

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

*С. Г. Шульга*<sup>1,2,\*</sup>, *Д. В. Будковский*<sup>1,3,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup>Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

<sup>3</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,  
Минск

Предложен способ измерения долей кварковых и глюонных струй, происходящих от партонов жесткого процесса с определенным ароматом. Сумма этих долей отличается от 1 на долю струй, относящихся к партонам, рожденным в процессе партонного ливня.

We propose a method for measuring the fractions of quark and gluon jets originating directly from the hard process partons with a given flavour. The sum of these fractions differs from 1 by the fraction of jets belonging to partons produced in the process of a parton shower.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

## ВВЕДЕНИЕ

Глюонные ( $g$ ) и кварковые ( $q$ ) струи\*\*\* имеют существенно различные характеристики. Например,  $g$ -струя имеет примерно в 1,5 раза большее число частиц, чем  $q$ -струя. Импульс  $g$ -струи более равномерно распределен между составляющими частицами, в то время как в  $q$ -струе большая часть импульса сосредоточена в одной или нескольких частицах. Измерение доли  $q/g$ -струй в выборке [1] предполагает распознавание  $q/g$ -струй, форма которых детально определена в некоторой генераторной модели.

Согласно современным представлениям источником струи является энергетический партон. Наиболее энергетические партоны — это первичные партоны, которые рождаются в жестком процессе взаимодействия пары исходных партонов. Первичные партоны теряют энергию в результате развития партонных ливней. При достижении энергии несколько

---

\* E-mail: [siarhei.shulha@cern.ch](mailto:siarhei.shulha@cern.ch)

\*\* E-mail: [dzmitry.budkouski@cern.ch](mailto:dzmitry.budkouski@cern.ch)

\*\*\* Под словом «струя» будем подразумевать адронную струю, в то время как струю на партонном уровне будем называть «партонная струя».

сотен мегаэлектронвольт партоны адронизируются, образуя наблюдаемые струи. Партонные ливни имеют неоднородную структуру. Часть вторичных партонов из партонных ливней могут образовывать отдельно наблюдаемые струи.

В генераторе событий аромат струи определяет партон с максимальной энергией, который входит в угловую область струи\*. Пусть струя получает аромат от первичного партона, рожденного в жестком процессе. Такую струю назовем PPj (Primary Parton jet). Предположим, что струя не сшивается ни с одним первичным партоном. Тогда этой струе можно попытаться поставить в соответствие вторичный партон — партон из партонных ливней с максимальной энергией. Такую струю назовем SPj (Secondary Parton jet). Струи PPj содержат в себе информацию о жестком процессе партонного взаимодействия, а струи SPj несут информацию о партонном ливне. Струи, не входящие в группы PPj и SPj, являются неидентифицированными и представляют собой ложные струи, возникшие как случайный результат наложения треков и работы алгоритма сбора струи. Расчет с применением генератора событий PYTHIA [2] для протон-протонных столкновений при энергии ЛHC дает долю неидентифицированных струй менее 3% в области поперечных импульсов струй  $p_T^{\text{jet}}$  до 100 ГэВ, и с ростом  $p_T^{\text{jet}}$  эта доля быстро уменьшается до пренебрежимо малых значений.

Способ идентификации аромата струи, объединяющий струи групп PPj и SPj, иногда называют AJF (Algorithmic Jet Flavour identification). Его дополняют проверкой наличия в струе адронов, содержащих  $c$ - и  $b$ -кварки. Это позволяет присвоить струе аромат тяжелого кварка ( $c/b$ -струи). С таким дополнением способ AJF применяется, например, в задаче по идентификации  $c/b$ -струй.

С точки зрения внутренней структуры и физики струй более интересны струи типа PPj (без примеси SPj). Характеристики  $q$ -струй и  $g$ -струй из группы PPj существенно различны, в то время как струи SPj с большей вероятностью могут иметь характеристики, которые не соответствуют назначенному аромату. Способ идентификации аромата струи, в котором идентифицированными струями являются только струи из группы PPj, называют PJF (Physics Jet Flavour identification). Так как первичные партоны обычно более энергетичны, чем партоны партонного ливня, то PJF  $q/g$ -струи являются подмножеством AJF  $q/g$ -струй.

