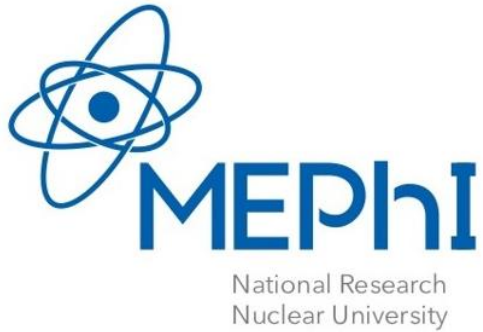




Мотивация к измерению дифференциального сечения рождения π^0 мезона в pp столкновениях

Владислав Кусков
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

25 апреля 2025

vakuskov@mephi.ru

Введение

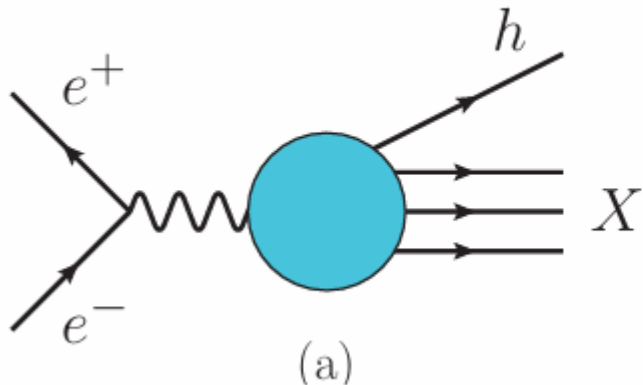
Диссертация посвящена измерению дифференциального сечения рождения инклюзивных π^0 мезонов в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ

Экспериментальные данные по измерению дифференциальных сечений рождения π^0 мезонов в столкновениях частиц вносят вклад в:

- Изучение механизма адронизации в жестких процессах КХД: структурные функций (**PDF**) адронов и нуклонов (**nPDF**), а функции фрагментации (**FF**) партонов в легкие кварки
- Измерение выхода прямых фотонов: оценка фона фотонов от распада адронов
- Исследование феноменологических моделей масштабирования: m_T -масштабирование

Жесткие процессы КХД

Реакции для изучения жестких процессов



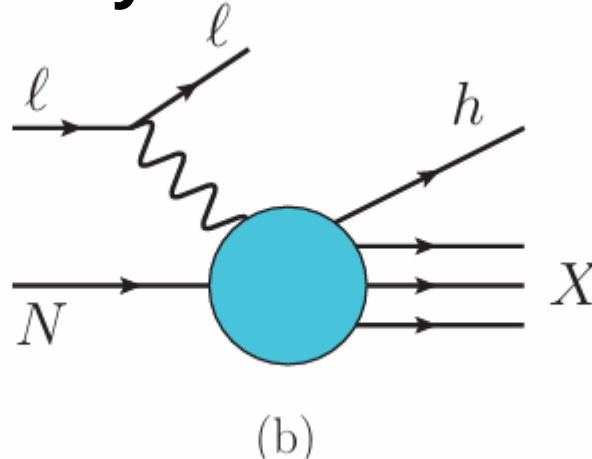
Single-Inclusive Annihilation (SIA):

$$e^+e^- \rightarrow h + X$$

$$\sigma^{e^+e^- \rightarrow hX} = \hat{\sigma} \otimes FF$$

- + «чистые» данные
- + зависимость только от FF (без PDF)
- + В-меченные струи/адроны

- слабый вклад глюонной FF
- не различает q и анти-q FF



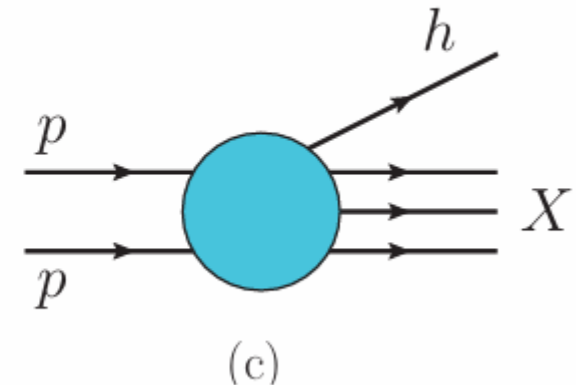
Semi-Inclusive Deep-Inelastic Scattering (SIDIS):

$$l + N \rightarrow h + X$$

$$\sigma^{\ell N \rightarrow \ell h X} = \hat{\sigma} \otimes PDF \otimes FF$$

- + разделение на q и анти-q
- + разделение ароматов

- зависимость от PDF



pp столкновения:

$$p + p \rightarrow h + X$$

$$\sigma^{pp \rightarrow hX} = \hat{\sigma} \otimes PDF \otimes PDF \otimes FF$$

- + возможно разделение q и анти-q
- + широкий диапазон по z
- + большой вклад глюонной PDF

- зависимость от PDF
- «грязные» данные

Функция фрагментации

Зарядовая четность:

$$D_1^{\pi^+/u} = D_1^{\pi^-/\bar{u}}$$

$$D_1^{\pi^+/d} = D_1^{\pi^-/\bar{d}}$$

$$D_1^{\pi^+/\bar{d}} = D_1^{\pi^-/d}$$

$$D_1^{\pi^+/g} = D_1^{\pi^-/g}$$

Изоспиновая симметрия:

$$D_1^{\pi^+/u} = D_1^{\pi^-/d}$$

$$D_1^{\pi^+/d} = D_1^{\pi^-/u}$$



Сокращение до трех независимых FF:

$$D_1^{\text{fav}} \equiv D_1^{\pi^+/u} = D_1^{\pi^+/\bar{d}} = D_1^{\pi^-/d} = D_1^{\pi^-/\bar{u}}$$

$$D_1^{\text{dis}} \equiv D_1^{\pi^+/d} = D_1^{\pi^+/\bar{u}} = D_1^{\pi^-/u} = D_1^{\pi^-/\bar{d}}$$

$$D_1^{\pi^+/g} = D_1^{\pi^-/g}$$

где $D_1^{h/i}(z)$ -- функция фрагментации партона i в адрон h

Тогда для π^0 мезона функция фрагментации примет вид:

$$D_1^{\pi^0/q} = \frac{1}{2}(D_1^{\pi^+/q} + D_1^{\pi^-/q})$$

При этом справедлива нормировка:

$$\sum_h \sum_{S_h} \int_0^1 dz z D_1^{h/q}(z) = 1$$

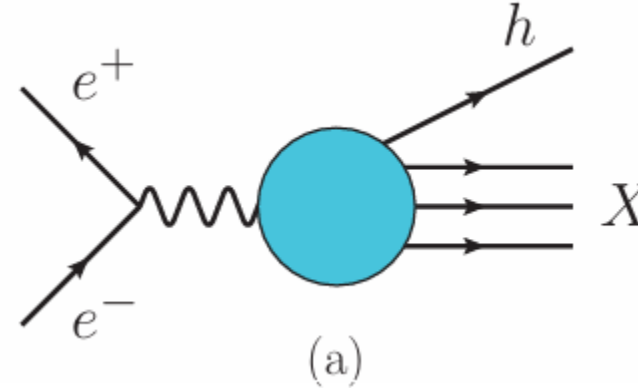
Отсюда можно дать **определение FF**: количество адронов h , рожденных при фрагментации партона q (кварка или глюона), и уносящих долю импульса родительского партона $[z, z + dz]$

Функция фрагментации в $e^+e^- \rightarrow h + X$ (SIA)

Для этой реакции сечение принимает вид:

$$\frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \frac{d\sigma^{e^+e^- \rightarrow hX}}{dz} = F^h(z, Q^2), \quad z = \frac{2E_h}{\sqrt{s}}$$

