

# **Stato e prospettive della fisica dei K**

---

A. Nappi

Università di Perugia

IFAE 2003 – Lecce 24/4/03

# Sommario

---

- Cosa si può ancora imparare dai K
  - ◆ Decadimenti FCNC rari nello SM. Stato dell'arte
    - ❖ Misure "theoretically clean"
    - ❖ Canali più complessi
  - ◆ Ricerca di effetti non previsti nello SM
- Esperimenti in corso o in progetto
  - ◆ Esperimenti su  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 
    - ❖ BNL: E787, E949
    - ❖ FNAL: CKM
  - ◆ Esperimenti su  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 
    - ❖ KEK: E391a
    - ❖ BNL: KOPIO
  - ◆ Misure di polarizzazione in  $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 
    - ❖ KEK: E246
  - ◆ JPARC

# K: auto d'epoca ben funzionante

---

- Vantaggi vecchi e nuovi
  - ◆ Dal punto di vista sperimentale:
    - ❖ Vita media lunga + pochi canali di decadimento
      - Studi di decadimenti rari
      - Studi di precisione di violazione delle simmetrie discrete
    - ❖ Il sistema  $K_L / K_S$  è un laboratorio in cui la natura ci presenta direttamente la differenza particella-antiparticella
  - ◆ Decadimenti con previsioni teoriche solide nell'ambito dello SM
    - ❖ La sovradeterminazione ( insieme alle misure del B) dei parametri dello SM esalta la sensibilità ad effetti di nuova fisica.
- Svantaggi
  - ◆ Le misure facili sono già state fatte

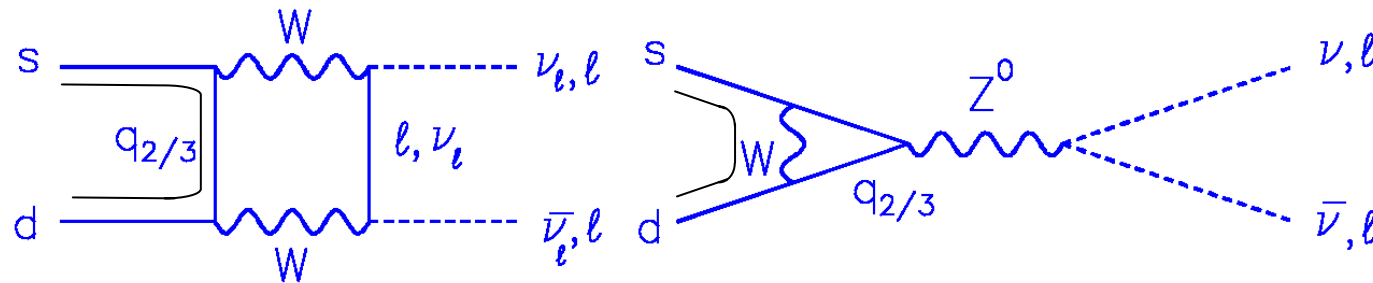
# Decadimenti di tipo FCNC

---

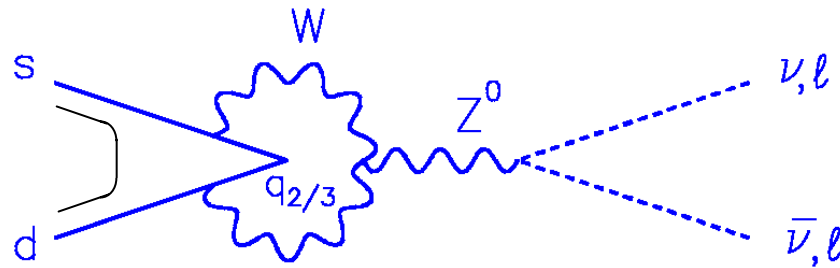
- Nell'ambito dello SM sono mediati da loop di quarks di tipo up
  - ◆ Secondo ordine nelle interazioni deboli
  - ◆ L'unitarietà della matrice CKM fornisce soppressione aggiuntiva (meccanismo GIM)
  - ◆ Nei canali con violazione di CP effetto residuo solo attraverso le differenze di fase tra gli elementi della matrice CKM
- L'insieme di questi meccanismi di soppressione rende questi canali particolarmente sensibili ad effetti fuori dello standard model

