

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи  
УДК 539.12.01

РУМЯНЦЕВ Леонид Александрович

ВНЕДРЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РОЖДЕНИЯ И РАСПАДА  $H$  И  $Z$   
БОЗОНОВ В СРЕДУ SANC

Специальность: 01.04.02 – теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Дубна 2008

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

**Научные руководители:**

доктор физико-математических наук,  
профессор  
кандидат физико-математических наук

Д. Ю. Бардин  
Л. В. Калиновская

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор  
доктор физико-математических наук

Э. А. Кураев  
Ф. В. Ткачѐв

**Ведущая организация:**

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета, г. Москва.

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2008 г. в 15<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

А.Б. АРБУЗОВ

## Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы.** За последние двадцать лет Стандартная Модель (СМ) обеспечивала исключительно точное описание всех экспериментов в физике высоких энергий. В настоящий момент она проверяется на уровне точности 0.1%. Уточнение важных входных параметров Стандартной Модели предполагается, в частности, на электронных линейных коллайдерах с опцией GigaZ, т.е. возврат на  $Z$  резонанс со статистикой в  $10^9$ . Обсуждаемые коллайдеры CLIC(CERN), международный линейный электронный коллайдер ILC и мюонные фабрики будут новыми прецизионными инструментами для физики частиц. Предполагается достижение высоких точностей  $\Delta \sin^2_{\theta_{eff}} \approx 0.00002$ ,  $\Delta M_W \approx 6$  МэВ,  $\Delta m_t \approx 0.2$  ГэВ, а для  $\Delta M_H \approx 100$  МэВ (из процесса  $e^+e^- \rightarrow ZH$ ). Мюонные фабрики будут обладать определенными преимуществами перед электронными коллайдерами. На них будет возможно детально изучить свойства Хиггс-бозона посредством его прямого рождения в  $s$ -канале.

Высокая точность измерений требует поддержки теоретических расчетов соответствующих наблюдаемых с теоретической неопределенностью в несколько раз лучше экспериментальной, скажем  $\approx (2 - 3) \times 10^{-4}$ , чтобы не вносить дополнительную систематику и в полной мере использовать высокую точность экспериментальных измерений для прецизионной проверки теории.

В Стандартной Модели спонтанное нарушение симметрии достигается посредством механизма Хиггса, и именно таким образом у кварков, лептонов и калибровочных бозонов появляются массы.

Открытие Хиггс-бозона — одна из главных физических задач недавно запущенного Большого Адронного Коллайдера (LHC) в CERN. Для экспериментального изучения Хиггс-сектора Стандартной Модели необходимо понимать и контролировать электрослабые поправки высшего порядка к процессам рождения и распада Хиггс-бозонов.

Одно из наиболее многообещающих направлений по поиску Хиггс-бозона — это его распад на четыре мюона:

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-. \quad (1)$$

Самый существенный фон, который подавляется только с помощью учета распределений событий по кинематическим параметрам — это рождение пары  $Z$  бозонов, которые тоже распадаются на четыре мюона:

$$pp \rightarrow ZZ X \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- X. \quad (2)$$

Проведенное исследование преследовало следующие цели:

- Развить физическую часть компьютерной системы SANC (до версии 1.10), доступной через интернет, для автоматического вычисления псевдо- и реалистических наблюдаемых на однопетлевом уровне точности для целого ряда процессов и распадов элементарных частиц в секторе фермион-бозонных взаимодействий.

- Реализовать в среде SANC вычисления однопетлевых электрослабых поправок к процессам  $f\bar{f} \rightarrow HZ$ ,  $H \rightarrow f\bar{f}Z$ ,  $f\bar{f} \rightarrow ZZ$ .
- Создать Монте-Карло генератор для процесса  $H \rightarrow 4\mu$  в однопетлевом резонансном приближении.
- Реализовать в среде SANC вычисления однопетлевых электрослабых поправок к процессам  $f\bar{f}HA \rightarrow 0$  и  $f\bar{f}ZA \rightarrow 0$  с использованием предложенного многоканального подхода.
- Внедрить вычисления спиральных амплитуд для всех рассматриваемых процессов.
- Внедрить вычисления вкладов мягкого и жесткого тормозного излучения для данных процессов.
- Вычислить специальные функции  $J_A$ , возникающие в редукции Пассарино–Вельтмана.

