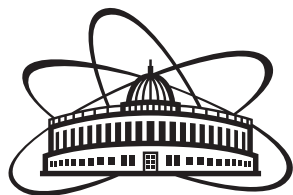


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи



Дыдышко Егор Вячеславович

Эффекты поляризации в процессах e^+e^- аннигиляции
при высоких энергиях

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. Джелепова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: **Садьков Ренат Рафаилович**
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований по адресу: (<https://dissertations.jinr.ru/ru/Dissertations/CalendarThesisDefenses>). С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь
диссертационного совета
(технический секретарь),
кандидат физико-математических
наук

Ю. М. Быстрицкий

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Исследования в области фундаментальных взаимодействий в последние десять лет велись по двум основным направлениям: поиску новых частиц и поиску отклонений от Стандартной модели (СМ) элементарных частиц [1] в прецизионных измерениях. Важнейшим успехом стратегии поиска было открытие предсказанного теорией электрослабых взаимодействий бозона Хиггса в 2013 году на Большом адронном коллайдере. При этом новых частиц, выходящих за рамки СМ обнаружено не было. Однако прецизионные измерения аномального магнитного момента мюона в Лаборатории Ферми показали отклонение от предсказаний СМ [2]. Рефлексия над сложившейся экспериментальной ситуацией объясняет логику построения планов для будущих исследований. В частности, на сегодняшний день выглядит нецелесообразным построение новых адронных ускорителей сверхвысоких энергий в ближайшее время. В то время, как прецизионное исследование свойств бозона Хиггса и других предсказаний СМ даёт надежду на обнаружение отклонений, вызванных новой физикой.

Наибольшую точность среди ускорительных экспериментов дают электрон-позитронные коллайдеры [3]. Точечный характер начальных частиц обеспечивает чистоту сигнатур при детектировании различных процессов и упрощает выделение сигнала из относительно низкого фона. Принципиально существует два типа e^+e^- ускорителей: линейные и циркулярные. Отсутствие синхротронного излучения даёт линейным ускорителям преимущество при достижении больших энергий пучков. Наибольшую известность получили проект Международного линейного коллайдера (ILC) [4] и проект Компактного линейного коллайдера (CLIC) [5]. Причём дизайн обоих ускорителей предполагает использование поляризованных пучков (со степенью поляризации до 80% для электронов и до 60% для позитронов). Главным достоинством циркулярных ускорителей является возможность получить высокую светимость пучков, позволяющую уменьшить статистическую неопределённость измерений. Синхротронное излучение ограничивает возможности достижения особенно больших энергий, однако на масштабе уже открытых частиц (до 350 ГэВ) потери оцениваются как приемлемые. В настоящее время созданы коллаборации для проектов Будущего циркулярного коллайдера (FCC) [6] и для Циркулярного электрон-позитронного коллайдера (CEPC) [7]. Поляризованные пучки на них также обсуждаются.

Диапазон энергий для будущих e^+e^- коллайдеров должен включать энергию 250 ГэВ, которая является оптимальной для ассоциированного рождения бозона Хиггса через процесс $e^+e^- \rightarrow ZH$, что наиболее важно для осуществления прецизионных измерений массы бозона Хиггса, его

спина, СР-чётности, константы взаимодействия Хиггса с Z -бозоном и различных парциальных ширин распада.

Другим важным направлением развития e^+e^- ускорителей является создание фабрик ароматов. При небольшой энергии (2-7 ГэВ) планируется достижение большой светимости для изучения свойств тау-лептонов и D -мезонов и поиска отклонений от СМ. При описании распадов этих частиц важную роль играет их поляризация.

Интерпретация данных на современных и будущих ускорителях требует детального учёта радиационных эффектов [8–11]. Радиационные поправки играют важную роль при поиске новой физики через отклонения от СМ. Задача прецизионной люминометрии также требует учёта радиационных эффектов.

Наибольшую актуальность в свете будущих проектов ускорителей имеют задачи вычисления электрослабых радиационных поправок с учётом поляризации частиц [12–14]. Требуемая точность предполагает отказ от ультрарелятивистского приближения и удержание масс всех частиц. Желательным является максимально широкий кинематический диапазон применимости результатов.

Целью настоящей работы является теоретическая поддержка экспериментов на будущих e^+e^- ускорителях. В неё входит расчёт радиационных поправок в рамках СМ, вызванных как вкладом петлевых диаграмм, так и тормозным излучением. Результаты расчётов оформляются в виде численных программных модулей и Монте-Карло генераторов событий, позволяющих моделировать наблюдаемые и псевдо-наблюдаемые величины.

