

Эксперимент BELLE

по изучению структуры материи и свойств антиматерии

Международный эксперимент Belle был запущен на асимметричном электрон-позитронном коллайдере KEKB в научном центре КЕК (Цукуба, Япония) в 1999 году. За период работы до 2010 года ускоритель KEKB достиг рекордной светимости, и детектор Belle набрал более 1000 фбн^{-1} данных.

Коллаборация Belle представила миру множество важнейших научных результатов. Среди них подтверждение механизма CP-нарушения, послужившее основанием для присуждения М. Кобаяши и Т. Маскаве Нобелевской премии по физике в 2008 году.

Учёные ИТЭФ играли ведущую роль в наборе и обработке данных эксперимента. Они внесли огромный вклад в решение главной задачи эксперимента — измерение параметров CP-нарушения в распадах В-мезонов и поиск редких распадов В-мезонов, а также в физику кваркония и очарованных адронов. Было впервые обнаружено и изучено ассоциативное рождение чармония, исследованы процессы рождения открытого чарма вблизи порога в e^+e^- аннигиляции, найдены новые очарованные барионы и новые состояния боттомония, изучены свойства B_s^0 -мезонов и $\Upsilon(5S)$ -резонанса. Кроме того, физики ИТЭФ открыли восемь экзотических состояний кваркония, в том числе заряженных, обнаружив новую структуру адронов, содержащих тяжёлые кварки.

CP-нарушение в системе В-мезонов, согласующееся с предсказанием модели Кобаяши-Маскавы, впервые обнаружено в 2001 г. в распаде $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ [1]. Коллаборация BELLE выпустила ряд работ, посвящённых измерению CP-нарушения в других распадах В-мезонов [2, 3]. С использованием результатов этих измерений вычислены три угла Треугольника унитарности, причем угол β — с точностью лучше полутора градусов. Точность прямых измерений двух других углов — около десяти-двадцати градусов. Эти работы велись при непосредственном участии и под руководством сотрудников ИТЭФ.

Физики ИТЭФ в 2002 году открыли процесс $e^+e^- \rightarrow J/\psi c\bar{c}$ [4]. Было найдено ассоциативное рождение J/ψ с η_c^- , χ_{c0}^- и $\eta_c'^-$ -состояниями (рис. 1),

а также с D^0 - и D^{*+} -мезонами. Измеренное сечение $e^+e^- \rightarrow J/\psi cc$ оказалось на порядок выше теоретических предсказаний. Спустя несколько лет возросшая более чем на порядок статистика данных эксперимента BELLE позволила вычислить это сечение модельно-независимым образом и измерить кинематические характеристики процесса.

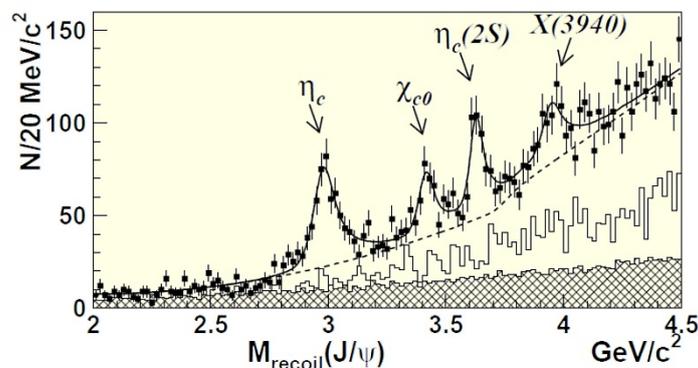


Рис. 1. Распределение массы отдачи к J/ψ в процессе $e^+e^- \rightarrow J/\psi cc$. Отчётливые пики вблизи масс η_c , χ_{c0} и η'_c свидетельствуют об ассоциативном их рождении с J/ψ . Пик вблизи массы 3,94 ГэВ — новое состояние чармония $X(3940)$.

С этой целью исследовалось рождение J/ψ совместно с основными состояниями очарованных адронов. Измеренная величина сечения процесса $e^+e^- \rightarrow J/\psi cc$ составила $(0,74 \pm 0,08 \pm 0,09)$ пбн, что значительно превысило теоретические оценки, полученные в лидирующем порядке разложения по α_s в нерелятивистском приближении КХД.