### Научная новизна работы.

- В среде SANC впервые реализованы полные вычисления однопетлевых электрослабых поправок к процессам  $f\bar{f} \rightarrow HZ$ ,  $H \rightarrow f\bar{f}Z$ ,  $f\bar{f} \rightarrow ZZ$ .
- На этой основе создан Монте Карло генератор для моделирования распада бозона Хиггса на четыре мюона с излучением одного реального фотона в резонансном приближении с использованием идеологии “строительных блоков”.
- Впервые предложен мультиканальный подход к вычислениям однопетлевых электрослабых поправок к распадам калибровочных бозонов  $H$  и  $Z$  на фермион–антифермионную пару и один фотон (процессы  $Z \rightarrow f\bar{f}\gamma$  и  $H \rightarrow f\bar{f}\gamma$ ), а также к их кросс-каналам — аннигиляции  $f\bar{f} \rightarrow Z\gamma$  и  $f\bar{f} \rightarrow H\gamma$  и рождения  $H$  и  $Z$  бозонов в  $e\gamma$  соударениях (процессы  $e\gamma \rightarrow eZ$  и  $e\gamma \rightarrow eH$ ).
- В среде SANC впервые реализованы полные вычисления однопетлевых электрослабых поправок ко всем шести процессам  $f\bar{f}H\gamma \rightarrow 0$  и  $f\bar{f}Z\gamma \rightarrow 0$ , их спиральных амплитуд, а также процедура вычисления вкладов мягкого и жесткого тормозного излучения для трех процессов  $f\bar{f}Z\gamma \rightarrow 0$ .
- Впервые предложен систематический подход для вычисления  $J_A$ -функций для рассмотренных процессов.

### **Практическая ценность работы.**

Система SANC находит свое применение для прецизионных вычислений вкладов процессов Стандартной Модели в экспериментах по поиску новой физики на современных ускорителях (LHC, эксперимент ATLAS).

**Следующие результаты выдвигаются для защиты:**

1. Развитие компьютерной среды SANC, v.1.10, доступной через интернет и реализующей вычисления физических наблюдаемых с однопетлевой точностью для широкого круга фермион–бозонных процессов в физике высоких энергий.
2. Законченное внедрение в систему SANC ряда фермион–бозонных процессов, представляющих интерес для физики LHC.
3. Мультиканальный подход к расчету ковариантных амплитуд  $f\bar{f}bb$ -процессов.
4. Общий метод вычисления функций  $J_A$ .
5. Монте Карло генератор для моделирования различных распределений для распада бозона Хиггса на четыре мюона с излучением реального фотона.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории Теоретической Физики им. Н.Н.Боголюбова ОИЯИ, на Рабочих Совещаниях по физической программе исследований на установке ATLAS (28 апреля и 25 ноября 2005 года, 14 апреля и 22 декабря 2006 года, 25 декабря 2007 года), а также на конференции ACAT2007 (Амстердам, Нидерланды, 23–27 апреля 2007 г.)

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано четыре статьи и один вклад в труды вышеупомянутой конференции.

## Содержание работы

**Во введении** (первой главе диссертации) очерчен круг исследуемых проблем, кратко сформулированы используемые методы и результаты, полученные в диссертации. Приведено содержание по главам.

**Во второй главе** диссертации приведено вычисление полной электрослабой однопетлевой поправки к процессам аннигиляции  $f_1\bar{f}_1 \rightarrow HZ$  и  $f_1\bar{f}_1 \rightarrow ZZ$  и процессу распада Хиггс-бозона  $H \rightarrow f_1\bar{f}_1 Z$ , а также описание Монте-Карло генератора  $H \rightarrow 4\mu$ . Все расчеты выполнены с помощью системы SANC. Вычисления выполнены в  $R_\xi$  калибровке с тремя калибровочными параметрами.

В таблицах 1 и 2 приведено сравнение между результатами SANC и результатами других групп и программ.

