

Изучение Λ_c^+ бариона на B и $ст$ фабриках

Н.И. Габышев
ИЯФ, Новосибирск

Совещание по Супер $ст$ Фабрике
18-19 декабря, 2017

- Физика Λ_c^+
- Обзор результатов по Λ_c^+ :
 - Belle
 - $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$: Belle & BESIII
 - BESIII
 - LHCb
- Перспективы на SuperKEKB/Belle2 & Супер $ст$ Фабрике

Физика Λ_c^+

- $\Lambda_c^+ = u d c$
- Масса: $M = 2.28646 \pm 0.00014 \text{ GeV}$
- Время жизни: $c\tau = 59.9 \mu m$ $\tau = (200 \pm 6) \times 10^{-15} s$
- Распады Λ_c^+ : $c \rightarrow s u \bar{d}(l^+ \nu)$ ($p \bar{K} \dots, \Lambda \pi \dots$)
 - абсолютная ширина (расхождение результатов Belle и BESIII)
 - редкие распады (Кабиббо-подавленные, поиски пентакварков ...)
 - прецизионные измерения (полу-лептонные распады ...)
 - нарушение CP ($\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \pi^+$... нет данных Belle и BESIII)
- Распады на Λ_c^+ :
 - спектроскопия барионов ($\Lambda_c^*, \Sigma_c^{(*)}, \Xi_c^{(*)}, \Xi_{cc}^{(*)} \dots$)
 - B -мезоны (вообще частицы с b -кварком ...)
- $e^+ e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$:
 - сечение около порога: (резонанс, молекула, тетракварк ...)

Belle

- $L \approx 1 \text{ ab}^{-1} @ \sqrt{s} \sim \Upsilon(4S) @ 2000 \div 2010$

Table 1. Summary of the luminosity integrated by Belle, broken down by CM energy.

Resonance	On-peak luminosity (fb^{-1})	Off-peak luminosity (fb^{-1})	Number of resonances
$\Upsilon(1S)$	5.7	1.8	102×10^6
$\Upsilon(2S)$	24.9	1.7	158×10^6
$\Upsilon(3S)$	2.9	0.25	11×10^6
$\Upsilon(4S)$ SVD1	140.0	15.6	$152 \times 10^6 B\bar{B}$
$\Upsilon(4S)$ SVD2	571.0	73.8	$620 \times 10^6 B\bar{B}$
$\Upsilon(5S)$	121.4	1.7	$7.1 \times 10^6 B_s\bar{B}_s$
Scan		27.6	

Belle

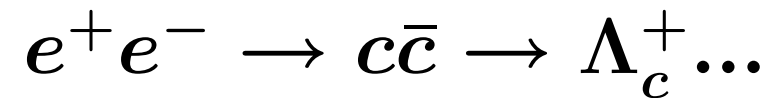
- Инклюзивное рождение Λ_c^+ из континуума:
 - $e^+e^- \rightarrow c\bar{c} \rightarrow \Lambda_c^+ \dots$
 - Λ_c^+ из распада других частиц

- Эксклюзивное рождение Λ_c^+ из континуума:
 - $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \pi^+ D^{(*)-}$ (пример)
 - $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$ (другой пример)

- Рождение Λ_c^+ из B мезонов:
 - $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}, \bar{B} \rightarrow \Lambda_c^+ \dots$
 - $b \rightarrow cW^-, W^- \rightarrow \bar{c}s$

Belle

- Инклюзивное рождение Λ_c^+ из континуума:



- $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ нормировка:

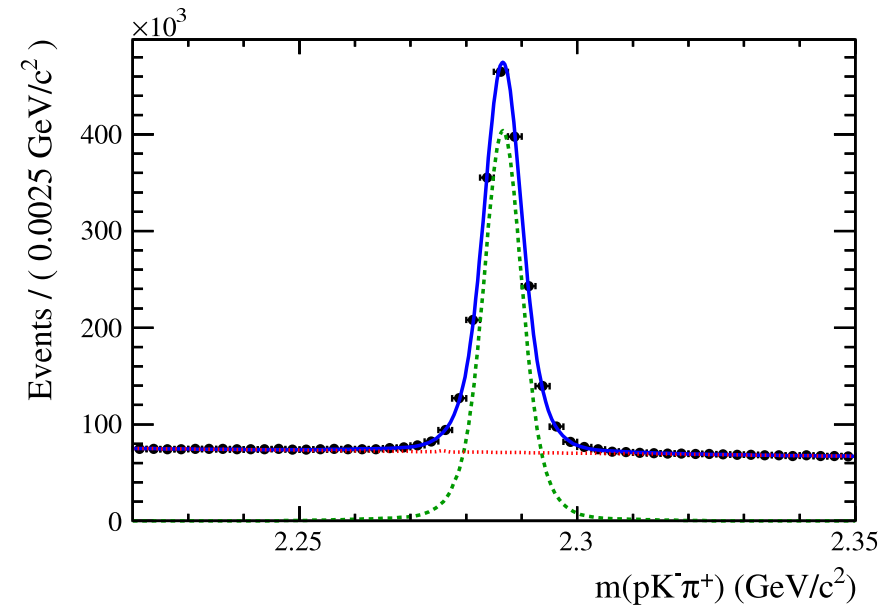
Статья $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ (915fb^{-1}):

$$N_{pK^-\pi^+} = 1468435 \pm 4816$$

$$\cdot \mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (6.46 \pm 0.24)\%$$

$$\cdot \varepsilon_{pK^-\pi^+} = (16.564 \pm 0.023)\%$$

- $N_{\Lambda_c^+}^0 \approx 150 \times 10^6$



Belle: результаты с $N_{\Lambda_c^+}^0$ (примеры)