Группа Belle в 2010 г. завершила уникальные исследования процессов рождения открытого чарма вблизи порога в e^+e^- аннигиляции с излучением в начальном состоянии. Были измерены десять эксклюзивных сечений рождения двух- и трёхчастичных конечных состояний, содержащих очарованные адроны, в частности D^*D^* , $D_s^*D_s^*$, $D^*D^*\pi$ и $\Lambda_c^+\Lambda_c^-$.

Отсутствие представителей Y -семейства, распадающихся в конечные состояния D^*D^* , стало подтверждением их экзотической природы. А измерение сечений процессов $e^+e^- \rightarrow D^0D^{*-}\pi^+$ позволило опровергнуть ряд гибридных моделей, предсказывающих распад $Y(4260) \rightarrow D^{(*)}D^{(*)}\pi$.

Впервые отчётливо проявилось рождение самого тяжёлого из известных возбуждений — векторного чармония $\psi(4415)$ — в процессе $e^+e^- \rightarrow D^0D^-\pi^+$ [5]. Были измерены его масса и полная ширина, и показано, что доминирующим распадом является $\psi(4415) \rightarrow DD_2(2460)$, в то время как доля нерезонансной моды $\psi(4415) \rightarrow D^0D^-\pi^+$ не превышает 0,22 на 90% У.Д.

В 2006 году физики ИТЭФ открыли два состояния возбуждённых очарованных странных Ξ_c -барионов в спектре инвариантных масс $\Lambda_c^+K^-\pi^+$ и $\Lambda_c^+K_s^0\pi^-$ [6] (рис. 2). Они впервые наблюдали необычный механизм распада

барионов в конечное состояние, в котором странный и очарованный кварки уносят разные частицы: Λ_c -барион и К-мезон.

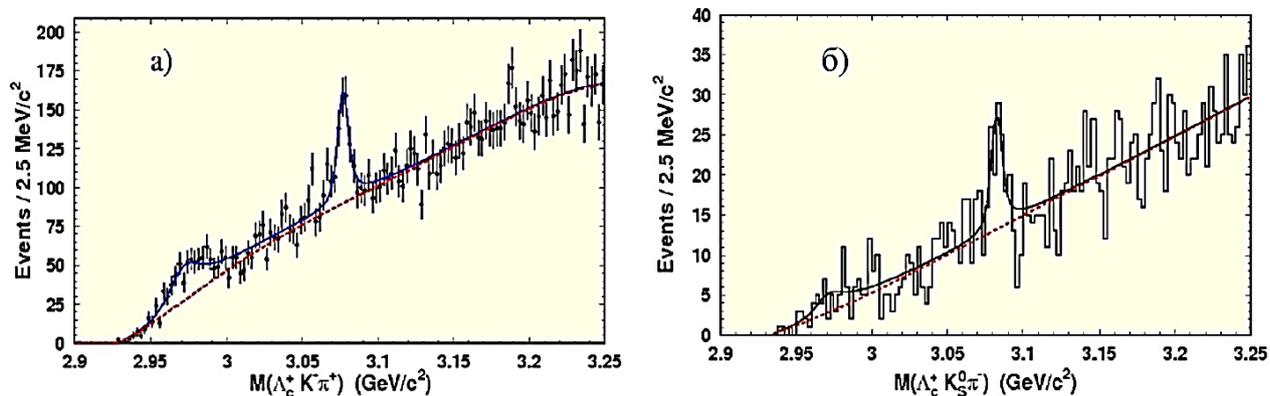


Рис. 2. Распределения $M(\Lambda_c^+ K^- \pi^+)$ (слева — а) и $M(\Lambda_c^+ K_s^0 \pi^-)$ (справа — б) демонстрируют отчетливые пики вблизи масс 2,98 ГэВ и 3,08 ГэВ, соответствующие $\Xi_c(2980)^+$ и $\Xi_c(3080)^+$ очарованным странным барионам.

Впервые группа BELLE измерила квантовые числа недавно открытого $\Lambda_c^+(2880)$ -бариона [7], а из анализа угловых распределений продуктов распада $\Lambda_c^+(2880) \rightarrow \Sigma_c(2520)\pi$ был определён его спин. Чётность этого бариона была получена в результате измерения относительного вклада промежуточного состояния $\Sigma_c(2520)\pi$, впервые наблюдавшегося в распаде $\Lambda_c(2880) \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^+ \pi^-$ в виде резонансной структуры.

