

Статус и перспективы BES-III эксперимента

Нефедов Юрий

(for the BES-III collaboration)

ОИЯИ Дубна

Рабочее совещание по физической программе

Супер с-тау фабрики, Новосибирск 2017

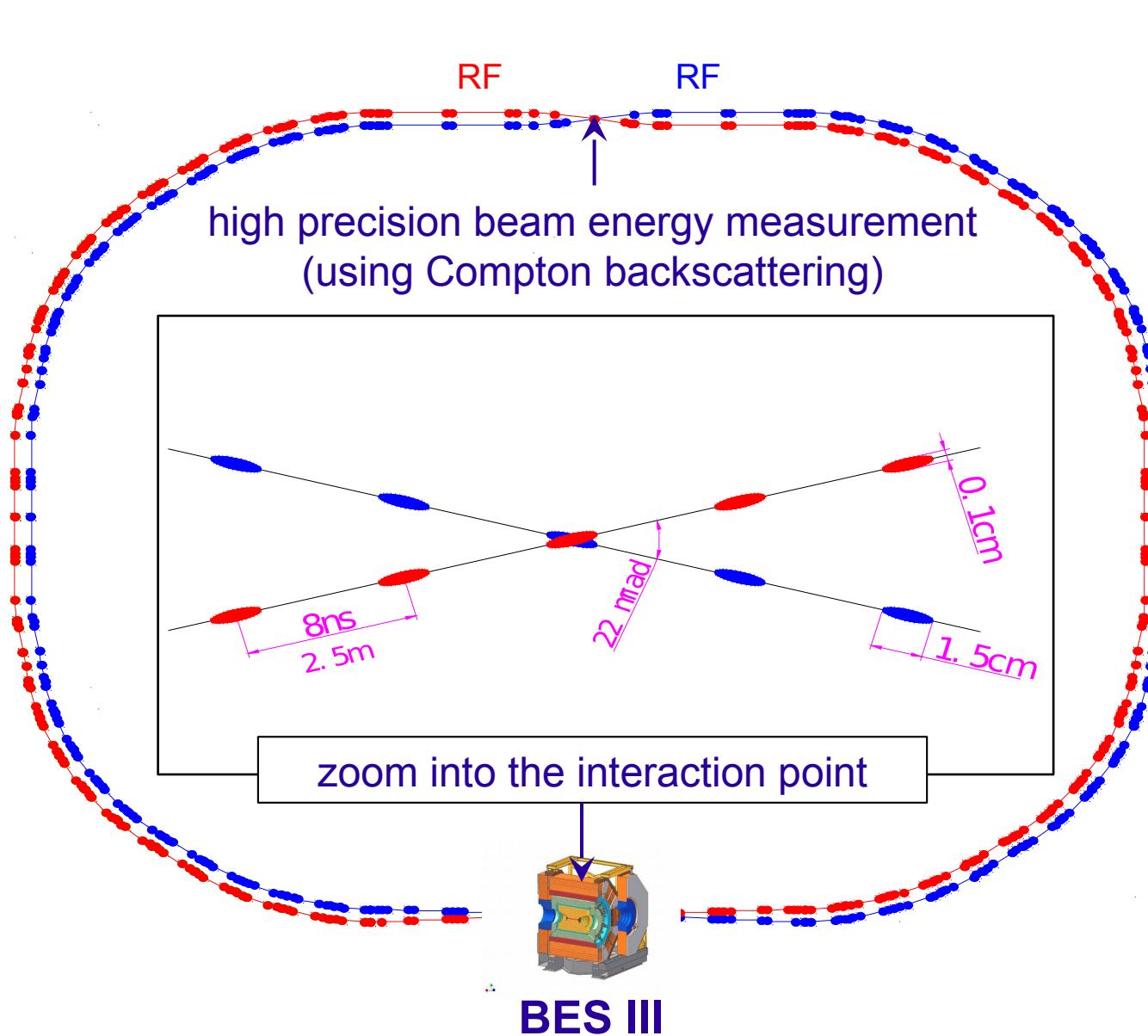
Outline

- Эксперимент и детектор BES3
- Наборы данных и физическая программа
- Чармоний-подобные состояния:
 - Заряженные Zc состояния

BEPCII/BESIII в IHEP (Пекин)



Beijing Electron Positron Collider (BEPCII)

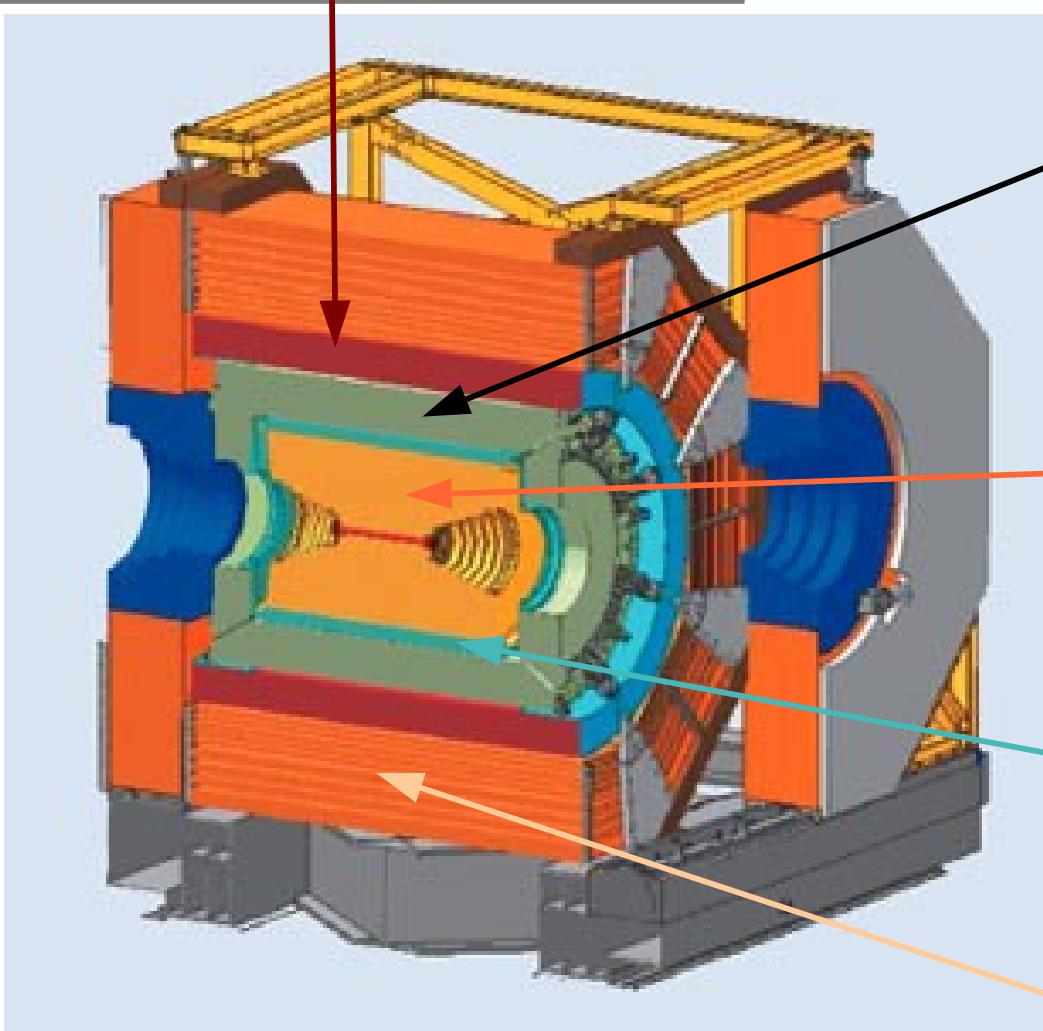


- Doble-ring
- Large crossing angle
- Beam energy:
1.0 - 2.3 GeV
- Design luminosity:
 $1 \times 10^{33} / \text{cm}^2 \text{s}$
@ $\psi(3770)$
- Achieved luminosity:
 $L_{\text{peak}} = 1.0 \times 10^{33} / \text{cm}^2 \text{s}$
- Beam energy
measurement:
 5×10^{-5}

Детектор BES-III

NIM A614, 345(2010)

Super conducting magnet: 1 T



EMC: CsI cristal

- Energy resolution: 2.5% @1GeV
- Spatial resolution: 6mm

MDC:

- Spatial resolution: $\sigma_{xy} = 120\mu\text{m}$
- Momentum resolution: 0.5% @ 1GeV
- dE/dx resolution: 6%

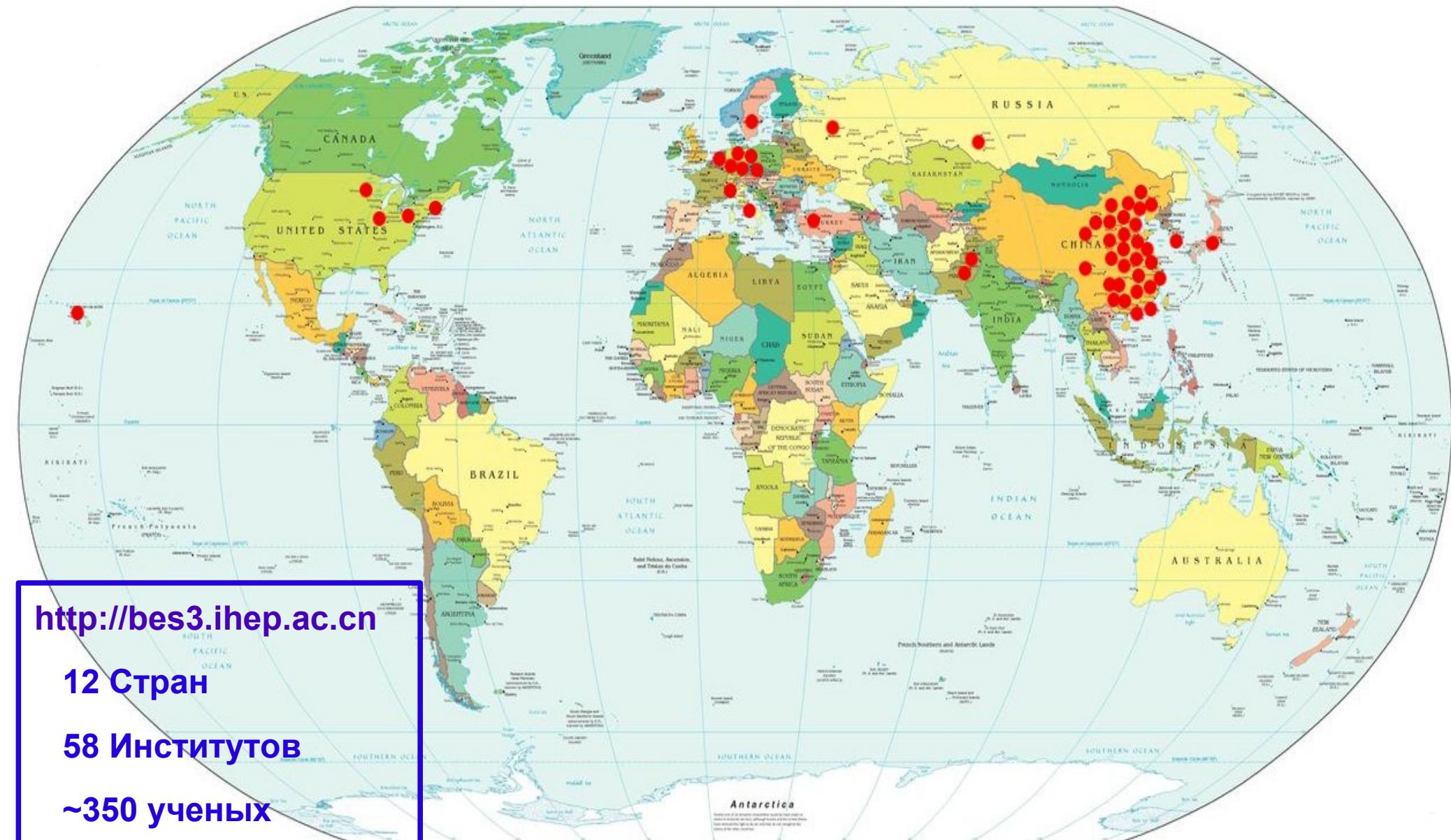
TOF:

Time resolution: 100ps (barrel)
110ps (endcaps)

Muon ID:

9 layers RPC, 8 for endcaps

The BES-III Collaboration



<http://bes3.ihep.ac.cn>

12 Стран

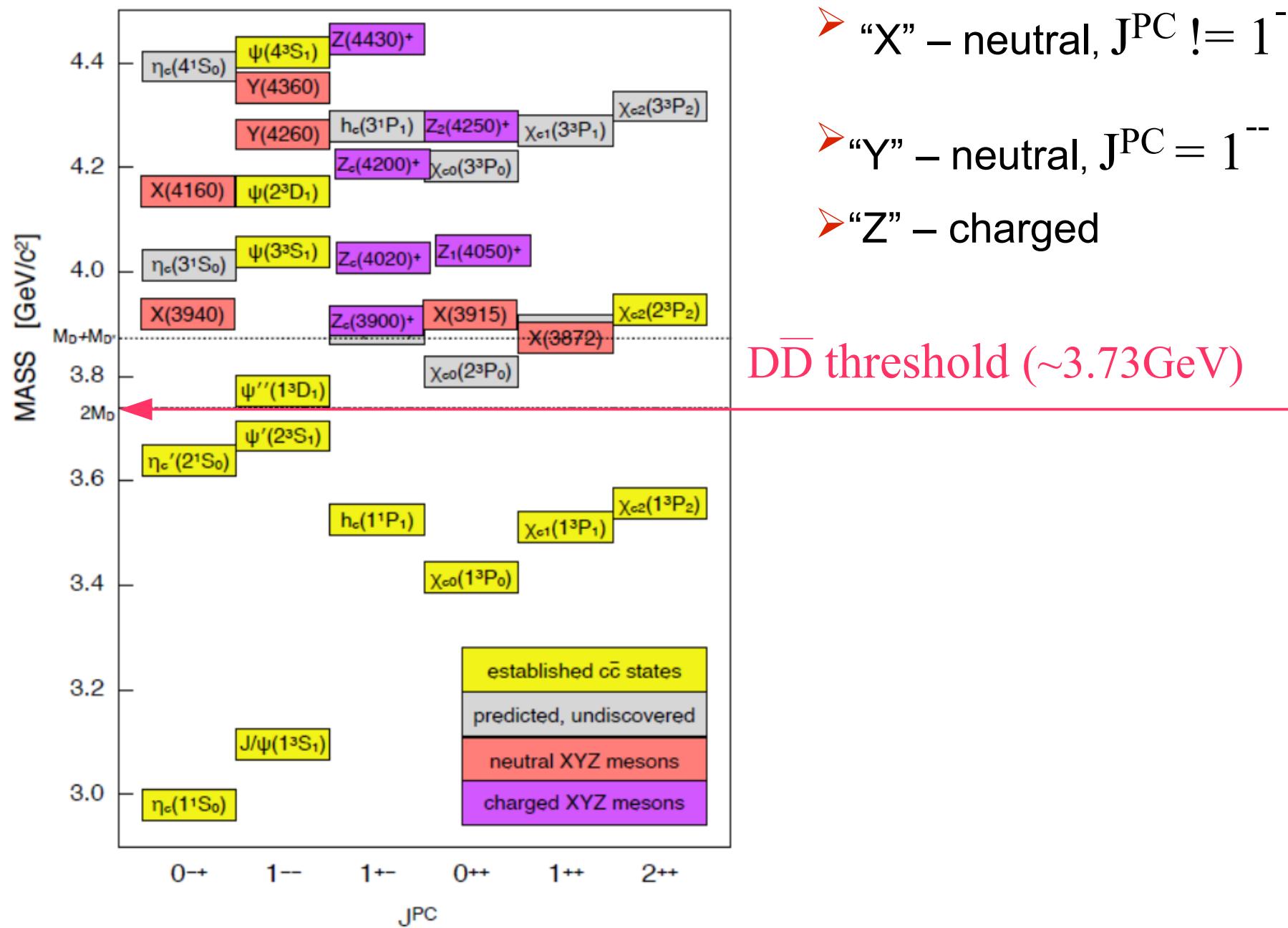
58 Институтов

~350 ученых

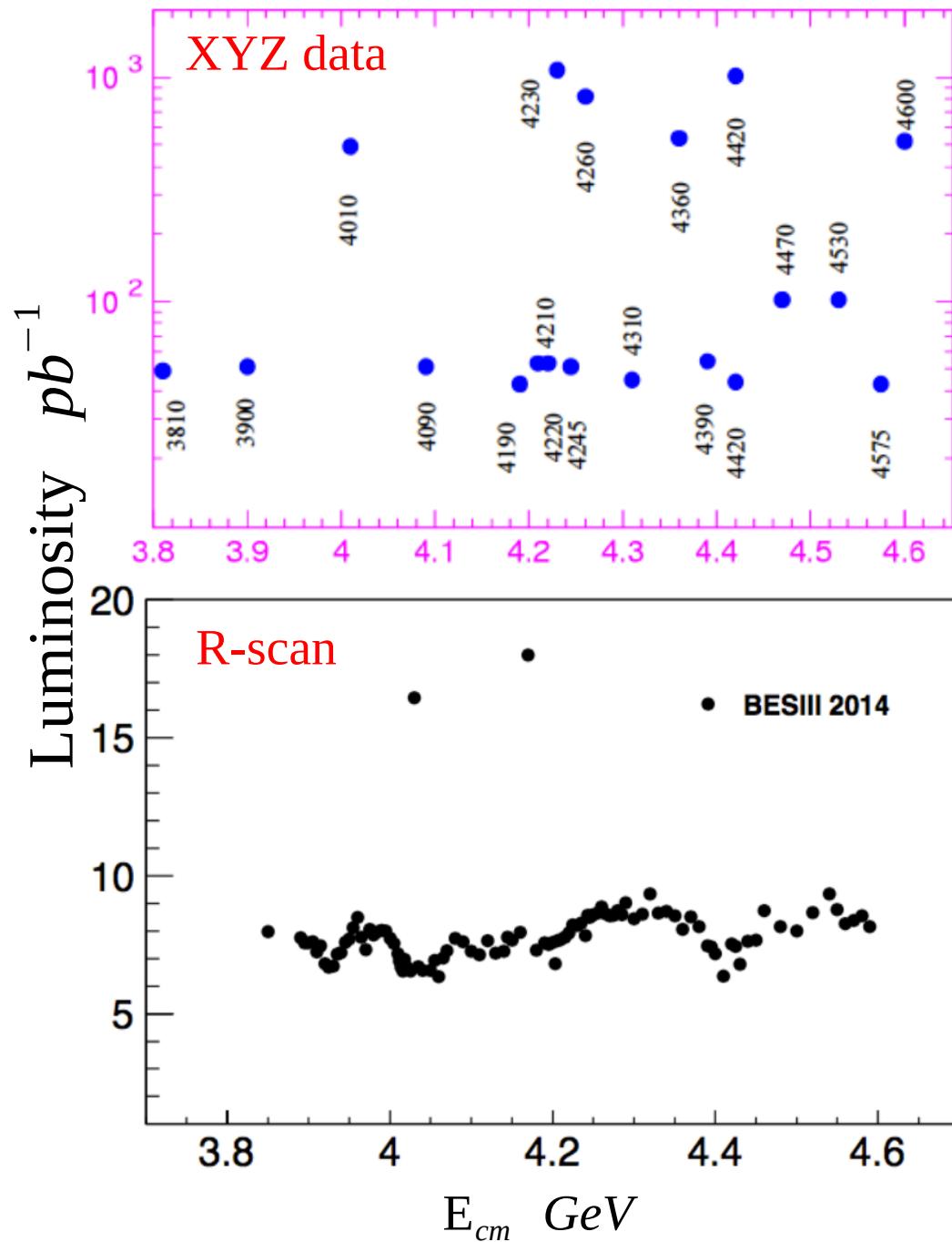
Набор данных на BES-III

Energy & physics	N or L	Comments
J/ ψ at 3.097 GeV	1.3×10^9	2009+2012: 20 x BES-II
$\psi(2S)$ at 3.686 GeV	0.5×10^9	2009+2012: 20 x CLEO-c
$\psi(3770)$ at 3.773 GeV	2.9 fb^{-1}	2010+2011: 3.5 x CLEO-c
$\psi(4040)$ at 4.009 GeV	0.5 fb^{-1}	2011
tau mass scan around 3.554 GeV	24 pb^{-1}	2011
4.23 / 4.26 GeV 4.36 GeV 4.42 GeV 4.47 / 4.53 GeV 4.6 GeV xyz-scan: 3.81 – 4.42 GeV	1.9 fb^{-1} 0.5 fb^{-1} 1.0 fb^{-1} 0.2 fb^{-1} 0.6 fb^{-1} $\sim 50 \text{ pb}^{-1}$	2013+2014 Data used for analyzes presented today 10 points
4.575 GeV at Λ_c threshold	48 pb^{-1}	2014
R scan: 3.85 – 4.59 GeV	$\sim 0.8 \text{ fb}^{-1}$	2014 (104 points)
R scan: 2.0 – 3.08 GeV + 2.175 GeV	$\sim 0.6 \text{ fb}^{-1}$	2015 (20 points)
4.18 GeV (for Ds)	$\sim 3 \text{ fb}^{-1}$	2016
XYZ: 4.19 – 4.28 GeV	$\sim 1 \text{ fb}^{-1}$	2017 on-going data taking (we have 8 more points this year!)

Чармопий и XYZ – состояния



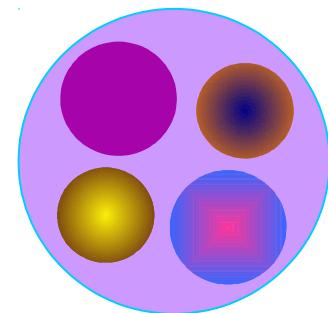
BES-III данные для изучения XYZ



- ~5fb⁻¹ данных в области энергий 3.8 – 4.6 GeV
- Значительная статистика для энергий 4.23/4.26/4.42 GeV
- Большое количество точек со светимостью ~10pb⁻¹

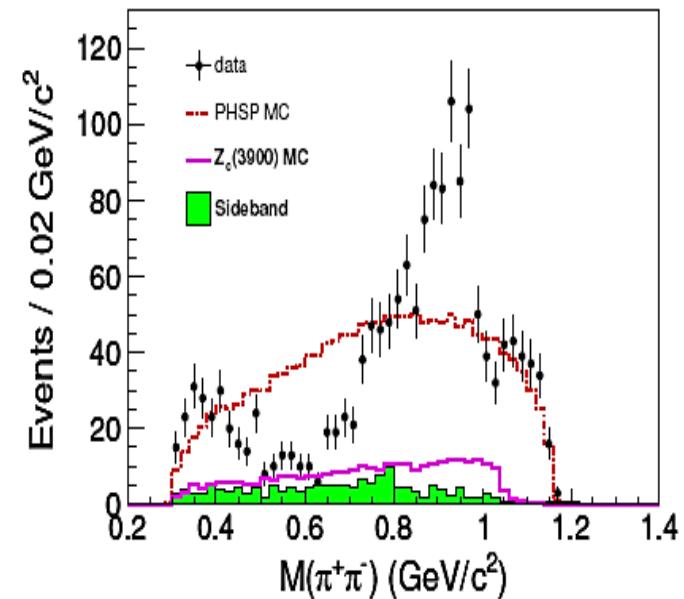
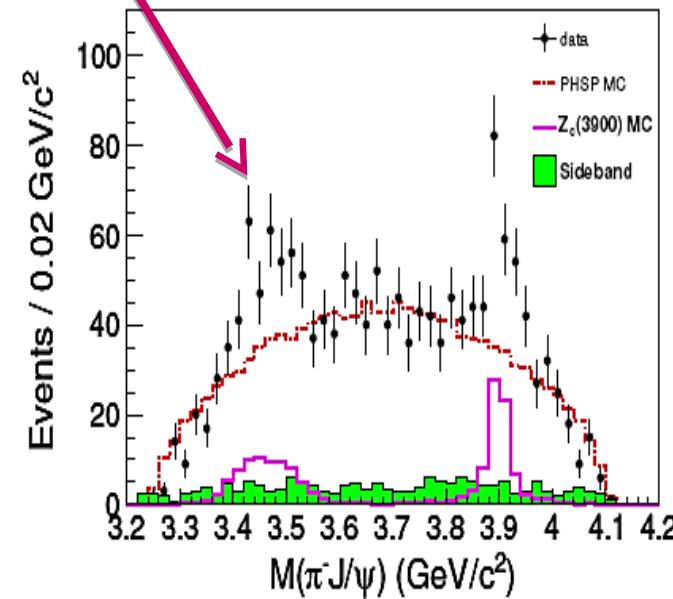
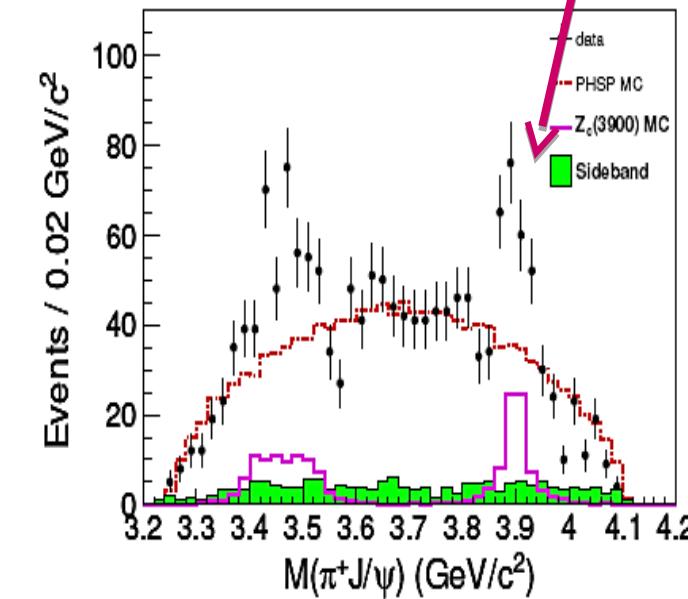
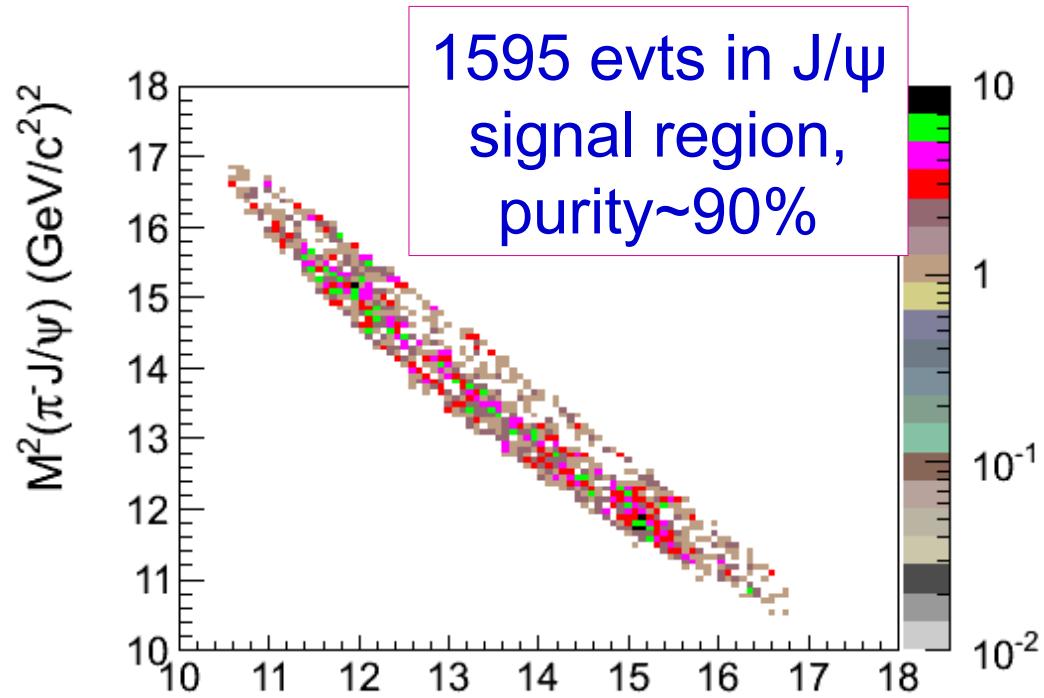
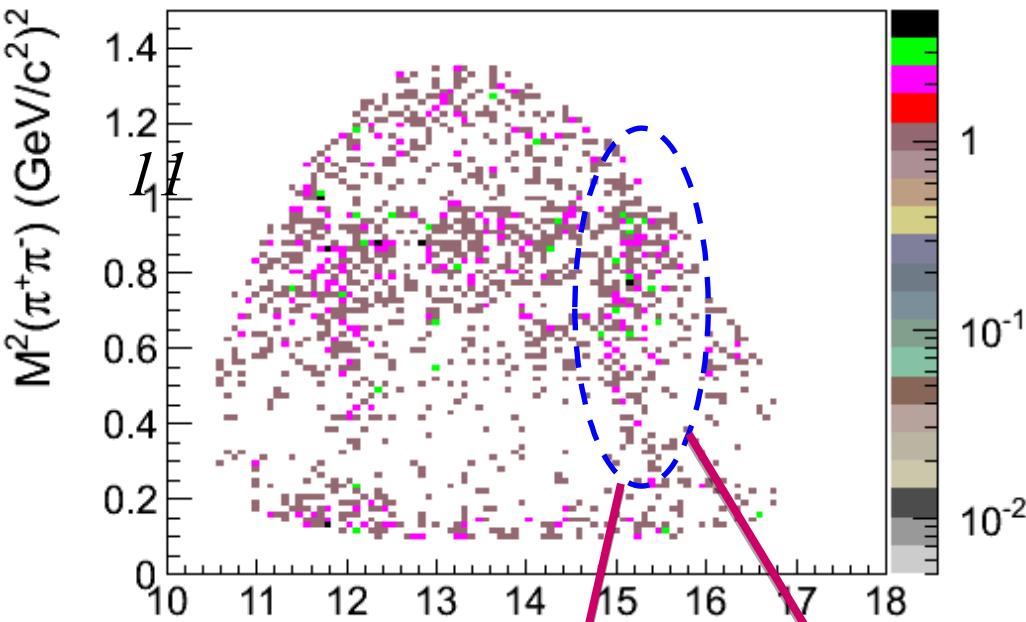
Z_c – заряженные чармоподобные мезоны

