

Отчет по проекту ARTeL за 2019-2021,

Л.В. Калиновская, И.Р. Бойко

При подаче заявки проекта ARTeL были поставлены следующие цели и задачи:

А) Теоретическая поддержка экспериментов на e^+e^- ускорителях, Л.В. Калиновская

1. Создание генератора для e^+e^- физики с возможностью описания процессов точнее, чем в однопетлевом приближении.
2. Интерфейс NLO EW RC с RUTHIA.
3. Развитие однорезонансного приближения для сложных процессов.
4. Создание стандартной процедуры вычисления спиральных амплитуд для процессов типа $2 \rightarrow 4$.
5. Создание строительных блоков для вычисления полных вкладов 2 петель электрослабого взаимодействия и 3 петель в КХД, а также для лидирующих вкладов более высоких порядков.

В) Подготовка физической программы CLIC, И.Р. Бойко

1. Поиск новой физики, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$.
2. Оценка точности измерения массы бозона Хиггса.
3. Исследование аномальных четырехбозонных взаимодействий, $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$.
4. Измерение поляризации топ-кварка.
5. Физика двухфотонных столкновений на коллайдере CEPC.

1 Итоги: А) Теоретическая поддержка экспериментов на e^+e^- ускорителях

1. Создание генератора для e^+e^- физики с возможностью описания процессов точнее, чем в однопетлевом приближении.

Основным результатом выполнения проекта является выпуск первой версии Монте-Карло генератора невзвешенных событий ReneSANCe на уровне полных однопетлевых вычислений (публикация в **Comput.Phys.Commun**). Электрослабые радиационные поправки с учетом поляризации вычислены и внедрены в наши интегратор и генератор для процессов: $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$; $e^+e^- \rightarrow ZH$; Баба-рассеяние (3 публикации в **Phys.Rev.D**).

Закончено внедрение в генератор и интегратор расчетов электрослабых радиационных поправок с учетом поляризации к процессам: $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, $\mu e^- \rightarrow \mu e^-$. Результаты готовятся к публикации (2021). В процессах $\mu e^- \rightarrow \mu e^-$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- (\tau\tau)$ внедрены поправки порядка α^2 и $\alpha\alpha_s$.

Вывод: пункт выполнен.

Работа по внедрению новых процессов будет продолжаться (см. планы 2021-2023).

2. Интерфейс NLO EW RC с PYTHIA.

В Монте Карло генераторе ReneSANCe реализована запись событий в файлы в формате LHEF. Данные файлы могут быть переданы на вход генераторов общего назначения, таких, как PYTHIA и Herwig, для моделирования в этих программах жестких подпроцессов с учетом однопетлевых электрослабых поправок. Тестируется версия ReneSANCe, реализованного в виде библиотеки, которую можно напрямую подключать в цепочку программ по поддержке экспериментов в физике высоких энергий.

Вывод: пункт выполнен.

3. Развитие однорезонансного приближения для сложных процессов.

Работа начата для процесса $e^+e^- \rightarrow \tau\tau$, лептонные моды распада. (см. планируемые публикации 2021)

Долговременная задача. Вывод: пункт выполняется.

4. Создание стандартной процедуры вычисления спиральных амплитуд для процессов типа $2 \rightarrow 4$.

Процедура уже внедрена в расчеты и прекрасно работает. Проведено несколько семинаров (ЛЯП, ЛТФ ОИЯИ; FCC-ee, CERN). Посчитано несколько процессов, готовится публикация в 2021 году.

Долговременная задача. Вывод: пункт выполняется.

5. Создание строительных блоков для вычисления полных вкладов 2 петель электрослабого взаимодействия и 3 петель в КХД, а также для лидирующих вкладов более высоких порядков.

Этот пункт также является нашей долговременной задачей.

Основными выходными компьютерными продуктами проекта ARiEL являются: интегратор MCSANCee, генератор ReneSANCe, проект xFitter, проект DIZET 6.45, проект Zfitter 7.00.

а) В MCSANCee и ReneSANCe внедряются все известные в литературе результаты по вычислениям вкладов электрослабых и КХД поправок высших порядков к эффективным параметрам Стандартной модели (СМ).

