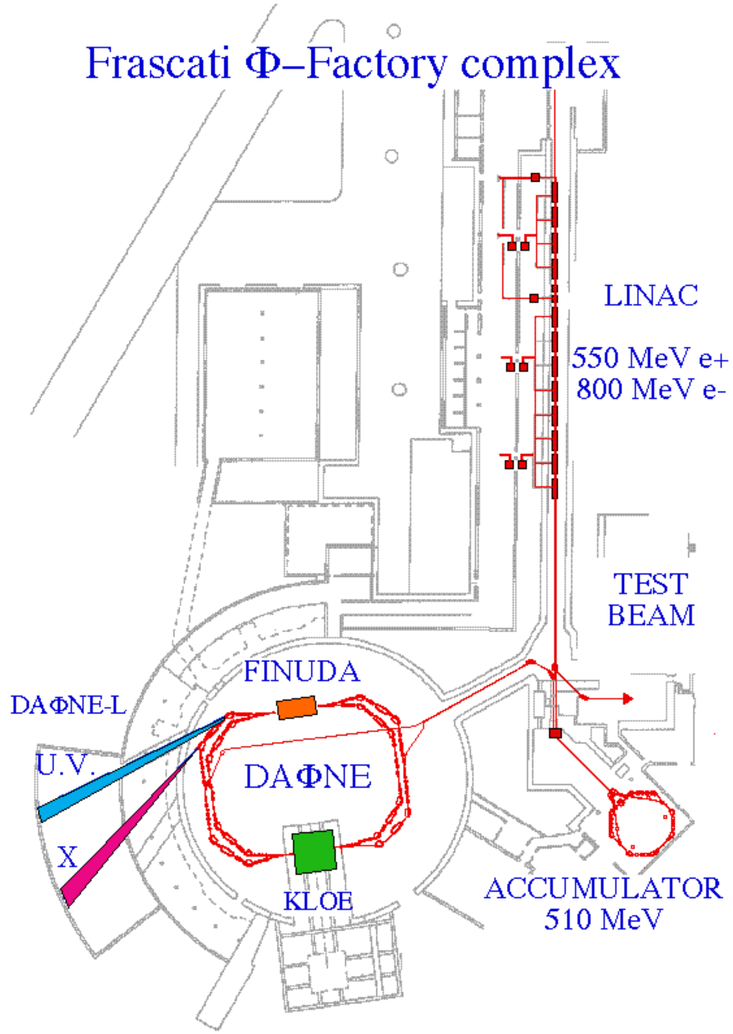
Fisica di precisione con KLOE @ DAΦNE

DAΦNE "ϕ-factory"

- Collider e^+e^- $\sqrt{s}=M_\phi=1019{,}4$ MeV
- Anelli separati per e+ ed e- per minimizzare interazioni fascio-fascio
- Due zone d'interazione
- Angolo di incrocio 12,5 mrad $\rightarrow p_T \sim 13$ MeV/c
- $L_{progetto}=5\text{x}10^{32}$ cm^{-2}s^{-1}
- Tempo tra due collisioni 2,7 ns
- Iniezione durante presa dati

Prestazioni nel 2004-05

- ~105 bunch $e^+ + e^-$
- $I^-_{picco} \sim 2{,}4$ A $I^+_{picco} \sim 1{,}5$ A
- $L_{picco}= 1{,}4\text{x}10^{32}$ cm^{-2}s^{-1}
- L integrata mese ~ 200 pb^{-1}



Φ-Factory come "fabbrica" di KK

$\sigma(e^+e^- \to \phi) \sim 3\ \mu b$ Per $L=10^{32}\ cm^{-2}s^{-1}$ → $\sim 300\ \Phi/s$

$\to$ovvero

- K^+K^- 49% ~150/s
- K_SK_L 34% ~100/s

"Fabbrica" di K

Perché una Φ-Factory

Infatti puro stato $J^{PC}=1^{--}$ quindi

$$\left|K\overline{K},t=0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K^0\overline{K}^0\right\rangle - \left|\overline{K}^0K^0\right\rangle\right) \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K_SK_L\right\rangle - \left|K_LK_S\right\rangle\right)$$

K_L (K^+) ⟵ ϕ ⟶ K_S (K^-)

L'osservazione di un K_L (K_S) segnala la presenza di un K_S (K_L)
Analogamente un K^+ (K^-) segnala un K^- (K^+)

"TAGGING"

Il decadimento della ϕ fornisce dei fasci puri di ***K_S e K_L (K^+ e K^-)***

Fisica dei K

Perché una Φ-Factory

- Misura di vite medie e frazioni di decadimento (BR) assolute o misura di precisione di rapporti di tali BR
  - Studi di simmetrie fondamentali quali CP e CPT
  - Verifica conservazione numero leptonico
  - Universalità dell'accoppiamento debole
  - Vus
- Studio dell'evoluzione temporale del sistema coerente $K_S K_L$
  - Ancora CP e CPT
  - Test di proprietà fondamentali della meccanica quantistica

Decadimenti radiativi

Perché una Φ-Factory

- $\eta\gamma$ 1,3%
- $\eta'\gamma$ 6,5x10^{-5}

$1^- \rightarrow 0^-$ transizione di dipolo magnetico

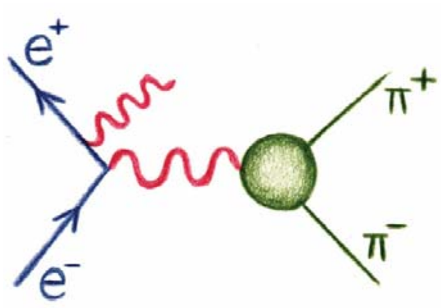
- $f_0\gamma$ 1,1x10^{-4}
- $a_0\gamma$ 6,2x10^{-5}

$1^- \rightarrow 0^+$ transizione di dipolo elettrico

➢ Sonde uniche per studiare proprietà e struttura dei mesoni pseudoscalari e scalari → i tassi di decadimento dipendono fortemente dalla funzione d'onda del mesone finale e dal suo contenuto in sapore

- Inoltre $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ $\sqrt{s_\pi}=(s-2E_\gamma\sqrt{s})^{1/2}$
  - ➢ $\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-)$ tra soglia e ~ 1GeV

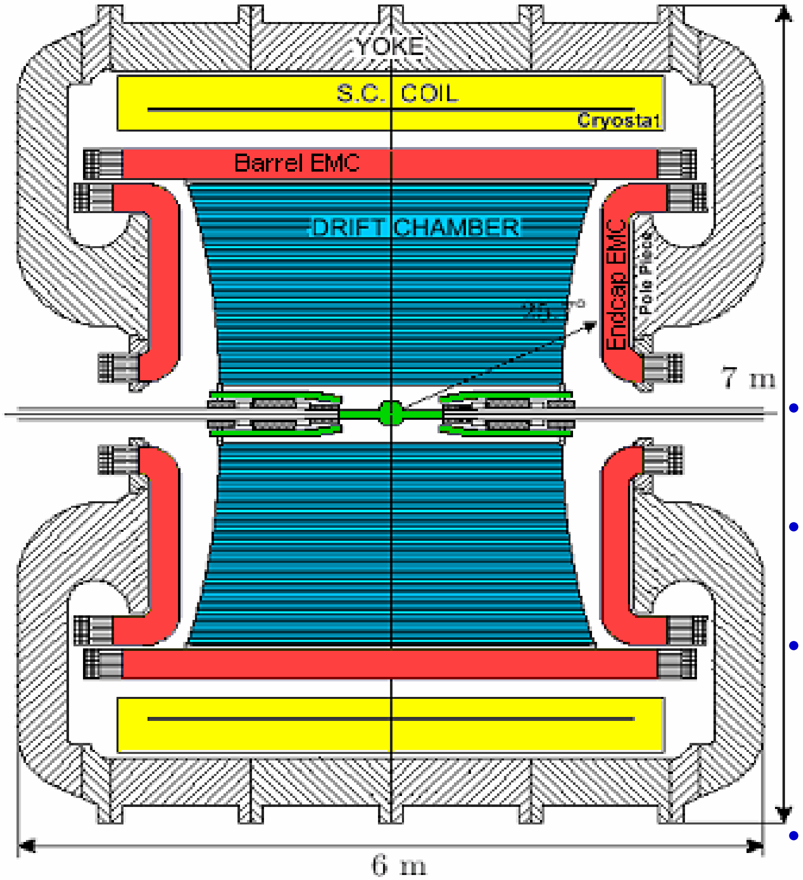
    da essa dipende buona parte del contributo adronico ad a_μ



Sommario

- KLOE
- Fisica dei K
  - Vus e universalità
  - Test di simmetrie
  - Decadimenti rari

KLOE (K Long Experiment)



Grande volume di decadimento (λ_L=3,5 m)

Massima trasparenza

“Ermetico”

“Unbiassed” trigger

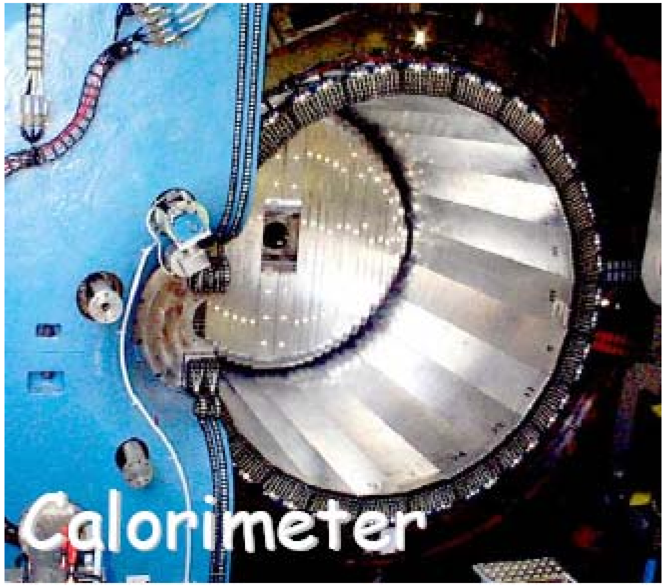
- **Pipe sferica in Be-Al ϕ=10 cm, spessore 0,5 mm → *Minimizza rigenerazione, conversione γ, scattering***
- **Quads low-beta instrumentati → Ermeticità per rivelazione γ**
- **Camera a drift “stereo”, ϕ=4 m, L=3,4 m, pareti fibra di carbonio, gas a bassa densità (90%He+10%i-C4H10),12.582 celle “quadrate” (fili: sense W ϕ=25 μm, campo Al ϕ=50 μm)**
- **Calorimetro 0,5 mm Pb, fibre scintillanti ϕ=1 mm, 15 X_0, 2440 celle doppia lettura**
- **Magnete superconduttore B=0,52 T**

$K_L\ K_S$
β^* = 0.216
p^* = 110 MeV/c
λ_S = 6 mm; λ_L = 3.4 m

$K^+\ K^-$
β^* = 0.245
p^* = 127 MeV/c
$\lambda_\pm$ = 95 cm

I rivelatori di KLOE

- $\sigma/p = 0{,}4\%$ (tracce $\theta > 45°$)
- $\sigma_{r\phi} \sim 150\ \mu m$, $\sigma_z = 2mm$
- $\sigma_{vertice} \sim 2\text{-}3\ mm$
- $\sigma\ (m_{\pi\pi}) \sim 1\ MeV$

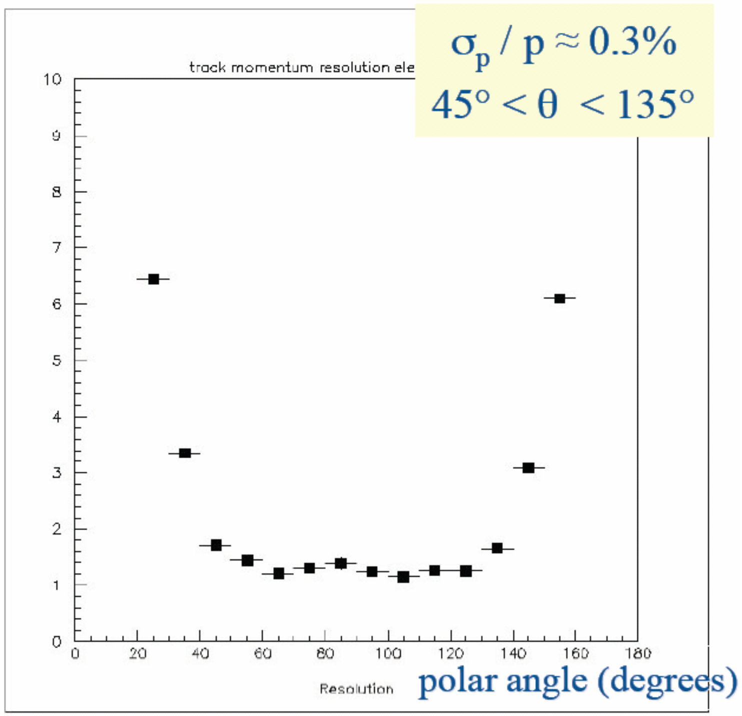


- $\varepsilon > 95\%$ per $E_\gamma > 20$ MeV
- $\sigma_E/E = 0{,}057/\sqrt{E}$ (GeV)
- $\sigma_t = 54\ ps/\sqrt{E}$ (GeV) $\oplus$ 50ps
- $\sigma_{sciame} = 1{,}3\ cm/\sqrt{E}$ (GeV)
- $\sigma_{vertice}(\gamma\gamma) = 1{,}3$ cm ($K_L \to \pi^+\pi^-\pi^0$)

