

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени
М.В. ЛОМОНОСОВА»**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

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.

Допущен к защите « »

Зав. кафедрой

Москва 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. СТРУИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS	
1.1 LHC, ATLAS.....	6
1.2 Рождение b -кварка, формирование и заряд струи.....	10
1.3 Струи в эксперименте ATLAS.....	15
ГЛАВА 2. ГЕНЕРАТОРЫ СОБЫТИЙ, МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙ	
2.1 Генераторы событий, генератор PYTHIA.....	22
2.2 Моделирование pp -соударений, выделение струй частиц.....	24
2.3 Расчет характеристик струй и их последующий анализ.....	26
ГЛАВА 3. ЗАРЯД СТРУЙ, СОДЕРЖАЩИХ B-МЕЗОН	
3.1 Основные характеристики струй.....	28
3.2 Распределения взвешенного заряда струй с различными B - мезонами.....	31
3.3 Анализ распределений зарядов струй с B -мезонами.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	52
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	54
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	58

Введение.

В физике частиц и ядер наиболее успешной и всеобъемлющей теорией является Стандартная модель. Однако, она не может объяснить барионную асимметрию и темную материю вселенной. Поэтому проводятся эксперименты, направленные на её проверку и поиск новой физики за её пределами. Для исследования фундаментальных частиц и их взаимодействий необходимы очень высокие энергии, которые можно получить только на коллайдерах. Коллайдером с самой высокой энергией соударения является LHC – Большой адронный коллайдер (БАК), разгоняющий встречные пучки протонов до энергий 6.5 ТэВ (10^6 МэВ) и больше. Столь высокие энергии соударений позволяют проникать на уровень кварков и глюонов и изучать их поведение.

Одним из актуальных направлений исследований в физике для экспериментов БАК является В-физика – то есть исследование свойств адронов, которые содержат b -кварки и \bar{b} -кварки. Механизмы рождения В-адронов определяются динамикой сильных взаимодействий, описываемых квантовой хромодинамикой (КХД), её непертурбативной областью, то есть для теоретических расчётов необходимо применение модельных описаний. Таким образом, при исследованиях В-физики возможно уточнение теории тяжелых кварков, свойств В-адронов, исследование нарушения CP-четности и др.

Как известно, из-за сильного взаимодействия (обмена цветными глюонами) вылет одиночного кварка или глюона из адрона невозможен. В реальности такая частица в 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. Одной из актуальных задач является исследование струй, в том числе струй b -кварков, и, в частности, электрического заряда струй.

Выделение или формирование струй среди множества рожденных частиц происходит с использованием специальных алгоритмов, в настоящее время обычно используется anti- k_T алгоритм. Измерения структуры струй в протон-протонных (pp) столкновениях при энергии центра масс $\sqrt{s} = 7$ ТэВ 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. В перспективе, анализ заряда струй и его зависимости от различных параметров и, главное, от формирующих струю частиц могут помочь в создании более совершенных методов детектирования тяжёлых кварков.

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 B -адронов в эксперименте ATLAS.

Магистерская диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. В главе 1 кратко рассматривается БАК (LHC) и детектор ATLAS, основные задачи B -физики и b -кварков, процессы их рождения, формирование струи от b -кварка, определение ее заряда. Рассматриваются существующие измерения в эксперименте ATLAS, связанные с процессами формирования струи и ее зарядом. В главе 2 уделено внимание генераторам событий, в особенности PYTHIA 8.2 и её возможностям. Кроме того, описываются используемые методы моделирования и выделения струй, программные способы обработки и анализа результатов. В главе 3 приводятся основные результаты моделирования – распределения взвешенного заряда струи в зависимости от радиуса струи R , коэффициента корреляции k , типа B -мезона, образующего струю. Также рассматриваются распределения в

струях по поперечному импульсу p_T , быстроте y , количеству частиц. Полный набор распределений включен в приложение 2. В последней части главы проводится анализ полученных распределений и сравнение с экспериментальными данными. В заключении приводятся основные результаты работы.

ГЛАВА 1. Струи в эксперименте ATLAS

1.1 Ускорительный комплекс БАК и эксперимент ATLAS

Большой адронный коллайдер (БАК) – Large Hadron Collider (LHC) – кольцевой ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначен для ускорения протонов или тяжёлых ионов и изучения продуктов их соударений. Его история началась с разработки проекта по созданию ускорителя адронов высоких энергий на основе Большого электрон-позитронного коллайдера (Large Electron-Positron collider) в 1984 году.

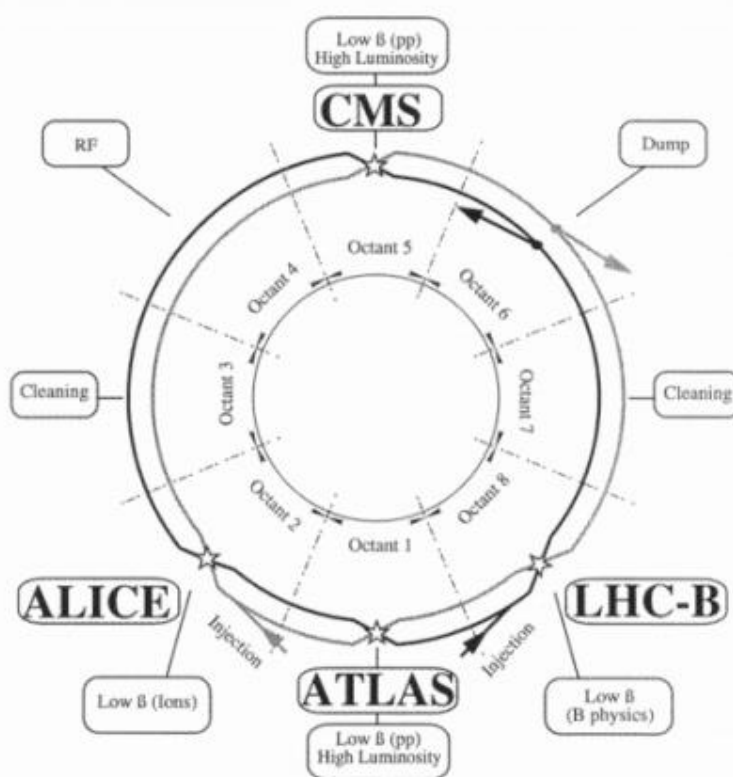


Рис. 1.1 Схематический макет официально принятый в 1994 году.

Строительство БАК началось в 2001 году. Запущен 10 сентября 2008 года. Является самым большим и мощным ускорителем частиц в мире. Длина большого ускорительного кольца составляет 27 км, встречные пучки протонов разгоняются до энергий в 6,5 ТэВ. В настоящее время завершён этап работы коллайдера Run 2 (второй сеанс 2015-2018гг.) и идут работы по подготовке к третьему этапу Run 3 и достижению энергии пучков 7 ТэВ (энергия соударений 14 ТэВ).

Источником протонов является простой газообразный водород. С использованием электрического поля срываются электроны, и полученные протоны разгоняются в первом ускорителе LINAC 2 (комплекс линейного ускорителя протонов ЛУП на рисунке 1.2) до энергий в 50 МэВ. Затем протоны вводятся в PSB (бустерный протонный синхротрон), где разгоняются до 1,4 ТэВ, затем в PS (протонный синхротрон), где достигают энергии 25 ТэВ. В итоге протоны попадают в SPS (суперпротонный синхротрон) и разгоняются до энергий 450 ТэВ. И уже из SPS, наконец, протоны (или ионы свинца) по линиям передачи пучков T_1 и T_2 вводятся в одну из труб основного большого кольца LHC (для ионов свинца достигается энергия 177 ТэВ/нуклон).

Основное кольцо состоит из двух труб, в которых по встречным направлениям движутся пучки протонов или ядер. Инжекция осуществляется с помощью септум и киккер магнитов. Движение частиц по приблизительно круговой орбите осуществляется с помощью 1232-х дипольных магнитов длиной по 15 метров. Фокусировка проводится 386-тью квадрупольными магнитами, каждый из которых 5-7 метров в длину. Используются также тысячи малых корректирующих магнитов. Сверхпроводящие магниты и резонаторы охлаждаются жидким гелием соответственно до 1,8⁰К и 4,5⁰К. Чтобы протонные пучки могли свободно циркулировать внутри труб, практически не сталкиваясь с молекулами газа, в трубах создается сверхглубокий вакуум. Давление остаточных газов составляет порядка 10^{-13} атм. Пакеты сгустков протонов в основном кольце коллайдера могут циркулировать в трубах кольца в течение 10-12 часов, сохраняя свои рабочие параметры. В четырёх точках пересечения труб в основном кольце располагаются четыре детектора: ATLAS, CMS, ALICE, LHCb.

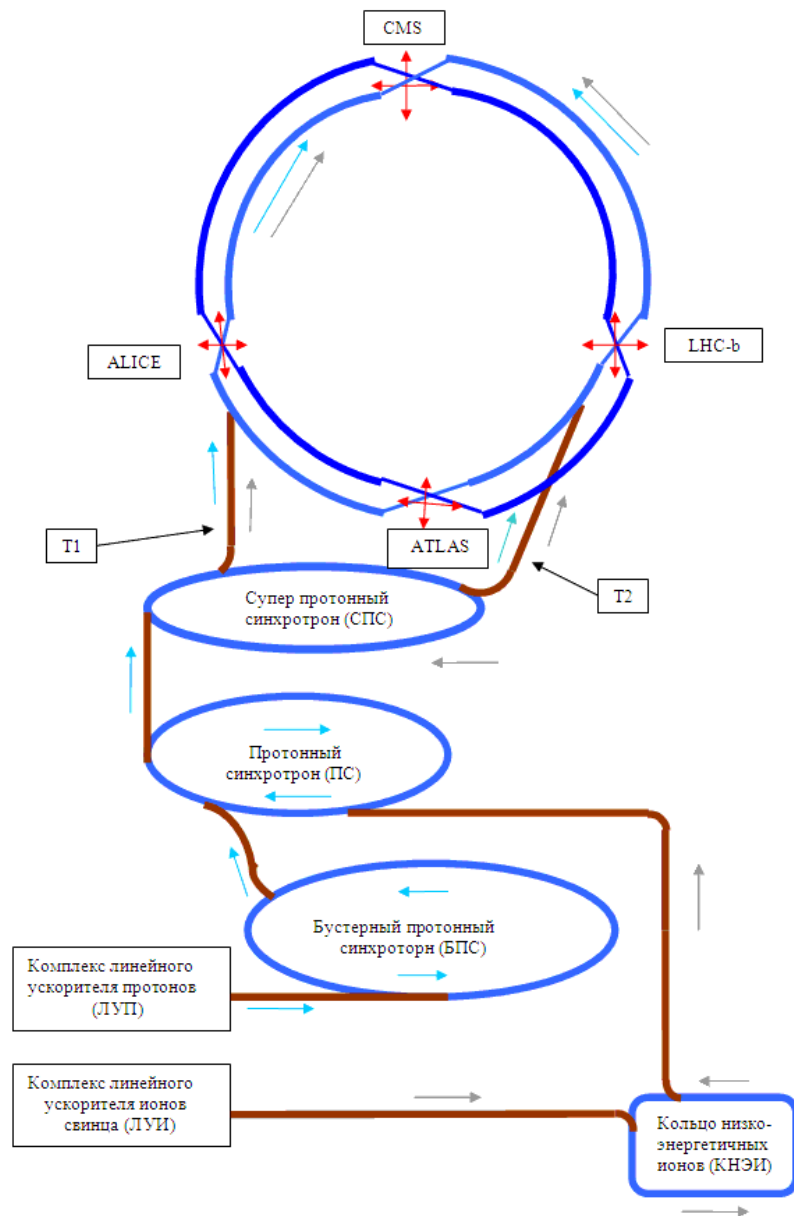


Рис.1.2 LHC, общая схема ускорительного комплекса

ATLAS – один из двух детекторов общего назначения на Большом адронном коллайдере (LHC). Он исследует широкий спектр физики, от поиска бозона Хиггса до дополнительных измерений и частиц, которые могут составлять темную материю. Основным элементом, определяющим внешний вид и размеры детектора ATLAS, является его магнитная система. Внешний сверхпроводящий воздушно-зазорный тороид служит ключевым элементом ATLAS, обеспечивая прецизионное измерение импульсов мюонов во всем доступном интервале их значений.

Является одним из самых больших детекторов в мире. Его длина составляет 43 метра, а диаметр — 22 метра. Впрочем, благодаря достаточно

ажурной конструкции, полный вес детектора не столь велик, как у CMS, — всего 7 тысяч тонн.

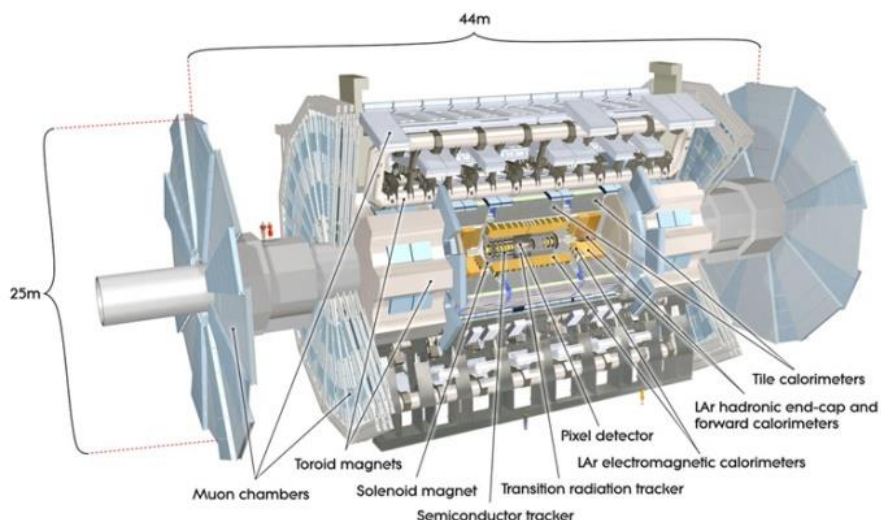


Рис.1.3. Общий вид детектора ATLAS.

На рисунке 1.3 показан общий вид детектора ATLAS, на котором видны элементы конструкции тороида. Он состоит из центрального тороида (барреля) и двух торцевых. Катушки (обмотки) торцевого тороида находятся в общем корпусе. В магнитном поле тороидов размещены детекторы мюонов. Справа и слева по краям расположены большие торцевые диски мюонных камер, диаметр этих дисков 25 метров. Тороидальный магнит с мюонными камерами составляет мюонный спектрометр детектора ATLAS.

Следующим элементом при движении к центру детектора от мюонного спектрометра служит адронный калориметр. Внутри адронного калориметра находится жидкоаргоновый электромагнитный калориметр. Внутри калориметрической системы в непосредственной близости к трубе, в которой движутся и сталкиваются пучки протонов, расположен внутренний детектор. Он помещен в магнитное поле соленоида 2Т. Диаметр Внутреннего детектора 2 метра, длина 5.4 метра. Элементами Внутреннего детектора служат пиксельные и микроstriповые кремниевые детекторы и пропорциональные дрейфовые трубки детектора переходного излучения.

Соленоид и тороиды совместно образуют магнитную систему детектора ATLAS.

Ближайшую к пучку область внутреннего детектора занимают прецизионные пиксельные и микростриповые кремниевые детекторы. В центральной части (барреле) они размещаются на цилиндрах с осями вдоль направления пучка, на краях смонтированы на дисках, плоскости которых перпендикулярны пучку. Выбор конструкции обеспечивает условие, чтобы частицы из области соударения протонов пересекали плоскости детекторов вблизи нормали. Конструкция позволяет детектору ATLAS производить измерения при высоких поперечных импульсах заряженных частиц $p_T > 0,5$ ГэВ и значениях псевдобыстроты $\eta < 2,5$.

1.2 Рождение b -кварков, формирование и заряд струи

Доминирующим источником рождения тяжелых b кварков на коллайдере являются процессы КХД, которые можно разделить на три категории:

- Парное рождение аромата (flavour creation, рис.1.4), в котором пара $b\bar{b}$ рождается в глюонном синтезе или аннигиляции легкого кварка и антикварка:

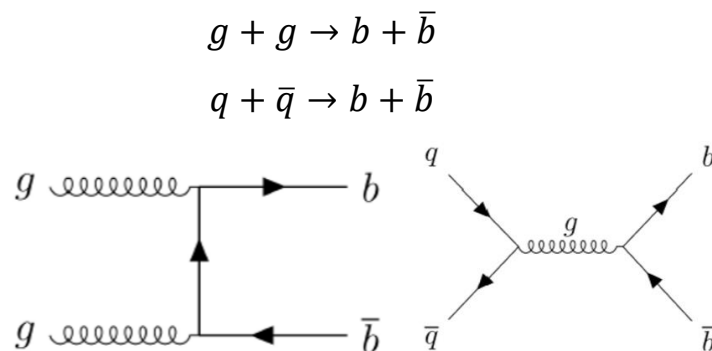


Рис. 1.4. Парное рождение в глюонном синтезе s -channel (слева) и при аннигиляции кварка и антикварка (справа) – flavour creation

При низких энергиях эти процессы являются механизмом лидирующего порядка по константе сильного взаимодействия и формируют большую часть полного сечения рождения.

- Возбуждение аромата (flavor excitation, рис.1.5) - рассеяние b -кварка или \bar{b} -кварка из начального состояния в конечное глюоном или лёгким кварком или антикварком. Вклад этого механизма чувствителен к количеству b -кварков в адроне, что определяется структурной функцией. Даже в отсутствие собственных $b\bar{b}$ -пар в структурной функции протона, они могут рождаться из моря глюонов при высоких переданных импульсах Q^2 .

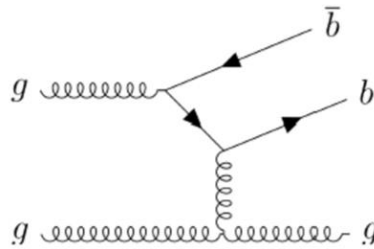


Рис.1.5. Рождение b -кварка при возбуждении аромата (flavor excitation)

- Рождение в партонном ливне или в процессе фрагментации (gluon splitting, рис.1.6).

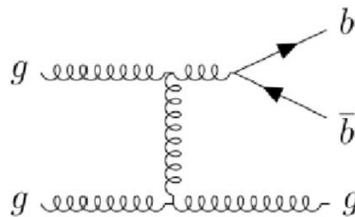


Рис.1.6. Рождение b -кварка в партонном ливне или фрагментации (расщепление глюона, gluon splitting)

Процессы с возбуждением аромата и партонными ливнями описываются в КХД диаграммами нелидирующего, т.е. следующего за лидирующим, порядка по константе сильного взаимодействия α_s , однако при энергиях ЛНС их вклад становится существенным.

Как уже отмечалось выше, из-за цветовых сил существование одиночного кварка невозможно. Рождённый b -кварк образует адрон путем присоединения других кварков или рождения их за счет собственной энергии. Этот процесс будет происходить и с новыми кварками, оставшимися без пары, то есть носит лавинный характер. В результате образуются струи частиц с высоким поперечным импульсом, движущихся примерно в одном направлении. Это явление называется процессом фрагментации и описывается нелинейными уравнениями КХД. Одним из

наиболее простых и наглядных значений при этом 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 . Поперечный импульс струи, p_T , является лучшим показателем начального масштаба (μ) эволюции струи. Доля поперечного импульса обозначена символом $\zeta = p_T^{particle} / p_T^{jet}$. Сама функция фрагментации, как и функции распределения партонов (PDFs), не может быть рассчитана из принципов теории возмущений. Однако через эволюцию 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 .

Использование информации о заряде частиц предоставляет путь для измерения одиночных адронов внутри струи (в отличие от энергетического вклада в калориметре, который может быть результатом от нескольких частиц), из которых можно получить $\sum_h D_p^h$. Основной величиной, связанной с функцией фрагментации, является множественность заряженных частиц. Полное распределение множественности зависит от многопартонных функций фрагментации сложным образом; более прямым исследованием D является измерение производства адронов как функции от ζ , которая является суммой D по p и h (но не интегрируется по ζ). Изучаются также дополнительные наблюдаемые, чтобы исследовать угловое распространение фрагментации струи за пределы коллинеарного предела.

Выделение струи из всего множества частиц осуществляется, как правило, с помощью anti- k_T метода [3]. Идею метода можно понять, рассмотрев событие с несколькими жесткими частицами с поперечными

импульсами p_{T1} , p_{T2} и далее и множеством мягких частиц. Условное расстояние между частицами $d_{ij} = \min\left(\frac{1}{p_{Ti}}, \frac{1}{p_{Tj}}\right) \frac{\Delta_{ij}^2}{R^2}$. В случае сравнения жесткой, пусть p_{T1} , и мягкой частицы (то есть $p_{T1} \gg p_{Tj}$ величина $d_{1j} = \min\left(\frac{1}{p_{T1}}, \frac{1}{p_{Tj}}\right) \frac{\Delta_{1j}^2}{R^2}$ определяется только поперечным импульсом жесткой частицы и расстоянием в пространстве $\Delta_{1j}^2 = (y_1 - y_j)^2 + (\phi_1 - \phi_j)^2$, где y – быстрота частицы, а ϕ – азимутальный угол, а параметр R определяет масштаб струи. Мягкие частицы будут стремиться сгуститься с жесткими задолго до того, как они сгруппируются между собой. Если у жесткой частицы нет жестких соседей на расстоянии $2R$, то она просто накапливает все мягкие частицы в круге радиуса R , в результате чего получается идеальная коническая струя. В случае, если есть такая частица на расстоянии меньше $2R$, то мягкие частицы относятся к той, для которой величина d_{12} будет минимальной. Таким образом струи уже не будут идеально коническими, а будут разделены линией, и граница будет определена из соотношения p_{T1} и p_{T2} .

Существуют и другие способы выделения струи из всего множества частиц, но в данной работе не будет о них упоминаться. Для иллюстрации и сравнения приводится рисунок 1.7.

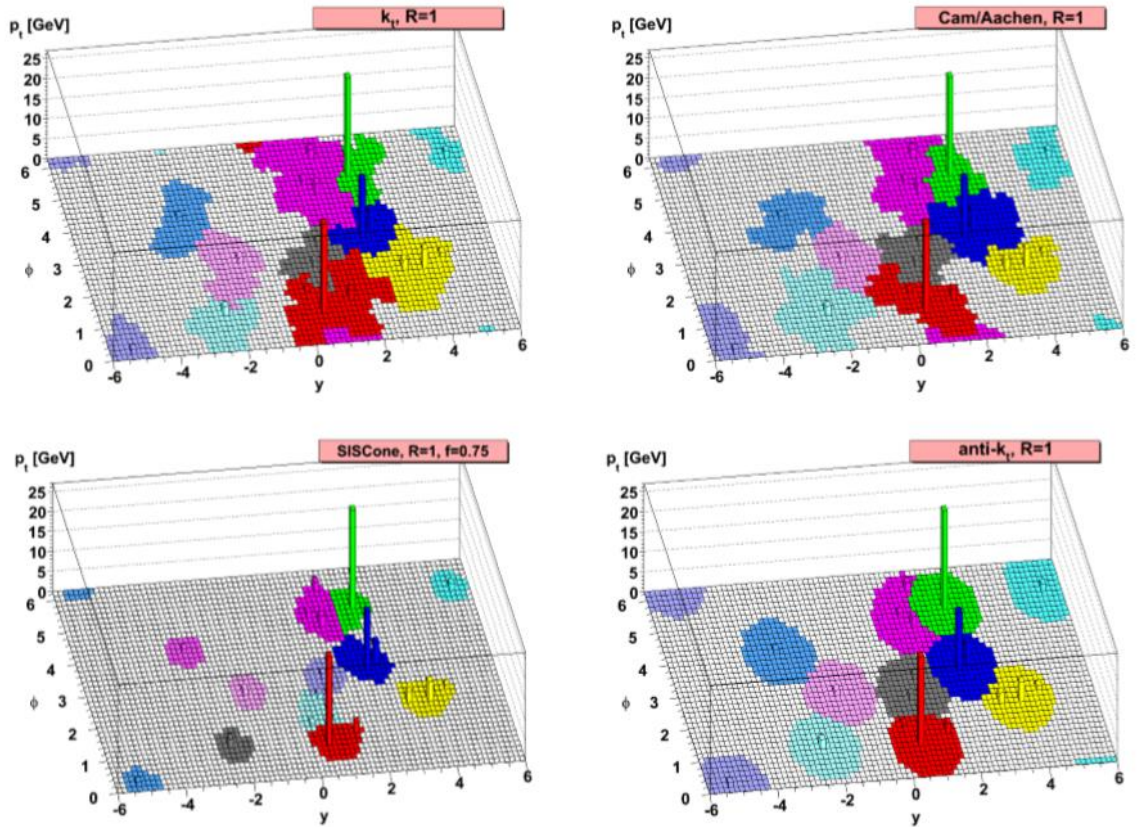


Рис.1.7. Пример события на партонном уровне, сгенерированного Herwig, иллюстрирующего области захвата результирующих жестких струй, полученные разными методами: k_T (слева сверху), Aachen (справа сверху), SIScone (слева снизу), $anti-k_T$ (справа снизу)

Для определения заряда струи нет унифицированной схемы. Самая простая и наиболее используемая состоит в том, чтобы скомпоновать заряд всех треков, связанных со струей. Но нужно учитывать, что этот способ чувствителен к внешнему мягкому излучению. Поэтому добавляется взвешивание заряда по поперечному импульсу. В итоге заряд струи Q_J считается как

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

где $Tracks$ – набор треков, связанных со струей J , q_i – заряд (в единицах заряда позитрона) трека i с соответствующим поперечным импульсом $p_{T,i}$, k – свободный параметр регуляризации, $p_{T,J}$ – поперечный импульс струи. Параметр k в уравнении регулирует чувствительность струй к мягкому излучению (что будет видно в дальнейшем из результатов моделирования).

1.3 Струи в эксперименте ATLAS

Многие работы в эксперименте ATLAS используют струи для анализа. Часть из них связана с зарядом струй, в том числе и b -кварков. Так работа [4] посвящена измерению заряда струй, образованными легкими ароматами – $up, down$. В ней сравниваются заряды струй, выделенных методом anti- k_T , полученных в результате измерений на детекторе, и струй, полученных в результате моделирования pp -соударений на Монте-Карло генераторе PYTHIA. Для такого сравнения видна хорошая согласованность эксперимента с теорией, для различных значений регуляризационного параметра k (рисунок 1.8 и 1.9). На распределениях представлены все струи, образованных легкими кварками, без деления на образующие ароматы.

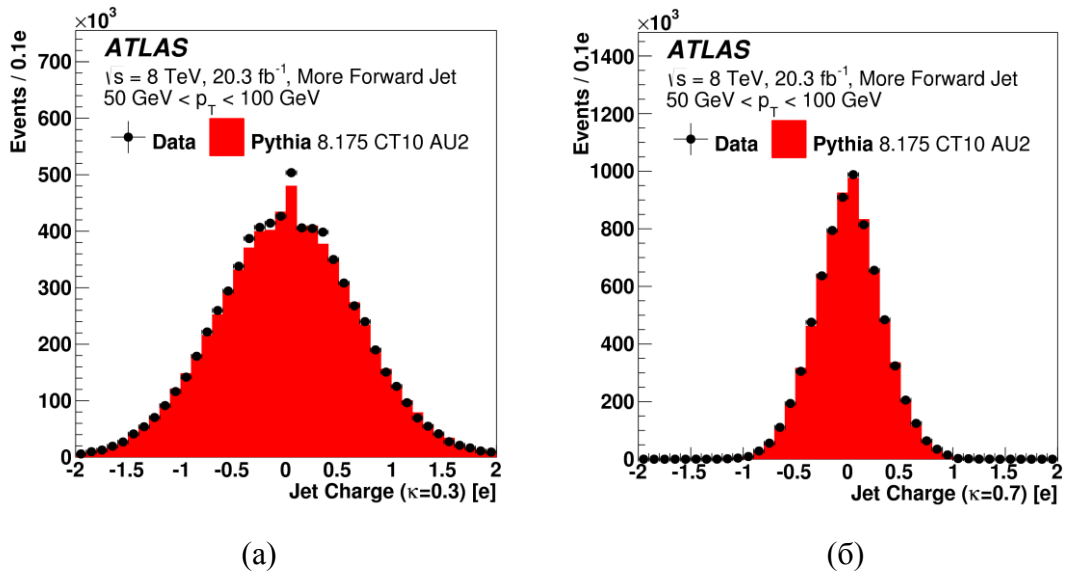


Рис.1.8. Распределения заряда струй от легких ароматов на уровне детектора полученных при измерении и при моделировании при значениях $50 \text{ GeV} < p_T < 100 \text{ GeV}$, $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, параметр регуляризации $k = 0.3$ (а) и $k = 0.7$ (б)

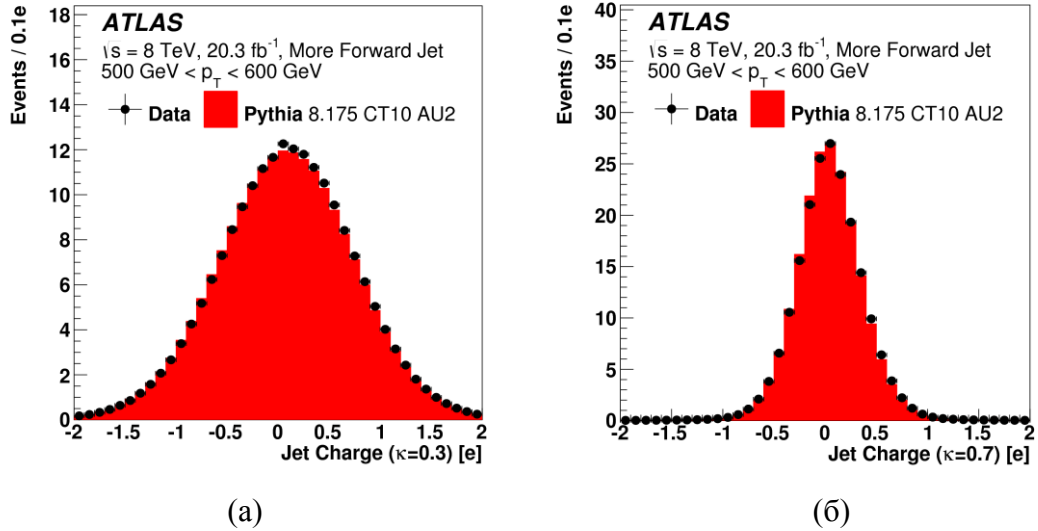


Рис.1.9. Распределения заряда струй от легких ароматов на уровне детектора полученных при измерении и при моделировании при значениях $500 \text{ GeV} < p_T < 600 \text{ GeV}$, $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, параметр регуляризации $k = 0.3$ (а) и $k = 0.7$ (б)

В качестве результатов получены распределения средних зарядов струй в зависимости от поперечного импульса при различных значениях k (рисунок 1.10) для центральной и передней областей. На распределениях хорошо видно, как параметр k регулирует чувствительность струй к мягкому излучению.

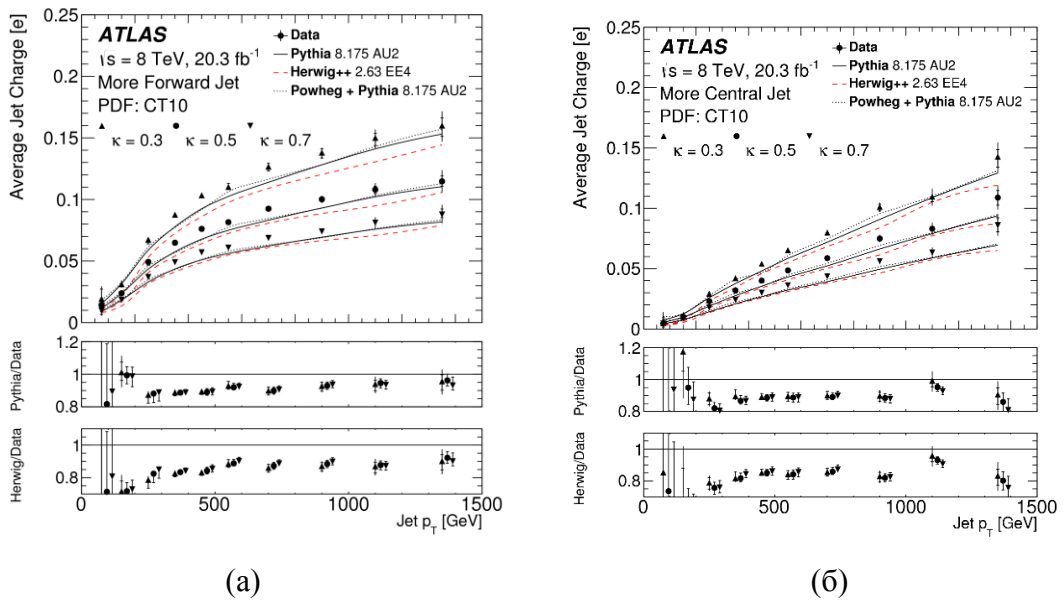


Рис.1.10. Распределение среднего заряда струи в зависимости от поперечного импульса для разных значений $k=0.3, 0.5, 0.7$ для (а) более передних струй и (б) более центральных струй.

При высоких значениях поперечного импульса средний заряд струй от легких ароматов возрастает. При низких значениях – средний заряд немногим больше нуля, около 0.01.

Однако чаще струи измеряются, или моделируются, ради дальнейшего анализа и измерения других, более фундаментальных процессов. Так, работа [5] посвящена исследованию фрагментации b -кварка, используя распад $B^\pm \rightarrow J/\psi (\mu^+ \mu^-) K^\pm$. При этом активно используются струи и их распределения. В том числе получены распределения струй по поперечному импульсу и псевдобыстроте (рисунок 1.11).

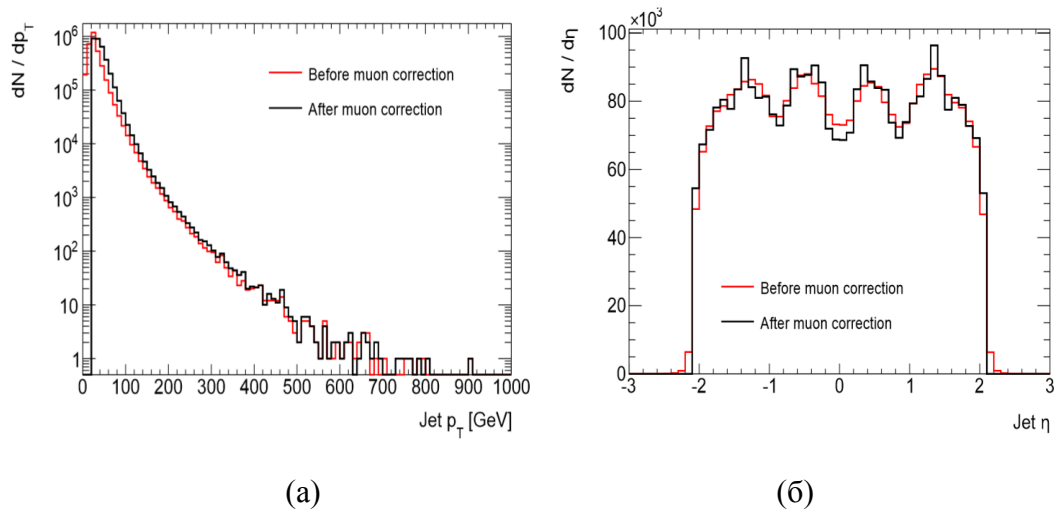


Рис.1.11. Распределения всех струй по поперечному импульсу (а) и псевдобыстроте (б).

