

Адронные распады τ -лептона

ПЛАН

- Общая картина распадов τ -лептона
- Распады с пионами
- Распады с каонами
- Токи 2-го рода
- Заключение

Общие замечания

- τ -лептон и его нейтрино ν_τ – два из шести фундаментальных лептонов: e^- , ν_e , μ^- , ν_μ , τ^- , ν_τ
- Как самый тяжелый лептон, τ распадается и на лептоны, и на адроны: в PDG-2017 более 200 различных мод распада τ (244!)
- Можно изучать все разрешенные в Стандартной Модели взаимодействия и искать эффекты Новой Физики
- Чистая лаборатория без адронов в начальном и небольшим количеством в конечном состоянии
- Серьезный прогресс после 2005 года связан с В-фабриками

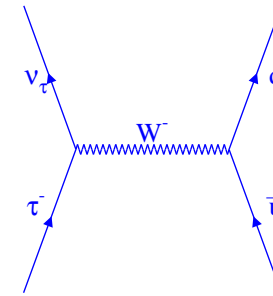
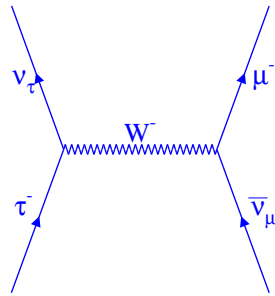
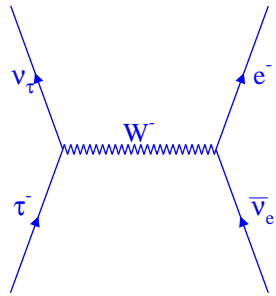
Фабрики τ лептонов

| Группа | $\int L dt, \text{fb}^{-1}$ | $N_{\tau\tau}, 10^6$ |
|---------------------|-----------------------------|----------------------|
| LEP (пик Z-бозона) | 0.34 | 0.33 |
| CLEO (10.6 ГэВ) | 13.8 | 12.6 |
| BaBar (10.6 ГэВ) | 469 | 431 |
| Belle (10.6 ГэВ) | 671 | 617 |
| τ -с (4.2 ГэВ) | 10k | 36k |
| SuperB | 50k | 45k |

BaBar ($\sim 550 \text{ fb}^{-1}$) and Belle ($\sim 1050 \text{ fb}^{-1}$) вместе набрали около 1.4 ab^{-1}
 В-фабрика – τ фабрика, производящая $0.9 \cdot 10^6 \tau^+ \tau^-$ пар на каждый fb^{-1} !!

Супер-с- τ – сравнимое число τ !

Каков $\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$?



$R_\tau = \frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \text{hadrons})}{\Gamma(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)}$, В асимптотике ($m_\tau \rightarrow \infty$) $R_\tau = N_c = 3$,

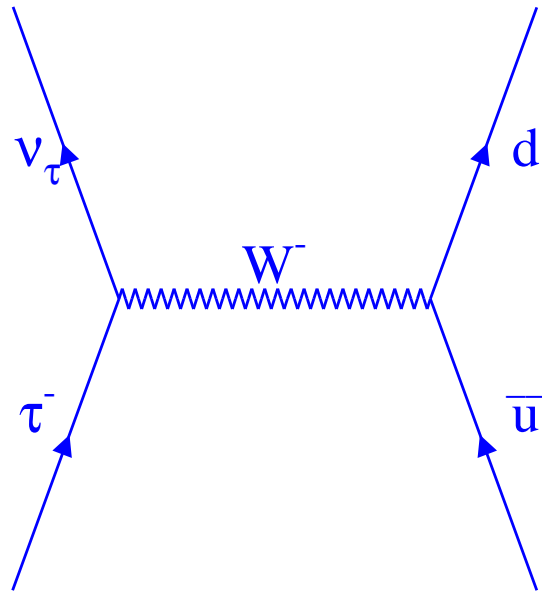
КХД и EW ($\alpha_s(m_\tau) \sim 0.35$):

$$R_\tau = 3.058 \left[1 + \frac{\alpha_s(m_\tau)}{\pi} + 5.2 \frac{\alpha_s(m_\tau)^2}{\pi} + 26.4 \frac{\alpha_s(m_\tau)^3}{\pi} + \dots + n.p.t. \right]$$

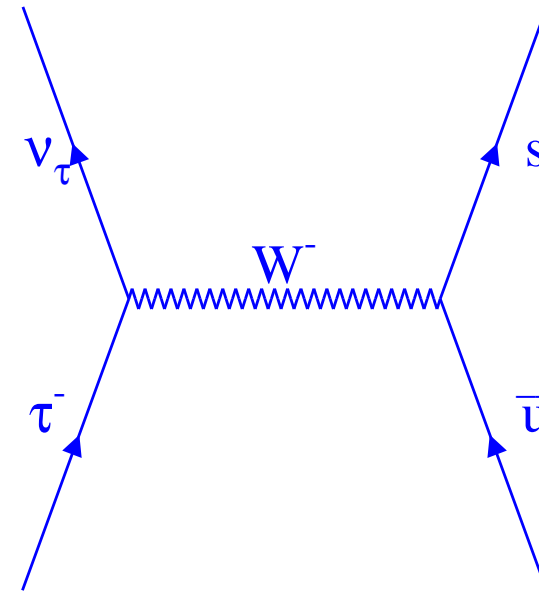
| Мода распада | \mathcal{B} , % (Без КХД) | \mathcal{B} , % (КХД) | \mathcal{B} , % (ЭКС-НТ) |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| $e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ | 20 | 17.6 | 17.82 ± 0.04 |
| $\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ | 20 | 17.6 | 17.39 ± 0.04 |
| Адроны + ν_τ | 60 | 64.8 | ~ 65 |

Адронные распады τ в Стандартной Модели

Кабиббо-разрешенные



Кабиббо-подавленные

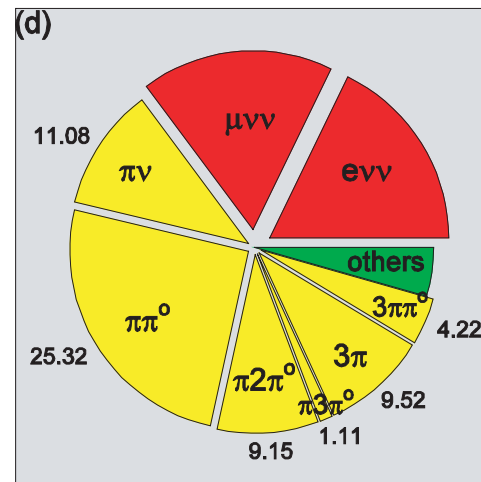
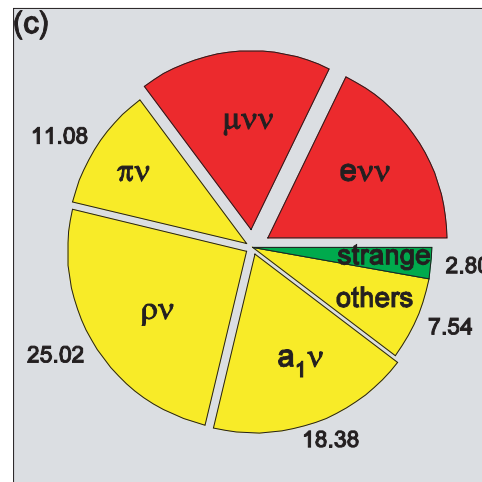
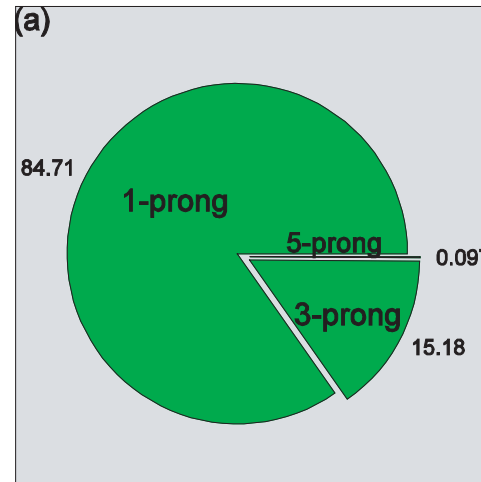
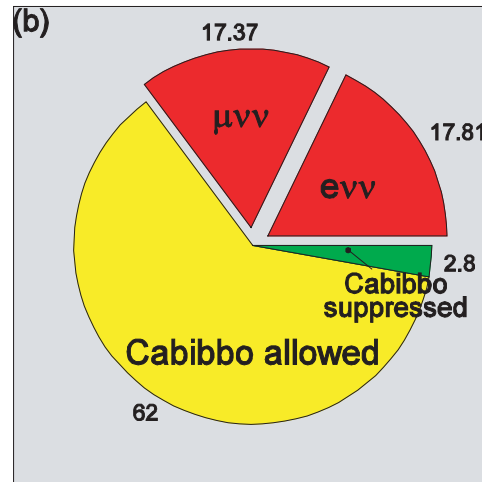