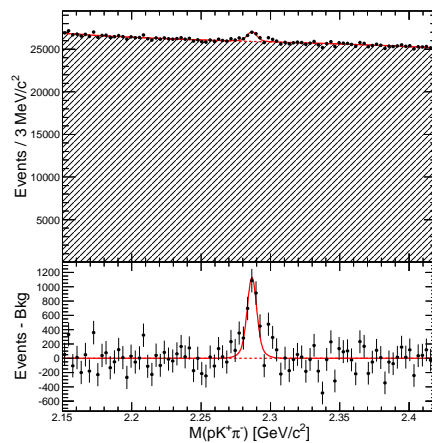
Дважды Кабиббо-подавленный (DCS) распад:

$$\mathcal{B}(pK^+\pi^-) = (1.61 \pm 0.23_{-0.08}^{+0.07}) \times 10^{-4}$$

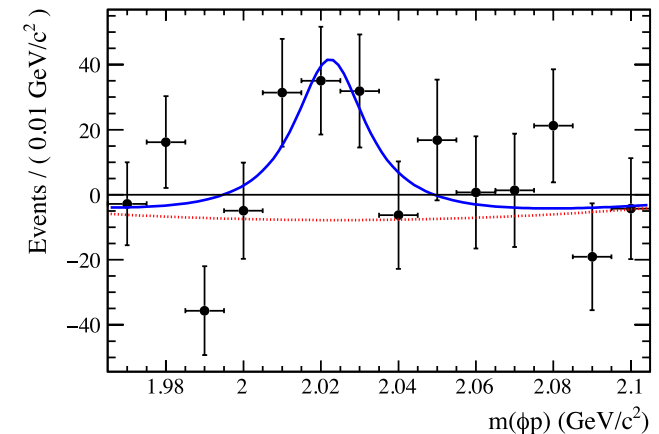
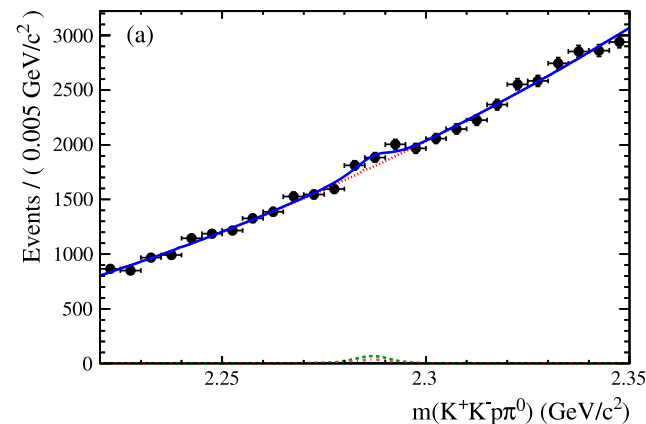
Кабиббо-подавленный распад и пентакварк (аналог $\Lambda_b^0 \rightarrow (J/\psi p)K^-$):

$$\mathcal{B}(\phi p \pi^0) < 15.3 \times 10^{-5} \text{ (at 90\%CL)}$$

$$\mathcal{B}(P_s^+ \pi^0) < 8.3 \times 10^{-5} \text{ (at 90\%CL)}$$



$$N_{\text{DCS}} = 3587 \pm 380 \text{ ev.}$$



$$M_{P_s^+} = 2.025 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_{P_s^+} = 0.022 \text{ GeV}$$

Belle (примеры)

- Инклюзивное рождение Λ_c^+ из континуума:
 Λ_c^+ как продукт распада других частиц
- Обнаружение **триплета** $\Sigma_c(2800)$:
 - * $\Sigma_c(2800)^{++/+ / 0} \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^{+ / 0 / -}$
- Определение **спина-чётности** $\Lambda_c(2880/2940)^+$:
 - * $\Lambda_c(2880/2940)^+ \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^+ \pi^-, \Sigma_c \pi$ (BaBar: $D^0 p$)
- **Массы и ширины** возбуждённых Ξ_c :
 - * $\Xi_c(2980/3080)^+ \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+$
 - * $\Xi_c(3055)^+ \rightarrow \Sigma_c^{++} K^-$ (расхождение с BaBar)
 - * $\Xi_c(3080)^0 \rightarrow \Lambda_c^+ K_S \pi^-$
- Поиск $\Xi_{cc}^{+(+)}$ $\rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ (\pi^+)$: (Ξ_{cc}^{++} найден LHCb)
 - * $\sigma(e^+ e^- \rightarrow \Xi_{cc}^+ \dots) < 4.1 - 25.0$ fb (90%CL)
 - * $\sigma(e^+ e^- \rightarrow \Xi_{cc}^{++} \dots) < 2.5 - 26.5$ fb (90%CL)
- ...

Belle

- Эксклюзивное рождение Λ_c^+ из континуума:

$$e^+e^- \rightarrow c\bar{c} \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \bar{D} \dots$$

- Статья $\mathcal{B}(pK^-\pi^+)$ (978fb^{-1}):

- * $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \pi^+ D^{(*)-}$

- Λ_c^+ в отдаче (recoil, missing)

