

Измерение долей кварковых и глюонных струй на CMS и определение степени отклонения модели адронизации от истинной картины при энергиях LHC

Будковский Д.В.^{1,2}, Шульга С.Г.^{1,3}

¹ОИЯИ(Дубна)

²НИИ ЯП БГУ (Минск, Беларусь)

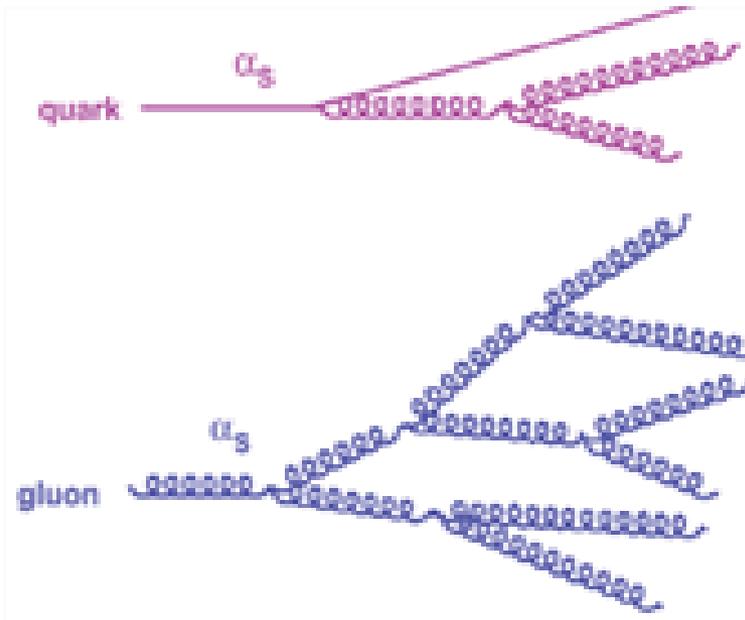
³ГГУ им. Ф.Скорины (Гомель, Беларусь)

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»,
посвященную 70-летию со дня рождения академика РАН В.А.Рубакова

21 февраля 2025 г. Москва

Введение

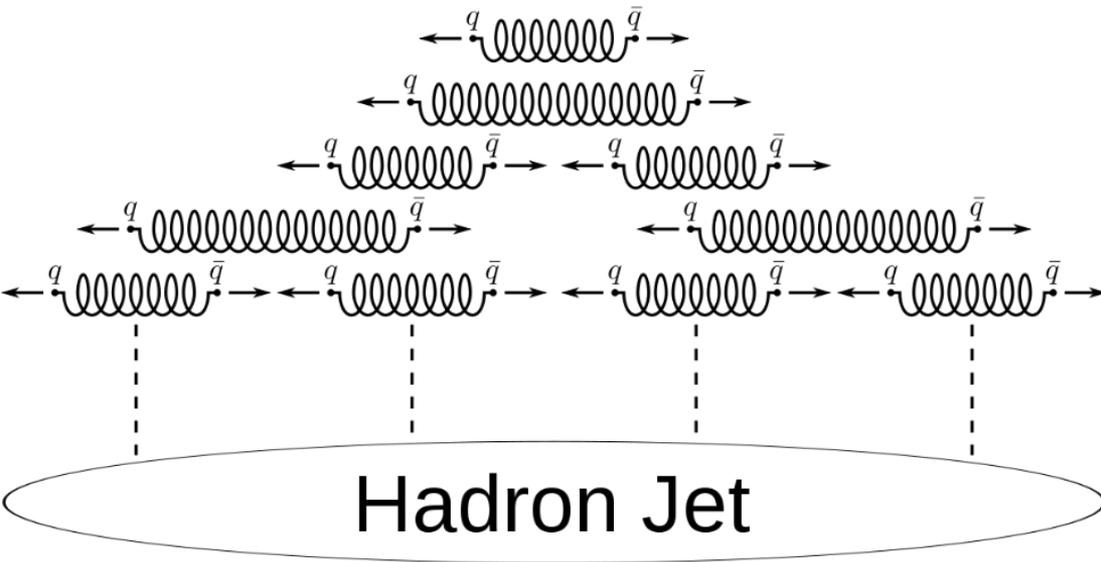
- Струи являются результатом адронизации первичных партонов
- Если струя ассоциируется с кварком/глюоном, то она является кварковой/глюонной