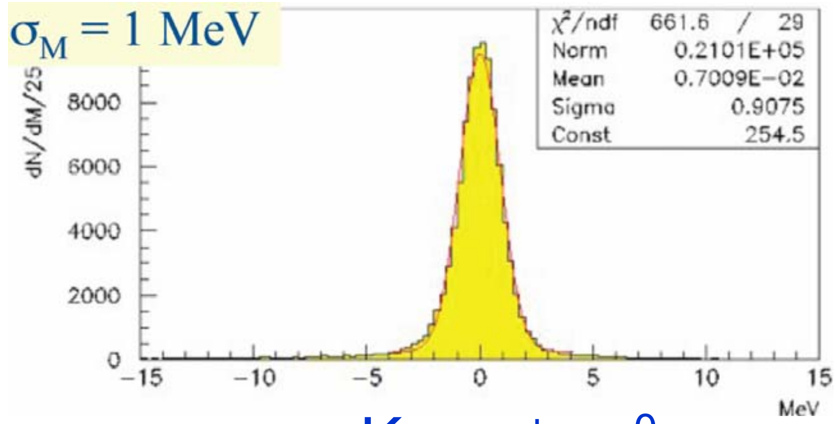
Ricostruzione di tracce

- Risoluzione spaziale
  - $\sigma_{\rho\phi} \cong 150\ \mu m$
  - $\sigma_z \cong 2\ mm$

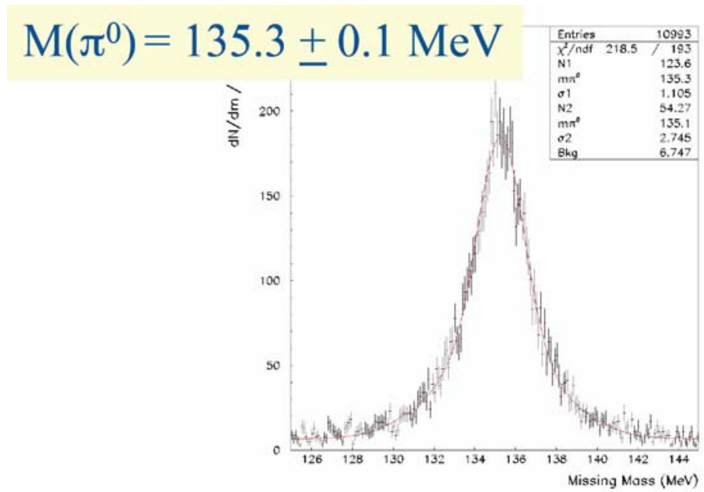
Bhabha scattering events



$K_S \to \pi^+\pi^-$



$K_L \to \pi^+\pi^-\pi^0$

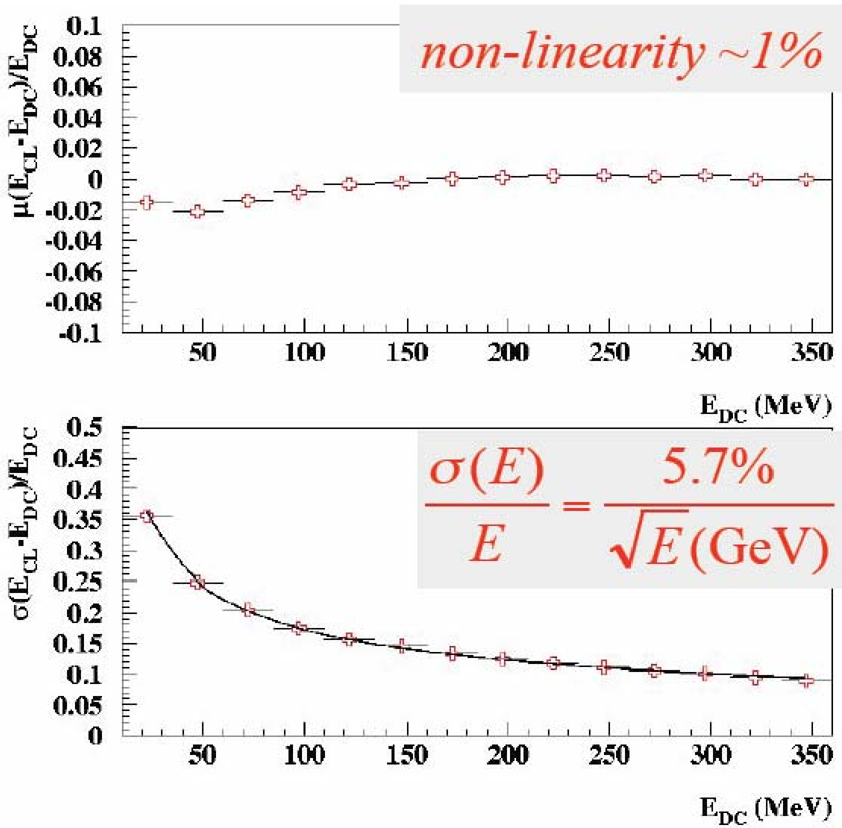


Misura dei fotoni

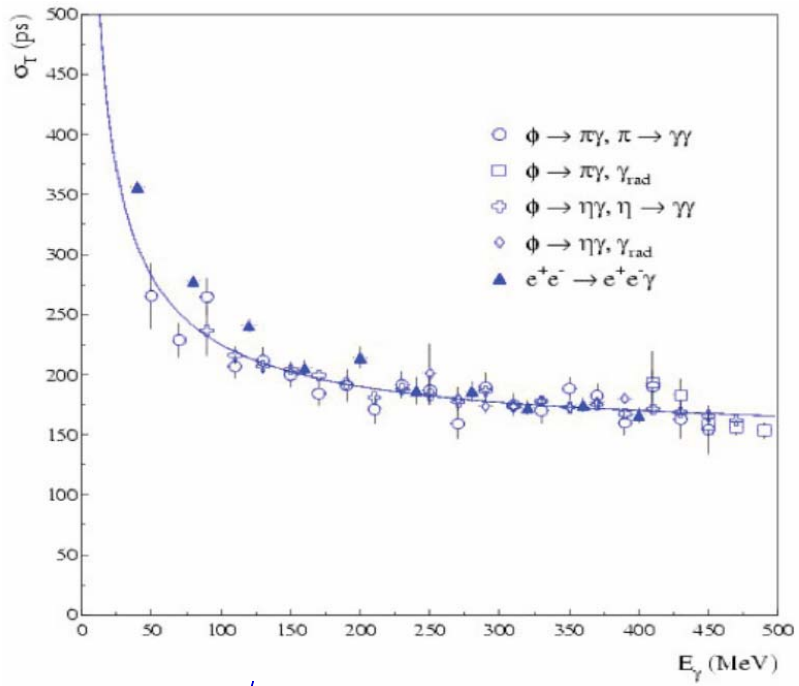
Risoluzione in energia

$\phi \to \pi^+\pi^-\pi^0$

E_γ dalla ricostruzione di $\pi^+\pi^-$



Risoluzione in tempo



$\sigma_t = 54\mathrm{ps}/\sqrt{E(\mathrm{GeV})} \oplus 120\mathrm{ps} \oplus 40\mathrm{ps}$

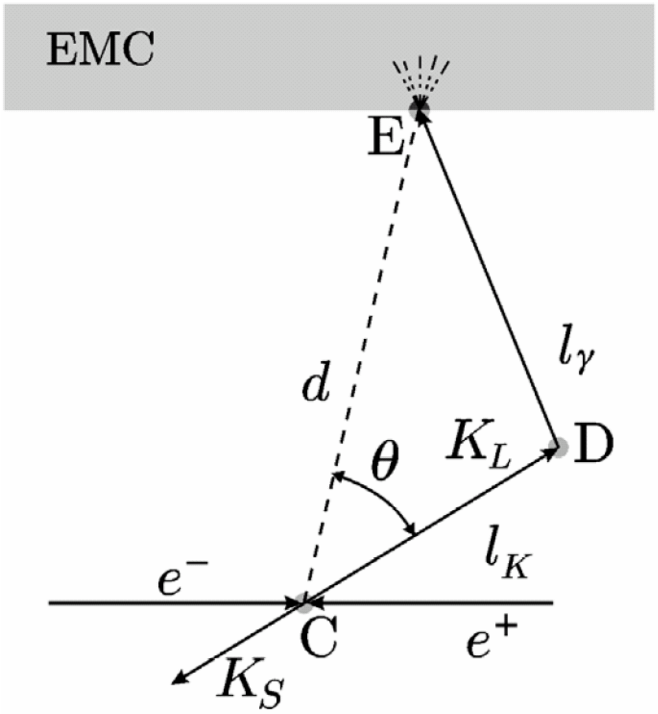
dalla struttura a bunch

da errori di calibrazione

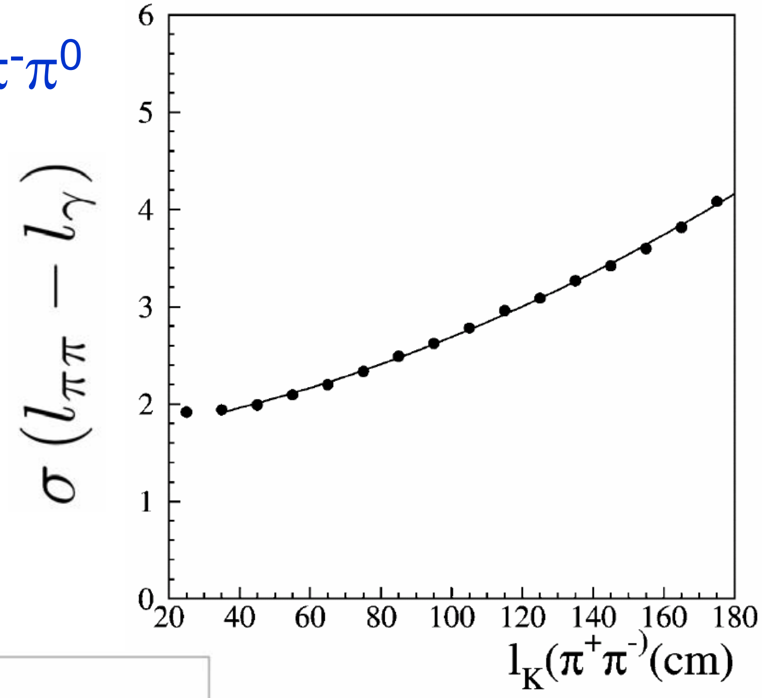
Misura dei fotoni/2

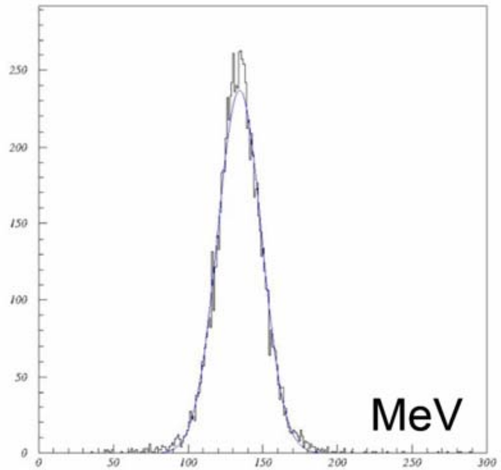
$$l\gamma^2 = d^2 + l_K^2 - 2dl_K \cos\theta$$

$$ct_\gamma = l_K/\beta_K + l_\gamma$$



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





M=134,5 MeV

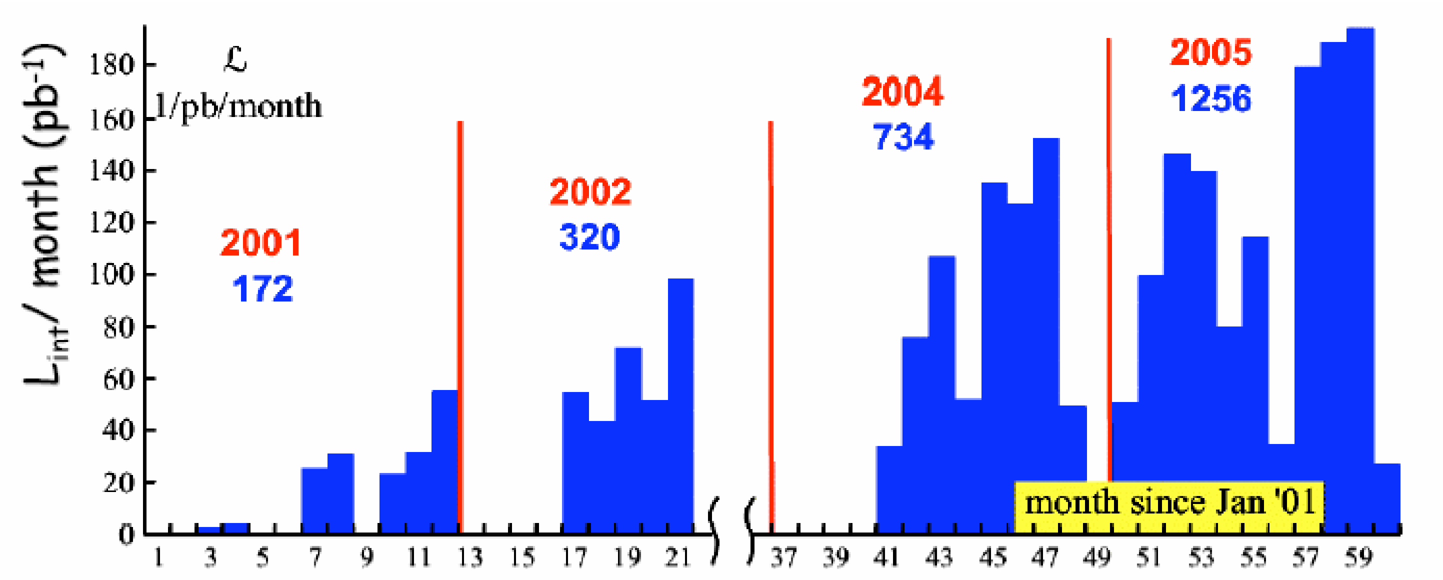
$\sigma_M \cong$14 MeV

I dati di KLOE

- Presa dati nel periodo 2001-05

  ~2,5 fb^{-1} $\sqrt{s}=M(\Phi)$

  - **~2,5x10^9 K_SK_L e 3,6x10^9K^+K^-**



- Presa dati 2006

  4 punti "energy scan" intorno al picco della Φ 225 pb^{-1}

Fisica dei K

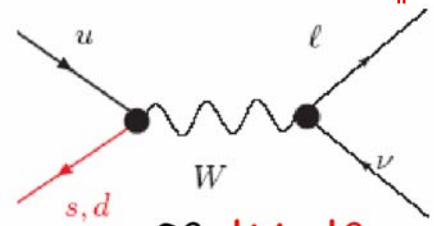
Vus e universalità

Interesse per la misura di V_{us} con i K/1

MS – Accoppiamento W con corrente debole carica:

$$\boxed{\frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^+ \left(\bar{\mathbf{U}}_L \mathbf{V}_{CKM} \gamma^\mu \mathbf{D}_L + \bar{e}_L \gamma^\mu \nu_{eL} + \bar{\mu}_L \gamma^\mu \nu_{\mu L} + \bar{\tau}_L \gamma^\mu \nu_{\tau L} \right) + h.c.}$$

