УДК 539.126.4

# ИЗУЧЕНИЕ НОВЫХ РАСПАДОВ $B_c^+$ МЕЗОНОВ С ЧАРМОНИЕМ И ЛЕГКИМИ АДРОНАМИ В КОНЕЧНОМ СОСТОЯНИИ

А. В. Егорычев, Д. Ю. Перейма

*В статье представлены результаты поиска новых распадов $B_c^+$ мезонов с чармонием и легкими адронами в конечном состоянии. Измерены относительные вероятности изучаемых процессов. Исследованы вклады промежуточных резонансов в системах легких адронов. Выполнено сравнение экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями. Анализ выполнен с использованием данных, набранных экспериментом LHCb в протон-протонных столкновениях, при энергиях в системе центра масс* $7, 8$ *и* $13$ *ТэВ в период с* $2011$ *по* $2018$ *г.г.*

**Ключевые слова:** прелестные адроны, спектроскопия, чармониевый резонанс, парциальные ширины, $B_c^+$ мезон.

*Введение.* Уникальное состояние, состоящее из двух тяжелых кварков разных ароматов ($\bar{b}c$ кварки), $B_c^+$ мезон имеет обширный набор возможных каналов распада. Такая система распадается через механизм слабого взаимодействия, когда один из кварков осуществляет распад, а второй является кварком-спектратором, либо происходит процесс аннигиляции двух кварков с участием виртуального $W^+$ бозона. Несмотря на то, что $B_c^+$ мезон был открыт более 20 лет назад в эксперименте CDF [1, 2], до начала экспериментов на БАК было обнаружено лишь несколько мод распада этого состояния [3]. Эксперименты на Большом Адронном Коллайдере (БАК) ознаменовали новую эру для исследований $B_c^+$ мезонов, которые были недоступны в предыдущем поколении экспериментов на электрон-позитронных машинах. Высокое сечение рождения $b$ кварков на ускорителе БАК позволяет изучать различные свойства этой частицы. Наиболее значимую роль в исследованиях в области спектроскопии прелестных и очарованных адронов на ускорителе БАК играет эксперимент LHCb, который на данный момент

НИЦ "Курчатовский институт" ККТЭФ, 117218 Россия, Москва, ул. Б. Черемушкинская, 25; e-mail: Dmitrii.Pereima@cern.ch.

является уникальной лабораторией, позволяющей исследовать весь спектр прелестных адронов и их возбужденные состояния, включая тяжелый кварконий – $B_c^+$ мезон.

Изучаемые распады $B_c^+$ мезона на чармоний и легкие адроны могут быть описаны с использованием подхода факторизации квантовой хромодинамики [4, 5], который характеризуется с помощью формфактора перехода $B_c^+ \to J/\psi W^+$ [6, 7] и универсальной спектральной функции виртуального $W^+$ бозона, распадающегося на легкие адроны [8, 9]. Феноменологическая модель, предложенная отечественными теоретиками А. В. Березным, А. К. Лиходедом и А. В. Лучинским (модель BLL), основанная на этом подходе [8–13], с хорошей точностью предсказывает значения парциальных ширин ранее обнаруженных распадов $B_c^+$ мезонов [8, 9, 11, 12] и основные вклады резонансных структур в системах легких адронов. Поиски новых распадов $B_c^+$ мезонов с чармонием и легкими адронами в конечном состоянии позволят более точно проверить гипотезу о факторизации, используемую при описании изучаемых процессов. Исследование, представленное в статье, посвящено изучению распадов типа $B_c^\pm \to \psi n h^\pm$ (где символом $\psi$ обозначено состояние чармония ($J/\psi, \psi(2S)$ мезоны), $n = 3, 5$ или 7 – количество легких адронов ($h$) в конечном состоянии). Восстановление $\psi$ мезонов выполнялось с использованием следующих мод распада $J/\psi \to \mu^+\mu^-$, $\psi(2S) \to \mu^+\mu^-$, $\psi(2S) \to J/\psi\pi^+\pi^-$. Работа выполнена с использованием данных, набранных экспериментом LHCb в периоды между 2011 и 2018 годами, при энергиях протон-протонных столкновений в системе центра масс 7, 8 и 13 ТэВ.

