

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Магистерская диссертация

# Парное рождение $B$ -адронов в $pp$ соударениях на Большом адронном коллайдере

Овчаров Юрий,  
Физический факультет 213М

4.06.2020

# Цель работы

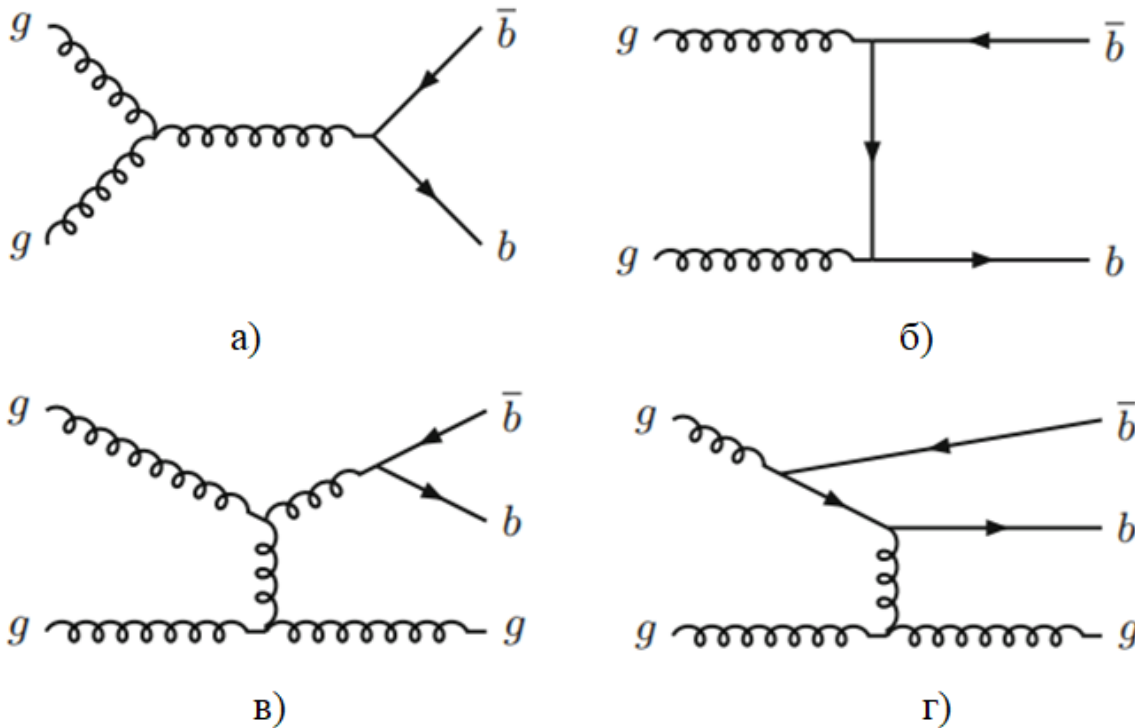
Анализ дифференциальных сечений рождения и характеристик парного рождения  $B$ -адронов путем моделирования с помощью генератора PYTHIA 8 и сравнения с экспериментальными данными экспериментов ATLAS и LHCb Большого адронного коллайдера.

# Введение

- В соударениях протонов высоких энергий на Большом адронном коллайдере (БАК) основная доля энергии расходуется на рождение адронов.
- Для описания таких процессов используются феноменологические модели, в основе которых лежат законы квантовой хромодинамики (КХД), для моделирования таких процессов используются генераторы событий.
- Энергия протонных соударений на БАК является максимальной, достигнутой на ускорителях, что позволяет исследовать энергетическую зависимость дифференциальных сечений рождения адронов в новой области энергий.
- Особое внимание на БАК уделяется исследованиям тяжелых кварков, в том числе  $b$ -кварков. В рамках этих исследований проводится измерение инклюзивных дифференциальных сечений рождения  $b$ -кварков и  $B$ -адронов
- Соударения протонов на БАК имеют преимущества по исследованию  $B$ -адронов разных типов по отношению к  $B$ -фабрикам, где они образуются при аннигиляции электронов и позитронов в результате распада  $\Upsilon(b\bar{b})$  кваркония.

# Введение

## Основные процессы рождения пар $b$ – кварков в $pp$ взаимодействиях на БАК



### Механизмы рождения:

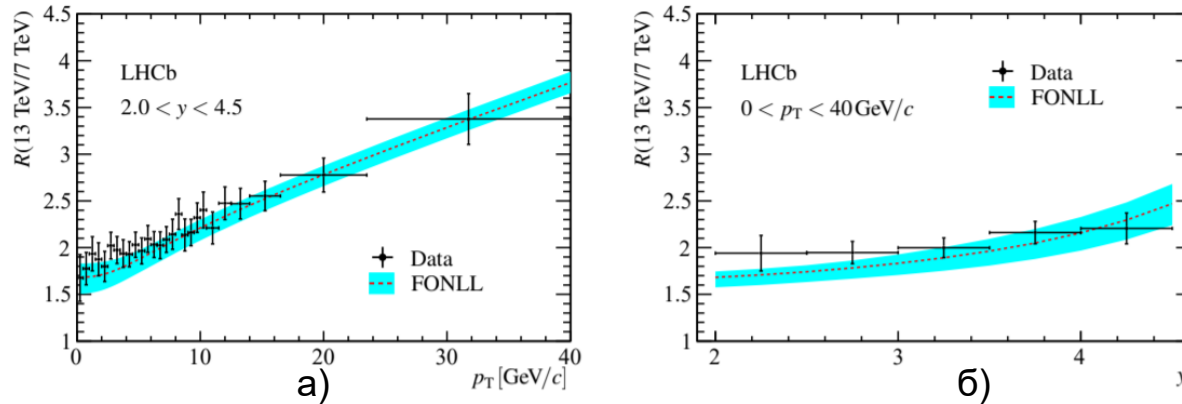
- а) рождение аромата ( $s$ -канал);
- б) рождение аромата ( $t$ -канал);
- в) расщепление глюона;
- г) возбуждение аромата.

Диаграммы Фейнмана низшего порядка для рождения  $b$  кварков. Eur. Phys. J. C (2016) 76 :670.

