



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова



Изучение функций перехода в протон-протонных взаимодействиях

Владимир Чуликов

Лаборатория барионной физики

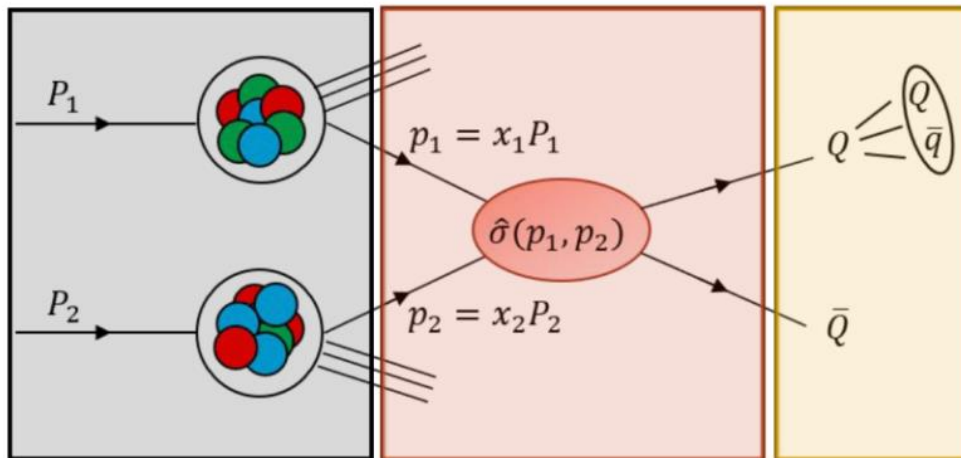
Семинар ОФВЭ

15.02.2022

Содержание

- Введение
- Расчет функций перехода в экспериментах на ускорителях
- Неуниверсальность функций перехода
- Изучение функций перехода в *pp* соударениях в эксперименте LHCb

Факторизационный подход



Функция перехода (функция фрагментации) – вероятность того, что после адронизации партонное состояние переходит в наблюдаемое адронное состояние.

Усредненные функции перехода для очарованных частиц

$$\frac{d\sigma}{dX} = \sum_{i,j} \int_X p_i(x_i, Q) p_j(x_j, Q) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}(Q)}{d\hat{X}} f(\hat{X} \rightarrow X, Q)$$

$f(c \rightarrow D^+)$	0.2404 ± 0.0067	$f(c \rightarrow D^{*+})$	0.2429 ± 0.0049
$f(c \rightarrow D^0)$	0.6086 ± 0.0076	$f(c \rightarrow D^{*0})$	0.2306 ± 0.0315
$f(c \rightarrow D_s^+)$	0.0802 ± 0.0040	$f(c \rightarrow D_s^{*+})$	0.0548 ± 0.0074
$f(c \rightarrow \Lambda_c^+)$	0.0623 ± 0.0041		

Партонные функции распределения

Партонные дифференциальные сечения

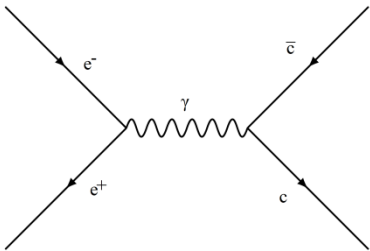
Функции перехода (фрагментации)

Экспериментальное изучение функций перехода

Тип взаимодействия	Эксперимент
e^+e^-	CLEO [1], ARGUS [2], OPAL [3], ALEPH [4], DELPHI [5]
e^-p	ZEUS [6], H1 [7]
pp	LHCb [8], CMS [9], ALICE [10], ATLAS [11]

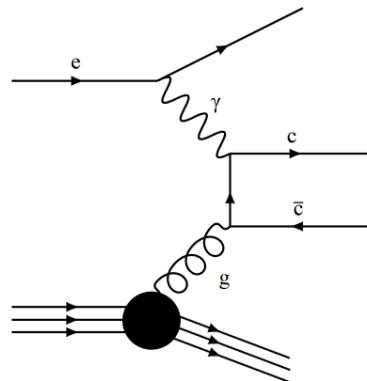
e^-e^+ - взаимодействия

$$f(c \rightarrow H_c) = \frac{\sigma(H_c)}{\sigma(c)}$$



ep, pp -взаимодействия

$$f(c \rightarrow H_c) = \frac{\sigma(H_c)}{\sum_{w.d.} \sigma(H_c)}$$



1. Phys. Rev., D37:1719, 1988.
2. Z.Phys., C52:353, 1991.
3. Z.Phys., C72:1, 1996.
4. Phys. Lett. B, 388:648, 1996.
5. Eur.Phys.J., C12:225 – 241, 2000.
6. JHEP, 0707:074, 2007.
7. Eur. Phys. J., C38:447, 2005.
8. Phys. Rev., D85, 2012.
9. Physics Letters B, 803, 2020.
10. JHEP, 128, 2012.
11. Nucl.Phys. B, 907:717, 2016.
- 12. Phys. Rev., D17, 1978.**
- 13. Phys. Rev., D21, 1980.**

Вычисление функций перехода

Справедливость подхода проверяется экспериментально путем вычисления величины S (см. [1]):

$$S = f(c \rightarrow D^0) + f(c \rightarrow D^+) + f(c \rightarrow D_s^+) + f(c \rightarrow \Lambda_c^+) + \lambda f(c \rightarrow \Lambda_c^+)$$

$$S = 1.061 \pm 0.045(stat) \pm 0.060(sys) \pm 0.037(br)$$

$$f(c \rightarrow H_c) = \frac{\sigma(H_c)}{\sum_{w.d.} \sigma(H_c)}$$

$$f(c \rightarrow H_c) = \frac{\sigma(H_c)}{\sigma(\Xi_c^+) + \sigma(\Xi_c^0) + \sigma(\Omega_c^0) + \sigma(D^0) + \sigma(D^+) + \sigma(D_s^+) + \sigma(\Lambda_c^+)}$$

$$\sigma(\Xi_c^+) + \sigma(\Xi_c^0) + \sigma(\Omega_c^0) = \lambda \sigma(\Lambda_c^+)$$

Поэтому значение λ можно получить следующим образом:

$$\lambda = 2 \frac{f(s \rightarrow \Xi^-)}{f(s \rightarrow \Lambda^0)} + \frac{f(c \rightarrow \Omega^-)}{f(c \rightarrow \Lambda^0)}$$

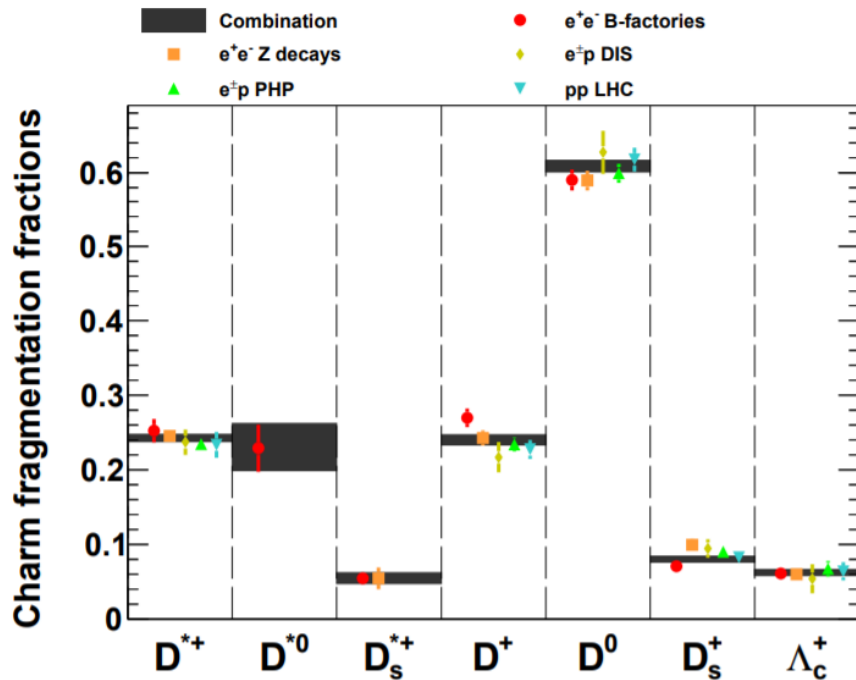
Из предположения симметрии:

$$\frac{f(c \rightarrow \Xi_c^+)}{f(c \rightarrow \Lambda_c^+)} = \frac{f(c \rightarrow \Xi_c^0)}{f(c \rightarrow \Lambda_c^+)} = \frac{f(s \rightarrow \Xi^-)}{f(s \rightarrow \Lambda^0)}$$

$$\frac{f(c \rightarrow \Omega_c^0)}{f(c \rightarrow \Lambda_c^+)} = \frac{f(c \rightarrow \Omega^-)}{f(c \rightarrow \Lambda^0)}$$

Вычисление функций перехода

$$f(c \rightarrow H_c) = \frac{\sigma(H_c)}{\sigma(c)} \quad f(c \rightarrow H_c) = \frac{\sigma(H_c)}{\sum_{w.d.} \sigma(H_c)}$$



1. M. Lisovsky, A. Verbytskyi, and O. Zenaiev. Combined analysis of charm-quark fragmentation-fraction measurements. The European Physical Journal C, 76(7), Jul 2016 (Fig. 1)

- Величина $S = 1$ и была оценена в e^+e^- взаимодействиях;
- Величины функций перехода в e^+e^- , e^-p , pp экспериментах имеют хорошее согласие;
- Не существует работ по измерению функций перехода для возбужденных состояний очарованных барионов.



