

Характеристики струй в pp-взаимодействиях в событиях с рождением Z-бозона

М. С. Снарская,* Л. Н. Смирнова†

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Поступила в редакцию 26.03.2026; подписана в печать 28.03.2026)

Целью работы является сравнение характеристик событий с рождением Z-бозона и струй в открытых данных эксперимента ATLAS и в опубликованных результатах. В работе проведено сравнение распределений по количеству струй, по углам вылета и по поперечному импульсу. Исследуемые процессы важны для уточнения структурных функций протона.

PACS: 13.87.Fh

УДК: 539.12

Ключевые слова: адронные струи, рождение Z-бозона со струями, Большой адронный коллайдер, эксперимент ATLAS.

ВВЕДЕНИЕ

Стандартная модель элементарных частиц (СМ) объединяет теории электрослабого и сильного взаимодействий и успешно описывает множество экспериментальных результатов. И хотя СМ хорошо согласуется с большинством наблюдений, тем не менее, несмотря на достижения, остаётся неполной: она не объясняет ряд фундаментальных вопросов, например, природу тёмной материи, массу нейтрино, гравитацию и др. Поэтому современные эксперименты активно ищут отклонения от СМ, особенно в области высоких энергий. Большой адронный коллайдер (БАК) — ключевой инструмент для таких поисков, предоставляющий возможность проверить СМ при максимально доступных на сегодняшний день энергиях.

В физике высоких энергий процессы рождения Z-бозона, сопровождающиеся рождением струй (Z+jets) играют важную роль. Они служат инструментом для проверки предсказаний квантовой хромодинамики (QCD) [1], изучение таких процессов помогает калибровать и проверять модели Монте-Карло: совмещение электрослабого сигнала с КХД-струями позволяет оценить, насколько точно генераторы воспроизводят процессы излучения глюонов и адронизации. Кроме того, события с Z+jets часто выступают существенным фоном в поисках новой физики и прецизионных измерениях, что делает их изучение особенно актуальным [2].

Основные диаграммы Фейнмана для процесса с рождением Z+jets показаны на рис. 1. Диаграмма слева соответствует событиям типа Z+1 струя, где импульс Z-бозона уравнивается одной высокоэнергичной струей, разлетаясь с ней в противоположные стороны (“back-to-back”). Справа показан процесс более высокого порядка: Z-бозон испускается с кварковой линии. Излучение дополнительных глюонов приводит к событиям с несколькими струями. В такой конфигурации минимальное угловое расстояние $\Delta R_{min}(Z, j)$ между

Z и ближайшей струей мало (Z-бозон направлен почти коллинеарно струе) [3].

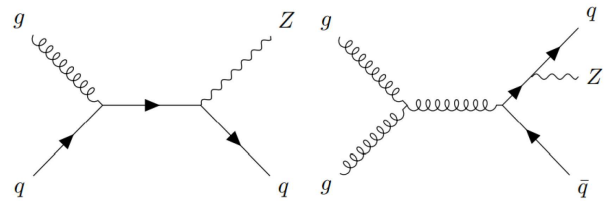


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для рождения Z+jets. Слева — события типа Z + 1 струя, справа — двуструйные события

В данном анализе использован открытый набор данных эксперимента ATLAS за 2015–2016 г. протон-протонных столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ ТэВ с интегральной светимостью $\sim 10\text{fb}^{-1}$. Рассматривались события распада Z-бозона на пару лептонов (электронов или мюонов) в сопровождении адронных струй [4].

Целью работы является сравнение характеристик событий с рождением Z-бозона и струй в открытых данных эксперимента ATLAS и опубликованных результатах ATLAS. В частности, проведено сопоставление распределений по количеству струй, углам вылета струй и по поперечному импульсу струи.

Аналогичный анализ выполнен и в эксперименте CMS при энергии столкновения $\sqrt{13}$ ТэВ [5], что подчёркивает общий интерес к процессам Z+jets.

1. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ И ОТБОРА

1.1. Детектор ATLAS

Эксперимент ATLAS [6] на БАК — это многоцелевой детектор частиц с цилиндрической геометрией и почти полным покрытием по телесному углу 4π . Он включает внутреннюю трековую систему, электромагнитные и адронные калориметры, а также мюонный спектрометр. Внутренняя трековая система состо-

* snarskaia.ms20@physics.msu.ru

† lns@physics.msu.ru

ит из кремниевых пиксельных и микростриповых детекторов и трекового детектора переходного излучения, снаружи она окружена тонким сверхпроводящим соленоидом, создающим магнитное поле 2 Тл. За ним расположены калориметры: электромагнитный калориметр на свинце/жидком аргоне (LAr) и адронные калориметры, разделенные на пять областей — три блока с абсорберами из стали и сцинтилляторами и два торцевых сектора, оснащенных LAr-калориметрами. Мюонные камеры расположены в поле сверхпроводящих тороидальных магнитов с интегральной величиной поля 1.5–5.5 Тл.

1.2. Используемые данные

ATLAS OpenData

В данном анализе использованы открытые данные эксперимента ATLAS Open Data за 2015–2016 г. [4] при энергии протон-протонных столкновений $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (Run 2) с интегральной светимостью около 10 фб^{-1} . Рассматриваются события распада Z-бозона на пару лептонов одного типа (электронов или мюонов) в сопровождении адронных струй. Анализ проводился на реконструированных объектах детекторного уровня (лептоны, струи и др.) с использованием пакета ROOT.

Основные критерии отбора событий:

1. Для Z-бозона требуется наличие двух противоположно заряженных лептонов (e^+e^- или $\mu^+\mu^-$) с поперечным импульсом $p_T > 25$ ГэВ у лептона с максимальной энергией в интервале псевдобыстроты $|\eta| < 2.5$. Инвариантная масса пары лептонов $m_{\ell\ell}$ должна находиться в окне около массы Z-бозона: $91 \text{ ГэВ} \pm 20 \text{ ГэВ}$.
2. Струи реконструируются с помощью алгоритма анти- k_T [7] с радиусом объединения $R = 0.4$. Для анализа отбираются струи с поперечным импульсом $p_T > 30$ ГэВ при $|\eta| < 2.5$.

Если выбранный лептон от распада Z и струя оказываются близко друг к другу (например, $\Delta R(\ell, \text{jet}) < 0.4$), то такая струя исключается из рассмотрения. Это исключает двойной учёт одного и того же адронного ливня как струи и как лептонного объекта.

ATLAS HEPdata

Для сравнения использовались данные с открытого портала опубликованных результатов HEPdata [8]. В анализе, проведенном в эксперименте ATLAS, при энергии столкновений 13 ТэВ и интегральной светимости 139 фб^{-1} для событий типа Z+jets [3] отбираются объекты, которые содержат кандидата Z-бозона,

распадающегося на пару одинаковых по типу противоположно заряженных лептонов (e^+e^- или $\mu^+\mu^-$). Каждый лептон проходит отбор с ограничением по поперечному импульсу $p_T \geq 25$ ГэВ и по псевдобыстроте для электронов $|\eta| < 2.5$ и для мюонов $|\eta| < 2.4$. Инвариантная масса пары лептонов находится в интервале 71–111 ГэВ, соответствующему массе Z-бозона. Струи реконструируются по анти- k_t алгоритму с радиусом $R = 0.4$ и должны соответствовать ограничению $p_T \geq 100$ ГэВ при значениях быстроты $|y| < 2.5$. Для исключения двойного учета объектов применяется перекрестное удаление: сначала удаляются струи с $p_T \geq 30$ ГэВ на расстояниях $\Delta R < 0.2$ от любого лептона, затем удаляются лептоны в радиусе $\Delta R < 0.4$ от оставшихся струй. Итоговый набор событий состоит из объектов, удовлетворяющих требованиям: наличие как минимум одной струи и кандидата Z-бозона с инвариантной массой лептонов в интервале $71 \leq m_{\ell\ell} \leq 111$ ГэВ.

