

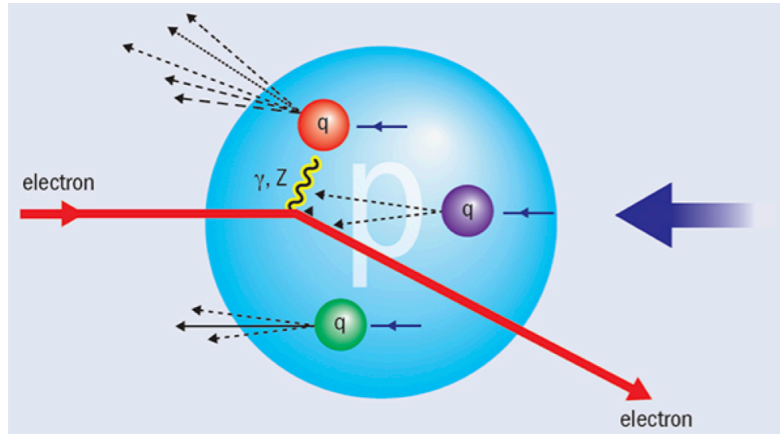
ПОИСКИ АСИМПТОТИЧЕСКИХ КХД-ЭФФЕКТОВ БФКЛ НА CMS

АНАТОЛИЙ ЕГОРОВ (ПИЯФ, СПБПУ),

В. КИМ (ПИЯФ, СПБПУ), В. ГАВРИЛОВ (ИТЭФ), В. МУРЗИН (ПИЯФ),
В. ОРЕШКИН (ПИЯФ), Г. ПИВОВАРОВ (ИЯИ), Г. САФРОНОВ (ИТЭФ)

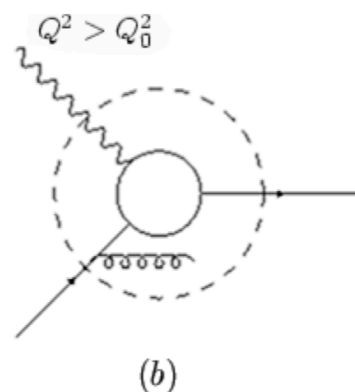
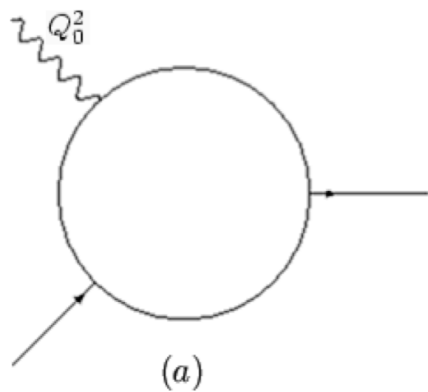
Партонная модель, предел Бьеркена, ДГЛАП

Глубоко-неупругое рассеяние



$$\sigma_0 \propto \frac{\overline{\sum |M_0|^2}}{Q^2} \sum_i x_{bj} f_i(x_{bj}) e_i^2 \quad x_{bj} = \frac{Q^2}{2P \cdot q}$$

КХД поправки нарушают Бьеркеновский скейлинг



Бьеркеновский предел $\sqrt{s} \rightarrow \infty; p_T \rightarrow \infty; x \sim \frac{p_T}{\sqrt{s}} \sim 1$

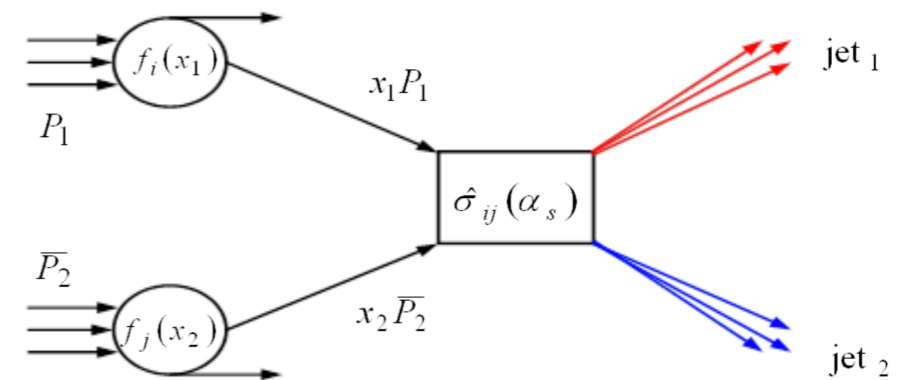
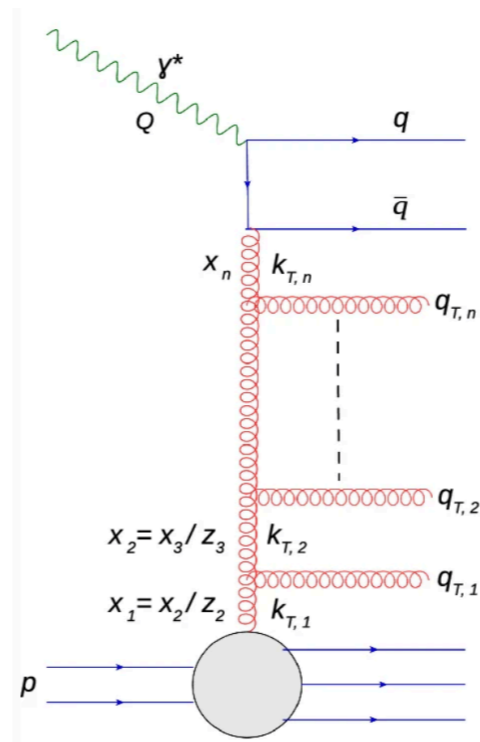
$$k_{Tn} \gg k_{Tn-1} \gg \dots \gg k_{T2} \gg k_{T1}$$

$$[\alpha_s \log Q^2]^n$$

ДГЛАП ЭВОЛЮЦИЯ

$$\frac{df_i}{d \log \mu^2} = \frac{\alpha_s}{2\pi} [P_{qq} \otimes f_i + P_{qg} \otimes f_g]$$

$$\frac{df_g}{d \log \mu^2} = \frac{\alpha_s}{2\pi} [P_{gq} \otimes \sum_i f_i + P_{gg} \otimes f_g]$$



$$d\sigma(pp \rightarrow H + X) = \int dx_1 dx_2 \sum_{ij} f_i(x_1, Q) f_j(x_2, Q) d\hat{\sigma}(ij \rightarrow H)$$

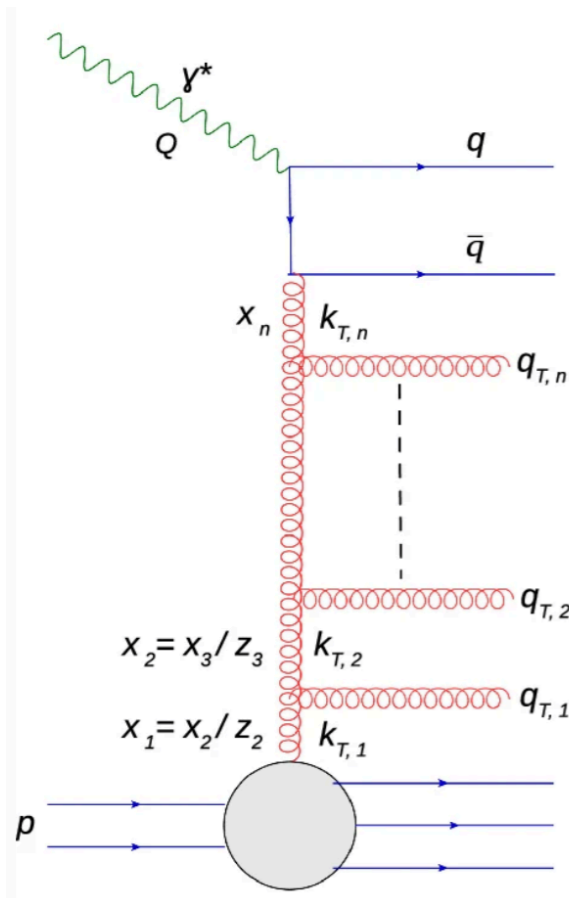
Предел Редже-Грибова, БФКЛ

БФКЛ Кинематика (LLA): Предел Редже-Грибова $\sqrt{s} \rightarrow \infty; p_T - finite; x \sim \frac{p_T}{\sqrt{s}} \rightarrow 0; c \ p_T \gg \Lambda_{QCD}$

Мультiredжевская кинематика

$$\left. \begin{aligned} x_n \gg x_{n-1} \gg \dots \gg x_2 \gg x_1 \\ k_{Tn} \sim k_{Tn-1} \sim \dots \sim k_{T2} \sim k_{T1} \end{aligned} \right\} y_n \gg y_{n-1} \gg \dots \gg y_2 \gg y_1$$

$$[\alpha_s \log(1/x)]^n$$



$$\frac{\partial f_g}{\partial \log 1/x} = K \otimes f_g = \omega f_g$$

$$f_g \propto e^{\omega \log 1/x} = x^{-\omega} \propto \left(\frac{s}{s_0} \right)^\omega$$

$$\log \left(\frac{s}{p_T^2} \right) = \log(1/x_1) + \log \left(\frac{\hat{s}}{p_T^2} \right) + \log(1/x_2)$$

$$\frac{d\hat{\sigma}_{gg}}{d^2 p_{T1} d^2 p_{T2}} = \left[\frac{C_A \alpha_s}{p_{T1}^2} \right] f_g(\Delta y, p_{T1}, p_{T2}) \left[\frac{C_A \alpha_s}{p_{T2}^2} \right]$$

$$\frac{d\hat{\sigma}_{gg}}{dp_{T1}^2 dp_{T2}^2 d\phi} = \frac{C_A^2 \alpha_s^2}{4\pi p_{T1}^3 p_{T2}^3} \sum_n e^{in(\phi-\pi)} \int_0^\infty d\nu e^{\omega(n,\nu)\Delta y} \cos \left(\nu \ln \frac{p_{T1}^2}{p_{T2}^2} \right) \Rightarrow \hat{\sigma}_{gg} \propto e^{A \cdot \Delta y}$$

при $\Delta y \rightarrow \infty$

$$\omega_{\max} = \alpha_P(0) - 1$$

LL БФКЛ дает слишком большой интерсепт

$$\alpha_P^{LL}(0) \approx 1.5$$

NLL БФКЛ: $\alpha_P^{NLL} \approx 1.2$

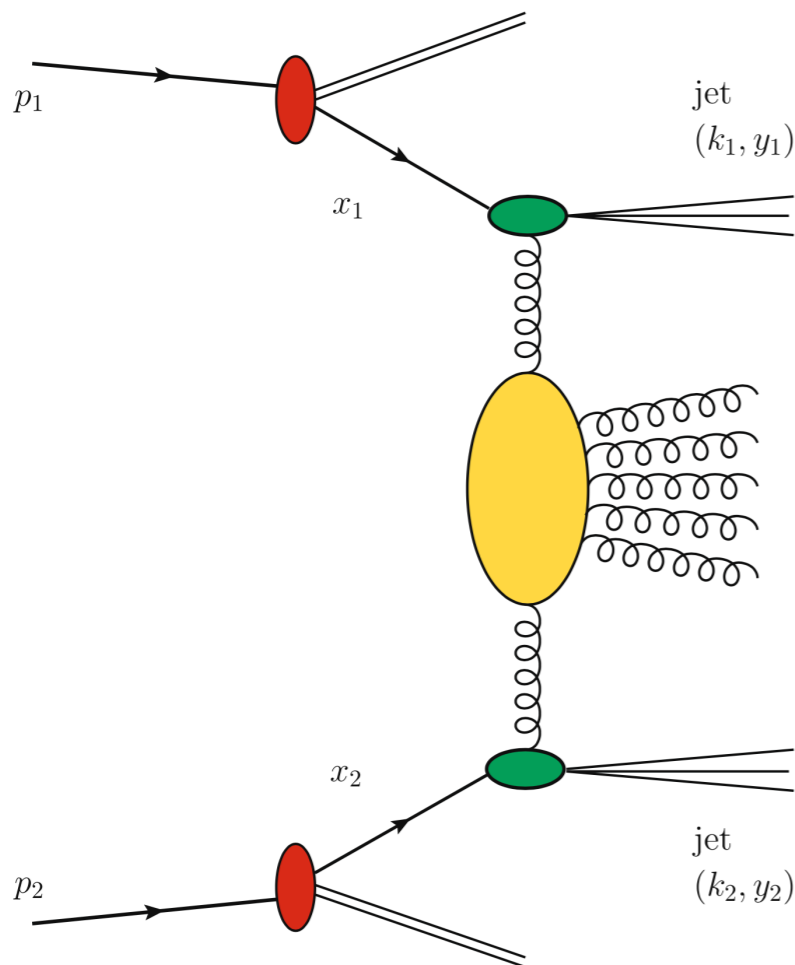
S.J. Brodsky, V.S. Fadin, V.T. Kim,
L.N. Lipatov, G.B. Pivovarov

[JETP Lett. 70 (1999) 155-160]

Характеристики БФКЛ динамики

$$\log\left(\frac{s}{p_T^2}\right) = \log(1/x_1) + \log\left(\frac{\hat{s}}{p_T^2}\right) + \log(1/x_2)$$

$$\frac{d\hat{\sigma}_{gg}}{dp_{T1}^2 dp_{T2}^2 d\phi} = \frac{C_A^2 \alpha_s^2}{4\pi p_{T1}^3 p_{T2}^3} \sum_n e^{in(\phi-\pi)} \int_0^\infty d\nu e^{\omega(n,\nu)\Delta y} \cos\left(\nu \ln \frac{p_{T1}^2}{p_{T2}^2}\right) \Rightarrow \hat{\sigma}_{gg} \propto e^{A \cdot \Delta y} \quad \text{при } \Delta y \rightarrow \infty$$



ДГЛАП динамика:

- адронные струи упорядочены по p_T
- нет упорядочения по y
- high- \sqrt{s} high- p_T small- Δy