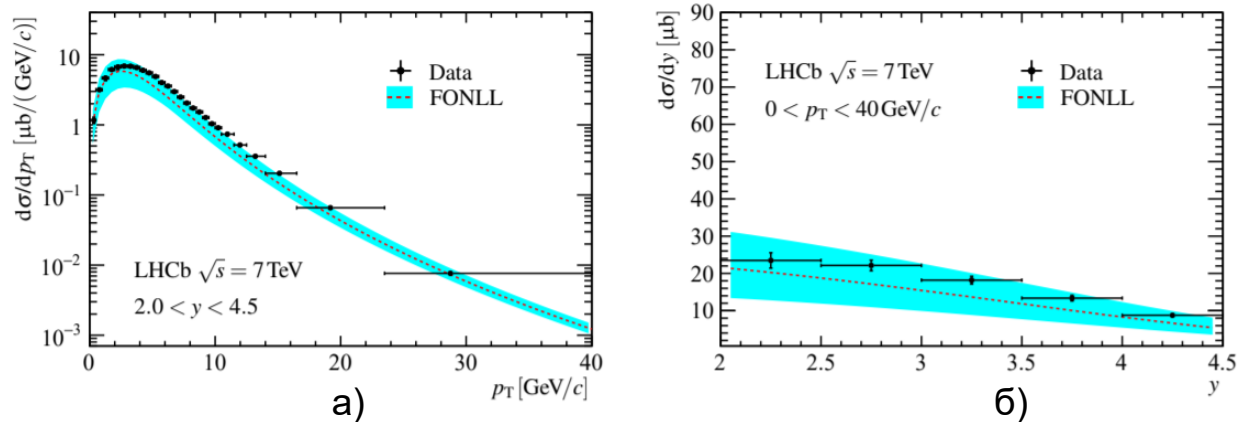
Наиболее чувствительны к механизмам нелидирующего порядка характеристики парного образования  $b$  кварков.

# Результаты экспериментов на БАК

## Инклюзивные сечения рождения $B$ – адронов в $pp$ соударениях (1)



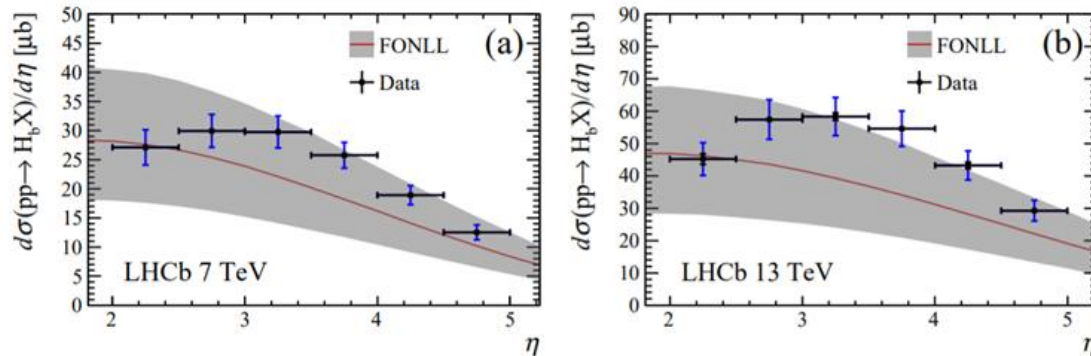
Отношение дифференциальных сечений рождения  $B^\pm$  - адронов при 13 ТэВ к сечениям при 7 ТэВ в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б) CERN-EP-2017-254



Дифференциальные сечения рождения  $B^\pm$  - адронов в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б) при энергии соударения протонов 7 ТэВ. CERN-EP-2017-254

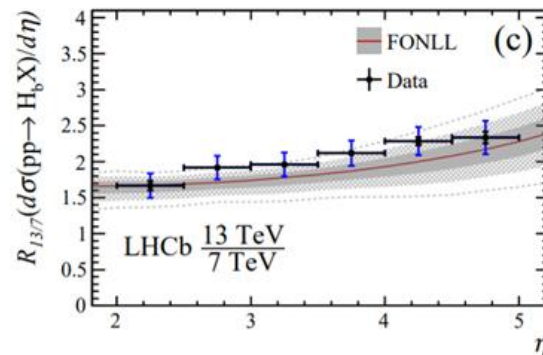
# Результаты экспериментов на БАК

## Сечения рождения $b$ – кварка в $pp$ соударениях при 7 и 13 ТэВ



a)

б)

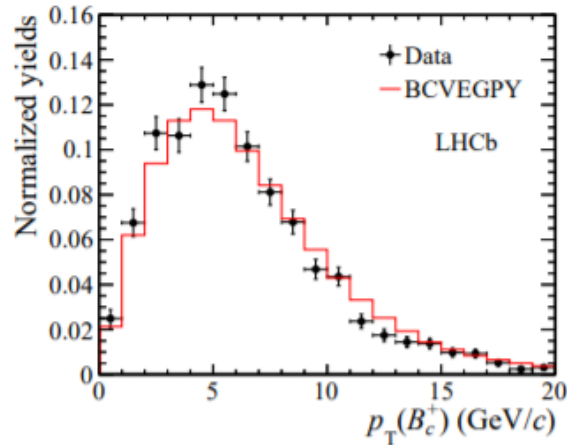


с)

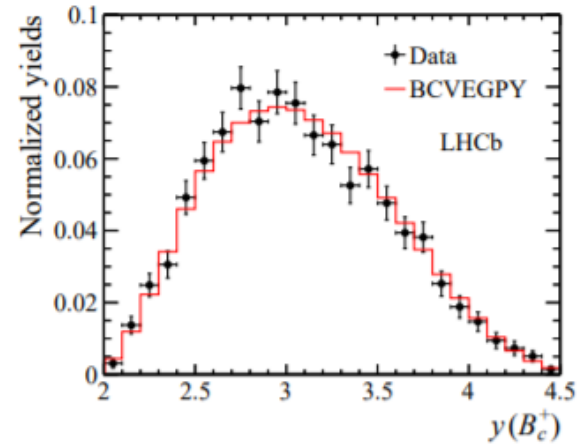
Инклюзивные сечения рождения в зависимости от псевдобыстроты  $\eta$  для  $\sigma(pp \rightarrow H_b X)$ , где  $H_b$  - адрон, который содержит один из  $b$  или  $\bar{b}$ -кварков, при энергиях центра масс 7 ТэВ (а) и 13 ТэВ (б). Их отношение представлено на (с).