В эксперименте ATLAS выполнены измерения инклюзивного рождения струй при энергии столкновений 13 ТэВ и при малой интегральной светимости 3.2 фб^{-1} [9]. Для выделения инклюзивных струй используется алгоритм анти- k_t с радиусом $R = 0.4$. Рассматриваются струи с $p_T \geq 100$ ГэВ в диапазоне быстроты $|y| < 3$. Отбираются события, содержащие по крайней мере одну такую струю. Дополнительно требуется наличие первичной вершины с ≥ 2 треками. Анализ в эксперименте ATLAS приведен на уровне частиц с применением процедуры "unfolding" в то время как объекты набора открытых данных анализируются на уровне реконструированных объектов детектора. Это приводит к дополнительным различиям при сравнении распределений.

2. АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С РОЖДЕНИЕМ Z-БОЗОНА И СТРУЙ

2.1. Распределение по числу струй

Распределения по числу струй в событиях Z+jets на основе 10 фб^{-1} открытых данных [4] сравниваются с аналогичными распределениями в опубликованных данных ATLAS (139 фб^{-1}) [3]. Дифференциальные сечения по числу струй в событиях Z+jets при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ представлены на рис. 2 и рис. 3 для двух областей: инклюзивная область (струи с $p_T > 100$ ГэВ, рис. 2) и область высоких поперечных импульсов (струи с $p_T > 500$ ГэВ, рис. 3).

Распределения на рис. 2 для инклюзивной области с поперечным импульсом $p_T > 100$ ГэВ подобны для обоих наборов данных, максимальное число струй в событии достигает более 5. Наблюдается быстрое уменьшение дифференциального сечения с увеличением числа струй, что соответствует ожиданиям квантовой хромодинамики. На рисунке показаны статистические погрешности для распределений, полученных на основе открытых данных. С учетом этих

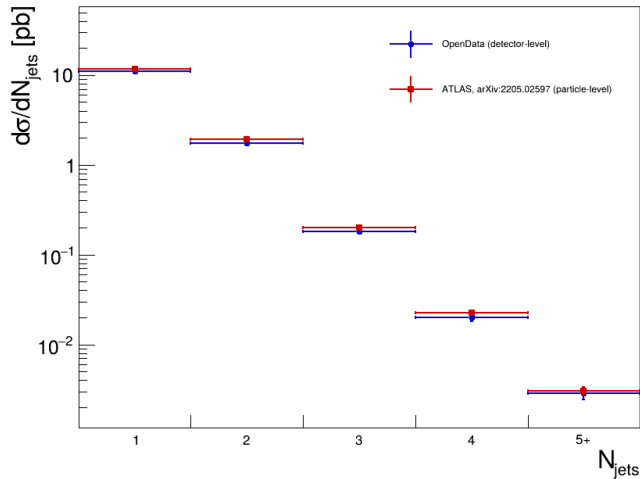


Рис. 2. Дифференциальные сечения по числу струй в событиях Z +jets при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (инклюзивная область, $p_T > 100$ ГэВ) по данным ATLAS [3] - красные точки. Синие точки – результат на основе открытых данных ATLAS

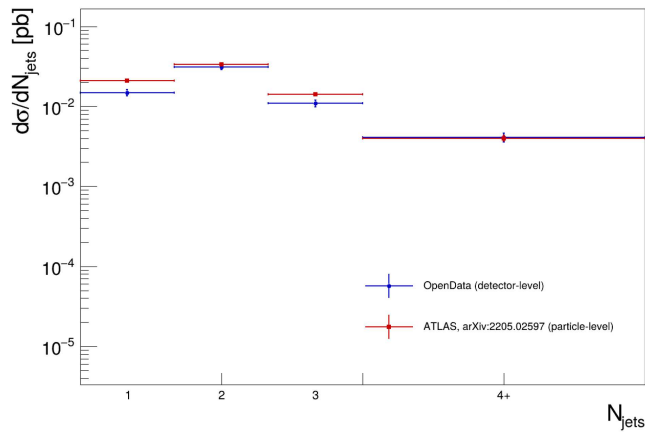


Рис. 3. Дифференциальные сечения по числу струй в событиях Z +jets при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (область высоких поперечных импульсов, ≥ 1 струя с $p_T > 500$ ГэВ). Красные точки – данные ATLAS [3], синие точки – результат на основе открытых данных

погрешностей распределения согласуются в пределах неопределенностей.