- › BES-3: $e^+ e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp$ (also check $\pi^0 Z_c^0$)
 $Z_c^\pm \rightarrow \pi^\pm (J/\Psi \text{ or } h_c \text{ or } \Psi' \text{ or } D^* D^{(*)})$
- › Хорошая сигнатура события:
 - распад на одно из известных состояний чармонания
 - имеет заряд $\Rightarrow \text{Nquark} \geq 4$

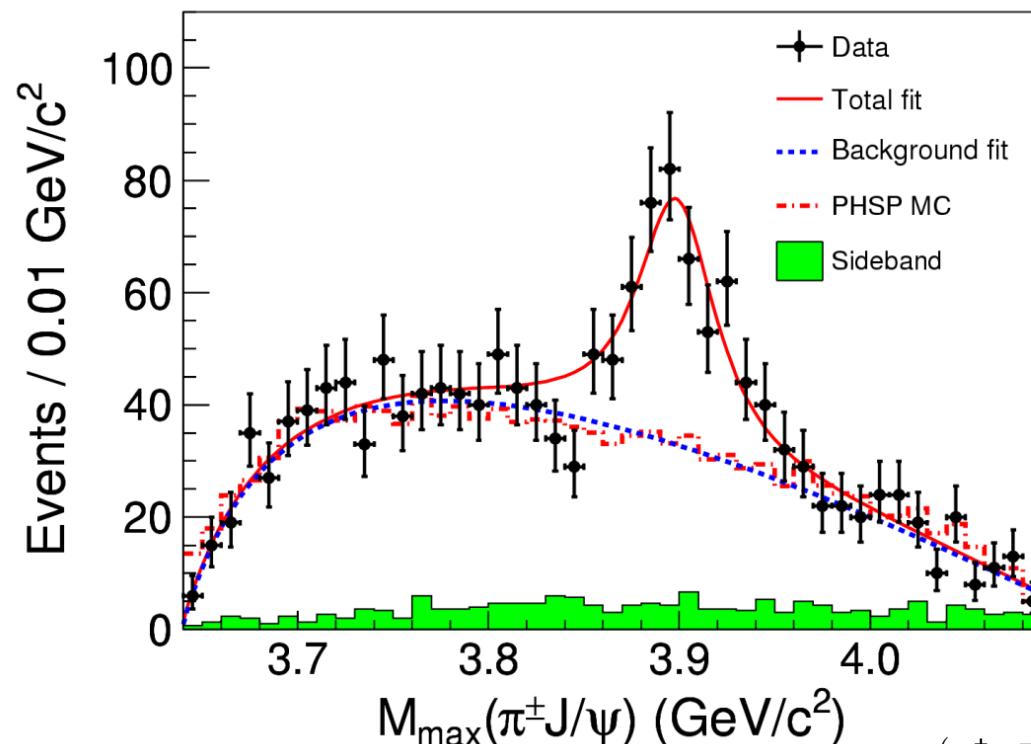


$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ @ Ecm=4.26 GeV

PRL 110, 252001 (2013)



$Z_c^\pm(3900)$: $e^+ e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp \rightarrow \pi^\pm \pi^- J/\Psi$ @ $E_{cm} = 4.26 \text{ GeV}$



PRL 110, 252001 (2013)

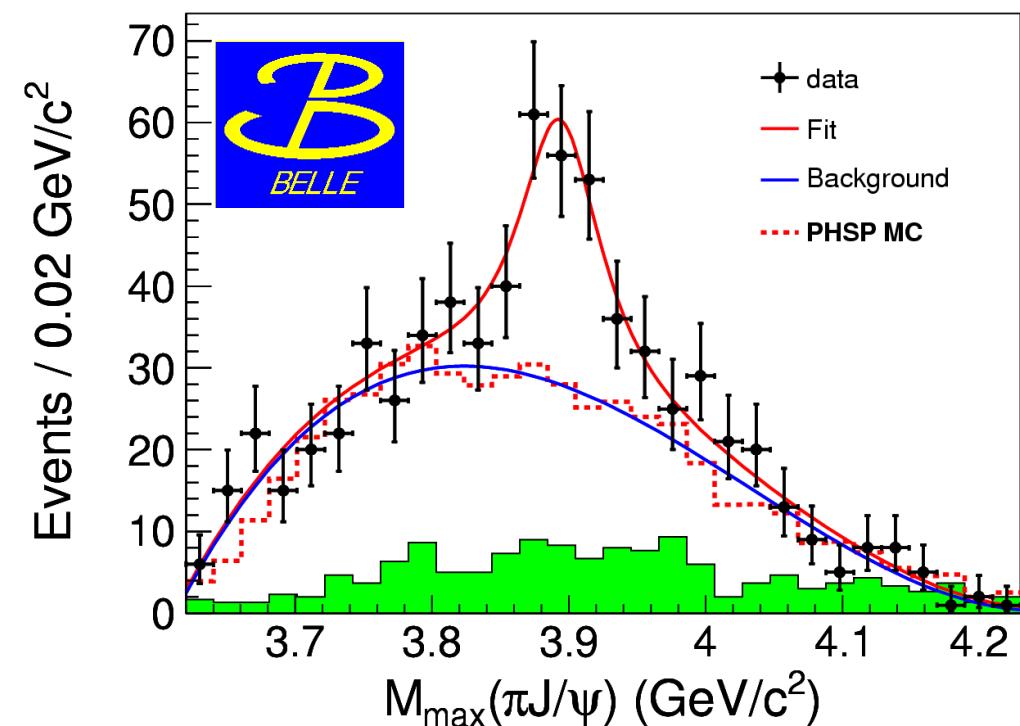
$M = 3899.0 \pm 3.6 \pm 4.9 \text{ MeV}$
 $\Gamma = 46 \pm 10 \pm 20 \text{ MeV}$
 $307 \pm 48 \text{ events}$
 Significance $> 8\sigma$

$$\frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp \rightarrow \pi^\pm \pi^- J/\Psi)}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\Psi)} = (21.5 \pm 3.3 \pm 7.5)\% \text{ @ } 4.26 \text{ GeV}$$

$$\sigma(e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\Psi) = 62.9 \pm 1.9 \pm 3.7 \text{ pb @ } 4.26 \text{ GeV}$$

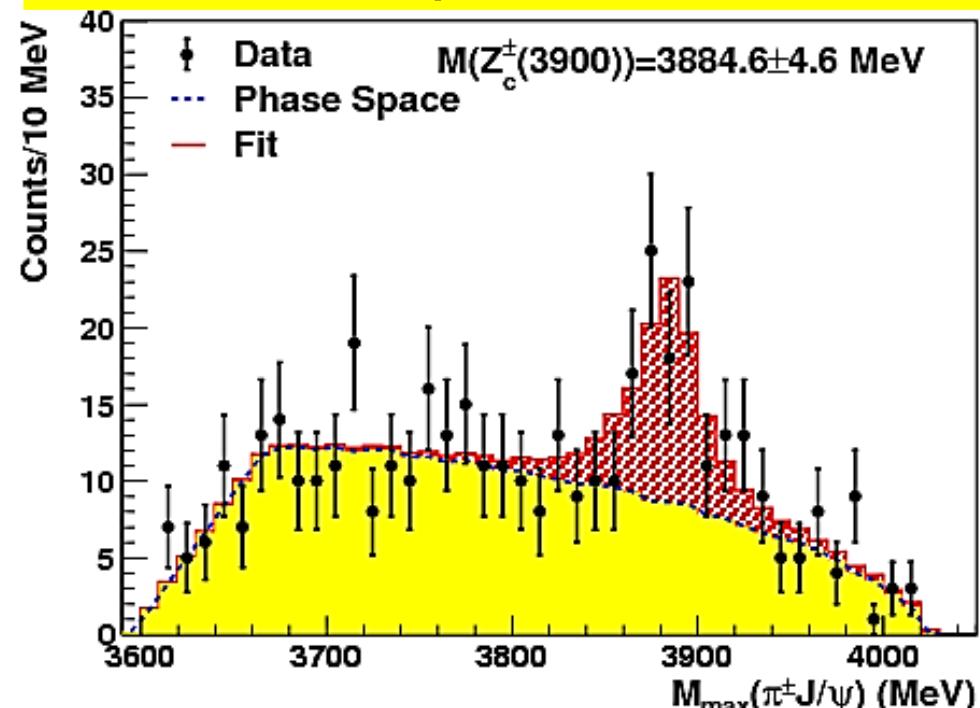
$Z_c^\pm(3900)$ – первое наблюденное состояние
подтвержденное другими экспериментами!

Belle: $e^+e^- \rightarrow \gamma(\text{ISR}) + \pi^+\pi^- J/\psi$
 Belle: PRL110, 252002



$M = 3894.5 \pm 6.6 \pm 4.5 \text{ MeV}$
 $\Gamma = 63 \pm 24 \pm 26 \text{ MeV}$
 $159 \pm 49 \text{ events}$
 $> 5.2\sigma$

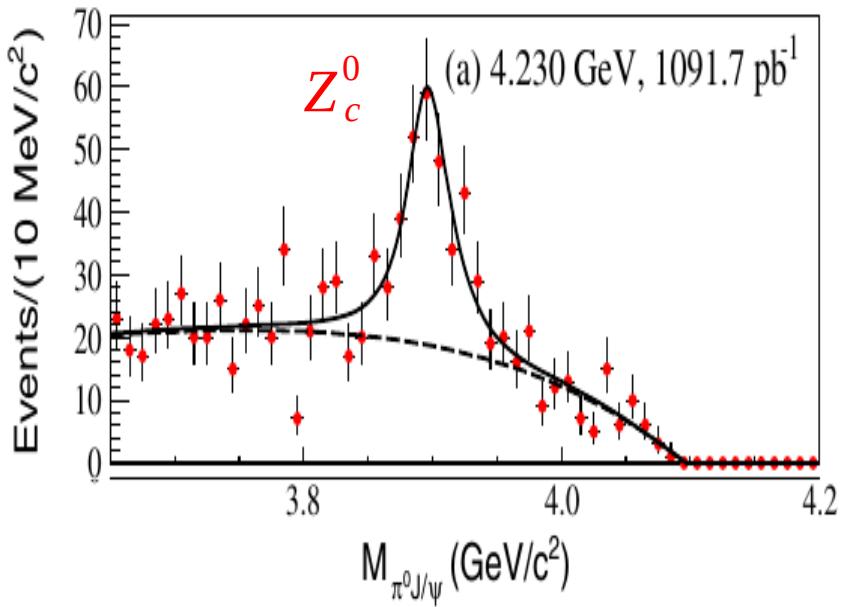
CLEOc: $e^+e^- \rightarrow \psi(4160) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ (PLB727,366)



$M = 3886 \pm 4 \pm 2 \text{ MeV}$
 $\Gamma = 37 \pm 4 \pm 8 \text{ MeV}$
 $81 \pm 16 \text{ events}$
 $> 5\sigma$

