

Н-25

На правах рукописи  
УДК 539.12.01

НАНАВА

Гизо

ОДНОПЕТЛЕВЫЕ ЭЛЕКТРОСЛАБЫЕ ПОПРАВКИ  
К ПРОЦЕССАМ  $2f_1 \rightarrow (\gamma, Z) \rightarrow 2f$  И РАСПАДАМ  $B \rightarrow 2f$   
В СРЕДЕ SANC

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

C 346.6g1 + C 346.6e2

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова 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

А.В. Ефремов  
Ф.В. Ткачѐв

**Ведущая организация:**

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

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2004 г. в 15<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета К 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 “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



С.И. ФЕДОТОВ

**Общая характеристика работы**

**Актуальность проблемы.** Современные эксперименты в физике элементарных частиц характеризуются огромной статистикой зарегистрированных событий. Так например, на четырех детекторах LEP: ALEPH, DELPHI, L3 и OPAL было зарегистрировано около 17 миллионов событий. Это огромная статистика обеспечила беспрецедентную точность экспериментальных измерений для некоторых Z резонансных наблюдаемых, таких как  $\sigma_h^0$  и  $\Gamma_z$ , порядка  $10^{-3}$  или лучше. С 1995 года по 2000г. LEP работал при энергиях выше Z резонанса, достигнув к 1999 году 100 ГэВ на пучок и поставив к октябрю 2000г. более  $750\text{пб}^{-1}$  светимости каждому детектору, что превысило проектные цели. Поэтому даже в области высоких энергий, где нерезонансные сечения малы, точность измерений превысила 1%.

Эта высокая точность измерений потребовала теоретических расчетов соответствующих наблюдаемых с теоретической неопределенностью в несколько раз лучше экспериментальной, скажем  $\sim (2 - 3) \times 10^{-4}$ , чтобы не вносить дополнительную систематику и в полной мере использовать высокую точность экспериментальных измерений для прецизионной проверки теории. Для этого в расчетах приходилось учитывать петлевые квантовые поправки. Соответствующий математический аппарат создавался в семидесятые–восемидесятые годы прошлого века. Все эти факты позволяют заключить, что в течение последних десяти лет окончательно сформировалась новая научная дисциплина – прецизионная физика высоких энергий, имеющая две составляющие:

- собственно прецизионные измерения при сверхвысоких энергиях, и
- поддерживающие их теоретические расчеты, которые, с неизбежностью должны быть многопетлевыми вычислениями в теории возмущений релятивистской квантовой теории поля.

Предполагается, что прецизионная физика высоких энергий имеет хорошие перспективы в будущем. Уже в ближайшее время ожидается уточнение важных входных параметров Стандартной Модели. Для теоретической поддержки экспериментов на современных и будущих ускорителях, где ожидается еще большая статистика, **необходим** новый уровень как теоретических предсказаний, так и компьютерных программ. Громоздкость петлевых расчетов приводит к необходимости создания соответствующих компьютерных систем.

Приведенное исследование преследовало следующие цели :

- Создание четырехуровневой компьютерной системы SANC, доступной через интернет, для автоматического вычисления псевдо- и реалистических наблюдаемых на однопетлевом уровне точности для целого ряда процессов и распадов элементарных частиц. В настоящее время доступна версия 0.41 системы.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

- Последовательно внедрить в систему SANC технику спиральных амплитуд для расчета наблюдаемых. Для вычисления спиральных амплитуд основных процессов в SANC используется метод Вега-Вудки, а для процессов сопутствующего излучения — техника Кляйса-Стирлинга.
- С использованием техники спиральных амплитуд создать Монте Карло генератор для распадов  $B \rightarrow ff\gamma$ .
- Результаты точного Монте Карло генератора SANC для распада  $W \rightarrow l\bar{\nu}_l\gamma$  использовать для улучшения известного приближенного Монте Карло генератора PHOTOS.