На рис. 3 представлены распределения по количеству струй для событий с наличием высокоэнергетичной струи с поперечным импульсом $p_T > 500$ ГэВ. Данные для двух наборов демонстрируют согласие на уровне формы распределений. Наблюдается преобладание событий при малых значениях числа струй. Это согласуется с тем, что в такой области значительную долю составляют события с одной доминирующей высокоэнергетичной струей, уравнивающей Z -бозон по поперечному импульсу.

Различия обусловлены отбором событий, меньшей интегральной светимостью набора открытых данных, а также тем, что сравнение проводится

между результатами на уровне реконструированных объектов и опубликованными результатами ATLAS на уровне частиц.

Дополнительно рассчитаны интегральные сечения в двух областях отбора. В инклюзивной области с поперечным импульсом $p_T > 100$ ГэВ: $\sigma_{incl}^{open} = 12.95 \pm 0.03$ пб для набора открытых данных и $\sigma_{incl}^{ATLAS} = 13.91 \pm 0.41$ пб для результатов эксперимента ATLAS. В области высоких поперечных импульсов с $p_T > 500$ ГэВ: $\sigma_{high}^{open} = 61.2 \pm 1.6$ фб – открытые данные, $\sigma_{high}^{ATLAS} = 72.36 \pm 2.38$ фб – результаты эксперимента ATLAS.

2.2. Угловые распределения

На рис. 4 слева представлены распределения по минимальному угловому расстоянию между направлением движения Z -бозона, определяемым по направлению двух лептонов, и ближайшей к нему струи $\Delta R_{min}(Z, ; j)$. На рис. 4 справа показаны отношения поперечных импульсов Z -бозона и ближайшей к нему струи $r(Z, ; j) = p_T(Z)/p_T(jet)$. Аналогично предыдущему сравнению рассматриваются данные, полученные из открытого набора 10 фб^{-1} Open Data [4] и опубликованные результаты ATLAS (139 фб^{-1}) [3], рассматриваются события с наличием Z -бозона и хотя бы одной струей с поперечным импульсом ≥ 500 ГэВ.

Распределение по $\Delta R_{min}(Z, j)$ демонстрирует четкий пик при больших значениях ΔR , максимум распределения наблюдается около $\Delta\varphi \approx \pi$ (180°), что указывает на то, что лидирующая струя во многих случаях уравнивает Z -бозон по поперечному импульсу. Z -бозон и струя разлетаются в противоположные направления: конфигурация «back-to-back», что соответствует первой диаграмме на рис. 1. В области малых угловых расстояний между Z и струей распределения для обоих наборов данных различаются. События, при которых Z -бозон направлен практически коллинеарно струе, соответствующие второй диаграмме на рис. 1, наблюдаются при значениях минимального углового расстояния $\Delta R_{min}(Z, j) \leq 1.4$.

Распределение по отношению поперечных импульсов $r(Z, j)$ имеет максимум при $r \approx 1$. Это означает, что в большинстве событий поперечные импульсы Z -бозона компенсируются струей с максимальным p_T . Преобладание событий с $r \sim 1$ подтверждает преимущество конфигураций, где Z и струя сбалансированы по p_T ("back-to-back"). События с коллинеарным направлением Z -бозона и ближайшей к нему струи ожидаются при $r \leq 0.4$.

Рассчитана доля событий, удовлетворяющих критерию коллинеарного направления ($\Delta R_{min}(Z, j) \leq 1.4$, $r \leq 0.4$): $f^{open} = 0.12 \pm 0.01$ для набора открытых данных и $f^{ATLAS} = 0.148 \pm 0.008$ для опубликованных результатов ATLAS. Остаток преимущественно составляют топологии, при которых Z -бозон и струя разлетаются в противоположных направлениях.