# Diagrammi a loop ...

$$K^0 \rightarrow 1 \bar{l}$$



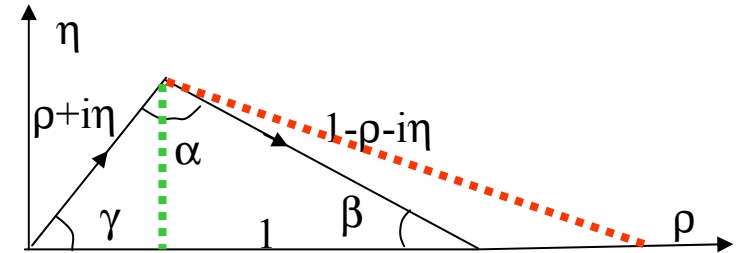
$$K \rightarrow \pi 1 \bar{l}$$



# Un caso ideale: $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$

- Unici per “theoretical cleanliness”

- ◆ Contributi “long range” assenti
- ◆ Correzioni QCD ben calcolabili
- ◆  $H_{\text{eff}}$  dominata da un solo operatore i cui elementi di matrice sono legati a quelli del  $K_{e3}$
- ◆ Decadimento del  $K_L$  dominato da violazione diretta di CP



$$B(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = kB(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu) \left[ \text{Im}(V_{ts}^* V_{td}) X \left( \frac{m_t^2}{m_W^2} \right) \right]^2 = k' A^4 \eta^2 \approx 3 \times 10^{-11} \quad \text{Noto con precisione } \sim 2\%$$

$$B(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = kB(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu) \left| V_{cs}^* V_{cd} X \left( \frac{m_c^2}{m_W^2} \right) + V_{ts}^* V_{td} X \left( \frac{m_t^2}{m_W^2} \right) \right|^2 \propto [(1.4 - \rho)^2 + \eta^2] \approx 8 \times 10^{-11}$$

Piccola incertezza aggiuntiva da  $m_c$

- ◆ Esperimenti estremamente difficili

- ❖ B.R.  $\sim 10^{-11}$ , cinematica non chiusa, fondo da canali con larghezze di decadimento molto più grandi

# Un caso disperato: $K_L \rightarrow \mu \mu$

- $K_L \rightarrow \mu \mu$ 
  - ◆ Contributo "short range" calcolabile nello SM
  - ◆ Misura ha raggiunto precisione degna di nota (BNL E871)
    - ❖ B.R. =  $(7.18 \pm 0.17) \times 10^{-9}$
  - ◆ Ma
    - ❖ Contributo assorbitivo da  $K_L \rightarrow \gamma \gamma$ :  $(7.07 \pm 0.18) \times 10^{-9}$ 
      - Errore dominato dalla misura di  $K_L \rightarrow \gamma \gamma$ !
    - ❖ Previsione contributo dispersivo long range problematica
      - Fattori di forma da  $K_L \rightarrow \gamma \gamma^*$ ,  $K_L \rightarrow \gamma^* \gamma^*$  ?
      - Stime basate su proprietà analitiche della  $1/N_C$  expansion
- Dati sperimentali possono migliorare la situazione
- A causa della grossa sottrazione è, comunque, escluso che possa essere usato come banco di prova dello SM

# Contributo assorbitivo a $K_L \rightarrow \mu \mu$

Littenberg hep-ex/0212005

recently measured  
by KLOE

last measured by

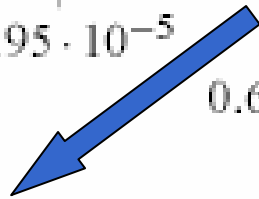
calculated

NA31 in 1987

$$\frac{B(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{B(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}$$

$$\frac{B_{\gamma\gamma}^{obs}(K_L \rightarrow \mu\mu)}{B(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)} = \frac{B_{\gamma\gamma}^{obs}(K_L \rightarrow \mu\mu)}{B(K_L \rightarrow \gamma\gamma)} \frac{B(K_L \rightarrow \gamma\gamma)}{B(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0)} \frac{B(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{B(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)} (1 - 6Re \frac{\epsilon'}{\epsilon})$$

$1.195 \cdot 10^{-5}$        $0.632 \pm 0.009$        $(2.236 \pm 0.015)^{-1}$        $1 - 6(16.6 \pm 1.6) \cdot 10^{-4}$