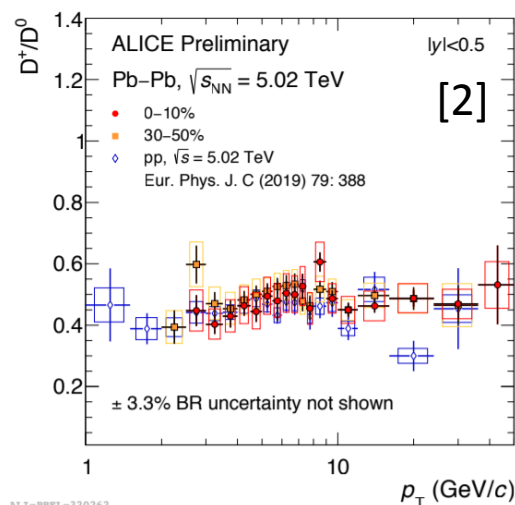
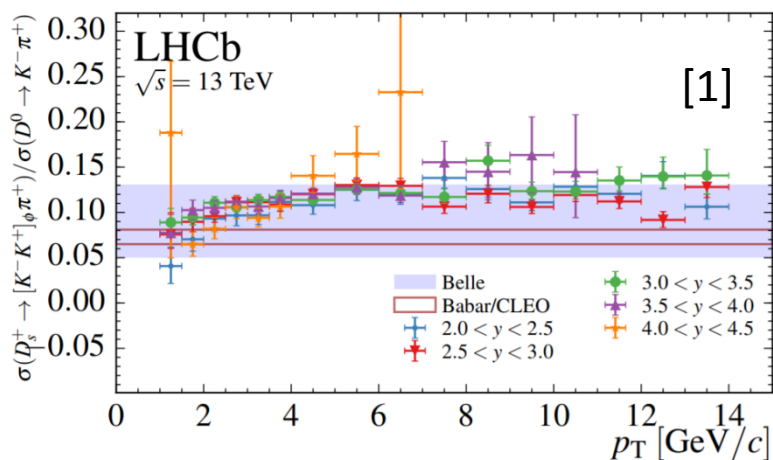
ФУНКЦИИ
ПЕРЕХОДА ДЛЯ
ОЧАРОВАННЫХ
МЕЗОНОВ



ФУНКЦИИ
ПЕРЕХОДА ДЛЯ
ОЧАРОВАННЫХ
БАРИОНОВ

Универсальность функций перехода

Универсальность функций перехода – независимость (отношений) функций перехода от поперечного импульса, быстроты, типа взаимодействующих систем, множественности и т.д.

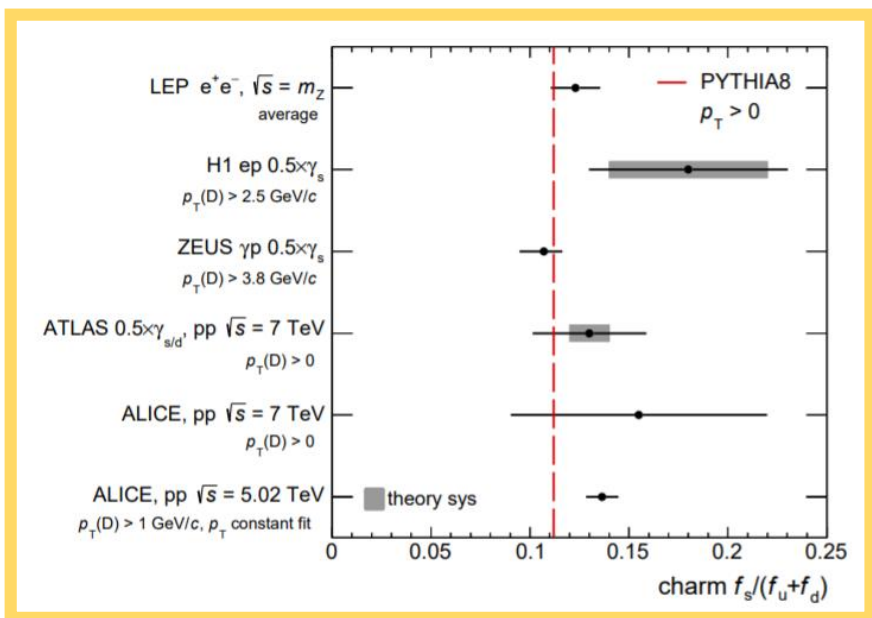


- Слабая зависимость от p_T в измерениях LHCb (согласие с данными по e^+e^- взаимодействиям [1]);
- Отношение функций перехода в ALICE не зависит от центральности;
- Отношения функций перехода не зависят от типа взаимодействий $pp / PbPb$;
- В целом, для D -мезонов отношение сечений рождения хорошо согласуется с гипотезой об универсальности по p_T .