Аналогичные распределения получены и для B^\pm , точнее для продуктов их распада $B^\pm \rightarrow J/\psi (\mu^+ \mu^-) K^\pm$

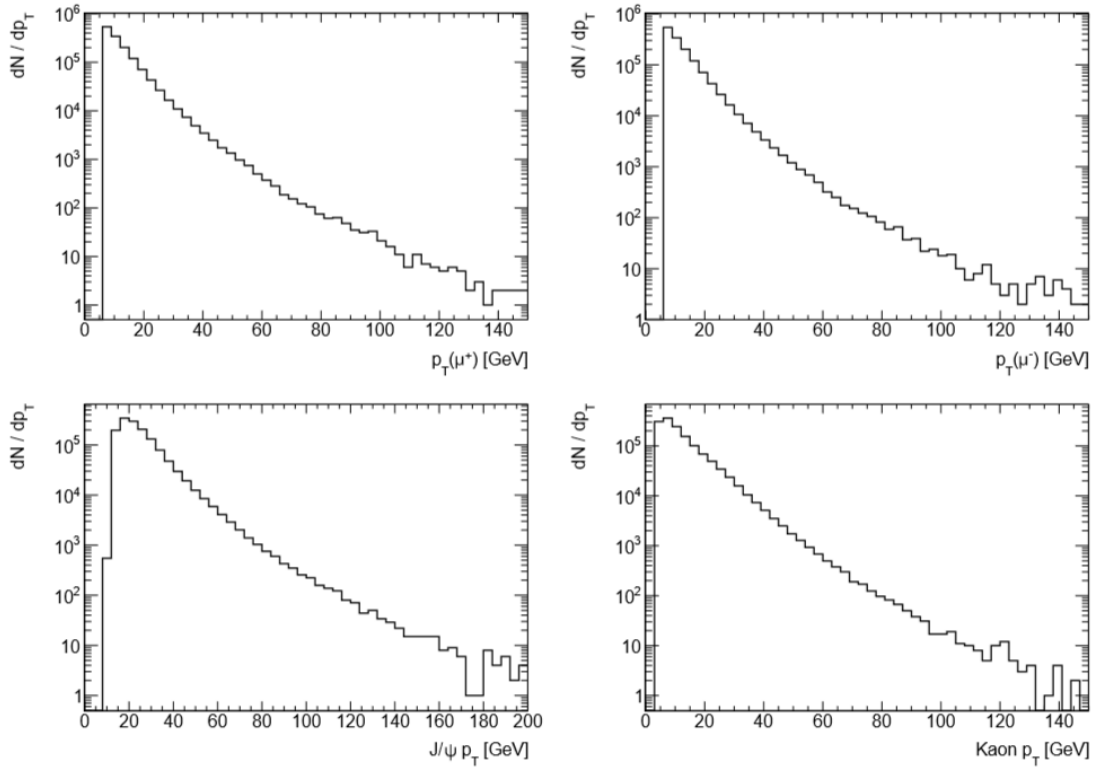


Рис.1.12. Распределения по поперечному импульсу частиц продуктов распада B^\pm : μ^+ (слева сверху), μ^- (справа сверху), J/ψ (снизу слева) и K^\pm (справа снизу).

Как несложно заметить, максимальное количество образованных частиц сосредоточено при достаточно низких поперечных импульсах, около 5-10 ГэВ.

Продолжая тему фрагментации, следует обратить внимание на работу [2], в которой исследуется фрагментация струй на основе анализа заряженных частиц в детекторе ATLAS. Струи выделяются anti- k_t методом, $R = 0.4$, для треков с $p_T > 0.5$ ГэВ, $|\eta| < 2.5$. В работе измерены и смоделированы характеристики самих струй, такие как распределение по поперечному импульсу струи, псевдобыстроте, количеству заряженных треков в струе (рисунок 1.13) и другие.

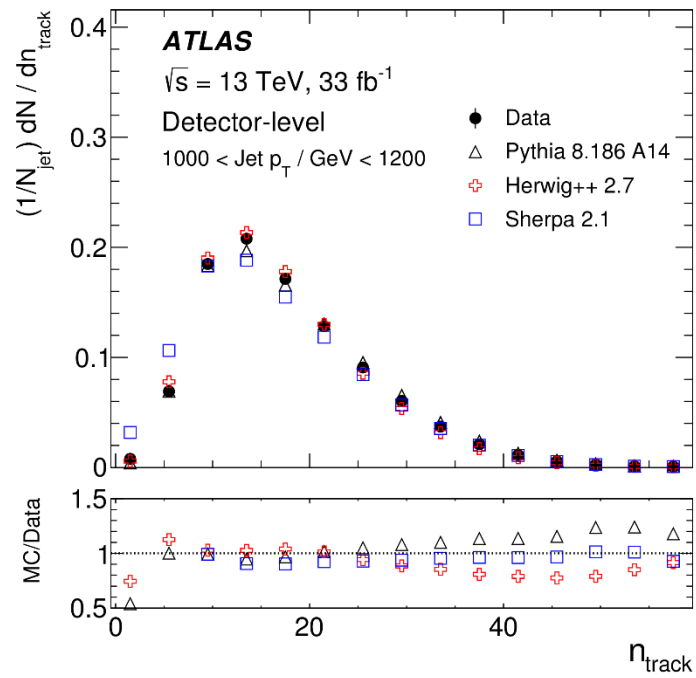


Рис.1.13 Распределение на уровне детектора числа треков заряженных частиц n_{tracks}

Основными результатами является оценка глюонной фракции в струе (рисунок 1.14)

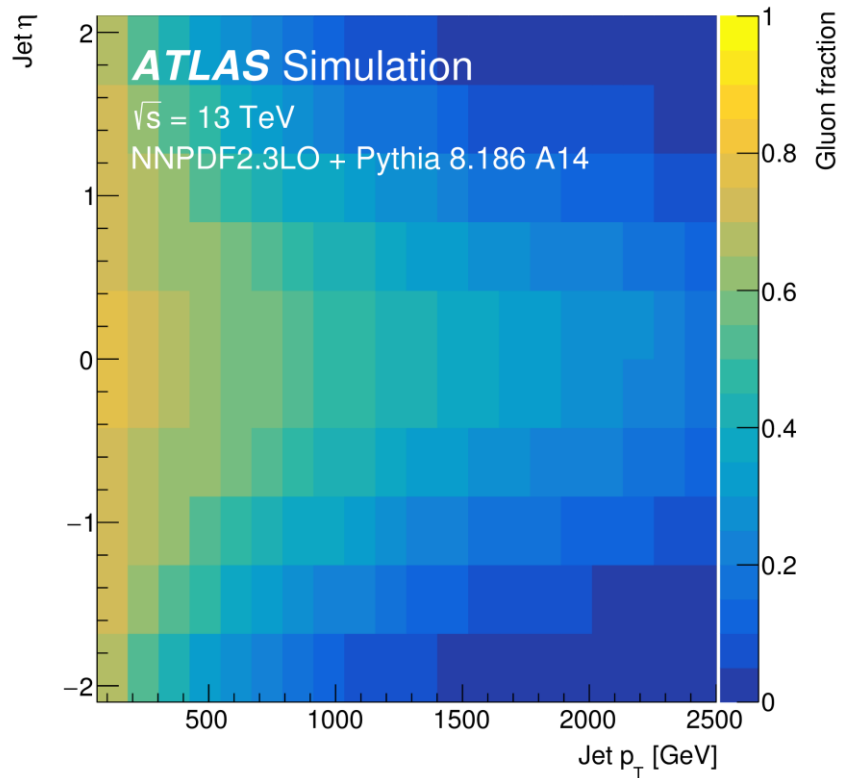


Рис.1.14. Доля глюонной струи как функция поперечного импульса струи p_T и псевдоскорости струи η

А также проведено подробное исследование глюонной и кварковой составляющей струй и их поведения в зависимости от множественности, поперечного импульса, радиального профиля (рисунок 1.15) для струй с высоким поперечным импульсом $1000 \text{ ГэВ} < p_T < 1200 \text{ ГэВ}$ при энергии pp соударения $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$.

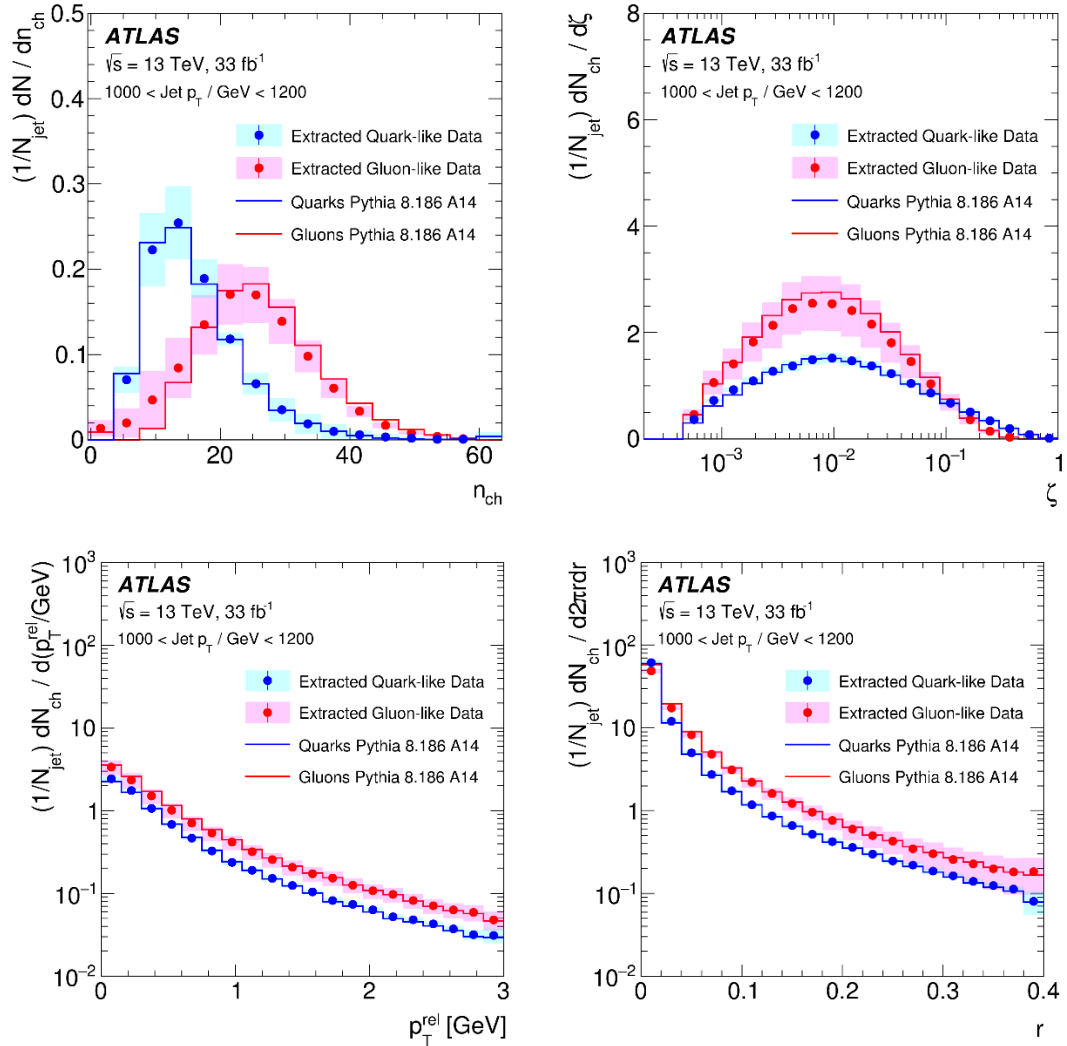


Рис.1.15. Кварк- и глюноподобные распределения кратности заряженных частиц (слева сверху), доли поперечного импульса (справа сверху), поперечного импульса (слева снизу), радиального профиля в единицах радиального расстояния r от оси струи для струй с $1000 \text{ ГэВ} < p_T < 1200 \text{ ГэВ}$.

Разработанный и применяемый в работе [2] метод является альтернативой к традиционным методам извлечения кварковых и глюонных струй с использованием моделирования.

В добавление к вышесказанному, можно упомянуть статью [6] по измерению сечения образования Z бозона, ассоциируемого с b -струями. Эта

работа является иллюстрацией важности точного определения струй и их характеристик для измерения и анализа величин, связанных с динамикой взаимодействий.

Примером измерений, где могут быть использованы моделируемые распределения может служить работа [7]. В ней получены распределения зарядов струй, компенсирующих образование B^+ и B^- мезонов (рисунок 3.7), которые можно будет использовать в данной работе для калибровки и проверки результатов моделирования. Работа [7] посвящена измерению CP-нарушения в распаде $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$.

Упомянутые статьи и работы демонстрируют важность измерения струй и их характеристик для исследования фундаментальной физики и КХД. Таким образом, актуальной задачей является выделение самих струй с высокой точностью, выделение их составляющих, анализ поведения и изменения струй при различных условиях их образования и различных методах выделения. Для этих задач будет полезной информация об электрическом заряде струй и его поведении при изменении разных факторов. Уже существующие работы по измерению и моделированию заряда струй от кварков легких ароматов показывают, как эти данные использовались для калибровки Монте-Карло генераторов событий. Таким образом, появляется необходимость измерения и моделирования зарядов струй от тяжелых ароматов, в том числе от b -кварков.

ГЛАВА 2. Генераторы событий, моделирование струй

2.1 Генераторы событий, генератор PYTHIA

Квантовая хромодинамика является очень сильным инструментом, позволяющим в теории описать почти все явления сильных взаимодействий. Однако нередко невозможно аналитически решить возникающие уравнения, и даже теория возмущений не может помочь. Остаются всевозможные варианты численного решения, в чем человеку помогают компьютерные программы – генераторы, рассчитывающие взаимодействия частиц и события, при этом возникающие. Из-за сложности КХД рассчитать сразу все явления, не потеряв точности, невозможно, поэтому созданы различные типы генераторов событий, каждый из которых лучше подходит для изучения определенных задач физики. В качестве основного программного метода расчетов часто используется метод Монте-Карло. Суть метода состоит в многократном моделировании случайных величин и получении вероятностных характеристик процесса. В случае моделирования множественного взаимодействия частиц, каждый следующий процесс вычисляется на основе результатов моделирования характеристик предыдущего процесса. Из недостатков метода стоит выделить невысокую точность моделирования, сильно зависящую от количества повторений расчетов – ошибка вычислений пропорциональна $\sqrt{D_z/N}$, где D_z – некоторая постоянная, а N – число испытаний. Следовательно, необходимо большое число моделирований события и, учитывая достаточно высокую сложность вычислений, большие программные мощности и время.

При моделировании pp-соударений и вычислении КХД в большинстве случаев используется идея струн Лунда – Lund string model. Суть состоит в том, чтобы сильное взаимодействие, то есть глюонный обмен между кварками, представить в виде струны, концы которой и являются кварками(рис.2.1).

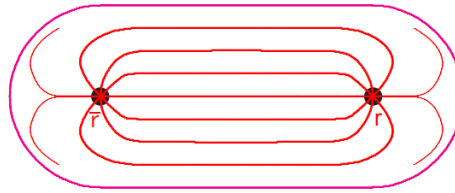


Рис.2.1. Струна в модели Лунда

Причем сила натяжения постоянна, а потенциальная энергия линейно возрастает:

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

Получается простое описание как 1+1 мерного объекта – струна без поперечных возбуждений с лоренц-ковариантным формализмом [8]. В свою очередь, процесс разрыва струны соответствует процессу рождения кварк-антикварковой пары (образно схож с процессом разрыва магнита и появлению полюсов), рис.2.2.

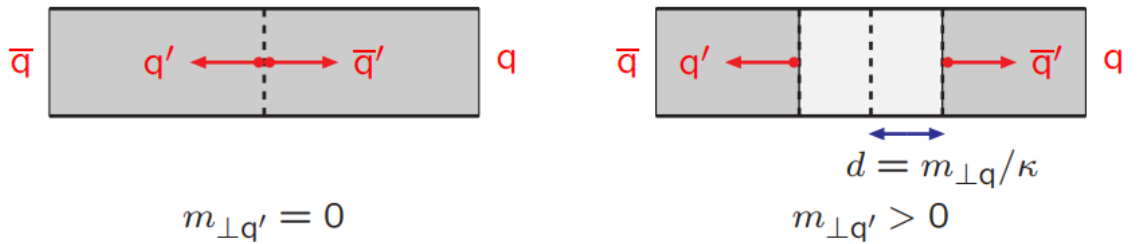


Рис.2.2. Процесс разрыва струны в модели Лунда и образование кварк-антикварковой пары

Подобное представление дает простой, но эффективный способ обсчета сильных взаимодействий партонов, в том числе рождения струй или кластеров, что и необходимо (рис.2.3).

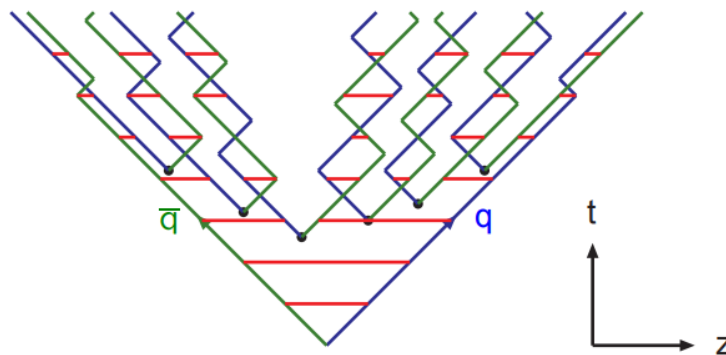


Рис.2.3. Взаимодействие кварк-антикварка, видно образование новых партонов

Струнная модель Лунда позволяет вычислять мультипартонные взаимодействия, цветовое перераспределение, дипольные ливни, фрагментацию в струях и множество других явлений. В стремлении применить этот метод возникла группа программ «Лунд Монте-Карло». Первым членом этой группы был JETSET, его разработка была начата членами теоретической группы Лунда в 1978 году. В 1997 году на его основе была создана программа PYTHIA, основной целью которой было моделирование процесса адронизации, процессов мягкой и жесткой КХД. В результате PYTHIA является наиболее удачным и широко распространенным генератором событий для моделирования партонных ливней, рождения и фрагментации струй и других схожих процессов.

Современная реализованная версия программы PYTHIA 8.2, именно она использовалась в данной работе для моделирования. Версия PYTHIA 8.3 в разработке на стадии калибровки. Для увеличения удобства чтения и анализа результатов моделирования в работе совместно с PYTHIA8.2 используется пакет ROOT на основе C++ разработанный для анализа большого количество данных специально для нужд исследовательских групп на LHC.

2.2. Моделирование pp-соударений, выделение струй частиц

Моделирование в работе производится с помощью Монте-Карло генератора PYTHIA8.2 на операционной системе LINUX. К базовым параметрам PYTHIA8.2 добавлены настройки для подсчитывания жестких процессов КХД:

- рассеяние $gg \rightarrow gg$
- рассеяние $gg \rightarrow q\bar{q}$, где q – легкий кварк (u, d, s)
- рассеяние $qg \rightarrow qg$
- рассеяние $\bar{q}g \rightarrow \bar{q}g$
- рассеяние $qq' \rightarrow qq'$
- или $q\bar{q}' \rightarrow q\bar{q}'$

• или $\bar{q}\bar{q}' \rightarrow \bar{q}\bar{q}'$, где q и q' могут совпадать, но входящие ароматы равны исходящим

- рассеяние (согласно инструкции PYTHIA) $q\bar{q} \rightarrow gg$
- рассеяние $q\bar{q} \rightarrow q'\bar{q}'$, где \bar{q} – легкий кварк (u, d, s)
- рассеяние $gg \rightarrow c\bar{c}$
- рассеяние $q\bar{q} \rightarrow c\bar{c}$
- рассеяние $gg \rightarrow b\bar{b}$
- рассеяние $q\bar{q} \rightarrow b\bar{b}$

А также мягких процессов КХД:

• неупругая недифракционная часть полного поперечного сечения, то есть то, что часто называют «компонентом минимального смещения (*minimum bias*)». Формализм основан на эйконализованном описании (*eikonalized description*) всех жестких процессов КХД, поэтому включает их в сочетании с событиями с низким p_T

- упругое рассеяние $AB \rightarrow AB$
- однократное дифракционное рассеяние $AB \rightarrow XB$
- и $AB \rightarrow AX$
- двойное дифракционное рассеяние $AB \rightarrow X_1X_2$
- центральное дифракционное рассеяние $AB \rightarrow AXB$ (двойной померонный обмен, *double-Pomeron exchange, DPE*)

В данной работе 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 $p_T > 0.5 \text{ GeV}$. Все соответствующие параметры генерации и отбора будут указаны непосредственно при описании результатов.

Отбор струи производится аналогично anti- k_t методу. То есть в пространстве (y, ϕ) выбирается расстояние $R^2 = (y_C - y_j)^2 + (\phi_C - \phi_j)^2$ относительно некоторой частицы C , которая считается иницирующей

струю. В данной работе для выделения струй от b -кварков, такой частицей может быть один из B -мезонов, исключая резонансы, то есть последний B -мезон в цепочке, начатой с образованного b -кварком мезона, как это показано на рис.2.4. Учитываются только B -мезоны, а не все адроны, так как в данной работе представляет интерес рассмотреть струи именно разных B -мезонов.

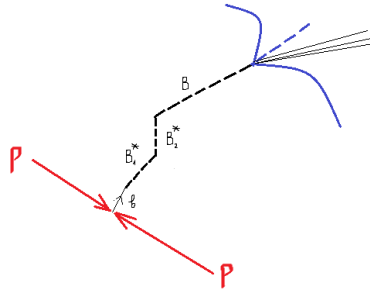


Рис.2.4. Цепочка B -мезонов в pp -соударении, как возможный иницирующий выбирается последний B -мезон в цепочке

При этом для такого B -мезона ставится ограничение по поперечному импульсу $p_T > 10$ ГэВ или больше, что конкретно указано при описании каждого из результатов.

В случае существования другого B -мезона на расстоянии $\Delta_{ij}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2 < 2$ от первого в качестве иницирующего выбирается тот, что образован раньше и с большим поперечным импульсом. Таким образом допускается возможность нахождения двух B -мезонов с высокими значениями p_T в одной струе. Вероятность и частоту такого события можно будет оценить из результатов моделирования.

Выбранные как входящие в струю события записываются в файл, конец струи (то есть полное ее заполнение) отмечается особым флажком, первым треком в струе записывается иницирующий B -мезон. Более подробное описание программы и блок-схема представлены в приложении 1.

2.3. Расчет характеристик струй и их последующий анализ

Анализ струй производится с помощью C++ и пакета ROOT (в ОС LINUX), струи считываются из записанного ранее файла. Благодаря выделению иницирующего трека можно изменять радиус струи R и

выделять струи образованные конкретным B -мезоном (B^+ , B^- , B^0 , $\overline{B^0}$, B_S^0 , $\overline{B_S^0}$). При считывании треков считаются величины $(p_{T_i})^k$ и $q_i * (p_{T_i})^k$, считывание завершается при достижении флажка, обозначающего конец струи. После вычисляется значение взвешенного заряда струи $Q_J = \frac{1}{(p_{T_J})^k} \sum_{i \in Tracks} q_i \times (p_{T,i})^k$ и записывается в гистограмму. Параметр регуляризации k , как и радиус струи, можно выбирать в начале программы. В результате после полного прочтения файла подсчитаны взвешенные заряды выбранного типа струй с заданными R и k , строится гистограмма, при этом вычисляется среднее значение взвешенного заряда. Изменяя характеристики струи (R и k) и тип струй, создается набор распределений для различных энергий генерации. Кроме того, добавляя условие при анализе считываемого трека, можно установить различные критерии отбора, то есть различные «уровни» учета частиц. Так, создан набор при учете всех частиц, кроме резонансов (но при $p_T > 0.5 GeV$), набор с учетом только заряженных частиц и набор с учетом только детектируемых частиц (*detect level*), то есть $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$.

Аналогичным образом вычисляются и другие характеристики струй, такие как: количество B -мезонов в струе, количество частиц в струе, распределения частиц в струе по поперечному импульсу, по быстрой, распределение струй по поперечному импульсу и так далее.

Для удобства анализа получаемых результатов, например, средних взвешенных зарядов, используется программа Wolfram Mathematica 10 (ОС Windows). Данные для анализа записываются вручную (если их мало) или в отдельный файл на этапе анализа струи в пакете ROOT. Программа Wolfram Mathematica позволяет визуализировать данные в необходимом виде и удобно и наглядно их анализировать, например, проводить аппроксимацию любой необходимой функцией.

ГЛАВА 3. Заряд струй, содержащих B -мезон

3.1. Основные характеристики струй

В результате генерации 100 миллионов событий неупругих pp взаимодействий было выделено 14766 струй. Обратим внимание на количество B -мезонов в каждой струе, оно приведено на рисунке 3.1.

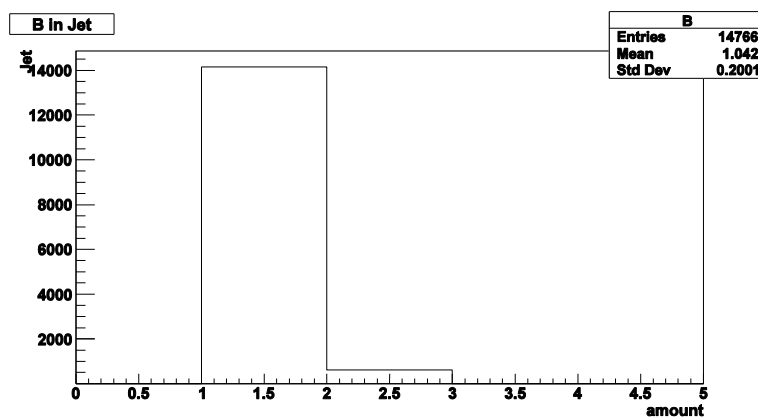


Рис. 3.1. Количество B -мезонов в выделенных струях. $E_{pp} = 8 \text{ TeV}$, $p_T > 0.5 \text{ GeV}$

Как видно из распределения, вероятность рождения двух B -мезонов в одной струе довольно низкая, около 3.6%. Из них лишь некоторые «вторые» B -мезоны имеют $p_T > 10 \text{ GeV}$ и могут быть претендентом на роль «инициирующего», то есть определяющего струю. Таким образом, их влияние на выделение струй и, соответственно, их характеристики будет слабым. Следовательно, погрешность использованного метода незначительна и возникающие ошибки будут сопоставимы с погрешностями моделирования и отклонениями при наборе статистики, но при этом упрощаются вычисления и программа, то есть значительно уменьшается время расчетов и накопления статистики.

Получены распределения для всего комплекса частиц в струях. В среднем в струе около 9 частиц не резонансов с $p_T > 0.5 \text{ ГэВ}$ (рисунок 3.2 б). При этом детектируется в среднем только 6-7 частиц (рисунок 3.2 а). Это заметно меньше, чем в работе [2], рисунок 1.13. Однако необходимо помнить, что в упомянутой статье получены распределения для струй с поперечным импульсом $1000 \text{ GeV} < p_T < 1200 \text{ GeV}$, в то время как в

настоящей работе при моделировании поперечный импульс струй значительно меньше, о чем говорится ниже.

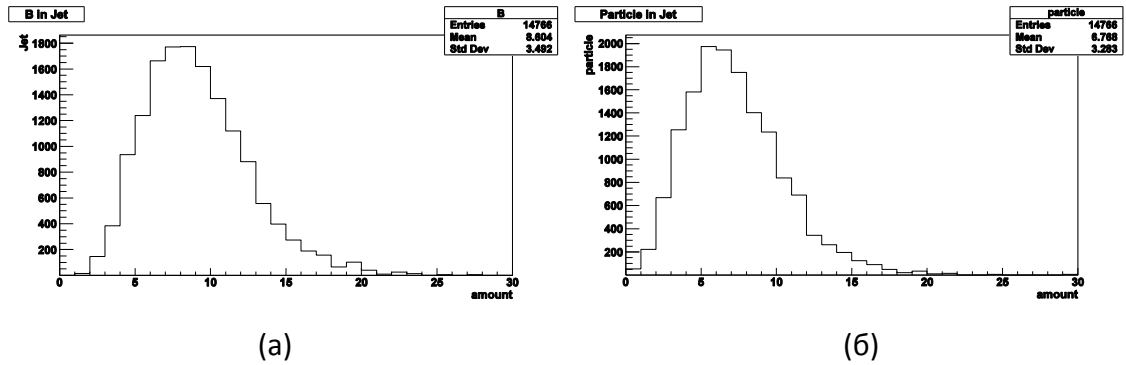


Рис. 3.2. Количество всех частиц в струе (без резонансов), среднее 8.9 (а), и количество детектируемых частиц, среднее 6.8 (б), $E_{pp} = 8 \text{ TeV}$, $p_T > 0.5 \text{ GeV}$

Для детектируемых частиц получены распределения по быстройте и p_T (результаты на рисунке 3.3), то есть для $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$, значение $p_T > 0.5 \text{ ГэВ}$.

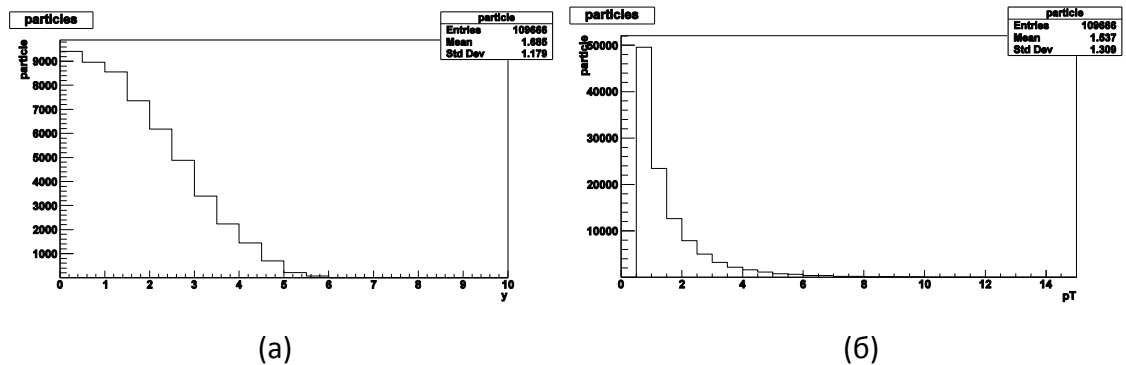


Рис. 3.3. Распределения детектируемых частиц в струях по быстройте y (а), среднее 1.685, и по поперечному импульсу p_T (б), среднее 1.537, $E_{pp} = 8 \text{ TeV}$, $p_T > 0.5 \text{ GeV}$

Как видно из распределений, большинство частиц струи рождаются в центральной области, количество частиц с возрастанием поперечного импульса убывает экспоненциально. Подобное поведение, что ожидаемо, наблюдается и для распределений B -мезонов (рисунок 3.4)

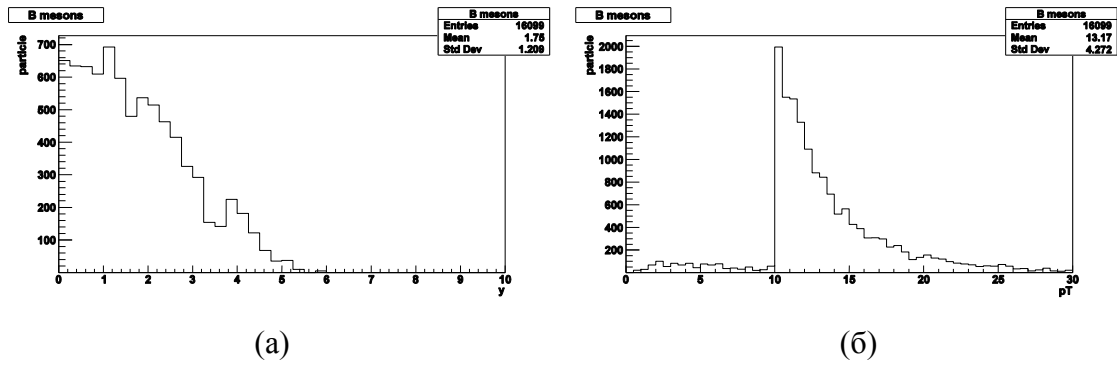


Рис.3.4. Распределения B -мезонов в струях по быстрой (b) и поперечному импульсу (a).

Среди характеристик струй сначала обратим внимание на распределение по поперечному импульсу всей струи $p_{T\text{ Jet}} = \sum_i p_{T_i}$, где p_{T_i} – поперечный импульс i -ого трека, принадлежащего струе (рисунок 3.5). Среднее получаемое значение $\sim 40\text{ GeV}$, 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 до 1000 ГэВ и более.

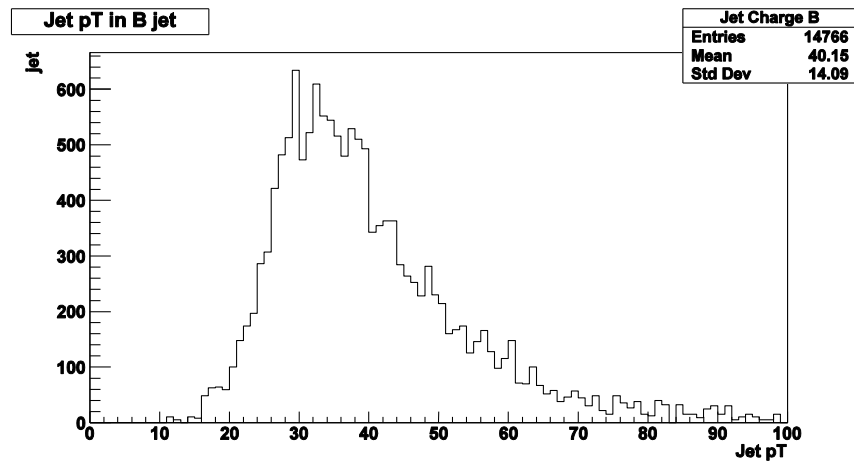


Рис.3.5. Распределение струй по поперечному импульсу струи, средний импульс – 40 ГэВ , $E_{pp} = 8\text{ TeV}$, $p_T > 0.5\text{ GeV}$

При этом в детекторе регистрируется лишь часть поперечного импульса струи – $\sim 11\text{ ГэВ}$. То есть около 30 ГэВ “теряется”.

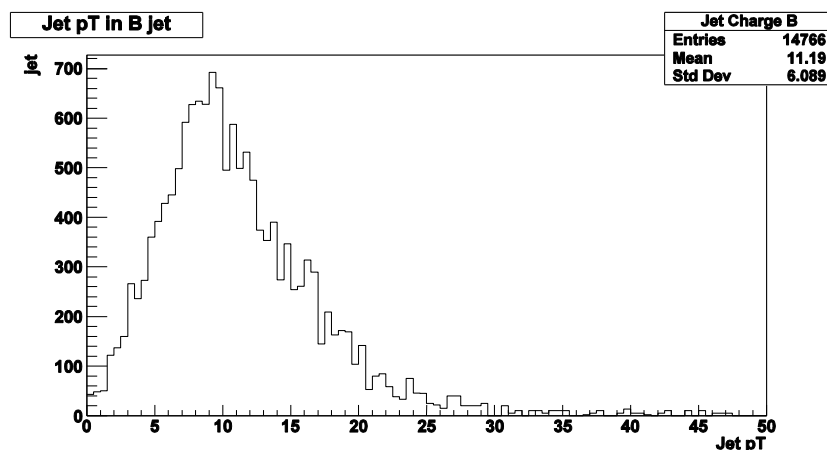


Рис.3.6. Распределение струй по поперечному импульсу струи на уровне детектора, средний импульс – 11 ГэВ, $E_{pp} = 8 \text{ TeV}$, $p_T > 0.5 \text{ GeV}$

3.2. Распределения взвешенного заряда струй с различными B -мезонами.

Получены распределения заряда струй при вариациях:

1. отбора частиц, а именно учитываются: 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 инициирующего (характерного) B -мезона в струе:

$B^+, B^-, B^0, \bar{B}^0, B_s^0, \bar{B}_s^0$ и все B -мезоны

3. регуляризационного параметра $k = \{0.3, 0.5, 0.7, 1.1\}$

4. радиуса струи $R = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 1.0\}$

Полный комплект всех распределений представлен в приложении 2. Здесь же рассмотрим наиболее характерные. Напомним характеристики b -кварков и B -мезонов:

Таблица 3.1 b -кварк и B -мезоны

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	-	-	$u\bar{b}$	$b\bar{u}$	$d\bar{b}$	$b\bar{d}$	$s\bar{b}$	$b\bar{s}$
масса	4.18 GeV		5279.3 MeV		5279.6 MeV		5366.8 MeV	

Для проверки моделирования и связи получаемых распределений с реальными измерениями сравним результаты с полученным в работе [7] распределением зарядов струй, компенсирующих рождения B^+ и B^- мезонов (рисунок 3.7). Для сравнения используем распределения зарядов струй с B^+ и B^- мезонами и для всех B -мезонов при $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, $k = 1.1$, $R = 0.8$ (рисунок 3.8), полученных с отбором детектируемых частиц (*detect level*).