Данная работа посвящена варианту идентификации струй PJF, который определяет аромат струи как аромат первичного партона (PPj). Для

---

\* Для сшивания струи и партона применяют так называемый ghost-метод. Для этого партоны заменяют объектами (ghost) с пренебрежимо малыми компонентами импульса, сохраняя направление исходного импульса. К полученной объединенной конфигурации частиц и ghost-объектов в событии повторно применяют алгоритм сборки струй. Если в область струи попадает несколько партонов, то аромат струи определяет партон с максимальной энергией.

этих струй будем использовать обозначение « $q/g$ -струи». Струи, которые не получают аромат  $PP_j$ , будем обозначать как « $x$ -струи», включающие струи  $SP_j$  (основная часть) и небольшую долю ложных струй (струй, для которых не найден соответствующий партон ни в группе  $PP_j$ , ни в группе  $SP_j$ ).

### ИЗМЕРЕНИЕ ДОЛИ $X$ -СТРУЙ

Для алгоритма PJF выборка струй состоит из трех фракций:  $q$ -струи,  $g$ -струи и  $x$ -струи. Для измерения фракций в данных используются генераторные  $q/g/x$ -шаблоны  $H^{q/g/x}(D)$  — нормированные распределения  $q/g/x$ -струй по дискриминатору  $D$  [1]. Доли  $q/g/x$ -струй в выборке можно определить путем фитирования измеренного нормированного  $D$ -распределения струй  $H(D)$  функцией

$$H(D) \sim \alpha_0^q H^q(D) + \alpha_0^g H^g(D) + \alpha^x H^x(D), \quad (1)$$

где  $\alpha_0^q + \alpha_0^g + \alpha^x = 1$ . Символ  $\sim$  означает фитирование измеренного распределения выборки реконструированных струй  $H(D)$  посредством функции в правой части уравнения (1) с двумя неизвестными параметрами, имеющими смысл долей  $q/g$ -струй —  $\alpha_0^{q/g}$ . Доли  $q/g$ -струй имеют индекс 0, обозначающий принадлежность струй к группе  $PP_j$ . Мы вводим индекс 0 для того, чтобы отличать фракции  $\alpha_0^{q/g}$  от  $\alpha^{q/g}$ . По определению фракции  $\alpha^{q/g}$  далее определяют параметр фитирования в уравнении

$$H(D) \sim \alpha^g H^g(D) + \alpha^q H^q(D), \quad (2)$$

где  $\alpha^q + \alpha^g = 1$ . Разность между  $\alpha^{q/g}$  и  $\alpha_0^{q/g}$  равна величинам  $\alpha_x^{q/g}$ , которые определяют параметр однопараметрического фитирования гистограммы  $H^x(D)$  комбинацией шаблонов  $H^{q/g}(D)$ :

$$H^x(D) \sim \alpha_x^g H^g(D) + \alpha_x^q H^q(D). \quad (3)$$

Здесь  $\alpha_x^q + \alpha_x^g = 1$ ,  $\alpha_x^f$  — доля  $f$ -струй ( $f = q, g$ ) в подвыборке  $x$ -струй. Если предположить, что формы (параметры) струй с определенным ароматом в группах  $PP_j$  и  $SP_j$  не различаются, то  $\alpha^f$  — это полная фракция  $f$ -струй в выборке струй, в то время как  $\alpha_0^f$  — доля  $f$ -струй типа  $PP_j$  в той же выборке.

Для определения величин  $\alpha_0^{q/g}$  в данных необходимо использовать уравнение (1). Однако двухпараметрическое фитирование (1) на практике не дает устойчивого результата ввиду плохой определенности  $D$ -распределения  $x$ -струй —  $H^x(D)$ .

Нормированное распределение генераторных струй по дискриминатору разлагается на три части\*:

$$H^{\text{MC}}(D) = \alpha_0^g H^g(D) + \alpha_0^q H^q(D) + \alpha^x H^x(D), \quad (4)$$

где  $\alpha_0^g + \alpha_0^q + \alpha^x = 1$ , так же как и в уравнении для данных (1). Отметим, что во всех уравнениях этого раздела сохраняется симметрия уравнений относительно замены  $q \leftrightarrow g$ .