б) Создана версия 6.45 пакета DIZET – библиотеки для учета петлевых электрослабых радиационных поправок к процессам СМ. Описание релиза DIZET отправлено в **CERN Yellow Rep. Monogr.**

с) В настоящее время проделаны вычисления следующих за ведущим вкладов порядка $\alpha^3 L^2$ для процессов e^+e^- аннигиляции и Баба-рассеяния (см. публикации 2021). Они внедрены в MCSANCee и ReneSANCe.

д) Готовится новая версия Zfitter 7.00, впервые доступны поправки за счет излучения из начального состояния (ISR) к сечению e^+e^- -аннигиляции и к A_{FB} асимметрии вплоть до $\mathcal{O}(\alpha^6 L^6)$ порядка.

Версия 7.00 проекта *Zfitter* будет представлена на Рабочем совещании FCC-ee в июне 2021 года.

Долговременная задача. Вывод: пункт выполнен в объеме 3 лет.

Работа по созданию строительных блоков поправок высших порядков будет продолжена.

Всего публикаций 18 (2019-2020гг.) + 6 (2021г.).

Международное сотрудничество

Участники проекта сотрудничают с коллегами из DESY (Hamburg, Germany), DESY (Zeuthen, Germany), University of Silesia (Katovice, Poland), Baylor University (United States), INP (Krakow, Poland) и INFN (Milan, Italy).

Мы приняли активное участие в рабочих совещаниях FCC-ee 2019-2021. Участники проекта вошли в состав авторов коллаборации FCC-ee (см. публикации [1-6]).

Все договорные обязательства по международному сотрудничеству выполнены.

2 Итоги: В) Подготовка физической программы CLIC

1. Поиск новой физики, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$.

Исследование реакции $ee \rightarrow \gamma\gamma$ на коллайдере CLIC. На основе полного моделирования детектора CLIC получена оценка чувствительности эксперимента к измерению радиуса электрона и некоторых других параметров моделей за пределами Стандартной модели. Результаты доложены на конференции LCWS2019, Sendai, Japan (October 2019).

Вывод: пункт выполнен.

2. Оценка точности измерения массы бозона Хиггса.

Исследованы основные факторы, влияющие на точность измерения массы бозона Хиггса. На основе полного моделирования получена предварительная оценка точности измерения. Результаты доложены на конференции AYSS-2020.

Вывод: пункт, в основном, выполнен, ожидается завершение до конца 2021 года.

3. Исследование аномальных четырехбозонных взаимодействий, $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$.

Оценены фоны Стандартной модели, предложены критерии предварительного отбора. Дальнейшее исследование не проведено из-за неготовности генератора событий сигнала.

Вывод: выполнение пункта откладывается.

4. Измерение поляризации топ-кварка.

Проведена оценка ожидаемой экспериментальной статистики, получено распределение чувствительных наблюдаемых, оценена статистическая точность фитирования.

Вывод: пункт выполнен частично, предполагается продолжение работы.

5. Физика двухфотонных столкновений на коллайдере СЕРС.

Данный пункт был включен в программу работы уже в ходе выполнения проекта. Группой ARIEL написана глава “Физика двухфотонных столкновений” в монографии “Whitebook of СЕРС physics”. Предложены исследования фоторождения бозона Хиггса, измерение аномального магнитного момента тау-лептона и другие исследования.

Вывод: пункт выполнен, предполагается расширение участия в проекте СЕРС.

3 Публикации за 2019-2020 годы.