В Кабиббо-разрешенных распадах $\propto \cos\theta_C$, а для подавленных $\propto \sin\theta_C$.
 $\cos\theta_C \approx |V_{ud}| = 0.97377 \pm 0.00027$, так что подавление $\propto \cos^2\theta_C/\sin^2\theta_C \approx 18$.
 Каждая Wud (Wus) вершина включает ККМ м.э. $V_{ud(us)}$

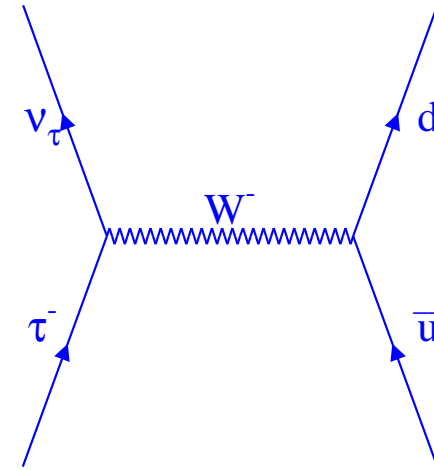
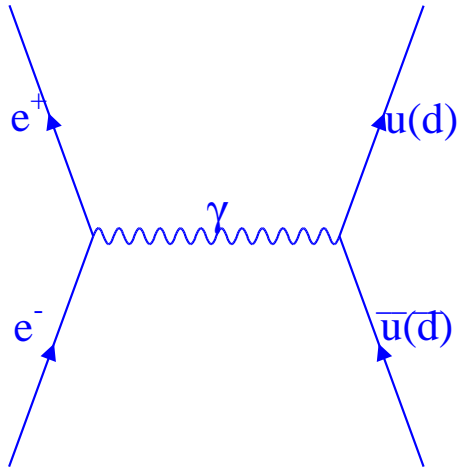
Общая картина распадов τ -лептона – I

| Мода распада | \mathcal{B} , % exper. |
|------------------------------|-------------------------------|
| 1 трек | 85.24 ± 0.06 |
| 3 трека | 15.21 ± 0.06 |
| 5 треков | $(9.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$ |
| 7 треков | $< 3 \cdot 10^{-7}$ |
| $e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ | 17.82 ± 0.04 |
| $\mu^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ | 17.39 ± 0.04 |

Общая картина распадов τ-лептона – II



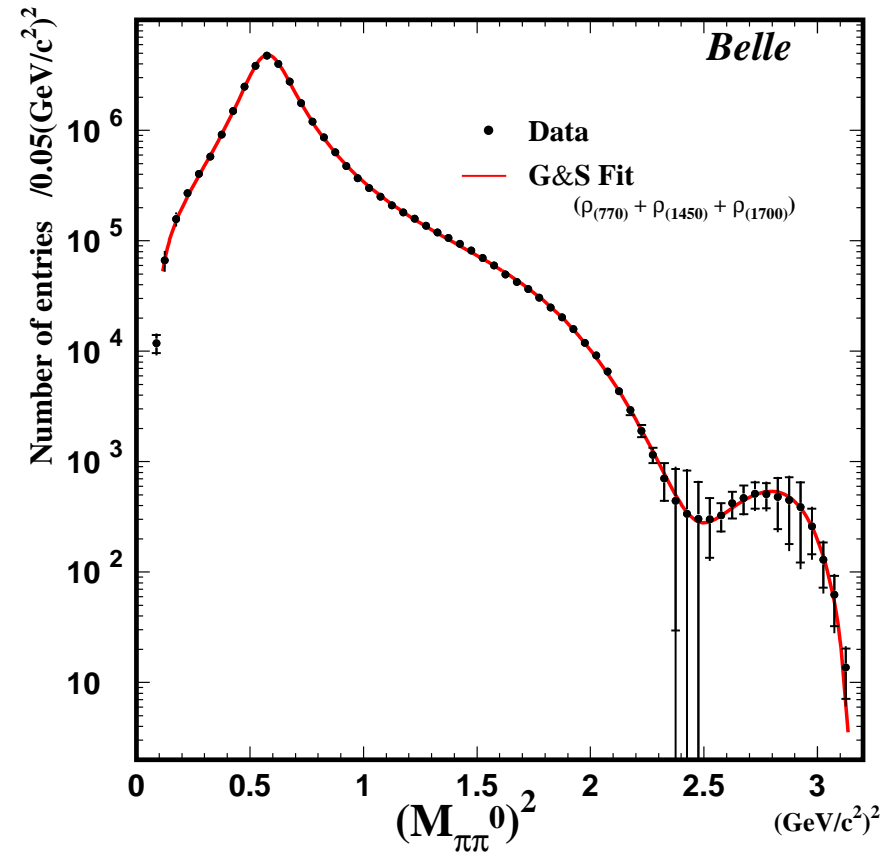
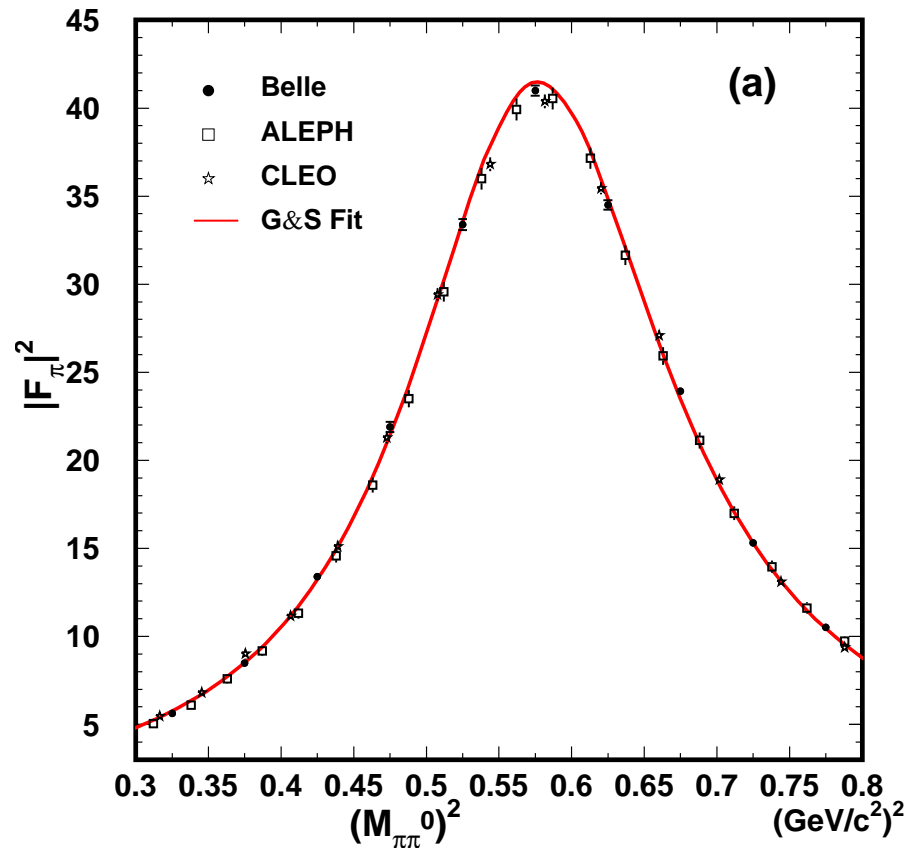
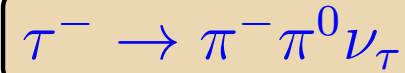
СВТ (CVC). $e^+e^- \rightarrow V^0$ и $\tau^- \rightarrow \nu_\tau V^-$



