

Проект SANC

Аннотация

Support of Analytic and Numeric Calculations for experiments at Colliders (проект внутри темы ОИЯИ 02-0-1062-2002/2014, после 2014г внутри темы 02-0-1081-2009/2016)

Д.Ю. Бардин¹, П.Х. Христова², Л.В. Калиновская, В.А. Колесников, Л.А. Румянцев, Р.Р. Садыков, А.А. Сапронов, Е.Д. Углов — НЭОБП, ЛЯП, ОИЯИ, Дубна, Россия;

А.Б. Арбузов, С.Г. Бондаренко — ЛТФ, ОИЯИ, Дубна, Россия;

В. фон-Шлиппе — ПИЯФ РАН, Гатчина, 18830, Россия;

Т. Риман — DESY, Цойтен, Германия;

Г. Нанава — Университет Лейбница, Ганновер, Германия;

З. Вос — IFJ, PAN, Краков, Польша;

Лючия Ди Чиаччо — Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (LAPP), Анси;

У. Кляйн, А. Глазов, Я. Кретчмар — CERN, DESY и Университет Ливерпуля, Англия.

1 Введение

Данный отчет подводит итог научной деятельности, проводимой с 2001 по 2018 годы в рамках проекта SANC (Support of Analytic and Numeric Calculations for experiments at Colliders).

Область исследований включала в себя физику ЛНС и феноменологию адронных столкновений, радиационные поправки высших порядков по теории возмущений к процессам вида Дрелла–Яна, анализ экспериментальных данных в контексте КХД и формализма DGLAP.

В настоящее время все более и более важной задачей на ЛНС стало уточнение тестов Стандартной модели (СМ). Точность, соответствующая экспериментальным исследованиям, непрерывно растет с увеличением статистики, улучшением калибровки детектора, разработкой методов анализа и т.д. Все это приводит к более высоким требованиям для точности теоретических предсказаний для экспериментальных данных.

Проект SANC стартовал в начале 2001г и впервые был описан в [1]. Отчеты о статусе первой фазы проекта были широко представлены на конференции АСАТ2002 в нескольких докладах [2]–[3].

Основными предпосылками для наших исследований были: опыт участников в области феноменологии ускорителей и анализа данных, продолжительная история развития теоретического базиса и инструментов, доступ к новейшим экспериментальным результатам и активное сотрудничество с международным научным сообществом.

Главным назначением проекта является создание компьютерной системы для полуавтоматических вычислений наблюдаемых и псевдонаблюдаемых для различных процессов взаимодействия элементарных частиц в однопетлевом приближении для действу-

¹deceased

²deceased

ющих и будущих коллайдеров – TEVATRON, LHC, электронные линейные коллайдеры (ISCLC, CLIC), мюонные фабрики и другие. В основу была заложена концепция “от лагранжиана Стандартной модели до кинематических распределений”.

В качестве пользовательского приложения SANC представляет собой Разработческую среду (IDE, Integrated Development Environment) реализованную в виде приложения клиентско-серверного программного обеспечения. Клиент SANC версии v.1.10 можно скачать с серверов в CERN <http://pcphsanc.cern.ch/> и Дубне <http://sanc.jinr.ru/>.

Все вычисления физических процессов в однопетлевом приближении реализованы в духе книги [4] в R_ξ калибровке, и все результаты редуцируются к скалярным функциям Пассарино-Вельтмана: A_0 , B_0 , C_0 , D_0 . Данные характерные методики позволяют проводить проверки корректности вычислений, такие как наличие калибровочной инвариантности путем сокращения калибровочно-зависимых параметров, различные свойства симметрии и корректность тождеств Ворда. Все перечисленные проверки производятся на уровне аналитических выражений. Процесс вычислений представляет собой хорошо определенную последовательность шагов. С помощью системы SANC все шаги вычислений легко воспроизводятся для широкого набора процессов и распадов СМ, что делает эту систему особенно привлекательной для образовательных целей.

