

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

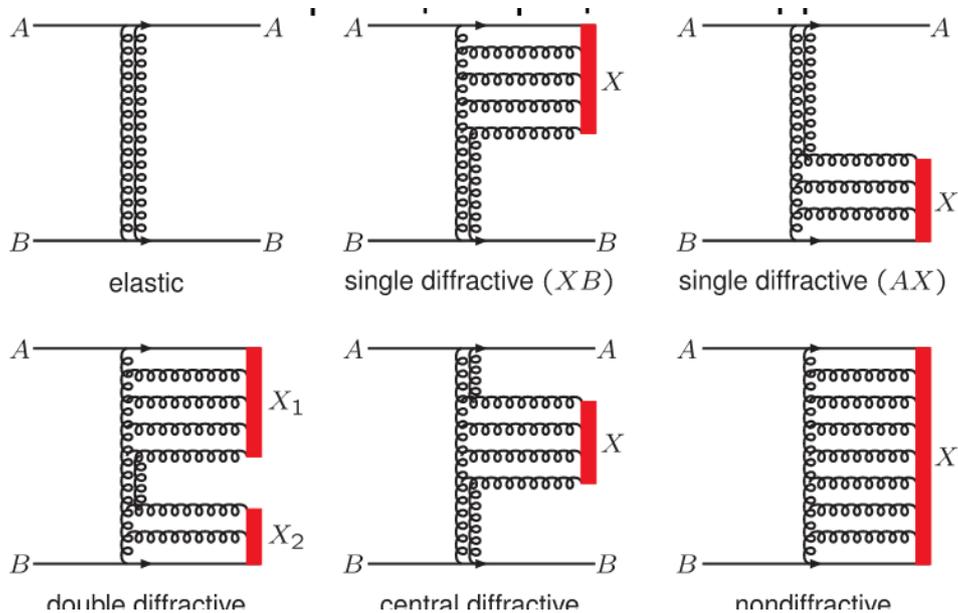
План доклада

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:

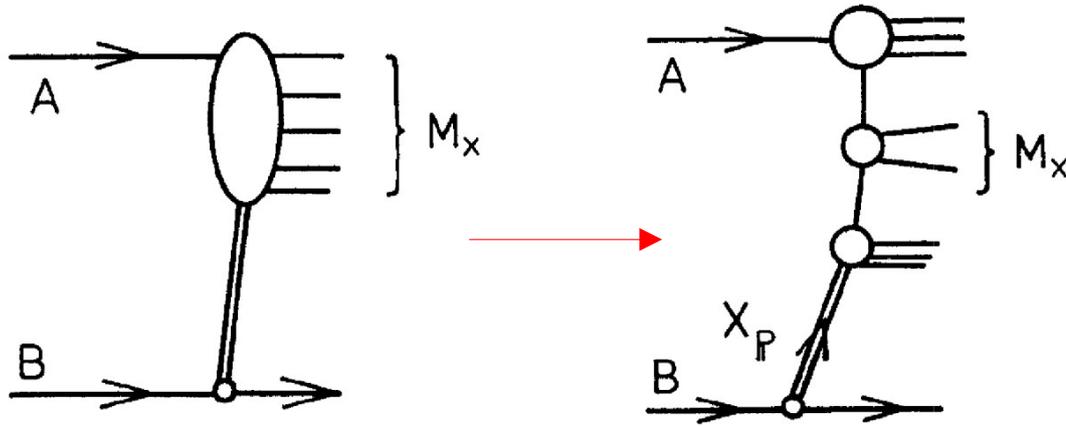
Классификация процессов КХД по наличию
по наличию цветового синглета:



- экспериментальная сигнатура
 - провал в распределениях частиц по (псевдо)быстротам η (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



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

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

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

Потоковый фактор померона
(интерп-я: плотность вероятности)

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

Сечение жёсткой дифракции:

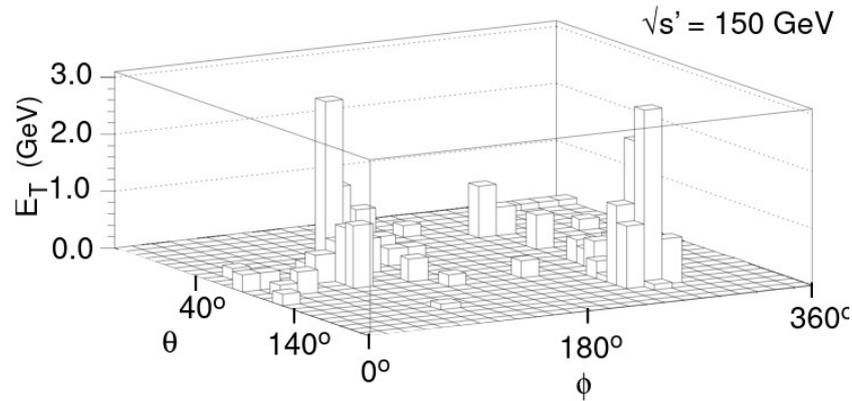
Экспериментальное подтверждение гипотезы Ингльельмана Шлейна о жёсткой дифракции

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



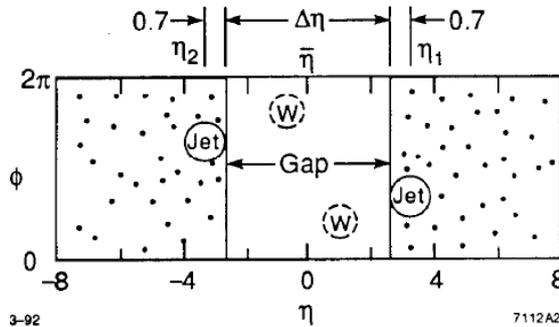
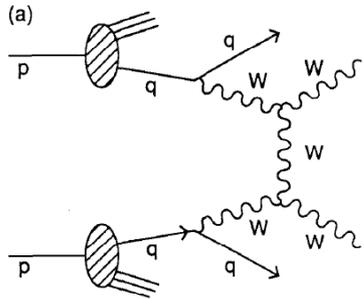
подтверждение гипотезы Ингльельмана и Шлейна (1985) о жестком рассеянии померона:

- pomeron flux
- diffractive PDF



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

Ещё одна сигнатура: провал по быстротам в центральной области



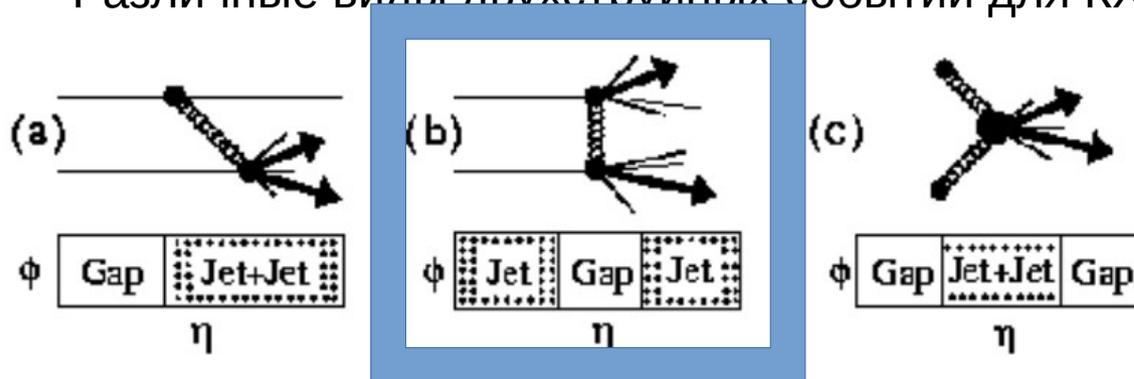
rapidity gap - провал по быстротам.

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 партона 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:

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

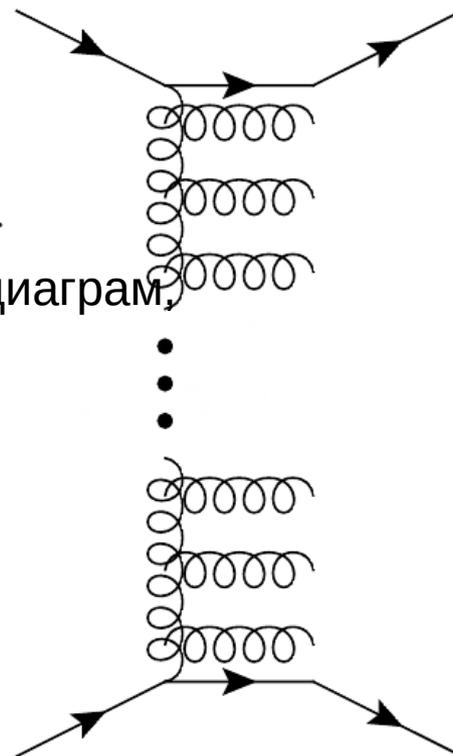
- приближения конечного порядка могут не работать
- LL БФКЛ производит суммирование бесконечного числа диаграмм, малость константы связи компенсируется большим логарифмом $\alpha_s^n \ln^n(\hat{s}/|\hat{t}|) \lesssim 1$.