Квантовая хромодинамика помимо стандартных барионов и мезонов, состоящих из трёх кварков или пары кварк-антикварк, не запрещает существование других связанных систем, состоящих, например, из четырёх кварков и одного антикварка или двух кварков и двух антикварков, а также из кварк-антикварка с глюоном. Благодаря интенсивной работе В-фабрик за последнее десятилетие открыто около трёх десятков кандидатов в подобные экзотические состояния кваркония.

История экзотического кваркония началась в 2003 году, когда коллаборация BELLE в распаде $V^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- J/\psi$ открыла первое чармониеподобное состояние, названное $X(3872)$ [8]. Среди многочисленных поисков распадов и измерений его параметров, выполненных в последние годы, важнейшим является обнаружение сотрудниками ИТЭФ распада в D^0 анти- D^{*0} [9].

Два новых состояния позволили начать исследование ассоциативного рождения чармония. Пик вблизи массы 3,94 ГэВ, названный $X(3940)$, был открыт в 2006 году в спектре масс отдачи к J/ψ (рис. 1) [10]. Удалось продемонстрировать, что новое состояние распадается на DD^* , в то время как распад на DD найден не был. Вскоре было обнаружено ещё одно состояние, $X(4160)$, распадающееся на $D^* D^*$, с массой около 4,16 ГэВ и шириной

130 МэВ. Наиболее вероятной интерпретацией найденных состояний сегодня являются третье и четвертое радиальные возбуждения η_c -мезона.

Нейтральное чармониеподобное состояние, названное $X(4630)$, было открыто в процессе $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^-$ [11]. Хотя его масса и полная ширина согласуются в пределах ошибок с параметрами экзотического состояния $Y(4660)$, и это совпадение, включая квантовые числа, кажется неслучайным, не исключены иные интерпретации. Возможны предположения, что $X(4630)$ — это $\psi(5S)$ - или $\psi(6S)$ -состояния чармония, пороговый эффект, точечные барионы, тетракварк или гексакварк.

Особое место занимают заряженные чармониеподобные состояния, поскольку именно наличие заряда однозначно указывает на их экзотическую природу, которую невозможно описать в рамках стандартной кварковой модели. Первое из таких состояний $Z(4430)^+$ было обнаружено в 2007 г. коллаборацией BELLE в спектре инвариантных масс $\psi(2S)\pi^+$ в распаде $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^-\pi^+$ [12]. Спустя два года группа ИТЭФ уточнила массу и ширину $Z(4430)^+$, осуществив Далиц-анализ этого распада, а в 2013 г. — обновила параметры $Z(4430)^+$ и измерила его квантовые числа, $J^P = 1^+$ [13].

Ещё два чармониеподобных состояния были открыты в 2008 году: $Z(4050)^+$ и $Z(4250)^+$. Физики ИТЭФ, исследуя распады $B^0 \rightarrow \chi_{c1}K^-\pi^+$, обнаружили их в комбинации $\chi_{c1}\pi^+$. Спустя шесть лет в распаде $B^0 \rightarrow J/\psi K^-\pi^+$ в комбинации $J/\psi\pi^+$ наряду с $Z(4430)^+$ группа ИТЭФ обнаружила четвертое заряженное экзотическое состояние — $Z(4200)^+$ [14].

Анализируя уникальный состав данных в области энергий $Y(5S)$ -резонанса, физики ИТЭФ в 2012 году открыли первые экзотические заряженные состояния боттомония [15]. Была исследована резонансная структура распадов $Y(5S) \rightarrow h_b(mP)\pi^+\pi^-$ ($m = 1, 2$) и $Y(5S) \rightarrow Y(nS)\pi^+\pi^-$ ($n = 1, 2, 3$). В каждом из распределений пар $h_b(mP)\pi^\pm$ и $Y(nS)\pi^\pm$ по массе наблюдалось по два значимых пика (рис. 3). Обнаруженные сигналы были идентифицированы как новые изовекторные состояния, названные $Z_b(10610)^\pm$ и $Z_b(10650)^\pm$. По результатам углового анализа была измерена их спин-чётность, которая оказалась равной $J^P = 1^+$.

Ключевую роль в открытии и исследованиях заряженных кваркониеподобных состояний принадлежит группе ИТЭФ. Найденные состояния Z_b^\pm являются экзотическими многокварковыми мезонами. Их свойства свидетельствуют о молекулярной структуре. Адронные молекулы стали новым установленным видом вещества.

