

Магистерская диссертация
**Анализ заряда струй в pp
соударениях
на Большом адронном
коллайдере**

Выполнил студент

213М группы

Кочергин И.А.

Научный руководитель:

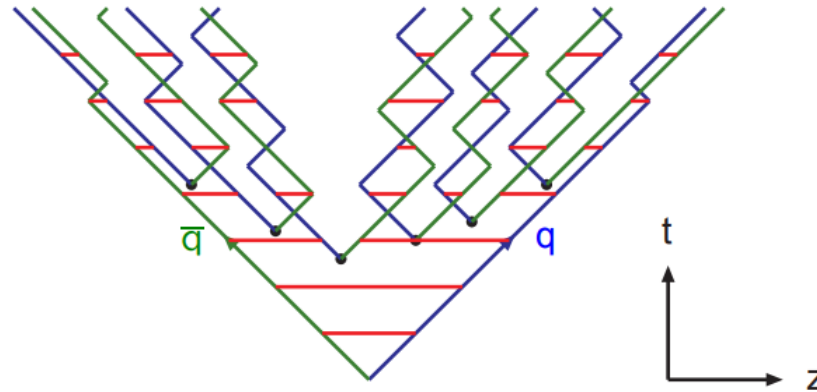
д.ф-м.н. проф. Смирнова Л.Н.

Москва. 2020 год.

Цель работы

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

Фрагментация, образование струй



- 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 .

$$\zeta = p_T^{particle} / p_T^{jet}$$

Через эволюцию ДГЛАП (DGLAP) можно рассчитать зависимость многих наблюдаемых от p_T [2]. В частности,

$$\mu \frac{\partial}{\partial \mu} D_p^h(\zeta, \mu) = \sum_{p'} \int_{\zeta}^1 \frac{\partial \zeta'}{\zeta'} \frac{\alpha_s(\mu) P_{p' \leftarrow p}(\zeta', \mu)}{\pi} D_{p'}^h\left(\frac{\zeta}{\zeta'}, \mu\right)$$

где $P_{p' \leftarrow p}(\zeta', \mu)$ – функция расщепления Докшицера-Грибова-Липатова-Алтарелли-Паризи, а масштаб μ определяется через α_s .

Модель струны Лунда

4

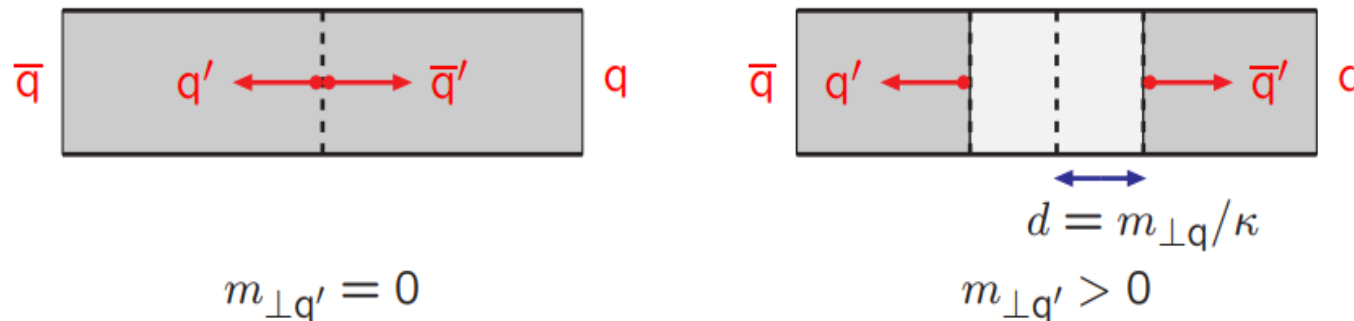
- Сильное взаимодействие, то есть глюонный обмен между кварками, представить в виде струны, концами которой являются кварки



- Сила натяжения постоянна, а потенциальная энергия линейно возрастает:

$$F(r) \approx \text{const} = k \approx 1 \text{ GeV/fm} \Leftrightarrow V(r) \approx kr$$

- Получается простое описание как 1+1 мерного объекта – струна без поперечных возбуждений с лоренц-ковариантным формализмом.



Процесс разрыва струны соответствует процессу рождения кварк-антикварковой пары

Выделение струй, anti- k_T алгоритм, электрический заряд струи

- расстояние между частицами

$$d_{ij} = \min\left(\frac{1}{p_{Ti}}, \frac{1}{p_{Tj}}\right) \frac{\Delta_{ij}^2}{R^2}$$

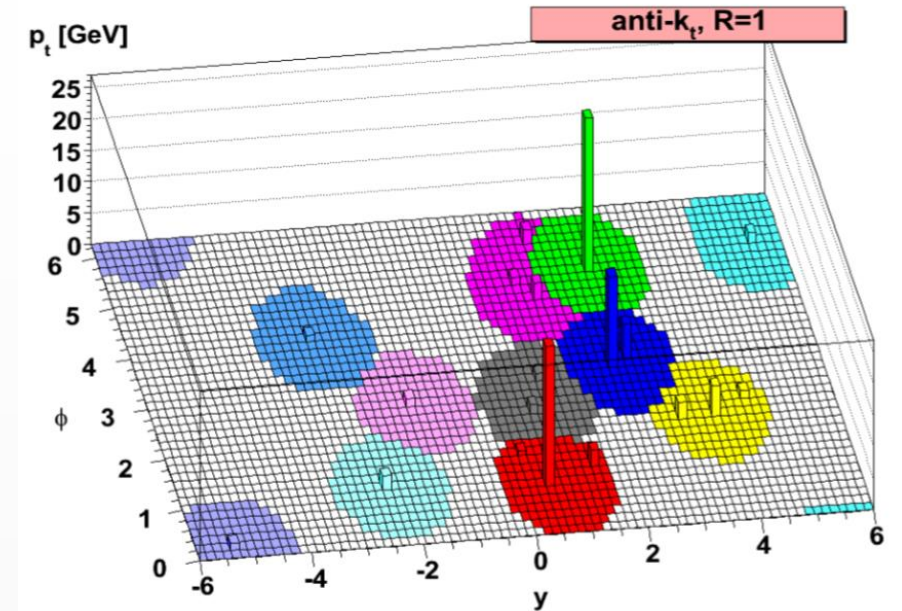
параметр R определяет масштаб струи

- $\Delta_{1j}^2 = (y_1 - y_j)^2 + (\phi_1 - \phi_j)^2$, где y – быстрота частицы, а ϕ – азимутальный угол.

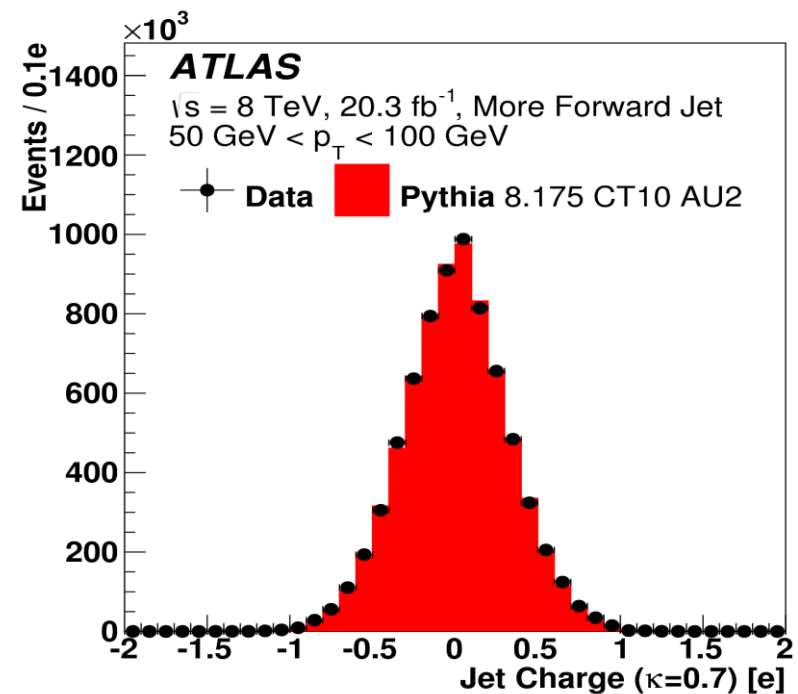
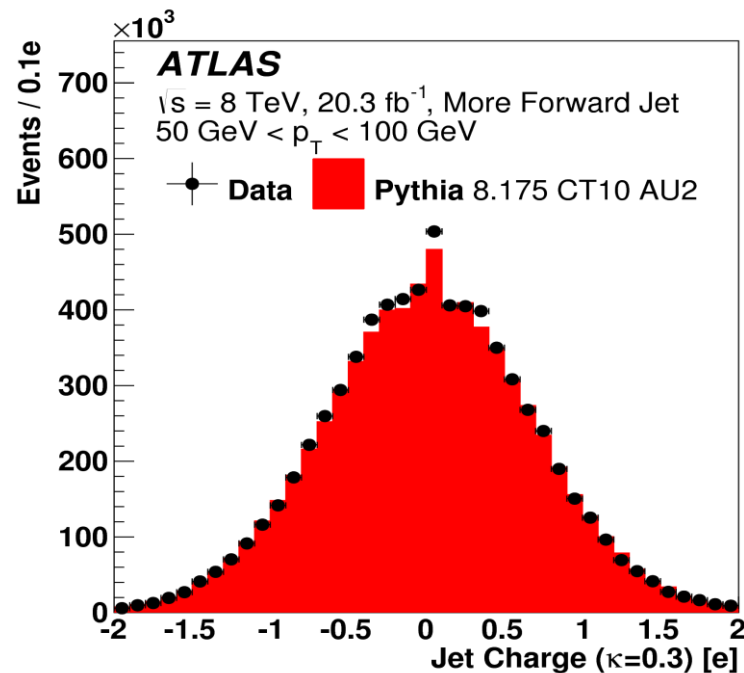
Заряд струи:

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

q_i – электрический заряд (в единицах заряда позитрона) трека i с соответствующим поперечным импульсом $p_{T,i}$, k – свободный параметр регуляризации, p_{TJ} – поперечный импульс струи.