A bassa energia $$G_F = \frac{g^2}{4\sqrt{2} M_W^2}$$



$\propto G^2{}_F |V_{uq}|^2$

Allora:

- $$\frac{\Gamma(K \to \pi e \nu)}{\Gamma(K \to \pi \mu \nu)} \implies universalità\ e - \mu$$
- $$\Gamma(K \to \pi e \nu)\ \text{e}\ \Gamma(K \to \pi \mu \nu) \implies g^4 |V_{us}|^2$$
- $$\Gamma(K \to \pi e \nu)\ \text{e}\ \Gamma(K \to \pi \mu \nu)\ \text{più dec. } \beta \implies \text{unitarietà}$$
  $$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 \simeq |V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 = 1 \quad (|V_{ub}|^2 \sim 1,5 \times 10^{-5})$$
- $$\frac{\Gamma(K \to \mu \nu)}{\Gamma(\pi \to \mu \nu)} \implies \text{misura indipendente di } \frac{|V_{us}|^2}{|V_{ud}|^2}$$

Decadimenti semileptonici e V_{us}

Decadimento del μ – V e A $\Gamma(\mu \to e\nu\bar{\nu}) = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3}\left(1 + \mathcal{O}\left(m_e^2/m_\mu^2\right) + \mathcal{O}(\alpha/\pi)\right)$ ⇒ G_F

Decadimento del K: $0^- \to 0^-$, Fermi super-permesso solo V, Cabibbo "soppresso"

$$\boxed{\Gamma\left(K_{l3(\gamma)}\right) = \frac{G_F^2 M_K^5}{192\pi^3} C_K^2 \left|V_{us}\right|^2 \left|f_+(0)\right|^2 I_K^l S_{EW}\left(1 + \delta_K^{SU(2)} + \delta_K^{em}\right)}$$

$BR(K\to\pi l\nu)/\tau_K$

fattore di isospin
$C_K=1$ ($1/\sqrt{2}$) per K^0 ($K^\pm$)

f(t): fattore di forma $K\to\pi$
$t=(p_K-p_\pi)^2$

$I^l_K(\lambda'_+, \lambda''_+, \lambda_0)$
integrale spazio fasi

Correzione ew breve distanza
$\approx 1+(2\alpha/\pi)\ln(M_Z/M_K)$

correzione
rottura isospin

correzione em
lunga distanza

Da misurare

- Rapporti di decadimento
- Vite medie dei K
- Masse dei K
- Dipendenza da t dei FF

Da calcolare

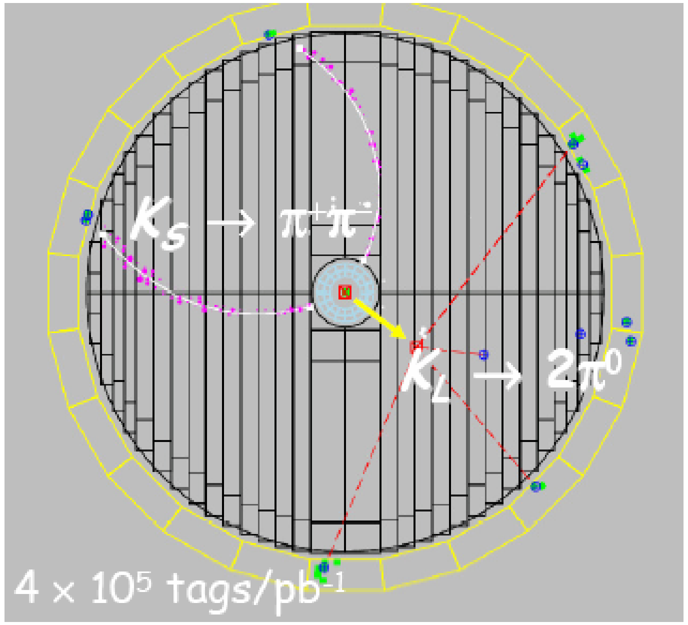
- Fattore di forma a t=0
- Correzioni
  - S_{EW}, $\delta^{SU(2)}$, δ^{em}

"Tagging" di K_L e K_S

K_L segnalato da $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$

K_S-tag

- **Due tracce con curvatura opposta**
- **Vertice "vicino" al punto d'incrocio**
- **$p_1+p_2 \sim 110$ MeV/c**
- **$M_{12} \sim M_K$ assegnando m_π alle tracce**

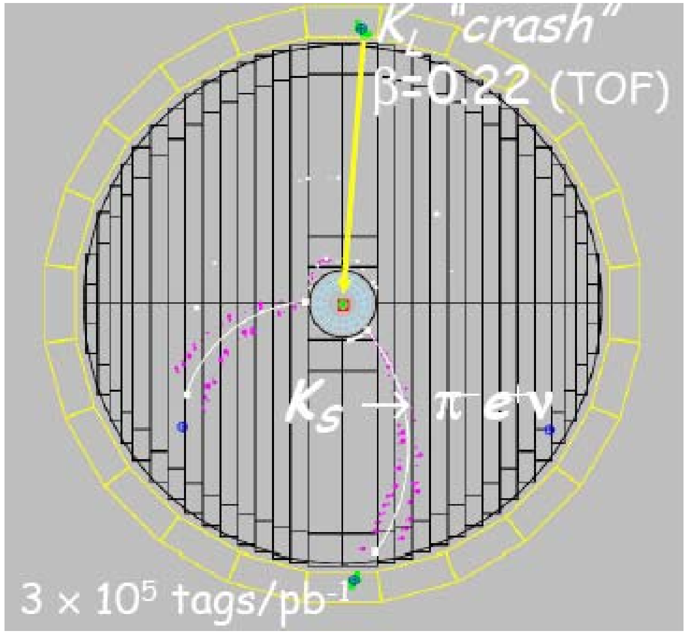


ε ~ **70%** geometria & vertice
K_L risoluzione angolare ~ 1°
K_L risoluzione momento ~ 1 MeV/c

K_S segnalato da K_L in calorimetro

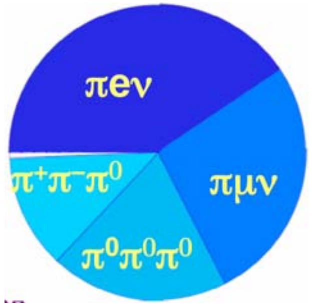
K_L-tag

- **Cluster di energia E > 200MeV**
- **$0{,}17 \leq \beta^* \leq 0{,}28$**
  ($\beta^* = r_{cl}/t_{cl}$ nel CM della Φ)



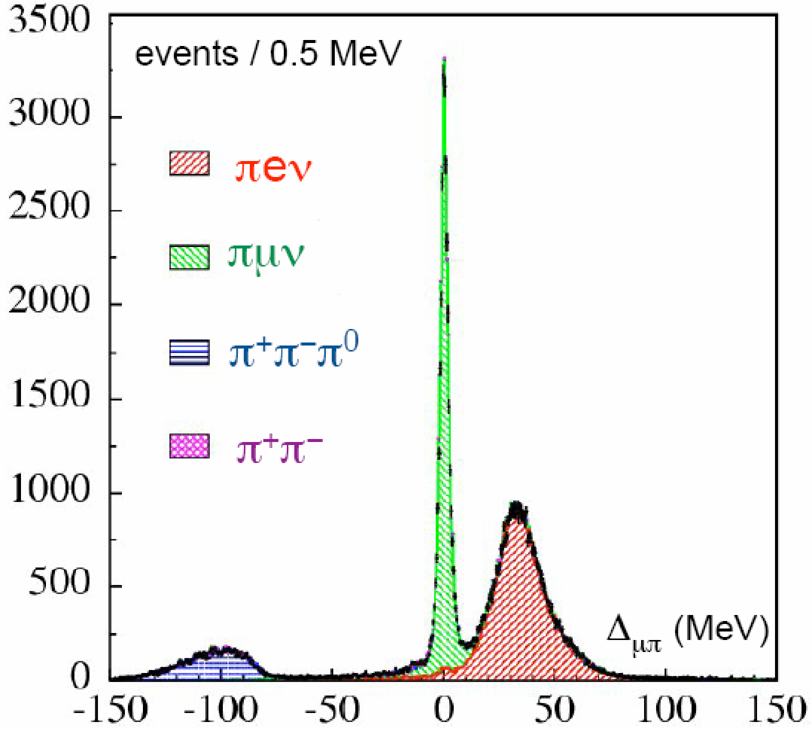
ε ~ **30%** geometria & taglio energia
K_S risoluzione angolare ~ 1°
K_S risoluzione momento ~ 1 MeV/c

Decadimenti principali del K_L/1



K_L-tag 328 pb^{-1} 13×10^6 K_L

¾ per la misura
¼ per valutare efficienze



$\pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi\mu\nu$, $\pi e\nu$

- Due tracce con vertice nel VF
- PID
  - Posizione del centroide del cluster
  - Rapporto $E_{cl}/p_{traccia}$
- $\Delta_{\mu\pi}$=min(p_{miss}-E_{miss}) ip. $\pi-\mu$ e $\mu-\pi$
  - Fit di $\Delta_{\mu\pi}$ con distr. MC (incluso radiativi)

$\pi^0\pi^0\pi^0$

- Almeno 3 γ con vertice in FV
- Tagli addizionali per n_γ>3
- Vertice da TOF fotoni

Decadimenti principali del K_L/2

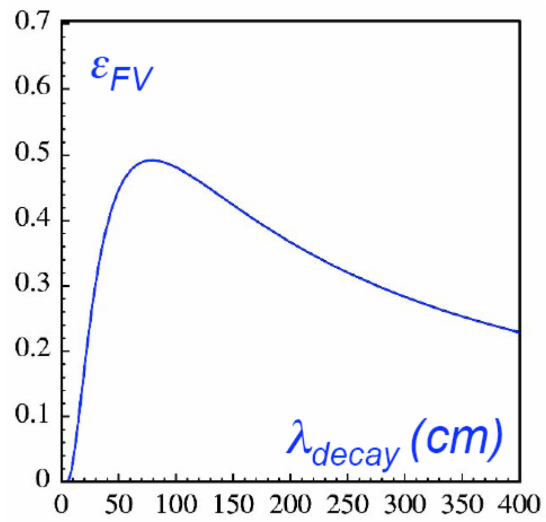
$$BR(K_L \to f) = \frac{N_f}{N_{tag}} \frac{1}{\epsilon^f_{rec} \; \epsilon_{FV}(\tau_L) \cdot \epsilon^f_{tag}/\epsilon^{all}_{tag}}$$

Efficienza di ricostruzione

- $K_L \to \pi e\nu, \pi\mu\nu$ ~55%
- $K_L \to \pi^+\pi^-\pi^0$ ~40%
- $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ ~99%

Integrale sul VF ~26%

"Tag bias"



Calcola inizialmente i BR usando τ_L del PDG

ε_{FV} dipende da τ_L – Allora:

− Somma tutti i BR

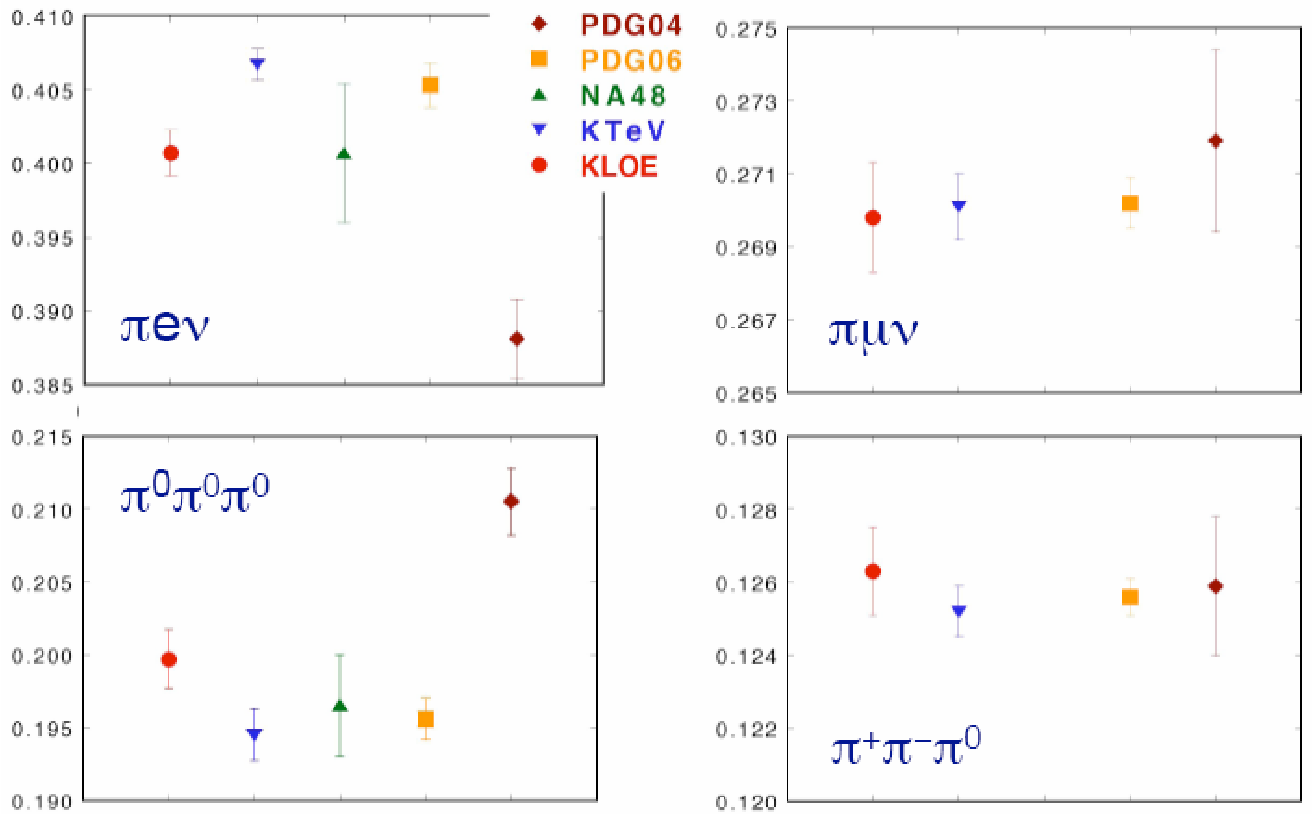
$BR(\pi\pi\pi+\pi\mu\nu+\pi e\nu)_{KLOE} + BR(\pi\pi)_{PDG04} = 1{,}0104 \pm 0{,}0076$