Разрешены $I^G J^P = 1^+ 1^-$: $V^- = \pi^- \pi^0, (4\pi)^-, \omega \pi^-, \eta \pi^- \pi^0, K^- K^0, (6\pi)^-,$

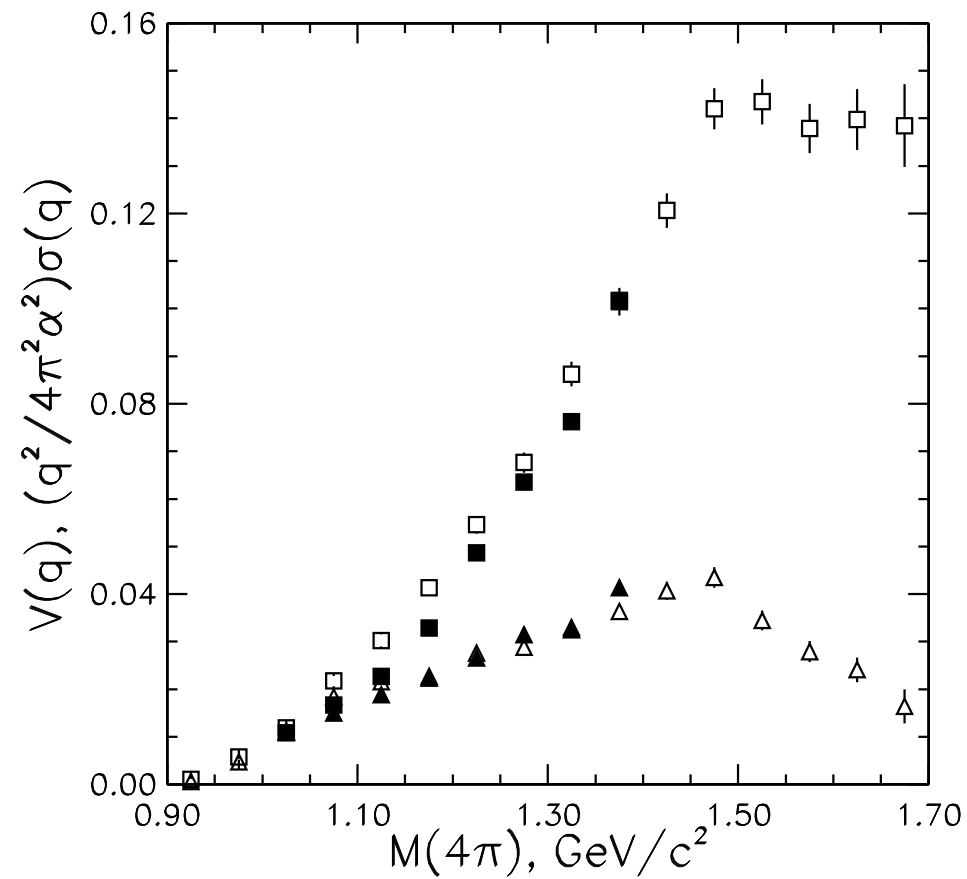
$\mathcal{B}(V^- \nu_\tau) \sim 32\%$

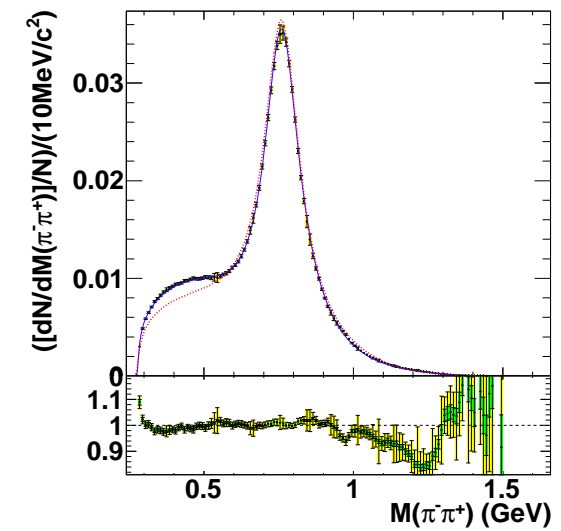
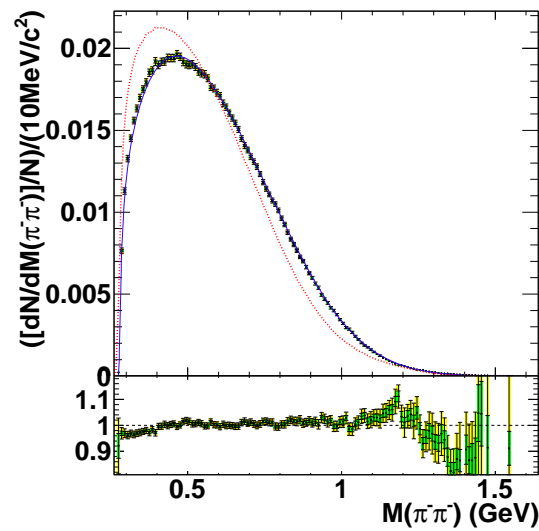
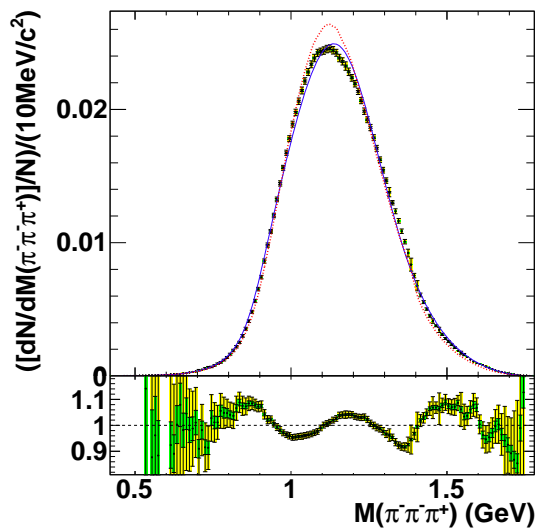
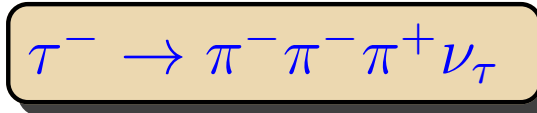
Первые тесты CVC: хорошее согласие \mathcal{B}_τ из e^+e^- с данными τ (N.Kawamoto, A.Sanda, 1978; F.Gilman, D.Miller, 1978; SE, V.Ivanchenko, 1991, 1997).