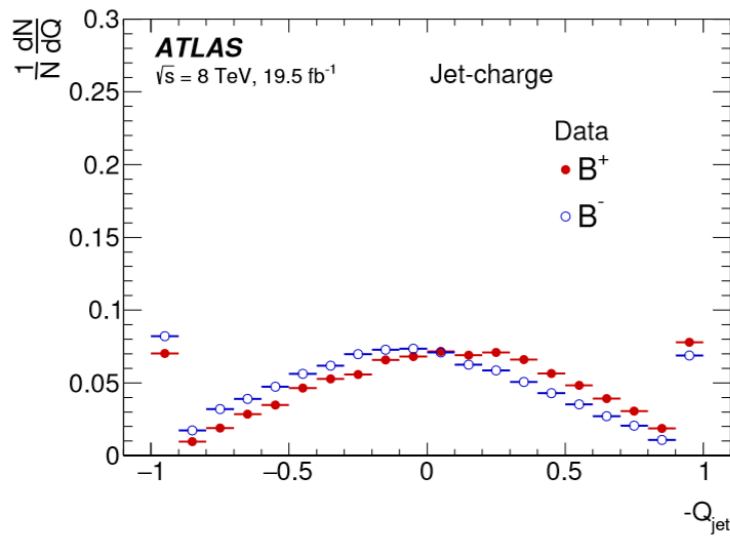
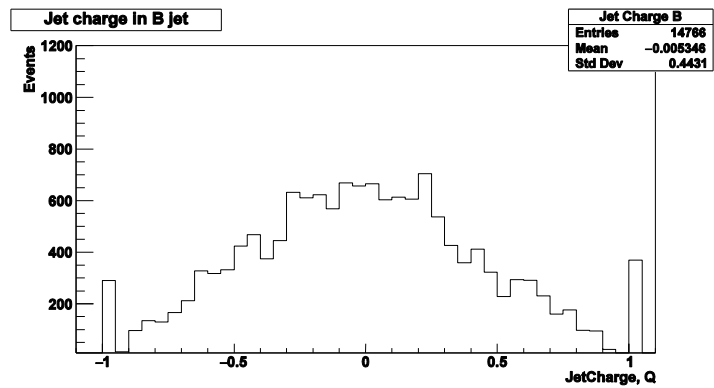


Рис. 3.7. Распределение заряда оппозитных струй для кандидатов в B^+ и B^- сигналы, $k = 1.1$, $p_T > 2.5 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.5$, $R = 0.8$, $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$



(a)

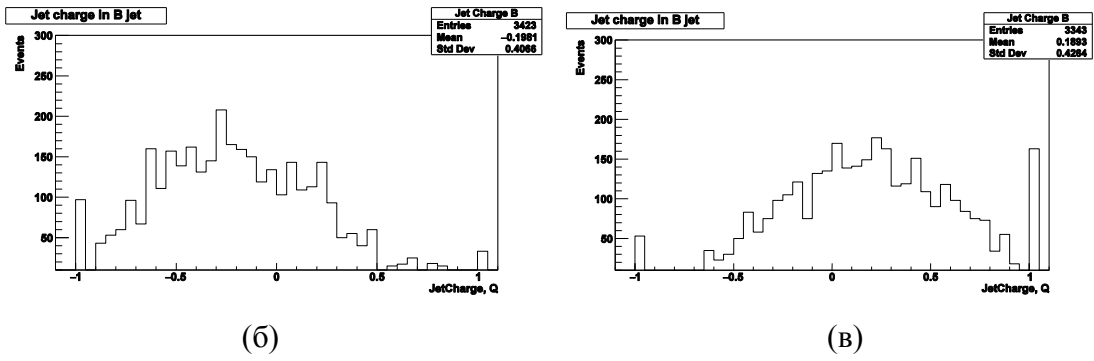
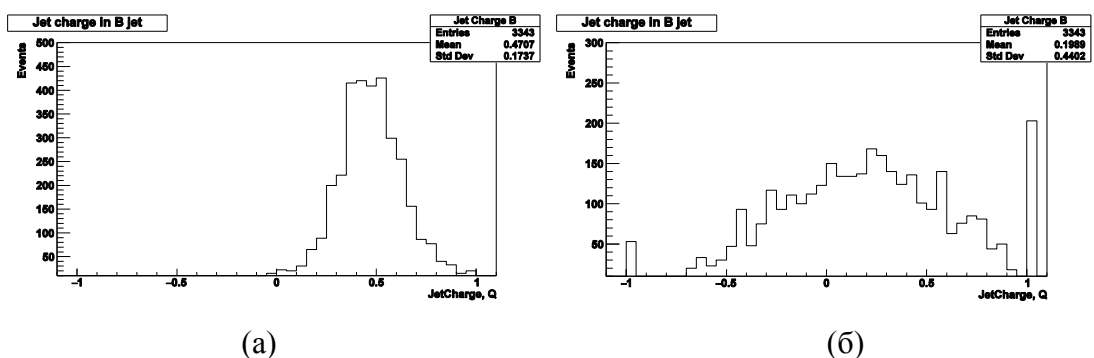
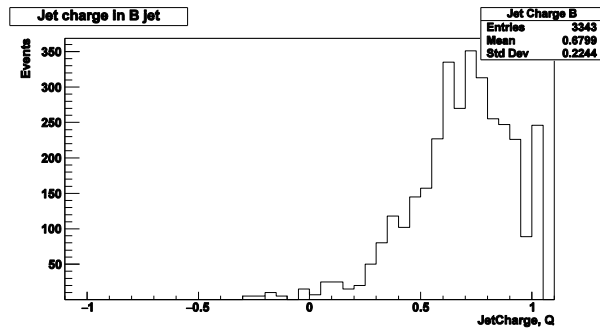


Рис.3.8. Распределения зарядов струй от всех B -мезонов (а), от B^- мезонов (б), от B^+ мезонов (в), при $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, $p_T > 0.5 \text{ GeV}$, $k = 1.1$, $R = 0.8$, detect level

Наблюдается соответствие моделированных распределений и измерений, приведенных на рисунке 3.7. Единственное отличие – распределения зарядов струй с B^- и B^+ мезонами практически обрываются при значениях заряда больше 0.5 (для B^-) и меньше -0.6 (для B^+), в отличие от измерений эксперимента на рисунке 3.7. Объяснить это можно прежде всего малой статистикой при моделировании и слегка различающимися параметрами при отборе. Таким образом, результаты моделирования можно считать адекватными и достаточными для первичной оценки. Основным недостатком будет являться недостаточно большая статистика – выделяется около 14-15 тысяч струй с B мезонами для энергии 8 ТэВ и 100 миллионов генераций неупругих pp -соударений.

Первичный интерес представляют распределения заряда струй с B^+ и B^- мезонами, они же самые показательные, ввиду изначально ожидаемого отличного от 0 заряда. Рассмотрим струи с B^+ мезонами. Для классической достаточно широкой струи, $R = 0.7$, с высоким весом частиц с высоким p_T распределения заряда для $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$, $p_T > 0.5$, $\tau > 3 \text{ nsec}$ и разного отбора представлены на рисунке 3.9



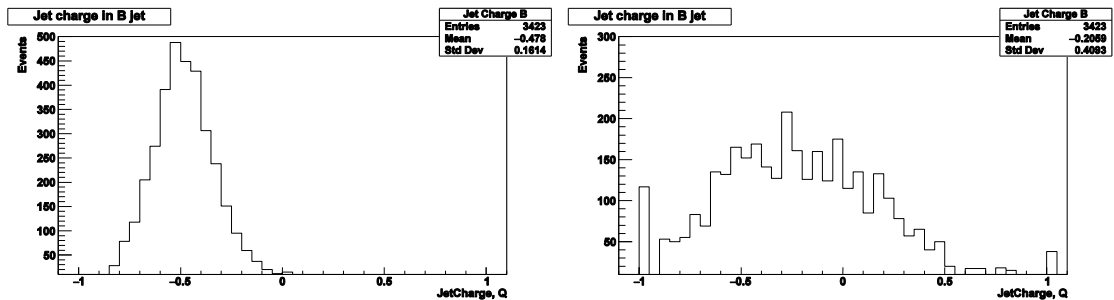


(B)

Рис.3.9. Распределения заряда струй с B^+ мезонами с отбором всех частиц (а), только детектируемых частиц (б) и только заряженных частиц (в) при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ пс

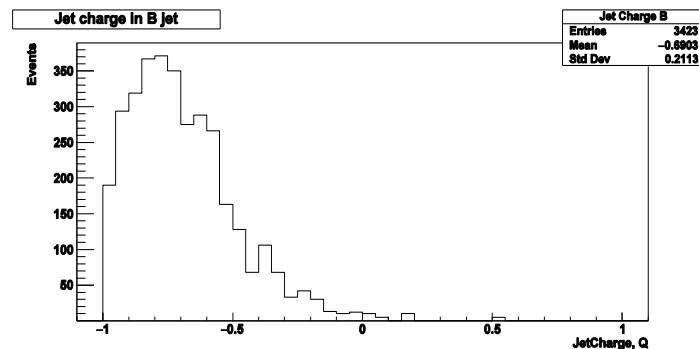
Среднее значение заряда струи при отборе всех частиц составляет величину 0.47, при отборе детектируемых частиц 0.20, при отборе заряженных частиц 0.68 в единицах заряда позитрона.

Аналогично для струй с B^- мезонами, рисунок 3.10.



(а)

(б)



(B)

Рис.3.10. Распределения заряда струй от B^- мезонов с отбором всех частиц (а), только детектируемых частиц (б) и только заряженных частиц (в) при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ пс

Среднее значение заряда струи при отборе всех частиц составляет -0.48, при отборе детектируемых частиц -0.21, при отборе заряженных частиц - 0.69.

Данные рисунки дают представление о характере распределений при различном отборе частиц в струе. Приводить в данной части все полученные распределения и их вариации невозможно. Все результаты и распределения содержатся в приложении 2. С помощью программы Wolfram Mathematica построены графики зависимости средних зарядов струй от радиуса струи R при различных значениях параметра k , именно они будут использоваться для иллюстрирования поведения заряда струи при изменении ее параметров. Таблицы со значениями этих графиков также представлены в приложении 2. В некоторых случаях, где было, проводилась аппроксимация функцией вида $\frac{a_1}{x-a_2} + a_3$. Так, для струй с B^+ мезонами при различных типах отбора частиц в струе приведены зависимости заряда струи от радиуса R при разных значениях параметра k :

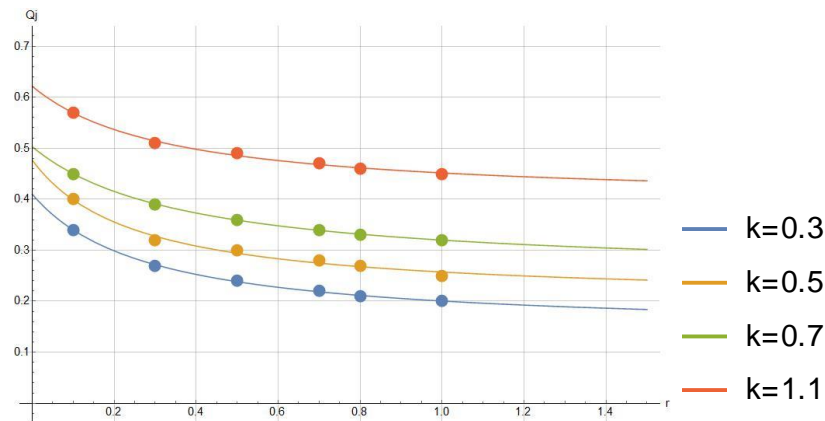


Рис.3.11. Зависимость среднего заряда струй с B^+ мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе всех частиц $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ пс.

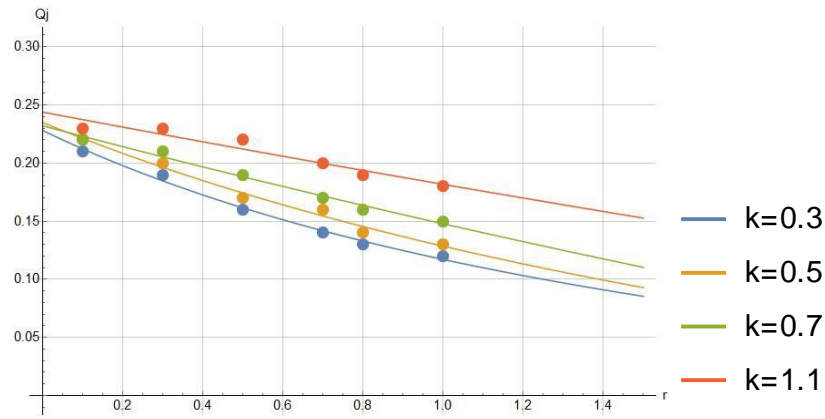


Рис.3.12. Зависимость среднего заряда струй с B^+ мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе детектируемых частиц $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$.

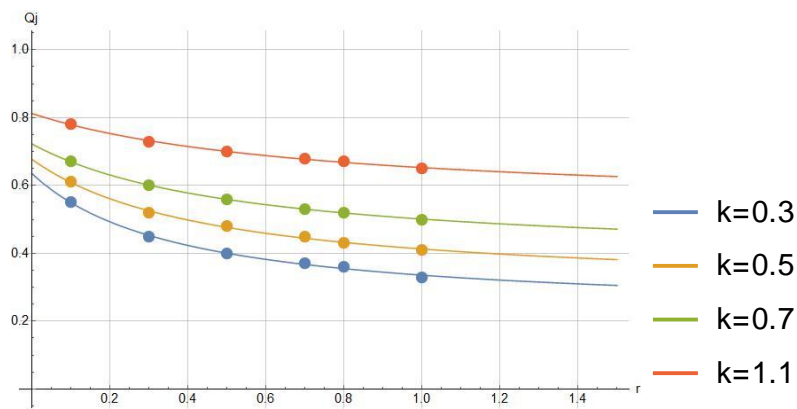


Рис.3.13. Зависимость среднего заряда струй с B^+ мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе заряженных частиц $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}, p_T > 0.5 \text{ ГэВ}, \tau > 3 \text{ nsec}, e_{particle} \neq 0$.

Аналогично для струй от B^- мезонов при различных типах отбора частиц:

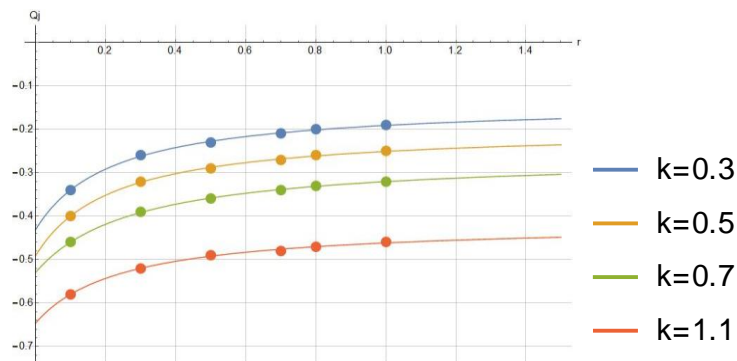


Рис.3.14. Зависимость среднего заряда струй с B^- мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе всех частиц $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}, p_T > 0.5 \text{ ГэВ}, \tau > 3 \text{ nsec}$.

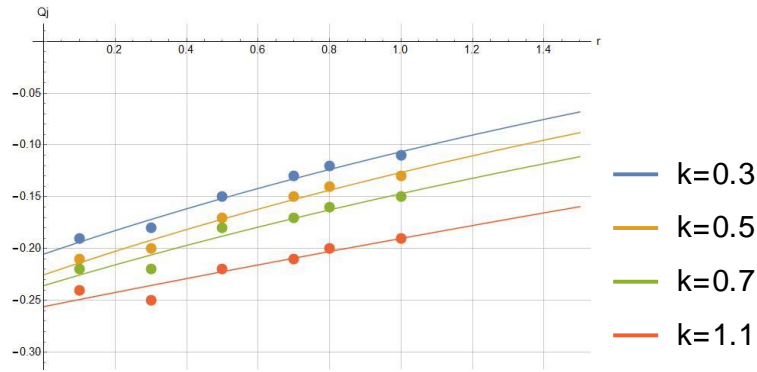


Рис.3.15. Зависимость среднего заряда струй с B^- мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе детектируемых частиц $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$.

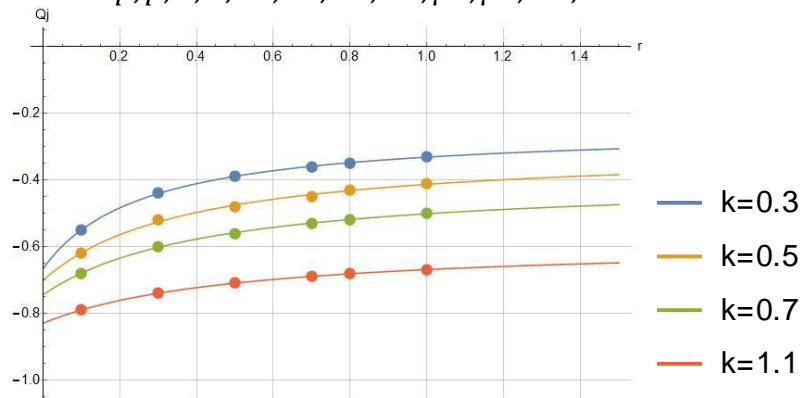


Рис.3.16. Зависимость среднего заряда струй с B^- мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе заряженных частиц $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}, p_T > 0.5 \text{ ГэВ}, \tau > 3 \text{ nsec}, e_{particle} \neq 0$

Видно, что при отборе заряженных частиц, при малых радиусах струи ее заряд примерно равен заряду присоединенного кварка – u для B^+ ($e_u = \frac{2}{3}$) и \bar{u} для B^- ($e_{\bar{u}} = -\frac{2}{3}$). При больших значениях радиуса заряд струи приближается к заряду самого образующего струю кварка – \bar{b} для B^+ ($e_{\bar{b}} = \frac{1}{3}$) и b для B^- ($e_b = -\frac{1}{3}$). Подобное поведение наблюдается при отборе всех частиц, хоть и менее выраженное. При отборе же детектируемых частиц средний заряд уменьшается от значения -0.25 до -0.1.

Таким же способом проиллюстрируем значения среднего заряда струй для других типов B -мезонов. Будем рассматривать отбор детектируемых частиц и отбор заряженных частиц. Для струй с B^0 и \bar{B}^0 мезонами, при энергии соударения 8 ТэВ , количество выделенных струй составляет 3169 и 3289 соответственно, результаты приведены на рис. 3.17 и 3.18.

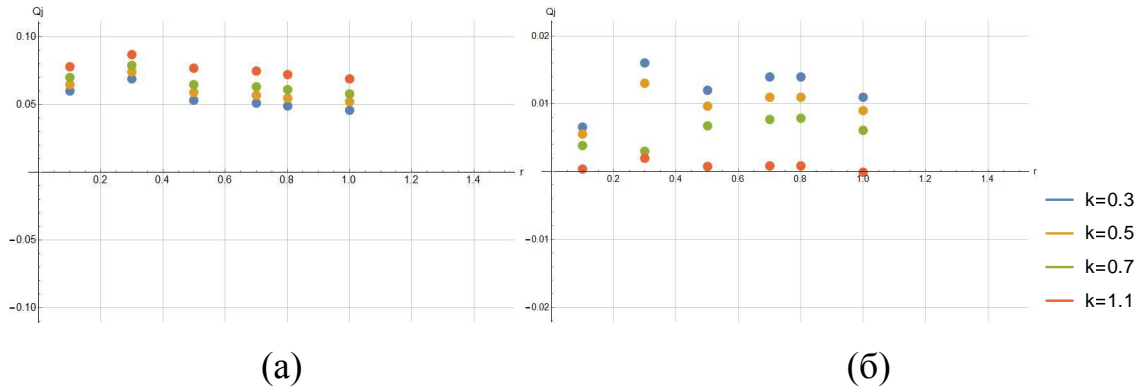


Рис.3.17. Зависимость среднего заряда струй с B^0 мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе (а) детектируемых частиц и (б) заряженных частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ псес.

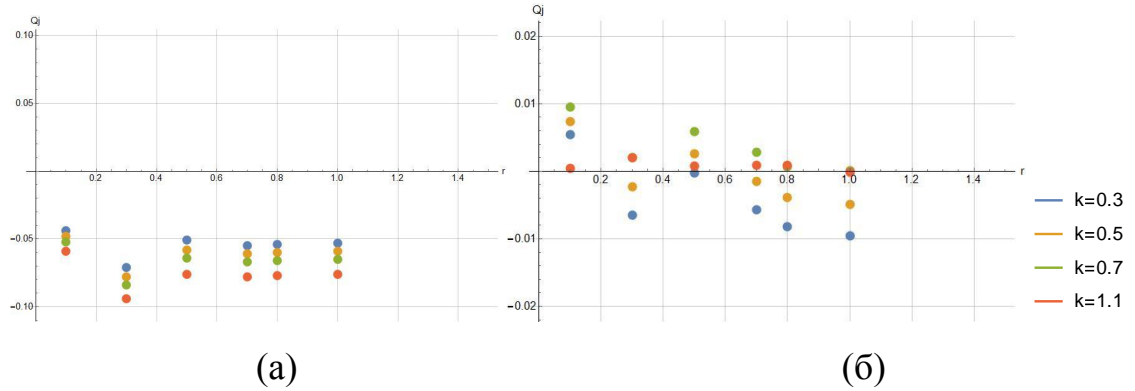


Рис.3.18. Зависимость среднего заряда струй с $\overline{B^0}$ мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе (а) детектируемых частиц и (б) заряженных частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ псес.

Из рисунков 3.17 и 3.18 следует, что средний заряд струй с B^0 ($d\bar{b}$) мезонами положителен, а с $\overline{B^0}$ ($b\bar{d}$) мезонами 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 $\overline{B_s^0}$ мезонами. Количество таких выделенных струй для анализа составило 770 и 757 соответственно:

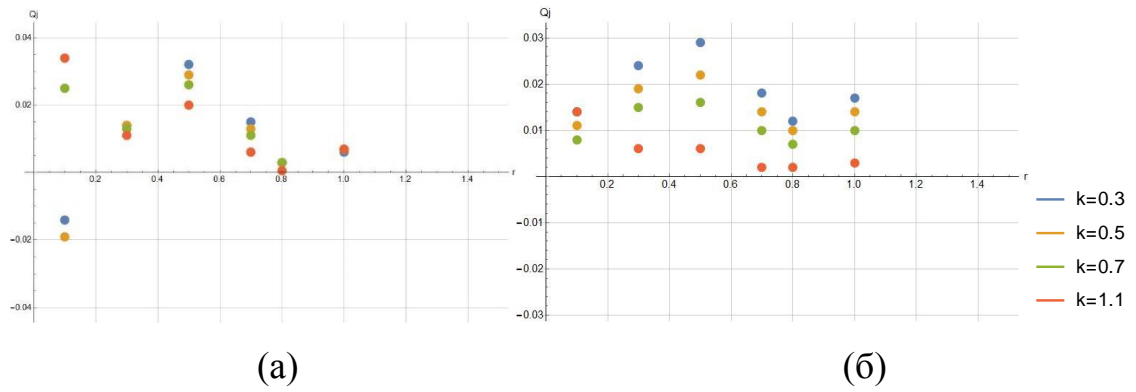


Рис.3.19. Зависимость среднего заряда струй с B_S^0 мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе (а) детектируемых частиц и (б) заряженных частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec.

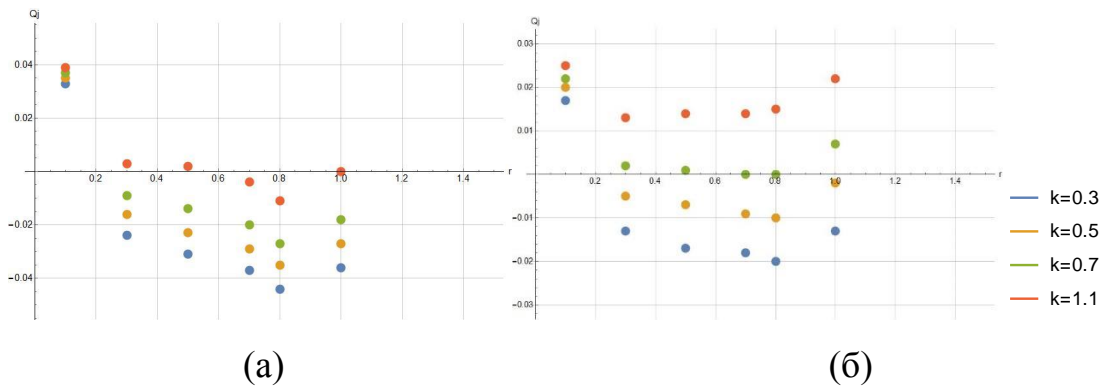


Рис.3.20. Зависимость среднего заряда струй с $\overline{B_S^0}$ мезонами от радиуса струи R при различных значениях параметра k при отборе (а) детектируемых частиц и (б) заряженных частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec.

Из-за меньшей статистики (~ 760 струй против ~ 3200 для B^0 и $\overline{B^0}$) разброс значительно выше. Можно говорить лишь о тенденции соответствия знака заряда струи знаку заряда образующего кварка. Тем не менее, с учетом этой тенденции можно заключить, что знак заряда струи, содержащей B_S^0 и $\overline{B_S^0}$, может свидетельствовать о природе образовавшего струю кварка в случае относительно большого радиуса струи $R = 0.3 - 0.6$ и малого значения параметра $k = 0.3$. Струи с малым радиусом $R = 0.1$ слабо чувствительны к природе кварка при любых значениях параметра k . Этот результат может быть рекомендован для мечения B_S^0 и $\overline{B_S^0}$ в эксперименте ATLAS методом той же стороны (*same side*) в дополнение к методу противоположной стороны (*opposite side*), использованного в работе [7] при измерении параметров CP нарушения в распадах $B_S^0 \rightarrow J/\psi\phi$.

3.3. Анализ распределений зарядов струй с B -мезонами

Для начала сравним результаты моделирования струй с B^+ и B^- мезонами с измерениями из работы [7], рисунок 3.7. Значения параметров струй возьмем те 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 (detect level). Средние значения заряда струй, выделенных таким образом из моделированных событий, составили:

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

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

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

Знак “-” для заряда измеренных струй связан с тем, что в это распределение струй, компенсирующих рождение b или \bar{b} кварка, а значит и заряд противоположен по знаку. Полученные значения близки, отличие можно объяснить тем фактом, что b или \bar{b} кварк образуют не только B^+ и B^- мезоны, но и иные, нейтральные по заряду.

Однако представляется интерес провести несколько иной, более подробный анализ, используя следующее замечание. 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. Демонстрируют это рисунки 3.12 и 3.15.

Подобная симметричность наблюдается и для измеренных распределений зарядов струй. Поэтому 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, которые далее будем рассматривать

как глюонные. Исходя из этого предположения и используя возможности программы Wolfram Mathematica были выделены компоненты:

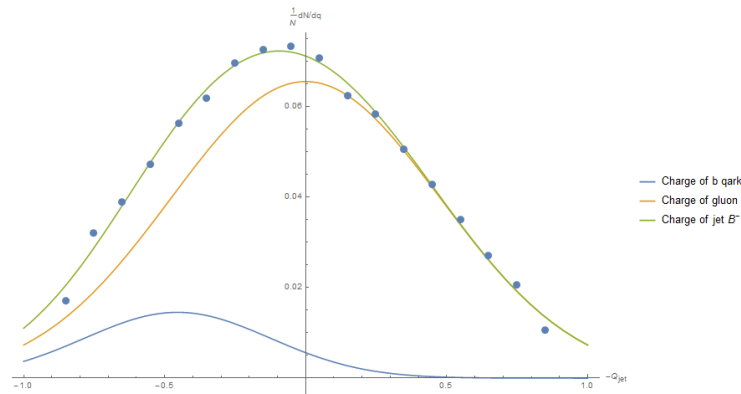


Рис.3.21. Распределение заряда струй, компенсирующих рождение B^- кварка, и его аппроксимация с помощью распределений зарядов глюонной струи и струи b кварков.

Получаем значение $Q_J \rightarrow -0.455$.

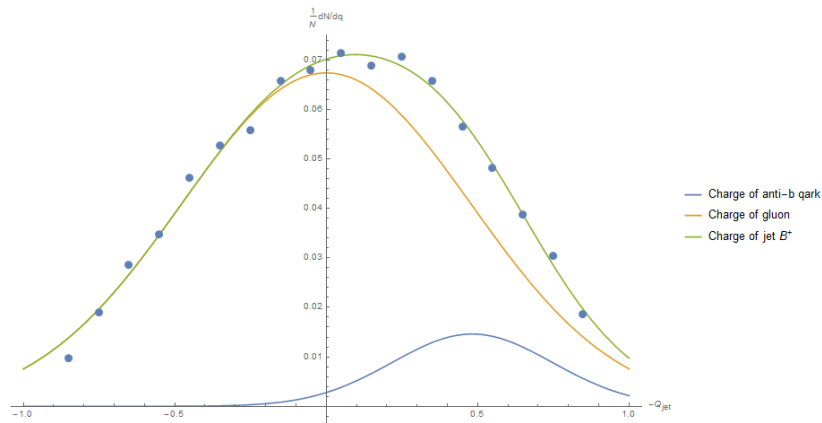


Рис.3.22. Распределение заряда струй, компенсирующих рождение B^+ мезона, и его аппроксимация с помощью распределений зарядов глюонной струи и струи \bar{b} кварков.

Получаем значение $Q_J \rightarrow 0.482$.

Кроме того, из этих распределений можно количественно оценить отношение глюонной и кварковой составляющей:

- глюонных струй: 87 – 89%
- кварковых струй: 11 – 13%

Подобный анализ можно провести и для моделированных струй от B^+ и B^- мезонов. Выделенные компоненты представлены на рисунке 3.23(а) и 3.23(б).

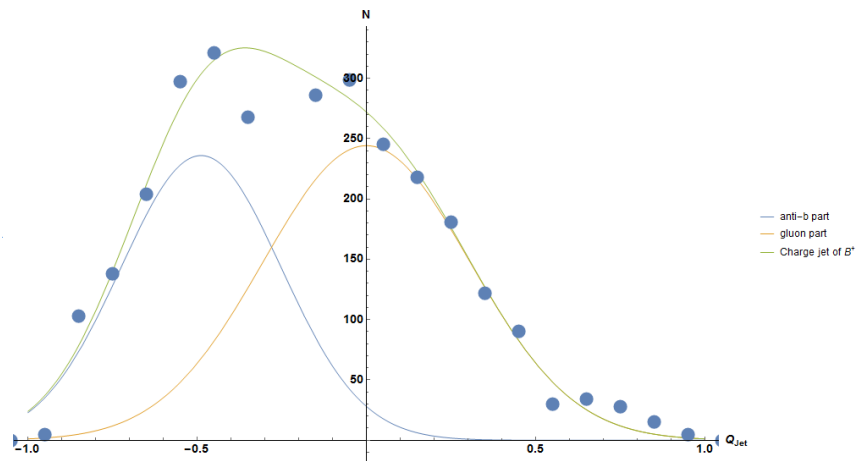


Рис.3.23(а). Распределение моделированного заряда B^- мезона при отборе детектируемых частиц и его аппроксимация с помощью распределений зарядов глюонной струи и струи b кварков.

Получаем значение $Q_J \rightarrow -0.49$.

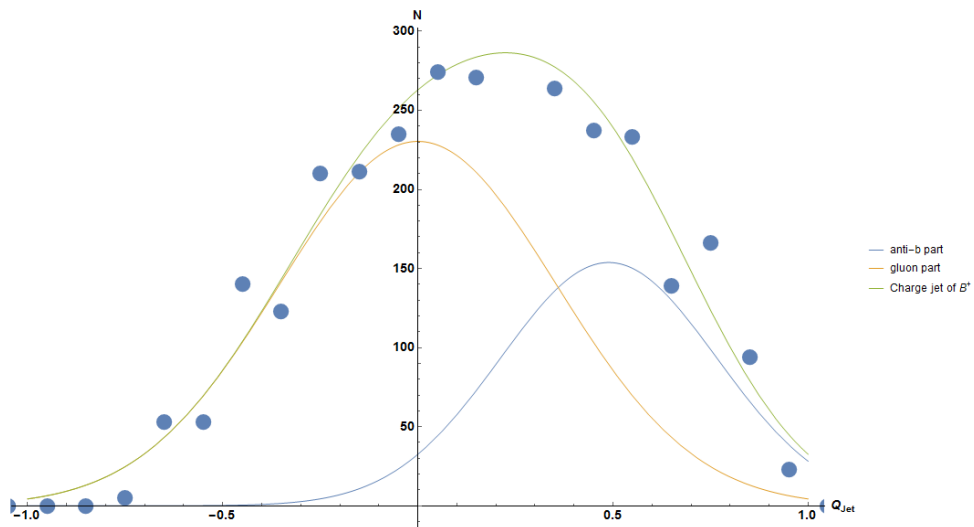


Рис.3.23(б). Распределение моделированного заряда B^+ мезона при отборе детектируемых частиц и его аппроксимация с помощью распределений зарядов глюонной струи и струи \bar{b} кварков.

Получаем значение $Q_J \rightarrow 0.49$.

Количественная оценка отношения симметричной (предположительно глюонной) и индивидуальной (предположительно кварковой) составляющей:

- симметричной: 57 – 66%
- индивидуальной: 34 – 43%

Видим довольно большое различие в количественном соотношении компонент – для моделированных данных процент симметричной (глюонной) составляющей меньше. Это, очевидно, соответствует присутствию струй с нейтральными В-мезонами. Кроме того, можно выполнить теоретическую оценку кварковой составляющей на основе работы [9], в которой рассчитаны сечения б-продуктов с помощью генератора PYTHIA 6.420, однако этот генератор не включает процессы NLO (next leading logarithm). В таблице ниже (таблица 3.2) приведены смоделированные сечения б-кварков для области псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$, как и в детекторе ATLAS, и для поперечного импульса $p_T > 10$ ГэВ/с.

Табл.3.2. Моделируемые в работе [9] сечения б-рождения для различных механизмов в рр-взаимодействиях при $|\eta| < 2.5$ и $p_T > 10$ ГэВ/с.

	Сечение, мкб		
	2 ТэВ	7 ТэВ	14 ТэВ
<i>flavor creation</i>	2.7	15.0	34.3
<i>flavor excitation</i>	7.7	44.7	104.6
<i>gluon splitting</i>	1.5	19.4	71.2
Суммарное	11.9	79.1	210.1

За кварки в общем случае отвечает процесс рождения аромата (*flavor creation*), таким образом процентные составляющая б-кварков от всех компенсирующих струй $\sim 19\%$.

Все результаты отличаются друг от друга ($\sim 12\%$ для измерений против $\sim 37\%$ для моделирования и $\sim 19\%$ для оценки на основе сечений). Это можно объяснить следующими фактами: моделирование генератором PYTHIA не включает процессы нелидирующего порядка NLO (в результате же этих процессов преобладание глюонов усиливается), неполная выборка событий в измерениях работы [7].

Обратим еще внимание на собственно значения средних зарядов. При этом, опять же, выполним теоретическую оценку, используя полученный в работе [10] коэффициент фрагментации

$$\frac{f_s}{f_d} = 0.240 \pm 0.004(\text{стат}) \pm 0.010(\text{сист}) \pm 0.017(\text{теор})$$

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. Для сравнения, полученные заряды струй приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. 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	-0.46	-0.47
средний заряд струй от \bar{b} кварков (с B^+ мезонами)	0.49	0.48	0.47

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

Вернемся к результатам моделирования струй с B -мезонами и обратим внимание на зависимость среднего заряда от параметров струи R и k . Общий вид распределений слабо зависит от изменений параметров, иллюстрация на рисунках 3.24 и 3.25 для B^+ , рисунке 3.26 и 3.27 для B^0 , рисунке 3.28 и 3.29 для B_s^0 .