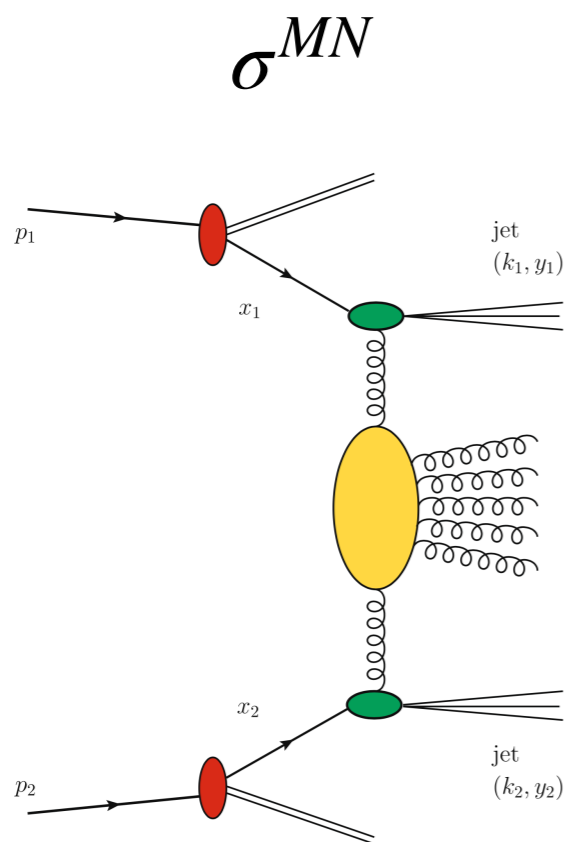
БФКЛ динамика:

- адронные струи упорядочены по y
- нет упорядочения по p_T
- декорреляция по азимутальному углу
- high- \sqrt{s} low- p_T large- Δy

Мюллер-Навеле и Инклюзивное сечение

Мюллер-Навеле (МН) двухструйное сечение

A. H. Mueller and H. Navelet [[Nucl. Phys. B 282 \(1987\) 727](#)]

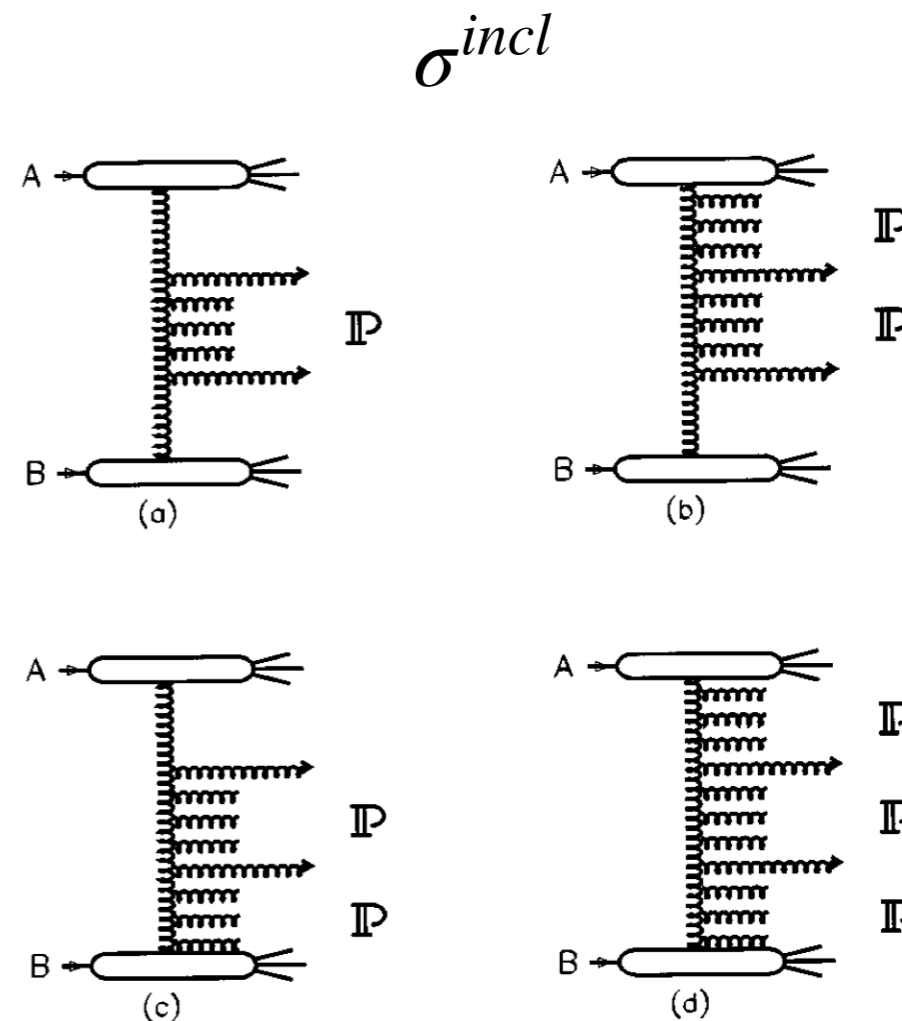


Мюллер-Навеле (МН) пара струй - пара струй с p_T выше $p_{T \min}$ с максимальным интервалом быстроты $\Delta y = |y_1 - y_2|$

При достаточно высоком \sqrt{s} низком $p_{T \min}$ МН пары могут быть за пределами акцептанса детектора

Инклюзивное двухструйное сечение

V. T. Kim and G. B. Pivovarov [[Phys. Rev. D 53 \(1996\) 6](#)]



Инклюзивное сечение рождения пар струй - для всех струй с p_T выше $p_{T \min}$ попарные комбинации струй дают вклад в сечение

“Эксклюзивное” сечение и вето на дополнительные струи

A. H. Mueller and H. Navelet
[\[Nucl. Phys. B 282 \(1987\) 727\]](#)

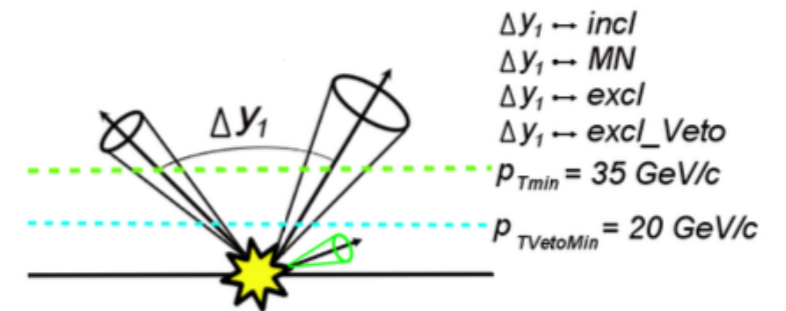
$$\frac{\sigma^{MN}}{\sigma^{Born}}$$

Мюллер-Навелле К-фактор

V. T. Kim and G. B. Pivovarov
[\[Phys. Rev. D 53 \(1996\) 6\]](#)

$$\frac{\sigma^{incl}}{\sigma^{Born}}$$

Инклюзивный К-фактор



σ^{Born} - **НЕ ВОЗМОЖНО ИЗМЕРИТЬ**

$$\frac{\sigma^{MN}}{\sigma^{excl}}$$

Мюллер-Навелле “К-фактор”

σ^{excl} “Эксклюзивное” сечение - события только с одной парой струй с p_T выше p_{Tmin}

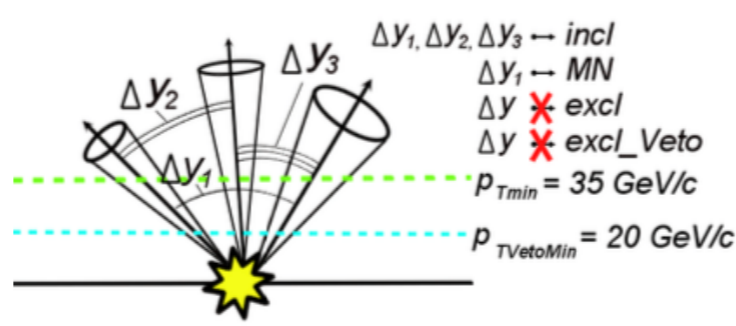
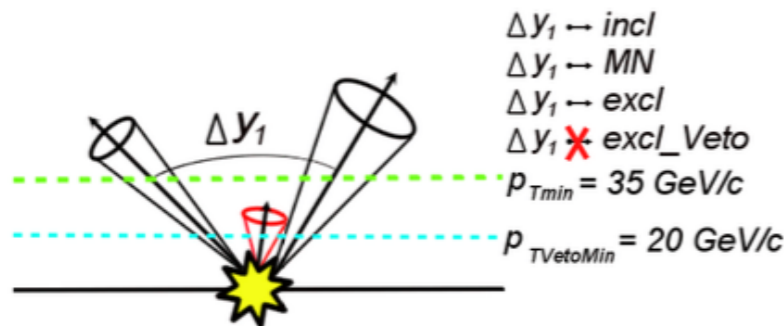
$$\frac{\sigma^{incl}}{\sigma^{excl}}$$

Инклюзивный “К-фактор”

σ_{veto}^{excl} “Эксклюзивное” с вето сечение - “эксклюзивные” события но с вето на дополнительные струи с p_T выше p_{Tveto}

$$\frac{\sigma^{MN}}{\sigma_{veto}^{excl}}$$

Мюллер-Навелле “К-фактор” с вето



$$\frac{\sigma^{incl}}{\sigma_{veto}^{excl}}$$

Инклюзивный “К-фактор” с вето

Азимутальные декорреляции

V. Del Duca and C.R. Schmidt [[Phys. Rev. D 49 \(1994\) 177](#)]

W.J. Stirling [[Nucl. Phys. B 423 \(1994\) 56](#)]

$$\frac{d\hat{\sigma}_{gg}}{dp_{T1}^2 dp_{T2}^2 d\phi} = \frac{C_A^2 \alpha_s^2}{4\pi p_{T1}^3 p_{T2}^3} \sum_n e^{in(\phi-\pi)} \int_0^\infty d\nu e^{\omega(n,\nu)\Delta y} \cos\left(\nu \ln \frac{p_{T1}^2}{p_{T2}^2}\right) \Rightarrow \hat{\sigma}_{gg} \propto e^{A \cdot \Delta y} \text{ при } \Delta y \rightarrow \infty$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\phi} = \frac{1}{2\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\phi) \langle \cos(n\phi) \rangle \right\}$$

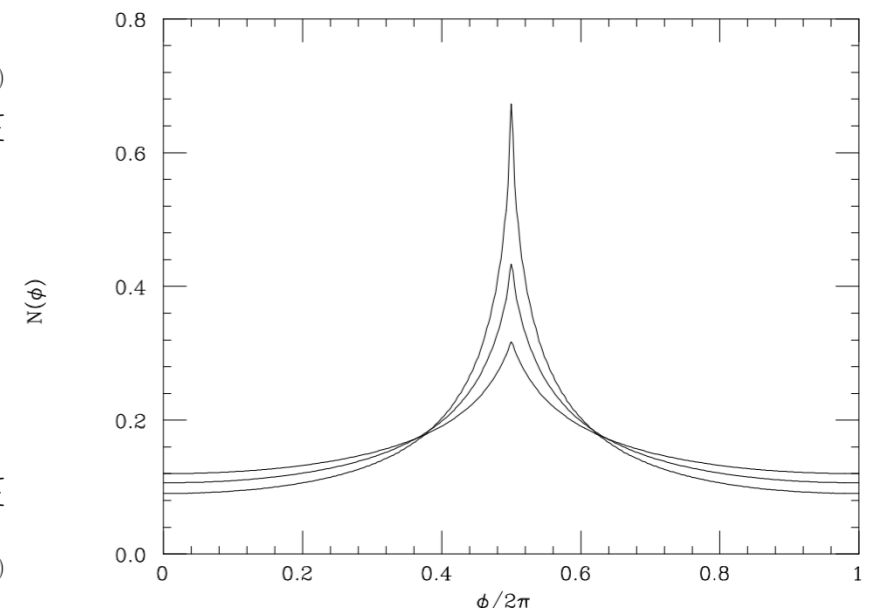
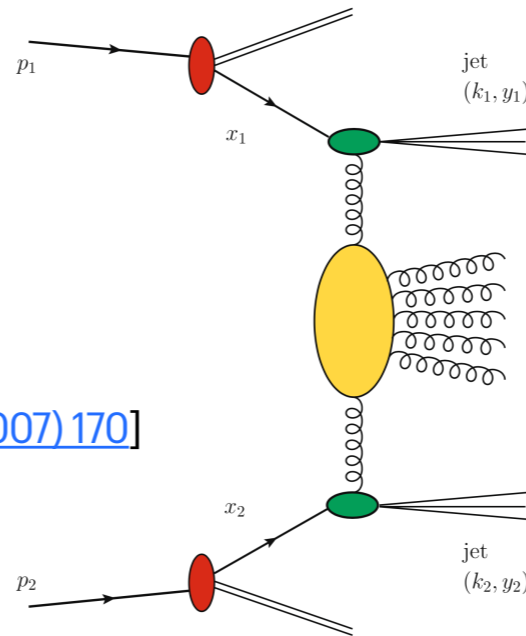
$$C_1 = \langle \cos(\phi) \rangle = \langle \cos(\Delta\phi - \pi) \rangle$$

$$C_2 = \langle \cos(2\phi) \rangle = \langle \cos 2(\Delta\phi - \pi) \rangle$$

$$C_3 = \langle \cos(3\phi) \rangle = \langle \cos 3(\Delta\phi - \pi) \rangle$$

A. Sabio Vera and F. Schwennsen [[Nucl. Phys. B 776 \(2007\) 170](#)]

$$\frac{C_2}{C_1} \qquad \frac{C_3}{C_2}$$



Обмен цветомым синглетом

A.H.Mueller and W.-K.Tang

[[Phys. Lett. B 284, 123 \(1992\)](#)]

