

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДОЛЕЙ КВАРКОВЫХ, ГЛЮОННЫХ И НЕИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ СТРУЙ В ВЫБОРКЕ АДРОННЫХ СТРУЙ ДЛЯ LHC

*С. Г. Шульга*<sup>а, б, 1</sup>, *Д. В. Будковский*<sup>а, в, 2</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Белоруссия

<sup>в</sup> Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск

С применением генераторов MADGRAPH5 и PYTHIA8 выполнено моделирование измерения долей кварковых, глюонных и неидентифицированных струй в выборке струй для  $pp$ -столкновений при энергии  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ на LHC. Показано, что неопределенность измерения долей кварковых и глюонных струй не превышает 0,1%, а для неидентифицированных струй — не более 0,2% в области поперечных импульсов струи до 1 ТэВ. В этих оценках не учтены неопределенности реконструкции струй в детекторе и теоретические неопределенности.

Using MADGRAPH5 and PYTHIA8 generators, simulation of measurements of fractions of quark, gluon and unidentified jets was performed for  $pp$ -collisions with  $\sqrt{s} = 13$  TeV at the LHC. It is shown that in the region of jet transverse momenta up to 1 TeV, the measurement uncertainties of the quark and gluon jet fractions do not exceed 0.1%, and for unidentified jets — no more than 0.2%. These estimates do not take into account the uncertainties in the reconstruction of jets in the detector and the theoretical uncertainties.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

## ВВЕДЕНИЕ

Свойства адронных струй зависят от поперечного импульса ( $P_T^{\text{jet}}$ ) и аромата партона, который инициировал струю. Для определения аромата струи конус адронной струи геометрически сопоставляется с направлением импульса партона жесткого процесса, полученного с применением квантовой хромодинамики (КХД). В задаче об измерении долей кварковых ( $q$ ) и глюонных ( $g$ ) струй важно использовать модель, которая как можно более точно воспроизводит конфигурацию первичных партонов. Генератор жесткого партонного процесса MADGRAPH5 [1] позволяет моделировать события в порядке КХД «Next-to-Leading Order» (NLO). Генератор PYTHIA8 [2] получает первичную партонную конфигурацию жесткого процесса и выполняет развитие партонных ливней, адронизацию и распады. MADGRAPH5 в комбинации с универсальным генератором событий PYTHIA8 образуют популярную схему моделирования

---

<sup>1</sup>E-mail: shulga@jinr.ru

<sup>2</sup>E-mail: budkouski@jinr.ru

струйных событий на LHC. В настоящей работе струи собираются с использованием алгоритма anti- $k_T$  [3] с угловым параметром  $R = 0,4$ , имплементированного в пакет FASTJET [4]. Для измерения долей  $q/g$ -струй используется  $q/g$ -дискриминатор правдоподобия ( $D$ ) [5], который является вещественным числом в интервале  $[0,1]$  и характеризует вероятность идентификации  $q(g)$ -струи.

Долю  $g$ -струй в выборке можно определить путем фитирования измеренного нормированного  $D$ -распределения струй  $H(D)$  комбинацией модельных  $D$ -распределений  $q/g$ -струй [6] с долей  $g$ -струй  $\alpha_g$  в качестве неизвестного параметра фитирования:

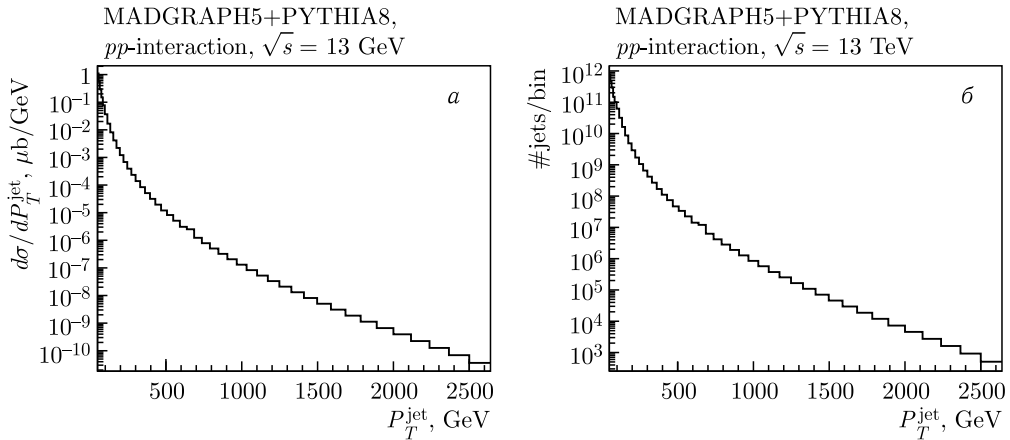
$$H(D) \sim \alpha_g H_g(D) + (1 - \alpha_g) H_q(D). \quad (1)$$