В написании системы SANC использовалось несколько языков программирования, но для аналитических вычислений использовалась только библиотека FORM [5]. Все функции были внедрены в специальное программное обеспечение, написанное на JAVA. На ранних стадиях эти разработки использовались для проверки нарушения четности в атомах [6], для вычисления однопетлевых радиационных поправок к процессам $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ [7] и глубоко-неупругого рассеяния нейтрино [8]. В то же время в [9] они применялись для прецизионного сравнения электрослабых поправок для распадов калибровочных бозонов Стандартной модели в фермион-антифермионную пару и в [10] для повышения качества Монте-Карло генератора PHOTOS.

Во вторую фазу проекта (2004–2010) вычисления были расширены большим числом процессов физики высоких энергий, с упором на физику LHC. В [11] подводятся основные результаты полученные с помощью пакета SANC версии 1.00, в которую были внедрены теоретические предсказания для большого числа процессов высокоэнергетического взаимодействия фундаментальных частиц в однопетлевом приближении вплоть до 4-частичного взаимодействия. Центральным мотивом этой работы было развернутое обсуждение так называемой “процедуры предвычислений” — важного начального шага в вычислениях однопетлевых амплитуд для 3- и 4-частичных процессов в электромагнитной, электрослабой и квантово-хромодинамической теориях. И, наконец, в [12] мы описали прогресс в программе SANC версии 1.10 по сравнению с версией на научном и программном уровнях. Касательно физической части проекта, в нем была улучшена трактовка процессов $u\bar{d} \rightarrow l^+\nu_l$ и $d\bar{u} \rightarrow l^-\bar{\nu}_l$, использовавшихся для прецизионных вычислений процессов вида Дрелла–Яна (см [13]) и полное вычисление распада $t \rightarrow b + l^+ + \nu_l$ по заряженному каналу, доведенные до численных результатов и Монте-Карло генераторов [14, 15]. Так же было реализовано несколько процессов, таких как $f_1\bar{f}_1ZZ \rightarrow 0$ и $f_1\bar{f}_1HZ \rightarrow 0$, а так же процесс $H \rightarrow f_1\bar{f}_1A$ в трех перекрестных каналах [16] в ветке EW, рассеяние $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ [17] и $ll \rightarrow \gamma\gamma^*$ в ветке QED, и новая ветка QCD [18], [19].

Начиная от [12] нами использовался обобщенный подход, в котором представляются

ковариантные амплитуды процессов, например, вида $f_1 \bar{f}_1 H Z \rightarrow 0$, где $\rightarrow 0$ обозначает, что все 4-импульсы на диаграмме Фейнмана направлены внутрь. Скалярные формфакторы, получаемые в таком подходе, могут быть использованы для любого имеющего место физического процесса с перекрестными каналами (здесь это два процесса аннигиляции $f_1 \bar{f}_1 \rightarrow H Z$ и распада $H \rightarrow Z f_1 \bar{f}_1$), получаемые после соответствующей перестановки аргументов (s, t, u) . Далее отдельно для каждого канала вычисляются спиральные амплитуды. В том же духе были рассмотрены три канала для процесса $f_1 \bar{f}_1 Z A \rightarrow 0$ [20].

Третья фаза (2010–2018) по большей части посвящена применению Монте–Карло интеграторов и генераторов, основанных на модулях **SANC**, полученных в предыдущей фазе, в физическом анализе. Вместе с тем, в систему **SANC** были внедрены модули для нескольких новых процессов: распады топ-кварка, КХД-поправки к процессам типа Дрелла–Яна [21],[22],[23], 4-бозонные процессы ([24], [25] и [26]), и одиночное рождение топ-кварка. Процессы типа Дрелла–Яна [27], то есть одиночное рождение бозонов Z и W и их последующий распад в лептонную пару [28],[29], являются универсальным эталоном в прецизионных экспериментальных измерениях. Теоретическое описание этих процессов в рамках Стандартной модели строится с учетом всех доступных эффектов, включая радиационные поправки, неопределенности PDF и вариации шкал. Интегратор **MCSANC** использовался в анализе таких процессов на LHC: [28], [30],[31], [32], а также внутренняя нота ATLAS ATL-PHYS-INT-2011-081 и [33], [34], [35]. Согласованные сравнения независимых результатов нескольких исследовательских групп эксперимента ATLAS показывают превосходное согласие в описании радиационных электрослабых и КХД поправок в однопетлевом (NLO) приближении. Поправки более высоких порядков так же необходимы для обеспечения требуемого уровня точности: [36], [37],[38], [39]. Данные поправки тщательно проверялись и сравнивались с результатами аналогичных инструментов, что продемонстрировало возможность наших инструментов обеспечить продвинутый уровень достоверности в предсказаниях партонных и адронных сечений.

