

71005  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2013-97

На правах рукописи

C-197

САПРОНОВ  
Андрей Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТИПА ДРЕЛДА-ЯНА  
С ОДИНОЧНЫМ РОЖДЕНИЕМ  $W$  И  $Z$  БОЗОНОВ НА LHC

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

17 д + 324 18 + 346.6 е

Дубна 2013

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзепелова  
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. Дзепелова 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 (LHC), 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  $35\text{pb}^{-1}$ , набранных за 2010г. при  $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ , хватило для измерения отношения сечения одиночного 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

Объединенный институт  
ядерных исследований

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 глубококонеупругих 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  $r_s = 0.5(s + \bar{s})/\bar{d} = 1.00^{+0.25}_{-0.28}$ , при значениях переданного импульса  $Q^2 = 1.9\text{GeV}^2$  и  $x = 0.023$ .

#### Научная новизна:

1. Впервые создан Монте Карло интегратор mcsapc 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 mcsapc, 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 mcsapc. 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 `mcscans` 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 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  $pp \rightarrow \mu^+\mu^-$ .

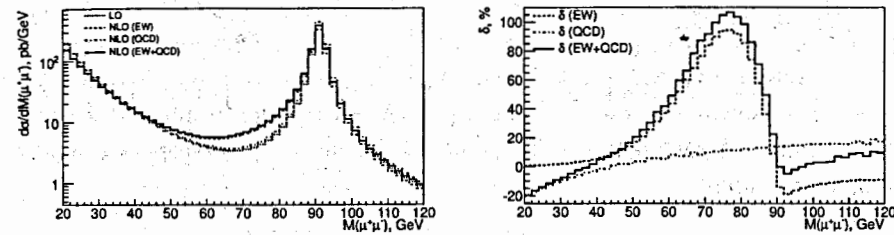


Рис. 1: Сравнение вкладов EW и QCD в поправки порядка NLO в распределении сечения по инвариантной массе лептонов в конечном состоянии для процесса Дрелла-Яна нейтрального тока  $pp \rightarrow \mu^+\mu^-$ .

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.

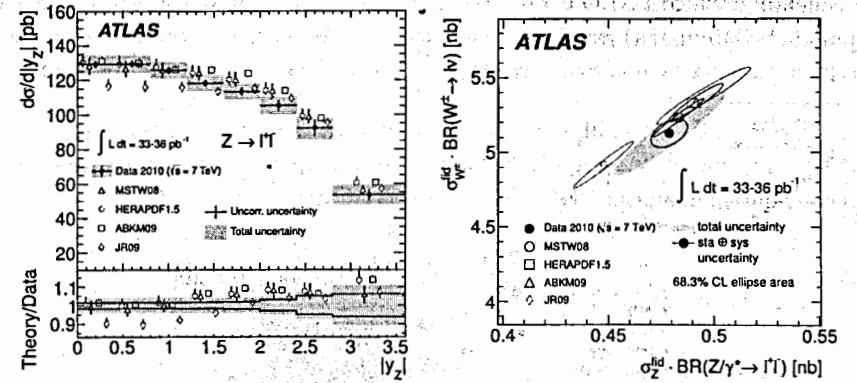


Рис. 2: Измеренное в чувствительном объеме сечение в сравнении с теоретическими предсказаниями в NNLO приближении, вычисленными с различными наборами PDF. Слева приведено дифференциальное сечение для  $Z \rightarrow \ell\ell$ , справа  $(\sigma_{W^+} + \sigma_{W^-})$  vs.  $\sigma_{Z/\gamma^*}$ . Эллипсы 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  $s/s$ -кварков к плотности морского  $d$ -кварка в протоне. Полученное отношение  $r_s = 0.5(s + \bar{s})/\bar{d}$  равно

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

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

$\sigma_{W^{\pm}}^{\text{fid}} \cdot \text{BR}(W \rightarrow \ell\nu)$ [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]					
	sta	sys	lum	acc	
$Z/\gamma^*$	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.

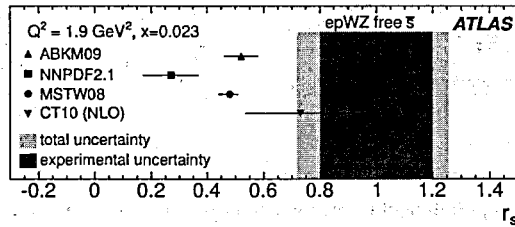


Рис. 3: Предсказания на основе анализа пертурбативной QCD в NNLO приближении для отношения  $r_s(x, Q^2) = 0.5(s+\bar{s})/\bar{d}$ . Точкам соответствуют результаты анализов глобальных фитов с погрешностями PDF, сплошная полоса — результат измерений по данным ATLAS.

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 mcscans 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. Saproinov, 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. Saproinov, 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. Saproinov, 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. Saproinov, W. von Schlippe // *Письма в ЖЭТФ*. — 2012. — Vol. 96. — P. 285–289. — 5pp.
- [5] Bondarenko S. G., Saproinov 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.

Получено 30 августа 2013 г.