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)

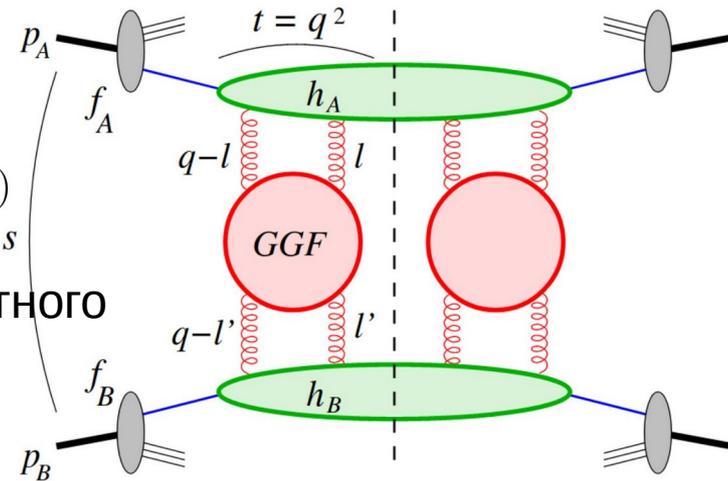
порядок точности LL

Парт. плотность импакт-фактор Ф-ция Грина

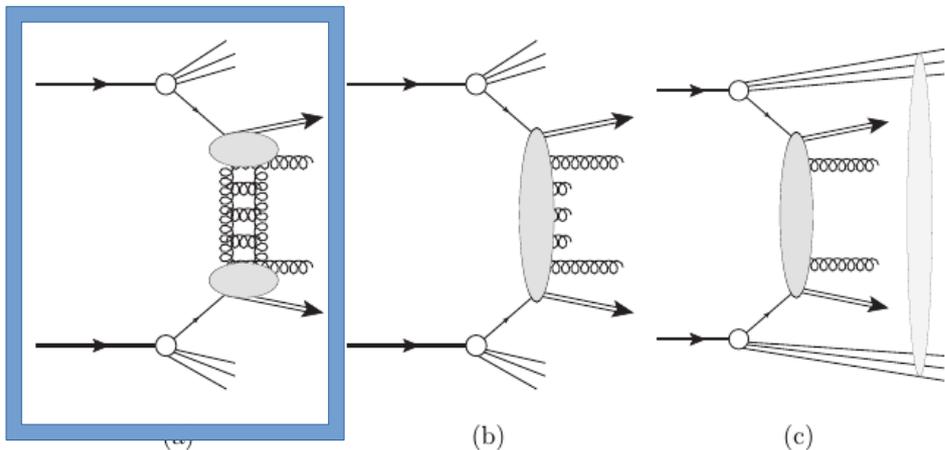
$$\frac{d\sigma^{(LL)}}{dJ_1 dJ_2} \simeq \int d(x_1, x_2, l_1, l'_1, l_2, l'_2) f_A(x_1) \Phi_A(x_1, l_1, l_2; J_1) G(x_1 x_2 s, l_1, l_2) \times G(x_1 x_2 s, l'_1, l'_2) \Phi_B(x_2, l'_1, l'_2; J_2) f_B(x_2)$$

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

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 быстройтам 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:

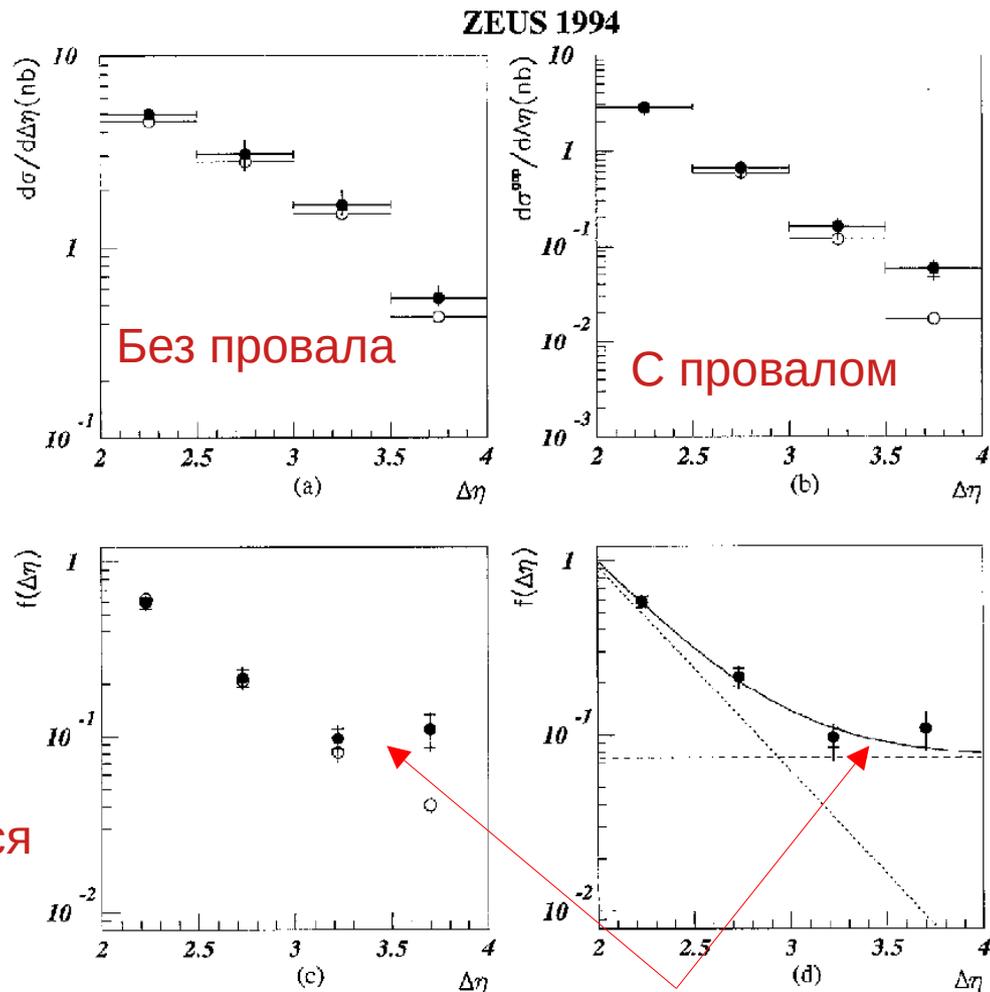
$$0.2 < y < 0.8, P^2 < 4 \text{ GeV}^2$$

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

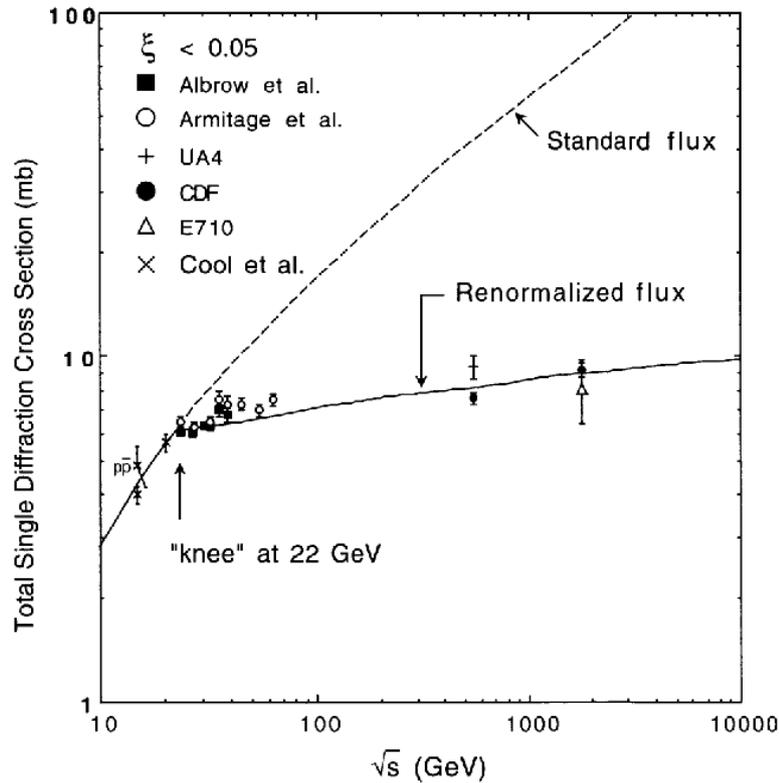
Доля событий с провалом по быстротам выполаживается для больших $\Delta\eta > 3$