$Z_c^{\pm,0}(3900)$ – Isospin Triplet

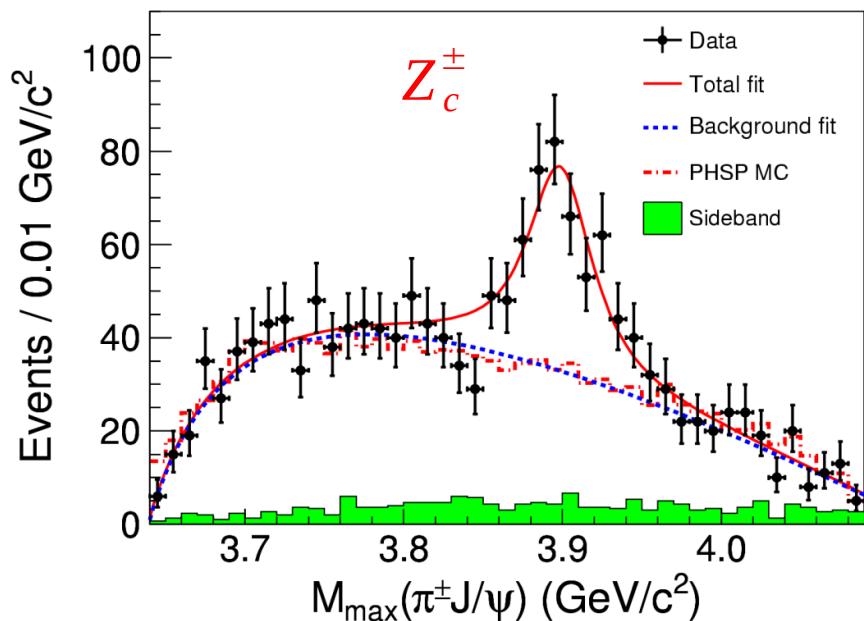
PRL 115, 112003 (2015)



$$M = 3894.8 \pm 2.3 \pm 3.2 \text{ MeV}$$

$$\Gamma = 29.6 \pm 8.2 \pm 8.2 \text{ MeV}$$

Significance > 10 σ



PRL 110, 252001 (2013)

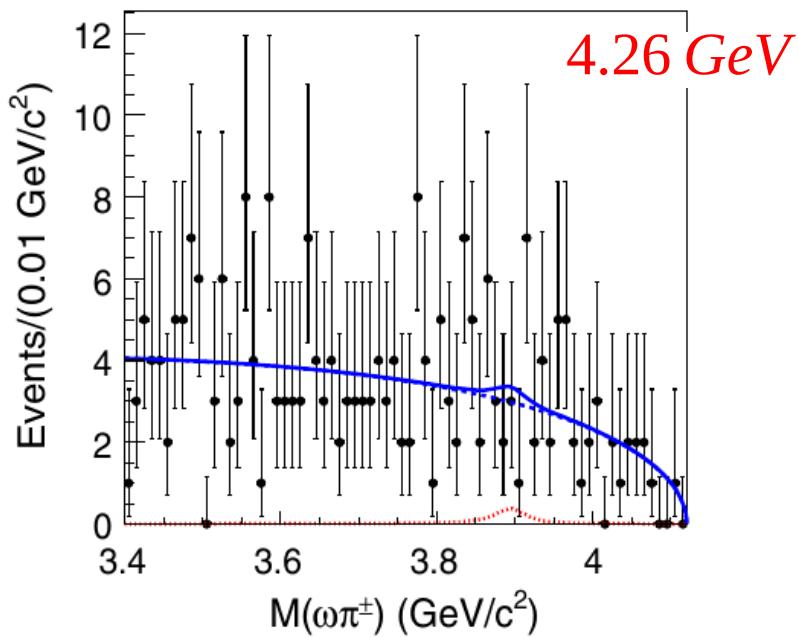
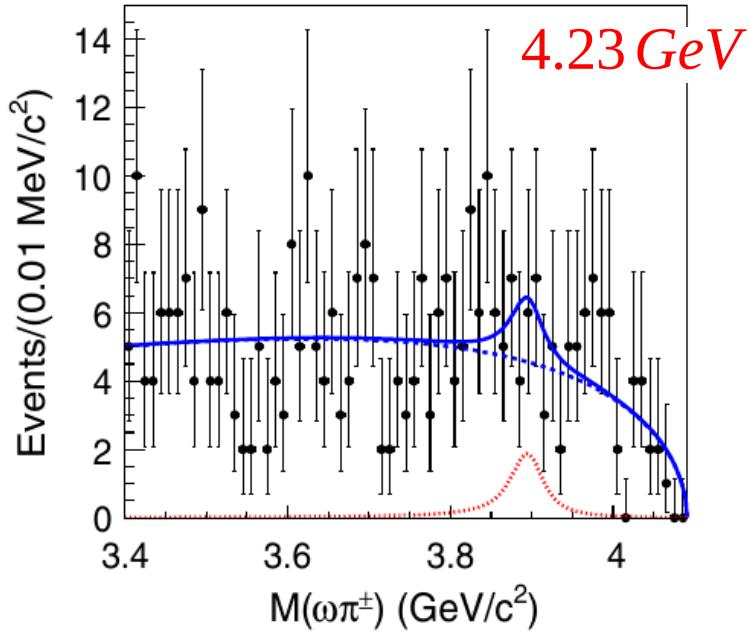


$$M = 3899.0 \pm 3.6 \pm 4.9 \text{ MeV}$$

$$\Gamma = 46 \pm 10 \pm 20 \text{ MeV}$$

Significance > 8 σ

Поиск $e^+ e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp(3900) \rightarrow \pi^\pm (\omega \pi^\mp)$



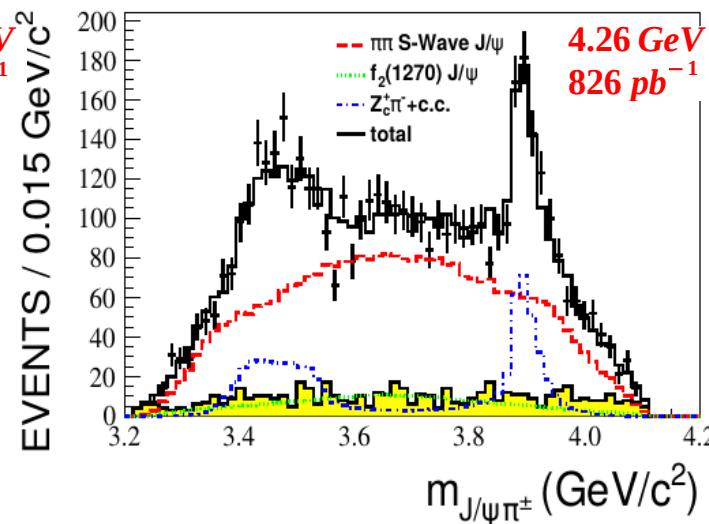
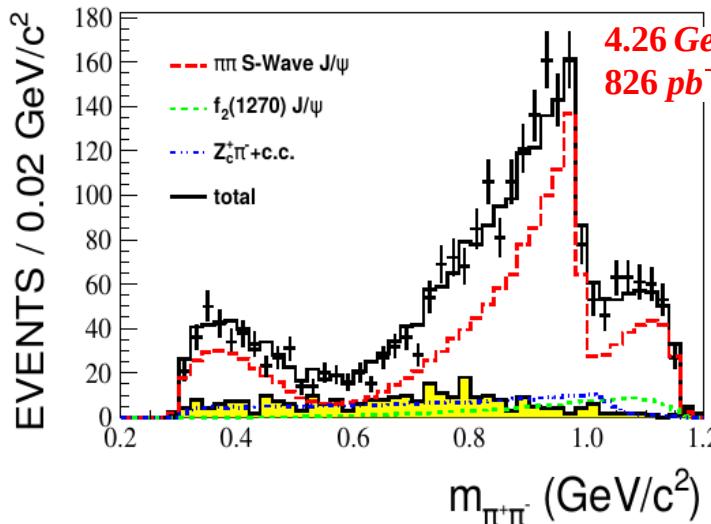
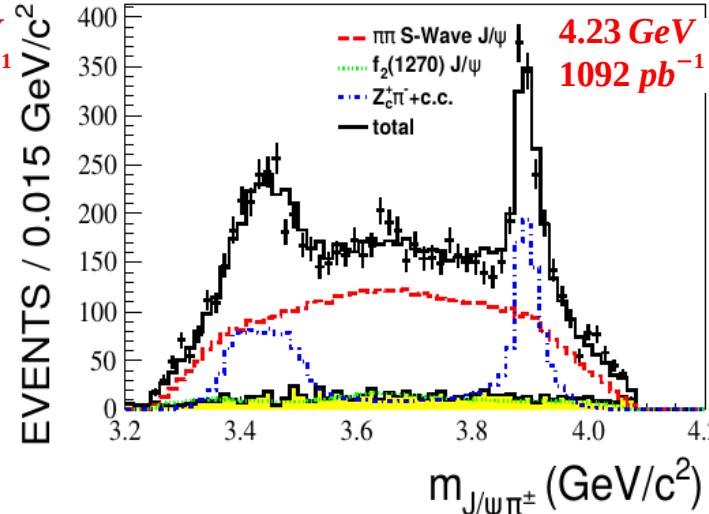
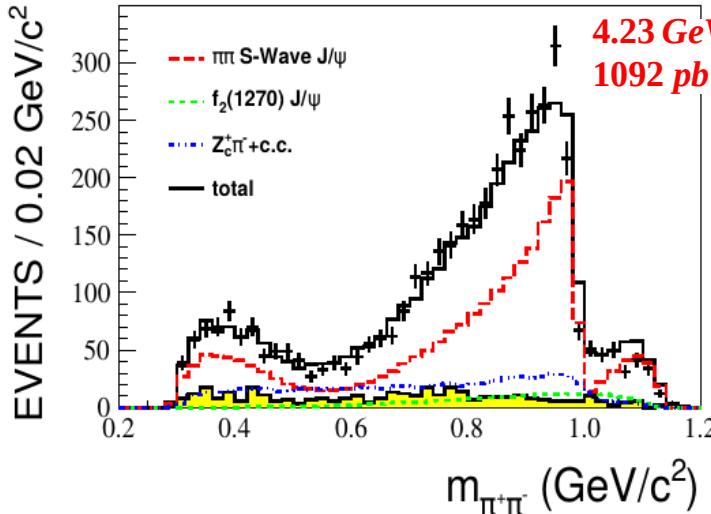
PR D92, 032009 (2015)

- Выполнен поиск распада $Z_c^\pm \rightarrow \omega \pi^\pm$
- Значимого сигнала нет
- Пределы (90% CL) на Борновское сечение $\sigma(e^+ e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp(3900) \rightarrow \pi^\pm \omega \pi^\mp)$
 - < 0.26 pb для $E_{cm} = 4.23 \text{ GeV}$
 - < 0.18 pb для $E_{cm} = 4.26 \text{ GeV}$

$Z_c^\pm(3900)$ Спин и четность

PRL 119, 072001 (2017)

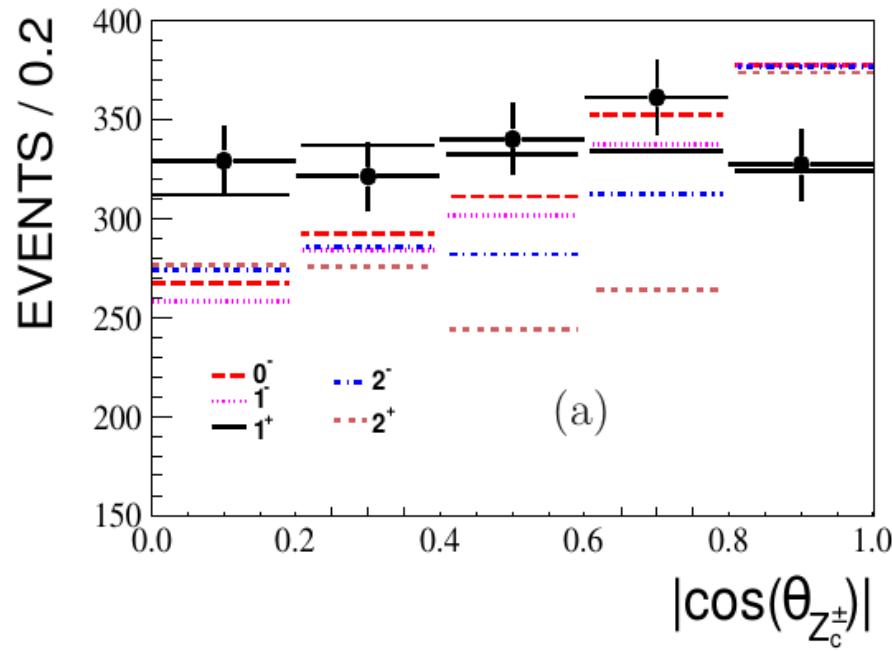
$$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\Psi$$



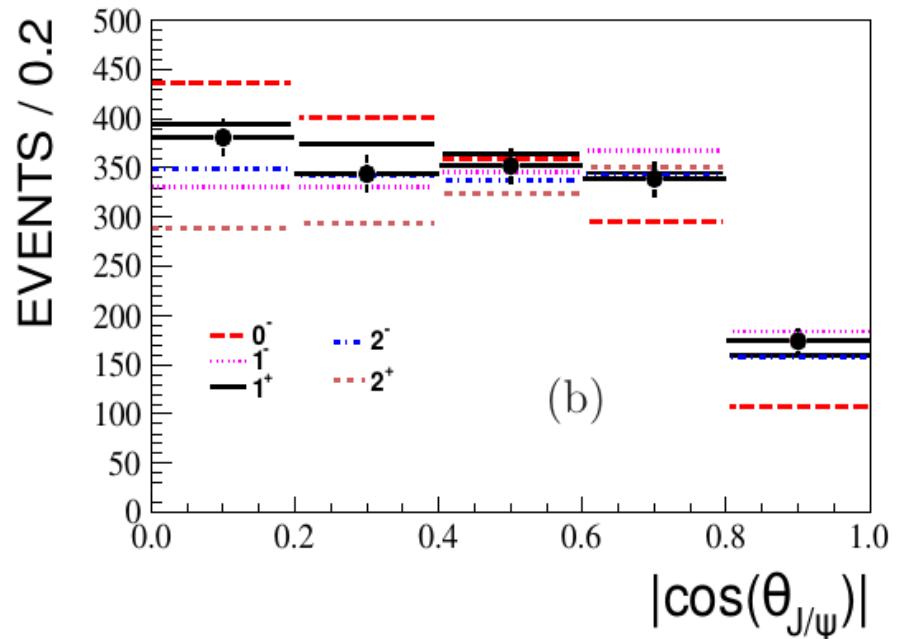
- PWA fit
- $\text{JP}=1^+$ preferred over $0^-, 1^-, 2^-, 2^+$ by at least 7σ
- Significant contr. of $\pi\pi$ S-wave:
 $\sigma, f_0(980), f_0(1370)$
- $N(Z_c) = 952.3 \pm 39.3$ (stat.) @ 4.23 GeV
- $N(Z_c) = 343.3 \pm 23.3$ (stat.) @ 4.26 GeV