Для e^+e^- функция фрагментации $F^h(z, Q^2)$ принимает смысл множественности адронов h в событии



Особенности реакции:

- Нечувствительна к $D^{h/g}$ (из-за малости α_s)
- Основная вклад составляет $\sum_q e_q^2 D_1^{h/q}$ т.е. из-за заряда тяжелые кварки доминируют
- Не разделяет FF от q и анти-q
- Дополнительно можно разделить вклады от разных ароматов отбирая события: $e^+e^- \rightarrow h_1 h_2 X$

Функция фрагментации:

$$F^h = \frac{1}{\sum_q e_q^2} (2F_1^h(z, Q^2) + F_L^h(z, Q^2))$$

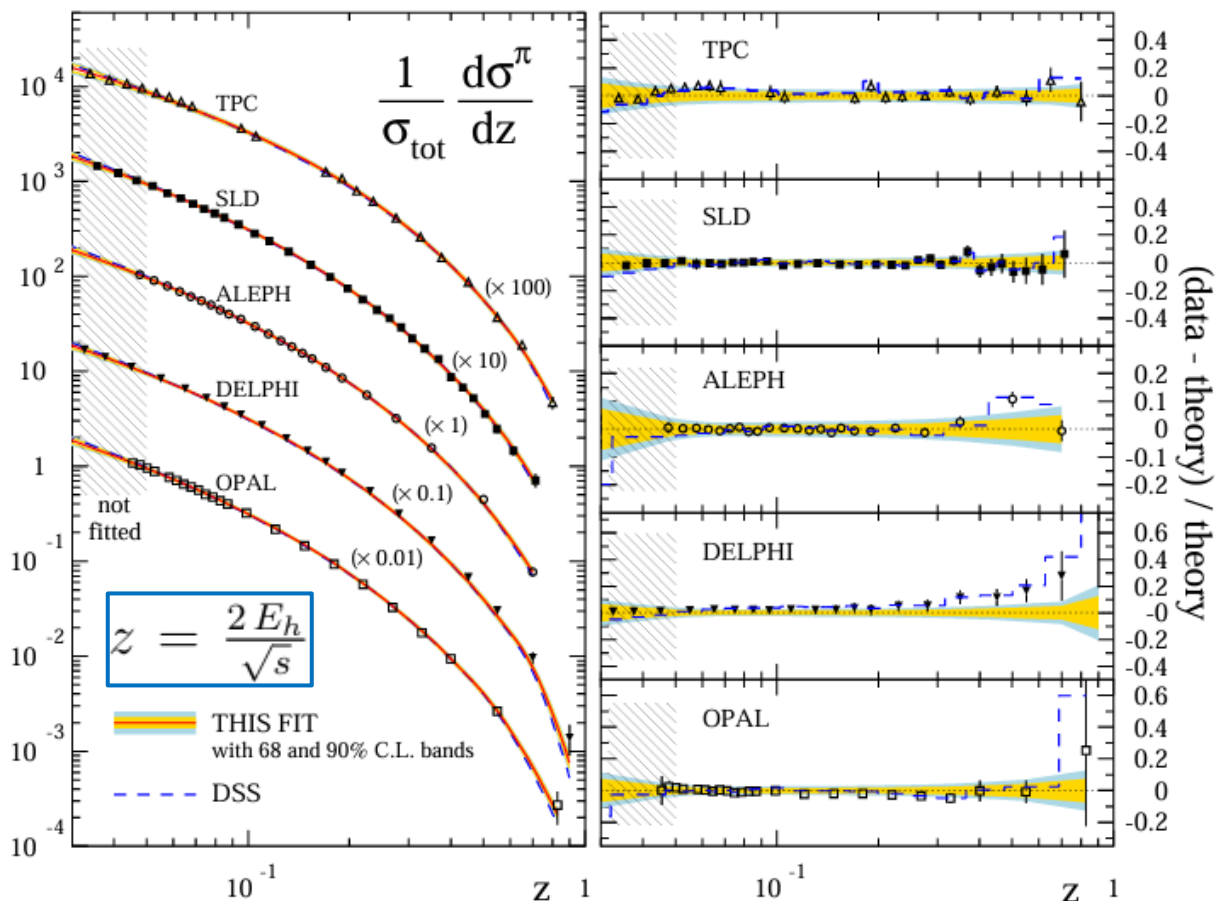
$$2F_1^h(z, Q^2) = \sum_q e_q^2 \left(\boxed{D_1^{h/q}(z, Q^2)} + \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \left(C_1^q \otimes D_1^{h/q} + C_1^g \otimes D_1^{h/g} \right)(z, Q^2) \right),$$

$$F_L^h(z, Q^2) = \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \sum_q e_q^2 \left(C_L^q \otimes D_1^{h/q} + C_L^g \otimes D_1^{h/g} \right)(z, Q^2).$$

Эксперименты SIA

Основные эксперименты:

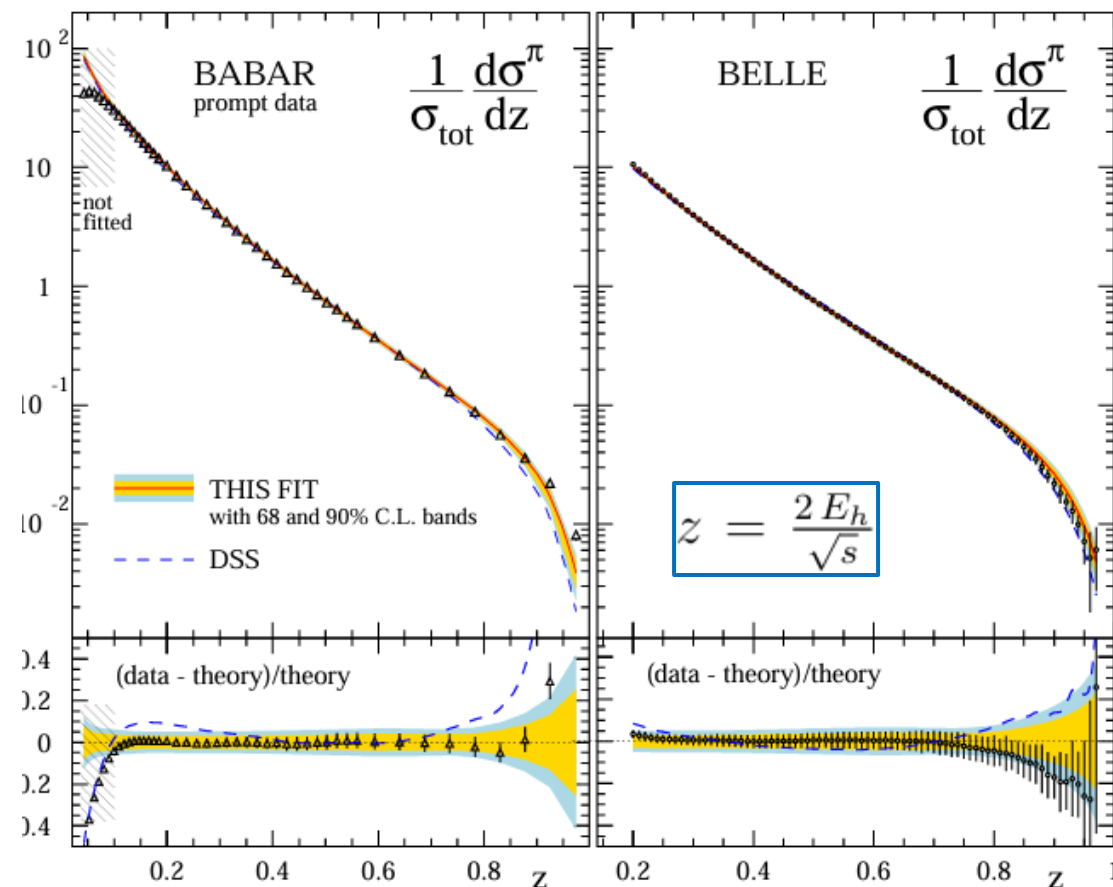
- TESSO на PETRA, DESY, $\sqrt{s} = 34$ ГэВ, 44 ГэВ
- SLD на SLC, SLAC
- ALEPH, DELPHI, OPAL на LEP, CERN, $\sqrt{s} = 100$ -130 ГэВ