1. A. Blondel *et al.*, “Theory report on the 11th FCC-ee workshop,” [arXiv:1905.05078 [hep-ph]]. BU-HEPP-19-03, CERN-TH-2019-061, CP3-19-22, DESY-19-072, FR-PHENO-2019-005, IFIC/19-23 IFT-UAM-CSIC-19-058, IPhT-19-050, IPPP/19/32, KW 19-003, MPP-2019-84, LTH 1203, ZU-TH-22-19, TUM-HEP-1200-19, TTP19-008, TTK-19-19.
2. A. Abada *et al.* [FCC Collaboration], “FCC-ee: The Lepton Collider : Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 2,” Eur. Phys. J. ST **228**, no. 2, 261 (2019).
3. A. Abada *et al.* [FCC Collaboration], “FCC-hh: The Hadron Collider : Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 3,” Eur. Phys. J. ST **228**, no. 4, 755 (2019).
4. A. Abada *et al.* [FCC Collaboration], “FCC Physics Opportunities : Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 1,” Eur. Phys. J. C **79**, no. 6, 474 (2019).
5. A. Abada *et al.* [FCC Collaboration], “HE-LHC: The High-Energy Large Hadron Collider : Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 4”, DOI:10.1140/epjst/e2019-900088-6, Eur. Phys. J. ST **228**, no. 5, 1109 (2019). CERN-ACC-2018-0059.
6. A. Blondel *et al.*, “Standard model theory for the FCC-ee Tera-Z stage,” CERN Yellow Rep. Monogr. **3** (2019). [arXiv:1809.01830 [hep-ph]].
7. S. Bondarenko, Y. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Rumyantsev, R. Sadykov and V. Yermolchyk, “One-loop electroweak radiative corrections to polarized $e^+e^- \rightarrow ZH$,” Phys. Rev. D **100**, no. 7, 073002 (2019). [arXiv:1812.10965 [hep-ph]].
8. D. Bardin, Y. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Rumyantsev, A. Arbuzov, R. Sadykov and S. Bondarenko, “One-loop electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering,” Phys. Rev. D **98**, no. 1, 013001 (2018). [arXiv:1801.00125 [hep-ph]].
9. H. Abdolmaleki *et al.* [xFitter Developers’ Team], “Probing the strange content of the proton with charm production in charged current at LHeC,” Eur. Phys. J. C **79**, no. 10, 864 (2019). [arXiv:1907.01014 [hep-ph]].

10. H. Abdolmaleki *et al.* [xFitter Developers Team], “Recent QCD results from the xFitter project - Probing the strange content of the proton with charmproduction in charged current at LHeC,” PoS DIS **2019**, 025 (2019). [arXiv:1909.00451 [hep-ph]].
11. S. Volkov, “Calculating the five-loop QED contribution to the electron anomalous magnetic moment: Graphs without lepton loops,” Phys. Rev. D **100**, no. 9, 096004 (2019). [arXiv:1909.08015 [hep-ph]].
12. R. Sadykov and V. Yermolchik, “Polarized NLO EW e^+e^- cross section calculations with ReneSANCe-v1.0.0”, Comput. Phys. Commun.,v 256, 2020 [arXiv:2001.10755 [hep-ph]],
13. A.B. Arbuzov, S.G. Bondarenko. Ya.V Dydyshka, L.V. Kalinovskaya, L.A. Rummyantsev and R.R. Sadykov, “QED and electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering”, J. Phys. Conf. Ser., v.1525, n 1, 2020
14. R.R. Sadykov, A.B. Arbuzov, S.G. Bondarenko. Ya.V Dydyshka, L.V. Kalinovskaya, I.I. Novikov, V.L. Yermolchik and L.A. Rummyantsev, “MCSANCe generator with one-loop electroweak corrections for processes with polarized e+e- beams”, J. Phys. Conf. Ser., v.1525 n 1, 2020
15. Andrej Arbuzov, Serge Bondarenko and Lidia Kalinovskaya, “Asymmetries in Processes of Electron-Positron Annihilation”, Symmetry, v.12, n 7, 2020, [arXiv:2007.03908[hep-ph]].
16. S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, and V Yermolchik, “One-loop electroweak radiative corrections to lepton pair production in polarized electron-positron collisions”, Phys. Rev. D, v.102, n 3, 2020 [arXiv:2005.04748[hep-ph]].
17. H. Abdolmaleki *et al.* [xFitter Developers’ Team], “Probing the strange content of the proton with charm production in charged current at LHeC,” Eur. Phys. J. C **79**, no. 10, 864 (2019). [arXiv:1907.01014 [hep-ph]].
18. H. Abdolmaleki *et al.* [xFitter Developers Team], “Recent QCD results from the xFitter project - Probing the strange content of the proton with charmproduction in charged current at LHeC,” PoS DIS **2019**, 025 (2019). [arXiv:1909.00451 [hep-ph]].