R.Enberg, G.Ingelman and L.Motyka

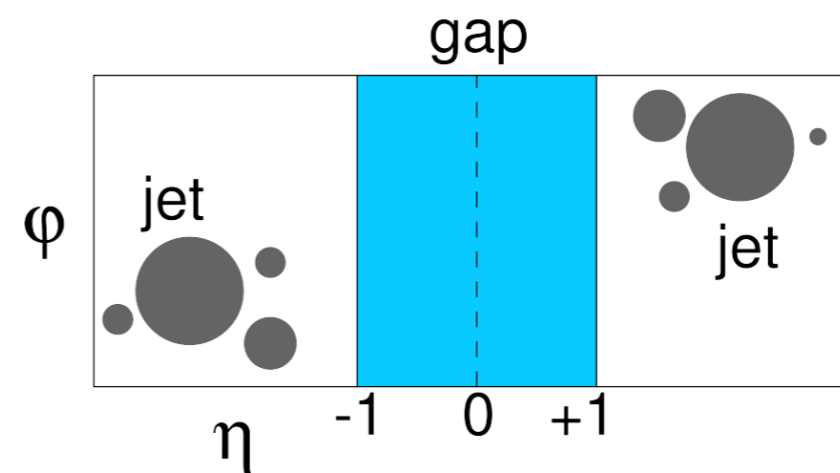
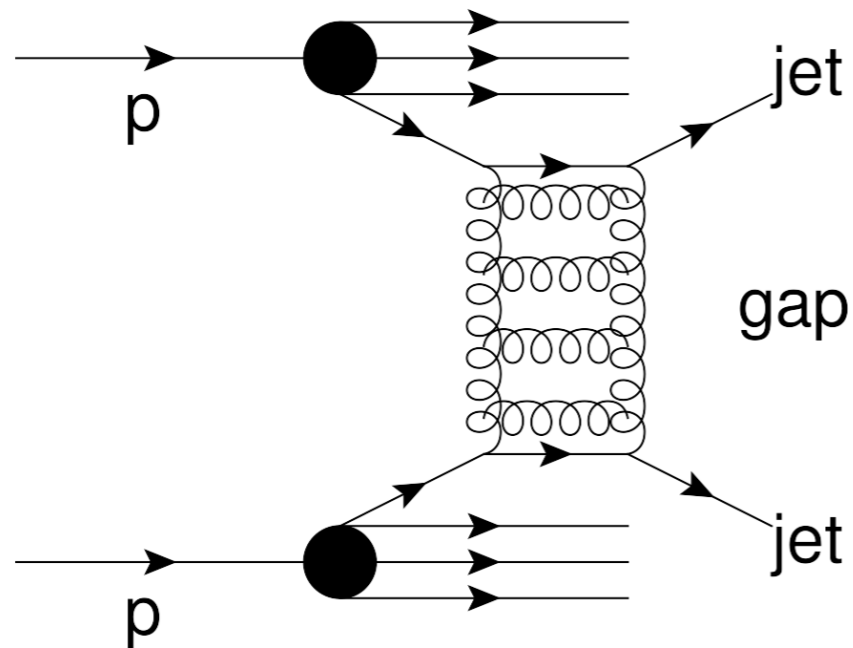
[[Phys. Lett. B 524](#)]

R.Enberg, G.Ingelman and L.Motyka

[[arXiv:1703.10919](#)]

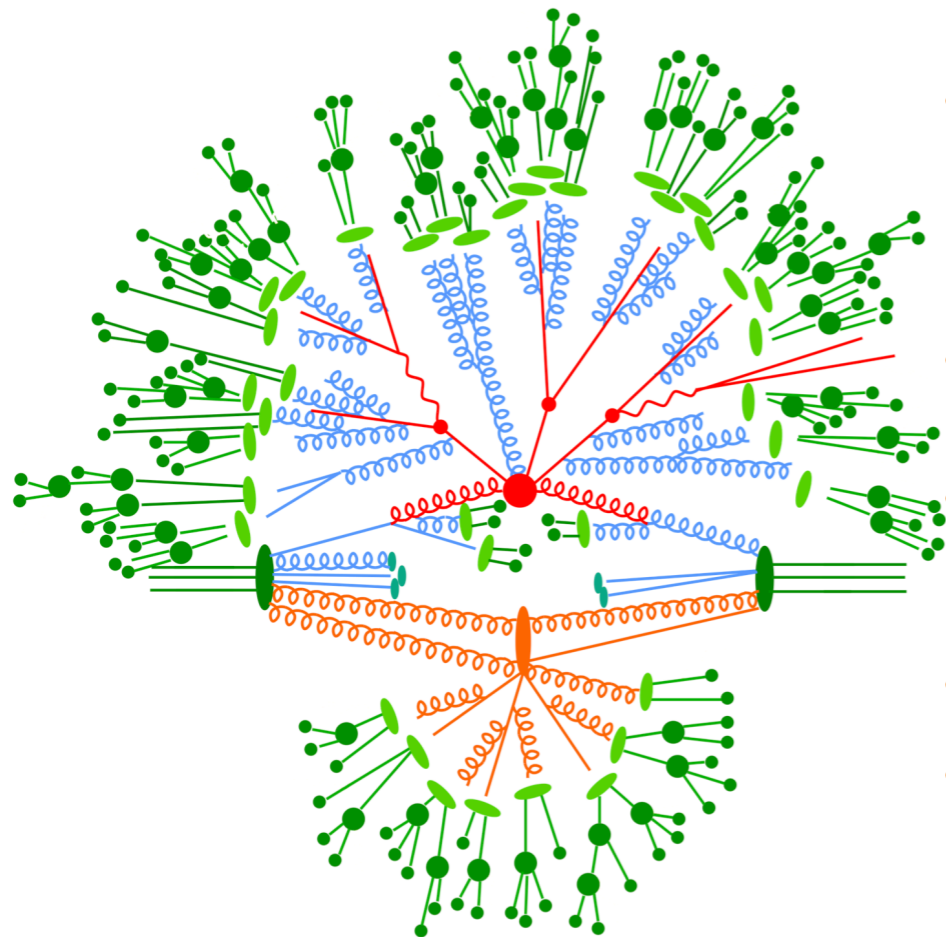
O. Kepka, C. Marquet, and C. Royon

[[Phys. Rev. D 83, 034036 \(2011\)](#)]



Расчеты БФКЛ должны также поправляться оценками вероятности отсутствия адронной множественности в данном быстротном интервале (gap survival probability)

Монте Карло генераторы



ДГЛАП генераторы

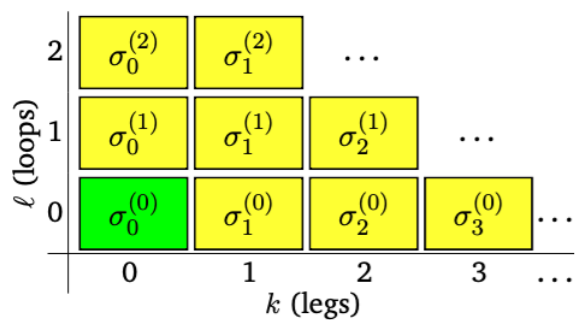
- PYTHIA - LO + LL ДГЛАП + color dipole
- HERWIG - LO + LL ДГЛАП + angular ordering
- POWHEG+PYTHIA - NLO + LL ДГЛАП + color dipole
- POWHEG+HERWIG - NLO + LL ДГЛАП + angular ordering
- SHERPA - LO + N-Real + LL ДГЛАП

Основанные на ДГЛАП генераторы содержат поправки частично учитывающие эффекты БФКЛ, такие как цветовая когерентность, приводящая к угловому упорядочению в партонном каскаде

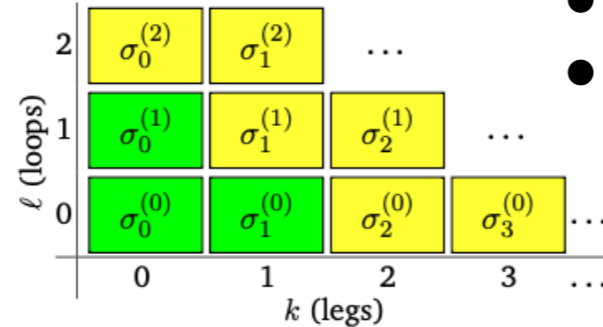
БФКЛ генераторы

- HEJ - LL БФКЛ (партонный уровень)
- HEJ+ARIADNE - LL БФКЛ (адронный уровень)

F @ LO×LL(unitary)



F @ NLO×LL (POWHEG)



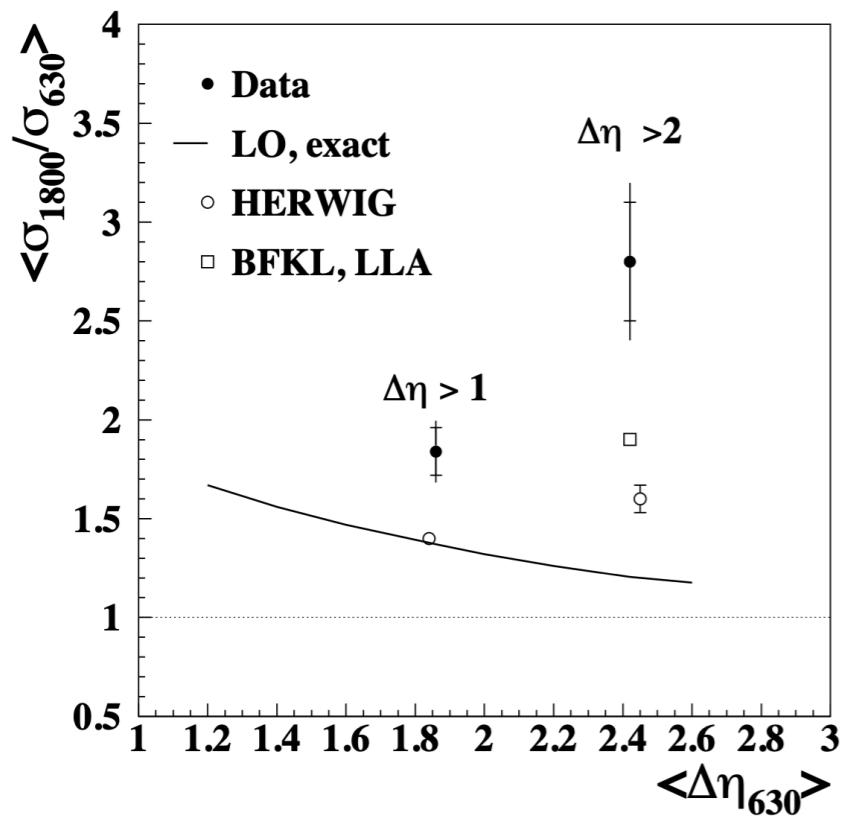
Измерения до LHC (Tevatron D0)

DO [[Phys. Rev. Lett. 84 \(2000\) 5722](#)]

$$\sqrt{s} = 0.63 \text{ and } 1.8 \text{ ТэВ}$$

$$E_T > 20 \text{ ГэВ}$$

Отношение сечений в двухструйных событиях



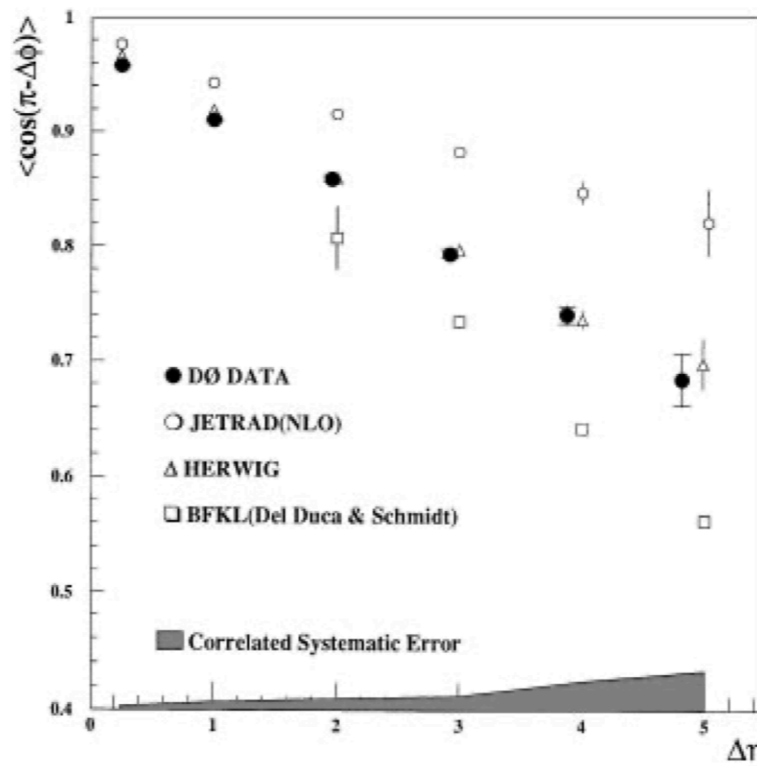
Измерения демонстрируют рост сечений больше чем LL БФКЛ

DO [[Phys. Rev. Lett. 77 \(1996\) 595](#)]

$$\sqrt{s} = 1.8 \text{ ТэВ}$$

$$E_T > 20 \text{ ГэВ}$$

Азимутальные декорреляции двухструйных событий



Наблюдаются эффекты цветовой когерентности

DO [[Phys. Lett. B 440 \(1998\) 189](#)]

$$\sqrt{s} = 1.8 \text{ ТэВ}$$

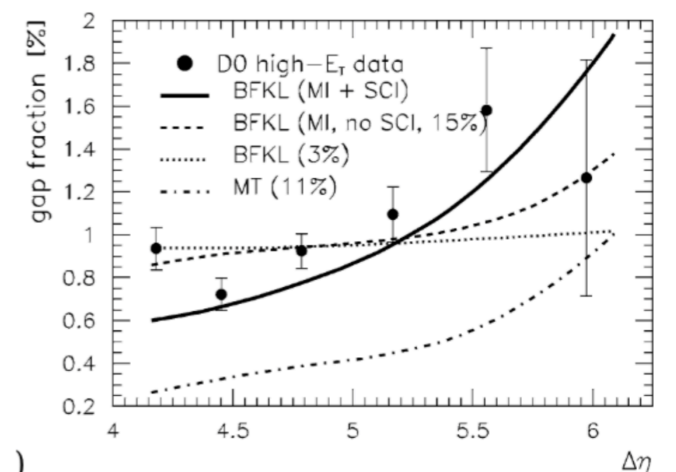
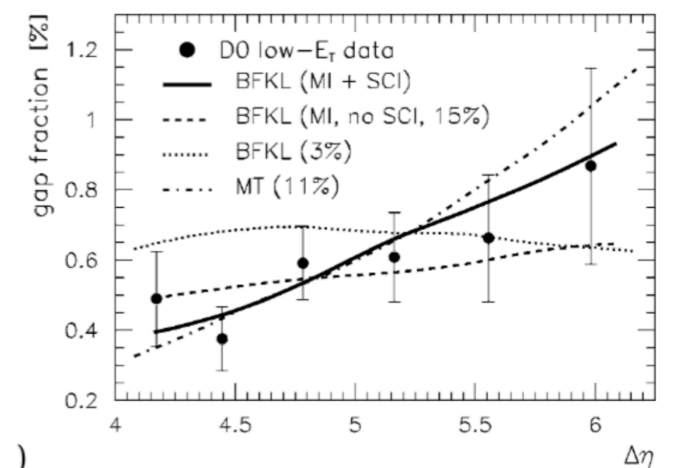
$$\text{low-}E_T: 15 < E_{T2}^{\text{jet}} < 25 \text{ ГэВ};$$

$$\text{high-}E_T: E_{T2}^{\text{jet}} > 30 \text{ ГэВ};$$

Обмен цветовым синглетом в двухструйных событиях

R. Enberg, G. Ingelman, and L. Motyka
BFKL with non-leading correction

[[Phys. Lett. B 524 \(2002\) 273](#)]

