Характеристики событий соударений протонов в открытых данных эксперимента ATLAS

И.О. Волков,^{*} И.С. Дьячков,[†] Л.Н. Смирнова,[‡] Р.А. Шоркин[§] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2 (Статья поступила 20.03.2019; Подписана в печать 24.03.2019)

В работе представлены распределения параметров событий с рождением W, Z бозонов и пар топ кварков в открытых данных ATLAS. Произведена сравнительная характеристика этих событий при разных параметрах. Проведено сравнение результатов с данными, опубликованными коллаборацией ATLAS.

РАСS: 14.65.На, 14.70.Fm, 14.70.Hpl УДК: 539.1.07 Ключевые слова: топ кварк, Z бозон, W бозон, ATLAS.

введение

В работе приведены результаты анализа событий протонных соударений при энергии 8 ТэВ, зарегистрированных в детекторе ATLAS в 2012 г. Данные, использованные в анализе, соответствуют интегральной светимости $1 \phi \delta^{-1}$ и предоставлены коллаборацией ATLAS для открытого доступа в 2016 г. с целью освоения методики их обработки [1]. Экспериментальные данные сопровождены соответствующими им наборами событий ряда процессов, моделированных методом Монте–Карло.

Анализ проводится на базе операционной системы Linux с использованием программного пакета ROOT [2]. Экспериментальные данные о событиях представлены в формате, упрощенном по сравнению с полномасштабной обработкой, в форме ntuple с целью сокращения времени обработки данных и облегчения подготовки программных кодов. Примеры кодов анализа написаны на языке Python для нескольких вариантов физических задач. В работе представлены начальные результаты по анализу событий с образованием векторных W и Z бозонов и пар топ кварков. Для каждой из этих групп событий используются отдельные критерии отбора и программные коды.

1. АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С РОЖДЕНИЕМ W БОЗОНОВ

События для анализа прошли первичную обработку по следующим критериям: использованы неповрежденные события с по крайней мере одним лептоном, не содержащие фоновых струй, не связанных с первичной вершиной; первичные вершины содержат ≥ 4 треков, по крайней мере один из лептонов в событии имеет поперечный импульс $p_T^l>25\,\Gamma$ эВ/с. Использовались лептоны и адронные струи в интервале по псевдобыстроте $|\eta|<2.5.$ Для лептонов требуются условия изолированности по поперечной энергии $E_T<0.15\,\Gamma$ эВ и поперечному импульсу $p_T^l<0.15\,\Gamma$ эВ/с.

Представленные результаты получены с высокой статистической обеспеченностью. Они демонстрируют согласие экспериментальных данных и соответствующих моделированных событий на основе Стандартной модели (СМ). Они позволяют провести измерение массы Z бозона, которая является одним из основных параметров СМ.

На рис. 1 представлены распределения по поперечному импульсу p_T мюонов и электронов от лептонных распадов W бозонов. Дополнительными критериями отбора событий являются требования на величину недостающей поперечной энергии $E_T^{miss} > 30$ ГэВ и величину поперечной массы W бозона $m_T^W > 30$ ГэВ. Величина m_T^W рассчитывается по формуле:

$$m_T^W = \sqrt{2p_T^l E_T^{miss} [1 - \cos(\Delta \varphi(p_T^l, E_T^{miss}))]}.$$

Величина E_T^{miss} определяется суммой всей измеренной поперечной энергии в событии, взятой с противоположным вектором направления. На рисунках приведены также гистограммы, отвечающие вкладам в спектр лептонов от моделированных событий других процессов СМ. На рис. 2 приведены те же распределения, но для лептонов в интервале псевдобыстроты $|\eta| < 0.5$. Это приводит к почти пятикратному уменьшению количества событий, но основные характеристики распределений не изменяются. Небольшое расхождение между экспериментальными точками и гистограммой объясняются несколько упрощенной системой отбора событий в анализе.