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

1. Вычислить однопетлевые электрослабые поправки к электрон-позитронному рассеянию

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^- \quad (1)$$

с учётом поляризации начальных и конечных частиц;

2. Вычислить однопетлевые электрослабые поправки к процессу ассоциированного рождения бозона Хиггса с Z -бозоном

$$e^+e^- \rightarrow ZH \quad (2)$$

с учётом поляризации начальных частиц;

3. Вычислить однопетлевые электрослабые поправки к процессу рождения лептонных пар

$$e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^- \quad (3)$$

с учётом поляризации начальных и конечных частиц;

4. Вычислить однопетлевые электрослабые поправки к процессу рождения γZ

$$e^+e^- \rightarrow \gamma Z \quad (4)$$

с учётом поляризации начальных частиц;

Научная новизна результатов диссертации состоит в следующем:

- предложен метод экономичного вычисления поляризационных матричных элементов для вклада тормозного излучения с помощью проекции на световой конус фотона;
- предложен способ приведения матричных элементов для процессов с участием безмассового калибровочного бозона к форме, ковариантной относительно калибровочных преобразований; получена калибровочно-инвариантная форма для фотонного случая;
- предложена форма для аксиальной калибровки в терминах тензора Максвелла для наиболее общего случая массивного вектор-параметра;
- предложен метод вычисления поляризационных матричных элементов для массивных частиц через тензорные блоки, ковариантные относительно малых групп внешних импульсов, с использованием спиноров 6-мерного пространства.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что созданные на основе выполненных расчётов программные продукты могут быть использованы для интерпретации данных, учёта фоновых процессов и прецизионной люминометрии на будущих e^+e^- ускорителях высоких энергий.

Учёт поляризации начальных и конечных частиц и удержание всех масс делает возможным применение поправок к процессам (1) и (3) в условиях проектируемой в России «с – τ -фабрики».

Поправки для процесса (2) при энергии в системе центра масс 250 ГэВ могут быть использованы при прецизионном измерении массы бозона Хиггса.

Поправки для процесса (4) могут быть использованы для уменьшения систематической неопределённости при измерении массы Хиггса, а также при поиске отклонений от Стандартной модели трёхбозонных констант взаимодействия вида $\gamma\gamma Z$ или γZZ .

Полученные в диссертационной работе спиральные амплитуды для процессов являются их фундаментальными характеристиками. Они позволяют определить систематическую погрешность в измерениях на будущих ускорителях.

Результаты получены в рамках государственного задания N 3.9696.2017/8.9 от Министерства образования и науки РФ.

Методология и методы исследования.

В диссертационной работе использовались современные методы квантовой теории поля. При вычислении амплитуд процессов рождения

лептонной пары использовался метод спиральных амплитуд; тензорная редукция петлевых интегралов осуществлялась методом Пассарино-Вельмана; интегрирование по фазовому объёму проводилось численным методом Монте-Карло; петлевые интегралы вычислялись аналитически методом т'Хофта-Вельмана; инфракрасные сингулярности выделялись с помощью метода Бардина-Шумейко.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые вычислены электрослабые радиационные поправки первого порядка с учётом поляризации входящих частиц для процесса Баба-рассеяния.
2. Впервые получены электрослабые радиационные поправки первого порядка с учётом поляризации входящих частиц для процесса ассоциированного рождения бозона Хиггса совместно с Z-бозоном.
3. Впервые получены электрослабые радиационные поправки первого порядка с учётом поляризации всех частиц для процесса рождения лептонных пар в электрон-позитронных столкновениях в полном фазовом объёме.
4. Впервые получены электрослабые радиационные поправки первого порядка с учётом поляризации входящих частиц для процесса рождения пары фотон-Z-бозон.
5. Разработана в рамках проекта SANC автоматизированная процедура учёта тормозного излучения методом спиральных амплитуд.

Достоверность

Результаты расчётов радиационных поправок для процессов рассеяния Баба, ассоциированного рождения бозона Хиггса с Z-бозоном, рождения лептонных пар и рождения пары фотон-Z-бозон сравнивались с результатами существующих программных пакетов в пределах применимости последних, а также многократно докладывались на международных конференциях.