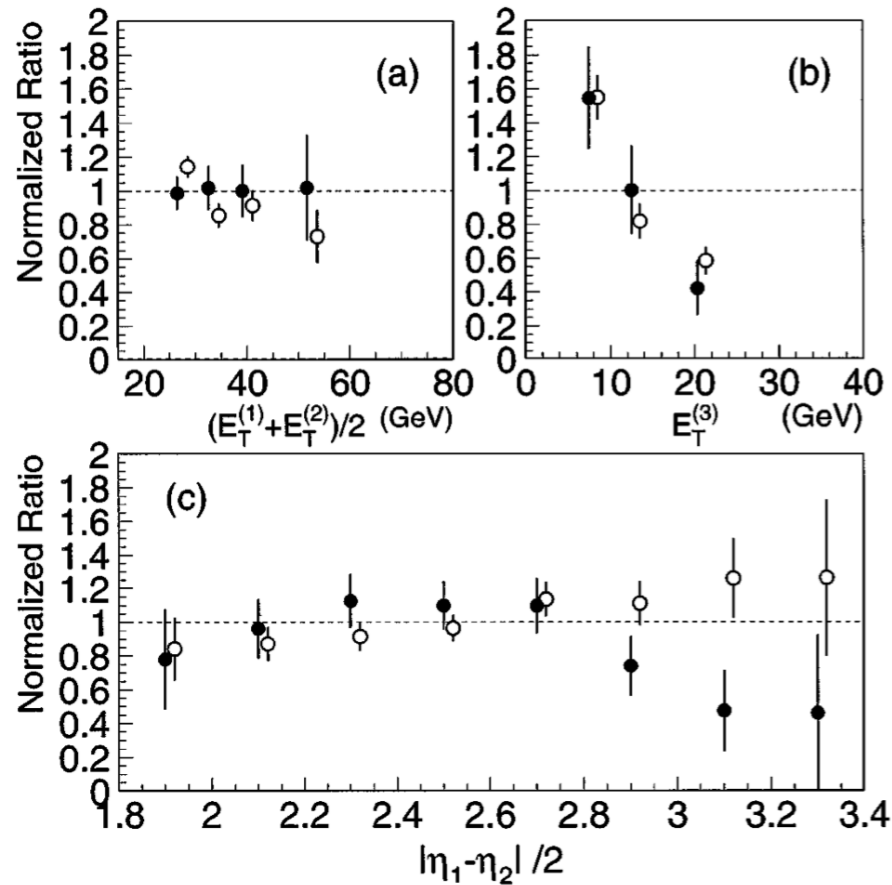


Описывается LL БФКЛ + главные NLL БФКЛ вклады

Измерения до LHC (Tevatron CDF)

CDF [[Phys. Rev. Lett. 80 \(1998\) 1156](#)]

Обмен цветовым синглетом в
двухструйных событиях



$$\begin{aligned} \sqrt{s} &= 1.8 \text{ ТэВ}, \\ E_T^{jet} &> 20 \text{ ГэВ}; \\ 1.8 &< |\eta^{jet}| < 3.5; \\ \eta_1 \eta_2 &< 0 \end{aligned}$$

In the two-gluon model of Ref. [2], the gap to non-gap ratio is predicted to be independent of jet E_T and $\Delta\eta$. Calculations [9] using a model [10] based on the Balitsky-Fadin-Kuraev-Lipatov (BFKL) [11] resummation of a color-singlet gluon ladder exchange also predict a “basically flat” [12] distribution of R versus $\Delta\eta$. Our results are in general agreement with these predictions, but further investigations with higher statistics are needed before firm conclusions can be drawn about the nature of the color-singlet exchange process.

FIG. 4. Normalized (to be unity on average) ratios of gap (solid points) and control sample events (open circles) over all events versus: (a) the average E_T of the two leading jets, (b) the E_T of the third jet, and (c) half the η separation between the two leading jets.

CDF делает вывод, что такое поведение в основном согласуется с БФКЛ предсказаниями, хотя больше статистики необходимо

Измерения на ATLAS (1)

Отношение двухструйных сечений (обратный “К-фактор”) при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ

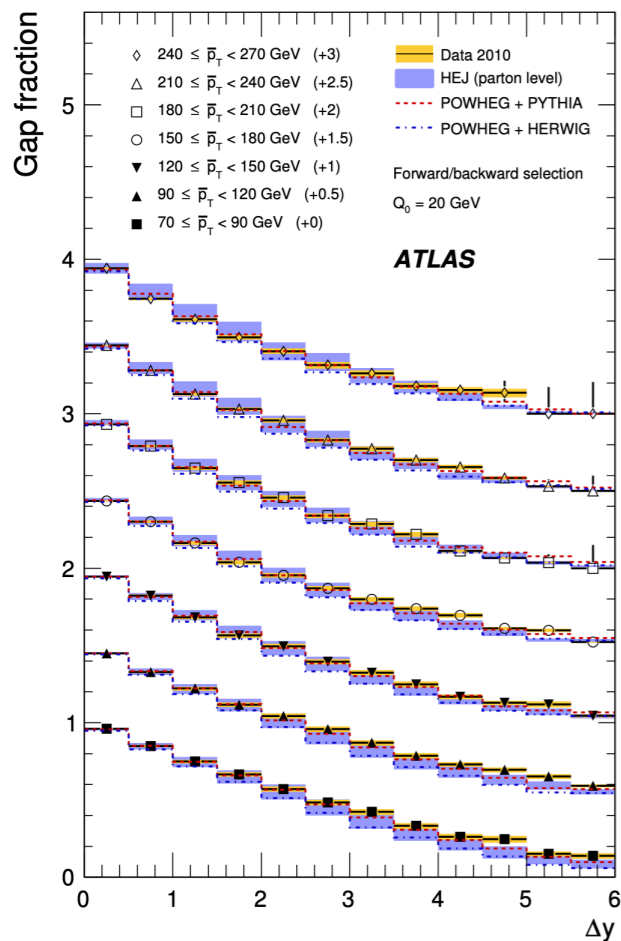
ATLAS [[JHEP 09\(2011\) 053](#)]

$$(p_{T1} + p_{T2})/2 > 70 \text{ ГэВ}$$

$$\Delta y < 6$$

$$Q_0 = 20 \text{ ГэВ}$$

forward/backward отбор



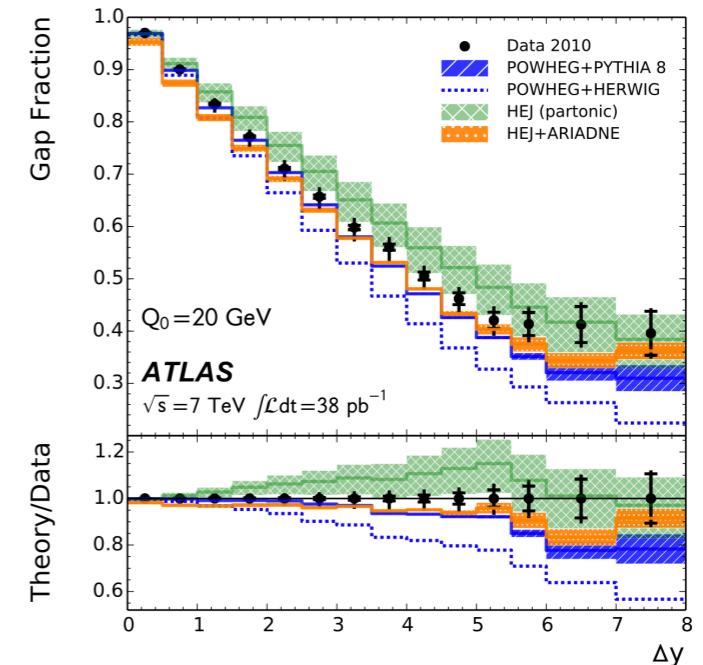
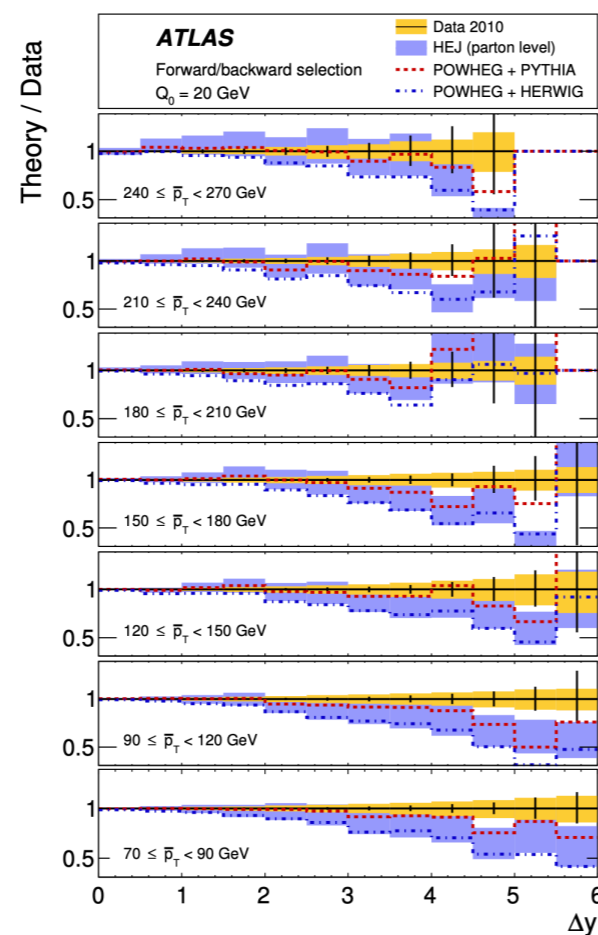
ATLAS [[Eur. Phys. J. C \(2014\) 74:3117](#)]

$$(p_{T1} + p_{T2})/2 > 60 \text{ ГэВ}$$

$$\Delta y < 8$$

$$Q_0 = 20 \text{ ГэВ}$$

leading-pT отбор

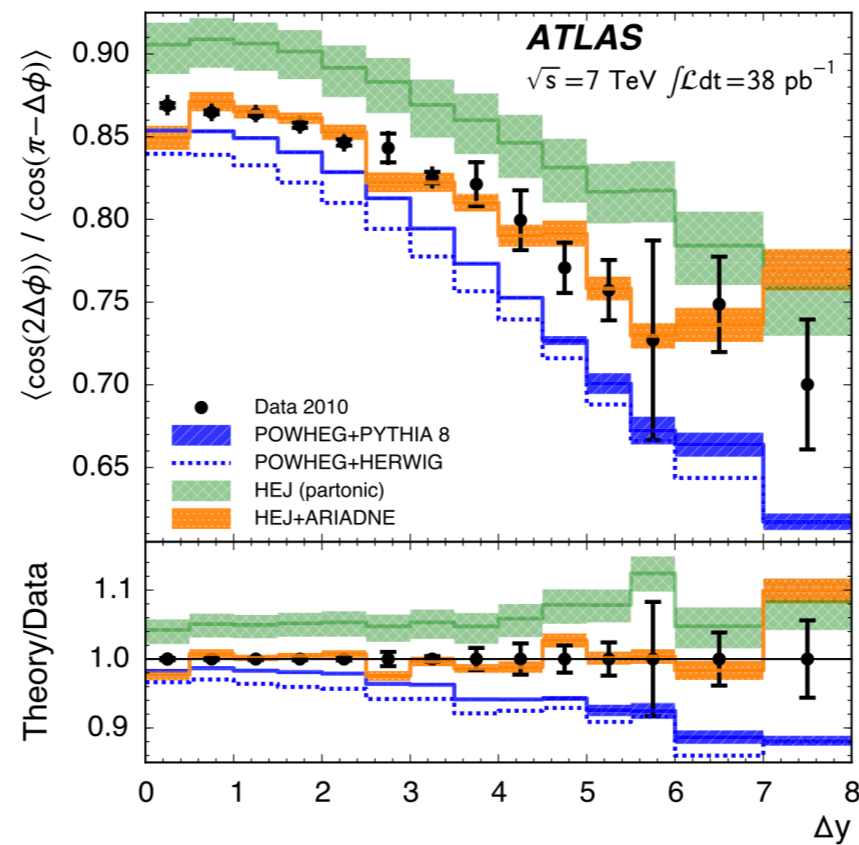
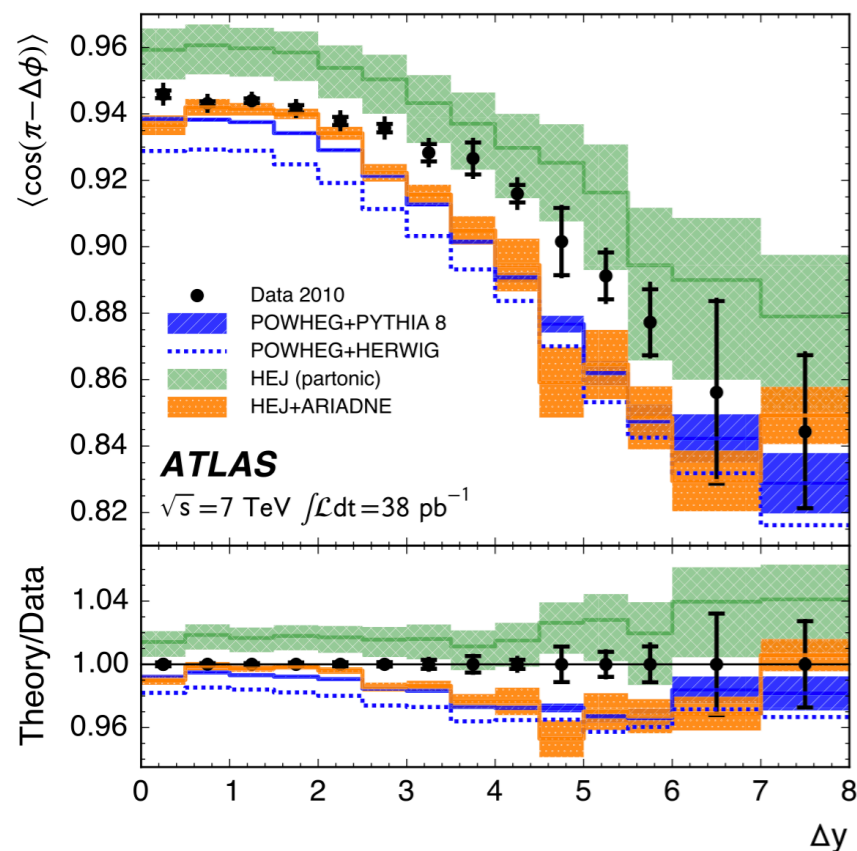