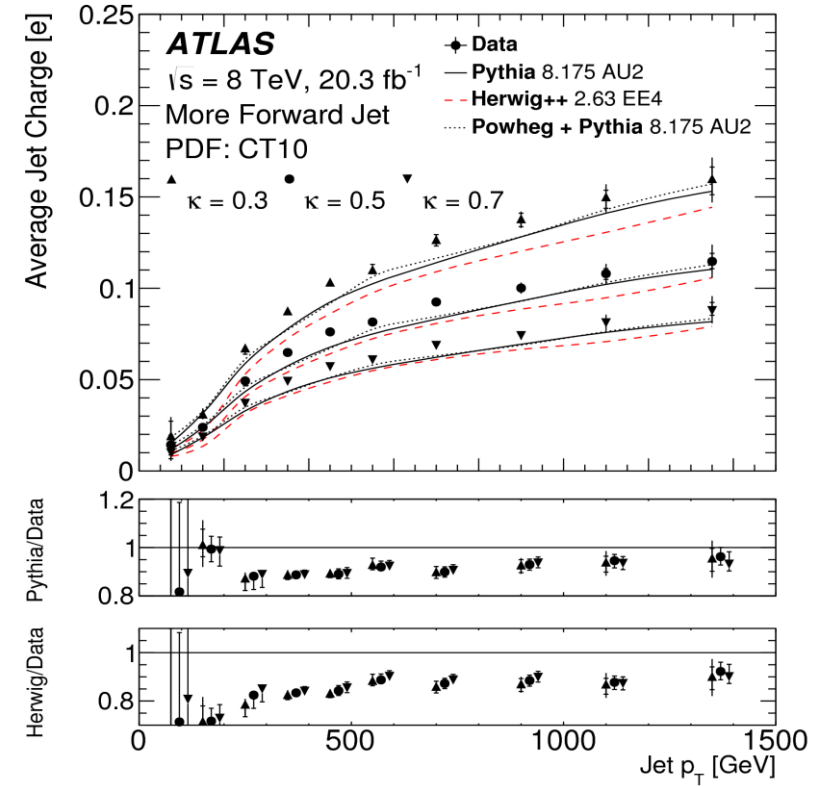
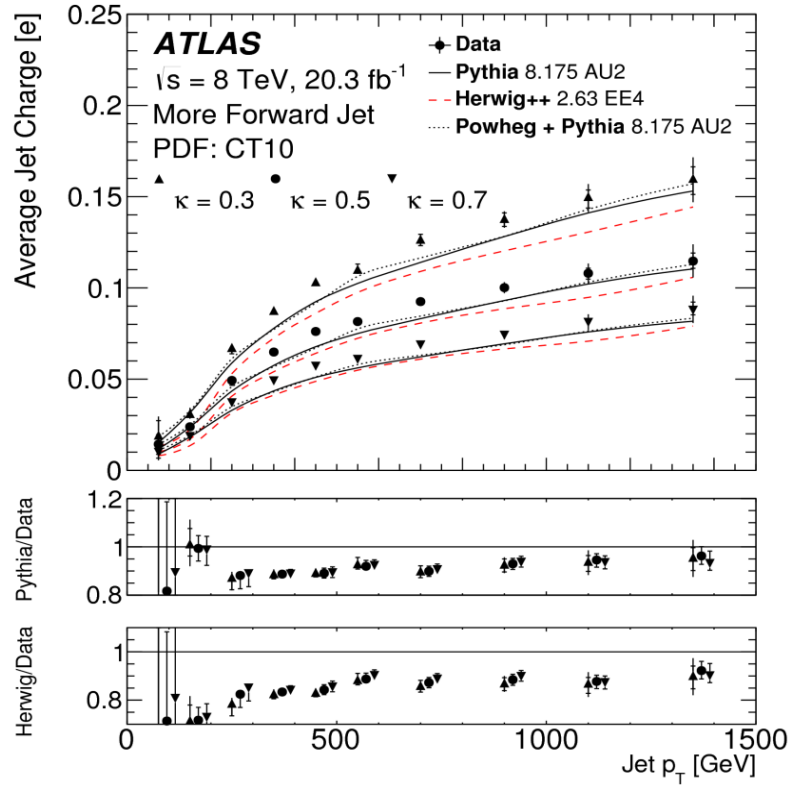


Струи в эксперименте ATLAS



Распределения заряда струй от легких ароматов на уровне детектора полученных при измерении и при моделировании при значениях $50 \text{ GeV} < p_T < 100 \text{ GeV}$, $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, параметр регуляризации $k = 0.3$ (слева) и $k = 0.7$ (справа)

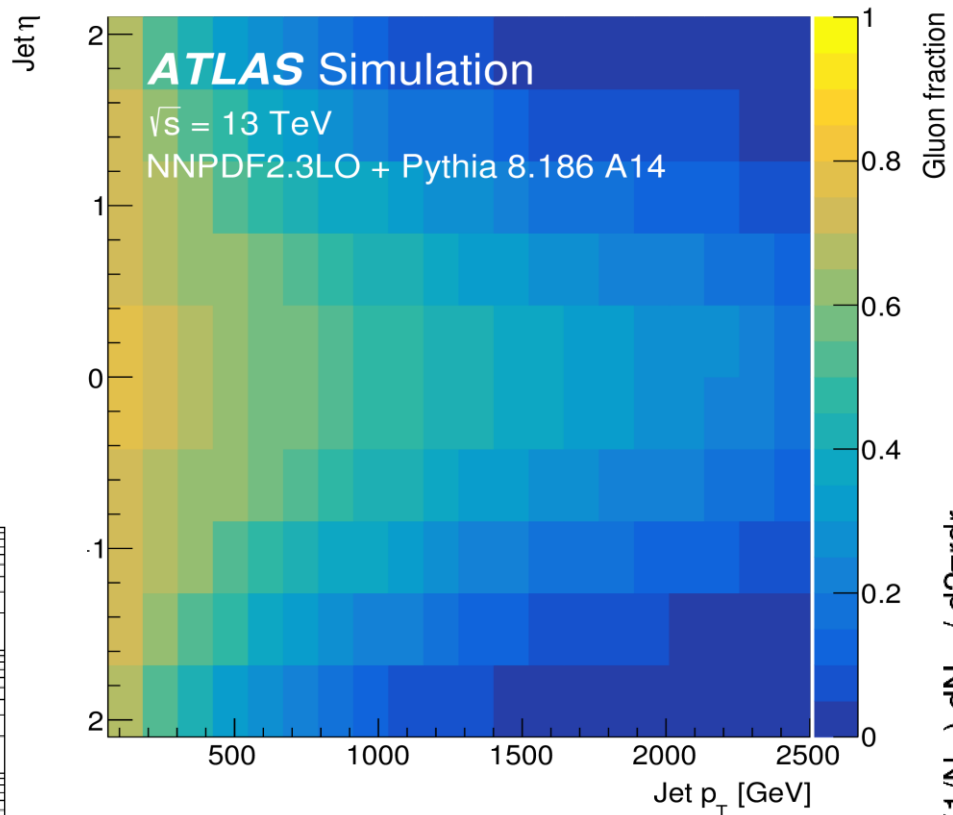
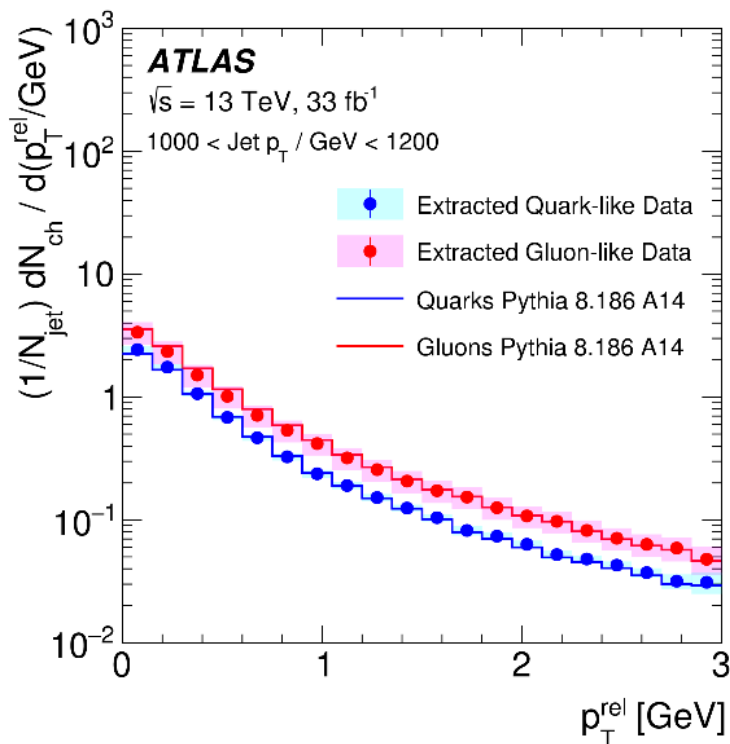
Работа [4] [[The ATLAS Collaboration, Measurement of jet charge in dijet events from $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector // Physical Review D 93, 052003 (2016), CERN-PH-EP-2015-207]