$Z_c^\pm(3900)$ Спин и четность

PRL 119, 072001 (2017)



(a)



(b)

- Угловые распределения для разных J^p
- $M_{\pi^\pm J/\psi} \in (3.86; 3.92) \text{ GeV}$
- Данные согласуются с $J^p = 1^+$

$Z_c^\pm(3900)$ Параметры из PWA

PRL 119, 072001 (2017)

- ✓ Flatte формула для параметризации Z_c :

$$BW(s) = \frac{1}{s - M^2 + i[\tilde{g}_1 \rho_{\pi J/\Psi}(s) + \tilde{g}_2 \rho_{D^* D}(s)]}$$

$$M(Z_c) = 3901.5 \pm 2.7 \pm 38.0 \text{ MeV}$$

$$g'_1 = 0.075 \pm 0.006 \pm 0.025 \text{ GeV}^2$$

$$g'_2/g'_1 = 27.1 \pm 2.0 \pm 1.9$$

$$M_{\text{pole}} = 3881.2 \pm 4.2 \pm 52.7 \text{ MeV}$$

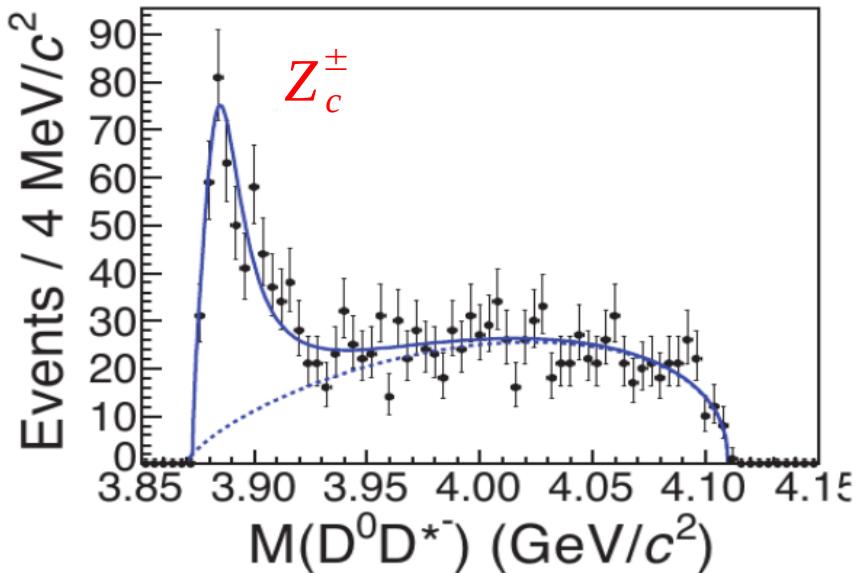
$$\Gamma_{\text{pole}} = 51.8 \pm 4.6 \pm 36.0 \text{ MeV}$$

- ✓ Борновское сечение

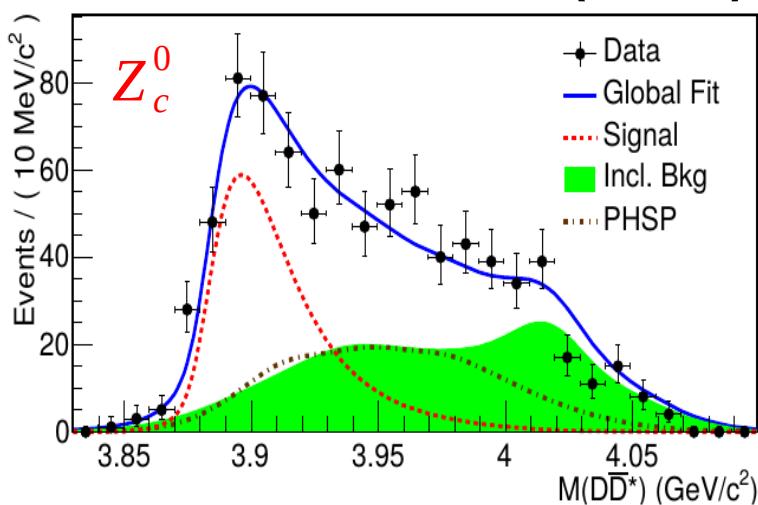
Ecm	$\sigma(e^+ e^- \rightarrow \pi^+ Z_c^- + \text{c.c.})$
4.23 GeV	$21.8 \pm 1.0 \pm 4.4 \text{ pb}$
4.26 GeV	$11.0 \pm 1.2 \pm 5.4 \text{ pb}$

$Z_c^{\pm,0}(3885)$ in $e^+ e^- \rightarrow \pi(D\bar{D}^*)$

PRL 112, 022001 (2014)



PRL 115, 222002 (2015)



$e^+ e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp(3885) \rightarrow \pi^\pm (D\bar{D}^*)^\mp$

$M = 3883.9 \pm 1.5 \pm 4.2 \text{ MeV}$

$\Gamma = 24.8 \pm 3.3 \pm 11.0 \text{ MeV}$

порог $M(D\bar{D}^*) \sim 3875 \text{ MeV}$

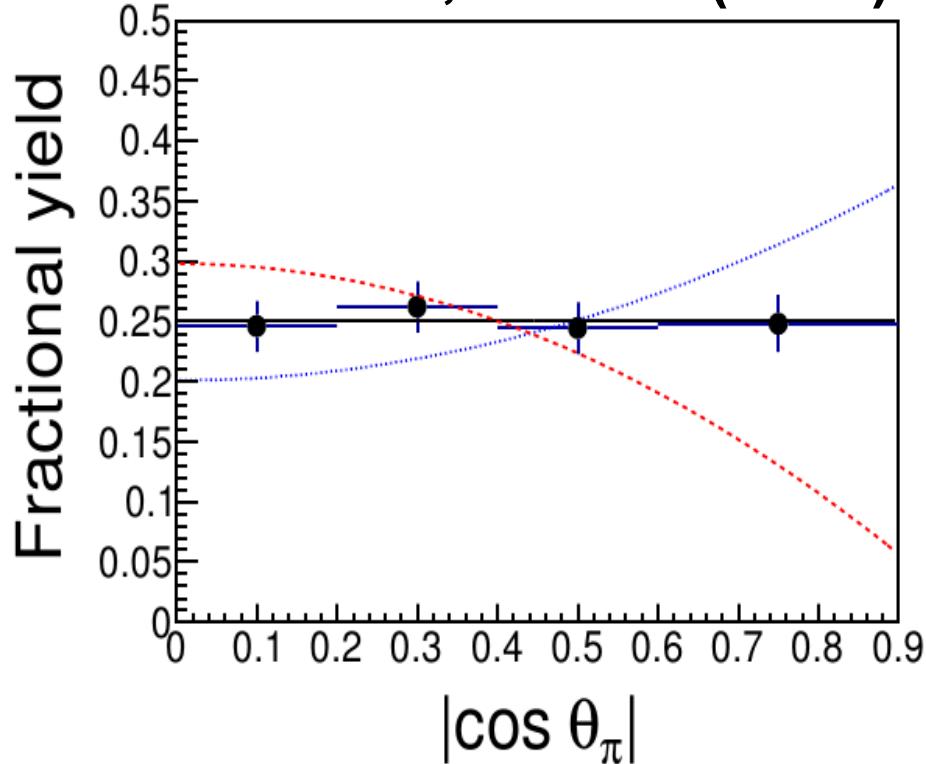
$e^+ e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^0(3885) \rightarrow \pi^0 (D\bar{D}^*)^0$

$M = 3885.7^{+4.3}_{-5.7} \pm 8.4 \text{ MeV}$

$\Gamma = 35^{+11}_{-12} \pm 15 \text{ MeV}$

Zc(3885) Спин и четность

PRL 112, 022001 (2014)



$\cos(\theta_\pi)$ – angle of bachelor π^+
in the CMS

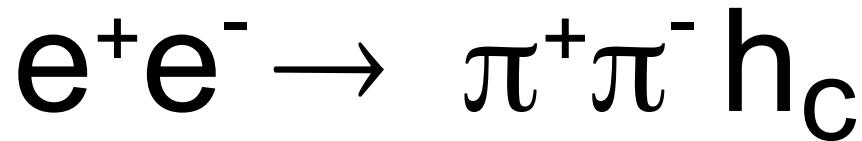
$J^P=0^-$, $dN/d \cos(\theta_\pi) \sim 1 - \cos^2(\theta_\pi)$

$J^P=1^-$, $dN/d \cos(\theta_\pi) \sim 1 + \cos^2(\theta_\pi)$

$J^P=1^+$, $dN/d \cos(\theta_\pi) \sim \text{flat}$

$J^P=0^+$, parity conservation

- If Zc(3885) is Zc(3900):
$$\frac{\Gamma(Z_c(3900) \rightarrow D \bar{D}^*)}{\Gamma(Z_c(3900) \rightarrow \pi J/\psi)} = 6.2 \pm 1.1 \pm 2.7$$



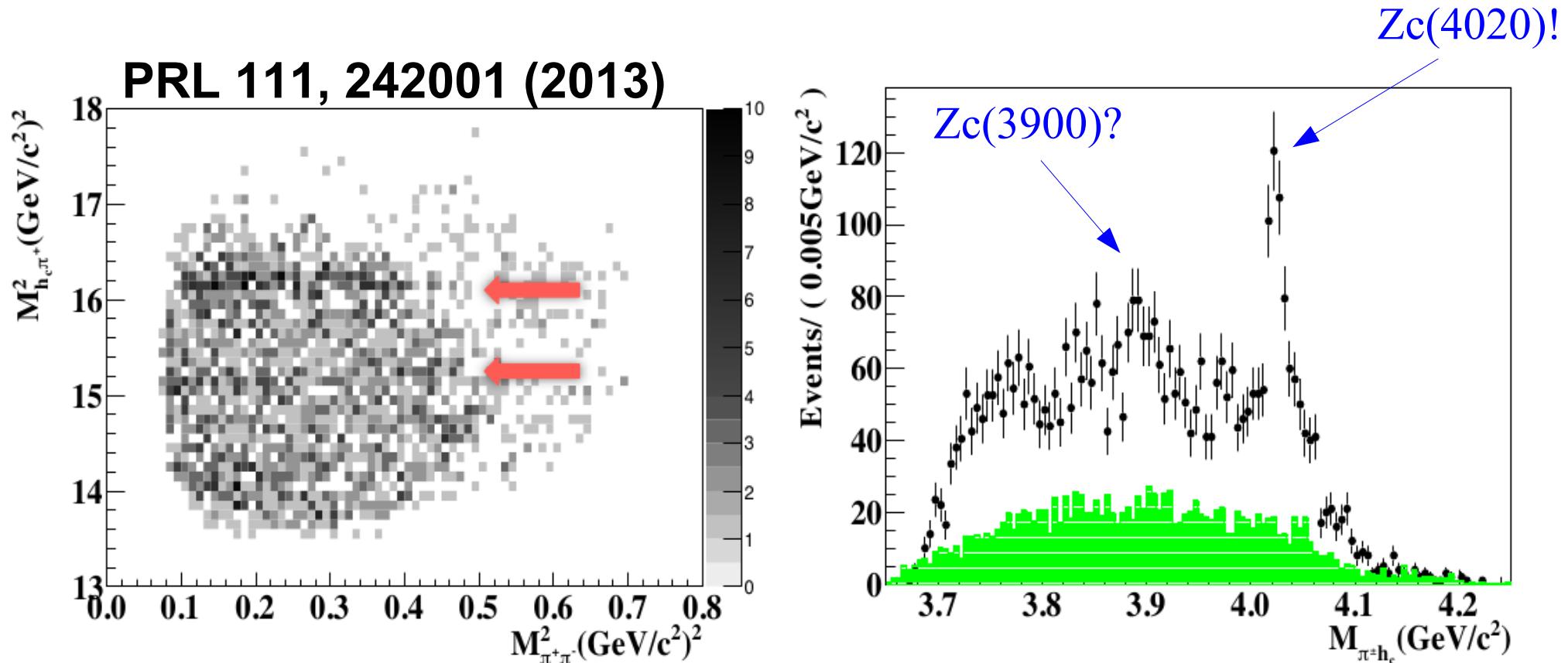
PRL 111, 242001 (2013)

- Data: 13 energy points in [3.90; 4.42] GeV; Lum = 827 pb⁻¹
- $h_c \rightarrow \gamma \eta_c$ (~50% all decays of h_c);
 $\eta_c \rightarrow p \bar{p}$, $2(\pi^+ \pi^-)$, $2(K^+ K^-)$, $K^+ K^- \pi^+ \pi^- \dots$
16 exclusive decay modes

**One of the most precise measurements
parameters of η_c BES-III: PRL 108, 222002 (2012)**

$$M(\eta_c) = 2984.3 \pm 0.6 \pm 0.6 \text{ MeV}$$
$$\Gamma(\eta_c) = 32.0 \pm 1.2 \pm 1.0 \text{ MeV}$$