*Изучение новых распадов $B_c^+$ мезонов на чармоний и три легких адрона.* В этом разделе представлены результаты исследований следующих распадов: $B_c^+ \to \psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+, B_c^+ \to J/\psi K^+\pi^-\pi^+$, $B_c^+ \to \psi(2S)K^+K^-\pi^+$ и $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-K^+$. Были измерены вероятности изучаемых процессов относительно нормировочных каналов с большой статистикой: $B_c^+ \to J/\psi\pi^+\pi^-\pi^+$ и $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+$. Также исследовались вклады промежуточных резонансов в системах легких адронов. Выходы сигналов для изучаемых процессов определялись из одновременной подгонки распределений по инвариантной массе для всех отобранных $B_c^+$ кандидатов. Модель аппроксимации данных состоит из двух компонентов: сигнал и фон для каждого изучаемого процесса. Сигнальный компонент в модели аппроксимации описывался модифицированной функцией Гаусса [14]. Фоновый компонент моделировался с помощью линейной функции. В модели для описания спектра по инвариантной массе от распада $B_c^+ \to J/\psi K^+\pi^-\pi^+$ использовалось два дополнительных компонента, которые учитывают вклады от распадов $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+$ и $B_c^+ \to J/\psi\pi^+\pi^-\pi^+$, когда каон был неверно идентифицирован

как пион или наоборот. Функции, используемые для моделирования таких вкладов, получены из данных математического моделирования. Распределения по инвариантной массе для новых распадов $B_c^{\pm} \to \psi 3h^{\pm}$, совместно с наложенной функцией подгонки, показаны на рис. 1. Выходы сигналов и их статистические значимости в величинах стандартных отклонений ($\sigma$) приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Выход сигнала и статистическая значимость ($\mathcal{S}$) в единицах стандартных отклонений, оцененная из аппроксимации экспериментальных данных для новых распадов $B_c^{\pm} \to \psi 3h^{\pm}$. Учитывались только статистические погрешности*

| Канал | Выход сигнала | $\mathcal{S}[\sigma]$ |
|---|---|---|
| $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-K^+$ | $43 \pm 10$ | 5.2 |
| $B_c^+ \to J/\psi K^+\pi^-\pi^+$ | $148 \pm 22$ | 7.8 |
| $B_c^+ \to \psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+$ | $49 \pm 11$ | 5.8 |
| $B_c^+ \to \psi(2S)K^+K^-\pi^+$ | $19 \pm 6$ | 3.7 |

Распределение количества распадов $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+$ по инвариантной массе комбинаций $K^-\pi^+$ и $K^+K^-$ после применения процедуры вычитания комбинаторного фона [15] показано на рис. 2. Согласно предсказаниям модели BLL, данный процесс должен происходить с доминирующим вкладом от распадов $\bar{K}^{*0}$ состояний. В то время как распады с участием промежуточных $\phi(1020)$ мезонов должны быть сильно подавлены в соответствии с правилом Окубо–Цвейга–Изуки [16–18]. Для проверки теоретических предсказаний была произведена аппроксимация соответствующих распределений. Подгонка выполнялась с использованием модели, содержащей два компонента: компонент, описывающий распады, проходящие с участием промежуточных резонансов $\bar{K}^{*0} \to K^-\pi^+$ или $\phi(1020) \to K^+K^-$ и компонент, моделирующий распады без вклада резонансных структур в системах $K^-\pi^+$ и $K^+K^-$. Первый компонент модели параметризовывался с использованием функции Брейта–Вигнера в $P$-волне. Второй компонент описывался с помощью функции двухчастичного фазового объема в четырехчастичном распаде$B_c^+$ мезона. Фундаментальным параметрам $\bar{K}^{*0}$ и $\phi(1020)$ состояний (массам и ширинам) присваивались значения, взятые из справочника свойств элементарных частиц [3]. Из подгонки было установлено, что $(64.5 \pm 4.7^{+3.9}_{-4.8})\%$ распадов $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+$ проходят с участием промежуточных $\bar{K}^{*0}$ состояний. В то же время вклад от $\phi(1020)$ мезонов оказался незначительным. Верхний предел на долю распадов с участием $\phi(1020)$ состояний составил менее 4.2 (4.8)% на 90 (95)% уровне до-