#### Научная новизна работы.

- Впервые создана однородная компьютерная среда SANC, доступная через интернет, для автоматического вычисления наблюдаемых в физике высоких энергий на однопетлевом уровне точности.
- В среду SANC имплементировано вычисление однопетлевых электрослабых поправок к процессам типа  $2f_1 \rightarrow 2f$ .
- В среде SANC реализовано вычисление однопетлевых электрослабых поправок к двухфермионным распадам калибровочных бозонов ( $W^\pm, Z$ ) и бозона Хиггса.
- Имплементирована процедура вычисления вкладов мягкого и жесткого тормозного излучения для данных процессов.
- В систему SANC внедрена техника спиральных амплитуд для расчета физических наблюдаемых.
- Впервые создан Монте Карло генератор для моделирования двухфермионных распадов бозонов Стандартной Модели и бозона Хиггса с излучением одного реального фотона.
- Результаты, полученные с помощью этого Монте Карло генератора, использованы для улучшения предсказательной способности генератора PHOTOS.

#### Практическая ценность работы.

Созданная система SANC найдет своё применение для прецизионных вычислений вкладов процессов Стандартной Модели в экспериментах по поиску новой физики на современных (CERN: NOMAD) и будущих ускорителях (LHC : ATLAS, CMS).

#### Следующие результаты выдвигаются для защиты:

1. Создание компьютерной среды SANC, v.040, доступной через интернет и реализующий вычисление физических наблюдаемых с однопетлевой точностью для широкого круга процессов в физике высоких энергий.
2. Внедрение в систему SANC техники спиральных амплитуд.
3. Создание Монте Карло генератора для моделирования различных распределений для двухфермионных распадов бозонов Стандартной Модели и бозона Хиггса с излучением реального фотона.
4. Улучшение пределов применения широко известного Монте Карло генератора PHOTOS посредством процедуры введения корректирующего веса, основанной на результатах точного моделирования радиационных распадов.

#### Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории Теоретической Физики им. Н.Н.Боголюбова ОИЯИ, на семинарах в CERN, на конференциях SAAP – 2001 (Дубна, Россия, 28 Июнь 2001 г.), ICHEP – 2002 (Амстердам, Нидерланды, 24–31 Июль 2002 г.), ACAT – 2002 (Москва, Россия, 24–28 Июнь 2002 г.), на Рабочем Совещании ECFA LCWS (Монпелье, Франция, 13–16 Ноябрь 2003 г.)

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано пять статей и четыре вклада в труды вышеупомянутых конференций.

## Содержание работы

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

В первой главе диссертации приведено вычисление полной электрослабой однопетлевой поправки к процессам типа  $2f_1 \rightarrow 2f$ . Расчеты выполнены с помощью системы SANC. Массы начальных фермионов пренебрегаются, а конечных фермионов удерживаются. Вычисления выполнены в  $R_\xi$  калибровке с тремя калибровочными параметрами. Используется техника спиральных амплитуд. Для устранения инфракрасных расходимостей в физических наблюдаемых (дифференциальные и полные сечения, асимметрии), учтен вклад мягкого тормозного излучения от внешних заряженных фермионов. Приведено детальное сравнение полученных результатов с результатами известной программы ZFITTER для всех каналов с рождением легких фермионов. В таблице 1 представлено сравнение для четырех ненулевых форм-факторов для трех значений энергии с.д.м.  $\sqrt{s}$ . А в таблицах 2 и 3 — сравнение для дифференциального

Таблица 1: ЭС форм-факторы для процесса  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ . Сравнение SANC-ZFITTER. Первая строка - SANC, вторая строка - ZFITTER.