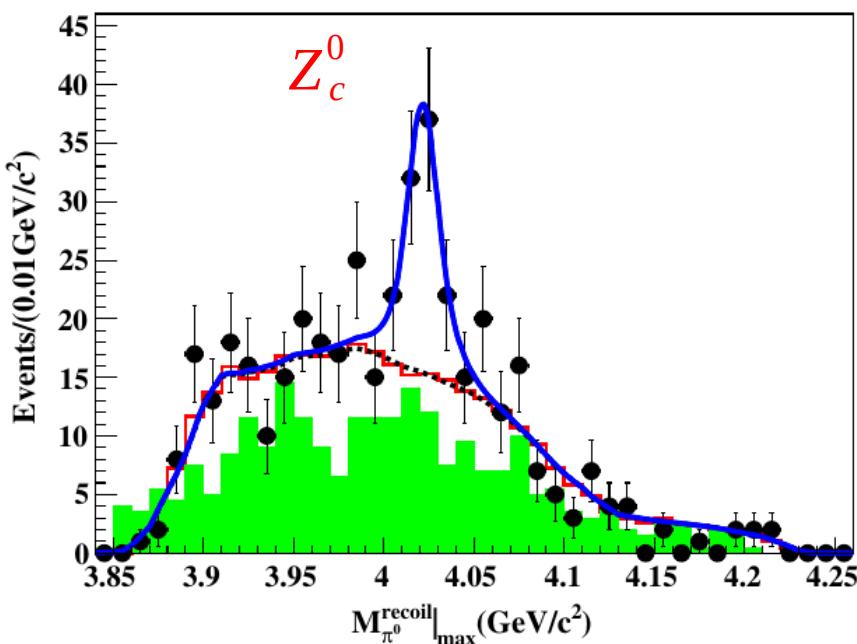
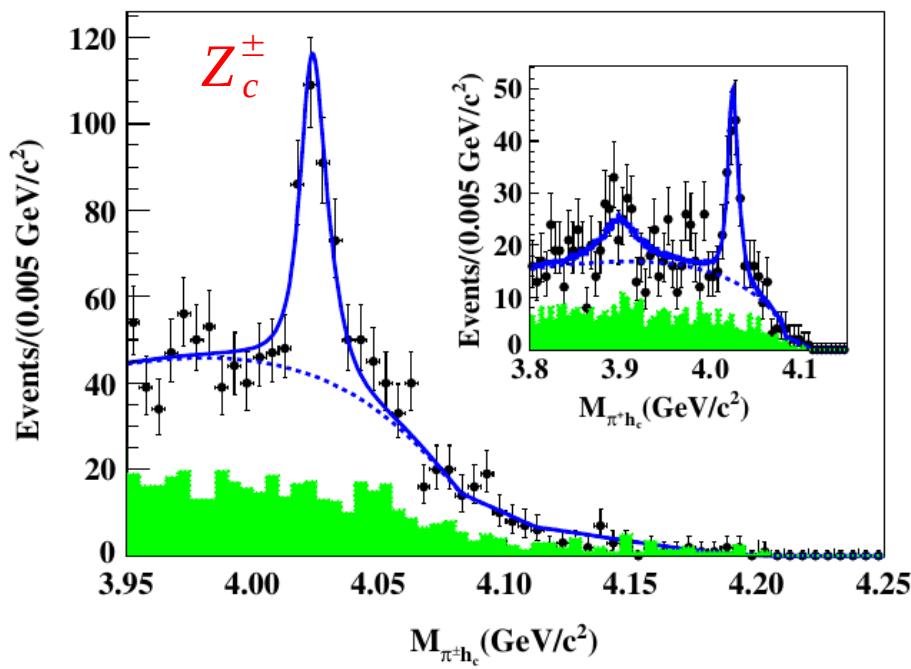
$Z_c^\pm(4020)$ in $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$



- Видна структура в районе 4.02 GeV
- «Намек» на $Z_c(3900)$
- Одновременный фит 4.23/4.26/4.36 GeV наборов данных

$Z_c^{\pm,0}(4020)$ in $e^+e^- \rightarrow \pi\pi h_c$

PRL 111, 242001 (2013)



$e^+e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp(4020) \rightarrow \pi^\pm \pi^\mp h_c$

$M = 4022.9 \pm 0.8 \pm 2.7 \text{ MeV}$

$\Gamma = 7.9 \pm 2.7 \pm 2.6 \text{ MeV}$

Significance $> 8.9 \sigma$

no significant $Z_c(3900)$ (2.1σ)

$\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp(3900) \rightarrow \pi\pi h_c) < 11 \text{ pb}$
(90% CL) @ 4.26 GeV

PRL 113, 212002 (2014)

$e^+e^- \rightarrow \pi^0 Z_c^0(4020) \rightarrow \pi^0 \pi^0 h_c$

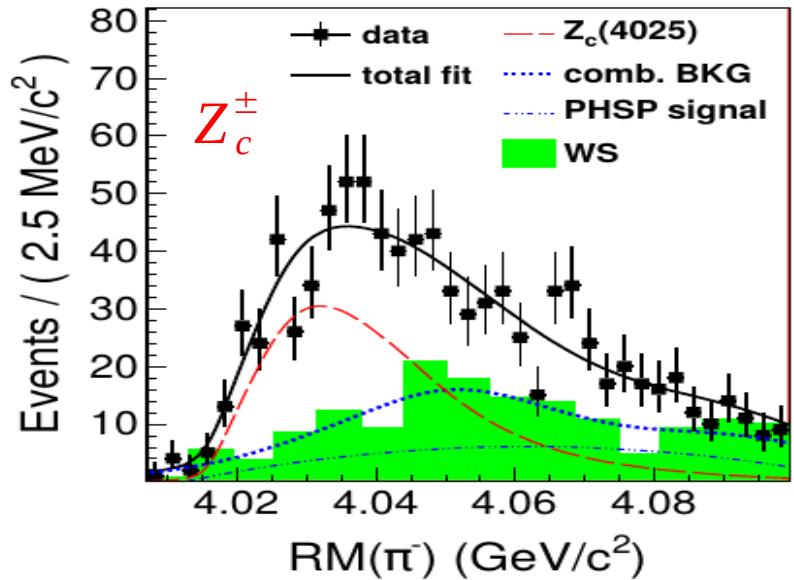
$M = 4023.8 \pm 2.2 \pm 3.8 \text{ MeV}$

Γ – fixed to charged $Z_c(4020)^\pm$

Significance $> 5 \sigma$

$Z_c^{\pm,0}(4025)$ in $e^+e^- \rightarrow \pi(D^*\bar{D}^*)$

PRL 112, 132001 (2014)



$e^+e^- \rightarrow \pi^\pm Z_c^\mp(4025) \rightarrow \pi^\pm (D^* \bar{D}^*)^\mp$

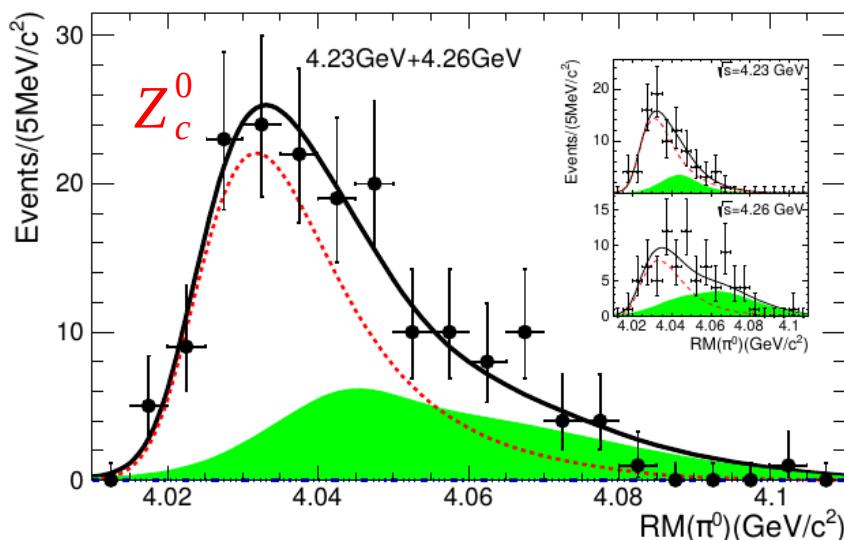
$M = 4026.3 \pm 2.6 \pm 3.7 \text{ MeV}$

$\Gamma = 24.8 \pm 5.6 \pm 7.7 \text{ MeV}$

Significance $> 10 \sigma$

порог $M(D^* \bar{D}^*) \sim 4017 \text{ MeV}$

PRL 115, 182002 (2015)



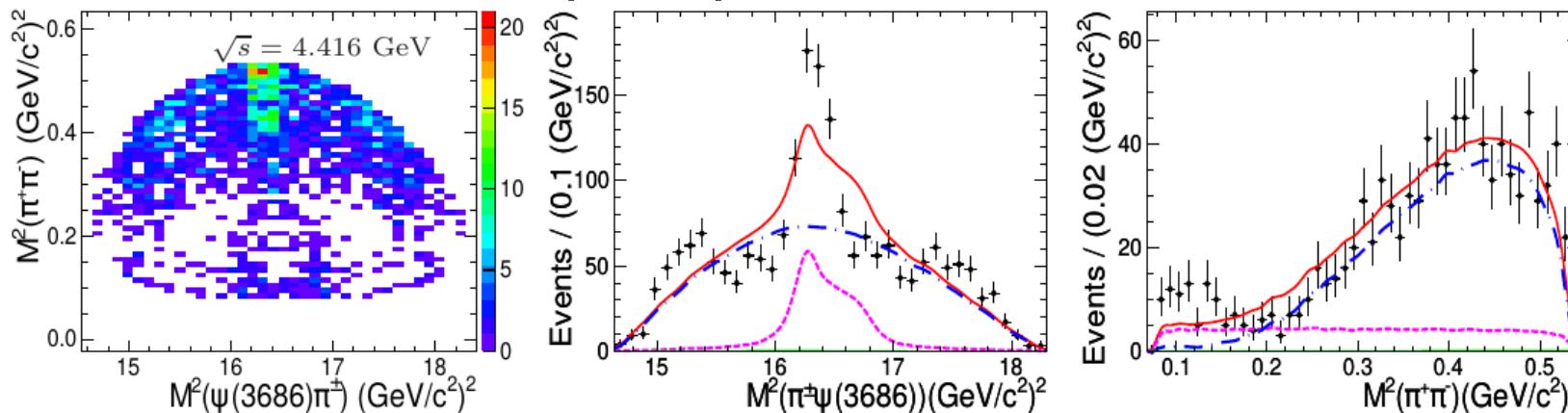
$e^+e^- \rightarrow \pi^0 Z_c^0(4025) \rightarrow \pi^0 (D^* \bar{D}^*)^0$

$M = 4025.5^{+2.0}_{-4.7} \pm 3.1 \text{ MeV}$

$\Gamma = 23.0 \pm 6.0 \pm 1.0 \text{ MeV}$

Поиск Z_c^\pm в $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \Psi'$

PR D96, 032004 (2017)



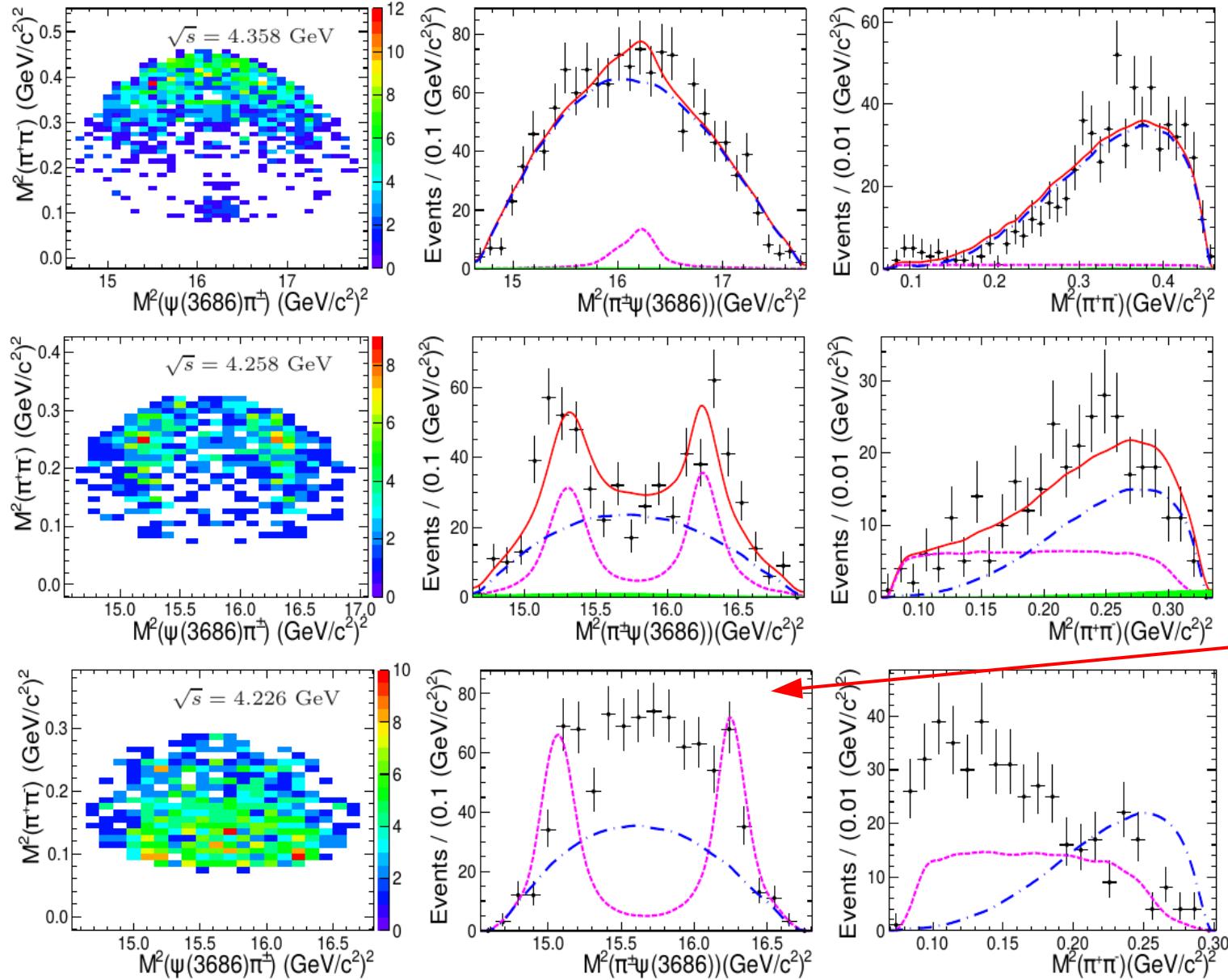
Stat.Err.Only!