Универсальность функций перехода

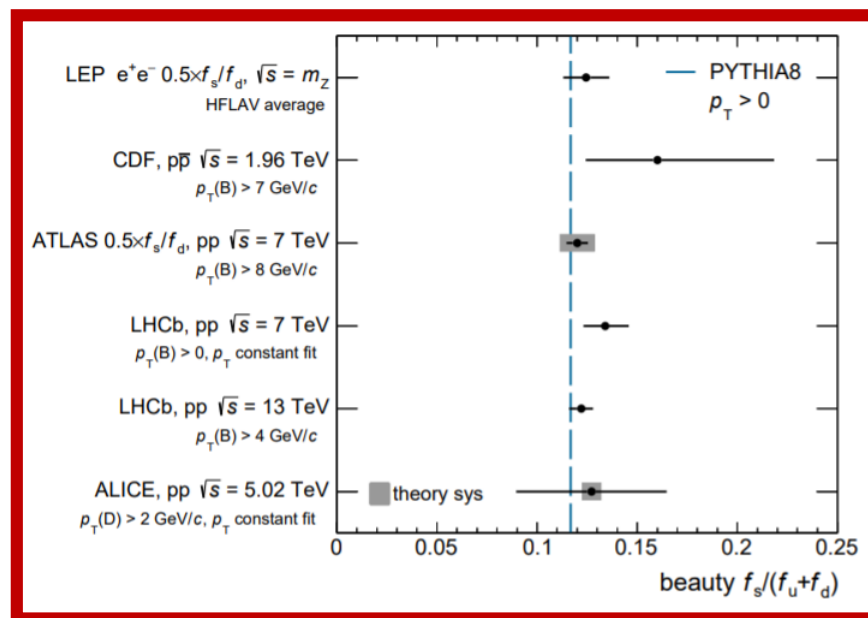
(C)charm

$$\frac{f_s}{f_u + f_d} = \frac{D_s^+}{D^0 + D^+}$$



(B)beauty

$$\frac{f_s}{f_u + f_d} = \frac{B_s^0}{\bar{B}^0 + B^-}$$



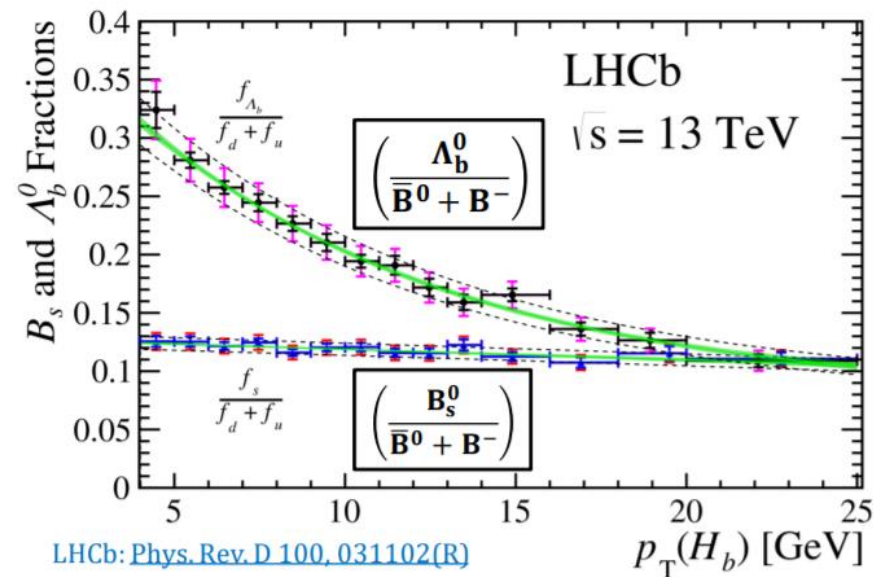
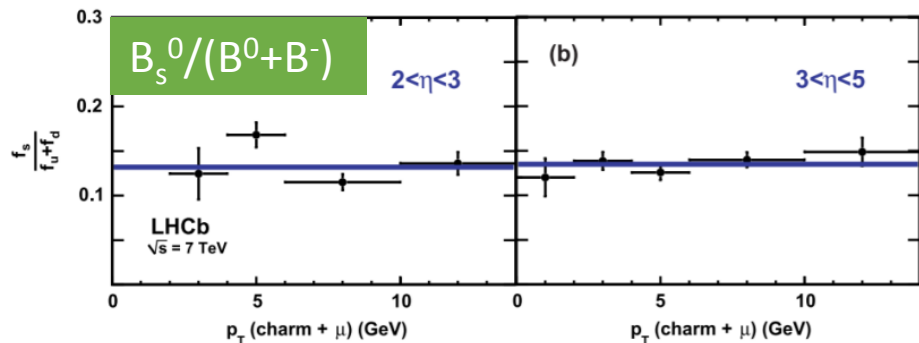
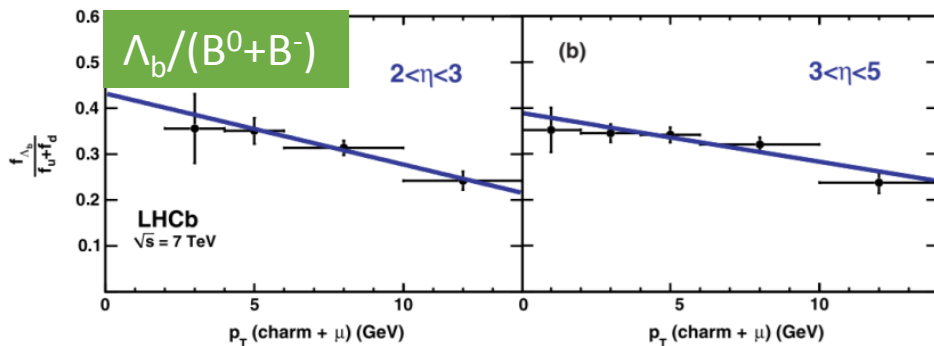
Результаты оценки отношений функций перехода для очарованных и прелестных мезонов хорошо согласуются.

Универсальность в секторе прелестных адронов



ФУНКЦИИ ПЕРЕХОДА НЕУНИВЕРСАЛЬНОСТЬ

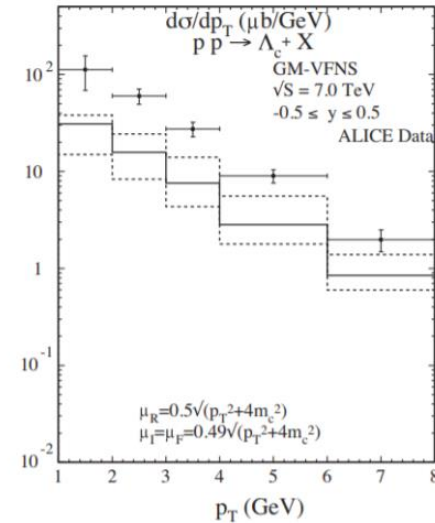
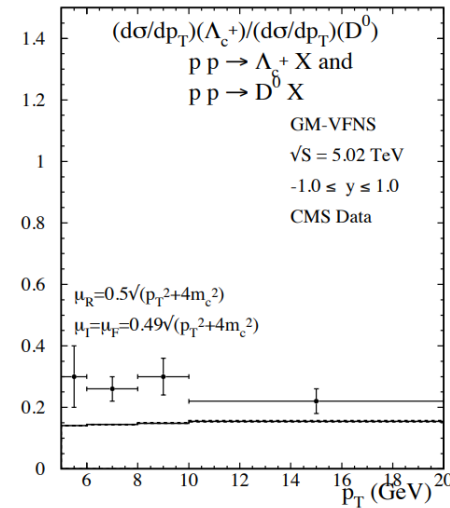
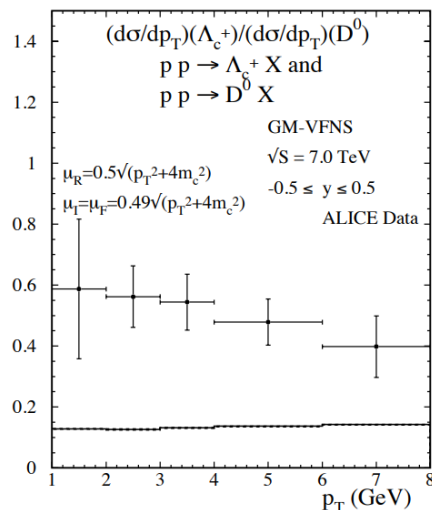
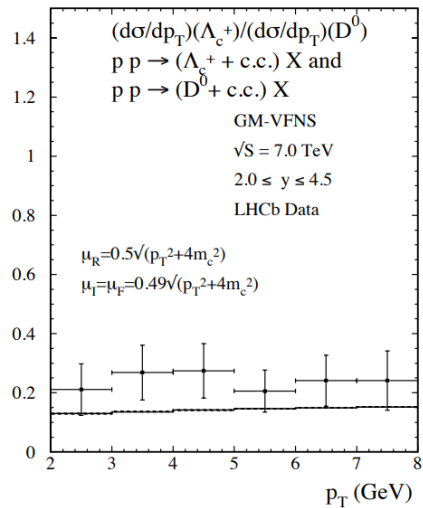
- «Барион-мезонные» отношения уменьшаются с ростом p_T
- «Мезон-мезонные» остаются постоянными;
- Наблюдается неуниверсальность отношений барион/мезон в pp -взаимодействиях.



Неуниверсальность в соотношении $f(\Lambda_c)/f(D^0)$

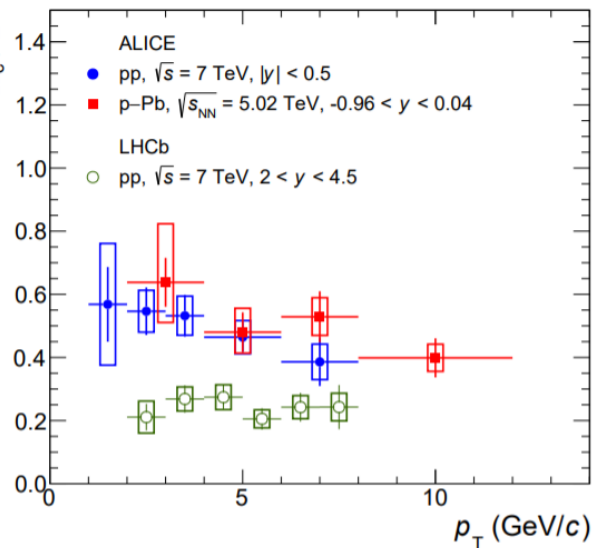
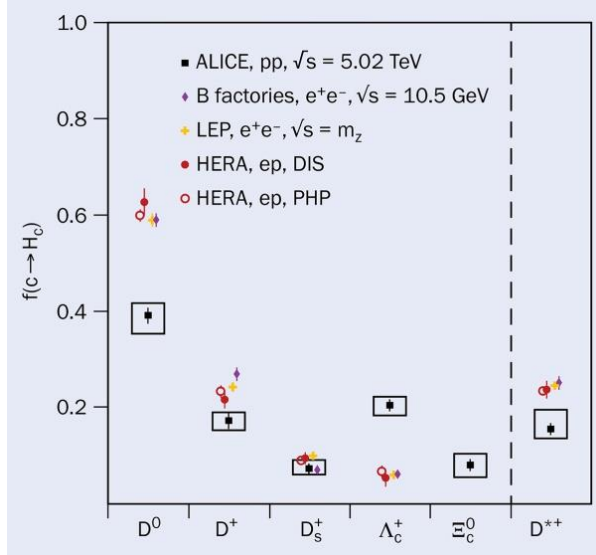
1. B.A. Kniehl, G. Kramer, I. Schienbein, and H., Phys. Rev. D 101, 114021
2. Belle, PRD 97, 072005 (2018)
3. G. Kramer, H. Spiesberger 2018 Chinese Phys. C 42 083102
4. LHCb, Phys. Rev. D 100, 031102(R) (2019).

- Комбинированный анализ [1], основанный на данных рождения очарованных адронов в e^+e^- взаимодействиях в эксперименте OPAL;
- Статистически значимые расхождения устранены путем включения в модель данных Belle [2];
- Отношение функций перехода Λ_c/D^0 согласуется с результатами LHCb и CMS, однако, отличается от результатов, полученных ALICE;
- Расхождение между данными модели и экспериментальными данными LHCb и CMS, со статистической значимостью $2-3\sigma$ [3] соответствует неуниверсальности Λ_b/B^0 [4].
- Вероятное объяснение – неуниверсальность отношения Λ_c/D^0 .