$5 \cdot 10^6$ событий (лишь малая доля)

M. Fujikawa et al., Phys. Rev. D78, 072006 (2008)

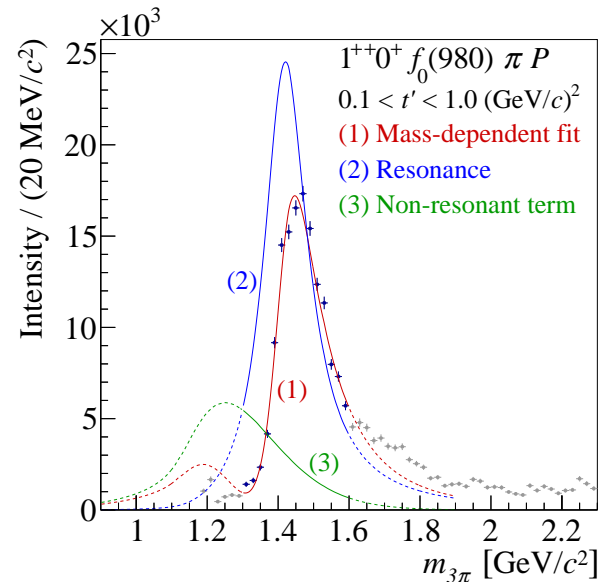
CLEO: Тест СВТ в $\tau^- \rightarrow (4\pi)^- \nu_\tau$ 



BaBar - точки, CLEO - красный, RChT - синий

О. Shekhovtsova, JETP Lett. 102 (2015) 329

Внутренняя структура 3π системы



COMPASS открыл новый легкий мезон, $a_1(1420)$, $I^G(J^{PC}) = 1^-(1^{++})$,
 $M = 1414_{-13}^{+15}$ MeV, $\Gamma = 153_{-23}^{+8}$ MeV, распадается лишь в $f_0(980)\pi$, экзотика?

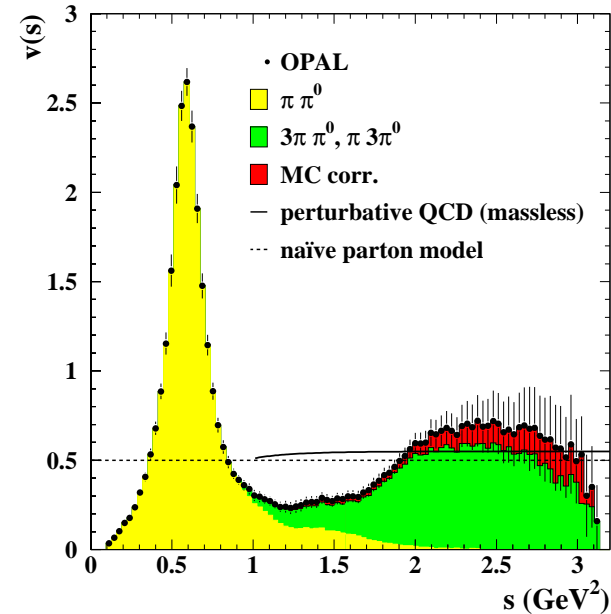
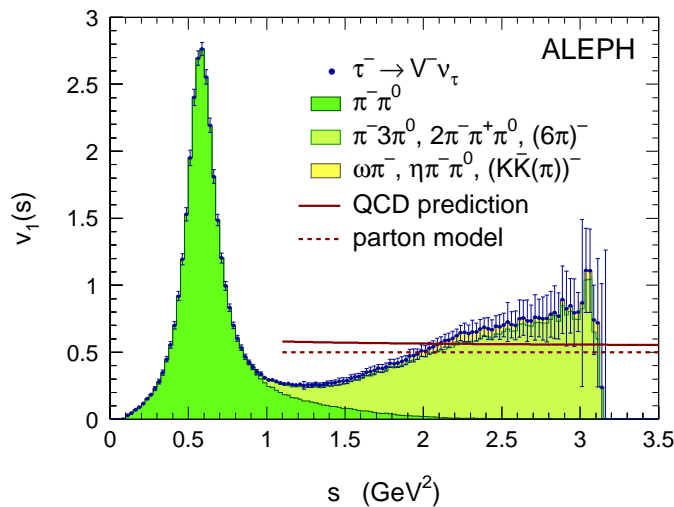
C. Adolph et al., Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 082001

Есть ли $a_1(1640)$ с массой 1647 ± 22 МэВ и шириной 254 ± 27 МэВ?

C.A. Baker et al., in $\bar{p}p \rightarrow 4\pi^0$, $\omega\pi^+\pi^-\pi^0$

Векторная спектральная функция

$$v_1(s) = \frac{m_\tau^2}{6|V_{ud}|^2 S_{EW}} \frac{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow V^- \nu_\tau)}{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} \times \frac{dN_V}{N_V ds} \left[\left(1 - \frac{s}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2s}{m_\tau^2}\right) \right]^{-1}$$

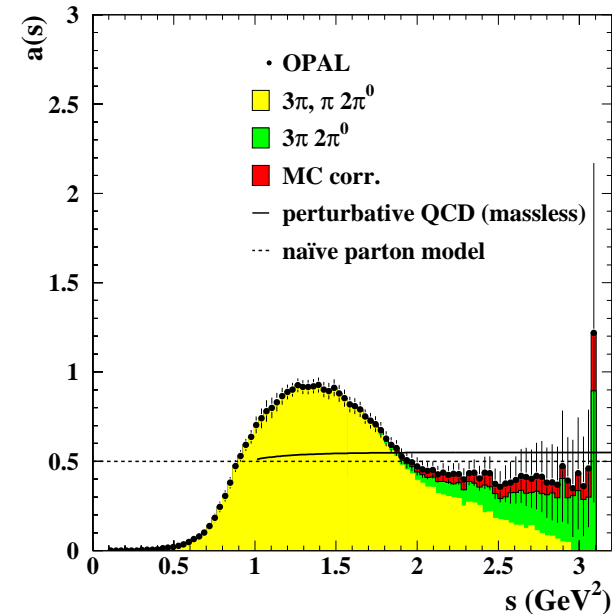
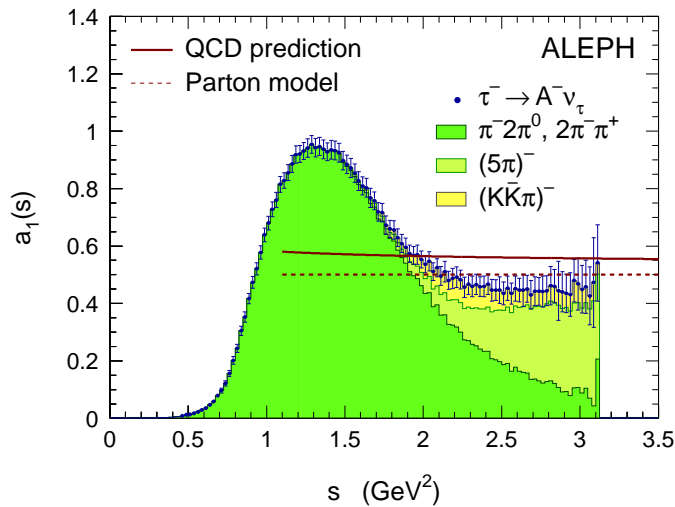