$\sqrt{s}$	100 ГэВ	200 ГэВ	300 ГэВ
FF			
<i>u</i> $\bar{u}$ канал, $m_u = 0.1$ ГэВ, $m_d = 0$			
$F_{LL}$	12.89583 - <i>i</i> 1.84786	8.24737 - <i>i</i> 10.64653	8.98371 - <i>i</i> 12.88466
ZF	12.89583 - <i>i</i> 1.84786	8.24736 - <i>i</i> 10.64651	8.98370 - <i>i</i> 12.88466
$F_{QL}$	29.30446 + <i>i</i> 3.67330	29.38217 + <i>i</i> 2.27613	31.59711 + <i>i</i> 1.59304
ZF	29.30445 + <i>i</i> 3.67330	29.38216 + <i>i</i> 2.27613	31.59710 + <i>i</i> 1.59304
$F_{LQ}$	29.10831 + <i>i</i> 3.26973	29.48511 + <i>i</i> 0.92311	31.65835 - <i>i</i> 0.89711
ZF	29.10832 + <i>i</i> 3.26973	29.48512 + <i>i</i> 0.92312	31.65835 - <i>i</i> 0.89711
$F_{QQ}$	44.88228 + <i>i</i> 8.85688	43.31854 + <i>i</i> 9.48286	44.18773 + <i>i</i> 10.25197
ZF	44.88228 + <i>i</i> 8.85688	43.31854 + <i>i</i> 9.48286	44.18773 + <i>i</i> 10.25196
<i>d</i> $\bar{d}$ канал, $m_d = 0.1$ ГэВ, $m_u = 0$			
$F_{LL}$	13.70781 - <i>i</i> 1.51002	15.18630 - <i>i</i> 3.93706	8.86000 - <i>i</i> 1.80409
ZF	13.70781 - <i>i</i> 1.51002	15.18629 - <i>i</i> 3.93706	8.86000 - <i>i</i> 1.80409
$F_{QL}$	29.64340 + <i>i</i> 4.12394	31.96819 + <i>i</i> 6.97877	31.69945 + <i>i</i> 8.03876
ZF	29.64340 + <i>i</i> 4.12394	31.96818 + <i>i</i> 6.97877	31.69944 + <i>i</i> 8.03876
$F_{LQ}$	29.12112 + <i>i</i> 3.22780	30.28990 + <i>i</i> 1.73736	31.69321 - <i>i</i> 0.07000
ZF	29.12113 + <i>i</i> 3.22780	30.28990 + <i>i</i> 1.73733	31.69323 - <i>i</i> 0.07001
$F_{QQ}$	44.87608 + <i>i</i> 8.79014	43.94906 + <i>i</i> 9.86523	44.19463 + <i>i</i> 10.38253
ZF	44.87609 + <i>i</i> 8.79014	43.94905 + <i>i</i> 9.86523	44.19462 + <i>i</i> 10.38251

и полного сечения, соответственно. Как видно, уровень согласия между вычислениями SANC и ZFITTER является очень хорошим и составляет 6 или 7 знаков. Для канала с рождением  $t$ -кварка результаты сравнивались с программами FeynArts и topfit. Уровень согласия SANC с этими программами составляет 8-9 знаков, таблица 4.

Таблица 2: Сравнение однопетлевого дифференциального сечения, [пб]. Первая строка - ZFITTER, вторая строка - SANC.

$\sqrt{s}$	100 ГэВ	200 ГэВ	300 ГэВ	400 ГэВ	700 ГэВ	1000 ГэВ
$\cos \vartheta$						
<i>u</i> $\bar{u}$ канал, $m_u = 0.1$ ГэВ						
-0.9	45.404742 45.404602	0.386966 0.386966	0.225923 0.225923	0.138065 0.138065	0.048621 0.048621	0.024156 0.024156
0	60.382423 60.382566	1.882835 1.882837	0.771939 0.771939	0.421410 0.421410	0.133475 0.133475	0.064245 0.064245
0.9	173.467517 173.467551	6.450000 6.450000	2.510881 2.510881	1.346620 1.346620	0.417295 0.417295	0.198842 0.198842
<i>d</i> $\bar{d}$ канал, $m_d = 0.1$ ГэВ						
-0.9	86.554414 86.554110	0.430807 0.430807	0.136720 0.136720	0.069644 0.069644	0.020899 0.020899	0.009978 0.009978
0	72.820806 72.820908	1.180211 1.180212	0.419410 0.419411	0.219070 0.219070	0.066312 0.066312	0.031351 0.031351
0.9	176.717336 176.717376	3.770861 3.770861	1.469194 1.469194	0.796291 0.796291	0.255118 0.255118	0.124714 0.124714

Таблица 3: Сравнение однопетлевого полного ЭС сечения, [пб]. Первая строка - ZFITTER, вторая строка - SANC.