Достоверность результатов контролировалась посредством многочисленных внутренних тестов: аналитическое сокращение калибровочных параметров, выполнение тождеств Уорда и др., а также путём сравнения с численными результатами пакетов aTALC [15], CalcHEP [16] и WHIZARD [9; 17–19] в областях их применимости.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих **конференциях и семинарах**:

1. Семинар «Физика адронов», ЛТФ ОИЯИ, Дубна (2018), *Поляризованное e^+e^- рассеяние в проекте SANC*.
2. Семинар «Физика адронов», ЛТФ ОИЯИ, Дубна (2018), *Поляризованная аннигиляция e^+e^- в пару массивных фермионов в проекте ARIEL*.

3. Семинар «Физика адронов», ЛТФ ОИЯИ, Дубна (2018), *Ассоциированное рождение бозона Хиггса в поляризованной аннигиляции e^+e^- в Z -бозон в проекте ARIEL.*
4. 7th International Workshop on Calculations for Modern and Future Colliders (CALC-2018), ОИЯИ, Дубна (2018), *Bremsstrahlung helicity amplitudes with massive fermions.*
5. Loops and Legs in Quantum Field Theory, DESY Zeuthen, Санкт-Гоар, Германия (2018), *Electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering.*
6. Mini Workshop on Precision EW and QCD Calculations for the FCC Studies: Methods and Techniques, CERN, Женева, Швейцария (2018).
7. 11th FCC-ee workshop: Theory and Experiments, CERN, Женева, Швейцария (2019), *One-loop electroweak radiative corrections to $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, f\bar{f}, ZH$ for polarized e^+e^- beams.*
8. CEPС Topical Workshop: Theoretical Uncertainty Controls for the CEPС measurements, ИНЕР, Пекин, Китай (2019), *Helicity amplitudes for Bremsstrahlung $2f \rightarrow 2f(\gamma), 2f \rightarrow 2b(\gamma)$.*
9. 19th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research (ACAT-2021), Saas Fee, Швейцария (2019), *QED and electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering.*
10. Международный семинар «LHC Days in Belarus», НИИЯП БГУ, Минск (2019), *Complete one-loop electroweak corrections to polarized e^+e^- scattering in SANC.*
11. Общелабораторный семинар, ЛЯП ОИЯИ, Дубна (2020), *Процесс $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$ с учётом продольной поляризации.*
12. 20th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research (ACAT-2021), Virtual and IBS Science Culture Center, Южная Корея (2021), *Development of the automatic procedures for spinor matrix element calculation with massive particles.*

Личный вклад.

Все основные результаты, вошедшие в диссертацию, получены в составе группы соавторов при определяющем или значительном личном вкладе её автора.

Вклад автора был определяющим при вычислении аналитических выражений для спиральных амплитуд тормозного излучения и форм-факторов, учитывающих вклад петлевых диаграмм для процессов (1), (2), (3), (4). Соавторы работали над численным моделированием, верификацией и текстом статей.

Автор разработал и внедрил в среду SANC метод учёта тормозного излучения с помощью спиральных амплитуд, обобщённого на случай массивных частиц.

Автор внёс значительный вклад в реализацию устойчивого численно-го анализа дифференциальных сечений и поляризационных асимметрий.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК (в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science или Scopus).

Основные публикации автора по теме диссертации

- A1. One-loop electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering / D. Bardin [et al.] // Phys. Rev. D. — 2018. — Vol. 98, no. 1. — P. 013001.
- A2. One-loop electroweak radiative corrections to polarized $e^+e^- \rightarrow ZH$ / S. Bondarenko [et al.] // Phys. Rev. D. — 2019. — Vol. 100, no. 7. — P. 073002.
- A3. One-loop electroweak radiative corrections to lepton pair production in polarized electron-positron collisions / S. Bondarenko [et al.] // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102, no. 3. — P. 033004.
- A4. QED and electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering / A. B. Arbuzov [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. — 2020. — Vol. 1525, no. 1. — P. 012011.
- A5. One-loop electroweak radiative corrections to polarized $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$ process / S. Bondarenko [et al.]. — 2021. — arXiv:2111.11490.

Содержание работы

Во **Введении** доказывається актуальность темы данной диссертации в контексте планируемых экспериментов на электрон-позитронных коллайдерах. Формулируется цель исследования и последовательность задач, решение которых необходимо для ее достижения. Производится оценка полученных результатов с точки зрения их новизны и практической значимости. Сообщаются сведения о процедурах верификации и апробации результатов исследования. Приводится перечень тезисов, выносимых на защиту и соответствующий список публикаций с указанием личного вклада автора.