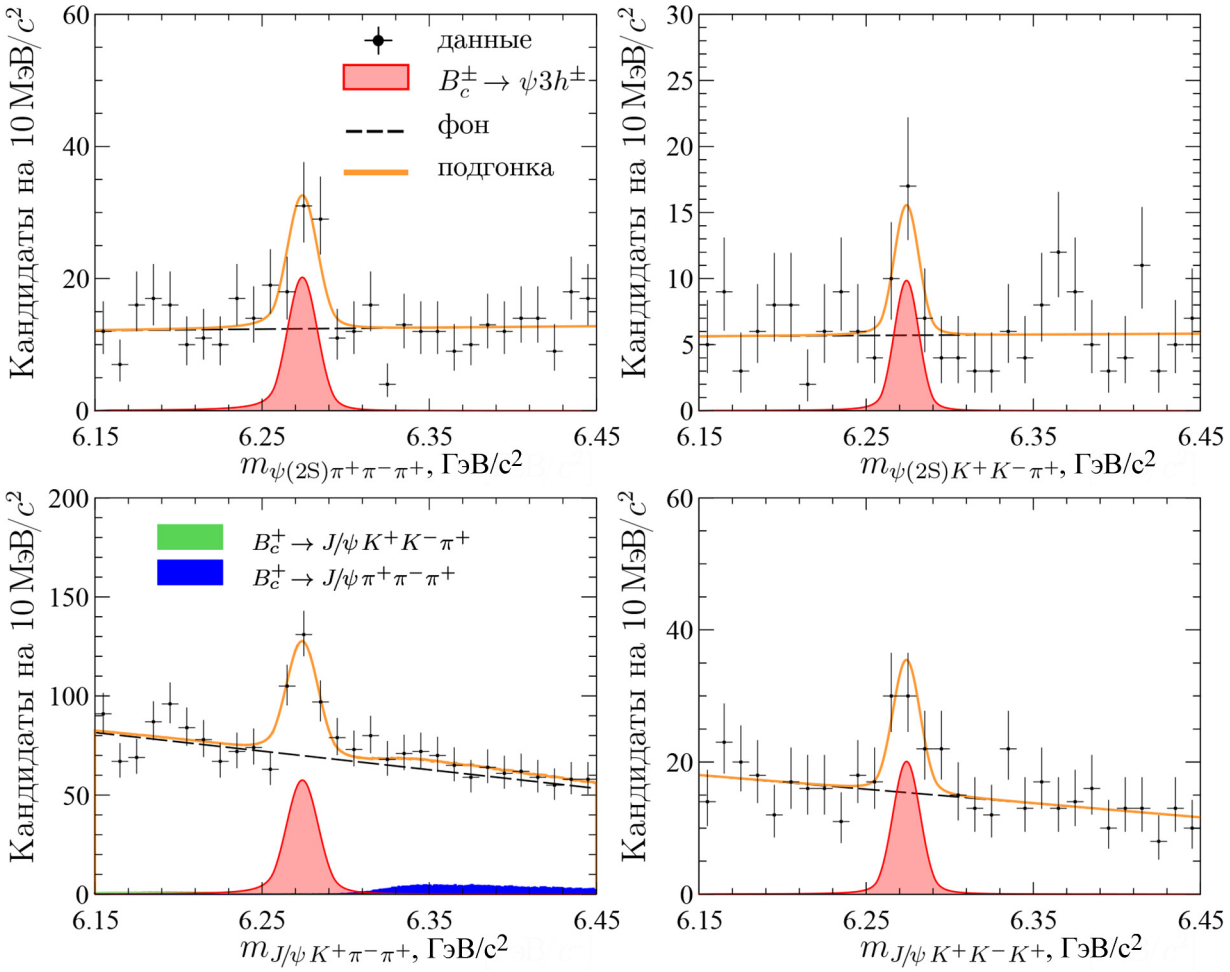



Рис. 1: *Распределения по инвариантной массе для отобранных* $B_c^\pm \to \psi 3h^\pm$ *кандидатов.*

стоверности. Оба результата представлены с учетом статистических и систематических неопределенностей. Каждое наблюдение подтверждает предсказания модели BLL [12] и результаты предыдущего исследования эксперимента LHCb [19].

Аналогичная аппроксимация была выполнена для оценки вкладов от промежуточных резонансов $K^{*0} \to K^+\pi^-$ и $\phi(1020) \to K^+K^-$ в распадах $B_c^+ \to J/\psi K^+\pi^-\pi^+$ и $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-K^+$, соответственно. Распределения