# Результаты экспериментов на БАК

Нормированные дифференциальные сечения рождения  $B_c^+$  - мезонов



а)



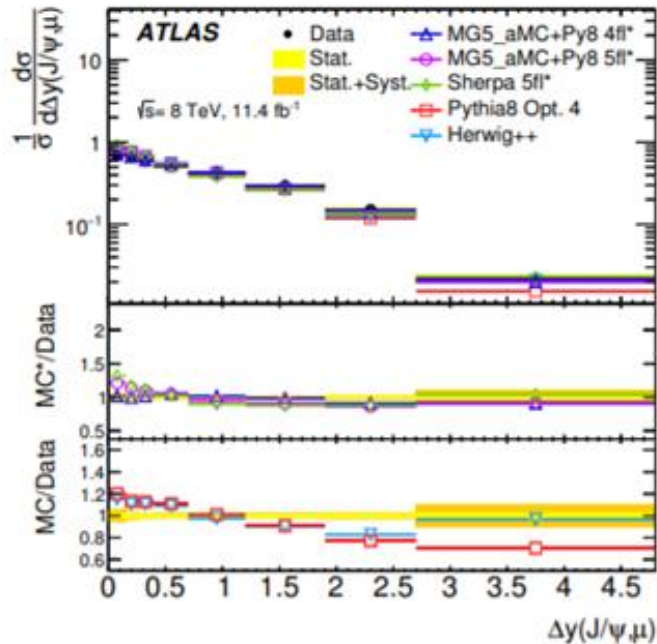
б)

*Нормированные дифференциальные сечения рождения  $B_c^+$  - мезонов в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б) при энергии соударения протонов 8 ТэВ.*

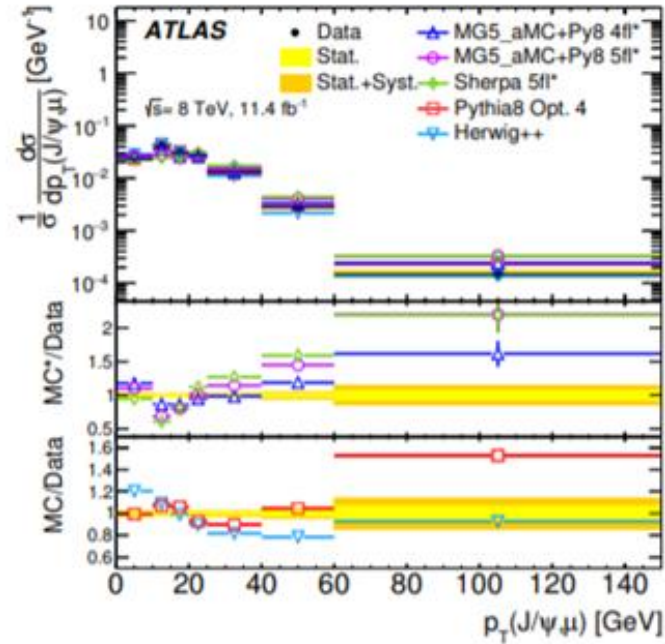
Phys. Rev. Lett. 114, 132001 (2015)

# Результаты экспериментов на БАК

## Сечения парного рождения $b$ -адронов в $pp$ соударениях при 8



а)



б)

Измеренные плотности дифференциальных сечений как функция  $\Delta y (\text{J}/\psi, \mu)$ ,  $p_T (\text{J}/\psi, \mu)$  (рисунки а и б соответственно) JHEP 11 (2017) 62

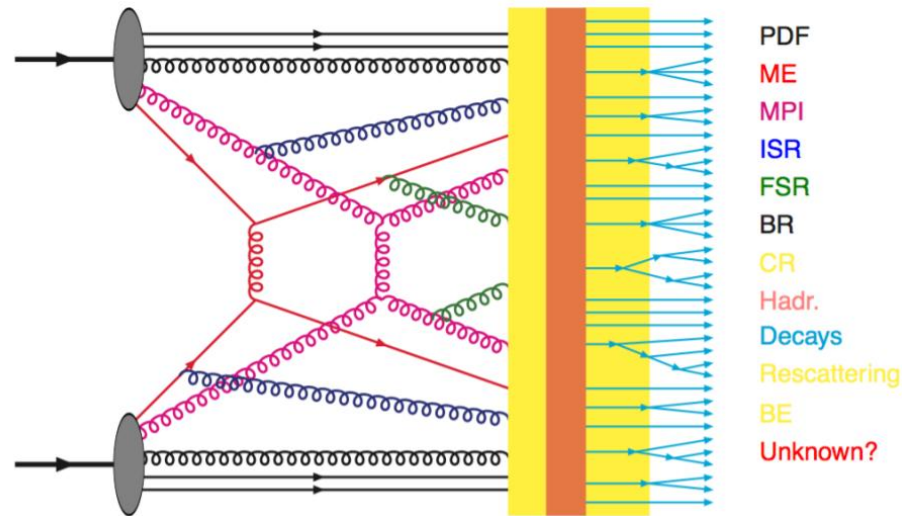


# Генераторы Монте Карло

## Моделирование процессов в pp взаимодействиях

Генераторы включают следующие данные и процессы:

- функция данных частицы,
- матричные элементы,
- многопартонные взаимодействия,
- излучение в начальном и в конечном состояниях,
- остатки пучков,
- цветовая перезарядка,
- процессы адронизации,
- процессы распадов,
- процессы перерассеяния,
- процессы обмена бозоном.



Процессы, происходящие в pp-соударениях

# Генераторы Монте Карло

Наиболее популярные Монте Карло генераторы в физике высоких энергий

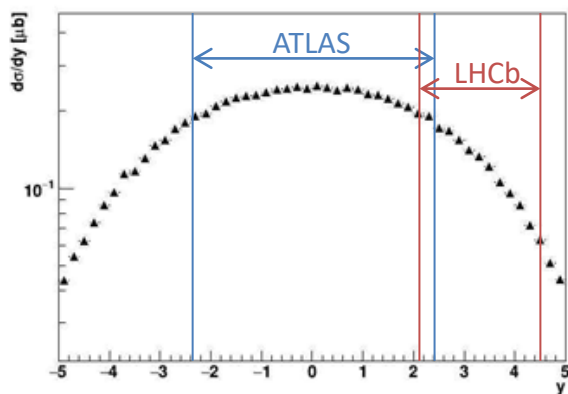
- ***HERWIG***
- ***Sherpa***
- ***POWHEG***
- ***MC@NLO***
- ***PYTHIA***
- ***VINCIA***

PYTHIA описывает жесткие и мягкие взаимодействия, распределения партонов, партонные ливни в начальных и конечных состояниях, многопартонные взаимодействия, фрагментацию и распад. В основе лежит струнная модель Лунда. Преимущество PYTHIA в том, что она хорошо описывает процессы адронизации.

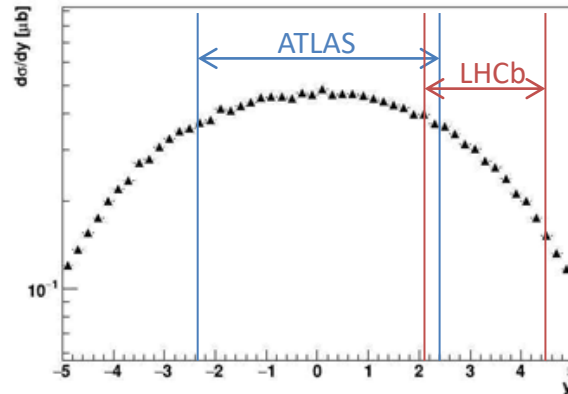
VINCIA - Программа для генератора событий физики высоких энергий PYTHIA 8.2. VINCIA заменяет внутренние партонные каскады PYTHIA.