3.1 Публикации 2021 года.

1. Процессы на однопетлевом уровне с учетом поляризации:
 - $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$
 - $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$.
 - $e^+e^- \rightarrow \tau\bar{\tau}$, лептонные моды распада τ .

2. Вычисление следующих за ведущим вкладов порядка $\alpha^3 L^2$ для процессов e^+e^- аннигиляции и Баба-рассеяния.
3. Обновление ReneSANCe и MCSANCee.
4. Обновление Zfitter, v. 7.00.

3.2 Планы в 2022-23 году

- Внедрение процессов с учетом поляризации начального состояния в MCSANCee и ReneSANCe: $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma(Z\gamma, ZZ)$.
- Версия DIZET v. 7.0.
- Подготовка версии компьютерной системы SANC - v. 1.30: расширение базиса процедур, на которых основывается расчет спиральных амплитуд для слабых и жестких вкладов. Предполагается: а) учет масс частиц начального и конечного состояний; б) возможность работы в полном фазовом пространстве; в) учет любой поляризации; г) внедрение поправок высших порядков (НО): библиотека для пар, а также библиотека НО для четырехфермионных процессов через параметр $\delta\rho$. Предполагается провести расчет интерференции начального и конечного состояний (например, для прямой и обратной зарядовой асимметрии лептонных пар на Z резонансе).
- Расчет процесса $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ на однопетлевом уровне с учетом поляризации пучков и с учетом ширины топ-кварка. Применение резонансного приближения для распада топ-кварка. Исследование электрослабых свойств топ-кварка. Сечение, его поведение на пороге рождения пары $t\bar{t}$ и форма дифференциального сечения как функции от энергии столкновения сильно зависят от массы топ-кварка. Таким образом, прецизионное измерение формы дифференциального сечения на пороге рождения пары $t\bar{t}$ можно использовать, чтобы получить массу топ-кварка с превосходной точностью, а также, чтобы получить другие параметры этой частицы. Поляризация топ-кварка явным образом связана с фермионными электрослабыми формфакторами. Для проверки Стандартной модели важно сравнить поляризацию топ-кварка, рассчитанную на основе Стандартной модели, с поляризацией, измеренной на будущих коллайдерах.
- Передача Монте Карло генератора/интегратора SANC (ReneSANCe и MCSANCee) в коллаборации FCC, BESIII и CEPC (по запросам представителей экспериментальных коллабораций). Наполнение $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, ZH, \gamma\gamma, Z\gamma, \nu\bar{\nu})$. Также данная программа будет использована для описания перечисленных процессов (кроме рождения $ZH, Z\gamma$) в условиях Супер Чарм-Тау фабрики.
- Внедрение в генератор эффектов поляризации для процессов на однопетлевом уровне точности: $e^-e^+ \rightarrow \gamma H, (ZZ, W^+W^-), \gamma\gamma \rightarrow e^+e^-, (\gamma\gamma, \gamma Z, ZZ, W^+W^-)$.

- Разработка `xFitter`, как инструмента для фитирования $\sin\theta_W^{\text{eff}}$: DY CC, DY NC.
- Внедрение эффектов поляризации для процессов типа $2 \rightarrow 5$ на однопетлевом уровне точности: $e^+e^- \rightarrow Z\gamma \rightarrow \bar{f}f\gamma$.

3.3 Рабочие совещания: 18 докладов.