^{*}E-mail: igorvolkov77@yandex.ru

[†]E-mail: dyachkov.is15@physics.msu.ru

[‡]E-mail: lidia.smirnova@cern.ch

[§]E-mail: schorkin.ra15@physics.msu.ru



Рис. 1: Распределения по поперечному импульсу мюонов (*a*) и электронов (*б*) от распада W бозонов в pp соударениях при энергии 8 ТэВ для интервала псевдобыстроты $|\eta| < 2.5$



Рис. 2: Распределения по поперечному импульсу мюонов (*a*) и электронов (б) от распада W бозонов в pp соударениях при энергии 8 ТэВ для интервала псевдобыстроты $|\eta| < 0.5$

2. АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С РОЖДЕНИЕМ Z БОЗОНОВ

На рис. З показаны распределения лептонов (мюонов, электронов) от распада Z бозона. При этом выбирался один лептон от распада с наибольшим поперечным импульсом. Отбирались события с по крайней мере двумя лептонами одного аромата с $p_T^l > 25 \, \Gamma$ эВ/с, с противоположными знаками электрического заряда и условием близости инвариантной массы этих лептонов к массе Z бозона : $|m_{ll} - m_Z| < 20 \, \Gamma$ эВ при массе $m_Z = 91.18 \, \Gamma$ эВ. Видно, что максимум распределения лидирующих лептонов заметно смещен в область больших значений p_T^l . Наблюдается лучшее согласие с модельными событиями.

Построенные распределения позволяют провести дальнейший анализ данных. Так, можно определить массу Z бозона из распределения инвариантной массы двух лептонов соответствующего процесса. Для этого распределение было приближено гауссовой кривой. На рис. 4 представлены результаты. Пик находится на массе m_Z =90.6737 ±0.0056 ГэВ. Погрешность здесь чисто статистическая, систематическая погрешность, связанная с размером бинов и особенностями процесса, значительно больше. Учитывая это, полученная масса неплохо согласуется с последними данными о массе Z бозона: $m_Z = 91.1876 \pm 0.0021$ ГэВ.



Рис. 3: Распределения по поперечному импульсу лидирующих мюонов (*a*) и электронов (б) от распада Z бозонов в pp соударениях при энергии 8 ТэВ для псевдобыстроты |η| < 2.5



Рис. 4: Распределение инвариантной массы двух лептонов m_{ll} в событиях с распадом Z бозонов на два мюона (a) и его аппроксимация гауссовой кривой (б)

3. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОБЫТИЙ С РОЖДЕНИЕМ *W*⁺/*W*⁻ И Z БОЗОНОВ

Наибольшее различие между событиями с образованием W и Z бозонов можно ожидать для распределения недостающей поперечной энергии вследствие присутствия нейтрино (антинейтрино) в распадах W бозонов. Распределения по величине E_T^{miss} приведены на рис. 5. Различие обусловлено как наличием нижней границы отбора для событий с W, так и более пологим для них характером спектра в области больших значений E_T^{miss} . Различие обусловлено присутствием нейтрино в распадах W нейтрино в распадах W бозона.

На рис. 6 показаны полученные распределения инвариантных поперечных масс m_T^W для W бозонов и инвариантных масс двух лептонов m_{ll} от распадов Z бозонов на два мюона. Хорошо виден пик на массе Z бозона. Распределение m_T^W более широкое, с более значительными отличиями от гистограммы модельных событий, но максимум находится вблизи массы W бозона $m_W = 80370 \pm 19 \text{ M}$ эВ [3].

Приведенные спектры распределения по поперечному импульсу лептонов от распадов W и Z бозонов подобны, однако спектры W^+ и W^- различаются вследствие положительного заряда протонов. Для определе-



Рис. 5: Распределения недостающей поперечной энергии E_T^{miss} для событий с мюонами от распада W (*a*) и событий с распадом Z бозонов на два мюона (б)



Рис. 6: Распределения поперечной массы m_t^W для событий с мюонами (*a*) и инвариантной массы двух лептонов m_{ll} событий с распадом Z бозонов на два мюона (*б*)



Рис. 7: Зависимость показателя асимметрии заряда мюонов от модуля псевдобыстроты в событиях с распадом W

ния этого различия была построена на рис. 7 зависимость зарядовой асимметрии мюонов от распада W^+ и W^- от модуля их псевдобыстроты. Величина зарядовой асимметрии рассчитывается по формуле:

$$A(|\eta|) = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}$$

где N^+ и N^- — количество положительных и отрицательных мюонов соответственно. Показатель асимметрии растет в области высоких $|\eta|$, где заметнее проявляется влияние валентных кварков протона. Общий вид спектра повторяет зависимость асимметрии заряда мюонов от распада W^+/W^- , полученную коллаборацией ATLAS при энергии соударений $\sqrt{s} = 7$ ТэВ [4].

4. АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С РОЖДЕНИЕМ ПАРЫ $t\overline{t}$ КВАРКОВ

Аналогичный набор событий с высокой статистикой представляют события с рождением пары топ-кварков.



Рис. 8: Распределения по p_T^l мюонов от распада топ кварка (а) и распределения по недостающей поперечной энергии E_T^{miss} (б) при парном рождении в pp соударениях при энергии 8 ТэВ

Сечение этого процесса при энергии pp соударений составляет 818 ± 36 пбн [5], что в 100 раз превышает его сечение при энергии Теватрона.

Для отбора событий для анализа используются те же критерии, что и для событий с W бозоном, но с добавлением требования наличия по крайней мере 4-х струй, из которых две классифицируются как струи b кварков, или b-струи. В отобранных событиях один из W бозонов от распада топ кварка распадается по лептонному каналу, другой с образованием двух струй. На рис. 6 приведены распределения по p_T^l мюонов от распада топ кварка по недостающей поперечной энергии E_T^{miss} (б).

Из рис. 8 видно, что мюоны от распада топ кварка достигают существенно более высоких значений поперечного импульса, чем в распадах векторных бозонов, как и значения недостающей поперечной энергии, превышающих значение 200 ГэВ, тогда как в распадах W они не превышают 100 ГэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ событий в открытых данных ATLAS в pp соударений при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ. Для событий с рождением Z бозонов получены распределения лептонов и спектр инвариантных масс пар лептонов. Рассчитана величина массы Z бозона. Построены распределения спектра лептонов и получена зарядовая асимметрия лептонов от распада W бозона. Получены распределения поперечного импульса лептонов и недостающей энергии для событий с рождением пар $t\bar{t}$ кварков. Проведено сравнение распределений по недостающей энергии для трех типов событий в анализе. Полученные результаты согласуются с опубликованными данными эксперимента ATLAS.

- [1] ATLAS Collaboration ATL-OREACH-PUB-2016-001.
- [2] Brun R., Rademakers F. ROOT: An object oriented data analysis framework, Nucl. Instrum. Meth. 1997. A389. P. 81.
- [3] ATLAS Collaboration, Aaboud M. et al. Eur.Phys. J. C. 2018. 78. P. 110.
- [4] ATLAS Collaboration, Aaboud M. et al. Phys.Lett. B. 2011.701. P. 31.
- [5] ATLAS Collaboration, Aaboud M. et al. Phys.Lett. B. 2016.761. P. 136.

Characteristics of pp collision events from ATLAS OpenData

I.O. Volkov^a, I.S. Diachkov^b, L.N. Smirnova^c, R.A. Shorkin^d

¹Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia

E-mail: ^aigorvolkov77@yandex.ru, ^bdyachkov.is15@physics.msu.ru, ^clidia.smirnova@cern.ch, ^dschorkin.ra15@physics.msu.ru

Parameter distributions for events with W, Z boson and top quark pairs production in ATLAS open data are presented. Comparison of distributions in different ranges of parameters was carried out. Obtained results were compared with public results of ATLAS collaboration.

PACS: 14.65.Ha, 14.70.Fm, 14.70.Hpl *Keywords*: Top quark, Z bosons, W bosons, ATLAS. *Received 20 March 2019*.

Сведения об авторах

1. Смирнова Лидия Николаевна — профессор, доктор физ.-мат. наук; тел.:(495)-932-89-72, Lidia.Smirnova@cern.ch.

Г

- 2. Волков Игорь Олегович студент; тел.: (904)762-06-30, e-mail: igorvolkov77@yandex.ru.
- 3. Дьячков Игорь Сергеевич студент; тел.:(916)142-99-15, e-mail: dyachkov.is15@physics.msu.ru.
- 4. Шоркин Роман Андреевич студент; тел.: (916)814-58-27, e-mail: schorkin.ra15@physics.msu.ru.