100 ГэВ		200 ГэВ		300 ГэВ	
$\sigma_{tot}$	$\sigma_{FB}$	$\sigma_{tot}$	$\sigma_{FB}$	$\sigma_{tot}$	$\sigma_{FB}$
<i>e</i> $^-e^+$ канал, $m_e = 0$					
52.61662	30.78899	2.980668	1.654673	1.276008	0.648414
52.61662	30.78899	2.980667	1.654673	1.276008	0.648414
$\mu^+\mu^-$ канал, $m_\mu = 0.106$ ГэВ					
52.61634	30.78885	2.980667	1.654671	1.276008	0.648414
52.61634	30.78885	2.980667	1.654671	1.276008	0.648414
<i>u</i> $\bar{u}$ канал, $m_u = 0.1$ ГэВ					
160.8980	70.98406	5.021808	3.360848	2.031754	1.269556
160.8981	70.98416	5.021810	3.360848	2.031754	1.269556
<i>d</i> $\bar{d}$ канал, $m_d = 0.1$ ГэВ					
193.7658	50.03208	3.120724	1.867871	1.149479	0.725581
193.7658	50.03227	3.120725	1.867871	1.149479	0.725581

Таблица 4: Сравнение дифференциального сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ . Учтен вклад мягкого тормозного излучения,  $E_\gamma^{\max} = \sqrt{s}/10$ . Первая строка — SANC, вторая строка — FeynArts, третья строка — topfit.

$\sqrt{s}$	500 ГэВ	700 ГэВ	1000 ГэВ
$\cos \vartheta$			
-0.9	0.11408409557800 0.11408410 0.11408410	0.05199100267864 0.051991003 0.051991001	0.02310170508071 0.023101705 0.023101706
-0.5	0.14308120516447 0.14308121 0.14308121	0.06560630503586 0.065606305 0.065606305	0.02882301902010 0.028823019 0.028823021
0.0	0.21718800976521 0.21718801 0.21718801	0.11496514450150 0.11496514 0.11496514	0.05495088904853 0.054950889 0.054950889
0.5	0.32933727394776 0.32933727 0.32933727	0.19615154401629 0.19615154 0.19615154	0.09941700898317 0.099417009 0.099416999
0.9	0.44290816734352 0.44290817 0.44290816	0.27915043976042 0.27915044 0.27915045	0.14426233253975 0.14426233 0.14426232

Во второй главе диссертации рассмотрена процедура вычисления однопетлевых ЭС поправок к двухфермионным распадам калибровочных бозонов ( $W^\pm, Z$ ) и бозона Хиггса. Расчеты выполнены с помощью компьютерной среды SANC. Получены форм-факторы и спиральные амплитуды свободные от УФ расходимостей. Для устранения ИК расходимости в ширине распада учтен вклад мягкого тормозного излучения. Также вычислен вклад жесткого тормозного излучения в ширину распада. Вычисления ЭС поправок для этих распадов в  $R_\xi$  калибровке выполнены впервые. На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты вычислений радиационных поправок к данным распадам выполненные с помощью SANC.

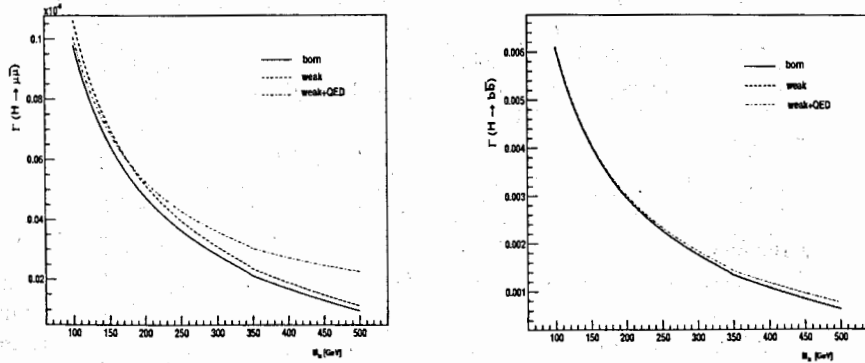


Рис. 1: Зависимость ширины распада от массы  $H$  бозона.