В 2004 году физики ИТЭФ разработали новую методику восстановления B_s^0 -мезонов в e^+e^- аннигиляции при полной энергии в системе центра масс в области $Y(5S)$ -резонанса. Первые измерения распадов B_s^0 -мезонов были выполнены сотрудниками ИТЭФ. Были впервые детально изучены свойства $Y(5S)$ -резонанса и измерены доли распадов $Y(5S)$ -резонанса в двухчастичные

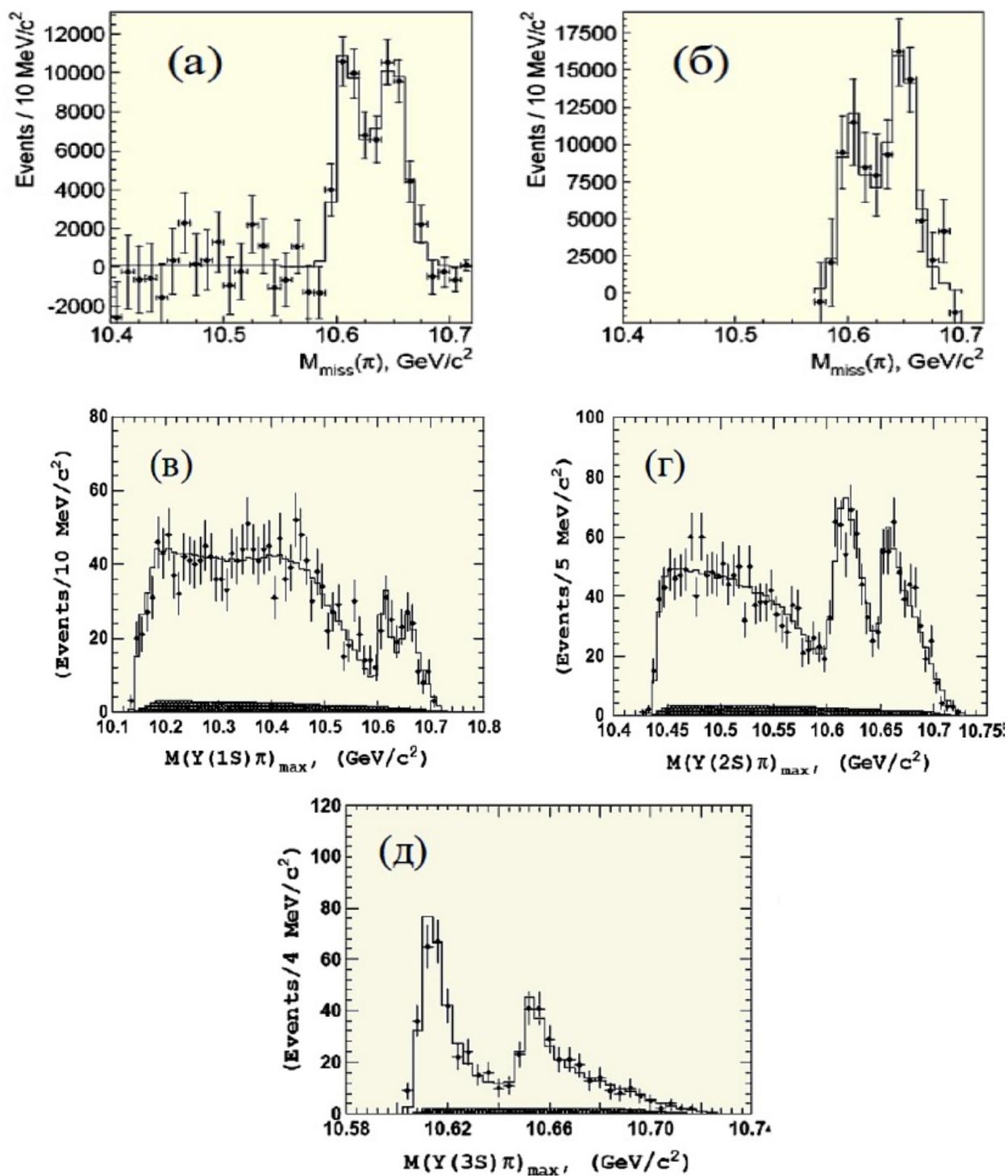


Рис. 3. Спектры масс: $h_b(1P)\pi^\pm$ — (а), $h_b(2P)\pi^\pm$ — (б), $Y(1S)\pi^\pm$ — (в), $Y(2S)\pi^\pm$ — (г), $Y(3S)\pi^\pm$ — (д). В каждом из распределений наблюдается по два значимых пика, идентифицированных как новые состояния $Z_b(10610)^\pm$ и $Z_b(10650)^\pm$.