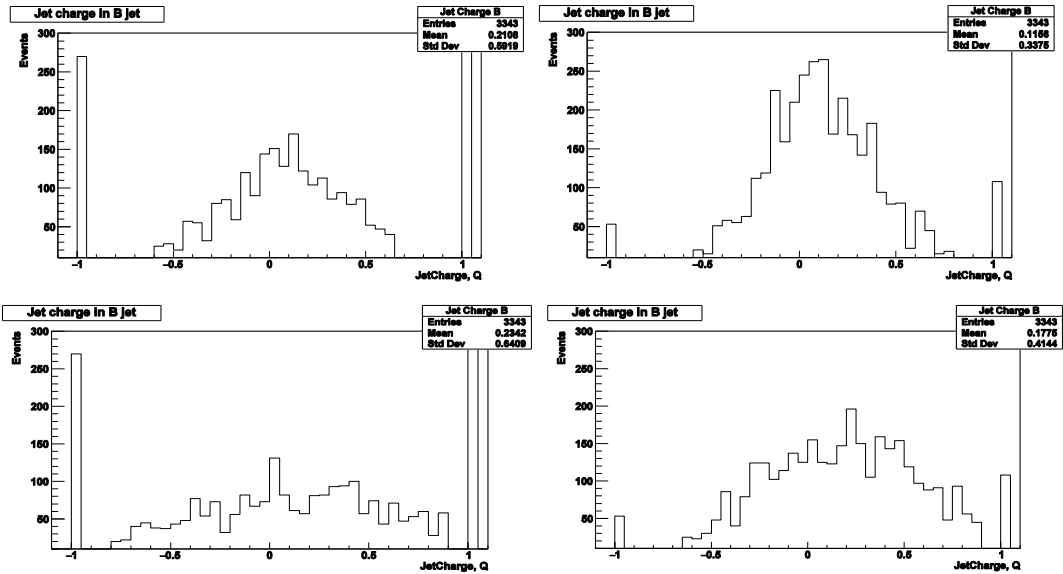


Рис.3.24. Распределения заряда струй с B^+ мезонами при отборе детектируемых частиц при: (слева сверху) $R = 0.1, k = 0.3$, (справа сверху) $R = 1.0, k = 0.3$, (слева снизу) $R = 0.1, k = 1.1$, (справа снизу) $R = 1.0, k = 1.1$, при значениях $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$, $p_T > 0.5 \text{ ГэВ}$, $\tau > 3 \text{ nsec}$

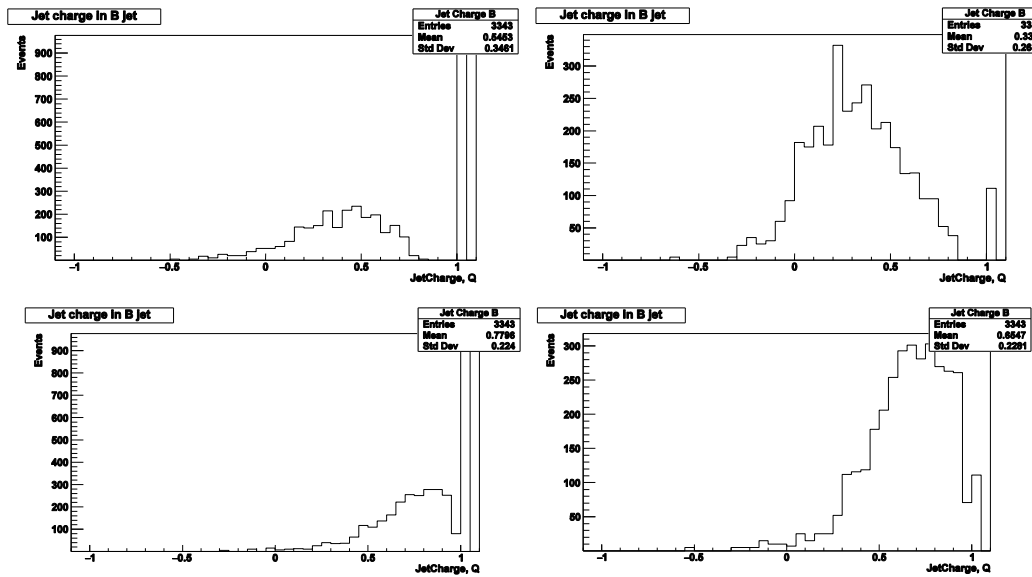
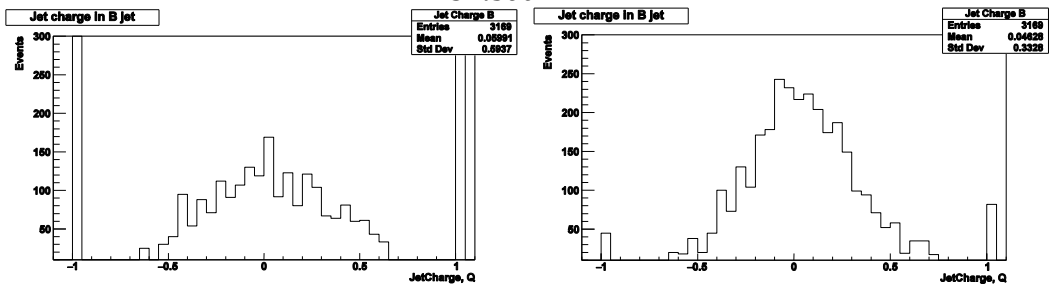


Рис.3.25. Распределения заряда струй с B^+ мезонами при отборе заряженных частиц при: (слева сверху) $R = 0.1, k = 0.3$, (справа сверху) $R = 1.0, k = 0.3$, (слева снизу) $R = 0.1, k = 1.1$, (справа снизу) $R = 1.0, k = 1.1$, $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$, $p_T > 0.5 \text{ ГэВ}$, $\tau > 3 \text{ nsec}$



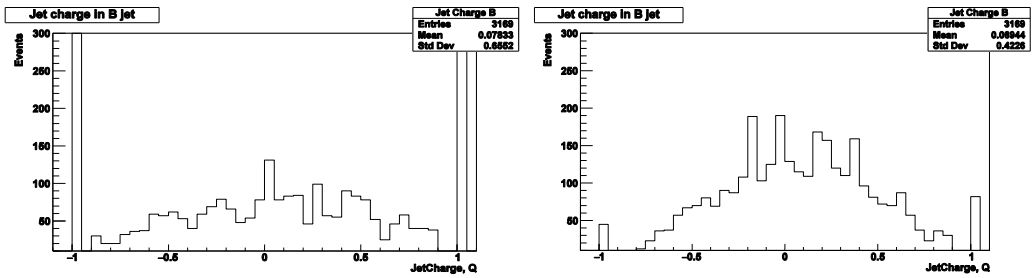


Рис.3.26. Распределения заряда струй с B^0 мезонами при отборе детектируемых частиц при: (слева сверху) $R = 0.1, k = 0.3$, (справа сверху) $R = 1.0, k = 0.3$, (слева снизу) $R = 0.1, k = 1.1$, (справа снизу) $R = 1.0, k = 1.1$, при значениях $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec

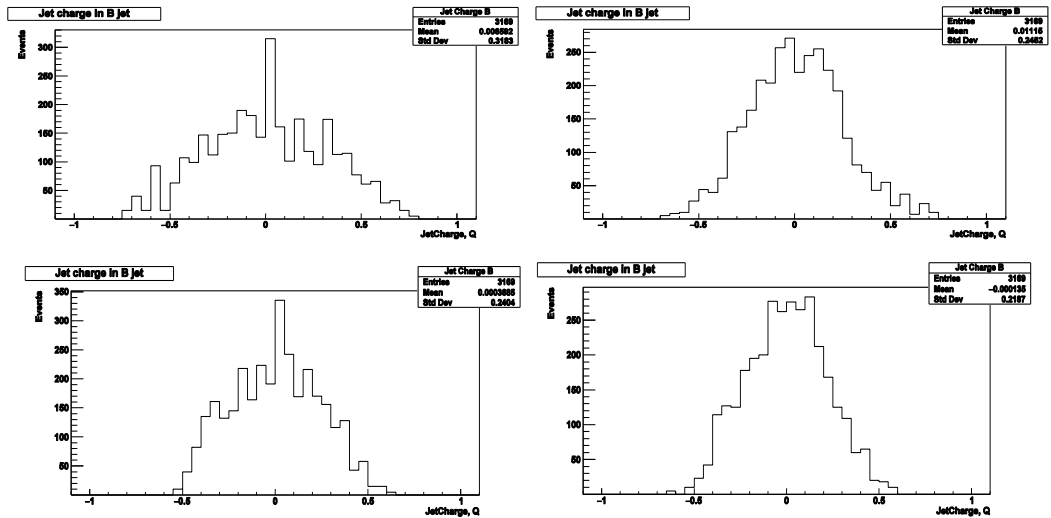


Рис.3.27. Распределения заряда струй с B^0 мезонами при отборе заряженных частиц при: (слева сверху) $R = 0.1, k = 0.3$, (справа сверху) $R = 1.0, k = 0.3$, (слева снизу) $R = 0.1, k = 1.1$, (справа снизу) $R = 1.0, k = 1.1$, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec

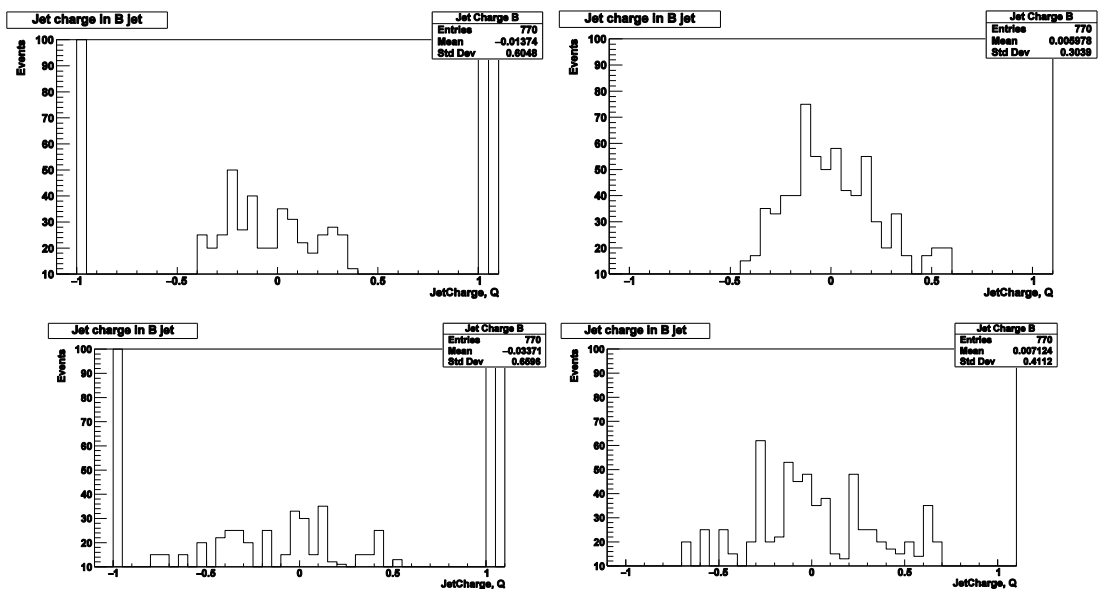


Рис.3.28. Распределения заряда струй с B_s^0 мезонами при отборе детектируемых частиц при: (слева сверху) $R = 0.1, k = 0.3$, (справа сверху) $R = 1.0, k = 0.3$, (слева

снизу) $R = 0.1, k = 1.1$, (справа снизу) $R = 1.0, k = 1.1$, при значениях $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec

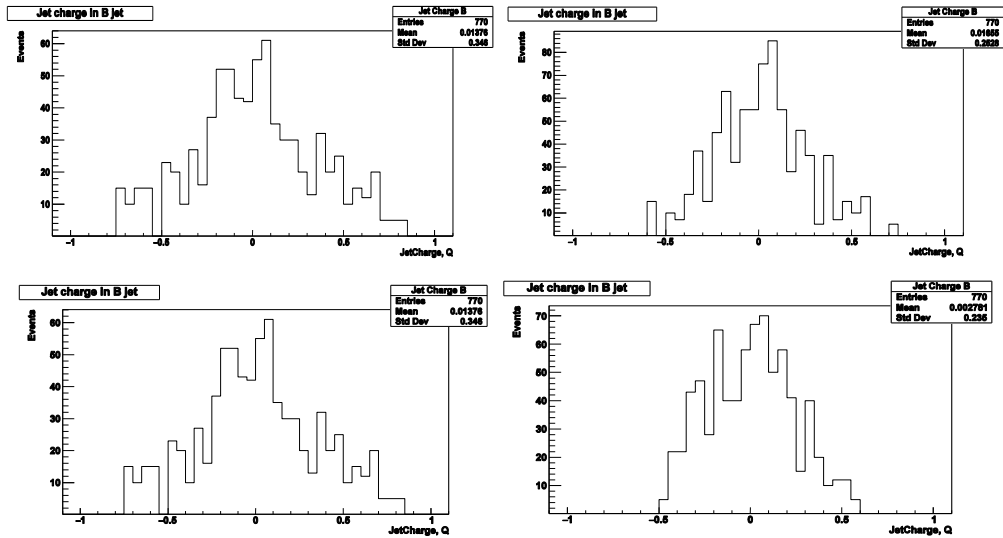


Рис.3.29. Распределения заряда струй с B_s^0 мезонами при учете заряженных частиц при: (слева сверху) $R = 0.1, k = 0.3$, (справа сверху) $R = 1.0, k = 0.3$, (слева снизу) $R = 0.1, k = 1.1$, (справа снизу) $R = 1.0, k = 1.1$, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec

Увеличение радиуса струи сглаживает распределения за счет увеличения количества частиц в струе. Увеличение коэффициента регуляризации k сжимает распределение. Сами распределения являются гауссоподобными, симметричными относительно среднего. Из всех вариантов отбор заряженных частиц для формирования струи наиболее визуально отличительный и характерный, в зависимости от типа B -мезона.

Как уже отмечалось выше, параметр регуляризации отвечает за чувствительность струй к мягкому излучению. Это видно, как из самих распределений, приведенных на рисунке 3.30, так и из зависимости среднего заряда струи от коэффициента k , приведенной на рисунке 3.31.

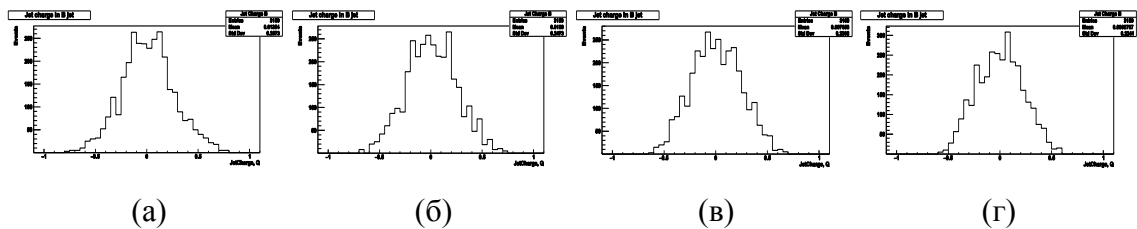


Рис.3.30. Распределения среднего заряда струй от B^0 мезонов для отбора заряженных частиц при (а) $k = 0.3$, (б) $k = 0.5$, (в) $k = 0.7$, (г) $k = 1.1$ и параметрах $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 0.7$

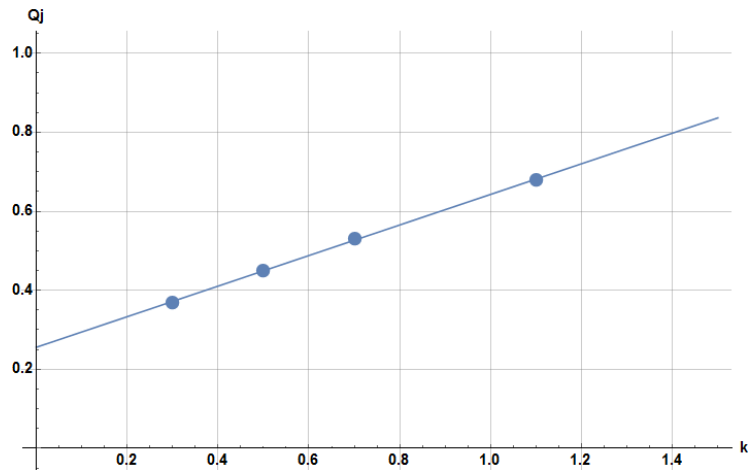


Рис.3.31(а). Зависимость среднего заряда струи, содержащей B^+ мезон, от коэффициента регуляризации k , для отбора заряженных частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 0.7$

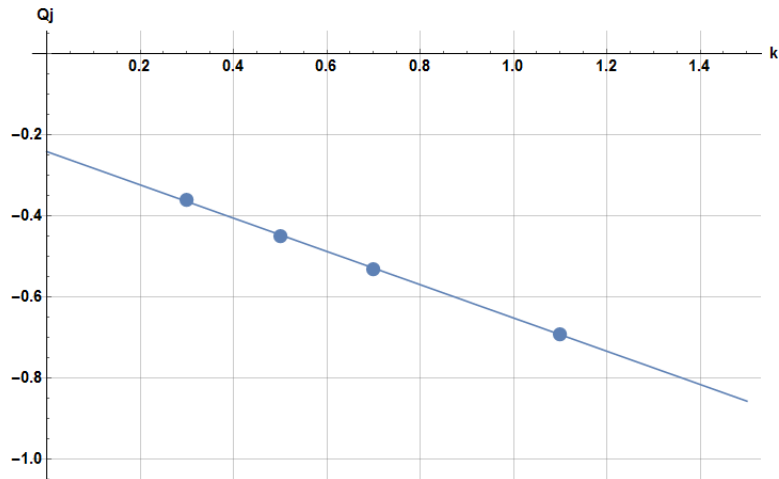


Рис.3.31(б). Зависимость среднего заряда струи, содержащей B^- мезон, от коэффициента регуляризации k , для отбора заряженных частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 0.7$

Наблюдается линейное возрастание заряда с увеличением k , аппроксимация осуществлена линейной функцией, модуль коэффициента наклона прямой в обоих случаях ~ 0.4 .

Характер поведения среднего заряда при изменениях k соответствует результату работы [4], о чем упоминалось ранее (рисунок 1.10). Однако, при существующей статистике невозможно точнее сравнить данные, поскольку невозможно построить значимое распределение среднего заряда струй от поперечного импульса струи. Причины две: недостаточное количество

событий и тот факт, что все струи с B -мезонами имеют достаточно малый поперечный импульс, иллюстрация на рисунке 3.32.

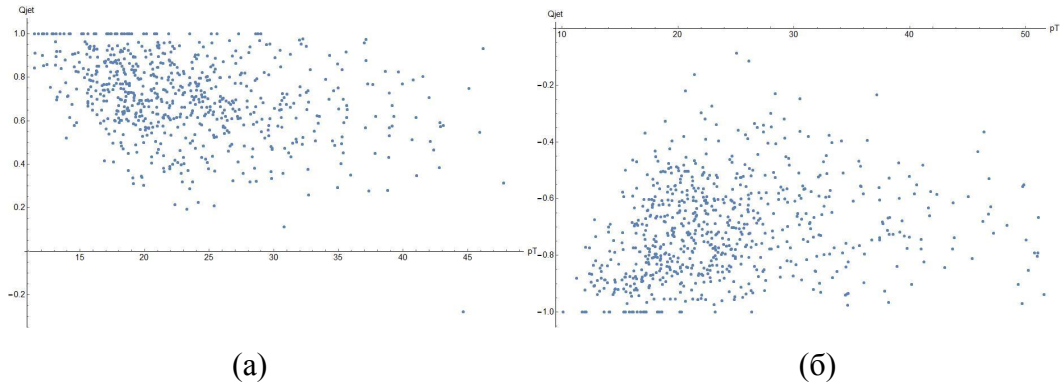


Рис.3.32. Распределения заряда струй, содержащих (а) B^+ или (б) B^- мезон, от поперечного импульса струи $p_{T, Jet}$ при отборе детектируемых частиц при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 0.7$, $k = 1.1$

Из рисунка 3.32 видно, что большая часть струй имеет поперечный импульс порядка 20 – 24 ГэВ. В то время как в работе [4], и во многих других, измеряются (или моделируются) струи с поперечным импульсом 100 – 1000 ГэВ.

Может представлять интерес оценить средний заряд струй при стремлении радиуса струи к 0, сравнения для разных методов и типов струй в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Оценка среднего заряда струй при стремлении радиуса струи к 0 при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $k = 1.1$.

“иницирующий” струю мезон \rightarrow	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

Для струй с B^+ и B^- мезонами при отборе всех частиц полученное предельное значение близко к заряду первого участвующего в адронизации кварка (тому, что образует мезон вместе с b кварком), однако для струй с

прочими типами мезонов предельный заряд равен 0, то есть заряду самого мезона.

Стоит обратить внимание на отбор детектируемых частиц. Для струй с B^+ и B^- мезонами заряд меньше заряда b и \bar{b} кварка соответственно. Однако для струй с B^0 и \bar{B}^0 мезонами, даже при устремлении радиуса струи к 0, наблюдается соответствие знака заряда струи знаку заряда образующего кварка, хотя сами заряды очень малы.

В итоге можно заключить, что исследование заряда струй позволяет исследовать особенность процесса адронизации для образующегося B -мезона, оценивать и сравнивать величины, связанные с фрагментацией струй b кварков. Однако, для повышения точности и значимости таких исследований необходимо увеличение статистики струй.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведен обзор исследований электрического заряда струй, образованных в pp соударений в эксперименте ATLAS, и проведено исследование электрического заряда струй, в составе которых присутствуют B -мезоны разного типа, методом моделирования с помощью генератора событий PYTHIA 8.2.

Приведено краткое описание формирования коллимированных струй частиц в высокоэнергетичном pp -соударении на Большом адронном коллайдере. Показана актуальность измерения струй и их характеристик для фундаментальных исследований КХД. Описан основной принцип действия программ Монте-Карло генераторов, моделирующих события КХД, в том числе генератор PYTHIA.

Разработан и осуществлен метод выделения и записи струй, содержащих B -мезоны, из всех моделированных событий генератором PYTHIA 8.2, а также методы вычисления и анализа их электрического заряда с помощью пакета ROOT, визуализация результатов моделирования реализована в виде гистограмм распределения заряда струй.

Построены основные распределения струй по поперечному импульсу, количеству частиц, скорости. Выполнено сравнение результатов моделирования с существующими измерениями и результатами работ в эксперименте ATLAS. Проведено исследование распределений заряда струй, содержащих разные B -мезоны, при вариации параметров струй и метода расчета электрического заряда струи.

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.

Для более точных и подробных исследований и оценок необходима большая статистика выделяемых струй, то есть улучшение и оптимизация методов выделения и обработки струй, увеличение используемых

вычислительных мощностей, увеличение времени работы программы. Кроме того, представляет интерес повторить моделирование и анализ для pp -соударений больших энергий – $\sqrt{s} = 13, 14 \text{ TeV}$.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Смирновой Лидии Николаевне, за её терпение, успешное руководство и объяснения ряда аспектов физики во время работы над диссертацией и во время учебы. Также автор хотел бы выразить искреннюю благодарность своему старшему другу, Черевань Александру Дмитриевичу, за помощь в части компьютерных программ и особенностей программирования. Кроме того, автор благодарит кафедру за предоставленную возможность освоения знаний и получения квалификации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ // Phys. Rev. D. CERN-EP-2019-090 24th June 2019
3. *Matteo Cacciari and Gavin P. Salam, Gregory Soyez*, The anti- k_r jet clustering algorithm // High Energy Physics JHEP04(2008)063
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 CERN-PH-EP-2015-207 January 11, 2018
5. *Javier Llorente, Simon Fraser University*, Measurement of exclusive b fragmentation using the decay $B^\pm \rightarrow J/\psi (\mu^+ \mu^-) K^\pm$ // SM Approval – March 26, 2020
6. *The ATLAS Collaboration*, Measurements of the production cross-section for a Z boson in association with b-jets in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector // CERN-EP-2020-022 27th March 2020
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
8. *Torbjorn Sjostrand, Lund University*, Old Ideas in Hadronization: The Lund String // IPPP Durham UK 15–17 April 2009
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
11. <https://home.cern>

12. *Л.Н.Смирнова «Детектор ATLAS Большого адронного коллайдера» // М.-Университетская книга, 2010, <http://nuclphys.sinp.msu.ru>*
13. *Sjostrand T., Mrenna S., Skands P., Pythia 6.4 Physics and Manual. // J. High Energy Phys. JHEP 05 (2006) 026, [[hep-ph/0603175](http://arxiv.org/abs/hep-ph/0603175)].*
14. *Sjostrand T., Mrenna S., Skands P.// A Brief Introduction to PYTHIA 8.1. // J. Comput. Phys. Commun. 2008. 178, N 11. P. 852.*
15. <https://root.cern.ch>
16. *ATLAS Collaboration, Measurement of the bb dijet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 TeV$ with the ATLAS detector // Eur. Phys. J. C (2016) 76:67*
17. *Torbjorn Sjostrand, Theoretical Particle Physics Department of Astronomy and Theoretical Physics Lund University, Status and Developments of Event Generators // LHCP 2016, Lund, 13 June 2016*

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Метод выделения струй реализован в три этапа:

Этап 1.

Моделирование pp -соударений Монте-Карло генератором PYTHIA8.2 и запись событий в отдельный файл типа NTuple с использованием библиотек пакета ROOT. Используются следующие настройки PYTHIA8.2:

- `pythia.readString("HardQCD:all = on")`
- `pythia.readString("Beams:eCM = 8000.")`
- `pythia.readString("SoftQCD:all = on")`
- `pythia.readString("LeptoQuark:all = on")`

Отбираются события с $p_T > 0.5 \text{ GeV}$. В NTuple файл статистики следующие характеристики событий:

- `pythia.event[j].id()` – идентификатор частицы (трека)
- `pythia.event[j].pT()` – поперечный импульс частицы
- `pythia.event[j].y()` – быстрота частицы
- `pythia.event[j].phi()` – азимутальный угол φ частицы
- `pythia.event[j].charge()` – электрический заряд частицы
- `pythia.event[j].xProd()` – x координата рождения частицы
- `pythia.event[j].yProd()` – y координата рождения частицы
- `pythia.event[j].zProd()` – z координата рождения частицы
- `pythia.event[j].tProd()` – время t рождения частицы
- `pythia.event[j].xDec()` – x координата распада частицы
- `pythia.event[j].yDec()` – y координата рождения частицы
- `pythia.event[j].zDec()` – z координата рождения частицы
- `pythia.event[j].tDec()` – время t распада частицы

После отбора и записи всех событий в одной генерации pp -соударения в файл записывается строка нулей в качестве флага. После чего генерируется новое pp -соударение и процесс повторяется заданное число раз.

Таким образом в результате выполнения программы создается статистика, содержащая характеристики всех частиц с $p_T > 0.5 \text{ GeV}$, полученных из генерации pp -соударений, с возможностью отличить частицы из различных генераций соударений. Время выполнения программы около 2-3 суток, в зависимости от выделенной мощности компьютера. Размер файла типа NTuple – порядка 240 Гб. Созданный единожды файл позволяет выделять и анализировать частицы и струи для определенной энергии pp -соударений без необходимости повторной генерации соударений.

Этап 2.

Чтение записанного в этапе 1 файла статистики типа NTuple, выделение и запись струй в промежуточный файл типа TXT. Выделяются струи, содержащие B -мезон, с радиусом струи $R = 1.0$. Образующим считается B -мезон с поперечным импульсом $p_T > 10 \text{ GeV}$, временем жизни $\tau > 3 \text{ nsec}$. В случае, если в результате генерации появилось два B -мезона с достаточным поперечным импульсом и временем жизни на расстоянии $r < 1.0$, в качестве образующего выбирается тот, что появился раньше. В струю записываются частицы (треки) с $p_T > 0.5 \text{ GeV}$ (что следует ещё из этапа 1) и временем жизни $\tau > 3 \text{ nsec}$. При записи в файл струи первым записывается образующий B -мезон для возможности выделения центра струи и регулировки радиуса струи во время обработки и анализа струй. Блок-схема программы выделения и записи струй представлена на рисунке 1.

При необходимости на этом этапе возможно выделение и анализ иных частиц и их характеристик, например, построение распределения всех B -мезонов по поперечному импульсу.

Время выполнения программы около 3 часов, размер файла TXT с записанными струями порядка 20 Мб.

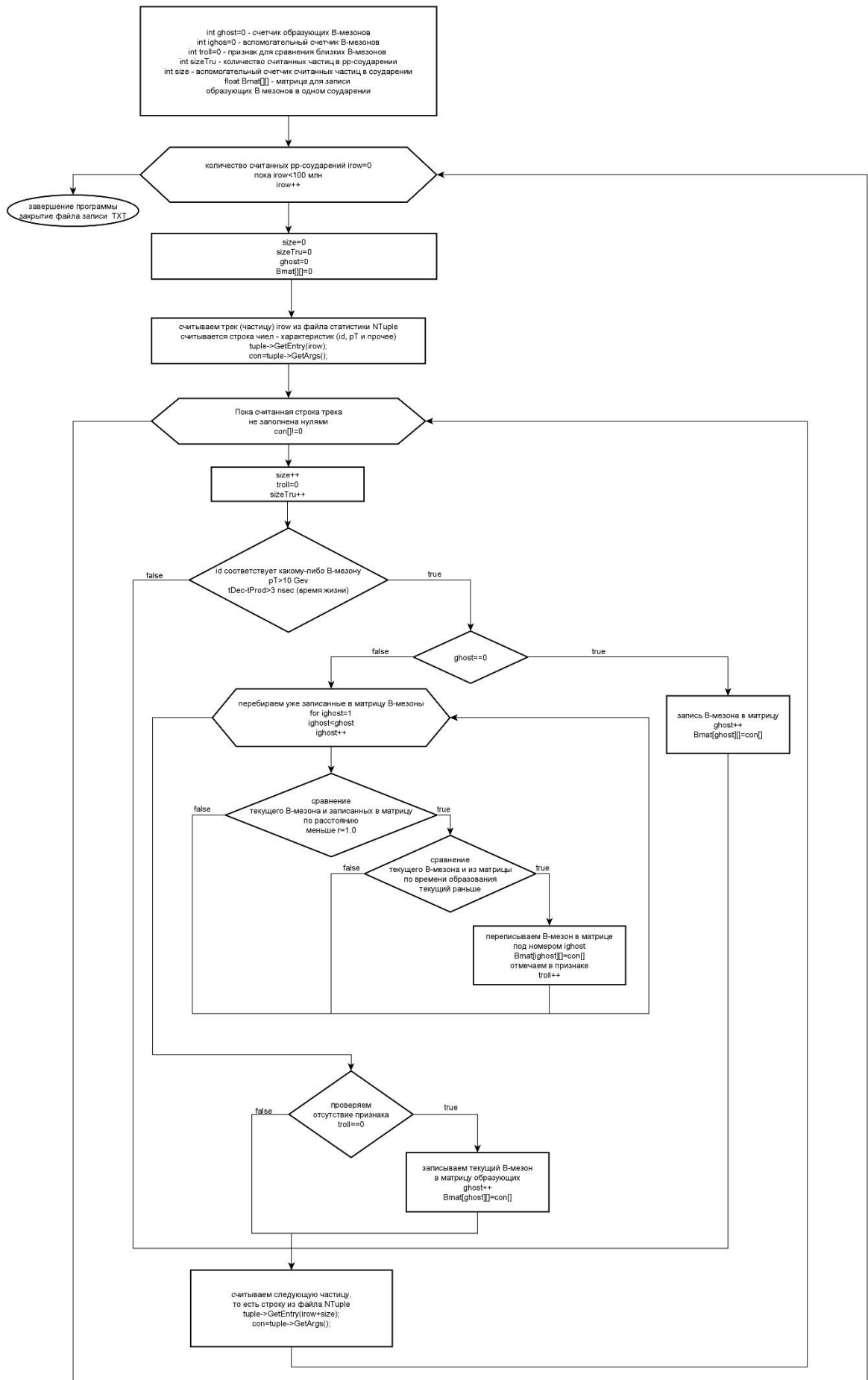


Рисунок 1(а). Блок-схема программы выделения и записи струй, часть 1

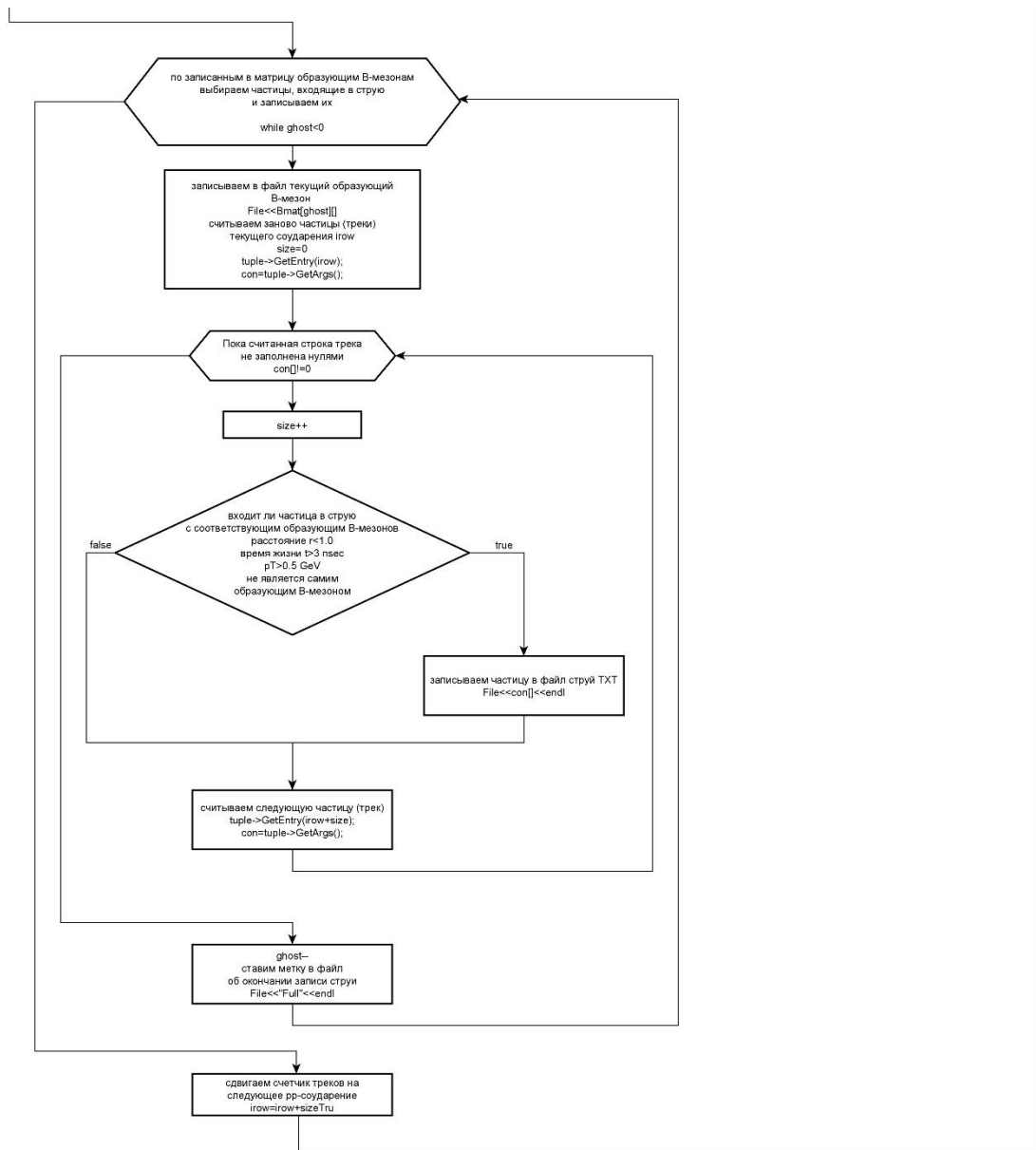


Рисунок 1(б). Блок-схема программы выделения и записи струй, часть 2

Этап 3.