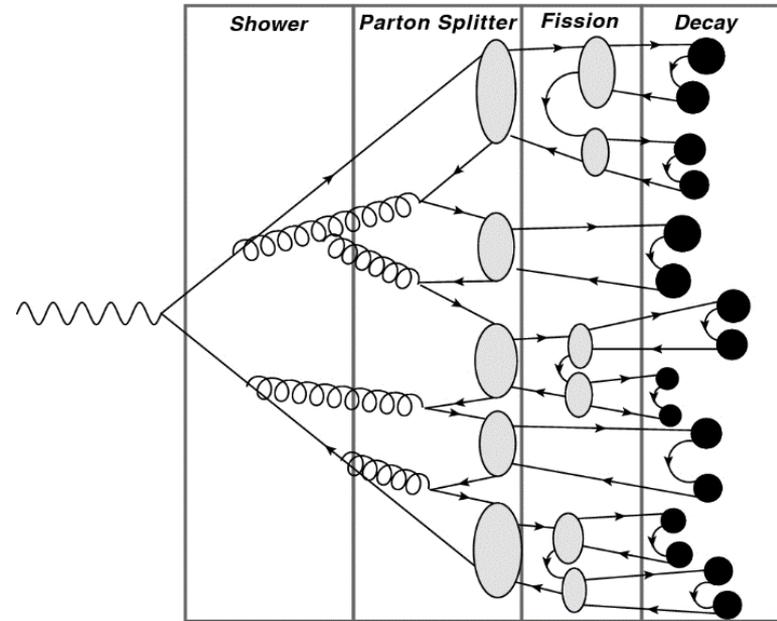
Кварковая струя

Глюонная струя

Модели адронизации



Струнная модель



Кластерная модель

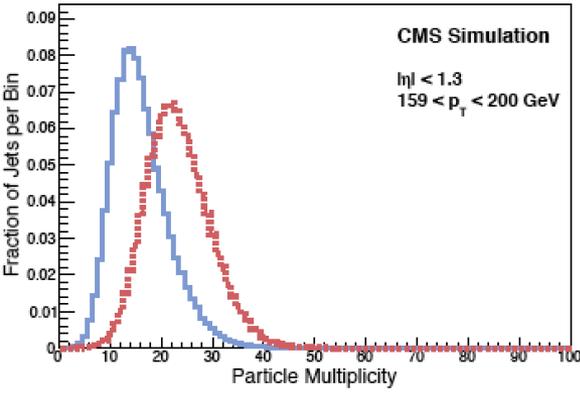
- Для описания процесса адронизации используются следующие модели
 - Струнная модель – генератор Pythia
 - Кластерная модель – генератор Herwig

Распознавание q/g - струй

- Для распознавания q/g -струй используются **свойства** (V) струй, по которым q/g -струи отличаются максимальным образом
- Свойства струй наиболее чувствительные к аромату: ¹
 - Множественность частиц в струе (***mult***)
 - Малая ось эллипса струи в (η, φ) -пространстве (**\mathbf{a}_2**)
 - “Функция фрагментации” $\mathbf{p}_T \mathbf{D} = \frac{\sqrt{\sum_i p_{T i}^2}}{\sum_i p_{T i}} \in [0, 1]$

