

Прецизионные измерения массы τ -лептона

С.И. Эйдельман
(Коллаборации КЕДР и Belle)

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,
Новосибирск

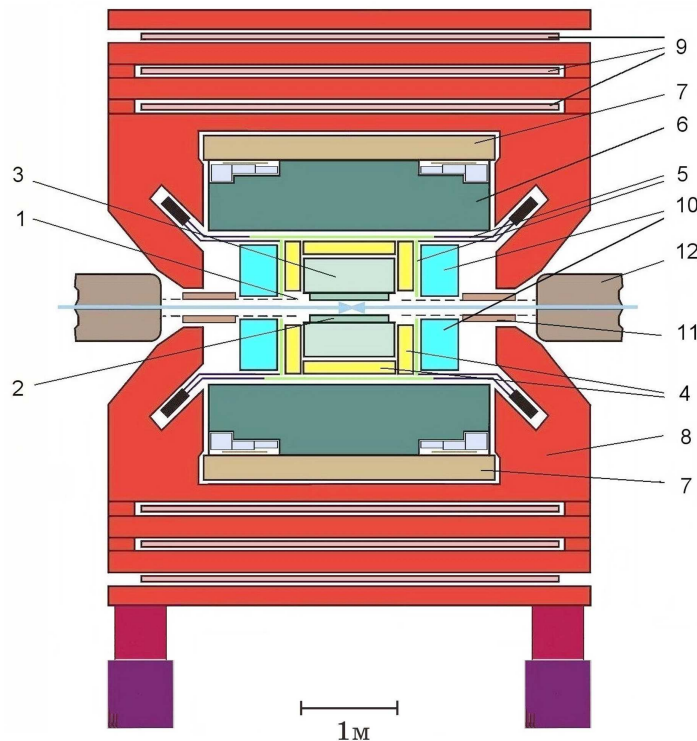
План

1. Лептонная универсальность и m_τ
2. Измерения КЕДР, Belle и BaBar
3. Лептонная универсальность и бранчинги
4. Выводы

Введение

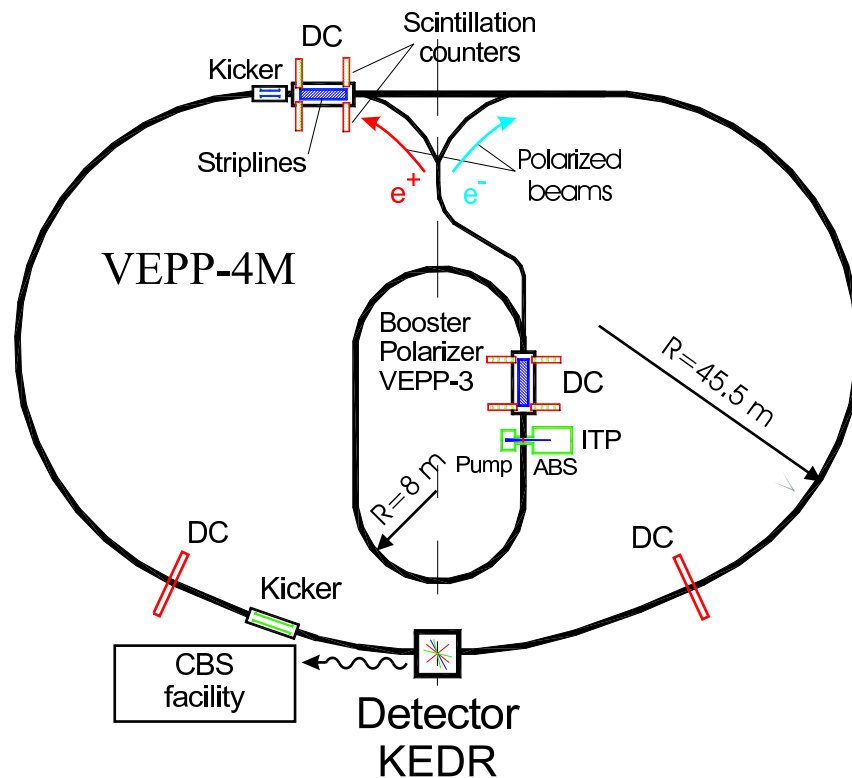
- τ -лептон – один из 6 фундаментальных лептонов (e^- , μ^- , τ^- , ν_e , ν_μ , ν_τ)
- Это тяжелый лептон ($m_\tau \sim 1.8$ ГэВ), распадающийся как в лептоны, так и адроны: в PDG свыше 200 распадов τ
- τ – чистая лаборатория, в начальном состоянии нет адронов, в конечном мало: 85.36% – 1, 14.56% – 3, 10^{-3} – 5 частиц
- Belle и BaBar накопили сотни миллионов $\tau^+\tau^-$ -пар: (сечение рождения $\sigma(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-)=0.92$ нб)
- τ -лептоны – важный инструмент на LHC

Детектор КЕДР



- 1) Vacuum chamber, 2) Vertex detector,
- 3) Drift chamber, 4) Aerogel counters,
- 5) ToF-counters, 6) LKr calorimeter,
- 7) Superconducting coil, 8) Magnet yoke,
- 9) Muon tubes, 10) CsI calorimeter,
- 11) Compensation solenoid,
- 12) VEPP-4M quadrupole

Общая схема ВЭПП-4М



- $\sqrt{s} = 2 - 11 \text{ ГэВ}$
- $L = 2 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при 3.6 ГэВ
- Физическая программа:
Измерение R ,
2 метода прецизионного
измерения энергии пучков,
позволяющие точно измерять
массы D , J/ψ , ψ' ,
 Γ_{ee} , $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma)$,
 $\gamma\gamma$ -физика

PEP-II и детектор BaBar

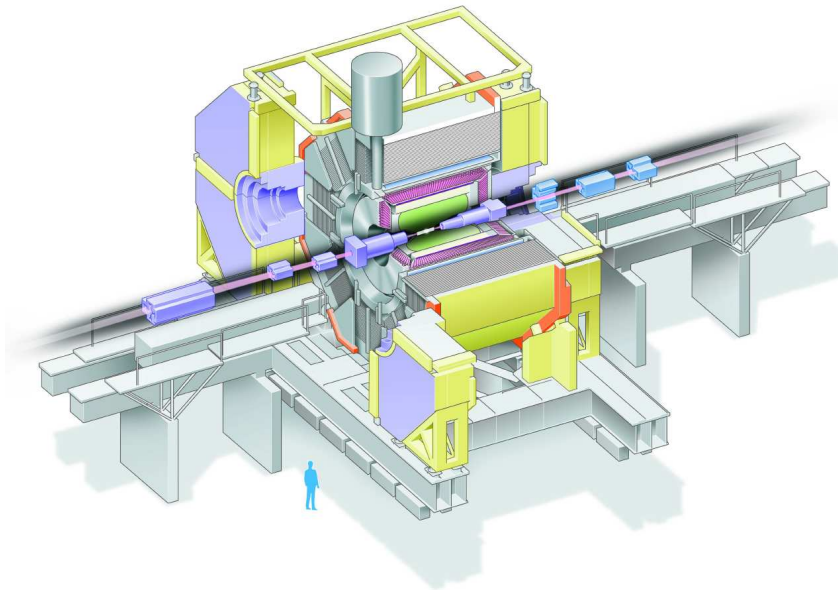
- PEP-II: $3.1 \text{ GeV } e^+ \times 9.0 \text{ GeV } e^-$
- $\mathcal{L}_{\text{max}} = 1.21 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Continuous injection $\rightarrow 0.91 \text{ fb}^{-1}/\text{day}$
- $\int \mathcal{L} dt \approx 516 \text{ fb}^{-1}$ Turned off in April 2008
- BaBar – 600 physicists from 75 Institutes in 10 countries