Чтение записанного в этапе 2 файла TXT с выделенными струями, обработка и анализ их характеристик, построение гистограмм. При необходимости возможна запись зависимости характеристик друг от друга в текстовый файл для дальнейшего анализа иными программами. Именно на этом этапе происходит отбор струй с различными образующими *B*-мезонами, выбор параметров струи *R* и *k*. Время выполнения программы составляет от нескольких до десятка секунд, результатом является заданный файл – гистограмма или таблица (столбцы) чисел в TXT, если планируется анализ через Wolfram Mathematica.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Учитываются частицы с $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, энергия соударения 8 ТэВ, количество событий pp-соударений 100 млн.

Построены распределения частиц по количеству в выделенных струях.

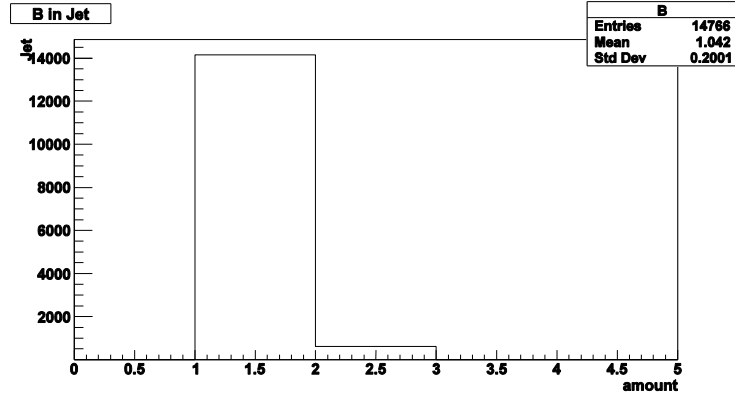


Рисунок 2. Количество B-мезонов в струях, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 1.0$

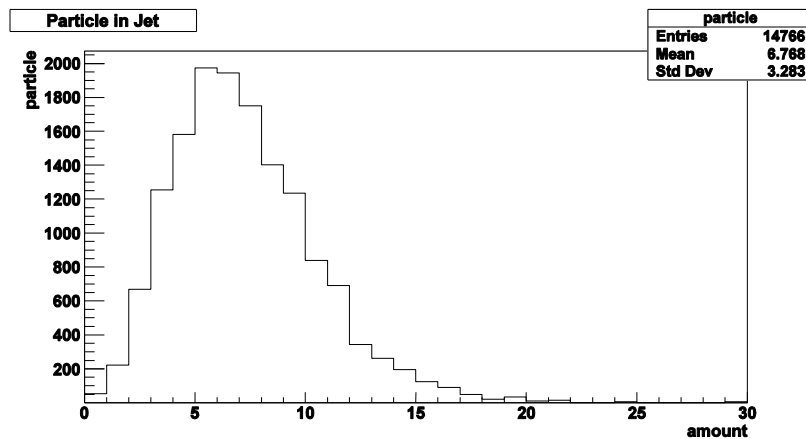


Рисунок 3(а). Количество в струе детектируемых частиц, среднее 6.77, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 1.0$

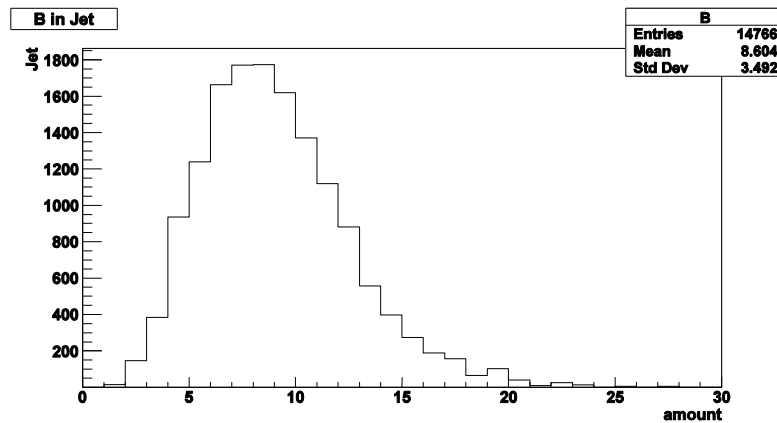


Рисунок 3(б). Количество в струе всех частиц в струе (без резонансов), среднее 8.9, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 1.0$

Построены распределения частиц в выделенных струях по быстроте и поперечному импульсу.

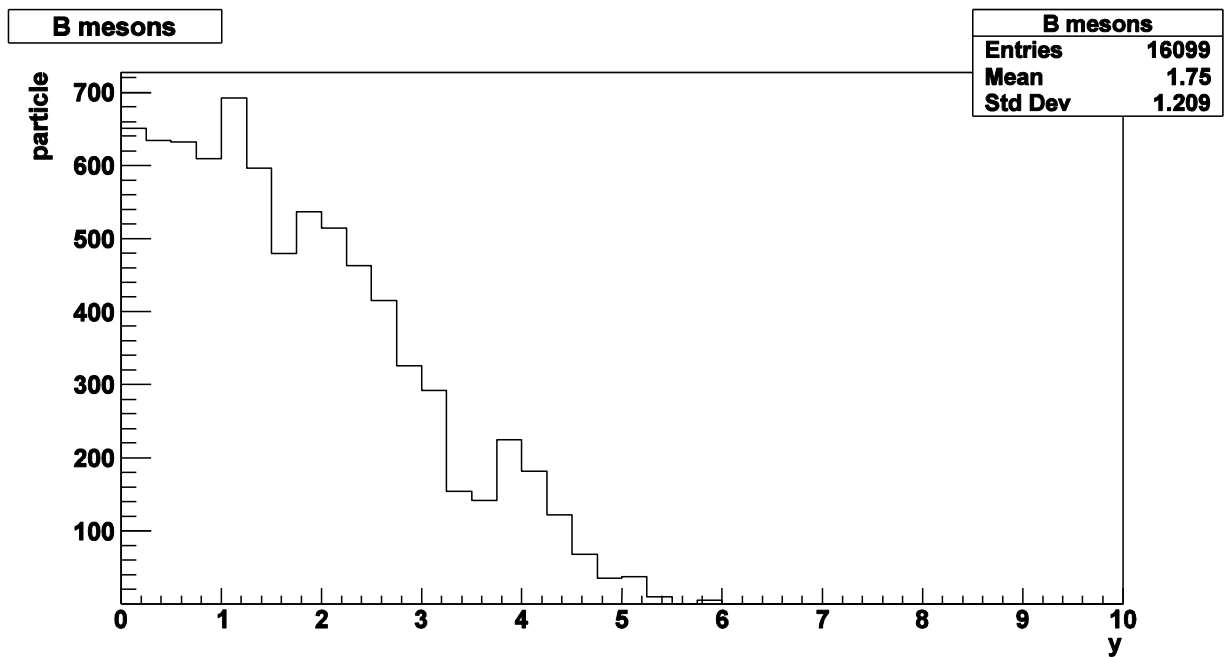


Рисунок 4(а). Распределения В-мезонов в струях по быстроте y , среднее 1.75,

$$\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}, p_T > 0.5 \text{ ГэВ}, \tau > 3 \text{ nsec}, R = 1.0$$

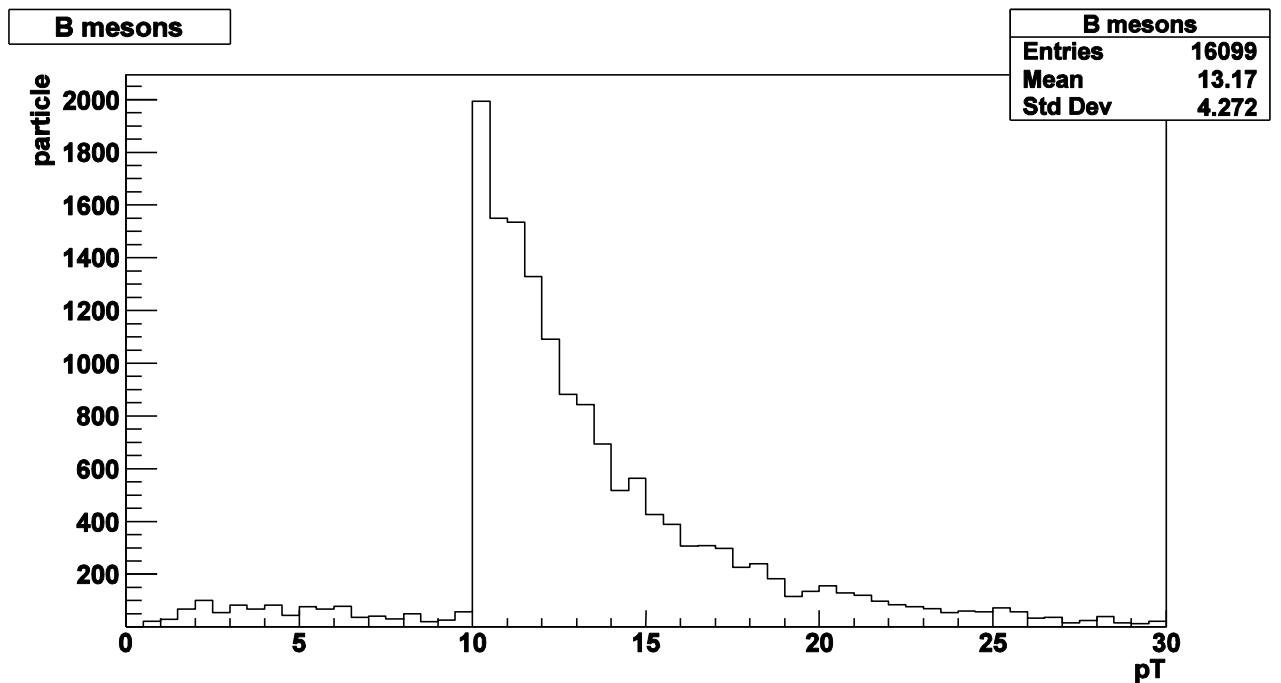


Рисунок 4(б). Распределения В-мезонов в струях по поперечному импульсу p_T ,

$$\text{среднее } 13.17, \sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}, p_T > 0.5 \text{ ГэВ}, \tau > 3 \text{ nsec}, R = 1.0$$

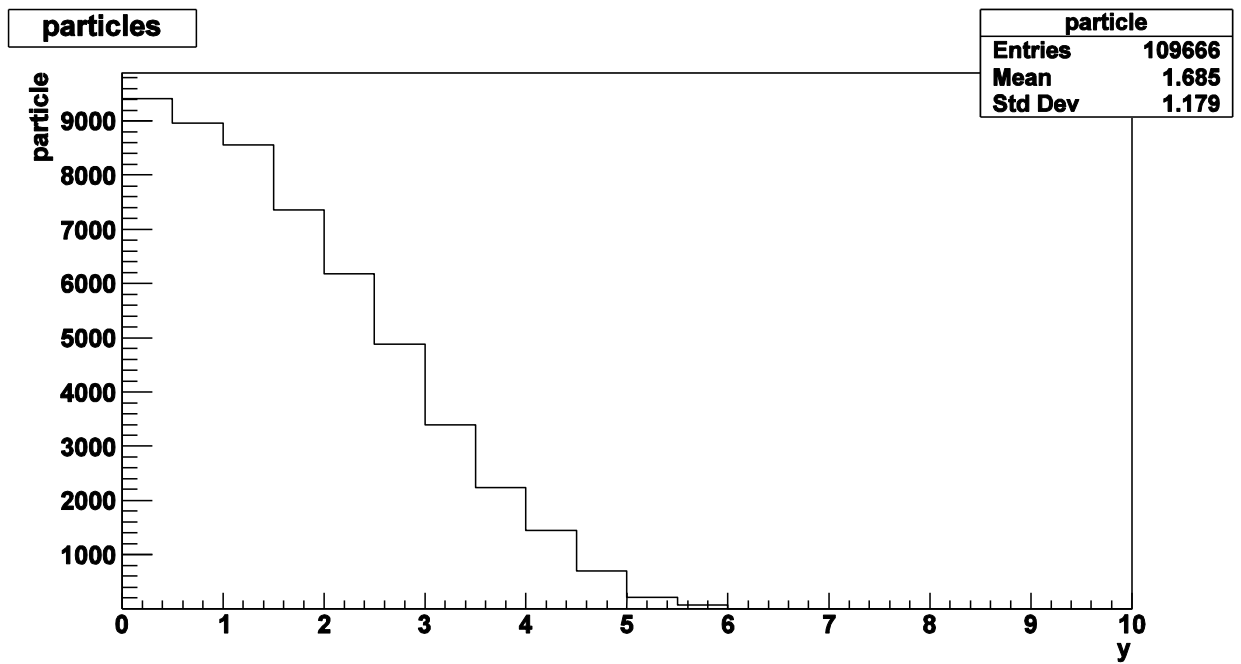


Рисунок 5(а). Распределения детектируемых частиц в струях по быстрой y , среднее 1.685, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 1.0$

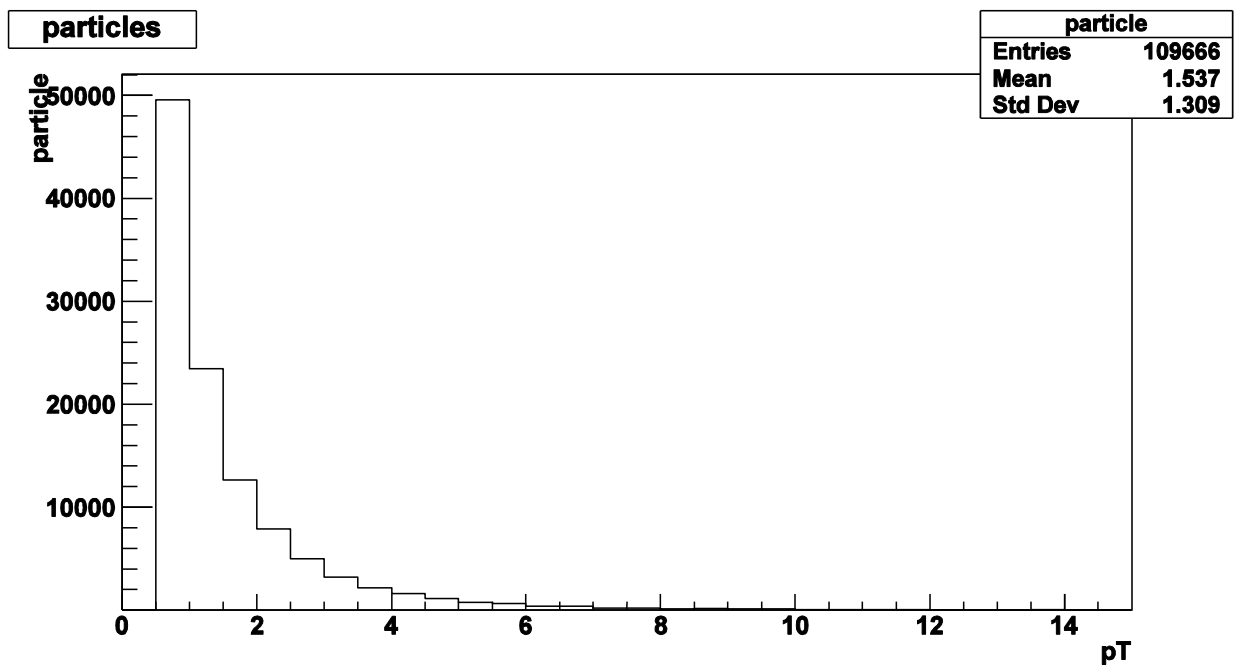


Рисунок 5(б). Распределения детектируемых частиц в струях по поперечному импульсу p_T , среднее 1.537, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 1.0$

Построены зависимости заряда струи Q_{jet} в соответствии с поперечным импульсом струи p_T при $k = 1.1, R = 0.7$, при отборе регистрируемых частиц для струй с образующими B^+ и B^- мезонами. Для иных значений R и k вид распределений практически не изменяется.

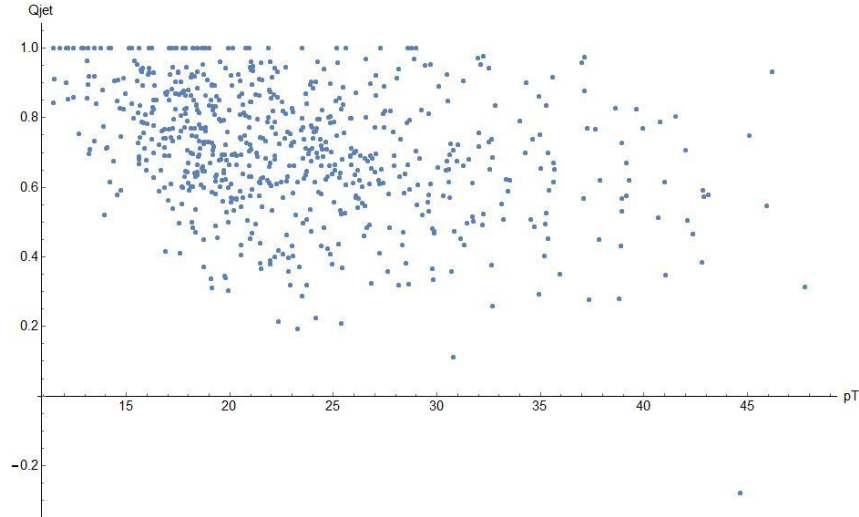


Рисунок 6(а). Зависимость заряда струи от поперечного импульса для струй с B^+ мезонами при отборе детектируемых частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 0.7, k = 1.1$

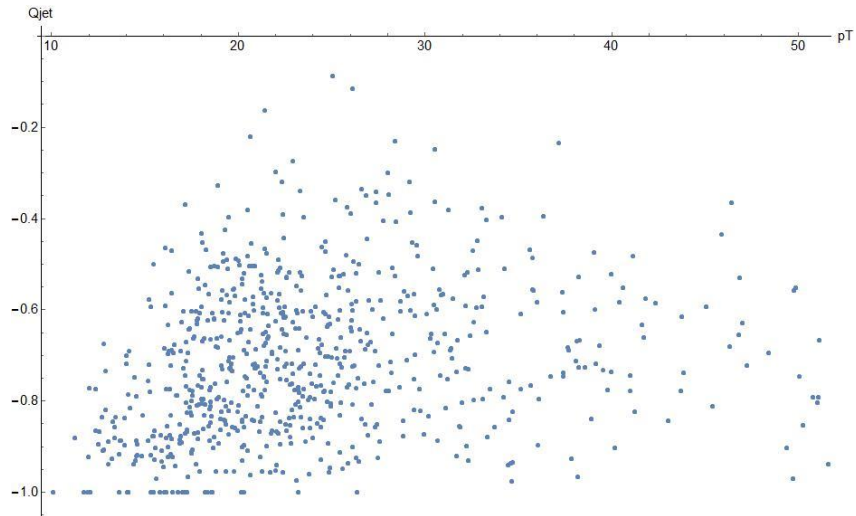


Рисунок 6(б). Зависимость заряда струи от поперечного импульса для струй с B^- мезонами при отборе детектируемых частиц, $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, $p_T > 0.5$ ГэВ, $\tau > 3$ nsec, $R = 0.7, k = 1.1$

Далее представлены распределения средних зарядов струй с различными типами образующих B -мезонов при различном виде отбора с вариацией параметров R и k . В таблицах представлены средние значения, также проведена визуализация этих результатов.

ДЕТЕКТ LEVEL $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$, детектируемые в детекторе: $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных **всеми** типами **B-адронов**

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 14766

Таблица 1(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0079 ± 0.61	0.0064 ± 0.62	0.0049 ± 0.63	0.0024 ± 0.66
$R = 0.3$	-0.0026 ± 0.45	-0.0036 ± 0.46	-0.0047 ± 0.48	-0.0068 ± 0.53
$R = 0.5$	0.0018 ± 0.39	0.0009 ± 0.40	-0.00003 ± 0.42	-0.0021 ± 0.48
$R = 0.7$	0.00014 ± 0.36	-0.0007 ± 0.38	-0.0017 ± 0.40	-0.0038 ± 0.45
$R = 0.8$	-0.0023 ± 0.35	-0.0029 ± 0.36	-0.0037 ± 0.39	-0.0053 ± 0.44
$R = 1.0$	-0.0028 ± 0.34	-0.0032 ± 0.35	-0.0037 ± 0.37	-0.0049 ± 0.43
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	0.0142	0.0123	0.0104	0.0076

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

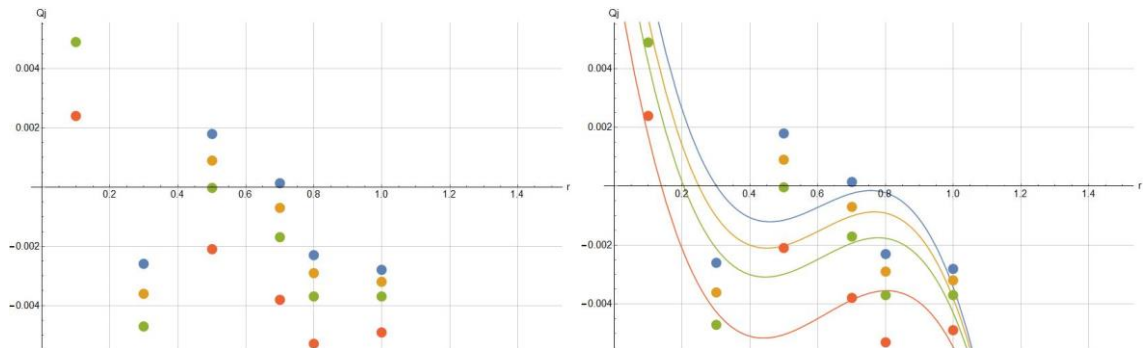


Рисунок 8. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса струи (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (справа).

Таблица 1(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .

ДЕТЕКТ LEVEL $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$, детектируемые в детекторе: $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^+ -

адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3343

Таблица 2(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.21 ± 0.59	0.22 ± 0.60	0.22 ± 0.61	0.23 ± 0.64
$R = 0.3$	0.19 ± 0.44	0.20 ± 0.45	0.21 ± 0.47	0.23 ± 0.51
$R = 0.5$	0.16 ± 0.39	0.17 ± 0.40	0.19 ± 0.42	0.22 ± 0.46
$R = 0.7$	0.14 ± 0.37	0.16 ± 0.38	0.17 ± 0.37	0.20 ± 0.44
$R = 0.8$	0.13 ± 0.35	0.14 ± 0.36	0.16 ± 0.38	0.19 ± 0.43
$R = 1.0$	0.12 ± 0.34	0.13 ± 0.35	0.15 ± 0.36	0.18 ± 0.41
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	0.2185	0.2311	0.2196	0.2207
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$	0.2280	0.2349	0.2321	0.2438

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

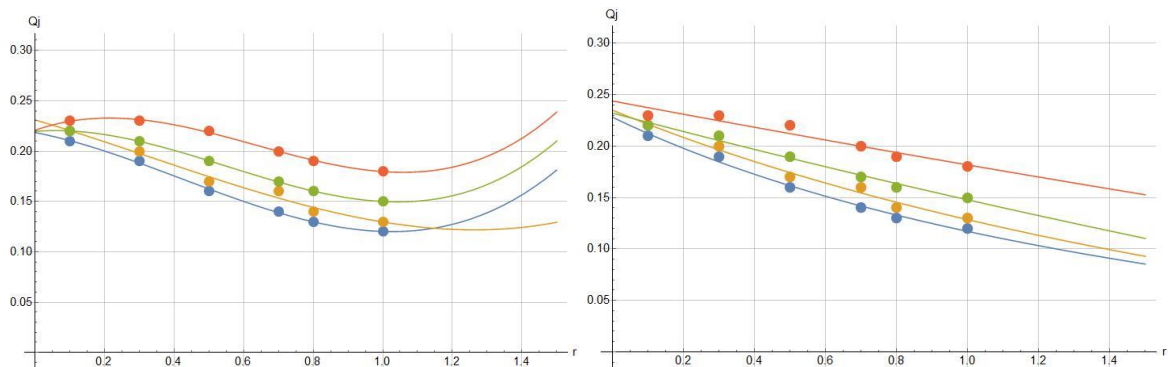
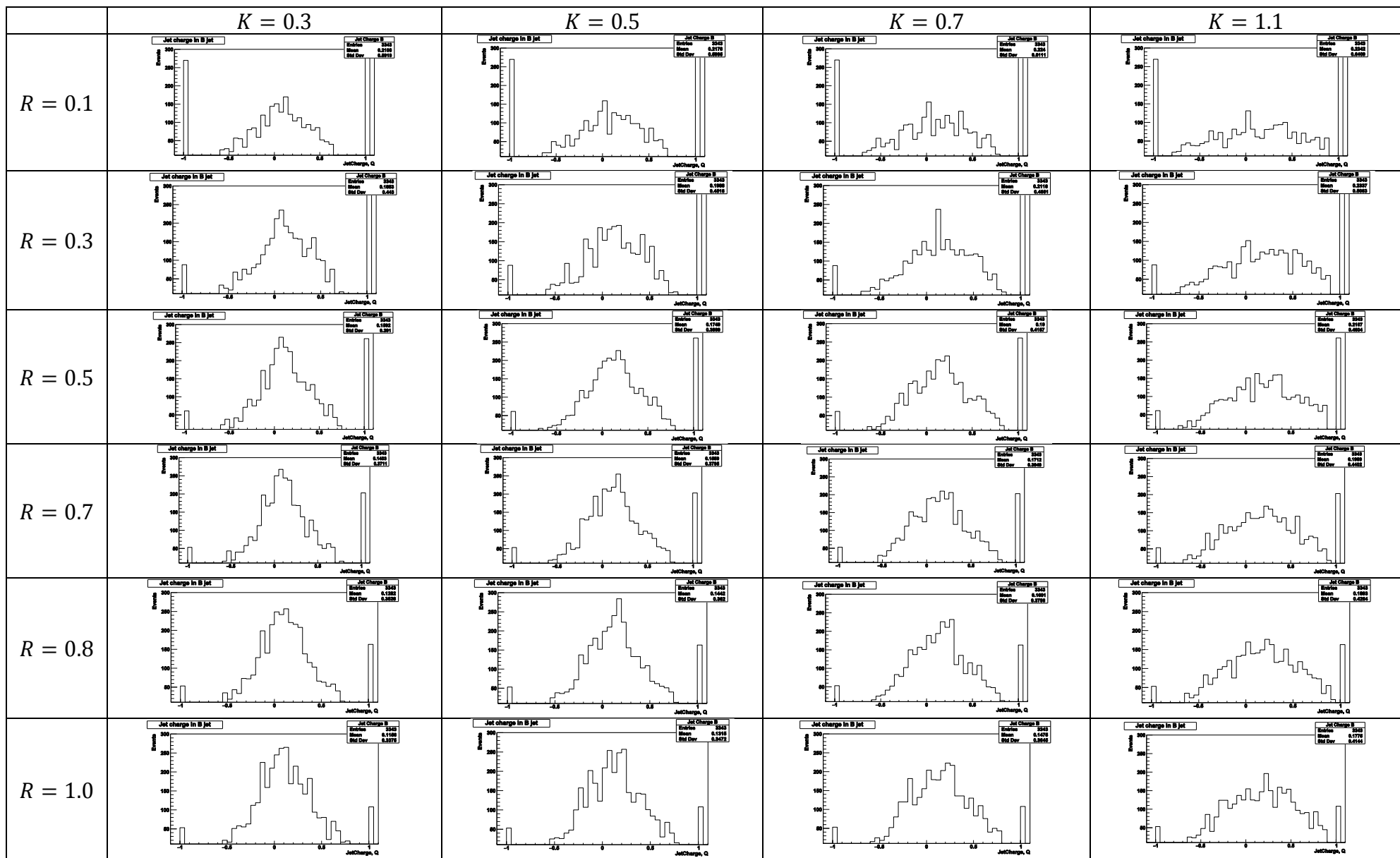


Рисунок 9. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса струи и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (слева) и функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$ (справа).

Таблица 2(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



DETECT LEVEL $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$, детектируемые в детекторе: $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^- -

адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3423

Таблица 3(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	-0.19 ± 0.57	-0.21 ± 0.58	-0.22 ± 0.59	-0.24 ± 0.62
$R = 0.3$	-0.18 ± 0.41	-0.20 ± 0.42	-0.22 ± 0.44	-0.25 ± 0.48
$R = 0.5$	-0.15 ± 0.36	-0.17 ± 0.38	-0.18 ± 0.39	-0.22 ± 0.44
$R = 0.7$	-0.13 ± 0.34	-0.15 ± 0.35	-0.17 ± 0.36	-0.21 ± 0.41
$R = 0.8$	-0.12 ± 0.33	-0.14 ± 0.342	-0.16 ± 0.36	-0.20 ± 0.41
$R = 1.0$	-0.11 ± 0.32	-0.13 ± 0.33	-0.15 ± 0.35	-0.19 ± 0.39
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	-0.1907	-0.2107	-0.2194	-0.2304
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации функцией вида $a_1(x - a_2)^{-1} + a_3$	0.2053	-0.2253	-0.2357	-0.2559

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

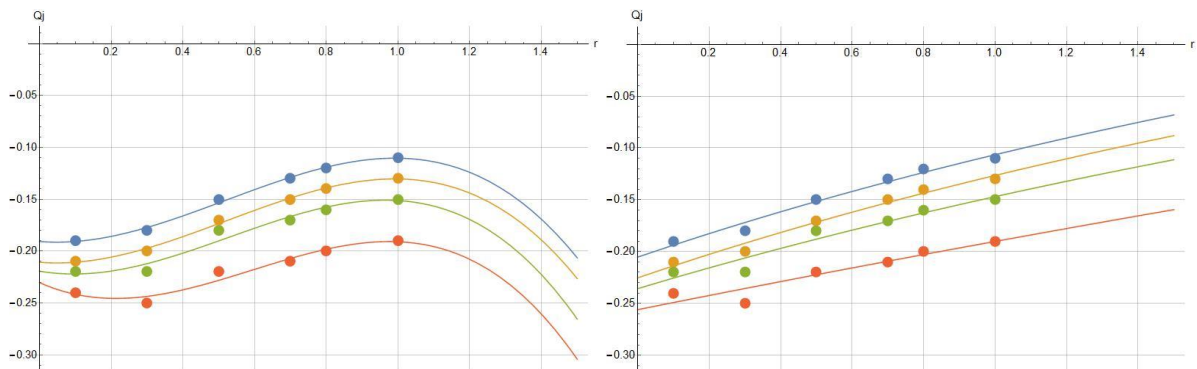
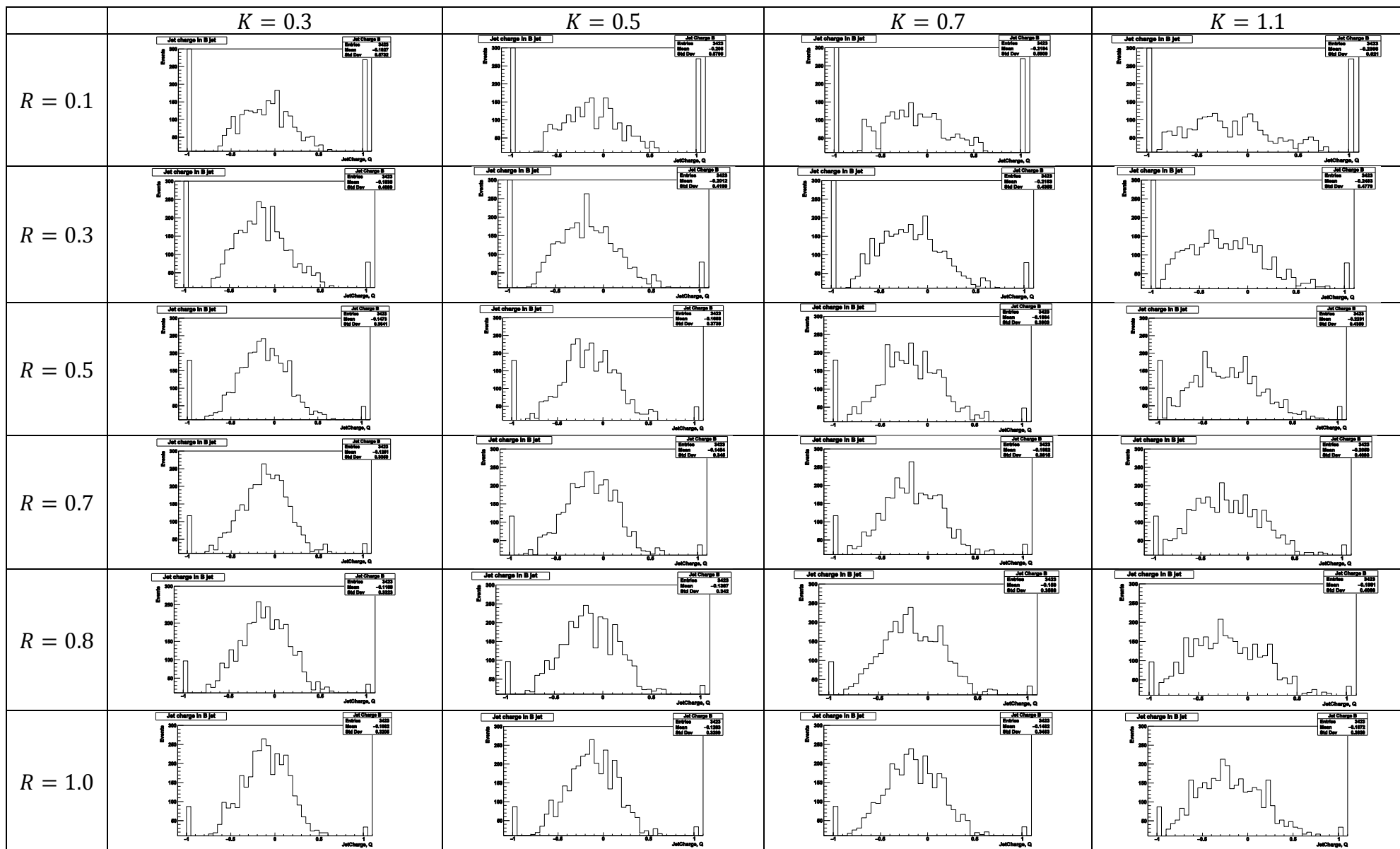


Рисунок 10. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса струи и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (слева) и функцией вида $a_1(x - a_2)^{-1} + a_3$ (справа).