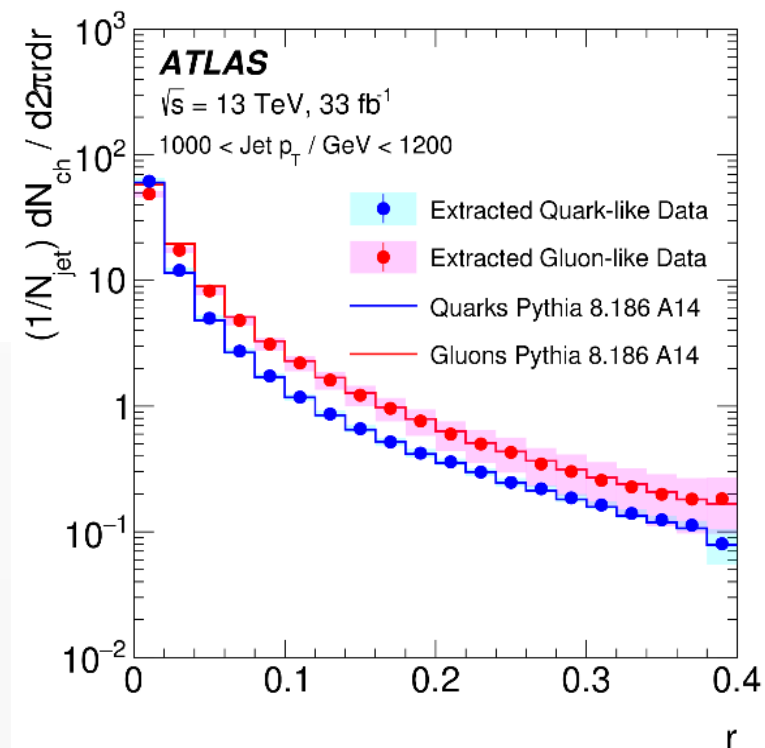
Распределение среднего заряда струи в зависимости от поперечного импульса для разных значений $\kappa=0.3, 0.5, 0.7$ для (слева) более передних струй и (справа) более центральных струй

Работа [4]

Кварк- и глюоноподобные распределения поперечного импульса

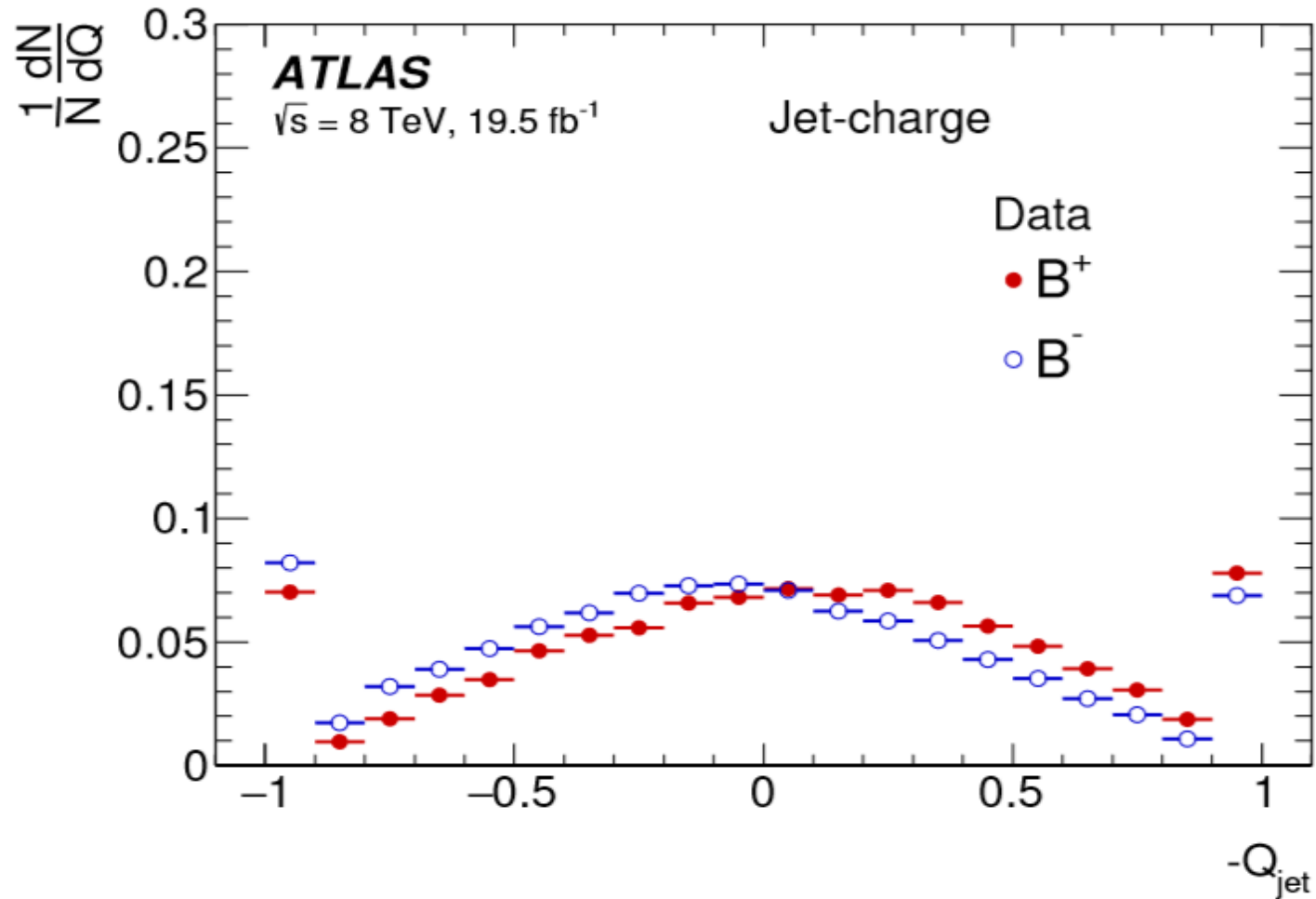


Кварк- и глюоноподобные распределения радиального профиля в единицах радиального расстояния r от оси струи



Доля глюонной струи как функция поперечного импульса струи p_T и псевдоскорости струи η .

Струи выделяются anti- k_r методом, $R = 0.4$, для треков с $p_T > 0.5 \text{ ГэВ}$, $|\eta| < 2.5$

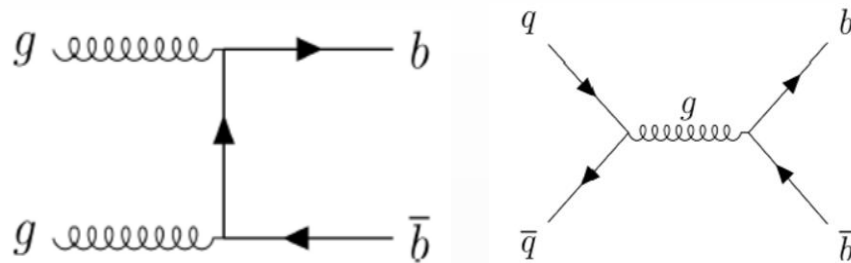


Распределение заряда оппозитных струй для кандидатов в B^+ и B^- сигналы, $k = 1.1, p_T > 2.5 \text{ GeV}, |\eta| < 2.5, R = 0.8, \sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$

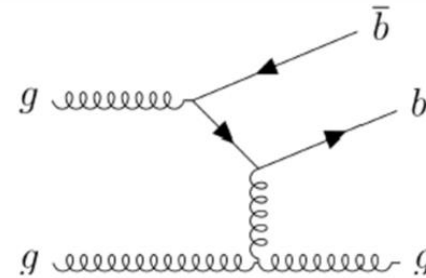
Работа [7] [The ATLAS Collaboration, Measurement of the CP-violating phase φ_s and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS // JHEP 08 (2016) 147, CERN-PH-2015-166 6th September 2016]

b -кварк

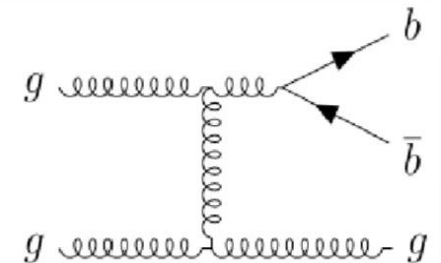
Рождение аромата
(flavour creation)



Возбуждение аромата
(flavor excitation)



Расщепление глюона
(gluon splitting)



кварк или мезон		b	\bar{b}	B^+	B^-	B^0	\bar{B}^0	B_s^0	\bar{B}_s^0
заряд		$-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	+1	-1	0	0	0	0
состав		-	-	$u\bar{b}$	$b\bar{u}$	$d\bar{b}$	$b\bar{d}$	$s\bar{b}$	$b\bar{s}$

Моделирование

11

Монте-Карло генератор PYTHIA 8.2,
настройки:

- ▶ $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$
- ▶ 100 млн соударений
- ▶ учет жестких процессов КХД:
 - ▶ $gg \rightarrow gg$
 - ▶ $gg \rightarrow q\bar{q}$
 - ▶ $qg \rightarrow qg$
 - ▶ $qq' \rightarrow qq'$ и другие
- ▶ учет мягких процессов КХД
 - ▶ упругое рассеяние $AB \rightarrow AB$
 - ▶ однократное дифракционное рассеяние $AB \rightarrow XB$
 - ▶ двухвершинное дифракционное рассеяние $AB \rightarrow X_1X_2$
 - ▶ двойной померонный обмен $AB \rightarrow AXB$

Отбор частиц.