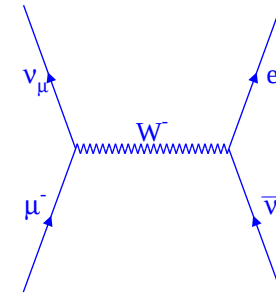
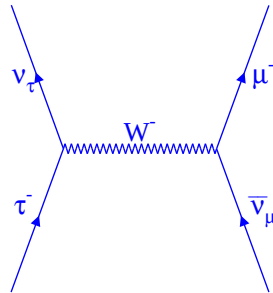
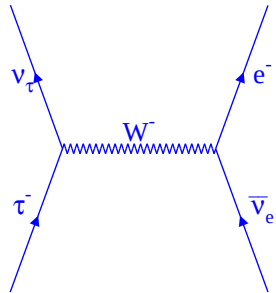
- Sil. vertex tracker
- Drift chamber
- DIRC
- CsI(Tl) calorimeter
- μK_L RPC

КЕКВ и детектор Belle

- КЕКВ: $3.5 \text{ GeV } e^+ \times 8.0 \text{ GeV } e^-$
- $\mathcal{L}_{\text{max}} = 2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Continuous injection $\rightarrow 1.52 \text{ fb}^{-1} / \text{day}$
- $\int \mathcal{L} dt \approx 1014 \text{ fb}^{-1}$ Turned off in June 2010
- Belle – 370 physicists from 60 Institutes in 15 countries
 - Sil.VD: 3(4) layers DSSD
 - CDC : small cells $He + C_2H_6$
 - TOF counters
 - Aerogel CC: $n = 1.015 \sim 1.030$
 - CsI(Tl) $16 X_0$
 - SC solenoid 1.5 T
 - μK_L detection 14-15 layers RPC+Fe



Лептонная универсальность в лептонных распадах – I



$$\Gamma(L \rightarrow l \nu_L \bar{\nu}_l) = \frac{G_L^2 m_L^5}{192\pi^3} F_{\text{cor}}(m_L, m_l)$$

$$F_{\text{cor}}(m_L, m_l) = f(m_l^2/m_L^2) F_W F_{\text{rad}}$$

$$f(x) = 1 - 8x + 8x^3 - x^4 - 12x^2 \ln x$$

$$F_W = 1 + \frac{3}{5} \frac{m_l^2}{m_W^2}, \quad F_{\text{rad}} = 1 + \frac{\alpha(m_L)}{2\pi} \left(\frac{25}{4} - \pi^2 \right)$$

Лептонная универсальность: $G_e = G_\mu = G_\tau = G_F$

Лептонная универсальность в лептонных распадах – II

$$r = \left(\frac{G_\tau}{G_\mu} \right)^2 = \left(\frac{G(\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e)}{G(\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e)} \right)^2 = \left(\frac{m_\mu}{m_\tau} \right)^5 \left(\frac{t_\mu}{t_\tau} \right) \mathcal{B}(\tau \rightarrow e \nu_\tau \bar{\nu}_e) \frac{F_{\text{cor}}(m_\mu, m_e)}{F_{\text{cor}}(m_\tau, m_e)}$$

Поправка	μ	τ
$f(m_e^2/m_L^2)$	0.9998	1.0000
$F_W(m_L)$	1.0000	1.0003
$F_{\text{rad}}(m_L)$	0.9958	0.9957
Всего	0.99558	0.99597

Лептонная универсальность $\Rightarrow r = 1$

Проверка лептонной универсальности в лептонных распадах

$$r = \left(\frac{G_\tau}{G_\mu} \right)^2 = \left(\frac{G(\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e)}{G(\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e)} \right)^2 = \left(\frac{m_\mu}{m_\tau} \right)^5 \left(\frac{t_\mu}{t_\tau} \right) \mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e) \frac{F_{\text{cor}}(m_\mu, m_e)}{F_{\text{cor}}(m_\tau, m_e)}$$

r	t_τ , фс	$\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e)$, %	m_τ , МэВ	КОММЕНТ.
0.9405 ± 0.0249	305.6 ± 6.0 ± 0.0185	17.93 ± 0.26 ± 0.0136	$1784.1^{+2.7}_{-3.6}$ $+0.0071$ -0.0095	PDG, 1992 -2.4σ
0.9999 ± 0.0069	291.0 ± 1.5 ± 0.0052	17.83 ± 0.08 ± 0.0045	$1777.0^{+0.30}_{-0.27}$ ± 0.0008	PDG, 1996 -0.01σ
1.0020 ± 0.0051	290.6 ± 1.1 ± 0.0038	17.84 ± 0.06 ± 0.0034	$1776.99^{+0.29}_{-0.26}$ ± 0.0008	PDG, 2004 $+0.4\sigma$

Два метода измерения m_τ

- Зависимость $\sigma(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-)$ от энергии вблизи порога,
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-) = 86.85 \text{ (нб)}/s(\text{ГэВ}^2) \sqrt{1 - 4m_\tau^2/s} (1 + 2m_\tau^2/s)$$
- Впервые на DELCO в 1978
- Среднемировое значение определяется детектором BES (1996), который улучшил точность на порядок
- Псевдомасса, восстановление инвариантной массы всех адронов в адронных распадах τ
- Впервые на ARGUS в 1992
- Точность улучшена в ~ 5 раз на Belle, 2007 и BaBar, 2009