Таблица 3(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ДЕТЕКТ LEVEL $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$, детектируемые в детекторе: $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^0 -

адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3169

Таблица 4(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.060 ± 0.59	0.065 ± 0.60	0.070 ± 0.62	0.078 ± 0.66
$R = 0.3$	0.069 ± 0.43	0.074 ± 0.45	0.079 ± 0.47	0.087 ± 0.52
$R = 0.5$	0.053 ± 0.39	0.059 ± 0.40	0.065 ± 0.42	0.077 ± 0.48
$R = 0.7$	0.051 ± 0.36	0.057 ± 0.37	0.063 ± 0.39	0.075 ± 0.45
$R = 0.8$	0.049 ± 0.35	0.055 ± 0.36	0.061 ± 0.38	0.072 ± 0.44
$R = 1.0$	0.046 ± 0.33	0.052 ± 0.34	0.058 ± 0.36	0.069 ± 0.42
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$	0.06689	0.0717	0.0766	0.0846

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

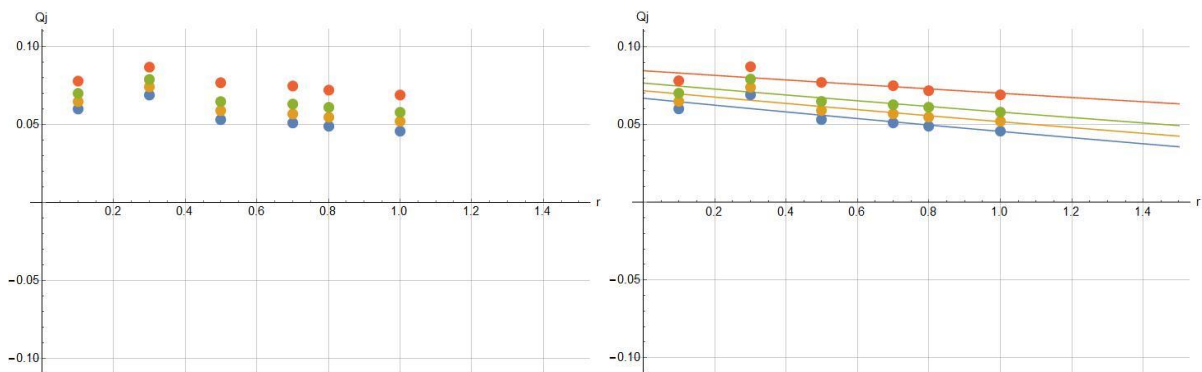
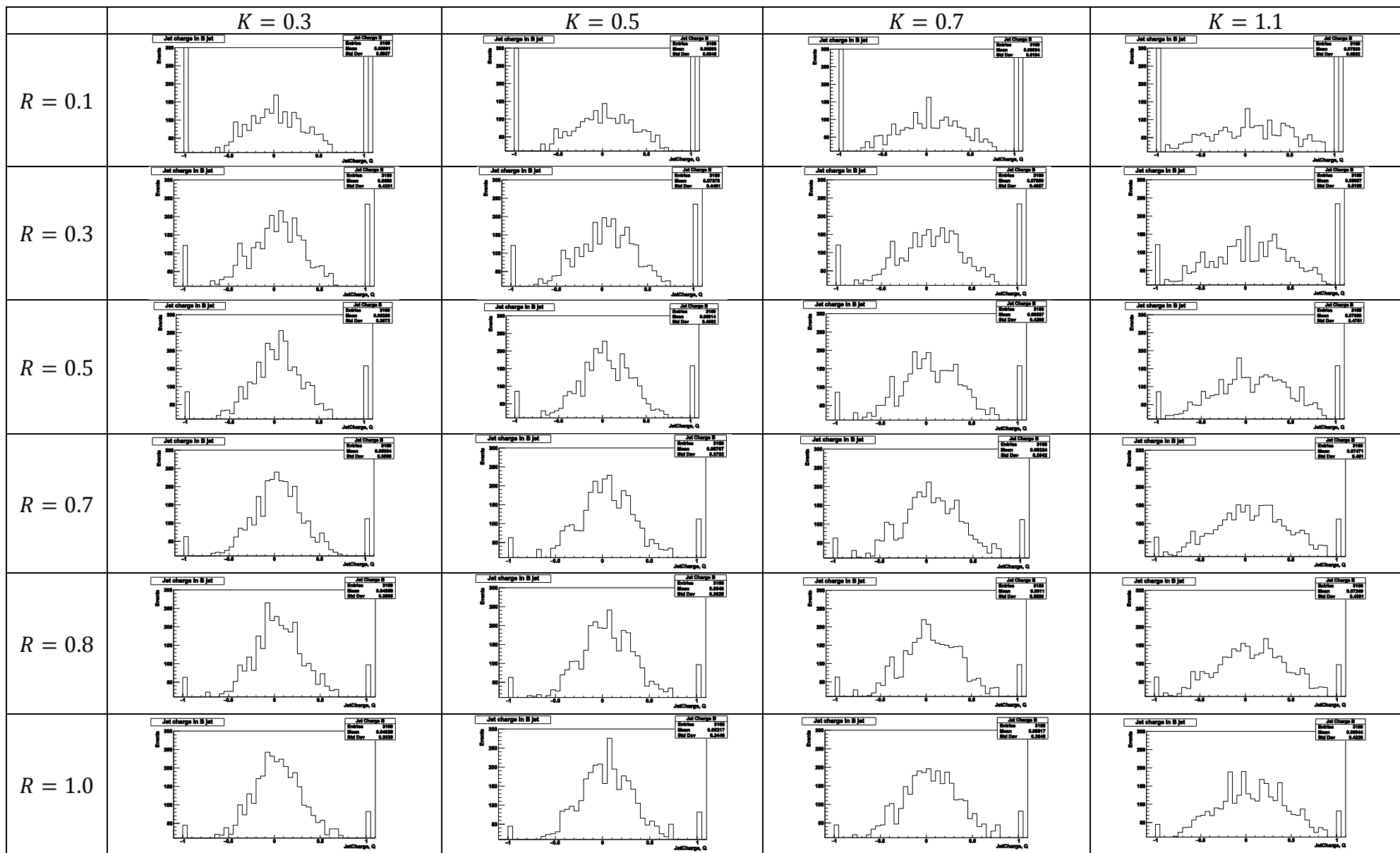


Рисунок 11. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$ (справа)

Таблица 4(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ДЕТЕКТ LEVEL $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$, детектируемые в детекторе: $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных $\overline{B^0}$ -

адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3289

Таблица 5(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	-0.044 ± 0.59	-0.048 ± 0.60	-0.052 ± 0.61	-0.059 ± 0.64
$R = 0.3$	-0.071 ± 0.44	-0.078 ± 0.45	-0.084 ± 0.47	-0.094 ± 0.51
$R = 0.5$	-0.051 ± 0.38	-0.058 ± 0.39	-0.064 ± 0.41	-0.076 ± 0.46
$R = 0.7$	-0.055 ± 0.34	-0.061 ± 0.36	-0.067 ± 0.38	-0.078 ± 0.43
$R = 0.8$	-0.054 ± 0.33	-0.060 ± 0.34	-0.066 ± 0.36	-0.077 ± 0.42
$R = 1.0$	-0.053 ± 0.32	-0.059 ± 0.33	-0.065 ± 0.35	-0.076 ± 0.40
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	-0.0274	-0.0285	-0.0309	-0.0349

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

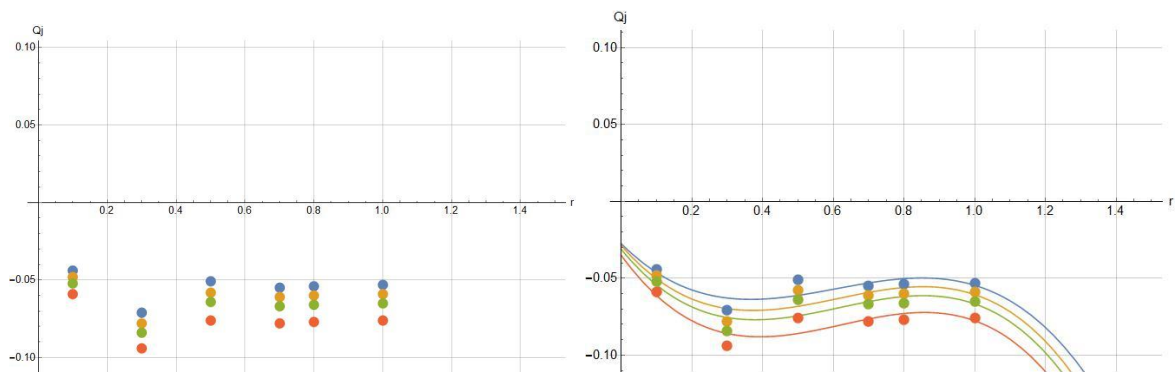
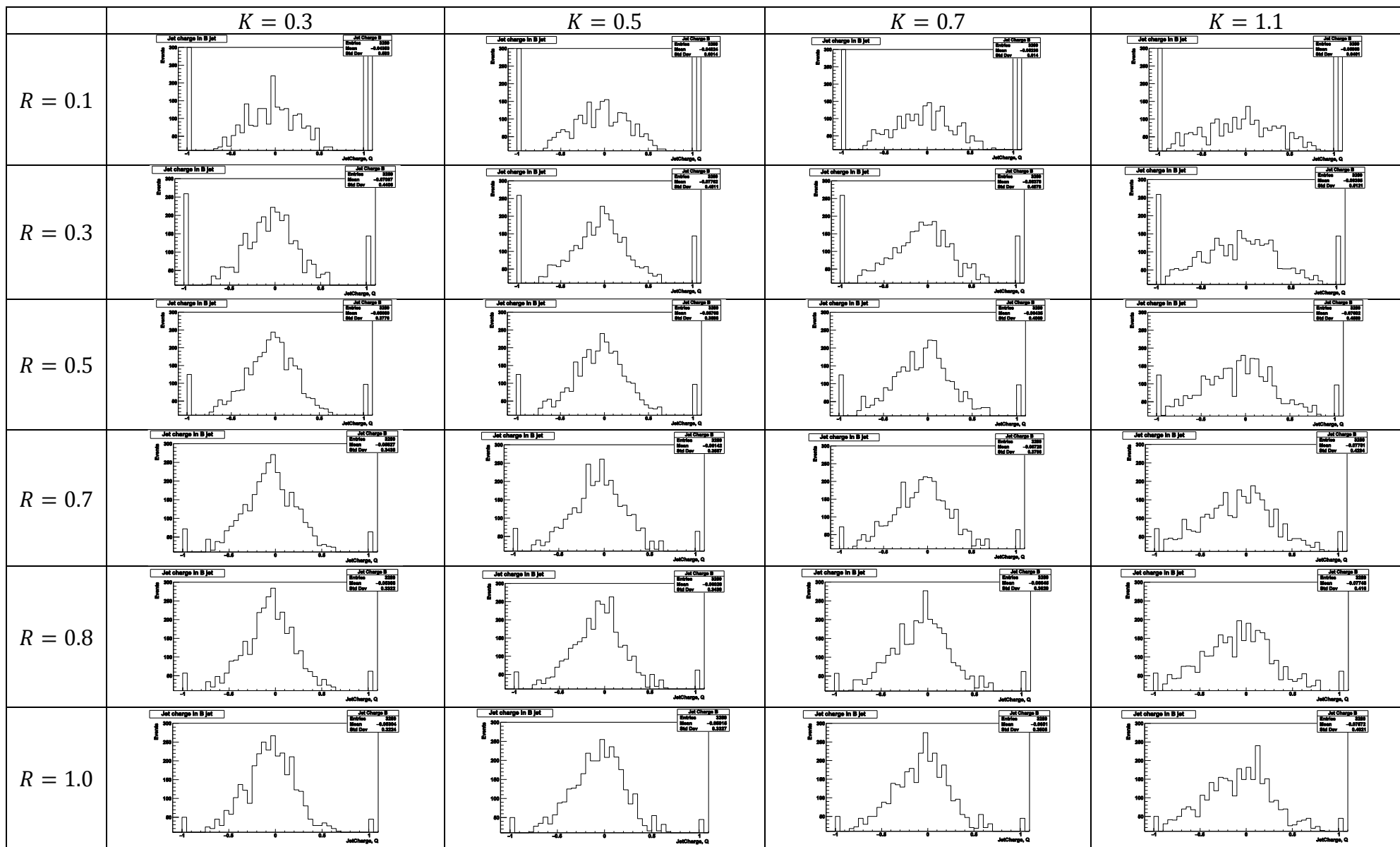


Рисунок 12. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (справа)

Таблица 5(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



DETECT LEVEL $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$, детектируемые в детекторе: $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B_S^0 -

адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 770

Таблица 6(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	-0.014 ± 0.60	-0.019 ± 0.61	0.025 ± 0.63	0.034 ± 0.66
$R = 0.3$	0.014 ± 0.39	0.014 ± 0.41	0.013 ± 0.43	0.011 ± 0.49
$R = 0.5$	0.032 ± 0.33	0.029 ± 0.35	0.026 ± 0.38	0.020 ± 0.44
$R = 0.7$	0.015 ± 0.31	0.013 ± 0.32	0.011 ± 0.35	0.006 ± 0.42
$R = 0.8$	0.003 ± 0.31	0.003 ± 0.33	0.003 ± 0.35	0.0006 ± 0.42
$R = 1.0$	0.006 ± 0.30	0.007 ± 0.32	0.007 ± 0.35	0.007 ± 0.41
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	-0.0507	-0.0584	0.0218	0.0404

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

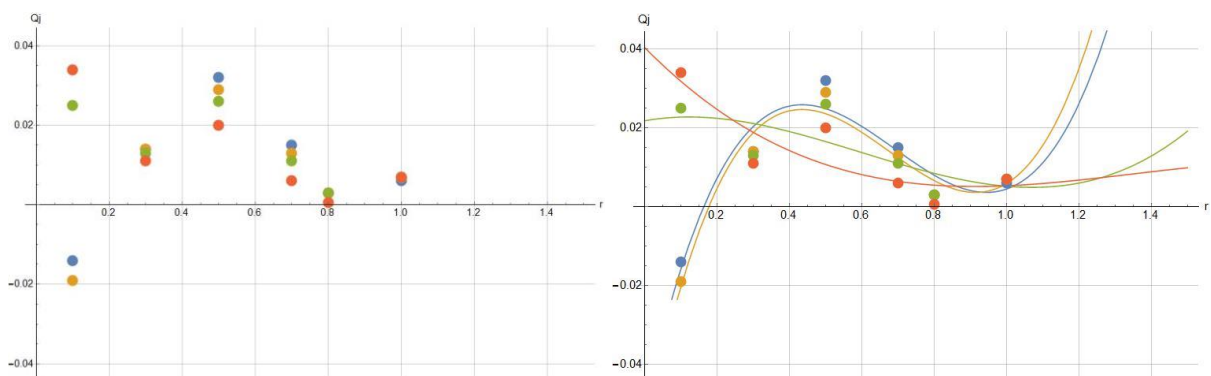
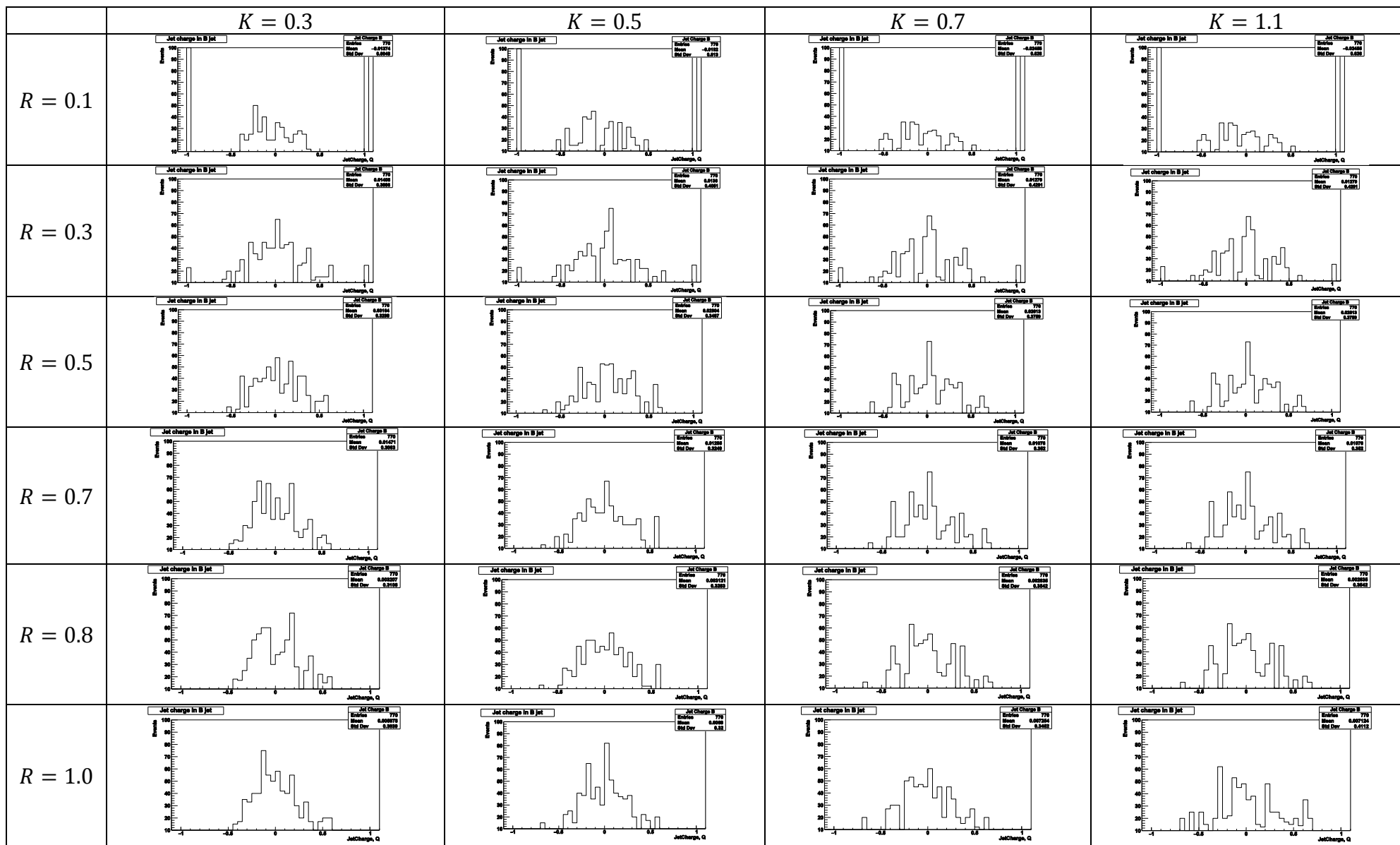


Рисунок 13. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (справа)

Таблица 6(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ДЕТЕКТ LEVEL $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$, детектируемые в детекторе: $p, \bar{p}, n, \bar{n}, e^+, e^-, \pi^+, \pi^-, \mu^+, \mu^-, K^+, K^-$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных \overline{B}_S^0 -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 757

Таблица 7(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.033 ± 0.59	0.035 ± 0.60	0.037 ± 0.61	0.039 ± 0.65
$R = 0.3$	-0.024 ± 0.4	-0.016 ± 0.41	-0.009 ± 0.43	0.003 ± 0.49
$R = 0.5$	-0.031 ± 0.32	-0.023 ± 0.34	-0.014 ± 0.36	0.002 ± 0.42
$R = 0.7$	-0.037 ± 0.31	-0.029 ± 0.32	-0.020 ± 0.35	-0.004 ± 0.41
$R = 0.8$	-0.044 ± 0.29	-0.035 ± 0.31	-0.027 ± 0.33	-0.011 ± 0.39
$R = 1.0$	-0.036 ± 0.28	-0.027 ± 0.30	-0.018 ± 0.31	0.000 ± 0.38
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	0.071	0.0686	0.06596	0.0592

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

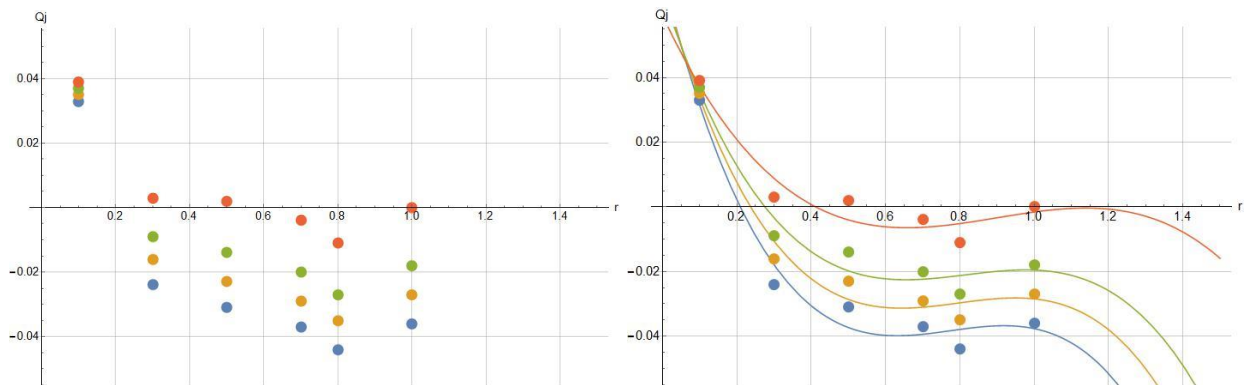
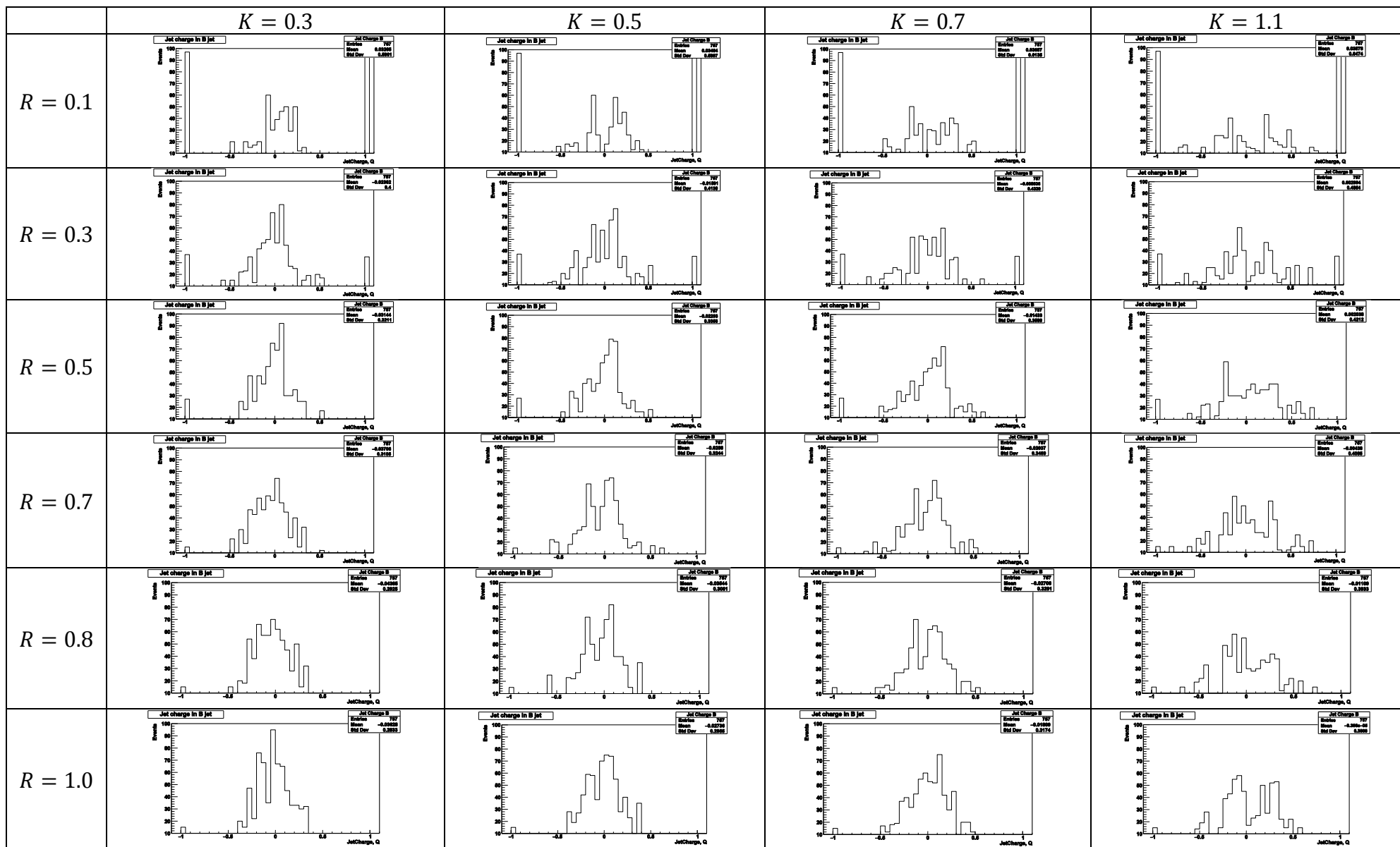


Рисунок 14. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (справа)

Таблица 7(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



CHARGED PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных **всеми типами**

B-адронов

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 14766

Таблица 8(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0008 ± 0.50	-0.0006 ± 0.51	-0.0017 ± 0.54	-0.0033 ± 0.58
$R = 0.3$	0.0009 ± 0.42	-0.0001 ± 0.44	-0.0012 ± 0.48	-0.0028 ± 0.54
$R = 0.5$	0.0027 ± 0.38	0.0013 ± 0.41	0.0002 ± 0.45	0.0023 ± 0.53
$R = 0.7$	0.0022 ± 0.36	0.0007 ± 0.40	-0.0008 ± 0.43	-0.0031 ± 0.51
$R = 0.8$	0.0006 ± 0.35	-0.0004 ± 0.38	-0.0015 ± 0.42	-0.0036 ± 0.51
$R = 1.0$	-0.0001 ± 0.34	-0.0007 ± 0.37	-0.0016 ± 0.41	-0.0034 ± 0.50
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	0.000011	-0.00167	-0.00293	-0.00728

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

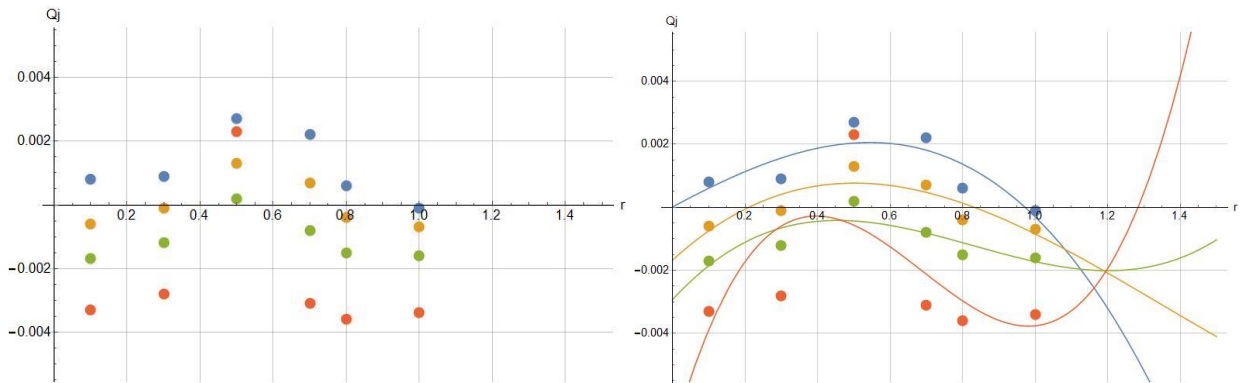
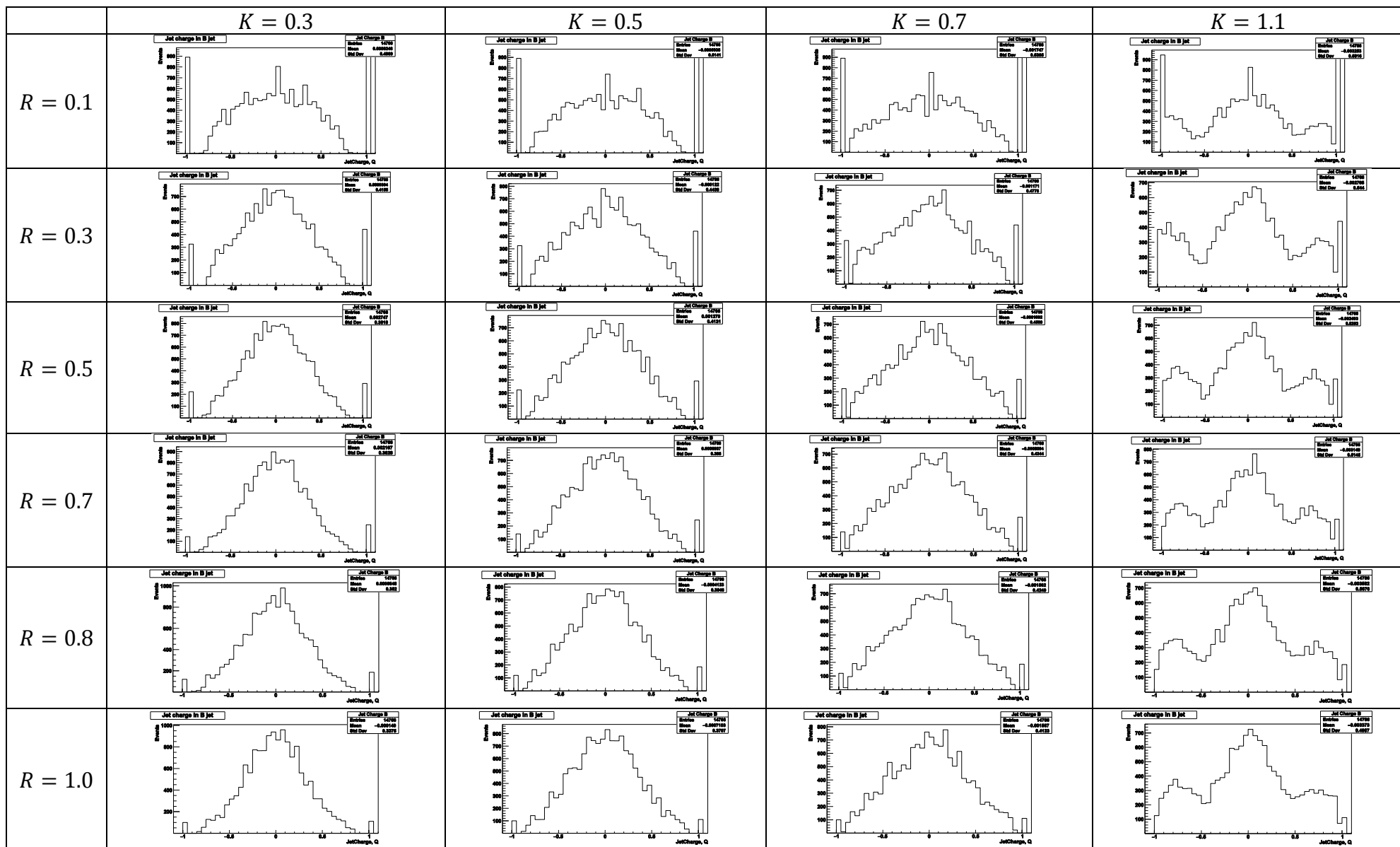


Рисунок 15. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (справа)

Таблица 8(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



CHARGED PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^+ -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3343

Таблица 9(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.55 ± 0.35	0.61 ± 0.31	0.67 ± 0.28	0.78 ± 0.22
$R = 0.3$	0.45 ± 0.31	0.52 ± 0.29	0.60 ± 0.26	0.73 ± 0.22
$R = 0.5$	0.40 ± 0.30	0.48 ± 0.27	0.56 ± 0.26	0.70 ± 0.22
$R = 0.7$	0.37 ± 0.29	0.45 ± 0.27	0.53 ± 0.25	0.68 ± 0.22
$R = 0.8$	0.36 ± 0.28	0.43 ± 0.26	0.52 ± 0.25	0.67 ± 0.23
$R = 1.0$	0.33 ± 0.26	0.41 ± 0.26	0.50 ± 0.25	0.65 ± 0.23
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	0.623	0.668	0.715	0.814
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$	0.635	0.677	0.722	0.812

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

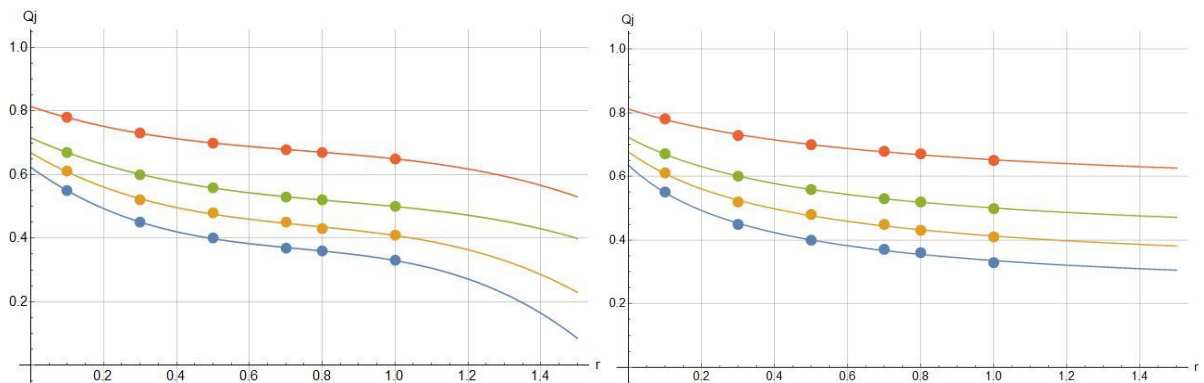
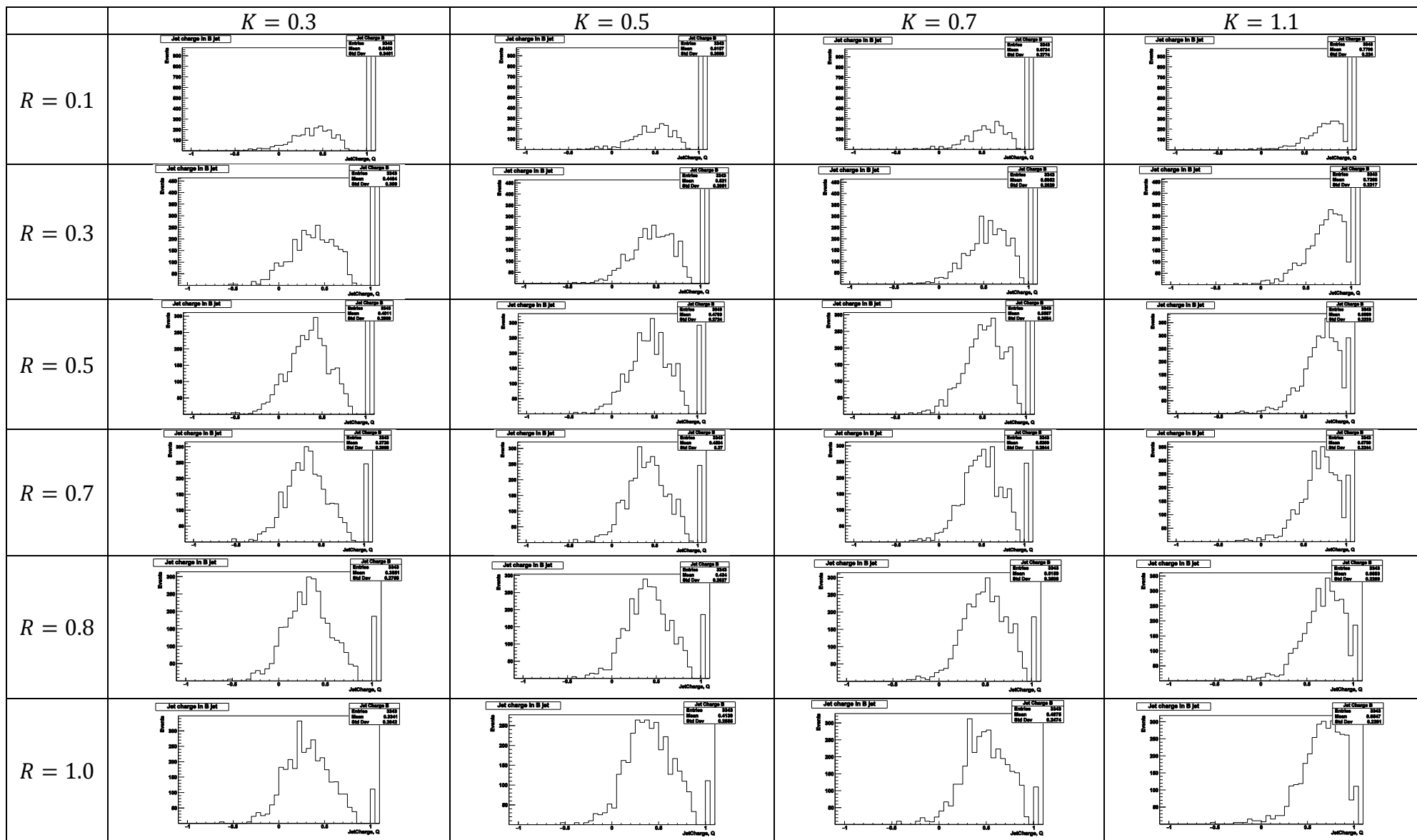


Рисунок 16. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (слева) и функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$ (справа)

Таблица 9(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



CHARGED PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^- -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3423

Таблица 10(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	-0.55 ± 0.33	-0.62 ± 0.30	-0.68 ± 0.26	-0.79 ± 0.21
$R = 0.3$	-0.44 ± 0.28	-0.52 ± 0.26	-0.60 ± 0.24	-0.74 ± 0.21
$R = 0.5$	-0.39 ± 0.27	-0.48 ± 0.26	-0.56 ± 0.24	-0.71 ± 0.21
$R = 0.7$	-0.36 ± 0.26	-0.45 ± 0.25	-0.53 ± 0.24	-0.69 ± 0.21
$R = 0.8$	-0.35 ± 0.26	-0.43 ± 0.25	-0.52 ± 0.24	-0.68 ± 0.21
$R = 1.0$	-0.33 ± 0.26	-0.41 ± 0.24	-0.50 ± 0.23	-0.67 ± 0.21
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	-0.628	-0.686	-0.733	-0.821
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации функцией вида $a_1(x - a_2)^{-1} + a_3$	-0.665	-0.701	-0.744	-0.829