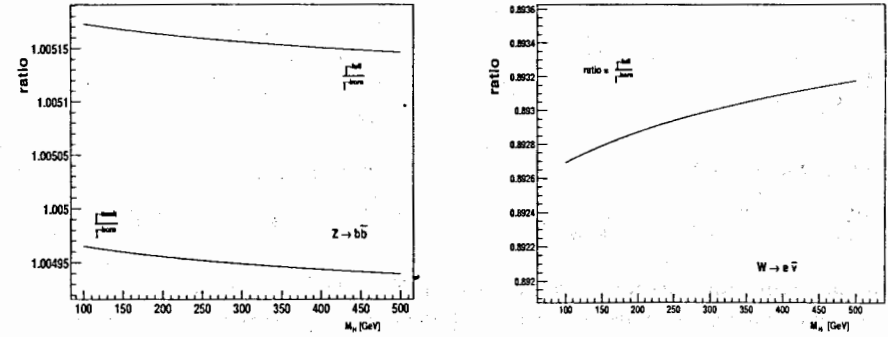


Рис. 2: Зависимость радиационной поправки к ширине распадов от массы  $H$  бозона

В третьей главе диссертации приведено описание Монте Карло генератора для двухфермионных распадов калибровочных бозонов и бозона Хиггса с излучением одного реального фотона. При имплементации однопетлевых КЭД и слабых поправок массами конечных фермионов не пренебрегается. Для численного расчета амплитуд радиационных распадов используется метод спиновых амплитуд Кляйса-Стирлинга. Интегрирование в фазовом пространстве выполнено с помощью техники Монте Карло. События, сгенерированные с помощью SANC, имеют единичный вес. Для распада  $Z$  бозона, КЭД часть вычислений сравнивается с точным однопетлевым КЭД предсказанием известного Монте Карло генератора KORALZ, который тщательно проверялся в течение последних 20 лет и широко использовался при обработке данных на LEP и SLC. Из приведённых на рис. 3 гистограмм видно, что уровень согласия SANC с KORALZ лучше, чем 0.5% (т.е. находится на уровне статистических ошибок). Проверяется, что КЭД поправки порядка  $O(\alpha)$  к ширине  $Z \rightarrow f\bar{f}$  распада согласуются с хорошо известным стандартным фактором  $1 + \frac{3\alpha}{4\pi} = 1.001743$ . Вычисления SANC для этого фактора дает  $1.001733 \pm 2.8 \times 10^{-5}$ . Т.е. согласие лучше, чем 0.01%. Для  $W$  и  $H$  распадов результаты сравнивались с приближенным Монте Карло генератором PHOTOS. Как видно из приведённых на рис. 4 и рис. 5 гистограмм, согласие SANC с PHOTOS находится в пределах ожидаемого уровня точности, если учесть, что алгоритм Монте Карло генератора PHOTOS основан на приближении лидирующих логарифмов. Для распределения по аколинеарности (рис. 5), где главный вклад определяется несингулярной частью матричного элемента распада  $W \rightarrow l\bar{\nu}_l\gamma$ , отличие между SANC и PHOTOS составляет 40%.

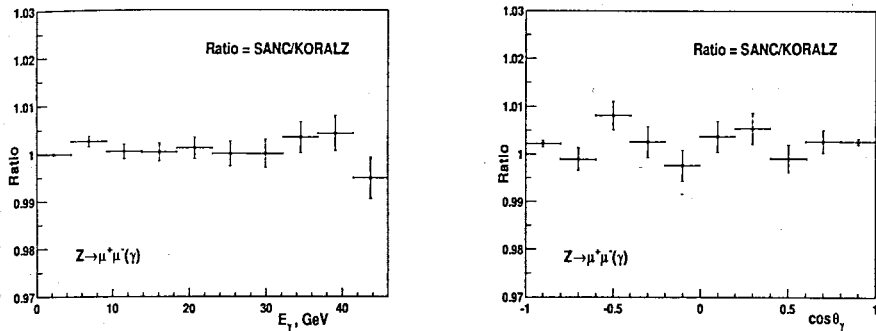


Рис. 3: Сравнение распределений SANC и KORALZ для распада  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^- (\gamma)$ ; отношение распределения по энергии фотона (на левом рис.) и углу фотона (на правом рис.) относительно  $\mu^-$ .