История измерений m_τ

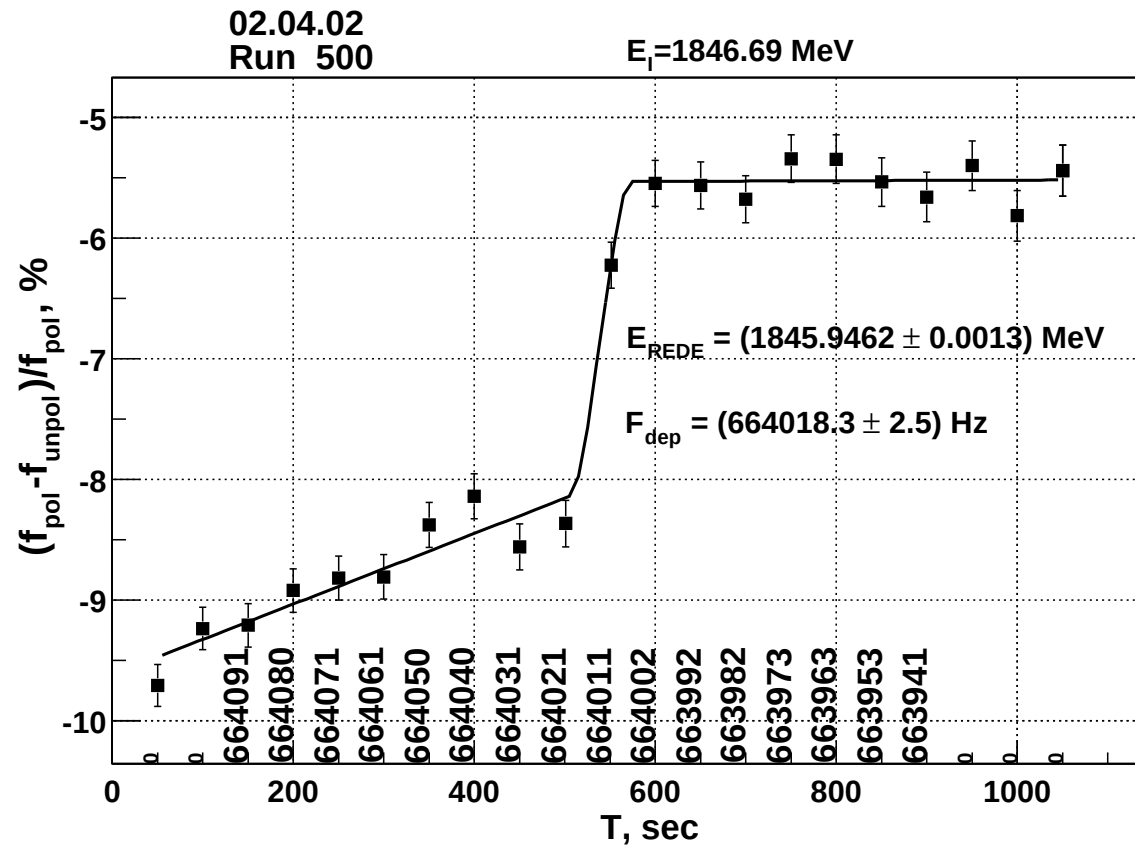
m_τ , ГэВ	N_{ev}	Группа	$\sqrt{s}$, ГэВ	Метод
1783^{+3}_{-4}	692	DELCO, 1978	3.1 – 7.4	σ
$1776.3 \pm 2.4 \pm 1.4$	11k	ARGUS, 1992	9.4 – 10.6	П/М
$1776.96^{+0.18+0.25}_{-0.21-0.17}$	65	BES, 1996	3.54 – 3.57	σ
$1778.2 \pm 0.8 \pm 1.2$	98.5k	CLEO, 1997	10.6	П/М
$1775.1 \pm 1.6 \pm 1.0$	13.3k	OPAL, 2000	~ 90	П/М
$1776.99^{+0.29}_{-0.26}$	—	PDG, 2006	—	

Измерение энергии на ВЭПП-4М и КЕДР

Два метода - резонансная деполяризация (РД) и обратный Комптон (ОКР)

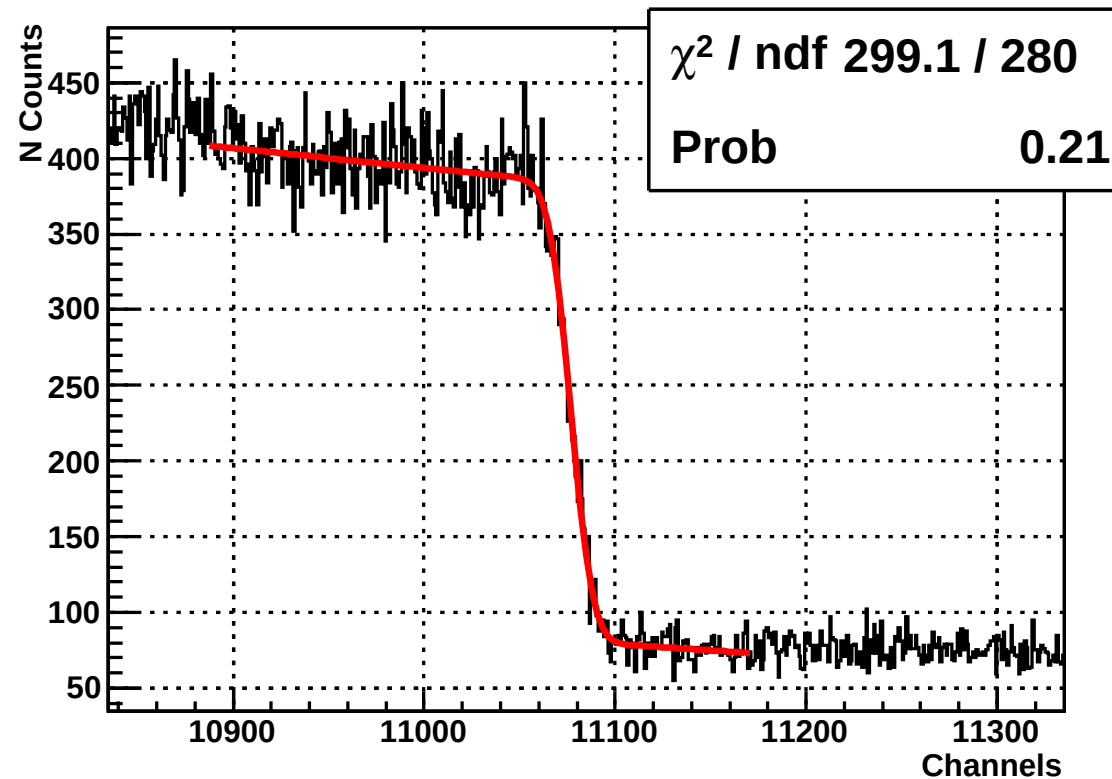
- Резонансная деполяризация предложена в ИЯФ в 1975,
 $\Omega/\omega = 1 + \gamma \cdot \mu' / \mu_0$,
 Ω – частота прецессии спина, ω – частота обращения,
 $\mu'(\mu_0)$ – аномальная (нормальная) часть м.м.э.
- Точность мгновенного измерения $\sim 10^{-6}$,
долгосрочная $(0.5 - 1.7) \cdot 10^{-5}$ (8-30 кэВ)
- Обратный Комптон предложен на BESSY в 1997,
энергия определяется краем спектра фотонов,
можно применять при наборе статистики
- Дает точность 50-70 кэВ на пороге рождения τ

Типичный заход с РД на ВЭПП-4М



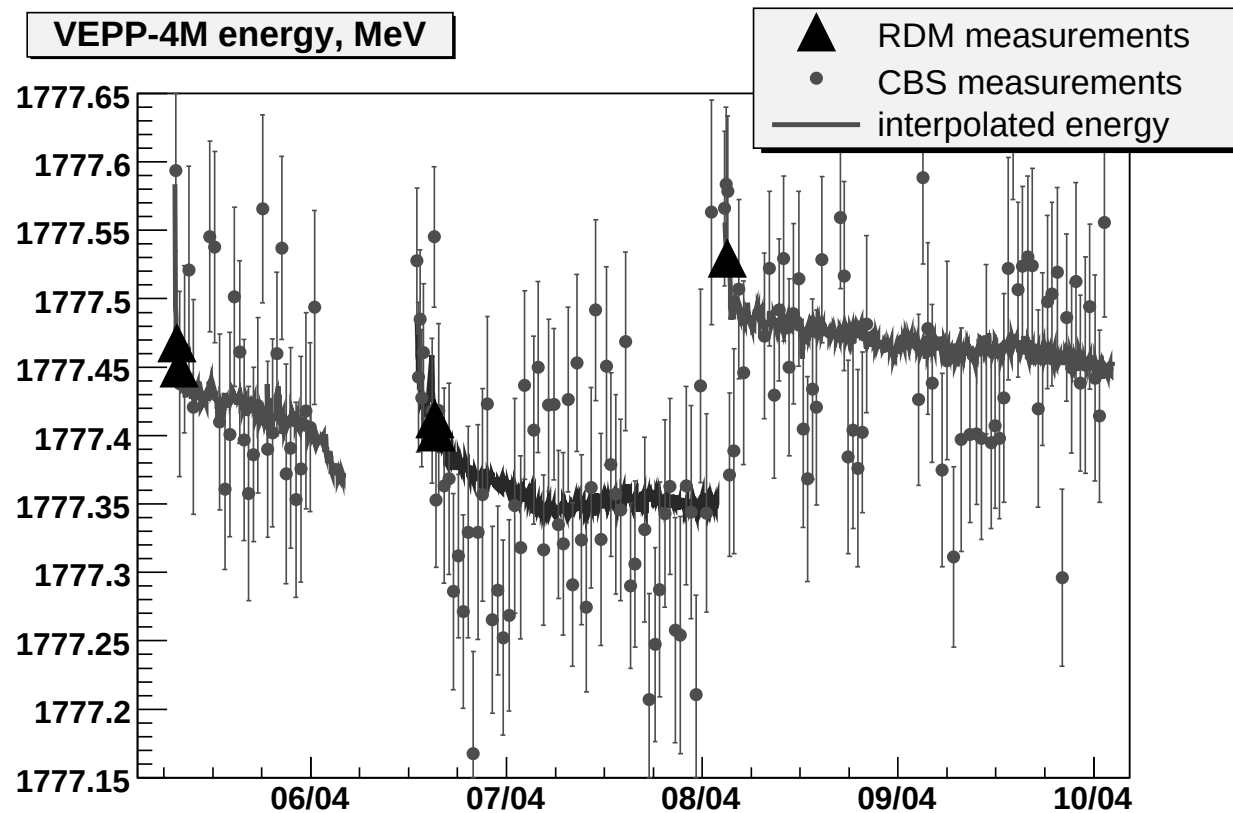
Резонансная деполяризация раз в день с $\sigma_E < 20 \text{ кэВ}$

