

# Анализ событий с рождением $W$ , $Z$ бозонов в соударениях протонов в открытых данных эксперимента ATLAS

А.А. Короткова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра общей ядерной физики*

## ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является анализ событий с рождением тяжелых векторных бозонов при энергиях 8 и 13 ТэВ при помощи портала ATLAS Open Data. Рассматриваются как события с инклюзивным рождением одиночного  $W$  бозона, так и события с парным рождением  $W$  и  $Z$  бозонов.

## ДААННЫЕ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В работе используются экспериментальные данные портала ATLAS Open Data, который был впервые представлен коллаборацией ATLAS в 2016 году. Проект позволяет не участникам коллаборации работать с реальными данными, собранными в результате работы детектора.

На начальной стадии проекта для анализа были доступны данные, зарегистрированные при энергии 8 ТэВ с интегральной светимостью 1 фб<sup>-1</sup>. [1] В 2020 году проект получил развитие — в него были добавлены новые данные, зарегистрированные при энергии 13 ТэВ с интегральной светимостью 10 фб<sup>-1</sup>. [2]

Для анализа данных пользователю доступна для скачивания виртуальная машина с предустановленным программным пакетом ROOT для построения и анализа гистограмм. Примеры возможных вариантов обработки данных написаны на языках Python и C++ для 8 и 13 ТэВ, соответственно. Программное обеспечение, позволяющее обрабатывать данные детектора при 13 ТэВ, находится в стадии разработки. В дальнейшем будет предоставлена возможность анализа данных на обоих языках программирования. Данные при 8 ТэВ можно анализировать только при помощи виртуальной машины. Для данных, зарегистрированных при энергии 13 ТэВ, у пользователя есть два возможных пути анализа: с помощью виртуальной машины и в онлайн режиме.

Помимо экспериментальных данных, у пользователя есть доступ к событиям, смоделированным методом Монте Карло. Эти события представляют собой рассчитанные физические реакции, продукты которых проходят ту же систему регистрации и анализа, что и экспериментальные события. Это позволяет проводить детальное сравнение экспериментальных результатов с теоретическими.

## АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С РОЖДЕНИЕМ W БОЗОНА ПРИ ЭНЕРГИИ 8 ТЭВ

Одним из стандартных анализов портала ATLAS Open Data является анализ событий с инклюзивным рождением одиночного W бозона. W бозоны могут распадаться как по адронному, так и по лептонному каналам распада. Для отбора событий лептонного канала данные проходят предварительный отбор по следующим критериям: используются лептоны и адронные струи в интервале по псевдобыстроте  $|\eta| < 2.5$ , поперечный импульс заряженного лептона от распада  $p_T > 25$  ГэВ, недостающая поперечная энергия  $E_T > 30$  ГэВ, восстановленная поперечная масса W бозона  $m_T^W > 30$  ГэВ.

