

Модельный анализ заряда струй в pp -соударениях при энергиях БАК

И. А. Кочергин*

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 25.08.2021; подписана в печать 27.08.2021)

Исследование заряда струй необходимо для уточнения теории фрагментации в квантовой хромодинамики. Также, оно может дать возможность для усовершенствования методов идентификации в соударениях частиц высоких энергий. При этом среди существующих измерений и моделируемый наблюдается недостаток данных по струям от тяжелых ароматов. В данной работе проводится анализ взвешенного заряда струй, содержащих b кварки, в зависимости от метода определения струи и метода вычисления электрического заряда струи путем программного моделирования с помощью Монте-Карло генератора РУТНИА 8.2. Установлены корреляции между типом γ -мезона, типом b или \bar{b} кварка, и электрическим зарядом струи при определенных параметрах выделения струи и вычисления её заряда.

PACS: 13.40.-f, 13.85.-t, 13.58.Hd, 14.40.-n, 29.27.-a

УДК: 539.12.122

Ключевые слова: B -мезоны, B_s^0 -мезоны, поперечный импульс, заряд струи, радиус струи, регуляризационный параметр, фрагментация струй, РУТНИА8.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования фундаментальных частиц и их взаимодействий необходимы очень высокие энергии, которые можно получить только на коллайдерах. Коллайдером с самой высокой энергией соударения является Большой адронный коллайдер (БАК, LHC), разгоняющий пучки протонов до энергий 6.5 ГэВ (порядка 10^6 МэВ) и больше. Столь высокие энергии соударений позволяют получать редкие частицы, в том числе кварки и глюоны, с высокими поперечными импульсами и изучать их свойства. Из-за сильного взаимодействия между кварками и глюонами (обмена цветными глюонами) существование одиночного свободного кварка или глюона невозможно. В реальности такая частица — результате процесса фрагментации образует струю — коллимированный пучок адронов. В основе фрагментации кварков и глюонов в бесцветные адроны лежат процессы квантовой хромодинамики (КХД), которые не могут быть описаны теорией возмущений. Таким образом актуальной задачей является исследование струй, и, в частности, электрического заряда струй и возможности его использования для определения природы частицы, образовавшей струю. Особое значение такая идентификация имеет для струй, образованных тяжелыми c и b кварками.

Одним из наиболее простых и наглядных значений при описании струй является коэффициент фрагментации f_q — число, показывающее относительную вероятность присоединения к образующему партону (в данном случае b -кварку) других партонов, например, d - или s -кварка. Фундаментальной величиной является функция фрагментации $D_p^h(z, E)$, которая описывает вероятность нахождения адрона h с энергетической долей z партона p , имеющего энергию E [1]. Попереч-

ный импульс струи, p_T , является лучшим показателем начального масштаба (μ) эволюции струи. А использование информации о заряде частиц предоставляет путь для измерений, связанных с одиночными адронами внутри струи, из которых можно получить $\sum_h D_p^h$.

Выделение или формирование струй среди множества рожденных частиц происходит с использованием специальных алгоритмов, в настоящее время обычно используется анти- k_T алгоритм [2]. Если у частицы с большим поперечным импульсом, более нескольких ГэВ (так называемой "жесткой"), нет аналогичных частиц на расстоянии $2R$ в пространстве псевдобыстроты η и азимутального угла ϕ , где $R^2 = (\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$, то все частицы с меньшими p_T в круге радиуса R объединяются в одну струю. В результате получается идеальная коническая струя. В случае, если есть частица с большим p_T на расстоянии меньше $2R$, то частицы с малыми p_T относятся к той, для которой величина $d_{i,j}$ будет минимальной. Таким образом струи будут разделены некой линией, и граница будет определена из соотношения поперечных импульсов частиц с максимальными поперечными импульсами p_{T1} и p_{T2} . Для определения заряда струи также нет унифицированной схемы. Самая простая процедура состоит в том, чтобы суммировать заряд всех частиц, связанных со струей. Для калибровки чувствительности к внешнему излучению добавляется взвешивание заряда по поперечному импульсу частицы в струе. В итоге заряд струи Q_J можно определить как

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

где $Tracks$ — набор треков частиц, связанных со струей J , q_i — заряд (в единицах заряда позитрона) трека i с соответствующим поперечным импульсом $p_{T,i}$, k — свободный параметр регуляризации, p_{TJ} — поперечный импульс струи.