− Imponi $\Sigma BR=1$
− Rivaluta τ_L imponendo $\Sigma BR=1$
− Rinormalizza BR

Decadimenti principali del K_L/3

$BR(K_L \to \pi e \nu(\gamma)) = 0{,}4007 \pm 0{,}0006 \pm 0{,}0014$
$BR(K_L \to \pi \mu \nu(\gamma)) = 0{,}2698 \pm 0{,}0006 \pm 0{,}0014$
$BR(K_L \to \pi^0 \pi^0 \pi^0) = 0{,}1997 \pm 0{,}0005 \pm 0{,}0019$
$BR(K_L \to \pi^+ \pi^- \pi^0(\gamma)) = 0{,}1263 \pm 0{,}0005 \pm 0{,}0011$

$\tau_L = 50{,}72 \pm 0{,}17 \pm 0{,}33$



Vita media del K_L

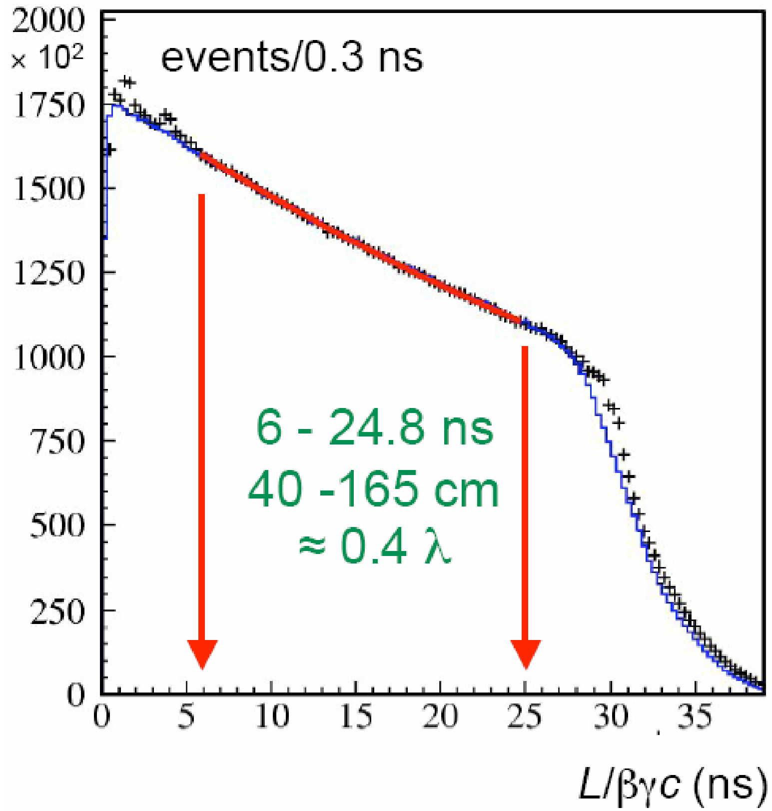
Da eventi $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ con K_S-tag
$\to$ massimizza eventi e minimizza tag bias
400 pb^{-1} $1{,}2 \times 10^9$ ϕ 10^7 K_L

- Ampia accettanza ~ $0{,}4\lambda_L$
  $\to$ Importante, più basso $\sigma(\tau_L)$
- Efficienza ε_{VTX} molto alta e ~ costante con la lunghezza di decadimento
- $K_L \to \pi^+\pi^-\pi^0$ per valutare risoluzione e scala dei tempi

$\tau_L = 50{,}92 \pm 0{,}17 \pm 0{,}25$ ns

Facendo la media pesata di questa e della precedente (sono scorrelate):

$\tau_L = 50{,}84 \pm 0{,}23$ ns

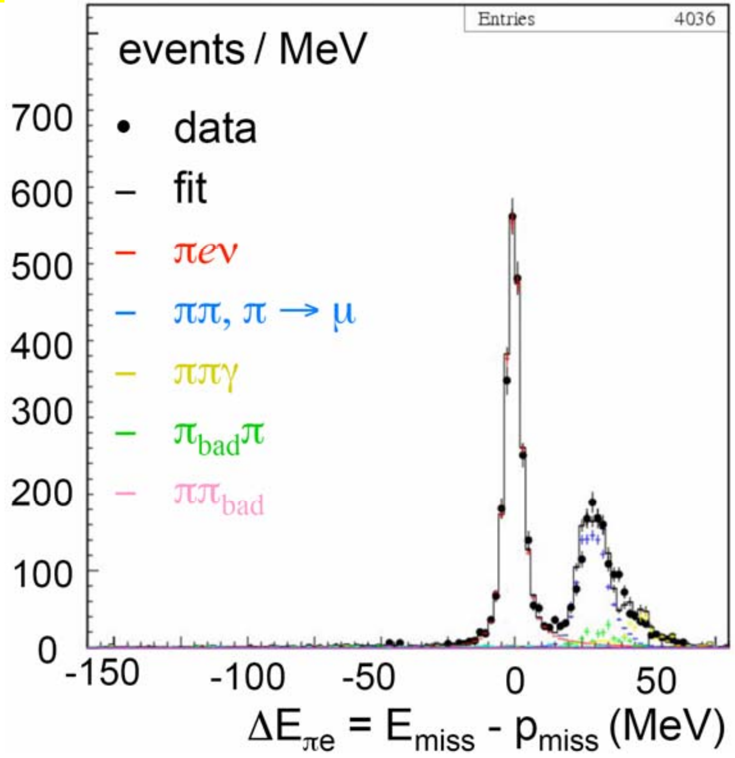


K_L^0 MEAN LIFE

VALUE (10^{-8} s)	*EVTS*	*DOCUMENT ID*		*TECN*
5.116±0.020 OUR FIT				
5.099±0.021 OUR AVERAGE				
5.072±0.011±0.035	13M	[13] AMBROSINO	06	KLOE
5.092±0.017±0.025	15M	AMBROSINO	05C	KLOE
5.154±0.044	0.4M	VOSBURGH	72	CNTR

Decadimenti semileptonici del K_S

$K_S \to \pi e \nu$ K_L-tag 410 pb^{-1} – 13.000 eventi $\pi e \nu$ *Prima volta*



- Due tracce di curvatura opposta
- Vertice vicino al punto d'incrocio
  - $r \leq 4$ cm, $z \leq 10$ cm
- $M_{\pi\pi} < 490$ MeV assegnando la massa del π
- e-π con TOF (dopo associazione cluster)
- Fit della distribuzione E_{miss}-p_{miss} per determinare Nev

Normalizzando a $\pi^+\pi^-$

$$\begin{aligned} BR\left(K_S \to \pi^- e^+ \nu_e\right) &= (3,528 \pm 0,062) \times 10^{-4} \\ BR\left(K_S \to \pi^+ e^- \bar{\nu}_e\right) &= (3,517 \pm 0,058) \times 10^{-4} \\ BR\left(K_S \to \pi e \nu\right) &= (7,046 \pm 0,91) \times 10^{-4} \end{aligned}$$

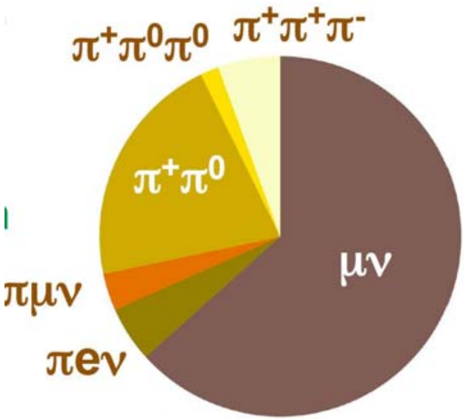
$$\begin{aligned} A_S &= \frac{\Gamma\left(K_S \to \pi^- e^+ \nu_e\right) - \Gamma\left(K_S \to \pi^+ e^- \bar{\nu}_e\right)}{\Gamma\left(K_S \to \pi^- e^+ \nu_e\right) + \Gamma\left(K_S \to \pi^+ e^- \bar{\nu}_e\right)} \\ &= (1,5 \pm 9,6 \pm 2,9) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

A_L = $3,32 \pm 0,08 \times 10^{-3}$ KTEV/NA48

$A_S = A_L$ CPT e $\Delta S = \Delta Q$ OK

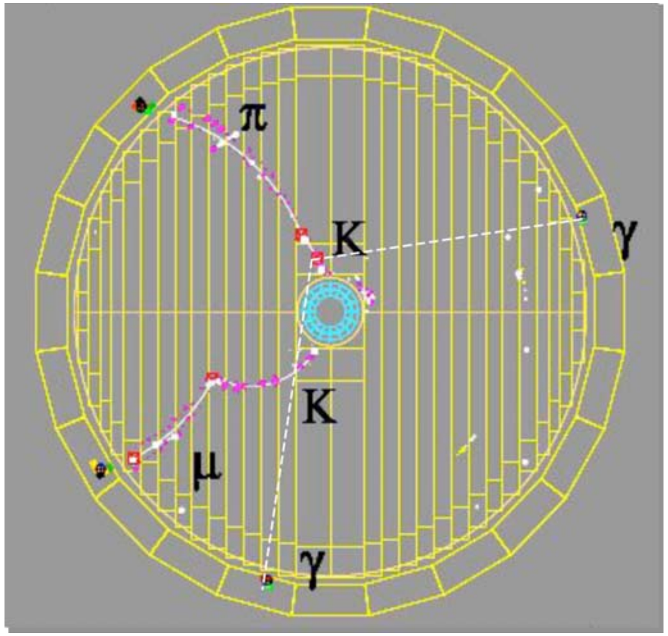
$A_S \neq A_L$ ~~CPT~~ (mixing) e/o $\Delta S \neq \Delta Q$ (dec)

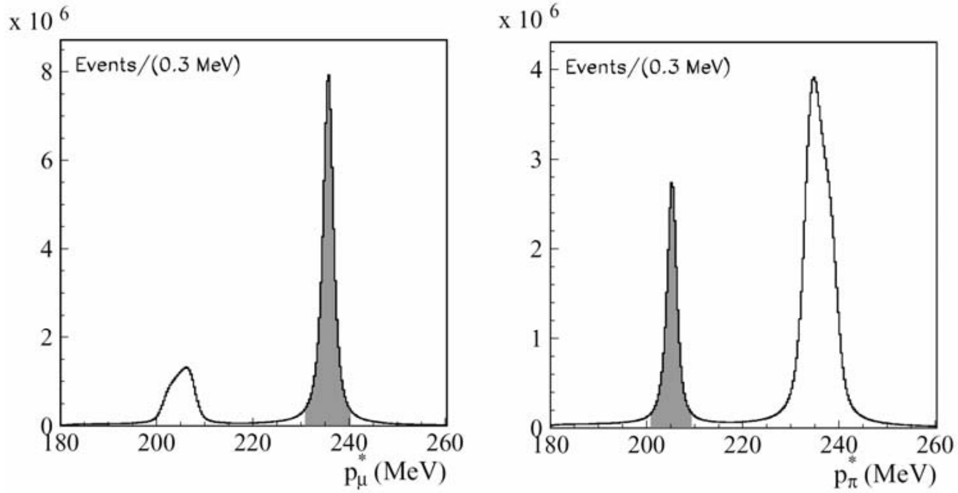
Tagging di K^+ e K^-



Usati i decadimenti in due corpi $K^\pm \to \mu^\pm\nu$ e $K^\pm \to \pi^\pm\pi^0$

- ***Due tracce con curvature dello stesso segno che formano un vertice (kink) nel VF***
- ***K identificato da 70 < p_K < 130 MeV/c e punto di max avvicinamento a IP tale che r < 10cm e |z| < 20cm***
- ***Secondario identificato da picco nella distr. di p* (imp. nel CM del K) calcolato in ip. m_μ e m_π***
  - $K_{\mu 2} \to 231 < p_\mu^* < 241$ MeV/c
  - $K_{\pi 2} \to 201 < p_\pi^* < 209$ MeV/c
- ***Richiesto self-trigger calorimetrico per ridurre tag-bias***
- ***Efficienza complessiva 5-6%***

