

Измерение заряда струй в pp -соударениях в эксперименте ATLAS

И. А. Кочергин*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 19
(Статья поступила 25.03.2020; подписана в печать 26.03.2020)

Исследование заряда струи может дать информацию о процессах фрагментации и, следовательно, помочь в уточнении теории квантовой хромодинамики (КХД). В работе проводится анализ распределения заряда струй, компенсирующих рождение B^+ и B^- -мезонов, наблюдается преобладание глюонных струй. Результаты анализа сравниваются с теоретическими ожиданиями.

PACS: 84.37.+q

УДК: 539.12.122

Ключевые слова: B -мезоны, поперечный импульс, заряд струи, PYTHIA8

ВВЕДЕНИЕ

В результате высокоэнергетичных столкновений протонов их составляющие приобретают большие поперечные импульсы. Из-за цветовых сил вылет одиночного кварка или глюона невозможен, поэтому в ходе процесса фрагментации образуются струи — коллимированные пучки частиц. Детали процесса, который лежит в основе фрагментации кварков и глюонов в бесцветные нейтральные адроны, до конца не изучены. Формирование струи представляет собой сложную многомасштабную проблему, включающую важные вклады эффектов КХД, которые не могут быть описаны теорией возмущений. Поэтому для углубления понимания процессов КХД необходимо измерение и исследование основных величин, связанных с фрагментацией, например, измерение электрического заряда струи.

С использованием анти- k_t метода происходит идентификация струй среди множества рожденных частиц. Это позволяет исследовать распределение заряженных частиц в струе и определить суммарный заряд струи. Эти данные могут быть использованы для разных целей. Во-первых, для уточнения и поправки теоретических расчетов и теорий цветовых взаимодействий в КХД. Во-вторых, для калибровки программ генераторов. Так, измерения структуры струй в протон-протонных (pp) столкновениях при энергии центра масс $\sqrt{s} = 7$ ТэВ уже использовались коллаборацией ATLAS для оптимизации параметров Монте-Карло генератора PYTHIA 8 [1]. Измерение среднего числа заряженных частиц внутри струй при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ также использовалось в качестве входных данных для последних разработок в программе генератора Herwig 7. Дальнейшие измерения множественности струи и распределения энергии между частицами струи обеспечат дополнительные ограничения для будущей оптимизации генераторов. Добавление большего количества наблюдаемых и измерение их дифференциальных распределений улучшит калибровку программ генераторов.

1. СТРУИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS

В эксперименте ATLAS измерены характеристики струй при энергии соударения 13 ТэВ, светимости $33fb^{-1}$ и проведено сравнение с данными генераторов для треков заряженных частиц n_{tracks} и долей поперечного импульса струи ζ [2]:

$$\zeta = \frac{p_T^{particle}}{p_T^{jet}}.$$

Эти результаты показаны на рис. 1 для струй с $1000 < p_T < 1200$ ГэВ.

Для удобства сравнения с модельными расчетами заряд струй Q_J измеряется с использованием схемы взвешивания зарядов частиц q_i по величинам их поперечных импульсов $p_{T,i}$:

$$Q_J = \frac{1}{(p_{T,J})^k} \sum_{i \in Tracks} q_i \times (p_{T,i})^k. \quad (1)$$

Параметр k является свободным параметром регуляризации. В работе [3] проведены измерения средних зарядов струй от легких кварков (u, d, \bar{u}, \bar{d}) при различных значениях коэффициента $k = 0.3, 0.5, 0.7$, результаты представлены на графиках рис. 2.

Как видно из результатов, меньшее значение k соответствует большей значимости частиц с малым поперечным импульсом, и наоборот, для учета частиц с большим поперечным импульсом необходимо брать значения k , близкие к 1. Малый заряд струй при малых значениях поперечного импульса обусловлен подавляющим вкладом глюонных струй.

2. ЗАРЯД СТРУЙ В-МЕЗОНОВ

Представляет интерес рассмотреть заряды струй от тяжелых кварков. Возможно проанализировать заряд струй от b -кварка, используя результаты, приведенные в статье [4] — распределение зарядов струй, компенсирующих образование B^+ и B^- мезонов. Это распределение приведено на графике рис. 3.

