

# ОБ ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК КВАРКОВЫХ И ГЛЮОННЫХ СТРУЙ В АДРОН-АДРОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

*С. Г. Шульга\**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна  
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,  
Гомель, Белоруссия

Для измерения характеристик кварковых и глюонных струй в адрон-адронных взаимодействиях используют две выборки струй. В условиях большой статистики струй на ЛHC метод двух выборок требует учета следующих поправок: 1) использования измеренных долей кварковых и глюонных струй вместо моделированных; 2) учета вклада неидентифицированных струй; 3) учета зависимости распределений кварковых и глюонных струй от условий отбора струй в выборке. Представлен усовершенствованный метод двух выборок, в котором учтены указанные поправки.

To measure the characteristics of quark and gluon jets in hadron–hadron collisions, two samples of jets are used. Given the large statistics of jets at the LHC, the two-sample method requires taking into account the following corrections: 1) use of measured fractions of quark and gluon jets instead of the model ones, 2) amendment for the contribution of jets with an unidentified flavour, 3) taking into account the dependence of the distributions of quark and gluon jets on the conditions for jet sample selections. The paper presents an improved two-sample method that takes into account these corrections.

PACS: 01.30.Cc; 13.87.–a; 13.85.–t; 14.70.Dj

## ВВЕДЕНИЕ

Свойства адронных струй несут в себе информацию о типе партон-прародителя, о процессе партонного ветвления и адронизации конечных мягких партонных. Различие свойств кварковых ( $q$ ) и глюонных ( $g$ ) струй возникает из различия цветовых зарядов партонных: струи, инициированные глюонами, имеют больший цветовой фактор КХД, что приводит к эволюции ливня с более высокой вероятностью ветвления [1, 2].

---

\* E-mail: shulga@jinr.ru

Так как свойства  $g$ - и  $q$ -струй различаются, то измерение характеристик струй\* в выборке безотносительно к типу струи имеет смысл только как первый шаг на пути нахождения характеристик  $q/g$ -струй.

Характеристики струй содержат разностороннюю информацию о процессе формирования партонной струи и о процессе адронизации. Адронизация партонной конфигурации — процесс, который описывается с помощью современных моделей на основе механистических схем, не имеющих глубоких теоретических оснований. Корректность модели и настройка ее параметров определяются из сопоставления моделированных характеристик струй с характеристиками, извлеченными из экспериментальных данных. Измерение множества разных характеристик струи позволяет определить, какая модель лучше описывает процесс адронизации, и/или настроить параметры модели. Корректная модель позволит также построить качественный дискриминатор  $q/g$ -струй. Кварк-глюонные дискриминаторы используются для отбора событий с заданной сигатурой. Дискриминатор  $q/g$ -струй представляет собой комбинированный параметр струи. Для его построения используются моделированные распределения  $q/g$ -струй по простым параметрам струи [5, 6].

Выборка струй состоит из подвыборок  $g$ -струй,  $q$ -струй и неидентифицированных струй ( $x$ -струй) с долями  $\alpha^g$ ,  $\alpha^q$  и  $\alpha^x = 1 - \alpha^g - \alpha^q$  соответственно. Простейшая характеристика  $q/g$ -струй — средняя множественность заряженных частиц в струе — измерялась в коллаборациях CDF [3] и ATLAS [4]. В этих работах использовались две выборки струй с существенно различными  $\alpha^g$ , которые определялись с применением генераторов Монте-Карло. Вклад  $x$ -струй не учитывался.

Измеренные значения  $\alpha^g$  могут отличаться от моделированных. Указание на это дает измерение  $q/g$ -шаблонов (распределений  $q/g$ -струй) для  $q/g$ -дискриминатора правдоподобия, проведенное в коллаборации CMS [5, 6]. Отношение измеренного  $q/g$ -шаблона к моделированному — это побиновый множитель SF (Scale Factor). В указанных работах для расчета SF использовалась методика работы [3]: метод двух выборок струй с моделированными  $\alpha^g$ . Показано, что SF для  $g$ -шаблонов на 25–100 % отклоняется от единицы в области небольших поперечных импульсов струй. Из работы [8] следует, что с использованием измеренных  $\alpha^g$  в расчете SF получается  $SF \approx 1$  в пределах ошибки измерения  $\alpha^g$ . Это значит, что причина большого отклонения SF от единицы состоит

---

\* Краткое название «характеристика струй» объединяет здесь понятия «нормированное распределение струй по параметру струи» или «простой момент этого распределения». Среди параметров струи выделяются такие, характеристики которых для струй  $q$  и  $g$  существенно различаются: множественность адронов в струе, радиус струи в угловом пространстве, параметр, характеризующий степень расщепленности энергии струи среди составляющих адронов, и др. [5, 6].