$\sqrt{s}$ , ГэВ	$M_H$ , ГэВ	[1]	<i>Grace-Loop</i>	SANC
500	100	4.1524	4.15239	4.15239
500	300	6.9017	6.90166	6.90166
1000	100	- 2.1656	- 2.16561	- 2.16560
1000	300	- 2.4995	- 2.49949	- 2.49949
1000	800	26.1094	26.10942	26.10942
2000	100	-11.5414	-11.54131	-11.54136
2000	300	-12.8226	-12.82256	-12.82256
2000	800	11.2468	11.24680	11.24680

Таблица 1: Сравнение процентов поправок в полное сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow ZH$  между результатами [1], *Grace-Loop* и SANC. Здесь [1] — это статья A.Denner, J.Kublbeck, R.Mertig and M.Bohm “Electroweak radiative corrections to  $e^+e^- \rightarrow HZ$ ”, Z.Phys.C56 (1992) 261-272 .

Были проведены расчеты мягкого и жесткого тормозного излучения. Вклад мягкого тормозного излучения содержит инфракрасную расходимость, которая устраняется при добавлении однопетлевого вклада. Жесткое же тормозное излучение было сравнено с программой CompHEP. Такое сравнение приведено в таблицах 3 и 4.

Наконец, в таблице 5 приведено сравнение результатов, полученных генератором Prophecy4f, с генератором SANC  $H \rightarrow 4\mu$ .

**В третьей главе** диссертации реализован мультиканальный подход для трех каналов процесса  $f_1\bar{f}_1 HA \rightarrow 0$ . Расчеты выполнены с помощью среды SANC. Получены формфакторы и спиральные амплитуды, свободные от УФ расходимостей. Для устранения инфракрасной расходимости в ширине распада  $H \rightarrow f_1\bar{f}_1 A$  и в сечениях процессов аннигиляции  $f_1\bar{f}_1 \rightarrow HA$  и рождения Хиггс-бозона  $e\gamma \rightarrow eH$  учтены вклады мягкого тормозного излучения. Для

$\sqrt{s}$ , ГэВ	$\theta$	[2] $\delta$ , %	SANC $\delta$ , %
190	10°	16.13	16.134
	45°	16.22	16.225
	90°	16.32	16.321
210	10°	13.88	13.879
	45°	13.93	13.932
	90°	13.85	13.849
250	10°	12.64	12.642
	45°	11.96	11.959
	90°	10.47	10.473
500	10°	13.26	13.258
	45°	5.51	5.514
	90°	-1.68	-1.679
1000	10°	11.89	11.888
	45°	6.00	-6.000
	90°	-17.66	-17.660

Таблица 2: Сравнение слабой однопетлевой поправки  $\delta$  в % для  $e^+e^- \rightarrow ZZ$  процесса (входные параметры как в работе [2] A.Denner and T.Sack “Electroweak radiative corrections to  $e^+e^- \rightarrow Z_0Z_0$ ”, Nucl.Phys. B306 (1988) 221).

$\sqrt{s}$ , ГэВ	$\sigma \cdot 10^{-2}$ , пб				
	250	300	500	1000	2000
Born (SANC)	21.984(1)	17.454(1)	5.6890(1)	1.2898(1)	0.31322(1)
Born (CompHEP)	21.984(1)	17.454(1)	5.6889(1)	1.2898(1)	0.31322(1)
Hard (SANC, s2n)	8.0309(1)	9.1168(1)	4.3650(1)	1.3246(1)	0.40293(1)
Hard (SANC, MC)	8.0307(1)	9.1166(1)	4.3649(1)	1.3246(1)	0.40293(1)
Hard (CompHEP)	8.0306(2)	9.1168(2)	4.3651(1)	1.3242(3)	0.40287(4)

Таблица 3: Сравнение для борновского сечения и сечения жестких фотонов в [пб] для реакции  $e^+e^- \rightarrow HZ\gamma$  (входные параметры CompHEP, энергия обоих фотонов  $E_\gamma \geq 1$  ГэВ).

аннигиляционного канала на рис. 1 представлено сечение процесса с радиационными поправками.

Для распадного же канала на рис. 2 показано распределение по инвариантной массе  $\mu^+\mu^-$  пары для борновского и однопетлевого случая. Видно, что есть два пика — кулоновский (в районе массы  $M_{\mu^+\mu^-} = 0$ ) и Z-резонансный (в районе массы  $M_{\mu^+\mu^-} = M_Z$ ).