ALEPH: R. Barate et al., Eur. Phys. J. C4 (1998) 409

OPAL: K. Akerstaff et al., Eur. Phys. J. C7 (1999) 571

Аксиал-векторная спектральная функция

$$a_1(s) = \frac{m_\tau^2}{6|V_{ud}|^2 S_{EW}} \frac{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow A^- \nu_\tau)}{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} \times \frac{dN_A}{N_A ds} \left[\left(1 - \frac{s}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2s}{m_\tau^2}\right) \right]^{-1},$$



ALEPH: R. Barate et al., Z. Phys. C76 (1997) 15

OPAL: K. Akerstaff et al., Eur. Phys. J. C7 (1999) 571

Определение α_S

- $R_\tau = \frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \text{hadrons})}{\Gamma(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} = R_{\tau,V} + R_{\tau,A} + R_{\tau,S}$,
 где $R_{\tau,V}$ ($R_{\tau,A}$) связаны с конечными состояниями с $J^P = 1^-, 0^+ (1^+, 0^-)$,
 а $R_{\tau,S}$ учитывает распады со странностью $S = -1$
- $R_{\tau,V+A} = N_C |V_{ud}|^2 S_{EW} (1 + \delta_P + \delta_{NP})$,
 EW радиационная поправка $S_{EW} = 1.0201 \pm 0.0003$,
 часть от непертурбативной КХД $\delta_{NP} = -0.0059 \pm 0.0014$
- Из эксперимента $R_{\tau,V+A} = 3.4671 \pm 0.0084$ и $|V_{ud}| = 0.97425 \pm 0.00022$,
 отсюда пертурбативная КХД дает $\delta_P = 0.1995 \pm 0.0033$
- Окончательно $\alpha_S(m_\tau^2) = 0.329 \pm 0.013$ или
 после эволюции $\alpha_S(M_Z^2) = 0.1198 \pm 0.0015$
 в согласии с и более точное, чем на M_Z

Распады τ^- в каоны

1. Распады с 1 или 3 каонами Кабиббо-подавлены, $A \propto \sin \theta_c$
 - $\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow (S = -1)\nu_\tau) = (2.87 \pm 0.12)\%$, ALEPH, 1999;
(2.81 ± 0.19)%, OPAL, 1999
 - Из странных спектральных функций – $m_s, |V_{us}|$
2. Распады с 2 каонами, $A \propto \cos \theta_c$
 - $\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow (K\bar{K})^- n\pi\nu_\tau) \sim 0.7\%$
 - $J^P = 1^-$ или 1^+ ?
 - Тесты CVC: τ vs. e^+e^-
3. Адронная физика:
 - K^* (κ , возбуждения), $(K\bar{K})^- n\pi$, $V(\rho, \phi)n\pi$
 - Изоспиновая симметрия

Что можно узнать из распадов τ в каоны?

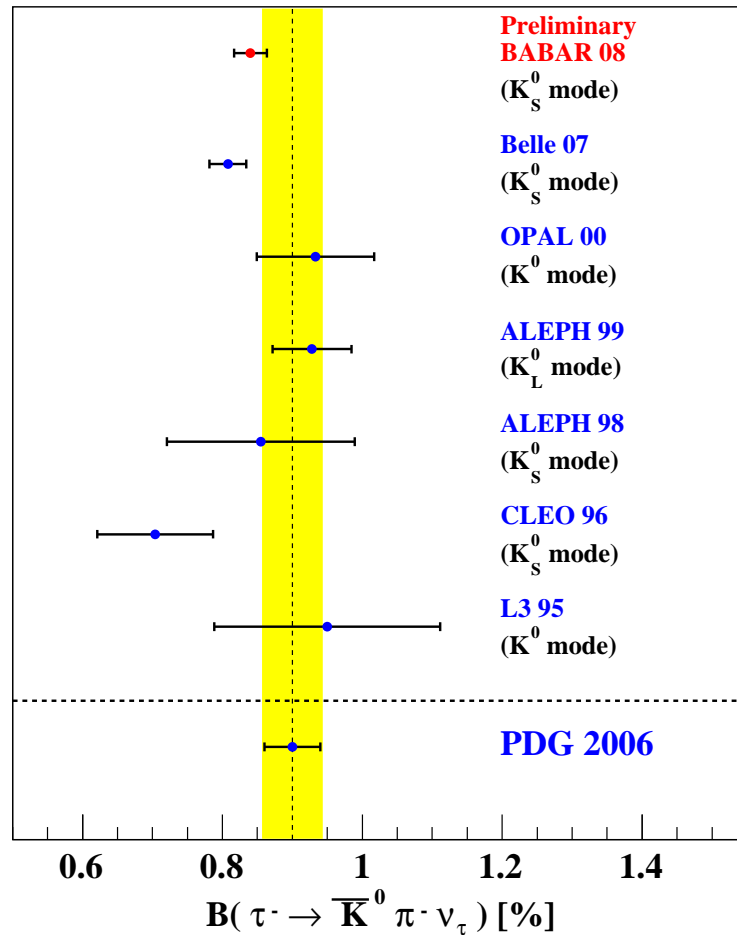
- Как взаимодействуют легкие кварки, включая s
- Возможные конечные адронные состояния:
 K^- , $(K\pi)^-$, $(K2\pi)^-$, $(K3\pi)^-$, $(K\bar{K})^-$, $(K\bar{K}\pi)^-$, $(K\bar{K}2\pi)^-$,
 $K^-(K\bar{K})^0$, $K^-\eta$, $K\eta\pi$
- Возможны резонансы в системе
 2π (ρ), $K\bar{K}$ (ϕ), $K\pi$ (K^*)
- Для отдельных мод распада $\mathcal{B} \sim 10^{-3} - 10^{-4}$, их наблюдение требует очень большой статистики
- Для разделения мод распада нужна отличная π/K идентификация:
 $h^-h^+h^-$ конечное состояние $\pi^-\pi^+\pi^-$, $K^-\pi^+\pi^-$, $K^-K^+\pi^-$, $K^-K^+K^-$
- Много мод с $K^0 \Rightarrow$ хорошая регистрация K_S^0 и K_L^0

Спектроскопия K^*

| Состояние | J^P | Масса, МэВ | Ширина, МэВ | Распады |
|----------------------|-------|--------------------------|---------------------------|-----------------|
| $K_0^*(800)(\kappa)$ | 0^+ | $841 \pm 30^{+81}_{-73}$ | $618 \pm 90^{+96}_{-144}$ | $K\pi$ |
| $K^*(892)$ | 1^- | 891.66 ± 0.26 | 50.8 ± 0.9 | $K\pi$ |
| $K_1(1270)$ | 1^+ | 1272 ± 7 | 90 ± 20 | $K\pi\pi$ |
| $K_1(1400)$ | 1^+ | 1402 ± 7 | 174 ± 13 | $K\pi\pi$ |
| $K^*(1410)$ | 1^- | 1414 ± 15 | 232 ± 21 | $K\pi\pi, K\pi$ |
| $K_0^*(1430)$ | 0^+ | 1414 ± 6 | 290 ± 21 | $K\pi$ |
| $K_2^*(1430)$ | 2^+ | 1425.6 ± 1.5 | 98.5 ± 2.9 | $K\pi, K\pi\pi$ |
| $K^*(1680)$ | 1^- | 1717 ± 27 | 322 ± 110 | $K\pi, K\pi\pi$ |