2 Краткое описание системы SANC

В системе **SANC** реализованы три модели взаимодействия элементарных частиц — КЭД, электрослабая и квантовая хромодинамика. Каждой соответствует древовидная структура уровней “папок”, которая заканчивается “файлами”, соответствующими форм-факторам (FF), спиральным амплитудам (HA) и bremsstrahlung (BR). Для обозначения папок используется номенклатура: b — для любого бозона, $f(f_1)$ — для любого фермиона (f_1 для безмассовых фермионов первого поколения, чья масса удерживается только будучи аргументом к логарифмическим функциям); A, Z, W, H — для фотона, Z, W, H бозоны. Для названий файлов — аналогично, кроме t, b , которыми обозначаются топ и боттом кварки.

Для многих процессов **SANC** вычисления доведены до уровня Монте–Карло интеграторов или генераторов событий. Но немногие из них внедрены в саму систему, см [3]. Коды для остальных процессов доступны отдельно и широко используют фортранные модули, автоматически генерируемые системой (см ниже).

2.1 Основные понятия: предвычисления, амплитуды, форм-факторы...

Предвычисления являются одной из важнейших концепций в идеологии **SANC**. Вследствие того, что многие вычисления в высших порядках приближения по теории возмущений очень ресурсоемки, естественным образом возникает идея вычислить заранее как можно больше однопетлевых диаграмм производных параметров (констант перенормировок и др.). Деревья с предвычислениями представлены и развернуто обсуждаются в работе [11], к которой мы отсылаем читателя.

Как правило, представлены три файла, написанные на языке **FORM**, вычисляющие:

- Ковариантные амплитуды (СА) и скалярные форм-факторы (FF), например, с вершиной нуклон-нуклон- γ , параметризованной двумя скалярными форм-факторами $\mathcal{F}_{1,2}$: $\mathcal{A} \propto \gamma_\mu \mathcal{F}_1 + \sigma_{\mu\nu} q_\nu \mathcal{F}_2$;
- Спиральные амплитуды (НА), зависящие от FF, $\mathcal{H}_{\{\lambda_i\}}(\mathcal{F}_i)$, где $\{\lambda_i\}$ обозначает набор квантовых спиральных собственных значений, как правило, проекций спина на ось квантования. Можно напомнить, что в стандартном подходе для наблюдаемой O имеем: $O \propto |\mathcal{A}|^2$, тогда как в терминах спиральных амплитуд: $O \propto \sum_{\{\lambda_i\}} |\mathcal{H}_{\{\lambda_i\}}|^2$, что существенно упрощает вычисления, поскольку $\mathcal{H}_{\{\lambda_i\}}$ являются комплексными скалярными объектами. Много других примеров СА и НА можно найти в [11], [12] и [16];
- Сопутствующее реальное излучение BR. Данный модуль вычисляет вклад реального bremsstrahlung для соответствующих процессов. Как правило, и те и другие инклюзивные величины вычислялись полностью дифференциально с целью использования в Монте-Карло.

