

D -волновые и другие возбуждения B_c -мезонов

Сессия ОЯФ РАН 2020, Новосибирск

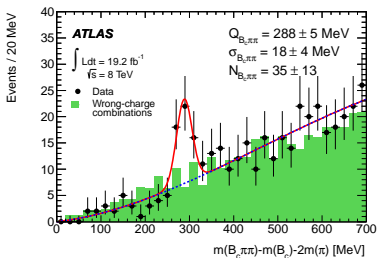
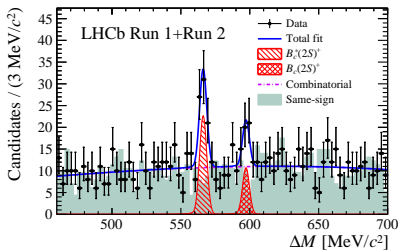
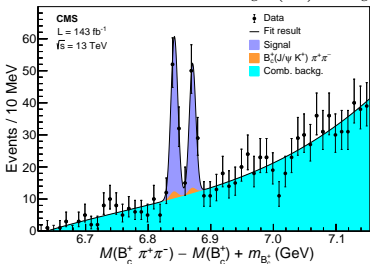
А. Бережной¹, И. Белов^{1,2}, А. Лиходед³,

¹НИИЯФ МГУ, ²Физический факультет МГУ, ³НИЦ “Курчатовский
Институт” ИФВЭ

10.03.2020

Уже обнаруженные возбуждения: $B_c(2S)$

$$B_c^{(*)}(2S) \rightarrow B_c^{(*)} \pi^+ \pi^-, B_c \rightarrow J/\psi \pi$$



Свойства B_c мезонов

- 1 Все возбуждения порога $D\bar{B}$ распадаются в нижнее состояние 1^1S_0 .
- 2 Нет сильных аннигиляционных каналов \implies очень узкое нижнее состояние.
- 3 Спектроскопия может изучаться в рамках тех же моделей, что и спектроскопия $c\bar{c}$ и $b\bar{b}$ кваркониев.
- 4 Небольшой выход по сравнению с “обычными” кваркониями.
- 5 Небольшой относительный выход P волновых возбуждений в сравнении с $c\bar{c}$ и $b\bar{b}$ кваркониями.

Семейство B_c имеет спектроскопию как у $c\bar{c}$ или $b\bar{b}$ кваркониев, а распадается как B мезон

- Основная разница в распадах (по сравнению с B мезонов): оба кварка в B_c мезоне тяжёлые.
- Основная разница в спектроскопии (по сравнению с $c\bar{c}$ и $b\bar{b}$ кваркониями): зарядовая чётность неопределена.

$$h_Q \chi_{1Q} \xrightarrow{\text{mixing}} 1^+ 1^{+'}$$

$$|2P, 1^{+'}\rangle = 0.294|S=1\rangle + 0.956|S=0\rangle$$

$$|2P, 1^+\rangle = 0.956|S=1\rangle - 0.294|S=0\rangle$$

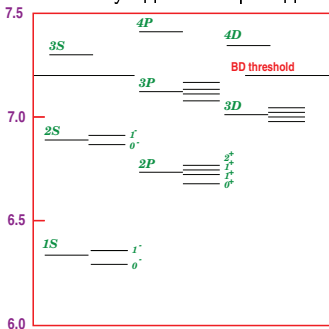
$$|3P, 1^{+'}\rangle = 0.371|S=1\rangle + 0.929|S=0\rangle$$

$$|3P, 1^+\rangle = 0.929|S=1\rangle - 0.371|S=0\rangle$$

[Kiselev et al.(1995)Kiselev, Likhoded, and Tkabladze, Gershtein et al.(1995)Gershtein, Kiselev, Likhoded, and Tkabladze]

Спектроскопия

Все возбуждения переходят в нижнее состояние 1^1S_0 .



state	Martin	BT
1^1S_0	6.253	6.264
1^1S_1	6.317	6.337
2^1S_0	6.867	6.856
2^1S_1	6.902	6.899
2^1P_0	6.683	6.700
$2P\ 1^+$	6.717	6.730
$2P\ 1'^+$	6.729	6.736
2^3P_2	6.743	6.747
3^1P_0	7.088	7.108
$3P\ 1^+$	7.113	7.135
$3P\ 1'^+$	7.124	7.142
3^3P_2	7.134	7.153
$3D\ 2^-$	7.001	7.009
3^5D_3	7.007	7.005
3^3D_1	7.008	7.012
$3D\ 2'^-$	7.016	7.012

Figure 1: The mass spectrum of (bc) with account for the spin-dependent splittings.