в том, что  $\alpha^g$  в данных существенно отличается от генераторных значений [7, 8].

Долю  $g$ -струй можно измерить [7]. Для этого в некоторой модели Монте-Карло создаются  $q/g$ -шаблоны. Измерение  $\alpha^g$  тем точнее, чем сильнее различие между используемыми  $q$ - и  $g$ -шаблонами. Для увеличения этого различия в измеренных  $\alpha^g$  эффективно использовать  $q/g$ -шаблоны, построенные на основе  $q/g$ -дискриминатора. В работе [8] предложен метод измерения  $\alpha^g$  с применением простых параметров струи.

В условиях большой статистики струй на LHC необходимо учесть примесь  $x$ -струй. Чтобы избежать увеличения числа параметров в процедуре фитирования, для измерения доли чистых  $g$ -струй можно присоединить  $x$ -струи к  $q$ -струям. Аналогично для измерения доли чистых  $q$ -струй рассматриваются генераторные шаблоны для  $q$ - и  $g + x$ -струй. Этот прием позволяет получить две искомые величины —  $\alpha^g$  и  $\alpha^q$  (а также  $\alpha^x = 1 - \alpha^q - \alpha^g$ ) посредством двух процедур однопараметрического фитирования [9].

Такой же прием можно применить для получения характеристик чистых  $q/g$ -струй без увеличения числа выборок струй и числа уравнений. Для нахождения характеристик  $q$ -струй необходимо использовать долю чистых  $q$ -струй, а долю  $g$ -струй принять равной  $\alpha^g + \alpha^x \equiv 1 - \alpha^q$ . Для нахождения характеристик чистых  $g$ -струй необходимо использовать долю чистых  $g$ -струй  $\alpha^g$ , а в качестве доли  $q$ -струй взять значение  $\alpha^q + \alpha^x \equiv 1 - \alpha^g$ . В каждом из двух расчетов используются две выборки реконструированных струй, которые разлагаются на две подвыборки, одна из которых содержит чистые  $q$ - или  $g$ -струи, а вторая подвыборка содержит  $q + x$ - или  $g + x$ -струи соответственно. Без ограничения общности далее рассматривается разложение выборки струй на две подвыборки —  $g$ -струи и  $q$ -струи, и предполагается, что  $x$ -струи присоединены либо к  $q$ -струям, либо к  $g$ -струям. Это позволяет использовать две выборки струй для измерения характеристик чистых  $q/g$ -струй, повторяя расчет дважды.

Метод двух выборок [3] можно применить для нахождения характеристик  $q/g$ -струй, если их выборки созданы в идентичных условиях: в идентичных кинематических областях струй и при идентичном количестве струй в событии. Требование кинематической идентичности выборок означает, что интервалы поперечных импульсов ( $p_T^{\text{jet}}$ ) и псевдобыстрот ( $\eta^{\text{jet}}$ ) струй в выборках одинаковые. Как правило, исследуется зависимость характеристики  $q/g$ -струй от  $p_T^{\text{jet}}$  и интервал по  $p_T^{\text{jet}}$  фиксируется. Ограничение интервала по  $\eta^{\text{jet}}$  приведет на практике к уменьшению статистики. Ограничение на количество струй в событии еще больше уменьшит число струй в исследуемом бине по  $p_T^{\text{jet}}$ . Это означает, что измерение станет невозможным во многих бинах по  $p_T^{\text{jet}}$ .

Чтобы снять ограничение по  $\eta^{\text{jet}}$  и по количеству струй на событие в выборках, в работе [7] предложено использовать моделирование для учета нефизических различий  $q/g$ -характеристик между выборками. Нефизические части характеристик выборки можно параметризовать для  $q$ - и  $g$ -струй и рассчитать их с применением генератора Монте-Карло. Для этого введено понятие мер неуниверсальности  $q/g$ -характеристик для конкретной пары выборок струй как разности  $q/g$ -характеристик струй между выборками.

Итак, в работе [7] найдены выражения для усредненных по двум выборкам характеристик  $q/g$ -струй с учетом не равных нулю мер неуниверсальности  $q/g$ -струй. В настоящей работе получены аналитические выражения для расчета характеристик  $q/g$ -струй в каждой выборке.

### ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КВАРКОВЫХ И ГЛЮОННЫХ СТРУЙ

Характеристика выборки  $X$  разлагается на  $q/g$ -характеристики  $X^{q/g}$  с долями  $q/g$ -струй,  $\alpha^g$  и  $\alpha^q = 1 - \alpha^g$ , в качестве весов

$$X = \alpha^g X^g + (1 - \alpha^g) X^q. \quad (1)$$

Уравнение (1) можно использовать для измерения  $\alpha^g$  [7]. Для этого необходимо построить  $q/g$ -шаблоны с применением генератора Монте-Карло и применить однопараметрическое фитирование измеренной характеристики  $X$  посредством линейной комбинации  $q/g$ -шаблонов, записанной в правой части уравнения (1). В то же время, если доли  $g$ -струй измерены, уравнение (1) можно применить для измерения  $q/g$ -шаблонов для различных макропараметров струи. Для этого необходимо записать два уравнения типа (1) для двух выборок:

$$\begin{aligned} X_1 &= \alpha_1^g X_1^g + (1 - \alpha_1^g) X_1^q, \\ X_2 &= \alpha_2^g X_2^g + (1 - \alpha_2^g) X_2^q. \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом неуниверсальности  $q/g$ -характеристик система уравнений для двух выборок содержит четыре неизвестные величины  $X_{1,2}^{q/g}$ :

$$\begin{aligned} X_1 &= \alpha_1^g X_1^g + (1 - \alpha_1^g) X_1^q, \\ X_2 &= \alpha_2^g X_2^g + (1 - \alpha_2^g) X_2^q. \end{aligned} \quad (3)$$

Разность  $\Delta X^f \equiv X_2^f - X_1^f$  — мера неуниверсальности  $f$ -струй [7] ( $f = q$  или  $g$ ). Две величины  $\Delta X^f$  можно рассчитать с применением генератора Монте-Карло и добавить их к уравнениям (3) в виде двух дополнительных соотношений. Вместе с мерой неуниверсальности вводится «универсальная» (усредненная) характеристика  $f$ -струй  $X^f$  [7]:

$$\Delta X^f \equiv X_2^f - X_1^f, \quad X^f \equiv \rho_1^f X_1^f + \rho_2^f X_2^f. \quad (4)$$

В уравнениях (4) использованы следующие обозначения:

$$X^f \equiv \frac{n_1^f(y) + n_2^f(y)}{N^f}, \quad N^f \equiv N_1^f + N_2^f, \quad N_{\text{ch}}^f \equiv \sum_y n_{\text{ch}}^f(y), \quad \text{ch} = 1, 2, \quad (5)$$

$$X_{\text{ch}}^f \equiv \frac{n_{\text{ch}}^f(y)}{N_{\text{ch}}^f}, \quad \rho_{\text{ch}}^f \equiv \frac{N_{\text{ch}}^f}{N^f}, \quad \rho_1^f + \rho_2^f = 1.$$

Здесь  $y$  — макропараметр струи,  $n_{\text{ch}}^f(y)$  —  $y$ -распределение  $N_{\text{ch}}^f$  струй с типом  $f$  для выборки с номером  $\text{ch}$ . Зависимость характеристик струй от  $y$  опускается:  $X^f \equiv X^f(y)$ ,  $X_{\text{ch}}^f \equiv X_{\text{ch}}^f(y)$ .

Отметим, что величины  $\rho_{\text{ch}}^f$ , введенные в определении универсальных (усредненных) характеристик (4), можно найти в случае моделированных выборок, но не определены в экспериментальных выборках струй. Мы увидим ниже, что эти величины являются промежуточными и исчезают в конечных выражениях для универсальных характеристик  $X^f$  и неуниверсальных характеристик  $X_{\text{ch}}^f$ .

Из уравнений (4) находим неуниверсальные характеристики для двух выборок:

$$\begin{aligned} X_1^f &= X^f - \rho_2^f \Delta X^f, \\ X_2^f &= X^f + \rho_1^f \Delta X^f. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3), получаем систему уравнений для универсальных характеристик  $q/g$ -струй  $X^{q/g}$  [7]:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_1 &= \alpha_1^q X^q + (1 - \alpha_1^q) X^g, \\ \tilde{X}_2 &= \alpha_2^g X^g + (1 - \alpha_2^g) X^q. \end{aligned} \quad (7)$$

В левых частях уравнений (7) находятся измеренные характеристики с поправками на неуниверсальность, имеющими вид [7]

$$\begin{aligned} \tilde{X}_1 &\equiv X_1 + \gamma^{\text{DAT}} \Delta X^{\text{JFNU}}, \\ \tilde{X}_2 &\equiv X_2 - \Delta X^{\text{JFNU}}. \end{aligned} \quad (8)$$

В (8) использованы следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \Delta X^{\text{JFNU}} &\equiv \beta^q \Delta X^q + \beta^g \Delta X^g, \quad \beta^f \equiv \frac{\alpha_1^f \alpha_2^f}{\alpha_1^f + \gamma^{\text{DAT}} \alpha_2^f}, \\ \gamma^{\text{DAT}} &\equiv \frac{N_2}{N_1}, \quad f = q, g, \quad \alpha_{\text{ch}}^q = 1 - \alpha_{\text{ch}}^g, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $N_{\text{ch}} \equiv N_{\text{ch}}^q + N_{\text{ch}}^g$  — число струй в выборке с номером  $\text{ch}$ .