Неуниверсальность фрагментации очарованных адронов

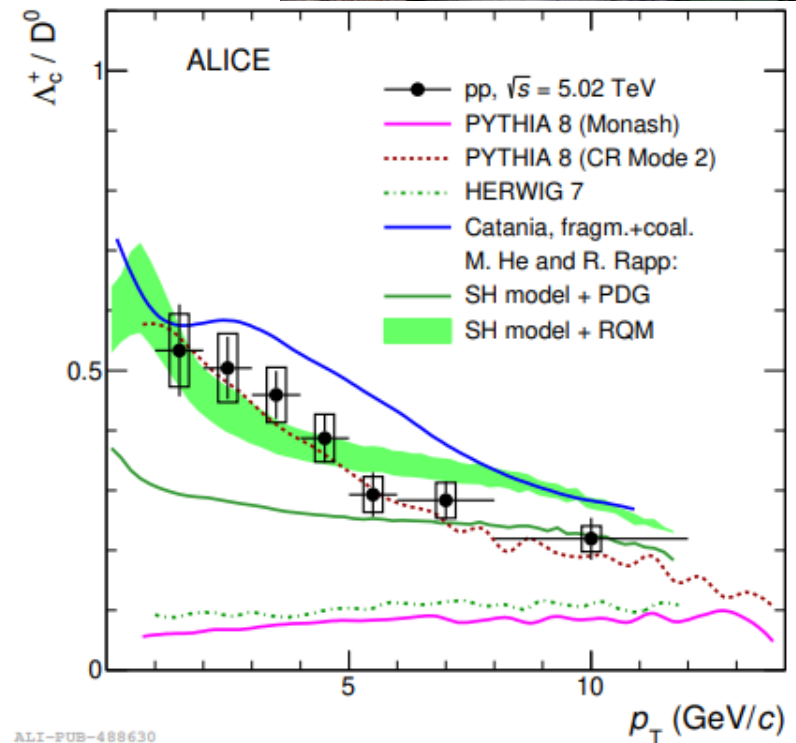
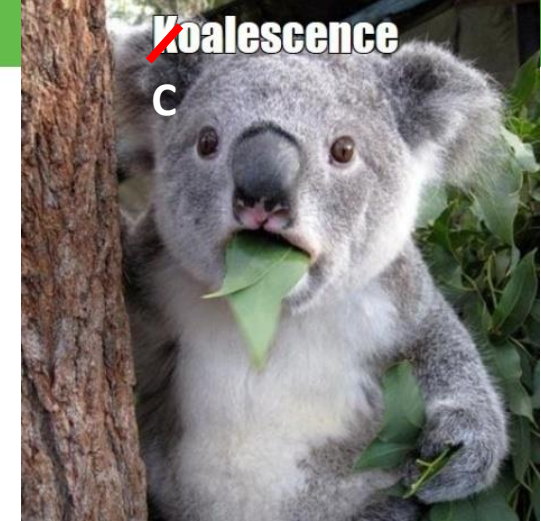
- ALICE, Run 2, pp , $\sqrt{s} = 5,02$ ТэВ,
- $d\sigma_{(cc)}/dy = 1165 \pm 44^{+134}_{-101}$ мкб
- Измерены функции перехода: $\Xi_c, \Lambda_c, D^0, D^+, D_s^+$
- Адронизация в барионы идет на 40% интенсивнее в сравнении с e^-p и e^+e^- соударениями
- В pp и p -Pb отношениях Λ_c/D^0 указание на неуниверсальное поведение по p_T (ALICE [1], LHCb [2]).



1. The ALICE collaboration., Acharya, S., Acosta, F.T. et al. Λ_c^+ production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ and in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. *J. High Energ. Phys.*
 2. The LHCb collaboration, Prompt charm production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, Volume 871, Issue 1, 1 June 2013, Pages 1-20

Неуниверсальность фрагментации

- Пересоединение цвета (Color Reconnection) [1];
- Адронизация через коалесценцию [2];
- Вклад от неизученных тяжелых состояний очарованных барионов [3].



ALI-PUB-488630

1. J.R. Christiansen, P.Z. Skands, JHEP 08, 003 (2015).

2. V. Minissale, S. Plumari, V. Greco, Charm Hadrons in pp collisions at LHC energy within a Coalescence plus Fragmentation approach, Phys.Lett.B 821 (2021).

3. M. He, R. Rapp, Phys. Lett. B 795, 117 (2019)

Резюме

- **Существуют** экспериментальные доказательства нарушения универсальности фрагментации в секторе прелестных адронов (LHCb);
- **Существуют** экспериментальные свидетельства (ALICE) и теоретические расчеты, указывающие на неуниверсальности функций перехода в секторе очарованных частиц;
- **Не существует** измерений функций перехода для очарованных барионов с $m > m_{\Xi_c}$

Вычисление функций перехода очарованных барионов (наша работа)

Цель работы: измерить величину отношения дифференциальных сечений рождения для $Y_c = \Xi_c(2645), \Xi_c(2815)$ к Ξ_c , используя данные, полученные в эксперименте LHCb в 2011, 2012 годах.

$$R_{Y_c} = Br(Y_c \rightarrow \Xi_c) \frac{d^2\sigma_{Y_c}/(dp_T dy)}{d^2\sigma_{\Xi_c}/(dp_T dy)} \propto \frac{f(c \rightarrow Y_c)}{f(c \rightarrow \Xi_c)}$$

Анализ нескорректированной на эффективности был выполнен для следующих каналов

распада: $\Xi_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$

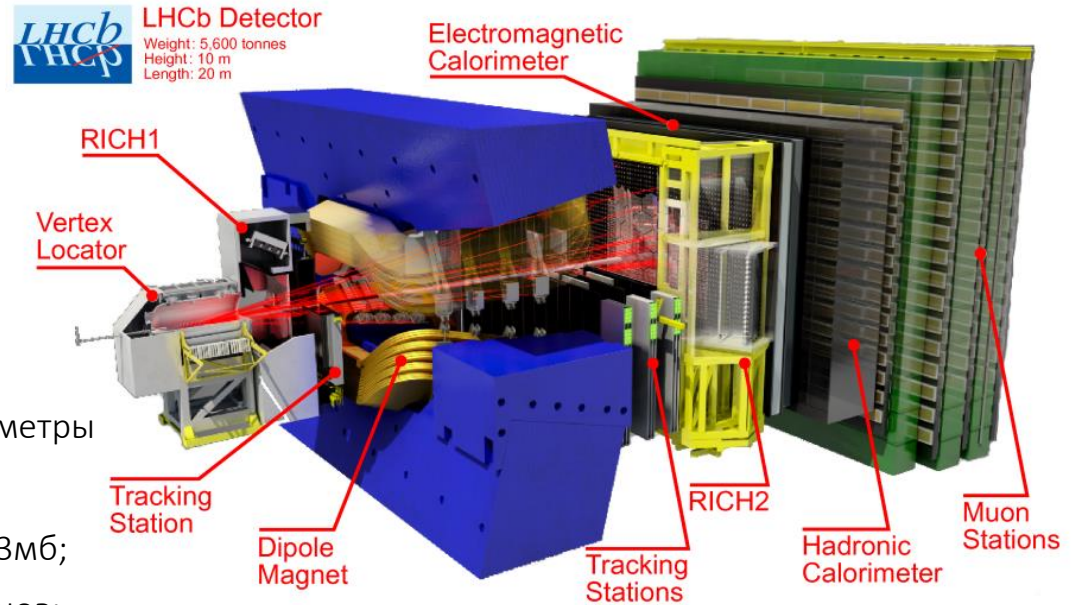
$\Xi_c(2645)^0 \rightarrow \Xi_c^+\pi^-$

$\Xi_c(2815)^+ \rightarrow \Xi_c(2645)^0\pi^+$

- pp взаимодействия при энергии в СЦМ: $\sqrt{s}_{2011} = 7 \text{ TeV}$, $\sqrt{s}_{2012} = 8 \text{ TeV}$;
- Интегральная светимость: $L_{2011} = 1 \text{ fb}^{-1}$, $L_{2012} = 2 \text{ fb}^{-1}$;
- Выбор оптимального разбиения на 9 кинематических интервалов (по p_T и быстроте);
- Выбор границ интервалов был произведен исходя из величины статистической неопределенности числа событий в интервале;

Эксперимент LHCb

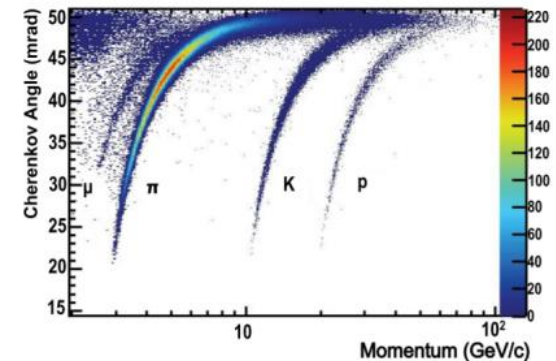
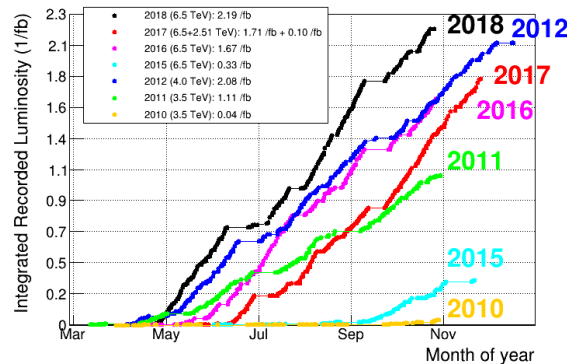
- Диапазон псевдобыстрот: $2 < \eta < 5$;
- Основные детекторные системы:
 - VELO – вершинный детектор
 - RICH – черенковский детектор
 - Внутренний и внешний трекары
 - Электромагнитный и адронный калориметры
 - Мюонная система
- Сечение рождения $c\bar{c}$ -пар при 7 ТэВ: $6.10 \pm 0.93 \text{ мб}$;
- LHCb акцептанс/1 fb^{-1} : $\sim 10^{12}$ распадов c -адронов;



pseudorapidity: $2 < \eta < 5$
 polar angle: $10 < \theta < 250 \text{ mrad}$
 resolution : $\Delta p/p = 0.5\%$ (low p)
 $\Delta p/p = 1.0\%$ (200 GeV/c)

ECAL resolution: $1\% + 10\% / \sqrt{E}$ [GeV]
 trigger efficiency: 90 % for dimuon decays
 30 % for multi-body hadronic

tracking efficiency: 96% for long tracks
 Kaon ID: 95% for 5 % $\pi \rightarrow K$ mis-id
 Muon ID: 97% for 1-3 % $\pi \rightarrow \mu$ mis-id



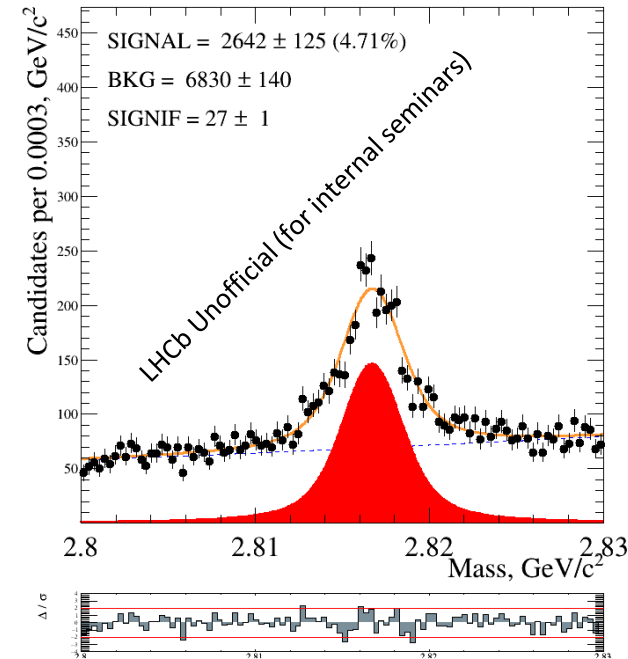
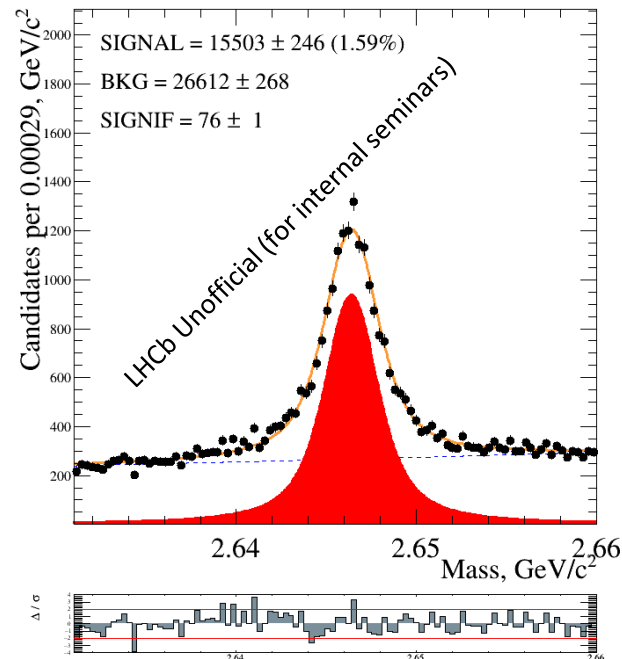
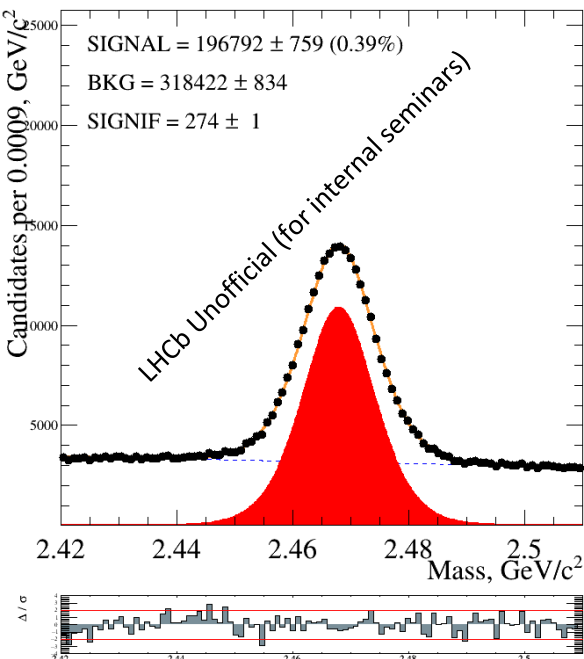
План

- Получение массовых спектров
- Вычисление разрешения детектора
- Оптимизация критериев отбора
- Вычисление систематической неопределенности
- Расчет величины R_{Y_c}

$$R_{Y_c} = Br(Y_c \rightarrow \Xi_c) \frac{d^2\sigma_{Y_c}/(dp_T dy)}{d^2\sigma_{\Xi_c}/(dp_T dy)} \propto \frac{f(c \rightarrow Y_c)}{f(c \rightarrow \Xi_c)}$$

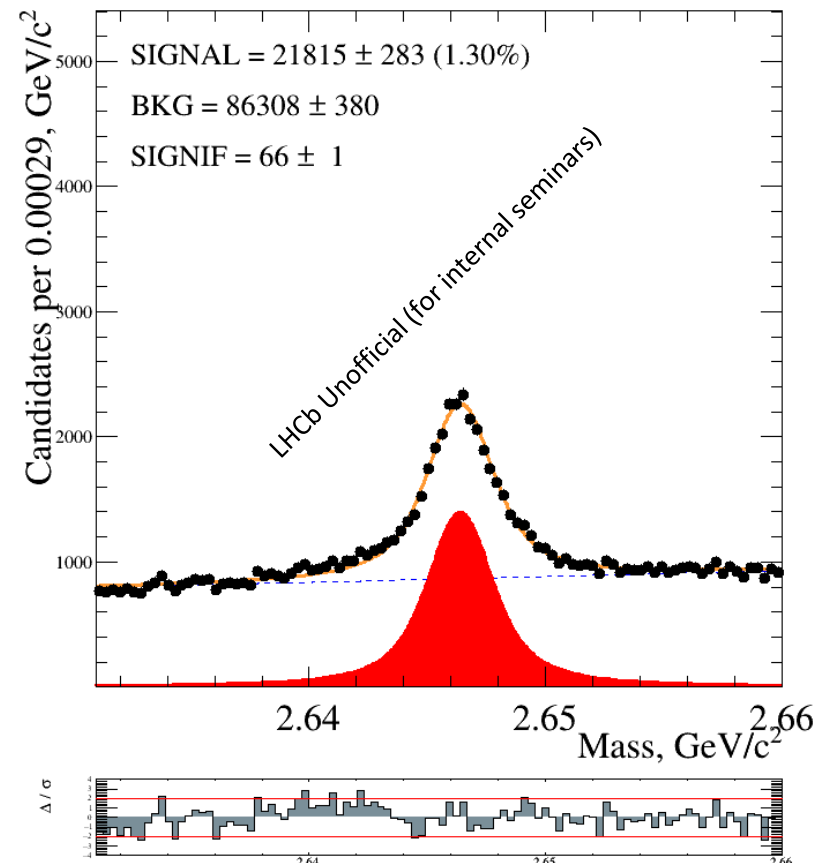
Массовая модель

- Для Ξ_c^+ : Функция плотности распределения *Аполониос2* (учет кратного рассеяния);
- Для $\Xi_c(2645)^0$, $\Xi_c(2815)^+$: Функция *Брейта-Вигнера*;
- Для каждой из массовых моделей фон был описан при помощи *экспоненциальной функции*;
- Для включения в анализ функции разрешения для $\Xi_c(2645)$ и $\Xi_c(2815)$ Брейт-Вигнер был свернут с функцией разрешения (нормальное распределение).



