

Недавние экспериментальные  
результаты по жёстким  
процессам  
обмена цветовым синглетом в КХД  
в *pp*-соударениях на БАК

Вадим Орешкин

НИЦ КИ - ПИЯФ

семинар ОФВЭ  
17.05.2022

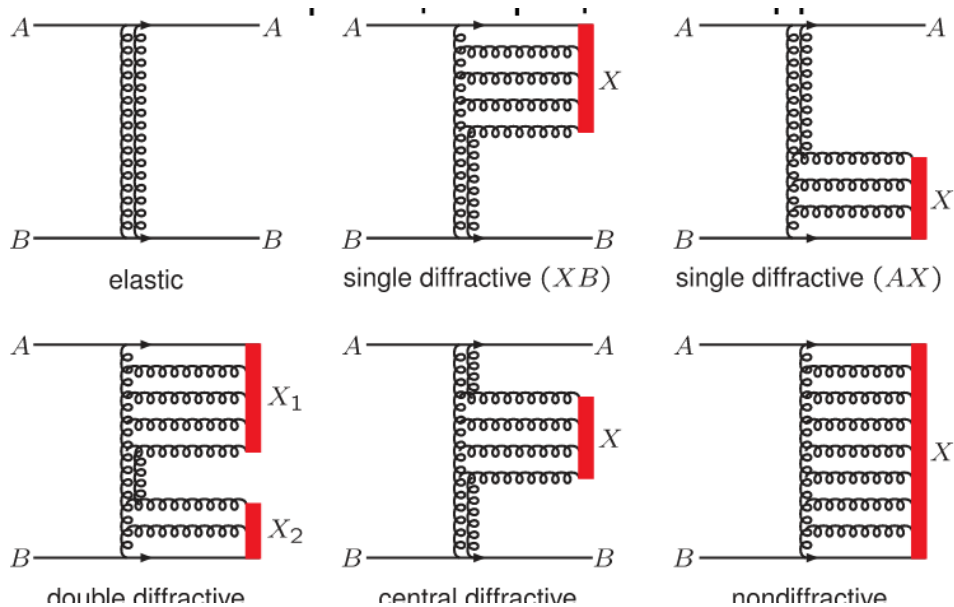
# План доклада

1. Введение: бесцветные обмены в КХД
2. двухструйные процессы с провалами по быстротам:
  - HERA: H1, ZEUS
  - Tevatron: CDF, D0
  - LHC: CMS+TOTEM – недавние результаты
3. Заключение

# Обмен цветовым синглетом

## обмен цветовым синглетом в КХД:

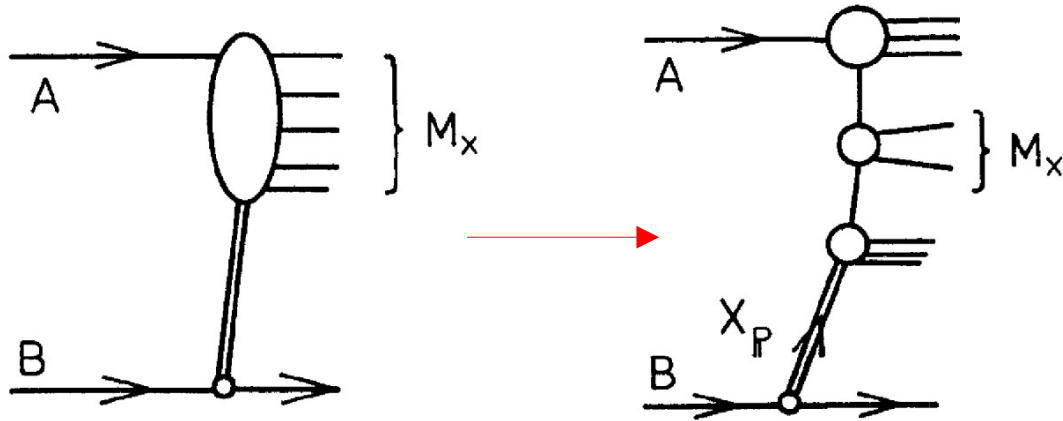
Классификация процессов КХД по наличию  
по наличию цветового синглета:



- экспериментальная сигнатура
  - провал в распределениях частиц по (псевдо)быстротам  $\eta$  (rapidity gap)
  - Неэкспоненциально подавленный как ф-ция  $\Delta\eta$
- обеспечивается обменом бесцветным объектом, полюсом Редже с кв. числами вакуума (помероном)
- Теория полюсов Редже не даёт ответа о природе померона

# Жёсткая дифракция: предположение Ингельмана и Шлейна (1985)

- факторизация жёсткой дифракции
- партонная структура померона



$$\beta_{PI}(t) = \beta_{\bar{P}I}(t) \simeq 4.6 \text{ mb}^{1/2} e^{1.9 \text{ GeV}^{-2} t}$$

$$\alpha(t) \simeq 1.08 + 0.25 \text{ GeV}^{-2} t.$$

$$f_{BIP}(x_{IP}, t) = \frac{1}{8\pi^2} |\beta_{BIP}(t)|^2 x_{IP}^{1-2\alpha(t)}$$

Сечение жёсткой дифракции:

Потоковый фактор померона  
(интерп-я: плотность вероятности)

$$\frac{d\sigma}{dt dx_{IP}} = f_{BIP}(x_{IP}, t) \sigma_{tot}(AIP) \quad 4$$

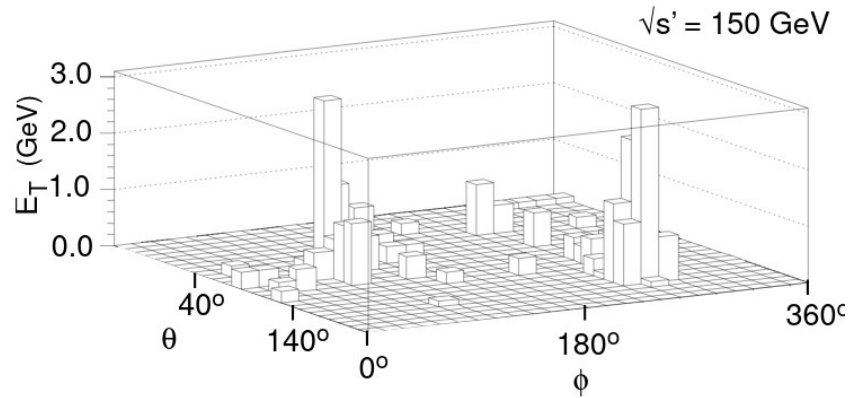
# Экспериментальное подтверждение гипотезы Ингльельмана Шлейна о жёсткой дифракции

- Коллаборация UA8 обнаружила события с дифрагированным протоном и парой жёстких струй (1988, 1992)



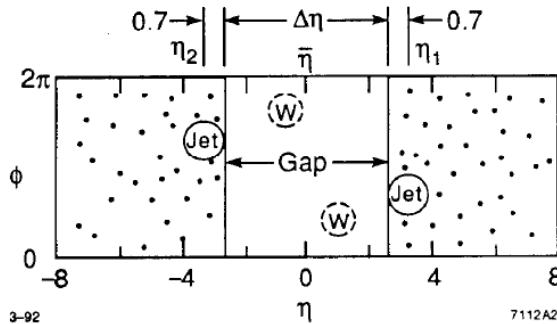
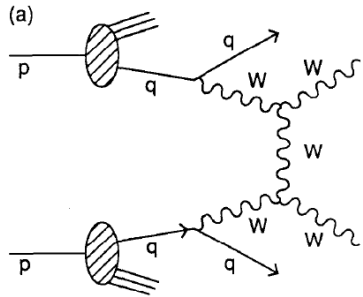
подтверждение гипотезы Ингльельмана и Шлейна (1985) о жестком рассеянии померона:

- pomeron flux
- diffractive PDF



доля событий одиночной дифракции 1-2%  
- в согласии с оценками

# Ещё одна сигнатура: провал по быстротам в центральной области



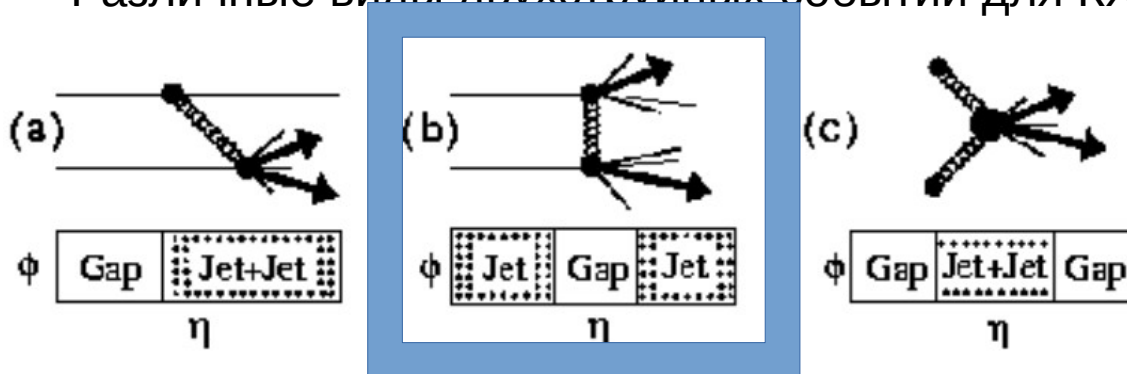
rapidity gap - провал по быстротам.