* iliya.a.kochergin@gmail.com

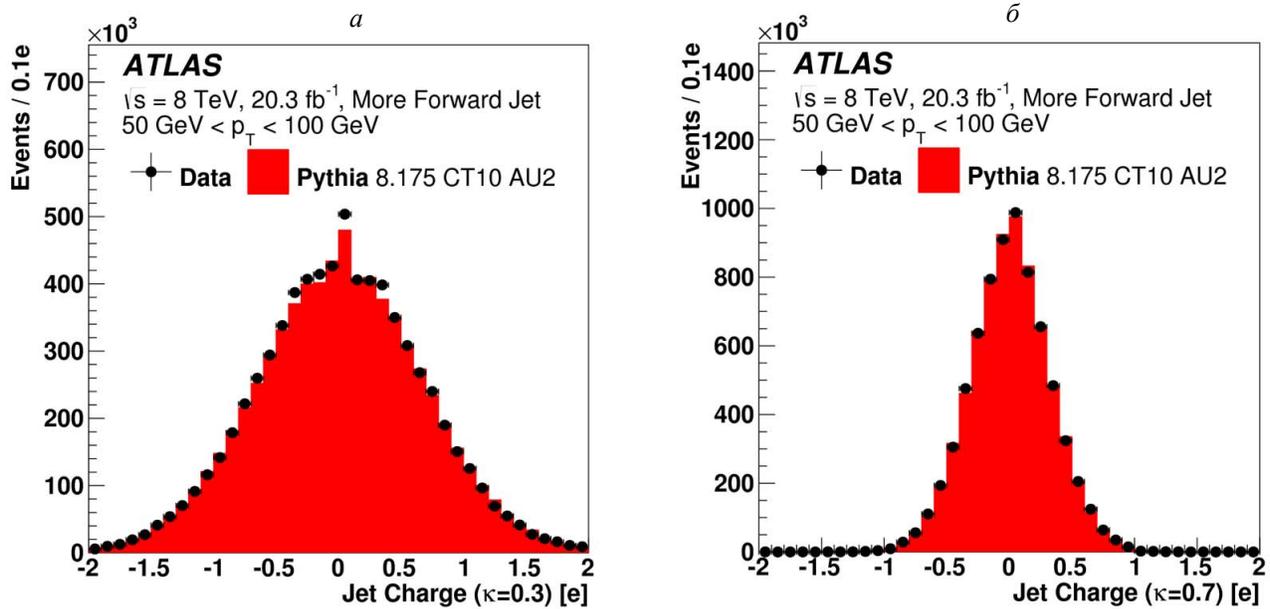


Рис. 1. Распределения электрического заряда передних струй в двухструйных событиях от легких ароматов на уровне детектора в взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, полученных при измерении и при моделировании для поперечных импульсов струй в интервале $50 \text{ GeV} < p_T < 100 \text{ GeV}$, параметр регуляризации $k = 0.3$ (а) и $k = 0.7$ (б) [3]

Целью данной работы является анализ взвешенного заряда струй, содержащих b -кварки, в зависимости от метода определения струи и метода вычисления электрического заряда струи путем программного моделирования с помощью Монте-Карло генератора PYTHIA 8.2. Полученные распределения и зависимости могут быть использованы для разработки методов идентификации струй и B -адронов в эксперименте ATLAS.

1. СТРУИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS

В эксперименте ATLAS проведено измерение зарядов струй в событиях с образованием двух струй во взаимодействиях протонов при энергии в системе центра масс 8 ТэВ на интегральной светимости 20 fb^{-1} [3]. В таких событиях частицы от струй практически не смешиваются, струи образованы легкими кварками (u , d и их антикварками) и глюонами. Сравниваются заряды струй, выделенных методом $\text{anti-}k_T$ при значении $R = 0.4$, полученных в результате измерений на детекторе, измерений после введения поправок на потери частиц и струй, полученных в результате моделирования pp -соударений с помощью Монте-Карло генератора PYTHIA 8.175. В каждой паре струй разделяются струи с большим и меньшим углом вылета относительно направления начальных протонов. Струя с меньшим углом, или большим значением псевдобыстроты, несет большую долю импульса протона и с большей вероятностью образована кварком,

чем глюоном. Такие струи названы передними. Парная струя относится к центральным струям. Измерения выполнены для этих двух групп струй отдельно, что позволяет косвенно оценить вклад струй, образованных глюонами. Сравнение измеренных значений зарядов передних струй до введения поправок с аналогичными расчетными показаны на рис. 1. Видна хорошая согласованность эксперимента с теорией, для различных значений регуляризационного параметра k .

В качестве результатов получены значения средних зарядов струй в зависимости от поперечного импульса струи при различных значениях параметра k (рис. 2) для более передних и более центральных струй. Значения зарядов приведены после введения поправок на эффективность измерения. Хорошо видно, как параметр k регулирует чувствительность струй к мягкому излучению и влияет на полученную величину заряда струи. Наиболее близкий к заряду образовавшего струю партона заряд струи ожидается для значения $k = 0.5$.

При высоких значениях поперечного импульса средний заряд струй возрастает. При низких значениях — средний заряд немногим больше нуля и находится на уровне около 0.01.

В работе [1] исследуется фрагментация струй на основе анализа заряженных частиц в детекторе ATLAS. Струи выделяются $\text{anti-}k_T$ методом, $R = 0.4$, для треков с $p_T > 0.5 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.5$. В работе измерены и смоделированы характеристики самих струй, такие как распределение по поперечному импульсу струи, псевдобыстроте, количеству заряженных треков в струе, приведенному на рисунке 3, и другие. Наблюдается со-