по инвариантной массе изученных систем совместно с наложенной функцией подгонки представлены на рис. 3. Доли распадов, проходящих с участием $K^{*0}$ и $\phi(1020)$ состояний составили $(61.3 \pm 5.0^{+7.7}_{-0.3})\%$ и $(90 \pm 19^{+5}_{-7})\%$, где первая погрешность – статистическая, а вторая – систематическая. Полученные результаты находятся в согласии с предсказаниями модели BLL [12]. Были

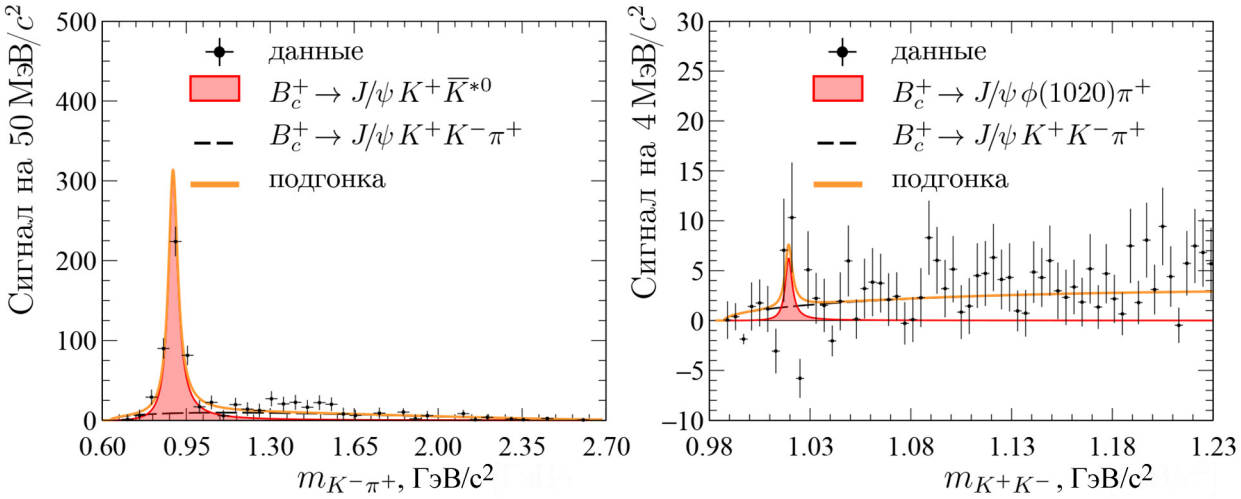



Рис. 2: *Распределения по инвариантной массе системы $K^-\pi^+$ (слева) и $K^+K^-$ (справа) для отобранных $B_c^+ \to J/\psi K^+ K^- \pi^+$ кандидатов после процедуры вычитания комбинаторного фона.*