Дополнительная экспериментальная сигнатура

**предложена**

- Докшицер, Троян, Хозе (1986)
- Докшицер, Хозе, Съёстранд (1987)
- Бьёркен (1993)

Различные виды двухструйных событий для КХД с провалами по быстротам:



## Чем интересно бесцветное жёсткое рассеяние в КХД/жёсткая дифракция?

Экспериментально три чётких сигнатуры:

1. дифрагированный протон
2. провал(ы) по быстротам
3. жёсткие адронные струи

теоретически:

- комплементарная информация: о структуре адрона: вместо того, чтобы выбирать из налетающих протонов два цветных партонa по отдельности, изучить как их поведение друг с другом внутри протона
- вопрос об универсальности дифракционной структурной функции и природе померона
- режим high-energy limit,  $s \gg t \gg \Lambda_{\text{QCD}}$ – изучение пертурбативного померона
  - проверка предсказаний БФКЛ (А. Н. Mueller and W.-K. Tang, 1992)
- взаимосвязь жёсткого рассеяния с DGLAP эволюцией процессами мягкого перерассеяния
- как фон для процессов вне КХД
  - электрослабые процессы
  - процессы за пределами СМ

# Высокоэнергетический предел КХД

Кинематические условия:

$$\hat{s} \gg |\hat{t}| \gg \Lambda_{\text{QCD}}^2 \quad \Delta Y \sim \log\left(\frac{s}{-t}\right)$$

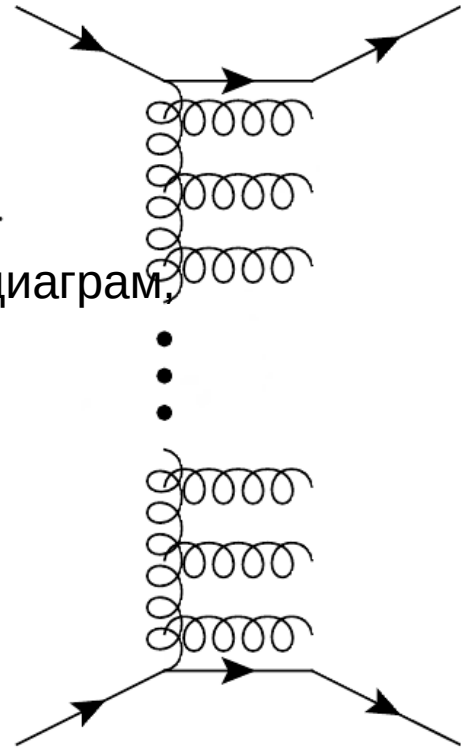
- приближения конечного порядка могут не работать
- LL БФКЛ производит суммирование бесконечного числа диаграмм, малость константы связи компенсируется большим логарифмом  $\alpha_s^n \ln^n(\hat{s}/|\hat{t}|) \lesssim 1$ .

Лидирующий логарифмический порядок: LL

$$d\hat{\sigma} \sim \alpha_s^2 \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_s^n \ln^n\left(\frac{\hat{s}}{|\hat{t}|}\right) + \alpha_s^3 \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_s^n \ln^n\left(\frac{\hat{s}}{|\hat{t}|}\right) + \alpha_s^4 \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_s^n \ln^n\left(\frac{\hat{s}}{|\hat{t}|}\right) + \dots$$

Следующий за лидирующим логарифмический порядок: NLL

$$d\hat{\sigma} \simeq \underbrace{\alpha_s^n \log^n\left(\frac{s}{-t}\right) \sigma^{(0)}}_{\text{Leading Log approx. (LL)}} + \underbrace{\alpha_s^n \log^{n-1}\left(\frac{s}{-t}\right) \sigma^{(1)}}_{\text{Next-to-Leading Log (NLL)}} + \dots$$





# подход Мюллер-Танг (Mueller and Tang 1992)

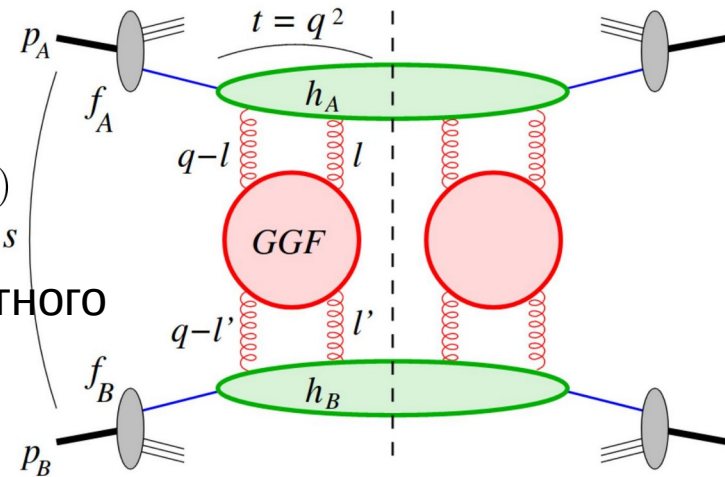
порядок точности LL

Парт. плотность    импакт-фактор    Ф-ция Грина

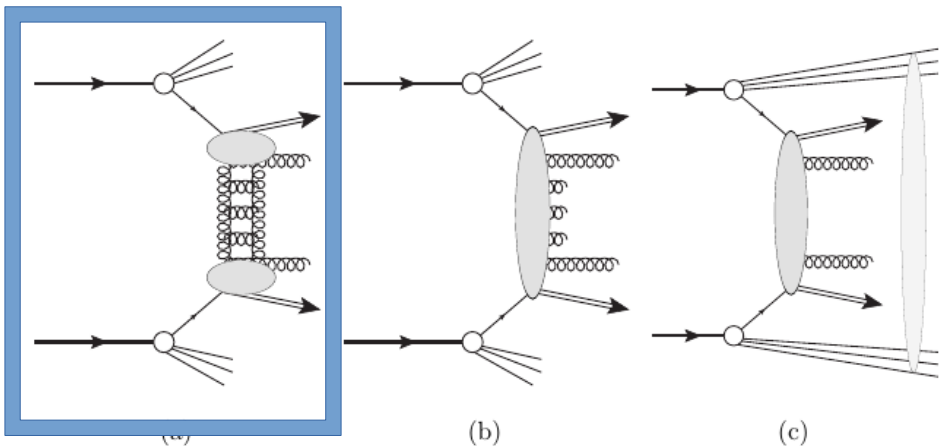
$$\frac{d\sigma^{(LL)}}{dJ_1 dJ_2} \simeq \int d(x_1, x_2, l_1, l'_1, l_2, l'_2) f_A(x_1) \Phi_A(x_1, l_1, l_2; J_1) G(x_1 x_2 s, l_1, l_2) \times G(x_1 x_2 s, l'_1, l'_2) \Phi_B(x_2, l'_1, l'_2; J_2) f_B(x_2)$$

$$\frac{d\hat{\sigma}}{dt} = (\alpha_{CF})^4 \frac{\pi^3 \exp[2(\alpha_P - 1)y]}{4t^2 [\frac{7}{2}\alpha_{CA}\zeta(3)y]^3}$$

МТ использовали решение LL БФКЛ ( $t \neq 0$ ) для бесцветного обмена (**L.N. Lipatov, Sov. Phys. JETP 63, 904 (1986)**) для случая взаимодействия цветных партонов



Схематическое изображение факторизационной формулы Мюллер-Танг



а) без излучения внутри

б) излучение только ниже порога

с) мягкие перерассеяния

конечное состояние:

- Две струи с похожим pT
- Провал по быструтам в центральной области

# исследования после UA8: на Теватроне и HERA: доля событий с провалом по быстротам

## 1. HERA: H1 and ZEUS

- глубоконеупругое рассеяние,  $ep$
- изменяемый по величине провал по быстротам в соотв. с быстротами струй
- порог:

## 2. Эксперименте D0 на Тэватроне

- Две энергии 0.63 и 1.8 ТэВ
- Провал по быстротам:  $|\eta| < 1$ ,  $E_T > 200$  MeV
- Струи: Cone algorithm,  $K=0.7$
- $|\eta_{jet1,2}| > 1.9$ , разные полусферы

## 3. Эксперименте CDF на Тэватроне

- Две энергии 0.63 и 1.8 ТэВ
- Провал по быстротам:  $|\eta| < 1$ ,  $E_T > 300$  MeV
- Струи: Cone algorithm,  $K=0.7$
- $1.8 < |\eta_{jet1,2}| < 3.5$ , разные полусферы

## 4. Эксперимент CMS на LHC

- 7 ТэВ
- **13 ТэВ – последние результаты**

что измерялось?  
доля событий с провалом  
по быстротам

$$f_{CSE} = \frac{dN^{\text{singlet}}}{d\mathcal{O}} / \frac{dN^{\text{all}}}{d\mathcal{O}}$$

# Исследования на коллайдере HERA

$$ep \rightarrow e\gamma p \rightarrow eX$$

Отбор событий:

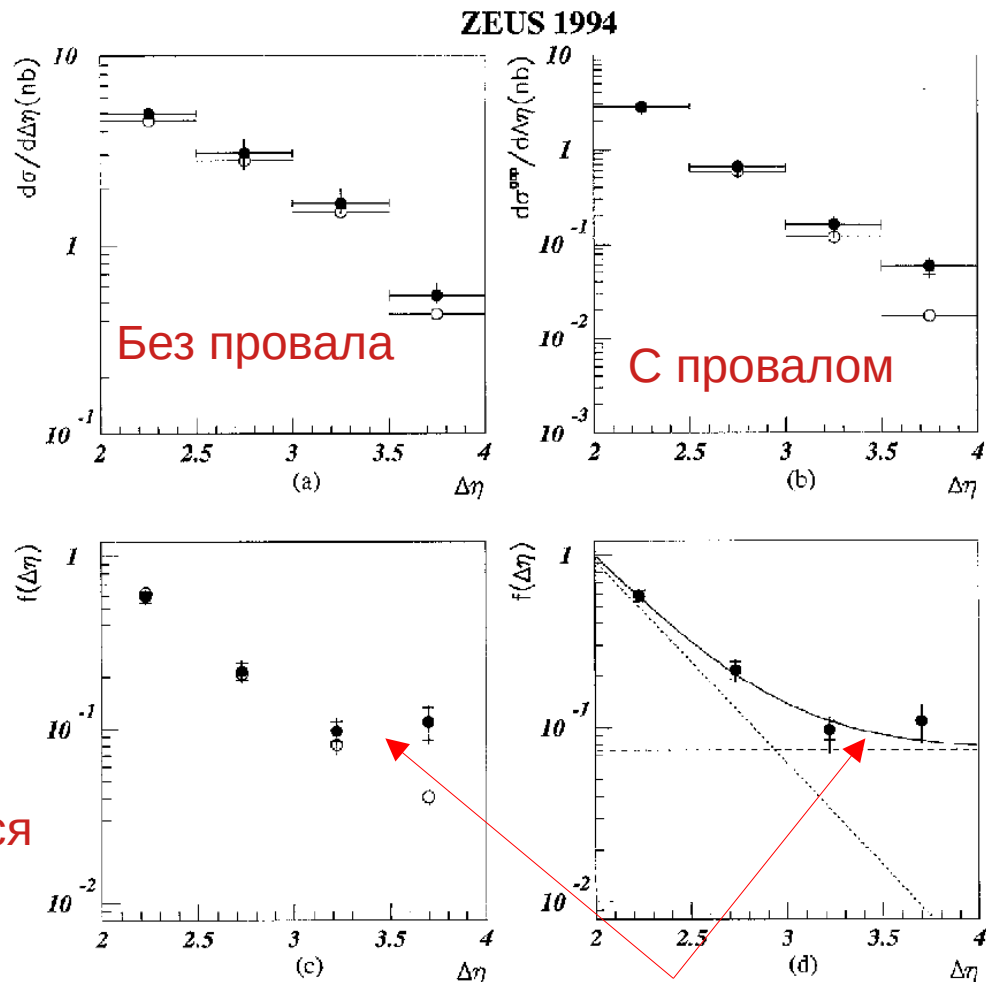
$$0.2 < y < 0.8, P^2 < 4 \text{ GeV}^2$$