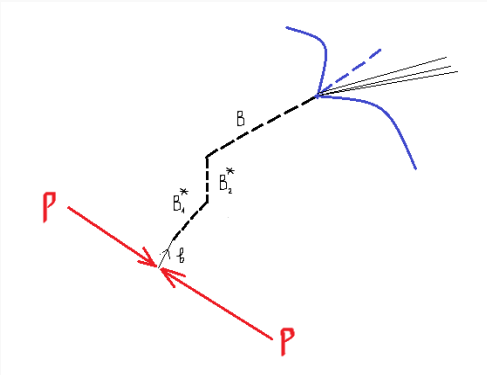
Для всех частиц:

- ▶ $p_T > 0.5 \text{ GeV}$

Центральная, образующая
частица:

- ▶ B -мезон
- ▶ $\tau > 3 \text{ nsec}$ (исключая резонансы)
- ▶ $p_T > 10 \text{ ГэВ}$

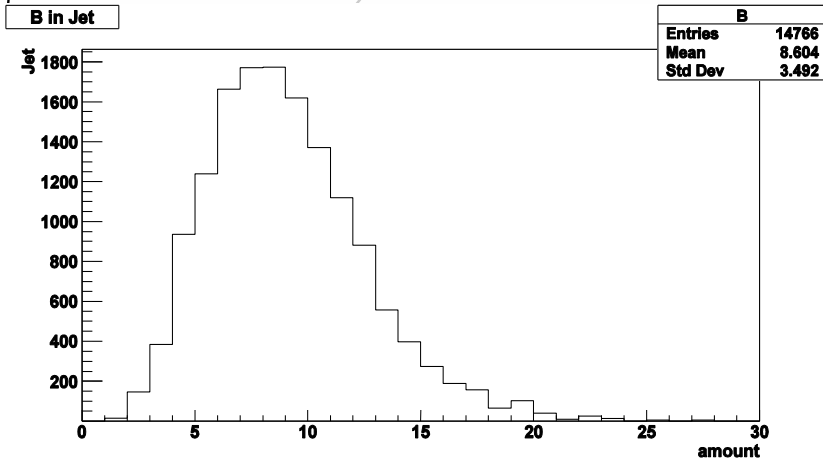
Выбирается последний B -мезон из
цепочки



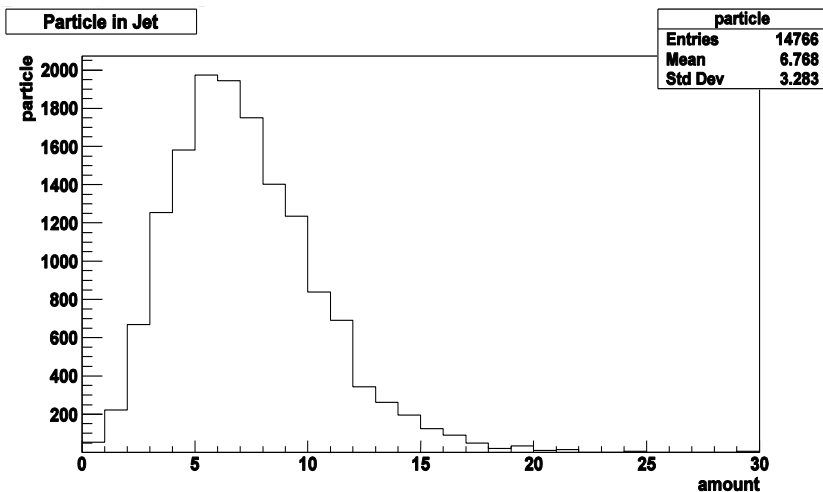
Струи, содержащие В-мезон. Основные характеристики. Количество частиц.

12

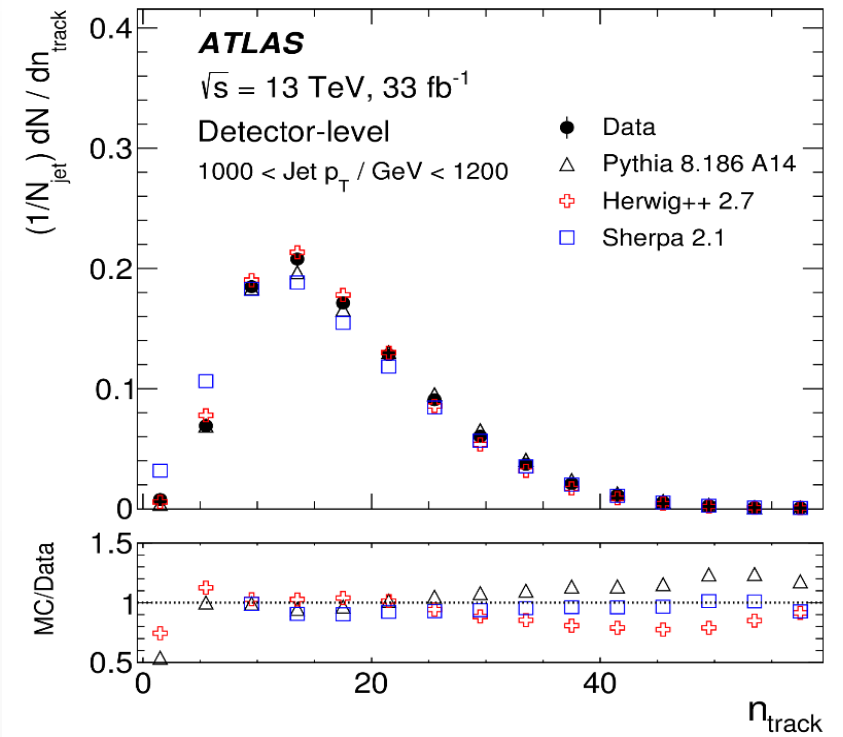
Вероятность рождения двух В-мезонов в одной струе довольно низкая, около 3.6%.



Количество всех частиц в струе, среднее $\langle n \rangle = 9$



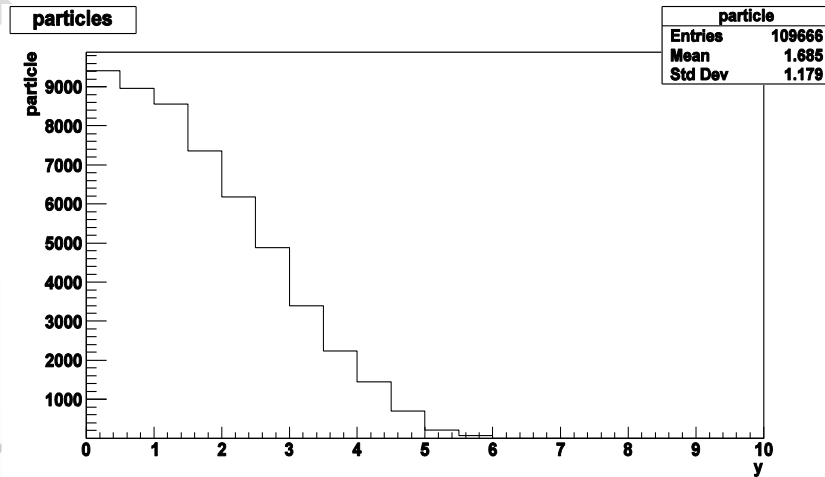
Количество детектируемых частиц, среднее $\langle n \rangle = 7$



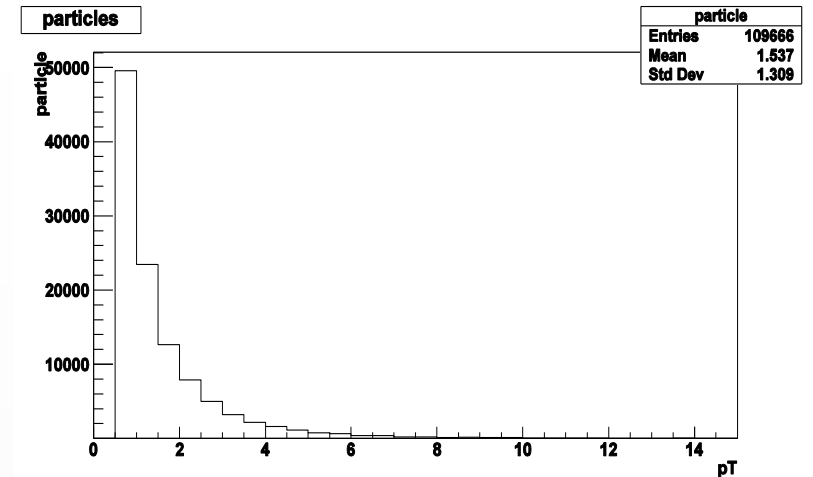
Распределение на уровне детектора числа треков заряженных частиц n_{tracks} , работа [2, Phys. Rev. D100(2019)052011]

Распределения по быстроте y и поперечному импульсу p_T

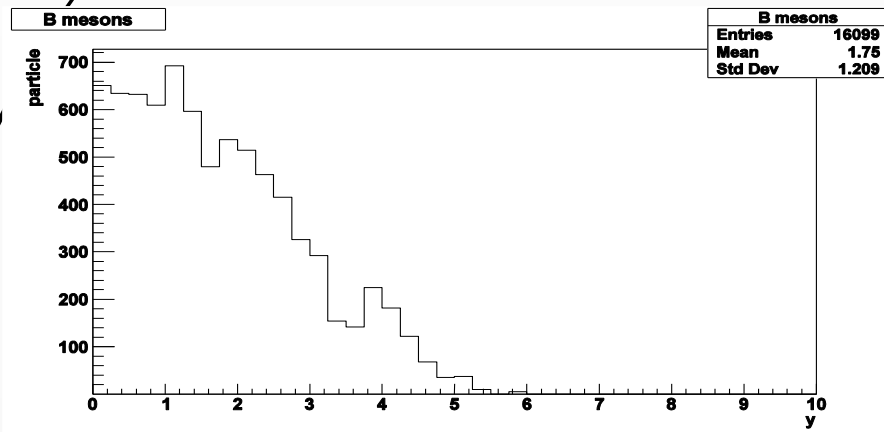
13



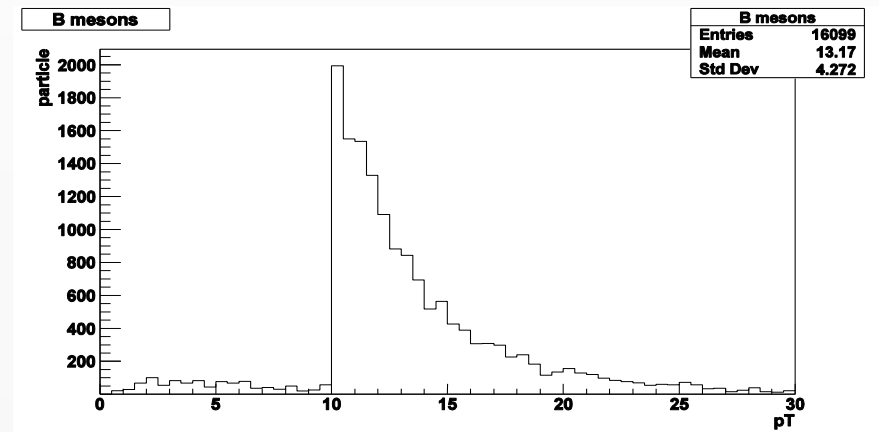
Распределения детектируемых частиц в струях по быстроте y , среднее 1.685