2.2 От аналитических результатов к численным

Цепочка вычислений **SANC** начинается с вычисления модулей форм-факторов на стороне сервера, с последующим запуском процедуры **s2n** (см. краткое Руководство пользователя на сайте проекта, указанного во введении к данному документу), и последующим запуском модулей спиральных амплитуд с повторным запуском **s2n**. В результате система генерирует фортранный код, вычисляющий вклады виртуальных поправок к выбранному процессу по нижеприведенной схеме: $d\Gamma(d\sigma) \sim \sum_{\lambda_i \lambda_j \lambda_k \lambda_l} \left| \mathcal{H}(\mathcal{F}^{\text{Born}+1\text{loop}+2\text{loop}})_{\lambda_i \lambda_j \lambda_k \lambda_l} \right|^2$.

Реальные поправки состоят из мягкого (Soft) и жесткого (Hard) излучения. Они вычисляются в модулях BR. Мягкому излучению присуща борноподобная кинематика, тогда как к Hard добавляется частица с соответствующим увеличением размерности фазового пространства, и обычно система создает соответствующий фортранный модуль, предназначенный для дальнейшего использования в Монте-Карло. Для некоторых процессов система умеет вычислять полные однопетлевые поправки, включая реальное излучение для инклюзивных наблюдаемых.

Фортранные модули являются конечным продуктом данной функциональности системы. Они генерируются пакетом **s2n** – написанным на языке **PERL**. **SANC** включает собственную библиотеку для вычисления функций Пассарино-Вельтмана, а также может использовать **LoopTools** в качестве альтернативы.

2.3 На выходе SANC

Стандартный вывод SANC может включать:

- Фортранные модули. Данные модули используются как основа для Монте–Карло моделирования в интеграторах и генераторах
- Вклад в согласованное сравнение было осуществлено в трех рабочих совещаниях: Les Houches Workshop, см. труды 2006 [36], TEVATRON for LHC Report, 2007, [37], and Precision studies of observables in $pp \rightarrow W \rightarrow l\nu_l$ and $pp \rightarrow \gamma, Z \rightarrow l^+l^-$ processes at the LHC, см отчет 2017 [39].
- Монте–Карло генераторы для процессов:
 - распад $t \rightarrow bl\nu$
 - распад $H \rightarrow 4\mu$ в однополюсном приближении
- интегратор MCSANC

2.3.1 Разработка интегратора MCSANC

Список процессов внедренных в MCSANC интегратор [28], [30], [31], [32] включает в себя процессы Дрелла–Яна, процессы, связанные с рождением Хиггса и калибровочных бозонов, и одиночного рождения топ кварка в s-и t-каналах [30].

Версия MCSANC-v1.20 была использована для расчета следующих поправок к процессам Дрелла–Яна:

1. смешанные — чисто слабые, учитывающие излучение из начального состояния и интерференции QED - распределения однопетлевых вкладов по инвариантной массе M_{inv} ;
2. вклады от излучения обратных фотонов для fiducial обрезаний.
3. Вклады, вызванные поглощением фотонов в начальном состоянии: $q\gamma \rightarrow ql^\pm\nu_l$ (заряженный ток DY), $q\gamma \rightarrow ql^+l^-$ (нейтральный ток DY) и $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$ (нейтральный ток DY)
4. Ведущие по $G_{m_t^2}$ двухпетлевые электрослабые и смешанные EW $\otimes$ QCD радиационные поправки
5. продольная асимметрия A_{FB}^{ff} (fowrad-backward asymmetry).

2.4 Электрослабые поправки для анализа процессов Дрелла–Яна в рамках коллаборации ATLAS

Моделирование Монте–Карло в анализе ATLAS обычно основаны на NLO QCD жестких процессах генераторов событий, таких как POWHEG++ и MC@NLO, дополненными PHOTOS,

чтобы генерировать QED FSR поправки. Такой подход не учитывает набор электрослабых поправок более высокого порядка (НО EW) при рассмотрении процессов Дрелла-Яна: вклады чисто слабых поправок (PW), вклад от QED интерференции начального и конечного состояний (IFI) и вклад от остатка вычитания вкладов от излучения в начальном состоянии (ISR) и коллинеарных расходимостей. Эти поправки иногда называют “неучтенные” (“missed”) поправки. Важность этих поправок в анализе процессов типа Дрелла-Яна была продемонстрирована во внутренней ноте ATLAS ATL-PHYS-INT-2011-081 и работе [38].