- HEJ+ARIADNE и POWHEG+PYTHIA дают лучшее описание
- HEJ (партонный уровень) - переоценивает
- POWHEG+HERWIG - недооценивает

Измерения на ATLAS (2)

Азимутальные декорреляции в двухструйных событиях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ

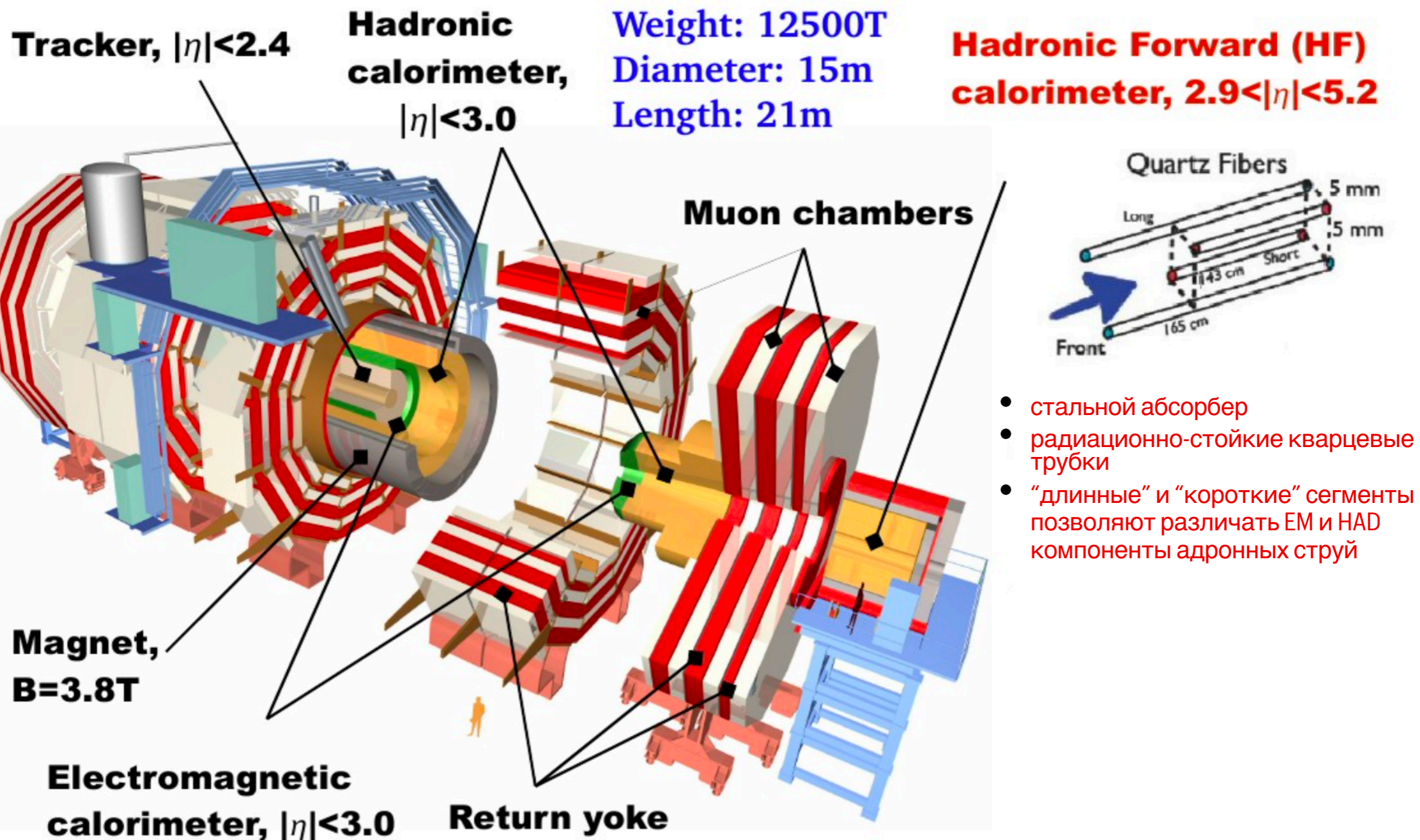
ATLAS [[Eur. Phys. J. C \(2014\) 74:3117](#)]



$(p_{T1} + p_{T2})/2 > 60$ ГэВ
 $\Delta y < 8$
 $Q_0 = 20$ ГэВ

- HEJ+ARIADNE - лучшее описание
- HEJ (партонный уровень) - недооценивает декорреляции
- POWHEG+LL DGLAP - переоценивает декорреляции

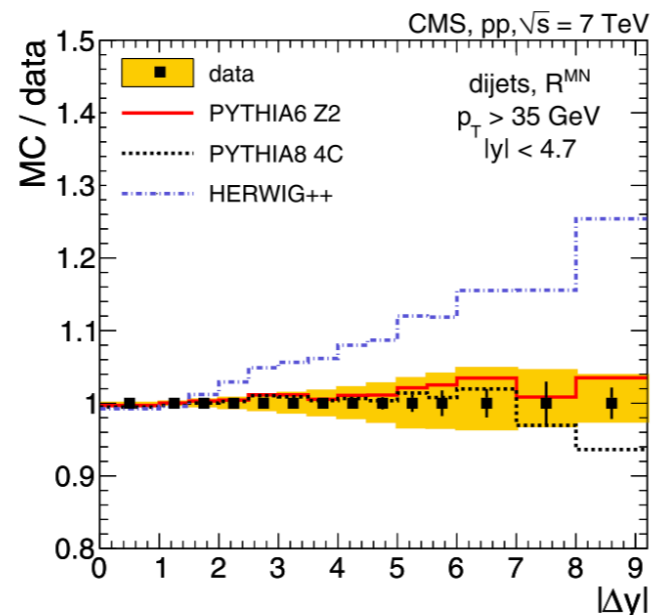
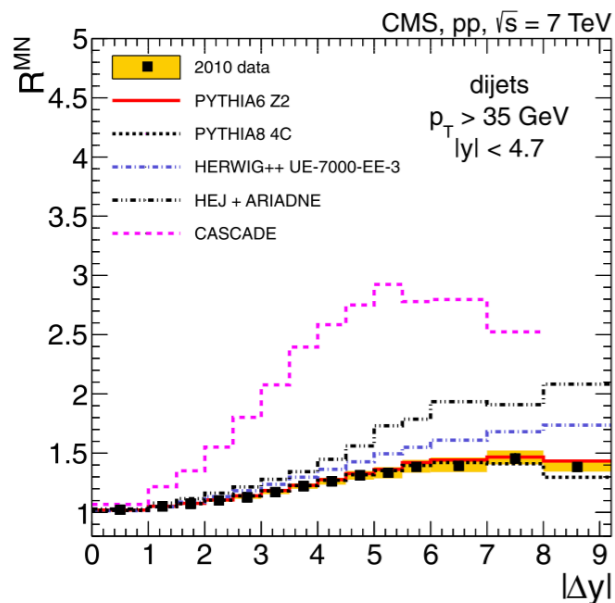
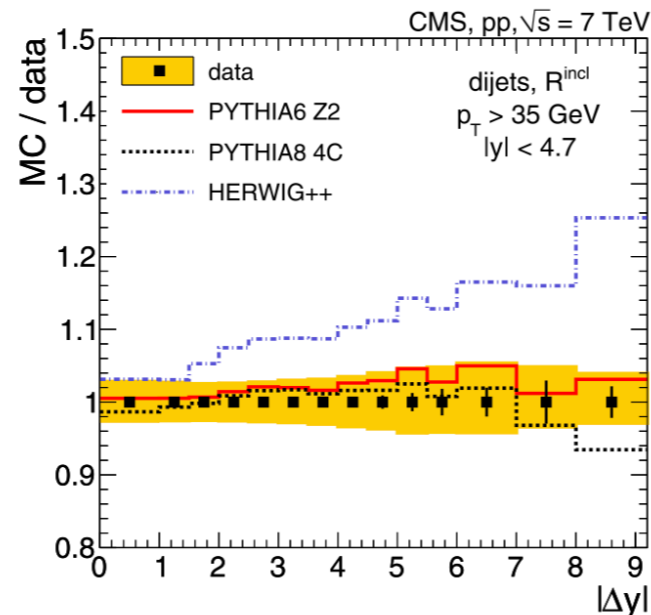
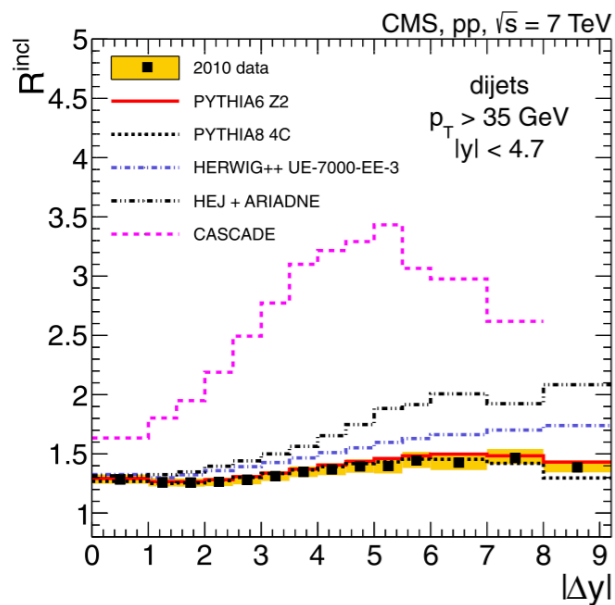
Детектор CMS



Измерения на CMS (1)

Отношение двухструйных сечений (“К-фактор”) при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ

CMS [[Eur. Phys. J. C 72 \(2012\) 2216](#)]



$p_T > 35$ ГэВ
 $\Delta y < 9.4$

- PYTHIA - лучшее описание
- HERWIG - переоценивает рост “К-фактора”
- HEJ + ARIADNE - переоценивает рост
- CASCADE (ДГЛАП с элементами LL БФКЛ) - очень сильно переоценивает

Нет чистого ДГЛАП генератора
PYTHIA и HERWIG - содержат вклады
от БФКЛ, а именно эффекты
цветовой когерентности

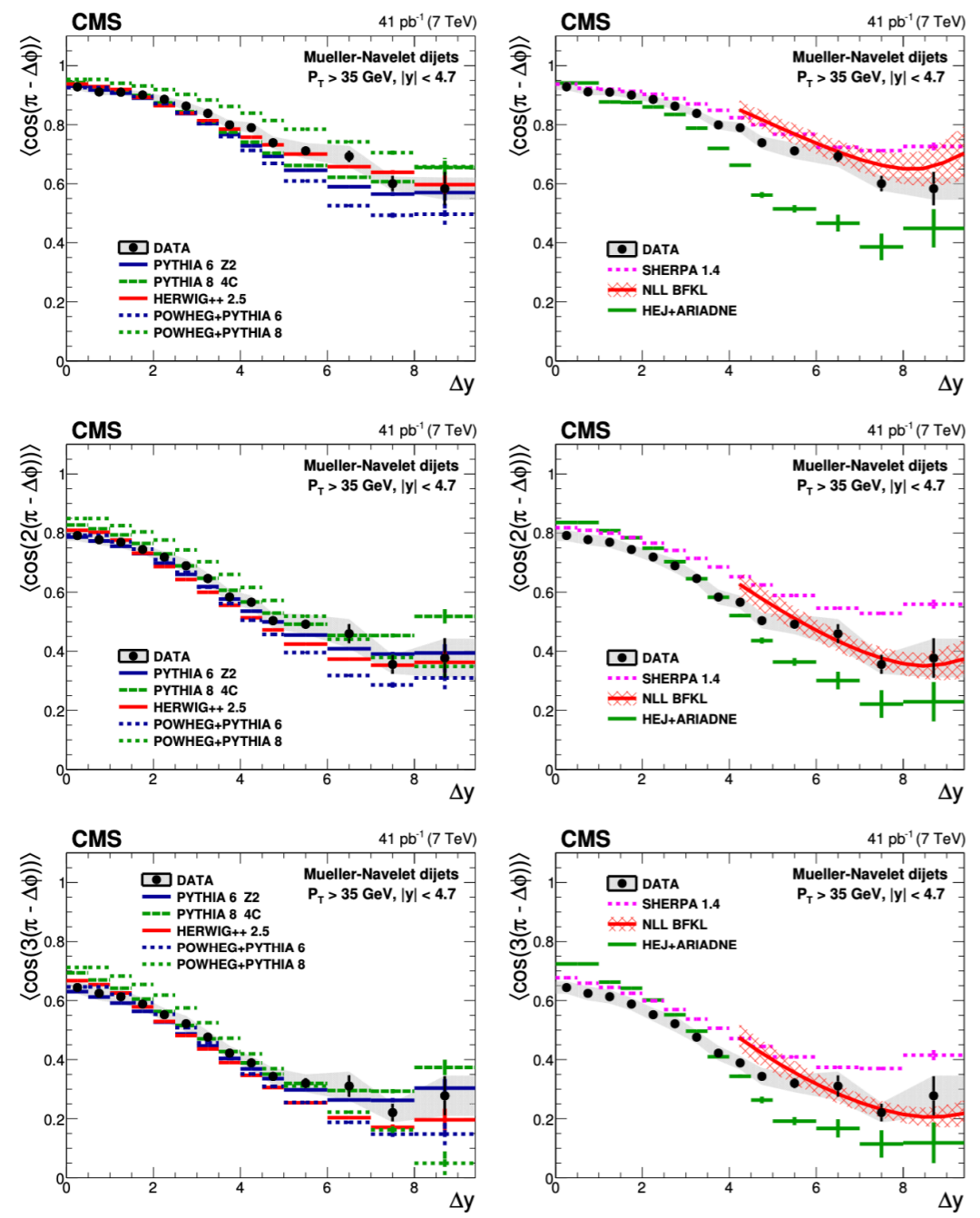
Нет NLL БФКЛ

Измерения на CMS (2)