25.04.2025

Основные эксперименты:

- BABAR на SLC, SLAC
- BELLE на KEK, Цукуба

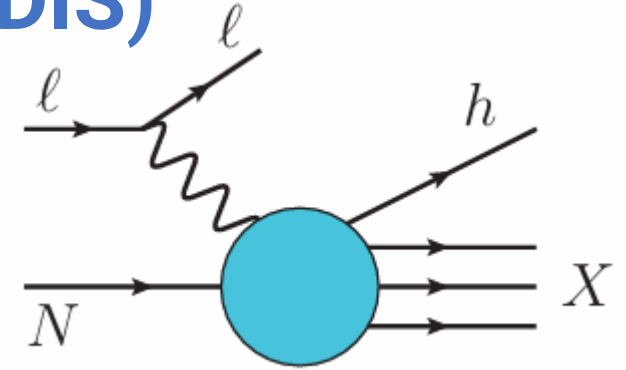


Нейтральные пи-мезоны | Обзор

Функция фрагментации в $\ell + N \rightarrow h + X$ (SIDIS)

Для этой реакции сечение принимает вид:

$$\frac{d^3\sigma^{\ell p \rightarrow \ell h X}}{dx dy dz} = \frac{2\pi\alpha_{\text{em}}^2}{Q^2} \left(\frac{1 + (1-y)^2}{y} 2F_1^h(x, z, Q^2) + \frac{2(1-y)}{y} F_L^h(x, z, Q^2) \right)$$



Функция фрагментации:

$$2F_1^h(x, z, Q^2) = \sum_q e_q^2 \left(\boxed{f_1^{q/p} D_1^{h/q}} + \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \left(f_1^{q/p} \otimes C_1^{qq} \otimes D_1^{h/q} \right. \right. \\ \left. \left. + f_1^{q/p} \otimes C_1^{gq} \otimes D_1^{h/g} + f_1^{g/p} \otimes C_1^{qg} \otimes D_1^{h/q} \right) \right],$$

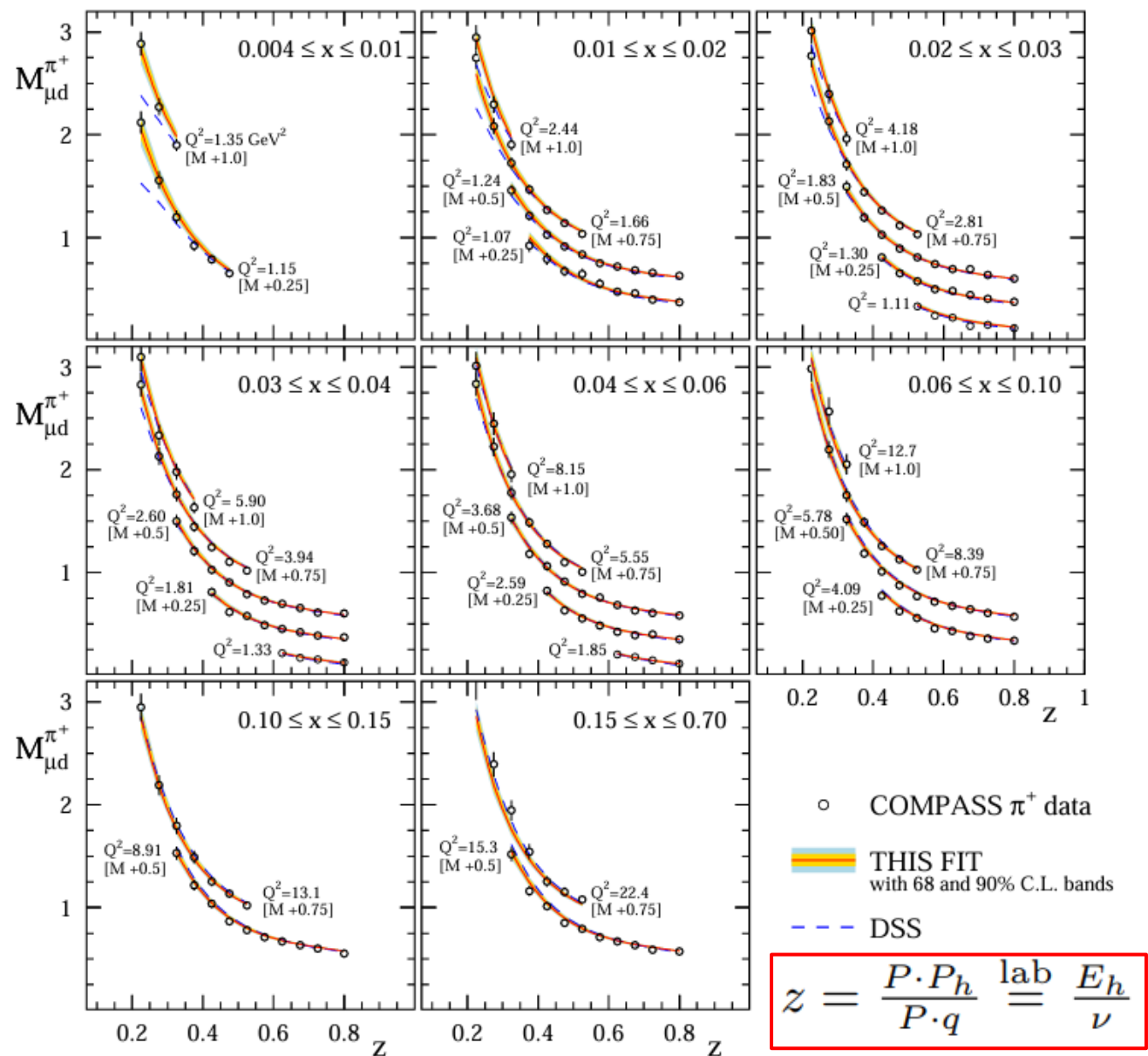
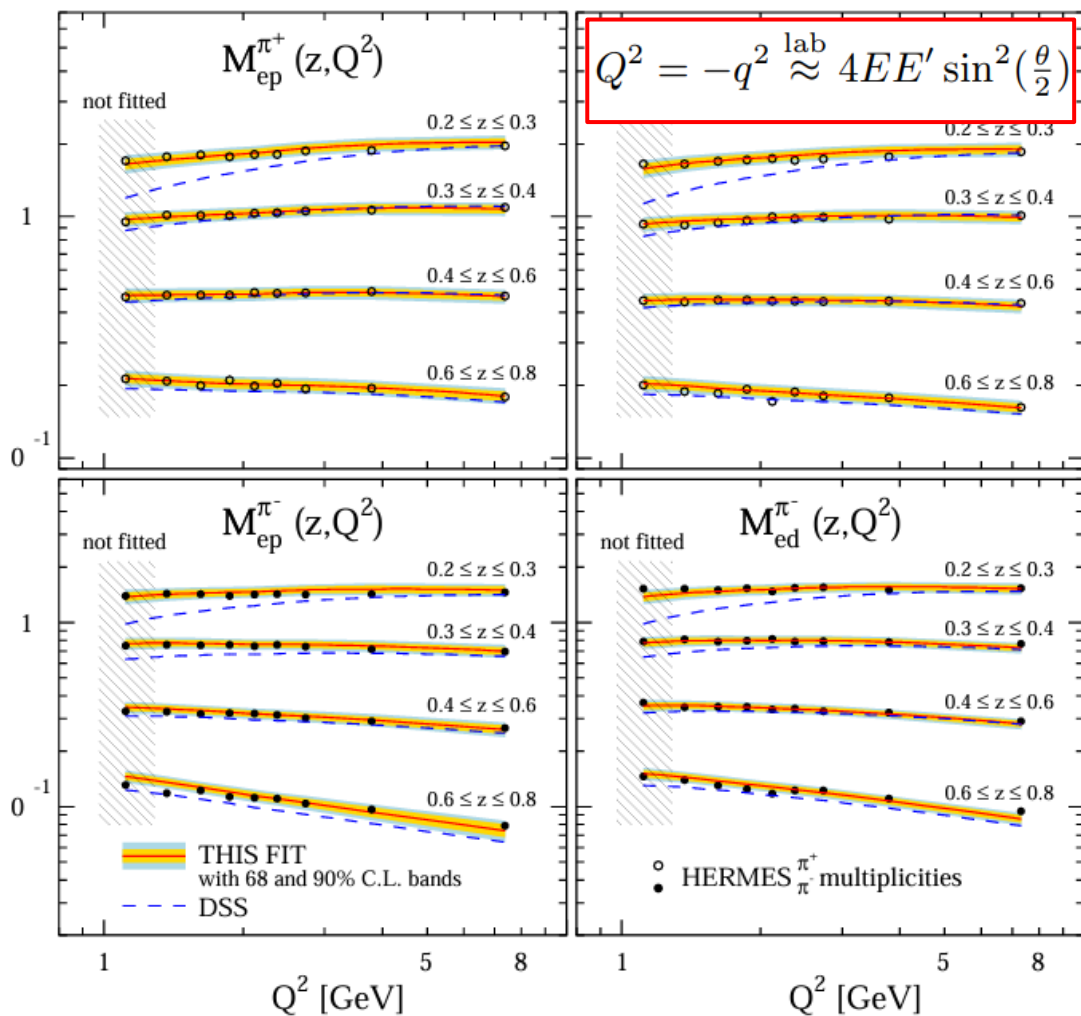
$$F_L^h(x, z, Q^2) = \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \sum_q e_q^2 \left(f_1^{q/p} \otimes C_L^{qq} \otimes D_1^{h/q} + f_1^{q/p} \otimes C_L^{gq} \otimes D_1^{h/g} + f_1^{g/p} \otimes C_L^{qg} \otimes D_1^{h/q} \right)$$