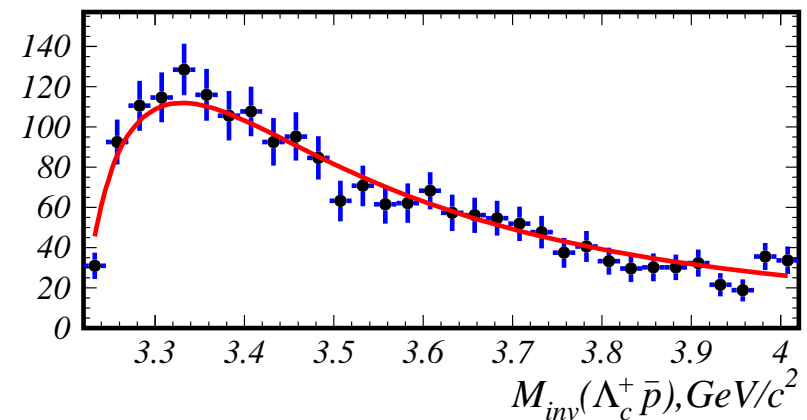
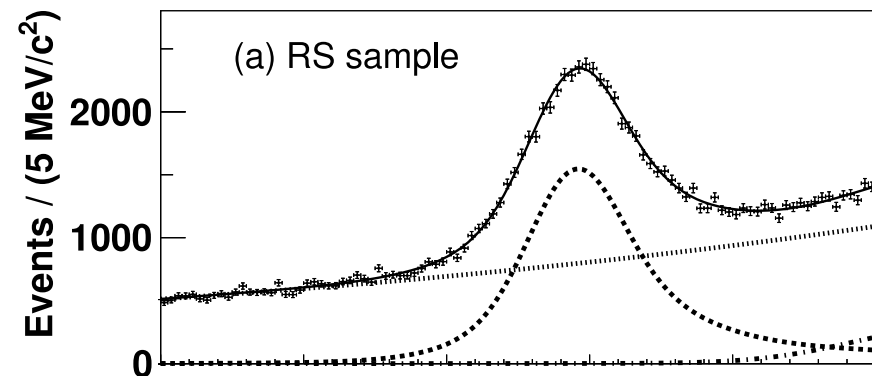
- * $N_{\text{incl}}^{\Lambda_c^+} = 36447 \pm 432$

- Preliminary:

- * $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \bar{D}^{(*)0}$

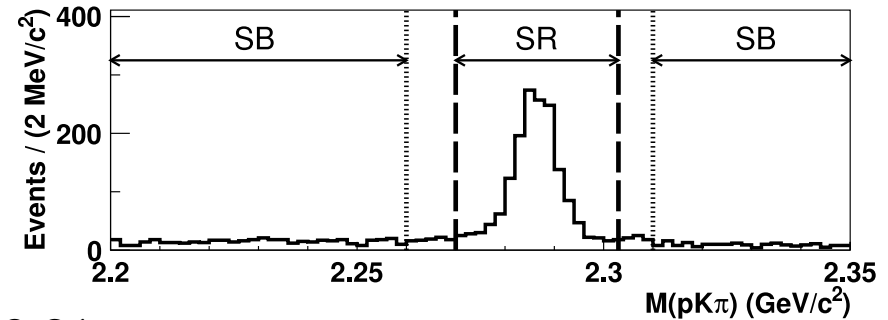
- * $N_{\text{incl}}^{\Lambda_c^+} \approx 10000$

- * $(\Lambda_c^+ \bar{p})$ low mass подъём:



Belle: результаты с $N_{incl}^{\Lambda_c^+}$

Абсолютная ширина Λ_c^+ :



$$\mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (6.84 \pm 0.24_{-0.27}^{+0.21})\%$$

Моды с **н**ерегистрируемыми частицами:

$$\mathcal{B}(\Lambda e^+\nu_e) = (3.36 \pm 0.27 \pm 0.26)\%$$

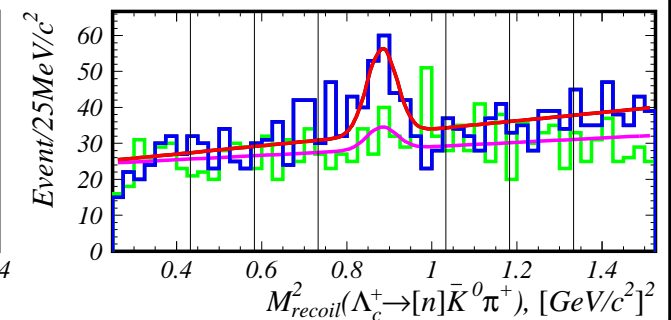
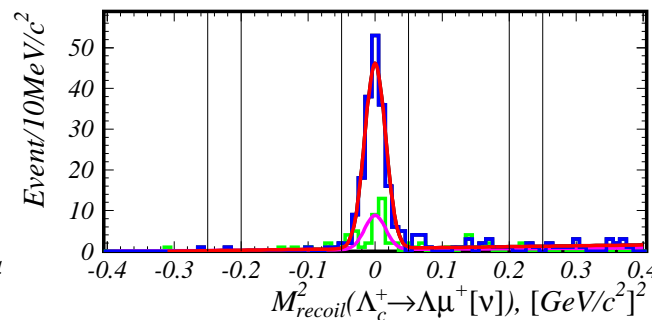
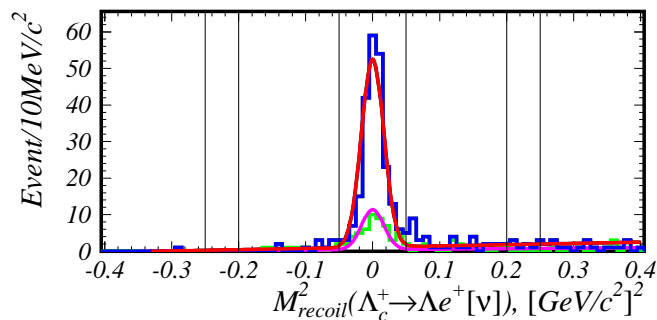
(preliminary)

$$\mathcal{B}(\Lambda \mu^+\nu_\mu) = (4.00 \pm 0.37 \pm 0.30)\%$$

(preliminary)

$$\mathcal{B}(nK_S\pi^+) = (1.50 \pm 0.45 \pm 0.11)\%$$

(preliminary)



Belle: $\bar{B} \rightarrow \Lambda_c^+ \dots$ (примеры)

- Рождение Λ_c^+ из B мезонов: $(N_{B\bar{B}} = 772 \times 10^6)$
 $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}, \bar{B} \rightarrow \Lambda_c^+ \dots$

* $\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow \Lambda_c^+ \dots) \sim 10^{-3} \div 10^{-5}$