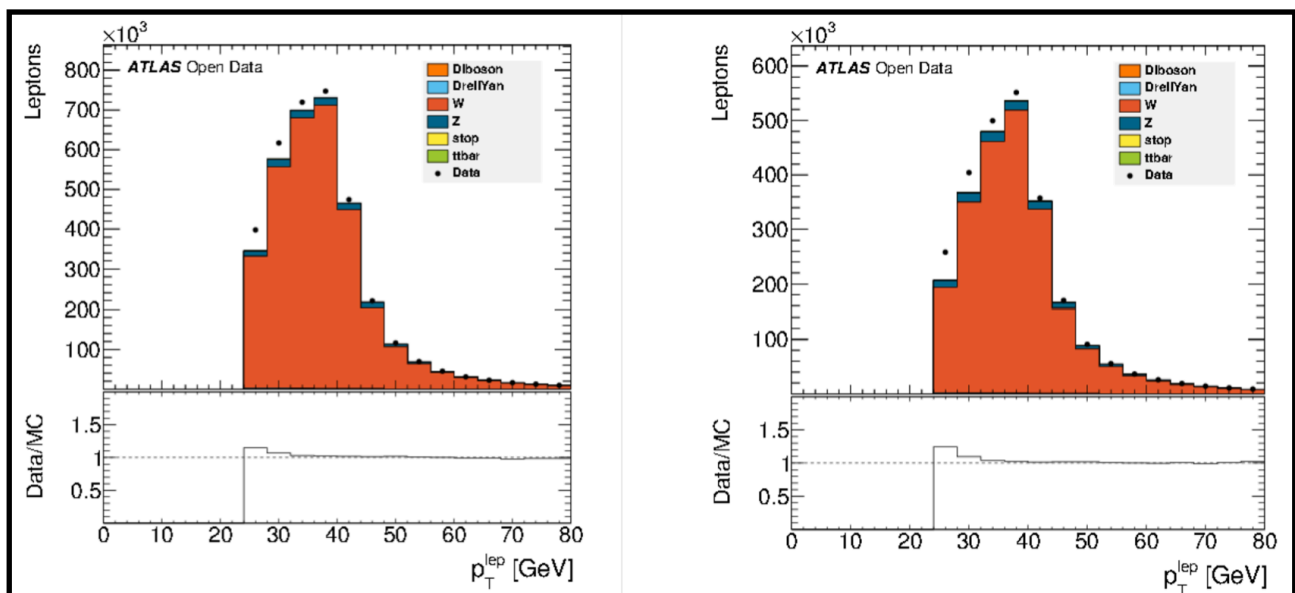


Рис 1: Распределение положительно (слева) и отрицательно (справа) заряженных лептонов, зарегистрированных в W анализе, по поперечному импульсу  $p_T$

Для отобранных событий при энергии 8 ТэВ проведено сравнение распределений лептонов с положительным и отрицательным электрическим зарядом. На рис. 1 слева и справа соответственно представлены распределения положитель-

но и отрицательно заряженных лептонов (электронов и мюонов), зарегистрированных при распаде W бозона, по поперечному импульсу. Наблюдается одинаковый характер этих зависимостей, однако количество лептонов разных знаков различается. Таким образом проявляется зарядовая асимметрия лептонов, заключающаяся в избытке лептонов с положительным зарядом и возникающая из-за положительного заряда протона. В отобранных событиях отношение зарегистрированных W бозонов с положительным и отрицательным знаком электрического заряда составляет:

$$\frac{N_{W_+}}{N_{W_-}} = 1.393 \pm 0.001(\text{стат}).$$

Для Монте Карло моделирования:

$$\frac{N_{W_+}}{N_{W_-}} = 1.391 \pm 0.001(\text{стат}).$$

Малая статистическая ошибка объясняется тем, что в анализе использовано большое количество событий  $N_{W^\pm} \sim 5 \cdot 10^6$ . На детекторе ATLAS при энергии  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  и интегральной светимости  $4.6 \text{ фб}^{-1}$  получено отношение:

$$R_{tot} = 1.450 \pm 0.001(\text{стат}) \pm 0.004(\text{сист}) \pm 0.029(\text{аксепт}) [3].$$

При энергии  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ :

$$R_{tot} = 1.295 \pm 0.003(\text{стат}) \pm 0.010(\text{сист}) [4].$$

Видно, что с ростом энергии рассматриваемая величина отношения уменьшается.

На основе проведенного анализа можно построить распределения событий с рождением W бозона по поперечной массе  $m_T^W$ . Точное знание массы W бозона имеет большое значение для проверки согласованности Стандартной модели, так как она связана с относительно хорошо измеренными массами топ кварка и бозона Хиггса. Его масса измерена во многих экспериментах и составляет  $m^W = 80385 \pm 15 \text{ МэВ}$  [5]. Она получается при помощи метода шаблонов с использованием распределений заряженных лептонов по поперечному импульсу и величине поперечной массы W бозона. Для определения поперечной массы W бозона можно воспользоваться следующей формулой:

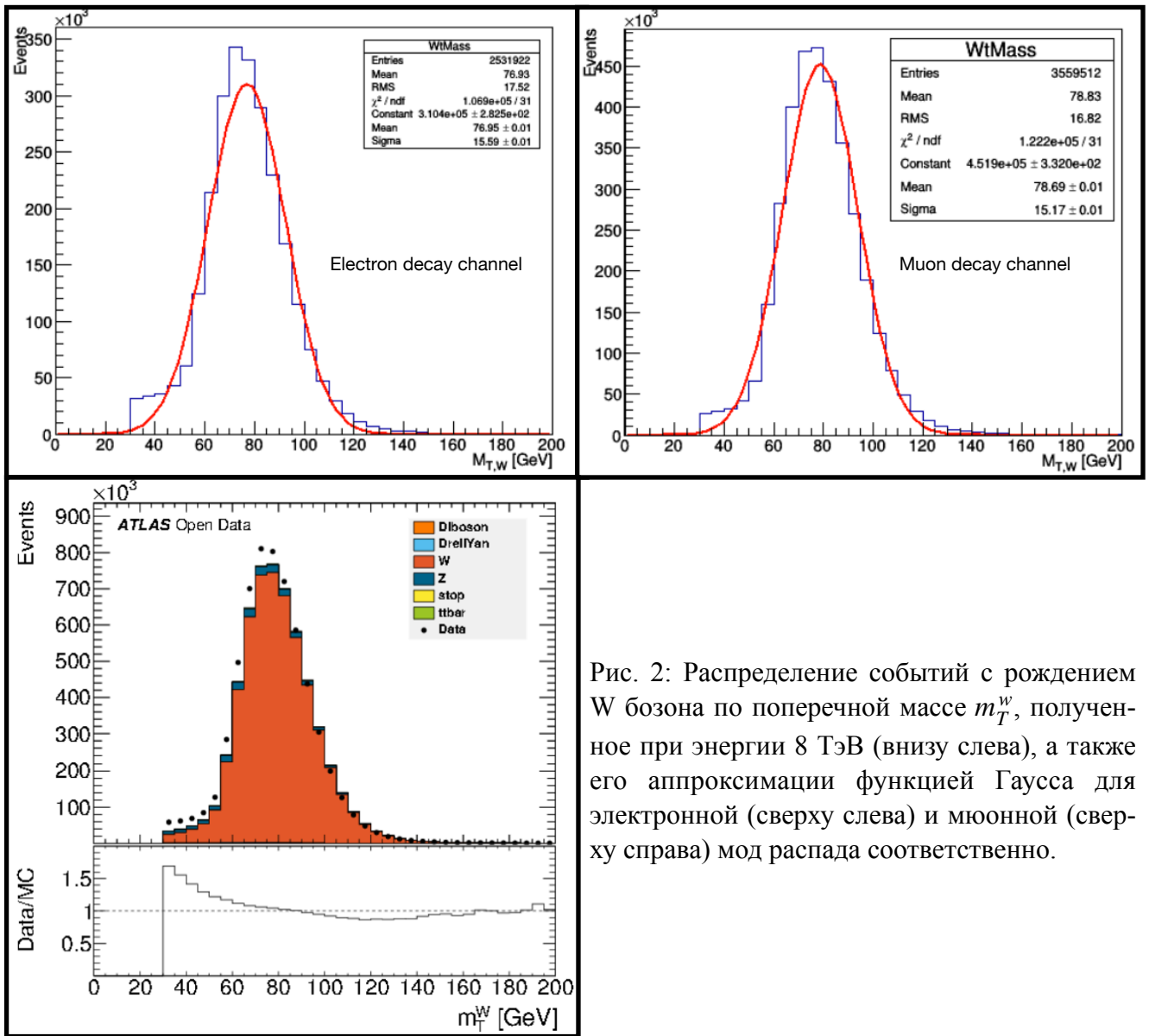


Рис. 2: Распределение событий с рождением W бозона по поперечной массе  $m_T^W$ , полученное при энергии 8 ТэВ (внизу слева), а также его аппроксимации функцией Гаусса для электронной (сверху слева) и мюонной (сверху справа) моды распада соответственно.

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

На рис. 2 показано распределение событий с рождением W бозона по поперечной массе  $m_T^W$ , полученное при энергии 8 ТэВ, а также его аппроксимации функцией Гаусса для электронной и мюонной моды распада соответственно. Полученные средние значения поперечной массы W бозона составляют  $76.95 \pm 0.01$  ГэВ для электронной моды распада и  $78.69 \pm 0.01$  ГэВ для мюонной моды распада. Оба значения близки к измеренной массе W бозона.

## АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С РОЖДЕНИЕМ WZ БОЗОНОВ ПРИ ЭНЕРГИИ 8 ТЭВ

Анализ процессов совместного рождения W и Z бозонов представляет особый интерес для проверки электрослабой теории и КХД. Сечение этого процесса измерено в эксперименте ATLAS при энергии  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  и интегральной светимости  $13 \text{ fb}^{-1}$  и составляет  $20.3 \pm 1.6 \text{ pb}$  [4]. Портал ATLAS Open Data дает возможность проанализировать рождение пар WZ бозонов. События для анализа отбираются по нескольким критериям: наличие трех лептонов, поперечный импульс лептонов  $p_T > 25 \text{ GeV}$ , восстановленная поперечная масса W бозона  $m_T^W > 30 \text{ GeV}$ , разность масс лептонной пары одного поколения, но разного знака и Z бозона  $|m_{ll} - m_Z| < 10 \text{ GeV}$ .

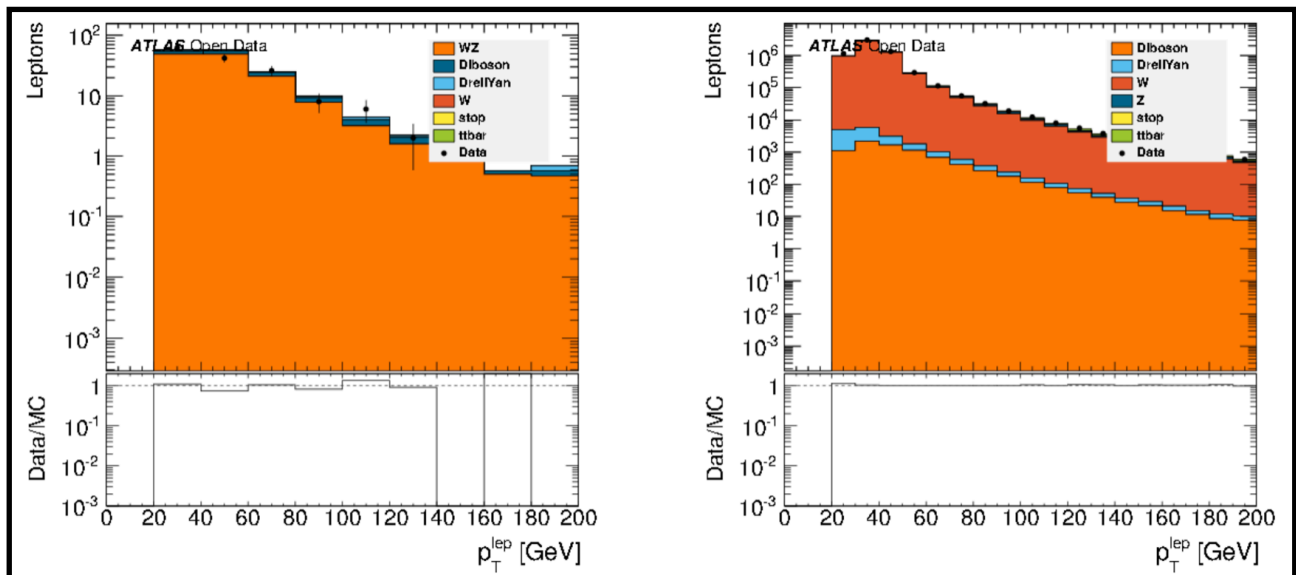


Рис. 3: Распределение лептонов, зарегистрированных в WZ анализе (слева) и W анализе (справа), по поперечному импульсу  $p_T$

На рис. 3 представлены распределения лептонов по поперечному импульсу для событий с рождением пары WZ и одиночным рождением W бозона при энергии 8 ТэВ слева и справа соответственно. Распределения представлены в логарифмическом масштаба по вертикальной оси. Для двух процессов наблюдается близкий экспоненциальный характер падения зависимости в области поперечных импульсов  $p_T > 60 \text{ GeV}$ , эти данные хорошо согласуются с результатами Монте Карло моделирования. Видно, что количество лептонов, зарегистрированных в парном рождении существенно меньше, чем для инклюзивного рож-

дения одиночного W бозона. Сечения этих событий измерены в эксперименте ATLAS и равны соответственно:

$$\sigma^{WZ} = 20.3 \pm 0.8(\text{стат}) \pm 1.2(\text{сист}) \pm 0.7(\text{свет}) \text{ пб [6].}$$

$$\sigma^W = 10720 \pm 3(\text{стат}) \pm 60(\text{сист}) \pm 190(\text{свет}) \pm 130(\text{аксепт}) \text{ пб [3],}$$

Из этих данных видно, что отношение числа лептонов от парного рождения WZ к количеству лептонов от инклюзивного одиночного рождения W:

$$\frac{10720 \cdot n_l}{20.3 \cdot n_{ll}} = 176 \pm 14,$$

где  $n_l = 1, n_{ll} = 3$  в соответствии с множественностью заряженных лептонов.

## АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С РОЖДЕНИЕМ W БОЗОНА ПРИ ЭНЕРГИИ 13 ТЭВ

В 2020 году у пользователей ATLAS Open Data появилась возможность анализировать данные, зарегистрированные при энергии 13 ТэВ. В работе был проведен анализ распределения лептонов по поперечному импульсу для событий с рождением W бозона при энергии 13 ТэВ (рис. 4).

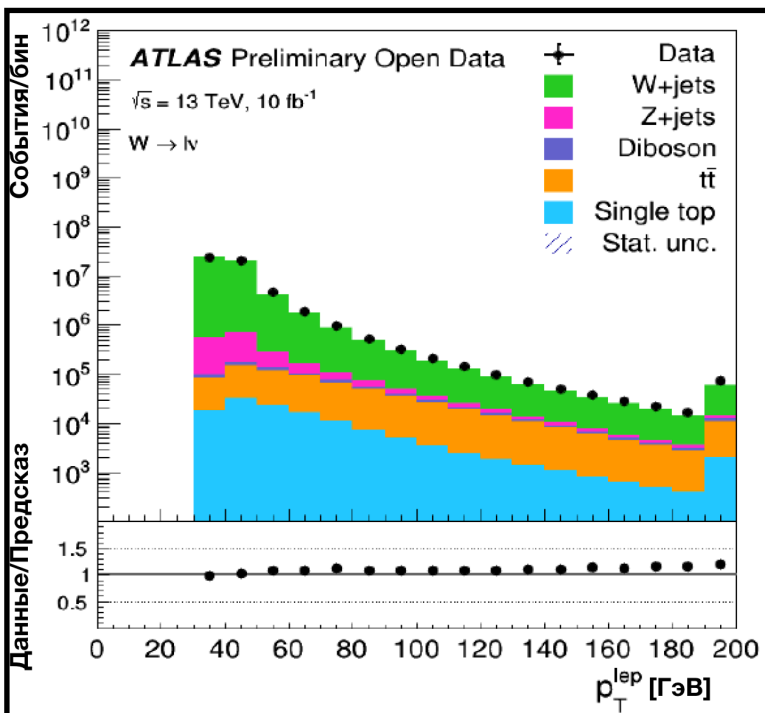


Рис. 4: Распределение лептонов от распада W бозона по поперечному импульсу при энергии 13 ТэВ

На гистограмме видно, что количество зарегистрированных при энергии 13 ТэВ событий отличается от количества зарегистрированных при энергии 8 ТэВ событий (рис. 3, справа) благодаря более высокой интегральной светимости. Большая статистика при энергии 13 ТэВ позволяет изучать больше фоновых каналов. При увеличении энергии появляются заметные вклады от дополнительных фоновых процессов Дрелла-Яна, процессов парного рождения векторных бозонов, а также от рождения пар топ-антитоп кварков. Открытие данные ATLAS при 13 ТэВ позволяют более подробно исследовать характеристики процессов парного рождения векторных бозонов, парного и одиночного рождения топ кварков, рождения бозонов Хиггса.

[1] The ATLAS Collaboration. ATL-OREACH-PUB-2018-001

[2] The ATLAS Collaboration. ATL-OREACH-PUB-2020-01

[3] ATLAS Collaboration, Precision measurement and interpretation of inclusive  $W^+$ ,  $W^-$  and  $Z/\gamma^*$  production cross section with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 367

[4] ATLAS Collaboration, Measurement of  $W^\pm$  and Z-boson production cross sections in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, Physics Letters B 759 (2016) 601–621

[5] Oleh Kivernyk, Measurement of the W-boson mass at the ATLAS experiment, ATL-PHYS-PROC-2018-020 11 April 2018

[6] ATLAS Collaboration, A Measurement of  $W^\pm Z$  Production in Proton-Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector, ATLAS-CONF-2013-021, URL: <http://cds.cern.ch/record/1525557/files/ATLAS-CONF-2013-021.pdf>