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 ≤ 1 (Goulianos, 1995)
 - Интерпретация: померонный поток – это вероятность провала по быстротам

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

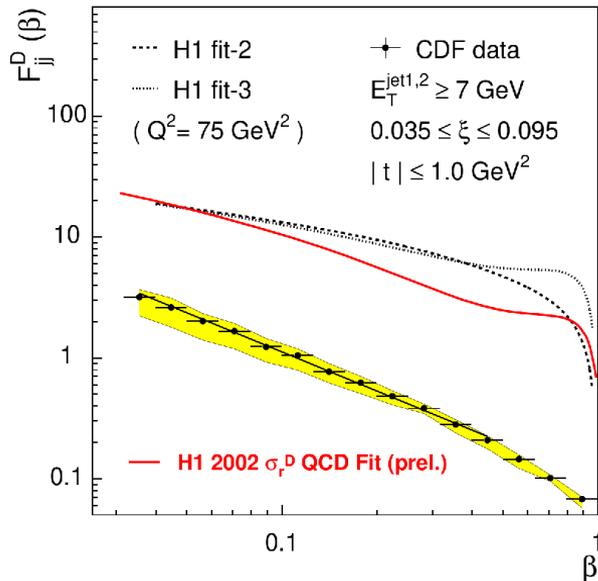
$$N_s \equiv \int_{\xi(\min)}^{\xi(\max)} d\xi \int_{t=0}^{-\infty} dt f_{\mathbb{P}/p}(\xi, t)$$

Переход от HERA к Теватрону:

нарушение факторизации и вероятность выживания провала по быстротам

дифракционная структурной функция. Сравнение:

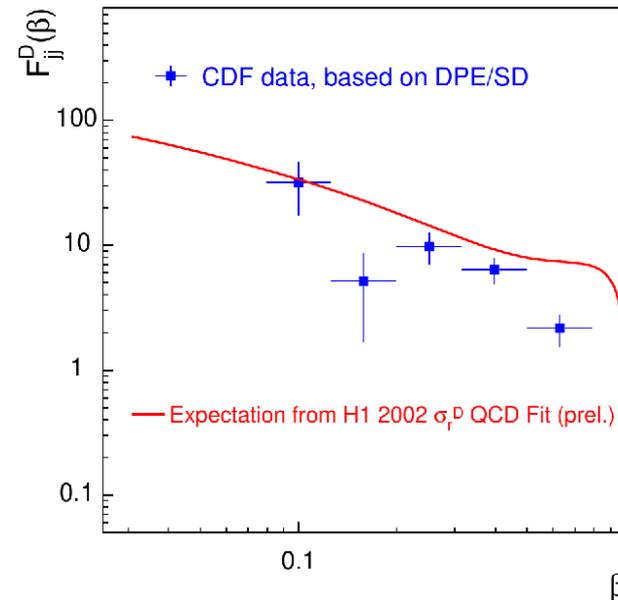
- Предсказание основанное на данных HERA и предположения о факторизации
- Данные CDF



Восстановление факторизации:

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

Потребуем **обязательного** наличия провала по быстротам:

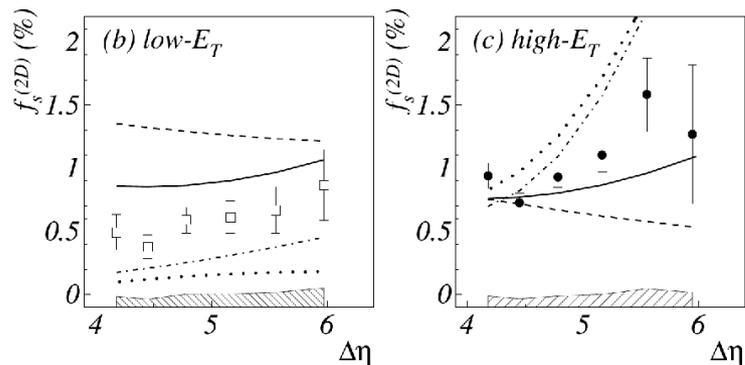
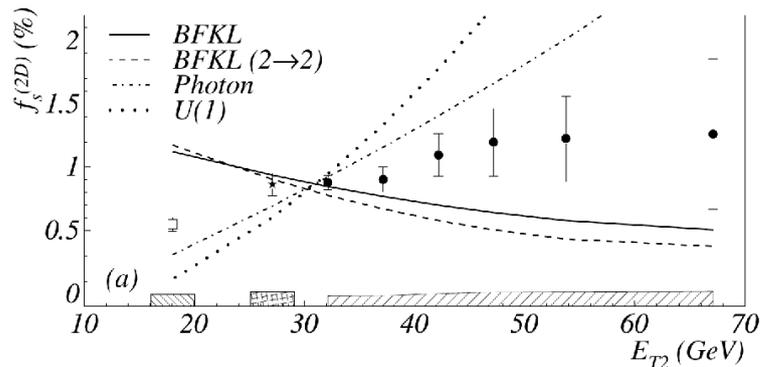


хорошее согласие HERA и Tevatron
Goulianos, 1995

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 EEIM

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

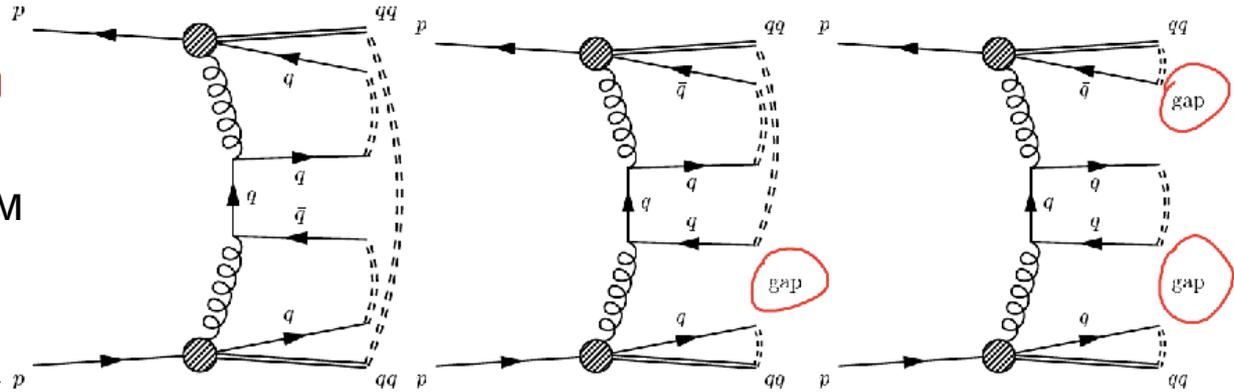
SCI – soft color interactions
(LEPTO for ep, PYTHIA for pp)

Один параметр P -

вероятность обмена цветом между парой партонов.

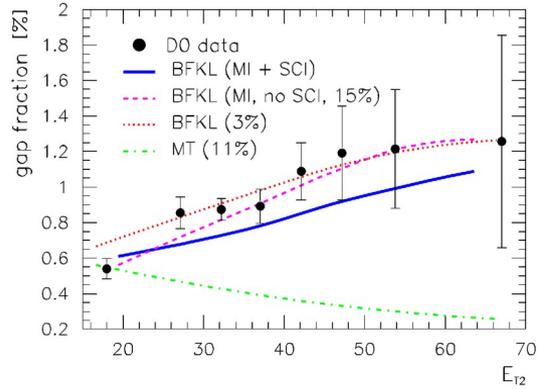
Численное значение

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].