Знак фитирования  $\sim$  в (3) можно заменить на приближенное равенство, выполняющееся в пределах ошибки фитирования. Подставив полученное приближенное равенство в (4), получаем

$$H^{\text{MC}}(D) \approx \alpha^g H^g(D) + \alpha^q H^q(D), \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha^g &\equiv \alpha_0^g + \alpha^x \alpha_x^g, \\ \alpha^q &\equiv \alpha_0^q + \alpha^x \alpha_x^q, \\ \alpha^g + \alpha^q &\equiv 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (4) удобно переписать в виде с двумя шаблонами —  $H^g(D)$  и  $H^{qx}(D)$ , где индекс  $qx$  обозначает тот факт, что гистограмма включает в себя  $x$ -струи и  $q$ -струи:

$$H^{\text{MC}}(D) = \alpha_0^g H^g(D) + \alpha^{qx} H^{qx}(D), \quad (7)$$

где  $\alpha_0^g + \alpha^{qx} = 1$ ,  $\alpha^{qx} = \alpha_0^g + \alpha^x$ .

Аналогично, объединяя  $g$ -струи и  $x$ -струи, переписываем уравнение (4) в виде с двумя шаблонами —  $H^{gx}(D)$  и  $H^q(D)$ :

$$H^{\text{MC}}(D) = \alpha^{gx} H^{gx}(D) + \alpha_0^q H^q(D), \quad (8)$$

где  $\alpha_0^q + \alpha^{gx} = 1$ ,  $\alpha^{gx} = \alpha_0^q + \alpha^x$ .

Уравнения (5) и (7), (8) можно рассматривать как определения двух типов  $q/g$ -фракций, которые соответствуют двум  $q/g$ -шаблонам:  $H^f(D)$  и  $H^{fx}(D)$ ,  $f = q/g$ . При этом мы пренебрегаем здесь незначительным различием  $f$ -шаблонов, построенных на идентифицированных  $f$ -струях и на  $f$ -струях, которые по форме распознаются в  $x$ -струях.

Глюонные фракции  $\alpha_0^g$  в данных можно измерить, применяя однопараметрическое фитирование:

$$H^{\text{DAT}}(D) \sim \alpha_{\text{DAT}}^g H^g(D) + (1 - \alpha_{\text{DAT}}^g) H^{qx}(D). \quad (9)$$

\* В отличие от [1] в данной работе индекс МС (Monte Carlo) не указан для генераторных  $f$ -шаблонов,  $f = q, g, x$ . Для долей  $f = g/q/x$ -струй в генераторной выборке струй также индекс МС опускаем:  $\alpha_0^g, \alpha_0^q, \alpha^x$ . Из контекста всегда ясно, где речь идет о данных, а где о генераторном моделировании.

Аналогично кварковые фракции  $\alpha_0^q$  в данных можно измерить, применяя второе однопараметрическое фитирование:

$$H^{\text{DAT}}(D) \sim \alpha_{0\text{DAT}}^q H^q(D) + (1 - \alpha_{0\text{DAT}}^q) H^{gx}(D). \quad (10)$$

Теперь можно вычислить долю  $x$ -струй, которая в сумме с  $\alpha_{0\text{DAT}}^q$  и  $\alpha_{0\text{DAT}}^g$  дает 1:

$$\alpha_{\text{DAT}}^x = 1 - \alpha_{0\text{DAT}}^q - \alpha_{0\text{DAT}}^g. \quad (11)$$

Таким образом, для определения долей  $q/g$ -струй типа PPj ( $\alpha_{0\text{DAT}}^{q/g}$ ) вместо уравнения фитирования с двумя параметрами (1) можно использовать два уравнения однопараметрического фитирования — (9) и (10).

Полные  $g$ -фракции в данных (без индекса 0) можно измерить, применяя шаблоны  $H^{q/g}(D)$  согласно (5):

$$H^{\text{DAT}}(D) \sim \alpha_{\text{DAT}}^g H^g(D) + (1 - \alpha_{\text{DAT}}^g) H^q(D). \quad (12)$$

Теперь можно вычислить  $\alpha_{x\text{DAT}}^g$ , применяя для данных уравнения, аналогичные генераторным уравнениям (6):

$$\alpha_{x\text{DAT}}^g = \frac{\alpha_{\text{DAT}}^g - \alpha_{0\text{DAT}}^g}{\alpha_{\text{DAT}}^x}. \quad (13)$$

Величину  $\alpha_{x\text{DAT}}^q$  можно найти по определению  $\alpha_{x\text{DAT}}^q = 1 - \alpha_{x\text{DAT}}^g$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен способ измерения долей кварковых и глюонных струй, происходящих от первичных партонов жесткого процесса с определенным ароматом. Сумма этих долей отличается от 1 на долю струй, относящихся к вторичным партонам, рожденным в процессе партонного ливня. Показано, что струи вторичных партонов также можно разделить на кварковую и глюонную составляющие и измерить их доли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
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.