Распределения детектируемых частиц в струях по поперечному импульсу p_T , среднее 1.537



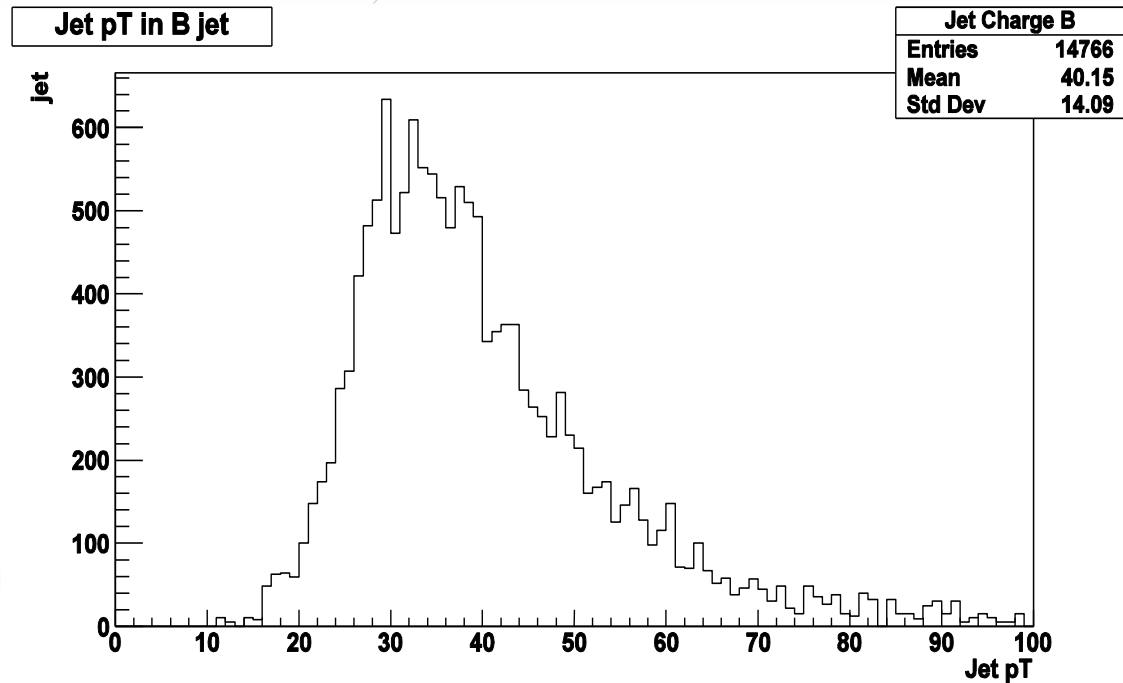
Распределения B -мезонов в струях по быстроте



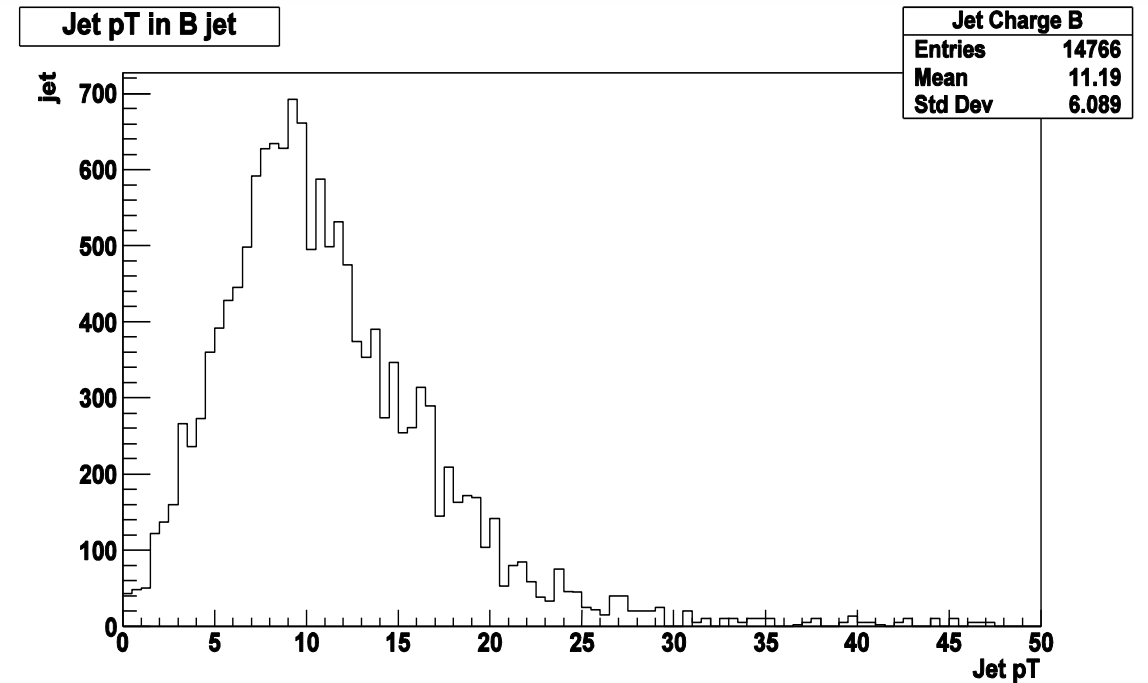
Распределения B -мезонов в струях по поперечному импульсу

Распределение струй по поперечному импульсу струи

14



Отбор всех частиц, средний импульс – 40 ГэВ



Отбор детектируемых частиц (detect level), средний импульс – 11 ГэВ

Распределения взвешенного заряда.

Вариации:

1. Отбора и учета частиц:

- ▶ все частицы ($p_T > 0.5 \text{ GeV}, \tau > 3 \text{ nsec}$)
- ▶ только заряженные частицы ($p_T > 0.5 \text{ GeV}, \tau > 3 \text{ nsec}, e_{particle} \neq 0$)
- ▶ только детектируемые частицы
($p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$)

2. Типа образующего (характерного) B -мезона в струе:

- ▶ $B^+, B^-, B^0, \bar{B}^0, B_s^0, \bar{B}_s^0$

3. Регуляризационного параметра

- ▶ $k = \{0.3, 0.5, 0.7, 1.1\}$

4. Радиуса струи

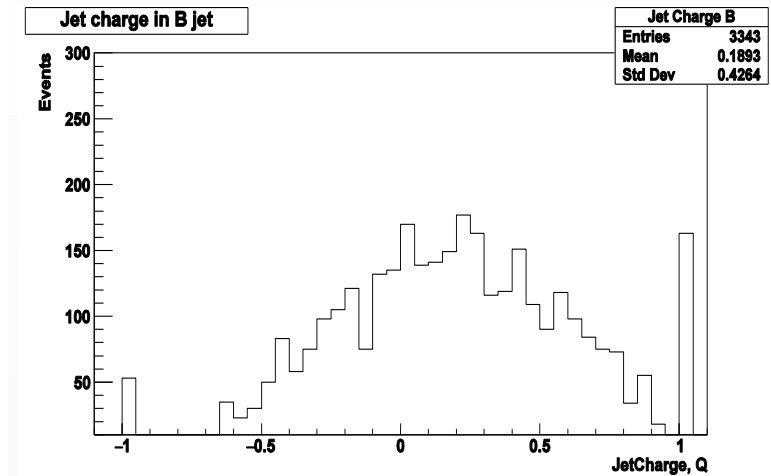
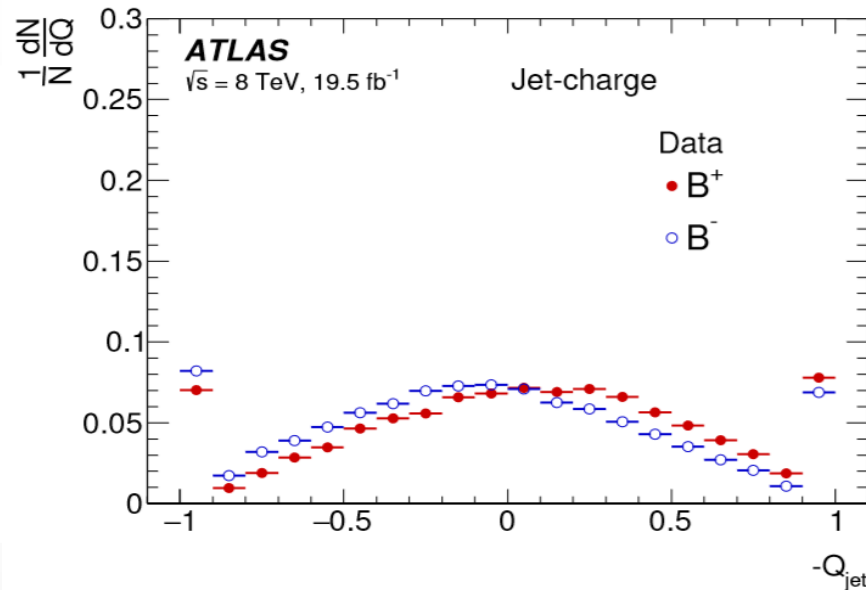
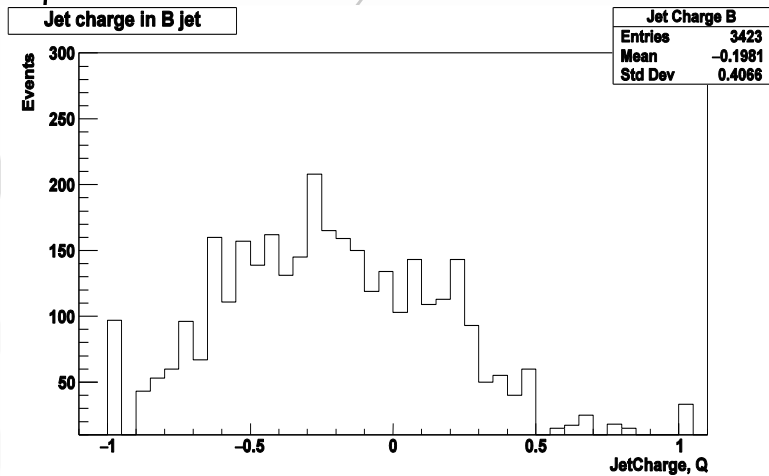
- ▶ $R = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 1.0\}$

Сравним с экспериментом – измерением работы [7]

16

Распределения зарядов струй с B^- мезонами (слева), с B^+ мезонами (справа), при $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, $p_T > 0.5 \text{ GeV}$, $k = 1.1$, $R = 0.8$, *detect level*

Распределения струй, компенсирующих b и \bar{b} кварки в работе [7] – по центру.