*E-mail: iliya.a.kochergin@gmail.com

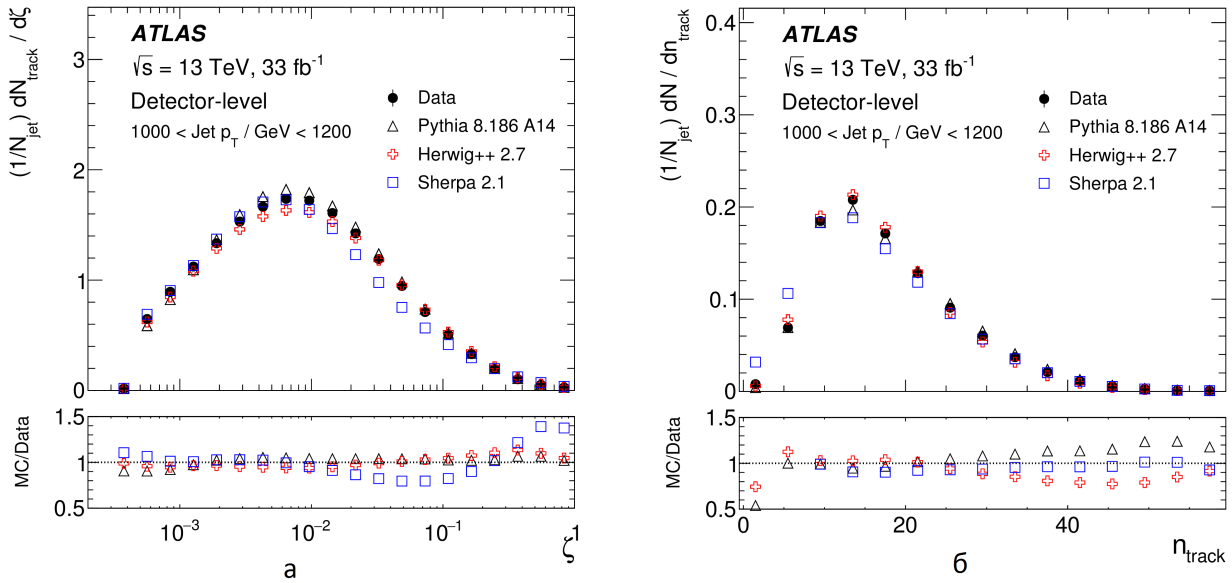


Рис. 1: Распределения от (а) доли поперечного импульса струи $\zeta = \frac{p_T^{particle}}{p_T^{jet}}$ и (б) треков заряженных частиц n_{tracks} , полученные в эксперименте ATLAS [2]