Фитирование выполняется посредством алгоритма MINUIT2 [7]. Минимизация выполняется методом наименьших квадратов (НК) и методом взвешенных наименьших квадратов (ВНК).

В любой выборке струй наряду с  $q/g$ -струями имеется подвыборка неидентифицированных струй ( $x$ -струи), которые порождаются струями вторичных партонов. Если присоединить  $x$ -струи к  $q$ -струям, то уравнение (1) позволяет определить долю  $g$ -струй. Аналогично, если присоединить  $x$ -струи к  $g$ -струям и заменить  $g$  на  $g + x$ , то уравнение (1) позволяет определить долю кварковых струй  $(1 - \alpha_{g+x}) \equiv \alpha_q$ . Чтобы измерить долю  $x$ -струй можно использовать формулу  $\alpha_x \equiv 1 - \alpha_q - \alpha_g$  [8].

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДОЛЕЙ КВАРКОВЫХ, ГЛЮОННЫХ И НЕИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ СТРУЙ

На рис. *a* показано сечение рождения инклюзивной струи в зависимости от  $P_T^{\text{jet}}$ . На рис. *б* показано число струй, соответствующее интегральной светимости  $100 \text{ фб}^{-1}$ . Для определенности здесь используется  $P_T^{\text{jet}}$ -биннинг, применяемый в работе [9].



Дифференциальное сечение рождения инклюзивной струи (*a*) и число струй в бинах по  $P_T^{\text{jet}}$  (*б*) в области быстрот  $|y^{\text{jet}}| \in [0, 2]$ , полученные с применением комбинации генераторов MADGRAPH5+PYTHIA8 для  $pp$ -взаимодействий на LHC с энергией  $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$  при интегральной светимости  $100 \text{ фб}^{-1}$

Интервал  $P_T^{\text{jet}} \in [49, 2500]$  ГэВ разбит на 46 неэквидистантных бинов. Фитирование (1) выполняется в каждом бине.

В табл. 1 показаны средние доли глюонных, кварковых и неидентифицированных струй для некоторых  $P_T^{\text{jet}}$ -бинов. Эти значения получены прямым подсчетом количества струй с заданным ароматом. Фитирование с применением уравнения (1) воспроизводит эти значения в пределах статистической неопределенности.

**Таблица 1. Доли  $q/g/x$ -струй, полученные с применением комбинации генераторов MADGRAPH5+PYTHIA8 для  $pp$ -взаимодействий на LHC с энергией  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ**

Неопределенность измерения	$P_T^{\text{jet}}$ -бин, ГэВ				
	[56, 64]	[196, 220]	[330, 362]	[507, 548]	[737, 790]
$\alpha_g$	0,5950	0,5578	0,5018	0,4205	0,4028
$\alpha_q$	0,3048	0,3786	0,4387	0,4813	0,5969
$\alpha_x$	0,1002	0,0636	0,0595	0,0982	0,0003

В табл. 2, 3, 4 показаны неопределенности измерения долей глюонных, кварковых и неидентифицированных струй соответственно, полученные с применением уравнения (1). Первые два столбца в таблицах — это статистические неопределенности (stat). Для фитирования используются гистограммы  $H(D)$ ,  $H^{g/q}(D)$  с числом  $D$ -бинов, равным 25. Значения в скобках получены для числа  $D$ -бинов 50.