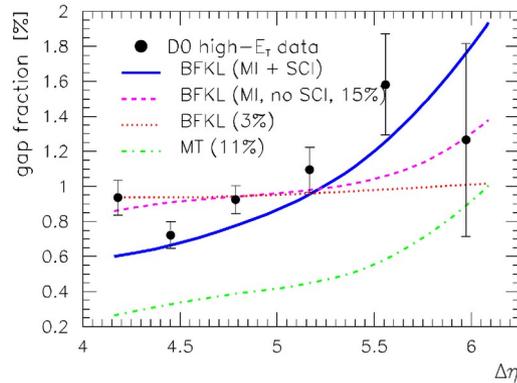
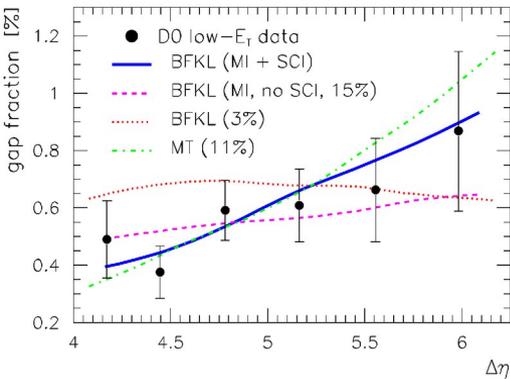
эксперимент D0 – сравнение с предсказаниями EEIM (NLL БФКЛ+SCI) (hep-ph/0111090)



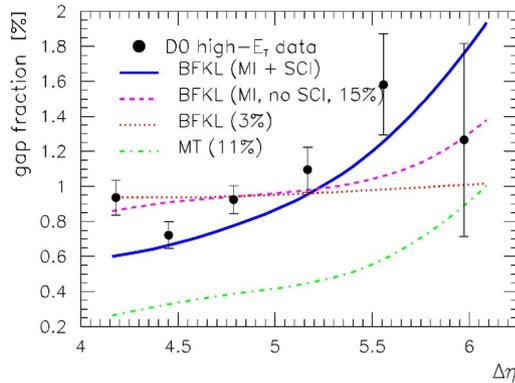
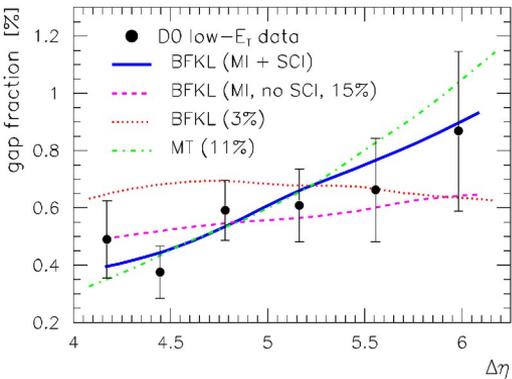
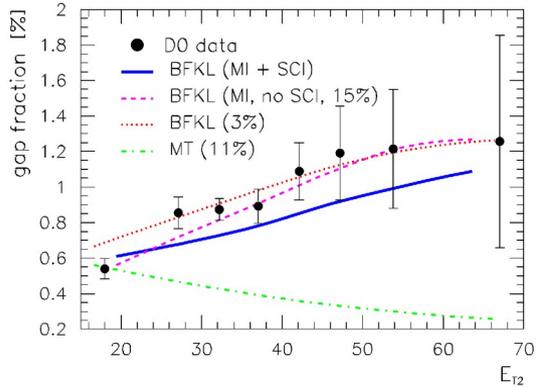
отбор событий:

- 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 η in (-1,1)

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



эксперимент D0 – сравнение с предсказаниями ЕЕИМ (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

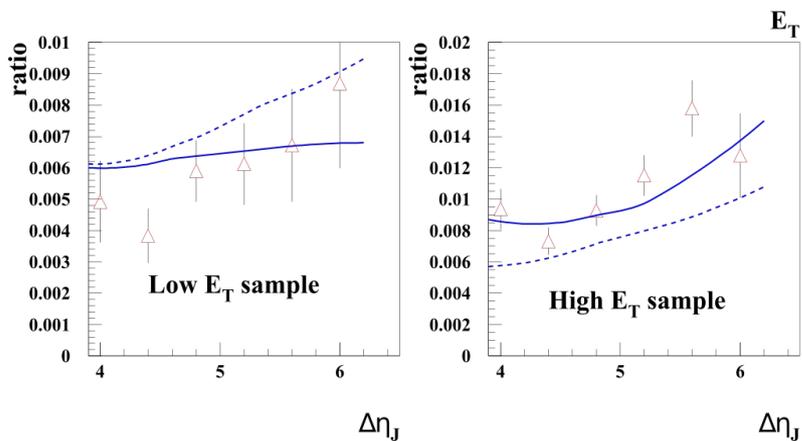
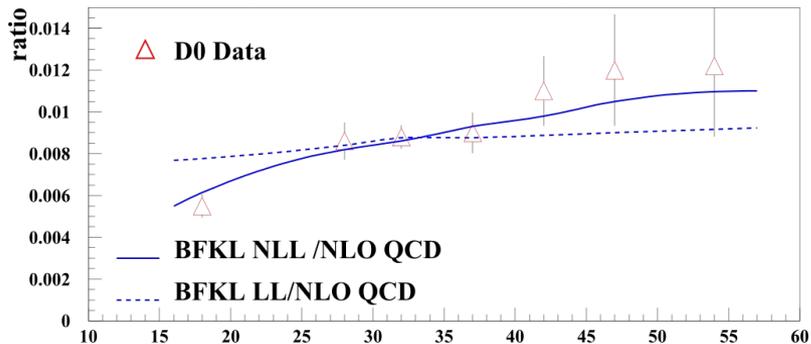
Сводка измерений и сравнений с предсказаниями EEIM (NLL BFKL+SCI)

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

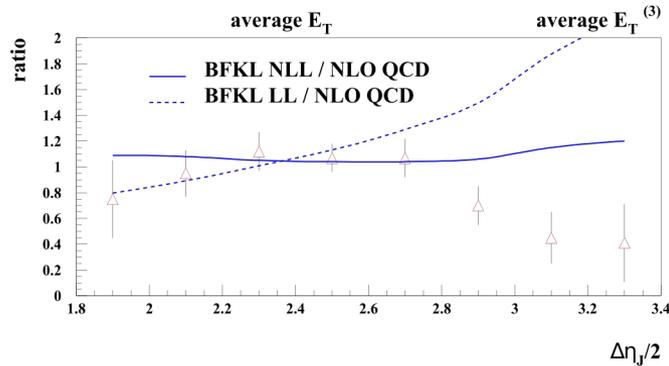
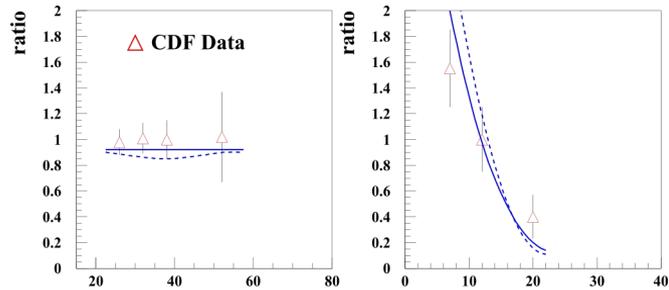
- 1) хотя бы две струи с $p_T > 15$
- 2) в противоположных полусферах
- 3) $1.9 < |\delta\eta| < 4.1$
- 4) $\delta\eta > 4$
- 5) провал по быстротам в области η in (-1,1)

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)

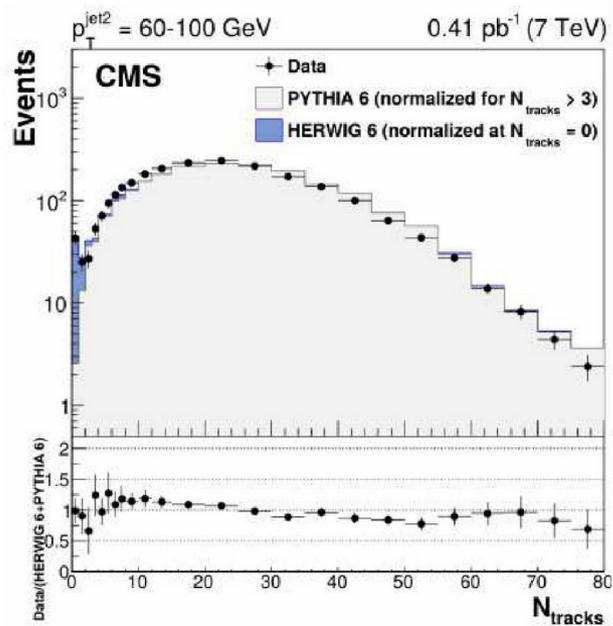


1. отбор струй 20 ГэВ (выше чем в D0 на 5 ГэВ)
2. акцептанс по быстротам (1.8,3.5) – меньше чем у D0
3. провал по быстротам η in (-1,1)
1) $3.6 < |\delta\eta|$