Типичный край спектра ОКР на ВЭПП-4М

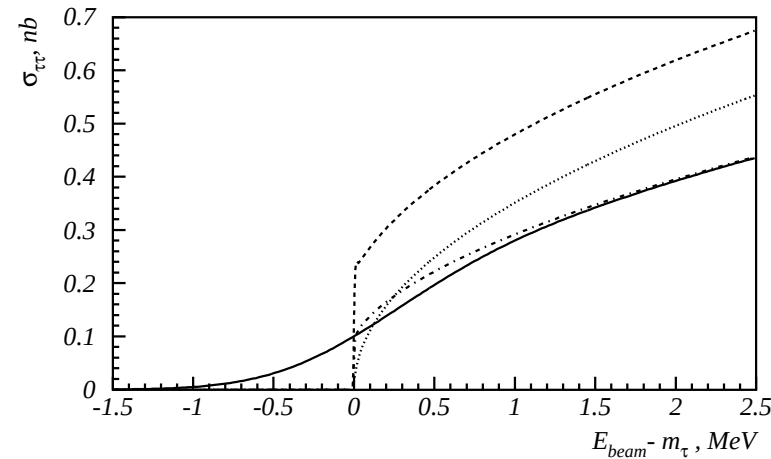


Между РД применяется ОКР с $\sigma_E < 100$ кэВ

Поведение энергии пучка на ВЭПП-4М



При наборе статистики E измеряется по ОКР и интерполяцией

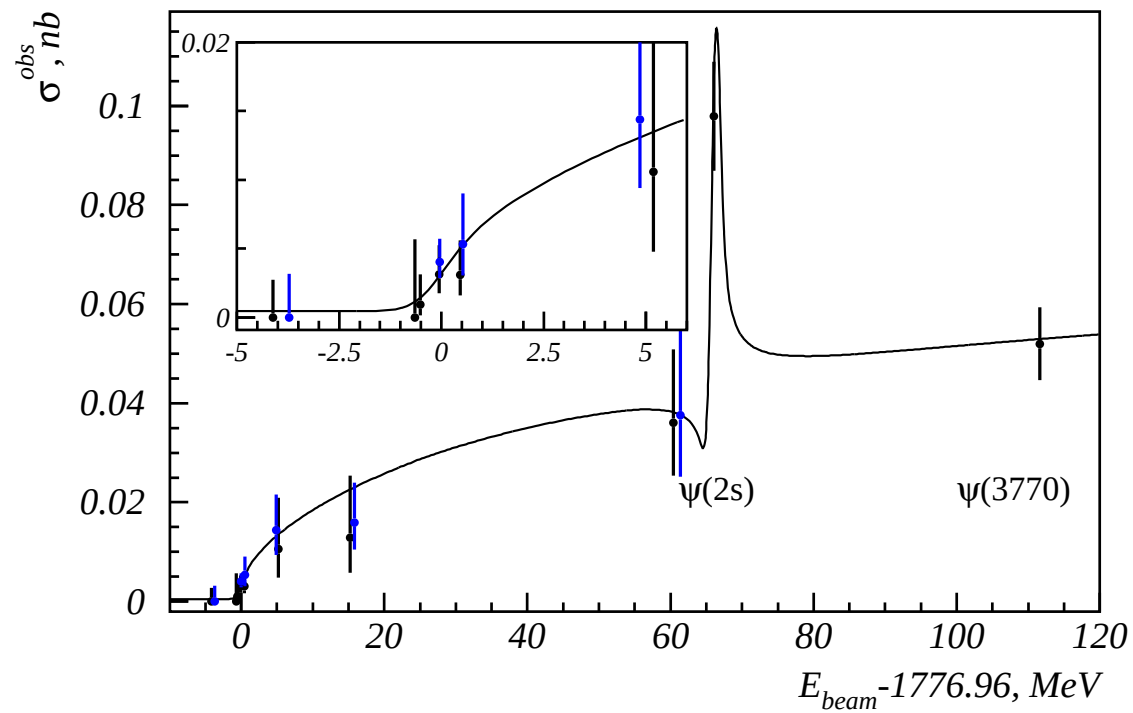
$\sigma(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-)$ вблизи порога


$$\sigma(W) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_W} \int dW' \exp \left\{ -\frac{(W-W')^2}{2\sigma_W^2} \right\} \int dx F(x, W') \sigma_{fs}(W' \sqrt{1-x}),$$

$$F_c(\beta) = (\pi\alpha/\beta)/(1 - \exp(-\pi\alpha/\beta)), \quad \beta = (1 - (2m_\tau/W)^2)^{1/2}$$

Точки – Born, линии – Coulomb, FSR и VP,

пунктир – ISR, непр. – разброс энергии пучков

m_τ на КЕДР: Наблюдаемое $\sigma(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-)$ 

2 сканирования с 6.7 fb^{-1} в 2006 и 8.5 fb^{-1} в 2008

m_τ на КЕДР: итоги сканирования в 2006

Точка	$\langle E \rangle$, МэВ	$\int Ldt$, нб $^{-1}$	$N_{\tau\tau}$	$\sigma_{\tau\tau}^{\text{obs}}$, пб
1	1771.945 ± 0.160	668	0	$0.0_{-0.0}^{+2.8}$
2	1776.408 ± 0.086	1382	1	$0.7_{-0.6}^{+1.7}$
3	1776.896 ± 0.045	1605	6	$3.7_{-1.5}^{+2.2}$
4	1777.419 ± 0.061	1288	4	$3.1_{-1.5}^{+2.5}$
5	1782.103 ± 0.060	283	4	$14.1_{-6.8}^{+11.3}$
6	1792.457 ± 0.102	233	3	$12.9_{-7.1}^{+12.5}$
7	1837.994 ± 0.092	305	14	$45.8_{-12.2}^{+16.0}$
8	1843.040 ± 0.065	807	79	97.9 ± 11.0
9	1888.521 ± 0.228	967	49	50.7 ± 7.2
Всего	Без $\psi(2S)$	6731	81	

$$m_\tau = 1776.81_{-0.23}^{+0.25} \pm 0.15 \text{ МэВ}/c^2$$

m_τ на КЕДР: 2008–2009 (предвар.)