Это было исправлено с помощью добавления в PHOTOS корректирующего веса:

$$\delta = -8E_\gamma(1 - \beta_l \cos \theta) \frac{Q_W}{Q_l} \left( \frac{m_l^2 E_l}{M_W^4 (1 - m_l^2/M_W^2)(4 - m_l^2/M_W^2)} + \frac{2E_l E_\gamma}{M_W^3 (1 - m_l^2/M_W^2)(4 - m_l^2/M_W^2)} \right)$$

В результате, согласие SANC с PHOTOS стало значительно лучше (рис. 6), особенно в той области фазового пространства, где доминируют нелидирующие слагаемые матричного элемента распада  $W \rightarrow l \bar{\nu} \gamma$  ( $\sim 10\%$ ).

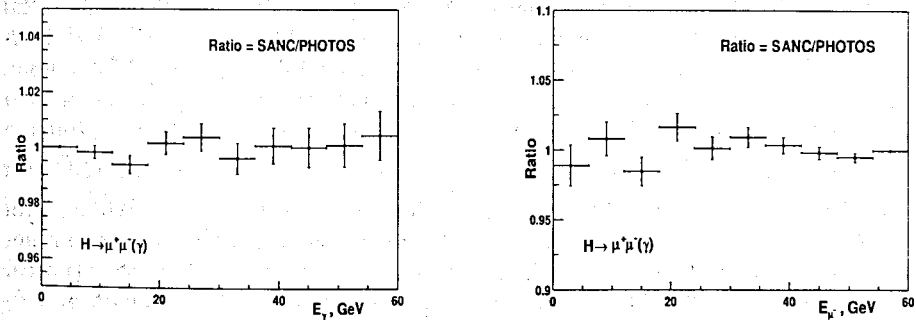


Рис. 4: Сравнение распределений SANC и PHOTOS для распада  $H \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ ; отношение распределения энергии фотона (на левом рис.) и мюона (на правом рис.). Главный вклад определяется лидирующим логарифмом (коллинеарность).

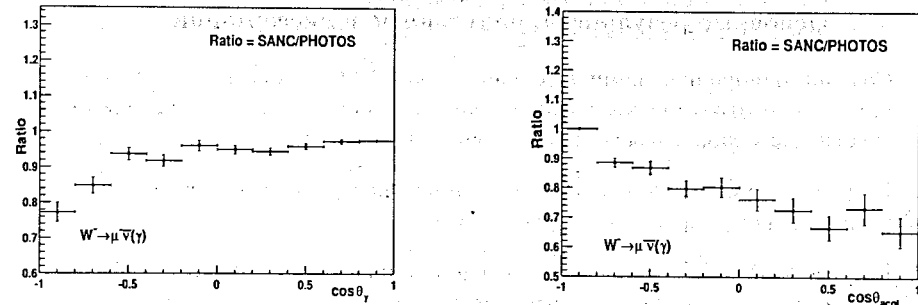


Рис. 5: Сравнение распределений SANC и PHOTOS для распада  $W \rightarrow \mu \bar{\nu} \gamma$ ; отношение распределения по углу фотона относительно  $\mu^-$  (на левом рис.) и  $\mu^- \mu^+$  аколлинеарности (на правом рис.). Главный вклад определяется ИК сингулярностью для левой гистограммы, и несингулярной частью матричного элемента для правой гистограммы.