$\leftrightarrow 4.416 \text{ GeV}$
 1074 pb^{-1}

- ✓ $\Psi(3686)$ реконструировался в двух модах:
 1. $\Psi(3686) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\Psi$
 2. $\Psi(3686) \rightarrow \text{neutrals } J/\Psi$
- ✓ Наблюдается пик в инвариантной массе $M(\pi\Psi(3686))$ для энергии 4.416 GeV
- ✓ Выполнен фит диаграммы Далица $M^2(\pi^+ \Psi(3686))$ vs $M^2(\pi^- \Psi(3686))$ без учета интерференции с промежуточными состояниями
- ✓ Получены значения:
 $M = 4032.1 \pm 2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\Gamma = 26.1 \pm 5.3 \text{ MeV}$ (significance $> 9 \sigma$)
- ✓ Однако фит плохо описывает данные!

Фит Z_c^\pm в $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \Psi'$ для других энергий

PR D96, 032004 (2017)



$\leftrightarrow 4.358$ GeV
 $540 pb^{-1}$

$\leftrightarrow 4.258$ GeV
 $826 pb^{-1}$

no structure!

$\leftrightarrow 4.226$ GeV
 $1092 pb^{-1}$

Всё вместе об Zc

Zc	Decay	Mass (MeV/c ²)	Width (Mev)	J ^p
Z _c ⁺ (3900)	$\pi^+ J/\Psi$	3899.0±3.6±4.9	46±10±20	1 ⁺
Z _c ⁰ (3900)	$\pi^0 J/\Psi$	3894.8±2.3±3.2	29.6±8.2±8.2	
Z _c ⁺ (3885)	(DD*) ⁺	3883.9±1.5±4.2	24.8±3.3±11.0	1 ⁺
Z _c ⁰ (3885)	(DD*) ⁰	3885.7 ^{+4.3} _{-5.7} ±8.4	35 ⁺¹¹ ₋₁₂ ± 15	
Z _c ⁺ (4020)	$\pi^+ h_c$	4022.9±0.8±2.7	7.9±2.7±2.6	
Z _c ⁰ (4020)	$\pi^0 h_c$	4023.8±2.2±3.8		
Z _c ⁺ (4025)	(D*D*) ⁺	4026.3±2.6±3.7	24.8±5.6±7.7	
Z _c ⁰ (4025)	(D*D*) ⁰	4025.5 ^{+2.0} _{-4.7} ±3.1	23.0±6.0±1.0	

- Zc(3900) и Zc(3885) одно состояние? (Zc(4020) и Zc(4025)?)
- Zc в $\pi\Psi(3686)$ системе?

Перспективы

- Поиск других мод распада: $Zc \rightarrow \rho^\pm \eta_c \dots$
- Более детальное исследование $Zc \rightarrow \pi^\pm \psi'$
- Сечение $\sigma(\pi Zc)$ в зависимости от энергии
- PWA для $Zc^0(3900)$ и $Zc(4020)$

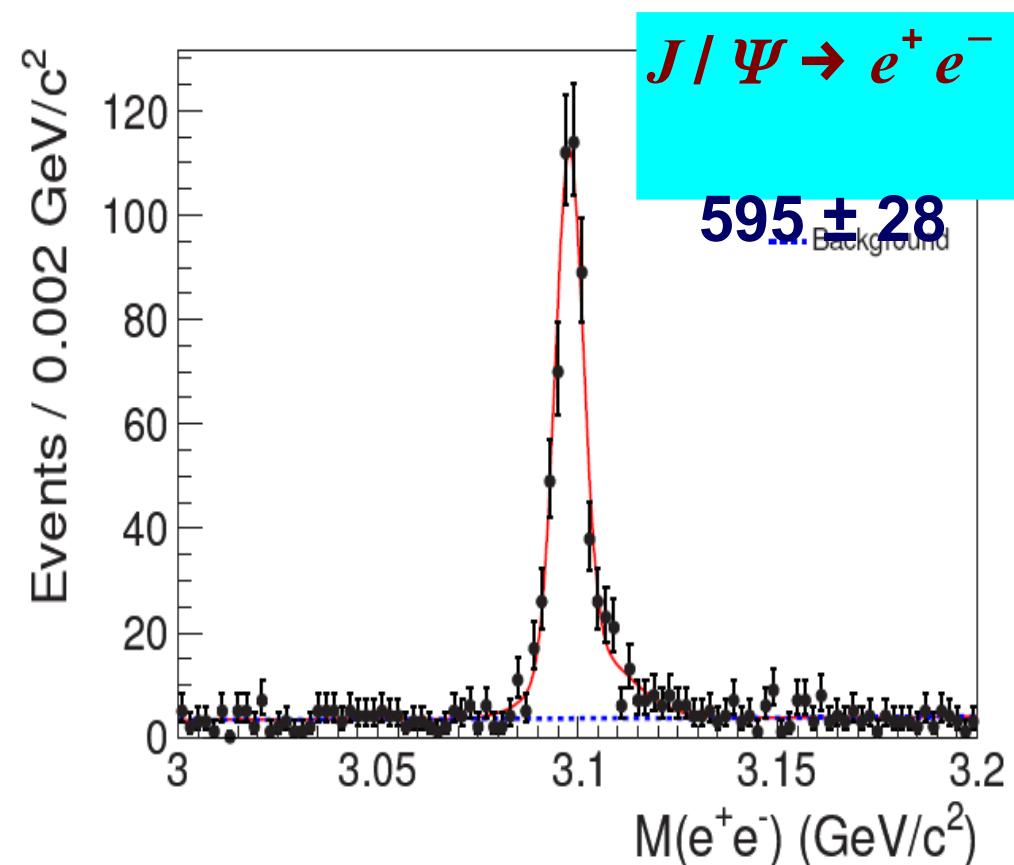
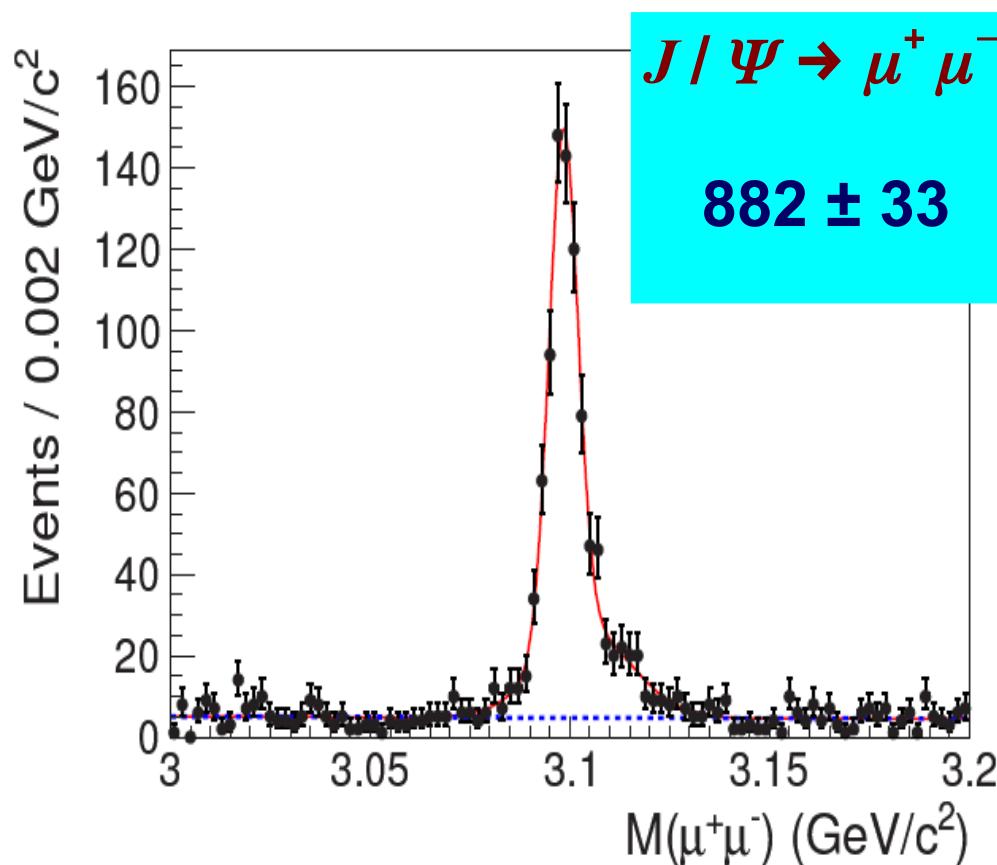
Заключение

- **BES-III успешно набирает данные с 2009:**
 - Данные по J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$ самые большие в мире.
 - Набрана уникальная статистика для изучения XYZ-состояний
- Прогресс в изучении заряженных чармомий-подобных состояний:
 - Наблюдаются два изоспиновых триплета – $Zc(3900)$ и $Zc(4020)$
 - Определено, что для $Zc(3900)$ $J^P=1^+$
 - Обнаружена новая Zc структура в $\pi^\pm \psi'$
- Природа XYZ-состояний все еще не ясна, нужны новые экспериментальные данные и новые идеи
- В ближайшее время ожидайте новых данных и новых результатов в эксперименте BES-III

Backup

$$e^+e^- \rightarrow Y(4260) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$$

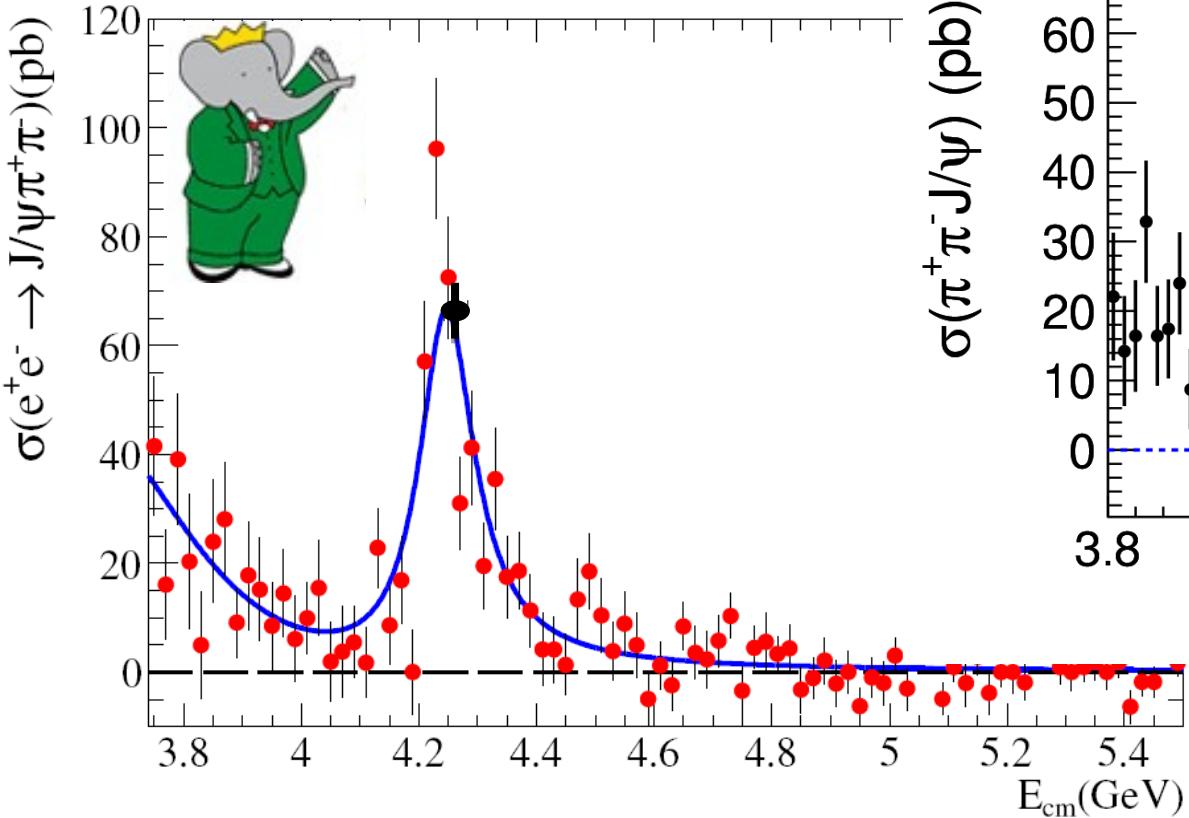
BES-III: PRL 110, 252001



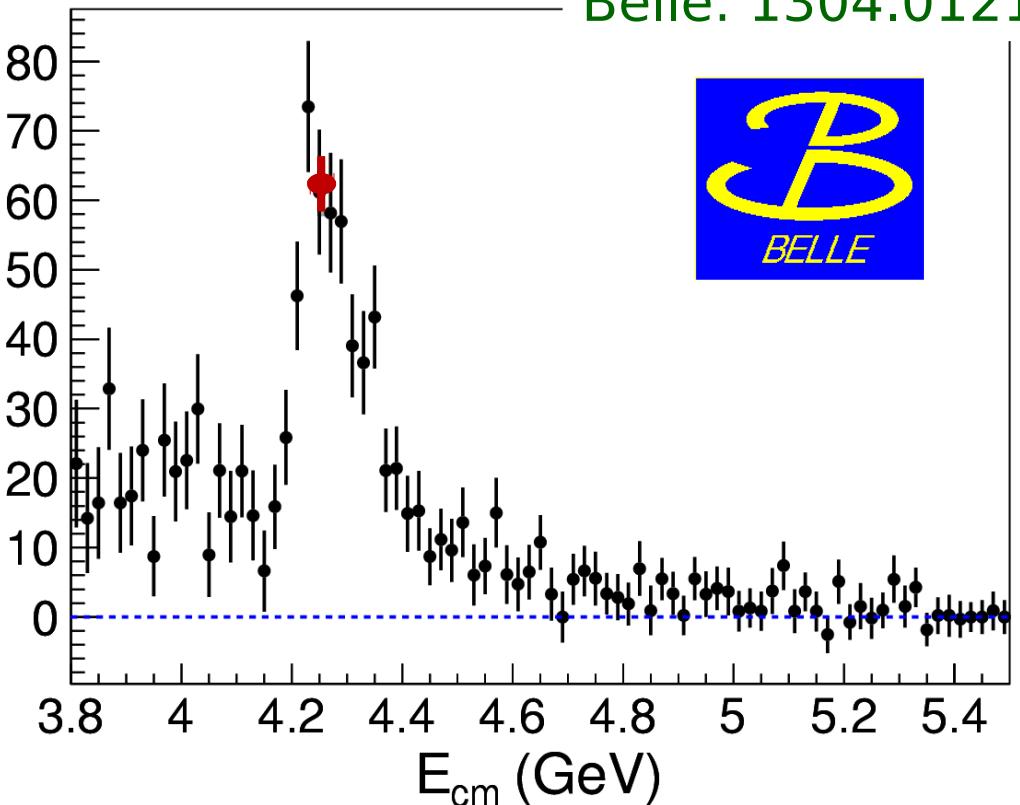
- Lum = 525 pb^{-1}
- J/ψ clearly identified in dilepton decay modes

Сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

BaBar: PRD86, 051102 (2012)



Belle: 1304.0121

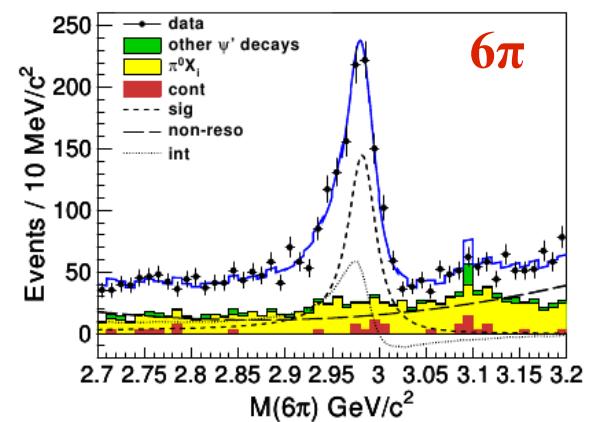
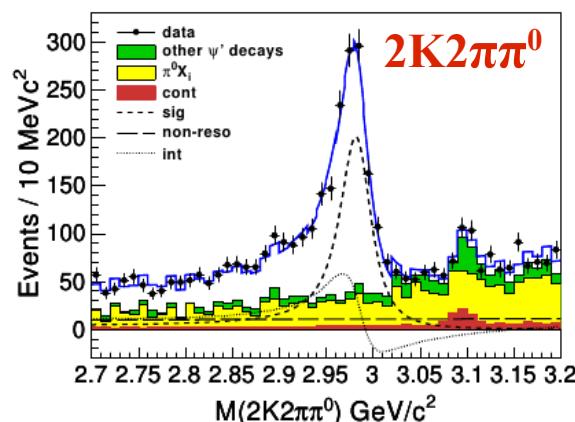
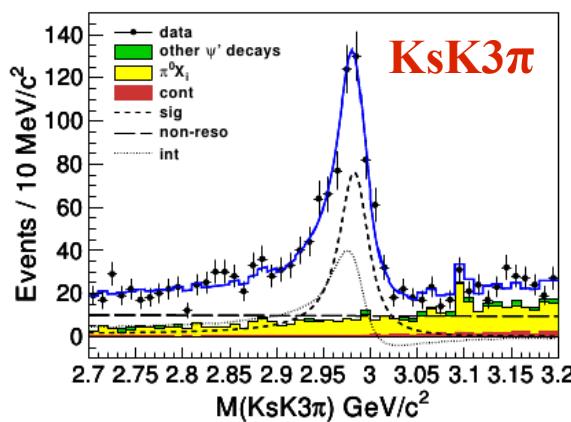
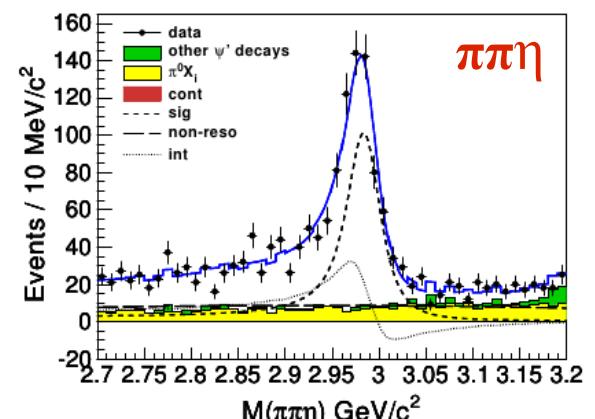
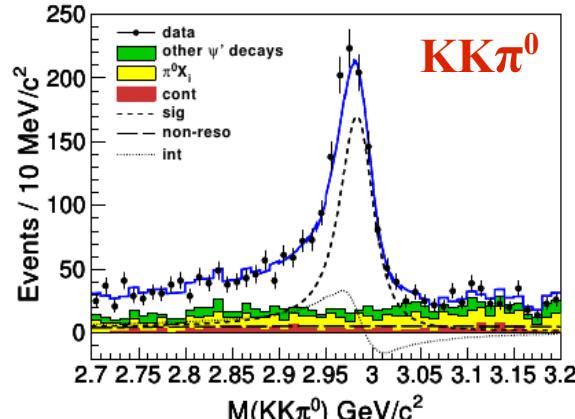
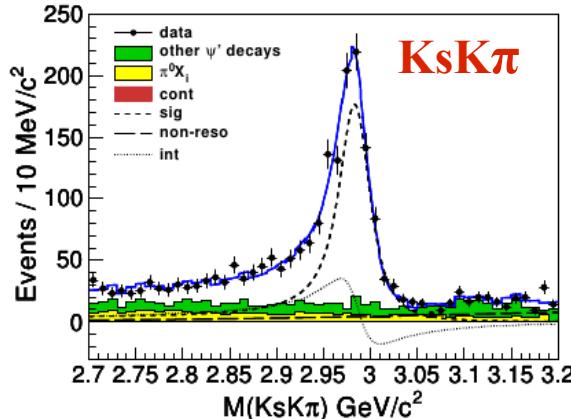


BES-3: PRL110, 252001: $\sigma(e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi) = 62.9 \pm 1.9 \pm 3.7$ pb

- Сечение согласуется с BaBar, Belle и CLEO-c!
- Лучшая точность!

η_c resonance parameters from $\psi' \rightarrow \gamma \eta_c$

PRL 108, 222002 (2012)



Simultaneous fit of shown η_c decay modes.

- η_c line shape: **interference with non- η_c decays**
- phases for different modes are consistent within 3σ , a common phase is used

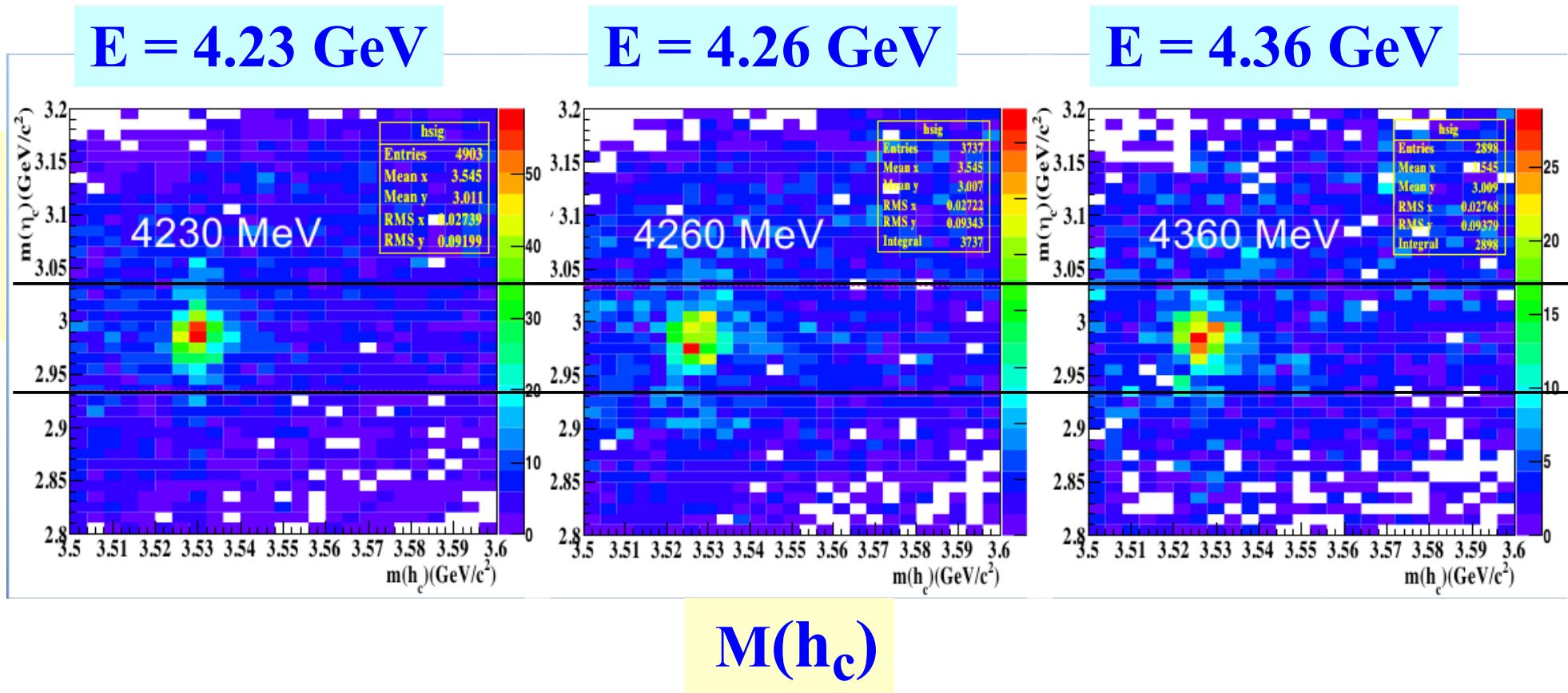
BES-III result:

$$\mathbf{M}(\eta_c) = 2984.3 \pm 0.6 \pm 0.6 \text{ MeV}$$

$$\mathbf{\Gamma}(\eta_c) = 32.0 \pm 1.2 \pm 1.0 \text{ MeV}$$

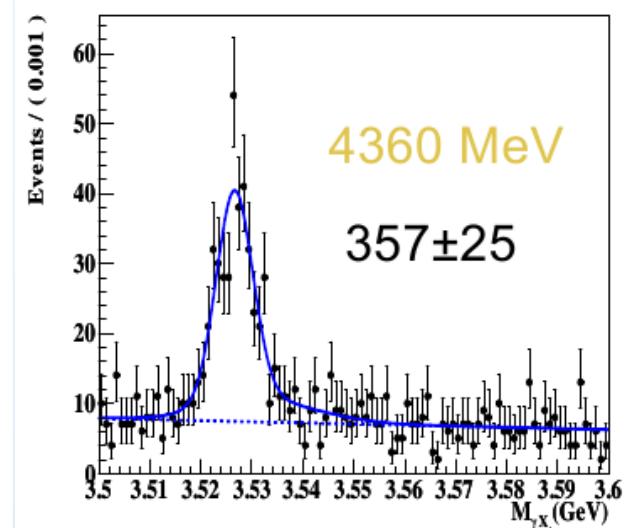
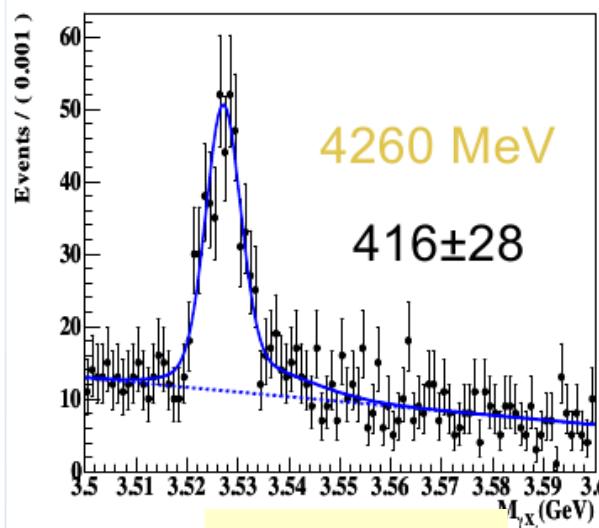
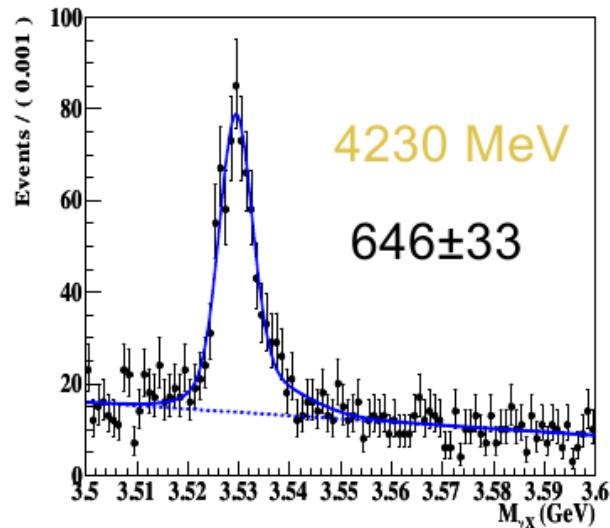
Currently the most precise measurements!

h_c и η_c в данных



- Показано окно: ~ 50 MeV вокруг табличного значения $M(\eta_c)$
- Эффективность $\sim 85\%$ (MC)

Сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- h_c$



$M(\gamma\eta_c)$

$E = 4.23 \text{ GeV}$

$N = 646 \pm 33$

$\text{Lum} = 1090/\text{pb}$

$[\text{pb}] = 50.2 \pm 2.7 \pm 4.6 \pm 7.9$

$E = 4.26 \text{ GeV}$

416 ± 28

826.8

$41.0 \pm 2.8 \pm 3.7 \pm 6.4$

$E = 4.36 \text{ GeV}$

357 ± 25

544.5

$52.3 \pm 3.7 \pm 4.8 \pm 8.$

2