Есть еще четыре $K\pi\pi$ резонанса с плохо изученными свойствами:

$K(1460) - 0^-$, $K_2(1580) - 2^-$, $K(1630) - ??$, $K_1(1650) - 1^+$

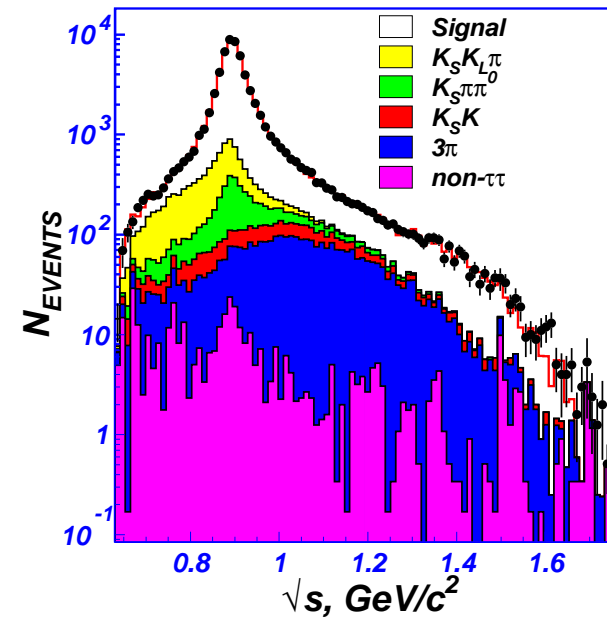
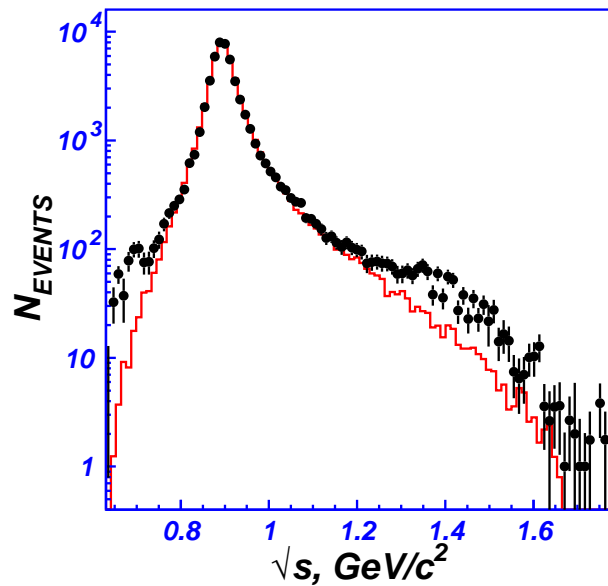
$$\tau^- \rightarrow (K\pi)^- \nu_\tau \text{ на Belle и BaBar}$$


$$\mathcal{B}^{\text{Belle}}(K_S^0 \pi^- \nu_\tau) = (0.404 \pm 0.002 \pm 0.013)\%$$

$$\mathcal{B}^{\text{BaBar}}(K^- \pi^0 \nu_\tau) = (0.416 \pm 0.003 \pm 0.018)\%$$

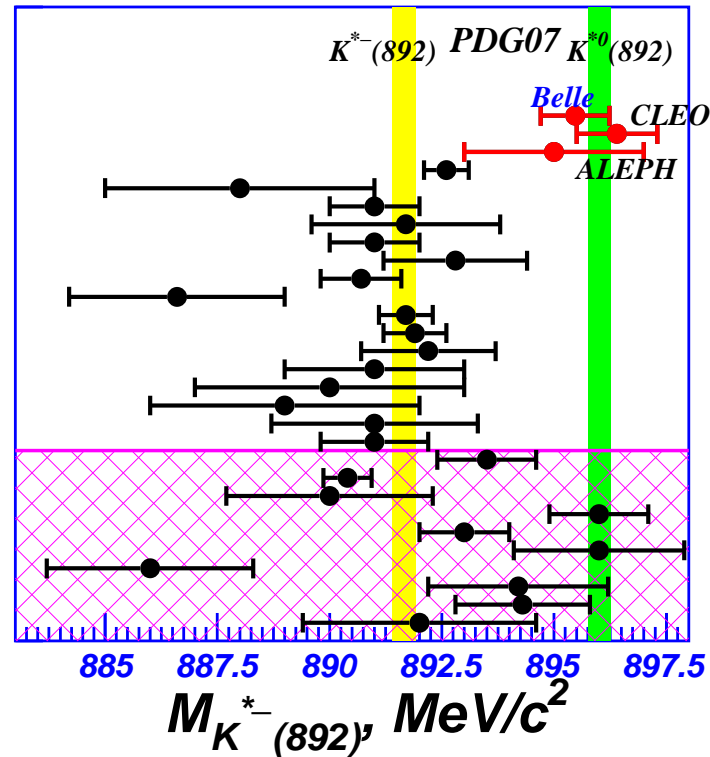
$$\mathcal{B}^{\text{PDG}}(K^- \pi^0 \nu_\tau) = (0.454 \pm 0.030)\%$$

Для обеих мод новые \mathcal{B} согласуются с PDG, но ниже!

Спектр масс $K_S\pi$ на Belle

Спектр $M_{K\pi}$ хорошо описывается в модели,
где $K^*(892)$, $K^*(800)$ (κ) и $K_0^*(1430)$ (or $K^*(1410)$).

Измерение массы и ширины $K^*(892)^0$ на Belle



$$M(K^*(892)^-) = (895.47 \pm 0.20 \pm 0.44 \pm 0.59) \text{ МэВ}$$

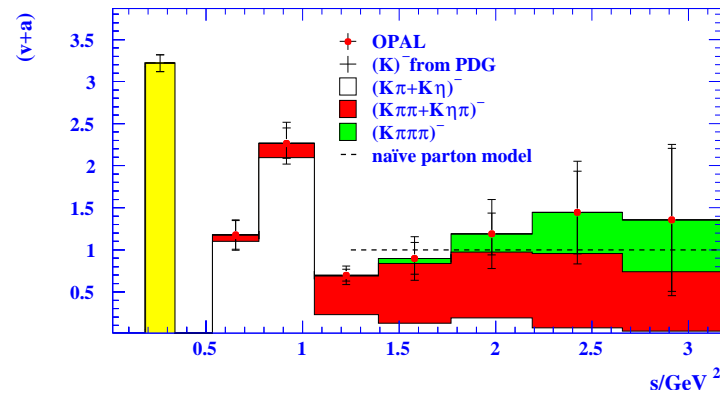
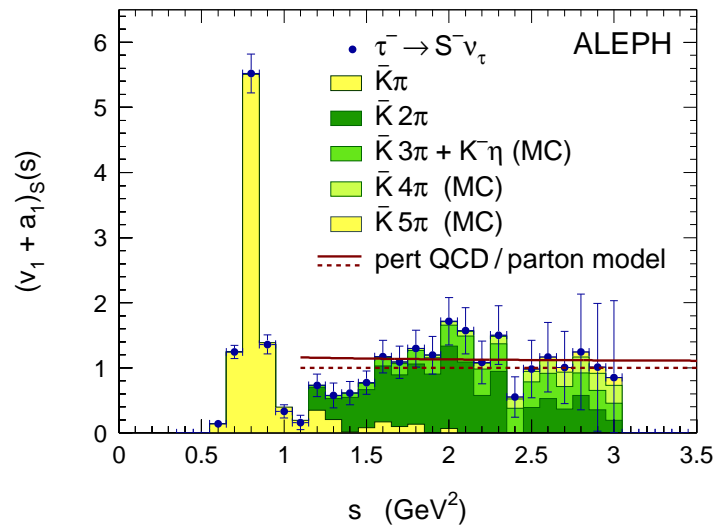
$$\Gamma(K^*(892)^-) = (46.2 \pm 0.6 \pm 1.0 \pm 0.7) \text{ МэВ}$$