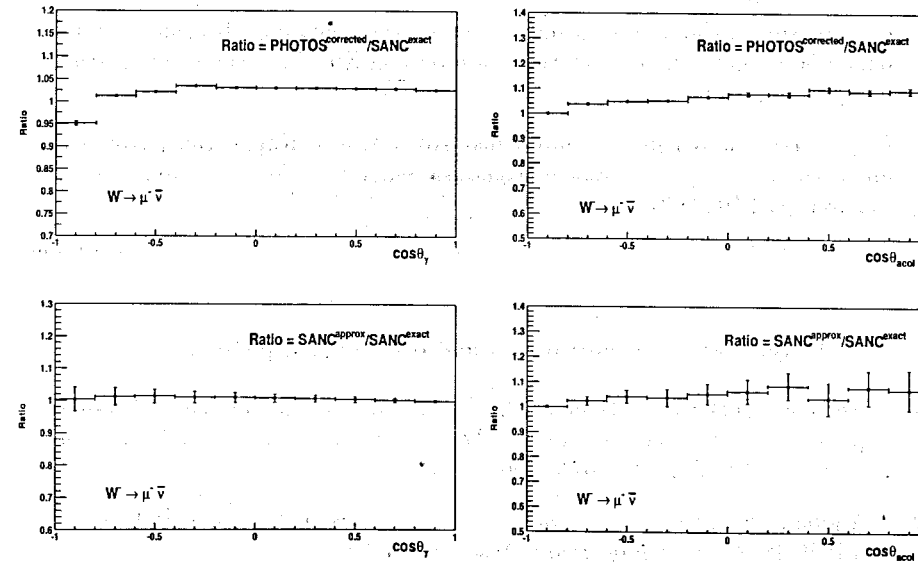


Рис. 6: Сравнение распределений для  $W$  распада точного SANC и улучшенного PHOTOS; отношение распределения по углу фотона относительно  $\mu^-$  (на левом рис.) и  $\mu^- \bar{\nu}$  аколлинеарности (на правом рис.). Главный вклад определяется ИК сингулярностью для левой гистограммы, и несингулярной частью матричного элемента для правой гистограммы. На нижних рисунках показаны те же сравнения распределений между точным и приближенным SANC.

### Основные результаты, полученные в диссертации.

1. Создана однородная компьютерная среда SANC, доступная через интернет, для автоматического вычисления наблюдаемых в физике высоких энергий на однопетлевом уровне точности.
2. В среде SANC имплементировано вычисление однопетлевых электрослабых поправок к процессам типа  $2f_1 \rightarrow 2f$ .
3. В среде SANC реализовано вычисление однопетлевых электрослабых поправок к двухфермионным распадам калибровочных бозонов ( $W^\pm$ ,  $Z$ ) и бозона Хиггса.
4. Имплементирована процедура вычисления вкладов мягкого и жесткого тормозного излучения для данных процессов.
5. В систему SANC внедрена техника спиральных амплитуд для расчета физических наблюдаемых.
6. Создан Монте Карло генератор для моделирования двухфермионных распадов бозонов Стандартной Модели и бозона Хиггса с излучением одного реального фотона.
7. Результаты, полученные с помощью этого Монте Карло генератора, использованы для улучшения предсказательной способности Монте Карло генератора PHOTOS.

### Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. A.Andonov, D.Bardin, S.Bondarenko, P.Christova, L.Kalinovskaya, G.Nanava, "Update of one-loop corrections for  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ , first run of SANC system.", *Particles and Nuclei* v.34 No:5 (2003) 576.
2. A.Andonov, S.Jadach, G.Nanava, Z.Was, "Comparison of SANC with KORALZ and PHOTOS", *Acta Phys.Polon.* B34 (2003) 2665.
3. G.Nanava, Z.Was, "How to use SANC to improve the PHOTOS Monte Carlo simulation of bremsstrahlung in leptonic W boson decays", *Acta Phys.Polon.* B34 (2003) 4561.
4. G.Nanava, "A Monte Carlo simulation of decays under the SANC project", *Nucl.Instrum.Meth.* A502 (2003) 583.

5. A.Andonov, D.Bardin, S.Bondarenko, P.Christova, L.Kalinovskaya, G.Nanava and W. von Schlippe, "SANCscope - v.0.41", to be submitted to *Comput. Phys. Commun.*, hep-ph/0411186.
6. D.Bardin, G.Passarino, L.Kalinovskaya, P.Christova, A.Andonov, S.Bondarenko, G.Nanava, "Project CALCPHEP: Calculus for precession high energy physics", CAAP-2001 Proceedings, Dubna 2001.
7. A.Andonov, D.Bardin, S. Bondarenko, P.Christova, L.Kalinovskaya, G.Nanava, G.Passarino, "Project SANC (former CALCPHEP): support of analytic and numeric calculations for experiments at colliders", ICHEP-2002 proceedings, Amsterdam, The Netherlands, 24-31 July 2002.
8. A.Andonov, D.Bardin, S.Bondarenko, P.Christova, L.Kalinovskaya, G.Nanava, G.Passarino, "SANC press release", ACAT-2002 proceedings, Moscow, Russia, 24-28 June.
9. A.Andonov, D.Bardin, S.Bondarenko, P.Christova, L.Kalinovskaya, G.Nanava, G.Passarino, "Present status of the SANC project", ECFA LCWS, Montpellier, 13-16 November 2003:

Получено 15 ноября 2004 г.