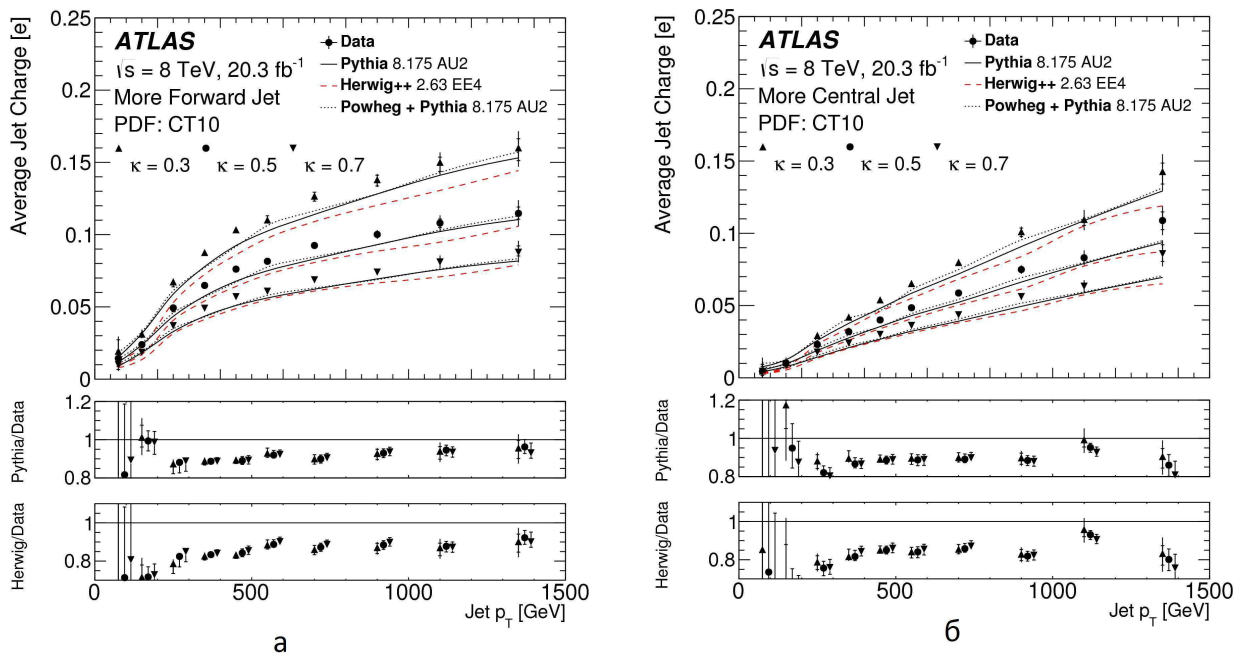


Рис. 2: Распределение среднего заряда струи в зависимости от поперечного импульса для разных значений $k = 0.3, 0.5, 0.7$ для (а) более передних струй и (б) более центральных струй, полученное в эксперименте ATLAS [3]

В рассматриваемом распределении отбирались кандидаты с $p_T > 2.5 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.5$, таким образом свободный параметр полагался $k = 1.1$ — соответствующий центральной области и высокому поперечному импульсу.

Сходные распределения, но для струй, содержащих B^+ и B^- мезоны, могут быть получены в результате моделирования с использованием Монте-Карло генератора PYTHIA 8.2. Отбор струи производился по ограничению углового отклонения от найденного B^+

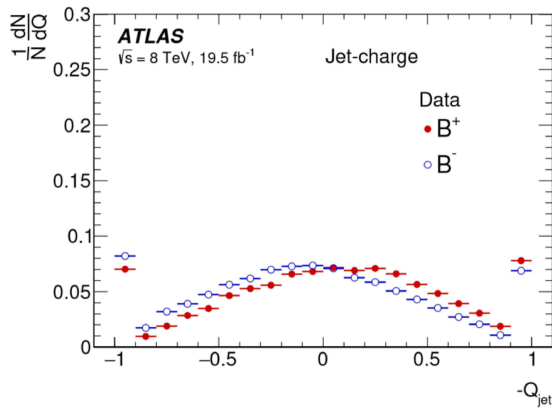


Рис. 3: Распределение заряда оппозитных струй для кандидатов в B^+ и B^- сигналы, $k = 1.1$, получены в работе [4]

или B^- мезона $\theta^2 + \phi^2 < r^2$, где принимается $r^2 < 0.3$. Взвешенный заряд струи рассчитывался с параметром $k = 1.1$. Набор статистики производился на основе 20.000.000 pp -соударений при энергии в 8 ТэВ. При расчете учитывались основные процессы КХД (hard QCD):

рассеяние глюона на глюоне

$$gg \rightarrow gg; gg \rightarrow q\bar{q},$$

рассеяние глюона на кварке

$$qg \rightarrow qg; \bar{q}g \rightarrow \bar{q}g,$$

рассеяние кварка на кварке или антикварке

$$qq' \rightarrow qq'; q\bar{q}' \rightarrow q\bar{q}'; \bar{q}q' \rightarrow \bar{q}q'; q\bar{q} \rightarrow gg; q\bar{q} \rightarrow q'\bar{q}.$$

а также многокварковые процессы и процессы с образованием тяжелых ароматов c , b или t . Результаты представлены в гистограммах 4 и 5.