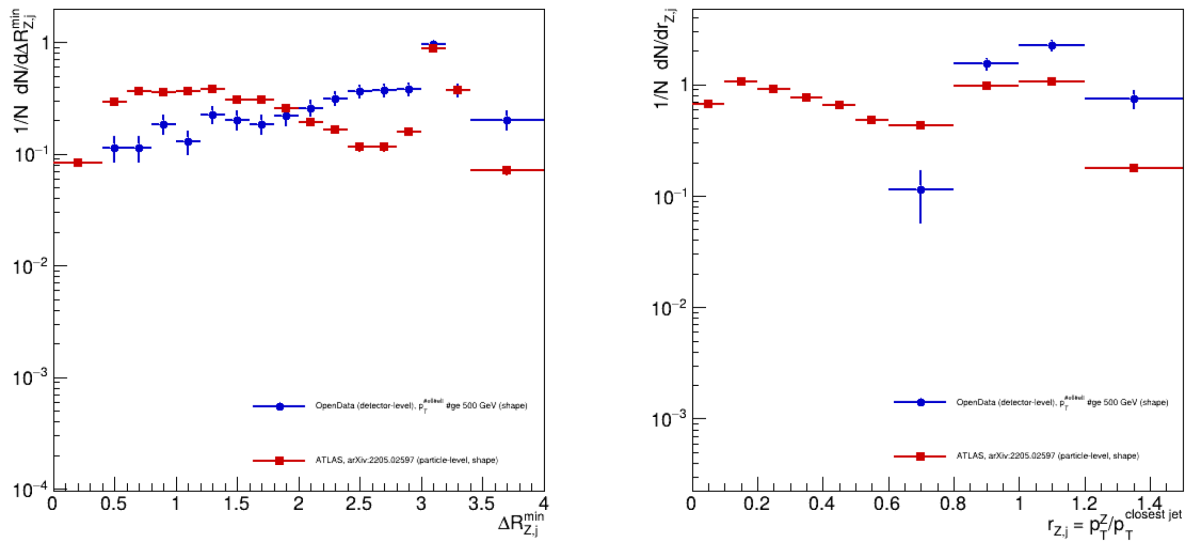


Рис. 4. Дифференциальные сечения в области высоких поперечных импульсов (≥ 1 струя, $p_T \geq 500$ ГэВ): слева — распределение по минимальному угловому расстоянию между Z -бозоном и ближайшей струей ($\Delta R_{\min}(Z, j)$), справа — по отношению поперечных импульсов $r(Z; j) = p_T(Z)/p_T(\text{jet})$. Красные точки — данные ATLAS [3], синие точки — результат на основе открытых данных

2.3. Распределение по поперечному импульсу

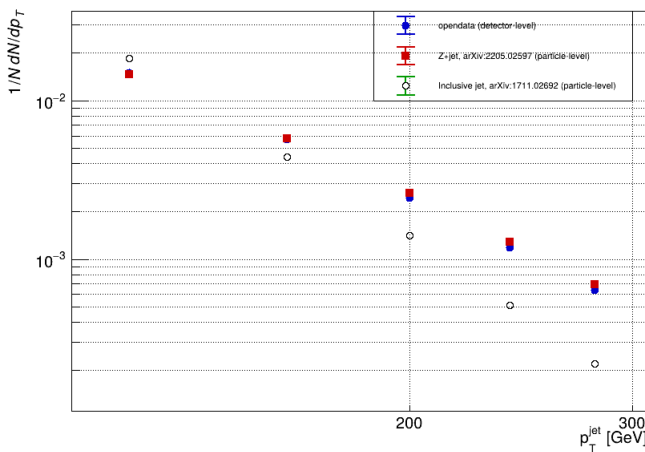


Рис. 5. Нормированное на число событий распределение по поперечному импульсу ведущей струи p_T для событий Z +jets (синие точки — открытые данные, красные — ATLAS HERdata [3]) в сравнении с аналогичным спектром для инклюзивных струйных событий (открытые точки — ATLAS HERdata [9])