Особенности реакции:

- наличие структурной функции $f^{q/p}$ позволяет оценивать вклад глюонов в фрагментацию
- разделение аромата и заряда (благодаря $f^{q/p}$)
- НО вводится зависимость от PDF

Эксперименты SIDIS

- HERMES на HERA, DESY
- COMPASS на SPS, CERN



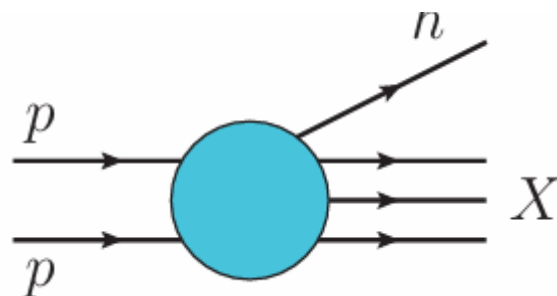
Функция фрагментации в $pp \rightarrow h + X$

Для этой реакции сечение принимает вид:

$$\frac{E_h d^3 \sigma^{pp \rightarrow hX}}{d^3 P_h} = \sum_{i,j,k,l} \int \frac{dx_a}{x_a} \int \frac{dx_b}{x_b} \int \frac{dz}{z^2} f_1^{i/p_a}(x_a) f_1^{j/p_b}(x_b) D_1^{h/k}(z) \hat{\sigma}^{ij \rightarrow kl} \delta(\hat{s} + \hat{t} + \hat{u})$$

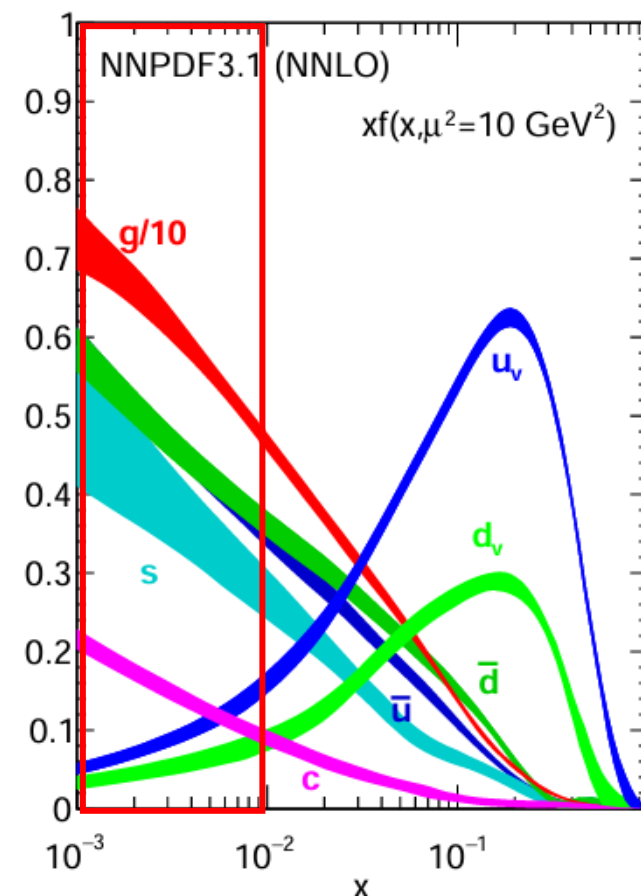
Особенности реакции:

- глюонная FF доминирует
- сильная зависимость от PDF
- «грязные» данные



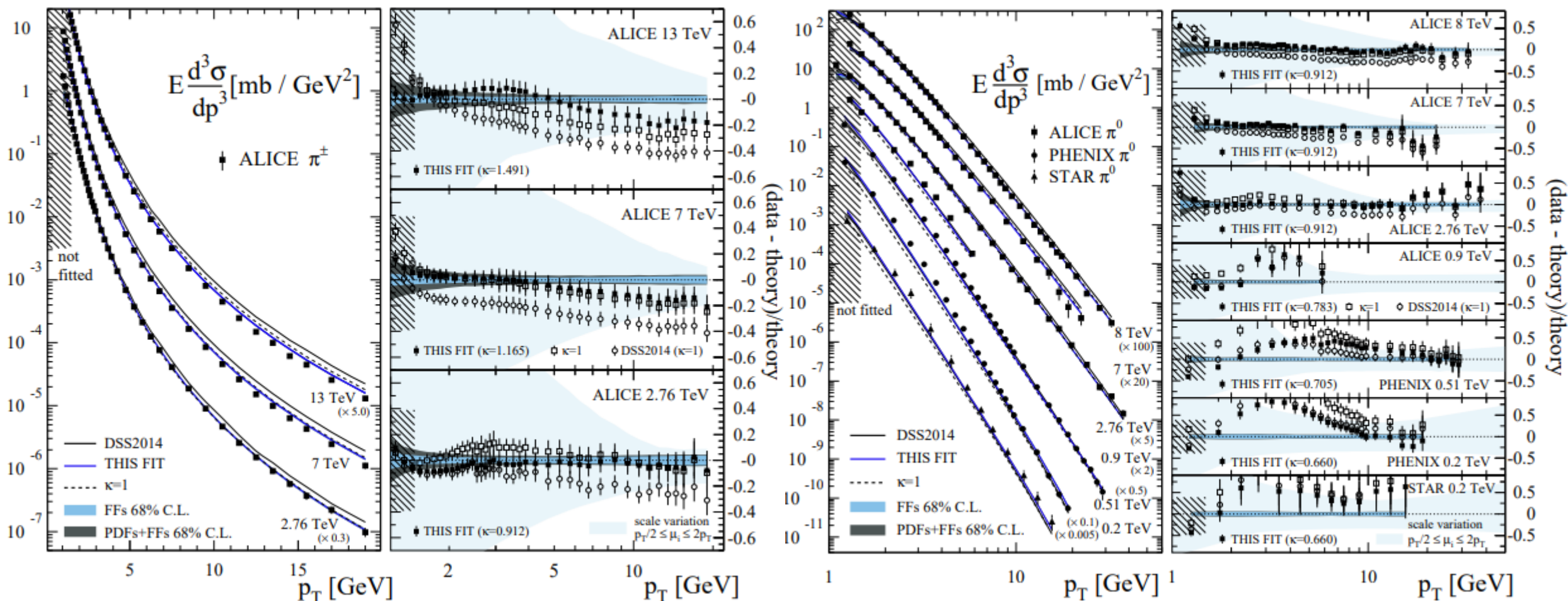
Возможность улучшить **определение z**: лидирующие адроны внутри струй