Данные LHC обеспечивают доступ к таким диапазонам инвариантной массы, где вклад индуцированного фотона в процесс Дрелл-Яна становится существенным по отношению к кварк-антикварковой аннигиляции. Более точная оценка этого фона для поисков высоких массовых резонансов требует включения $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$ в теоретические предсказания. Прогнозы были получены с использованием внедрения этого процесса в MCSANC интегратор с MRST2004QED PDF, которая была единственно подходящая в то время для такого рода анализа. Поправки были включены в систематическую неопределенность при поиске дилептонных резонансов в области высоких инвариантных масс [40].

Полные расчеты НО EW, кроме QED FSR поправок и их комбинации с NNLO QCD обычно используются в анализе данных в Стандартной модели ATLAS и в BSM:

- Измерения дифференциальных сечений процессов Дрелла-Яна при $\sqrt{s} = 7$ TeV в e и μ каналах для инвариантных масс между 26 GeV и 66 GeV с использованием интегральной светимости 1.6 fb^{-1} , собраны в 2011 [40].
- Измерения дифференциальных сечений процессов Дрелл-Яна в диапазоне высоких инвариантных масс при $\sqrt{s} = 7$ TeV в $e + e$ канале основываются на интегральной светимости 4.9 fb^{-1} . Инвариантная масса пары электронов, охваченная измерениями, распределена в диспазоне $116 < M_{ee} < 1500$ GeV [35].
- Измерения инклюзивных $W^\pm$ and Z/γ сечений в электронных и мюонных каналах распада в pp столкновениях проводились при $\sqrt{s} = 7$ TeV [34]
- QCD анализ осуществляется для инклюзивного рождения W и Z-бозона данных ATLAS, совместно с данными глубоко неупругого ep рассеяния HERA. Соотношение распределений strange-to-down морских кварков определяется как $1.00(+0.25-0.28)$ при переданном квадрате четырех-импульса $Q^2 = 1.9 \text{ GeV}^2$ и $x = 0.023$ [41].
- Поиск дилептонных резонансов в диапазоне высоких инвариантных масс 20 fb^{-1} в pp соударениях при $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$. Узкий резонанс с константой связи Z с фермионами в Стандартной Модели исключается на 95% доверительном интервале для масс меньше, чем 2,79 TeV в диэлектронном канале, 2,53 TeV в димюонном канале, и 2,90 TeV в двух комбинированных каналах [8].

2.5 КХД-анализ и разработка проекта HERAFitter

HERAFitter представляет собой проект с открытым кодом для QCD анализа экспериментальных данных. Проект был создан коллегами из DESY и первоначально предна-