- DIZET Mini-Workshop. DESY, Zeuthen. 2019
- 19th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research. 2019
- CEPC Topical Workshop. 2019
- 3rd Fcc Physics and Experiments Workshop, 2019.
- 11th FCC-ee Workshop. CERN. 2020
- + ACAT 2021 + FCC-ee Workshop. CERN. 2021, June + CEPC Workshop. 2021, April

3.3.1 Рабочие совещания и семинары

- (a) DIZET Workshop, DESY, Zeuthen, 11-14 November 2019.
<https://indico.desy.de/indico/event/24616/>.
- “LHC EW, 8 TeV, NC DY, fitting $\sin^{eff}\theta_W$ ”, L. Kalinovskaya.
 - “Library for Electroweak Radiative corrections DIZET v 6.45”, V. Yermolchuk.
 - “Electroweak schemes for fitting of the effective Weinberg mixing angle”, A. Arbuzov.
- (b) 19th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, Saas Fee, Швейцария. <https://indico.cern.ch/event/708041/>
- “QED and electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering”
A. Arbuzov, S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, R. Sadykov.
 - <https://indico.cern.ch/event/708041/contributions/3266626/> “MCSANcEE generator with one-loop electroweak corrections for processes with polarized e^+e^- beams” A. Arbuzov, S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, R. Sadykov.
 - S. Volkov, “Numerical calculation of 5-loop QED contributions to the electron anomalous magnetic moment,” [arXiv:1905.08007 [hep-ph]].
- (c) CEPC Topical Workshop: Theoretical Uncertainty Controls for the CEPC measurements Thursday, April 4, 2019. <https://indico.ihep.ac.cn/event/9843/>.
- “Bhabha scattering”, A. Arbuzov.

- “Overview of the Generator MCSANCee”, R. Sadykov.
 - “One-loop EW corrections for the processes $ee\gamma\gamma \rightarrow 0$ ”, V. Yermolchuk.
 - “Helicity amplitudes for bremsstrahlung $2f \rightarrow 2f(\gamma)$, $2f \rightarrow 2b(\gamma)$ ”, Y. Dydyshka.
- (d) 3rd Fcc Physics and Experiments Workshop 13-17 January 2020,
<https://indico.cern.ch/event/838435/>
- “MC generator MCSANC”, A. Arbuzov, S. Bondarenko, Y. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, R. Sadykov and V. Yermolchuk.
- (e) 11th FCC-ee workshop: Theory and Experiments, CERN, 8-11 January 2019,
[https://indico.cern.ch/event/766859.](https://indico.cern.ch/event/766859/)
- “Electron-positron annihilation processes in MCSANCee”, A. Arbuzov, S. Bondarenko, Y. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, R. Sadykov and V. Yermolchuk.
- (f) XXIV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2020), 9-13 November 2020, Dubna
- “New method to measure Higgs mass at CLIC collider”, P.Shvydkin, I.Boyko.
- (g) International workshop on the Circular Electron-Positron Collider, Oxford, 15-17 April 2019
- “Two photon collisions: physics at CEPC energies”, I.Boyko.
- (h) International workshop on the high energy Circular Electron-Positron Collider, Beijing, 18-20 November 2019
- “Two photon physics at CEPC”, I.Boyko.
- (i) Семинары:
- “Проект ARieL: процессы $l^+l^-\gamma\gamma \rightarrow 0$ на однопетлевом уровне с учетом поляризации”, 13 марта 2019, ЛЯП, <http://www.jinr.ru/posts/66422/>, L.Romyantsev.
 - “Процессы $l^+l^-\gamma\gamma \rightarrow 0$ в проекте ARieL”, 22 февраля 2019, ЛТФ, <http://www.jinr.ru/posts/65330/>, V.Yermolchuk.
 - “Процесс $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$ с учетом продольной поляризации”, 30 октября 2019, ЛЯП, <http://www.jinr.ru/posts/76044/>, V.Yermolchuk.
 - “Standart procedure for calculating the helicity amplitudes for hard processes”, Minsk, INP, 5 December 2019, Y. Dydyshka.
 - “Процесс $e^+e^- \rightarrow l^+l^-(\mu, \tau)$ с учетом продольной поляризации”, ЛЯП, 10 июня 2020, <http://www.jinr.ru/posts/85752/>, Y. Dydyshka.
 - “Evaluation of Bremsstrahlung helicity amplitudes with Dirac spinor algebra”, BLTP, 11 December 2020, <http://www.jinr.ru/posts/95952/>, Y. Dydyshka.