Год	2006	2008
$\int L dt, \text{ пб}^{-1}$	6.7	8.5
N_{ev} на пороге	11	26
$m_\tau, \text{ МэВ}$	$1776.81^{+0.25}_{-0.23} \pm 0.15$	$1776.69^{+0.17}_{-0.19} \pm 0.15$

КЕДР, 2007: В.В. Анашин и др., Письма в ЖЭТФ 85, 347 (2007)

КЕДР, 2009: A.G. Shamov et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 189, 21 (2009)

m_τ на КЕДР: систематика

Источник	σ , кэВ/ c^2
Энергия пучка	35
Эффективность регистрации	120
Точность разброса энергии	20
Зависимость фона от энергии	20
Светимость	80
Изменение разброса энергии	10
Сечение	30
Всего	150

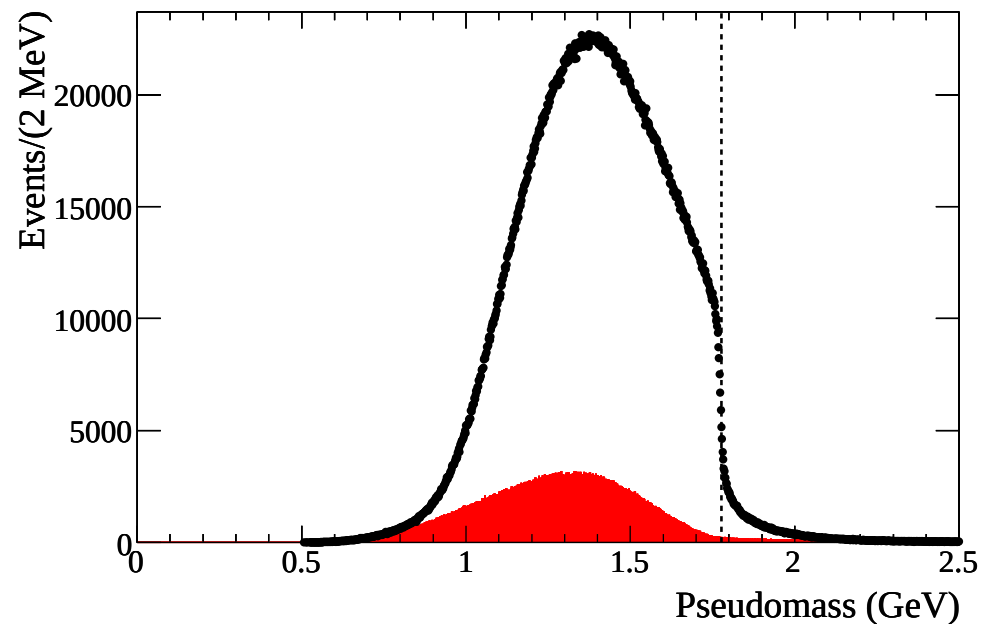
Работа над систематикой продолжается

m_τ на Belle и BaBar – I

В методе псевдомассы используется

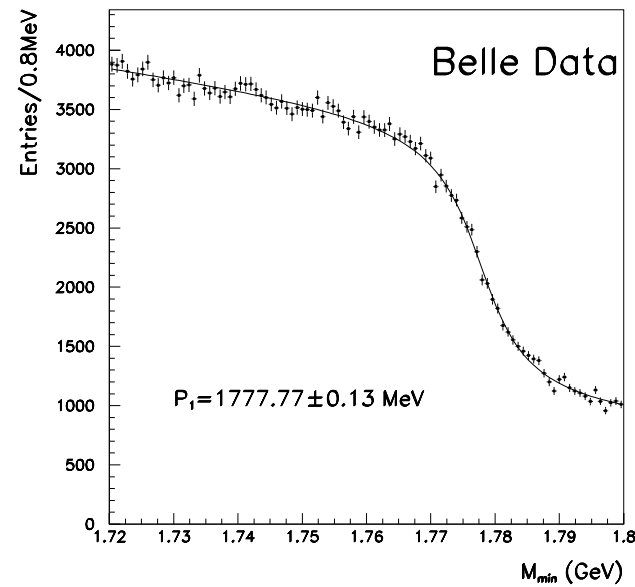
M_p – максимальная инв. масса адронов распада

$$M_\tau^2 \geq M_p^2 = M_h^2 + 2(E_{\text{beam}} - E_h)(E_h - |\vec{p}_h|)$$



$$f(M_p) \sim (p_1 + p_2 M_p) \tan^{-1} (M_p - p_3)/p_4 + p_5 + p_6 M_p$$

Размазывание края спектра и хвост – ISR/FSR и разрешение

m_τ на Belle и BaBar – II

И BaBar, и Belle – $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau + \text{с.с.}$,
большой бранчинг $\sim 9\%$
и хорошая статистика вблизи края

m_τ на Belle и BaBar – III

Итоги измерения на Belle и BaBar

Группа	BaBar	Belle
$\int L dt, \text{ фб}^{-1}$	423	414
$N_{\tau\tau}, 10^6$	388	380
$N_{\text{ev}}, 10^5$	682	580
$M_\tau, \text{ МэВ}$	$1776.68 \pm 0.12 \pm 0.41$	$1776.61 \pm 0.13 \pm 0.35$

BaBar: B. Aubert et al., Phys. Rev. D 80, 092005 (2009)

Belle: K. Belous et al., Phys. Rev. Lett. 99, 011801 (2007)

Систематика m_τ на Belle и BaBar

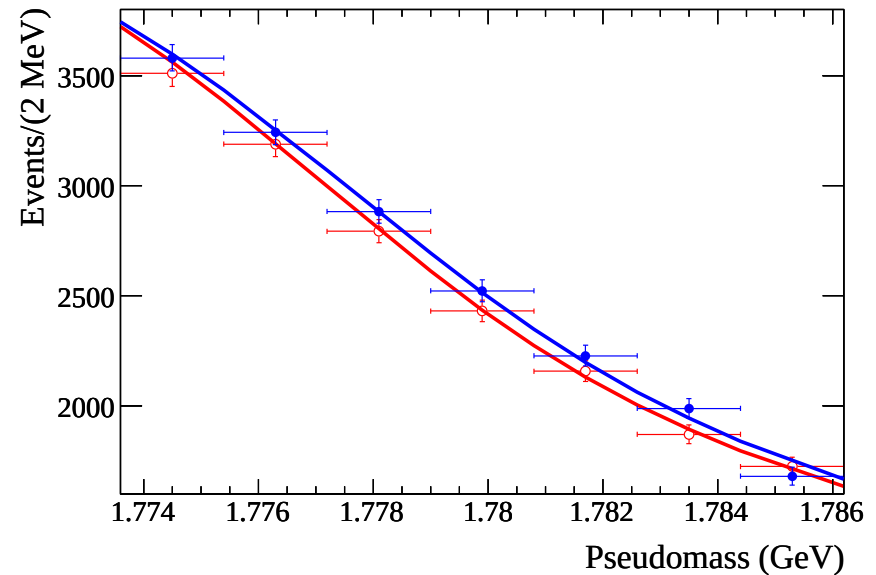
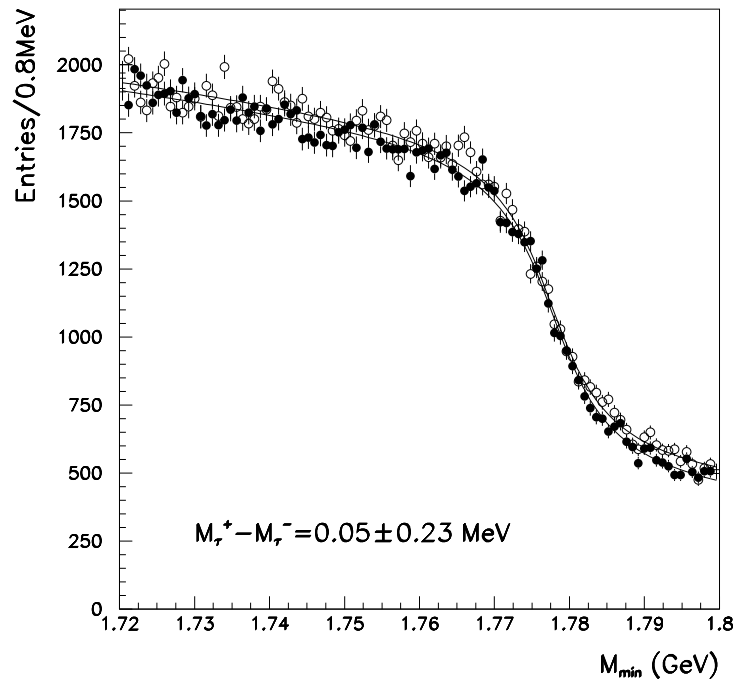
Источник	BaBar	Belle
Энергия пучков и восстановление $ p $	0.40	0.26
Моделирование ($\tau \rightarrow 3\pi\nu_\tau$)	0.05	0.02
МК статистика	0.05	0.14
Диапазон подгонки	0.05	0.04
Параметризация	0.03	0.18
Разрешение по импульсу	Пренебр.	0.02
Фон	Пренебр.	0.01
Всего	0.41	0.35

Belle K. Belous et al., Phys. Rev. Lett. 99, 011801 (2007)

BaBar B. Aubert et al., Phys. Rev. D 80, 092005 (2009)

Тест СРТ по m_{τ^+} и m_{τ^-} – I

В методе псевдомассы m_{τ^+} и m_{τ^-} измеряются отдельно
и можно определить $\Delta m = m_{\tau^+} - m_{\tau^-}$



Belle: $\Delta m = 0.05 \pm 0.23 \pm 0.14 \text{ MeV}$

BaBar: $\Delta m = -0.61 \pm 0.23 \pm 0.06 \text{ MeV}$

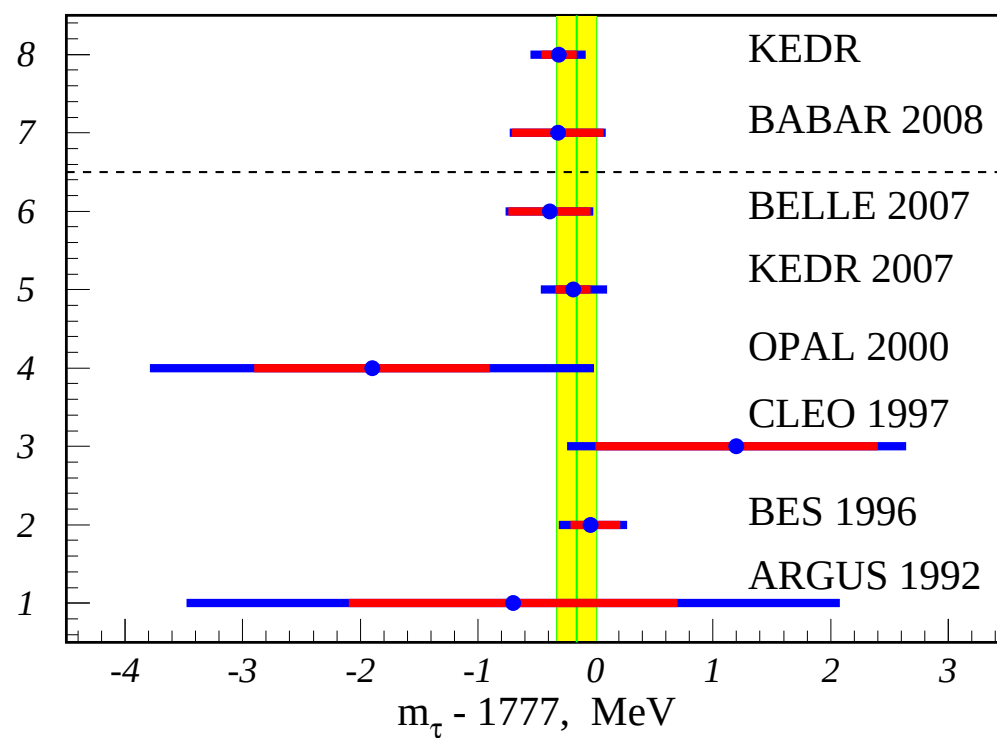
Тест СРТ по m_{τ^+} и m_{τ^-} – II

Группа	OPAL, 2000	Belle, 2007	BaBar, 2009
$N_{\tau^+\tau^-}, 10^6$	0.16	380	388
$\Delta m, \text{МэВ}$	0.0 ± 3.2	0.05 ± 0.27	-0.61 ± 0.24
$\Delta m/m_\tau, 10^{-4}$	0.0 ± 18.0	0.3 ± 1.5	-3.4 ± 1.4
$\Delta m/m_\tau, 10^{-4} \text{ } 90\%CL$	< 30.0	< 2.8	< 5.5

Вероятность флуктуации на BaBar 1.2%

Прогресс измерений m_τ – I

Группа	m_τ , МэВ
BES, 1996	$1776.96^{+0.18+0.25}_{-0.21-0.17}$
PDG, 2006	$1776.99^{+0.29}_{-0.26}$
KEDR, 2007	$1776.81^{+0.25}_{-0.23} \pm 0.15$
Belle, 2006	$1776.61 \pm 0.13 \pm 0.35$
PDG, 2008	1776.84 ± 0.17
BaBar, 2008	$1776.68 \pm 0.12 \pm 0.41$
PDG, 2010	1776.82 ± 0.16
KEDR, 2009	$1776.69^{+0.17}_{-0.19} \pm 0.15$

Прогресс измерений m_τ – II

Нужно ли уточнение m_τ ?

- Массы лептонов – фундаментальные константы и должны быть измерены с высокой точностью

Частица	Масса, МэВ	σ_m/m
e	$0.510998910 \pm 0.000000013$	$2.5 \cdot 10^{-8}$
μ	$105.6583668 \pm 0.0000038$	$3.6 \cdot 10^{-8}$
τ	1776.82 ± 0.16	$9.0 \cdot 10^{-5}$

- В тесты лептонной универсальности входит m_l^5 , в тесты Новой Физики – m_l^2
- КЭД член в $(g - 2)_\mu$ чувств. к m_τ через 2-петл. член
- формула Койде, 1981 (чистая нумерология?)

$$\frac{(\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau})^2}{(m_e + m_\mu + m_\tau)} = 1.4999973_{-0.0000304}^{+0.0000395}$$

Лептонная универсальность и бранчинги – I

Три недавних измерения BaBar (467 фб^{-1}):

Отношение	BaBar	PDG-08
$\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau) / \mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$	$0.9796 \pm 0.0016 \pm 0.0036$	0.9725 ± 0.0039
$\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau) / \mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$	$0.5945 \pm 0.0014 \pm 0.0061$	0.6076 ± 0.0061
$\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow K^- \nu_\tau) / \mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$	$0.03882 \pm 0.00032 \pm 0.00057$	0.0384 ± 0.0013

Распад	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	$\pi^- \nu_\tau$	$K^- \nu_\tau$
$N_{\text{ev}}, 10^3$	884	731	369	25

$$\left(\frac{G_\mu}{G_e} \right)^2 = \frac{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)}{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} \frac{f(m_e^2/m_\tau^2)}{f(m_\mu^2/m_\tau^2)},$$

где $f(x) = 1 - 8x + 8x^3 - x^4 - 12x^2 \log x$, $m_\nu = 0$.

$$|G_\mu/G_e| = 1.0036 \pm 0.0029,$$

B. Aubert et al., Phys. Rev. Lett. 105, 051602 (2010)

Лептонная универсальность и бранчинги – II

$$\left(\frac{G_\tau}{G_\mu}\right)^2 = \frac{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau)}{\mathcal{B}(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} \frac{2m_\pi m_\mu^2 \tau_\pi}{\delta_{\tau^- \rightarrow \pi^- \nu} / \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu} m_\tau^3 \tau_\tau} \left(\frac{1 - m_\mu^2/m_\pi^2}{1 - m_\pi^2/m_\tau^2}\right)^2,$$

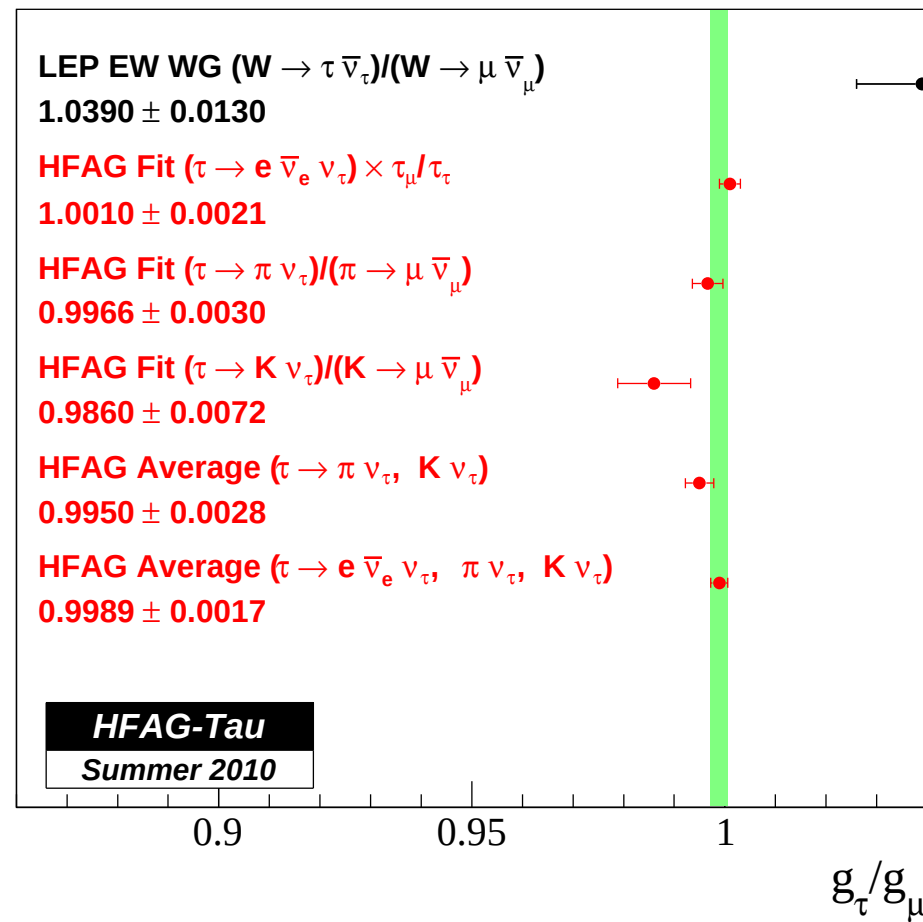
$$\left(\frac{G_\tau}{G_\mu}\right)^2 = \frac{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow K^- \nu_\tau)}{\mathcal{B}(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} \frac{2m_K m_\mu^2 \tau_K}{\delta_{\tau^- \rightarrow K^- \nu} / K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu} m_\tau^3 \tau_\tau} \left(\frac{1 - m_\mu^2/m_K^2}{1 - m_K^2/m_\tau^2}\right)^2,$$

где рад. поправки

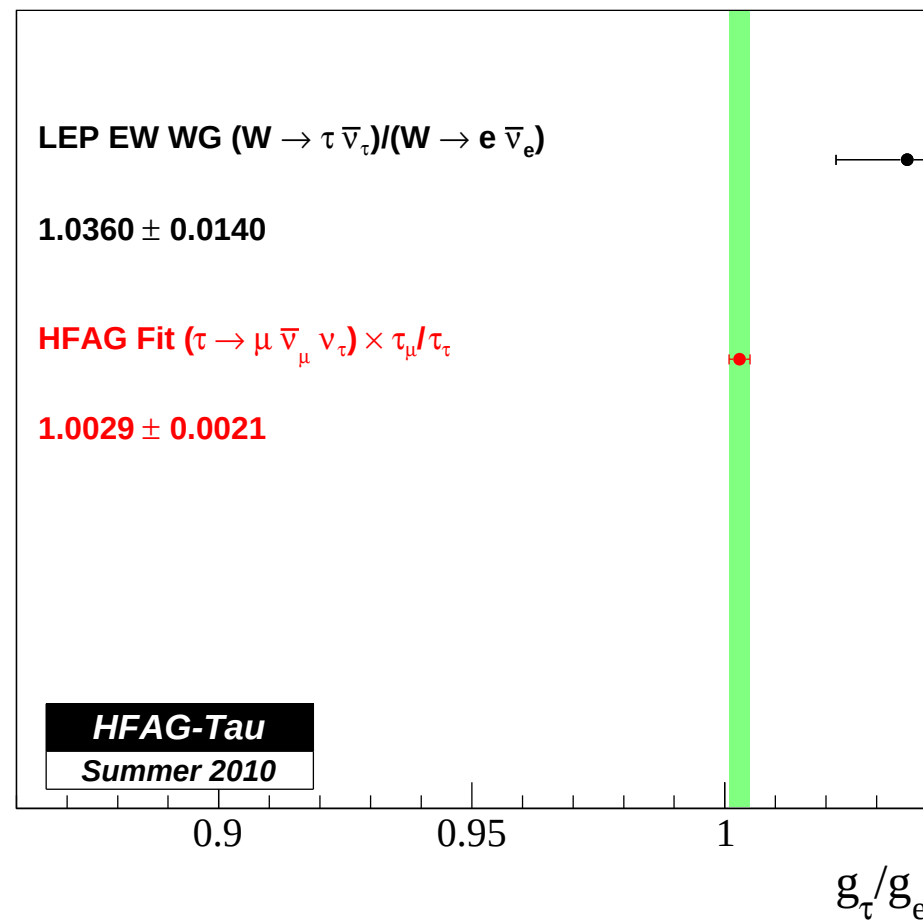
$$\delta_{\tau^- \rightarrow \pi^- \nu} / \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu} = 1.0016 \pm 0.0014 \text{ и } \delta_{\tau^- \rightarrow K^- \nu} / K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu} = 1.0090 \pm 0.0022.$$

$$|G_\tau/G_\mu| = 0.9859 \pm 0.0057 (0.9836 \pm 0.0087) \text{ для } \pi \text{ (} K \text{)}.$$

