

**Энергетическая зависимость дифференциальных сечений рождения струй на БАК**

И. П. Мордовец,\* Л. Н. Смирнова†

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
 физический факультет, кафедра общей ядерной физики  
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
 (Статья поступила 23.06.2017; Подписана в печать 20.07.2017)

В данной работе проведен анализ энергетической зависимости дифференциальных сечений рождения струй путем рассмотрения их отношения в протонных соударениях при энергиях  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ и  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ. Сечения измерены в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере (БАК). Выполнена аппроксимация степенными функциями дифференциальных сечений в зависимости от поперечного импульса при разных значениях быстроты струй и их отношений. Показано, что дифференциальные сечения рождения струй растут быстрее при увеличении поперечного импульса струи, и этот эффект проявляется сильнее при увеличении быстроты струи.

PACS: 13.87.Ce      УДК: 539.1.07

Ключевые слова: дифференциальное сечение, поперечный импульс, адронная струя, коллайдер.

**ВВЕДЕНИЕ**

В соударениях протонов на Большом адронном коллайдере (БАК) рождение струй — это основной процесс с образованием объектов с большим поперечным импульсом ( $p_T$ ). Дифференциальные сечения струй служат одним из основных наблюдаемых параметров в физике частиц высоких энергий, обеспечивая получение информации о строении протона. Они служат важным инструментом для понимания сильного взаимодействия и поиска физики за пределами Стандартной модели.

Инклюзивные дифференциальные сечения струй были измерены в протон–протонных ( $pp$ ) столкновениях при энергиях в системе центра масс  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ и  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ на данных, соответствующих интегральной светимости  $0.20 \text{ пб}^{-1}$  и  $37 \text{ пб}^{-1}$ , в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере [1, 2]. Результаты измерения дифференциальных сечений струй в зависимости от поперечного импульса для нескольких интервалов значений быстроты струи размещены в базе данных HEPDATA и были использованы для анализа в данной работе. В работе [2] было выполнено сравнение отношений дифференциальных сечений струй с предсказаниями квантовой хромодинамики при различных структурных функциях протона. В данной работе проведен анализ энергетической зависимости дифференциальных сечений струй в зависимости от поперечного импульса. Мотивацией для анализа послужили результаты измерения отношения дифференциальных сечений заряженных частиц в зависимости от поперечного импульса, измеренных в эксперименте ATLAS при энергиях соударения протонов  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ и  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ [3–5]. Было установлено, что дифференциальные сечения растут быстрее при увеличе-

нии поперечного импульса частиц. Этот результат соответствовал аналогичным измерениям в эксперименте ALICE на БАК, где сравнивались дифференциальные сечения заряженных частиц в  $pp$  взаимодействиях при энергиях  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ и  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ [6]. Измерения струй перекрывают большой диапазон значений поперечных импульсов, и параметры струй ближе к характеристикам кварков, участвующих в процессе жесткого рассеяния. Сравнение дифференциальных сечений рождения струй при разных энергиях  $pp$  соударений позволит проверить устойчивость наблюдаемого эффекта для большего диапазона поперечных импульсов и объекта другого типа.

Для анализа использованы струи, реконструированные с использованием алгоритма анти- $k_T$  и значением радиуса  $R = 0.4$ . Инклюзивные дважды дифференциальные сечения рождения представлены в виде функции от поперечного импульса струи  $p_T$  и быстроты  $y$ , охватывающих диапазоны значений  $20 \text{ ГэВ} \leq p_T < 430 \text{ ГэВ}$  для  $\sqrt{s} = 2.76$  ТэВ и  $20 \text{ ГэВ} \leq p_T < 1.5 \text{ ТэВ}$  для  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ и  $|y| < 4.4$  для обоих значений энергии  $\sqrt{s}$ .