$$\frac{d^3 \sigma^{pp \rightarrow (h, \text{jet})X}}{dP_T^{\text{jet}} d\eta^{\text{jet}} dz} \propto \sum_{i,j,k} f_1^{i/p_a}(x_a) \otimes f_1^{j/p_b}(x_b) \otimes \hat{\sigma}^{ij \rightarrow k\text{jet}} \otimes D_1^{h/p_k}\left(\frac{z}{z_k}\right)$$



Эксперименты pp

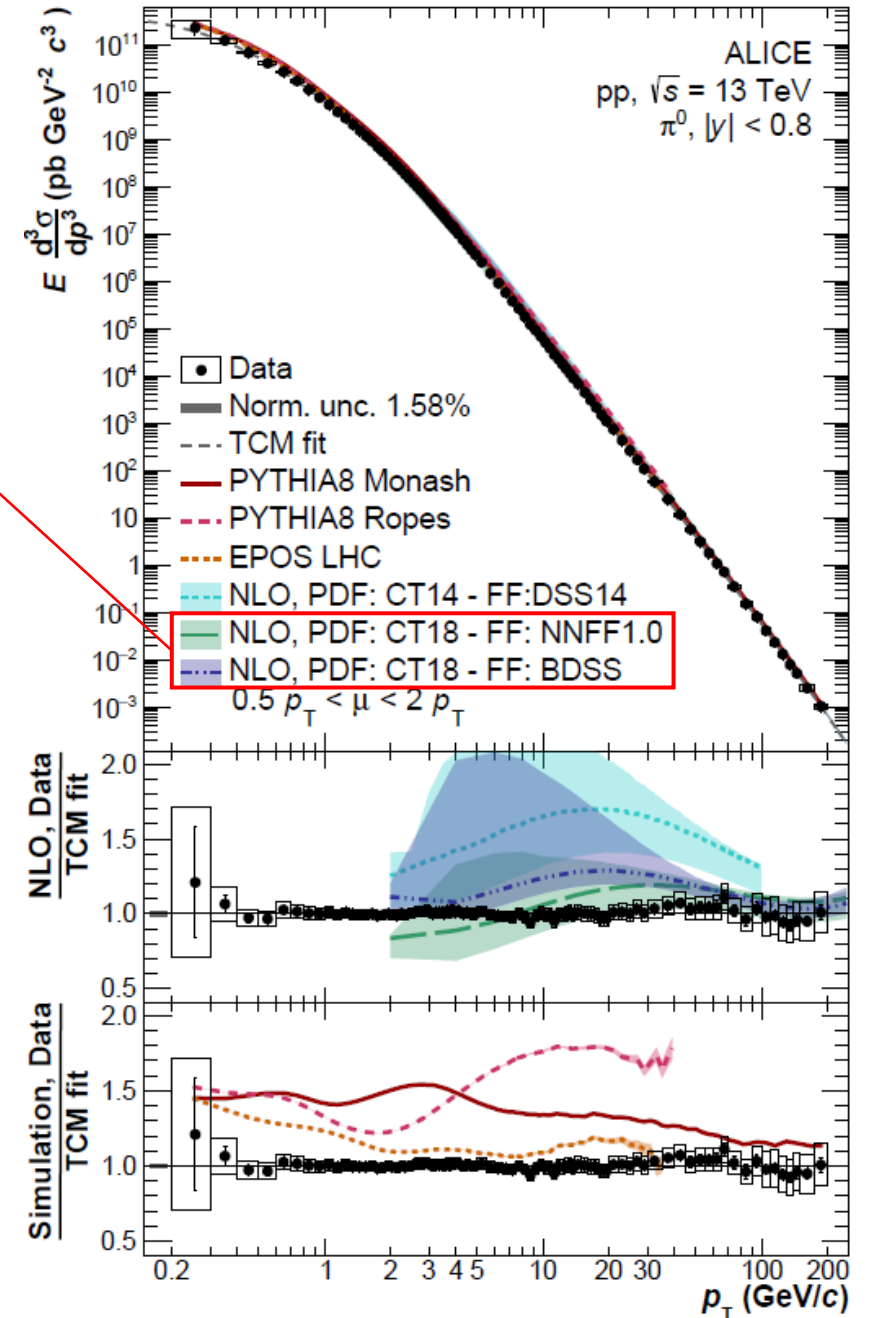
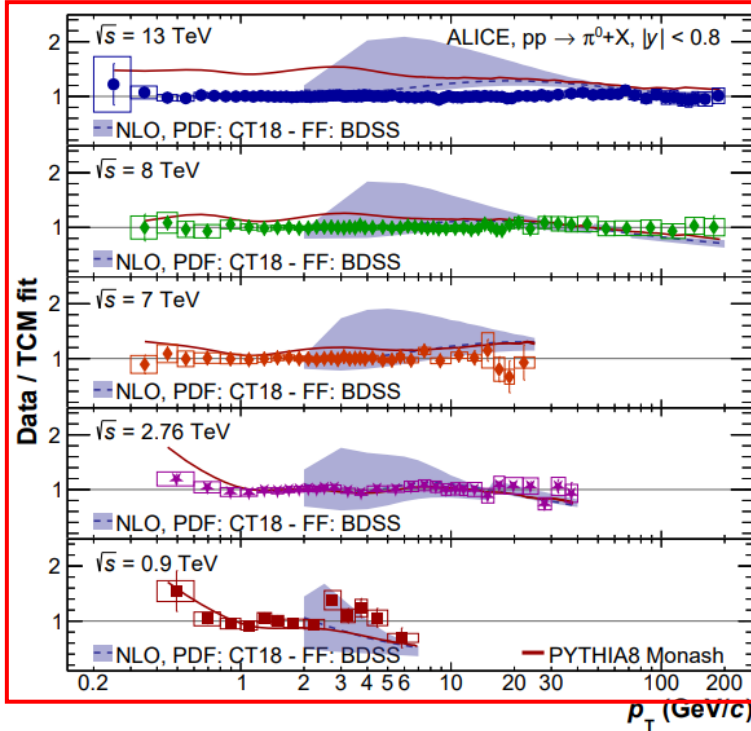
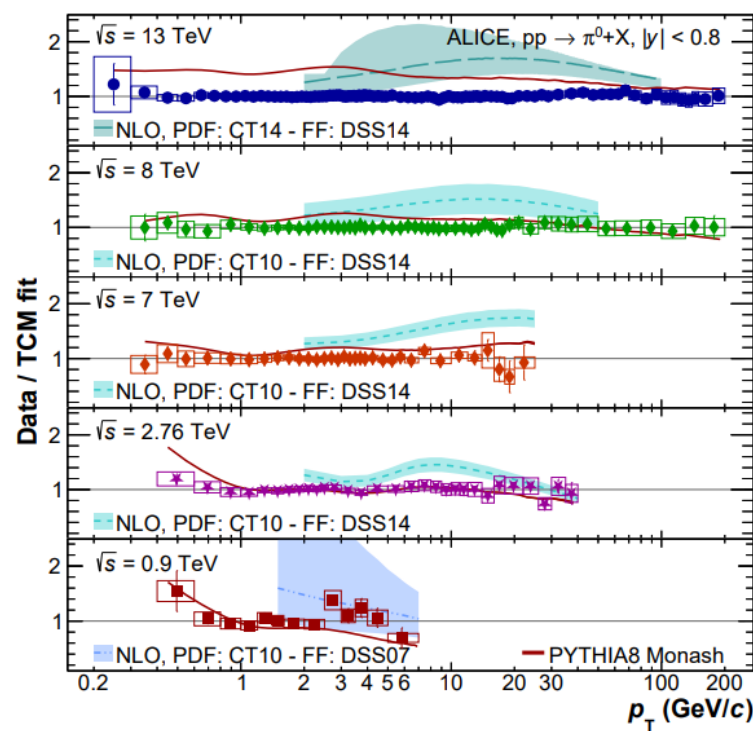
- STAR, PHENIX, BRAHMS на RHIC, BNL, $\sqrt{s} = 200$ ГэВ
- ALICE на LHC, CERN, $\sqrt{s} = 0.9, 2.76, 7, 13$ ТэВ