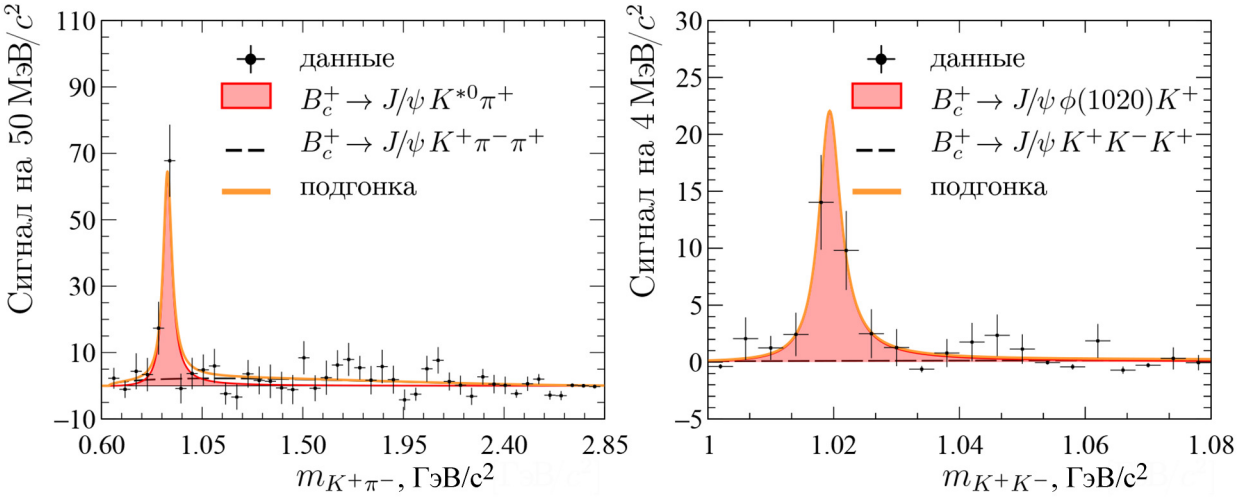



Рис. 3: *Распределения по инвариантной массе системы $K^+\pi^-$ (слева) и $K^+K^-$ (справа) для отобранных $B_c^+ \to J/\psi K^+ \pi^- \pi^+$ и $B_c^+ \to J/\psi K^+ K^- K^+$ кандидатов после процедуры вычитания комбинаторного фона.*

измерены шесть отношений парциальных ширин ($\mathcal{R}$) между изученными каналами:

$$\mathcal{R}^{J/\psi K^+ K^- K^+}_{J/\psi K^+ K^- \pi^+} = (7.0 \pm 1.8 \pm 0.2) \times 10^{-2},$$

$$\mathcal{R}^{J/\psi K^+ \pi^- \pi^+}_{J/\psi K^+ K^- \pi^+} = 0.35 \pm 0.06 \pm 0.01,$$

$$\mathcal{R}^{\psi(2S)K^+K^-\pi^+}_{J/\psi K^+K^-\pi^+} = (3.7 \pm 1.2 \pm 0.1) \times 10^{-2},$$
$$\mathcal{R}^{\psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+}_{J/\psi\pi^+\pi^-\pi^+} = (1.9 \pm 0.4 \pm 0.1) \times 10^{-2}$$
$$\mathcal{R}^{\psi(2S)\pi^+}_{J/\psi\pi^+\pi^-\pi^+} = (3.5 \pm 0.6 \pm 0.2) \times 10^{-2},$$
$$\mathcal{R}^{J/\psi K^+K^-\pi^+}_{J/\psi\pi^+\pi^-\pi^+} = (18.5 \pm 1.3 \pm 0.6) \times 10^{-2},$$

где первая погрешность – статистическая, а вторая – систематическая. Измеренные значения находятся в согласии с теоретическими предсказаниями, предыдущими измерениями эксперимента LHCb и аналогичными исследованиями в системах заряженных и нейтральных $B$-мезонов. Более детально с исследованием можно ознакомиться в работе [20].