* $\Delta E @ M_{BC}$

– $\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p})$:

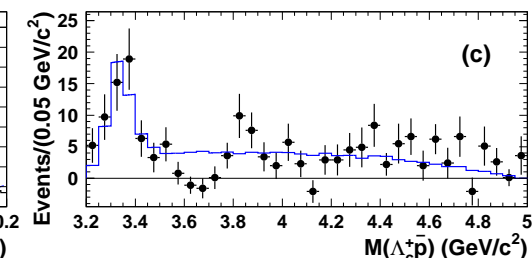
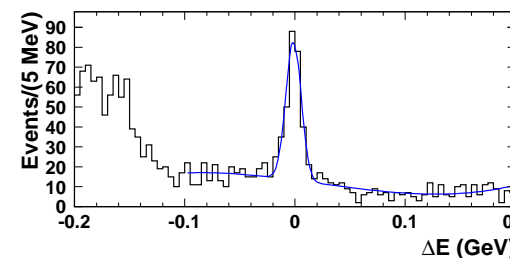
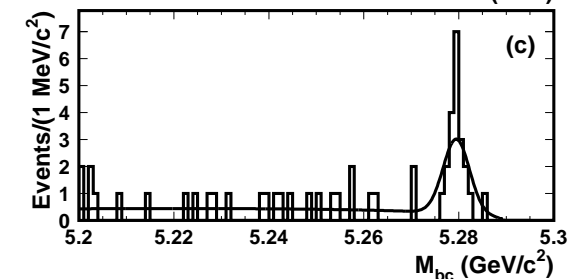
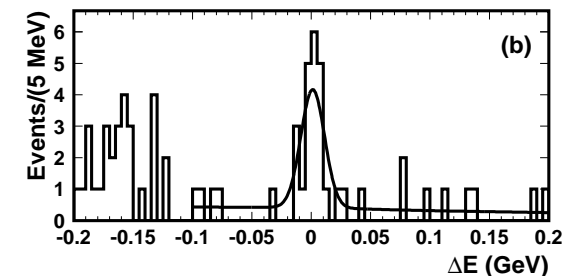
* $78 \phi b^{-1}$ @ 2003

* $\mathcal{B} = (2.19_{-0.49}^{+0.56} \pm 0.32 \pm 0.57) \times 10^{-5}$

– $\mathcal{B}(B^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \pi^-)$:

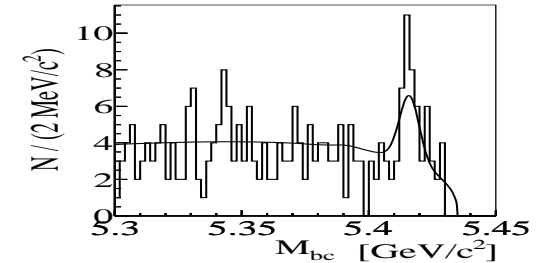
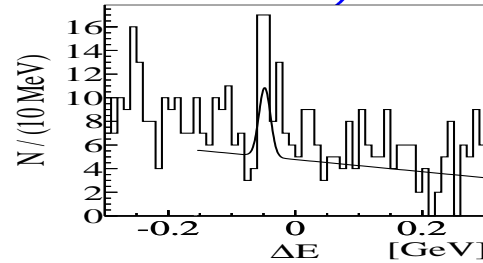
* $140 \phi b^{-1}$ @ 2006

* $(\Lambda_c^+ \bar{p})$ low-mass

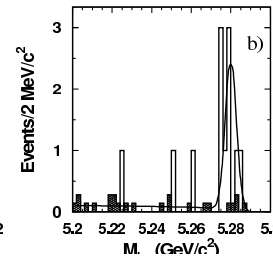
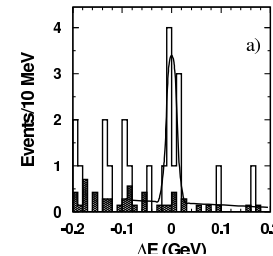
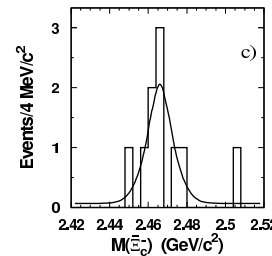
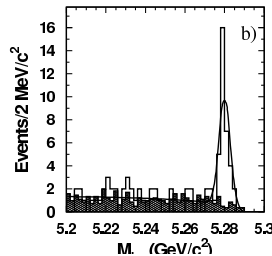
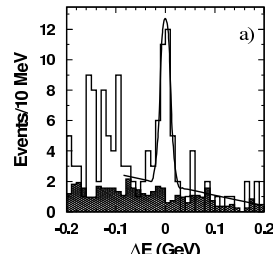
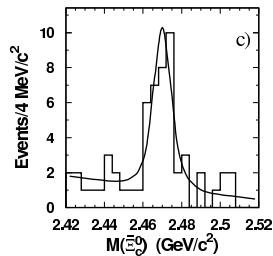
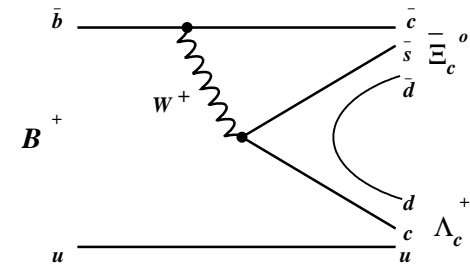


Belle: $\bar{B} \rightarrow \Lambda_c^+ \dots$ (примеры)

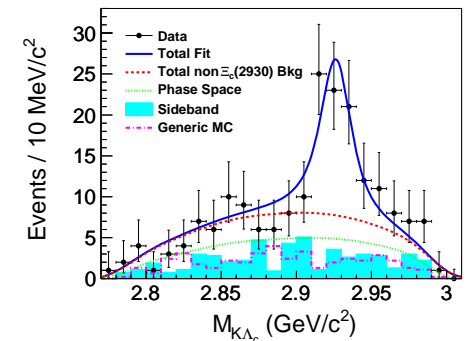
- $\mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda} \pi^-)$:
 - * $121 \phi b^{-1}$ @ $\Upsilon(5S)$
 - * $N_{B_s \bar{B}_s} = 7 \times 10^6$