Диссертация посвящена вычислению электрослабых радиационных поправок для процессов на будущих электрон-позитронных коллайдерах с учётом поляризации начальных пучков.

Первая глава посвящена общему описанию методологии аналитических вычислений для теоретической поддержки ускорительных экспериментов в системе **SANC**. Вводятся основные элементы формализма: организация различных вкладов в однопетлевое сечение, нормированные форм-факторы и соответствующие им Дираковские структуры. Даются явные выражения для сечения процесса с произвольным образом поляризованными пучками через его спиральные амплитуды. Приводятся некоторые общие сведения из спинорной алгебры, а также вводятся следующие безындексные обозначения

$$\lambda_A(p) \equiv |p\rangle, \quad \lambda^A(p) \equiv [p], \quad \lambda_{\dot{A}}(p) = [p], \quad \lambda^{\dot{A}}(p) = \langle p| \quad (5)$$

Дираковские спиноры для двух поляризационных состояний записываются как два столбца матрицы 4×2 .

$$|p\rangle \equiv u^\chi(p_i) = \{u^+(p_i), u^-(p_i)\}, \quad [p] \equiv v_\chi(p_i) = \{v_+(p_i), v_-(p_i)\}. \quad (6)$$

Проецирование массивного импульса p_i на световой конус $q_i^2 = 0$ приводит к возникновению ассоциированного безмассового импульса k_i

$$p_i = k_i + \frac{m_i^2}{2p_i \cdot q_i} q_i, \quad k_i^2 = q_i^2 = 0, \quad \not{k}_i = \frac{\not{p}_i \not{q}_i \not{p}_i}{2p_i \cdot q_i} \quad (7)$$

Используется Вейлевское представление для γ -матриц, в котором возможна декомпозиция решений уравнения Дирака через двухкомпонентные спиноры

$$|p\rangle = \begin{pmatrix} |i\rangle & \frac{m_i}{\langle i|q_i\rangle} |q_i\rangle \\ \frac{m_i}{[i|q_i]} |q_i] & |i] \end{pmatrix}, \quad [p] = \begin{pmatrix} -\frac{m_i}{\langle i|q_i\rangle} |q_i\rangle & |i\rangle \\ |i] & -\frac{m_i}{[i|q_i]} |q_i] \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $|i\rangle \equiv |k_i\rangle$ и $|i] \equiv |k_i]$.

Вторая глава посвящена исследованию электрон-позитронного рассеяния (рассеяния Баба). Используя методологию среды **SANC**, получен вклад петлевых диаграмм с учётом поляризации начальных пучков, а с помощью метода спиральных амплитуд вычислен вклад жёсткого тормозного излучения.

Считая все импульсы входящими, так что $\sum p_i = 0$, кинематику жесткого тормозного излучения можно привести к безмассовому виду, если выбрать для всех фермионов $q_i = p_5$ - импульс тормозного фотона. Тогда

$$\begin{aligned} k_5 &= -\sum_{i=1}^4 k_i = K p_5, & K &= 1 + \sum_{i=1}^4 \frac{m_i^2}{2p_i \cdot p_5} = 1 + \sum_{i=1}^4 \frac{m_i^2}{2k_i \cdot p_5} \\ p_5 &= -\sum_{i=1}^4 p_i = K' k_5, & K' &= 1 - \sum_{i=1}^4 \frac{m_i^2}{2p_i \cdot k_5} = 1 - \sum_{i=1}^4 \frac{m_i^2}{2k_i \cdot k_5} \end{aligned} \quad (9)$$

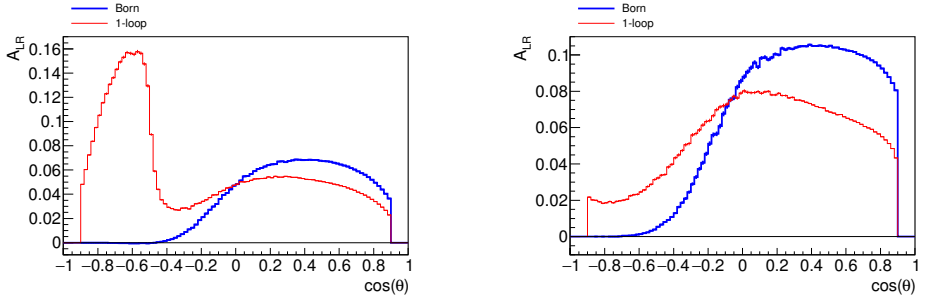


Рис. 1 — Поляризациянная асимметрия A_{LR} как функция косинуса угла рассеяния электрона при $\sqrt{s} = 250$ ГэВ (слева) и $\sqrt{s} = 500$ ГэВ (справа).