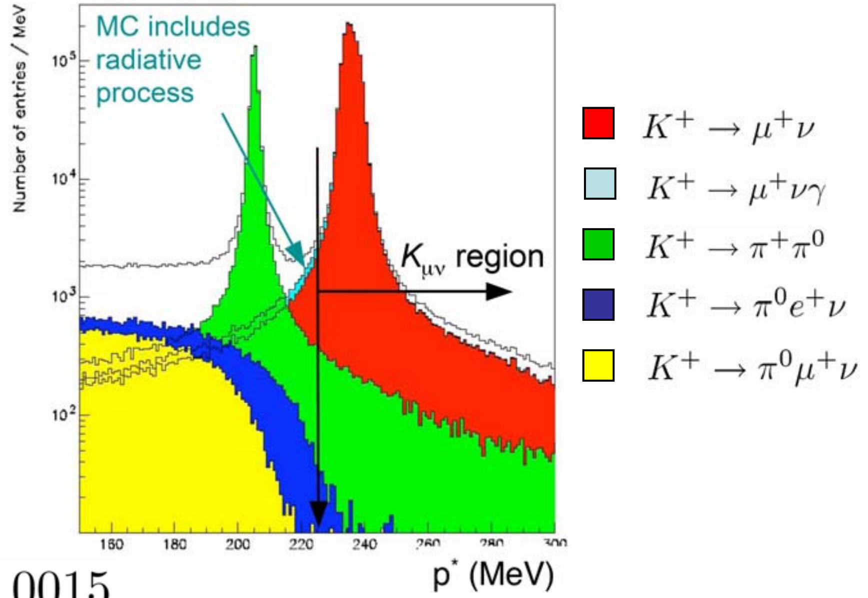




$K^+ \to \mu^+ \nu(\gamma)$

Grazie a QCD su reticolo (f^2_K/f^2_π) $\to$ alternativa ai dec. semileptonici per misurare V_{us}
Misura più recente nel 1972: non furono pienamente considerati effetti radiativi.
KLOE ha misurato il BR assoluto inclusivo di radiazione

- **175 pb^{-1}, ~60 per la misura, ~115 per valutare efficienze e fondo**
- **$K^+ \to \mu^+\nu$ taggati con $K^- \to \mu^-\nu$ per minimizzare effetti interazioni nucleari**
- **Selezione eventi secondo procedura tagging**
- **Sottratto il fondo $K^+ \to \pi^+\pi^0$**
- **Eventi contati per $225 \leq p^* \leq 400$ MeV/c (nell'ipotesi m_π)**
- **Efficienza ~32%**



$$BR\left(K^+ \to \mu^+\nu\left(\gamma\right)\right) = 0,6366 \pm 0,0009 \pm 0,0015$$

$$\frac{\Gamma(K^\pm \to \mu^\pm\nu(\gamma))}{\Gamma(\pi^\pm \to \mu^\pm\nu(\gamma))} = \frac{|V_{us}|^2}{|V_{ud}|^2}\frac{f_K^2}{f_\pi^2}\frac{m_K(1-m_\mu^2/m_K^2)^2}{m_\pi(1-m_\mu^2/m_\pi^2)^2}\left[1+\mathcal{O}(\alpha/\pi)\right]$$

Dalla teoria

$\Gamma(\mu^+\nu_\mu)/\Gamma_{total}$

VALUE (units 10^{-2})	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	CHG
63.44±0.14 OUR FIT Error includes scale factor of 1.2.				
63.60±0.16 OUR AVERAGE				
63.66±0.09±0.15	865k	[9] AMBROSINO 06A	KLOE	+
63.24±0.44	62k	CHIANG 72	OSPK	+

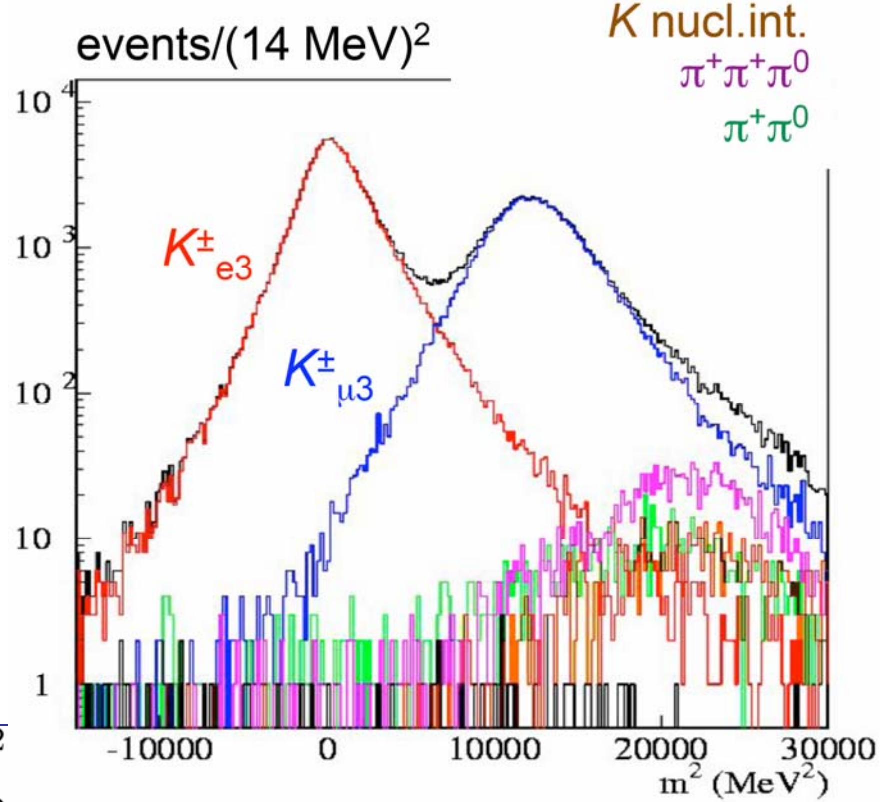
[9] Fully inclusive. Used tagged kaons from ϕ decays.

|Vus|=0,2223±0,0026

Decadimenti semileptonici di $K^{\pm}$

Misurati BR assoluti usando un campione di oltre 600×10^6 $\phi \to K^+K^-$

- 4 campioni distinti con tag: $K^- \to \mu^- \nu$, $K^+ \to \mu^+ \nu$, $K^- \to \pi^- \pi^0$, $K^+ \to \pi^+ \pi^0$
- analizzati indipendentemente per ridurre sistematiche
- Tagli cinematici su secondario carico per rigettare due corpi e $K_{3\pi}$
- Tempo di volo per separazione e-μ
- Numero di eventi dal fit di m^2_{lept}



Mediando i dati dei quattro campioni:

$$\boxed{\begin{aligned} BR(K_{e3}) &= (4,965 \pm 0,038 \pm 0,037) \times 10^{-2} \\ BR(K_{\mu3}) &= (3,233 \pm 0,029 \pm 0,026) \times 10^{-2} \end{aligned}}$$

Radiazione inclusa non essendo richiesta chiusura cinematica

$$\frac{\Gamma(K_{\mu3})}{\Gamma(K_{e3})} = 0,6511 \pm 0,0064 \text{ accordo entro } 1,5\sigma \text{ con } R^{SM}_{\mu e} = 0,6646\,(61)$$

Vita media di $K^{\pm}$

- 210 pb^{-1} - Eventi taggati con $K \rightarrow \mu\nu$
- Usati due metodi per controllo incrociato errori sistematici

1° metodo: $\tau^{\pm}$ dalla lunghezza di decadimento (solo DC)

- Usati tutti i tipi di decadimento
- Identificato il vertice di decadimento (nel VF)
- Ricostruita la lunghezza di decadimento
- τ_K dal fit del tempo proprio $t_K = L/\beta\gamma c$

2° metodo: $\tau^{\pm}$ dal tempo di decadimento (solo cal.)

- Usati $K^{\pm} \rightarrow X^{\pm}\pi^0$
- Usato il tag per stimare T^0
- $t_K = (t_\gamma - L_\gamma/c - T^0)\gamma_K$
- τ_K dal fit del tempo proprio t_K

$$\tau = (12,337 \pm 0,030)\, ns$$

$$PDG: \quad \tau = (12,384 \pm 0,024)\, ns$$

$$\frac{\tau^+}{\tau^-} = 1,004 \pm 0,004$$

$K \to \pi l \nu$: fattori di forma

$$\langle \pi \left| J_\mu^{adr} \right| K \rangle = f_+(t)\,(P+p)_\mu + f_-(t)\,(P-p)_\mu$$

$$f_0(t) = f_+(t) + \frac{t}{m_K^2 - m_\pi^2} f_-(t) \qquad\qquad f_+(0) = f_0(0)$$

$$\langle \pi \left| J_\mu^{adr} \right| K \rangle = f_+(0)\left[(P+p)_\mu \tilde{f}_+(t) + \underbrace{(P-p)_\mu}_{\approx m_l}\left(\tilde{f}_0(t) - \tilde{f}_+(t)\right)\frac{m_K^2 - m_\pi^2}{t}\right]$$

Sviluppati in potenze di t

$\approx m_l$ → Solo $\tilde{f}_+$ per Ke3

vettoriale

$$\boxed{\tilde{f}_+(t) = 1 + \lambda'_+ \frac{t}{m_\pi^2} + \frac{1}{2}\lambda''_+ \left(\frac{t}{m_\pi^2}\right)^2 + \ldots}$$

scalare

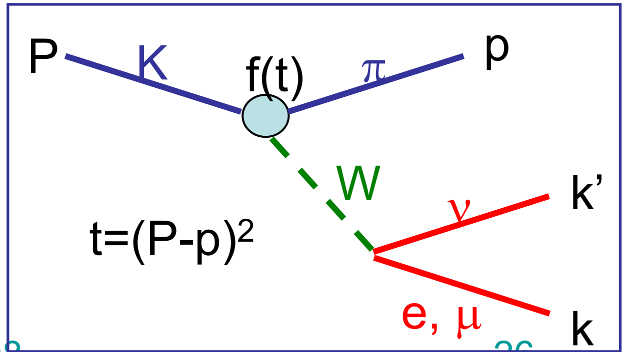
$$\boxed{\tilde{f}_0(t) = 1 + \lambda'_0 \frac{t}{m_\pi^2} + \frac{1}{2}\lambda''_0 \left(\frac{t}{m_\pi^2}\right)^2 + \ldots}$$

o come polo

$$\boxed{\tilde{f}_+(t) = \frac{1}{1 - t/M_V^2}} \qquad \boxed{\tilde{f}_0(t) = \frac{1}{1 - t/M_S^2}} \quad \Longrightarrow \quad \lambda' = (m_\pi/M)^2 \qquad \lambda'' = 2\lambda'^2$$

I parametri λ sono estratti fittando la funzione densità degli eventi → λ' e λ'' fortemente correlati

KLOE ha usato una nuova parametrizzazione basata su relazioni di dispersioni

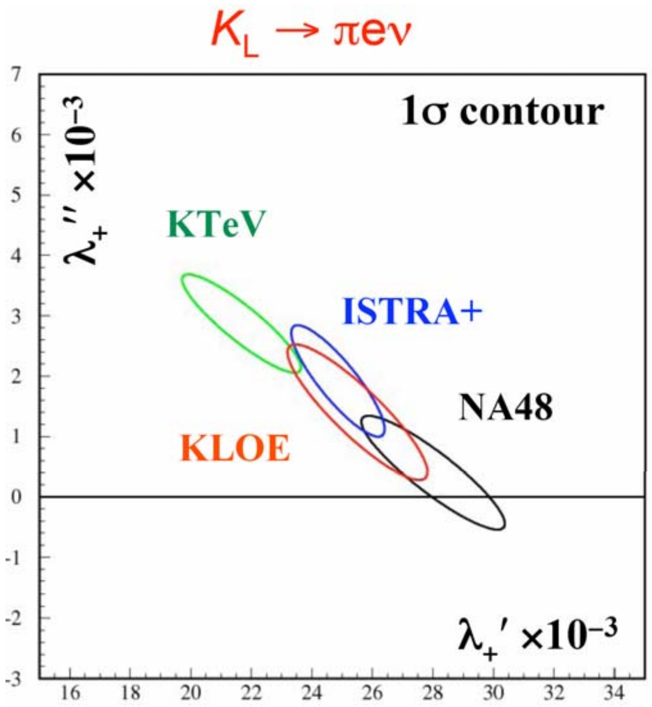


$K \to \pi l \nu$: fattori di forma/2

- K_{Le3}
  - 328 pb^{-1}, 2 10^6 K_L - stesso campione decad. K_L
    - Tagli cinematici più stringenti
    - TOF per separazione e-μ-π
    - Misure separate per ciascuno stato di carica (e+π-, e-π+)

- Sviluppo lineare $\lambda_+=(28{,}6\pm0{,}5\pm0{,}4)\ 10^{-3}$
- Sviluppo quadratico $\lambda'_+=(25{,}5\pm1{,}5\pm1{,}0)\ 10^{-3}$
  $\lambda''_+=(1{,}4\pm0{,}7\pm0{,}4)\ 10^{-3}$

- Polo $M_V=(870\pm6\ \pm7)$ MeV
  - KTEV $M_V=(882{,}3\ \pm6{,}5)$ MeV
  - NA48 $M_V=(859\pm18)$ MeV



$K \to \pi l \nu$: fattori di forma/3

- **$K_{L\mu3}$**

  Più difficile – Separazione $\pi-\mu$ problematica – Invece di E_π (equiv. a t) fit di E_ν dopo integraz. su E_π. E_ν =momento mancante (nel CM del K) $\rightarrow$ nessuna necessità di separare $\pi-\mu$

  – 328 pb^{-1}, 1,8 10^6 KL - stesso campione decad. K_L

$$\begin{aligned} \lambda'_+ &= (22,3 \pm 9,8 \pm 3,7) \times 10^{-3} \\ \lambda''_+ &= (4,8 \pm 4,9 \pm 1,6) \times 10^{-3} \\ \lambda'_0 &= (9,1 \pm 5,9 \pm 2,6) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