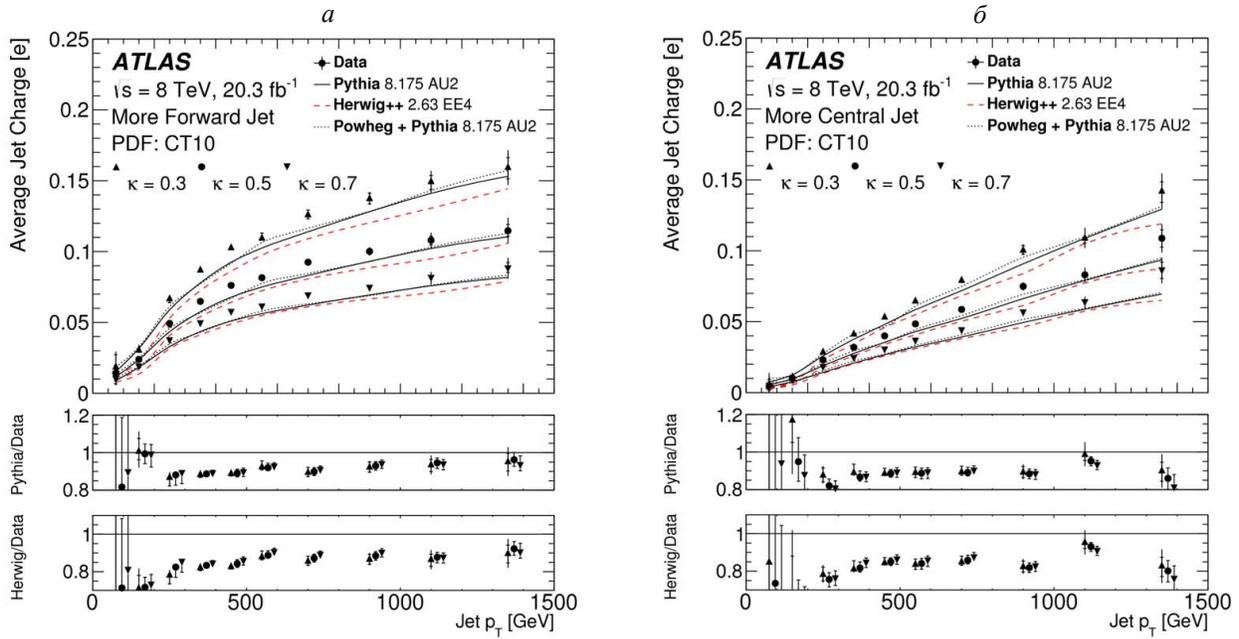


Рис. 2. Распределение среднего заряда струи в зависимости от поперечного импульса струи для разных значений $k = 0.3, 0.5, 0.7$ для (а) более передних струй и (б) более центральных струй в взаимодействиях при энергии 8 ТэВ в эксперименте ATLAS [3]

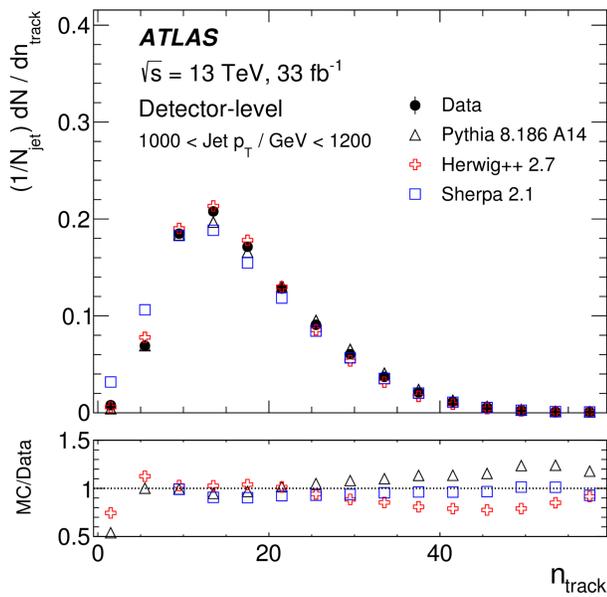


Рис. 3. Распределение на уровне детектора числа треков заряженных частиц n_{tracks} в струях с поперечным импульсом в интервале $1000\text{ GeV} - 1200\text{ GeV}$ в pp взаимодействиях при энергии 13 ТэВ в сравнении с предсказаниями различных генераторов событий [1].

главие измеренных и расчетных характеристик.

Основным результатом анализа является оценка доли глюонной фракции в струях (рис. 4). Показано, что

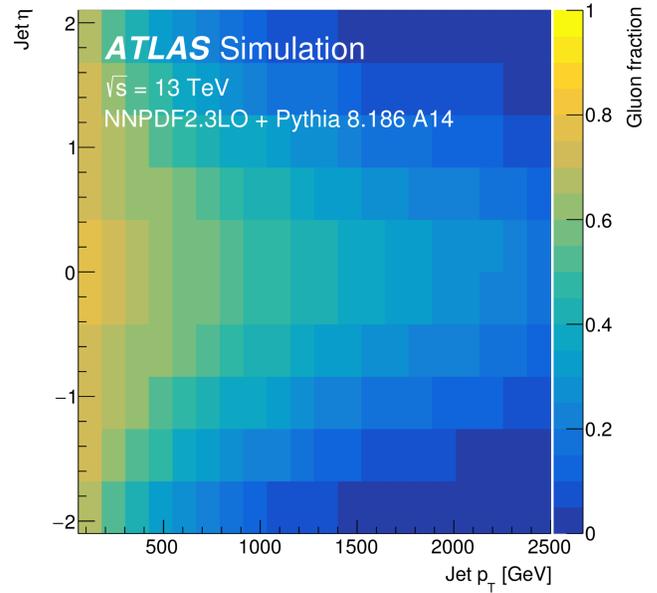


Рис. 4. Доля глюонных струй как функция поперечного импульса струи и псевдобыстроты струи в pp соударениях при энергии 13 ТэВ [1]. Струи от глюонов выделены желтым цветом.

струи от глюонов преимущественно рождаются в центральной области и поперечные импульсы таких струй уменьшаются с увеличением псевдобыстроты.