**1. РОЖДЕНИЕ СТРУЙ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ**

Коллимированные струи адронов являются доминирующей особенностью физики высоких энергий. В квантовой хромодинамике (КХД) они могут быть интерпретированы как результат фрагментации кварков и глюонов, возникающих в процессе рассеяния. Инклюзивное сечение рождения струй дает информацию о сильной связи и структуре протона и проверяет справедливость пертурбативной КХД вплоть до кратчайших доступных расстояний. Одним из основных детекторов, используемых для изучения струй, является детектор ATLAS Большого адронного коллайдера [1]. В установке ATLAS трековые детекторы используются для определения координат событий при столкновении протонов путем измерения треков частиц и восстановления вершин по трекам, а кало-

\*E-mail: mordovetc.ip14@physics.msu.ru

†E-mail: lns@physics.msu.ru

Таблица I: Показатели степени функции  $(p_T)^n$

Интервал значений быстроты $y$	Значения показателя $n$ для $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ	Значения показателя $n$ для $\sqrt{s} = 7$ ТэВ	Значения показателя $n$ для отношения 7 к 2.76 ТэВ	Интервал по $p_T$ , ГэВ	$\chi^2$ /степень свободы для отношения 7 к 2.76 ТэВ
$ y  < 0.3$	$-6.2 \pm 0.5$	$-5.5 \pm 0.4$	$0.6 \pm 0.1$	$50 < (p_T) < 500$	1.8/9
$0.3 <  y  < 0.8$	$-6.2 \pm 0.5$	$-5.9 \pm 0.9$	$0.7 \pm 0.1$	$50 < (p_T) < 500$	3.3/9
$1.2 <  y  < 2.1$	$-8.5 \pm 2.0$	$-7.0 \pm 0.1$	$0.9 \pm 0.2$	$60 < (p_T) < 1000$	3.8/8
$2.1 <  y  < 2.8$	$-8.7 \pm 1.6$	$-7.6 \pm 0.2$	$1.8 \pm 0.5$	$60 < (p_T) < 1000$	2.8/6

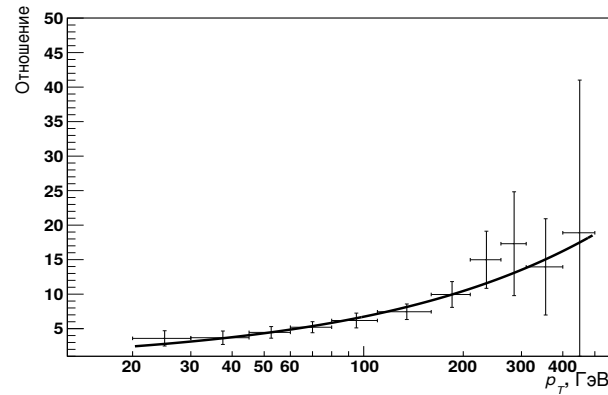
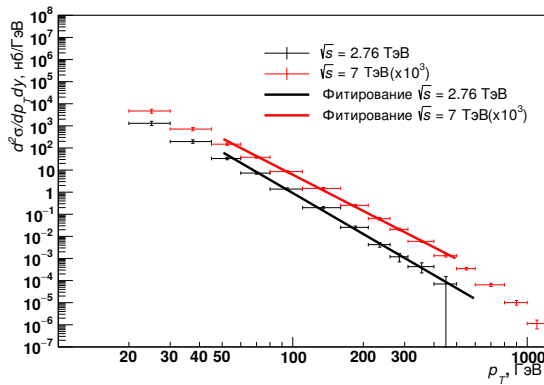


Рис. 1: Зависимость дважды дифференциального сечения (слева) и отношения сечений (справа) от поперечного импульса  $p_T$  в  $pp$ -соударениях при  $\sqrt{s} = 2.76$  и 7 ТэВ в области по быстрой  $|y| < 0.3$  по данным эксперимента ATLAS [1, 2]

риметры используются для измерения энергии и углов вылета струй. Внутренняя часть детектора, используемая для измерения и идентификации треков частиц, состоит из слоев кремниевых пиксельных детекторов, кремниевых микростриповых детекторов и трековых детекторов переходного излучения, окруженных магнитом соленоида, который обеспечивает равномерное поле 2 Тл. Для идентификации струй от электронов и фотонов используется электромагнитный калориметр. Процесс реконструкции струй происходит с помощью анти- $k_T$  алгоритма.