$$\tau^- \rightarrow h^- h^+ h^- \nu_\tau \text{ на BaBar и Belle}$$

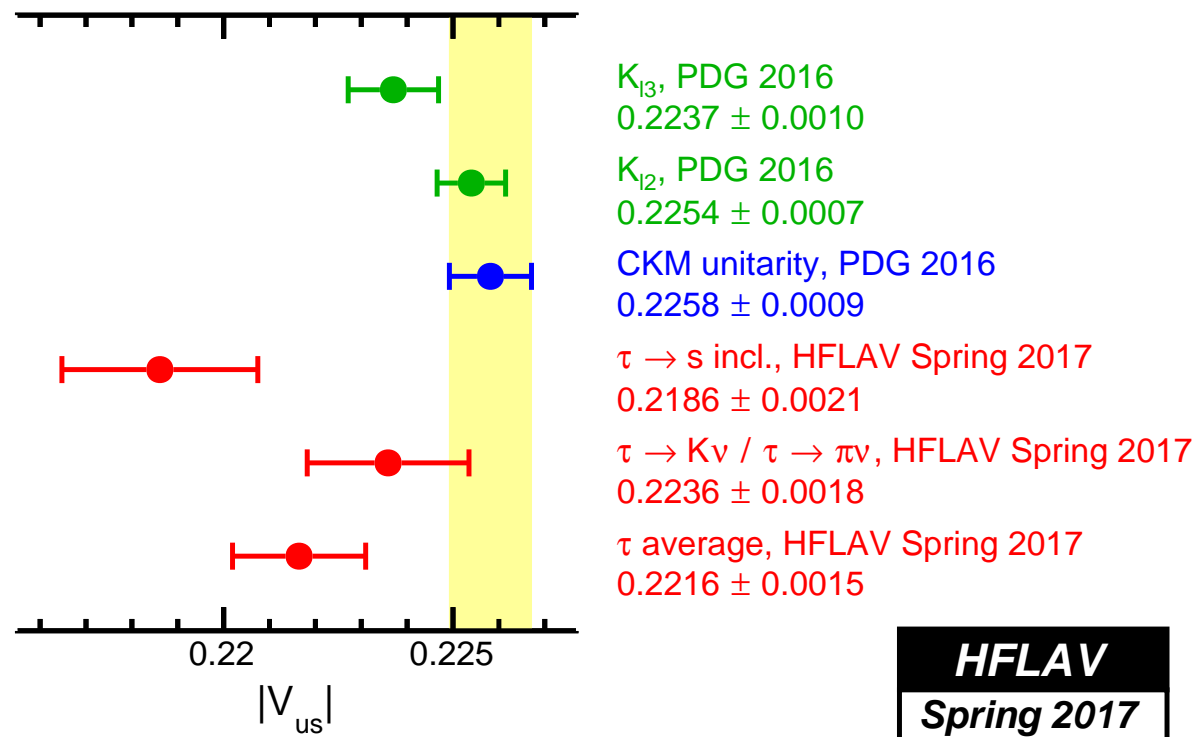
| Мода | BaBar, 342 fb ⁻¹ | Belle, 666 fb ⁻¹ | PDG2006 |
|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| $N_{\text{ev}}, 10^6$ | 1.6 | 8.86 | – |
| $\mathcal{B}(\pi^- \pi^+ \pi^-), 10^{-2}$ | $8.83 \pm 0.01 \pm 0.13$ | $8.42 \pm 0.01 \pm 0.26$ | 9.02 ± 0.08 |
| $N_{\text{ev}}, 10^4$ | 7.0 | 79.4 | – |
| $\mathcal{B}(K^- \pi^+ \pi^-), 10^{-3}$ | $2.73 \pm 0.02 \pm 0.09$ | $3.28 \pm 0.01 \pm 0.17$ | 3.33 ± 0.35 |
| $N_{\text{ev}}, 10^4$ | 1.8 | 10.8 | – |
| $\mathcal{B}(K^- K^+ \pi^-), 10^{-3}$ | $1.346 \pm 0.010 \pm 0.036$ | $1.53 \pm 0.01 \pm 0.05$ | 1.53 ± 0.10 |
| N_{ev} | 275 | 3160 | – |
| $\mathcal{B}(K^- K^+ K^-), 10^{-5}$ | $1.58 \pm 0.13 \pm 0.12$ | $2.62 \pm 0.15 \pm 0.17$ | $< 3.7 \cdot 10^{-5}$ |

Странная спектральная функция

$$a_0(s) = \frac{m_\tau^2}{6|V_{ud}|^2 S_{EW}} \frac{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \pi^- (K^-) \nu_\tau)}{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} \times \frac{dN_A}{N_A ds} \left(1 - \frac{s}{m_\tau^2}\right)^{-2}$$



Определение $|V_{us}|$



Токи 2-го рода в $\tau^- \rightarrow \eta\pi^- \nu_\tau - I$

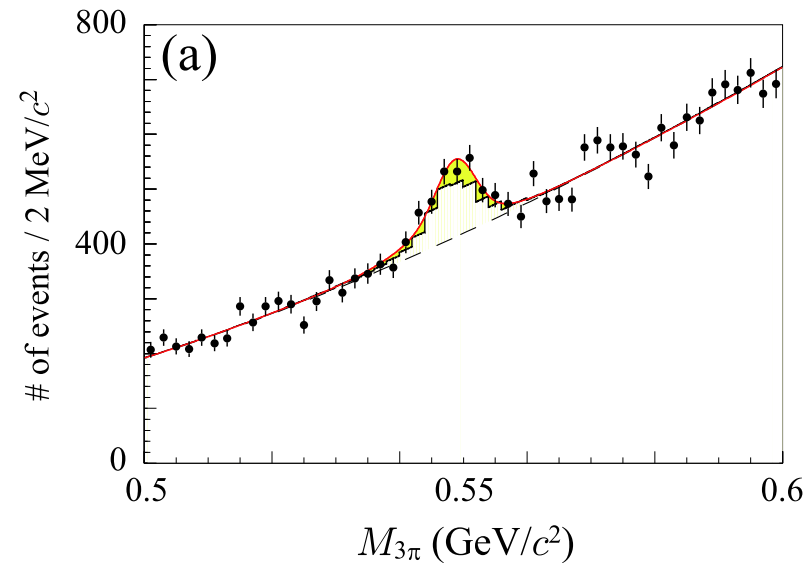
- В СМ токи 2-го рода подавлены: $\propto m_u - m_d$
- У $\tau^- \rightarrow \eta\pi^- \nu_\tau$ $J^{PG} = 0^{+-}$
- В теории:
 $\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \eta\pi^- \nu_\tau) \sim 10^{-6} - 10^{-5}$.
- Фон от $\tau^- \rightarrow \eta\pi^- \pi^0 \nu_\tau$
с $\mathcal{B} = (1.77 \pm 0.24) \cdot 10^{-3}$
- CLEO и ALEPH наблюдали $\tau^- \rightarrow \eta K^- \nu_\tau$:
 $\mathcal{B}_{\text{exp}} = (2.7 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$
по сравнению с $\mathcal{B}_{\text{th}} \sim 1.2 \cdot 10^{-4}$

| Группа | $\mathcal{B}_{95}(\tau^- \rightarrow \eta\pi^- \nu_\tau), 10^{-4}$ |
|-------------|--|
| HRS, 1987 | $510 \pm 100 \pm 120$ |
| CLEO, 1987 | < 100 |
| ARGUS, 1988 | < 90 |
| CLEO, 1992 | < 3.4 |
| CLEO, 1996 | < 1.4 |
| ALEPH, 1997 | < 6.2 |