- $B^+ \rightarrow \Xi_c^0 \Lambda_c^+ @ B^0 \rightarrow \Xi_c^- \Lambda_c^+$:
 - * $357 \phi b^{-1}$ @ $N_{B\bar{B}} = 386 \times 10^6$



- $B^- \rightarrow \Xi_c(2930)^0 \bar{\Lambda}_c^-$, $\Xi_c(2930)^0 \rightarrow \Lambda_c^+ K^-$:
 - * $711 \phi b^{-1}$ @ $N_{B\bar{B}} = 772 \times 10^6$ @ $\Upsilon(4S)$



$e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^- : Belle \& BESIII$

- Belle: 695 fb^{-1} @ $\Upsilon(4S)$

$$- e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^- \text{ rec } \gamma_{\text{ISR}} \\ (N_{\Lambda_c^+} = 386 \pm 27)$$

$$* X(4630): M = (4634_{-7-8}^{+8+5}) \text{ GeV} \\ \Gamma = (92_{-24-21}^{+40+10}) \text{ GeV}$$

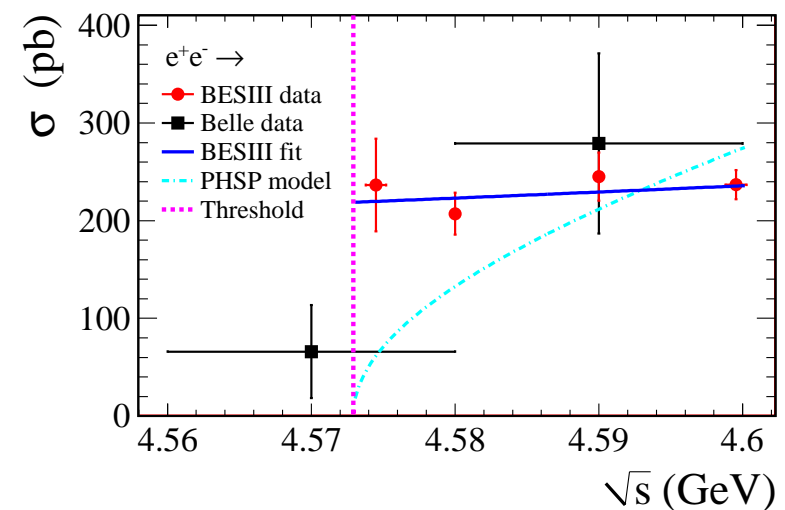
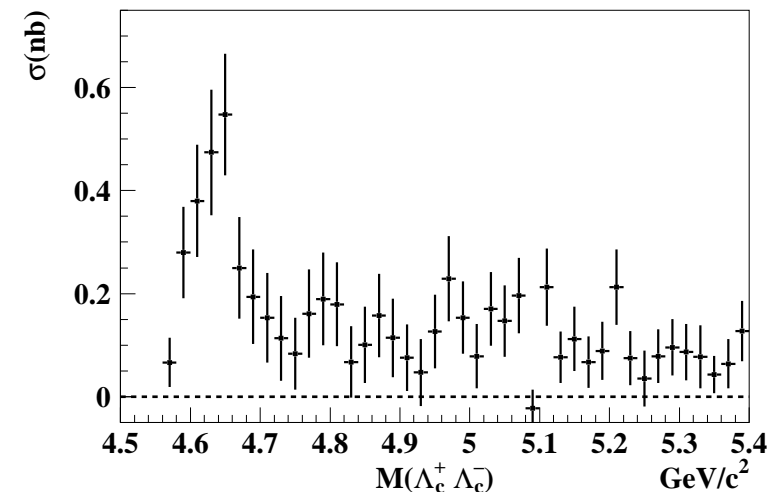
$$- e^+e^- \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^- \gamma_{\text{ISR}} \text{ (Belle)}$$

$$* Y(4660): M = (4652 \pm 10 \pm 11) \\ (\text{ещё есть } Y(4360)) \quad \Gamma = (68 \pm 11 \pm 5)$$

- BESIII: $\sim 600 \text{ pb}^{-1}$ @ $< 4.6 \text{ GeV}$
($N_{\Lambda_c^+} \approx 3000 \pm 60$)

– $\sigma \sim$ “полочка” около порога

$$- \Lambda_c^+: |G_E/G_M|$$



BESIII

- $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$ $L = 0.567 \text{ fb}^{-1} @ \sqrt{s} = 4.599 \text{ GeV}$
- $M_{BC} @ \Delta E$
- $\sqrt{s} - 2m_{\Lambda_c^+} < m_\pi$
- Нет ISR (или мало)

Статья $\mathcal{B}(pK^-\pi^+)$:

* $N_{\Lambda_c^+}^{ST} = 15400 \pm 160$

• $\bar{\Lambda}_c^-$ в отдаче ($\epsilon_{pK^-\pi^+} \approx 50\%$)