# Моделирование и анализ результатов

## Моделирование рождения $B^\pm$ адронов в РУНIA 8.3 (1)

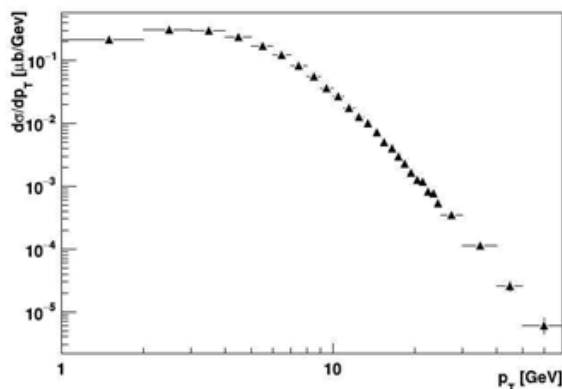


а)

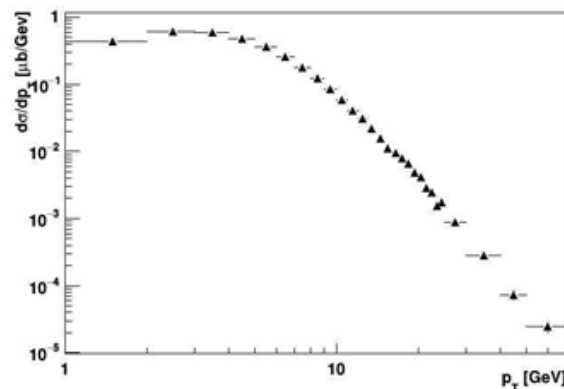


б)

*Дифференциальные сечения  $B^\pm$  адронов в зависимости от быстроты  $y$  при энергиях 7 ТэВ (а) и 13 ТэВ (б).*



а)

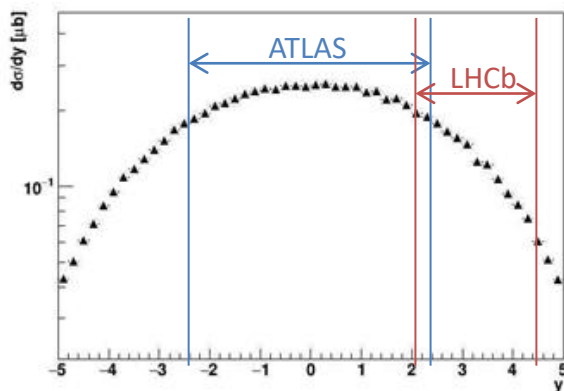


б)

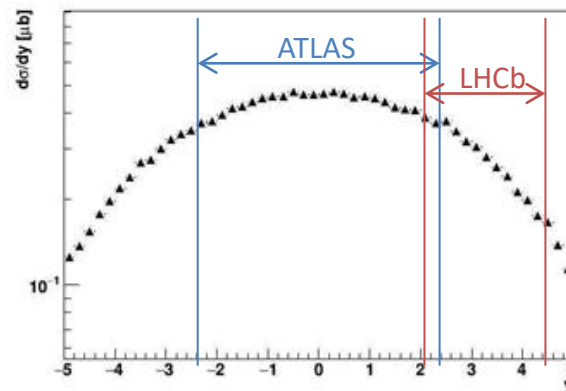
Дифференциальные сечения  $B^\pm$  адронов в зависимости от поперечного импульса  $p_T$  при энергиях 7 ТэВ (а) и 13 ТэВ (б).

# Моделирование и анализ результатов

## Моделирование рождения $B^\pm$ адронов в РУТИА 8.3 (2)

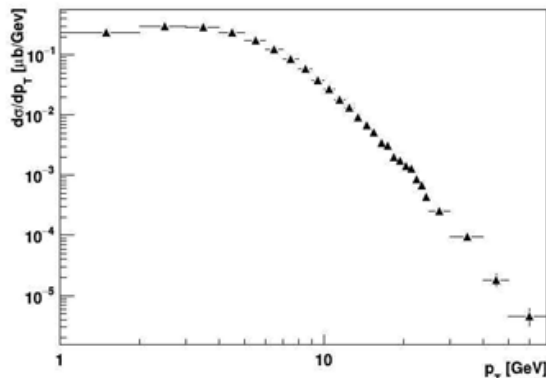


а)

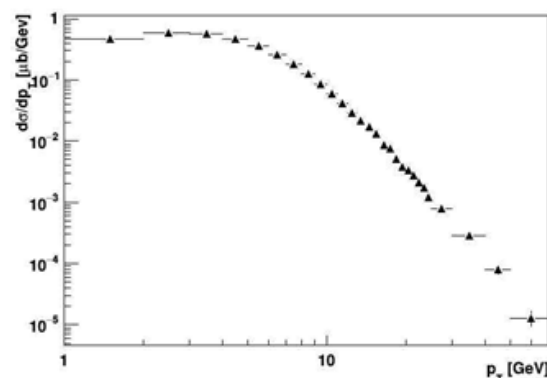


б)

*Дифференциальные сечения  $B^\pm$  адронов в зависимости от быстроты  $y$  при энергиях 7 ТэВ (а) и 13 ТэВ (б) с учетом механизма партонных ливней.*



а)

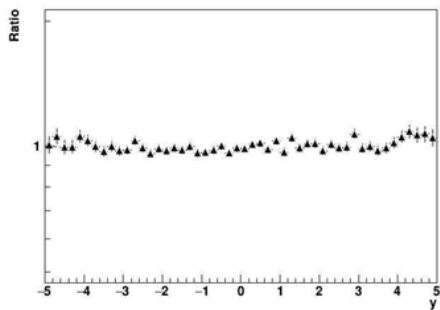


б)

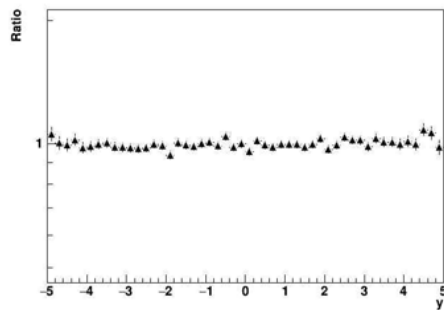
*Дифференциальные сечения  $B^\pm$  адронов в зависимости от поперечного импульса  $p_T$  при энергиях 7 ТэВ (а) и 13 ТэВ (б) с учетом механизма партонных ливней.*