состояния BB , BB^* и B^*B^* , а также определены доли трёхчастичных состояний: $BB\pi$, $BB^*\pi$, $B^*B^*\pi$ — в предположении изотопической симметрии [16].

На базе данных, набранных в области энергий $\Upsilon(5S)$ -резонанса, сотрудниками ИТЭФ были открыты три новых спин-синглетных состояния боттомония. Ими же в переходах $\Upsilon(5S) \rightarrow h_b(mP)\pi^+\pi^-$ ($m=1,2$) были найдены спин-синглетные уровни боттомония $h_b(1P)$ и $h_b(2P)$ [17] (рис. 4) и измерены их массы, а также получено значение сверхтонкого расщепления $\Delta M_{\text{HF}}(nP)$, являющегося мерой спин-спинового взаимодействия между кварком и антикварком. $\Delta M_{\text{HF}}(nP)$ согласуется с нулем, как и ожидается в большинстве теоретических моделей. Хотя рождение $h_b(mP)$ сопровождается переворотом спина b -кварка и должно быть подавлено по сравнению с рождением $\Upsilon(nS)$ как Λ/m_b , существенного подавления обнаружено не было, что, вероятно, свидетельствует об экзотическом механизме рождения $h_b(mP)$.

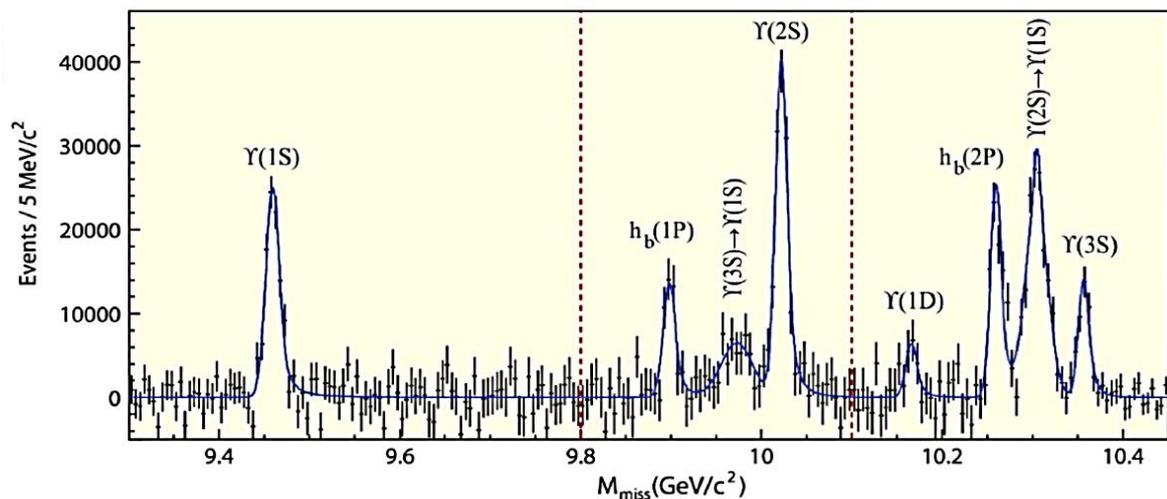


Рис. 4. Спектр недостающей массы $\pi^+\pi^-$ пар при энергии $\Upsilon(5S)$ -резонанса после вычитания гладкого фона. Помимо известных состояний боттомония $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$ и $\Upsilon(3D)$ впервые наблюдаются спин-синглетные уровни боттомония $h_b(1P)$ и $h_b(2P)$.

Физикам ИТЭФ удалось впервые обнаружить радиационные переходы $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(2S)\gamma$ [18]. Кроме этого были найдены переходы $h_b(1P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$ и $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$, а также измерены массы и ширины состояний боттомония $\eta_b(1S)$ и $\eta_b(2S)$. Масса $\eta_b(1S)$ определена с наивысшей в мире точностью и на $10 \text{ МэВ}/c^2$ превысила мировое среднее значение. Измеренные значения находятся в согласии с последними решёточными вычислениями.