Вектор k_5 получается из p_5 таким образом, чтобы возникло “сохранение ассоциированных импульсов” $\sum k_i = 0$.

Произвол в проецировании на световой конус соответствует произволу в выборе оси квантования спина. Предложенный выбор приводит к упрощению матричных элементов.

Для получения амплитуды другого поляризованного состояния достаточно применить матрицу поворота спина [20–22]. В частности, если требуется амплитуда для спиральных состояний, то матрица имеет вид

$$C_{a_i}^{b_i} = \begin{bmatrix} \frac{[i^b|5]}{[i|5]} & \frac{m_i \langle i^*|5 \rangle}{\langle i^*|i^b \rangle \langle i|5 \rangle} \\ \frac{m_i [i^*|5]}{[i^*|i^b] [i|5]} & \frac{\langle i^b|5 \rangle}{\langle i|5 \rangle} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\langle i^*|i \rangle}{\langle i^*|i^b \rangle \langle i|5 \rangle} & \frac{m_i \langle i^*|5 \rangle}{\langle i^*|i^b \rangle \langle i|5 \rangle} \\ \frac{m_i [i^*|5]}{[i^*|i^b] [i|5]} & \frac{[i^*|i]}{[i^*|i^b]} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где спиноры соответствуют безмассовым векторам

$$k_{i^*} = \{|\vec{p}_i|, -p_i^x, -p_i^y, -p_i^z\}, \quad k_{i^b} = p_i - \frac{m_i^2}{2p_i \cdot k_{i^*}} k_{i^*}.$$

Третья глава посвящена изучению ассоциированного рождения бозона Хиггса вместе с Z-бозоном. Получены спиральные амплитуды для вклада виртуальных частиц. Для вычисления вклада жёсткого тормозного излучения использовался специальный поляризационный базис для амплитуд, совместно с матрицами спиновых вращений.

Содержанием **четвертой главы** является изучению процесса рождения лептонных пар в электрон-позитронных столкновениях.

Амплитуда вклада тормозного излучения для этого процесса была приведена к форме с явной калибровочной инвариантностью:

$$\sqrt{2}A_{\chi_1\chi_2\chi_3\chi_4\chi_5}^e = \frac{\text{Tr}[\not{p}_1\not{p}_2\mathbf{F}_5]}{z_1z_2} \bar{v}_1\not{\epsilon}_{34}u_2 - \frac{\bar{v}_1\mathbf{F}_5\not{\epsilon}_{34}u_2}{z_1} - \frac{\bar{v}_1\not{\epsilon}_{34}\mathbf{F}_5u_2}{z_2}, \quad (11)$$

Таблица 1 — Жёсткое тормозное, борновское и однопетлевое сечения в фб для процесса $e^+e^- \rightarrow ZH$, а также относительная поправка δ в процентах, для энергии 250 ГэВ и различных поляризаций начальных частиц, полученные SANC.

P_{e^-}	P_{e^+}	σ^{hard} , фб	σ^{Born} , фб	$\sigma^{\text{1-loop}}$, фб	δ , %
0	0	82.0(1)	225.59(1)	206.91(1)	-8.28(1)
-0.8	0	47.6(1)	266.05(1)	223.52(2)	-15.99(1)
-0.8	-0.6	46.3(1)	127.42(1)	111.76(2)	-12.29(1)
-0.8	0.6	147.1(1)	404.69(1)	335.28(1)	-17.15(1)

с сокращениями $z_i = 2p_i \cdot p_5$, $u_i \equiv u^{\chi_i}(p_i)$, и т.д.

Вектор поляризации реального фотона появляется только в комбинации $\mathbf{F}_5 = p_5^\mu \varepsilon_5^\nu \sigma_{\mu\nu}$. Это общеизвестный бивектор Максвелла, который является калибровочно-инвариантным объектом. Вводятся также сокращения для следующих комбинаций пропагаторов и констант связи:

$$\not{\phi}_{34} = \frac{1}{2} \sum_{a,b=\pm 1} \mathcal{D}^{ab} (\bar{v}_3 \gamma^\mu \gamma_b u_4) \gamma_\mu \gamma_a, \quad \mathcal{D}^{ab} = \frac{Q_e Q_l}{s'} + \frac{g_e^a g_l^b}{s' - M_Z^2 + i M_Z \Gamma_Z},$$

где g_l^\pm - киральные константы связи лептона l с векторным бозоном Z .