Хотя бы 2 струи:

$$E_T^{\text{jet}} > 6 \text{ GeV}, \eta^{\text{jet}} < 2.5, |\bar{\eta}| < 0.75 \text{ and } \Delta\eta > 2.$$

Требование провала по быстротам:  
Отсутствие частиц с  $E_T > 300 \text{ MeV}$   
интервале быстрот между струями

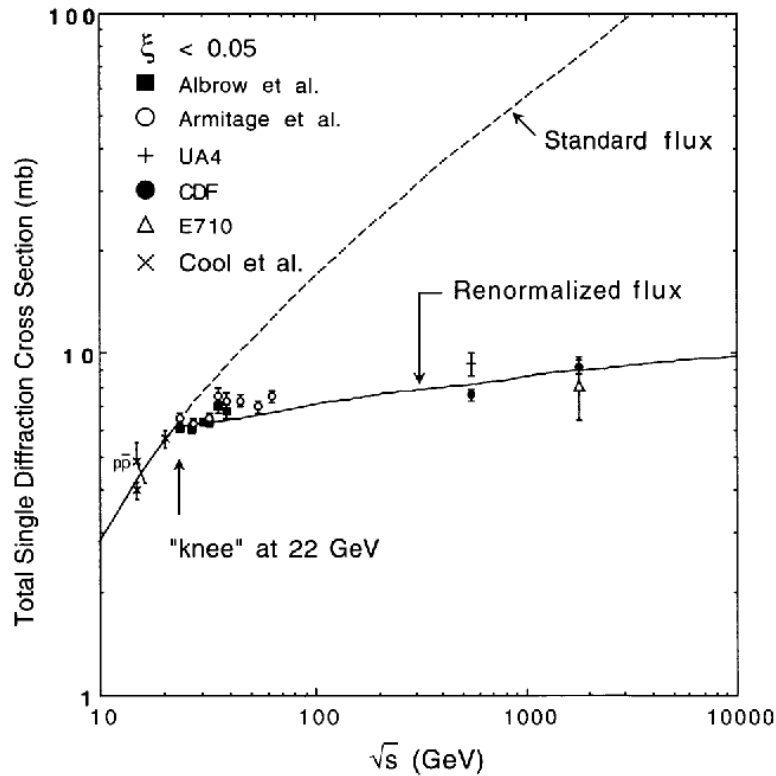
Доля событий с провалом по быстротам выполаживается для больших  $\Delta\eta > 3$



Обнаружен избыток событий: свидетельство бесцветового обмена с большой передачей импульса

# Переход от HERA к Теватроне: нарушение факторизации и перенормировка померонного потока

## Сечение одиночной дифракции



- Предсказания основанные на данных HERA сильно превышали результаты измерения на CDF
- **Попытка феноменологического решения:** Перенормировка померонного потокового фактора (flux factor) – значение интеграла всегда  $\leq 1$  (Goulianos, 1995)
  - Интерпретация: померонный поток – это вероятность провала по быстротам

$$f_{\mathbb{P}/p}(\xi, t) \Rightarrow N_s^{-1} \cdot f_{\mathbb{P}/p}(\xi, t)$$

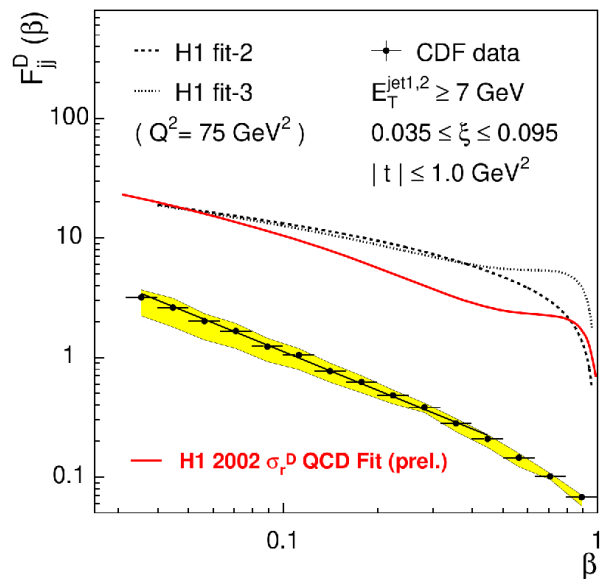
$$N_s \equiv \int_{\xi(\min)}^{\xi(\max)} d\xi \int_{t=0}^{-\infty} dt f_{\mathbb{P}/p}(\xi, t)$$

# Переход от HERA к Теватрону:

нарушение факторизации и вероятность выживания провала по быстротам

дифракционная структурной функция. Сравнение:

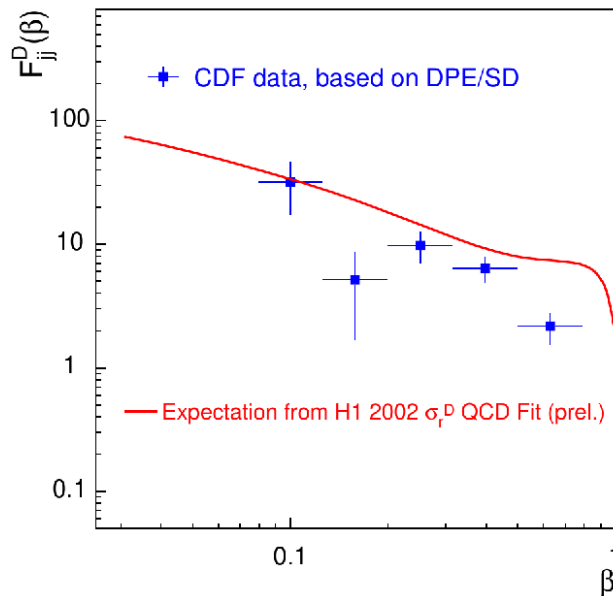
- Предсказание основанное на данных HERA и предположения о факторизации
- Данные CDF



## Восстановление факторизации:

Предположим, что факторизация нарушается только за счёт разрушения провала по быстротам из-за мягких цветовых обменов:

Потребуем **обязательного** наличия провала по быстротам:

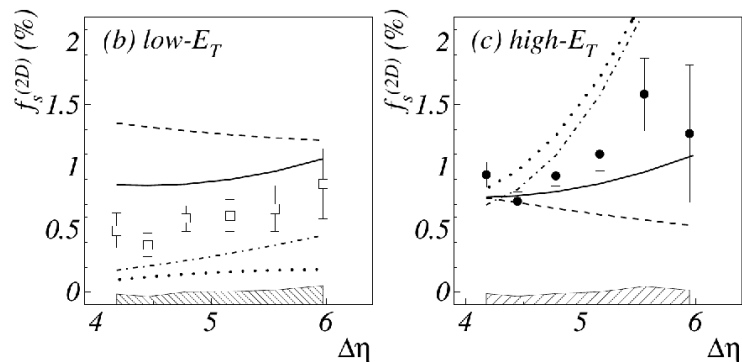
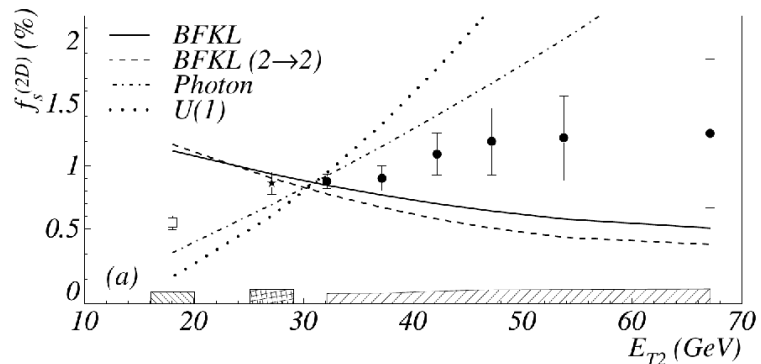


хорошее согласие HERA и Tevatron  
Goulianos, 1995

Как учесть вероятность разрушения провала по быстром  
(rapidity gap survival probability)?

1. Перенормирование померонного потока на 1  
(R.J.M. Covolan, J. Montanha, and K. Goulianos, A New Determination of the Soft Pomeron Intercept, Phys. Lett. B 389 (1996) 176.  
K. Goulianos, Phys. Lett. B358 (1995) 379;
2. Экранировка путём мультпомеронного обмена
  1. E. Gotsman, E. Levin, and E. Maor, 1999
  2. A.B. Kaidalov, V.A. Khoze, A.D. Martin, and M.G. Ryskin, 2001
3. [Цветовая нейтрализация путём мягких рассеяний: \(SCI\)](#)  
R. Enberg, G. Ingelman, and N. Timneanu, Rapidity Gaps at HERA and the Tevatron from Soft Color Exchanges, J. Phys. G21,712 (2000)

# Исследования на Теватроне: D0



Данные DØ сравнены с БФКЛ  
 B. Abbott et al (DØ Collaboration),  
 Phys. Lett. B81 (1998) 189.

LL БФКЛ из HERWIG+Мюллер-Танг  
 плохо описывает данные

Наблюдаемая:

$F_S$  – доля двухструйных событий с  
 провалом по быстротам среди  
 всех инклюзивных двухструйных событий

$$f_{\text{CSE}} = \frac{N_{\text{events}}^{\text{F}} - N_{\text{non-CSE}}^{\text{F}}}{N_{\text{events}}^{\text{F}}} \equiv \frac{\text{Number of jet-gap-jet events}}{\text{Number of dijet events}}$$

Предсказания получены с помощью

- Мюллер-Танг (Herwig 5.9) IPROC=2400

## модель ЕЕИМ

- обмен цветовым синглетом основанный на БФКЛ, с поправками NLL
- Варианты моделирования Underlying event
  - А) 3% - вероятность выживания провала по быстротам
  - В) Моделирование **многократных партонных взаимодействий (MPI)**, 15% вероятность выживаемости провала по быстротам
  - С) Моделирование **многократных партонных взаимодействий (MPI)**+ модель мягких цветовых взаимодействий (SCI)
  - Д) Вычисление в приближении Мюллер-Танг с 11% вероятностью выживания провала по быстротам

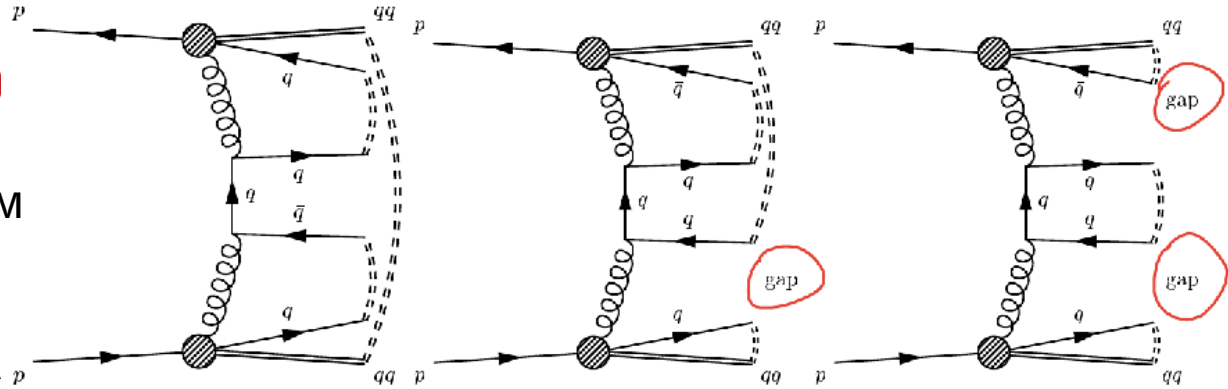
SCI – soft color interactions  
(LEPTO for ep, PYTHIA for pp)

Один параметр  $P$ -

вероятность обмена цветом между парой партонов.