Средние значения заряда струй, выделенных таким образом из моделированных событий:

- с $B^+ \rightarrow Q_{\text{Jet}} = 0.19$
- с $B^- \rightarrow Q_{\text{Jet}} = -0.20$

Средние значения заряда компенсирующих струй, измеренных в работе [7]:

- компенсирующих $b \rightarrow -Q_{\text{Jet}} = 0.15$
- компенсирующих $\bar{b} \rightarrow -Q_{\text{Jet}} = -0.12$

Можно предположить, что результаты измерений в работе [7] образованы симметричными частями от B^+ и B^- мезонов, и общей частью, вероятно – глюонной компонентой и струями с нейтральными B -мезонами. Аналогично рассмотрим и результаты моделирования.

Считая $\frac{f_s}{f_d} \cong \frac{f_s}{f_u}$, вследствие примерного равенства масс кварков u и d , получаем ожидаемое значение заряда струй от b и \bar{b} кварков.

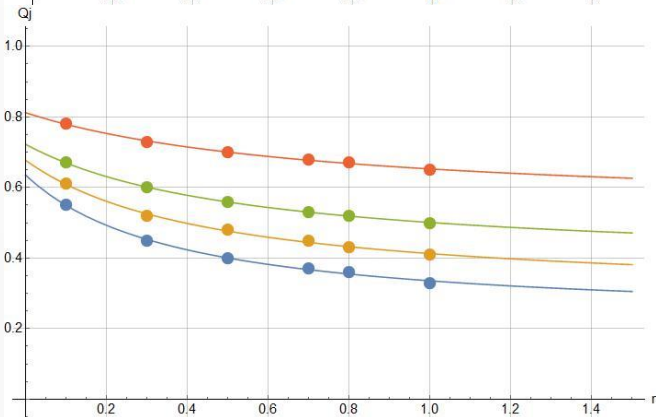
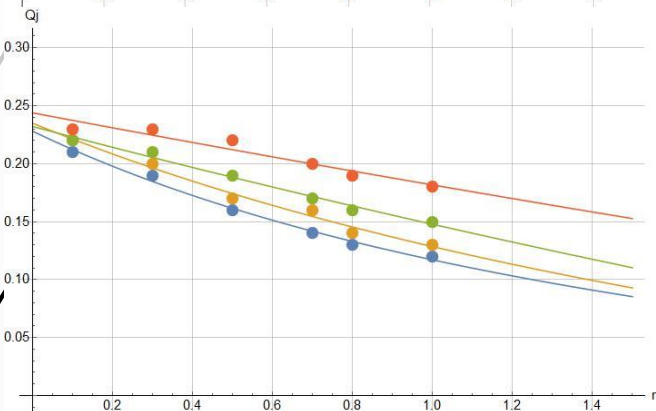
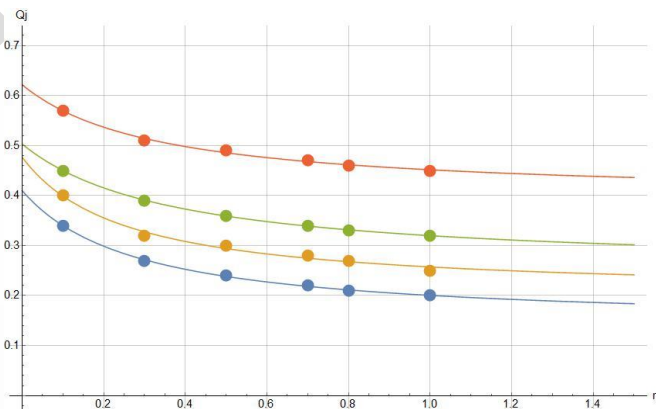
Результаты близки, практически совпадают.

	из моделированных данных	из экспериментальных данных	из теоретической оценки на основе коэффициента фрагментации $\frac{f_s}{f_d}$
средний заряд струй от b кварков (с B^- мезонами)	-0.49	-0.46	-0.47
средний заряд струй от \bar{b} кварков (с B^+ мезонами)	0.49	0.48	0.47

Зависимость среднего заряда струй от радиуса струи R

с B^+ мезонами, 3343 струй

18



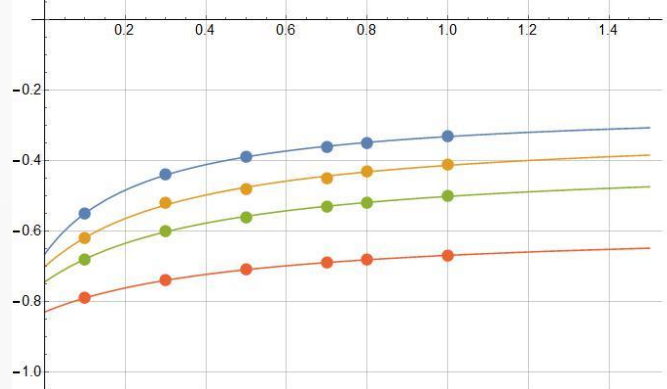
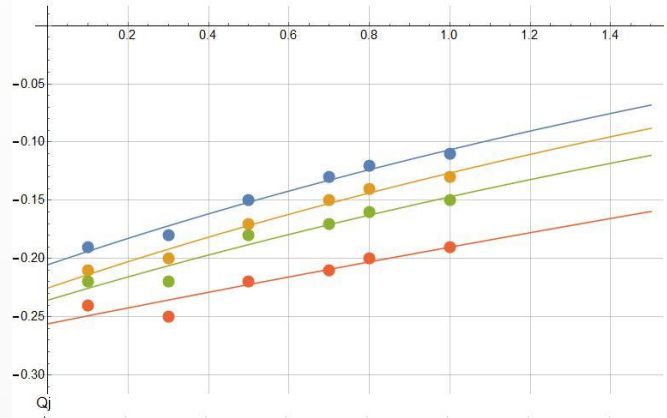
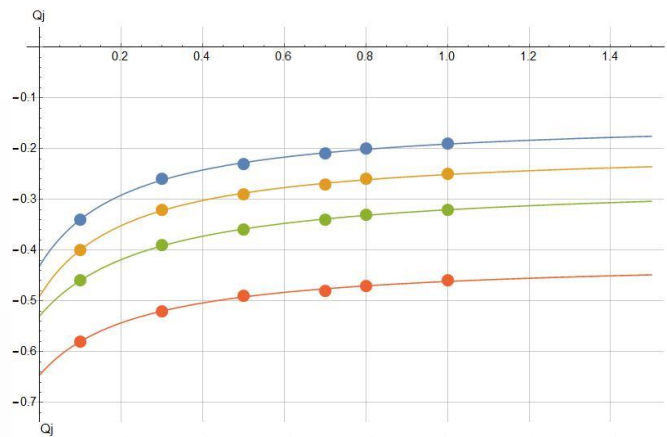
отбор всех частиц

отбор детектируемых
частиц

отбор заряженных
частиц

- $k=0.3$
- $k=0.5$
- $k=0.7$
- $k=1.1$

с B^- мезонами, 3423 струй



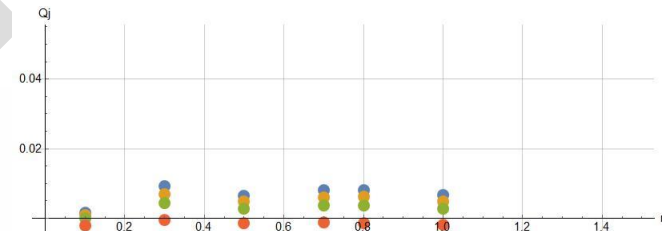
Зависимость среднего заряда струй от радиуса струи R