Анти- $k_T$  является алгоритмом кластерного типа. Процедура кластеризации для всех алгоритмов данного типа начинается одинаково: со списка входных объектов-стабильных частиц или ячеек калориметра. Для каждого объекта  $i$  и каждой пары  $(i, j)$  вычисляются расстояния

$$d_{i,j} = \min\{E_{T,i}^{2p}, E_{T,j}^{2p}\} R_{i,j}^2,$$

$$d_i = \min(E_{T,i})^{2p} R^2,$$

где обычно  $R^2 = 1$ , а  $R_{i,j}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$ . Для данного алгоритма параметр  $p = -1$ ,  $y$  — быстрая,  $\phi$  — азимутальный угол. Здесь  $R$  — параметр, характеризующий размер конуса струи.

Далее алгоритм ищет наименьшую величину из  $d_{i,j}$  и  $d_i$ :

1. Если расстояние типа  $d_{i,j}$  наименьшее, соответствующие объекты  $i$  и  $j$  удаляются из списка входных объектов. Они объединяются по рекомбинационной схеме

$$E_T = \sum_i E_{T,i},$$

$$y = \frac{\sum_i E_{T,i} y_i}{\sum_i E_{T,i}}, \quad \phi = \frac{\sum_i E_{T,i} y_i}{\sum_i E_{T,i}}$$

и записываются в список входных данных как один объект.

2. Если расстояние типа  $d_i$  наименьшее, тогда объект удаляется из списка входных объектов, струя считается завершенной и добавляется в список конечных струй.

Процедура повторяется, пока все объекты не будут включены в струи. Около 82% струй образуются легкими кварками (u, d, s) или глюонами. В составе остальных присутствуют один или два тяжелых b и c кварков [6].

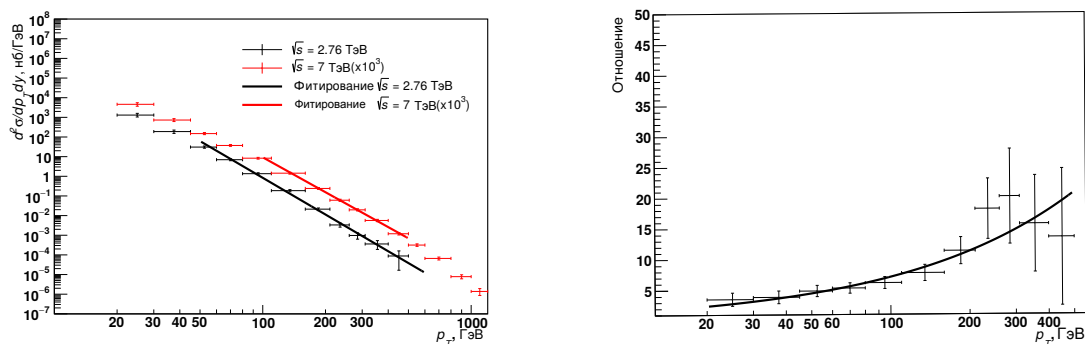


Рис. 2: Зависимость дважды дифференциального сечения (слева) и отношения сечений (справа) от поперечного импульса  $p_T$  в  $pp$ -соударениях при  $\sqrt{s} = 2.76$  и  $7$  ТэВ в области по быстроте  $0.3 < |y| < 0.8$  по данным эксперимента ATLAS [1, 2]