Получение функции разрешения

- Объединенный набор данных 2011+2012, MagUp+MagDown;
- Аппроксимация массового спектра методом максимального правдоподобия;
- Ширина резонанса и форма фоновой компоненты спектра зафиксированы;
- Варьируется только ширина гауссовского разрешения;
- Полученные результаты:
 - $\text{Res}(\Xi_c(2645)) = 817 \pm 35 \text{ keV}$,
 - $\text{Res}(\Xi_c(2815)) = 1114 \pm 101 \text{ keV}$;
- Консервативная оценка разрешения была выбрана в соответствии с величиной $\text{Res} + \sigma_{\text{Res}}$



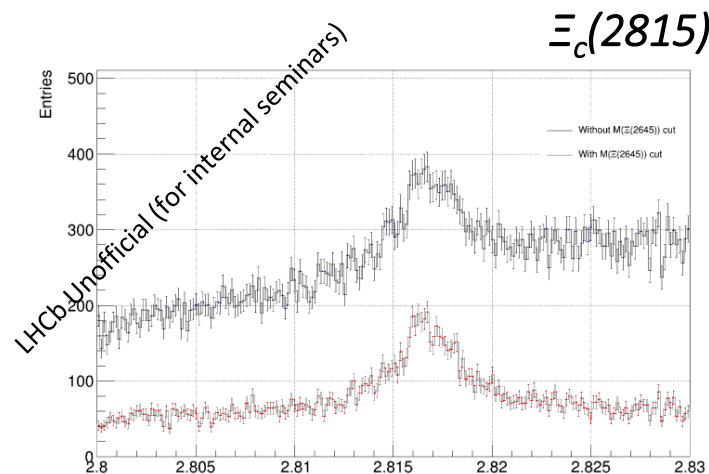
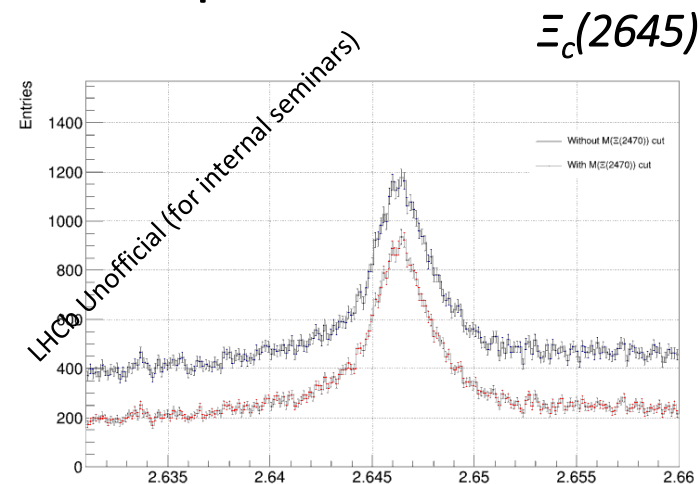
Оптимизация критериев отбора

Цель оптимизации –
максимизировать значимость:

$$signif. = \frac{S}{\sqrt{S + B}}$$

Оптимизация проводилась для
следующих *критериев отбора*:

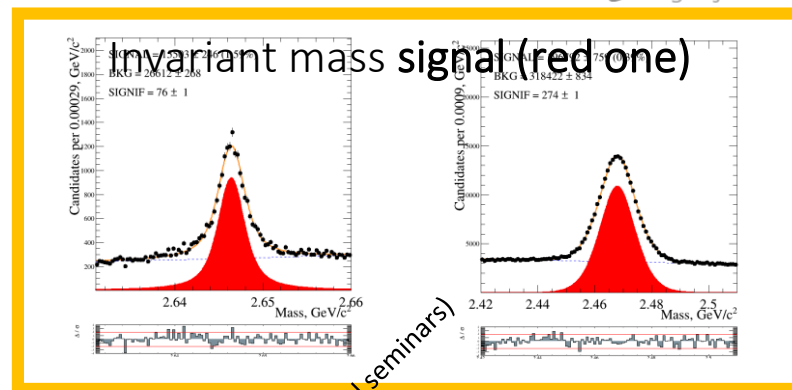
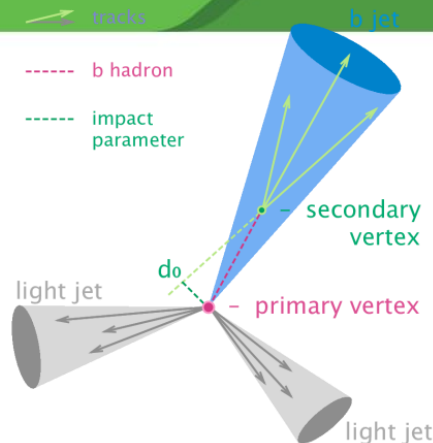
- Отклик нейросетей NNp (вероятность, что событие соответствует протону);
- Массовый диапазон основного состояния;
- Прицельный параметр.



Ограничение на $\log_{10} \chi_{ip}^2$

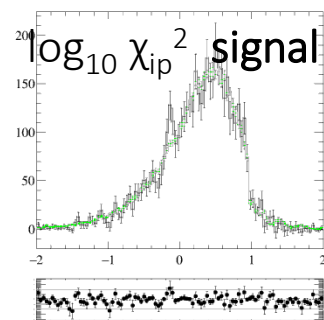
Изменяет ли ограничение на $\log_{10} \chi_{ip}^2$ величину R?

- Аппроксимация набора данных методом максимального правдоподобия;
- Выделение компоненты, соответствующей сигнальному распределению;
- Использование метода *sPlot*: сигнальная компонента массового распределения – дискриминационная переменная, $\log_{10} \chi_{ip}^2$ – контрольная переменная;
- Нормировка на количество событий в массовом спектре основного состояния;
- Pull-гистограмма для проверки значимых расхождений между $\log_{10} \chi_{ip}^2$ -спектрами



LHCb Unofficial (for internal seminars)

sPlot

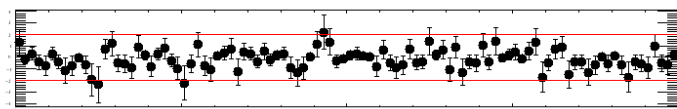
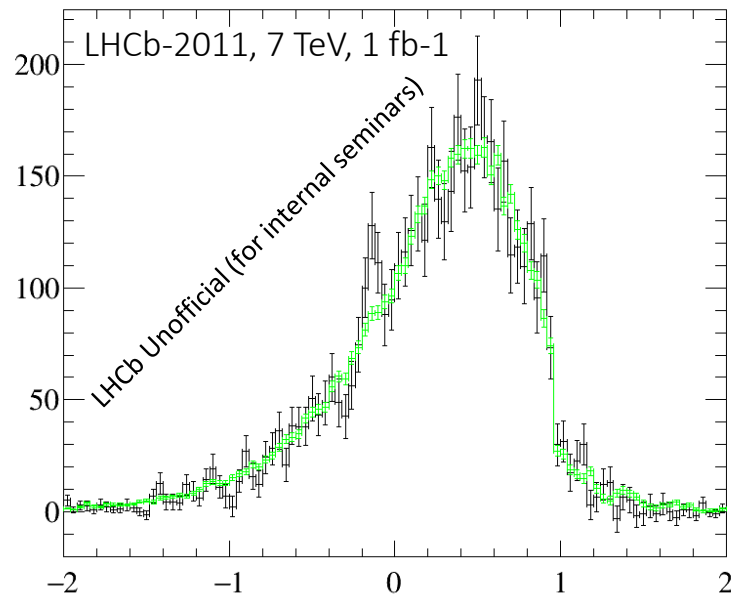


Результаты для $\Xi_c(2645)$

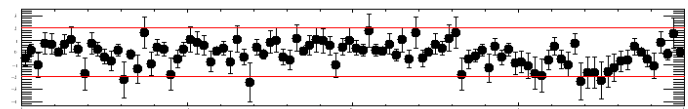
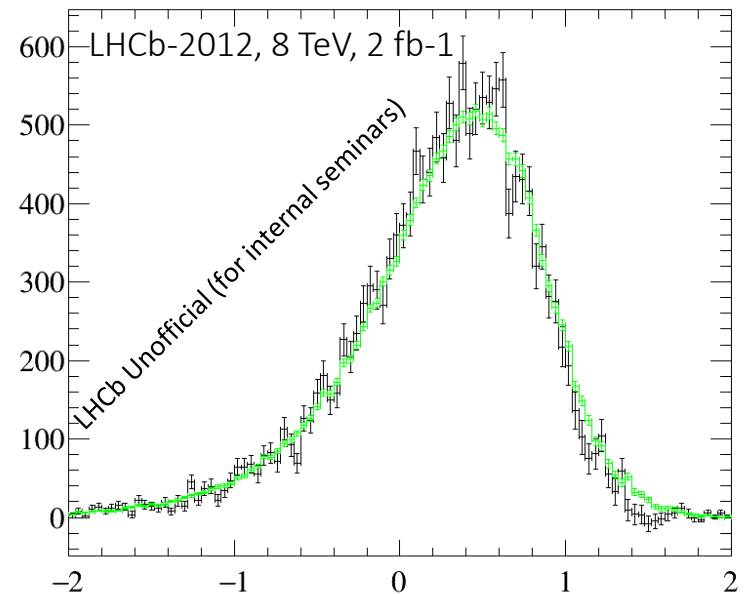
Распределение $\log_{10} \chi_{ip}^2$:

для $\Xi_c(2645)$;