Наконец, для канала рождения Хиггс-бозона  $e\gamma \rightarrow eH$  было проведено срав-

$\sigma$ , пб					
$\sqrt{s}$ , ГэВ	250	300	500	1000	2000
Born (SANC)	1.0758(1)	0.82971(1)	0.40644(1)	0.14815(1)	0.049760(1)
Born (CompHEP)	1.0758(1)	0.82971(1)	0.40644(1)	0.14814(1)	0.049761(1)
Hard (SANC)	0.52262(1)	0.46800(2)	0.29114(1)	0.13375(1)	0.54563(1)
Hard (CompHEP)	0.52258(2)	0.46801(1)	0.29111(2)	0.13374(1)	0.54563(6)

Таблица 4: Сравнение борновского сечения и сечения жесткого тормозного излучения в [пб] для реакции  $e^+e^- \rightarrow ZZ\gamma$  (входные параметры CompHEP, энергия обоих фотонов  $E_\gamma \geq 1$  ГэВ).

$\sqrt{s}$ , ГэВ	120	130	140	150
Prophecy4f	$7.053(3) \cdot 10^{-8}$	$2.3769(9) \cdot 10^{-7}$	$6.692(2) \cdot 10^{-7}$	$1.6807(6) \cdot 10^{-6}$
SANC ( $G_\mu$ )	$7.197(3) \cdot 10^{-8}$	$2.4079(8) \cdot 10^{-7}$	$6.743(2) \cdot 10^{-7}$	$1.6842(5) \cdot 10^{-6}$
$\delta$ , %	2.04	1.01	0.76	0.21
SANC ( $\alpha$ )	$6.938(2) \cdot 10^{-8}$	$2.343(1) \cdot 10^{-7}$	$6.594(2) \cdot 10^{-7}$	$1.6534(5) \cdot 10^{-6}$

Таблица 5: Сравнение для ширины распада  $H \rightarrow 4\mu$  в  $G_\mu$ -схеме  $M_H = 140$  ГэВ между Prophecy4f и SANC.

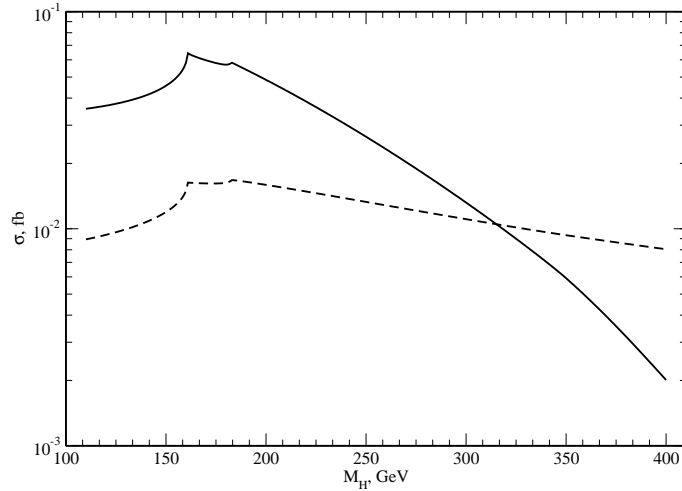


Рис. 1: Сечение процесса с однопетлевыми поправками рождения Хиггс-бозона через аннигиляционный канал как функция массы Хиггс-бозона,  $M_H$ . Сплошная и пунктирная линии отвечают результатам соответственно для  $\sqrt{s}=500$  и  $\sqrt{s}=1500$  ГэВ.

нение полных сечений процесса между работой [3] и SANC для трех энергий в системе центра масс  $\sqrt{s} = 500, 1000, 1500$  ГэВ и для широкого диапазона масс



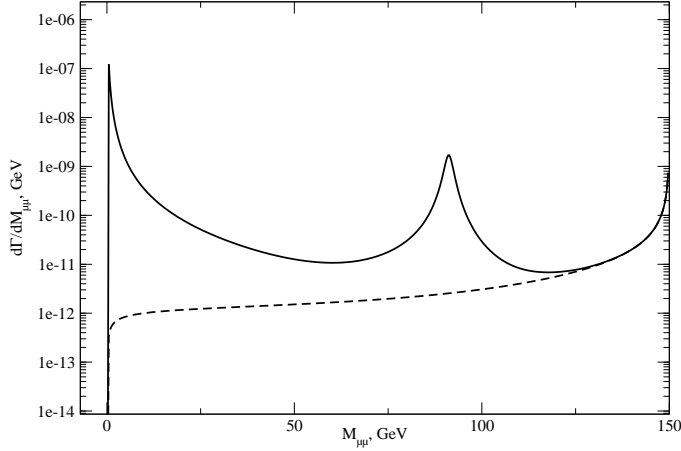


Рис. 2: Распределение по инвариантной массе  $\mu^+\mu^-$  пары. Показаны и борновский (пунктирная линия), и однопетлевой (сплошная) результаты.