Проведено исследование глюонной и кварковой со-

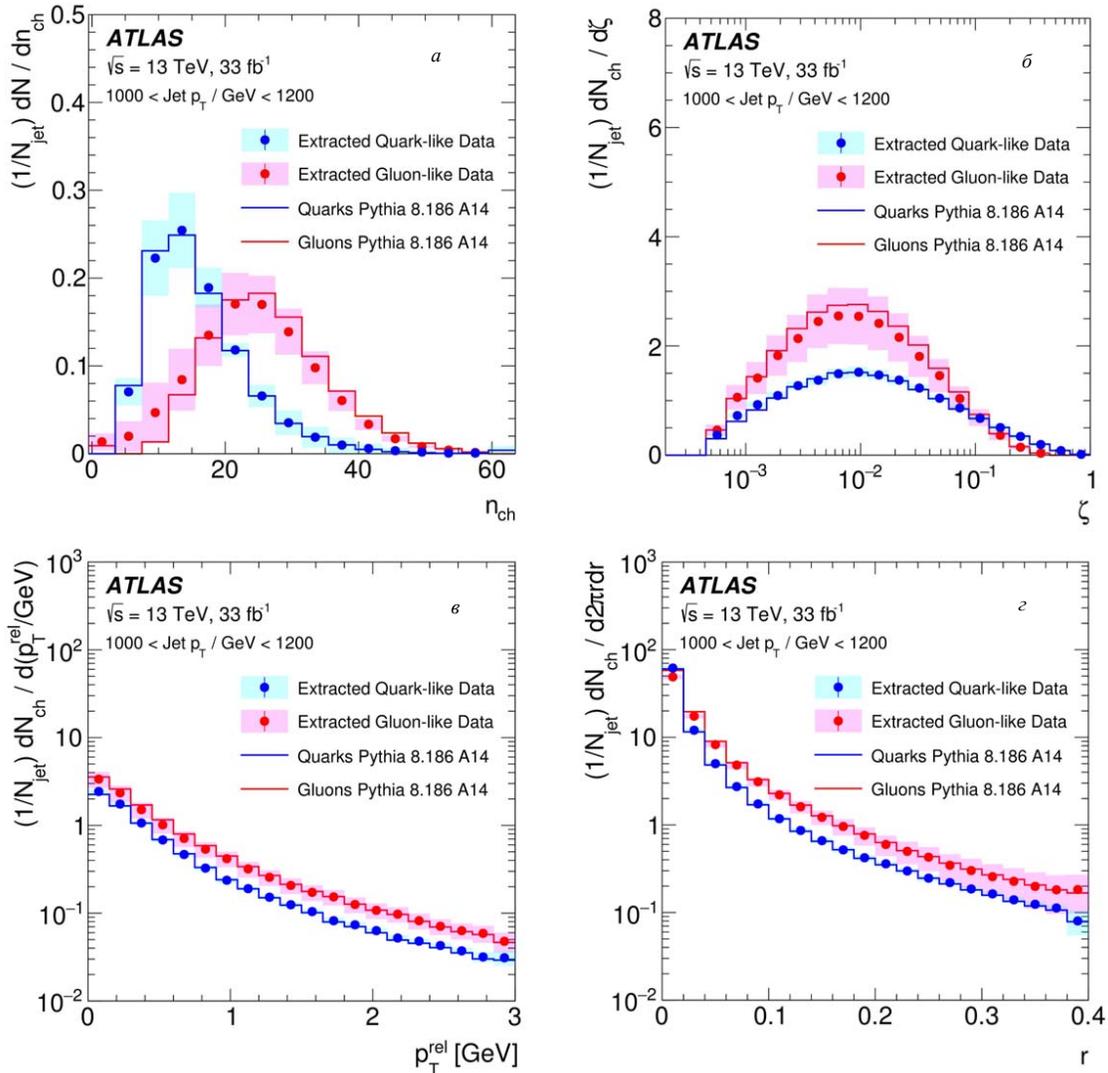


Рис. 5. Для кварк- и глюноподобных струй распределения по множественности заряженных частиц (а), по доле поперечного импульса частицы в струе ζ (б), поперечного импульса (в), радиального профиля в зависимости от расстояния r от оси струи для струй с $1000 \text{ GeV} < p_T < 1200 \text{ GeV}$ в взаимодействиях при энергии 13 ТэВ

ставляющих струй, сравнение их характеристик в распределениях по множественности частиц в струе, доле поперечного импульса струи ζ , уносимой частицей, поперечных импульсов струй и радиального профиля для струй с высоким поперечным импульсом $1000 \text{ GeV} < p_T < 1200 \text{ GeV}$ при энергии pp соударения $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ (рис. 5).

Примером измерений, где могут быть использованы распределения по заряду струй, может служить работа [4], в которой используются распределения зарядов струй, компенсирующих образование B^+ и B^- мезонов, приведенных на рис. 6, для определения природы b или \bar{b} кварка при измерении распадов B_s^0 мезонов. В этой работе измеряются распады $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ с целью определения фазы CP-нарушения.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБЫТИЙ И СТРУЙ

Моделирование в работе производится с помощью Монте-Карло генератора PYTHIA 8.2 на операционной системе LINUX. К базовым параметрам PYTHIA 8.2 добавлены настройки для учета жестких и мягких процессов КХД. Энергия начального pp -соударения принималась равной 8 ТэВ, количество генерируемых событий (pp -соударений) для каждой энергии составило 100 миллионов. Для записи и дальнейшего анализа выбираются треки с $p_T > 0.5 \text{ GeV}$ и $|\eta| < 6$. Анализ струй производится с помощью C++ и пакета ROOT (в ОС LINUX). В качестве образующей струю частицы выбирается B -мезон с $p_T > 10 \text{ GeV}$ и $|\eta| < 4$, не являющийся резонансом (то есть B^+ , B^- , B^0 , \bar{B}^0 , B_s^0 , B_s^0).