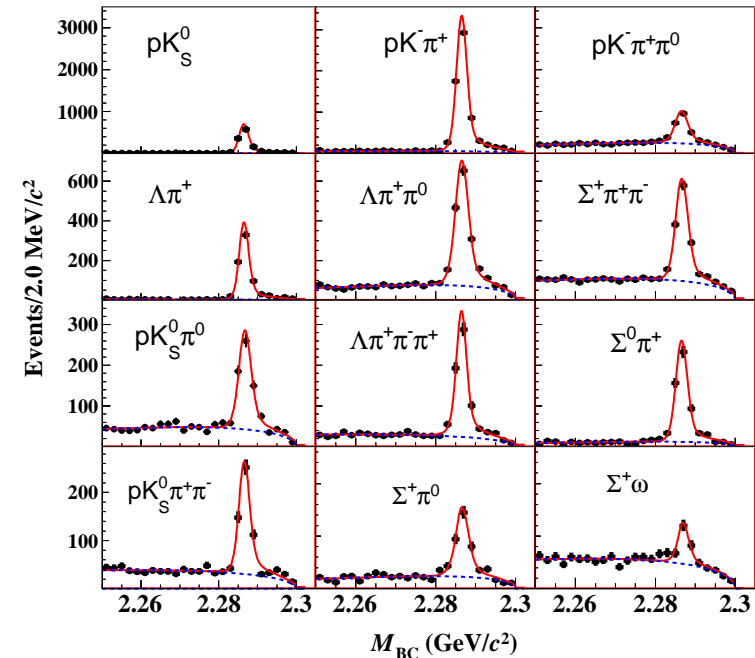
* $N_{\Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-} = (1.06 \pm 0.05) \times 10^5$

• $N_{\Lambda_c^+}^0 \approx 200 \cdot 10^3$

Абсолютная ширина Λ_c^+ :

$\mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (5.84 \pm 0.27 \pm 0.23)\%$ (+ 11 мод)

Belle: $(6.84 \pm 0.24^{+0.21}_{-0.27})\%$ ($\Delta(\mathcal{B}) \sim 4\sigma$)



BESIII: результаты с $N_{\Lambda_c^+}^{ST}$

Моды с **н**ерегистрируемыми частицами:

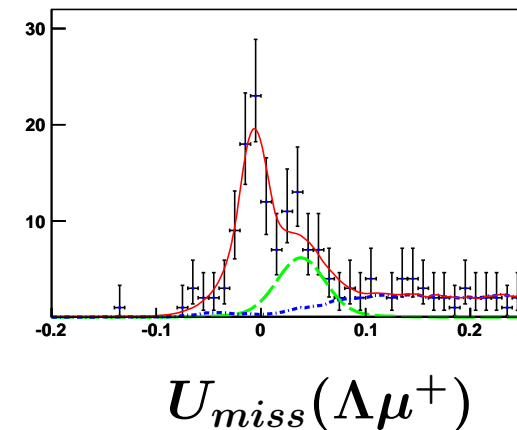
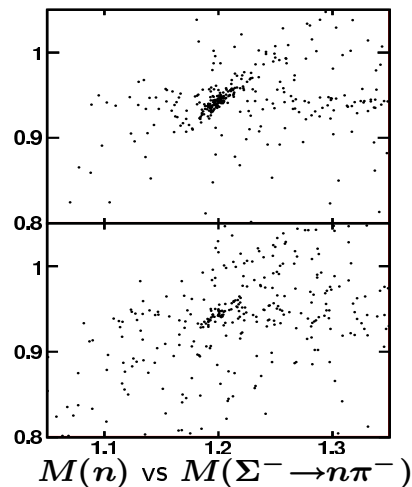
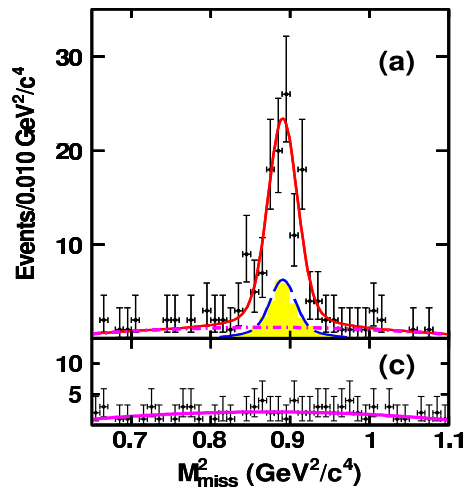
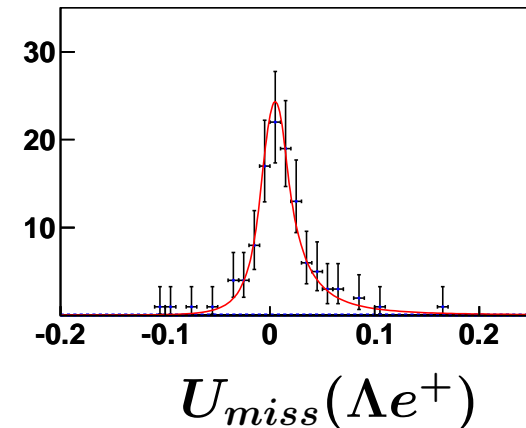
$$\mathcal{B}(\Lambda e^+ \nu_e) = (3.63 \pm 0.38 \pm 0.20)\%$$

$$\mathcal{B}(\Lambda \mu^+ \nu_\mu) = (3.49 \pm 0.46 \pm 0.27)\%$$

$$\mathcal{B}(n K_S \pi^+) = (1.82 \pm 0.23 \pm 0.11)\%$$

$$\mathcal{B}(\Sigma^- \pi^+ \pi^+) = (1.81 \pm 0.17 \pm 0.09)\%$$

$$\mathcal{B}(\Sigma^- \pi^+ \pi^+ \pi^0) = (2.11 \pm 0.33 \pm 0.14)\%$$



BESIII: результаты с $N_{\Lambda_c^+}^0$

Кабиббо-подавленные распады:

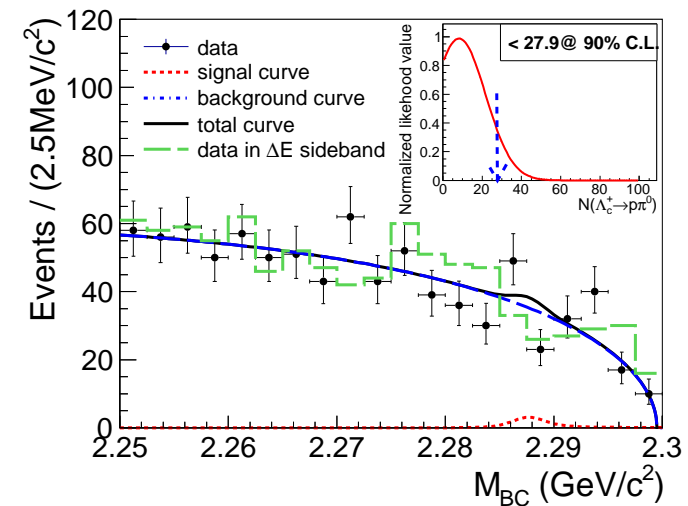
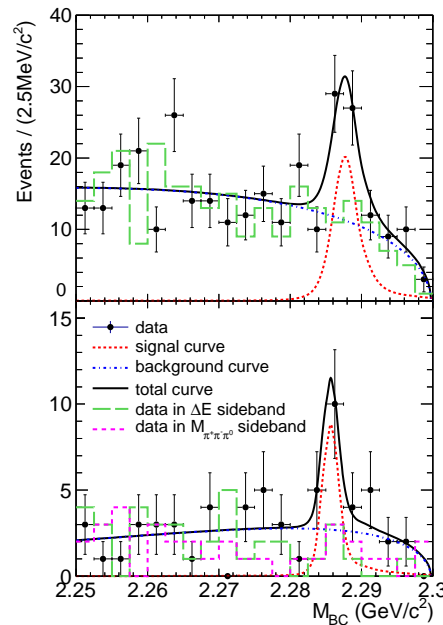
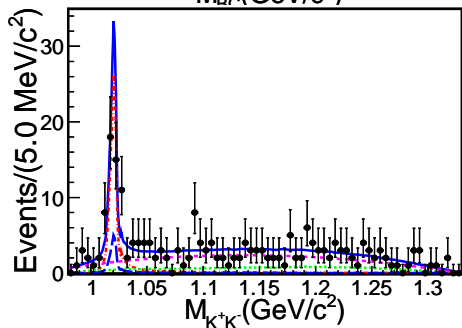
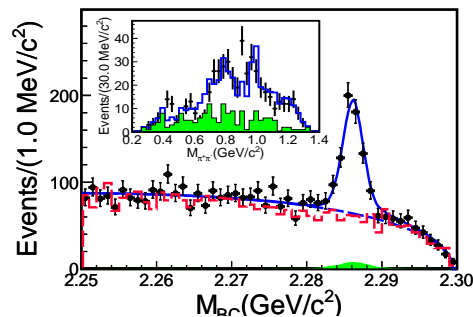
$$\mathcal{B}(p\pi^+\pi^-) = (3.91 \pm 0.28 \pm 0.15 \pm 0.24) \times 10^{-3}$$

$$\mathcal{B}(p\phi) = (1.06 \pm 0.19 \pm 0.08 \pm 0.06) \times 10^{-3}$$

$$\mathcal{B}(pK^+K^-) = (5.47 \pm 1.30 \pm 0.41 \pm 0.33) \times 10^{-4}$$

$$\mathcal{B}(p\eta) = (1.24 \pm 0.28 \pm 0.10) \times 10^{-3}$$

$$\mathcal{B}(p\pi^0) < 2.7 \times 10^{-4} \text{ (at 90\%CL)}$$



LHCb: результаты



* 1.7 fb^{-1} @ 13 TeV $N_{\Xi_{cc}} = 313 \pm 33$

$M = 3621.40 \pm 0.72 \pm 0.27 \pm 0.14 (m_{\Lambda_c}) \text{ MeV}$

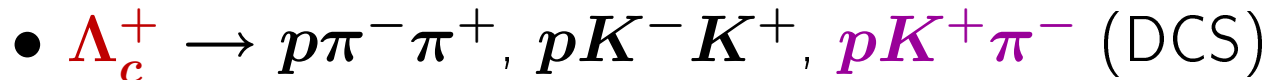
(m_{Λ_c} : BaBar: $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda(\Sigma^0) K_S K^+$)



* 1 fb^{-1} @ 7 TeV & 2 fb^{-1} @ 8 TeV

$N_{\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+} = (2.74 \pm 0.02) \times 10^6$

Single FF HQET & Unquenched Lattice QCD

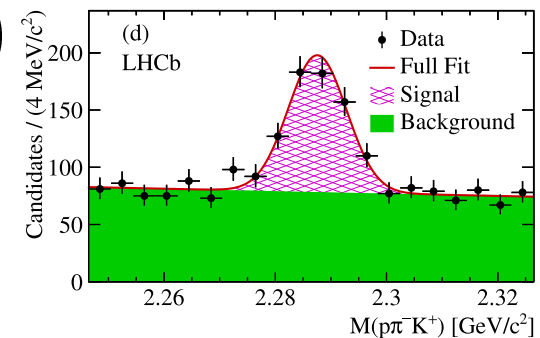
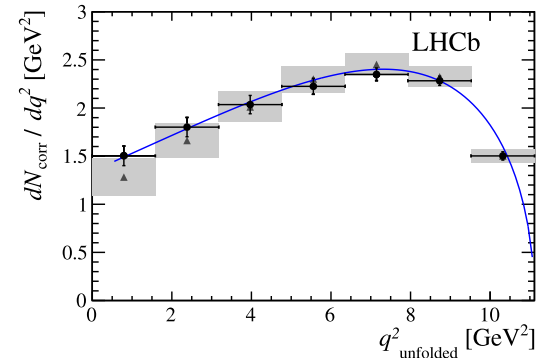
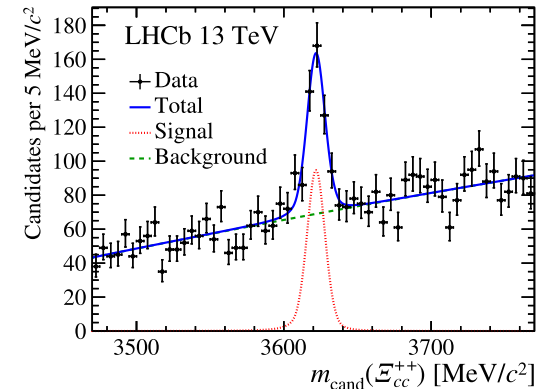