$V_1 = \mathbf{mult}$

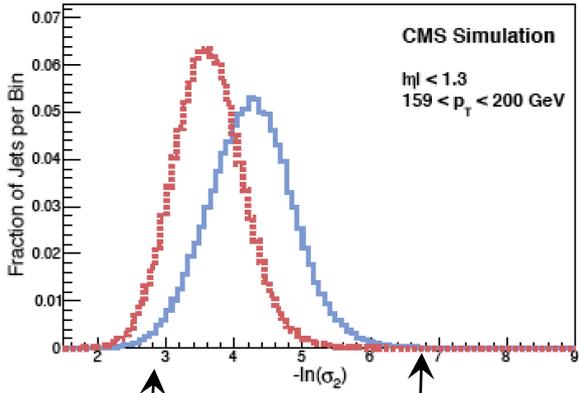
— quark gluon



¹ CMS PAS JME-13-002
 CMS PAS JME-16-003

$V_2 = -\log(\mathbf{a}_2)$

— quark gluon

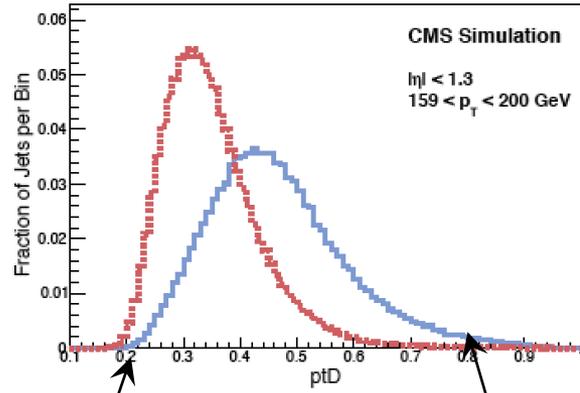


Широкие струи

Узкие струи

$V_3 = \mathbf{p}_T \mathbf{D}$

— quark gluon



p_T^{jet} однородно распределен

p_T^{jet} более сконцентрирован

Кварк-глюонный дискриминатор (QG Likelihood)

CMS PAS JME-16-003

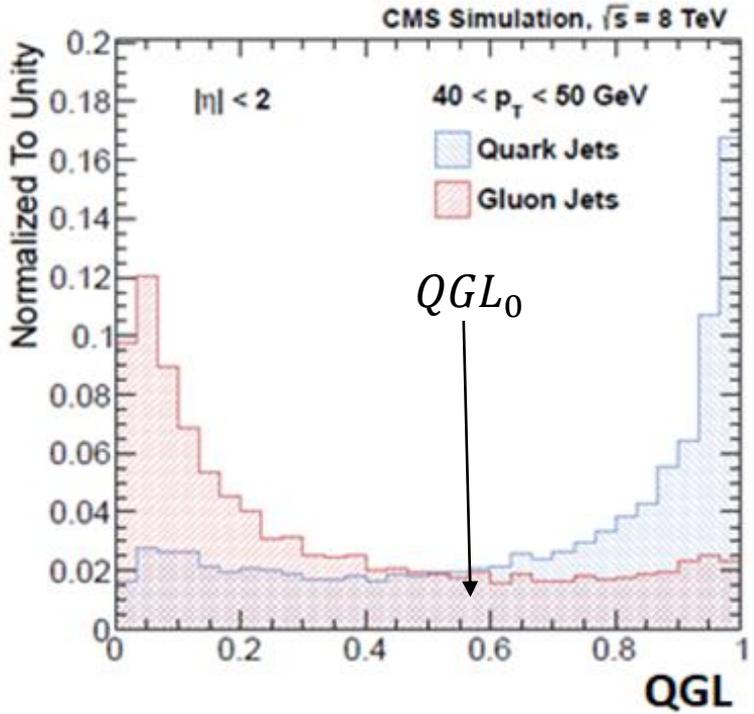
- $QGL(\vec{V}) = \frac{Q(\vec{V})}{Q(\vec{V})+G(\vec{V})}$ - значение дискриминатора

$$Q(\vec{V}) = \prod_{i=1}^3 H_Q^{(i)}(V_i), \quad G(\vec{V}) = \prod_{i=1}^3 H_G^{(i)}(V_i)$$

- $H_{Q/G}^{(i)}(V_i)$ – нормированные распределения q/g-струй по параметру V_i , где $(V_1 = \mathbf{mult}, V_2 = \mathbf{a}_2, V_3 = \mathbf{p}_T \mathbf{D}) \equiv \vec{V}$

- Задавая раб.точку QGL_0 можно определить долю истинных/ложных q/g-струй

- QGL - «объединенный» параметр струи
 $V_4 \equiv QGL$



Измерение доли q/g струй

- В простейшем случае все струи можно разделить на струи от легких кварков и от глюонов
- Измеренная гистограмма $h(\mathbf{V}_i)$ является суммой кварковой и глюонной гистограмм

$$h(\mathbf{V}_i) = h^g(\mathbf{V}_i) + h^q(\mathbf{V}_i) \quad (1)$$

- Если разделить это выражение на число входов N гистограммы $h(\mathbf{V}_i)$ и учесть, что $\alpha^g = \frac{N^g}{N}$, где N^g - число входов гистограммы $h^g(\mathbf{V}_i)$, то получим для нормированных гистограмм

$$H(\mathbf{V}_i) = \alpha^g H^g(\mathbf{V}_i) + (1 - \alpha^g) H^q(\mathbf{V}_i) \quad (2)$$