Распады с η -мезонами на Belle

| Мода | Группа | N_{ev} | \mathcal{B}_{exp} |
|-----------------------------|-------------|----------------|--|
| $\pi^- \pi^0 \eta \nu_\tau$ | Belle, 2008 | 5675 ± 111 | $(1.35 \pm 0.03 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$ |
| | CLEO, 1992 | 125 ± 16 | $(1.7 \pm 0.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$ |
| $K^- \eta \nu_\tau$ | Belle, 2008 | 1545 ± 51 | $(1.58 \pm 0.05 \pm 0.09) \cdot 10^{-4}$ |
| | CLEO, 1996 | 61 ± 14 | $(2.6 \pm 0.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$ |
| $K^- \pi^0 \eta \nu_\tau$ | Belle, 2008 | 241 ± 34 | $(4.6 \pm 1.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-5}$ |
| | CLEO, 1999 | 47 ± 12 | $(17.7 \pm 5.6 \pm 7.1) \cdot 10^{-5}$ |
| $K^{*-} \eta \nu_\tau$ | Belle, 2008 | 119 ± 19 | $(1.30 \pm 0.13 \pm 0.11) \cdot 10^{-4}$ |
| | CLEO, 1999 | 27 ± 6 | $(2.90 \pm 0.80 \pm 0.42) \cdot 10^{-4}$ |
| $K_S \pi^- \eta \nu_\tau$ | Belle, 2008 | 45 ± 8 | $(4.4 \pm 0.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$ |
| | CLEO, 1999 | 15 | $(1.00 \pm 0.35 \pm 0.11) \cdot 10^{-3}$ |

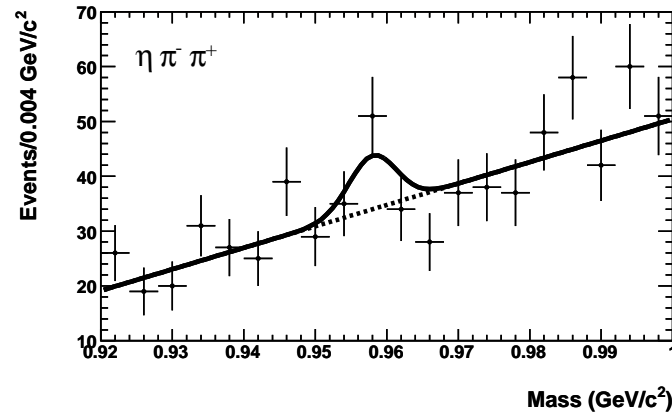
Belle (490 fb^{-1}): K. Inami et al., Phys. Lett. B 672, 209 (2009)

Токи 2-го рода в $\tau^- \rightarrow \eta\pi^- \nu_\tau$ – II

$\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \eta\pi^- \nu_\tau) = (4.4 \pm 1.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-5}$ или 2.4σ эффект,
 соответствующий предел $\mathcal{B} < 7.9 \cdot 10^{-5}$ с 95% CL
 по сравнению с $< 1.4 \cdot 10^{-4}$ на CLEO
 Belle (675 fb^{-1}) К. Hayasaka, EPS-2009

Токи 2-го рода в $\tau^- \rightarrow \eta' \pi^- \nu_\tau$

BaBar



| Группа | $\int Ldt, \text{ фб}^{-1}$ | $\mathcal{B}_{95}(\tau^- \rightarrow \eta' \pi^- \nu_\tau), 10^{-6}$ |
|-------------|-----------------------------|--|
| CLEO, 1997 | 4.7 | < 74 |
| BaBar, 2008 | 384 | < 7.2 |
| Belle, 2009 | 675 | < 7.0 |

В теории $\leq 1.4 \cdot 10^{-6}$

BaBar: В. Aubert et al., Phys. Rev. D77, 112002 (2008)

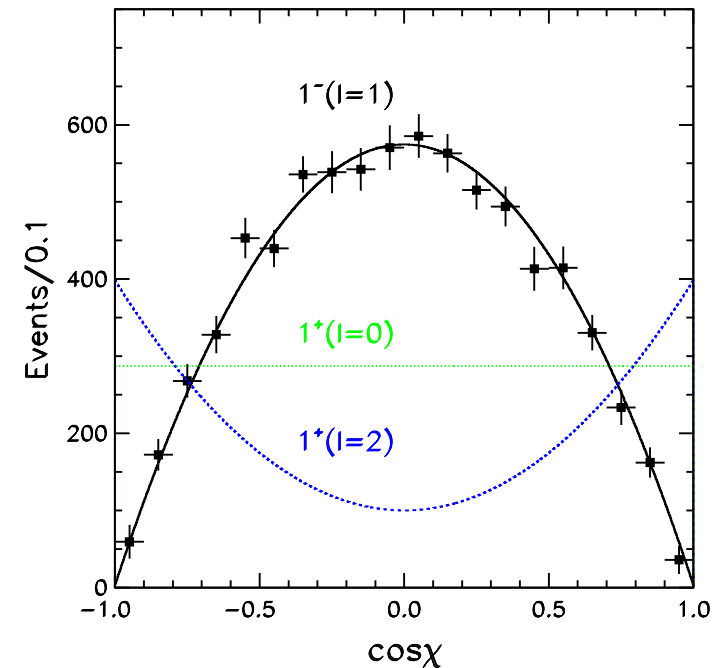
Токи 2-го рода в $\tau^- \rightarrow \omega\pi^- \nu_\tau$

Оба тока возможны:

Токи 1-го рода $J^{PG} = 1^{-+}, l = 1, \mathcal{B} \sim 1.9\%$.

Токи 2-го рода $J^{PG} = 1^{++}, l = 0, 2$.

| Группа | $\mathcal{B}_\omega/\mathcal{B}_\nu$ 95% CL |
|-------------|---|
| ARGUS, 1987 | < 0.5 |
| ALEPH, 1997 | < 0.086 |
| CLEO, 2000 | < 0.064 |
| BaBar, 2009 | < 0.0069 |



$$F(\cos \chi) = N \times \left[\frac{1}{2}\epsilon + \frac{3}{4}(1 - \epsilon)(1 - \cos^2 \chi) \right]$$

BaBar (347 fb^{-1}) V. Aubert et al., Phys. Rev. Lett. 103, 041802 (2009)

Заключение

- Супер-с- τ не может конкурировать с BelleII по числу τ , необходимо искать преимущества в фоне, систематике и т.д.
- Фон заметно отличается (меньшая множественность)
- Кинематика (меньшая энергия)
- Разделение π и K
- Моделирование!!!