с B^0 мезонами, 3169 струй

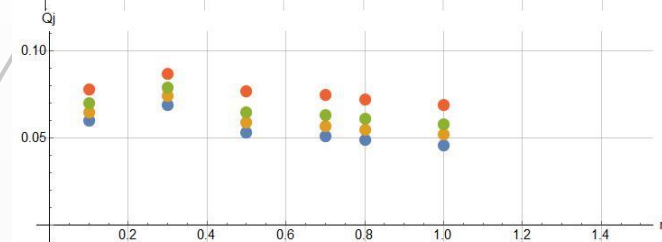
с \bar{B}^0 мезонами, 3289 струй

19

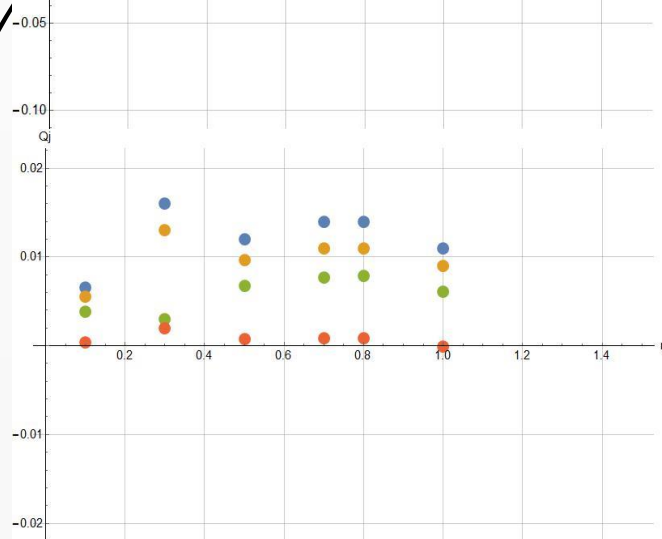
отбор всех частиц



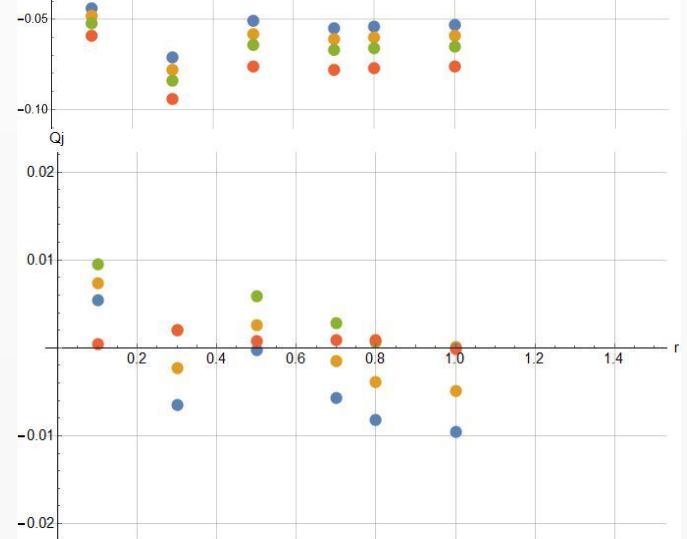
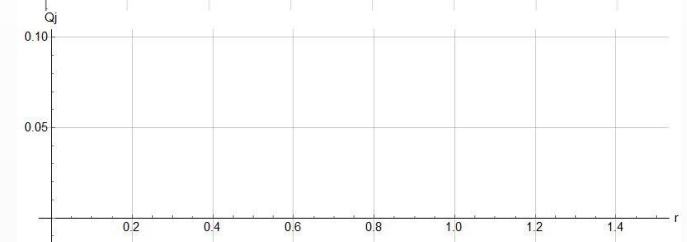
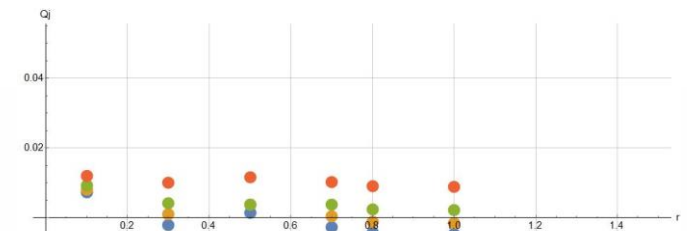
отбор детектируемых частиц



отбор заряженных частиц



- $k=0.3$
- $k=0.5$
- $k=0.7$
- $k=1.1$

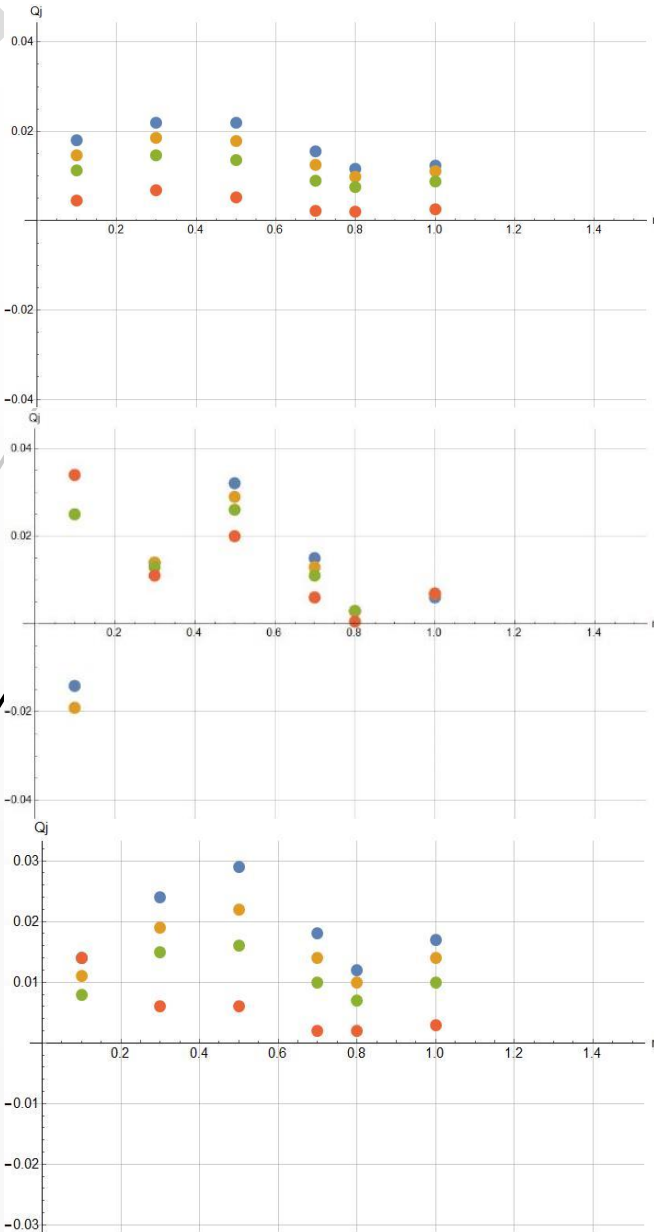


Зависимость среднего заряда струй от радиуса струи R

с B_s^0 мезонами, 770 струй

с \bar{B}_s^0 мезонами, 757 струй

20

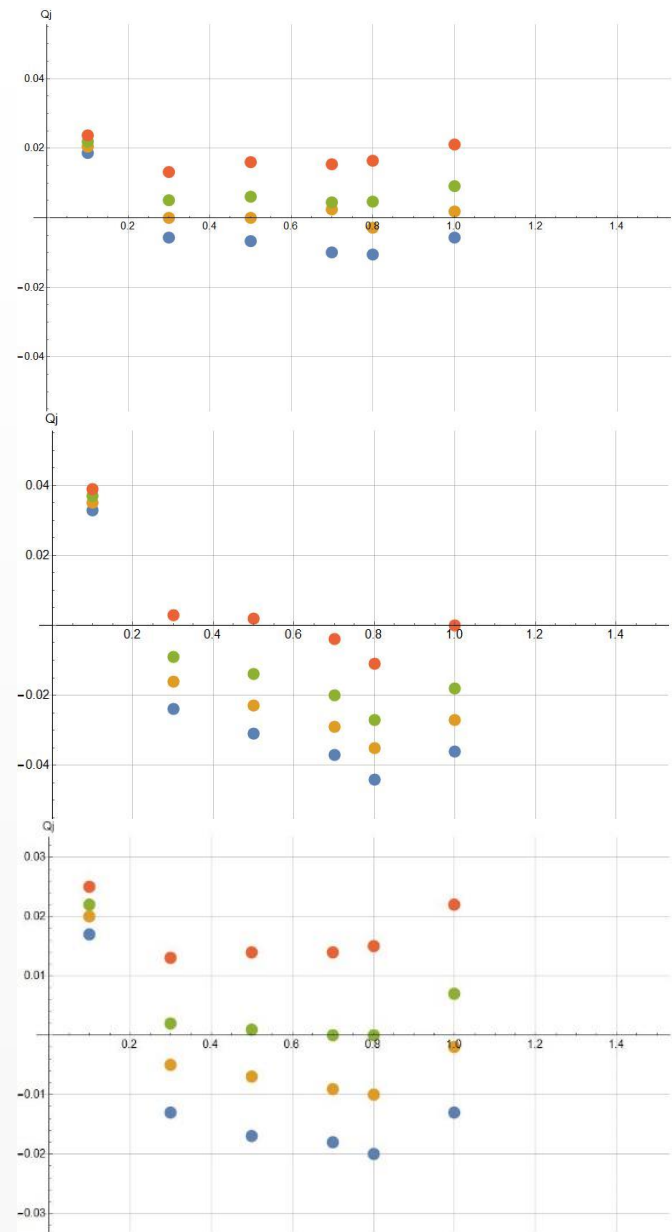


отбор всех частиц

отбор детектируемых частиц

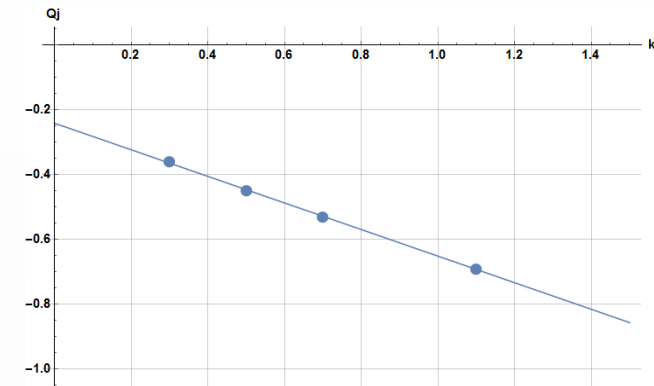
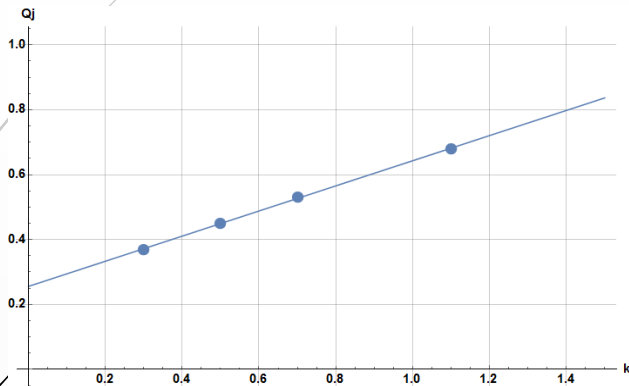
отбор заряженных частиц

- $k=0.3$
- $k=0.5$
- $k=0.7$
- $k=1.1$



Параметр регуляризации отвечает за чувствительность струй к мягкому излучению.