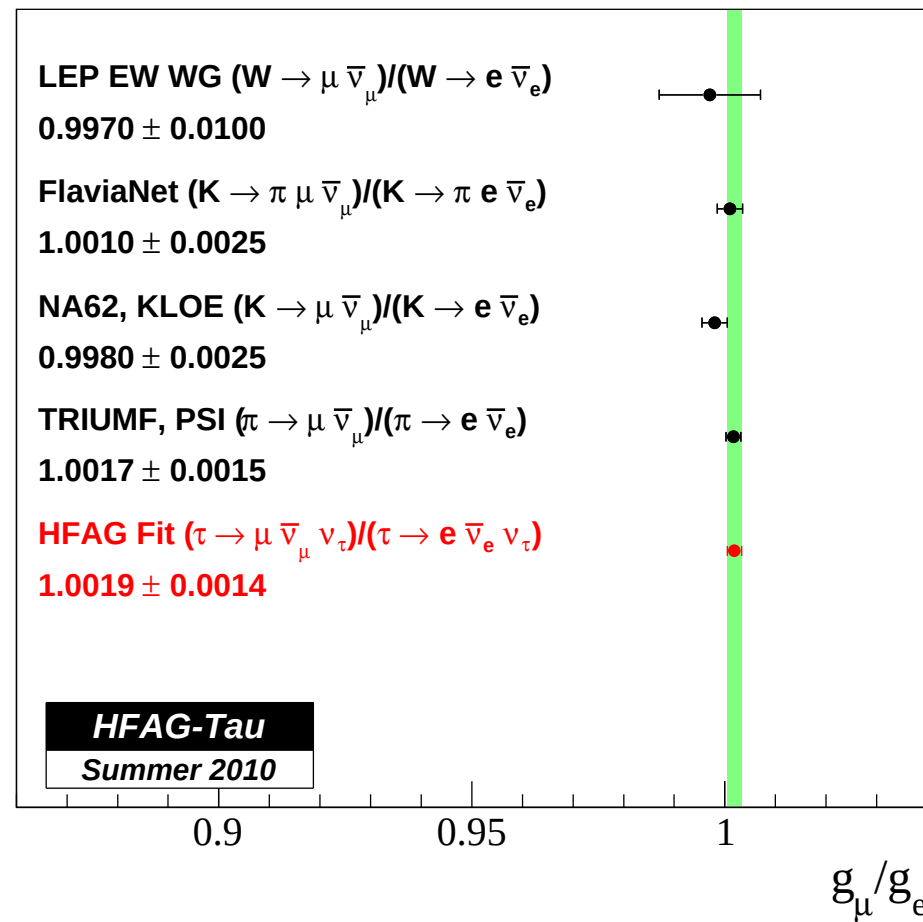
Лептонная универсальность – g_τ/g_μ



Лептонная универсальность – g_τ/g_e



Лептонная универсальность – g_μ/g_e



Выводы

- Заметное улучшение точности m_τ на КЕДР, Belle и BaBar
- Новые измерения согласуются и подтверждают низкое значение, полученное на BES
- Новое среднемировое значение m_τ в 2 раза точнее
- Улучшена точность $|G_\tau/G_\mu|$, но прогресс требует уточнения t_τ и $\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e)$
- Дальнейший прогресс точности m_τ – BES и Супер- B -фабрики
- Улучшена точность проверки CPT
- Тесты лепт. универсальности по τ среди самых точных

Backup

Resonant Depolarization – I

Usual NMR based absolute energy determination – $3 \cdot 10^{-4}$

Resonant depolarization suggested at BINP in 1975
gives at least an order of magnitude better precision

In a storage ring with a flat orbit:

$$\Omega/\omega_0 = 1 + \gamma \cdot \mu'/\mu_0,$$

Ω – spin precession frequency, ω_0 – revolution frequency,
 μ'/μ_0 – the ratio of the anomalous (normal) parts of emm known with an
accuracy of 10^{-9}

The average ω_0 is determined by the RF frequency of the guiding field and can be
set and determined with high accuracy

Ω is measured at the moment of depolarization by the external electromagnetic
field with a frequency ω_d :

$$\omega_d \pm \Omega = k\omega_0$$

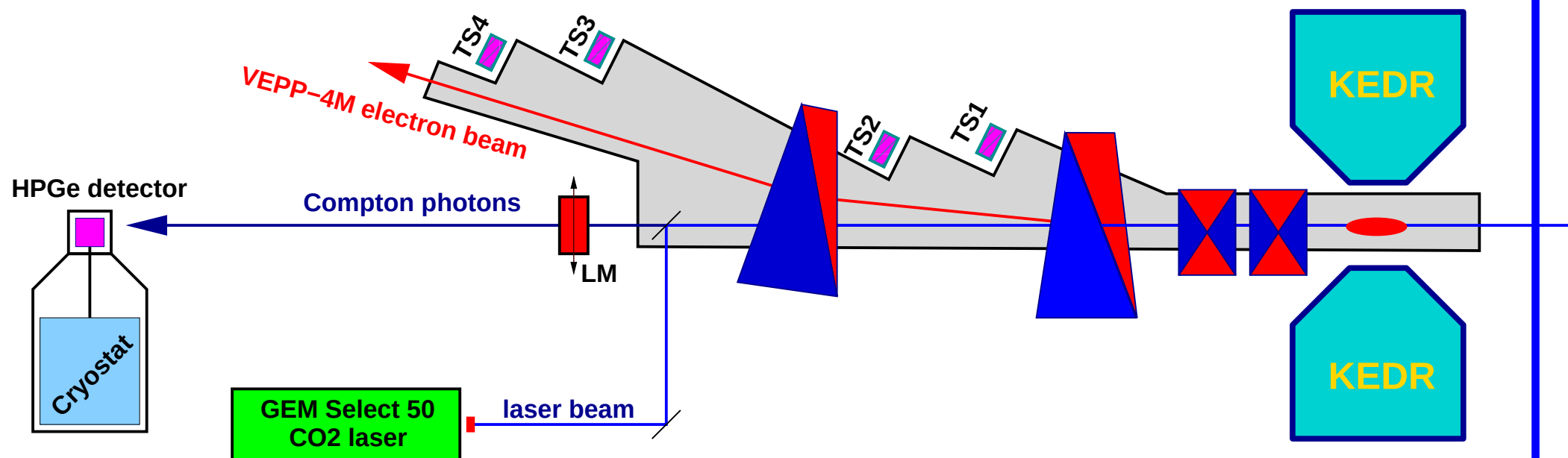
Resonant Depolarization – II

Since 1975 has been successfully used
 to determine masses of various particles: $K^\pm$, ω , ϕ , J/ψ , $\psi(2S)$, $\Upsilon(3S)$ at BINP,
 $\Upsilon(1S)$ at BINP and Cornell, $\Upsilon(2S)$ at BINP and DESY, Z at CERN
 Also used at various SR facilities

State	Mass, MeV/ c^2	$\Delta m/m$	Factor
ϕ	1019.455 ± 0.020	$2.0 \cdot 10^{-5}$	25
J/ψ	3096.916 ± 0.011	$3.6 \cdot 10^{-6}$	90
$\Upsilon(1S)$	9460.30 ± 0.26	$2.7 \cdot 10^{-5}$	50
Z	91187.6 ± 2.1	$2.3 \cdot 10^{-5}$	60

Compton Backscattering Monitor

Realized at BESSY-I in 1987



Spectrum of CBS Photons with Calibration Lines