- Combinando questi con quelli di Ke3

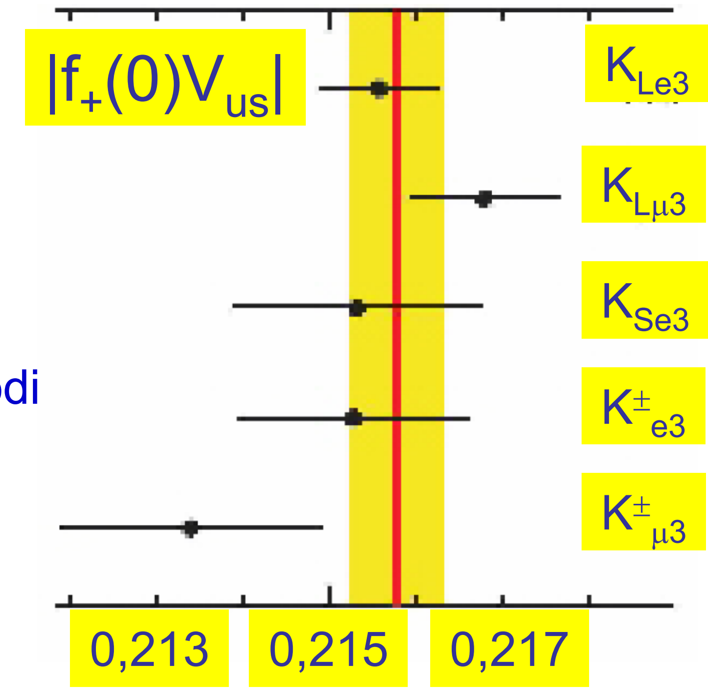
$$\boxed{\begin{aligned} \lambda'_+ &= (25,6 \pm 1,7) \times 10^{-3} \\ \lambda''_+ &= (1,5 \pm 0,8) \times 10^{-3} \\ \lambda'_0 &= (15,4 \pm 2,2) \times 10^{-3} \end{aligned}}$$

- C'è una forte correlazione tra i parametri del fit quadratico. KLOE ha usato una nuova parametrizzazione basata su relazione di dispersione, con la quale si fitta un solo parametro sia per FF scalare che vettoriale. Combinando K_{e3} e $K_{\mu3}$ si ha
  – λ_+=(25,7$\pm$0,4 $\pm$0,4) 10^{-3}
  – λ_0=(14,0 $\pm$1,6 $\pm$1,3) 10^{-3}

$|f_+(0)V_{us}|$

Parametri	$\mathbf{I}\left(K^0_{e3}\right)$	$\mathbf{I}\left(K^0_{\mu3}\right)$	$\mathbf{I}\left(K^+_{e3}\right)$	$\mathbf{I}\left(K^+_{\mu3}\right)$
$\lambda'_+,\ \lambda''_+\ \lambda'_0$	$0,15483\,(40)$	$0,10271\,(52)$	$0,15919\,(54)$	$0,10568\,(54)$
$\lambda_+\ \lambda_0$	$0,15477\,(35)$	$0,10262\,(47)$	$0,15913\,(36)$	$0,10559\,(48)$
$\Delta\,(\%)$	$0,04$	$0,09$	$0,04$	$0,09$

Canale	$\delta_K^{SU(2)}$	δ_{Kl}^{em}
K^0_{e3}	0	$0,57\,(15)\,\%$
$K^0_{\mu3}$	0	$0,80\,(15)\,\%$
$K^\pm_{e3}$	$2,36\,(22)\,\%$	$0,08\,(15)\,\%$
$K^\pm_{\mu3}$	$2,36\,(22)\,\%$	$0,05\,(15)\,\%$



- Calcolato indipendentemente per i cinque modi

$$K^0_{Le3},\ K^0_{L\mu3},\ K^0_{Se3},\ K^\pm_{e3}\ \mathrm{e}\ K^\pm_{\mu3}$$

- Mediando

$$\boxed{|f_+(0)\,V_{us}| = 0,2157 \pm 0,0006}$$

Universalità e-μ

$$r_{\mu e} \equiv \frac{\left|f_+(0)\,V_{us}\right|^2_{\mu 3,sper}}{\left|f_+(0)\,V_{us}\right|^2_{e3,sper}} = \frac{\Gamma_{\mu 3}}{\Gamma_{e3}}\frac{I_{e3}\left(1+\delta_{Ke}\right)^2}{I_{\mu 3}\left(1+\delta_{K\mu}\right)^2}$$

$$\delta_{Kl} = \delta_K^{SU(2)} + \delta_{Kl}^{em}$$

$$\boxed{r_{\mu e} = \frac{g_\mu^2}{g_e^2} \quad \longrightarrow \quad = 1 \quad nel \quad MS}$$

- Mediando i modi carichi e neutri troviamo

$r_{\mu e} = 1{,}000 \pm 0{,}008$

- Per confronto:

  $(r_{\mu e})_\pi = 1{,}0042 \pm 0{,}0033$ (Ramsey_Musolf et al., Phys. Rev. D76 (2007) 095017)

  $(r_{\mu e})_\tau = 1{,}000 \pm 0{,}004$ (Davier et al., Rev. Mod. Phys. 78 (2006) 1043)

Unitarietà di CKM

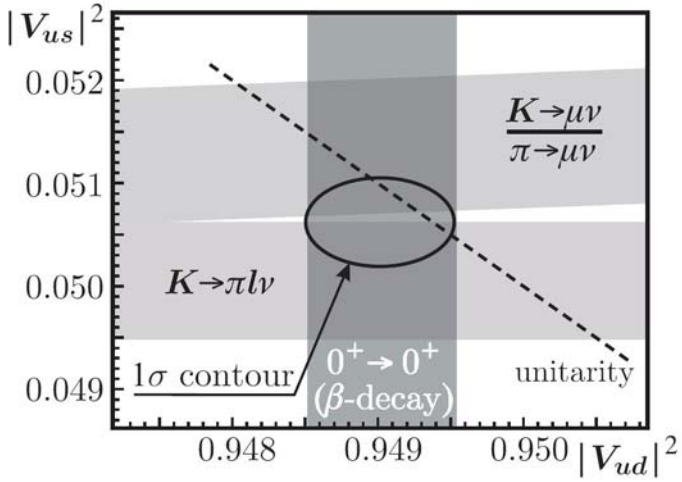
- Usando un valore recente di $f_+(0)$ da QCD su reticolo (Boyle et al., arXiv: 0710.5136) $f_+(0)=0{,}9644 \pm 0{,}0049$

  $\Rightarrow |V_{us}|=0{,}2237 \pm 0{,}0013$

  e con un valore recente $|V_{ud}| = 0{,}97418$ da dec. β superpermessi (Towner, Hardy, arXiv: 0710.3181)

  $\Rightarrow |V_{ud}|2 + |V_{us}|2 -1 = -0{,}0009 \pm 0{,}0008$

  compatibile con unitarietà CKM entro ~0,1%



- Ulteriori informazioni calcolando $|V_{us}/V_{ud}|$

PDG

$f_K/f_\pi=1{,}189\pm0{,}007$
(E. Follana et al., arXiv: 0706.1726)

$0{,}9930\pm0{,}0035$
(Marciano, Phys. Rev. Lett. 93(2004)231803)

$$\frac{\Gamma\left(K_{\mu 2(\gamma)}\right)}{\Gamma\left(\pi_{\mu 2(\gamma)}\right)} = \frac{|V_{us}|^2}{|V_{ud}|^2}\frac{f_K^2}{f_\pi^2}\frac{m_K\left(1-m_\mu^2/m_K^2\right)^2}{m_\pi\left(1-m_\mu^2/m_K^2\right)^2} \times \frac{1+\frac{\alpha}{\pi}C_K}{1+\frac{\alpha}{\pi}C_\pi} \Rightarrow |V_{us}|^2/|V_{ud}|^2 = 0{,}0541\pm0{,}007$$

➢ $|V_{us}|^2/|V_{ud}|^2$	questo	fit	**$|V_{us}| = 0{,}2249 \pm 0{,}0010$**
➢ $|V_{ud}|$	dec β		**$|V_{ud}| = 0{,}97417 \pm 0{,}0026$**
➢ $|V_{us}|$	KLOE		**$1- |V_{ud}|2 - |V_{us}|2 = 0{,}0004 \pm 0{,}0007$ (~0,6σ)**

Fisica dei K
Test di simmetrie

Gli stati K_S e K_L - Re(ε'/ε) - *Richiami*

Il sistema dei K^0 è descritto dall'equazione

$$i\frac{\partial}{\partial t}\psi(t) = H\psi(t) = \left(M - \frac{i}{2}\Gamma\right)\psi(t)$$

CPT $\begin{cases} M_{11} = M_{22} & (\text{ovvero } m_{K^0} = m_{\bar{K}^0}) \\ \Gamma_{11} = \Gamma_{22} & (\text{ovvero } \Gamma_{K^0} = \Gamma_{\bar{K}^0}) \end{cases}$

Autostati

$$K_{S,L} = \frac{1}{\sqrt{2\left(1+|\epsilon_{S,L}|^2\right)}}\left[(1+\epsilon_{S,L})K^0 \pm (1-\epsilon_{S,L})\bar{K}^0\right]$$

Con

$$\epsilon_{S,L} = \frac{-i\,\mathrm{Im}(m_{12}) - \frac{1}{2}\mathrm{Im}(\Gamma_{12}) \pm \frac{1}{2}\left[m_{K^0} - m_{\bar{K}^0} - \frac{i}{2}(\Gamma_{\bar{K}^0} - \Gamma_{K^0})\right]}{m_L - m_S + i\frac{(\Gamma_S - \Gamma_L)}{2}}$$
$$\equiv \epsilon \pm \delta$$

$\varepsilon \to \cancel{C}P$

$\delta \to C\cancel{P}T$

I parametri ε e δ si collegano a grandezze misurabili per mezzo delle ampiezze di decadimento in stati finali definiti. Per il decadimento in 2π

$$\eta_{+-} = \frac{\langle\pi^+\pi^-|T|K_L\rangle}{\langle\pi^+\pi^-|T|K_S\rangle} \simeq \tilde{\epsilon} + \epsilon'$$
$$\eta_{00} = \frac{\langle\pi^0\pi^0|T|K_L\rangle}{\langle\pi^0\pi^0|T|K_S\rangle} \simeq \tilde{\epsilon} - 2\epsilon'$$

CPT esatta $\begin{cases} \tilde{\epsilon} = \epsilon \\ \epsilon' \end{cases}$ $\cancel{C}P$ "indiretta" / $\cancel{C}P$ "diretta"

$\phi_{+-} \cong \phi_{00} \to$ Re(ε'/ε) misura $\cancel{C}P$ "diretta"

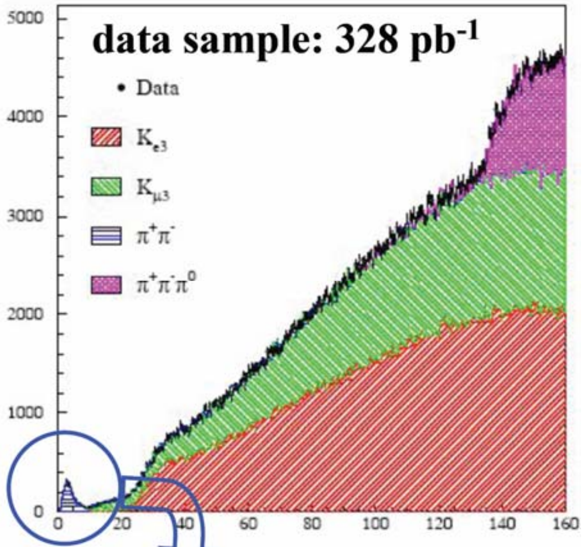
Ottenuta con "doppio rapporto"

$$R = \left|\frac{\eta_{+-}}{\eta_{00}}\right|^2 = \frac{\Gamma(K_L \to \pi^+\pi^-)\,\Gamma(K_S \to \pi^0\pi^0)}{\Gamma(K_L \to \pi^0\pi^0)\,\Gamma(K_S \to \pi^+\pi^-)} \simeq 1 + 6\,\mathrm{Re}(\epsilon'/\epsilon)$$

$$\mathrm{Re}(\epsilon'/\epsilon) \approx \epsilon'/\epsilon = (1.66 \pm 0.26) \times 10^{-3}$$

PDG

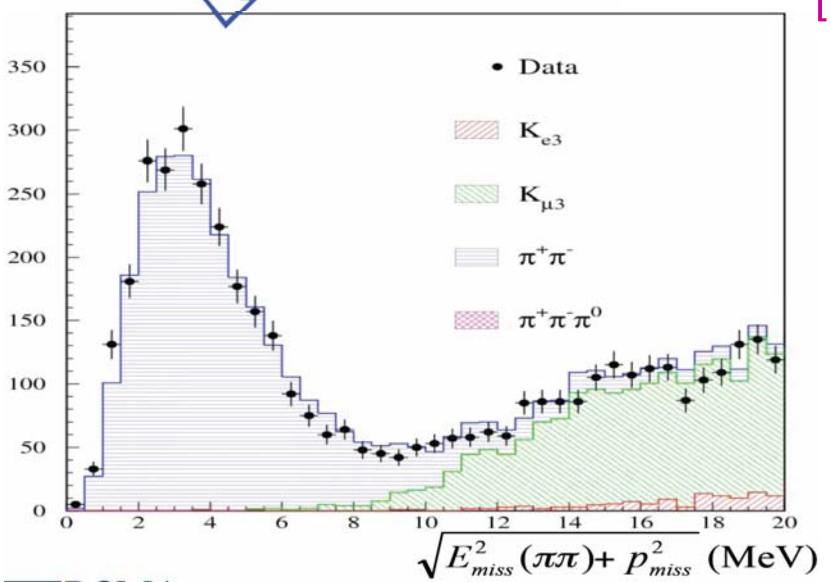
Decadimento $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$



- Due tracce di carica opposta
- Che fanno un vertice nel VF
- $\sqrt{(E^2_{miss} + p^2_{miss})}$ migliore discr. per ($\pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi e\nu$, $\pi\mu\nu$)
- Fit della distribuzione con andamenti MC
- Normalizzazione a $K_L \rightarrow \pi\mu\nu$ per ridurre sistematiche dovute a tag bias

$BR(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-) = (1{,}963 \pm 0{,}012 \pm 0{,}017) \times 10^{-3}$

[Include radiazione di stato finale (sia IB che DE)]

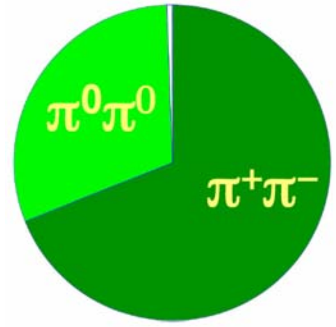


In this 2006 edition of the *Review of Particle Physics*, the values of $|\epsilon|$, $|\eta_{+-}|$, and $|\eta_{00}|$ decrease significantly as a result of the high precision measurements of K^0_L branching ratios from KTeV, KLOE, and NA48. These measurements reduce the branching ratio $\Gamma(K^0_L \rightarrow \pi^+\pi^-)/\Gamma(\text{total})$ by 5.5 percent, a $\boxed{4.6\sigma \text{ decrease relative to the 2004 edition}}$ [21].