Численное значение

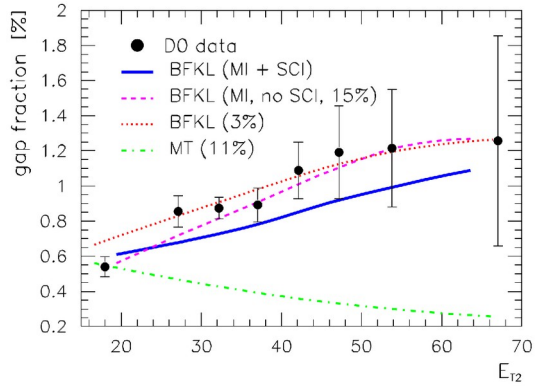
Получено из данных HERA



A. Ekstedt, R. Enberg, and G. Ingelman, “Hard color-singlet BFKL exchange and gaps between jets at the LHC,” arXiv:1703.10919 [hep-ph].



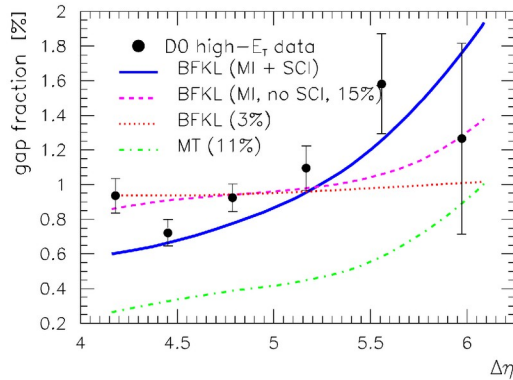
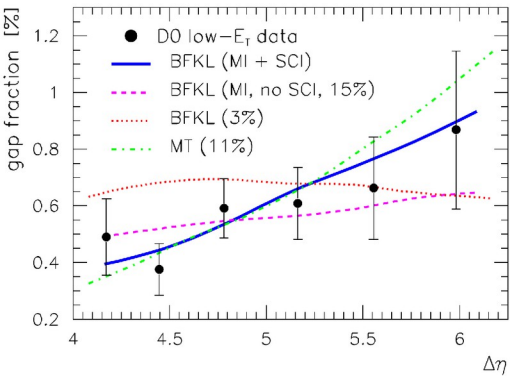
# эксперимент D0 – сравнение с предсказаниями EEIM ( NLL БФКЛ+SCI ) (hep-ph/0111090)



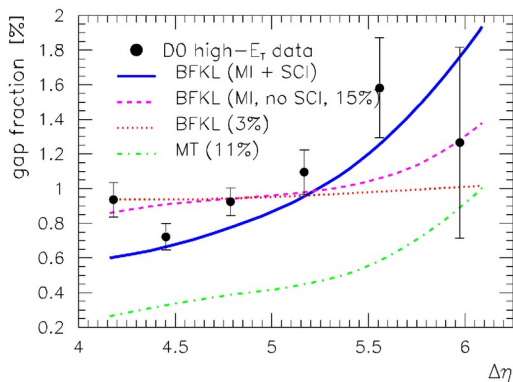
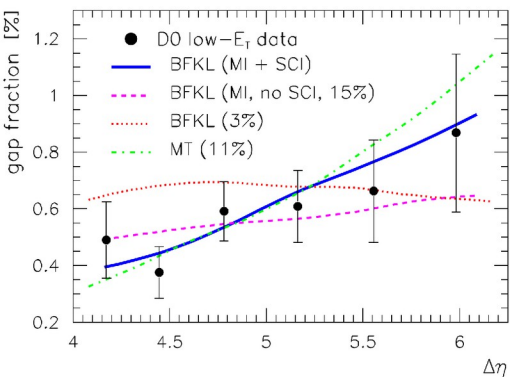
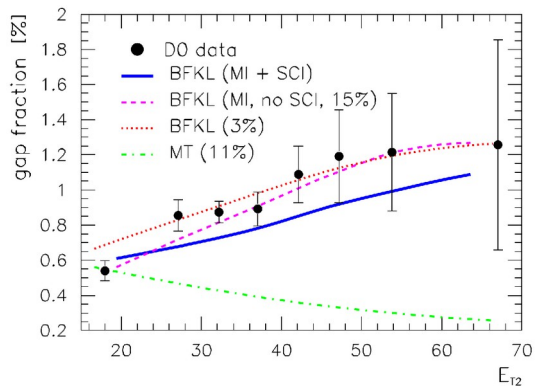
отбор событий:

- 1) хотя бы две струи с  $p_T > 15$
- 2) в противоположных полусферах
- 3)  $1.9 < |\Delta\eta| < 4.1$
- 4)  $\Delta Y > 4$
- 5) провал по быстротам в области  $\eta$  in (-1,1)

low  $E_T$ :  $15 < E_T < 25$  GeV  
 high  $E_T$ :  $30 < E_T < 40$  GeV



# эксперимент D0 – сравнение с предсказаниями EEIM ( NLL БФКЛ+SCI ) (hep-ph/0111090)



- Вычисление в приближении Мюллер-Танг с 11% вероятностью выживания провала по быстротам **Неправильно описывает  $E_2, \Delta\eta$**

- БФКЛ, с поправками NLL
- Варианты моделирования Underlying event

А) 3% - вероятность выживания провала по быстротам

В) Моделирование **многократных партонных взаимодействий (MPI)**, 15% вероятность выживаемости провала по быстротам

С) Моделирование **многократных партонных взаимодействий (MPI)**+ модель мягких цветовых взаимодействий (SCI)

Не требуется нормировка вероятности выживания провала по быстротам 18

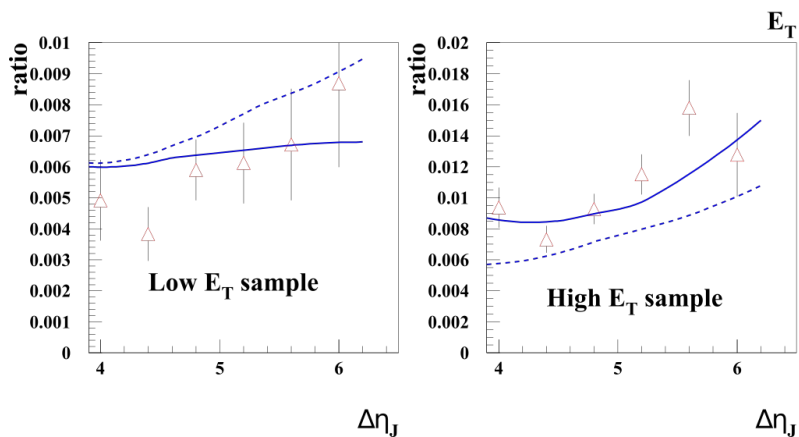
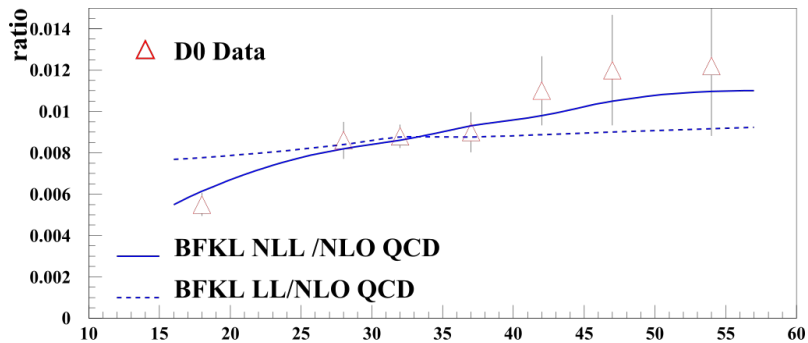
# Сводка измерений и сравнений с предсказаниями EEIM (NLL BFKL+SCI)

Process	Experiment		Ratio [%]	
			Observed	SCI
W	CDF	[165]	$1.15 \pm 0.55$	1.2
Z	D0	[163]	$1.44^{+0.62}_{-0.54}$	1.0
$b\bar{b}$	CDF	[177]	$0.62 \pm 0.25$	0.7
$J/\psi$	CDF	[170]	$1.45 \pm 0.25$	1.4
dijets	CDF	[166]	$0.75 \pm 0.10$	0.7
dijets	D0	[162]	$0.65 \pm 0.04$	0.7

## модель RMK (Royon, Marquet, Kerka) NLL БФКЛ

- вычисление БФКЛ
  - NLL (forward) Green Func. + collinear improvement,
  - Импакт факторы LO
  - Фиксированная вероятность выживания провала по быстротам
    - $|S|^2=0.1$
- сопряжено с генератором HERWIG6 для
  - для моделирования мягкого излучения
  - партонные ливни
  - адронизации

## эксперимент D0 – сравнение с предсказаниями RMK (NLL БФКЛ)



отбор событий:

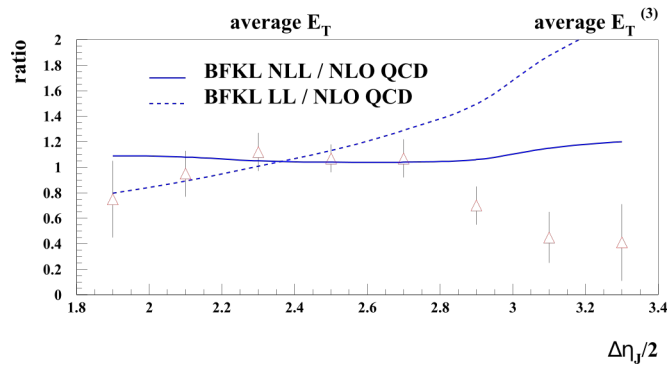
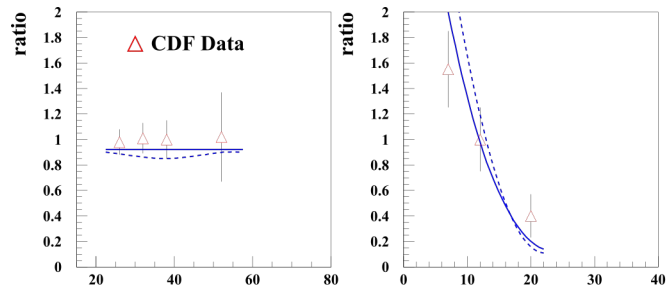
- 1) хотя бы две струи с  $p_T > 15$
- 2) в противоположных полусферах
- 3)  $1.9 < |\delta\eta| < 4.1$
- 4)  $\delta Y > 4$
- 5) провал по быстротам в области  $\eta$  in  $(-1,1)$

low  $E_T$ :  $15 < E_T < 25$  GeV

high  $E_T$ :  $30 < E_T$

Вычисление NLL хорошо согласуется с данными, в то время как LL даёт гораздо худшее согласие.