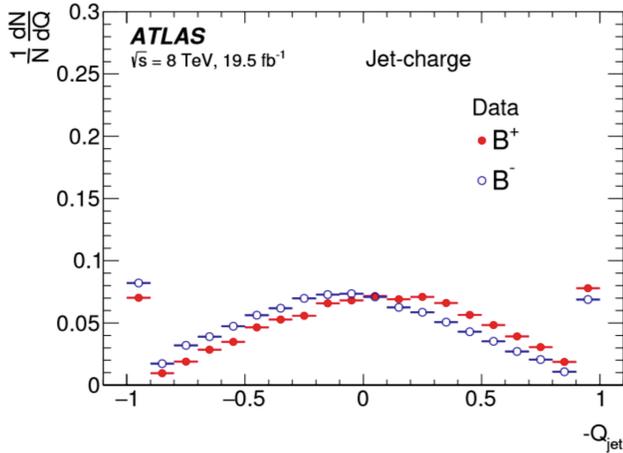


Рис. 6. Распределение заряда струй, компенсирующих поперечный импульс кандидатов в B^+ и B^- мезоны, рассчитанных с параметром $k = 1.1$ [4].

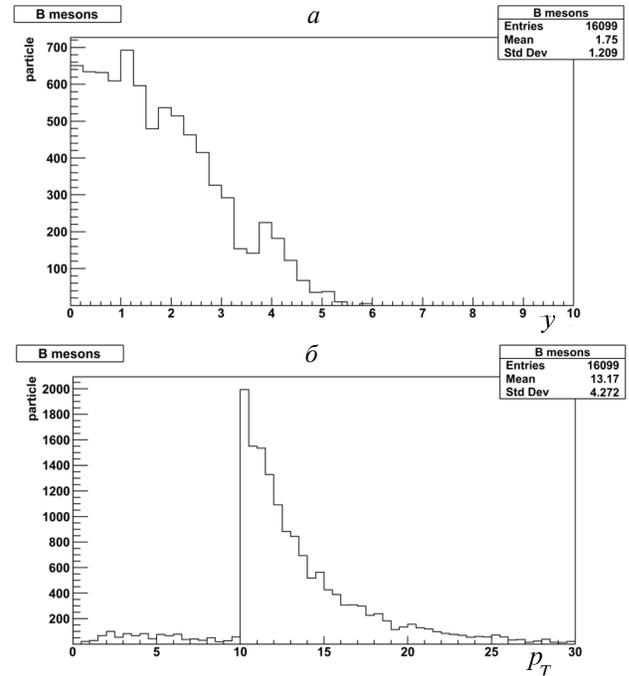


Рис. 8. Распределения B -мезонов в струях по быстройте (а) и поперечному импульсу (б), при $E_{pp} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ

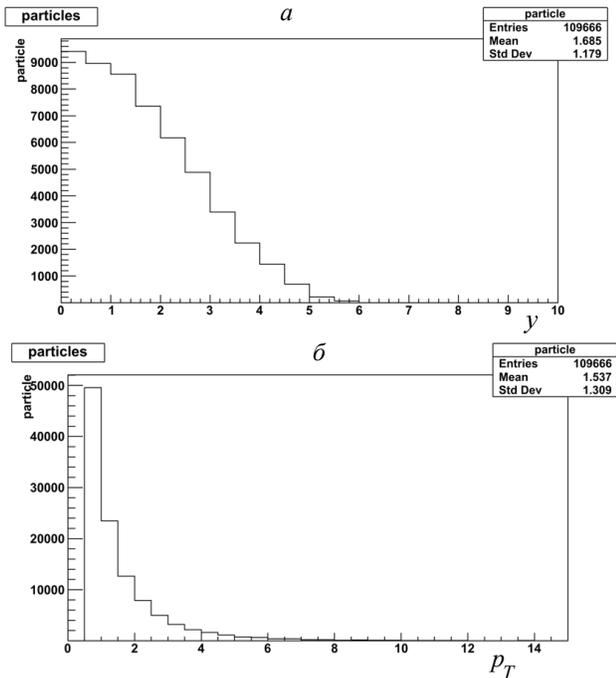


Рис. 7. Распределения детектируемых частиц в струях по быстройте y (а), и по поперечному импульсу p_T (б), при $E_{pp} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ

В результате генерации 100 миллионов событий неупругих pp взаимодействий было выделено 14766 струй с рождением B -мезонов. Вероятность рождения двух B -мезонов в одной струе довольно низкая, около 3.6%. При этом детектируется 6–7 частиц. Это заметно меньше, чем приведено на рис. 3. Однако необходимо помнить, что в упомянутой статье получены распределения для струй с поперечным импульсом $1000 < p_T < 1200$ ГэВ, в то время как в настоящей

работе при моделировании поперечный импульс струй значительно меньше.

В ходе моделирования был осуществлен отбор по типу учитываемых частиц. В том числе выполнен отбор условно детектируемых частиц, а именно: p , \bar{p} , e^+ , e^- , π^+ , π^- , μ^+ , μ^- , K^+ , K^- с величиной поперечного импульса $p_T > 0.5$ ГэВ и псевдобыстройтой $\eta < 5$. Для такого отбора получены распределения по быстройте и поперечному импульсу p_T , приведенные на рис. 7.