*Изучение новых распадов $B_c^+$ мезонов на чармоний и многочастичные адронные состояния.* Дополнительные исследования распадов $B_c^+$ мезонов на чармоний и многочастичные адронные состояния предоставляют значимую информацию для проверки гипотезы о факторизации. В частности, в эксперименте LHCb недавно исследовались следующие конечные состояния: $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+$ и $B_c^+ \to J/\psi 4\pi^+3\pi^-$ [21]. В качестве нормировочной моды использовался ранее наблюдаемый канал распада $B_c^+ \to J/\psi 3\pi^+2\pi^-$. Распределения по инвариантной массе для числа отобранных $B_c^+$ кандидатов показаны на рис. 4. Выходы сигналов составили $69 \pm 11$ и $16 \pm 5$ (погрешности только статистические) для каналов $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+$ и $B_c^+ \to J/\psi 4\pi^+3\pi^-$. Значимость сигналов с учетом систематических неопределённостей составила $9.0\sigma$ и $4.7\sigma$, соответственно.

Аналогично предыдущему исследованию в распаде $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+$ изучались вклады промежуточных резонансов в системах $K^\pm\pi^\mp$ и $K^+K^-$. В канале $B_c^+ \to J/\psi 4\pi^+3\pi^-$ подобные измерения не проводились ввиду малой статистики. Исследованные распределения представлены на рис. 5. Как видно из подгонки, аппроксимация с добавлением вклада от промежуточных $K^{*0}$ и $\bar{K}^{*0}$ состояний (которые предсказываются моделью BLL [13]) качественно описывает данные. В распределении по инвариантной массе системы $K^+K^-$ значимые вклады от промежуточных $\phi(1020)$ мезонов не наблюдаются. В то же время данные находятся в хорошем согласии с предсказаниями модели BLL. Аналогичные эффекты наблюдались в канале $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+$ (см. рис. 2). Измеренные относительные вероятности изучаемых процессов составили

$$\mathcal{R}^{J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+}_{J/\psi 3\pi^+2\pi^-} = (33.7 \pm 5.7 \pm 1.6) \times 10^{-2},$$
$$\mathcal{R}^{J/\psi 4\pi^+3\pi^-}_{J/\psi 3\pi^+2\pi^-} = (28.5 \pm 8.7 \pm 2.0) \times 10^{-2},$$

