

Предсказание для $(g - 2)/2$ мюона в СМ

Семен Эйдельман

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

План

1. КЭД и электрослабые вклады
2. Новые данные по e^+e^- и LO адронный вклад
3. Перспективы
4. Выводы

Аномальный магнитный момент мюона

$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m} \vec{s}, \quad a = (g - 2)/2.$$

Для точечных дираковских частиц $g = 2$,
эффекты высшего порядка или новой физики $\Rightarrow g \neq 2$

Любое значимое отличие a_{μ}^{exp} от a_{μ}^{th} указывает на
Новую физику вне Стандартной Модели

a_{μ} более чувствительно к Новой Физике, чем a_e :
выигрыш $\sim (m_{\mu}/m_e)^2 \approx 4.3 \cdot 10^4$.

$$a_{\mu}^{\text{th}} = a_{\mu}^{\text{SM}} + a_{\mu}^{\text{NP}}, \quad a_{\mu}^{\text{SM}} = a_{\mu}^{\text{QED}} + a_{\mu}^{\text{EW}} + a_{\mu}^{\text{had}}.$$

Экспериментальный статус a_l

$$a_e = 1159652180.73(28) \times 10^{-12} \quad 0.24 \times 10^{-9}$$

D. Hanneke et al., PRL 100, 120801 (2008)

Тест КЭД или определение α

$$a_\mu = 116592080(63) \times 10^{-11} \quad 0.54 \times 10^{-6}$$

G.W. Bennett et al. (E821), PRD 73, 072003 (2006)

Чувствительный тест Стандартной Модели

$$a_\tau = -0.018(17) \quad \text{or} \quad -0.052 < a_\tau < 0.013 \quad 95\%CL$$

J. Abdallah et al. (DELPHI), EPJ C 35, 159 (2004)

Теория: $117721(5) \times 10^{-8}$, SE, M. Passera, MPL A 22, 159 (2007)

Вклад КЭД a_μ^{QED}

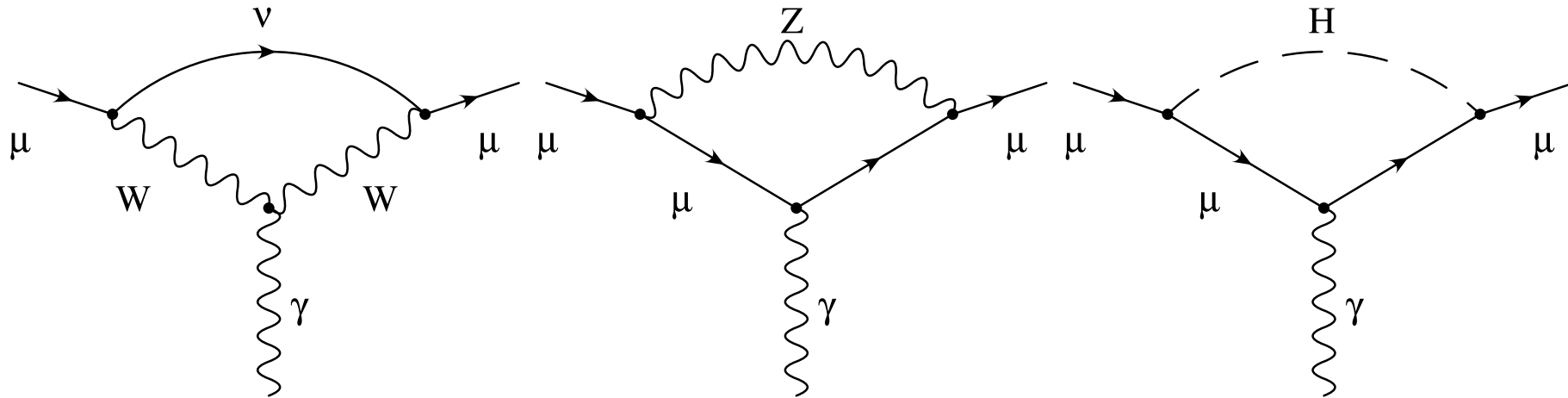
$$\begin{aligned}
 a_\mu^{\text{QED}} \cdot 10^{10} = \Sigma C_i \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^i = & \quad 11614097.3 \text{ (1-петл.)} & \quad 1 \text{ диаграмма} \\
 + & \quad 41321.8 \text{ (2-петл.)} & \quad 9 \\
 + & \quad 3014.2 \text{ (3-петл.)} & \quad > 100 \\
 + & \quad 38.1 \text{ (4-петл.)} & \quad > 1000 \\
 + & \quad 0.4 \text{ (5-петл.)} & \quad > 20000
 \end{aligned}$$

α^3 члены известны аналитически (S. Laporta, E. Remiddi, 1993),
 α^4 члены – численно (Т. Kinoshita et al., 2003-2008),
 α^5 частично (S. Karshenboim, 1993; ТК et al., 2005,2007; A.L. Kataev, 2006,
 К. Chetyrkin et al., 2008):

$$\alpha^{-1} = 137.035999084(51), \quad a_\mu^{\text{QED}} = (116584718.09 \pm 0.14 \pm 0.04) \cdot 10^{-11}.$$

Неопределенности: а/ $\mathcal{O}(\alpha^5)$, б/ α

Электрослабый вклад a_μ^{EW}



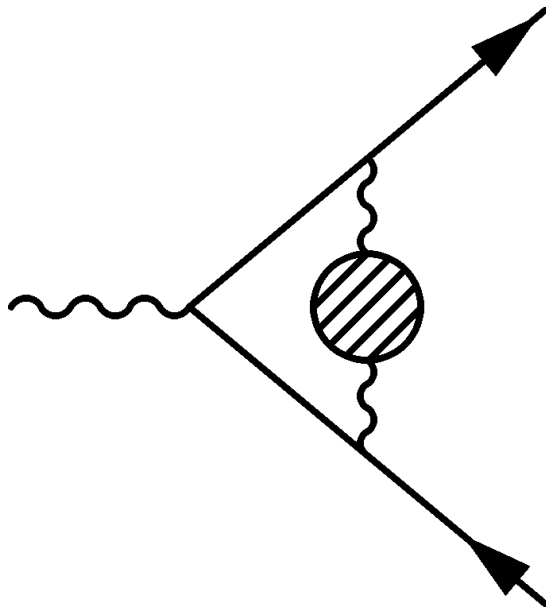
Однопетлевые электрослабые вклады

Авторы	Год	$a_\mu^{\text{EW}}, 10^{-10}$
5 групп	1972	19.5
A. Czarnecki et al.	1996	15.2 ± 0.4
A. Czarnecki et al.	2002	$15.4 \pm 0.1 \pm 0.2$

Ошибки: а/ адр. петли, б/ M_H, M_t , 3-петл. эффекты

Адронный вклад a_μ^{had}

$$a_\mu^{\text{had}} = a_\mu^{\text{had,LO}} + a_\mu^{\text{had,HO}} + a_\mu^{\text{had,LBL}}$$



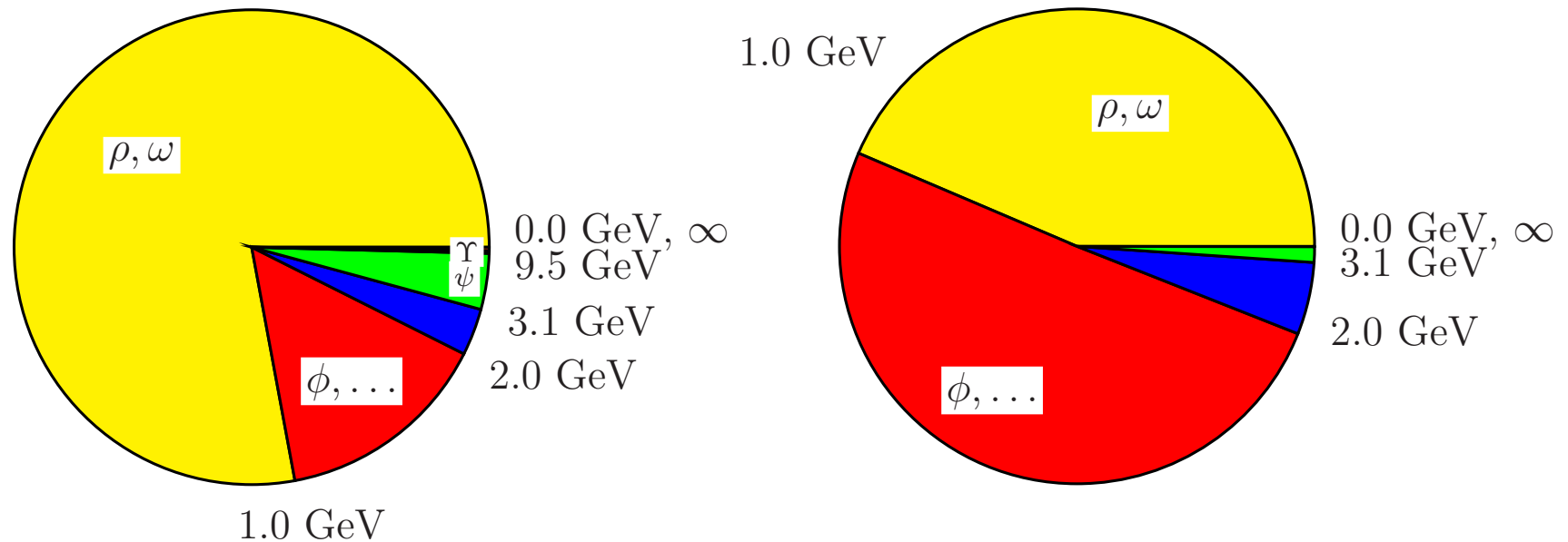
$$a_\mu^{\text{had,LO}} = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi} \right)^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds \frac{R(s) \hat{K}(s)}{s^2},$$

C. Bouchiat, L. Michel, Bouchiat, 1961;
M. Gourdin, E. de Rafael, 1969

$$R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)},$$

$\hat{K}(s)$ растёт от 0.63 at $s = 4m_\pi^2$ до 1 при $s \rightarrow \infty$,
 $1/s^2$ подчеркивает роль низких энергий, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$.
 $a_\mu^{\text{had,LO}} \sim 700 \cdot 10^{-10} \Rightarrow$ Нужна точность лучше 1%!

Вклады различных энергий в $a_{\mu}^{\text{had,LO}}$



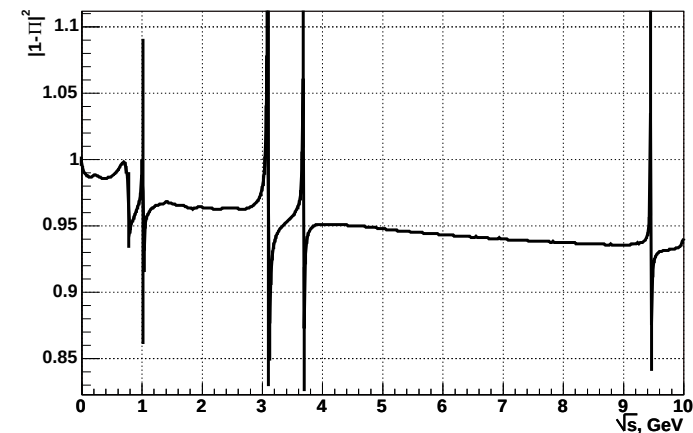
Свыше 72% of $a_{\mu}^{\text{had,LO}}$ от $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и
свыше 90% от энергий ниже 2 ГэВ

Как измеряют $R(s)$?

- $\sqrt{s} < 2$ ГэВ – эксклюзив
($\pi^+\pi^-$, $\pi^+\pi^-\pi^0$, ..., $K\bar{K}$, ...)
- Невидимые (малые σ , незарег.) конечные сост.
- Выше 2 ГэВ – R
(все адронные события)
- Рад. попр. нач.(ISR),
поляр. вакуума (VP),
кон. фотоны (FSR):
М. Drees, К. Hikasa, 1990
- Сканирование или ISR

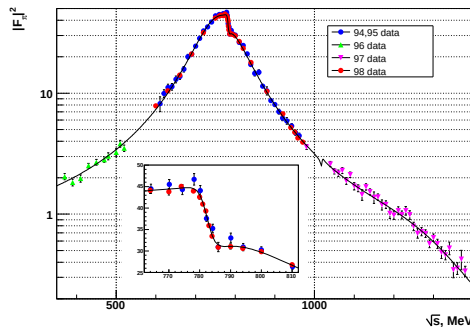
$$\sigma_{\text{dr}} = \frac{N}{\int L dt \varepsilon (1 + \delta_{\text{ISR}})}$$

$$\sigma_{\text{bare}} = \sigma_{\text{dr}} |1 - \Pi(s)|^2 (1 + \delta_{\text{FSR}})$$



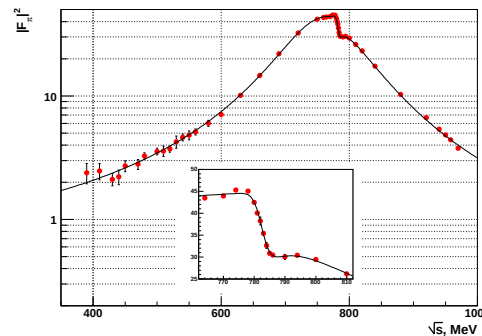
$$|1 - \Pi(s)|^2$$

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \text{ (CMD-2, SND и KLOE)}$$



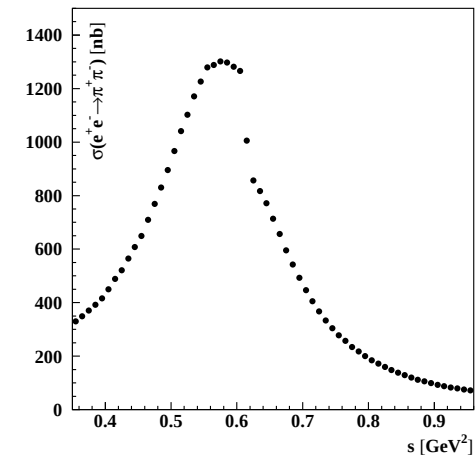
CMD-2, скан.: $\sim 9 \cdot 10^5$ ev.

2E, MeV	$\sigma, \%$
370-520	0.7
600-970	0.6-0.8
1040-1380	1.3-4.2



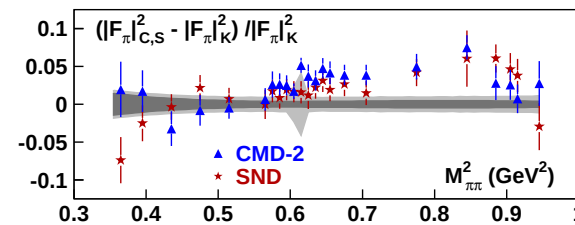
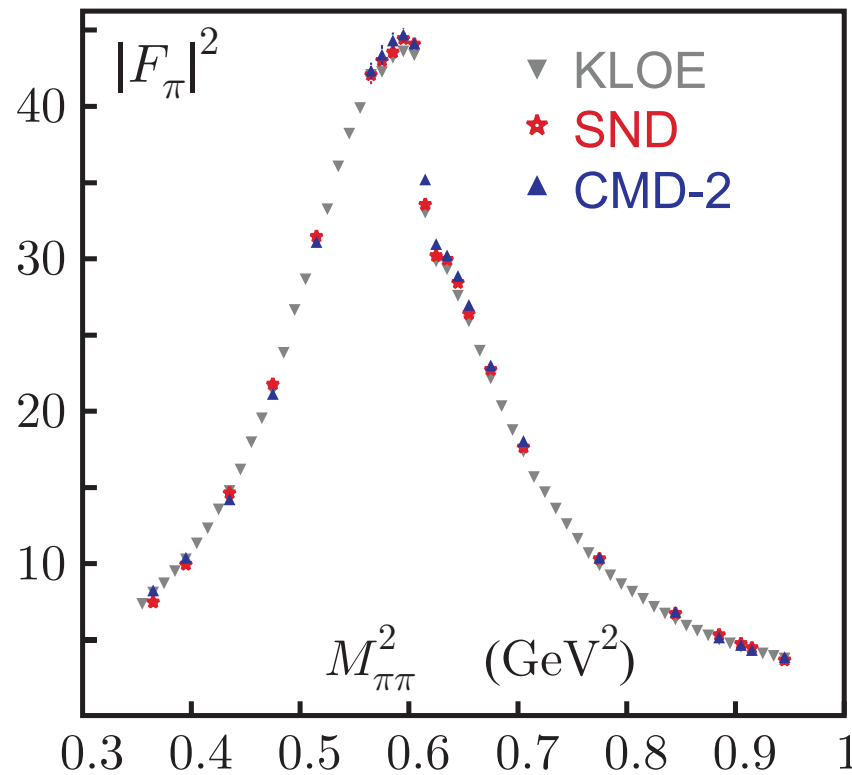
SND, скан.: $\sim 8 \cdot 10^5$ ev.

2E, MeV	$\sigma, \%$
390-420	3.2
430-970	1.3



KLOE, ISR: $\sim 3.1 \cdot 10^6$ ev.
(590-970) MeV - 0.8-0.9%

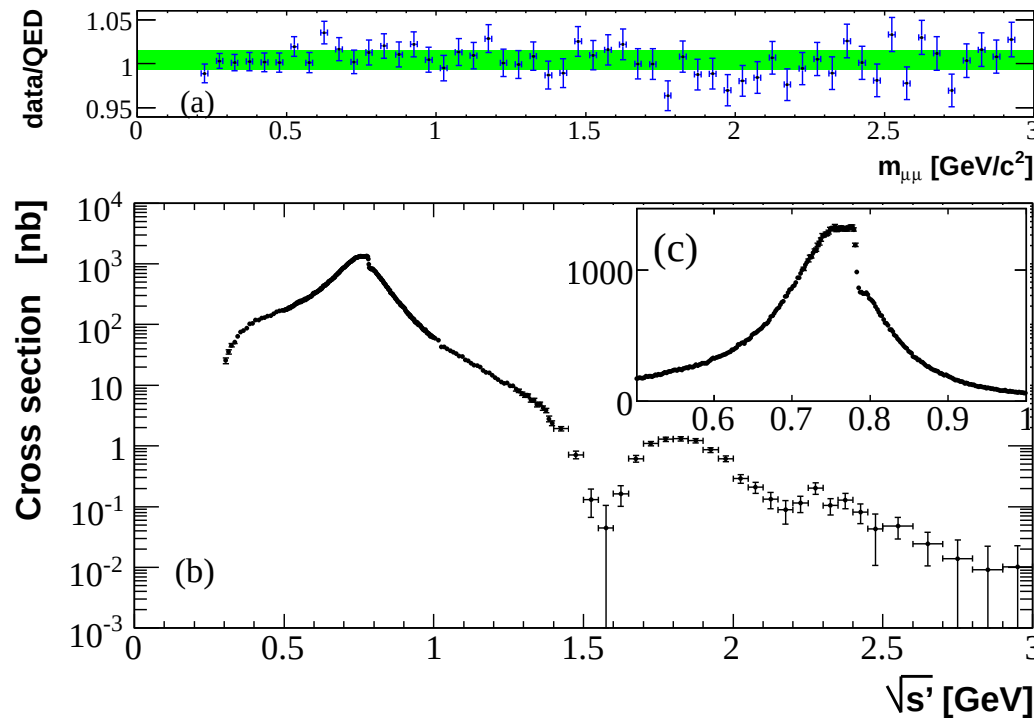
Сравнение KLOE с Новосибирском



Для $[0.650, 0.958]$ ГэВ

Группа	$\Delta a_\mu^{\pi\pi} \cdot 10^{10}$
SND	361.0 ± 5.1
CMD-2	361.5 ± 3.4
KLOE	356.7 ± 3.1

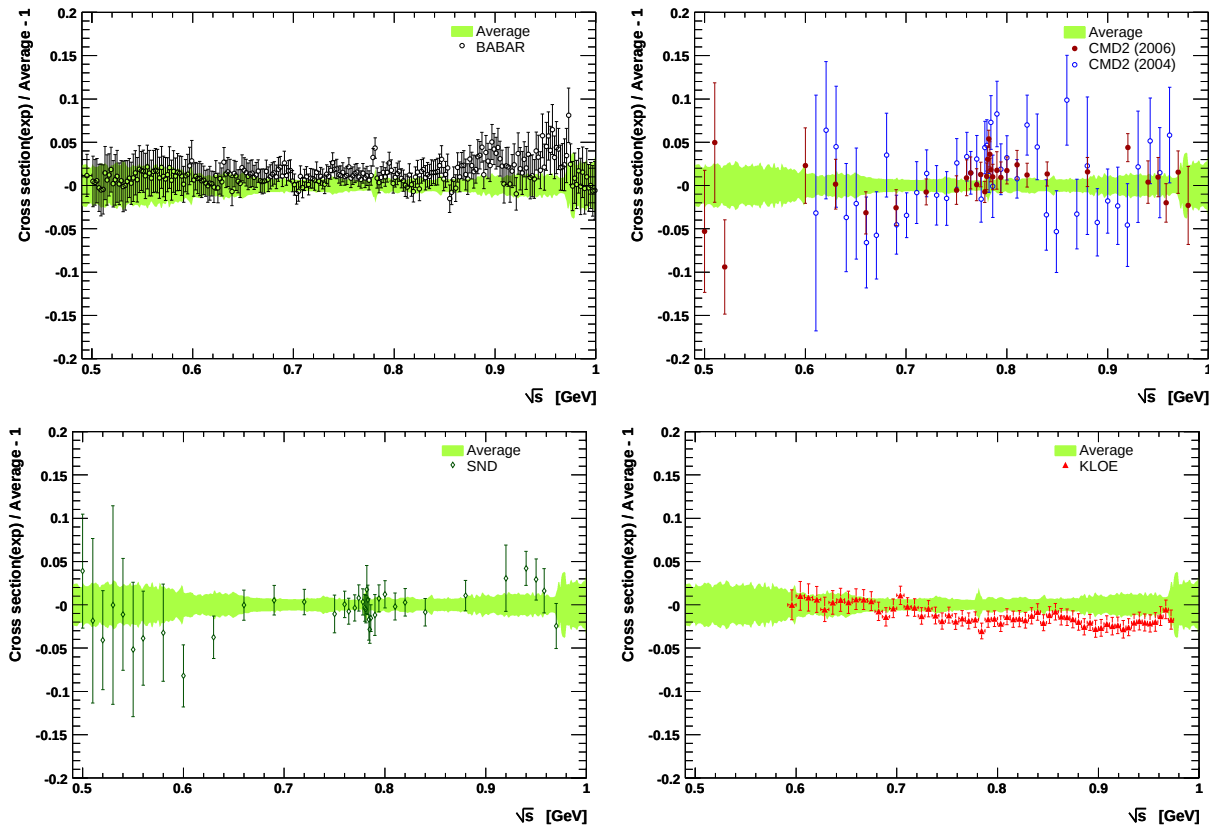
Новые данные KLOE на большие углы согласуются с малыми углами

ISR измерение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на BaBar – I

$0.5 \cdot 10^6$ $\pi^+\pi^-(\gamma)$ событий, нормир. на $\mu^+\mu^-(\gamma)$

$$\frac{\sigma_{\mu\mu\gamma(\gamma)}^{\text{data}}}{\sigma_{\mu\mu\gamma(\gamma)}^{\text{QED}}} - 1 = (40 \pm 20 \pm 55 \pm 94) \cdot 10^{-4}$$

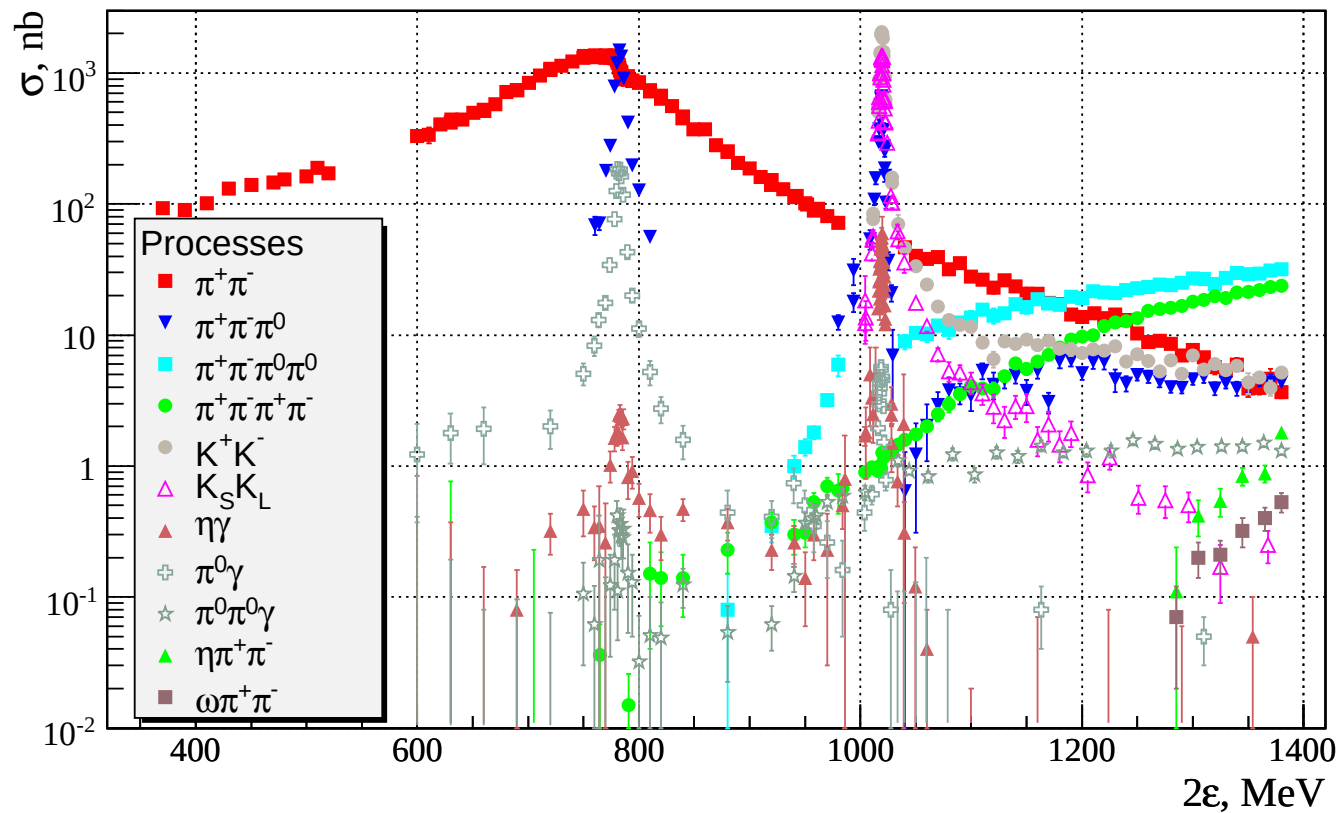
На ρ пике сист. ошибка 0.5%!

ISR измерение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на BaBar – II

Неплохое согласие: выше 0.8 ГэВ BaBar (KLOE) выше (ниже)

B. Aubert et al., arXiv:0908.3589

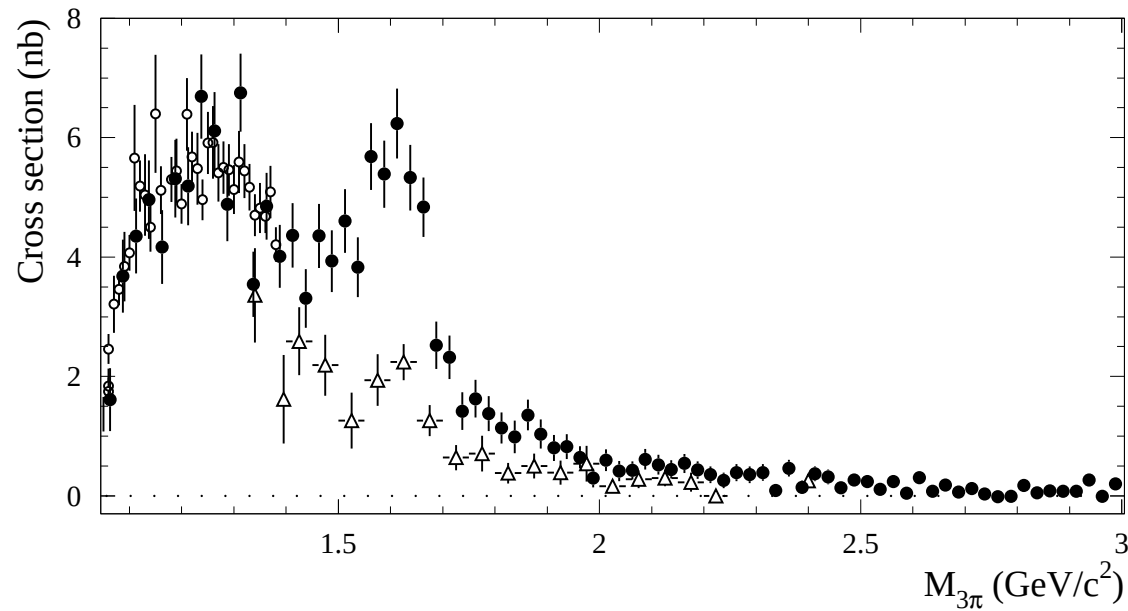
Адронные сечения на CMD-2



До ISR на ВаВар энергии ниже 1.4 ГэВ
изучены на CMD-2 и SND в Новосибирске

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$$

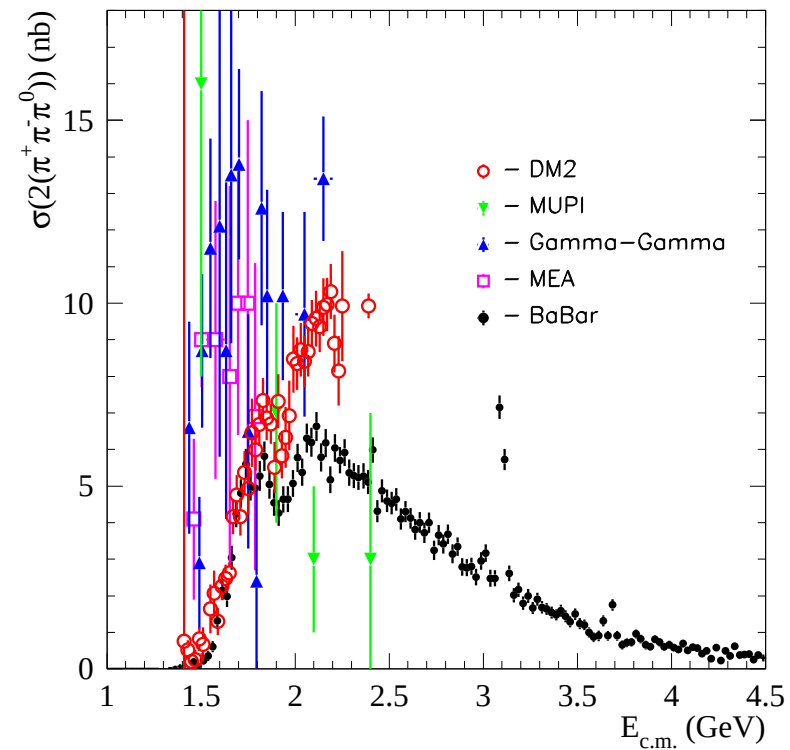
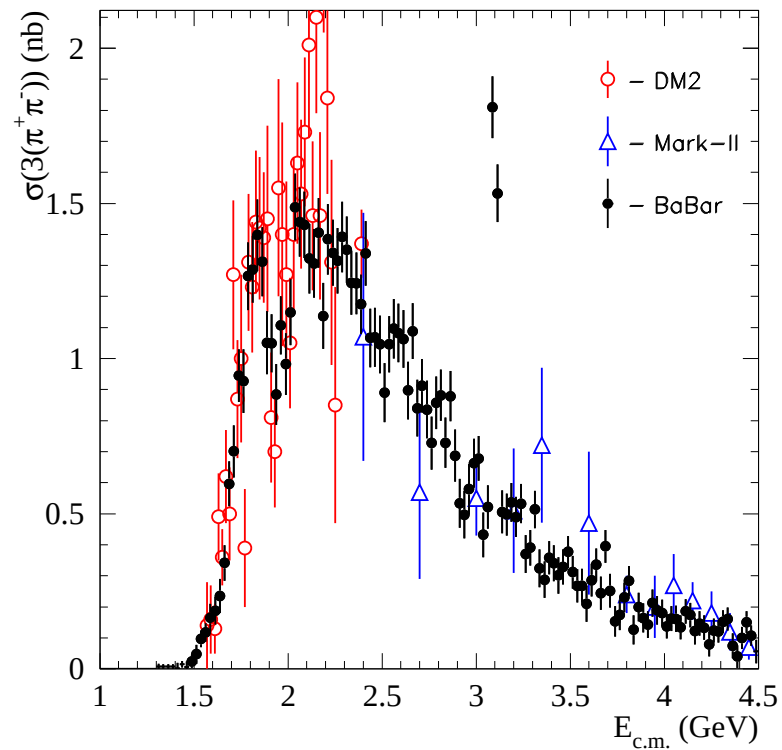
Новые ISR рез-ты на ВаБар не всегда согл. со старыми данными



Согласие с SND. ВаБар много выше DM2

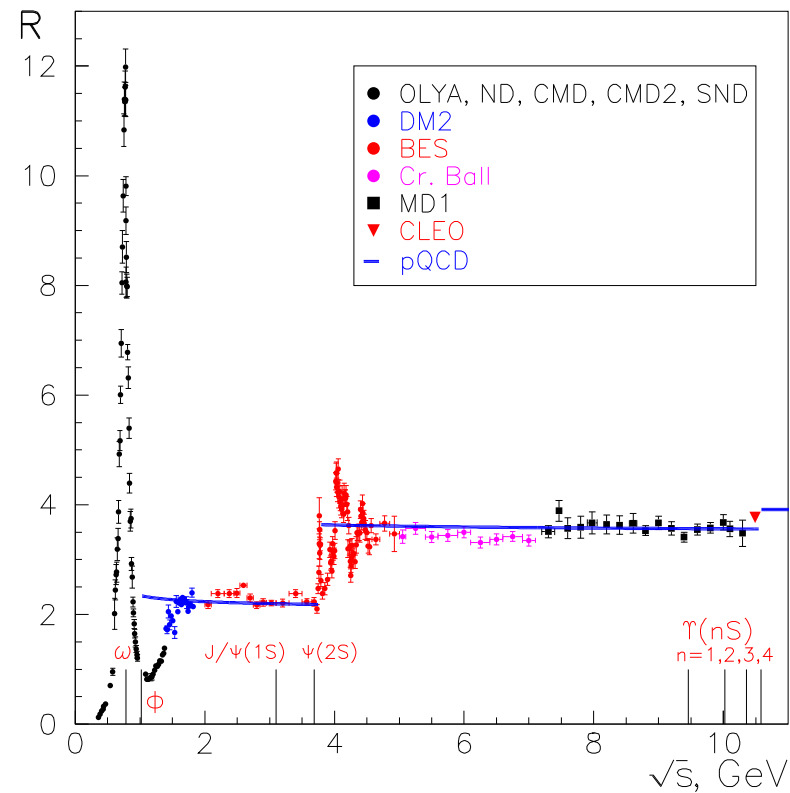
Источник	До ВаБар	Все + ВаБар	Все - DM2 + ВаБар
$\delta a_\mu, 10^{-10}$	$2.45 \pm 0.26 \pm 0.03$	$2.79 \pm 0.19 \pm 0.01$	$3.25 \pm 0.09 \pm 0.01$

$$e^+e^- \rightarrow 6\pi$$



δa_μ изменился от 0.10 ± 0.10 до 0.108 ± 0.016 и от 1.42 ± 0.30 до 0.890 ± 0.093

Заметное улучшение!

Измерение R при $\sqrt{s} < 10$ ГэВ

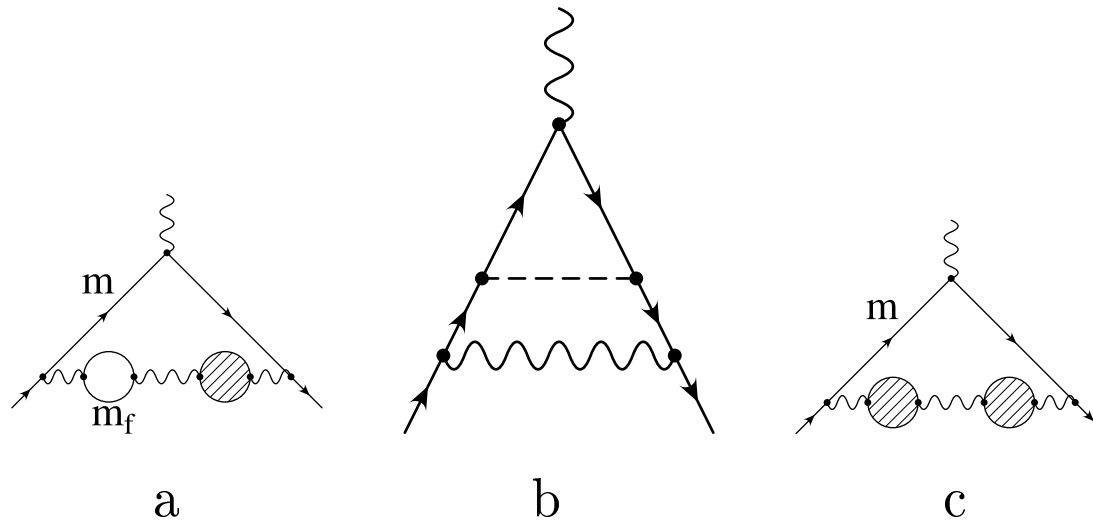
Хорошее согласие с пКХД!

Расчет $a_{\mu}^{\text{had,LO}}$ с новыми e^+e^- данными (DEHZ-2006)

$\sqrt{s}$, ГэВ	$a_{\mu}^{\text{had,LO}}, 10^{-10}$	$\delta a_{\mu}^{\text{had,LO}}, \%$
2π	$504.6 \pm 3.1 \pm 1.0$	73.0
ω	$38.0 \pm 1.0 \pm 0.3$	5.5
ϕ	$35.7 \pm 0.8 \pm 0.2$	5.2
$0.6 - 1.8$	$54.2 \pm 1.9 \pm 0.4$	7.8
$1.8 - 5.0$	$41.1 \pm 0.6 \pm 0.0$	6.0
$J/\psi, \psi'$	$7.4 \pm 0.4 \pm 0.0$	1.1
> 5.0	$9.9 \pm 0.2 \pm 0.0$	1.4
Всего	$690.9 \pm 3.9_{\text{exp}} \pm 1.9_{\text{rad}} \pm 0.7_{\text{QCD}}$	100.0

Высокая точность e^+e^- : ошибка $a_{\mu}^{\text{had,LO}}$ 4.4 (0.63%)
по сравнению с 15.3 у EJ, 1995 и 7.2 у DEHZ, 2003!

Адронные вклады высшего порядка $a_{\mu}^{\text{had,HO}}$

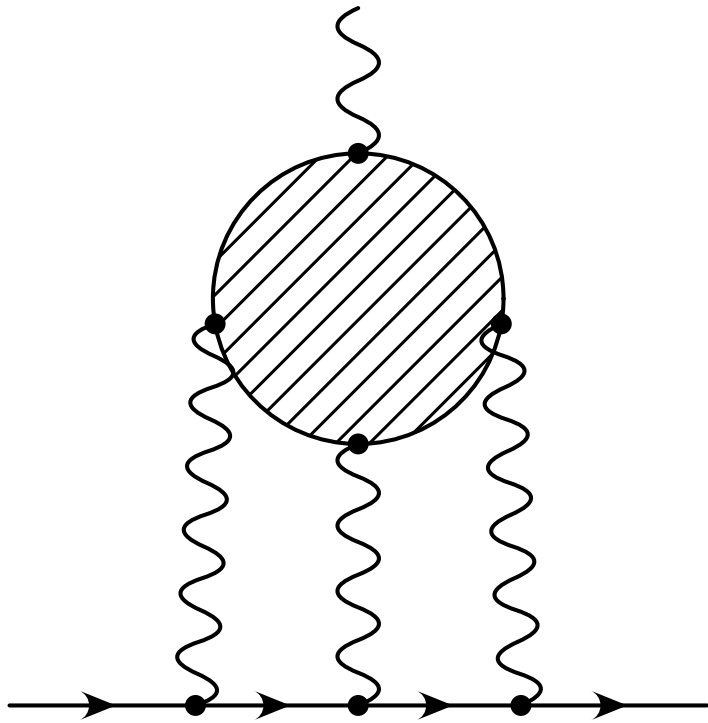


Все вклады через $\int R(s)G(s)ds/s^2$ ⁽³⁾, где $G(s)$ - гладкая ф-ция s , доминируют малые энергии. Принятое значение

(В. Krause, 1997; К. Hagiwara et al., 2003):

$$a_{\mu}^{\text{had,HO}} = (-9.8 \pm 0.1) \cdot 10^{-10}.$$

Свет-на-свете – I



Различные подходы:

- ВД и киральные модели
- Данные по $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0, \eta, \eta'$ (1 рас. e)
- Ограничения КХД на малых расстояниях
- Эффективные теории

Знак главного PS вклада был неверен до 2002!

Свет-на-свете – II

Авторы	Год	$a_{\mu}^{\text{had,LBL}}, 10^{-10}$
J. Bijnens, E. Pallante, J. Prades	1996 (2002)	83 ± 32
M. Hayakawa, T. Kinoshita	1998 (2002)	89.6 ± 15.4
M. Knecht, A. Nyffeler	2002	80 ± 40
K. Melnikov, A. Vainshtein	2003	136 ± 25
M. Davier, W. Marciano	2004	120 ± 35
J. Bijnens, J. Prades	2006	110 ± 40
J. Prades, E. de Rafael, A. Vainshtein	2008	105 ± 26
F. Jegerlehner, A. Nyffeler	2009	116 ± 39

Ошибка большая и сравнима с LO вкладом

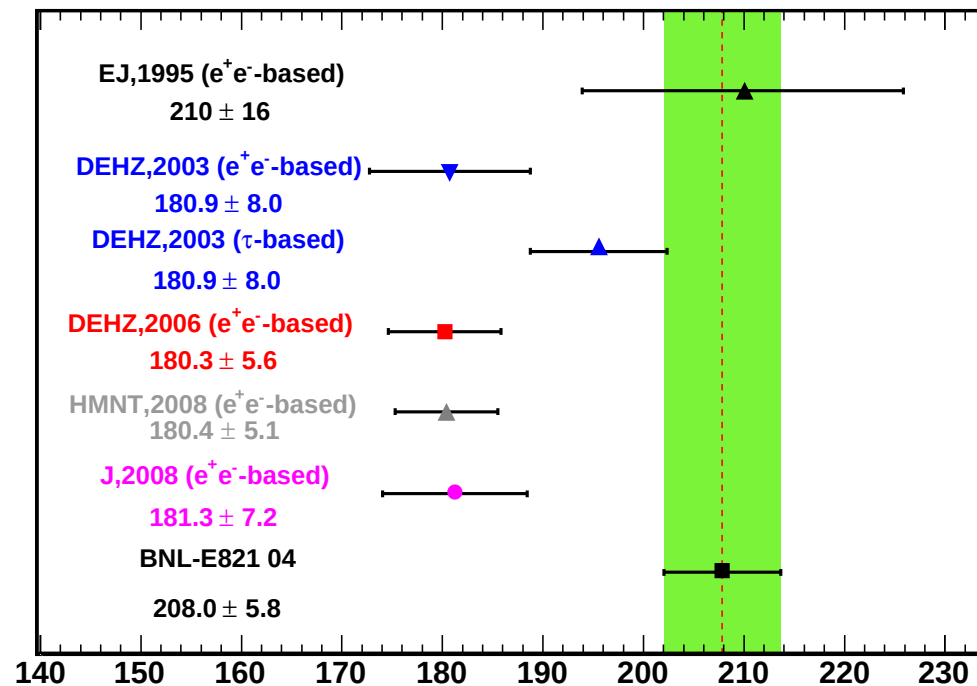
Теория vs Эксперимент – I

Вклад	$a_\mu, 10^{-10}$
Эксперимент	11659208.0 ± 6.3
КЭД	11658471.8 ± 0.016
Электрослабый	$15.4 \pm 0.1 \pm 0.2$
Адронный	693.1 ± 5.6
Теория	11659180.3 ± 5.6
Эксп.–теория	$27.7 \pm 8.4 \ (3.3\sigma)$

Разница между экспериментом и теорией 3.3σ !

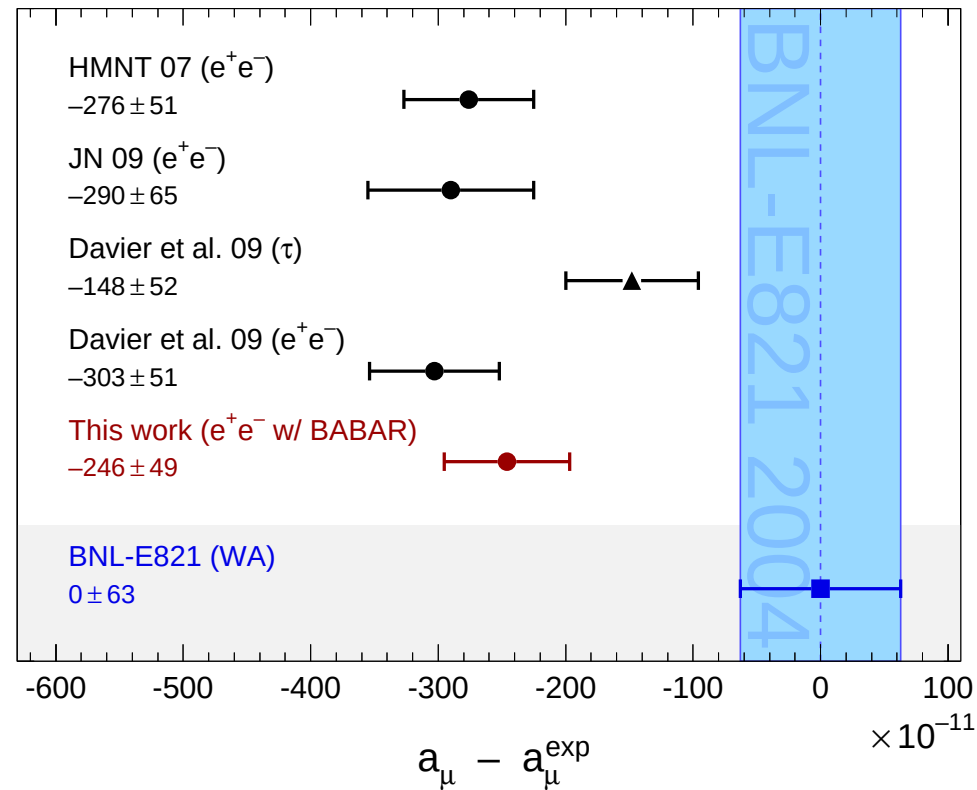
Во всех оценках $> 3\sigma$

Теория vs Эксперимент – II



Статус до данных KLOE/BaBar, 2006-2007!

Новое сравнение a_μ^{exp} и a_μ^{th} после ВаБар



Новый расчет a_μ^{had} после $\pi\pi$ на ВаБар и изменение a_μ^{exp} на $+0.9 \cdot 10^{-10}$
 (CODATA изменила μ_μ/μ_p) $\Rightarrow 3.2\sigma$

М. Davier et al., arXiv:0908.4300

Перспективы a_μ^{had} – I

Что в e^+e^- секторе?

Дальнейший ISR анализ на KLOE, BaBar, Belle;
улучшение точности R ниже 4.3 ГэВ на CLEO-с и BES-III

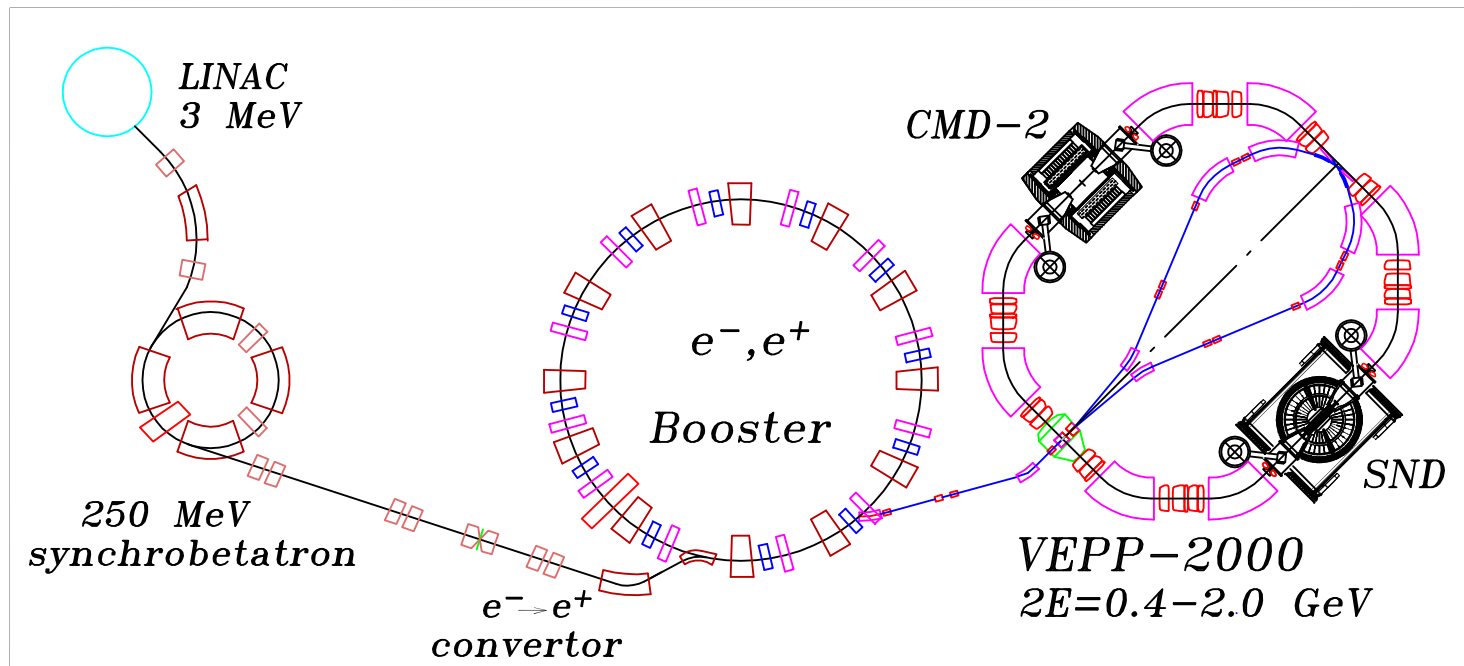
Эксперименты на VEPP-2000 с 2 детекторами до $\sqrt{s}=2$ ГэВ с
 $L_{\text{max}} = 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ уже есть на ϕ

Подобная машина (DAΦNE-II) во Фраскати,,
 τ – c -фабрика в Пекине (BES-III) – набор данных

Через 3-4 года точность LBL
будет серьезно ограничивать точность

VEPP-2000

Layout of the VEPP-2000 complex



Проектная светимость $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, с $\int L dt \approx 1 - 2 \text{ fb}^{-1}$ 3–5 лет даст
уточнение $\Delta a_{\mu}^{\text{had}} / a_{\mu}^{\text{had}}$ в 2 раза!

Перспективы $(g_\mu - 2)/2 - II$

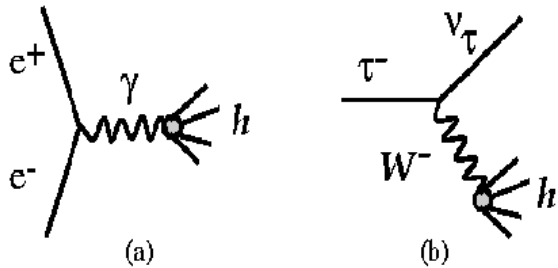
1. Новые эксперименты улучшат точность в 2-3 раза
2. Такая точность соотв. 0.2% для $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$,
практически недостижимо для абсолютного измерения сечения
3. a_μ^{had} расчет из 1-ых принципов (КХД, решетки).
Модель КХД инстантонов (А. Dorokhov, 2003),
Недавно на решетке: $a_\mu^{\text{had}} = (545 \pm 65) \cdot 10^{-10} \Rightarrow (667 \pm 20) \cdot 10^{-10}$
(С. Aubin и Т. Blum, 2005),
попытки оценить a_μ^{lbl} (М. Hayakawa et al., 2005).

Выводы

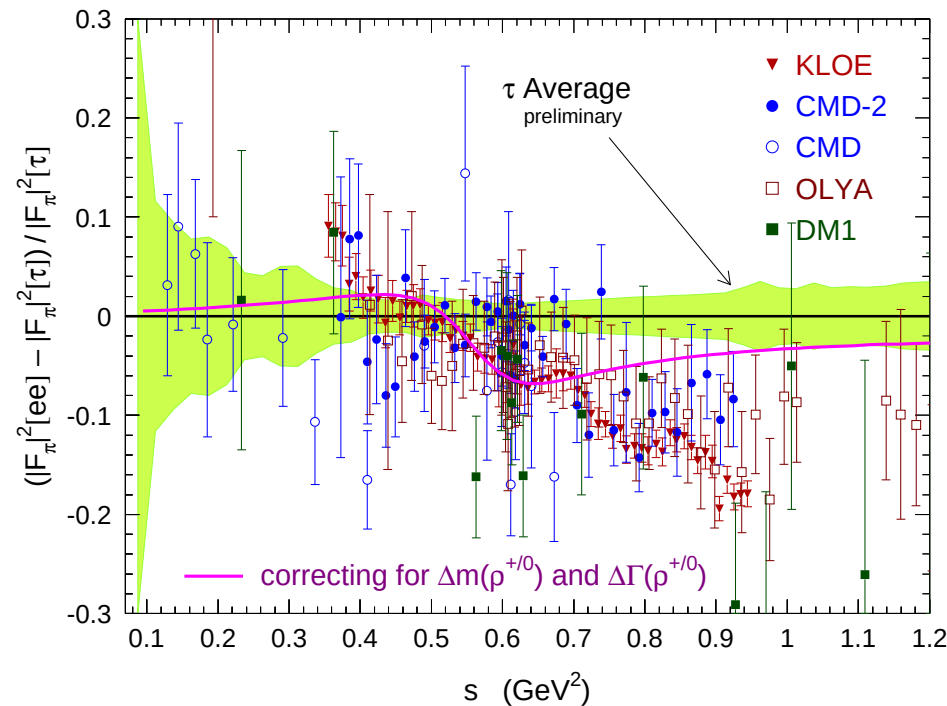
- Успех БНЛ => заметный прогресс эксперимента и теории
- КЭД и Э/С вклады известны хорошо
- Уточнение e^+e^- данных $\Rightarrow$ меньше $\delta a_\mu^{\text{had,LO}}$
- Дальнейшее уточнение $a_\mu^{\text{had,LO}}$ будет возможно после VEPP-2000, DAΦNE-II и $(c - \tau)$ -фабрики + ISR на DAΦNE и B-фабриках
- Точность будет вскоре ограничена вкладом свет-на-свете
- Большой объем работы для теоретиков
- $a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{SM}}$ отличается от 0 на более чем $3\sigma \Rightarrow$ Указание на Новую Физику?

Back-up Slides

CVC. $e^+e^- \rightarrow X^0$ and $\tau^- \rightarrow \nu_\tau X^-$



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



Large SU(2) breaking corrections from theory, V.Cirigliano et al., 2002

$M(\Gamma)_{\rho^0} \neq M(\Gamma)_{\rho^\pm}$ helps,

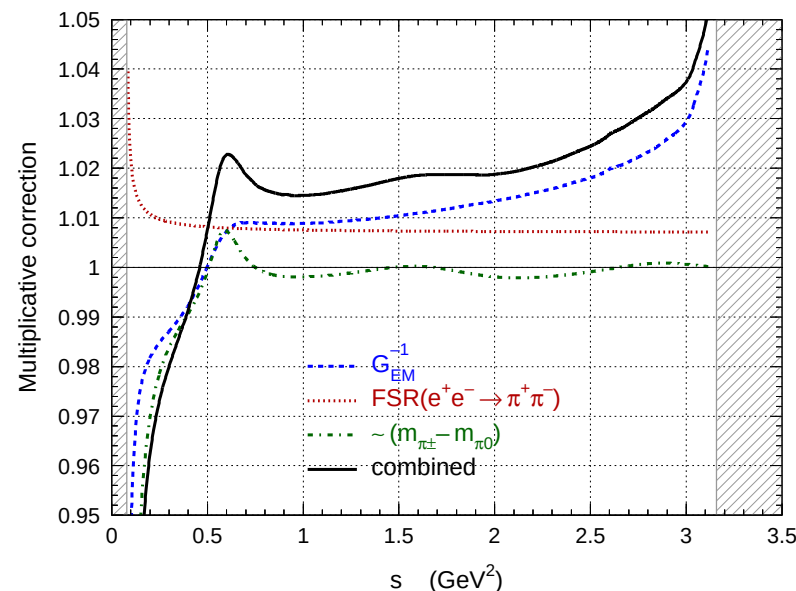
M.Davier, 2003; S.Ghozzi, F.Jegerlehner, 2004

Corrections to the τ Spectral Functions

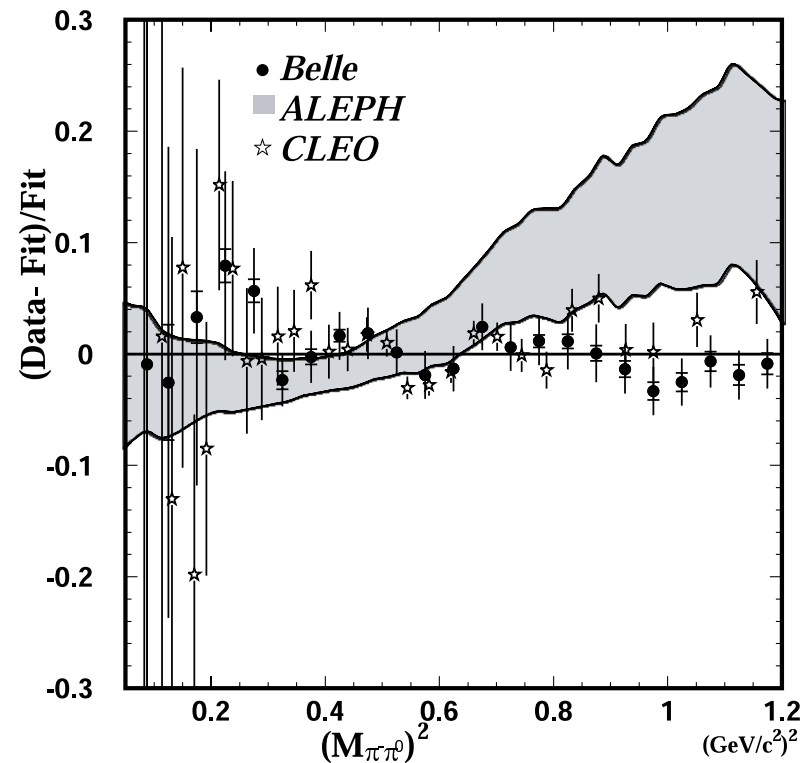
- $S_{EW} = 1.0233 \pm 0.0006$
- Real photons, loops
- FSR
- $m_{\pi^\pm} \neq m_{\pi^0}$
(phase space, Γ_ρ)
- $m_{\rho^\pm} \neq m_{\rho^0}$
- $\rho - \omega$ interference
- Radiative decays
($\pi\pi\gamma, \pi(\eta)\gamma, l^+l^-$)
- $m_u \neq m_d$
and 2 class currents

V. Cirigliano, G. Ecker,
H. Neufeld, 2002

M. Davier, S. Eidelman,
A. Höcker, Z. Zhang, 2002



New data on $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ from Belle

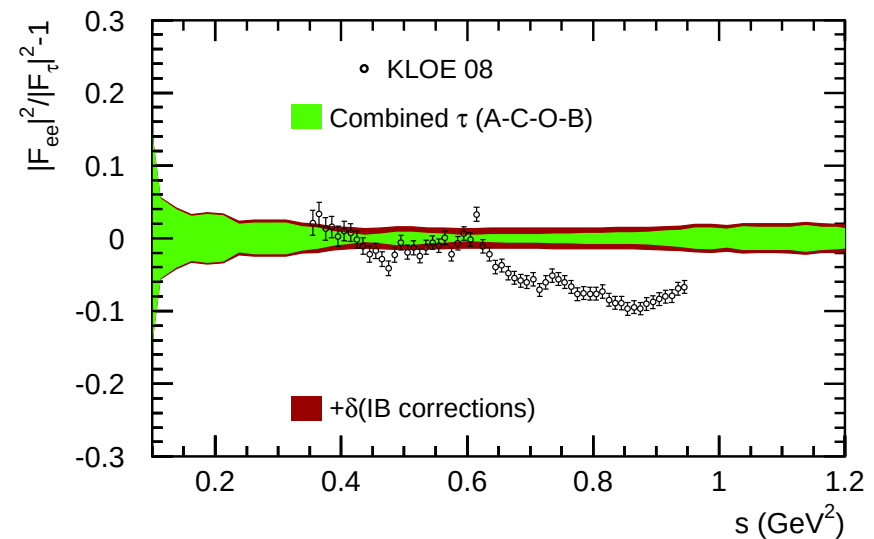
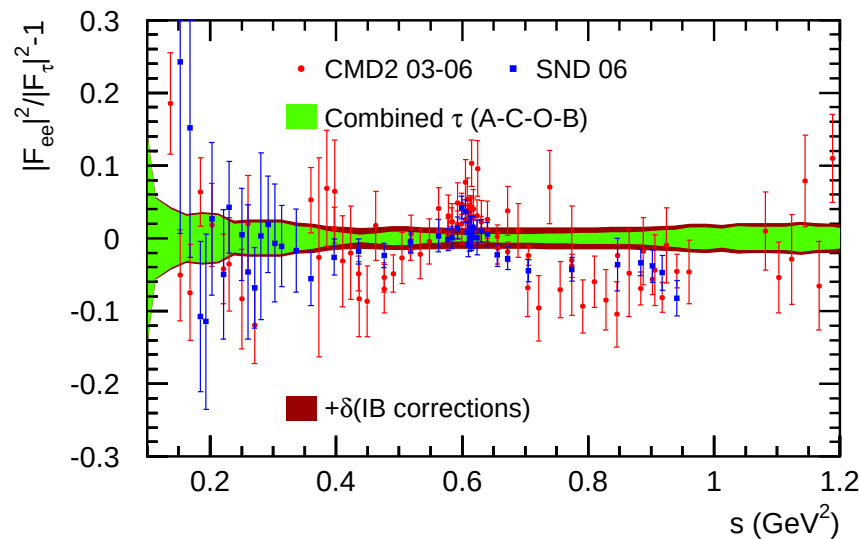


$$\mathcal{B}_{\text{Belle}} = (25.24 \pm 0.01 \pm 0.39)\% \quad \mathcal{B}_{\text{ALEPH}} = (25.49 \pm 0.10 \pm 0.09)\%$$

The contributions to a_μ^{had} are also compatible due to compensation at tails

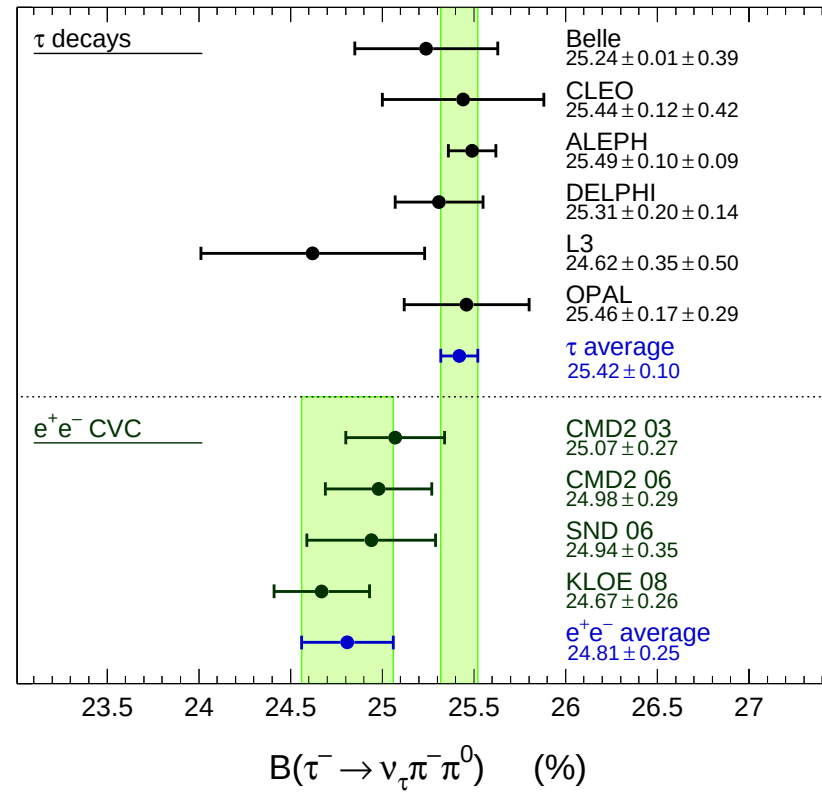
New developments in τ vs. e^+e^- – I

M. Davier et al., arXiv:0906.5443, reconsidered IB corrections to the averaged 2π spectral functions from ALEPH/OPAL/CLEO/Belle (large-distance rad. corr., M_ρ , Γ_ρ splitting



The discrepancy between the τ and e^+e^- is smaller but still there.

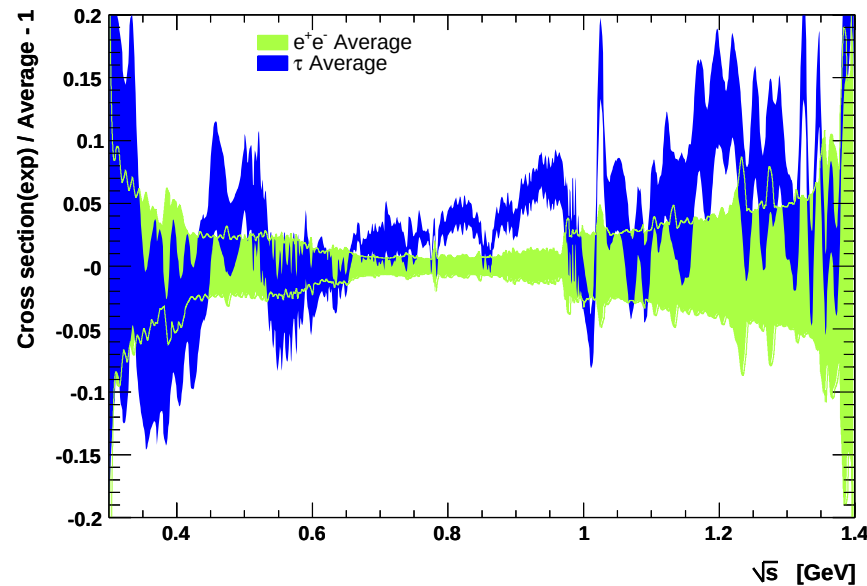
New developments in τ vs. e^+e^- – II



$\mathcal{B}_\tau - \mathcal{B}_{ee} = (0.61 \pm 0.27)\%$ or 2.3σ compared to 4.5σ before.

New developments in τ vs. e^+e^- – III

After taking into account BaBar:



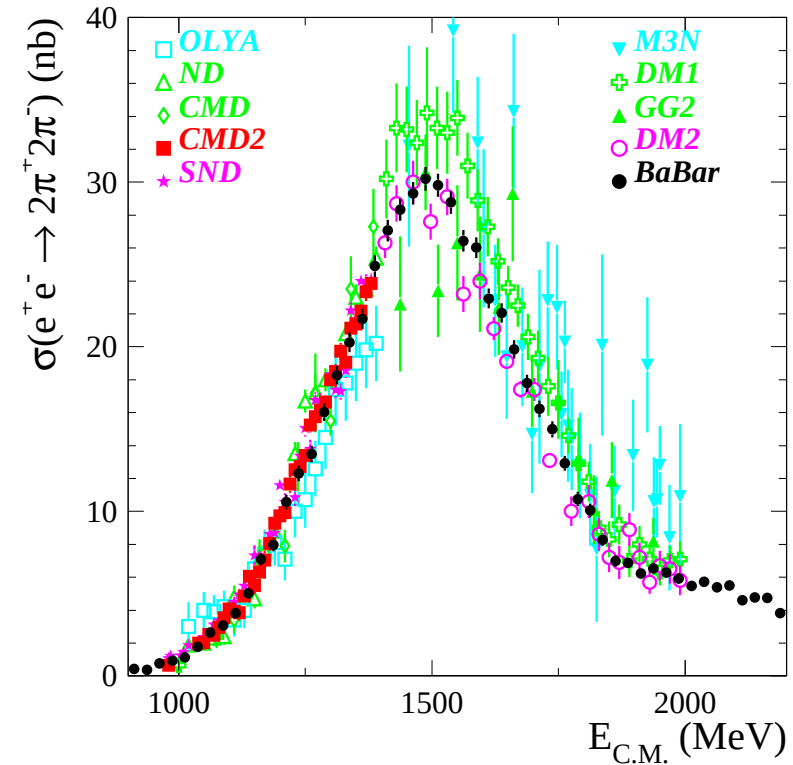
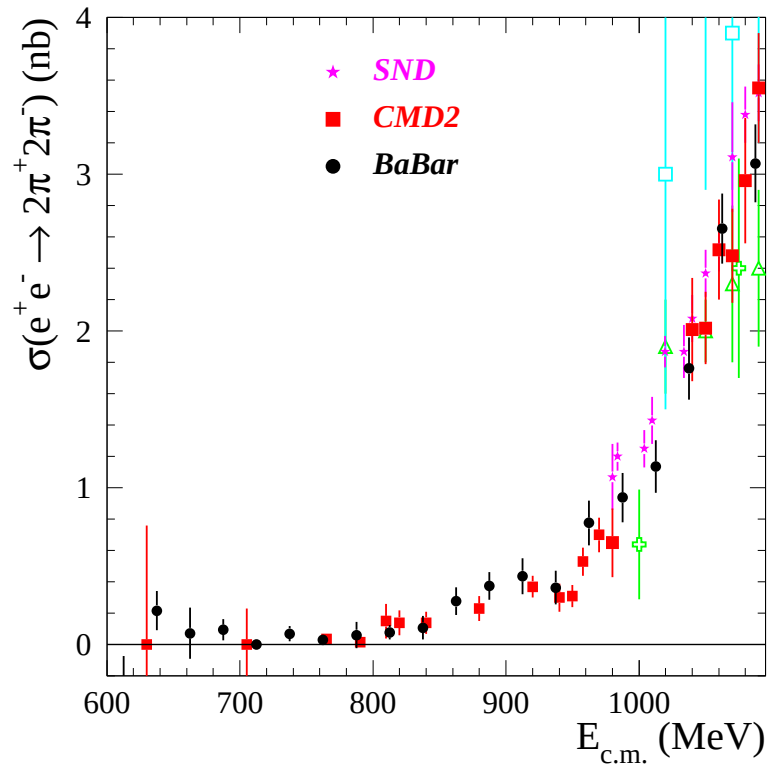
Difference between τ and e^+e^- :

2.9σ (2006), 2.4σ (τ update), 1.5σ (+BaBar)

New Physics and a_μ

- Supersymmetry ($\tilde{m} \simeq 200 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$)
- Cold dark matter and neutralino
- Tachyons ($m^2 < 0$)
- Technicolor
- Leptoquarks
- New gauge bosons (Z' etc.)
- Large extra dimensions ($M > 600 \text{ GeV}$)
- Lepton flavor violation ($\mu \rightarrow e\gamma$, $\mu \text{ edm}$, $\tau \rightarrow \mu\gamma, \dots$)
- $b \rightarrow s\gamma$
- Composite quarks and leptons

$$e^+e^- \rightarrow 2\pi^+2\pi^-$$



Good agreement with CMD-2/SND.
Error of continuum below 2 GeV improved.

Light-by-Light Scattering – II

- A. Pivovarov, 2001: $\sim 14.3 \cdot 10^{-10}$
 u, d, s with m_q , heavy quarks with standard masses
- J.F. de Trocóniz, F.J. Ynduráin, 2001: $(9.2 \pm 2.0) \cdot 10^{-10}$
Constituent quarks + π^0
- A. Dorokhov, 2005: $(10.6 \pm 1.0) \cdot 10^{-10}$
Instanton liquid model
- J. Erler, G. Toledo Sánchez, 2006: $< 15.9 \cdot 10^{-10}$
Parton model

Is there a way to consistently relate experimental data on $\gamma\gamma^* \rightarrow X^0$ with $J^{PC} = 0^{-+}, 0^{++}, 1^{++}, 2^{-+}, 2^{++}$ to the corresponding contributions to $a_\mu^{\text{had,LBL}}$?

Theory vs Experiment – II

Calculation	$a_\mu^{\text{exp}}, 10^{-10}$	$a_\mu^{\text{th}}, 10^{-10}$	$a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{th}}, 10^{-10} \ (\sigma)$
EJ, 1995	11659230 ± 84	11659210 ± 16	$20 \pm 86 \ (--)$
DEHZ, 2003	11659203 ± 8	11659180.9 ± 8.0	$22.1 \pm 11.3 \ (1.9)$
DEHZ, 2006	11659208.0 ± 6.3	11659180.3 ± 5.6	$27.7 \pm 8.4 \ (3.3)$
HMNT, 2008	11659208.0 ± 6.3	11659180.4 ± 5.1	$27.6 \pm 8.1 \ (3.4)$
J, 2008	11659208.0 ± 6.3	11659181.3 ± 7.2	$26.7 \pm 9.6 \ (2.8)$

Branchings of $\tau^- \rightarrow X^- \nu_\tau$ Decay, %

Hadronic State X	Experiment, 2002	CVC Prediction	$\mathcal{B}_{\text{exp}} - \mathcal{B}_{\text{CVC}}$
$\pi^- \pi^0$	25.31 ± 0.18	24.76 ± 0.25	0.55 ± 0.31
$\pi^- 3\pi^0$	1.08 ± 0.10	1.07 ± 0.05	0.01 ± 0.11
$2\pi^- \pi^+ \pi^0$	4.19 ± 0.23	3.84 ± 0.17	0.35 ± 0.29
$\omega \pi^-$	1.94 ± 0.07	1.82 ± 0.07	0.12 ± 0.10
Total	31.59 ± 0.31	30.28 ± 0.34	1.31 ± 0.46

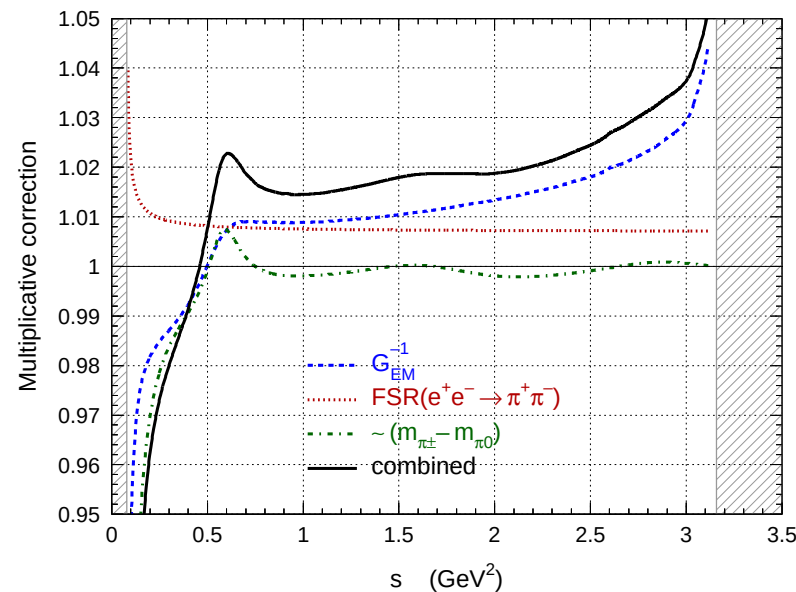
With more accurate data some deviations have been observed.

Corrections to the τ Spectral Functions

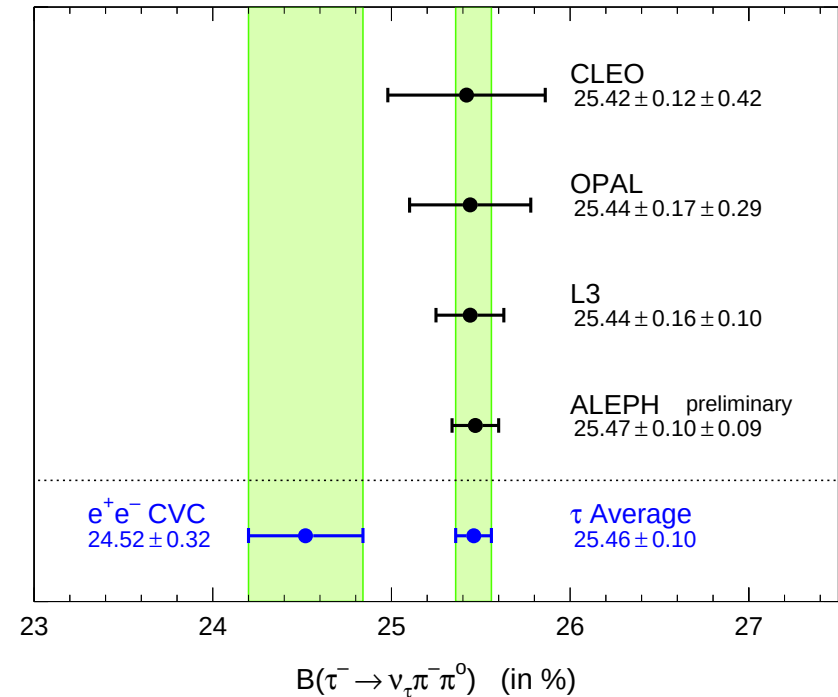
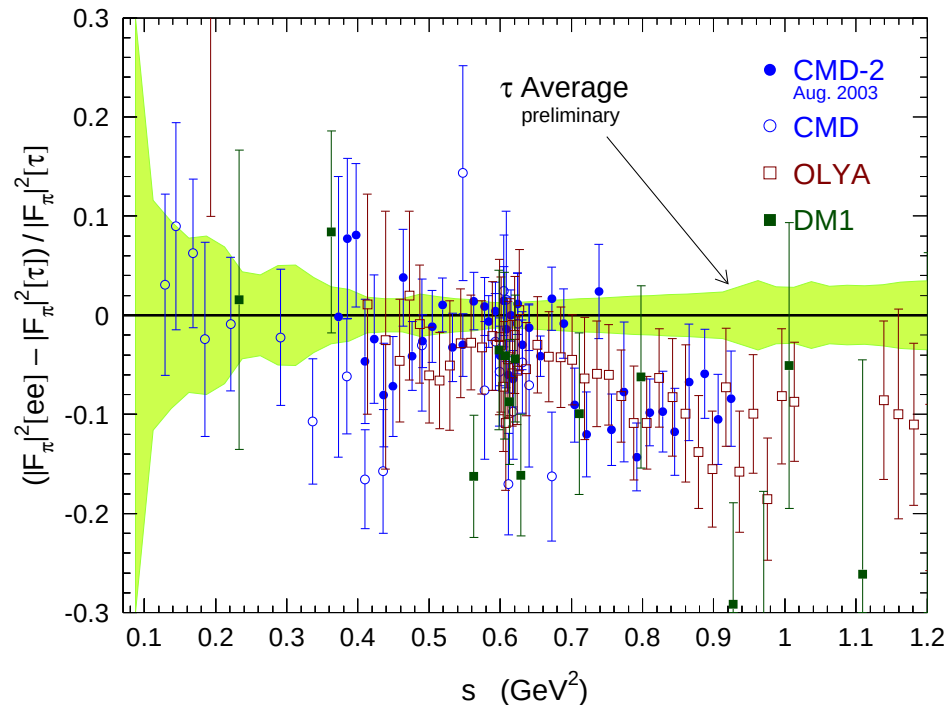
- $S_{EW} = 1.0233 \pm 0.0006$
- Real photons, loops
- FSR
- $m_{\pi^\pm} \neq m_{\pi^0}$
(phase space, Γ_ρ)
- $m_{\rho^\pm} \neq m_{\rho^0}$
- $\rho - \omega$ interference
- Radiative decays
($\pi\pi\gamma, \pi(\eta)\gamma, l^+l^-$)
- $m_u \neq m_d$
and 2 class currents

V. Cirigliano, G. Ecker,
H. Neufeld, 2002

M. Davier, S. Eidelman,
A. Höcker, Z. Zhang, 2002

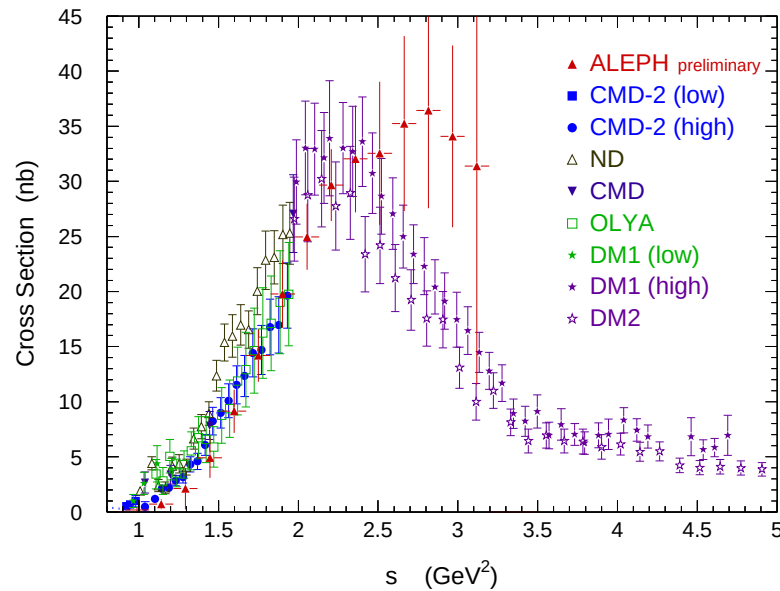


CVC in the 2π Channel. e^+e^- vs. τ



The branching from all groups is systematically higher than the CVC prediction:
 $B_\tau - B_{ee} = (0.94 \pm 0.32)\%$

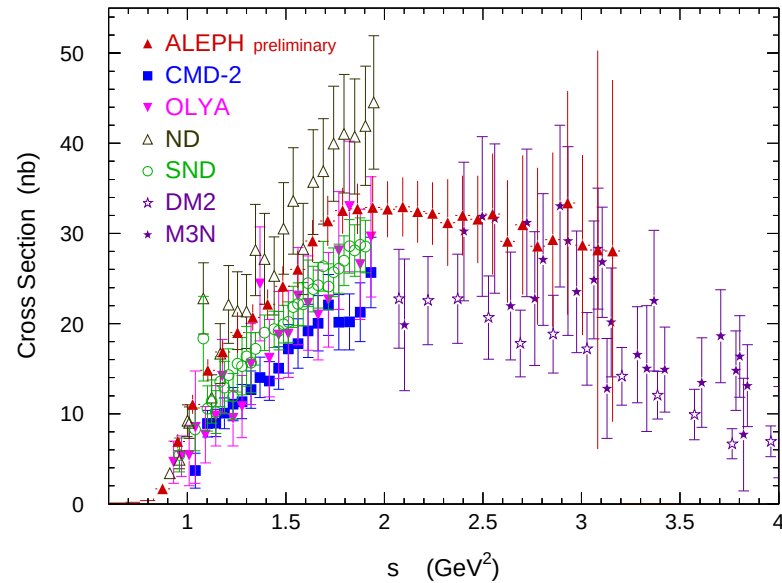
CVC in the 4π Channel. e^+e^- vs. τ

 $2\pi^+2\pi^-$


$$\mathcal{B}(\tau), \% \quad 1.01 \pm 0.08$$

$$\mathcal{B}(\text{CVC}), \% \quad 1.09 \pm 0.08$$

$$\Delta\mathcal{B}, \% \quad -0.08 \pm 0.11$$

 $\pi^+\pi^-2\pi^0$


$$4.54 \pm 0.13$$

$$3.63 \pm 0.21$$

$$+0.91 \pm 0.25$$

Why are e^+e^- and τ Spectral Functions Different?

- Problems with data: underestimated systematics, normalization, rad. corr.
- Problems with SU(2) breaking corrections; Is ChPT reliable? The uncertainty of corrections may be large (K.Maltman, 2005)
- Non (V-A) contribution to e/w interactions (M.Chizhov, 2003) inspired by problems in $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ (E.Frlez et al., 2003)
- Effect of charged Higgs propagator in τ decay
- $m_{\rho^\pm} > m_{\rho^0}$ by a few MeV (S.Ghozzi and F.Jegerlehner, 2003, M.Davier, 2003). Current experiments indicate equality within a few MeV.