Decadimenti principali del KS

Misura di $R_S=\Gamma[K_S\rightarrow\pi^+\pi^-(\gamma)]/\Gamma[K_S\rightarrow\pi^0\pi^0]$

K_L-tag 410 pb^{-1}



$K_S\rightarrow\pi+\pi-$

- Due tracce di curvatura opposta
- Vertice vicino al punto d'incrocio
  - $r\leq4$ cm, $z\leq10$ cm
- $120 < p < 300$ MeV/c
- accettanzaxefficienza~0,59

$K_S\rightarrow\pi^0\pi^0$

- Almeno 3 cluster "pronti"
- $| t_{cl}-r_{cl}/c | < 5\ \sigma_t$
- $E_{cl} > 20$ MeV/c $25° < \theta_{cl} < 155°$
  - Riduce il fondo macchina
- Accettanza x efficienza ~ 0,85

$R_S=2,2549\pm0,0054$

dall'altro con universalità

Includendo $K_S\rightarrow\pi e\nu$ e $K_S\rightarrow\pi\mu\nu$ e normalizzando $\Sigma_i BR_i=1$

da KLOE

$BR(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-(\gamma)) = (69,196 \pm 0,051)\%$

$BR(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0) = (30,678 \pm 0,051)\%$

Relazione di Bell-Steinberger – Test di CPT

Il sistema dei K^0 fornisce la sonda più sensibile per test di CPT

$$i\frac{\partial}{\partial t}\psi(t) = H\psi(t) = \left(M - \frac{i}{2}\Gamma\right)\psi(t)$$

$$K_{S,L} = \frac{1}{\sqrt{2\left(1+|\epsilon_{S,L}|^2\right)}}\left[(1+\epsilon_{S,L})K^0 \pm (1-\epsilon_{S,L})\bar{K}^0\right]$$

$$\begin{aligned}\epsilon_{S,L} &= \frac{-i\,\mathrm{Im}(m_{12}) - \frac{1}{2}\mathrm{Im}(\Gamma_{12}) \pm \frac{1}{2}\left[m_{K^0} - m_{\bar{K}^0} - \frac{i}{2}(\Gamma_{\bar{K}^0} - \Gamma_{K^0})\right]}{m_L - m_S + i\frac{(\Gamma_S - \Gamma_L)}{2}} \\ &\equiv \epsilon \pm \delta\end{aligned}$$

$$\text{CPT}\begin{cases} M_{11} = M_{22} & (\text{ovvero } m_{K^0} = m_{\bar{K}^0}) \\ \Gamma_{11} = \Gamma_{22} & (\text{ovvero } \Gamma_{K^0} = \Gamma_{\bar{K}^0}) \end{cases}$$

$\varepsilon \rightarrow \cancel{C}P$

$\delta \rightarrow C\cancel{P}T$

L'unitarietà permette di scrivere

$$\Gamma_{ij} = \sum_f \mathcal{A}_i(f)\mathcal{A}_j^*(f) \quad (i,j = 1,2 \equiv K^0, \bar{K}^0)$$

e quindi

$$\boxed{\left[\frac{\Gamma_S + \Gamma_L}{\Gamma_S - \Gamma_L} + i\tan\phi_{SW}\right]\left[\frac{\mathrm{Re}(\epsilon)}{1+|\epsilon|^2} - \mathrm{Im}(\delta)\right] = \frac{1}{\Gamma_S - \Gamma_L}\sum_f \mathcal{A}_L(f)\mathcal{A}_S^*(f)}$$

B. S. R.

$$\tan\phi_{SW} = \frac{2(m_L - m_S)}{\Gamma_S - \Gamma_L} = \frac{2\Delta m}{\Gamma_S - \Gamma_L}$$

BRS: una relazione tra Re(ε), Im(δ) e ampiezze di decadimento

Se *Im(δ) $\neq$ 0* allora CPT o l'unitarietà (o entrambe) sono violate

Relazione di Bell-Steinberger – Test di CPT/2

Vantaggio K^0 - solo pochi stati finali da considerare ($\pi\pi(\gamma)$, $\pi\pi\pi$, $\pi l\nu$) per significatività al livello 10^{-7}
I prodotti delle ampiezze sono espressi da parametri α_i ricavabili dai ris. sperimentali. Così:

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathrm{Re}(\epsilon)}{1+|\epsilon|^2} \\ \mathrm{Im}(\delta) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1+\kappa(1-2b) & (1-\kappa)\tan\phi_{SW} \\ (1-\kappa)\tan\phi_{SW} & -(1+\kappa) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_i \mathrm{Re}(\alpha_i) \\ \sum_i \mathrm{Im}(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{\tau_S}{\tau_L} \\ b &= (K_L \to \pi l\nu) \\ N &= N(k, b, \tan\phi_{SW}) \end{aligned}$$

Modi adronici

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \frac{1}{\Gamma_S}\langle \mathcal{A}_L(i)\,\mathcal{A}_S^*(i)\rangle = \eta_i BR(K_S \to i) \\ i &= \pi^0\pi^0, \pi^+\pi^-(\gamma), \pi^0\pi^0\pi^=, \pi^+\pi^-\pi^0(\gamma) \end{aligned}$$

Modi semileptonici

$$\begin{aligned} \alpha_{\pi l\nu} &= \frac{1}{\Gamma_S}\sum_{\pi l\nu}\langle \mathcal{A}_L(\pi l\nu)\,\mathcal{A}_S^*(\pi l\nu)\rangle + 2i\frac{\tau_S}{\tau_L}BR(K_L \to \pi l\nu)\,\mathrm{Im}(\delta) \\ &= 2i\frac{\tau_S}{\tau_L}BR(K_L \to \pi l\nu)\left[(A_S + A_L)/4 - i\,\mathrm{Im}(x_+)\right] \end{aligned}$$

$$A = \frac{\Gamma(K \to \pi^- l^+ \nu) - \Gamma(K \to \pi^+ l^- \bar{\nu})}{\Gamma(K \to \pi^- l^+ \nu) + \Gamma(K \to \pi^+ l^- \bar{\nu})}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(K^0 \to \pi^- l^+ \nu) &= \mathcal{A}_0(1-y) \\ \mathcal{A}(K^0 \to \pi^+ l^- \bar{\nu}) &= \mathcal{A}_0^*(1+y^*)(x_+ - x_-)^* \\ \mathcal{A}(\bar{K}^0 \to \pi^+ l^- \bar{\nu}) &= \mathcal{A}_0^*(1+y^*) \\ \mathcal{A}(\bar{K}^0 \to \pi^- l^+ \nu) &= \mathcal{A}_0(1-y)(x_+ + x_-) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_+ &\longrightarrow \text{NO } \Delta S = \Delta Q\ ;\ \text{SI } CPT \\ x_- &\longrightarrow \text{NO } \Delta S = \Delta Q\ ;\ \text{NO } CPT \\ y &\longrightarrow \text{SI } \Delta S = \Delta Q\ ;\ \text{NO } CPT \end{aligned}$$

Re(ε), Im(δ), ΔM

Grandezza	Origine
τ_{K_S}	*PDG*
τ_{K_L}	*media* **KLOE**
$m_L - m_S$	*PDG*
$BR(K_S \to \pi^+\pi^-)$	*media* **KLOE**
$BR(K_S \to \pi^0\pi^0)$	*media* **KLOE**
$BR(K_S \to \pi l \nu)$	**KLOE**
$BR(K_L \to \pi^+\pi^-)$	*media* **KLOE**
$BR(K_L \to \pi^0\pi^0)$	*media* **KLOE**
ϕ_{+-}	*PDG*
ϕ_{00}	*PDG*
$R_{S,\gamma}(E_\gamma > 20MeV)$	*E731*
$R^{th-IB}_{S,\gamma}(E_\gamma > 20MeV)$	**KLOE** *MC*
$\lvert\eta_{+-\gamma}\rvert$	*E773*
$\phi_{+-\gamma}$	*E773*
$BR(K_L \to \pi^+\pi^-\pi^0)$	*media* **KLOE**
η_{+-0}	*CPLEAR*
$BR(K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0)$	*media* **KLOE**
$BR(K_S \to \pi^0\pi^0\pi^0)$	**KLOE**
$BR(K_L \to \pi l \nu)$	*media* **KLOE**
A_L	*PDG*
A_S	**KLOE**
$\mathrm{Im}(x_+)$	*CPLEAR, NA48,* **KLOE**

Risultati

$\mathfrak{Re}(\varepsilon)$ = (159,6 ± 1,3) x 10^{-5}
$\mathfrak{Im}(\delta)$ = (0,4 ± 2,1) x 10^{-5}

Si ottiene, inoltre, $nel\ lim.\ \Gamma_{K^0} = \Gamma_{\bar{K}^0}$

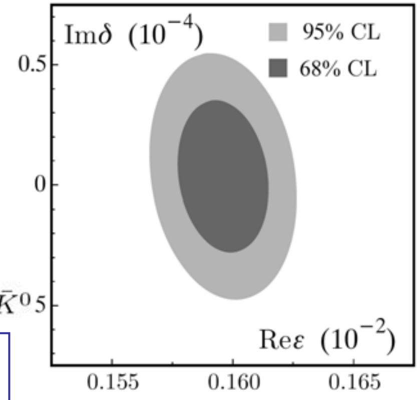
-5,3 10^{-19} < ΔM < 6,3 10^{-19} GeV (95% CL)

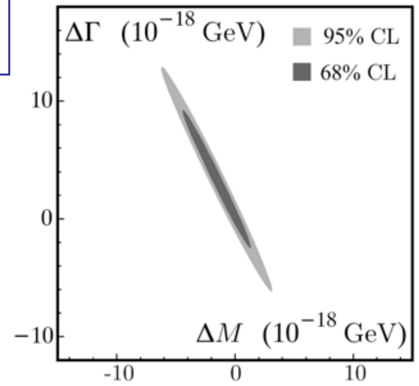
$$\Delta M = m_{K^0} - m_{\bar{K}^0}$$

Migliorano notevolmente i risultati precedenti di CPLEAR

$\mathfrak{Re}(\varepsilon)$ = (164,9 ± 2,5) x 10^{-5}
$\mathfrak{Im}(\delta)$ = (2,4 ± 5,0) x 10^{-5}

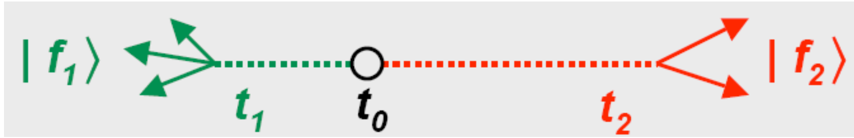
|ΔM| < 12,7 10^{-19} GeV (90% CL)





Evoluzione di K_S e K_L - Interferometria

$$|i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[K_S(\mathbf{p})\,K_L(-\mathbf{p}) - K_S(-\mathbf{p})\,K_L(\mathbf{p})\right]$$



Evoluzione temporale del sistema data da

$$\langle f_1, t_1; f_2, t_2 | i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\langle f_1, t_1 | K_S(\mathbf{p})\rangle \langle f_2, t_2 | K_L(-\mathbf{p})\rangle - \langle f_2, t_2 | K_S(-\mathbf{p})\rangle \langle f_1, t_1 | K_L(\mathbf{p})\rangle\right]$$

$$= \frac{\langle f_1 | K_S\rangle \langle f_2 | K_S\rangle}{\sqrt{2}}\left[\eta_2 e^{-(\Gamma_S t_1 + \Gamma_L t_2)/2} e^{-i(m_S t_1 + m_L t_2} - \eta_1 e^{-(\Gamma_S t_2 + \Gamma_L t_1)/2} e^{-i(m_S t_2 + m_L t_1}\right]$$

Numero dei decadimenti allo stato f_1 a t_1 e f_2 a t_2

$$\begin{aligned} I(f_1, t_1; f_2, t_2) \quad = \quad & \frac{|\langle f_1 | K_S\rangle \langle f_2 | K_S\rangle|^2}{2}\left[|\eta_1|^2 e^{-(\Gamma_L t_1 + \Gamma_S t_2)} + |\eta_2|^2 e^{-(\Gamma_S t_1 + \Gamma_L t_2)}\right. \\ & \left. -2|\eta_1||\eta_2| e^{-(\Gamma_S + \Gamma_L)(t_1 + t_2)/2} \cos(\Delta m(t_2 - t_1) + \phi_1 - \phi_2)\right) \end{aligned}$$

e integrando su t_1 e t_2 per $\Delta t = |t_2 - t_1|$ fissato

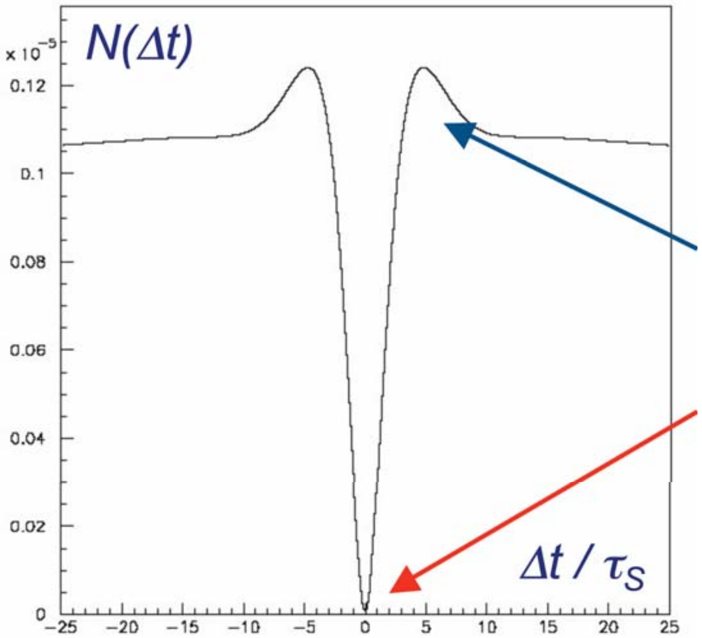
$$\begin{aligned} I(f_1, f_2, \Delta t) \quad = \quad & \frac{|\langle f_1 | K_S\rangle \langle f_2 | K_S\rangle|^2}{2(\Gamma_S + \Gamma_L)}\left[|\eta_2|^2 e^{-\Gamma_S \Delta t} + |\eta_1|^2 e^{-\Gamma_L \Delta t}\right. \\ & \left. -2|\eta_1||\eta_2| e^{-(\Gamma_S + \Gamma_L)\Delta t/2} \cos(\Delta m \Delta t + \phi_2 - \phi_1)\right] \end{aligned}$$