## эксперимент CDF– сравнение с предсказаниями RMK (NLL БФКЛ)

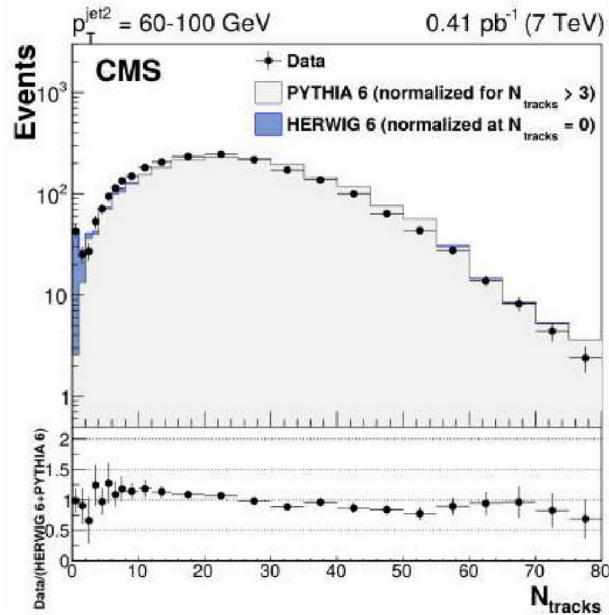


1. отбор струй 20 ГэВ (выше чем в D0 на 5 ГэВ)
2. акцептанс по быстротам (1.8,3.5) – меньше чем у D0
3. провал по быстротам  $\eta$  in (-1,1)  
1)  $3.6 < |\text{delta}\eta|$

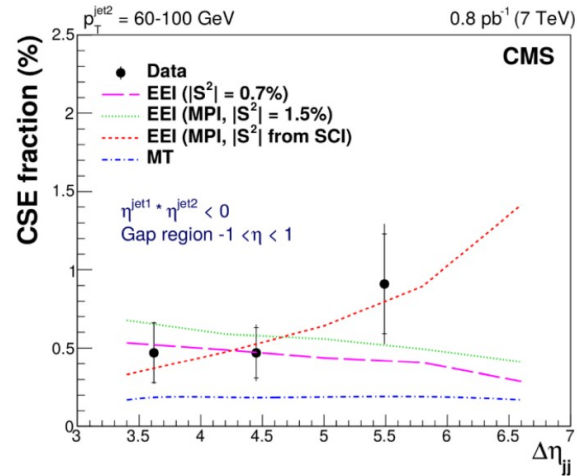
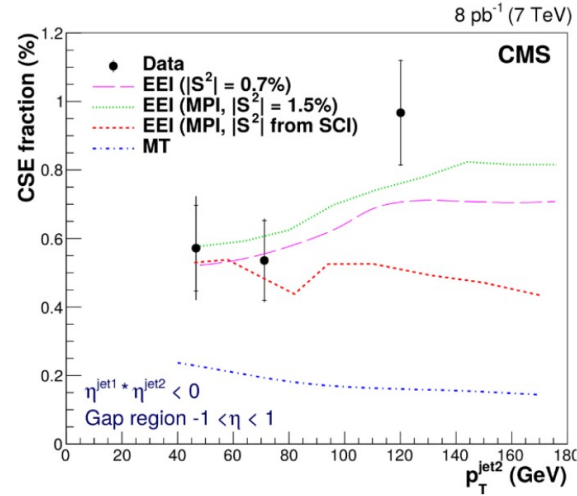
Вычисление NLL хорошо согласуется с данными, в то время как LL даёт гораздо худшее согласие.

Однако, есть сильное разногласие с предсказанием при больших  $\text{delta}\eta$  (в отличие от D0, где хорошее согласие)

# Измерение доли событий обмена цветовым синглетом в эксперименте CMS при 7 ТэВ



1. распределение множественности сравнивается с предсказаниями Pythia 6 и Herwig 6 (который включает IPROC=2400)



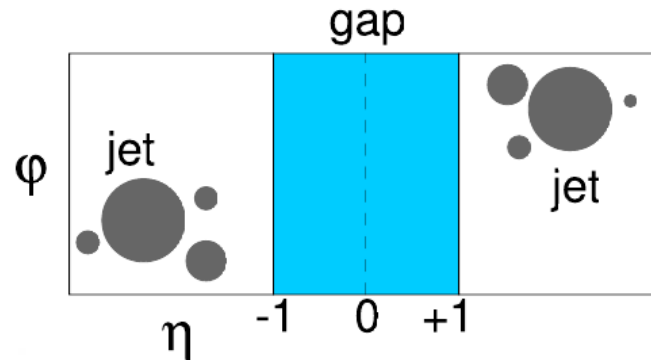
Предсказания NLL БФКЛ сопряженные с различными подходами к моделированию underlying event (модель EEIM)

(hep-ph/1703.10919)

Eur. Phys. J. C 78 (2018) 3, 242, Study of dijet with a large rapidity gap between the two leading jets in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV

1. сеанс сбора данных: специальный сеанс с низкой мгновенной светимостью ( $\beta \approx 90$  ns) для маленького pile-up, 2015 год
2. струи anti-kt алгоритм,  $R=0.4$ , алгоритм particle flow
3. отбор струй: хотя бы две струи с  $p_T > 40$  GeV
4. две лидирующие струи удовлетворяют условию  $1.4 < |\eta_{\text{jet}}| < 4.7$  and  $\eta^{\text{jet1}} \eta^{\text{jet2}} < 0$

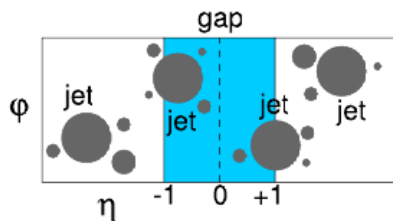
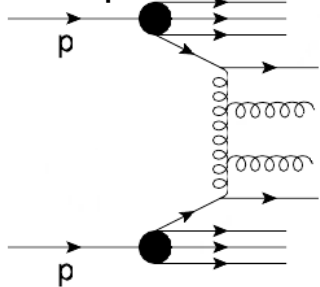
5. для уменьшения pile-up, число первичных вершин равно 1 или 0 (важно для струй в HF)
6. провал по быстротам: подсчитывается число заряженных частиц с  $|\eta| < 1$



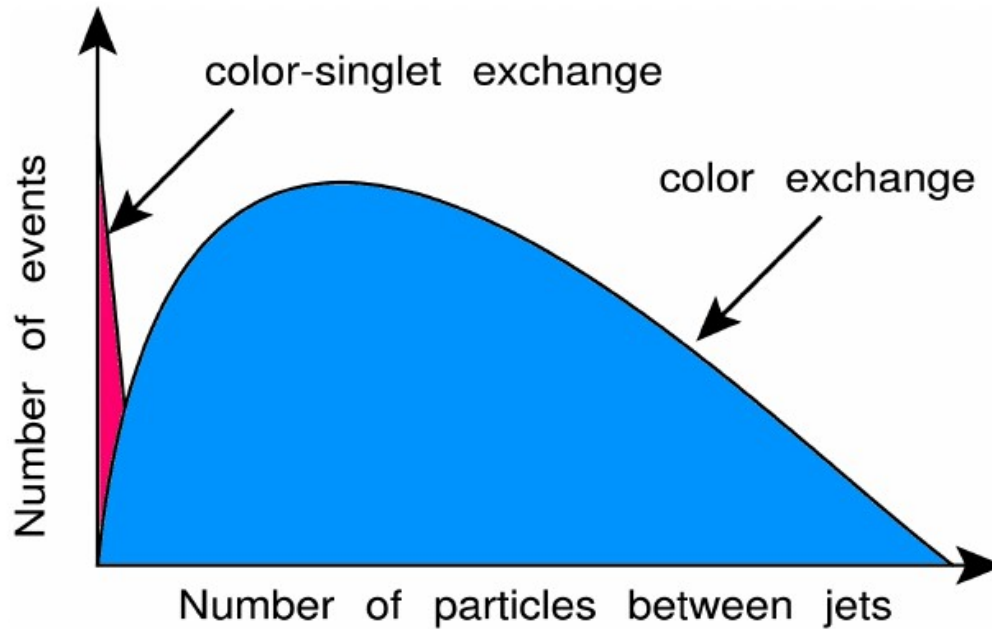
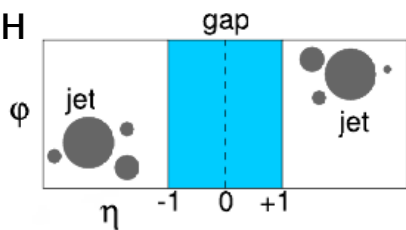
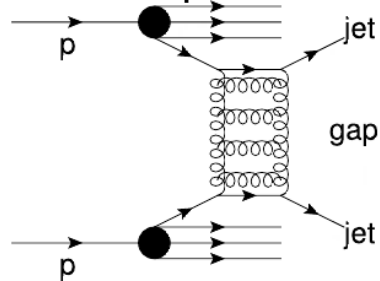