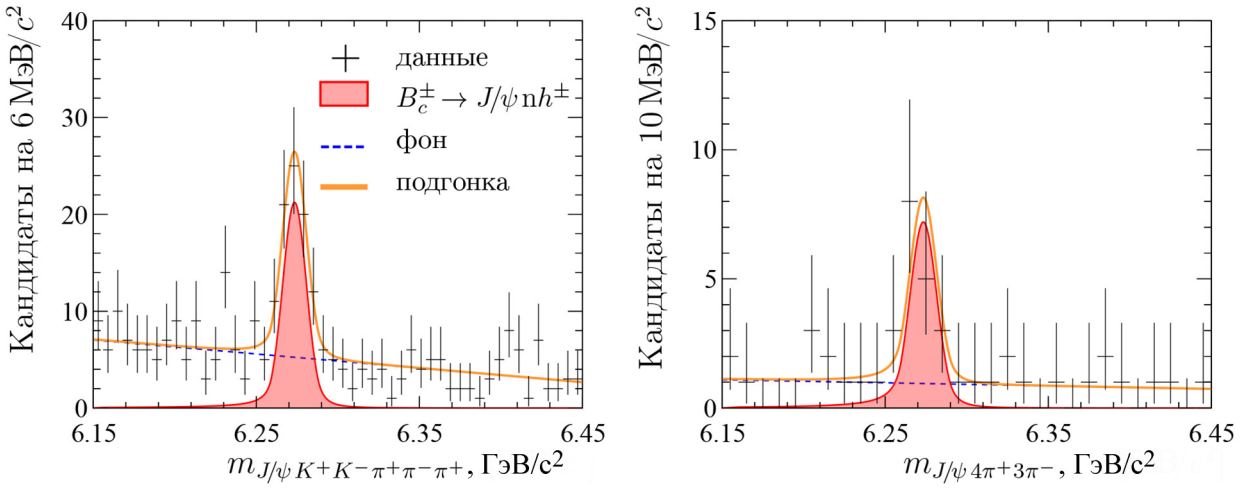



Рис. 4: *Распределения по инвариантной массе для отобранных* $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+$ *(слева) и* $B_c^+ \to J/\psi 4\pi^+3\pi^-$ *(справа) кандидатов.*

где первая погрешность статистическая, а вторая – систематическая. Более подробно с результатами исследования можно ознакомиться в работе [21].

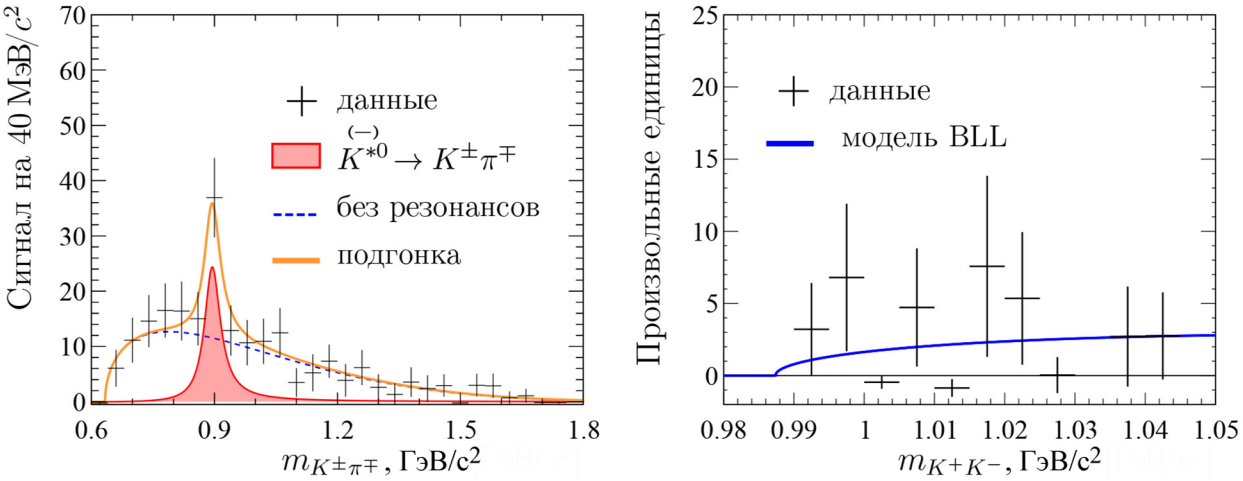



Рис. 5: *Распределения по инвариантной массе системы* $K^{\pm}\pi^{\mp}$ *(слева) и* $K^+K^-$ *(справа) для отобранных* $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+$ *кандидатов после процедуры вычитания комбинаторного фона.*

*Заключение.* С использованием данных, набранных экспериментом LHCb в протон-протонных столкновениях, при энергиях в системе центра масс 7, 8 и 13 ТэВ в период с 2011 по 2018 г.г., были изучены новые распады $B_c^{\pm} \to \psi n h^{\pm}$. Впервые обна-