Как видно из распределений, большинство частиц струи рождаются в центральной области, количество частиц с возрастанием поперечного импульса убывает экспоненциально. Подобное поведение, наблюдается и для распределений B -мезонов в этих струях, приведенных на рис. 8.

Также получено распределение по поперечному импульсу всей струи $p_{T,Jet} = \sum_i p_{T,i}$, где $p_{T,i}$ — поперечный импульс i -ого трека, принадлежащего струе (рис. 9). Все полученные в результате моделирования струи имеют невысокий поперечный импульс, сильно отличающийся от результатов и распределений большинства других работ, о которых уже упоминалось выше, где рассматривались струи от 100 ГэВ до 1000 ГэВ и более.

3. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Сравним результаты моделирования струй с B^+ и B^- мезонами с измерениями из работы [4], приведенных на рис. 6. Значения параметров струй возь-

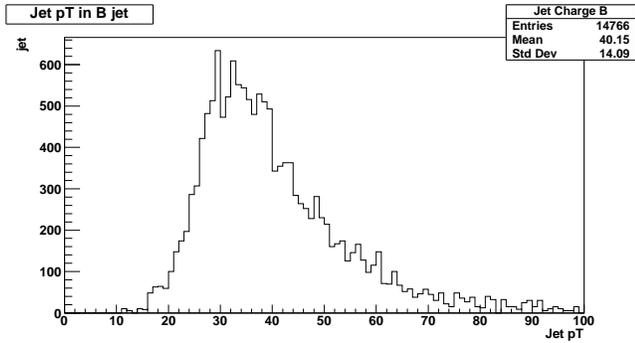


Рис. 9. Распределение струй по поперечному импульсу струи, средний импульс — 40 ± 14 , при $E_{pp} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ

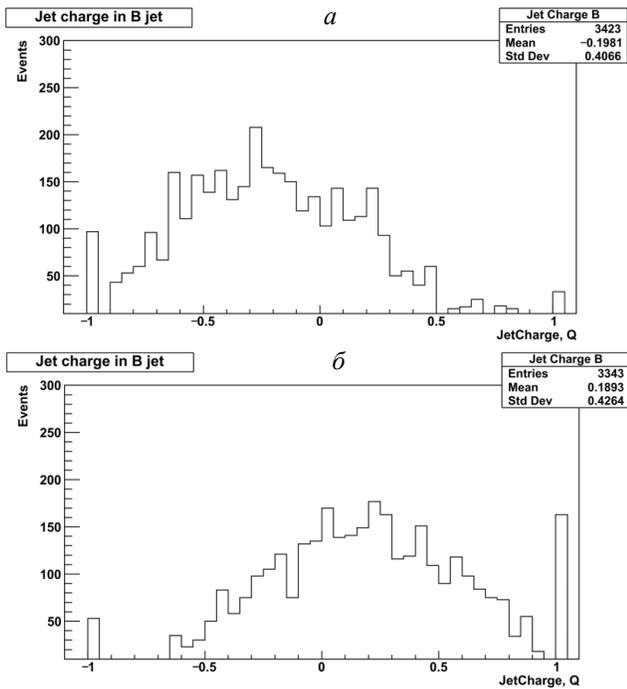


Рис. 10. Распределения зарядов струй, содержащих B^- мезоны (а) и B^+ мезоны (б), при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $k = 1.1$, $R = 0.8$

тем же, что и в экспериментальных данных: $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $k = 1.1$, $R = 0.8$, отбор по детектируемым частицам, полученные распределения струй по заряду приведены на рис. 10.

Оценка средних значений заряда струй, выделенных таким образом из смоделированных событий, составляет:

- струи от B^+ мезонов $\rightarrow Q_{Jet} = 0.19 \pm 0.01$
- струи от B^- мезонов $\rightarrow Q_{Jet} = -0.20 \pm 0.01$

Оценка значений средних зарядов струй из данных, измеренных в работе [4]:

- струи от B^+ мезонов $\rightarrow Q_{Jet} = 0.12 \pm 0.01$

- струи от B^- мезонов $\rightarrow Q_{Jet} = -0.15 \pm 0.01$

При этой оценке было учтено, что в распределении на рис. 6 приведены струи, компенсирующие рождение B^+ и B^- мезонов, то есть противоположные по знаку. Как можем видеть, полученные значения оказываются близки, их различие соответствует разнице в форме распределений.

Однако представляет интерес провести несколько иной анализ, используя следующие предположения. Для всех результатов моделирования при любых значениях радиуса R и параметра k средние заряды струй с B^+ и B^- мезонами получаются практически симметричным относительно нуля. Подобная симметричность наблюдается и для измеренных распределений зарядов струй. Поэтому можно предположить, что результаты измерений в работе [4] образованы симметричными частями от B^+ и B^- мезонов, и общей частью, вероятно — глюонной компонентой и струями с нейтральными мезонами, которые далее будем рассматривать как глюонные. Аналогично будем рассматривать и струи, полученные в результате моделирования. Исходя из этого предположения и используя возможности программы Wolfram Mathematica были выделены и оценены средние заряды кварковых струй при условии нулевого среднего заряда глюонных струй. Также выполнена теоретическая оценка, используя полученный в работе [5] коэффициент фрагментации:

$$f_s/f_d = 0.240 \pm 0.004(stat) \pm 0.010(sist) \pm 0.017(theor). \quad (2)$$

Считая $f_s/f_d \cong f_s/f_u$, вследствие примерного равенства масс кварков u и d , получаем ожидаемое значение заряда лидирующего адрона в струе от b и \bar{b} кварков. Полученные заряды приведены в таблице I.