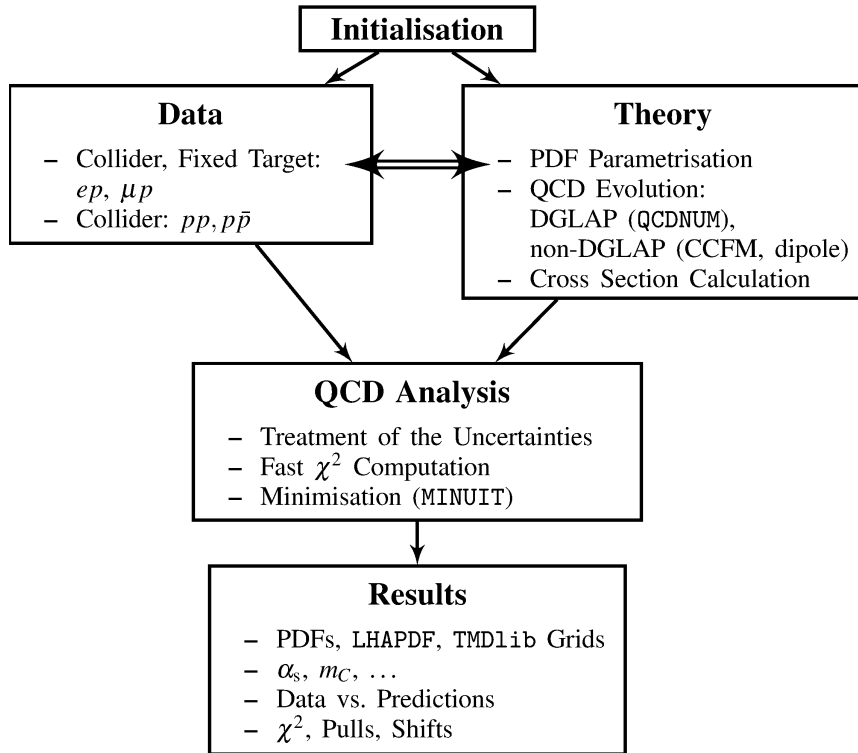


Рис. 1: Схема программы HERAFitter.

значался для результатов анализа DIS результатов, полученных в эксперименте HERA. Диаграмма на рисунке (1) дает схематическое представление о структуре и рабочих функциях HERAFitter, которые могут быть разделены на четыре основных блока.

Текущая версия рамках HERAFitter предоставляет набор инструментов для QCD анализа pp , $p\bar{p}$ и ep рассеяния данных, определение PDF-файлов и уточнение основных параметров QCD, таких как массы тяжелых кварков и сильная константа связи, а также предоставляет общую полигон для теоретических моделей и проверки согласованности экспериментальных результатов [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]. В дальнейшем при участии членов группы SANC возможности проекта были расширены, т.е. был включён анализ данных протон-(анти) протонных столкновений LHC.

3 Научная деятельность в 2018 году

- Завершение исследований вкладов QED радиационных поправок в начальном и конечном состояниях процессов типа Дрелла-Яна с целью согласованного их учета при использовании стандартных программ анализа экспериментальных данных.
- Измерение электрослабых параметров Стандартной модели на основе данных по продольной асимметрии лептонной моды распада одиночного Z-бозона. Имеющиеся наработки по вычислению электрослабых поправок в приближении NLO, ре-

ализованные в виде Монте Карло интегратора MCSANC, позволяют, совместно с аппроксимацией партонных распределений протона, провести измерение ряда электрослабых параметров СМ. К последним относятся эффективный угол Вайнберга, так называемый ρ -параметр, и, в перспективе, эффективных констант взаимодействия. [50]

- Анализ процессов типа Дрелла-Яна в контексте QCD. Целью данного анализа является уточнение функций партонных распределений на основе экспериментальных данных протон-протонных столкновений. Применение программы HERAFitter к данным, набранным в RUN-I, показало, что они несут дополнительную информацию о плотностях импульсных распределений s-кварка при малых значениях x и глюонов при больших x . Налицо необходимость продолжения данных исследований в течение RUN-II с использованием больших кинематических диапазонов и более высокой статистики.
- Имея разработанный и настроенные инструменты для анализа экспериментальных данных LHC Run-I, необходимо подготовить их для анализа данных Run-II и соответствующим образом расширить функционал.

4 Заключение

В результате деятельности членов проекта была решена большая часть поставленных задач. Полученные результаты были представлены в виде более 50 публикаций в реферируемых журналах и доложены на международных конференциях и рабочих совещаниях. Было защищено 10 бакалаврских дипломов, 5 магистерских, 6 кандидатских и 2 докторские диссертации.

Все задачи проекта по экспериментальному анализу координировались совместно с членами коллаборации ATLAS в CERN и DESY.

Список литературы

- [1] D. Bardin, G. Passarino, L. Kalinovskaya, P. Christova, A. Andonov, S. Bondarenko, and G. Nanava, “Project ‘CalcPHEP: Calculus for precision high-energy physics’”, 2002, hep-ph/0202004.
- [2] A. Andonov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, G. Nanava, and G. Passarino, *Nucl. Instrum. Meth.* **A502** (2003) 576–577.
- [3] G. Nanava, *Nucl. Instrum. Meth.* **A502** (2003) 583–585.
- [4] D. Yu. Bardin and G. Passarino, *The standard model in the making: Precision study of the electroweak interactions*. 1999.
- [5] J. A. M. Vermaseren, math-ph/0010025.