Предложен следующий вид для обобщения аксиальной калибровки $\varepsilon(g) \cdot g = 0$ с вектор-параметром g , на случай $g^2 \neq 0$

$$\not{\phi}(g) = \frac{\not{g}\mathbf{F} - \mathbf{F}\not{g}}{2g \cdot k}, \quad \not{\phi}(g_1) - \not{\phi}(g_2) = -\frac{\text{Tr}[\not{g}_1 \not{g}_2 \mathbf{F}]}{(2g_1 \cdot k)(2g_2 \cdot k)} \not{k}. \quad (12)$$

Амплитуда в форме (11) может быть получена путём выбора $g = p_2$.

Пятая главы посвящена рождению пары фотон-Z-бозон. Подход, основанный на тензоре Максвелла, был обобщён на случай 6-мерного пространства с $g^{MN} = \text{diag}[g^{\mu\nu}, 1, -1]$.

Матрицы Дирака и спинорная метрика в этом случае выбраны в виде

$$\begin{aligned} \not{M}_\alpha^{\dot{\beta}} &= \{\gamma_\mu, \gamma_5, +1\}, & \epsilon^{\alpha\dot{\beta}} &= \epsilon^{\dot{\beta}\alpha} = \epsilon_{\alpha\dot{\beta}} = \epsilon_{\dot{\beta}\alpha} = \begin{bmatrix} \epsilon^{AB} & 0 \\ 0 & \epsilon_{\dot{A}\dot{B}} \end{bmatrix} \\ \not{M}_{\dot{\alpha}}^\beta &= \{\gamma_\mu, \gamma_5, -1\}, & & \end{aligned} \quad (13)$$

Это позволило упростить выкладки и получить явным образом калибровочно-инвариантный ответ для процесса $e^+e^- Z\gamma\gamma \rightarrow 0$, описывающего

Таблица 2 — Борновские сечение, слабый вклад (weak) и полный однопетлевой вклад, и относительные поправки δ (%) для процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ для энергии $\sqrt{s} = 250$ ГэВ в схемах $\alpha(0)$ и G_μ .

P_{e^+}, P_{e^-}	0, 0	0,-0.8	0.3,-0.8	0,0.8	-0.3,0.8
$\sigma_{\alpha(0)}^{\text{Born}}$, пб	1.6537(1)	1.8040(1)	2.2572(1)	1.5034(1)	1.8440(1)
$\sigma_{G_\mu}^{\text{Born}}$, пб	1.7611(1)	1.9212(1)	2.4039(1)	1.6011(1)	1.9638(1)
$\sigma_{\alpha(0)}^{\text{weak}}$, пб	1.8360(1)	1.9447(1)	2.4261(1)	1.7273(1)	2.1271(1)
$\delta, \%$	11.03(1)	7.81(1)	7.49(1)	14.89(1)	15.36(1)
$\sigma_{G_\mu}^{\text{weak}}$, пб	1.8547(1)	1.9614(1)	2.4466(1)	1.7480(1)	2.1532(1)
$\delta, \%$	5.31(1)	2.10(1)	1.78(1)	9.18(1)	9.64(1)
$\sigma_{\alpha(0)}^{\text{EW}}$, пб	4.534(1)	4.923(1)	6.115(1)	4.145(1)	5.047(1)
$\delta, \%$	174.2(1)	172.9(1)	170.9(1)	175.7(1)	173.7(1)
$\sigma_{G_\mu}^{\text{EW}}$, пб	4.728(1)	5.132(1)	6.376(1)	4.323(1)	5.263(1)
$\delta, \%$	168.5(1)	167.1(1)	165.2(1)	170.0(1)	168.0(1)