Как видим, значения практически совпадают. Более того, близкое значение дают распределения среднего заряда струй с B^- и B^+ мезонами при отборе всех частиц, $R = 0.8$, $k = 1.1$: $Q_J = 0.46 \pm 0.01$ для струй с B^+ и $Q_J = -0.47 \pm 0.01$ для струй с B^- .

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ЗАРЯДА СТРУЙ В-МЕЗОНОВ

Нашей задачей является исследование заряда струй, образованных b кварками, в зависимости от параметра струи и метода вычисления заряда. Для смоделированных струй, содержащих B -адроны, были получены распределения по заряду струй при разных значениях радиуса струи и при разных значениях параметра k , найдены средние значения заряда струй. С помощью программы Wolfram Mathematica построены графики зависимости средних зарядов струй от радиуса струи R при различных значениях параметра k , именно они используются для иллюстрирования поведения заряда струи при изменении ее параметров (рис. 11–13).

Таблица I. Оценочные средние заряды струй, полученные различными способами

	из моделированных данных	из экспериментальных данных	из теоретической оценки
средний заряд струй от b кварков (с B^- мезонами)	-0.49 ± 0.01	-0.46 ± 0.01	-0.47 ± 0.01
средний заряд струй от \bar{b} кварков (с B^+ мезонами)	0.49 ± 0.01	0.48 ± 0.01	0.47 ± 0.01

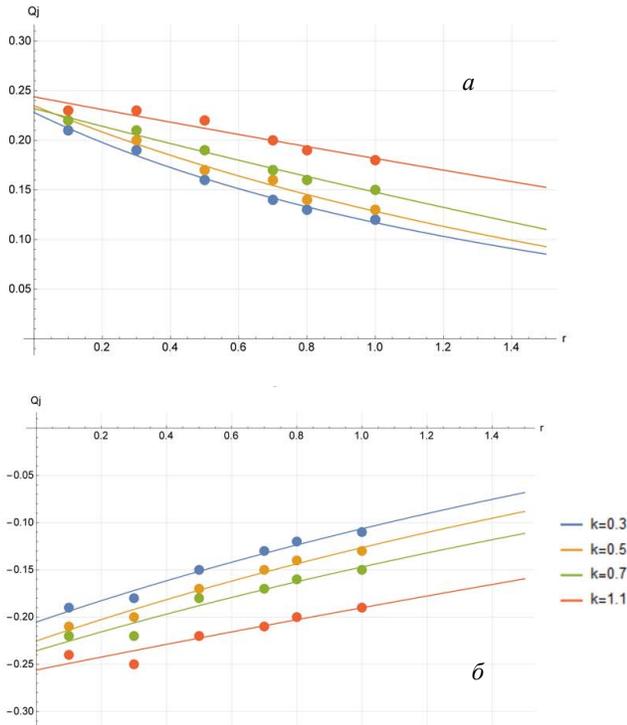


Рис. 11. Зависимость среднего заряда струй с (а) B^+ мезонами и (б) B^- мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе детектируемых частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ

В качестве результатов получены распределения заряда струй при вариациях:

1. отбора частиц, а именно учитываются: все частицы ($p_T > 0.5$ ГэВ), только заряженные частицы ($p_T > 0.5$ ГэВ, $\epsilon_{particle} \neq 0$), только детектируемые частицы ($p, \bar{p}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$ при $p_T > 0.5$ ГэВ и $\eta < 5$)
2. типа инициирующего (характерного) B -мезона в струе: $B^+, B^-, B^0, \bar{B}^0, B_s^0, \bar{B}_s^0$ при $p_T > 10$ ГэВ и $\eta < 4$
3. регуляризационного параметра $k = \{0.3, 0.5, 0.7, 1.1\}$
4. радиуса струи $R = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 1.0\}$

Из рисунков следует, что средний заряд струй с B^0 ($d\bar{b}$) мезонами положителен, а с \bar{B}^0 ($b\bar{d}$) мезо-

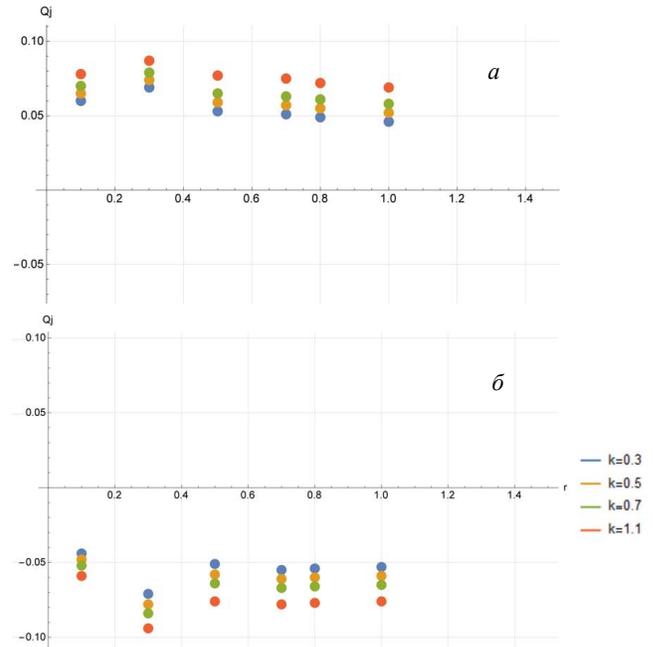


Рис. 12. Зависимость среднего заряда струй с (а) B^0 мезонами и (б) \bar{B}^0 мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе детектируемых частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ

нами отрицателен, особенно явно это видно при учете детектируемых частиц. То есть знак заряда струи соответствует знаку образующего струю кварка, хоть и значительно меньше по модулю. Схожий характер поведения наблюдается и для струй с B_s^0 и \bar{B}_s^0 мезонами. Из-за меньшей статистики (~ 760 струй против ~ 3200 для B^0 и \bar{B}^0) разброс значительно выше.