# Задача: отделить вклад бесцветового обмена и цветовой обмена

цветовой обмен

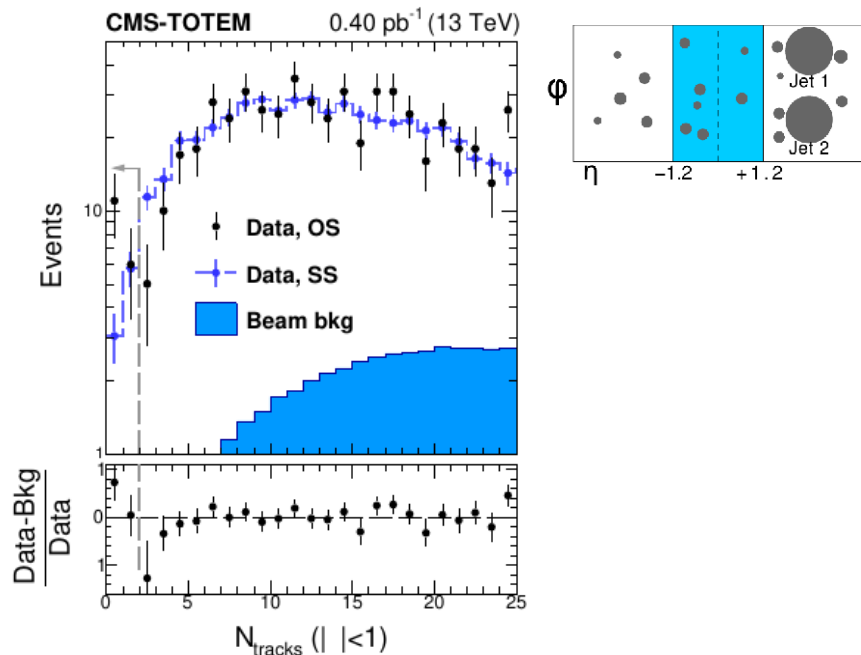


бесцветовой обмен



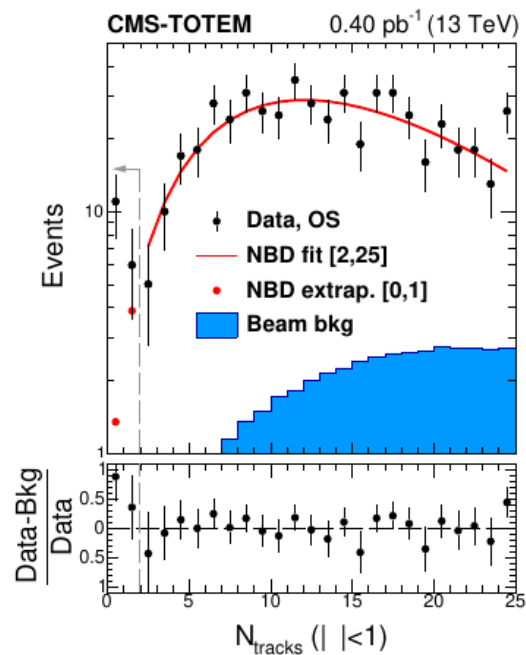
## Два способа вычитания цветového обмена

1) используя данные, обеднённые бесцветовым обменом



используется другой набор данных:  
две струи в одной полусфере

2) NBD-распределение

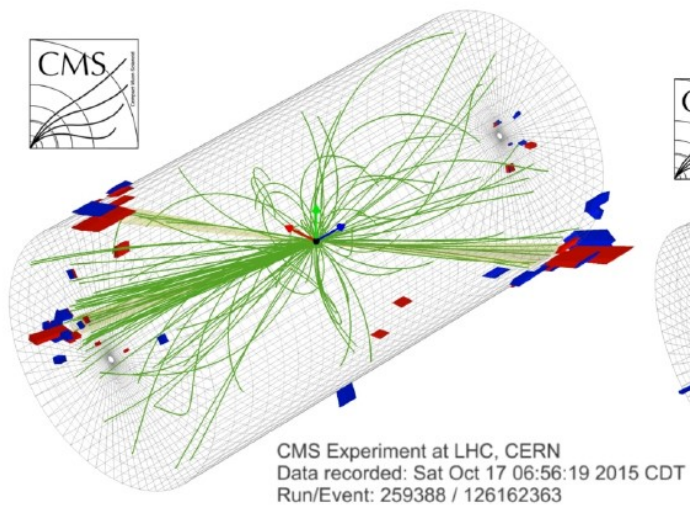


$$\text{NBD}(k; n, p) = \frac{(k+n-1)!}{k!(n-1)!} p^n (1-p)^k$$

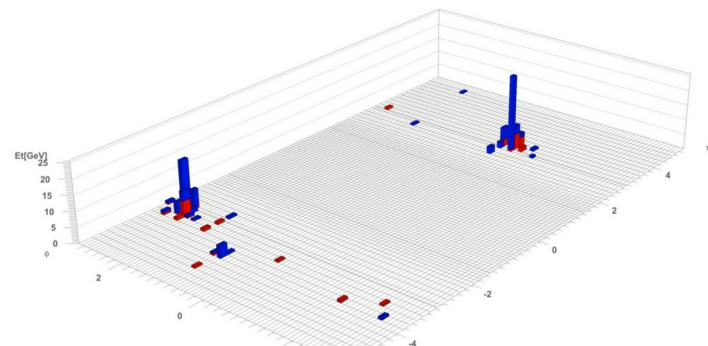
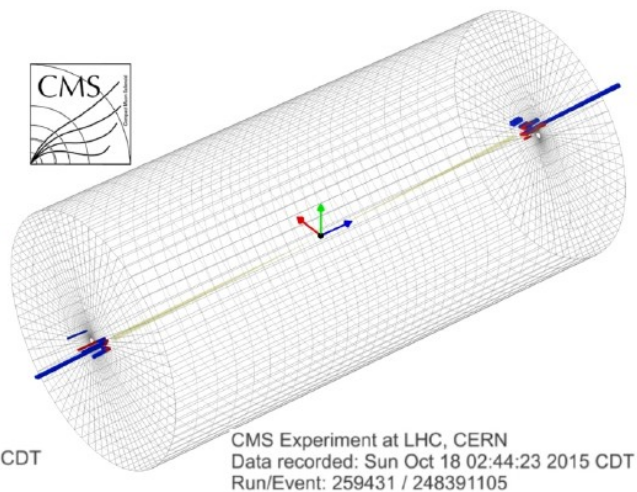
фитирование с помощью  
NDB распределения (2 < Ntracks < 25)  
и экстраполяция к N\_tracks=0

# Примеры событий

инклюзивное двухструйное событие



двухструйное событие с провалом по быстротам



Наблюдаемая – доля двухструйных событий с бесцветным обменом

число событий с числом первичных вершин < 3

$$f_{\text{CSE}} = \frac{N_{\text{events}}^F - N_{\text{non-CSE}}^F}{N_{\text{events}}} \equiv \frac{\text{Number of jet-gap-jet events}}{\text{Number of dijet events}}$$

← фоновые события (оценка)

Измерена, как функция:

1. разницы быстрот между струями
  - наиболее важно для больших логарифмов в пересуммировании БФКЛ
2. поперечный импульс сублидирующей струи
  - феноменологические исследования БФКЛ указывают на слабую зависимость наблюдаемой от  $p_{T2}$
3. разница азимутальных углов лидирующих струй
  - баланс лучше для бесцветного обмена, чем цветového

# Монте Карло моделирование, используемое в анализе данных

## 1. **инклюзивные** двухструйные процессы:

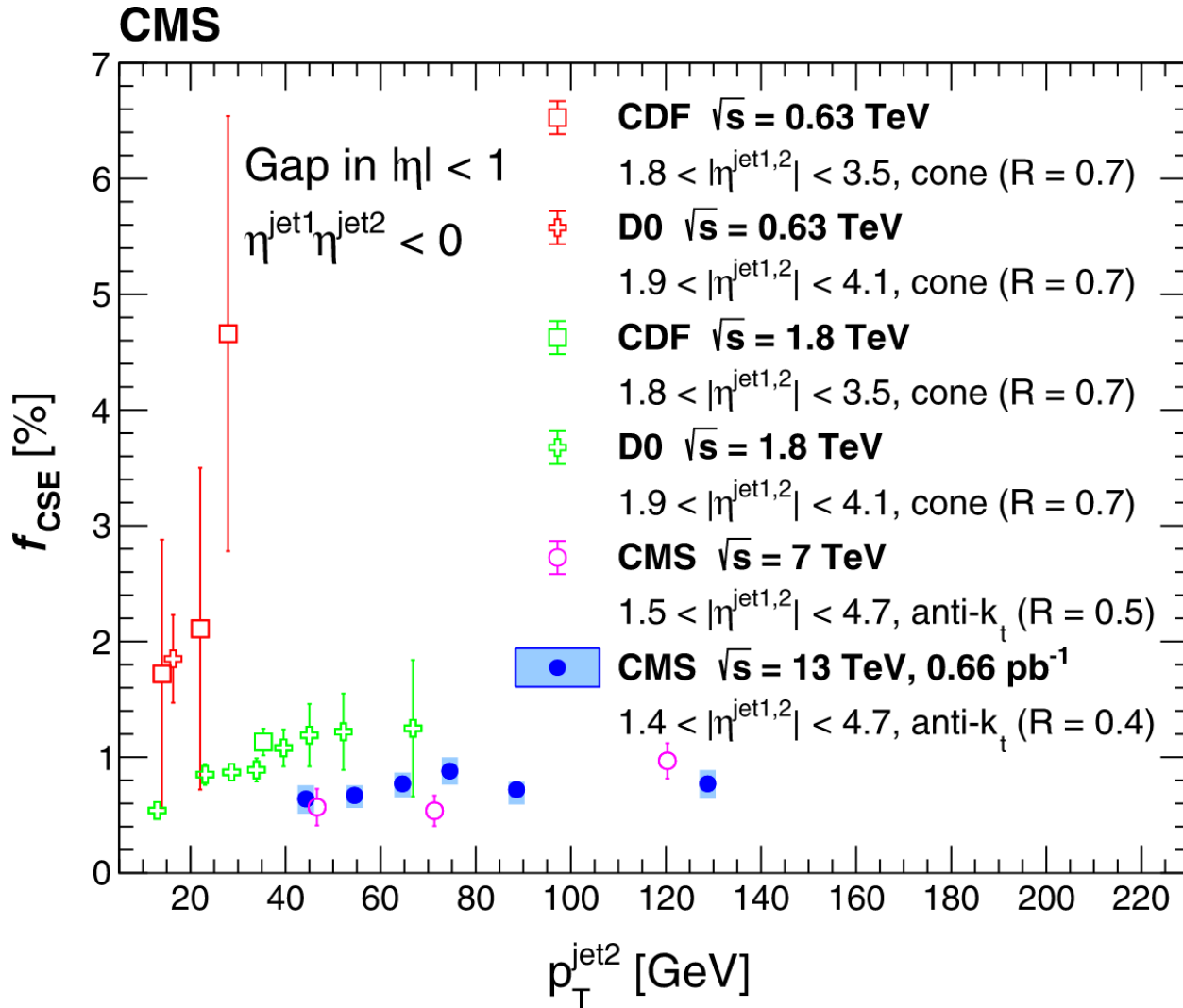
Pythia8, LO, ISR, FSR, tune CUETP8M1

## 2. процессы обмена **цветовым синглетом**:

- генератор: Herwig 6.5, IPROC=2400
- использовалось приближение Mueller-Tang
- пока этот процесс не реализован в более современных генераторах Pythia 8 и Herwig++