Решая систему уравнений (7), находим универсальные характеристики  $X^{q,g}$ , выраженные через величины  $\tilde{X}_{1,2}$  и  $\alpha_{1,2}^{q,g}$  (см. (13) в [7]). Подставляя найденные таким образом  $X^{q,g}$  в (6), получаем выражения для

неуниверсальных  $q/g$ -характеристик, содержащих измеренные величины  $X_{1,2}$  и две модельные меры неуниверсальности  $\Delta X^{q/g}$ :

$$X_1^q = \frac{\alpha_2^g X_1 - \alpha_1^g X_2}{\alpha_2^g - \alpha_1^g} + (\Delta X^g \alpha_2^g + \Delta X^q \alpha_2^g) \frac{\alpha_1^g}{\alpha_2^g - \alpha_1^g}, \quad (10)$$

$$\alpha_{ch}^q \equiv 1 - \alpha_{ch}^g.$$

Остальные три величины ( $X_2^q$ ,  $X_1^g$  и  $X_2^g$ ) можно записать, делая в (10) формальные замены:  $\{q \leftrightarrow g\}$  и  $\{1 \leftrightarrow 2\}$ . Эти выражения не содержат введенные в промежуточных выкладках доли  $f$ -струй из выборки  $ch$  в объединенной выборке  $\rho_{ch}^f$  (5) и отношение числа струй в выборках  $\gamma^{DAT}$ , определенное в (9).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя две выборки струй, можно вычислить характеристики  $q/g$ -струй (распределения  $q/g$ -струй и простые моменты этих распределений), предполагая, что доли  $g$ -струй в выборках известны. В работе представлен усовершенствованный метод двух выборок, в котором используются доли  $q/g$ -струй, предварительно измеренные, учтены зависимость характеристик  $q/g$ -струй от выборки и вклад неидентифицированных струй ( $x$ -струи), доля которых также может быть измерена. Характеристики  $q/g$ -струй для каждой из двух выборок выражены через измеренные характеристики в двух выборках струй, измеренные доли  $g$ -струй в выборках и меры неуниверсальности  $q/g$ -струй — разности характеристик  $q/g$ -струй между выборками, которые могут быть определены с применением моделирования. Для учета вклада  $x$ -струй расчетный метод необходимо применить дважды для одной пары выборок: для расчета характеристики чистых  $q$ -струй используется доля чистых  $q$ -струй и доля  $g + x$ -струй, а для расчета характеристик чистых  $g$ -струй используется доля чистых  $g$ -струй и доля  $q + x$ -струй. Полученные формулы позволяют значительно расширить кинематические области и каналы для отбора струй в задаче об измерении характеристик  $q/g$ -струй.

Исследование выполнено в рамках тематического плана Объединенного института ядерных исследований (Дубна) «CMS. Компактный мюонный соленоид на LHC» 02-0-1083-2009/2023.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Workman R. L. et al.* Review of Particle Physics // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022. V. 2022. 083C01.
2. *Larkoski A., Metodiev E.* A Theory of Quark vs. Gluon Discrimination // JHEP. 2019. V. 2019. P. 14.

3. *Aad G. et al. (CDF Collab.)*. Measurement of Charged-Particle Multiplicities in Gluon and Quark Jets in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94. P. 171802.
4. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Charged-Particle Multiplicity inside Jets from  $\sqrt{s} = 8$  TeV  $pp$  Collisions with the ATLAS Detector // *Eur. Phys. J. C.* 2016. V. 76. P. 322.
5. *CMS Collab.* Performance of Quark/Gluon Discrimination in 8 TeV  $pp$  Data. CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-JME-13-002. 2013.
6. *CMS Collab.* Jet Algorithms Performance in 13 TeV Data. CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-JME-16-003. 2017.
7. *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.
8. *Shulha S.* Model Uncertainty in Measuring the Gluon Fraction at the Hadron Collider // *Phys. At. Nucl.* 2024 (in press).
9. *Шульга С. Г., Будковский Д. В.* Об измерении долей кварковых и глюонных струй в адрон-адронных столкновениях // *ЭЧАЯ.* 2024. Т. 55, № 1. С. 272.