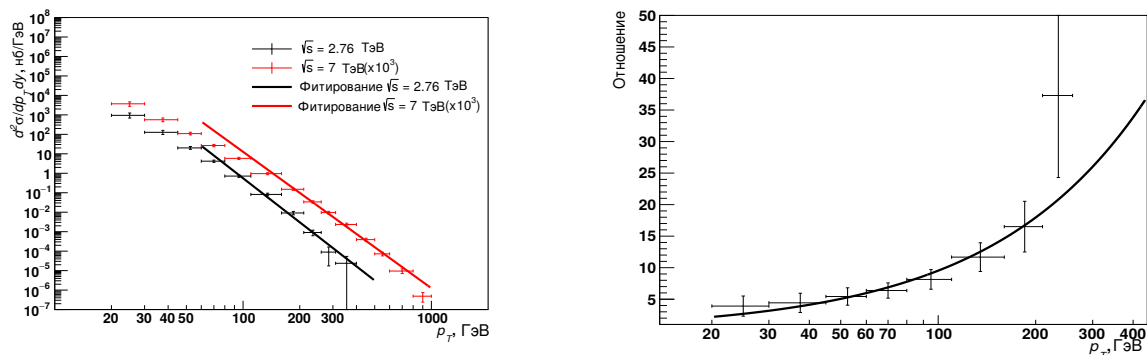


Рис. 3: Зависимость дважды дифференциального сечения (слева) и отношения сечений (справа) от поперечного импульса  $p_T$  в  $pp$ -соударениях при  $\sqrt{s} = 2.76$  и  $7$  ТэВ в области по быстроте  $1.2 < |y| < 2.1$  по данным эксперимента ATLAS [1, 2]

## 2. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ОТНОШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ РОЖДЕНИЯ СТРУЙ ОТ ПОПЕРЕЧНОГО ИМПУЛЬСА

Для прямого сравнения спектров адронных струй по  $p_T$  в  $pp$ -соударениях при 2.76 и 7 ТэВ [1, 2] были построены зависимости дважды дифференциального сечения от поперечного импульса на отдельном графике для каждого интервала значений быстроты. Были рассчитаны отношения этих спектров. Графики представлены на рис. 1–4. Из отношения распределений видно, что при переходе от 2.76 к 7 ТэВ не только увеличилось количество струй в событиях, но и их спектр стал более жестким. Можно также отметить, что при увеличении быстроты, т. е. удалении от центральной области к передней, происходит более резкий рост величины сечения. Для количественного описания этого эффекта была проведена аппроксимация распределений по  $p_T$  степенной функцией  $(p_T)^n$ . Полученные показатели степени  $n$  приведены в табл. 1. Поскольку отношение двух степенных функций также является степенной функцией с показателем, равным разнице исходных показателей, для более точ-

ной оценки разницы показателей степеней отношение распределений по  $p_T$  было также аппроксимировано степенной функцией. Результаты этой аппроксимации также приведены в табл. 1.

Из показателей степеней аппроксимирующей функции видно, что при увеличении энергии величина показателя отношения спектров возрастает, причем это увеличение существенно зависит от того, в каком интервале быстроты мы находимся ( в центральной или передней). Величина  $\chi^2/\text{степень свободы}$  получилась меньше 1. Это связано с тем, что при данном анализе учитывались только статистические погрешности, которые, в свою очередь, на порядок меньше систематических. Полученные аппроксимации энергетической зависимости сечений рождения струй могут быть использованы для сравнения с предсказаниями различных теоретических моделей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам данных эксперимента ATLAS видно, что спектры адронных струй по по-