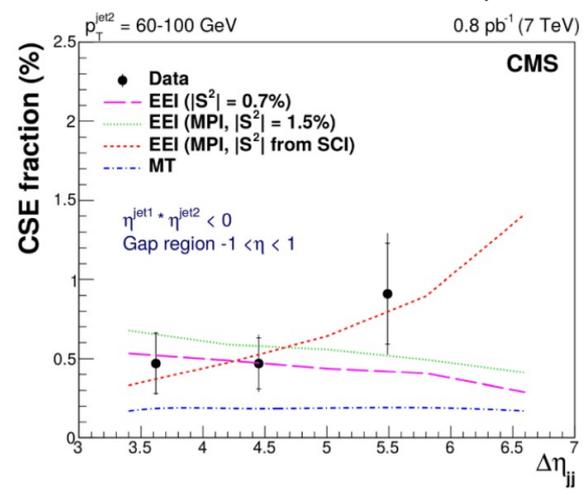
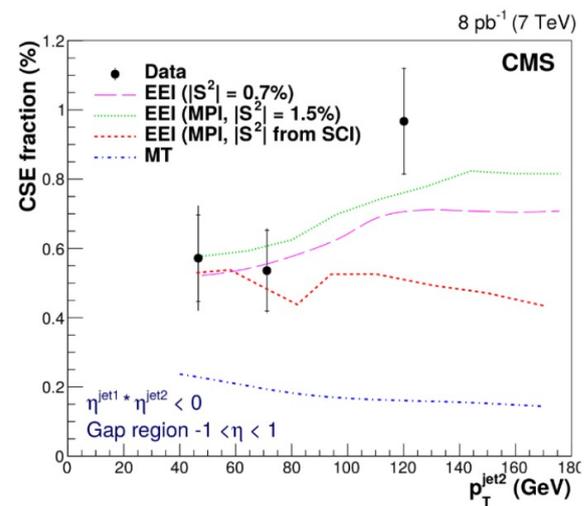
Вычисление NLL хорошо согласуется с данными, в то время как LL даёт гораздо худшее согласие.

Однако, есть сильное разногласие с предсказанием при больших $\delta\eta$ (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)

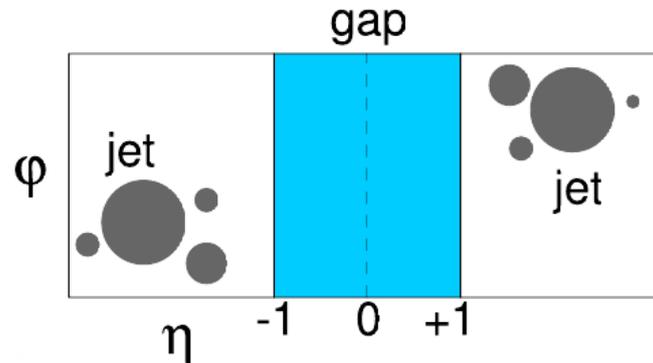


Предсказания NLL БФКЛ сопряженные с различными подходами к моделированию underlying event (модель EEIM)

(hep-ph/1703.10919)

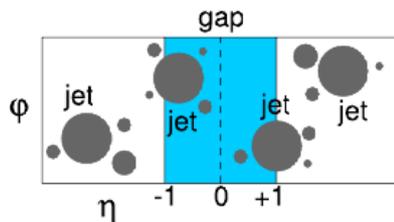
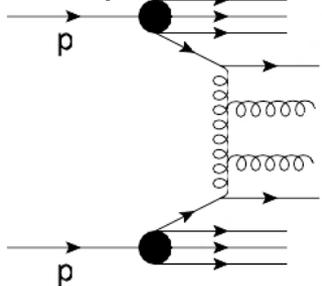
1. сеанс сбора данных: специальный сеанс с низкой мгновенной светимостью ($\beta^* = 90$ m) для маленького pile-up, 2015 год
2. струи anti-kt алгоритм, $R=0.4$, алгоритм particle flow
3. отбор струй: хотя бы две струи с $p_T > 40$ GeV
4. две лидирующие струи удовлетворяют условию $1.4 < |\eta_{\text{jet}}|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

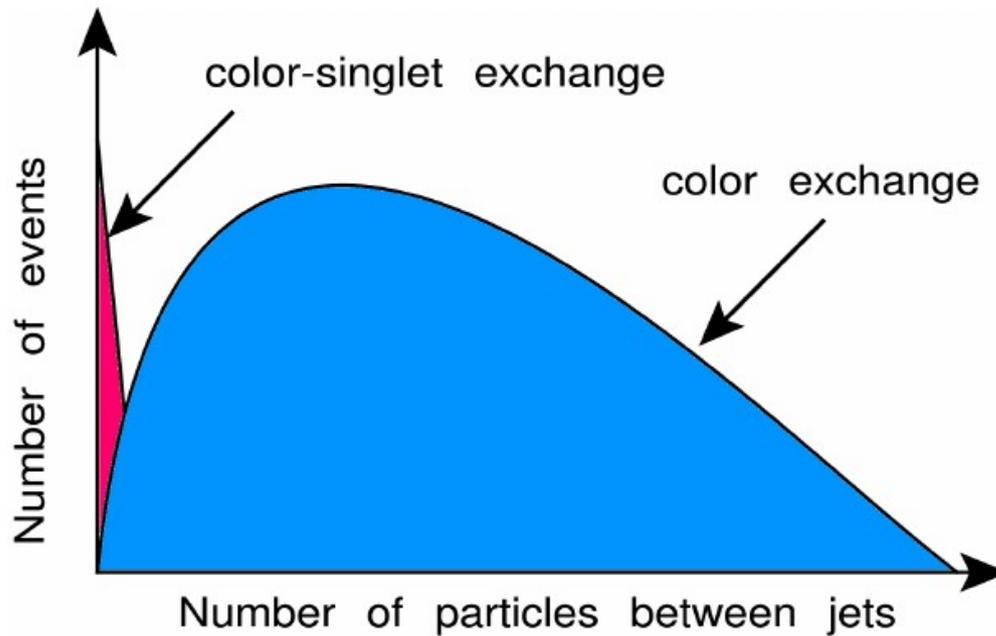
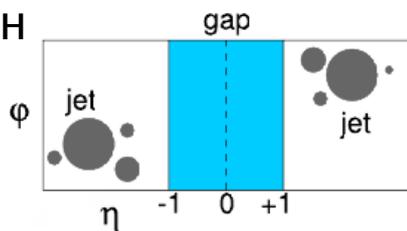
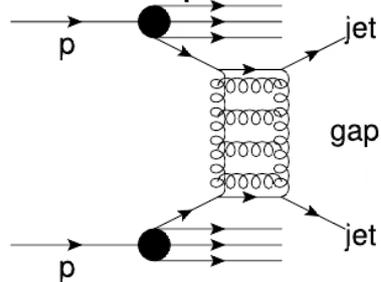