Хиггс-бозона:  $110 \text{ ГэВ} \leq M_H \leq 400 \text{ ГэВ}$  ([3] — это статья E.Gabrielli, V.A.Plyin and B.Mele “ $Z\gamma H$  vertex effects in Higgs production at future  $e\gamma$  linear colliders”, Phys.Rev.D56 (1997) 5945-5961, hep-ph/9702414). Результаты сравнения можно видеть в таблицах 6 и 7.

**В четвертой главе** диссертации реализован мультиканальный подход для трех каналов процесса  $f_1\bar{f}_1ZA \rightarrow 0$  почти полностью аналогично третьей главе. Все расчеты выполнены в среде SANC. Получены формфакторы и спиральные амплитуды, так же как и в предыдущей главе диссертации. Для этого процесса

$M_H/\sqrt{s}$	500			1000		
	SANC	[3]	$\delta$	SANC	[3]	$\delta$
80	8.40	8.38	-0.2	9.31	9.29	-0.2
100	8.85	8.85	0	9.95	9.94	-0.1
120	9.77	9.80	0.3	11.16	11.2	0.4
140	11.76	11.8	0.3	13.68	13.7	0.1
160	20.91	21.1	0.9	24.82	25.0	0.7
180	20.67	20.9	1.1	25.04	25.3	1.0
200	16.99	17.2	1.2	21.05	21.2	0.7
300	5.90	5.97	1.2	8.44	8.53	1.0
400	1.64	1.64	0	2.74	2.78	1.5

Таблица 6: Канал рождения  $H$ -бозона, SANC и [3].

есть три канала реакции: аннигиляционный  $f_1\bar{f}_1 \rightarrow ZA$ , распадный  $Z \rightarrow f_1\bar{f}_1A$  и канал рождения  $Z$ -бозона на  $e\gamma$  коллайдерах  $e\gamma \rightarrow eZ$ .

В таблице 8 приведены результаты сравнения наших результатов с результатами пакета CompHEP для борновских сечений и для сечений жесткого тор-мозного излучения процесса  $e^+e^- \rightarrow Z\gamma(\gamma)$ .

$M_H/\sqrt{s}$	1500		
	SANC	[3]	$\delta$
80	9.76	9.74	-0.2
100	10.48	10.5	-0.2
120	11.80	11.8	0
140	14.52	14.6	0.6
160	26.48	26.6	0.5
180	26.81	27.0	0.7
200	22.64	22.8	0.7
300	9.33	9.43	1.1
400	3.15	3.18	1.0

Таблица 7: Канал рождения  $H$ -бозона, SANC и [3].

$\sqrt{s}$ , ГэВ	$\sigma$ , пб				
	100	200	500	1000	2000
Born (SANC)	2482.0(1)	86.230(1)	11.652(1)	2.9845(1)	0.77816(1)
Born (CompHEP)	2482.0(1)	86.230(1)	11.651(1)	2.9846(1)	0.77817(1)
Hard (SANC)	586.7(7)	43.26(8)	7.69(2)	2.341(6)	0.717(2)
Hard (CompHEP)	586.7(3)	42.48(5)	7.47(1)	нестабильно	нестабильно

Таблица 8: Сравнение для борновского сечения и сечения жестких фотонов в [пб] для реакции  $e^+e^- \rightarrow Z\gamma(\gamma)$  (входные параметры CompHEP, энергия обоих фотонов  $E_\gamma \geq 1$  ГэВ). Статистическая неточность последней значащей цифры дана в скобках.

Для этого же процесса в таблице 9 приведено сравнение борновских и однопетлевых сечений, демонстрируется независимость от параметра  $\bar{\omega}$ , разделяющего вклады мягкого и жесткого тормозного излучений.