Двухструйные азимутальные декорреляции при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ

CMS [[JHEP 08 \(2016\) 139](#)]

$p_T > 35$ ГэВ
 $\Delta y < 9.4$

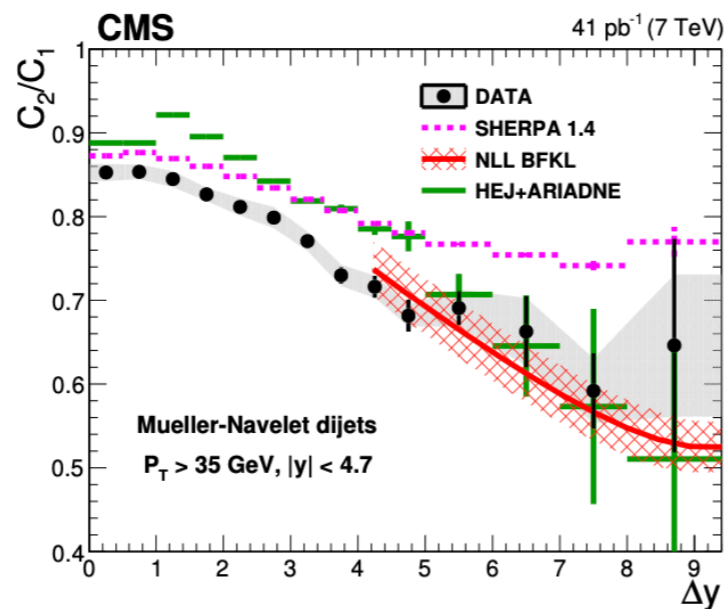
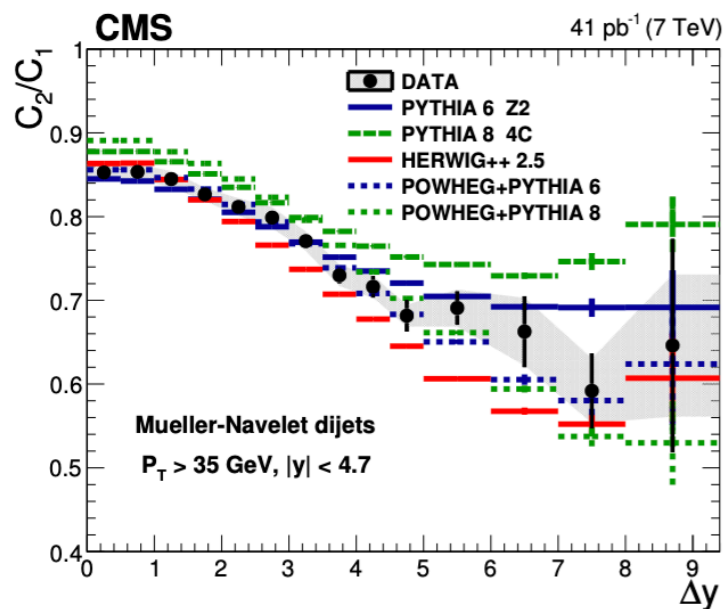


- ДГЛАП генераторы - описывают частично
- SHERPA - недооценивает декорреляции
- HEJ + ARIADNE - переоценивает декорреляции
- NLL БФКЛ - согласуется с данными

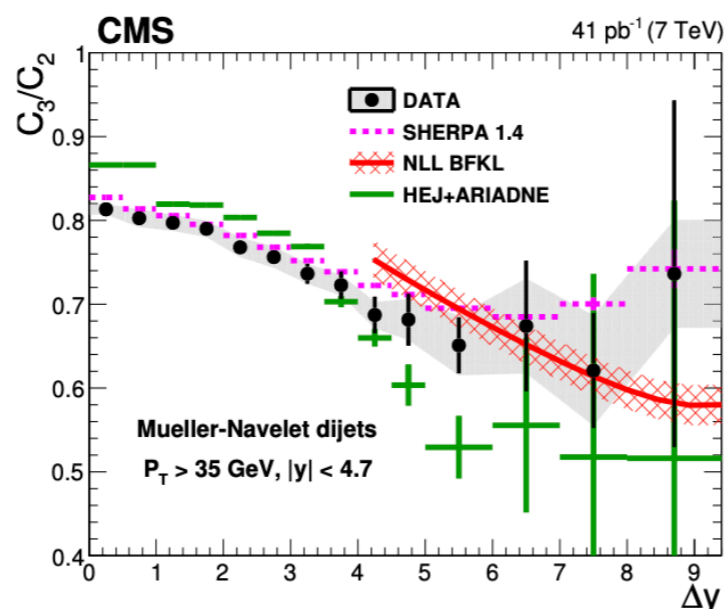
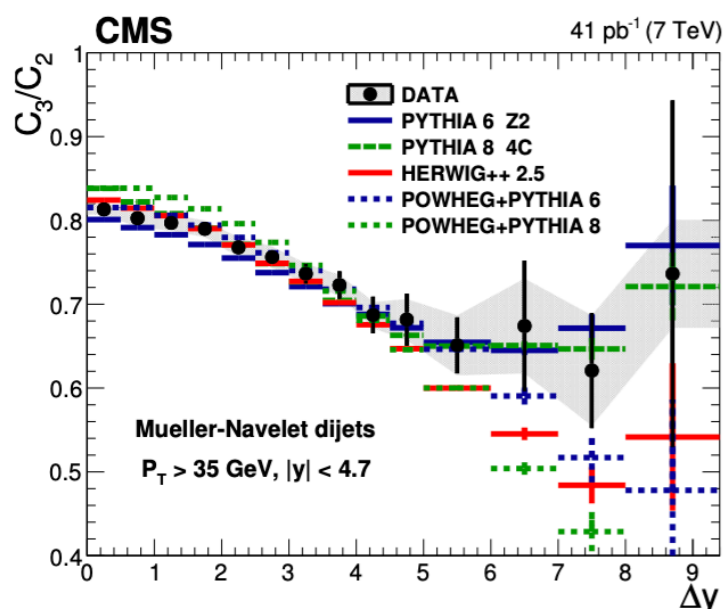
Измерения на CMS (3)

Двухструйные азимутальные декорреляции при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ

CMS [[JHEP 08 \(2016\) 139](#)]



$p_T > 35$ ГэВ
 $\Delta y < 9.4$



- ДГЛАП генераторы - описывают частично
- SHERPA - недооценивает декорреляции
- HEJ + ARIADNE - переоценивает декорреляции
- NLL БФКЛ - согласуется с данными

Измерения на CMS (4)

CMS [[Phys. Rev. D 104 \(2021\) 032009](#)]

Обмен цветовым синглетом в двухструйных событиях при $\sqrt{s} = 7$ и 13 ТэВ

CMS [[Eur. Phys. J. C 78 \(2018\) 242](#)]

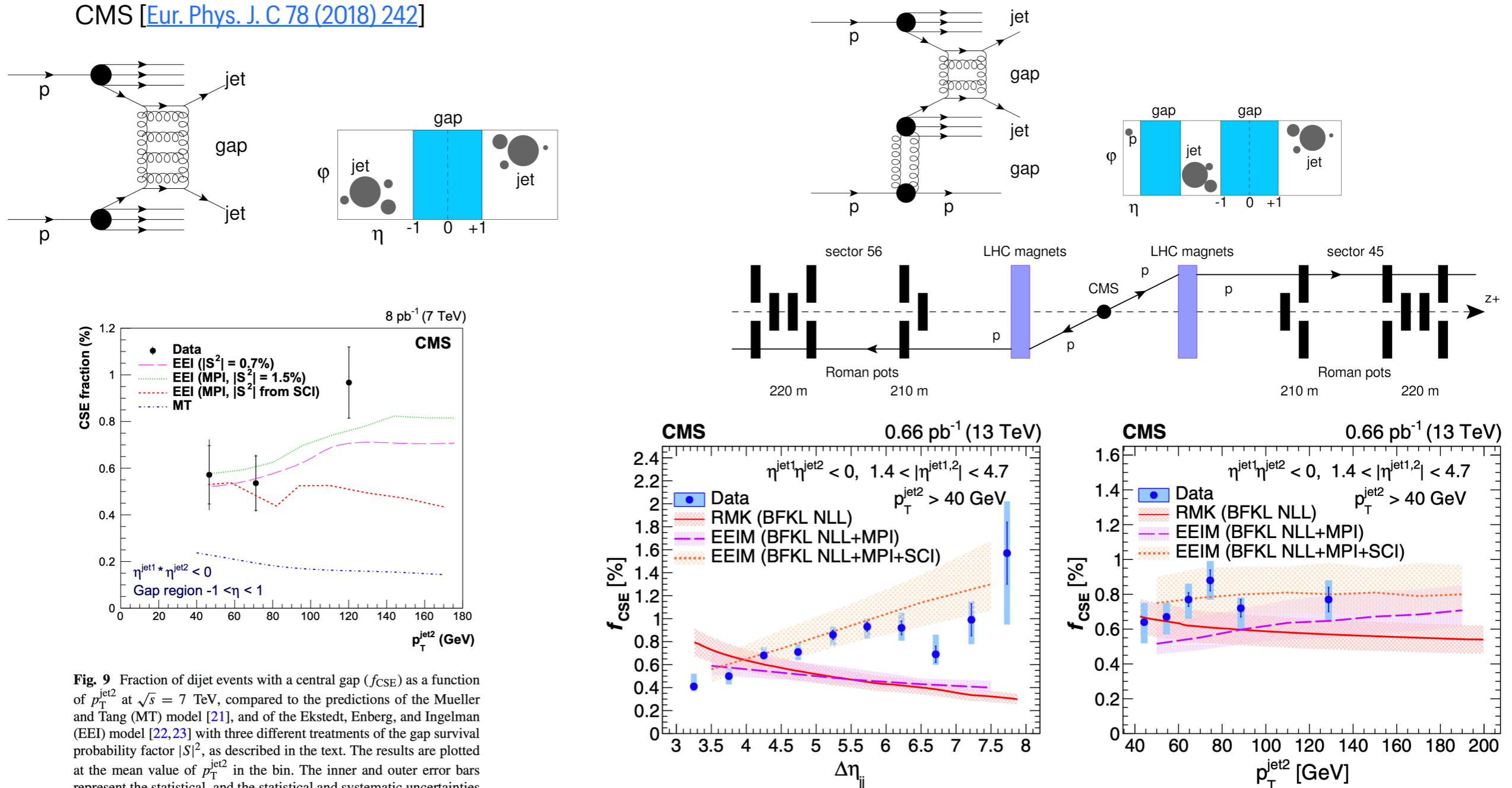


Fig. 9 Fraction of dijet events with a central gap (f_{CSE}) as a function of $p_T^{\text{jet}2}$ at $\sqrt{s} = 7$ TeV, compared to the predictions of the Mueller and Tang (MT) model [21], and of the Ekstedt, Enberg, and Ingelman (EEI) model [22,23] with three different treatments of the gap survival probability factor $|S|^2$, as described in the text. The results are plotted at the mean value of $p_T^{\text{jet}2}$ in the bin. The inner and outer error bars represent the statistical, and the statistical and systematic uncertainties added in quadrature, respectively



Новые измерения на CMS при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ

σ^{MN} Мюллер-Навеле сечение

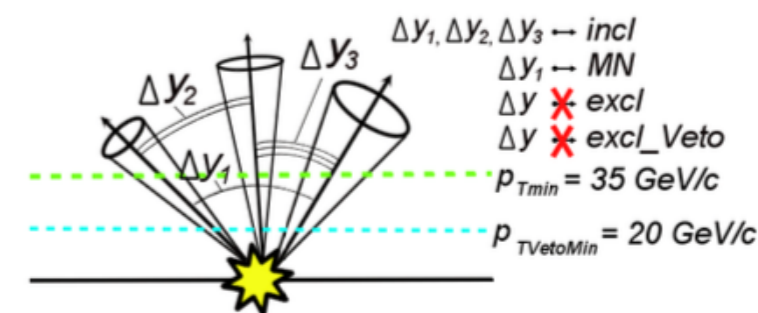
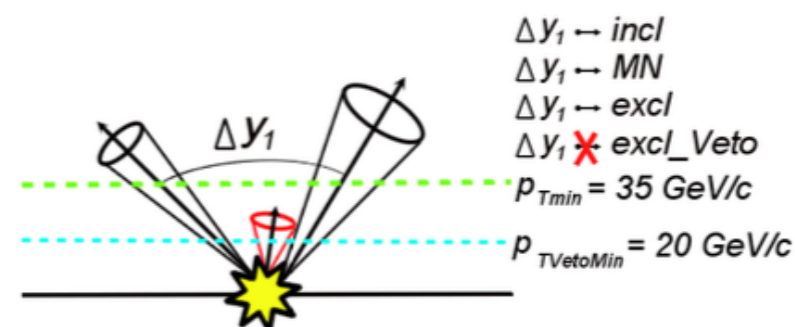
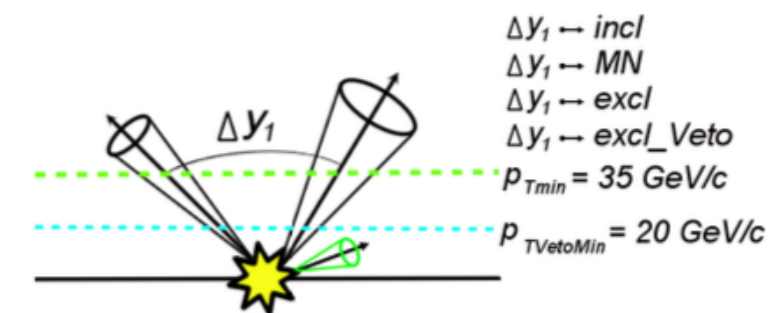
σ^{incl} Инклюзивное сечение

$R^{MN} = \frac{\sigma^{MN}}{\sigma^{excl}}$ Мюллер-Навеле "К-фактор"