Задача: отделить вклад бесцветового обмена и цветовой обмена

цветовой обмен

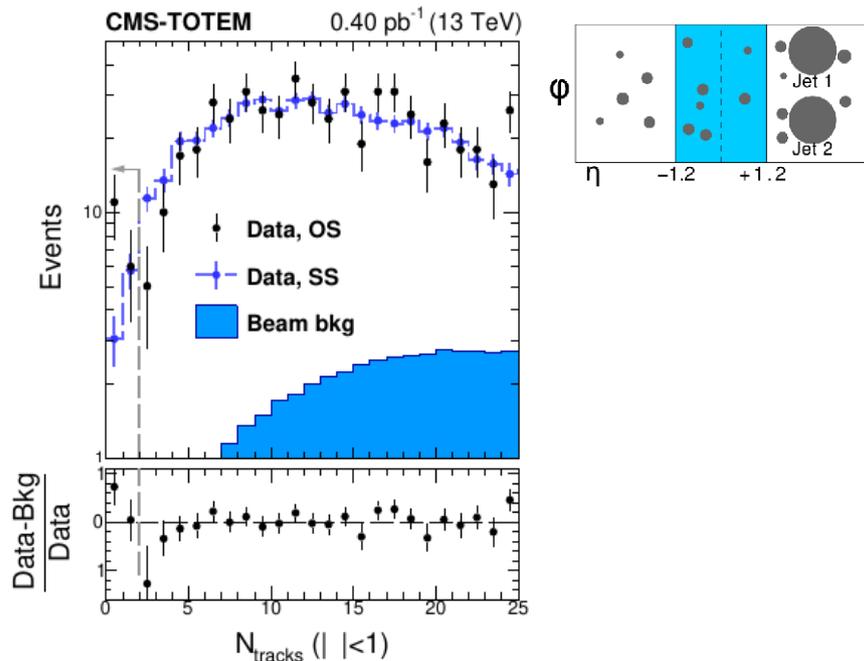


бесцветовой обмен



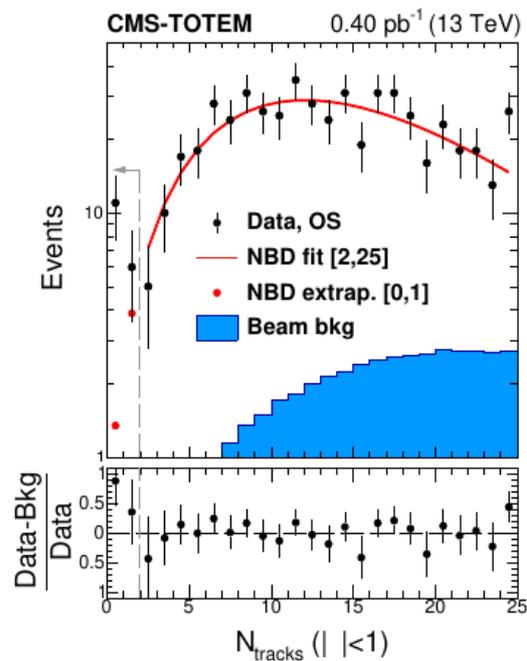
Два способа вычитания цветového обмена

1) используя данные, обеднённые бесцветовым обменом



используется другой набор данных:
две струи в одной полусфере

2) NBD-распределение

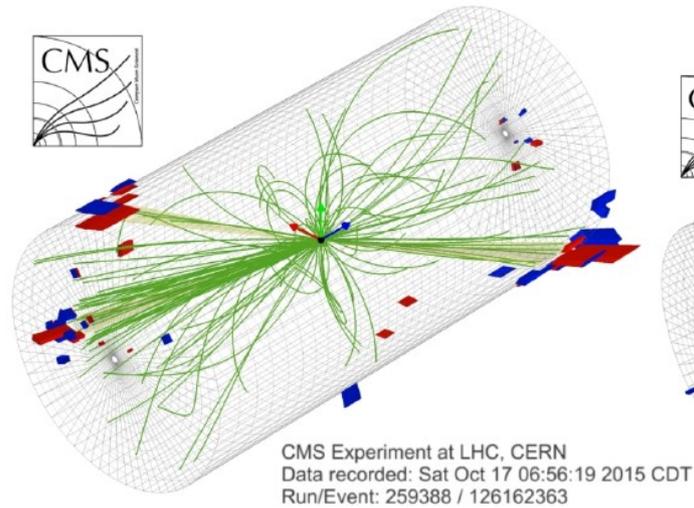


$$\text{NBD}(k;n,p) = \frac{(k+n-1)!}{k!(n-1)!} p^n (1-p)^k$$

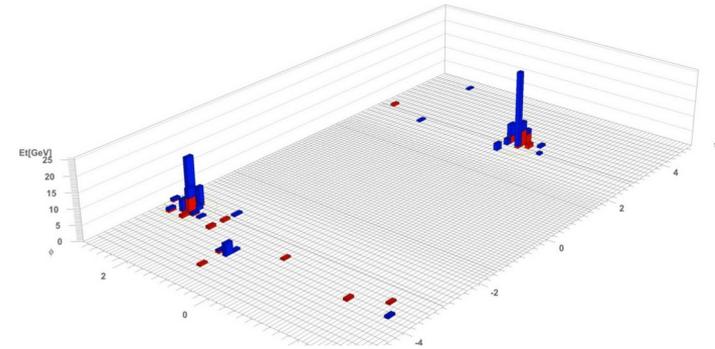
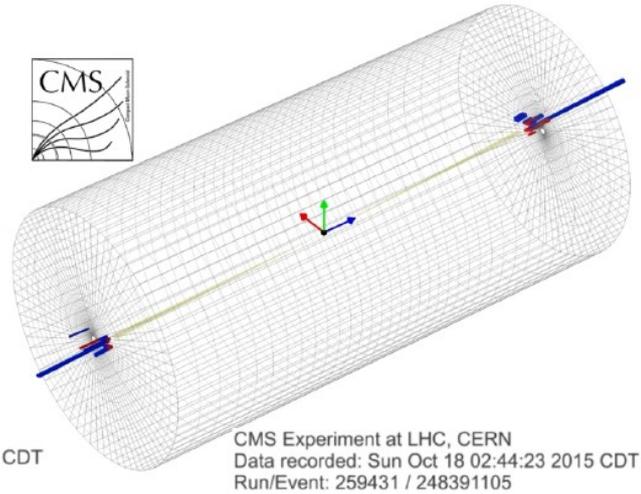
фитирование с помощью
NDB распределения (2 < Ntracks < 25)
и экстраполяция к N_{tracks}=0

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

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

фооновые 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:

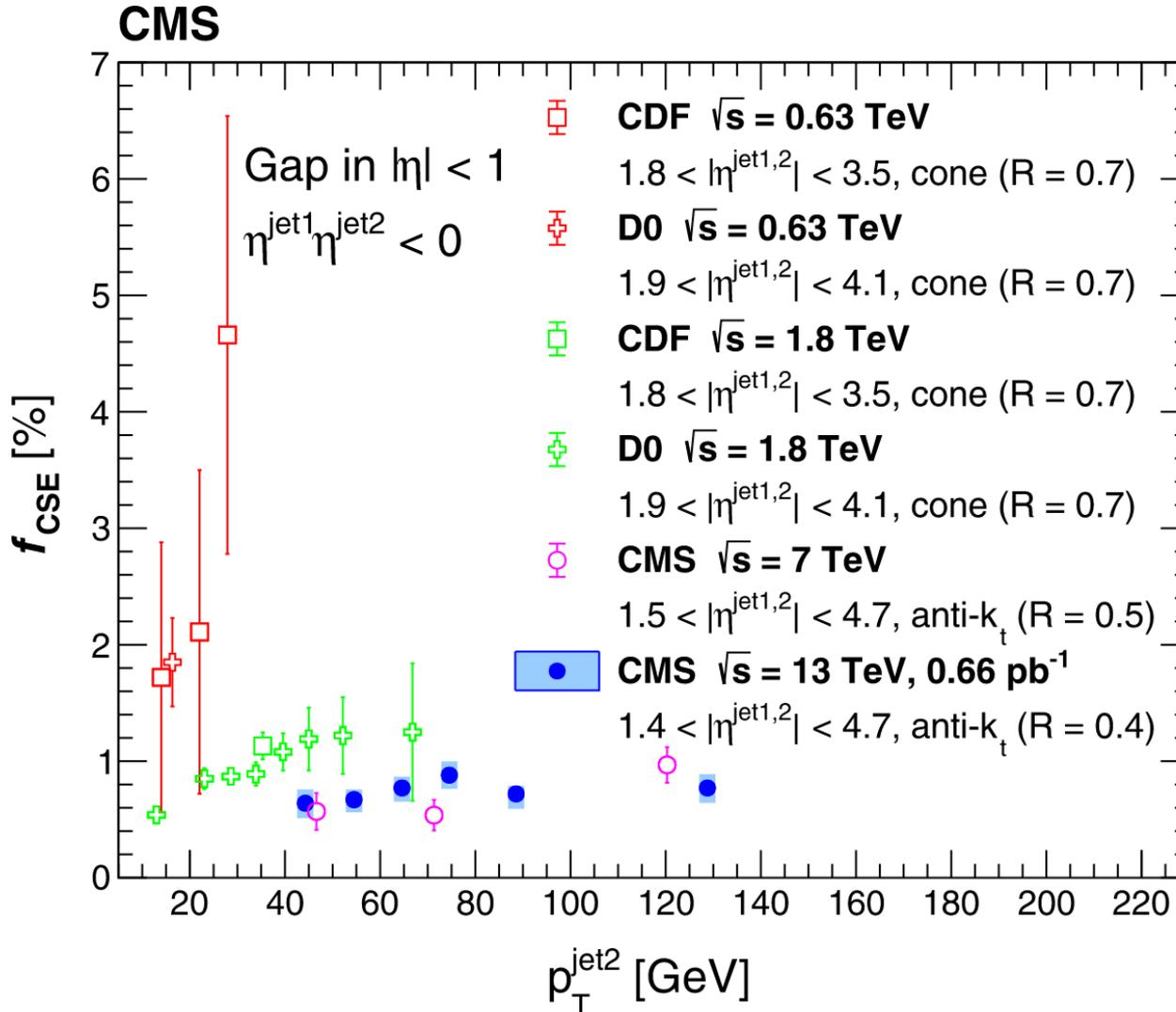
Pythia8, LO, ISR, FSR, tune CUETP8M1

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 $\ll 1$

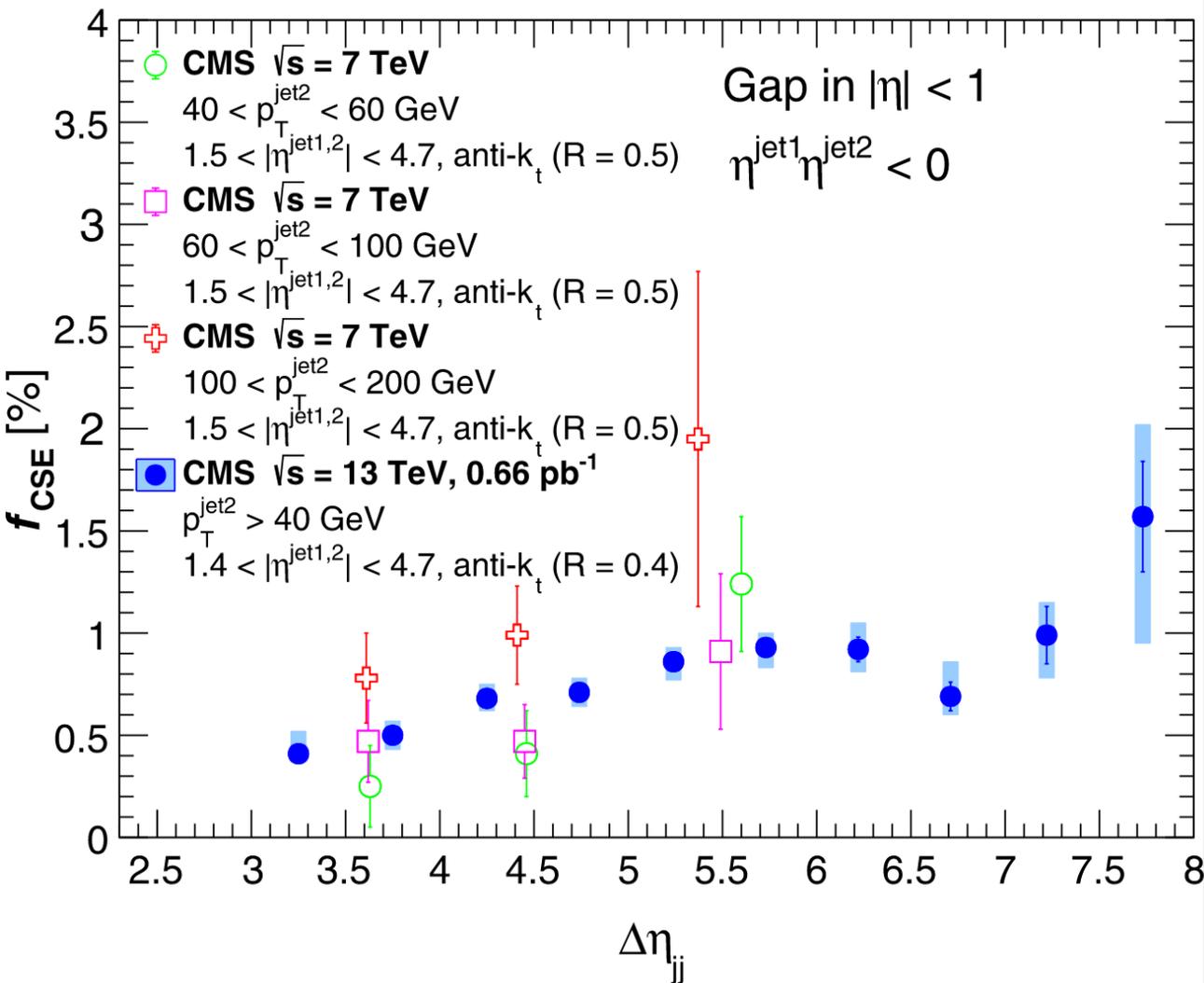
Результаты измерения



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

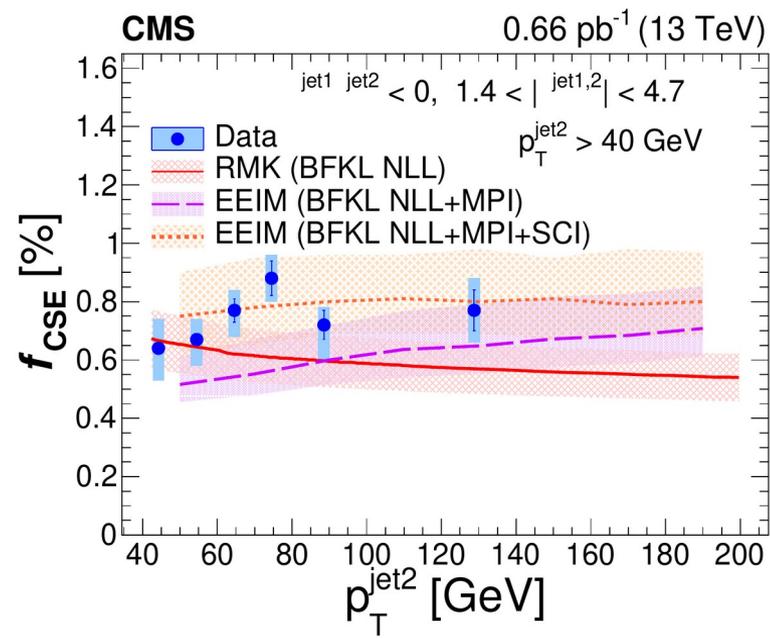
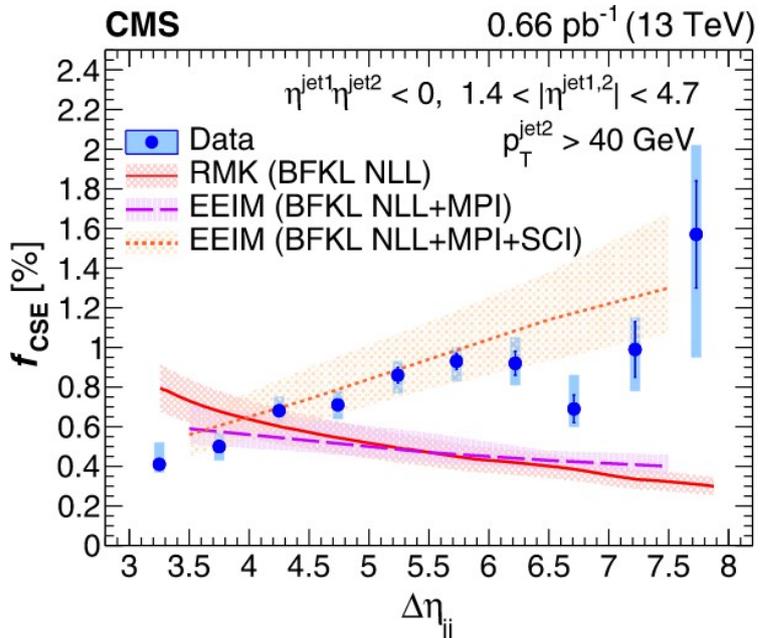
Результаты нового измерения при 7 и 13 ТэВ: зависимость от разницы псевдобыстрот

CMS



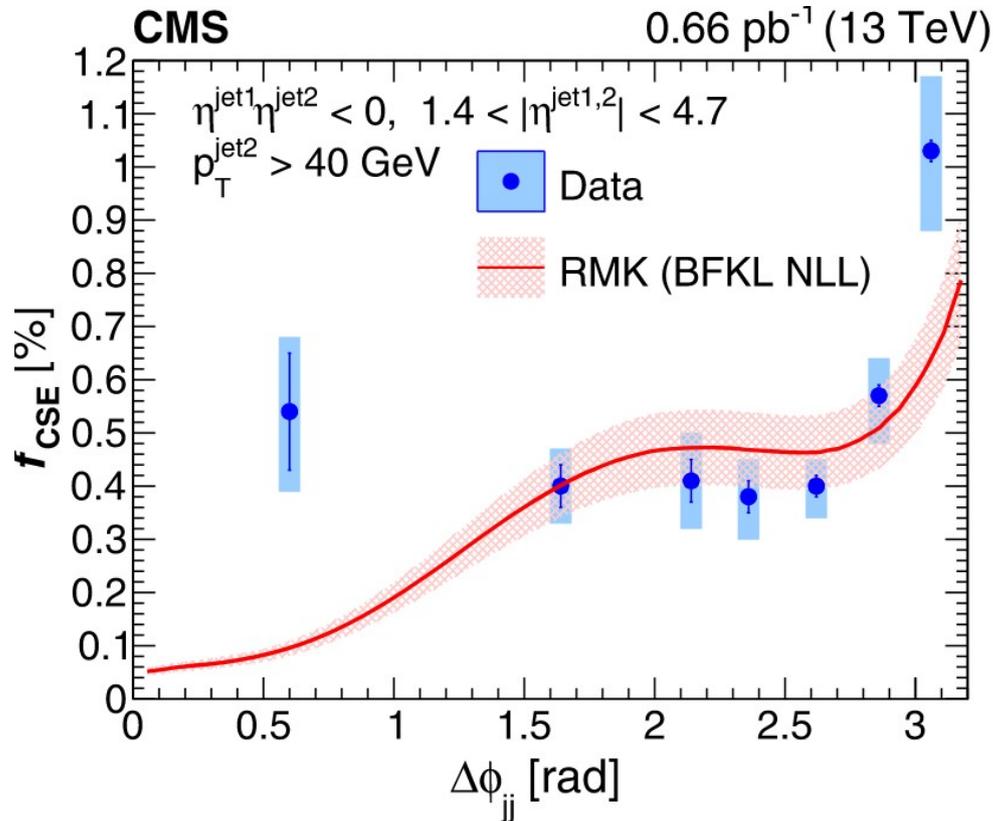
- впервые измерено при таких больших значения разницы псевдобыстрот и энергии
- подтверждается тенденция увеличения доли бесцветного обмена с увеличением $\Delta\eta$

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

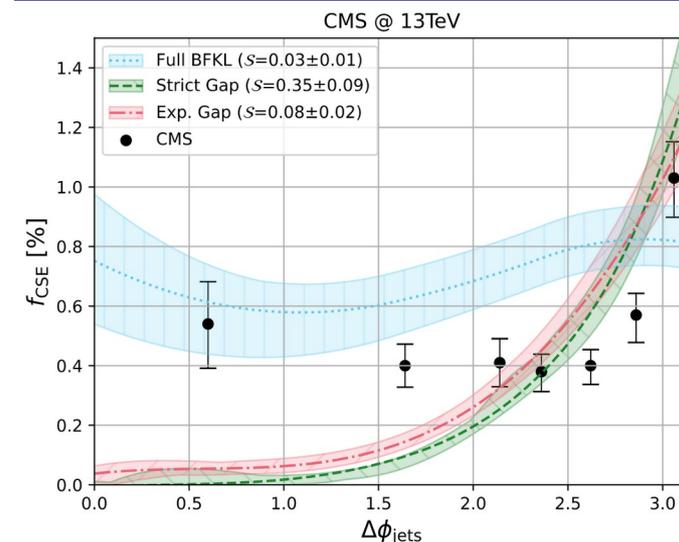
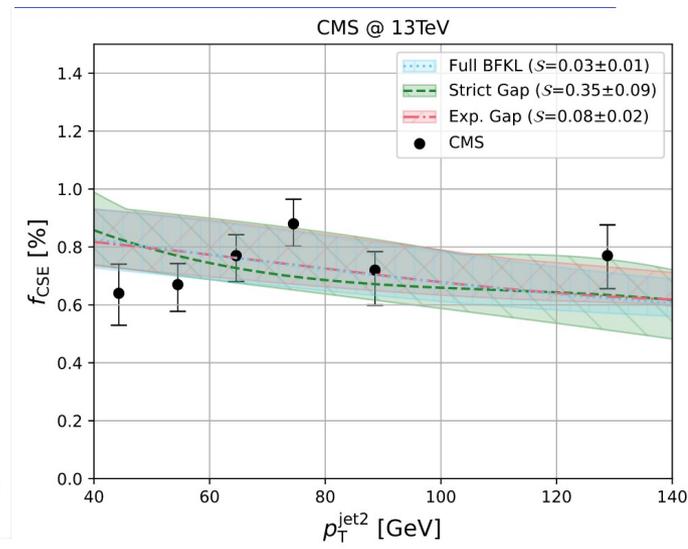
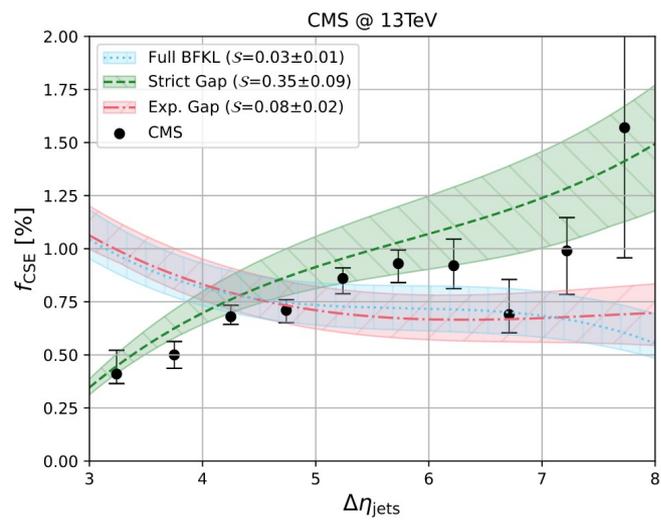


предсказание RMK (NLL БФКЛ) описывает зависимость от разницы азимутальных углов двух струй для больших значений переменной

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)



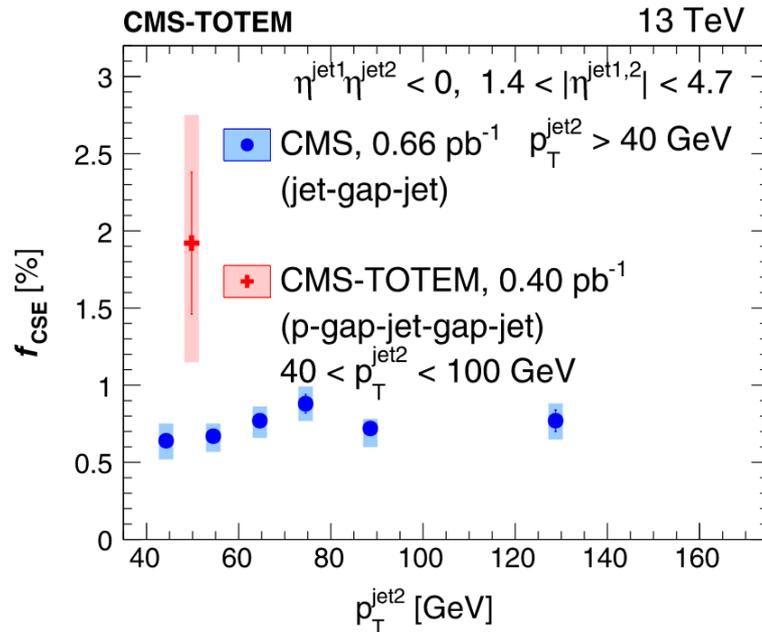
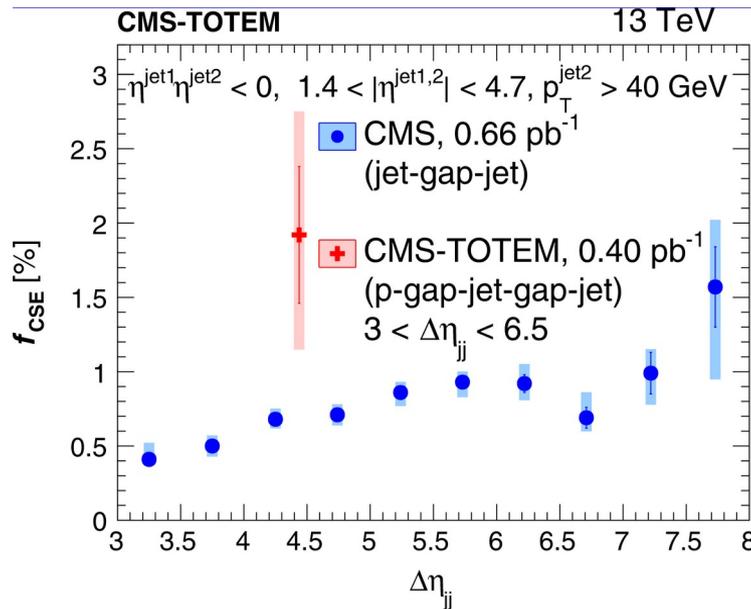
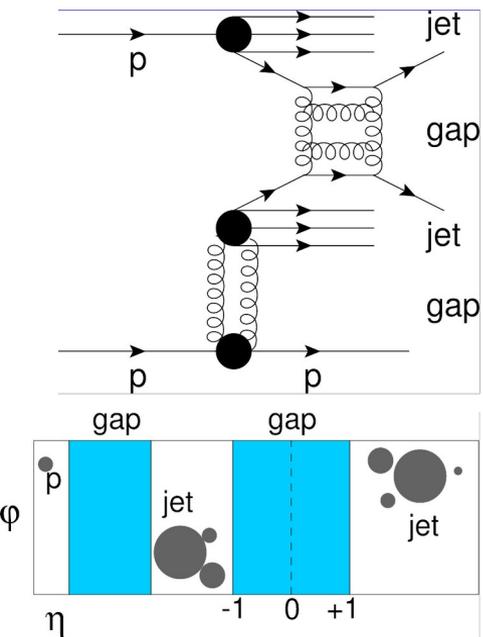
три определения провала по быструтам:

1. “exp gap”: экспериментальный $|\eta| < 1$, $p_T > 200$ 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_{CSE} в 2.91 раза больше когда зарегистрирован протон и доп. провалом по быстротам
- можно объяснить уменьшенной активностью партонных спектров 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!