

# «Теоретическая поддержка экспериментов на коллайдерах»

## Авторский коллектив:

А. Б. Арбузов<sup>1</sup>, С. Г. Бондаренко<sup>1</sup>, Е. В. Дыдышко<sup>2</sup>, Л. В. Калиновская<sup>2</sup>, А. А. Кампф<sup>2</sup>, Л. А. Румянцев<sup>2</sup>, Р. Р. Садыков<sup>2</sup>, В. Л. Ермольчик<sup>2</sup>, Ю. В. Ермольчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – ЛТФ ОИЯИ

<sup>2</sup> – ЛЯП ОИЯИ

Область исследований [цикла работ](#) охватывает физику электрослабых и сильных взаимодействий частиц в рамках Стандартной модели.

Точность экспериментальных исследований непрерывно растет с увеличением собранной статистики, развитием методов анализа, улучшением калибровки детекторов и т. д. Это приводит к постоянному повышению требований к точности теоретических прогнозов, таких, как Большой адронный коллайдер, электрон-позитронные коллайдеры, мюонные фабрики и другие. В связи с планами по запуску экспериментов с поляризованными пучками (NICA, Belle II, ILC, CLIC, RHIC), необходимы теоретические предсказания с учетом поляризации начальных и конечных частиц.

Основная цель работ – разработка и развитие компьютерной системы SANC для полуавтоматических аналитических расчетов для различных процессов взаимодействия частиц с учетом радиационных поправок. Результаты аналитических расчетов реализованы в Монте-Карло интеграторе MCSANC и Монте-Карло генераторе невзвешенных событий ReneSANCe, которые позволяют учитывать экспериментальные условия. Данные программы позволяют получать результаты оценки наблюдаемых и псевдонаблюдаемых, принимая во внимание полные однопетлевые электрослабые поправки и отдельные поправки высших порядков в полном фазовом объеме с учетом массы всех частиц как для неполяризованных, так и для поляризованных случаев. Эти уникальные свойства делают их востребованными для моделирования современных и будущих экспериментов.

На сегодняшний день в Монте-Карло кодах MCSANC/ReneSANCe реализованы следующие процессы:

На сегодняшний день в Монте-Карло кодах MCSANC/ReneSANCe реализованы следующие процессы:

- I. Получено прецизионное теоретическое описание следующих процессов для лептонных коллайдеров с учетом всех масс и поляризации начальных частиц:
  1. рассеяния Баба ( $e^+e^- \rightarrow e^-e^+$ ) на однопетлевом уровне точности;
  2. рождения бозона Хиггса, ассоциированного с рождением Z-бозона ( $e^+e^- \rightarrow ZH$ ) на однопетлевом уровне, а также ведущих логарифмических вкладов высших порядков в формализме структурных функций КЭД за счет излучения из начального состояния;
  3. электрон-позитронная аннигиляция в пару фотон и Z-бозон ( $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$ ) на

однопетлевом уровне точности;

4. упругое мюон-электронное рассеяние  $\mu^\pm e^- \rightarrow e^- \mu^\pm$  на однопетлевом уровне точности с учетом двухпетлевых электрослабых поправок порядка  $O(G_\mu^2)$  и двухпетлевых смешанных электрослабых/КХД поправок порядка  $O(G_\mu \alpha_s)$ ;
5. процесс Мёллера для каналов  $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$  и  $\mu^+ \mu^+ \rightarrow \mu^+ \mu^+$  на однопетлевом уровне точности, (применение: будущие мюонные коллайдеры  $\mu$ TRISTAN);
6. рождение фермионной пары ( $e^+ e^- \rightarrow \mu^- \mu^+$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \tau^- \tau^+$ ,  $e^+ e^- \rightarrow t \bar{t}$ ) на однопетлевом уровне точности с учетом двухпетлевых электрослабых поправок порядка  $O(G_\mu^2)$  и двухпетлевых смешанных электрослабых/КХД поправок порядка  $O(G_\mu \alpha_s)$ ;
7. рождение пары фотонов ( $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$ ) на однопетлевом уровне точности.

II. Для адронных коллайдеров проведен расчет процессов Дрелла-Яна с радиационными поправками:

1. с нейтральным током ( $pp[p\bar{p}] \rightarrow Z, \gamma \rightarrow \ell^+ \ell^-$ );
2. с заряженным током ( $pp[p\bar{p}] \rightarrow W^- \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ ,  $pp[p\bar{p}] \rightarrow W^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$ );
3. реализована возможность оценки продольной поляризации для процесса Дрелла-Яна с нейтральным током.

На будущих электрон-позитронных коллайдерах высоких энергий планируется изучить физику в области энергии порядка массы  $Z$ -бозона на принципиально новом уровне точности. Это вызвало новую волну интереса к программам, созданных для анализа экспериментальных данных на LEP. Наша группа продолжила поддерживать и развивать две такие программы: библиотеку электрослабых поправок DIZET и полуаналитическую программу для вычисления сечений процессов электрон-позитронной аннигиляции ZFITTER.

Созданные нами программы переданы экспериментаторам и активно используются для симуляции и анализа данных в коллаборациях ATLAS, CMS, Belle II и др.

Таким образом, сделан вклад в теоретическую поддержку современных и будущих экспериментальных исследований в области физики высоких энергий, в частности, на существующих коллайдерах ВЭПП-2000 (Новосибирск), Belle II (Япония), BEPC-II (Пекин) и будущих установках, таких, как Супер чарм-тау фабрика (Саров), FCC\_ee (ЦЕРН), CEPС (Китай) и др.

