^+e^-$  Linear Collider / A. Arbey [et al.] // Eur. Phys. J. / ed. by G. Moortgat-Pick [et al.]. — 2015. — Vol. C75, no. 8. — P. 371. — arXiv: [1504.01726 \[hep-ph\]](#).
13. The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics. — 2013. — June. — arXiv: [1306.6352 \[hep-ph\]](#).
14. Physics with  $e^+e^-$  linear colliders / E. Accomando [et al.] // Phys. Rept. — 1998. — Vol. 299. — P. 1—78. — arXiv: [hep-ph/9705442 \[hep-ph\]](#).
15. Physics at the CLIC multi-TeV linear collider / E. Accomando [et al.] // Proceedings, 11th International Conference on Hadron spectroscopy (Hadron 2005): Rio de Janeiro, Brazil, August 21-26, 2005. — 2004. — arXiv: [hep-ph/0412251 \[hep-ph\]](#). — URL: <http://weblib.cern.ch/abstract?CERN-2004-005>.
16. CLIC homepage — <http://clic-study.web.cern.ch>.
17. Updated baseline for a staged Compact Linear Collider / M. J. Boland [et al.]. — 2016. — Aug. — arXiv: [1608.07537 \[physics.acc-ph\]](#).
18. The Compact Linear Collider (CLIC) - 2018 Summary Report / T. K. Charles [et al.]. — 2018. — Dec. — arXiv: [1812.06018 \[physics.acc-ph\]](#).
19. *Krauss, F.* AMEGIC++ 1.0: A Matrix element generator in C++ / F. Krauss, R. Kuhn, G. Soff // JHEP. — 2002. — Vol. 02. — P. 044. — arXiv: [hep-ph/0109036](#).
20. *Belyaev, A.* CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model / A. Belyaev, N. D. Christensen, A. Pukhov // Comput. Phys. Commun. — 2013. — Vol. 184. — P. 1729—1769. — arXiv: [1207.6082 \[hep-ph\]](#).
21. Automatic calculations in high energy physics and Grace at one-loop / G. Belanger [et al.] // Phys. Rept. — 2006. — Vol. 430. — P. 117—209. — arXiv: [hep-ph/0308080 \[hep-ph\]](#).
22. *Kilian, W.* WHIZARD: Simulating Multi-Particle Processes at LHC and ILC / W. Kilian, T. Ohl, J. Reuter // Eur. Phys. J. — 2011. — Vol. C71. — P. 1742. — arXiv: [0708.4233 \[hep-ph\]](#). — *Moretti, M.* O'Mega: An Optimizing matrix element generator / M. Moretti, T. Ohl, J. Reuter. — 02/2001. — arXiv: [hep-ph/0102195](#).
23. MERADGEN 1.0: Monte Carlo generator for the simulation of radiative events in polarized Moller scattering / A. Afanasev [et al.] // Comput. Phys. Commun. — 2007. — Vol. 176. — P. 218—231. — arXiv: [hep-ph/0603027](#).
24.  $\mu$ TRISTAN / Y. Hamada [et al.]. — 01/2022. — arXiv: [2201.06664 \[hep-ph\]](#).

25. *Kuraev, E. A.* On Radiative Corrections to  $e^+ e^-$  Single Photon Annihilation at High-Energy / *E. A. Kuraev, V. S. Fadin* // *Sov. J. Nucl. Phys.* — 1985. — Vol. 41. — P. 466—472.