- [6] D. Yu. Bardin, P. Christova, L. Kalinovskaya, and G. Passarino, *Eur. Phys. J.* **C22** (2001) 99–104, [hep-ph/0102233](#).
- [7] A. Andonov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, and G. Nanava, *Phys. Part. Nucl.* **34** (2003) 577–618, [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra*34,1125(2003)], [hep-ph/0207156](#).
- [8] A. B. Arbuzov, D. Yu. Bardin, and L. V. Kalinovskaya, *JHEP* **06** (2005) 078, [hep-ph/0407203](#).
- [9] A. Andonov, S. Jadach, G. Nanava, and Z. Was, *Acta Phys. Polon.* **B34** (2003) 2665–2672, [hep-ph/0212209](#).
- [10] G. Nanava and Z. Was, *Acta Phys. Polon.* **B34** (2003) 4561–4570, [hep-ph/0303260](#).
- [11] A. Andonov, A. Arbuzov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, G. Nanava, and W. von Schlippe, *Comput. Phys. Commun.* **174** (2006) 481–517, [Erratum: *Comput. Phys. Commun.*177,623(2007)], [hep-ph/0411186](#).
- [12] D. Bardin, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, G. Nanava, L. Romyantsev, and W. von Schlippe, *Comput. Phys. Commun.* **177** (2007) 738–756, [hep-ph/0506120](#).
- [13] A. Arbuzov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, G. Nanava, and R. Sadykov, *Eur. Phys. J.* **C46** (2006) 407–412, [Erratum: *Eur. Phys. J.*C50,505(2007)], [hep-ph/0506110](#).
- [14] R. Sadykov, A. Arbuzov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, and G. Nanava, *PoS TOP2006* (2006) 036.
- [15] A. Arbuzov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, G. Nanava, R. Sadykov, and W. von Schlippe, *Eur. Phys. J.* **C51** (2007) 585–591, [hep-ph/0703043](#).
- [16] D. Bardin, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, G. Nanava, and L. Romyantsev, *Eur. Phys. J.* **C52** (2007) 83–92, [hep-ph/0702115](#).
- [17] D. Bardin, L. Kalinovskaya, V. Kolesnikov, and E. Uglov, “Light-by-light scattering in SANC”, in *International School-Workshop on Calculations for Modern and Future Colliders (CALC 2006) Dubna, Russia, July 15-25, 2006*, 2006, [hep-ph/0611188](#).
- [18] A. Andonov, A. Arbuzov, S. Bondarenko, P. Christova, V. Kolesnikov, and R. Sadykov, [hep-ph/0610268](#).
- [19] A. Andonov, A. Arbuzov, S. Bondarenko, P. Christova, V. Kolesnikov, and R. Sadykov, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **4** (2007) 451–460.
- [20] D. Bardin, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, G. Nanava, L. Romyantsev, and W. von Schlippe, *Eur. Phys. J.* **C54** (2008) 187–197, [0710.3083](#).
- [21] A. Andonov, A. Arbuzov, S. Bondarenko, P. Christova, V. Kolesnikov, G. Nanava, and R. Sadykov, *Phys. Atom. Nucl.* **73** (2010) 1761–1769, [0901.2785](#).