для основного состояния Ξ_c



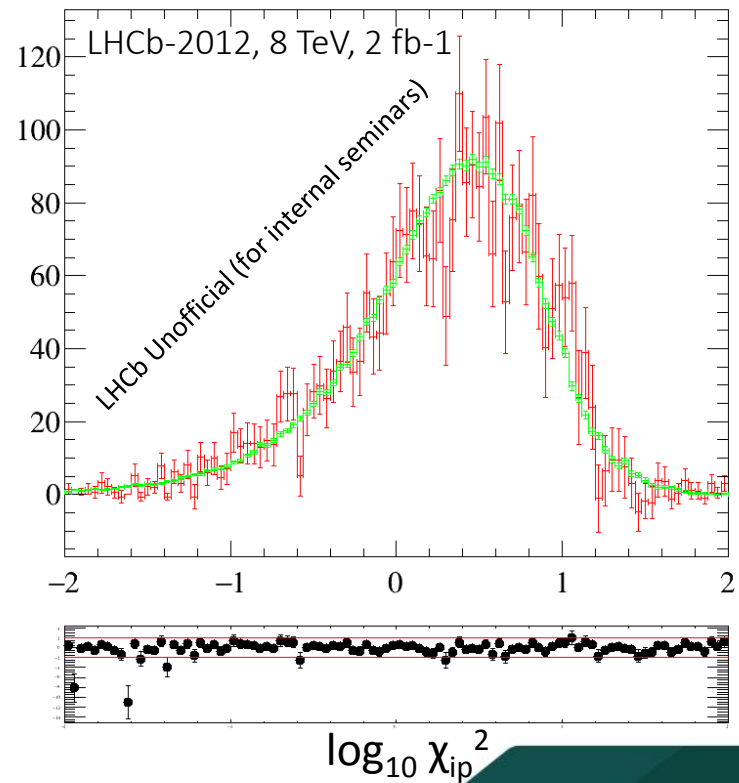
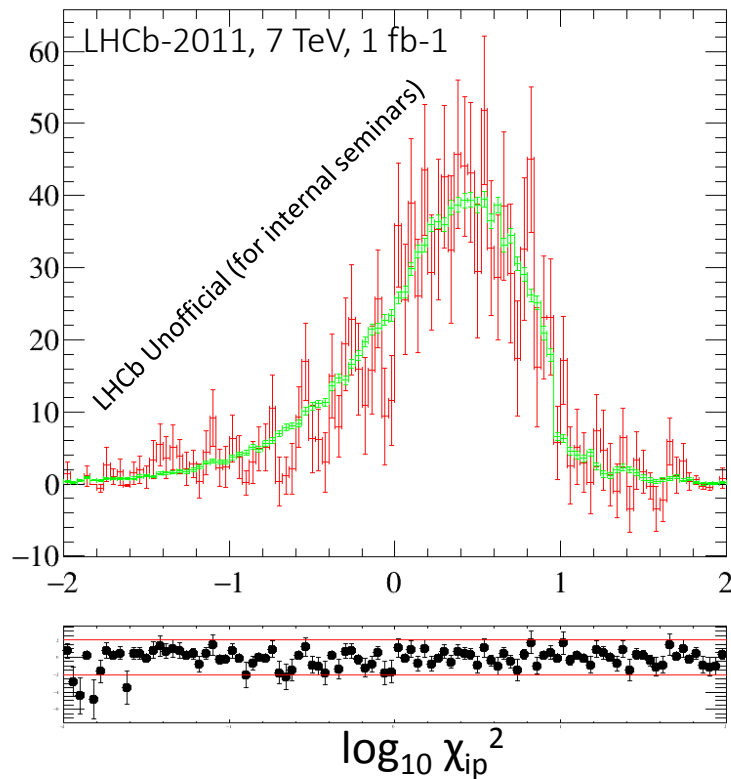
$\log_{10} \chi_{ip}^2$



$\log_{10} \chi_{ip}^2$

Результаты для $\Xi_c(2815)$

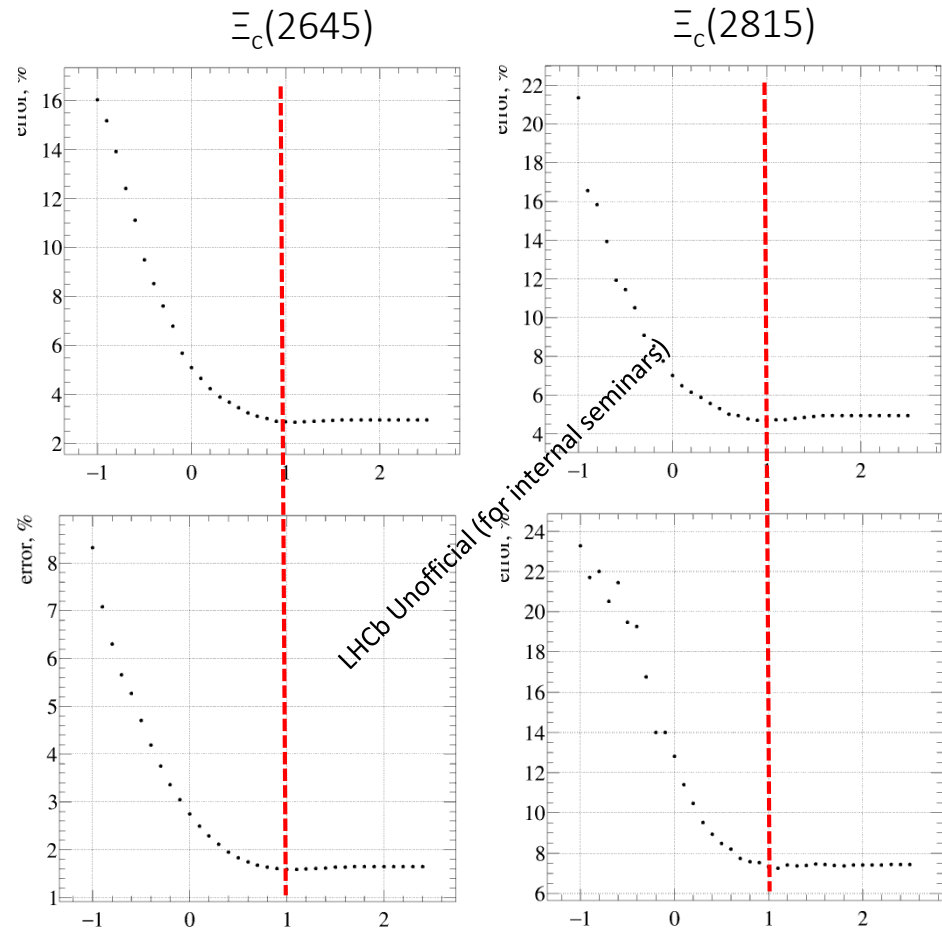
Распределение $\log_{10} \chi_{ip}^2$:
для $\Xi_c(2815)$;
для основного состояния Ξ_c



Оптимизация $\log_{10} \chi_{ip}^2$

- Ограничения на $\log_{10} \chi_{ip}^2$ не изменяют величину R;
- Для оптимизации используется весь кинематический интервал по p_T и y ;
- Аппроксимация массового спектра в диапазоне 2.5 до -1.0;
- Минимизация статистической погрешности;

Максимальная значимость достигается при $\log_{10} \chi_{ip}^2 = 1$.



2011

2012

Систематическая неопределенность

Фиксирование ширины резонанса

- На основе значений ширины резонанса из PDG генерируется значение ширины;
- Производится аппроксимация массового спектра с фиксированной шириной;
- Извлекается количество сигнальных событий в массовом спектре;
- Данная процедура повторяется N раз;
- Отношение ширины (σ) данного распределения к ее центральному значению – есть систематическая неопределенность, соответствующая фиксации ширины резонанса на значение из PDG.

Систематическая неопределенность

Очарование рожденное из прелестных адронов

First observation of the $\Xi_c^+ \rightarrow p\phi$ decay

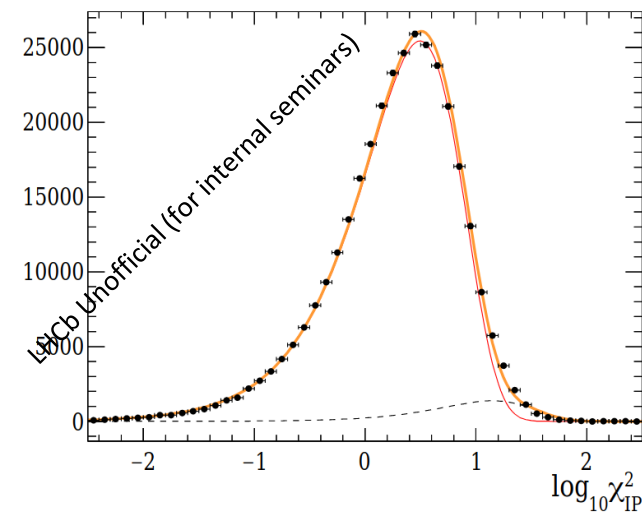
- Использовался спектр $\log_{10} \chi_{\text{IP}}^2$ -распределения из работы (LHCb-ANA-2016-072);
- Компоненты из **первичной вершины** и **вторичной вершины** описывались при помощи распределения:

$$\Gamma(k, \theta) = \frac{x^{k-1}}{\Gamma(k)\theta^k} e^{-\frac{x}{\theta}}$$

- Консервативная оценка при ограничении $\log_{10} \chi_{\text{IP}}^2 = 1$, составляет 2%.