* 1 fb^{-1} @ 7 TeV (SemiLeptonic tag)

$N_{\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+} = 226851 \pm 522$

$\mathcal{B}(p K^+ \pi^-) = (1.04 \pm 0.09 \pm 0.03 \pm 0.05) \times 10^{-4}$

$N_{\text{DCS}} = 392 \pm 55$



Перспективы: SuperKEKB (Belle2)

	L, ab^{-1}	$N_{\Lambda_c^+}^0$	$N_{\text{incl}}^{\Lambda_c^+}$	$N_{B\bar{B}}$
Belle	1	150×10^6	45×10^3	772×10^6
Belle2	50	7.5×10^9	2.3×10^6	40×10^9

- Λ_c^+ :

- всегда будут, ничего специально делать не надо
- количество будет в ~ 50 раз больше, чем на Belle
- * редкие распады $\Lambda_c^+, \bar{B} \rightarrow \Lambda_c^+ \dots$, CPV на $\Lambda_c^+ \dots$

- B FREC (FullREConstruction):

- $B_{\text{tag}} \rightarrow D_{(s)} h(h\dots), \bar{B}_{\text{sig}} \rightarrow \dots$ в отдаче
- $\epsilon_{\text{FREC}} \sim 0.3 \div 0.4 \%$ (Purity up to $\sim 80\%$)
- * $\mathcal{B}(\bar{B}^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} l^- \bar{\nu}_l)$
- * $\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{n} \dots)$
- * $\mathcal{B}(B \rightarrow \Xi_c^+ \Lambda_c^+)$: абсолютная ширина Ξ_c (пока не измерена)

Перспективы: Супер *ст* Фабрика (*SстF*)

	L, fb^{-1}	$N_{\Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-}$	$N_{\Lambda_c^+}^0$	$N_{\Lambda_c^+}^{ST}$
BESIII	0.6	106×10^3	0.2×10^6	15.4×10^3
<i>SстF</i>	200	40×10^6	70×10^6	5×10^6
Belle2			7.5×10^9	2.3×10^6

- $N_{\Lambda_c^+}^{ST}$: (recoil) Λ_c^+ будет в > 2 раза больше, чем на Belle2
 * распады Λ_c^+ на n , ν , тёмную материю ...
- $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$: правильный скан по энергии ускорителя будет лучше, чем ISR от B фабрик
 – скан \sqrt{s} от $2M_{\Lambda_c}$ (< 4.573 GeV) до > 4.9 GeV ($M_{Y(4660)} + (2 \div 3)\Gamma_{Y(4660)}$)
 – при $\sqrt{s} > 2M_{\Lambda_c} + (1 \div 2)M_\pi$: $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^- \pi \dots$
 * $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Sigma}_c^{(*)-}$ - запрещены изоспином
 * $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^{*-}$ - σ сравнимо с $\sigma(e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-)$

– $e^+e^- \rightarrow \Xi_c \bar{\Xi}_c$:

* При $\sqrt{s} > 2M_{\Xi_c}$ (>4.935 GeV)

• Абсолютная ширина Ξ_c , поведение σ на пороге ...

* Экспериментальные данные Belle:

Есть:

Нет (пока?):

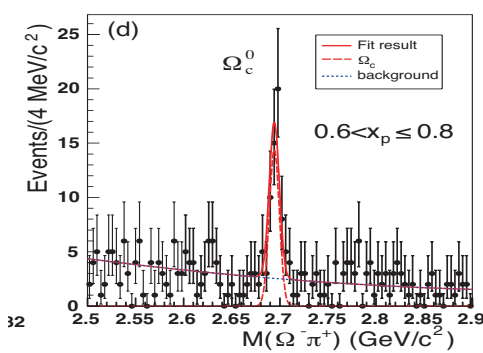
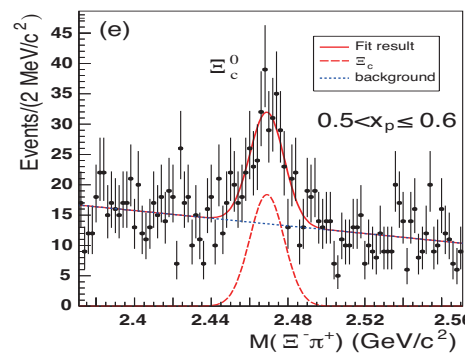
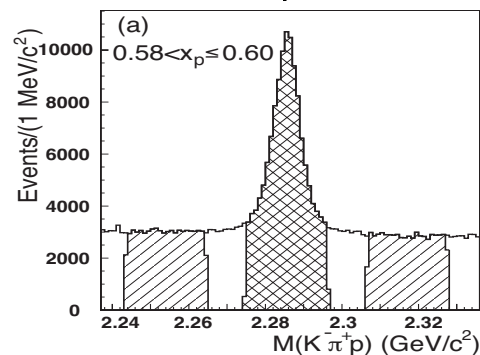
• $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \bar{D}^0$ vs $e^+e^- \rightarrow \Xi_c \bar{\Lambda} \bar{D}$

• $\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p}$ vs $\bar{B}^0 \rightarrow \Xi_c^0 \bar{\Lambda}$

$\bar{B}^0 \rightarrow \Xi_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$

$B^- \rightarrow \Xi_c^0 \bar{\Lambda}_c^-$

• Inclusive production cross section:



* Подбор кварковой пары из вакуума $u\bar{u}(d\bar{d}) \leftrightarrow s\bar{s}$ подавлен?