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

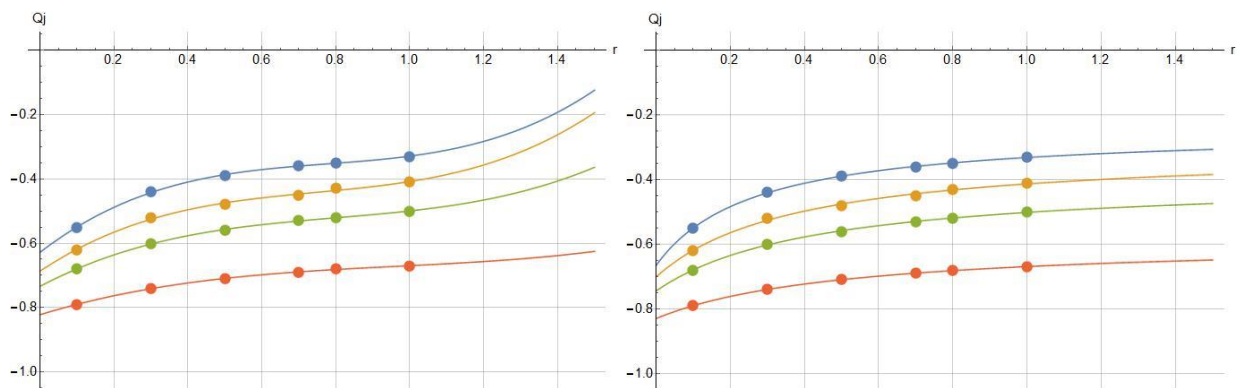
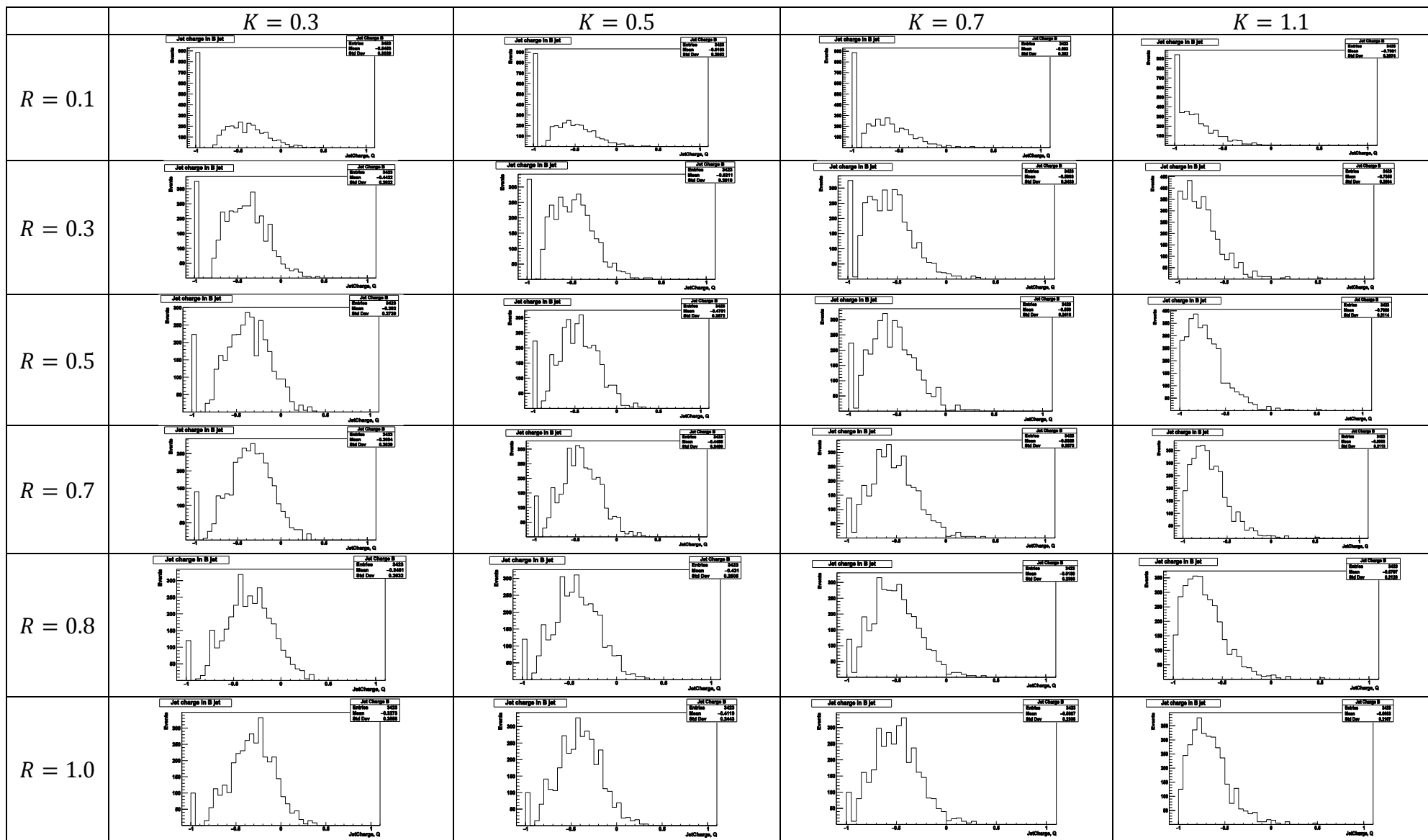


Рисунок 17. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (слева) и функцией вида $a_1(x - a_2)^{-1} + a_3$ (справа)

Таблица 10(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



CHARGED PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^0 -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3169

Таблица 11(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0066 ± 0.32	0.0055 ± 0.30	0.0039 ± 0.28	0.0004 ± 0.24
$R = 0.3$	0.016 ± 0.28	0.013 ± 0.27	0.0090 ± 0.25	0.002 ± 0.23
$R = 0.5$	0.012 ± 0.26	0.0097 ± 0.25	0.0068 ± 0.24	0.0008 ± 0.23
$R = 0.7$	0.014 ± 0.26	0.011 ± 0.25	0.0077 ± 0.24	0.0009 ± 0.22
$R = 0.8$	0.014 ± 0.26	0.011 ± 0.24	0.0079 ± 0.24	0.0009 ± 0.22
$R = 1.0$	0.011 ± 0.25	0.0090 ± 0.24	0.0061 ± 0.23	-0.0001 ± 0.22
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	0.00158	0.00125	0.00515	-0.00038

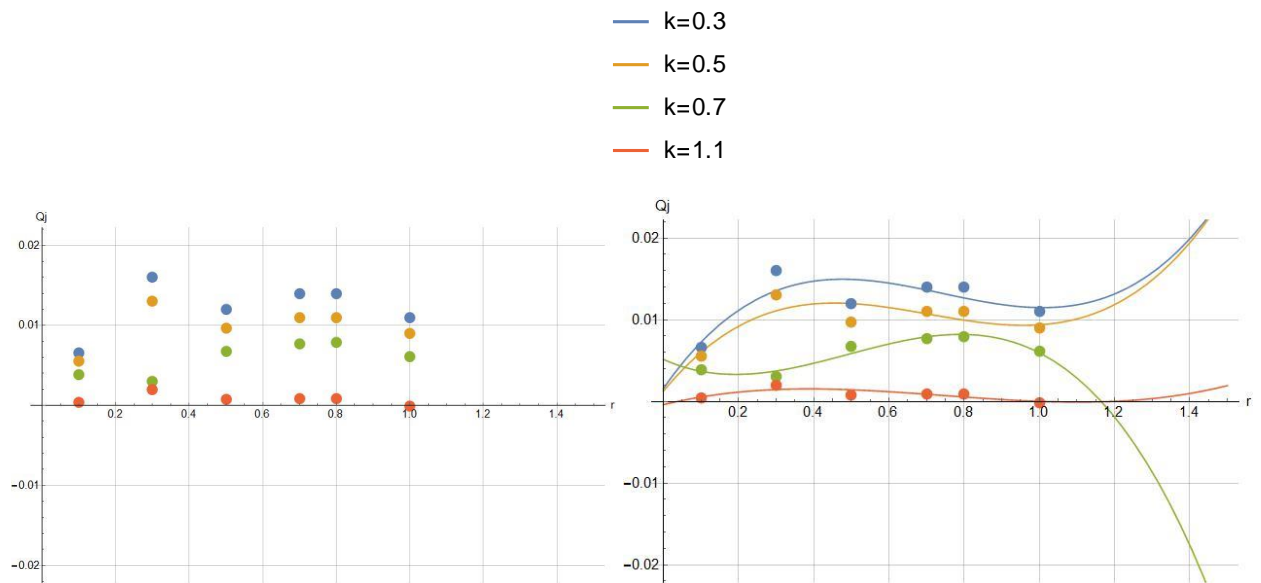
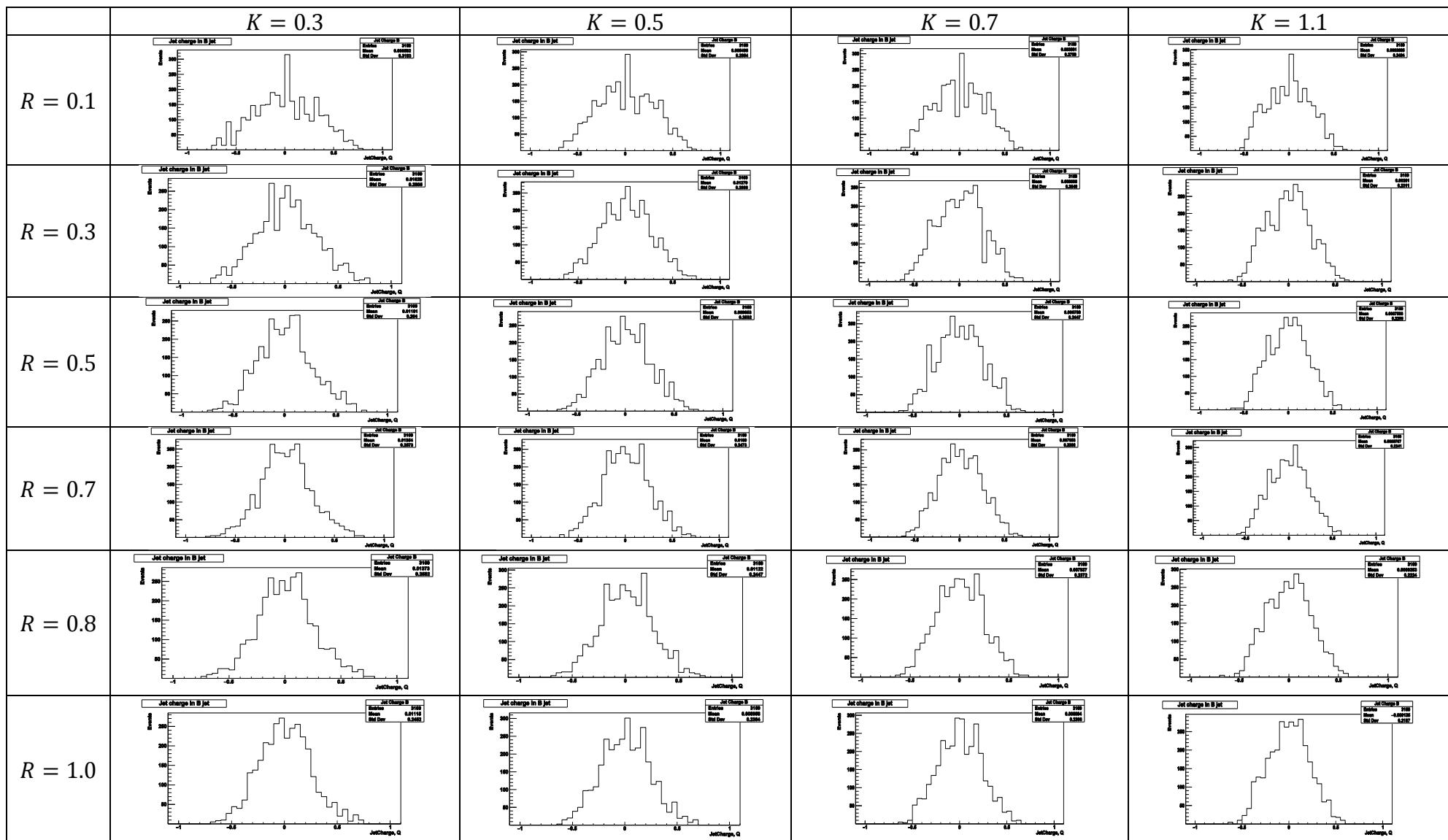


Рисунок 18. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (справа)

Таблица 11(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



CHARGED PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных $\overline{B^0}$ -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3289

Таблица 12(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0054 ± 0.32	0.0073 ± 0.29	0.0095 ± 0.27	0.013 ± 0.23
$R = 0.3$	-0.0065 ± 0.27	-0.0023 ± 0.26	0.0020 ± 0.24	0.0096 ± 0.22
$R = 0.5$	-0.0003 ± 0.26	0.0026 ± 0.24	Q_j 0.0059 ± 0.23	0.012 ± 0.22
$R = 0.7$	-0.0057 ± 0.25	-0.0015 ± 0.24	0.0028 ± 0.23	0.010 ± 0.22
$R = 0.8$	-0.0082 ± 0.25	-0.0039 ± 0.24	0.0007 ± 0.23	0.0089 ± 0.21
$R = 1.0$	-0.0096 ± 0.24	-0.0049 ± 0.23	0.0001 ± 0.23	0.0089 ± 0.21
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	0.0108	0.0116	0.0128	-0.00038

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

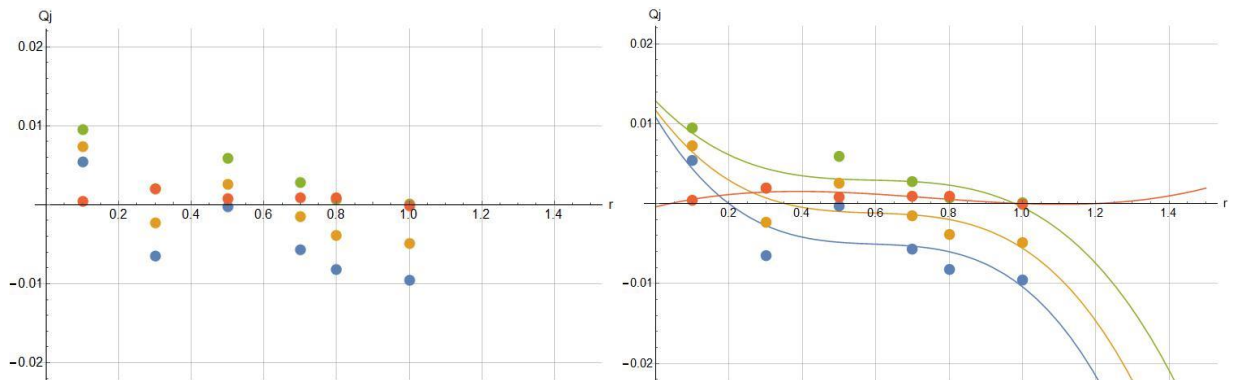
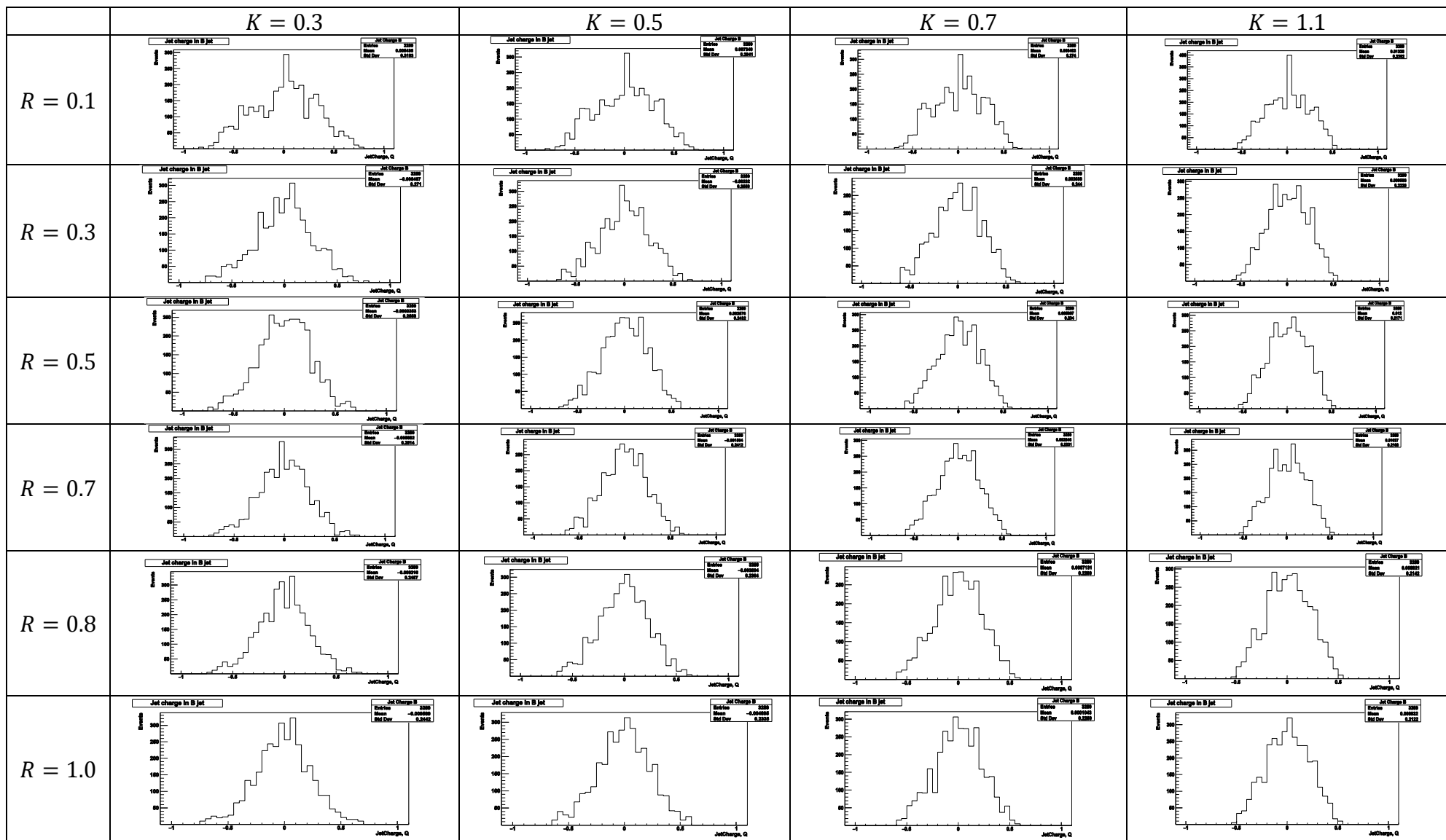


Рисунок 19. Значения среднего заряда струй в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (справа)

Таблица 12(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



CHARGED PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B_s^0 -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 770

Таблица 13(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.014 ± 0.35	0.011 ± 0.32	0.008 ± 0.30	0.014 ± 0.35
$R = 0.3$	0.024 ± 0.29	0.019 ± 0.28	0.015 ± 0.27	0.006 ± 0.25
$R = 0.5$	0.029 ± 0.27	0.022 ± 0.26	0.016 ± 0.26	0.006 ± 0.24
$R = 0.7$	0.018 ± 0.26	0.014 ± 0.25	0.010 ± 0.25	0.002 ± 0.24
$R = 0.8$	0.012 ± 0.26	0.010 ± 0.25	0.007 ± 0.24	0.002 ± 0.24
$R = 1.0$	0.017 ± 0.25	0.014 ± 0.25	0.010 ± 0.24	0.003 ± 0.23
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	-0.00301	-0.00186	-0.00228	0.01786

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

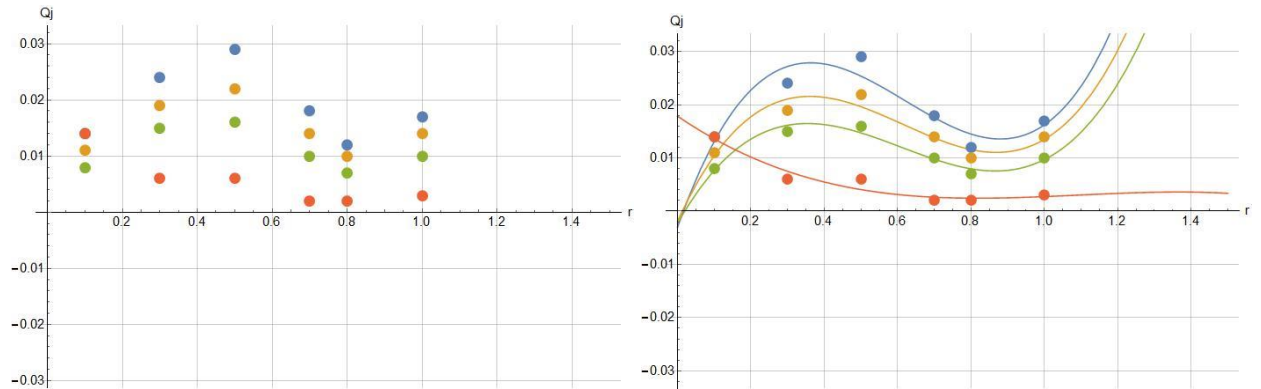
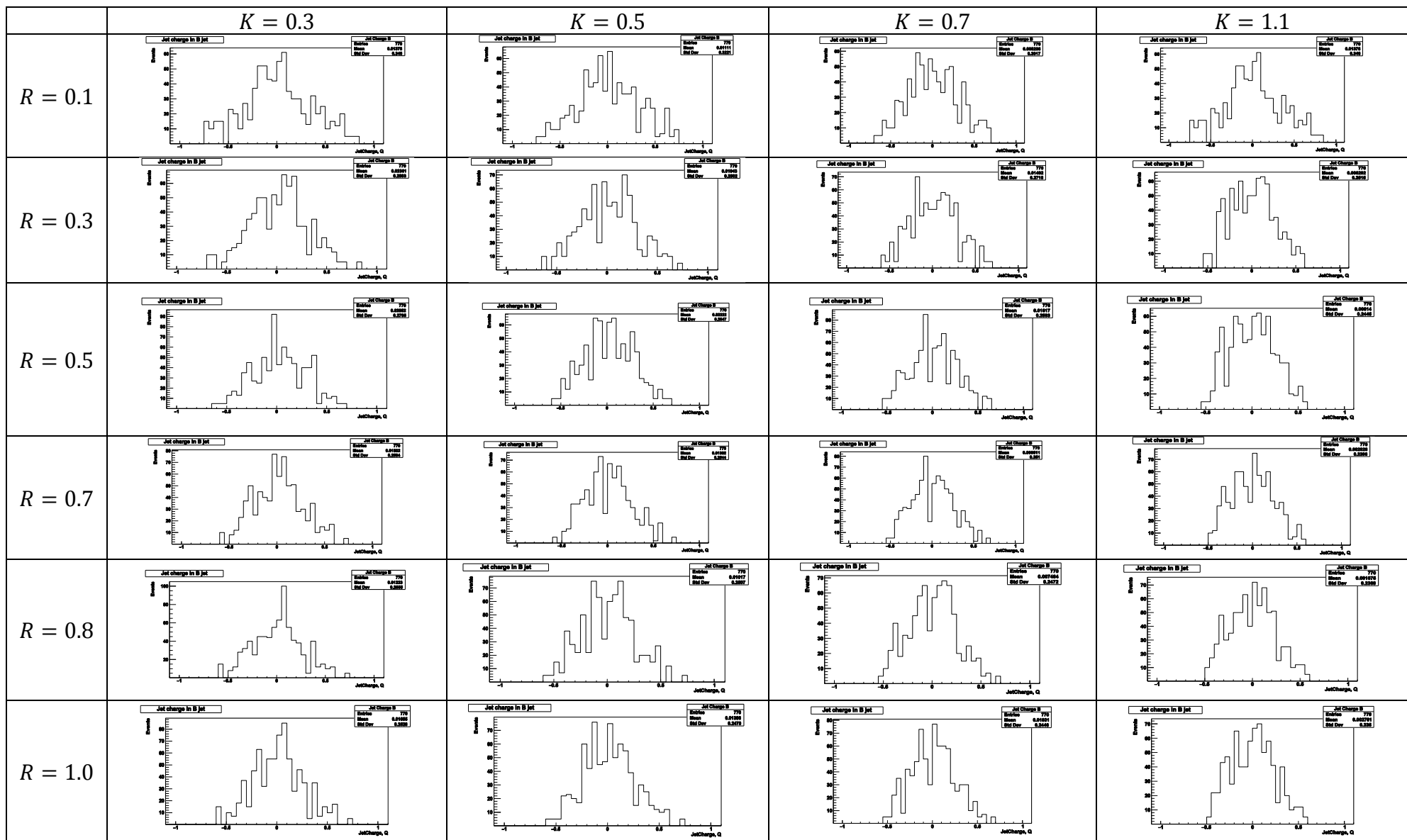


Рисунок 20. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (справа)

Таблица 13(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



CHARGED PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс, $q \neq 0$

Распределения взвешенного заряда струй, образованных \overline{B}_S^0 -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 757

Таблица 14(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.017 ± 0.37	0.020 ± 0.34	0.022 ± 0.32	0.025 ± 0.28
$R = 0.3$	-0.013 ± 0.29	-0.005 ± 0.28	0.002 ± 0.28	0.013 ± 0.26
$R = 0.5$	-0.017 ± 0.27	-0.007 ± 0.26	0.001 ± 0.26	0.014 ± 0.25
$R = 0.7$	-0.018 ± 0.26	-0.009 ± 0.26	0.000 ± 0.26	0.014 ± 0.25
$R = 0.8$	-0.020 ± 0.25	-0.010 ± 0.25	0.000 ± 0.25	0.015 ± 0.25
$R = 1.0$	-0.013 ± 0.25	-0.002 ± 0.25	0.007 ± 0.25	0.022 ± 0.25
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	0.0378	0.0362	0.0352	0.0326

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

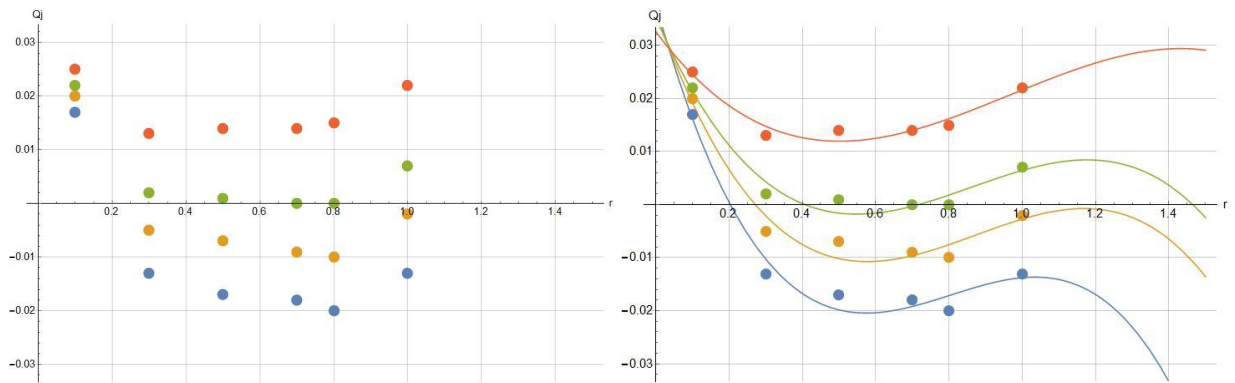
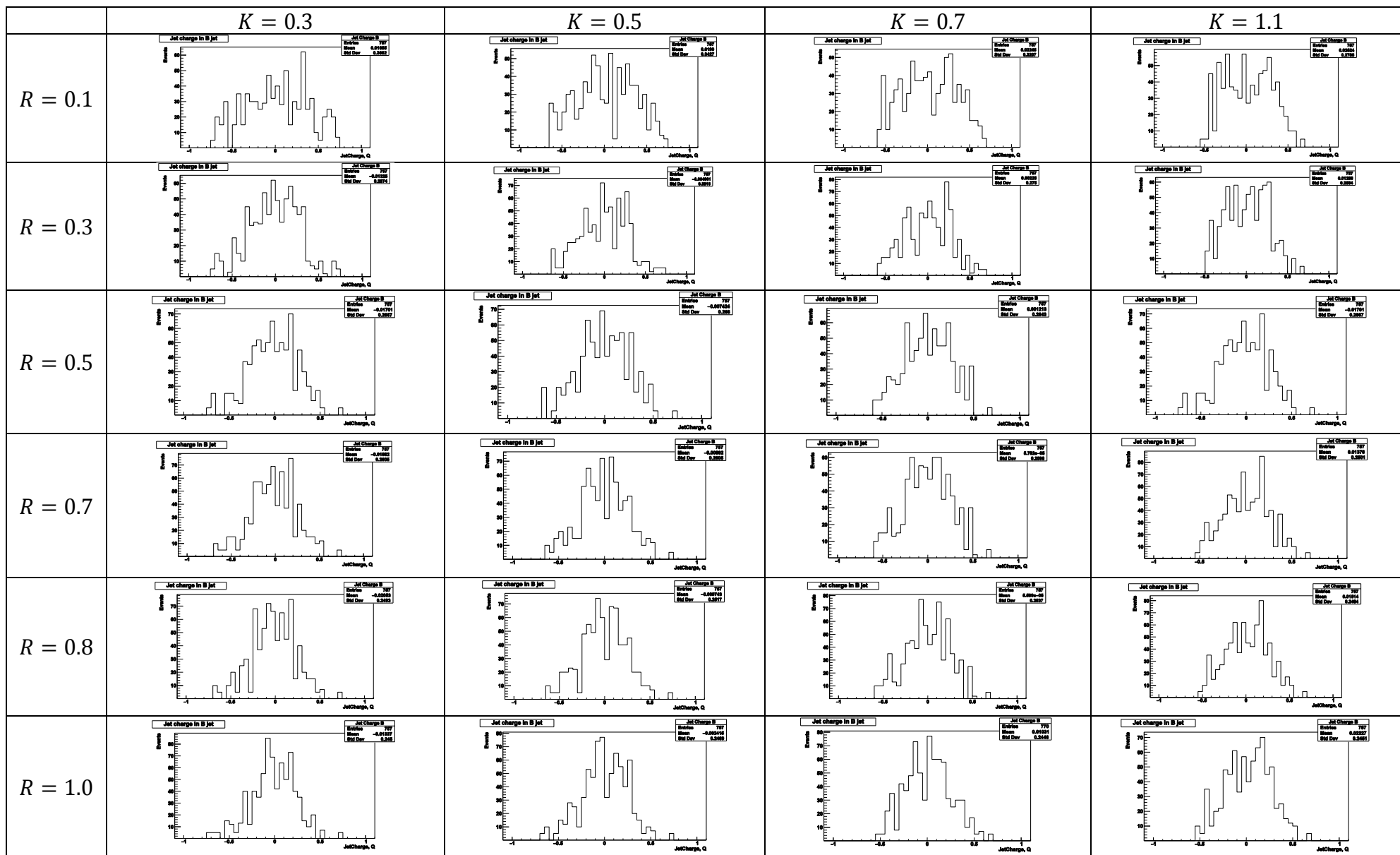


Рисунок 21. Значения среднего заряда струй в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (справа)

Таблица 14(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ALL PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс

Распределения взвешенного заряда струй, образованных **всеми типами**

B-адронов

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 14766

Таблица 15(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0018 ± 0.33	0.0004 ± 0.35	-0.0009 ± 0.38	-0.0029 ± 0.44
$R = 0.3$	Q_J = 0.0015 ± 0.26	Q_J = 0.0008 ± 0.29	Q_J = 0.0000 ± 0.32	-0.0015 ± 0.39
$R = 0.5$	0.0025 ± 0.24	0.0018 ± 0.26	0.0009 ± 0.30	-0.0011 ± 0.38
$R = 0.7$	0.0018 ± 0.22	0.0012 ± 0.25	0.0003 ± 0.29	-0.0015 ± 0.37
$R = 0.8$	0.0011 ± 0.21	0.0006 ± 0.25	0.0000 ± 0.28	-0.0018 ± 0.36
$R = 1.0$	0.0011 ± 0.21	0.0007 ± 0.23	0.0001 ± 0.27	-0.0014 ± 0.35
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$	0.00136	0.00052	-0.00212	-0.00442

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

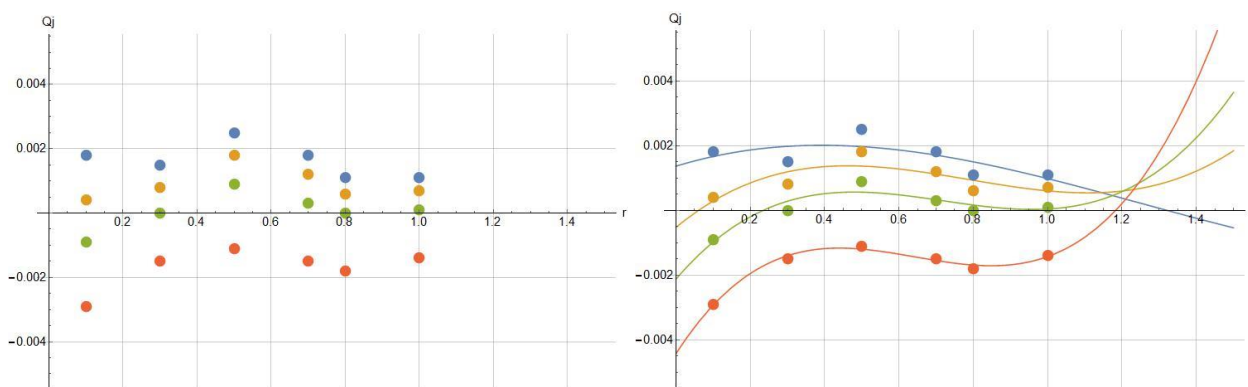
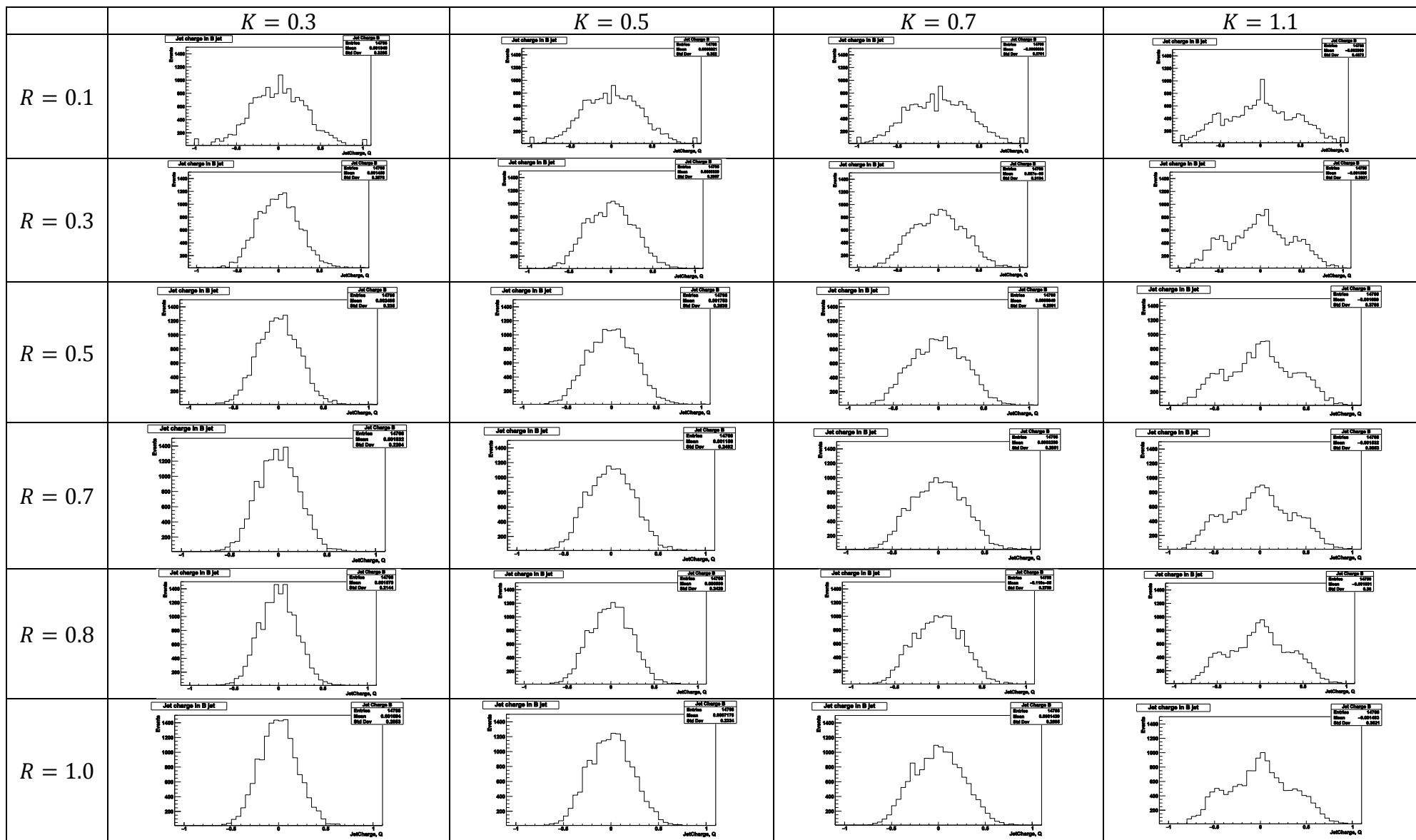