[Gouz et al.(2004)Gouz, Kiselev, Likhoded, Romanovsky, and Yushchenko]

Что ожидалось для $B_c^{(*)}(2S) \rightarrow B_c^{(*)} + \pi\pi$

$$B_c(2S) \xrightarrow[\sim 50\%]{\pi^+\pi^-} B_c$$

$$B_c^*(2S) \xrightarrow[\sim 40\%]{\pi^+\pi^-} B_c^*$$

$$\sigma^{2S} / \sigma^{\text{total}} \sim 25\%$$

~ 10 % of B_c происходят из распада
 $B_c(2S) \rightarrow B_c(1S) + \pi^+\pi^-$

в предположении, что

$$|R(B_c^*(2S))(0)| \approx |R(B_c(2S))(0)|$$

$$\sigma(B_c^*(2S)) / \sigma(B_c(2S)) \sim 2.6$$

Учёт релятивистских поправок

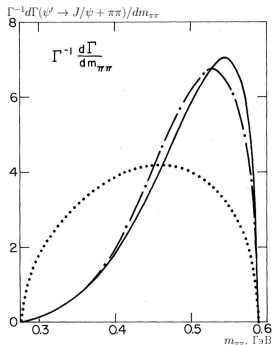
$$|R(B_c^*(2S))(0)| / |R(B_c(2S))(0)| = 0.87$$

[Martyненко(2019)]

$$|R(B_c^*(2S))(0)| / |R(B_c(2S))(0)| = 0.567$$

[Galkin(2019),
 Ebert et al.(2011)Ebert, Faustov, and Galkin]

$$\sigma(B_c^*(2S)) / \sigma(B_c(2S)) \sim 1 \div 2$$



$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{dm_{2\pi}} \sim \frac{|\mathbf{k}_{\pi\pi}|}{M^2} (2x^2 - 1) \sqrt{x^2 - 1}$$

где $x = m_{\pi\pi} / 2m_{\pi}$, а $\mathbf{k}_{\pi\pi}$ — момент $\pi\pi$ пары в системе покоя начального кваркония.
 [Brown and Cahn(1975), Novikov and Shifman(1981),
 Voloshin(1975), Voloshin and Zakharov(1980)]

$$B_c^*(2S) \rightarrow B_c^* \pi \pi, B_c^* \rightarrow B_c + \gamma^{\text{soft}}$$

γ^{soft} не детектируется. Впрочем как было замечено в 2013 году на мини-симпозиуме “Кварконий”, потеря фотона от B_c^* сдвигает векторное $2S$ -состояние примерно на ~ 65 МэВ и незначительно уширяет пик:

$$\Delta \tilde{M}_{2S} \sim 2 \frac{\Delta M^* \langle \sqrt{\Delta M^2 - m_{\pi\pi}^2} \rangle}{M} < 2 \frac{\Delta M^* \sqrt{\Delta M^2 - 4m_{\pi}^2}}{M} \approx 10 \text{ MeV}$$

M — масса основного состояния, $\Delta M^* = M(B_c^*) - M(B_c)$ — разница масс между нижними векторным и псевдоскалярными состояниями, а $\Delta M = M(B_c^*(2S)) - M(B_c^*)$.

Результат цитируется CMS и LHCb.