$R^{incl} = \frac{\sigma^{incl}}{\sigma^{excl}}$ Инклюзивный "К-фактор"

$R_{veto}^{MN} = \frac{\sigma^{MN}}{\sigma_{veto}^{excl}}$ Мюллер-Навеле "К-фактор" с вето

$R_{veto}^{incl} = \frac{\sigma^{incl}}{\sigma_{veto}^{excl}}$ Инклюзивный "К-фактор" с вето





Измерения на CMS (5)

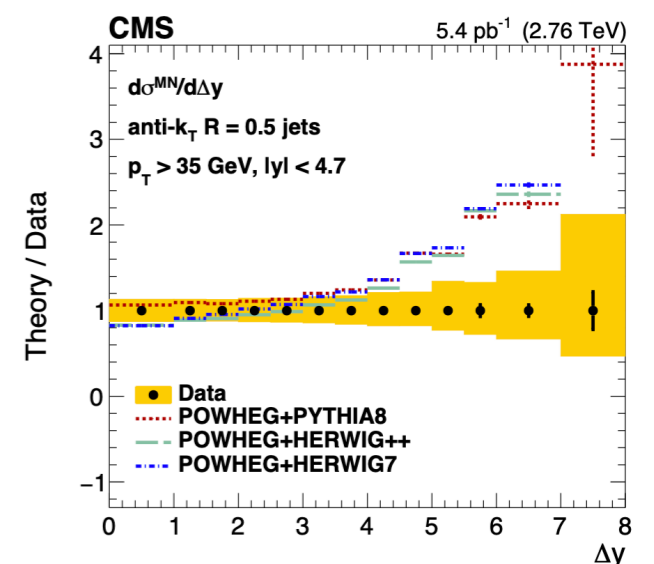
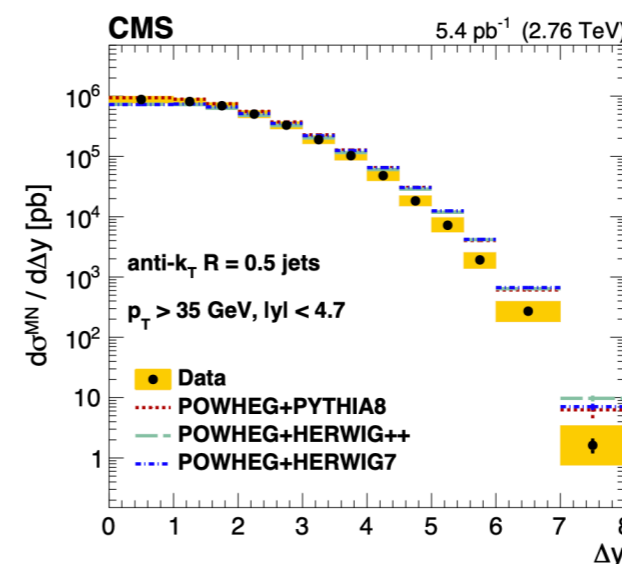
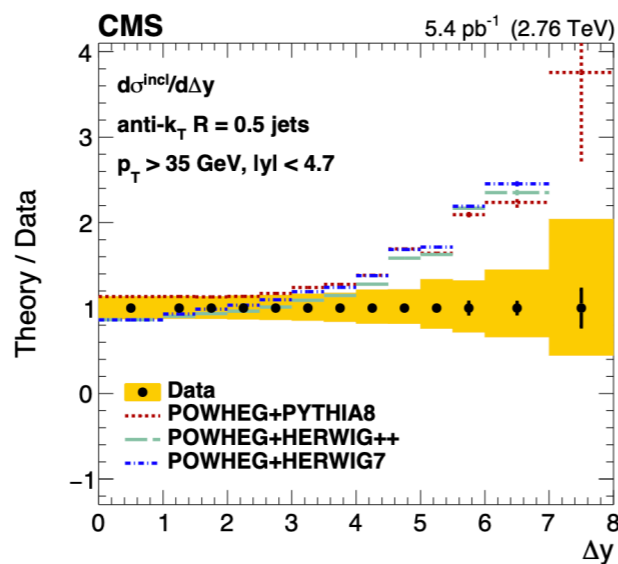
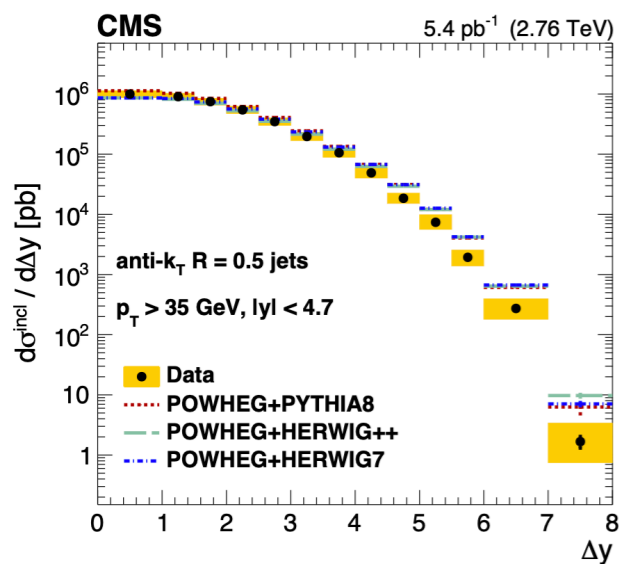
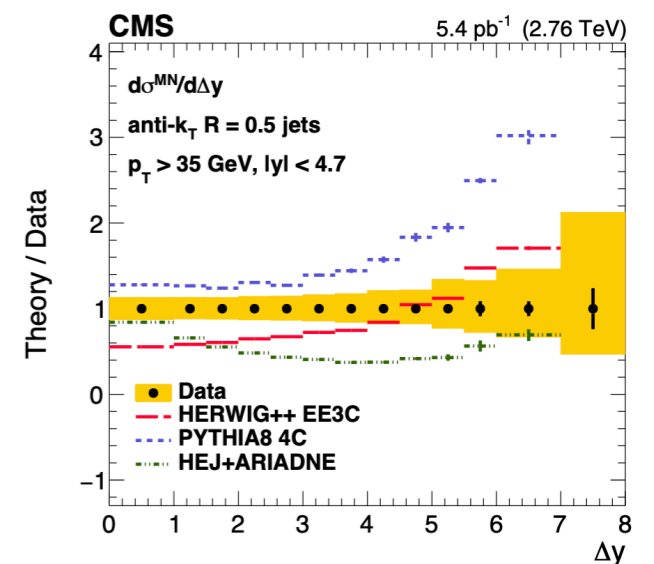
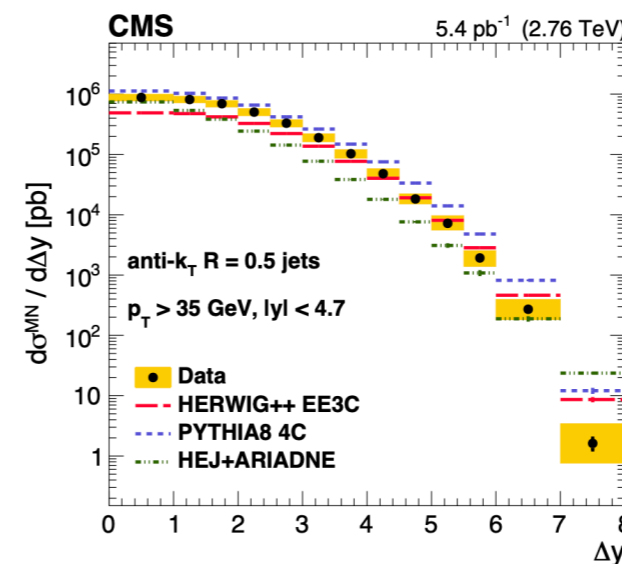
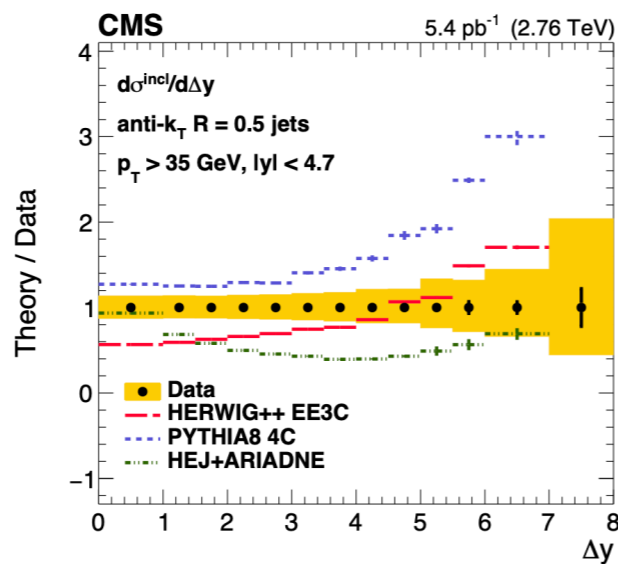
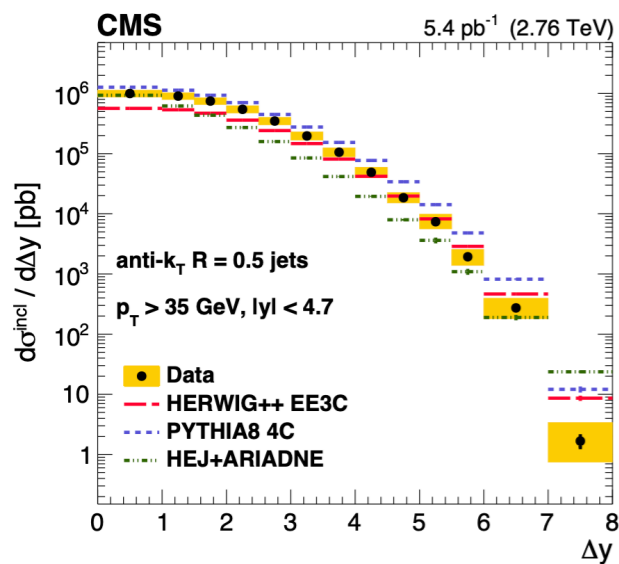
Двухструйные сечения и их отношения (К-фактор) при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ

$p_T > 35$ ГэВ
 $\Delta y < 9.4$

CMS [[arXiv:2111.04605](https://arxiv.org/abs/2111.04605)]

$$d\sigma^{incl}/d\Delta y$$

$$d\sigma^{MN}/d\Delta y$$





Измерения на CMS (6)