В данном разделе рассматривается спектр по поперечному импульсу струй. На рис. 5 представлено сравнение нормированных на число событий распределений p_T ведущей (наиболее энергичной) струи в событиях Z +jets для опубликованных результатов ATLAS (139 fb^{-1}) [3], открытых данных Open Data (10 fb^{-1}) [4] и событий инклюзивного рождения струй ATLAS

(3.2 fb^{-1}) [9]. Распределения по p_T ведущей струи в обоих случаях имеют схожую форму спектра, распределение на основе открытых данных хорошо согласуется с результатами ATLAS в пределах погрешностей. Наблюдается, что спектр p_T струй в событиях Z +jets значительно более жесткий, чем в инклюзивных событиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ характеристик событий с рождением Z -бозона и струй на основе открытых данных эксперимента ATLAS и результатов эксперимента ATLAS, представленных на портале HepData. Установлено, что в наборе открытых данных распределение по числу струй, сопровождающих рождение Z -бозона, близко к наблюдаемому в официальных результатах ATLAS. Дифференциальное сечение уменьшается с ростом числа струй.

В наборе открытых данных преобладают события, в которых импульсы Z -бозона и струи близки, а направления почти противоположны, что соответствует левой диаграмме на рис. 1. Другая группа событий с $r \leq 0.4$ и небольшими угловыми расстояниями относится к правой диаграмме на рис. 1 и соответствует конфигурации, при которой Z -бозон направлен почти коллинеарно струе.

Распределения поперечного импульса Z -бозона и ведущей струи в событиях Z +jet в открытых данных хорошо согласуются с опубликованными распределениями ATLAS. В событиях с рождением Z -бозона спектры более жесткие, чем при инклюзивном рождении струй.

Таким образом, распределения на основе открытых данных воспроизводят основные особенности официальных результатов. События типа Z+jets обладают

уникальными характеристиками, играют важную роль при проверке предсказаний квантовой хромодинамики и уточнении партонных распределений в протоне.

-
- [1] *Gross D.J., Wilczek F.* // Asymptotically Free Gauge Theories. I. *Phys. Rev. D* **8**, 3633 (1973).
- [2] *Aad G., Abbott B., Abbott D.C.* et al. // ATLAS Collaboration *Phys. Rev. D* **103**, 112006 (2021).
- [3] *Aad G., Abbott B., Abbott D.C.* et al. // ATLAS Collaboration *J. High Energ. Phys.* **80** (2023).
- [4] *ATLAS Collaboration* // ATLAS 13 TeV samples collection with at least two leptons (electron or muon), for 2020 Open Data release.
- [5] *Tumasyan A., Adam W., Andrejkovic J.W.* et al. // CMS Collaboration. *Phys. Rev. D* **108**, 052004 (2023).
- [6] *Aad G., Abat E., Abdallah J.* et al. // ATLAS Collaboration *JINST* **3**, S08003 (2008).
- [7] *Cacciari M., Salam G.P., Soyez G.* // The anti-kt jet clustering algorithm, *J. High Energ. Phys.* **2008** 063 (2008).
- [8] <https://www.hepdata.net/>
- [9] *Aaboud M., Aad G., Abbott B.* et al. // ATLAS Collaboration *J. High Energ. Phys.* **2018** 195 (2018).

Jet characteristics in pp collisions in events with Z-boson production

M. S. Snarskaya^{1a}, L. N. Smirnova^{2b}

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: ^asnarskaia.ms20@physics.msu.ru, ^blns@physics.msu.ru

This work aims to compare the characteristics of events with a produced Z boson accompanied by jets, using open data from the ATLAS experiment and published results. The distributions of the jet multiplicity, emission angles, and transverse momentum are compared. These processes are important for refining the proton's structure functions.

PACS: 13.87.Fh.

Keywords: hadron jets, Z boson production with jets, Large Hadron Collider, ATLAS experiment.

Received 26 March 2026.

Сведения об авторах

1. Снарская Мария Сергеевна — студентка, e-mail: snarskaia.ms20@physics.msu.ru.
2. Лидия Николаевна Смирнова — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 932-89-72, e-mail: lns@physics.msu.ru.