$B_c(2S)$: что измерено

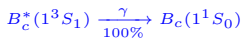
Таблица: Экспериментальные данные по $B_c(2S)$

	эксперимент	ATLAS	CMS	LHCb
	светимость (энергия)	24.1 fb^{-1} (7, 8 ТэВ)	140 фбн^{-1} (13 ТэВ)	8.7 фбн^{-1} (7, 8, 13 ТэВ)
масса, МэВ	$2^3 S_1$, смещённая	6842 ± 6	6842 ± 2	6841 ± 1
	$2^1 S_0$		6871.0 ± 1.6	6872.1 ± 1.6
выход	$2^3 S_1$	0.18 ± 0.05	0.0088 ± 0.0014	0.0136 ± 0.0027
	$2^1 S_0$		0.0068 ± 0.0014	0.0063 ± 0.0024
	total		0.0156 ± 0.0019	0.0198 ± 0.0036
$N(2^3 S_1)/N(2^1 S_0)$			1.31 ± 0.32	2.1 ± 0.9

Эффективности $\pi^+\pi^-$ не опубликованы, таким образом выходы нельзя сравнить аккуратно.

ATLAS [Aad et al.(2014)] CMS [Sirunyan et al.(2019)]

LHCb [Aaij et al.(2019)]

B_c^* и P -волновые B_c 

$$M(B_c^*) - M(B_c) \approx 65 \text{ МэВ}$$

Максимальная поперечная энергия ω_T фотона γ в лабораторной системе:

$$\omega_T^{max} = \left(1 + \frac{\Delta M}{2M_{B_c^*}}\right) \left(\sqrt{M_{B_c^*}^2 + p_T^2} + p_T\right) \frac{\Delta M}{M_{B_c^*}}$$

$$\approx 0.01 \left(\sqrt{M_{B_c^*}^2 + p_T^2} + p_T\right)$$

B_c^* v.s. B_c^P

- Много B_c^* , но нужны большие p_T .
- Небольшой выход B_c^P , но p_T несуществен.

B_c^P состояния более перспективны для наблюдений:

$$\frac{\sigma_{2P}(\omega_T^\gamma > 0.5 \text{ ГэВ})}{\sigma_{1S}(\omega_T^\gamma > 0.5 \text{ ГэВ} \iff p_T^{B_c} > 24 \text{ ГэВ})} \sim 25 \div 50$$

Таблица: Распады $P \rightarrow 1S + \gamma$

[Godfrey(2004), Gupta and Johnson(1996),

Kiselev et al.(1995) Kiselev, Likhoded, and Tkabladze]

state	decay to 1S	Br, %	ΔM , MeV
2^3P_0	$1^3S_1 + \gamma$	100	363-366
$2P1^+$	$1^3S_1 + \gamma$	87	393-400
	$1^1S_0 + \gamma$	13	393-400
$2P1'^+$	$1^1S_0 + \gamma$	94	472-476
	$1^3S_1 + \gamma$	6	472-476
2^3P_2	$1^3S_1 + \gamma$	100	410-426
3^3P_0	$1^3S_1 + \gamma$	2	741
$3P1^+$	$1^3S_1 + \gamma$	8.5	761
	$1^1S_0 + \gamma$	3.3	820
$3P1'^+$	$1^1S_0 + \gamma$	22.6	825
	$1^3S_1 + \gamma$	0.7	769
3^3P_2	$1^3S_1 + \gamma$	18	778

$$B_c^*(P) \rightarrow B_c^* + \gamma^{\text{hard}}, B_c^* \rightarrow B_c + \gamma^{\text{soft}}$$

Пики от P -волновых состояний могли бы выглядеть следующим образом:

Только $\sim 20\%$ $2P$ -волновых состояний распадаются, излучая один фотон. В большинстве случаев они распадаются каскадно:

$$B_c(2P) \xrightarrow{\gamma^{\text{hard}}} B_c^* \xrightarrow{\gamma^{\text{soft}}} B_c$$

Потеря мягкого фотона приводит к незначительному уширению пика на величину

$$\Delta\tilde{M} = \tilde{M}_{max} - \tilde{M}_{min} \approx 2 \frac{\Delta M^* \Delta M}{M}$$

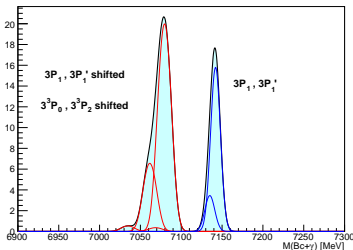
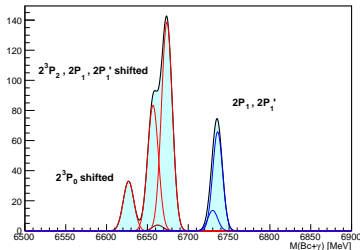
и его сдвигу на $\Delta M^* \approx 65$ МэВ.