Зависимость среднего заряда струи, содержащей B^+ мезон (слева) и B^- мезон (справа), от коэффициента регуляризации k , для отбора заряженных частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 0.7$. Наклон ~ 0.4



Представляет интерес оценить средний заряд струй при стремлении радиуса струи к 0

“образующий” струю мезон →	B^+	B^-	B^0	$\overline{B^0}$	B_S^0	$\overline{B_S^0}$
отбор всех частиц	0.62	-0.62	-0.00	0.01	0.00	0.03
заряженных частиц	0.81	-0.82	-0.00	-0.00	-0.02	0.03
детектируемых частиц	0.24	-0.26	0.08	-0.03	0.04	0.06

Заключение

22

- Выполнено моделирование pp-соударений и набор статистики в 100 млн событий при энергии соударения $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, реализован метод выделения струй, содержащих B -мезоны, и записи их с возможностью последующей обработки.
- Построены распределения взвешенного заряда струй с различными образующими B -мезонами при вариации критериев отбора, а также параметров струи R и k .
- Построены основные распределения струй по поперечному импульсу, количеству частиц, быстрой.
- Выполнено сравнение результатов моделирования с существующими измерениями и работами.
- Показаны возможности анализа распределений заряда струй с B -мезонами.
- 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.

Спасибо за внимание!

Упомянутые работы

[2] *The ATLAS Collaboration*, Properties of jet fragmentation using charged particles measured with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ // Phys. Rev. D100(2019)052011. CERN-EP-2019-090 24th June 2019

[4] *The ATLAS Collaboration*, Measurement of jet charge in dijet events from $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ pp collisions with the ATLAS detector // Physical Review D 93, 052003 (2016), CERN-PH-EP-2015-207

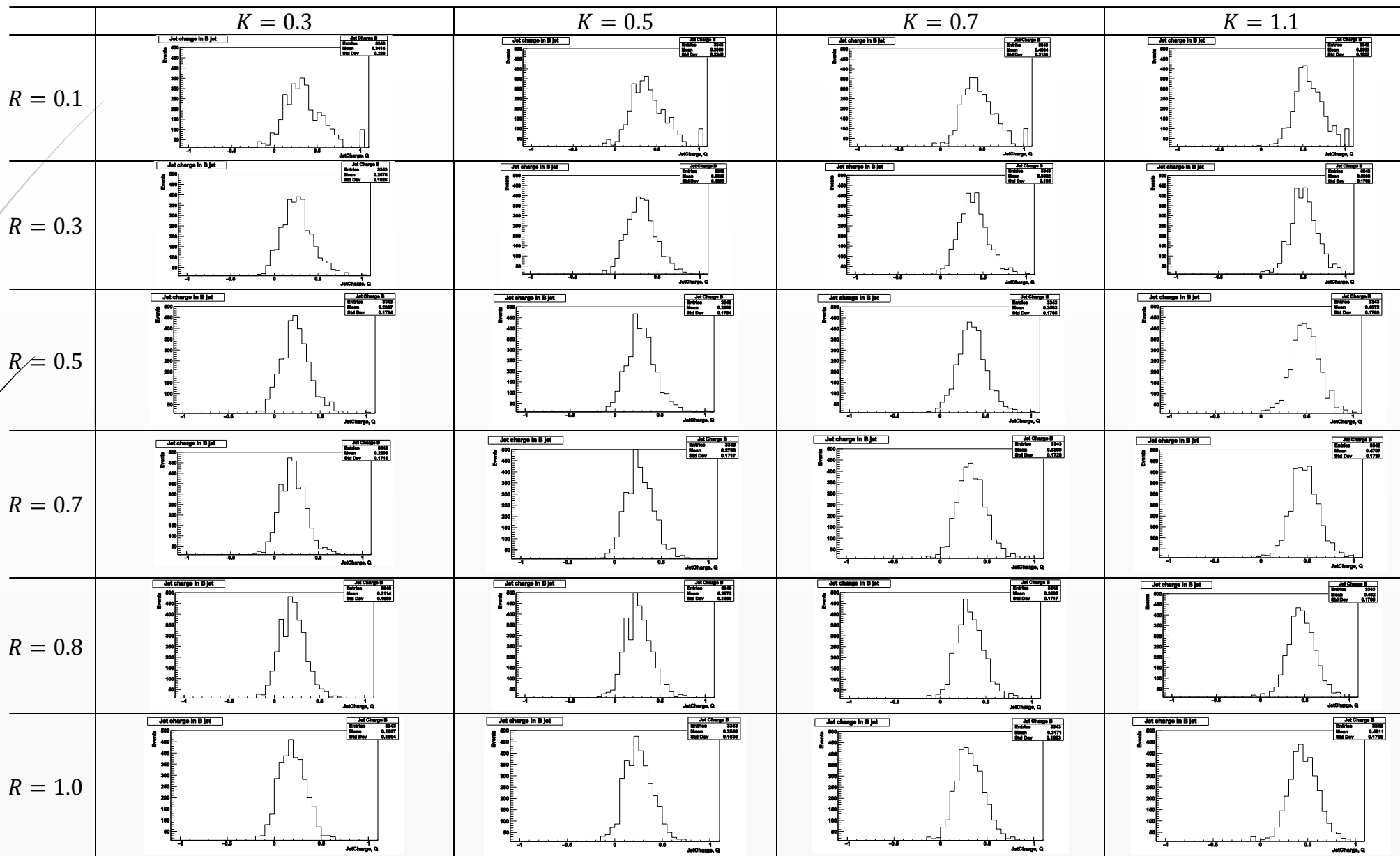
[7] *The ATLAS Collaboration*, Measurement of the CP-violating phase φ_s and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS // JHEP 08 (2016) 147, CERN-PH-2015-166 6th September 2016

[9] *L.N.Smirnova, S.M.Turchikhin*, Expected b-production at the LHC // Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics

[10] *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

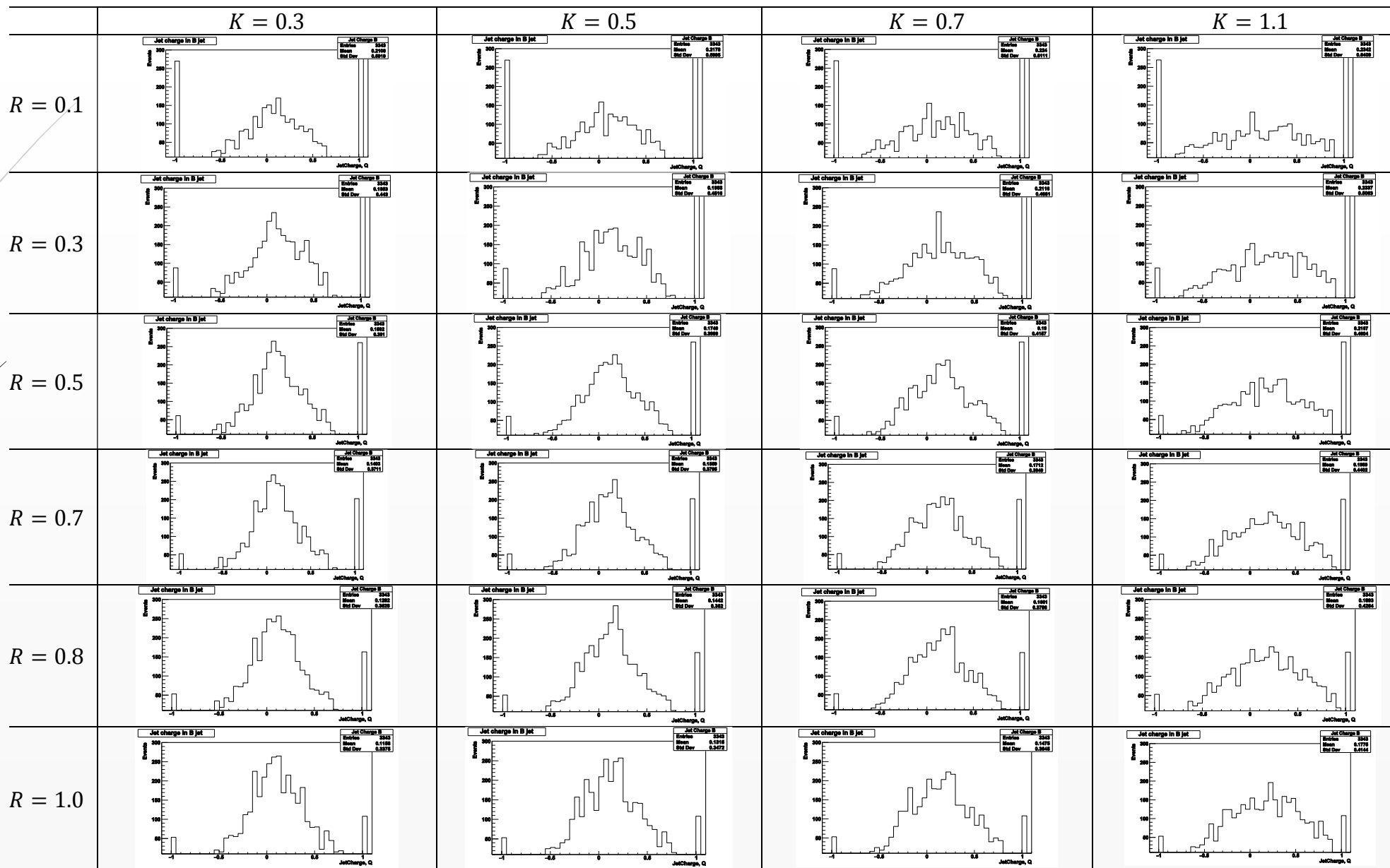
Струи с B^+ -адронами, количество струй: **3343**, отбор **всех** частиц.

24



Струи с B^+ -адронами, количество струй: **3343**, отбор **детектируемых** частиц.

25



Струи с B^+ -адронами, количество струй: **3343**, отбор **заряженных** частиц.

26