жёсткое тормозное излучение $\mathcal{A} = \mathcal{A}_4 + \mathcal{A}_5$, $\mathcal{A}_5 = \mathcal{A}_4|_{4 \leftrightarrow 5}$,

$$\begin{aligned}
 \mathcal{A}_4 = & \left(-\frac{\text{Tr}[\not{p}_1 \not{p}_2 \not{F}_4] \text{Tr}[\not{p}_1 \not{p}_2 \not{F}_5]}{2z_{14}z_{24}z_{15}z_{25}} + \frac{\text{Tr}[\not{p}_2 \not{F}_4 \not{p}_2 \not{F}_5]}{z_{24}z_{245}z_{25}} \right) \langle 1|e_3|2\rangle \\
 & + \left(\frac{\text{Tr}[\not{p}_1 \not{p}_2 \not{F}_4]}{z_{14}z_{24}} + \frac{\text{Tr}[\not{p}_2 \not{p}_5 \not{F}_4]}{z_{24}z_{245}} \right) \frac{\langle 1|e_3 \not{F}_5|2\rangle}{z_{25}} \\
 & + \left(\frac{\text{Tr}[\not{p}_1 \not{p}_2 \not{F}_4]}{z_{14}z_{24}} - \frac{\text{Tr}[\not{p}_1 \not{p}_5 \not{F}_4]}{z_{14}z_{145}} \right) \frac{\langle 1|\not{F}_5 e_3|2\rangle}{z_{15}} \\
 & - \frac{\langle 1|e_3 \not{F}_5 \not{F}_4|2\rangle}{z_{24}z_{245}} - \frac{\langle 1|\not{F}_4 e_3 \not{F}_5|2\rangle}{z_{14}z_{25}} - \frac{\langle 1|\not{F}_5 \not{F}_4 e_3|2\rangle}{z_{15}z_{145}}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

где

$$\begin{aligned}
 \not{p}_1 &= \not{p}_1 - m, & \not{p}_3 &= \not{p}_3 + 0, & z_{14} &= 2\not{p}_1 \cdot \not{p}_4 = z_{23}, & \not{F}_4 &= \not{p}_4 \not{e}_4, \\
 \not{p}_2 &= \not{p}_2 + m, & \not{p}_4 &= \not{p}_4 + 0, & z_{24} &= 2\not{p}_2 \cdot \not{p}_4 = z_{14}, & \not{F}_5 &= \not{p}_5 \not{e}_5
 \end{aligned}$$

Используя представление 6-мерных векторов через спиноры $\not{p} \equiv |u\rangle\langle u| = |u^a\rangle\langle u_a|$, $\not{p} = |u^a\rangle\langle\langle u_a|$, а также тождество $\langle p|q\rangle\langle q|p\rangle = \langle p|q\rangle\langle\langle q|p\rangle = 2\not{p} \cdot \not{q}$, вклад тормозного излучения организован в виде комбинации тензоров малых групп, описывающих спиновые вращения внешних частиц

$$\begin{aligned}
 \mathcal{A}_4 = & -\left(\frac{\mathcal{S}_4 \otimes \mathcal{S}_5}{2} + \frac{\mathcal{Y}_{154} \otimes \tilde{\mathcal{Y}}_{145}}{z_{145}} \right) \otimes \mathcal{B} + \left[\left(\mathcal{S}_4 + \frac{\mathcal{Y}_{245} \cdot \mathcal{E}_{54}}{z_{245}} \right) \otimes \mathcal{C}_{25} - \frac{\mathcal{E}_{54}}{z_{245}} \otimes \mathcal{C}_{24} \right] \otimes \mathcal{G}_{15} \\
 & + \left[\left(\mathcal{S}_4 - \frac{\mathcal{Y}_{145} \cdot \mathcal{E}_{54}}{z_{145}} \right) \otimes \mathcal{C}_{15} - \frac{\mathcal{E}_{45}}{z_{145}} \otimes \mathcal{C}_{14} \right] \otimes \mathcal{G}_{25} - \mathcal{C}_{14} \otimes \mathcal{C}_{25} \otimes \mathcal{H}_{45},
 \end{aligned}$$

$$\mathcal{B} = \langle 1|e_3|2\rangle, \quad \mathcal{G}_{15} = \langle 1|e_3|5\rangle, \quad \mathcal{H}_{45} = \langle 4|e_3|5\rangle, \quad \mathcal{C}_{15} = \frac{1}{\llbracket 5|1\rangle}, \quad \mathcal{E}_{45} = \llbracket 4|5\rangle$$

$$\mathcal{S}_5 = \frac{1}{\langle 1|5\rangle} \langle 1|2\rangle \frac{1}{\langle 5|2\rangle}, \quad \mathcal{Y}_{154} = \frac{1}{\langle 1|5\rangle} \langle 1|4\rangle, \quad \tilde{\mathcal{Y}}_{145} = \frac{1}{\llbracket 1|4\rangle} \llbracket 1|5\rangle.$$