Таким образом, для B^0 и \bar{B}^0 заряд струи почти не зависит от радиуса r и коррелирует с зарядом b кварка при всех. Для странных B_s^0 можно говорить лишь о тенденции соответствия знака заряда струи знаку заряда образующего кварка, которая в большей степени проявляется при значениях параметра $k = 0.3 - 0.5$. Тем не менее, с учетом этой тенденции можно заключить, что знак заряда струи, содержащей B_s^0 и \bar{B}_s^0 , может свидетельствовать о природе образовавшего струю кварка в случае радиуса струи $R = 0.3 - 0.6$ и значения параметра $k = 0.3 - 0.5$. Струи с малым радиусом $R = 0.1$ слабо чувствительны к природе кварка при любых значениях параметра k . Этот результат мо-

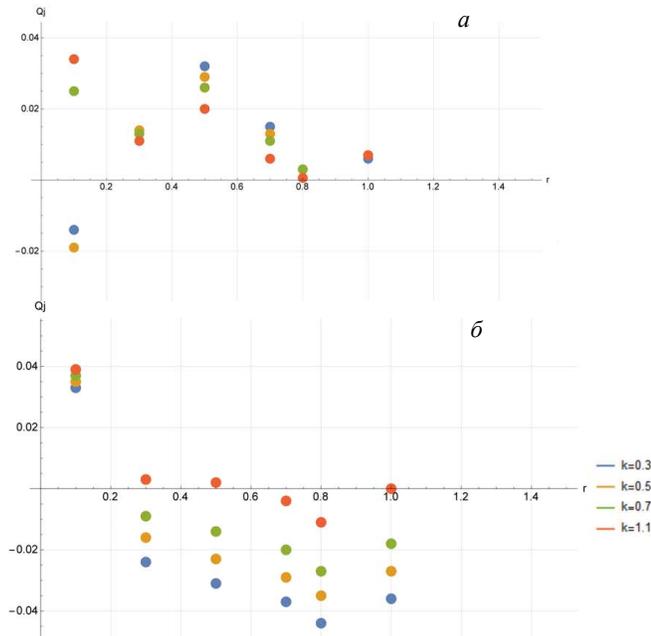


Рис. 13. Зависимость среднего заряда струй с (а) B_s^0 мезонами и (б) \bar{B}_s^0 мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе детектируемых частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ

жет быть использован для мечения B_s^0 и \bar{B}_s^0 в эксперименте ATLAS при измерении параметра CP нарушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено моделирование струй, содержащих B -мезоны, с помощью генератора PYTHIA 8.2, проведен анализ электрического заряда струй в зависимости от радиуса струи и параметра взвешивания при расчете заряда струи.

Получены основные распределения струй по поперечному импульсу, количеству частиц, быстроте. Выполнено сравнение результатов моделирования с существующими измерениями и результатами работ в эксперименте ATLAS.

Установлены корреляции между типом B -мезона, типом b или \bar{b} кварка, и электрическим зарядом струи при определенных параметрах выделения струи и вычисления её заряда, которые могут быть использованы в эксперименте ATLAS при идентификации B_s^0 -мезонов.

- [1] *ATLAS Collaboration*. // Properties of jet fragmentation using charged particles measured with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. *Phys. Rev. D*. 2019.
 [2] *Matteo Cacciari, Gavin P. Salam, Gregory Soyez*. The anti-kt jet clustering algorithm. 2008.
 [3] *The ATLAS Collaboration*. // Measurement of jet charge in dijet events from $\sqrt{s} = 8$ ТэВ pp -collisions with the ATLAS

- detector. *Phys. Rev. D*. 2016.
 [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. 2016.
 [5] *The ATLAS Collaboration*. // Determination of the ratio of b -quark fragmentation fractions f_s/f_d in pp -collisions at $\sqrt{s} = 7$ ТэВ with the ATLAS detector. 2015.

Simulated analysis of jet charge in pp -collisions at the LHC

I.A. Kochergin

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
E-mail: iliya.a.Kochergin@gmail.com

The study of jets charge is necessary to refine the theory of fragmentation in quantum chromodynamics. Also, it can provide an opportunity for improving identification methods in high-energy particle collisions. At the same time, there is a lack of data on jets from heavy flavors. The paper analyzes the weighted charge of the jets from b -quarks depending on the method for determining the jet and the method for calculating the electric jets charge by software simulation using the Monte Carlo generator PYTHIA 8.2. Correlations have been established between the type of B -meson, type b or \bar{b} quark, and the electric charge of the jet at certain parameters of jet separation and calculation of its charge.

PACS: 13.40.-f, 13.85.-t, 13.58.Hd, 14.40.-n, 29.27.-a

Keywords: B -mesons, B_s^0 mesons, transverse momentum, jet charge, jet radius, regularization parameter, jet fragmentation, PYTHIA 8

Received 25 August 2021.

Сведения об авторах

1. Кочергин Илья Александрович — аспирант; тел.: +7 (916) 822-96-84, e-mail: iliya.a.kochergin@gmail.com.