## 3. моделирование pile-up не проводилось из-за того, среднее число соударений $\ll 1$

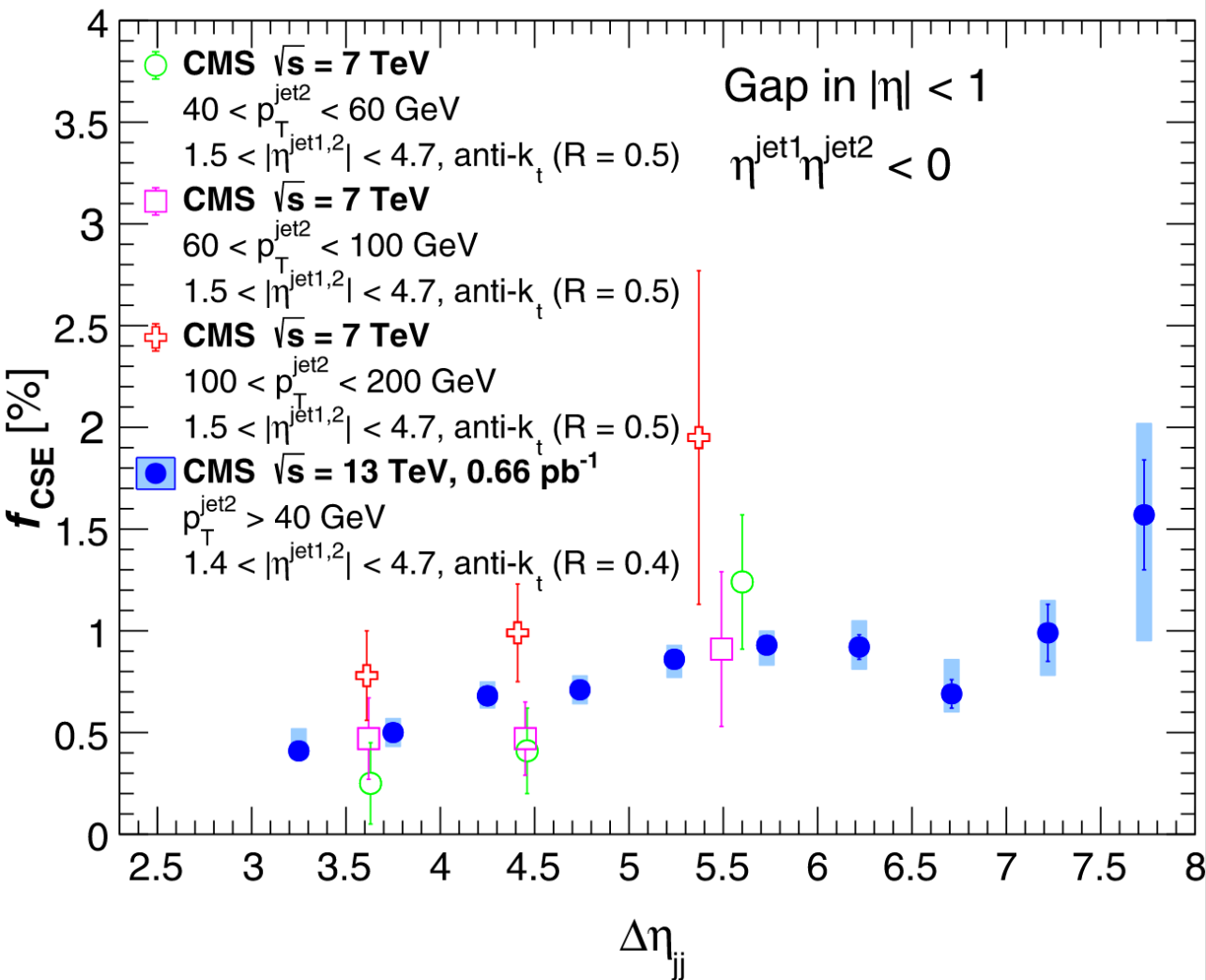
# Результаты измерения



- при энергиях ЛНС динамика уменьшения доли событий бесцветного обмена сильно замедлилась

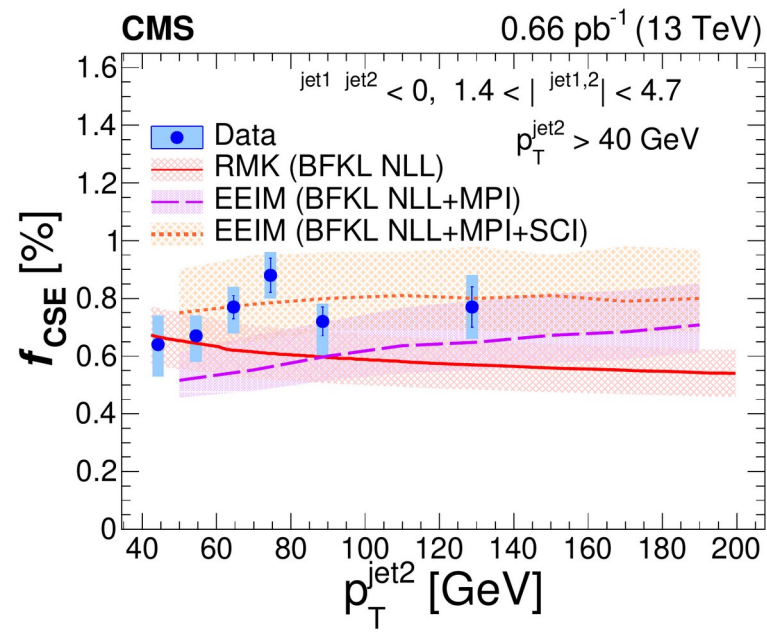
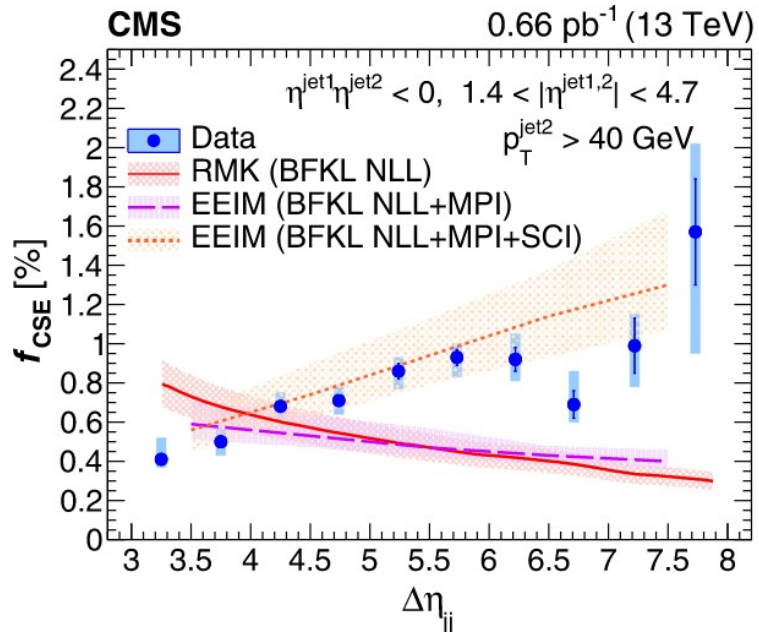
# Результаты нового измерения при 7 и 13 ТэВ: зависимость от разницы псевдобыстрот

**CMS**



- впервые измерено при таких больших значения разницы псевдобыстрот и энергии
- подтверждается тенденция увеличения доли бесцветного обмена с увеличением  $\Delta\eta$

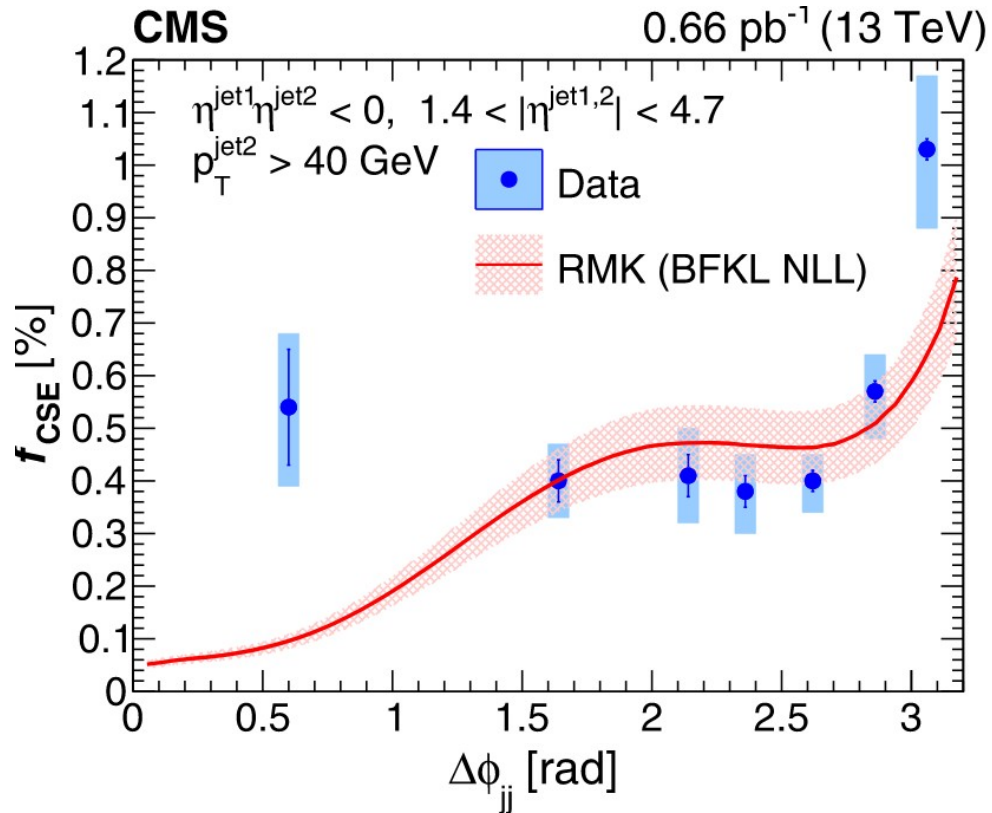
## Результаты измерения при 13 ТэВ



- первое измерение для  $|\Delta\eta| > 6$
- подтверждается тенденция увеличения с  $\Delta\eta$
- вычисления EEIM (NLL БФКЛ) описывает данные хорошо, только если сопровождается
  - SCI
  - MPI
- вычисления в подходе RMK (NLL БФКЛ, с  $|S|^2=0.1$ ) ошибочно предсказывает падение доли событий обмена цветовым синглетом, вместо роста