Результаты ALICE

Недостаток: неточная оценка z
(модельно зависимая)

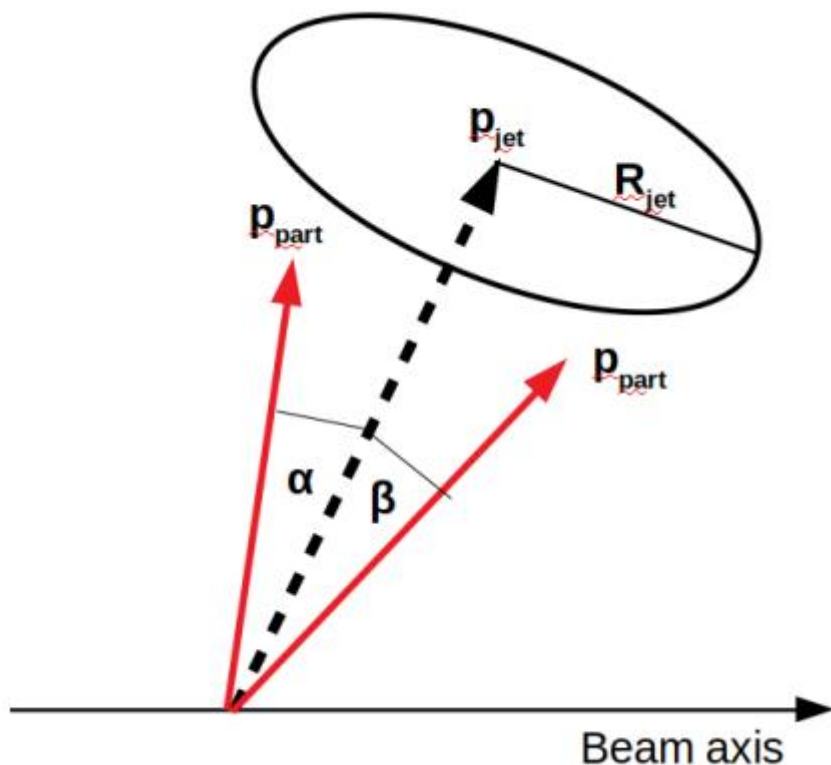
Учитываю последние
данные с pp коллайдеров
(прошлый слайд)



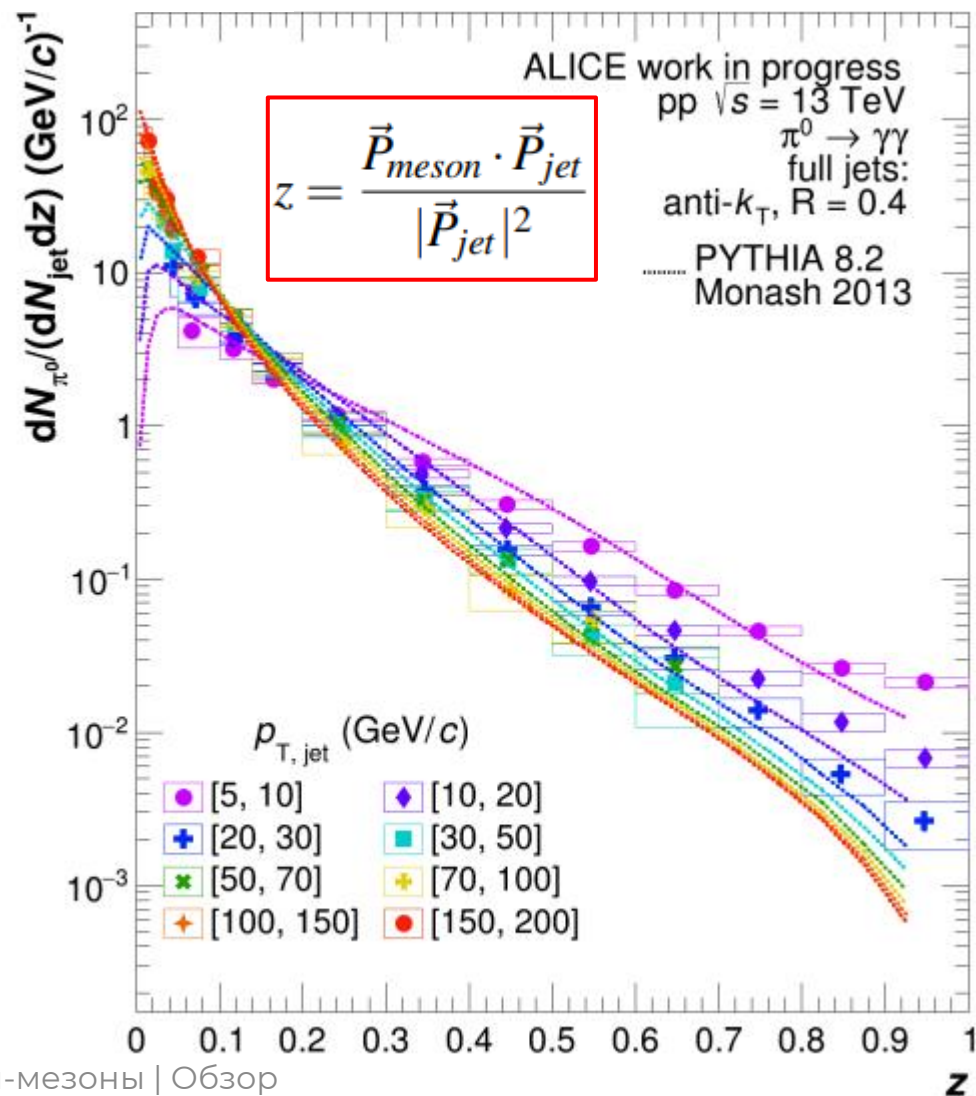
Результаты ALICE

$$\frac{d^3\sigma^{pp\rightarrow(h,\text{jet})X}}{dP_T^{\text{jet}} d\eta^{\text{jet}} dz} \propto \sum_{i,j,k} f_1^{i/p_a}(x_a) \otimes f_1^{j/p_b}(x_b) \otimes \hat{\sigma}^{ij\rightarrow k\text{jet}} \otimes D_1^{h/p_k}\left(\frac{z}{z_k}\right)$$