- [22] A. Arbuzov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, G. Nanava, and R. Sadykov, *Eur. Phys. J.* **C54** (2008) 451–460, 0711.0625.
- [23] A. Arbuzov, A. Andonov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, V. Kolesnikov, G. Nanava, and R. Sadykov, *PoS ACAT08* (2008) 109.
- [24] D. Bardin, L. Kalinovskaya, and E. Uglov, *Phys. Atom. Nucl.* **73** (2010) 1878–1888, 0911.5634.
- [25] D. Y. Bardin, L. Kalinovskaya, and E. Uglov, *Phys.Atom.Nucl.* **76** (2013) 1339–1344, 1212.3105.
- [26] D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, W. von Schlippe, and E. Uglov, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **14** (2017), no. 6 811–816, 1709.05978.
- [27] A. B. Arbuzov and R. R. Sadykov, *J. Exp. Theor. Phys.* **106** (2008) 488–494, 0707.0423.
- [28] A. Arbuzov, R. Sadykov, and Z. Was, *Eur.Phys.J.* **C73** (2013), no. 11 2625, 1212.6783.
- [29] S. Antropov, A. Arbuzov, R. Sadykov, and Z. Was, *Acta Phys. Polon.* **B48** (2017) 1469, 1706.05571.
- [30] S. G. Bondarenko and A. A. Sapronov, *Comput.Phys.Commun.* **184** (2013) 2343–2350, 1301.3687.
- [31] A. Arbuzov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, U. Klein, V. Kolesnikov, L. Rumyantsev, R. Sadykov, and A. Sapronov, *JETP Lett.* **103** (2016), no. 2 131–136, 1509.03052.
- [32] A. Arbuzov, D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, A. Sapronov, and T. Riemann, *J. Phys. Conf. Ser.* **762** (2016), no. 1 012062.
- [33] D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, L. Rumyantsev, A. Sapronov, and W. von Schlippe, *JETP Lett.* **96** (2012) 285–289, 1207.4400.
- [34] ATLAS Collaboration, G. Aad *et al.*, *Phys.Lett.* **B725** (2013) 223–242, 1305.4192.
- [35] ATLAS Collaboration, G. Aad *et al.*, *JHEP* **1406** (2014) 112, 1404.1212.
- [36] C. Buttar *et al.*, “Les houches physics at TeV colliders 2005, standard model and Higgs working group: Summary report”, in *Physics at TeV colliders. Proceedings, Workshop, Les Houches, France, May 2-20, 2005*, 2006, hep-ph/0604120.
- [37] Electroweak Working Group, TeV4LHC-Top Collaboration, C. E. Gerber *et al.*, “Tevatron-for-LHC Report: Top and Electroweak Physics”, 2007, 0705.3251.
- [38] J. Butterworth, G. Dissertori, S. Dittmaier, D. de Florian, N. Glover, *et al.*, 1405.1067.
- [39] S. Alioli *et al.*, *Eur. Phys. J.* **C77** (2017), no. 5 280, 1606.02330.
- [40] ATLAS Collaboration, G. Aad *et al.*, *Phys.Rev.* **D90** (2014), no. 5 052005, 1405.4123.

- [41] ATLAS Collaboration, G. Aad *et al.*, *Phys.Rev.Lett.* **109** (2012) 012001, 1203.4051.
- [42] T. Carli, D. Clements, A. Cooper-Sarkar, C. Gwenlan, G. P. Salam, *et al.*, *Eur.Phys.J.* **C66** (2010) 503–524, 0911.2985.
- [43] M. Botje, *Comput.Phys.Commun.* **182** (2011) 490–532, 1005.1481.
- [44] S. Alekhin, O. Behnke, P. Belov, S. Borroni, M. Botje, *et al.*, 1410.4412.
- [45] HERAFitter developers’ team Collaboration, P. Belov *et al.*, *Eur.Phys.J.* **C74** (2014), no. 10 3039, 1404.4234.
- [46] R. Sadykov, 1401.1133.
- [47] HERAFitter developers’ Team Collaboration, S. Camarda *et al.*, 1503.05221.
- [48] xFitter Developers’ Team Collaboration, F. Giuli *et al.*, *Eur. Phys. J.* **C77** (2017), no. 6 400, 1701.08553.
- [49] analysis team Collaboration, F. Giuli, *PoS EPS-HEP2017* (2017) 375, 1708.03623.
- [50] A. Saproinov, S. Bondarenko, and L. Kalinovskaya.