Для $2P$ -волновых уровней ($\Delta M \approx 400$ МэВ) уширение невелико:

$$\Delta\tilde{M}_{2P} \approx 10 \text{ МэВ}$$

Для $3P$ -волновых уровней оно также приемлемо:

$$\Delta\tilde{M}_{3P} \approx 20 \text{ МэВ}$$



D-волновые состояния B_c-мезона

Таблица: Предсказания для масс D-волновых состояний B_c-мезонов (МэВ)

State	EQ	GKLT	ZVR	FUI	EFG	GI	MBV	SJSCP	LLLGZ
3^3D_1	7012	7008	7010	7024	7072	7028	6973	6998	7020
$3D_2'$	...	7016	...	...	7079	7036	7003	...	7032
$3D_2$	...	7001	...	...	7077	7041	6974	...	7024
3^1D_2	7009	...	7020	7023	...	...	...	6994	...
3^3D_2	7012	...	7030	7025	...	...	...	6997	...
3^3D_3	7005	7007	7040	7022	7081	7045	7004	6990	7030

Выход должен быть для D-волновых состояний должен быть мал ($\sim 1\%$ в e^+e^- -аннигиляции [Cheung and Yuan(1996)]).

$\sim 20\%$ D-волн излучают $\pi\pi$ [Eichten and Quigg(1994)].

Можно ожидать пики в том же массовом распределении, что и для 2S-состояний: несмещённый пик для 3^1D_2 -состояния и пики для 3^3D_1 -, 3^3D_2 -, 3^3D_3 -состояний, уширенные и смещённые на 65 МэВ.

Можно ожидать в B_c $\pi\pi$ -спектре:

- один узкий пик при ~ 7000 МэВ
- один широкий пик при ~ 6930 МэВ

Предварительные оценки выхода D -волновых состояний B_c в адронных взаимодействиях

$$A \sim \int d^3q \Psi^*(\vec{q}) \left\{ T(p_i, \vec{q})|_{\vec{q}=0} + q^\alpha \frac{\partial}{\partial q^\alpha} T(p_i, \vec{q})|_{\vec{q}=0} + q^\alpha q^\beta \frac{\partial^2}{\partial q^\alpha \partial q^\beta} T(p_i, \vec{q})|_{\vec{q}=0} + \dots \right\}$$

\vec{q} — трёх-импульс кварка в B_c -мезоне, $\Psi^*(\vec{q})$ — волновая функция B_c -мезоне, а T — амплитуда рождения четырёх тяжёлых кварков с импульсами p_i в жёстком глюон-глюонном взаимодействии. Для D -волновых состояний амплитуда пропорциональна $R''(0)$ и вторым производным T по трёх-импульсу кварка в B_c -мезоне.

Основные детали вычислений:

- Использовалась модификация программ для численного вычисления S - и P -состояний.
- Проведены проверки на калибровочную и лоренцевскую инвариантности.
- Оценены сечения в глюон-глюонном взаимодействии для разных энергий.

Предварительные результаты

Аномально низкий выход $B_c(D)$: $\frac{\sigma(D\text{-wave})}{\sigma(S\text{-wave})} \sim 10^{-4}$ v.s. 10^{-2} для e^+e^- -аннигиляции [Cheung and Yuan(1996)].

Планы:

- Дальнейшие проверки.
- Воспроизведение результатов для e^+e^- .
- Учёт цветового октета (?).