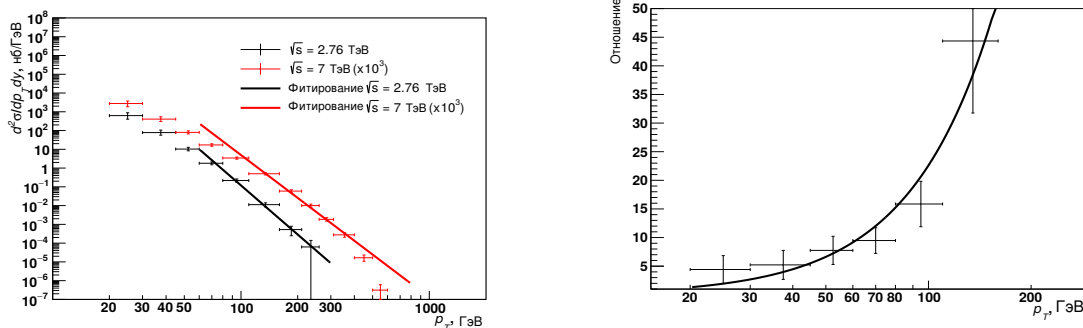


Рис. 4: Зависимость дважды дифференциального сечения (слева) и отношения сечений (справа) от поперечного импульса  $p_T$  в  $pp$ -соударениях при  $\sqrt{s} = 2.76$  и  $7$  ТэВ в области по быстроте  $2.1 < |y| < 2.8$  по данным эксперимента ATLAS [1, 2]

перечному импульсу становятся более жесткими при увеличении энергии соударений протонов от 2.76 до 7 ТэВ. Дана количественная оценка данного эффекта в виде показателя степенной зависимости аппрокси-

мирующей функции для отношения соответствующих распределений по  $p_T$ . Результат может быть использован для сравнения с расчетами в различных теоретических подходах.

[1] Aad G., Abbott B., Abdallah J., Abdelalim A.A., Abdesselam A., Abidin O., Abi B., Abolins M., Abramowicz H., Abreu H. et al., ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. D.* 2012. **86**. 014022.  
 [2] Aad G., Abajyan T., Abbott B., Abdallah J., Abdel Khalek S., Abdelalim A.A., Abidin O., Aben R., Abi B., Abolins M. et al., ATLAS Collaboration. *Eur. Phys. J. C.* 2013. **73**, P. 2509.  
 [3] Aad G., Abbott B., Abdallah J., Abidin O., Abeloos B., Aben R., Abolins M., Abouzeid O.S., Abraham N.L., Abramowicz H. et al., ATLAS Collaboration. *Eur. Phys. J. C.* 2016. **76**. P. 403.  
 [4] Aad G., Abbott B., Abdallah J., Abidin O., Abeloos B.,

Aben R., Abolins M., Abouzeid O.S., Abraham N.L., Abramowicz H. et al., ATLAS Collaboration. *Phys. Lett. B.* 2016. **758**, P. 67.  
 [5] Овчаров Ю. Ю., Маевский А. С. Труды XVII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». 2016. М. С. 118.  
 [6] Adam J., Adamova D., Aggarwal M. M., Aglieri Rinella G., Agnello M., Agrawal N., Ahammed Z., Ahn S. U., Aiola S., Akimov A. et al., ALICE Collaboration. *Phys. Lett. B.* 2016. **753**. P. 319.

## Energy dependence of differential jet cross sections in the ATLAS experiment at the LHC

I. P. Mordovets<sup>a</sup>, L. N. Smirnova<sup>b</sup>

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

E-mail: <sup>a</sup>mordovets.ip14@physics.msu.ru, <sup>b</sup>lns@physics.msu.ru

In this paper we analyze the energy dependence of the differential cross sections of jets by analyzing the ratio of the differential cross sections of hadronic jets in proton collisions at energies  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV and  $\sqrt{s} = 7$  TeV, measured in the ATLAS experiment at the Large Hadron Collider. The differential cross sections are approximated as a function of the transverse momentum for different values of the rapidity of the jet and their ratio by power functions. It is shown that the differential cross sections grow faster with an increase in the transverse momentum of the jet, and this effect is more pronounced when the rapidity of the jet is increased.

PACS: 13.87.Ce

Keywords: differential cross-section, transverse momentum, hadron jet, collider.

Received 23 June 2017.

### Сведения об авторах

1. Мордовец Иван Петрович — студент 3-го курса; e-mail: mordovets.ip14@physics.msu.ru.
2. Смирнова Лидия Николаевна — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: lns@physics.msu.ru.