- Это уравнение содержит 3 неизвестные величины (α^g , $H^q(\mathbf{V}_i)$ и $H^g(\mathbf{V}_i)$) и одну измеренную величину $H(\mathbf{V}_i)$
- По этой причине необходимо использовать информацию из МК модели для измерения либо q/g -гистограмм ($H^q(\mathbf{V}_i)$ и $H^g(\mathbf{V}_i)$), либо доли глюонных α^g в данных

Измерение доли q/g струй

- Для нахождения доли g -струй в данных берутся распределения q/g струй по параметрам из МК модели $H_{mc}^{q/g}(\mathbf{V}_i)$ - q/g -шаблоны
- Подставляя это в уравнение (2) для данных и выражая α^g получим

$$\alpha_j^g(\mathbf{V}_i) = \frac{H_{dat,j}(\mathbf{V}_i) - H_{mc,j}^q(\mathbf{V}_i)}{H_{mc,j}^g(\mathbf{V}_i) - H_{mc,j}^q(\mathbf{V}_i)} \quad (3)$$

- $\alpha_j^g(V)$ определяется в каждом j -ом бине распределения по свойству \mathbf{V}_i
- Усредняя по всем бинам и по свойствам \mathbf{V}_i получим:

$$\alpha^g(\mathbf{V}_i) = \left\langle \alpha_j^g(\mathbf{V}_i) \right\rangle_j, \alpha^g = \langle \alpha^g(\mathbf{V}_i) \rangle_{\mathbf{V}_i} \quad (4)$$

- Вариации $\alpha_j^g(\mathbf{V}_i)$ будет определять ошибку измерения связанную с отличием модельных свойств струй от свойств струй в данных

Коррекция свойств струй в МК модели

D.B., S.S.

Phys.Part.Nuc. V55, N1, p.180 (2024)

Phys.Part.Nuc. V55, N4, p.1019 (2024)

Phys.Atom.Nucl. V87, N4, p.509 (2024)

- Измерив долю g -струй α^g , необходимо определить какие $H^{q/g}(\mathbf{V}_i)$ - q/g шаблоны ей соответствуют

- Метод 1: Рассмотрим два канала с разными α^g

$$\left. \begin{aligned} H_{1,\text{dat}}(\mathbf{V}_i) &= \alpha_1^g \cdot H^g(\mathbf{V}_i) + (1 - \alpha_1^g) \cdot H^q(\mathbf{V}_i) \\ H_{2,\text{dat}}(\mathbf{V}_i) &= \alpha_2^g \cdot H^g(\mathbf{V}_i) + (1 - \alpha_2^g) \cdot H^q(\mathbf{V}_i) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

- Решая систему (5) относительно $H^{q/g}(\mathbf{V}_i)$, получим

$$H^q(\mathbf{V}_i) = \frac{\alpha_2^g H_{1,\text{dat}}(\mathbf{V}_i) - \alpha_1^g H_{2,\text{dat}}(\mathbf{V}_i)}{\alpha_2^g - \alpha_1^g}, \quad H^g(\mathbf{V}_i) = (g \leftrightarrow q, 1 \leftrightarrow 2) \quad (6)$$

- Практический недостаток этого метода – различие кинематики двух процессов и различное число струй в событии, что вносит различия в $H^{g/q}(\mathbf{V}_i)$ в разных каналах

Коррекция свойств струй в МК модели

- Метод 2: Рассмотрим один канал и построим распределение по дискриминатору

- Выбираем рабочую точку так, чтобы площади “хвостов” ($H_{mc}^{g,>}$ и $H_{mc}^{q,<}$) были одинаковыми

- Учитывая, что гистограммы разделяются на:

$$H^{q/g} = H^{q/g,<} + H^{q/g,>}$$

- А также:

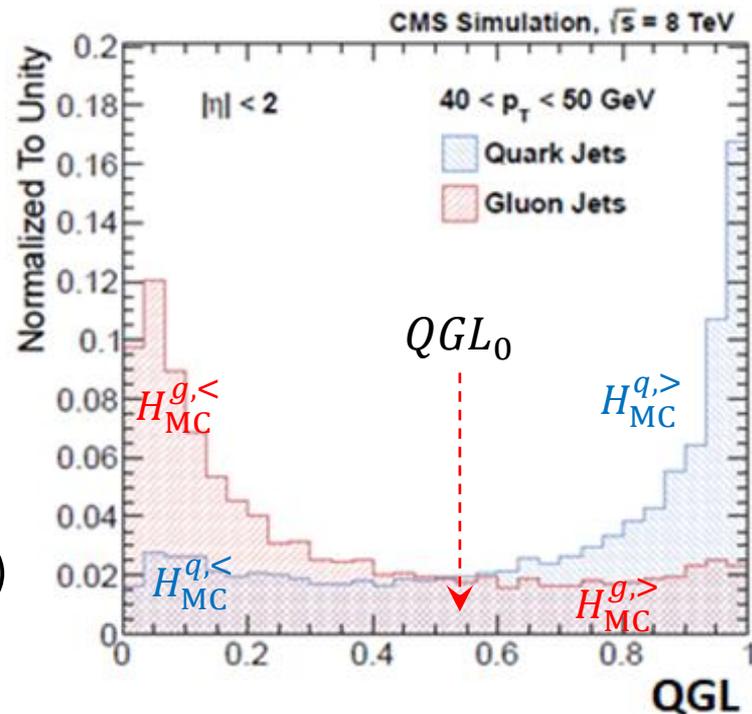
$$H^{>/<} = \alpha^g H^{g,>/<} + (1 - \alpha^g) H^{q,>/<}$$

- Получим:

$$\begin{aligned} H_{dat}^{<} &= \alpha^g (H^g - H_{mc}^{g,>}) + (1 - \alpha^g) H_{mc}^{q,<} \\ H_{dat}^{>} &= \alpha^g H_{mc}^{g,>} + (1 - \alpha^g) (H^q - H_{mc}^{q,<}) \end{aligned} \quad (7)$$

- В результате, если взять измеренные α^g , можно выразить поправленные $H^{q/g}$:

$$\left. \begin{aligned} H^g &= \frac{1}{\alpha^g} (H_{dat}^{<} - (1 - \alpha^g) H_{mc}^{q,<}) + H_{mc}^{g,>} \\ H^q &= \frac{1}{(1 - \alpha^g)} (H_{dat}^{>} - \alpha^g H_{mc}^{g,>}) + H_{mc}^{q,<} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$



Степень отклонения модельных свойств от “истинных”

- Выбранная МК модель позволяет определить величину $\alpha^g(V_i)$ для каждого выбранного свойства V_i
- В случае, если свойства кварковых и глюонных струй соответствуют “истинным”, $\alpha_j^g(V_i)$ рассчитанная для каждого ***j-ого*** бина гистограммы V_i будет иметь одинаковое значение, которое также будет одинаковым для всех свойств V_i
- Отклонение модельных свойств струй от “истинных” приводит к разбросу $\alpha_j^g(V_i)$
- Ошибка связанная с разбросом будет включать в себя как случайное отклонение свойств от “истинных”, так и их систематическое отклонение