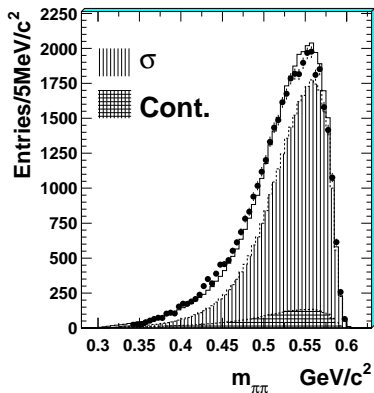
Выводы

- $B_c(2S)$ открыты!
- Зависимость выходов $2^3 S_1$ - $2^1 S_0$ -состояний B_c -мезонов может служить важнейшим источником информации о механизме рождения.
- Обнаружение P -волновых состояний B_c -мезонов вполне реальная задача для экспериментов на БАК.
- Предлагается искать D -возбуждения в спектре $B_c + \pi\pi$ на большой статистике.
- Но! Наши предварительные оценки сечения показывают очень сильное подавление выхода D -волновых возбуждений (10^{-4} от основного состояния).
- Планируются дополнительные проверки. В частности, планируется воспроизвести результат [Cheung and Yuan(1996)] для e^+e^- -аннигиляции.

Мы благодарим В. Галкина и А. Мартыненко за помощь в исследовании. Работа поддержана грантом РФФИ № 20-02-00154 А. А. Бережной и И. Белов благодарят фонд “Базис” (гранты 17-12-244-1 и 17-12-244-41).

Спасибо за внимание!

σ -мезон в распадах кваркониев



$f_0(500)$ or σ
 $J^{PC} = 0^{++}$
 $(400 - 550) - i(200 - 350)$ МэВ

Распределение $m_{\pi\pi}$ в распаде $\psi' \rightarrow J/\psi\pi\pi$. В фит
 был включён резонанс σ ($f_0(500)$)
 (BESII) [Ablikim et al.(2007)].

Работы с предсказаниями масс D -волновых состояний B_c -мезона

EQ [Eichten and Quigg(1994)]

GKLT [Gershtein et al.(1995)Gershtein, Kiselev, Likhoded, and Tkabladze]

ZVR [Zeng et al.(1995)Zeng, Van Orden, and Roberts]

FUI [Fulcher(1999)]

EFG [Ebert et al.(2003)Ebert, Faustov, and Galkin]

GI [Godfrey(2004)]

MBV [Monteiro et al.(2017)Monteiro, Bhat, and Vijaya Kumar]

SJSCP [Soni et al.(2018)Soni, Joshi, Shah, Chauhan, and Pandya]

LLLGZ [Li et al.(2019)Li, Liu, Lu, Lü, Gui, and Zhong]



Georges Aad et al.

Observation of an Excited B_c^\pm Meson State with the ATLAS Detector.

Phys. Rev. Lett., 113(21):212004, 2014.

doi: 10.1103/PhysRevLett.113.212004.



Roel Aaij et al.

Observation of an excited B_c^+ state.

2019.



M. Ablikim et al.

Production of sigma in $\psi(2S) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$.

Phys.Lett., B645:19–25, 2007.

doi: 10.1016/j.physletb.2006.11.056.



Aleksander Berezhnoy and Anatolii Likhoded.

The observation possibility of B_c excitations at LHC.

PoS, QFTHEP2013:051, 2013.

doi: 10.22323/1.183.0051.



Lowell S. Brown and Robert N. Cahn.

Chiral Symmetry and ψ -prime — $\psi + \pi + \pi$ Decay.

Phys.Rev.Lett., 35:1, 1975.

doi: [10.1103/PhysRevLett.35.1](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.35.1).



King-man Cheung and Tzu Chiang Yuan.

Heavy quark fragmentation functions for d wave quarkonium and charmed beauty mesons.

Phys. Rev., D53:3591–3603, 1996.

doi: [10.1103/PhysRevD.53.3591](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.53.3591).



D. Ebert, R. N. Faustov, and V. O. Galkin.

Properties of heavy quarkonia and B_c mesons in the relativistic quark model.

Phys. Rev., D67:014027, 2003.

doi: [10.1103/PhysRevD.67.014027](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.67.014027).



D. Ebert, R. N. Faustov, and V. O. Galkin.

Spectroscopy and Regge trajectories of heavy quarkonia and B_c mesons.