$\phi \to K_S K_L \to \pi^+\pi^- \pi^+\pi^-$

Diverse figure d'interferenza per i diversi modi di decadimento

$f_1 = f_2 = \pi^+\pi^-$

$$I\left(\pi^+\pi^-, \Delta t\right) = \frac{\left|\langle \pi^+\pi^- | K_S\rangle\right|^4}{2\left(\Gamma_S + \Gamma_L\right)} \left|\eta_{+-}\right|^2 \left[e^{-\Gamma_L \Delta t} + e^{-\Gamma_S \Delta t} - 2e^{-(\Gamma_S+\Gamma_L)\Delta t/2} \cos\left(\Delta m \Delta t\right)\right]$$



$\Delta m = m_L - m_S$

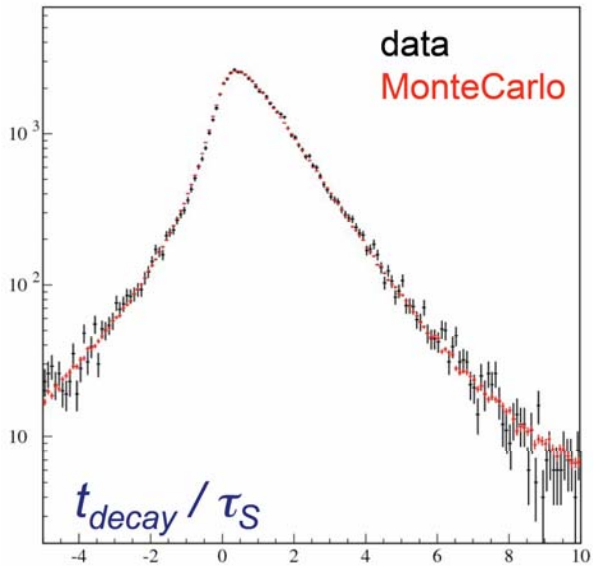
posizione e altezza picco sensibile a Δm

$I = 0$ per $\Delta t = 0$!

$\Rightarrow$ paradosso EPR

$\sigma_t = (1{,}15 \pm 0{,}2)\tau_S$

Necessaria σ_t ordine τ_S



Fit con esponenziale convoluto con gaussiana

$\tau_S = (0{,}9030 \pm 0{,}0056)\ 10^{-10}$ s

PDG $(0{,}8935 \pm 0{,}0008)\ 10^{-10}$ s

Test della coerenza quantistica e di CPT

380 pb^{-1} – 7366 eventi

Prima volta

Rigenerazione $K_L \rightarrow K_S$ sulla beam pipe

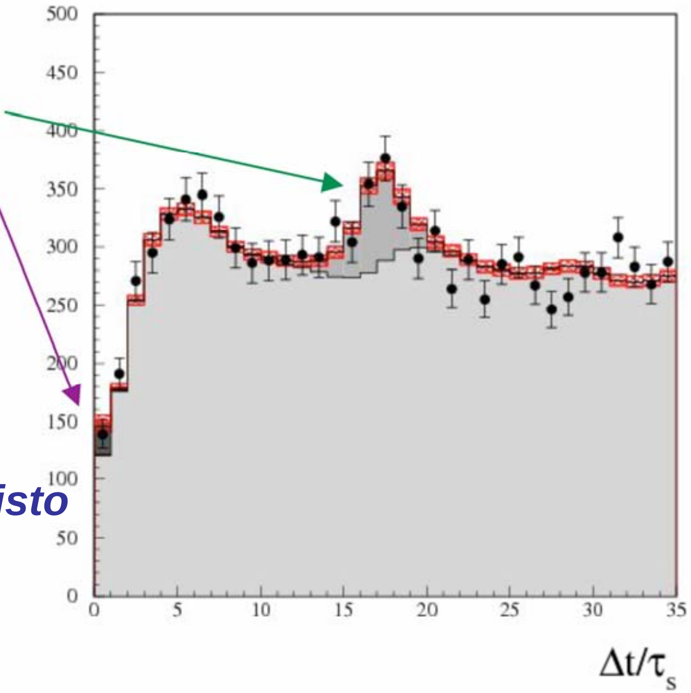
Fondo non risonante $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$

Test coerenza quant. fittando un param. di decoerenza ζ

$$I(\Delta t) \propto e^{-\Gamma_S \Delta t} + e^{-\Gamma_L \Delta t} - 2(1-\zeta)\, e^{-(\Gamma_S+\Gamma_L)\Delta t/2} \cos(\Delta m \Delta t)$$

Modelli di gravità quantistica prevedono la possibilità di decoerenza e violazione di CPT. Fluttuazioni spazio-temporali alla scala di Plank farebbeo traf. stato puro in misto dando luogo a violazioni di MQ e CPT. In tale contesto lo stato iniziale C=-1 può acquistare una componente C=+1

$$|i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\left(\left|K^0,\bar{K}^0\right\rangle - \left|\bar{K}^0,K^0\right\rangle\right) + \omega\left(\left|K^0,\bar{K}^0\right\rangle + \left|\bar{K}^0,K^0\right\rangle\right)\right]$$



$\Delta m = (5{,}34 \pm 0{,}34)\mathrm{x}10^9\ s^{-1}$

ζ_{SL} < 0,098 al 95 % CL

ζ_{00} < 0,50 x 10^{-3} al 95% CL

Migliorato CPLEAR

Δm fissato al valore del PDG
(5,290 $\pm$ 0,016)x10^9 s^{-1}

$|\omega|$ < 2,1 x 10^{-3} al 95% CL *prima volta*

Fisica dei K
Decadimenti rari

Decadimenti rari del K_S - $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$

VIOLA CP

$$\eta_{000} = \frac{\langle \pi^0\pi^0\pi^0 | K_S \rangle}{\langle \pi^0\pi^0\pi^0 | K_L \rangle} = \epsilon + \epsilon'_{000} \text{ con } |\epsilon'_{000}| \ll |\epsilon|$$

$$BR\left(K_S \to \pi^0\pi^0\pi^0\right) \simeq |\eta_{000}|^2 \, BR\left(K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0\right) \frac{\tau_S}{\tau_L} \simeq 1,9 \times 10^{-9}$$

Miglior limite prima di KLOE BR($K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$)<7,4 10^{-7} 90%CL (NA48)
(fittando interferenza KS/KL a piccoli t)

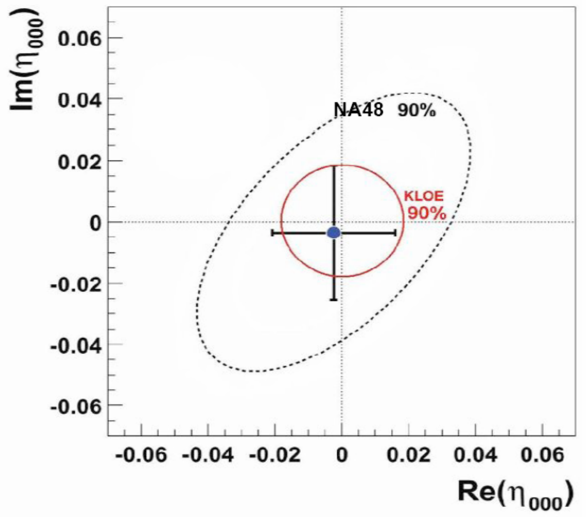
KLOE ha fatto la misura diretta migliorando di un fattore 6 questo limite e di due ordini di grandezza il limite diretto di SND

- Sei cluster "neutri" pronti
- Nessuna traccia dalla regione di interazione
- Rimangono ~40.000 ev, prevalentemente $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$ + 2 cluster

Stratategia di eliminazione del fondo a partire da un fit a 11 vincoli (p, E, m_K, velocità dei 6 fotoni)
Restano 2 ev con circa 3±1 di fondo

$BR(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0) < 1,2\ 10^{-7}$ (90% CL)

$|\eta_{000}| < 0,018$ (90% CL)



Decadimenti rari del K_S: $K_S \to \gamma\gamma$ – Test di χPT

Test di χPT che prevede BR($K_S \to \gamma\gamma$)=2,1 10^{-6}
Migliore misura BR($K_S \to \gamma\gamma$)=2,1 10^{-6} differisce per 30% da χPT

Dati 1,9 fb^{-1} - ~ 700 10^6 K_S da cui 1900 da cui ~ 1900 $K_S \to \gamma\gamma$ aspettati

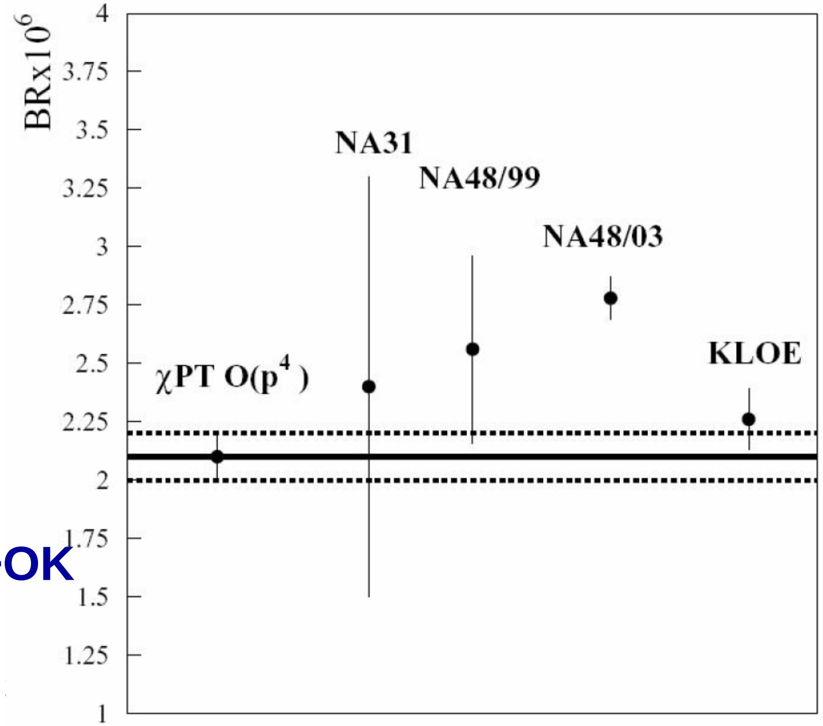
- 2 e solo 2 cluster
- $|t_\gamma - r/c| < \min(5\sigma_{t\gamma}, 2ns)$
- $E\gamma > 7$ MeV, $|\cos\theta\gamma| < 0,93$ grande accet. per aumentare reiezione $K_S \to \pi^0\pi^0$

- No eventi con almeno un fotone in QCAL migliora S/B
- Fit cinematico e taglio su $\chi 2$

➢Taglio su scatterplot $M\gamma\gamma$ vs $\theta\gamma\gamma$ per riduzione ulteriore $K_S \to \pi^0\pi^0$ (ora unico fondo)

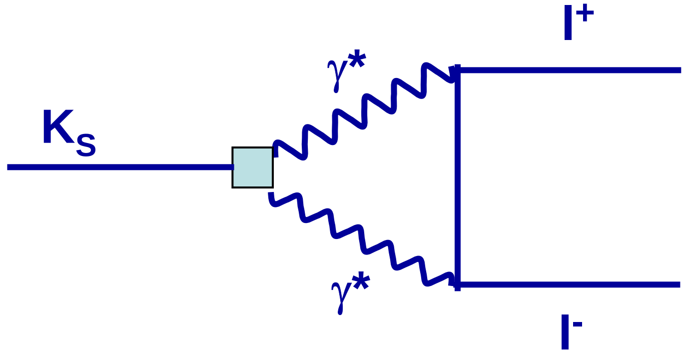
Normalizzazione a $K_S \to \pi^0\pi^0$

$\boxed{BR(K_S \to \gamma\gamma)=(2,26 \pm 0,12 \pm 0,06)10^{-6}}$ **χPT ~OK**



Decadimenti rari del K_S - $K_S \rightarrow e^+e^-$

Decadimento "FCNC" con amp. dominata da



$$\frac{\Gamma\left(K_S \rightarrow e^+e^-\right)}{\Gamma\left(K_S \rightarrow \gamma\gamma\right)} = 8 \times 10^{-9} \quad (\pm 10\%)$$

$$\chi PT \; (\mathcal{O}(p4))$$

$$\boxed{BR\left(K_S \rightarrow e^+e^-\right) \simeq 1,7 \times 10^{-14}}$$

$$\text{CPLEAR} \quad \longrightarrow \qquad BR\left(K_S \rightarrow e^+e^-\right) < 1,4 \times 10^{-7} \quad (90\% \; CL)$$

KLOE 1,9 fb^{-1}

$BR(K_S \rightarrow e+e-(\gamma)) < 1,65 \times 10^{-8}$