Отбор лидирующего адрона (пиона) внутри конуса струи --> прямая возможность измерять z



25.04.2025



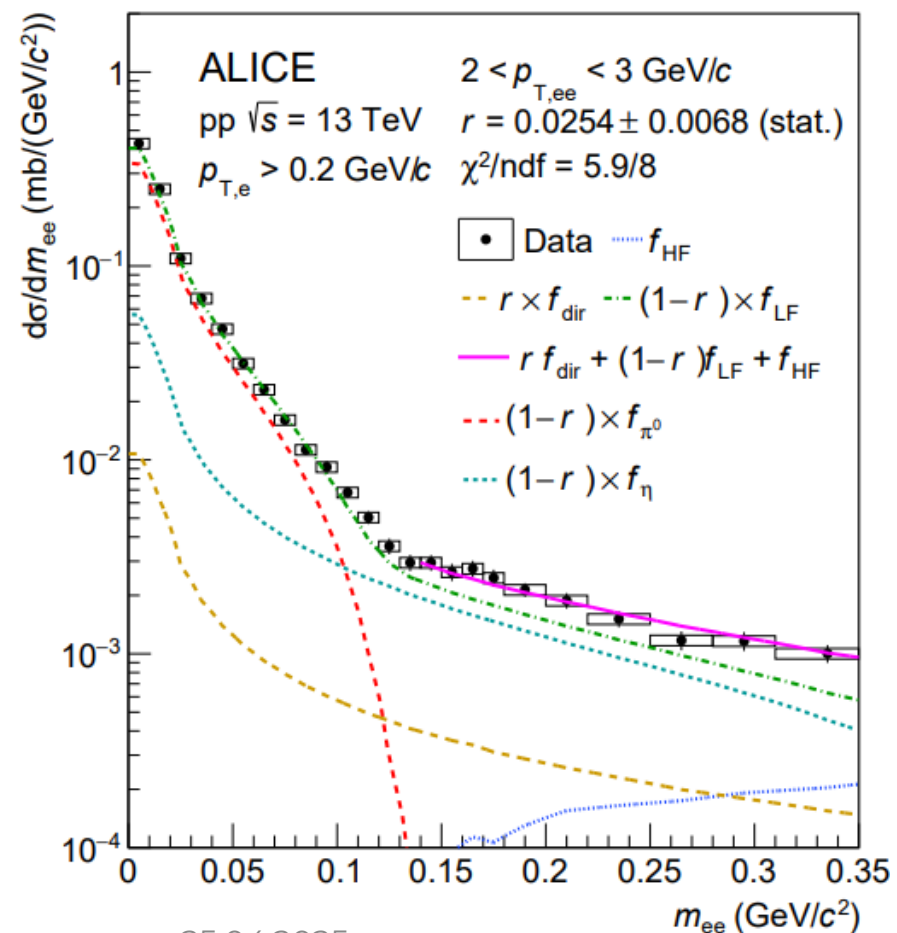
Нейтральные пи-мезоны | Обзор

Вклад в измерение прямых фотонов в pp

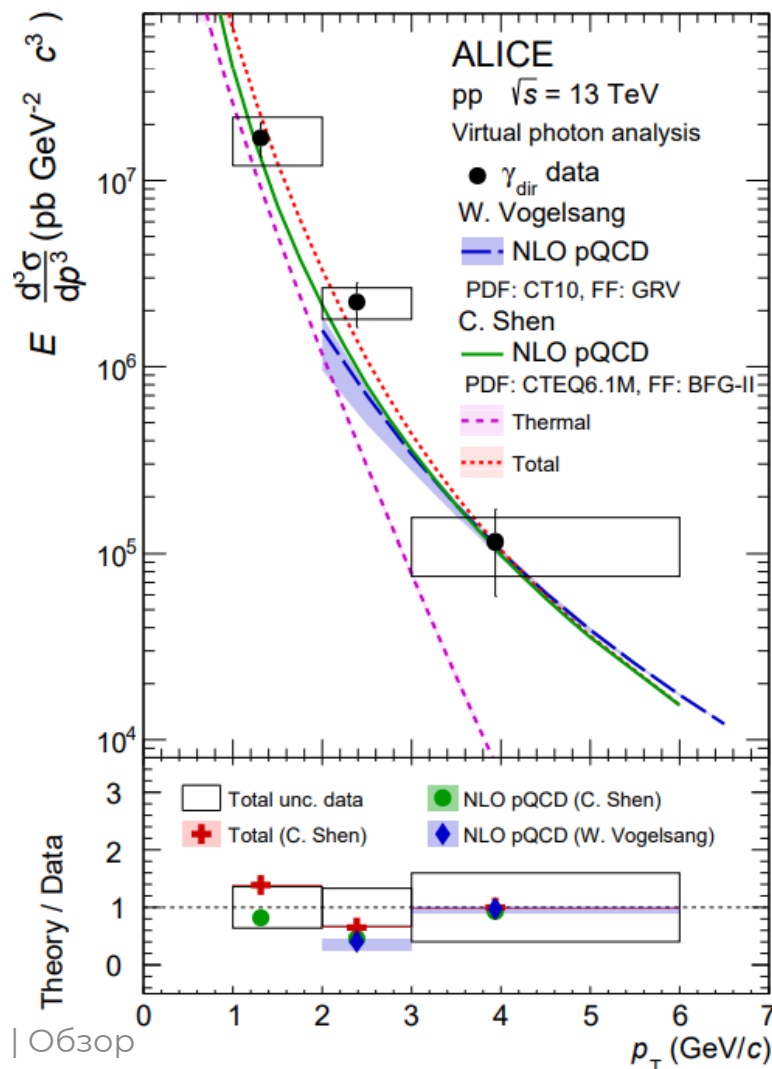
Для оценки выхода прямых фотонов в столкновении, необходимо знать выход распадных фотонов

$$\gamma_{\text{dir}} = \gamma_{\text{decay}} \times r / (1 - r). \quad d\sigma/dm_{ee} = r f_{\text{dir}}(m_{ee}) + (1 - r) f_{\text{LF}}(m_{ee}) + f_{\text{HF}}(m_{ee})$$