Eur. Phys. J., C71:1825, 2011.

doi: [10.1140/epjc/s10052-011-1825-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1825-9).



Estia J. Eichten and Chris Quigg.

Mesons with beauty and charm: Spectroscopy.

Phys. Rev., D49:5845–5856, 1994.

doi: [10.1103/PhysRevD.49.5845](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.49.5845).



Lewis P. Fulcher.

Phenomenological predictions of the properties of the B_c system.

Phys. Rev., D60:074006, 1999.

doi: 10.1103/PhysRevD.60.074006.



V. O. Galkin.

Private communications: wave functions for $bc(2s)$ states.

Private communications: wave functions for $B_c(2S)$ states, 2019.



S.S. Gershtein, V.V. Kiselev, A.K. Likhoded, and A.V. and Tkabladze.

Physics of $B(c)$ mesons.

Phys.Usp., 38:1–37, 1995.

doi: 10.1070/PU1995v038n01ABEH000063.



Stephen Godfrey.

Spectroscopy of B_c mesons in the relativized quark model.

Phys.Rev., D70:054017, 2004.

doi: 10.1103/PhysRevD.70.054017.



I.P. Gouz, V.V. Kiselev, A.K. Likhoded, V.I. Romanovsky, and O.P. Yushchenko.

Prospects for the B_c studies at LHCb.

Phys.Atom.Nucl., 67:1559–1570, 2004.

doi: 10.1134/1.1788046,10.1134/1.1788046.



Suraj N. Gupta and James M. Johnson.

B(c) spectroscopy in a quantum chromodynamic potential model.

Phys.Rev., D53:312–314, 1996.

doi: 10.1103/PhysRevD.53.312.



V. V. Kiselev, A. K. Likhoded, and A. V. Tkabladze.

B(c) spectroscopy.

Phys. Rev., D51:3613–3627, 1995.

doi: 10.1103/PhysRevD.51.3613.



Qi Li, Ming-Sheng Liu, Long-Sheng Lu, Qi-Fang Lü, Long-Cheng Gui, and Xian-Hui Zhong.

The excited bottom-charmed mesons in a nonrelativistic quark model.

2019.



A. P. Martynenko.

Private communications: wave functions for $bc(2s)$ states.

Private communications: wave functions for $B_c(2S)$ states, 2019.



Antony Prakash Monteiro, Manjunath Bhat, and K. B. Vijaya Kumar.

Mass spectra and decays of ground and orbitally excited $c\bar{b}$ states in nonrelativistic quark model.

Int. J. Mod. Phys., A32(04):1750021, 2017.

doi: 10.1142/S0217751X1750021X.



V.A. Novikov and Mikhail A. Shifman.

Comment on the psi-prime — J/psi pi pi Decay.

Z.Phys., C8:43, 1981.

doi: 10.1007/BF01429829.



Albert M Sirunyan et al.

Observation of Two Excited B_c^+ States and Measurement of the $B_c^+(2S)$ Mass in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV.

Phys. Rev. Lett., 122(13):132001, 2019.

doi: 10.1103/PhysRevLett.122.132001.



N. R. Soni, B. R. Joshi, R. P. Shah, H. R. Chauhan, and J. N. Pandya.

$Q\bar{Q}$ ($Q \in \{b, c\}$) spectroscopy using the Cornell potential.

Eur. Phys. J., C78(7):592, 2018.

doi: 10.1140/epjc/s10052-018-6068-6.



Mikhail B. Voloshin.

Adler's Selfconsistency Condition in the Decay $\psi(3700) \rightarrow \psi(3100) \pi \pi$.

JETP Lett., 21:347–348, 1975.



Mikhail B. Voloshin and Valentin I. Zakharov.

Measuring QCD Anomalies in Hadronic Transitions Between Onium States.

Phys.Rev.Lett., 45:688, 1980.

doi: 10.1103/PhysRevLett.45.688.



J. Zeng, J. W. Van Orden, and W. Roberts.

Heavy mesons in a relativistic model.

Phys. Rev., D52:5229–5241, 1995.

doi: 10.1103/PhysRevD.52.5229.