ружены следующие каналы распада: $B_c^+ \to \psi(2S)\pi^+\pi^-\pi^+$, $B_c^+ \to J/\psi K^+\pi^-\pi^+$, $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-K^+$, $B_c^+ \to J/\psi K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^+$. Получено первое экспериментальное свидетельство существования распадов $B_c^+ \to \psi(2S)K^+K^-\pi^+$ и $B_c^+ \to J/\psi 4\pi^+3\pi^-$. Измерены относительные вероятности изучаемых распадов и исследованы вклады резонансных структур в системах легких адронов. Полученные результаты согласуются с теоретическими предсказаниями [20, 21].

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации. Номер гранта: МК-894.2022.1.2.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

[1] F. Abe et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 2432 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.2432.
[2] F. Abe et al., Phys. Rev. D **58**, 112004 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevD.58.112004.
[3] P. A. Zyla et al., Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 083C01 (2020). DOI: 10.1093/ptep/ptac097and 2022 update.
[4] M. Bauer, B. Stech, M. Wirbel, Z. Phys. C **34**, 103 (1987). DOI: 10.1007/BF01561122.
[5] M. Wirbel, Prog. Part. Nucl. Phys. **21**, 33 (1988). DOI: 10.1016/0146-6410(88)90031-2.
[6] S. S. Gershtein, V. V. Kiselev, A. K. Likhoded, et al., Phys. Usp. **38**, 1 (1995). DOI: 10.1070/PU1995v038n01ABEH000063.
[7] V. V. Kiselev, A. E. Kovalsky, A. K. Likhoded, Nucl. Phys. B **585**, 353 (2000). DOI: 10.1016/S0550-3213(00)00386-2.
[8] A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky, Phys. Rev. D **81**, 014015 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevD.81.014015.
[9] A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky, Phys. Atom. Nucl. **76**, 787 (2013). DOI: 10.1134/S1063778813050062.
[10] A. V. Berezhnoy, A. K. Likhoded, A. V. Luchinsky, PoS **QFTHEP2011**, 076 (2012). DOI: 10.22323/1.138.0076.
[11] A. V. Luchinsky, Phys. Rev. D **86**, 074024 (2012). DOI: 10.1103/ PhysRevD.86.074024.
[12] A. V. Luchinsky, Preprint (2013). arxiv.org/abs/1307.0953v2.
[13] A. V. Luchinsky, Phys. Lett. B **832**, 137269 (2022). DOI: 10.1016/j.physletb.2022.137269.
[14] T. Skwarnicki, *Study of the radiative cascade transitions between the* $\Upsilon'$ *and* $\Upsilon$ *resonances* (PhD Thesis, Institute of Nuclear Physics, Krakow, 1986).

[15] M. Pivk, F. R. Le Diberder, Nucl. Instrum. Meth. A **555**, 356 (2005). DOI: 10.1016/j.nima.2005.08.106.
[16] S. Okubo, Phys. Lett. **5**, 165 (1963). DOI: 10.1016/S0375-9601(63)92548-9.
[17] G. Zweig, *An $SU_3$ model for strong interaction symmetry and its breaking; Version 2* (PhD Thesis, CERN, Geneva, 1964).
[18] J. Iizuka, Suppl. Prog. Theor. Phys. **37**, 21 (1966). DOI: 10.1143/PTPS.37.21.
[19] R. Aaij et al., JHEP **11**, 094 (2013). DOI: 10.1007/JHEP11(2013)094.
[20] R. Aaij et al., JHEP **01**, 065 (2022). DOI: 10.1007/JHEP01(2022)065.
[21] R. Aaij et al., LHCb collaboration, Submitted to JHEP (2022). arXiv:2208.08660.

Поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.
После доработки 3 февраля 2023 г.
Принята к публикации 6 февраля 2023 г.

*Публикуется по рекомендации оргкомитета Московской международной школы физики 2022 (http://mosphys.ru)*