# Моделирование и анализ результатов

## Моделирование рождения $V^\pm$ адронов в PYTHIA 8.3 (3)

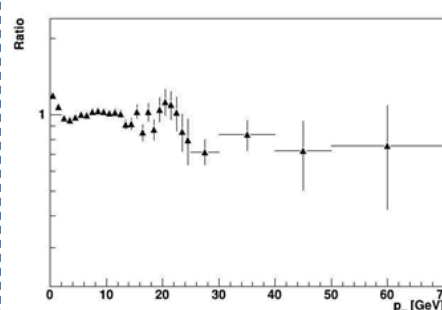


а)

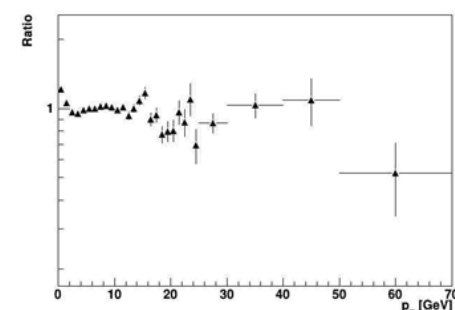


б)

*Отношение дифференциальные сечений рождения  $V^\pm$  адронов с учетом механизма партонных ливней к спектрам адронов, рожденных в жестких процессах в зависимости от быстроты  $y$  при энергиях 7 ТэВ (а) и 13 ТэВ (б).*



а)



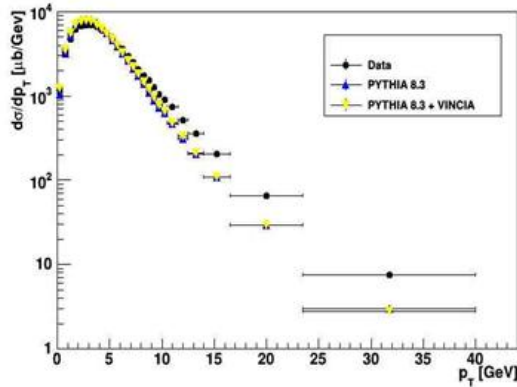
б)

*Отношение дифференциальные сечений рождения  $V^\pm$  адронов с учетом механизма партонных ливней к спектрам адронов, рожденных в жестких процессах в зависимости от поперечного импульса  $p_T$  при энергиях 7 ТэВ (а) и 13 ТэВ (б).*

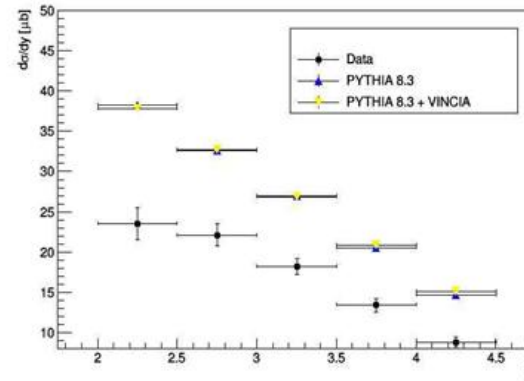
Для инклюзивных дифференциальных сечений включение механизма партонных ливней с настройкой VINCIA не влияет на характер распределения по быстроте, однако проявляется в распределениях по поперечному импульсу.

# Моделирование и анализ результатов

## Сравнение с данными LHCb CERN-EP-2017-254 (1)

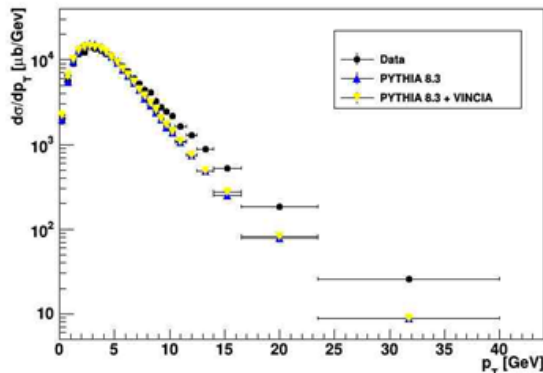


а)

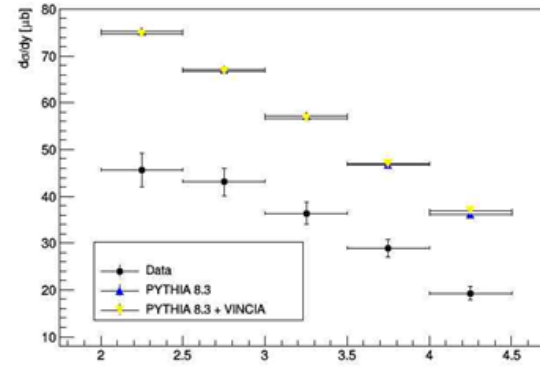


б)

Дифференциальные сечения рождения  $V^\pm$  - мезонов в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б) при энергии соударения протонов 7 ТэВ. Сравнение результатов моделирования PYTHIA 8.3 и экспериментальных данных



а)

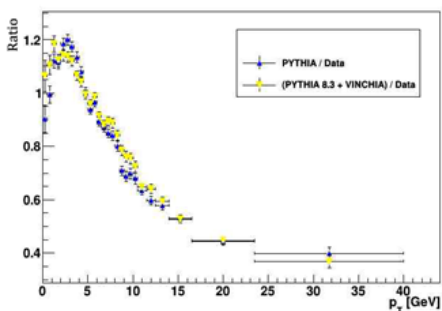


б)

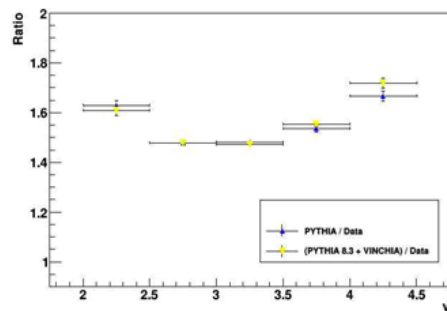
Дифференциальные сечения рождения  $V^\pm$  - мезонов в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б) при энергии соударения протонов 13 ТэВ. Сравнение результатов моделирования PYTHIA 8.3 и экспериментальных данных

# Моделирование и анализ результатов

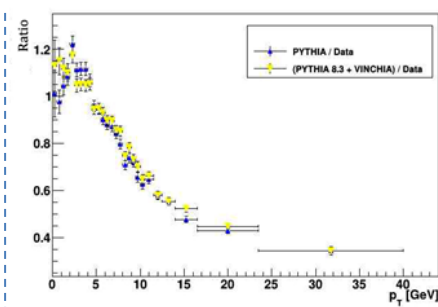
## Сравнение с данными LHCb CERN-EP-2017-254 (2)



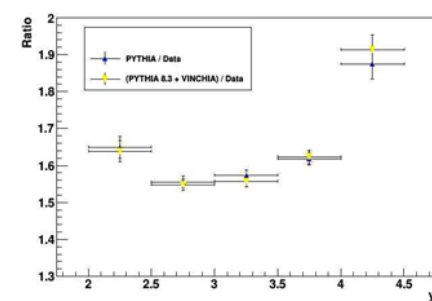
а)