Физики ИТЭФ — участники эксперимента BELLE — отмечены многочисленными наградами. За лучшую научную работу 2005 г. им была присуждена медаль Российской академии наук. Молодые ученые группы 4 раза получали грант Президента Российской Федерации, дважды становились победителями конкурса молодых ученых Госкорпорации «Росатом». По результатам эксперимента BELLE пятерым физикам была присуждена учёная степень доктора, а шестерым — кандидата физико-математических наук.

Литература

1. Belle Collaboration (K. Abe et al.). “Observation of Large CP Violation in the Neutral B Meson System”. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, v. 87, p. 091802.
2. Belle Collaboration (K. Vervink et al.). “Evidence of time-dependent CP violation in the decay $B^0 \rightarrow D^{*+} D^{*-}$ ”. *Phys. Rev.*, 2009, D80, p. 111104.
3. Belle Collaboration (T. Aushev (Moscow, ITEP) et al.). “Search for CP Violation in the Decay $B^0 \rightarrow D^{*+} D^+$ ”. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, v. 93, p. 201802.
4. Belle Collaboration (K. Abe et al.). “Observation of double c anti-c production in e^+e^- annihilation at \sqrt{s} approximately 10.6 GeV”. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, v. 89, p. 142001.
5. Belle collaboration (G. Pakhlova (ITEP, Moscow) et al.). “Observation of $\psi(4415) \rightarrow DD_2^*(2460)$ Decay Using Initial-State Radiation”. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100, p. 062001.
6. Belle Collaboration (R. Chistov (ITEP, Moscow) et al.). “Observation of New States Decaying into $\Lambda_c^+ K^- \pi^+$ and $\Lambda_c^+ K_S^0 \pi^-$ ”, *Phys. Rev. Lett.*, 2006, v. 97, p. 162001.
7. Belle Collaboration (K. Abe et al.). “Experimental Constraints on the Spin and Parity of the $\Lambda_c(2880)^+$ ”. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, v. 98, p. 262001.
8. Belle Collaboration (S.K. Choi et al.). “Observation of a Narrow Charmonium State in Exclusive $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^- J/\psi$ Decays”. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, v. 91, p. 262001.
9. Belle Collaboration (T. Aushev et al.). “Study of the $B \rightarrow X(3872) (\rightarrow D^{*0} D^0) K$ decay”. *Phys. Rev.*, 2010, D81, p. 031103.
10. Belle Collaboration (K. Abe et al.). “Observation of a Charmonium State Production in Association with a J/ψ in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} \approx 10.6$ GeV”. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, v. 98, p. 082001.
11. Belle collaboration (G. Pakhlova (ITEP, Moscow) et al.). “Observation of a near-threshold enhancement in the $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^-$ cross section using initial-state radiation”. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, v. 101, p. 172001.
12. Belle Collaboration (T. Medvedeva (ITEP, Moscow) et al.). “Observation of the decay $B^0 \rightarrow D_s^+ \Lambda^- \text{ anti-p}$ ”. *Phys. Rev.*, 2007, D76, p. 051102.
13. Belle Collaboration (R. Chilikin (ITEP, Moscow) et al.). “Experimental constraints on the spin and parity of the $Z(4430)^+$ ”. *Phys. Rev.*, 2013, D88, p. 074026.
14. Belle Collaboration (R. Chilikin (ITEP, Moscow) et al.). “Observation of a new charged charmonium-like state in $B \rightarrow J/\psi K \pi$ decays”. *Phys. Rev.*, 2014, D90, p. 112009.
15. Belle Collaboration (A. Bondar et al.). “Observation of Two Charged Bottomonium-like Resonances in $Y(5S)$ Decays”. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, v. 108, p. 122001.
16. Belle Collaboration (A. Drutskoy et al.). “Measurement of $Y(5S)$ decays to B^0 and B^+ mesons”. *Phys. Rev.*, 2010, D81, p. 112003.

17. Belle Collaboration (I. Adachi et al.). “First Observation of the P-Wave Spin-Singlet Bottomonium States $h_b(1P)$ and $h_b(2P)$ ”. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, v. 108, p. 032001.

18. Belle Collaboration (R. Mizuk (ITEP, Moscow) et al.). “Evidence for the $\eta_b(2S)$ and Observation of $h_b(1P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$ and $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$ ”. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, v. 109, p. 232002.