$\sqrt{s}$ , ГэВ	200	500	1000	2000	5000
$\sigma^{\text{Born}}$ , пб	27.8548(1)	3.37334(1)	0.816485(2)	0.202534(1)	0.0323355(1)
$\sigma_1^{1\text{-loop}}$ , пб	43.36(4)	5.216(9)	1.239(4)	0.299(1)	0.0436(3)
$\sigma_2^{1\text{-loop}}$ , пб	43.38(5)	5.211(10)	1.235(4)	0.298(2)	0.0430(5)
$\delta_1$ , %	55.7(2)	54.6(3)	51.9(4)	47.4(6)	34.9(8)
$\delta_2$ , %	55.7(2)	54.5(3)	51.3(5)	46.9(8)	33.0(14)

Таблица 9: Сравнение борновского и однопетлевого сечений аннигиляционного канала  $e^+e^- \rightarrow Z\gamma(\gamma)$  для различных значений параметра  $\bar{\omega}$ .

Далее, рассмотрим канал распада  $Z \rightarrow f_1\bar{f}_1A$ . На рисунке 3 показана борновская и однопетлевая дифференциальная ширина.

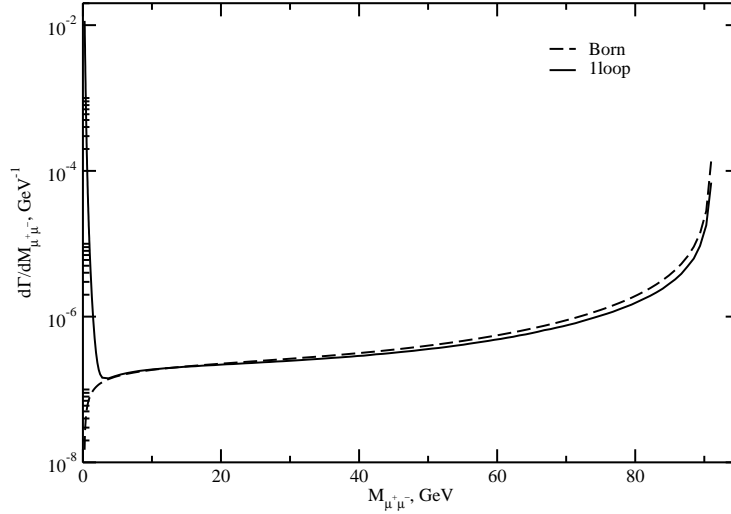


Рис. 3: Распределение по инвариантной массе  $\mu^+\mu^-$  пары распада  $Z \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma(\gamma)$ . Представлены и борновский (пунктирная линия), и однопетлевой (сплошная линия) результаты.

Наконец, для процесса  $e\gamma \rightarrow eZ$  в таблице 10 показано сравнение борновского и однопетлевого сечений.

$\sqrt{s}$ , ГэВ	200	500	1000	2000	5000
$\sigma^{\text{Born}}$ , пб	8.3381(3)	1.79168(0)	0.46840(0)	0.11842(0)	0.019007(0)
$\sigma_1^{1\text{-loop}}$ , пб	8.7988(5)	1.9591(2)	0.52129(5)	0.13171(1)	0.02037(2)
$\sigma_2^{1\text{-loop}}$ , пб	8.8002(9)	1.9593(2)	0.52131(6)	0.13168(1)	0.02037(3)
$\delta_1$ , %	5.54(1)	9.35(1)	11.29(1)	11.23(1)	7.16(1)
$\delta_2$ , %	5.54(1)	9.36(1)	11.30(1)	11.20(1)	7.15(2)

Таблица 10: Сравнение борновского и однопетлевого сечений процесса  $\gamma e^- \rightarrow Ze^-(\gamma)$ , вычисленных с различными значениями параметра  $\bar{\omega}$ .

**В пятой главе** диссертации были вычислены функции  $J_A$  в редукции Пассарино-Вельтмана, а именно функции  $J_A(ZZ)$ ,  $J_A(ZA)$  и  $J_A(AA)$ . Эти функции необходимы для расчетов процессов  $f\bar{f} \rightarrow ZZ$ ,  $f\bar{f} \rightarrow ZA$  и  $f\bar{f} \rightarrow AA$ . В таблице 11 приведено сравнение вещественных и мнимых частей функции  $J_{A,\text{sub}}^{ZZ}$  при двух значениях переменной  $s$  и трех  $\cos\theta$  при  $m_\gamma = 10^{-40}$ ,  $m_e = 10^{-10}$ ,  $M_Z = 91.1867$  (все размерные величины приведены в ГэВ). Первая строка — LoopTools, вторая строка — настоящая работа.

$\cos\theta$	$s = 4 \cdot 10^4$	$s = 10^5$
-0.999	-9.17793269440E-5, 5.01365750241E-5	-8.34819076278E-5, 9.56822492987E-6
	-9.17793269440E-5, 5.01365750242E-5	-8.34819076277E-5, 9.56822492987E-6
0	-8.19476326776E-5, 2.66195083157E-5	-7.59496912845E-5, -1.71354446353E-5
	-8.19476326775E-5, 2.66195083157E-5	-7.59496912844E-5, -1.71354446353E-5
0.999	-6.38460671355E-5, 7.09185809003E-7	-3.56999202585E-5, -6.06505583369E-5
	-6.38460671354E-5, 7.09185809029E-7	-3.56999202585E-5, -6.06505583369E-5

Таблица 11: Сравнение функции  $J_A(ZZ)$  с пакетом LoopTools.

### Основные результаты, полученные в диссертации.

1. В среду SANC внедрены расчеты однопетлевых электрослабых поправок к процессам  $f\bar{f} \rightarrow HZ$ ,  $H \rightarrow f\bar{f}Z$ ,  $f\bar{f} \rightarrow ZZ$ .
2. В среде SANC реализовано вычисление однопетлевых электрослабых поправок к распадам калибровочного бозона  $Z$  и бозона Хиггса на фермион–антифермионную пару и один фотон (процессы  $Z \rightarrow f\bar{f}\gamma$  и  $H \rightarrow f\bar{f}\gamma$ ), а также к их кросс-каналам — каналам аннигиляции (процессы  $f\bar{f} \rightarrow Z\gamma$  и  $f\bar{f} \rightarrow H\gamma$ ) и к каналам рождения  $H$  и  $Z$ -бозона (процессы  $e\gamma \rightarrow eZ$  и  $e\gamma \rightarrow eH$ ), используя предложенный в диссертации многоканальный подход.
3. Реализована процедура вычисления вкладов мягкого и жесткого тормозного излучения для данных процессов ко всем рассмотренным в диссертации  $f\bar{f}bb$  процессам.
4. В систему SANC внедрены спиральные амплитуды для всех рассмотренных в диссертации процессов.
5. Создан Монте Карло генератор для моделирования распада бозона Хиггса на четыре мюона с излучением одного реального фотона.
6. Вычислены специальные функции  $J_A$  в классе функций Пассарино–Вельтмана с использованием предложенного в диссертации общего метода.

### Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. D.Bardin, S.Bondarenko, L.Kalinovskaya, G.Nanava, L.Rumyantsev, W. von Schlippe, “SANCnews: Sector ffbb”, Computer Physics Communications v.177 (2007) 738-756.
2. D.Bardin, S.Bondarenko, L.Kalinovskaya, G.Nanava, L.Rumyantsev, “Electroweak radiative correction to the three channels of the process  $f_1\bar{f}_1HA \rightarrow 0$ ”, European Physics Journal v.C52 (2007) 83-92.
3. D.Bardin, S.Bondarenko, L.Kalinovskaya, G.Nanava, L.Rumyantsev, W. von Schlippe, “Electroweak radiative corrections to the three channels of the process  $f_1\bar{f}_1ZA \rightarrow 0$ ”, European Physics Journal v.C54 (2008) 187-197.
4. Д.Ю.Бардин, Л.В.Калиновская, Л.А.Румянцев, “Функции  $J_A$  в редукции Пассарино-Вельтмана”, Письма в ЭЧАЯ v.6 N1 (2009) 53-70.
5. D.Bardin, L.Kalinovskaya, A.Arbuzov, S.Bondarenko, P.Christova, V.Kolesnikov, L.Rumyantsev, R.Sadykov, G.Nanava, “SANC: precision calculations for the SM processes”, ACAT-2007 proceedings, Amsterdam, The Netherlands, 23-27 April 2007.