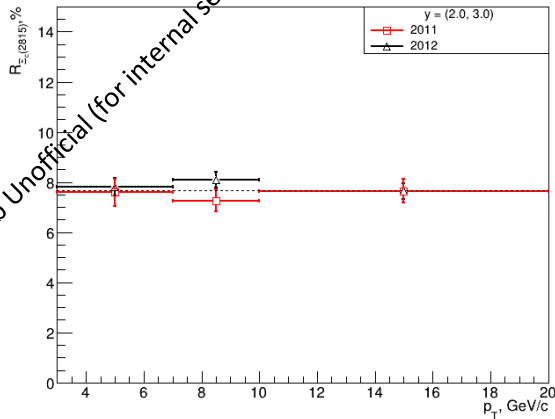
Yu. Shcheglov¹, A. Dzyuba¹, N. Sagidova¹, A. Vorobyov¹

¹Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina, Russia

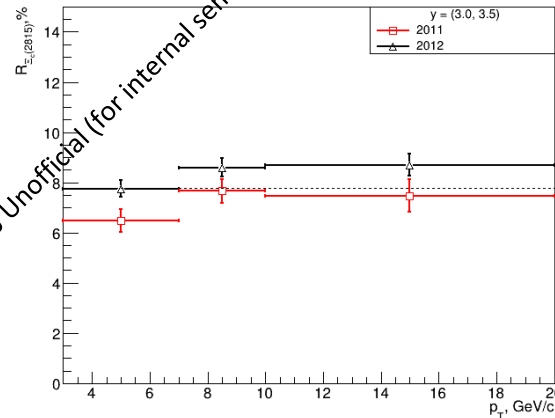


Результаты отношений функций перехода $\Xi_c(2645)/\Xi_c(2470)$

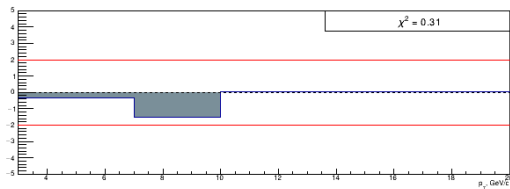
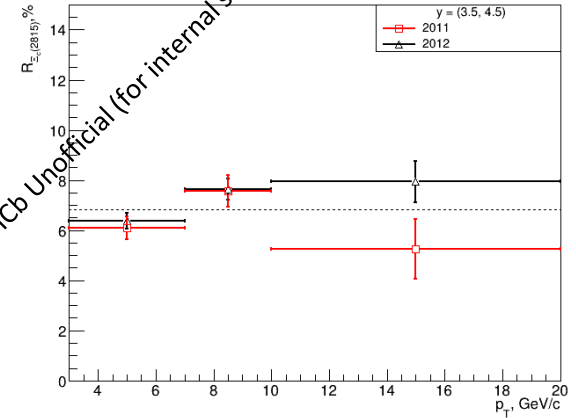
LHCb Unofficial (for internal seminars)



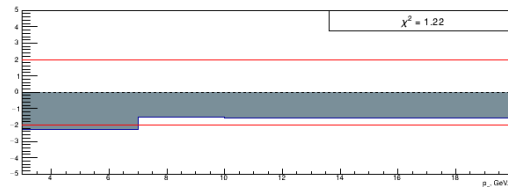
LHCb Unofficial (for internal seminars)



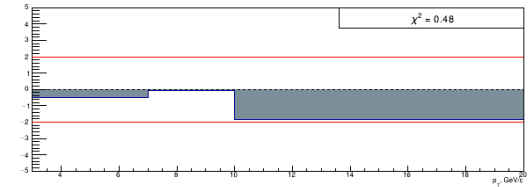
LHCb Unofficial (for internal seminars)



p_T , GeV/c



p_T , GeV/c



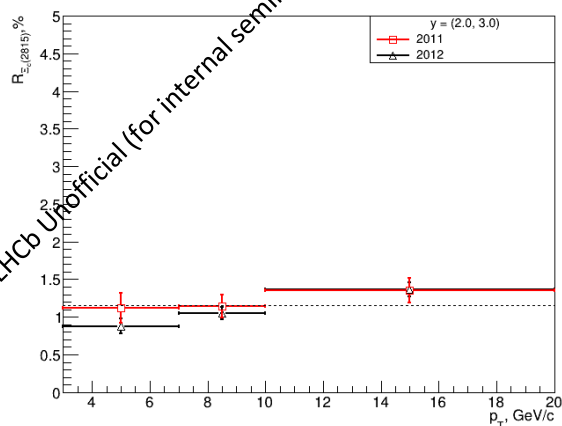
p_T , GeV/c

$$pull = \frac{R_{\Xi_c(2645)}(2011) - R_{\Xi_c(2645)}(2012)}{\sigma R_{\Xi_c(2645)}(2011) - R_{\Xi_c(2645)}(2012)}$$

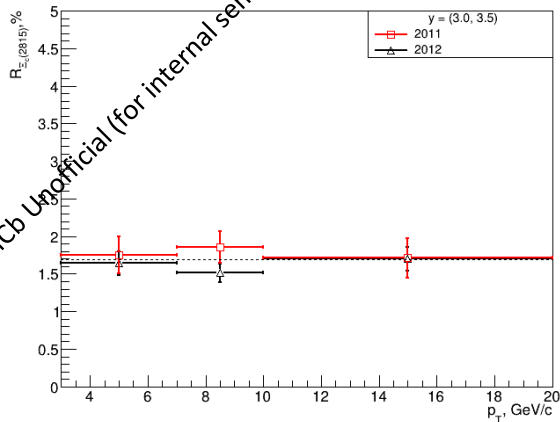
Нет поправки на эффективность реконструкции мягких пионов!

Результаты отношений функций перехода $\Xi_c(2815)/\Xi_c(2470)$

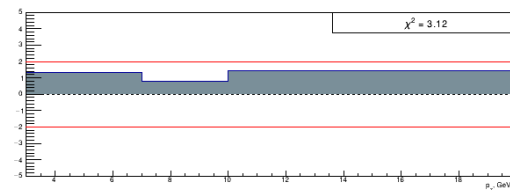
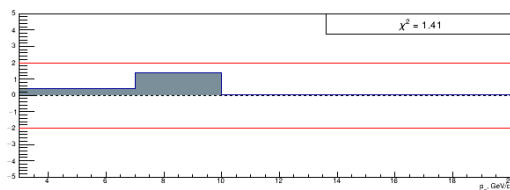
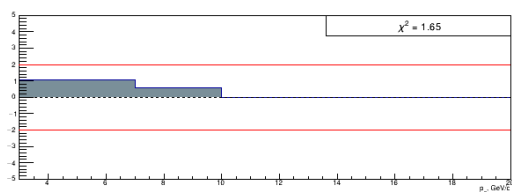
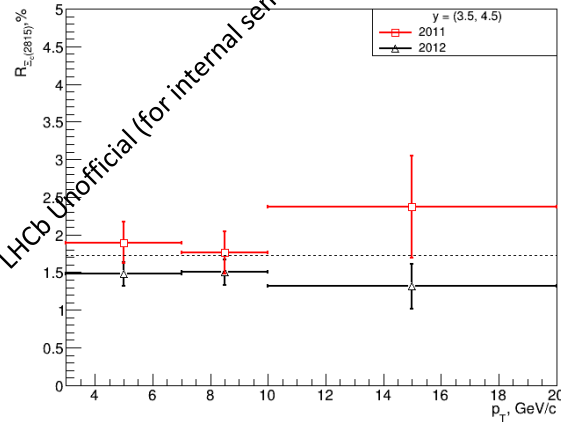
LHCb Unofficial (for internal seminars)



LHCb Unofficial (for internal seminars)



LHCb Unofficial (for internal seminars)



$p_T, \text{ GeV}/c$

$p_T, \text{ GeV}/c$

$p_T, \text{ GeV}/c$

$$\text{pull} = \frac{R_{\Xi_c(2815)}(2011) - R_{\Xi_c(2815)}(2012)}{\sigma R_{\Xi_c(2815)}(2011) - R_{\Xi_c(2815)}(2012)}$$

Нет поправки на эффективность
реконструкции мягких пионов!

Заключение

- Измерено отношение выходов очарованных барионов
 - нет статистически значимых расхождений между результатами полученными при энергиях взаимодействия протонов 7 и 8 ТэВ (в СЦМ)
- Проведен учет систематических неопределённостей, связанных с вкладом от распадов прелестных адронов и параметрами функций, описывающих сигнал;
- Ведется работа над расчетом поправок и систематических неопределенностей, связанных с:
 - Эффективностью трекинга частиц,
 - Эффективностью идентификации типов заряженных частиц

Спасибо за внимание!