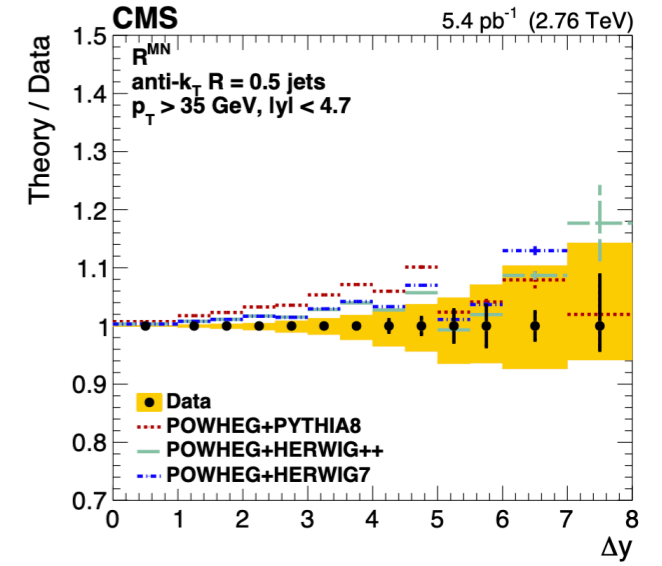
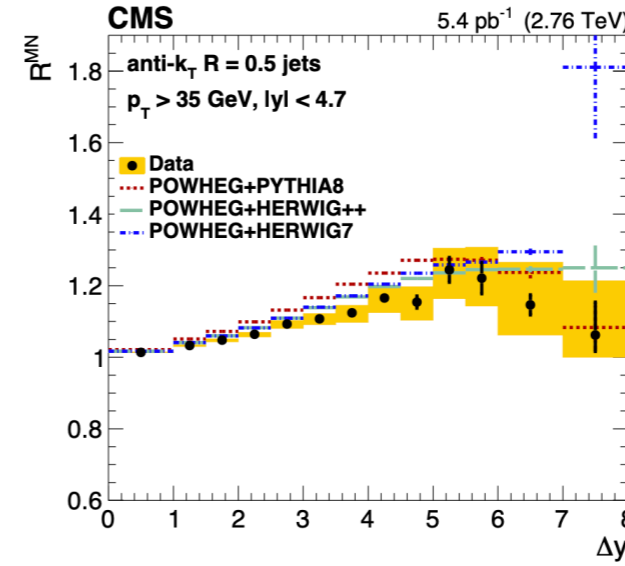
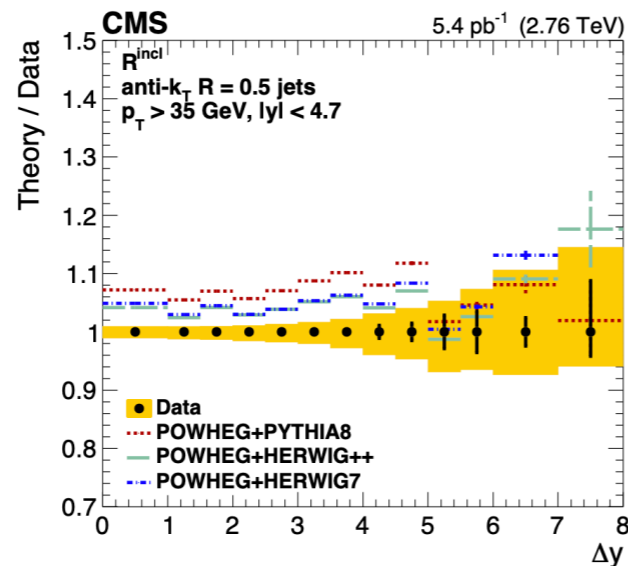
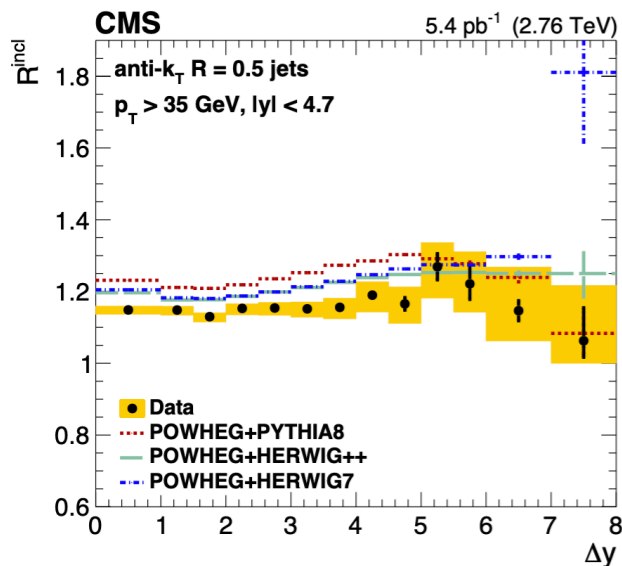
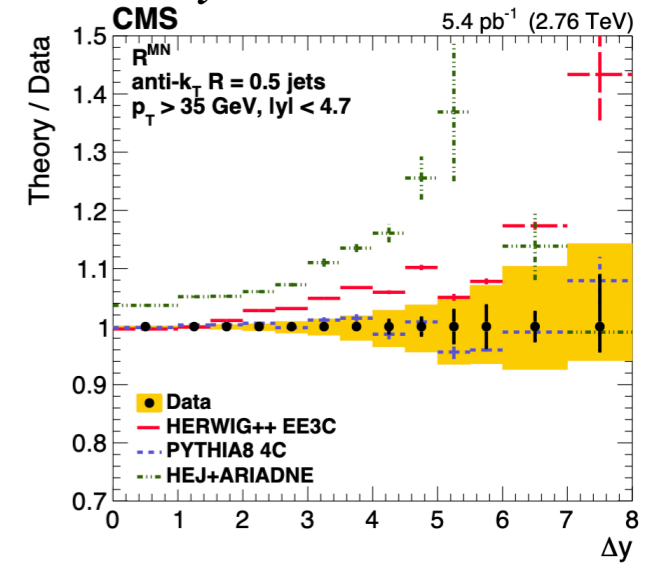
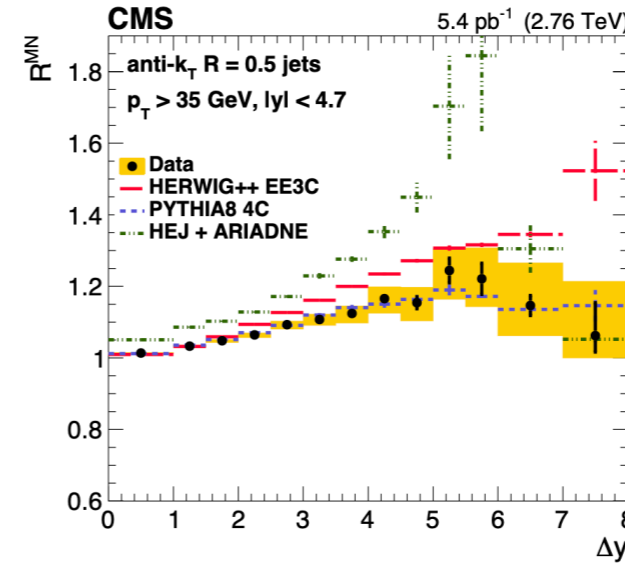
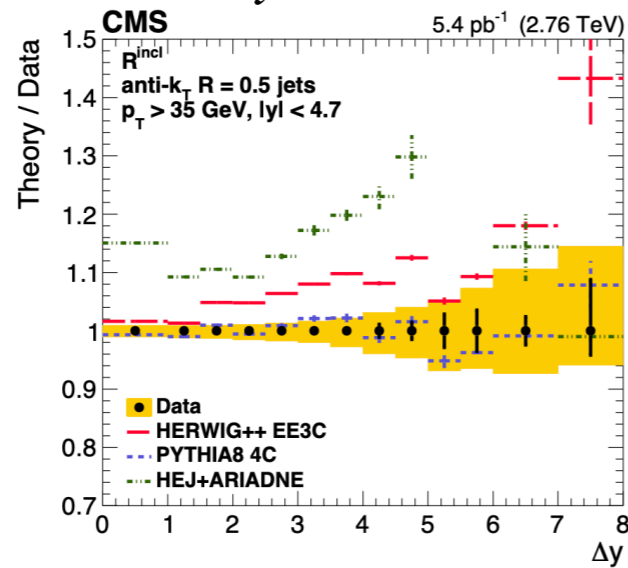
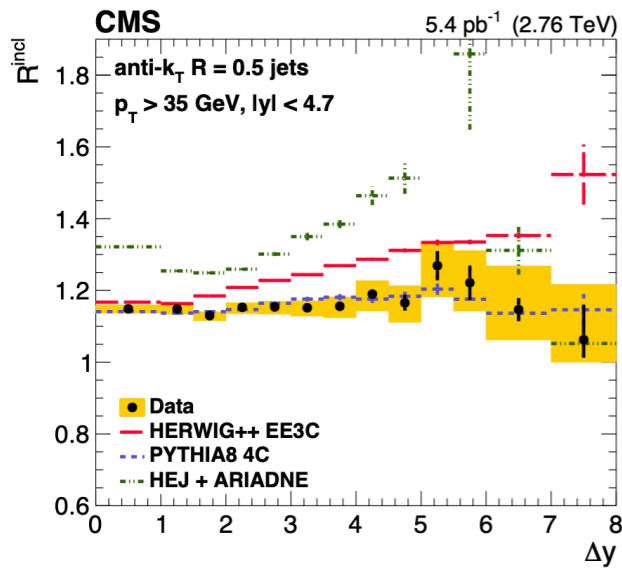
Двухструйные сечения и их отношения (К-фактор) при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ

CMS [[arXiv:2111.04605](https://arxiv.org/abs/2111.04605)]

$$R^{incl} = \frac{d\sigma^{incl}/d\Delta y}{d\sigma^{excl}/d\Delta y}$$

$$p_T > 35 \text{ ГэВ} \\ \Delta y < 9.4$$

$$R^{MN} = \frac{d\sigma^{MN}/d\Delta y}{d\sigma^{excl}/d\Delta y}$$





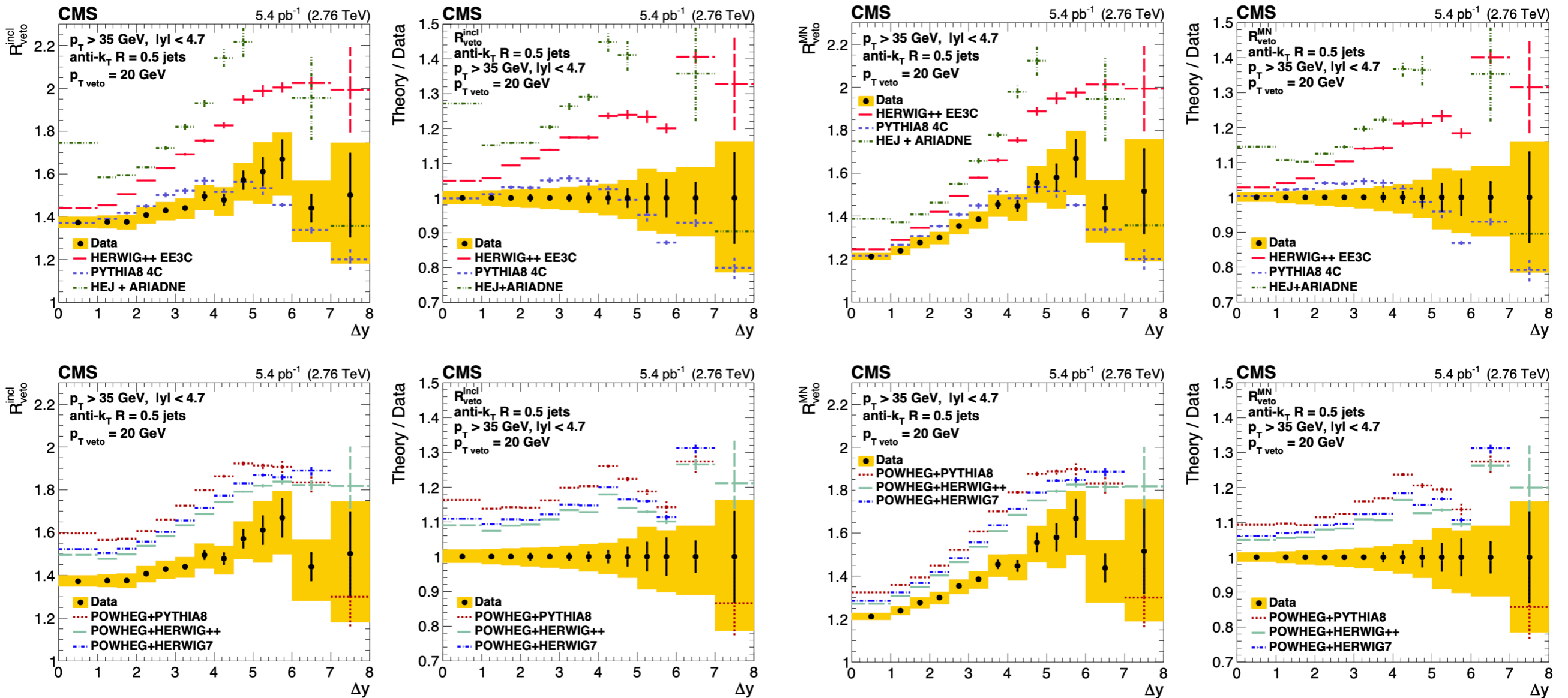
Измерения на CMS (7)

Двухструйные сечения и их отношения (К-фактор) при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ

CMS [[arXiv:2111.04605](https://arxiv.org/abs/2111.04605)]

$$R_{veto}^{incl} = \frac{d\sigma^{incl}/d\Delta y}{d\sigma_{veto}^{excl}/d\Delta y} \quad p_T > 35 \text{ ГэВ} \\ \Delta y < 9.4$$

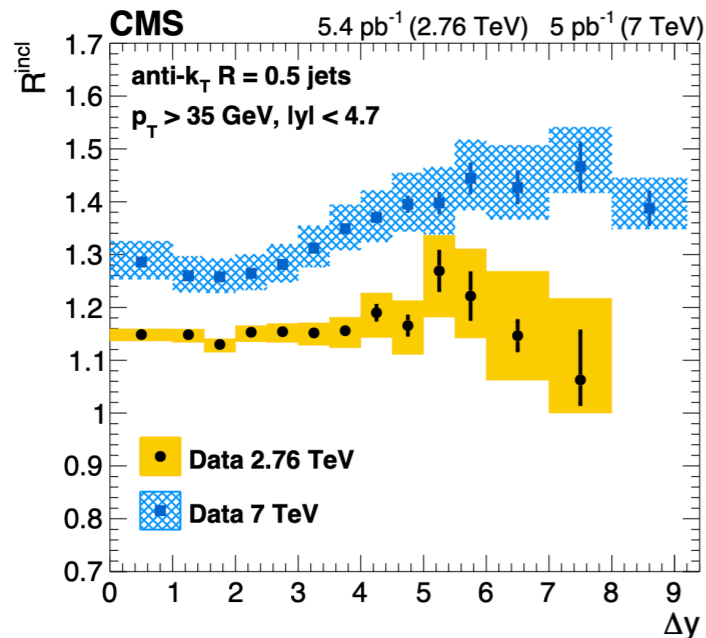
$$R_{veto}^{MN} = \frac{d\sigma^{MN}/d\Delta y}{d\sigma_{veto}^{excl}/d\Delta y}$$



Измерения на CMS (8)

Двухструйные сечения и их отношения (К-фактор) при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ

CMS [[arXiv:2111.04605](https://arxiv.org/abs/2111.04605)]

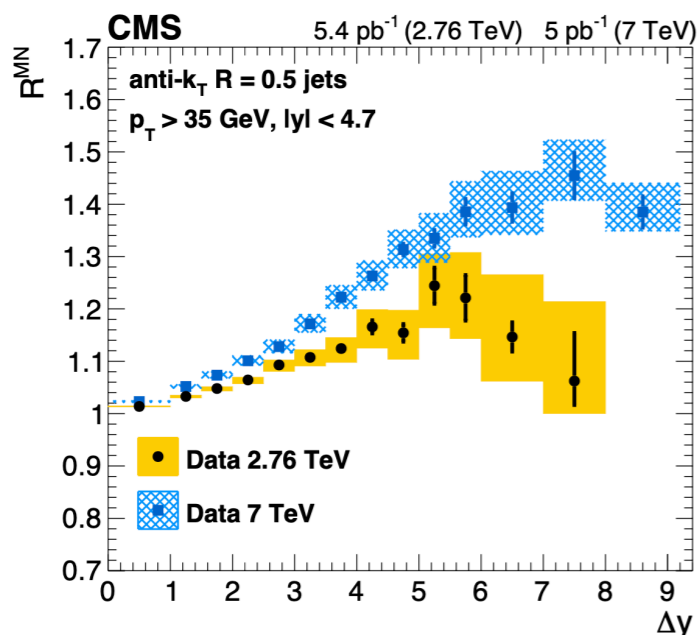


$$p_T > 35 \text{ ГэВ}$$
$$\Delta y < 9.4$$

- Ни один ДГЛАП генератор не описывает все наблюдаемые 2.76 ТэВ
- HEJ+ARIANDE - переоценивает рост “К-фактора”
- PYTHIA - дает лучшее описание “К-фактора”, но наблюдается отклонение для “К-фактора” с вето

Имеются указания на наличие эффектов БФКЛ

- Необходимы NLL БФКЛ расчеты для “К-фактора”
- Необходимы ДГЛАП предсказания без поправок учитывающих эффекты БФКЛ
- Необходимы измерения при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (“К-фактор” и азимутальные декорреляции в процессе)



Выводы

- Имеются указания на наличие БФКЛ эффектов в отношениях двухструйных сечений и азимутальных декорреляциях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ и получены новые указания в двухструйных отношениях сечений при $\sqrt{s} = 2.76$ ТэВ

Для более значимых выводов о наличии БФКЛ эффектов:

- Необходимы предсказания ДГЛАП без цветовой когерентности (без частичного учета эффектов БФКЛ)
- Необходимы NLL БФКЛ расчеты (аналитические и/или Монте Карло)
- Необходимы измерения при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ
- Поиск новых наблюдаемых