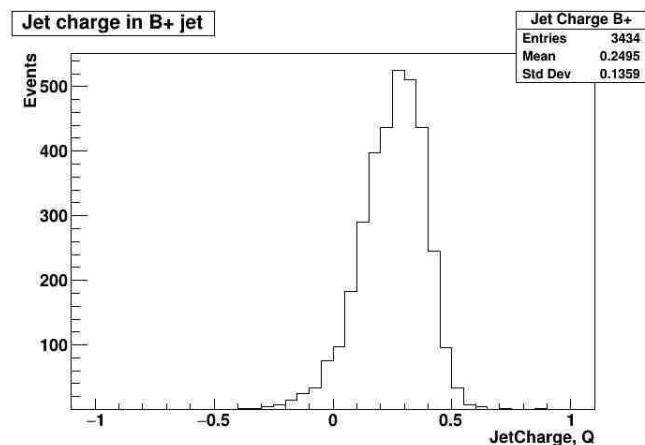


Рис. 4: Полученное при моделировании распределение заряда струи B^+ мезона

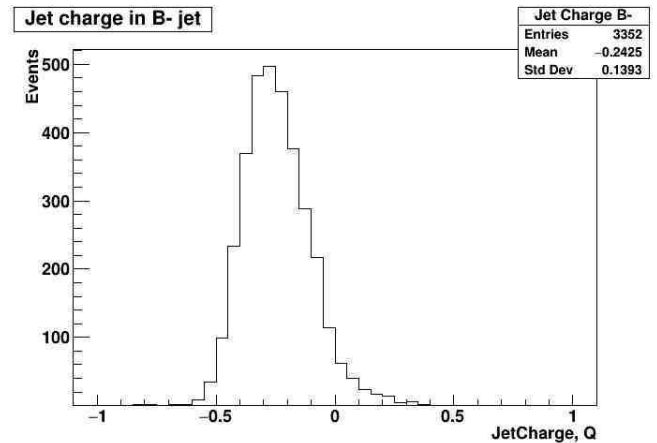


Рис. 5: Полученное при моделировании распределение заряда струи B^- мезона

Полученные в результате моделирования распределения заряда струй для B^+ и B^- мезонов согласуются с результатами измерений, представленных в статье [4]. Средний взвешенный заряд струи около 0.24 для B^+ мезонов и -0.24 для B^- мезонов. Основной вклад в его значение вносит окружение B мезона. Также наблюдается меньшая дисперсия, по сравнению с экспериментальным значением. Это можно объяснить слишком узким отбором струи при моделировании. Кроме того, эксперимент учитывает струи, компенсирующие рождение B^- мезона, а значит и струи, образованные глюонами, то есть с нулевым зарядом образующей частицы.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Используя разность распределений B^+ и B^- были выделены отличия, обусловленные зарядом адронов. С помощью программы Wolfram Mathematica 10.2 получены исходные параметризации для аппроксимации зарядов струй. Результаты аппроксимаций приведены на графиках рис. 6 и 7.

Найденные средние значения зарядов струй от b и \bar{b} кварков:

$$q_b = -0.46 \pm 0.02,$$

$$q_{\bar{b}} = 0.46 \pm 0.02.$$

При этом использовалось предположение, что симметричная (повторяющаяся) часть распределения обусловлена глюонами. В результате наблюдается примерно 7.5-кратное преобладание струй от глюонов над струями от кварков:

Спектр B^+ : глюоны: 89%, кварки: 11%.

Спектр B^- : глюоны: 87%, b -кварки: 13%.

Результаты близки к результатам работы [5], где в ходе моделирования с использованием Монте-Карло

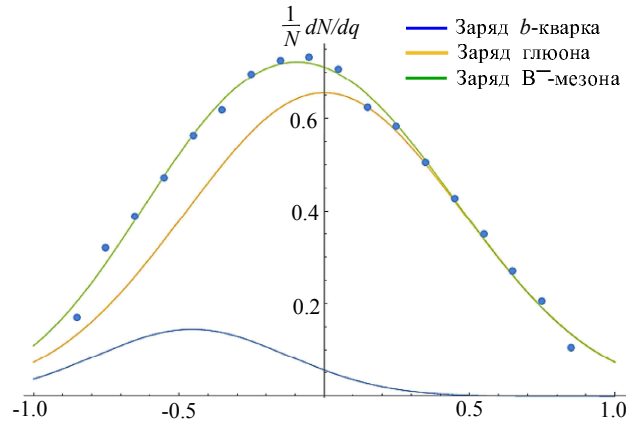


Рис. 6: Распределение заряда B^- -мезона и его аппроксимация с помощью распределений зарядов глюонной струи и струи b -кварков