б)



а)



б)

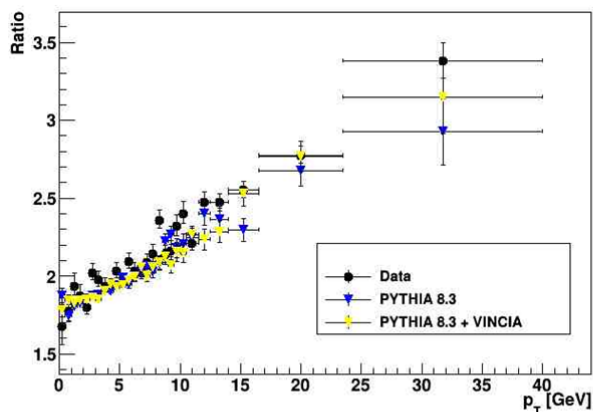
*Отношение дифференциальных сечений рождения  $V^\pm$  - мезонов PYTHIA 8.3 к экспериментальным данным в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б) при энергии соударения протонов 7 ТэВ.*

*Отношение дифференциальных сечений рождения  $V^\pm$  - мезонов PYTHIA 8.3 к экспериментальным данным в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б) при энергии соударения протонов 13 ТэВ.*

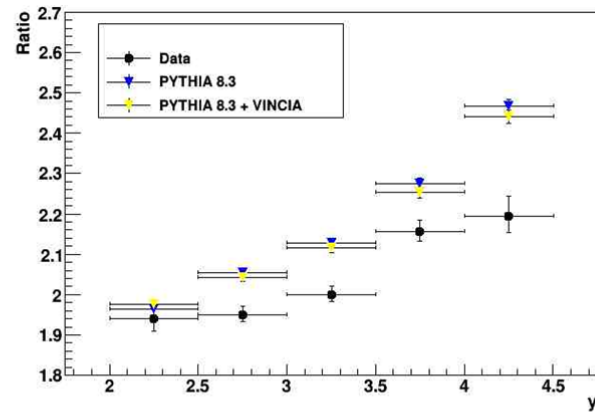
- Наблюдается расхождение экспериментальных и модельных распределений.
- Для более детального сравнения и анализа вклада партонных ливней в механизмы рождения  $V^\pm$  - мезонов построены отношения спектров  $V^\pm$  - мезонов, рожденных как в результате только жесткого процесса, так и с настройкой VINCHIA/

# Моделирование и анализ результатов

Отношение дифференциальных сечений рождения  $V^\pm$  - мезонов при 13 ТэВ к сечениям при 7 ТэВ  
LHCb CERN-EP-2017-254



а)



б)

Отношение дифференциальных сечений рождения  $V^\pm$  - мезонов при 13 ТэВ к сечениям при 7 ТэВ в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б). На одном графике представлены экспериментальные данные, результаты моделирования в PYTHIA 8.3 и моделирования в PYTHIA 8.3 с использованием настройки VINCIA.

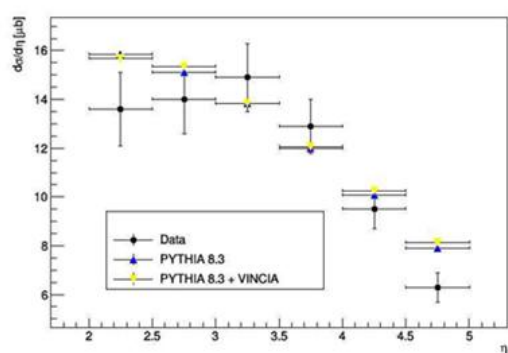
- Отношения сечений при увеличении энергии удовлетворительно описывается для распределений по поперечным импульсам.
- Для распределений по быстройте PYTHIA хорошо описывает характер распределения, предсказания несколько завышенные и завышается рост сечения при увеличении энергии взаимодействия (недостаток PYTHIA).



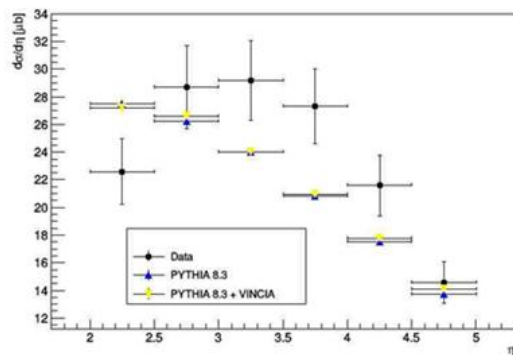
# Моделирование и анализ результатов

Инклюзивные сечения рождения в зависимости от псевдобыстроты  $\eta$  для  $\sigma(pp \rightarrow H_b X)$

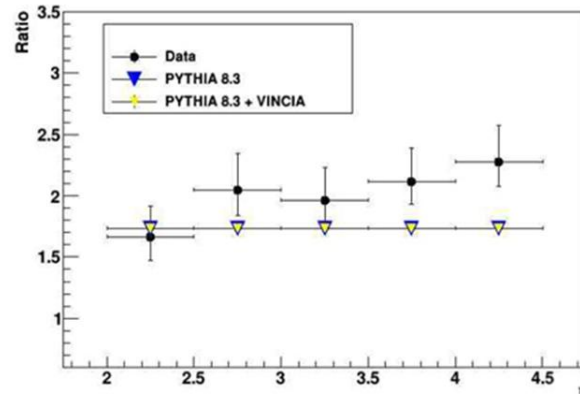
Сравнение с экспериментальными данными Phys. Rev. Lett. 118. 052002 (2017)



a)



б)



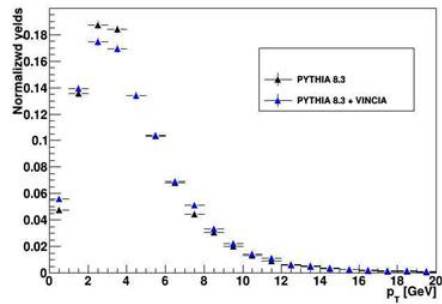
с)

Инклюзивные сечения рождения в зависимости от псевдобыстроты  $\eta$  для  $\sigma(pp \rightarrow H_b X)$ , где  $H_b$  - адрон, который содержит один из  $b$  и  $\bar{b}$ -кварков, при энергиях центра масс 7 ТэВ (а) и 13 ТэВ (б). Их отношение представлено в (с). Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования PYTHIA 8.3 и VINCIA.