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Используя методологию системы **SANC** вычислены вклады петлевых диаграмм для процессов (1),(2),(3),(4). Получены соответствующие программные модули.
2. Используя метод вейлевских спиноров, получены матричные элементы для вклада жёсткого тормозного излучения в поправку к процессам (1),(2) с помощью проекции на световой конус фотона.
3. Создана автоматическая процедура для упрощения выражений, содержащих спинорные произведения, используя тождества Схутена и законы сохранения. Процедура применена к процессам (1),(2).
4. Написана программа для автоматического генерирования программного модуля для тормозного излучения на языке C++. С её помощью сгенерированы модули для процессов (1),(2).
5. Предложен способ приведения матричных элементов для процессов с участием фотона к калибровочно-инвариантному виду, используя алгебру матриц Дирака. Способ применён к процессам (3),(4).
6. Предложен метод вычисления поляризационных матричных элементов для массивных частиц через тензорные блоки, ковариантные относительно малых групп внешних импульсов, с использованием спиноров 6-мерного пространства. Метод применён к процессу (4).

Список литературы

1. *Bardin, D.* The standard model in the making: Precision study of the electroweak interactions / D. Bardin, G. Passarino. — Oxford, UK: Clarendon (1999) 685 p, 1999.
2. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm / B. Abi [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Apr. — Vol. 126, issue 14. — P. 141801.
3. The Role of polarized positrons and electrons in revealing fundamental interactions at the linear collider / G. Moortgat-Pick [et al.] // Phys. Rept. — 2008. — Vol. 460. — P. 131–243.
4. ILC, homepages. — <https://www.linearcollider.org/ILC>.

5. CLIC, homepages. — <http://clic-study.web.cern.ch>.
6. FCCee, homepages. — <http://tlep.web.cern.ch>.
7. CEPC, homepages. — <http://cepc.ihep.ac.cn>.
8. Full $\mathcal{O}(\alpha)$ electroweak radiative corrections to $t\bar{t}\gamma$ and $e^-e^+\gamma$ productions at ILC with GRACE-Loop / P. H. Khiem [et al.] // 9th Rencontres du Vietnam: Windows on the Universe.
9. *Ohl, T.* WHiZard and O’Mega / T. Ohl // LoopFest V: Radiative Corrections for the International Linear Collider: Multi-loops and Multi-legs. — 06/2006.
10. High-precision Luminosity at e^+e^- Colliders: Theory Status and Challenges / C. M. Carloni Calame [et al.] // Acta Phys. Polon. B. — 2015. — Vol. 46, no. 11. — P. 2227.
11. *Rieman, S.* Status and Prospects of e^+e^- Linear Collider Projects / S. Rieman // Acta Phys. Polon. B. — 2015. — Vol. 46, no. 11. — P. 2213.
12. Physics with e^+e^- linear colliders / E. Accomando [et al.] // Phys. Rept. — 1998. — Vol. 299. — P. 1–78.
13. 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.
14. 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.
15. One-loop photonic corrections to Bhabha scattering in $d=4-2\epsilon$ dimensions / J. Fleischer [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2006. — Vol. 48. — P. 35–52.
16. *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.
17. *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.
18. WHIZARD 2.2 for Linear Colliders / W. Kilian [et al.] // International Workshop on Future Linear Colliders. — 03/2014.
19. New Developments in WHIZARD Version 2.6 / W. Kilian [et al.] // International Workshop on Future Linear Collider (LCWS2017) Strasbourg, France, October 23-27, 2017. — 2018.
20. *Wigner, E. P.* Relativistic Invariance and Quantum Phenomena / E. P. Wigner // Rev. Mod. Phys. — 1957. — Vol. 29. — P. 255–268.

21. *Wigner, E. P.* SYMMETRY AND CONSERVATION LAWS /
E. P. Wigner // Phys. Today. — 1964. — Vol. 17. — P. 34–40.
22. *Schwinn, C.* On-shell recursion relations for all Born QCD amplitudes /
C. Schwinn, S. Weinzierl // JHEP. — 2007. — Vol. 04. — P. 072.

Дыдышко Егор Вячеславович

Эффекты поляризации в процессах e^+e^- аннигиляции при высоких энергиях

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____