Рисунок 22. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ (справа)

Таблица 15(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ALL PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^+ -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3343

Таблица 16(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.34 ± 0.23	0.40 ± 0.22	0.45 ± 0.21	0.57 ± 0.19
$R = 0.3$	0.27 ± 0.19	0.32 ± 0.19	0.39 ± 0.19	0.51 ± 0.18
$R = 0.5$	0.24 ± 0.18	0.30 ± 0.18	0.36 ± 0.18	0.49 ± 0.18
$R = 0.7$	0.22 ± 0.17	0.28 ± 0.17	0.34 ± 0.17	0.47 ± 0.17
$R = 0.8$	0.21 ± 0.17	0.27 ± 0.17	0.33 ± 0.17	0.46 ± 0.18
$R = 1.0$	0.20 ± 0.16	0.25 ± 0.16	0.32 ± 0.17	0.45 ± 0.18
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	0.38738	0.45663	0.48961	0.60845
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$	0.40987	0.47655	0.50297	0.62151

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

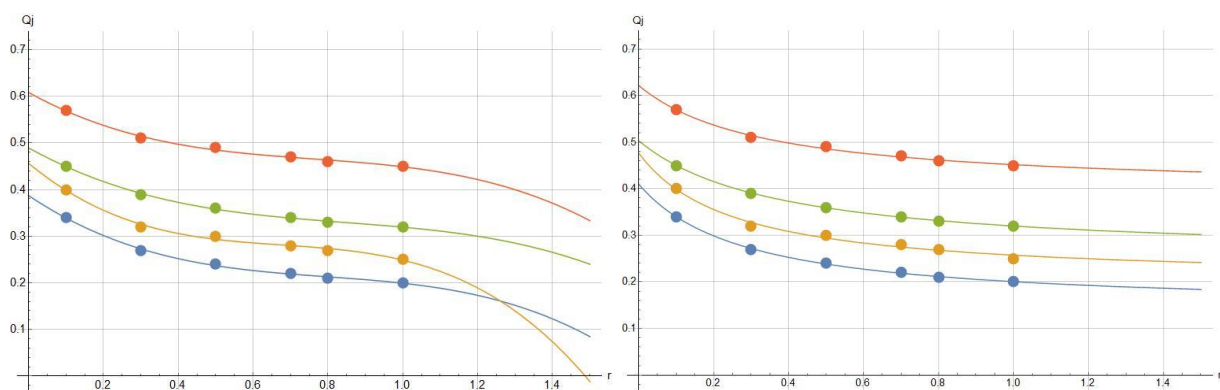
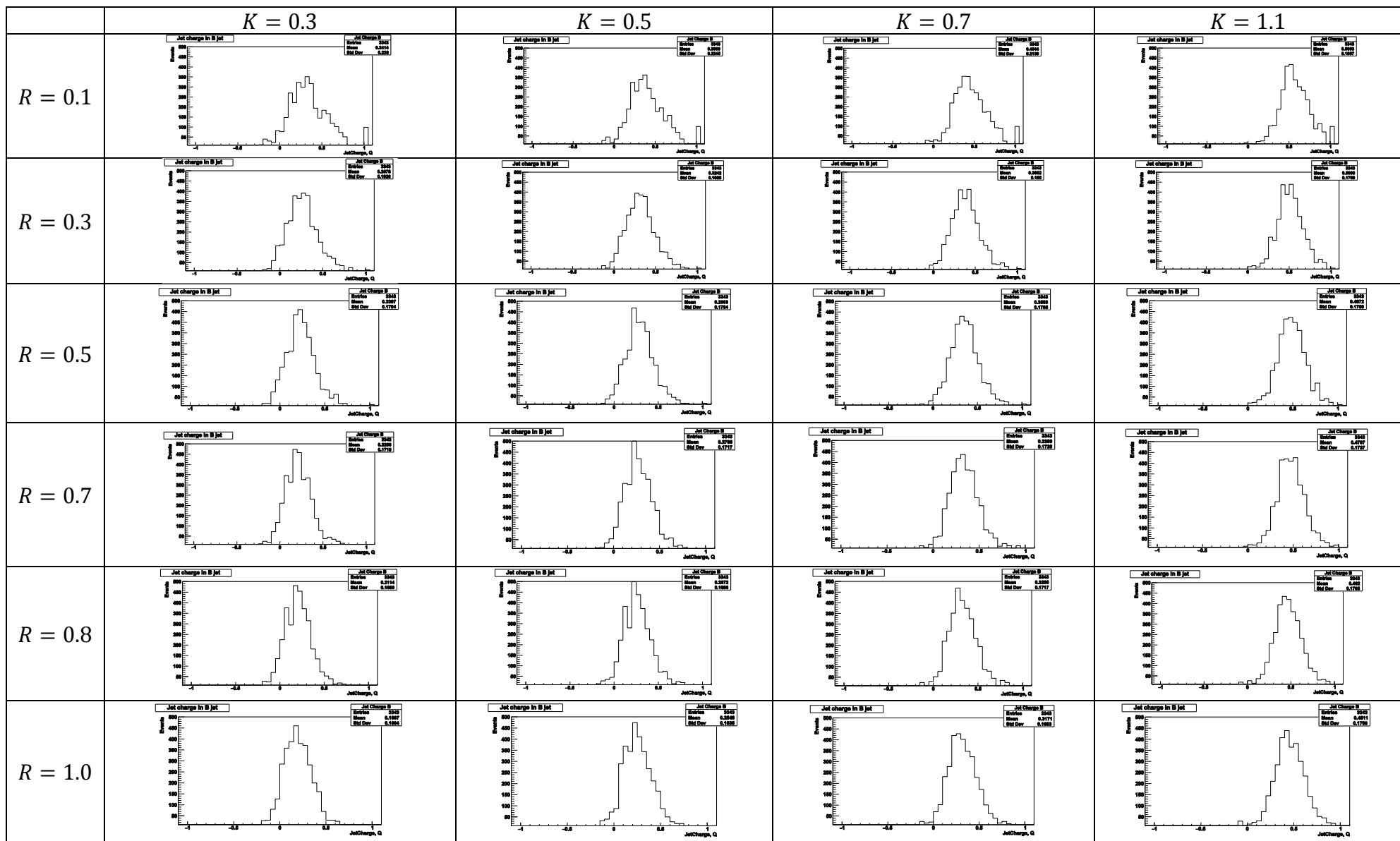


Рисунок 23. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (слева) и функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$ (справа)

Таблица 16(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ALL PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^- -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3423

Таблица 17(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	-0.34 ± 0.23	-0.40 ± 0.22	-0.46 ± 0.21	-0.58 ± 0.19
$R = 0.3$	-0.26 ± 0.17	-0.32 ± 0.17	-0.39 ± 0.17	-0.52 ± 0.17
$R = 0.5$	-0.23 ± 0.16	-0.29 ± 0.16	-0.36 ± 0.16	-0.49 ± 0.16
$R = 0.7$	-0.21 ± 0.16	-0.27 ± 0.16	-0.34 ± 0.16	-0.48 ± 0.16
$R = 0.8$	-0.20 ± 0.16	-0.26 ± 0.16	-0.33 ± 0.16	-0.47 ± 0.16
$R = 1.0$	-0.19 ± 0.15	-0.25 ± 0.15	-0.32 ± 0.15	-0.46 ± 0.16
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	-0.3951	-0.4551	-0.5073	-0.6248
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$	-0.43141	-0.49141	-0.5298	-0.6463

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

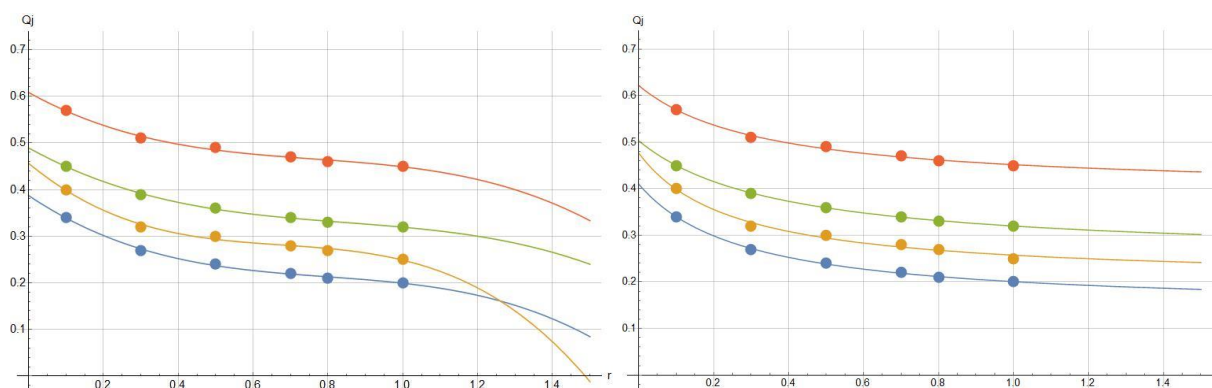
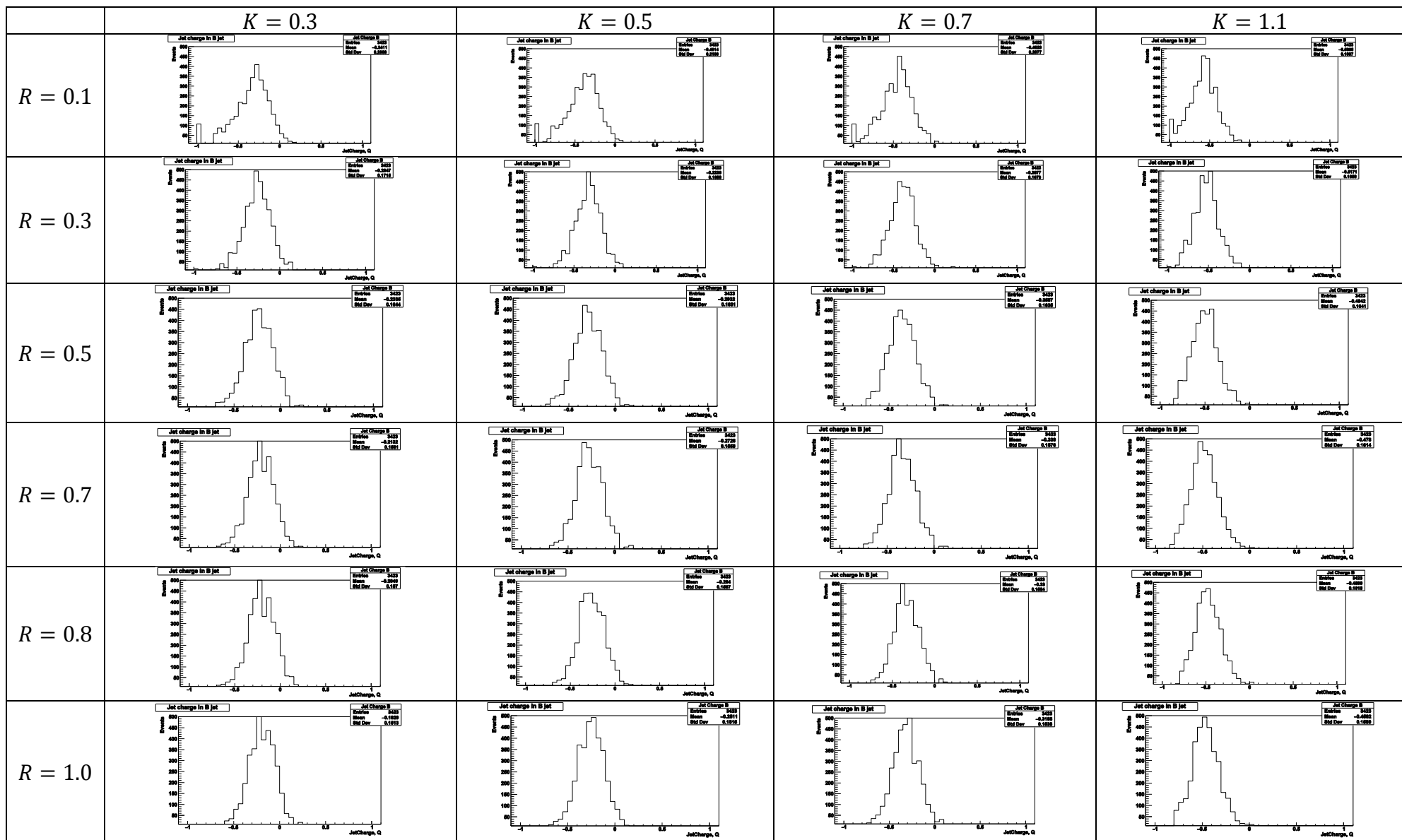


Рисунок 24. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (слева) и функцией вида $a1(x - a2)^{-1} + a3$ (справа)

Таблица 17(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ALL PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B^0 -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3169

Таблица 18(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0015 ± 0.22	0.0009 ± 0.22	0.0000 ± 0.21	-0.0020 ± 0.20
$R = 0.3$	0.0093 ± 0.18	0.0069 ± 0.18	0.0043 ± 0.19	-0.0005 ± 0.19
$R = 0.5$	0.0065 ± 0.17	0.0048 ± 0.17	0.0028 ± 0.18	-0.0014 ± 0.18
$R = 0.7$	0.0081 ± 0.16	0.0060 ± 0.17	0.0036 ± 0.17	-0.0012 ± 0.18
$R = 0.8$	0.0082 ± 0.16	0.0062 ± 0.16	0.0037 ± 0.17	-0.0013 ± 0.17
$R = 1.0$	0.0068 ± 0.15	0.0049 ± 0.16	0.0027 ± 0.16	-0.0019 ± 0.17
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	-0.003009	-0.0024992	-0.002461	-0.002826

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

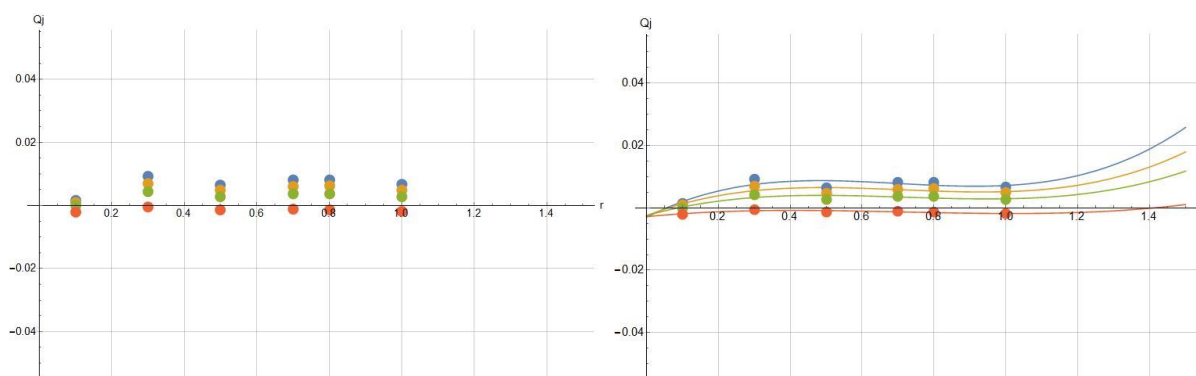
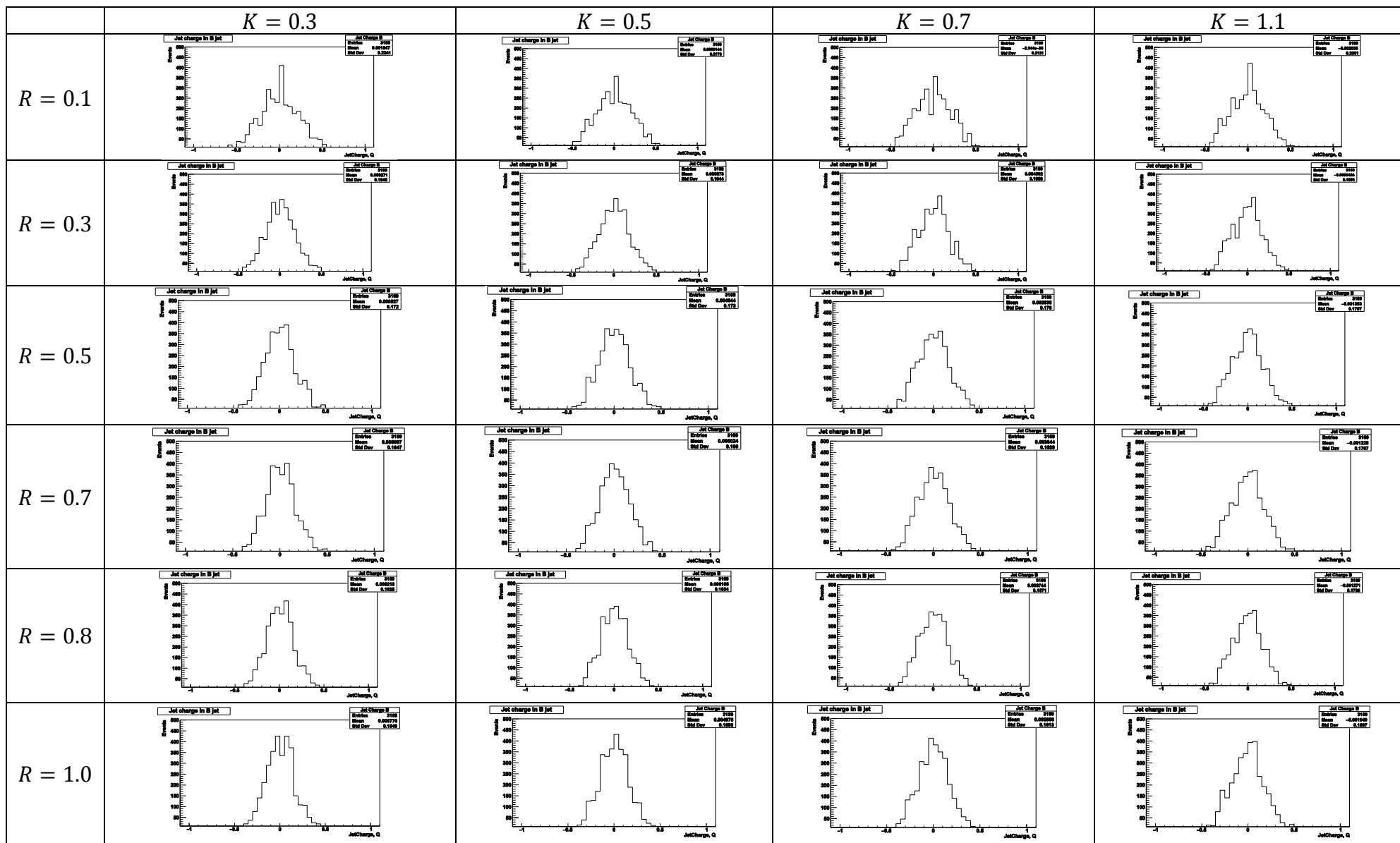


Рисунок 25. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (справа)

Таблица 18(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ALL PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс

Распределения взвешенного заряда струй, образованных $\overline{B^0}$ -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 3289

Таблица 19(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0074 ± 0.23	0.0081 ± 0.22	0.0093 ± 0.21	0.0121 ± 0.20
$R = 0.3$	-0.0021 ± 0.18	0.0010 ± 0.18	0.0043 ± 0.18	0.0101 ± 0.18
$R = 0.5$	0.0014 ± 0.16	0.0038 ± 0.16	0.0039 ± 0.16	0.0116 ± 0.17
$R = 0.7$	-0.0027 ± 0.16	0.0005 ± 0.16	0.0039 ± 0.16	0.0102 ± 0.17
$R = 0.8$	-0.0042 ± 0.15	-0.0010 ± 0.16	0.0025 ± 0.16	0.0091 ± 0.17
$R = 1.0$	-0.0046 ± 0.15	-0.0014 ± 0.15	0.0022 ± 0.16	0.0090 ± 0.16
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	0.01194	0.01127	0.012938	0.012483

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

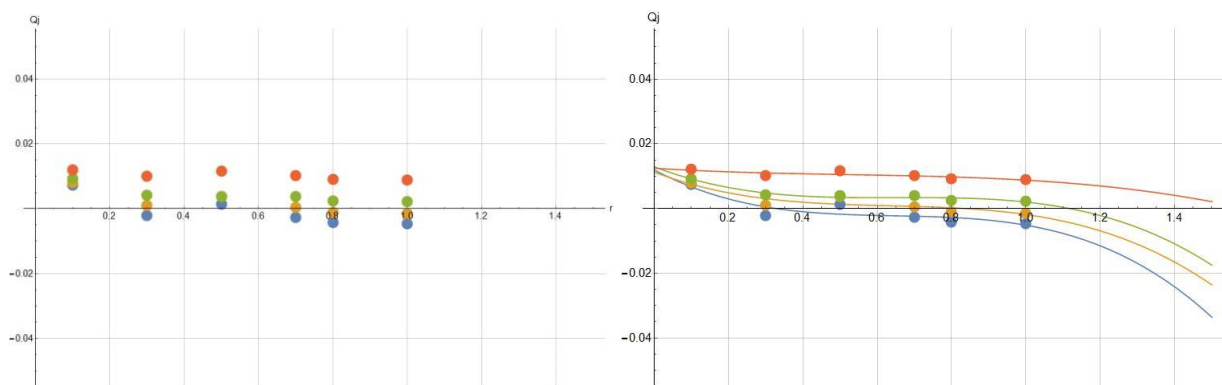
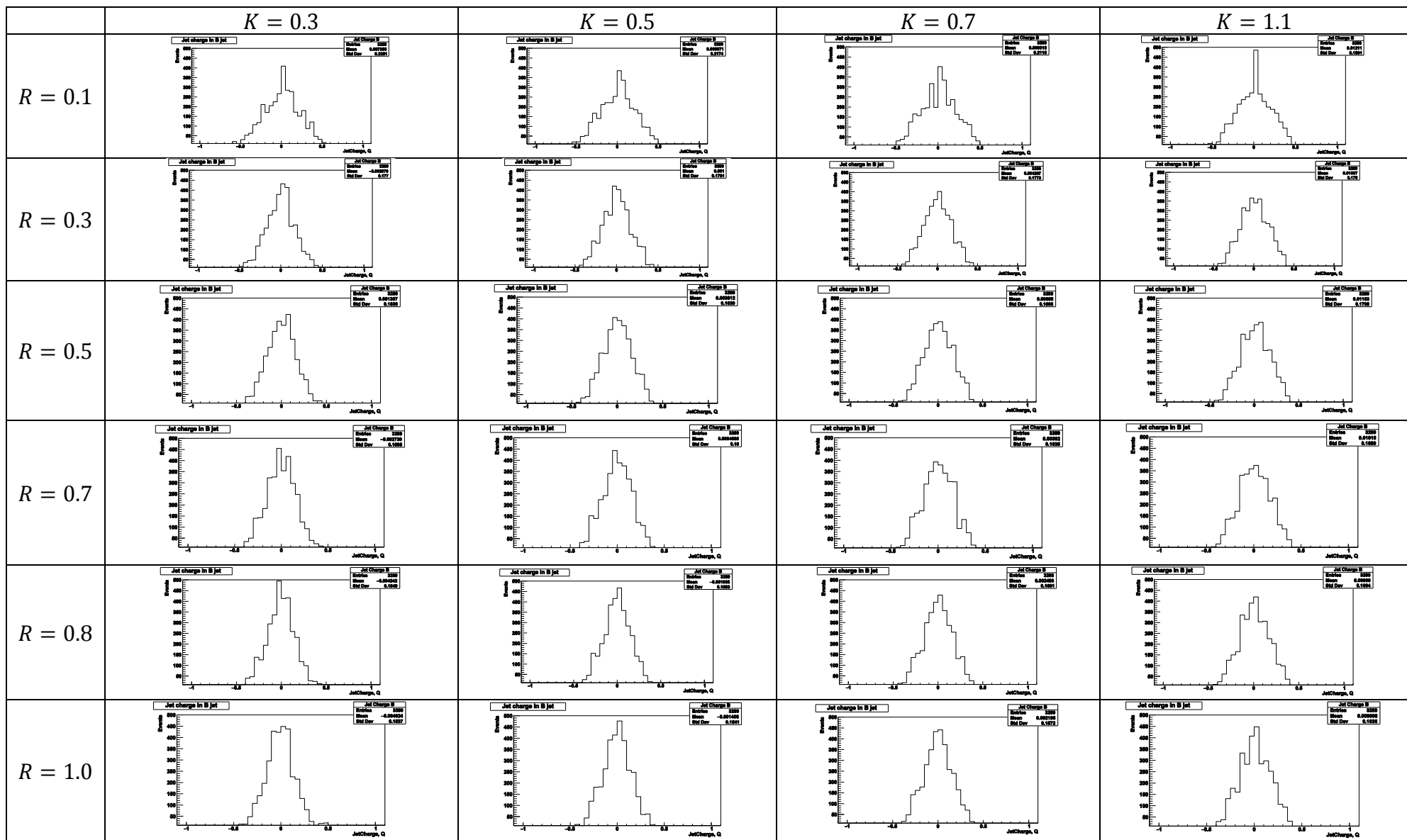


Рисунок 26. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (справа)

Таблица 19(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ALL PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс

Распределения взвешенного заряда струй, образованных B_s^0 -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 770

Таблица 20(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0180 ± 0.27	0.0147 ± 0.26	0.0113 ± 0.25	0.0046 ± 0.24
$R = 0.3$	0.0219 ± 0.20	0.0186 ± 0.20	0.0147 ± 0.21	0.0068 ± 0.21
$R = 0.5$	0.0219 ± 0.18	0.0178 ± 0.19	0.0135 ± 0.20	0.0053 ± 0.20
$R = 0.7$	0.0155 ± 0.17	0.0125 ± 0.18	0.0090 ± 0.19	0.0022 ± 0.20
$R = 0.8$	0.0116 ± 0.17	0.0099 ± 0.17	0.0075 ± 0.18	0.0020 ± 0.19
$R = 1.0$	0.0124 ± 0.17	0.0110 ± 0.17	0.0087 ± 0.18	0.0026 ± 0.19
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	0.010374	0.0080089	0.005728	0.001232

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

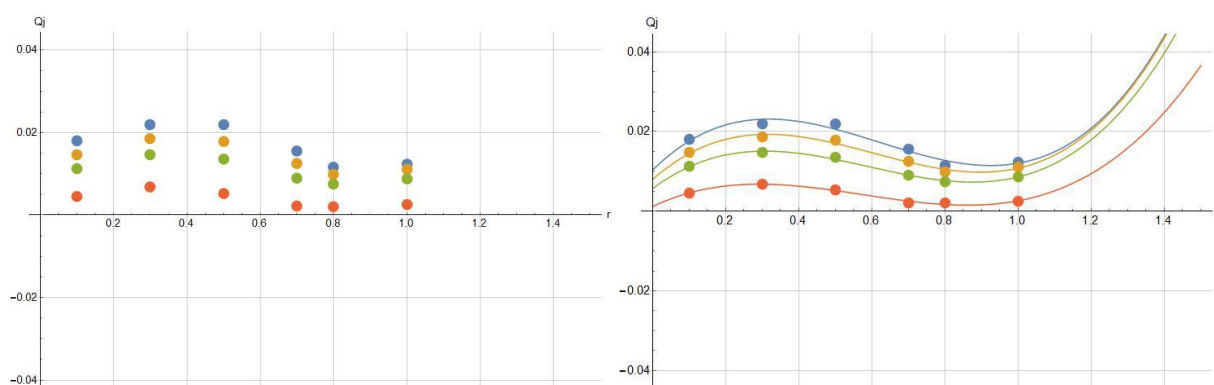
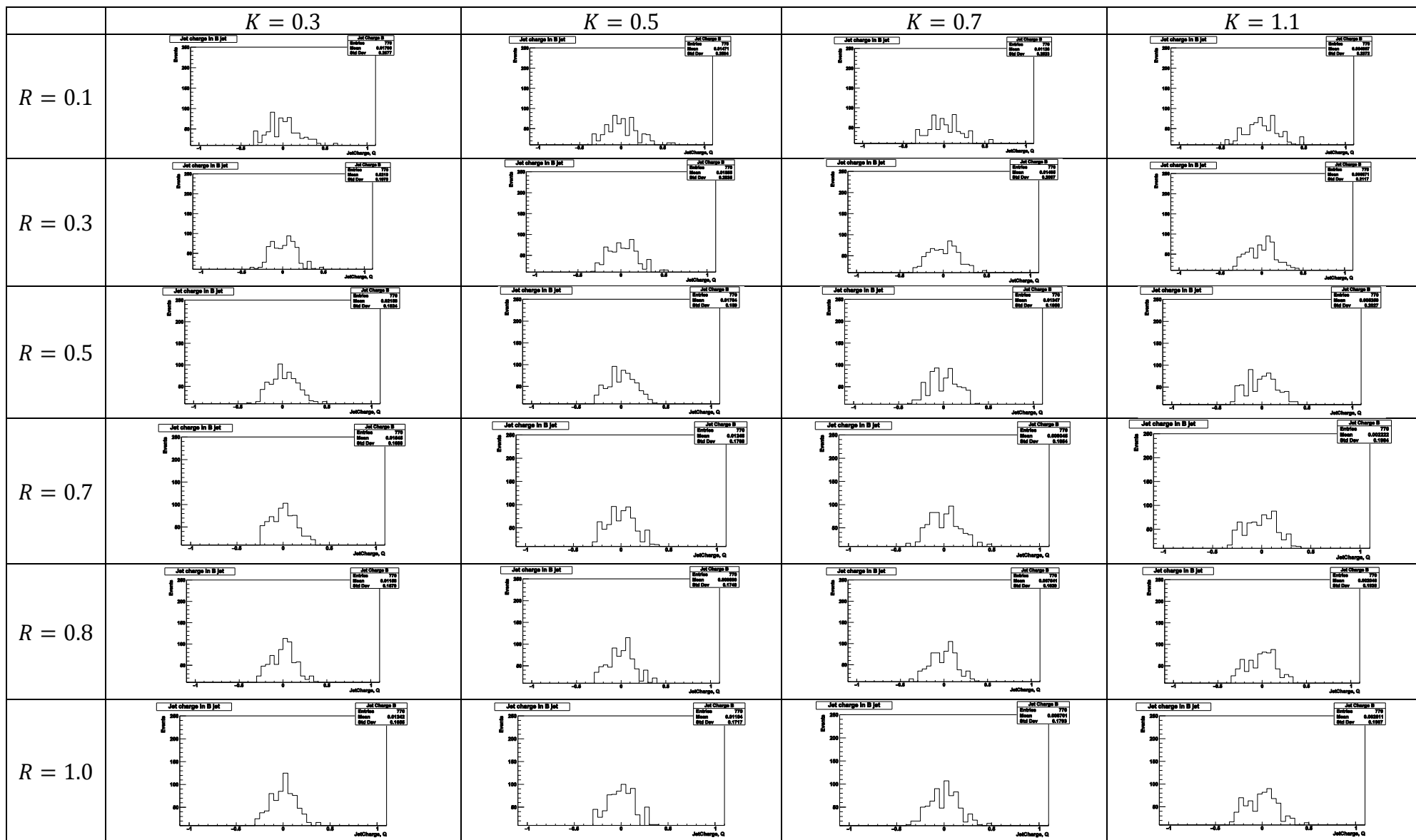


Рисунок 27. Значения среднего заряда струй в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (справа)

Таблица 20(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .



ALL PARTICLE $p_T > 0.5$ ГэВ, $t_{life} > 3$ нс

Распределения взвешенного заряда струй, образованных \overline{B}_S^0 -адронами

Количество событий: 100 млн. Количество струй: 757

Таблица 21(а). Значения среднего взвешенного заряда струй при различных R и k

	$K = 0.3$	$K = 0.5$	$K = 0.7$	$K = 1.1$
$R = 0.1$	0.0186 ± 0.29	0.0204 ± 0.28	0.0219 ± 0.27	0.0238 ± 0.25
$R = 0.3$	-0.0056 ± 0.21	0.0000 ± 0.22	0.0051 ± 0.22	0.0131 ± 0.22
$R = 0.5$	-0.0066 ± 0.19	0.0000 ± 0.20	0.0061 ± 0.21	0.0160 ± 0.21
$R = 0.7$	-0.0099 ± 0.18	0.0024 ± 0.19	0.0044 ± 0.20	0.0155 ± 0.21
$R = 0.8$	-0.0106 ± 0.17	-0.0028 ± 0.18	0.0046 ± 0.20	0.0165 ± 0.21
$R = 1.0$	-0.0056 ± 0.17	0.0019 ± 0.18	0.0091 ± 0.19	0.0211 ± 0.20
$R = 0.0$ – оценка при аппроксимации полиномом $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$	0.034298	0.034886	0.032823	0.030577

— $k=0.3$
— $k=0.5$
— $k=0.7$
— $k=1.1$

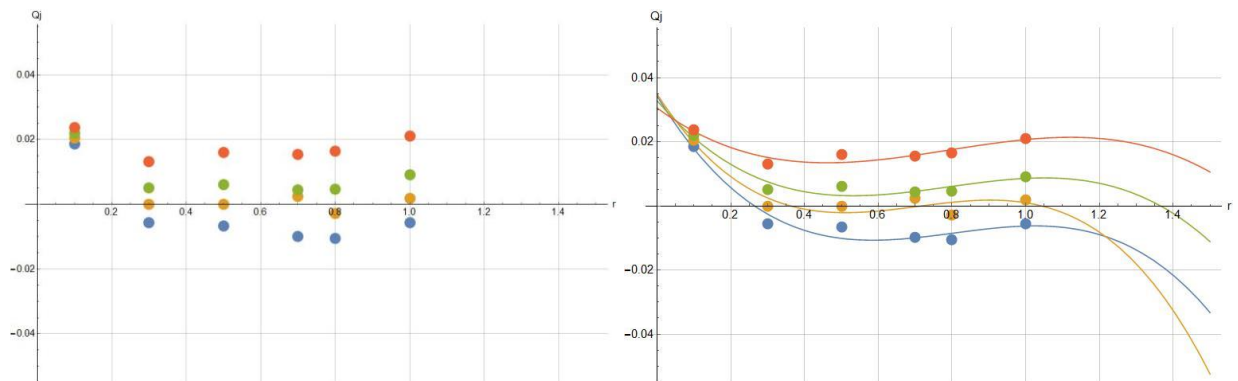


Рисунок 28. Значения среднего заряда струи в зависимости от выбранного радиуса (слева) и условная аппроксимация степенной функцией 3-ей степени $a1x^3 + a2x^2 + a3x + a4$ (справа)

Таблица 21(б). Распределения взвешенного заряда струй при различных R и k .