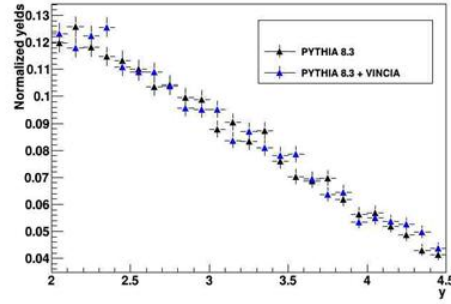
- Экспериментальные данные одночастичных распределений  $H_b$ -адронов по псевдобыстроте, полученные на LHCb с увеличением энергии взаимодействия больше расходятся с модельными распределениями, когда в заданную кинематическую область попадают оба  $H_b$ -адрона.
- Не воспроизводятся наблюдаемые в эксперименте уменьшения сечения для  $\eta < 3$ , которые возможно определяются погрешностью измерений.
- Вклад в сечения рождения  $H_b$ -адронов от механизма партонных ливней практически не проявляется.

# Моделирование и анализ результатов

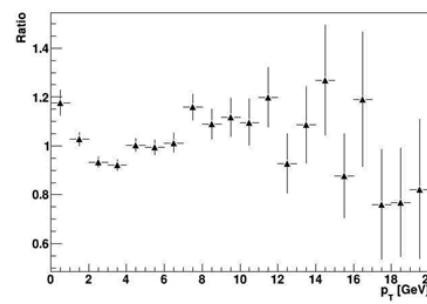
## Анализ рождения $B_c^+$ - мезонов



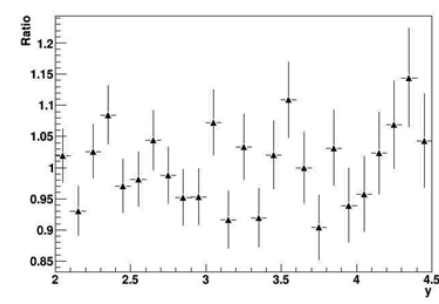
а)



б)



а)



б)

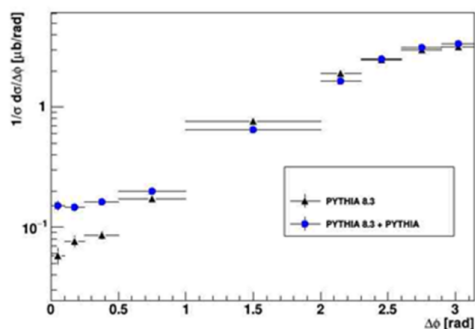
*Модельные нормированные дифференциальные сечения рождения  $B_c^+$  - мезонов PYTHIA 8.3 в жестком КХД процессе и с использованием настройки VINCIA в зависимости от поперечного импульса (а) и быстроты (б) при энергии соударения протонов 8 ТэВ.*

*Отношение нормированных дифференциальных сечений рождения  $B_c^+$  - мезонов PYTHIA 8.3 с использованием настройки VINCIA к сечениям рождения в жестком КХД процессе в зависимости от  $p_T$  (а) и быстроты у (б) при энергии соударения протонов 8 ТэВ.*

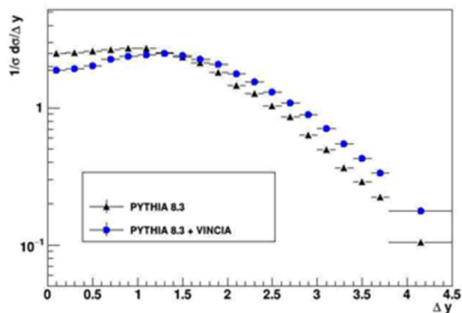
- Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, показывает, что распределения по поперечному импульсу хорошо согласуются с экспериментальными данными.
- Для распределений по быстроте для области  $y > 3$  наблюдается согласие экспериментальных данных с предсказаниями PYTHIA (слайд 7).
- Процесс рождения в партонных ливнях вносит незначительный вклад по отношению к лидирующему жесткому КХД процессу.

# Моделирование и анализ результатов

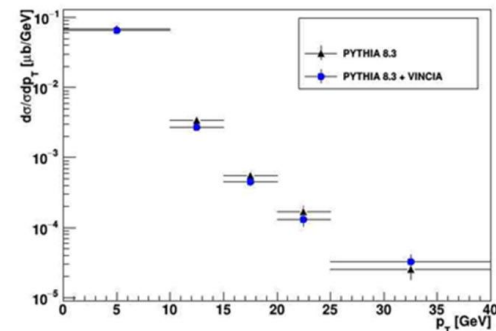
## Анализ рождения пар $B^\pm$ - мезонов (1)



a)

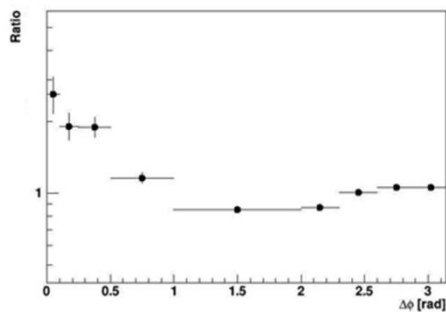


б)

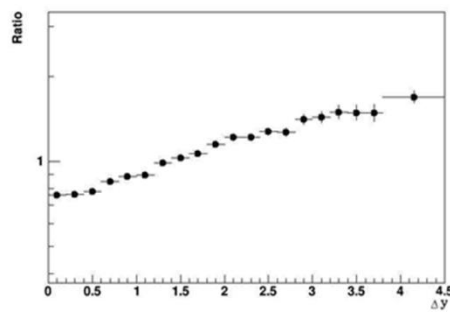


с)

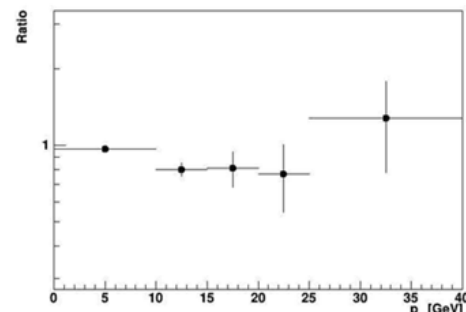
Модельные нормированные дифференциальные сечения как функция разности азимутальных углов  $\Delta\phi$  (а), разности быстрот  $\Delta y$  (б) и поперечного импульса пары  $B$  – мезонов  $p_T$  (в).



a)



б)



с)

Отношение модельных нормированных дифференциальных сечений, полученных с использованием настройки VINCIA к сечениям, полученным в результате моделирования только жесткого КХД процесса в зависимости от разности азимутальных углов  $\Delta\phi$  (а), разности быстрот  $\Delta y$  (б) и поперечного импульса системы пары  $B$  – мезонов  $p_T$  (в).