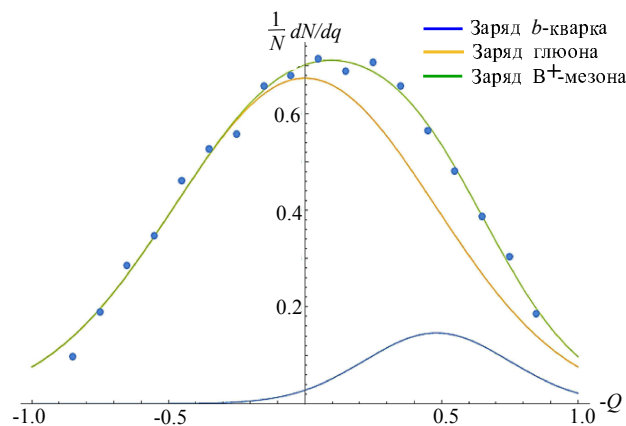


Рис. 7: Распределение заряда B^+ -мезона и его аппроксимация с помощью распределений зарядов глюонной струи и струи b -кварков

генератора RUTHIA6.420 получены сечения b кварков для области псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$ и поперечного импульса $p_T > 10$ ГэВ, на основе которых произведена оценка кварковой составляющей:

$$N_{quark} = 19\%.$$

Данное значение несколько отличается от полученного ранее из распределений зарядов струй глюонов и кварков. Объясняется это тем, что моделирование генератором RUTHIA 6.420 не включает процессы нелидирующего порядка NLO. В результате же этих процессов преобладание глюонов усиливается.

Также, можно оценить значения средних зарядов струй от b и \bar{b} кварков из теории. Для этого необходимо учесть, что образование частиц, содержащих b кварк, чей заряд в действительности измеряется детектором, происходит с различной вероятностью. Как было сказано в начале, за это отвечает процесс фрагментации. В работе [6] в ходе анализа количественных данных по распадам $B_S^0 \rightarrow J/\psi\phi$ и $B_D^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ определяется коэффициент фрагментации

$$f_s/f_d = 0.240 \pm 0.004(stat) \pm 0.010(sistematic) \pm \pm 0.017(theor) = 0.24 \pm 0.03.$$

Полученные значения $q_{\bar{b}} = 0.446$ и $q_b = -0.446$ соответствуют экспериментальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием Монте-Карло генератора RUTHIA 8.2 получены распределения зарядов струй, содержащих B^+ и B^- мезоны. Основной вклад в средний заряд струи вносит окружение B мезонов. Проведен анализ экспериментальных данных по распределению зарядов струй, компенсирующих рождение B^+ и B^- мезонов. Выделены распределения зарядов кварковых и глюонных струй. Наблюдаемое количественное отношение и средний заряд согласуются с теоретическими ожиданиями.

-
- [1] *ATLAS Collaboration* // ATLAS Pythia 8 tunes to 7 TeV data. ATL-PHYS-PUB-2014-021, 2014.
- [2] *The ATLAS Collaboration* // Properties of jet fragmentation using charged particles measured with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$. CERN-EP-2019-090.
- [3] *The ATLAS Collaboration* // Measurement of jet charge in dijet events from $\sqrt{s} = 8\text{TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector. CERN-PH-EP-2015-207.
- [4] *The ATLAS Collaboration* // Measurement of the CP-violating phase ϕ_s and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS. JHEP. 2016.
- [5] *Smirnova L. N., Turchikhin S. M.* // Expected b-production at the LHC. Lomonosov Moscow State University Skobel'syn Institute of Nuclear Physics.
- [6] *The ATLAS Collaboration* // Determination of the ratio of b-quark fragmentation fractions f_s/f_d in pp-collisions at $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ with the ATLAS detector, CERN-PH-EP-2015-165
- [7] *Sjostrand T., Mrenna S., Skands P.* // JHEP. 2006.
- [8] *Particle Data Group, W.-M. Yao et al.* // J. Phys. 2006. G33.
-

Jet charge measurements in pp collisions at the ATLAS.

I. A. Kochergin

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: iliya.a.kochergin@gmail.com

The research of electric charge can provide information about processes of fragmentation and, therefore, can help to calibration the theory of quantum chromodynamics (QCD). The paper analyzes the distribution of the jets that compensate for the production of B^+ and B^- mesons; the prevalence of gluon jets is observed. The results of the analysis are compared with theoretical expectations.

PACS: 84.37.+q

Keywords: B-meson, transverse momentum, jet charge, PYTHIA8.

Received 25 March 2020.

Сведения об авторе

Кочергин Илья Александрович — студент магистратуры; e-mail: iliya.a.kochergin@gmail.com.