# Результаты измерения

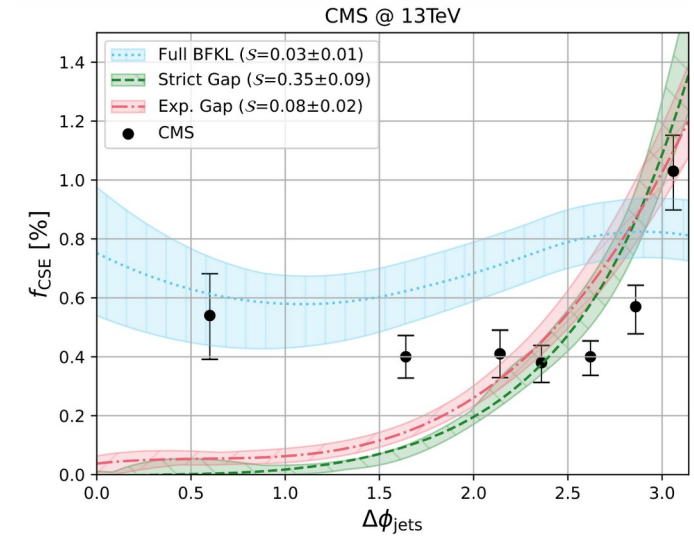
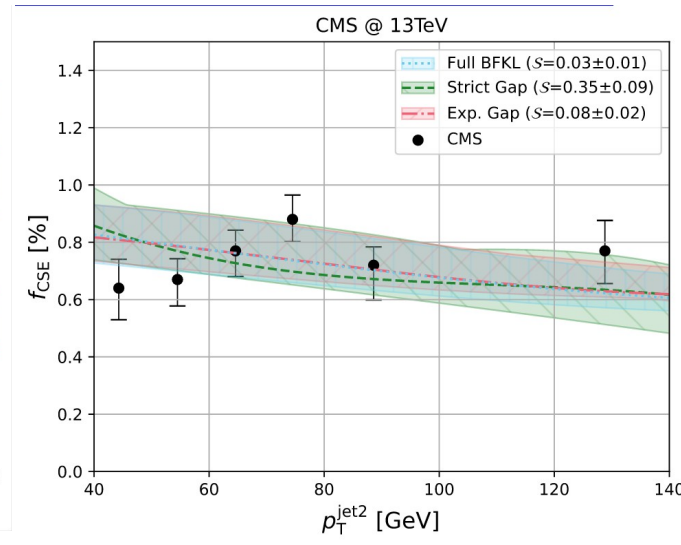
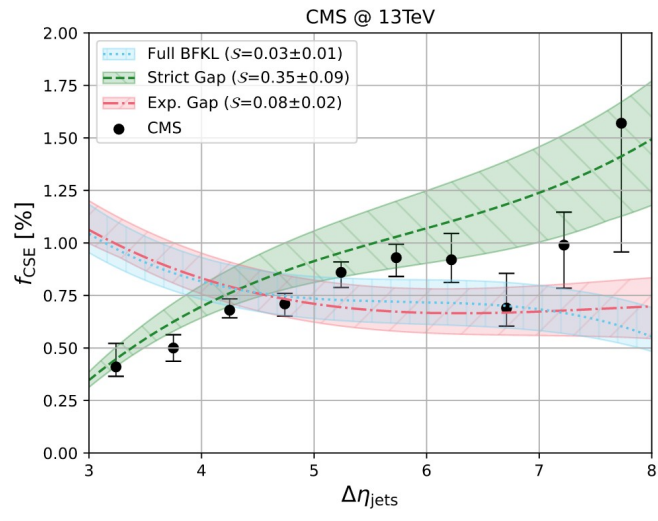


предсказание RMK (NLL БФКЛ) описывает зависимость от разницы азимутальных углов двух струй для больших значений переменной

## RMK (NLL БФКЛ): переход на Pythia 8 (hep-ph/2203.08129)

- 1) До сих пор феноменологические исследования процессов струя-провал-струя были основаны на использовании PYTHIA6 and HERWIG6
- 2) Чтобы использовать последние достижения в подстройке генераторов к данным ЛНС, нужно перейти на современный генератор Pythia 8
- 3) В недавнем исследовании, <https://arxiv.org/abs/2203.08129>, были использованы настройки Pythia 8 из Run-2 CMS
  1. данные использованные для настройки: спектры заряженных частиц
  2. отдельная настройка для разных видов данных: одиночная дифракция, недифракционные неупругие соударения
- 4) Бесцветовой обмен: БФКЛ амплитуды обмена помероном в NLL с импакт-факторами LO были встроены в PYTHIA8, настройка PYTHIA8: CP1
- 5) Инклюзивные события: NLO (POWHEG) + партонный ливень, настройка PYTHIA8: CP5
- 6) разрушение провала по быстротам: важна роль в излучения в начальном состоянии (ISR)

# Продолжение RMK (NLL БФКЛ): переход на PYTHIA 8 (hep-ph/2203.08129)



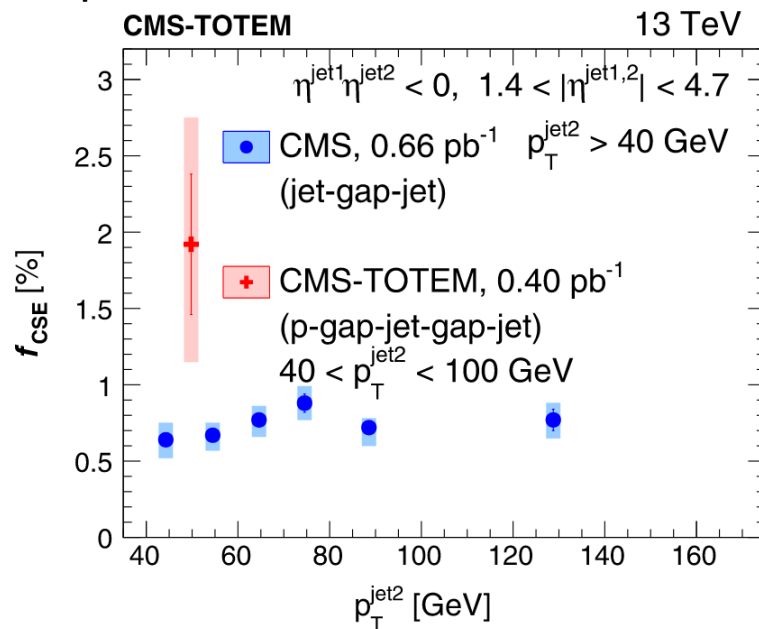
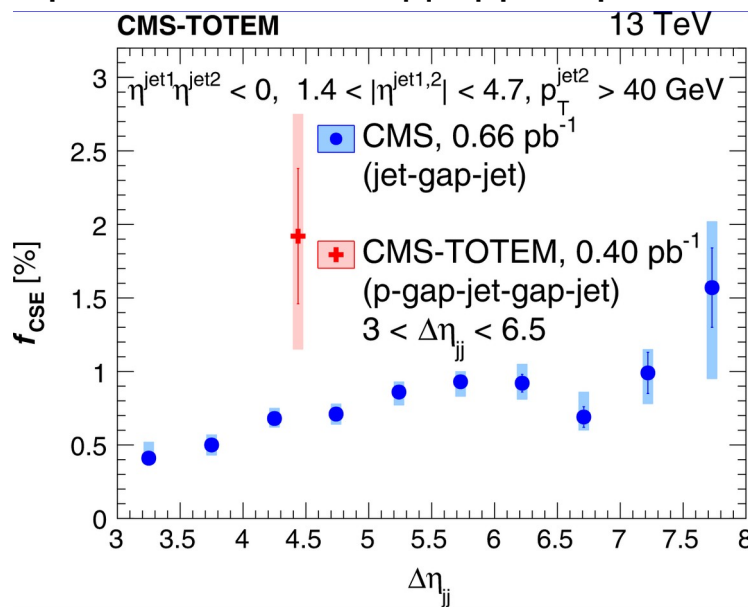
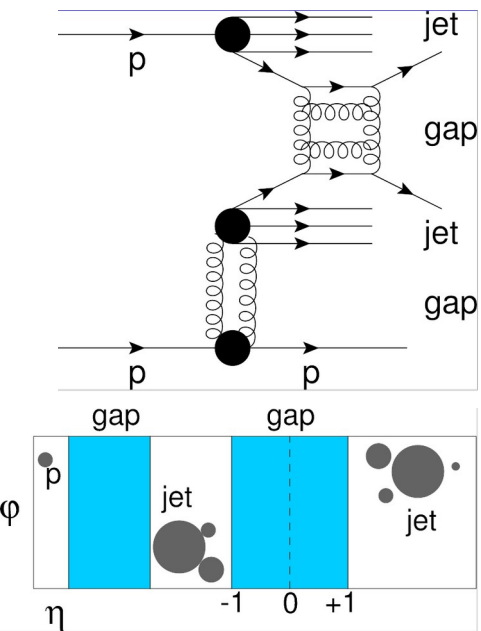
три определения провала по быструтам:

1. “exp gap”: экспериментальный  $|\eta| < 1, p_T > 200 \text{ MeV}$
2. “strict gap”: теоретический  $|\eta| < 1$
3. “full BFKL”: без требования провала по быструтам

## Выводы:

- Зависимость от  $\Delta\eta$  сильно зависит от определения провала по быструтам
- Strict gap хорошо описывает данные
- (переход к strict gap позволяет описать зависимость от  $\Delta\eta$ )

## Два провала по быстротам и вместе дифрагированным протоном



- $f_{\text{CSE}}$  в 2.91 раза больше когда зарегистрирован протон и доп. провалом по быстротам
- можно объяснить уменьшенной активностью партонных спектаторов в событиях с дифрагированным протоном

# Заключение

- Представлен обзор предыдущих измерений
- Были представлены новые результаты
  - новые энергии
  - новый вид процесса – с двумя провалами (между парой струями и )
  - Новые Монте Карло генераторы (Pythia 8) и новые настройки, описывающие underlying event для 13 ТэВ
- Предсказания LL БФКЛ неспособно описать данные
- Предсказания (NLL БФКЛ + LO импакт-факторы) фрагментарно описывает данные, но при условии учёта различных моделей мягких цветовых взаимодействий
  - Использование модели SCI позволяет описать данные с минимальным числом параметров
- Будущие исследования
  1. Добавление NLO импакт-факторов
  2. Расширение набора наблюдаемых:
  3. Другие определения “провала по быстротам”: сканирование порога по  $p_T$  для лучшего контроля ISR
  4. улучшение статистики для событий с тагированным протоном и дополнительным провалом по быстротам, для того, чтобы измерить форму зависимостей (провести дифференциальное измерение)

Спасибо за  
внимание!