π^0 и η мезоны вносят подавляющий вклад в распадные фотоны



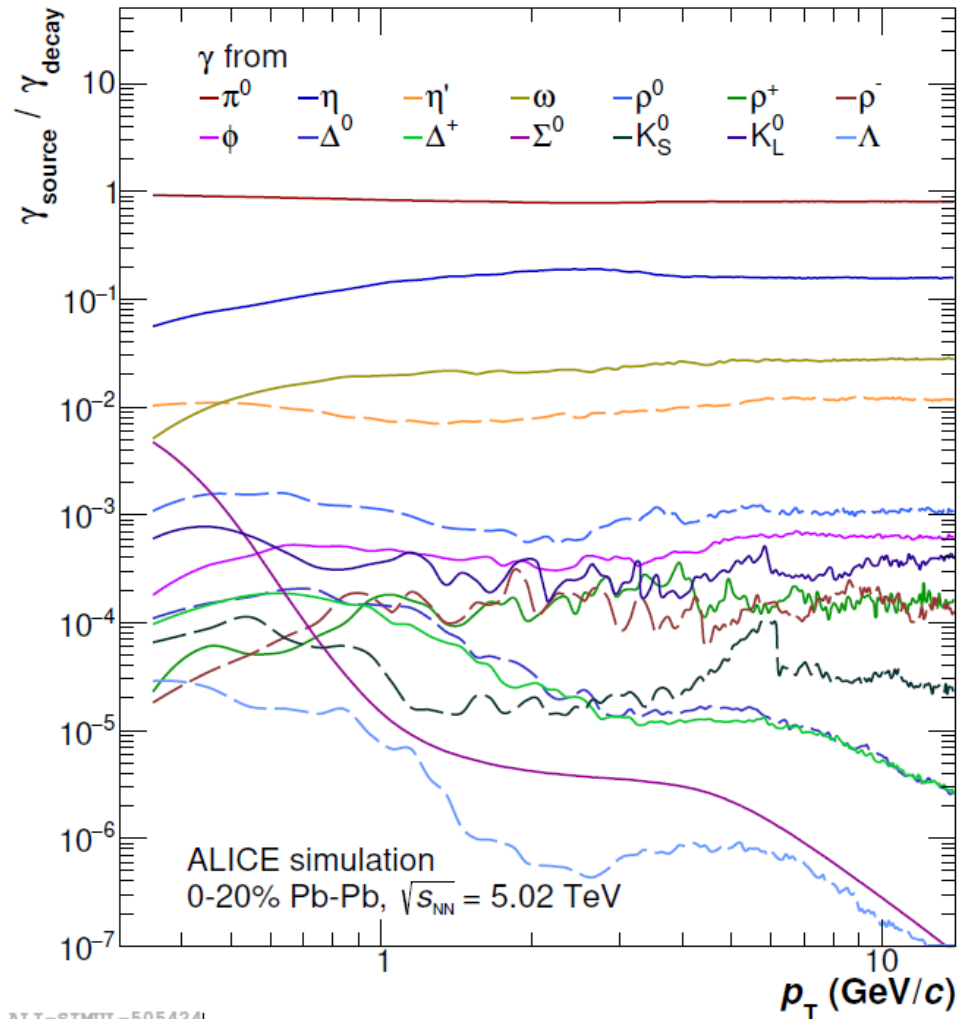
25.04.2025



Нейтральные пи-мезоны | Обзор

Прямые фотоны в Pb-Pb столкновениях

Доля распадных фотонов по адронам:



- Выделение сигнала:

$$\gamma_{\text{dir}} = \gamma_{\text{inc}} - \gamma_{\text{decay}} = \left(1 - \frac{\gamma_{\text{decay}}}{\gamma_{\text{inc}}}\right) \gamma_{\text{inc}}$$

$$\gamma_{\text{dir}} = \left(1 - \frac{1}{R_\gamma}\right) \gamma_{\text{inc}}$$

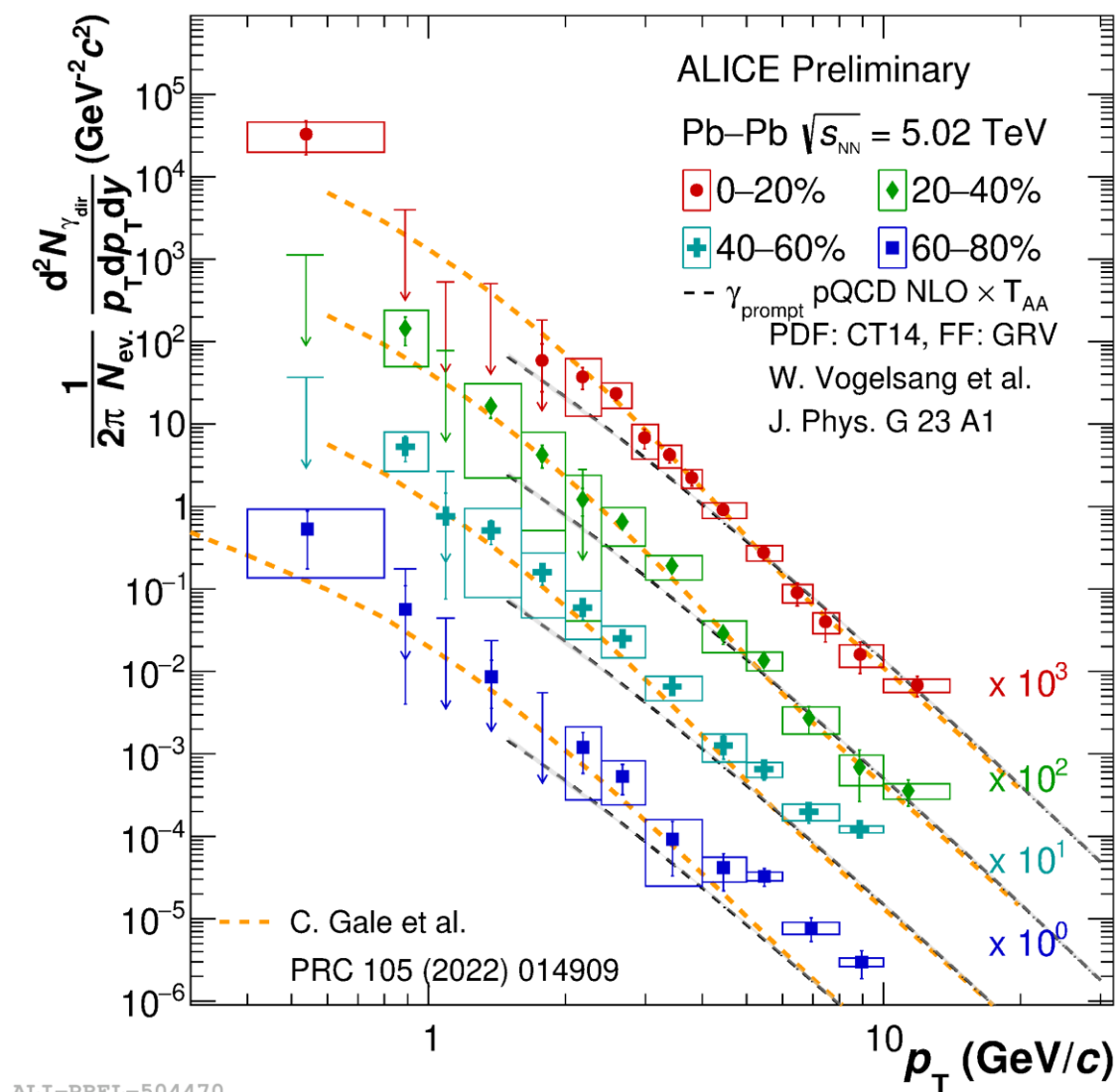
- Инклюзивные фотоны:** все фотоны в событии
- Распадные фотоны:** основные вклады π^0 и η мезоны

- Двойное отношение:**

$$R_\gamma = \frac{\gamma_{\text{inc}}}{\gamma_{\text{decay}}} \approx \frac{\gamma_{\text{inc}} / \pi_{\text{meas}}^0}{\gamma_{\text{decay}} / \pi_{\text{sim}}^0}$$

ALI-SIMUL-505424

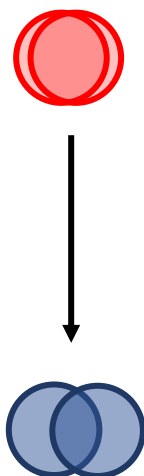
Прямые фотоны в Pb-Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ



- Инвариантный выход измерен как:

$$\frac{1}{2\pi N_{ev}} \frac{d^2 N_{\gamma_{dir}}}{p_T dp_T dy} = \frac{1}{2\pi N_{ev}} \frac{d^2 N_{\gamma_{inc}}}{p_T dp_T dy} \times \left(1 - \frac{1}{R_\gamma}\right)$$

- $p_T > 3$ GeV/c – доминирование жестких фотонов (пертурбативная КХД)
- Отнормированные NLO pQCD расчеты в pp столкновениях с использованием **PDF:CT14** и **FF:GRV**
- Модель с использованием гидродинамики и партонных реакций описывает данные во всем p_T диапазоне при всех измеренных центральностях



C. Gale et al. Multimessenger heavy-ion collision physics, Phys.Rev.C 105 (2022) 1, 014909

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Владислав Кусков
25 апреля 2025

vakuskov@mephi.ru