# Моделирование и анализ результатов

## Анализ рождения пар $B^\pm$ - мезонов (2)

- Для парного рождения  $B$  – мезонов для малой разности азимутальных углов ( $\Delta\phi < 0,5$  рад) существенный вклад  $\sim 20\%$  оказывает механизм рождения партонных ливней.
- Для разности быстрот вклад от механизма рождения в партонных ливнях проявляется при всех значениях разностей: появляется недостаток событий при малых значениях разности  $\Delta y < 1,5$  и избыток при больших значениях.
- Для поперечного импульса системы двух  $B$  – адронов учет партонных ливней никак не влияет на характер зависимости.
- Полученные в результате моделирования распределения отличаются от экспериментальных распределений (слайд 8). В эксперименте проводится анализ продуктов распада пары  $B$  – мезонов:  $J/\psi$  мезона и мюона  $\mu$ .
- Поскольку при описании экспериментальных данных РУТНІА 8 показала хорошее согласие, можно сделать вывод о достоверности предсказаний, полученных с помощью РУТНІА 8.3 для спектров  $B$  – мезонов.

# Заключение

- В данной работе выполнено моделирование рождения  $B$  – адронов в новой версии генератора PYTHIA 8.3.
- Проведено сравнение модельных распределений и экспериментальных данных экспериментов LHCb [2, 5, 6] и ATLAS [1, 3]
- Получены одночастичные модельные спектры  $B^\pm$ -мезонов для широкого интервала по быстроте  $-5 < y < 5$  и поперечному импульсу в лидирующем порядке КХД за счет жест-кого рассеяния и с учетом следующего порядка за счет включения механизма партон-ного ливня. Распределения по быстроте для двух вариантов расчета практически не различаются при энергиях 7 и 13 ТэВ, отличия на уровне 20% присутствуют в распределениях по поперечному импульсу.
- Аналогичный результат получен при сравнении расчетных спектров с экспериментально измеренными спектрами  $B^\pm$ -мезонов,  $H_b$ -адронов и  $B_c^+$ - мезонов в LHCb.

# Заключение

- Выполнено моделирование характеристик пар В-мезонов с учетом и без учета механизма партонного ливня при энергии  $pp$  взаимодействий 8 ТэВ, исследованных в эксперименте ATLAS. Получено качественное согласие с результатами эксперимента. Показан количественный вклад в приведенных расчетных распределениях от включения механизма партонного ливня в распределениях по разности азимутальных углов  $\Delta\phi$  в паре, отчетливо проявляющемся для области  $\Delta\phi < 0,5$  рад, и для распределений по разности быстрот в паре.
- Результаты работы подтверждают чувствительность характеристик пар В-адронов к вкладу следующего за лидирующим порядку КХД в сечения рождения В-адронов в  $pp$  взаимодействиях на Большом адронном коллайдере.

# Генераторы Монте Карло

Наиболее популярные Монте Карло генераторы в физике высоких энергий (1)

Генератор Монте Карло	Особенности генератора
HERWIG	Моделирование начинается с процесса жесткого рассеяния в низшем порядке КХД. + процессы излучения КХД и КЭД в ливневом приближении. В основе кластерная модель.
Sherpa	Использует интерфейс модели адронизации PYTHIA; имеются матричные элементы фиксированного порядка КХД + партонные ливни в PYTHIA
POWHEG	Большая библиотека жестких процессов SM и BSM. Жесткий подпроцесс обрабатывается в LO, а ливни партонов представляют поправки более высокого порядка.

# Генераторы Монте Карло

Наиболее популярные Монте Карло генераторы в физике высоких энергий (2)

Генератор Монте Карло	Особенности генератора
MC@NLO	Программный пакет для объединения генератора Монте-Карло с вычислениями скоростей для процессов КХД в NLO-порядке, следующим за лидирующим. Имеется возможность последовательно включать матричные элементы NLO КХД в систему партонного ливня.
PYTHIA	Описывает жесткие и мягкие взаимодействия, распределения партонов, партонные ливни в начальных и конечных состояниях, MPI, фрагментацию и распад. В основе струнная модель Лунда.
VINCIA	Программа для генератора событий физики высоких энергий PYTHIA 8.2. VINCIA заменяет внутренние партонные каскады PYTHIA.



# Список использованных источников (1)

1. ATLAS Collaboration, Measurement of the bb dijet cross section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C (2016) 76 :670.
2. The LHCb Collaboration, Measurement of the b-quark production cross-section in 7 and 13 TeV pp collisions, Phys. Rev. Lett. 118, 052002 (2017) [[arXiv:1612.05140](https://arxiv.org/abs/1612.05140)].
3. ATLAS Collaboration, Measurement of b-hadron pair production with the ATLAS detector in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV, JHEP 11 (2017) 62 [[arXiv: 1705.03374](https://arxiv.org/abs/1705.03374)].
4. T. Sjstrand, S. Mrenna and P.Z. Skands, A Brief Introduction to PYTHIA 8.
5. The LHCb Collaboration, Measurement of the  $B^\pm$  production cross-section in pp collisions at  $\sqrt{s}= 7$  and 13 TeV, CERN-EP-2017-254, [[arXiv:1710.04921v1](https://arxiv.org/abs/1710.04921v1)]
6. The LHCb Collaboration, Measurement of production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV, Phys. Rev. Lett. 114, 132001 (2015), [ [arXiv:1411.2943v2](https://arxiv.org/abs/1411.2943v2)]
7. T. Sjstrand, Status and Developments of Event Generators, Theoretical Particle Physics Department of Astronomy and Theoretical Physics Lund University Svegatan 14A, 223 62 Lund.
8. <https://herwig.hepforge.org/>
9. UFO - The Universal FeynRules Output, Comput.Phys.Commun. 183 (2012) 1201-1214 [[arXiv:1108.2040](https://arxiv.org/abs/1108.2040) ].
10. <https://sherpa-team.gitlab.io/>
11. <http://powhegbox.mib.infn.it/>
12. [Stefano Frixione](#), [Fabian Stoeckli](#), [Paolo Torrielli](#), [Bryan R. Webber](#), [Chris D. White](#), The MC@NLO 4.0 Event Generator Cavendish–HEP–10/12 [[arXiv:1010.0819v1](https://arxiv.org/abs/1010.0819v1)]

# Список использованных источников

13. <https://vincia.hepforge.org/>
14. Silvia Ferreres-Solé, Torbjörn Sjöstrand, The space–time structure of hadronization in the Lund model, [Eur Phys J C Part Fields](#). 2018; 78(11): 983.
15. T. Sjöstrand and M. van Zijl, Phys. Rev. D **36** (1987) 2019.
16. Овчаров Ю.Ю., Смирнова Л.Н. Моделирование рождения В–мезонов в pp соударениях при энергиях БАК. УЗФФ 2 (2018).
17. Овчаров Ю.Ю. Моделирование пар В-адронов в pp соударениях на БАК, XXI межвузовская научная школа молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине"