

На правах рукописи

Сапронов Андрей Александрович

Моделирование и анализ результатов  
измерения процессов типа Дрелла–Яна с  
одиноким рождением  $W$  и  $Z$  бозонов на LHC

Специальность 01.04.16 —  
физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2013

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, 01.04.02

Л.В. Калиновская

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, 01.04.16

В.А. Бедняков

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, 01.04.16

М.В. Токарев

(начальник сектора, ЛФВЭ ОИЯИ)

кандидат физико-математических наук, 01.04.16

С.М. Доркин

(доцент МУПОиЧ “Дубна”)

Ведущая организация:

Государственный научный центр Российской Федерации

Институт физики высоких энергий (г. Протвино)

Защита состоится « » \_\_\_\_\_ 2013 г. в \_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 2013 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 720.001.03

на базе ОИЯИ, д.ф.-м.н., профессор

Батусов Ю.А.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

Первые три года эксплуатации Большого адронного коллайдера (ЛHC), примечательного уникальной управляемостью и стабильностью работы, были ознаменованы несколькими крупными успехами современной физики высоких энергий. В первую очередь это, конечно, открытие в экспериментах ATLAS и CMS бозона Хиггса — главного объекта исследований физики элементарных частиц в течение последних двух десятилетий. Немаловажным вкладом являются и работы по постановке ограничений на физику за пределами Стандартной модели (SM), в том числе суперсимметричные модели, дополнительные измерения и новые калибровочные бозоны. Уже начальных данных детектора ATLAS с интегральной светимостью  $35\text{fb}^{-1}$ , набранных за 2010г. при  $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ , хватило для измерения отношения сечения однократного рождения и распада  $W$  бозона в электронном и мюонном каналах в процессах типа Дрелла–Яна с точностью, сопоставимой с мировым усредненным значением Particle Data Group.

Следует отметить, что измерения процессов Дрелла–Яна в глубоко-неупругих протон–протонных столкновениях имеют существенное значение для физики высоких энергий. Четкая сигнатура лептонных конечных состояний распадов электрослабых бозонов позволяет накапливать достаточную статистику для выполнения нескольких важных экспериментальных задач, таких как: уточнение электрослабых параметров ( $M_W$ ,  $m_t$ , различных ширин и констант связи), выделение функций партонных распределений (PDF), калибровка элементов детектора и мониторинг светимости, а также дополнительная настройка алгоритмов ливнеобразования, используемых в программах Монте Карло для моделирования процессов.

Точность теоретических предсказаний должна соответствовать постоянно повышающейся точности экспериментальных измерений. Основными источниками погрешностей теоретических предсказаний являются *i*) погрешности PDF, *ii*) неопределенность шкал факторизации и ренормализации, а также *iii*) неопределенности, вызванные учетом конечного числа членов в пертурбативном разложении. Последний вклад контролируется повышением порядка разложения по теории возмущения, которое, однако, связано с большими вычислительными трудностями. Например, поправка NLO QCD к интегральному сечению процесса Дрелла–Яна в канале нейтрального тока может составить порядка 20%, в зависимости от кинематических ограничений. При этом учет поправок следующего порядка, NNLO, составляющих

около 2 – 3%, требует вычисления в десятки раз большего количества диаграмм и в сотни раз больше времени CPU.

Теоретическое сообщество поддерживает потребность экспериментаторов в Монте Карло инструментах для прецизионных вычислений поправок высших порядков. Существует несколько известных программ, выполняющих вычисления процессов Дрелла–Яна в различных приближениях: NLO QCD (DYRAD, MCFM); NLO EW (w/ZGRAD2, HORACE); NLO QCD + NLO EW (mcsanc); NNLO QCD (DYNLLO, FEWZ v2.x); NNLO QCD + NLO EW (FEWZ v3.x). Все из перечисленных пакетов являются интеграторами, то есть могут вычислить интегральные и дифференциальные сечения, но не способны генерировать события для моделирования отклика детектора.

Необходимым условием для вычисления сечений процессов в глубоко-конеупругих адронных столкновениях является знание функций партонных распределений. На сегодняшний день существует более десятка научных групп, занимающихся выделением PDF из экспериментальных данных. В основе процедуры выделения лежит фитирование экспериментальных результатов теоретическими предсказаниями. Для глобальных фитов используются по возможности все доступные данные – от нейтринных экспериментов до коллайдерных (CTEQ, MSTW, ABKM, JR), узкоспециализированные фиты могут использовать, к примеру, только данные экспериментов глубоко-конеупругого рассеяния (HERAPDF). Помимо стандартного метода фитирования минимизацией  $\chi^2$ , применяется также подход нейронных сетей (NNPDF).

Важно отметить, что порядок пертурбативного приближения теоретических расчетов должен соответствовать функциям партонных распределений, выделенным с помощью предсказаний в том же порядке приближения. То есть, вычисляя сечение в приближении NLO QCD, мы обязаны использовать PDF, которые были получены в соответствующем приближении. В большинстве случаев увеличение точности теоретических вычислений приводит к масштабному повышению затрачиваемого времени. Для обхода этой проблемы применяются таблицы К-факторов, перевзвешивание структурных функций, быстрая оценка сечений (FastNLO, APPLgrid) либо их комбинации.

**Целью** данной работы является обеспечение теоретического сопровождения: анализа данных эксперимента ATLAS, полученных за 2010г., нацеленном на измерение сечения рождения электрослабых бозонов в процессах типа Дрелла–Яна; анализа результатов данных измерений в контексте QCD с целью определения плотности  $(s/\bar{s})$ -кварков в протоне; при исследовании совмещения партонных ливней и электрослабых поправок к сечению процессов типа Дрелла–Яна, в том числе обусловленных вкладом процессов

с фотоном в начальном состоянии, в зависимости от различных алгоритмов ливнеобразования.

Для достижения поставленной цели требовалось решение следующих задач:

1. Создание Монте Карло интегратора для вычисления сечения процессов типа Дрелла–Яна в глубоконеупругих протон–протонных столкновениях на основе фортранных модулей SANC. Программа должна принимать входные параметры вычислений, производить соответствующую процедуру интегрирования и выводить результаты в виде интегрального сечения в заданных пределах и дифференциального сечения в виде гистограмм, запрошенных пользователем;
2. Моделирование событий процесса Дрелла–Яна с учетом электрослабых поправок, вызванных процессами с фотоном в начальном состоянии, для двух различных алгоритмов ливнеобразования, реализованных в программах Pythia8 и Herwig++ и сравнение результатов моделирования;
3. Вычисление NNLO QCD сечений для рождения  $W$  и  $Z/\gamma^*$  бозонов в процессах типа Дрелла–Яна в условиях детектора ATLAS на LHC для различных наборов функций партонных распределений; вычисление корреляций ошибок между сечениями рождения  $W$  и  $Z$  бозонов и сравнение с экспериментальными измерениями;
4. Вычисление NNLO QCD и NLO EW К-факторов для фитирования данных ATLAS партонными распределениями с помощью программы HERAFITTER; генерация сеток APPLgrid для быстрой оценки NLO QCD сечений процессов Дрелла–Яна.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан и создан интегратор `mcsanc` для вычисления сечений процессов типа Дрелла–Яна, ассоциативного рождения Хиггса и электрослабых бозонов, а также одиночного рождения топ кварка в  $s$ - и  $t$ -каналах на основе фортранных модулей SANC. Проведенное тщательно согласованное сравнение `mcsanc-v1.01` с другими программными продуктами и литературой показало достоверность вычислений.
2. Изучено влияние различных алгоритмов ливнеобразования, с упорядочиванием по поперечному импульсу (Pythia8) и алгоритма когерентного ветвления (Herwig++), на электрослабые поправки, включая обусловленные процессами с фотонами в начальном состоянии, реализованными в генераторах системы SANC.

3. Получены теоретические предсказания для интегральных и дифференциальных сечений с учетом поправок NLO EW и NNLO QCD для различных наборов PDF в работе по измерению сечений рождения и распада  $W$  и  $Z/\gamma^*$  бозонов на детекторе ATLAS на основе  $35\text{pb}^{-1}$  данных за 2010г. при  $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ . Поправки NLO EW вычислялись с помощью программ SANC, а поправки NNLO QCD с помощью программы FEWZ.
4. Проведено сравнение комбинированных интегральных и дифференциальных сечений рождения и распада  $W$  и  $Z$  бозонов с теоретическими предсказаниями для различных наборов PDF с учетом корреляций погрешностей.
5. Оценено отношение плотностей партонных распределений  $s$ -кварка и морского  $d$ -кварка в протоне на основе данных детектора ATLAS за 2010г. с помощью программы HERAFITTER, используя метод быстрого восстановления сечения высших порядков приближения APPLgrid и таблицы  $K$ -факторов. Измерено соотношение  $r_s = 0.5(s + \bar{s})/\bar{d} = 1.00_{-0.28}^{+0.25}$ , при значениях переданного импульса  $Q^2 = 1.9\text{GeV}^2$  и  $x = 0.023$ .

#### Научная новизна:

1. Впервые создан Монте Карло интегратор `mcsanc` для вычисления сечений ряда процессов в NLO QCD и EW приближениях, в основе которого лежат модули SANC. Список процессов включает в себя процессы типа Дрелла–Яна, ассоциативного рождения Хиггса и  $W/Z$  бозонов, а также одиночного рождения топ-кварка в  $s$ - и  $t$ -каналах. Достоинством данного интегратора является удобство пользовательского интерфейса и поддержка многопроцессорных вычислений.
2. Впервые изучено влияние различных алгоритмов партонных ливней на электрослабые поправки обусловленные процессами с фотоном в начальном состоянии.
3. Сечения рождения и распада  $W$  и  $Z/\gamma^*$  бозонов, измеренные на детекторе ATLAS на основе данных за 2010г в электронном и мюонном каналах, впервые сопоставлены с теоретическими предсказаниями в NNLO QCD приближении, полученными с различными наборами PDF с учетом корреляций их погрешностей.
4. Впервые измерено отношение плотностей партонных распределений  $s$ -кварка и морского  $d$ -кварка в составе протонов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на рабочих совещаниях по физической программе ATLAS (Дубна,

декабрь 2012, февраль 2013); совещании для пользователей программы HERAFitter (Марсель, февраль 2012); конференции CALC-2012 (Дубна, июль 2012); ACAT-2013 (Пекин, май 2013); EPSHEP-2013 (Стокгольм, июль 2013).

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-02-01030, 12-02-91526-CERN\_a и Фонда «Династия».

**Личный вклад.** Автор был лидером разработки кода интегратора `mcsanc`, принимал непосредственное участие в сравнении алгоритмов ливнеобразования в контексте электрослабых поправок индуцированных фотоном в начальном состоянии. Автор принимал активное участие в получении теоретических предсказаний для сечений Дрелла–Яна в кинематических ограничениях чувствительного объема детектора ATLAS, вычислении корреляций погрешностей и в вычислении  $K$ -факторов и генерации таблиц APPLgrid для измерения плотности партонного распределения  $s$ -кварка в протоне.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 5 печатных изданиях, входящих в список рекомендованных ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации **154** страницы текста с **52** рисунками и **29** таблицами. Список литературы содержит **152** наименования.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена теоретическому обзору физики процессов Дрелла–Яна в глубоконеупругих протон-протонных столкновениях. Дано краткое описание партонной модели в контексте протон-протонных столкновений в ведущем приближении и описаны способы отнесения коллинеарных расходимостей, возникающих в высших порядках пертурбативной теории, к факторизуемым функциям партонных распределений. Приведены основные диаграммы, дающие вклад в NLO EW и QCD поправки к процессам вида  $pp \rightarrow Z \rightarrow \ell\ell$  и  $pp \rightarrow W \rightarrow \ell\nu_\ell$ .

**Во второй главе** приводится краткое описание системы SANC, а затем развернуто излагается описание интегратора `mcsanc`. Приведен список процессов, реализованных в интеграторе, описаны вклады в NLO EW и QCD сечения и приведены таблицы и распределения, демонстрирующие достовер-

$pp \rightarrow$	$Z^0(\mu^+\mu^-)$	$W^+(\mu^+\nu_\mu)$	$W^-(\mu^-\bar{\nu}_\mu)$
NLO QCD	3388(2)	12263(4)	9045(4)
NLO MCFM	3382(1)	12260(1)	9041(5)

Табл. 1: Интегральные сечения NLO QCD для процессов нейтрального и заряженного тока Дрелла–Яна, вычисленные в `mcsanc` и MCFM (в pb) при согласованных электрослабых параметрах и кинематических ограничениях.

ность результатов, полученных с помощью данного кода. В Табл. 1 приведено сравнение NLO QCD сечений с сечениями, полученными в программе MCFM для процессов Дрелла–Яна. На Рис. 1 показано сравнение дифференциальных сечений с учетом NLO QCD, EW и QCD+EW (слева) и соответствующие поправки  $\delta(\%)$  (справа) для процесса  $pp \rightarrow \mu^+\mu^-$ .

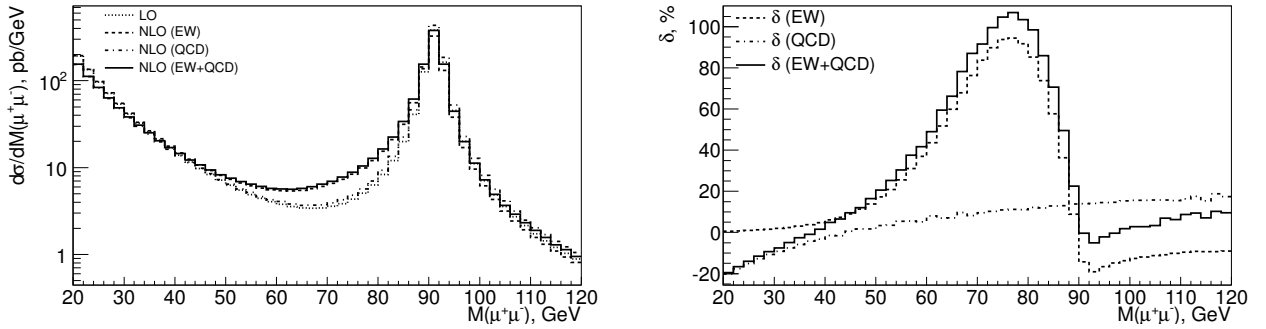


Рис. 1: Сравнение вкладов EW и QCD в поправки порядка NLO в распределении сечения по инвариантной массе лептонов в конечном состоянии для процесса Дрелла–Яна нейтрального тока  $pp \rightarrow \mu^+\mu^-$ .

**В третьей главе** рассматриваются результаты анализа комбинирования партонных ливней и электрослабых поправок, обусловленных процессами с фотоном в начальном состоянии:

$$\begin{aligned}\gamma + q &\rightarrow q' + \ell^+ + \nu_\ell, \\ \gamma + q &\rightarrow q + \ell^- + \ell^+.\end{aligned}$$

Проведено сравнение данных поправок с полученными в других исследованиях и изучено влияние различных алгоритмов ливнеобразования, реализованных в Pythia8 и Herwig++ на электрослабые поправки, вычисленные в генераторах SANC.

**Четвертая глава** посвящена описанию исследований по измерению инклюзивного сечения рождения  $W$  и  $Z/\gamma^*$  бозонов с распадом в электронные и мюонные конечные состояния и сравнению результатов с теоретическими предсказаниями. Для анализа были использованы данные ATLAS 2010 года с интегральной светимостью  $35\text{pb}^{-1}$  при энергии пучков  $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ .



В главе приведено краткое описание установки ATLAS, описание критериев отбора событий, процедуры вычисления интегрального и дифференциального сечения и объединения результатов для электронного и мюонного каналов. Результаты измерения сечений приведены в сравнении с теоретическими предсказаниями в NNLO QCD приближении, полученными в программе FEWZ для различных наборов функций партонных распределений: MSTW08, HERAPDF1.5, ABKM09, JR09. В Табл. 2 приведены сечения, измеренные в чувствительном объеме детектора. На Рис. 2 показаны дифференциальные распределения измеренного сечения и теоретических предсказаний соотношений сечений  $W/Z$  с эллипсами скоррелированных погрешностей.

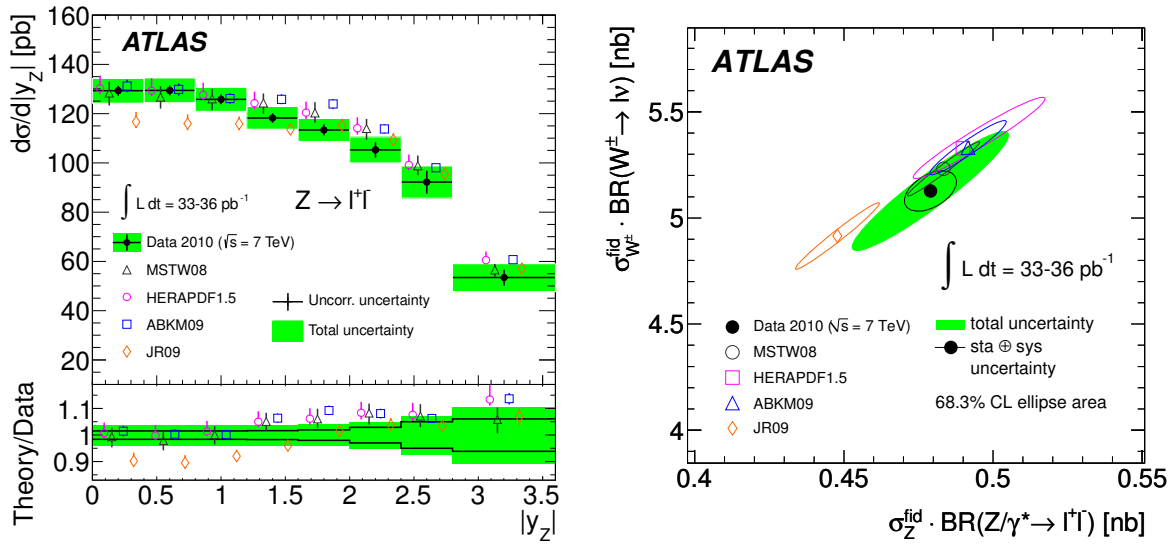


Рис. 2: Измеренное в чувствительном объеме сечение в сравнении с теоретическими предсказаниями в NNLO приближении, вычисленными с различными наборами PDF. Слева приведено дифференциальное сечение для  $Z \rightarrow \ell\ell$ , справа  $(\sigma_{W^+} + \sigma_{W^-})$  vs.  $\sigma_{Z/\gamma^*}$ . Эллипсы соответствуют уровню достоверности 68%, а погрешности теоретических значений соответствуют только неопределенностям PDF.

**Пятая глава** посвящена исследованию плотности распределения  $s$ -кварка в протоне на основе данных ATLAS. В ней описаны методы извлечения партонных распределений из экспериментальных данных, необходимые процедуры быстрой оценки теоретических предсказаний для соответствующих сечений, изложены результаты QCD анализа с вычислением отношения плотности  $s/\bar{s}$ -кварков к плотности морского  $d$ -кварка в протоне. Полученное отношение  $r_s = 0.5(s + \bar{s})/\bar{d}$  равно

$$r_s = 1.00 \pm 0.20_{\text{exp}} \pm 0.07_{\text{mod}}^{+0.10} \pm 0.06_{-0.15}^{\text{par}} \pm 0.08_{\text{th.}}$$

при значениях переданного импульса  $Q^2 = 1.9 \text{ GeV}^2$  и  $x = 0.023$ .

$\sigma_W^{\text{fid}} \cdot \text{BR}(W \rightarrow \ell\nu)$ [nb]					
		sta	sys	lum	acc
$W^+$	3.110	$\pm 0.008$	$\pm 0.036$	$\pm 0.106$	$\pm 0.004$
$W^-$	2.017	$\pm 0.007$	$\pm 0.028$	$\pm 0.069$	$\pm 0.002$
$W^\pm$	5.127	$\pm 0.011$	$\pm 0.061$	$\pm 0.174$	$\pm 0.005$
$\sigma_{Z/\gamma^*}^{\text{fid}} \cdot \text{BR}(Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell)$ [nb]					
$Z/\gamma^*$	0.479	$\pm 0.003$	$\pm 0.005$	$\pm 0.016$	$\pm 0.001$

Табл. 2: Комбинированные сечения рождения и распада в лептонные каналы для  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $W^\pm$  и  $Z/\gamma^*$ , измеренные в чувствительном объеме детектора, ограниченном  $|\eta_\ell| < 2.5$ ,  $p_{T,\ell} > 20$  GeV, для заряженного тока:  $p_{T,\nu} > 25$  GeV и  $m_T > 40$  GeV, и для нейтрального тока:  $66 < m_{\ell\ell} < 116$  GeV. Приведены значения погрешностей: статистических (sta), экспериментальных систематических (sys), светимости (lum) и экстраполяции (acc).

На Рис. 3 приведено сравнение измеренной в анализе величины  $r_s$  со значениями, предполагаемыми различными группами, занимающимися глобальным фитированием PDF.

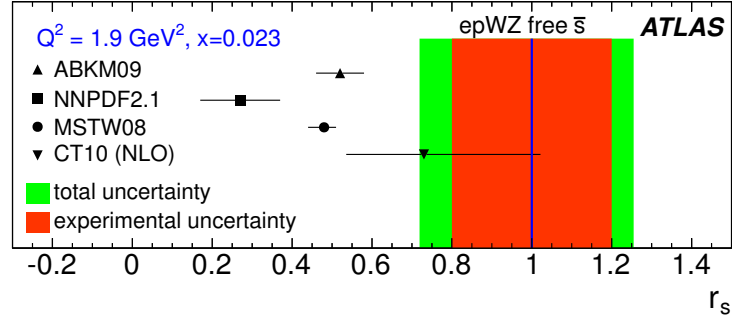


Рис. 3: Предсказания на основе анализа пертурбативной QCD в NNLO приближении для отношения  $r_s(x, Q^2) = 0.5(s+\bar{s})/\bar{d}$ . Точкам соответствуют результаты анализов глобальных фитов с погрешностями PDF, сплошная полоса — результат измерений по данным ATLAS.

В **заключении** подведены основные итоги работы: автором обеспечено теоретическое сопровождение анализа данных эксперимента ATLAS 2010 года, нацеленном на измерение сечения рождения электрослабых бозонов в процессах типа Дрелла–Яна. Теоретическое сопровождение анализа результатов данных измерений в контексте QCD позволило впервые определить плотность  $(s/\bar{s})$ -кварков в протоне в диапазоне средних значений  $x$  и  $Q^2$ . Автор был лидером в создании Монте Карло интегратора `mcsanc` для вычисления сечений ряда процессов в NLO QCD и EW приближениях на основе фортран-ных модулей SANC и был ключевым участником в вычислении NNLO QCD сечений для рождения  $W$  и  $Z/\gamma^*$  бозонов в процессах типа Дрелла–Яна в

условиях детектора ATLAS на LHC для ряда наборов функций партонных распределений с помощью программ Монте Карло. Основным результатом анализа в контексте QCD дифференциальных сечений рождения и распада  $W$  и  $Z/\gamma^*$  бозонов в электронном и мюонном каналах являются впервые измеренные отношения плотностей партонных распределений  $s$ -кварка и морского  $d$ -кварка в составе протонов.

## Список литературы

- [1] QCD parton showers and NLO EW corrections to Drell-Yan / P. Richardson, R.R. Sadykov, A.A. Sapronov, M.H. Seymour, P.Z. Skands // Journal of High Energy Physics. — 2012. — Vol. 1206. — P. 090. — 20pp.
- [2] Measurement of the inclusive  $W^\pm$  and  $Z/\gamma$  cross sections in the electron and muon decay channels in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector / ATLAS Collaboration (G. Aad, ..., R. Santonico, H. Santos, A. Sapronov, J.G. Saraiva, T. Sarangi et. al.) // Physical Review D — 2012. — Vol. D85. — P. 072004. — 43pp.
- [3] Determination of the strange quark density of the proton from ATLAS measurements of the  $W \rightarrow l\nu$  and  $Z \rightarrow ll$  cross sections / ATLAS Collaboration (G. Aad, ..., R. Santonico, H. Santos, A. Sapronov, J.G. Saraiva, T. Sarangi et. al.) // Physical Review Letters — 2012. — Vol. 109. — P. 012001. — 18pp.
- [4] SANC integrator in the progress: QCD and EW contributions / D. Bardin, S. Bondarenko, P. Christova, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, A. Sapronov, W. von Schlippe // Письма в ЖЭТФ. — 2012. — Vol. 96. — P. 285–289. — 5pp.
- [5] Bondarenko S. G., Sapronov A. A. NLO EW and QCD proton-proton cross section calculations with mcsanc-v1.01. // Computer Physics Communications — 2013. — Vol. 184. — P. 2343–2350. — 10pp.