**Таблица 2. Статистические и систематические неопределенности для измерения  $\alpha_g$  в зависимости от числа струй в выборке**

Число струй	stat ([56, 64] ГэВ)	stat ([196, 220] ГэВ)	syst <sub>1</sub> ([196, 220] ГэВ)	syst <sub>2</sub> ([196, 220] ГэВ)	tot <sub>g</sub> ([196, 220] ГэВ)
500	0,050(–)	0,040(–)	–	0,017	0,066(–)
1000	0,040(0,036)	0,025(0,028)	0,0060	0,0004	0,026(0,029)
10000	0,013(0,012)	0,007(0,007)	0,0006	0,0021	0,0073(0,0073)
100000	0,004(0,0037)	0,0020(0,0023)	0,0006	0,0011	0,0024(0,0026)
1000000	0,0010(0,0014)	0,0008(0,0010)	0,0003	0,00053	0,0010(0,0012)
10000000	0,0004(0,0006)	0,0002(0,0004)	0,00003	0,00002	0,0002(0,0004)

**Таблица 3. Статистические и систематические неопределенности для измерения  $\alpha_q$  в зависимости от числа струй в выборке**

Число струй	stat ([56, 64] ГэВ)	stat ([196, 220] ГэВ)	syst <sub>1</sub> ([196, 220] ГэВ)	syst <sub>2</sub> ([196, 220] ГэВ)	tot <sub>q</sub> ([196, 220] ГэВ)
500	0,046(–)	0,039(–)	–	0,018	–
1000	0,032(0,032)	0,023(0,028)	0,0060	0,0003	0,024(0,029)
10000	0,010(0,010)	0,008(0,007)	0,0005	0,0021	0,0083(0,0073)
100000	0,0035(0,0032)	0,0025(0,0023)	0,0007	0,0012	0,0029(0,0027)
1000000	0,0010(0,0013)	0,0009(0,0010)	0,0002	0,00053	0,0011(0,0011)
10000000	0,0003(0,0005)	0,0002(0,0004)	0,00002	0,00006	0,0002(0,0004)

Таблица 4. Статистические и систематические неопределенности для измерения  $\alpha_x$  в зависимости от числа струй в выборке

Число струй	stat ([56, 64] ГэВ)	stat ([196, 220] ГэВ)	syst <sub>1</sub> ([196, 220] ГэВ)	syst <sub>2</sub> ([196, 220] ГэВ)	tot <sub>x,1</sub> ([196, 220] ГэВ)	tot <sub>x,2</sub> ([196, 220] ГэВ)
500	0,71(-)	0,011(-)	—	0,090	—	—
1000	0,92(0,38)	0,046(0,025)	0,007	0,031	0,056(0,040)	0,035(0,041)
10000	0,66(0,17)	0,015(0,010)	0,038	0,070	0,081(0,080)	0,010(0,011)
100000	0,059(0,067)	0,0050(0,0031)	0,0042	0,010	0,012(0,011)	0,0038(0,0037)
1000000	0,035(0,025)	0,0017(0,0007)	0,0076	0,0010	0,0079(0,0077)	0,0015(0,0016)
10000000	0,012(0,014)	0,0005(0,0003)	0,0004	0,0008	0,0010(0,0009)	0,0003(0,0006)

Систематическая неопределенность, связанная с зависимостью от числа  $D$ -бинов,  $\text{syst}_1$ , вычисляется как абсолютная величина разности значений измеренной величины с числом  $D$ -бинов 50 и 25. Для  $\text{syst}_1$  измерения выполняются в 10-м  $P_T^{\text{jet}}$ -бине. Зависимость величины  $\text{syst}_1$  от  $P_T^{\text{jet}}$  незначительная.

Систематическая неопределенность, связанная с методом фитирования,  $\text{syst}_2$ , вычисляется как абсолютная величина разности значений измеренной величины для метода НК и метода ВНК [7]. Для расчета  $\text{stat}$  и  $\text{syst}_1$  применяется метод ВНК. Данные для  $\text{syst}_2$  получены для  $P_T^{\text{jet}}$ -бина (196, 220) ГэВ с числом  $D$ -бинов 25. Полная неопределенность определяется по формуле  $\text{tot}_{q,g,x} = \sqrt{\text{stat}^2 + \text{syst}_1^2 + \text{syst}_2^2}$ .