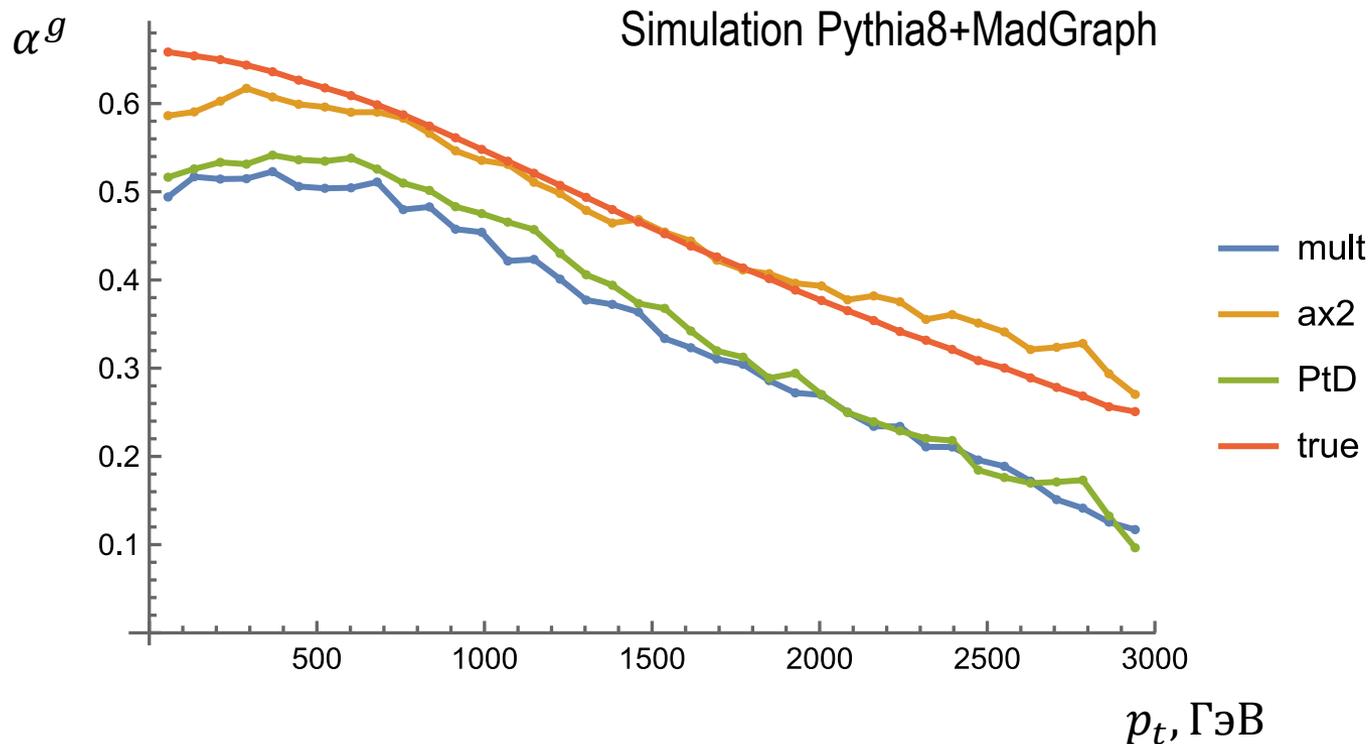
$$\Delta\alpha^g = \sqrt{\Delta\alpha^{g,случ^2} + \Delta\alpha^{g,сист^2}}$$

- Систематического отклонения, обусловленное различием модельных свойств и “истинных”, можно оценить путем вычитания случайного отклонения, определенного в МК следующим образом:

- Варьируем случайным образом $H_{mc}^{q/g}(V_i)$ и $H_{MC}(V_i)$
- Полученный разброс в $\alpha_j^g(V_i)$ будет включать только случайное отклонение

Различие данных и МК

- Данные сравнивались с МК моделями Pythia8+MadGraph и Herwig7+MadGraph
- Свойства струй ($mult$, a_2 и $p_T D$) в данных и МК существенно отклоняются
- Это в свою очередь означает отклонение “истинного” значения в данных от того, что есть в МК модели



Заключение

- В работах авторов был предложен метод измерения долей q/g -струй в данных эксперимента CMS
- В настоящей работе показано, что используя измеренные доли q/g -струй можно измерить (поправить) свойства кварковых и глюонных в данных. Предложено два способа измерения (коррекции) q/g -шаблонов
- Предложен способ оценки неопределенности, связанной с отклонением модельных свойств струй от “истинных” в измерениях долей q/g -струй и q/g -шаблонов

Результаты по измерению долей q/g -струй в выборках инклюзивных струй **готовятся к публикации в коллаборации CMS/LHC**

Работа выполнена в рамках Проблемно-тематического плана ОИЯИ (Дубна) 02-1-1083-1-2010/2025 CMS. Физические исследования на LHC.