Результаты, полученные участниками проекта, были представлены в публикациях в рецензируемых журналах и докладывались на многочисленных международных семинарах и конференциях.

### Публикации цикла:

1. A. Arbuzov, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, V. Yermolchyk, [Electroweak radiative corrections to polarized top quark pair production](#), Phys.Rev.D 107 (2023) 11, 113006.

2. A. Arbuzov, J. Gluza, L. Kalinovskaya, S. Riemann, T. Riemann, V. Yermolchyk, [Computer package DIZET v. 6.45](#), Comput. Phys. Commun. 291 (2023) 108846.
3. A. Arbuzov, S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, V. Yermolchyk, Yu. Yermolchyk, [Electroweak Effects in Neutral Current Drell–Yan Processes within SANC System](#), Phys. Part. Nucl. 54 (2023) 3, 552-555.
4. S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, A. Kampf, L. Romyantsev, R. Sadykov, V. Yermolchyk, [One-loop radiative corrections to photon-pair production in polarized positron-electron annihilation](#), Phys. Rev. D 107 (2023) 7, 073003.
5. S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, V. Yermolchyk, [EW One-Loop Corrections to the Longitudinally Polarized Drell–Yan Scattering. \(I\) The Neutral Current Case](#), Phys. Part. Nucl. Lett. 20 (2023) 2, 77-83.
6. S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, V. Yermolchyk, [Hadron-hadron collision mode in ReneSANCe-v1.3.0](#), Comput. Phys. Commun. 285 (2023) 108646.
7. A. Arbuzov, S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, R. Sadykov, V. Yermolchyk, Yu. Yermolchyk, [Effects of Electroweak Radiative Corrections in Polarized Low-Energy Electron–Positron Annihilation into Lepton Pairs](#), JETP Lett. 116 (2022) 4, 199-204.
8. S.G. Bondarenko, L.V. Kalinovskaya, L.A. Romyantsev, V.L. Yermolchyk, [One-loop electroweak radiative corrections to polarized Møller scattering](#), JETP Lett. 115 (2022) 9, 495-501.
9. A.B. Arbuzov, S.G. Bondarenko, L.V. Kalinovskaya, L.A. Romyantsev, V.L. Yermolchyk, [Electroweak effects in polarized muon-electron scattering](#), Phys. Rev. D 105 (2022) 3, 033009.
10. A. Arbuzov, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, R. Sadykov and V. Yermolchyk, [Electroweak Effects in  \$e^+e^-\$  ZH Process](#), Symmetry, 13 (2021) 7, 1256.
11. A. Arbuzov, S. Jadach, Z. Was, B.F.L. Ward, S.A. Yost, [The Monte Carlo Program KKMC, for the Lepton or Quark Pair Production at LEP/SLC Energies—Updates of electroweak calculations](#), Comput. Phys. Commun. 260 (2021), 107734
12. A.B. Arbuzov, S.G. Bondarenko, L.V. Kalinovskaya. [Asymmetries in Processes of Electron-Positron Annihilation](#), Symmetry 12 (2020) 7, 1132.
13. S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, V. Yermolchyk, [One-loop electroweak radiative corrections to lepton pair production in polarized electron-positron collisions](#), Phys. Rev. D 102 (2020) 3, 033004
14. R. Sadykov, V. Yermolchyk, [Polarized NLO EW  \$e^+e^-\$  cross section calculations with ReneSANCe v1.0.0](#), Comput. Phys. Commun. 256 (2020) 107445.
15. S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, R. Sadykov, V.

Yermolchik, [One-loop electroweak radiative corrections to polarized  \$e^+e^-\$  ZH](#), Phys. Rev.D 100 (2019) 7, 073002.

16. D. Bardin, A. Arbuzov, S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, R. Sadykov, [One-loop electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering](#) Phys. Rev. D 98 (2018) 1, 013001.

#### **Труды конференций и рабочих совещаний:**

1. A. Arbuzov and S. Bondarenko and L. Kalinovskaya, [Electroweak Effects in Asymmetries of Electron–Positron Annihilation Processes](#), Acta Phys. Polon. Supp., 15, number 2, pages 1–A11, 2022 year.
2. R. Sadykov, A. Arbuzov, S. Bondarenko, Y. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev and V. Yermolchik, [ReneSANCe event generator for high-precision  \$e^+ e^-\$  physics](#), J. Phys. Conf. Ser., 2438, 1, 012152, 2023 year.
3. A. Arbuzov, S. Bondarenko, Y. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, R. Sadykov, V. Yermolchik, [Electron-positron annihilation processes in MCSANCe](#), CERN Yellow Reports: Monographs 3 (2020) 213-216. Eds. A. Blondel, J. Gluza, S. Jadach, P. Janot and T. Riemann
4. A. Arbuzov, D. Bardin, S. Bondarenko, Y. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev and R. Sadykov, [Electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering](#) PoS LL2018 (2018) 010
5. A. B. Arbuzov, S. G. Bondarenko, Ya. V. Dydyshka, L. V. Kalinovskaya, L.A. Romyantsev and R. R. Sadykov, [QED and electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering](#), J.Phys.Conf.Ser. 1525 (2020) 1, 012011
6. R.R. Sadykov, A.B. Arbuzov, S.G. Bondarenko, Ya V. Dydyshka, L.V. Kalinovskaya, I.I. Novikov, L.A. Romyantsev, V.L. Yermolchik, [MCSANCe generator with one-loop electroweak corrections for processes with polarized  \$e^+e^-\$  beams](#), J.Phys.Conf.Ser. 1525 (2020) 1, 012012.