Согласно табл. 2 и 3 с ростом числа струй,  $N^{\text{jet}}$ , значение  $\text{stat}$  уменьшается по правилу для стандартной ошибки среднего  $1/\sqrt{N^{\text{jet}}}$ .

Значения  $\text{stat}$  для  $x$ -струй не пропорциональны  $1/\sqrt{N^{\text{jet}}}$  (см. табл. 4). Это означает, что  $D$ -распределения для  $x$ -струй определены плохо и вносят дополнительную неопределенность в измерения. Однако доля струй вторичных партонов может быть вычислена с применением измеренных долей  $q/g$ -струй по формуле  $\alpha_x = 1 - \alpha_g - \alpha_q$ . В этом случае неопределенность измерения  $\alpha_x$  определяется по формуле  $\text{tot}_{x,2} = \sqrt{\text{tot}_g^2 + \text{tot}_q^2}$ . Значения  $\text{tot}_{x,2}$  существенно меньше, чем  $\text{tot}_{x,1}$ , и подчиняются правилу для стандартной ошибки среднего:  $\text{tot}_{x,2} \sim 1/\sqrt{N^{\text{jet}}}$  (см. табл. 4).

Из табл. 2, 3, 4 следует, что статистическая неопределенность является определяющей для измерения долей струй с заданным ароматом.

Согласно рисунку, в последнем  $P_T^{\text{jet}}$ -бине (2366, 2500) ГэВ число струй не менее 1000. Таким образом, ЛНС предоставляет возможность измерить доли  $q/g/x$ -струй с точностью 2–3% вплоть до  $P_T^{\text{jet}} = 2,5$  ТэВ (без учета эффектов реконструкции струй и теоретических неопределенностей).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты моделирования измерения долей кварковых, глюонных и неидентифицированных струй для  $pp$ -столновений при энергии  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ на ЛНС с применением комбинации генераторов MADGRAPH5 и PYTHIA8. Показано, что в области до  $P_T^{\text{jet}} = 1$  ТэВ неопределенность измерения долей  $q/g$ -струй не превышает 0,1%, а для  $x$ -струй не более 0,2%. В анализе данных из реального эксперимента эти неопределенности увеличатся за счет неопределенностей реконструк-

ции струй в детекторе. Измерения фракций  $g$ -струй имеют неустранимую модельную зависимость используемых шаблонов  $H_{q/g}(D)$ . Кроме этого, дискриминатор строится («тренируется») на основе моделей, которые могут не соответствовать реальным данным. Это внесет дополнительные теоретические неопределенности в измерения. Методика учета модельных неопределенностей для измерения долей  $q/g/x$ -струй находится в стадии разработки и будет представлена в отдельной работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alwall J. et al.* The Automated Computation of Tree-Level and Next-to-Leading Order Differential Cross Sections, and Their Matching to Parton Shower Simulations // JHEP. 2014. V. 07. P. 079.
2. *Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P.* A Brief Introduction to PYTHIA 8.1 // Comput. Phys. Commun. 2008. V. 178, No. 11. P. 852–867.
3. *Cacciari M., Salam G.P., Soyez G.* The Anti- $k_T$  Jet Clustering Algorithm // JHEP. 2008. V. 04. P. 063.
4. *Cacciari M., Salam G.P., Soyez G.* FastJet User Manual // Eur. Phys. J. C. 2012. V. 72. P. 1896.
5. *CMS Collab.* Jet Algorithms Performance in 13 TeV Data: CMS Physics Analysis Summary. CMS-PAS-JME-16-003. 2017.
6. *Shulha S., Budkouski D.* Methodology for Measuring Gluon Jet Fraction and Characteristics of Quark and Gluon Jets in Hadron–Hadron Collisions // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18, No. 2. P. 239–243.
7. *James F., Roos M.* Minuit: A System for Function Minimization and Analysis of the Parameter Errors and Correlations // Comput. Phys. Commun. 1975. V. 10. P. 343.
8. *Shulha S., Budkouski D.* On Measuring the Fractions of Jets of Primary and Secondary Quarks and Gluons in Hadron–Hadron Collisions // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54, Iss. 7.
9. *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.).* Measurement and QCD Analysis of Double-Differential Inclusive Jet Cross Sections in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // JHEP. 2022. V. 02. P. 14.

Получено 14 ноября 2022 г.