Misura più recente di NA48  
normalizzata a  $K_L \rightarrow 3\pi^0$

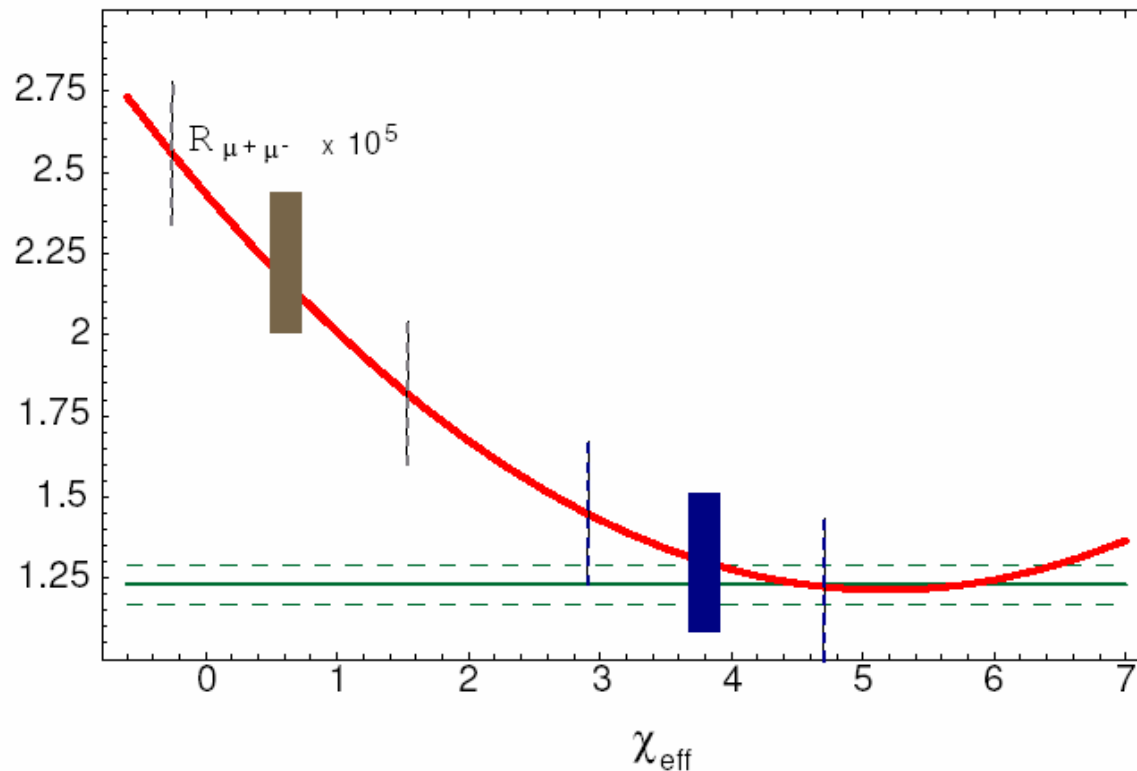




# Esempio di previsione teorica per $K_L \rightarrow \mu \mu$

$$R = \frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \gamma\gamma)}$$

D.Greynat, E.De Rafael, hep-ph 03/03/096



- Minimo della curva  $\equiv$  contributo assorbitivo

- $\chi_{\text{eff}} = \chi_{\text{LD}} - \chi_{\text{SD}}$

- $\chi_{\text{SD}} = \pm(1.8 \pm 0.1)$



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

- Complicazioni teoriche

- ◆ A differenza di  $\pi^0 \nu \bar{\nu}$ , il decadimento del  $K_S$  non è soppresso

- ❖  $B.R.(K_S^0 \rightarrow \pi^0 e^+ e^-)_{CPV} \approx 5.2 a_S^2 \times 10^{-9}$  con  $a_S \sim 1$

- ❖  $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  ha sia contributo da violazione diretta di CP che da violazione indiretta ( con interferenza ).

$$B.R.(K_L^0 \rightarrow \pi^0 e^+ e^-)_{CPV} \approx 10^{-12} \left[ 15.3 a_S^2 - 6.8 a_S \frac{\Im(V_{ts}^* V_{td})}{10^{-4}} + 2.8 \left( \frac{\Im(V_{ts}^* V_{td})}{10^{-4}} \right)^2 \right] \approx 7 \times 10^{-12} + ??$$

- ◆ Meccanismo long range CP conserving con scambio di 2  $\gamma$

- La sola osservazione del decadimento non è sufficiente



- ◆  $a_S$  da NA48/1: sensibilità ad  $a_S \sim 0.5$  . Ora  $|a_S| < 5.2$  al 95% C.L.

- ◆ Contributo CP conserving stimato da  $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$

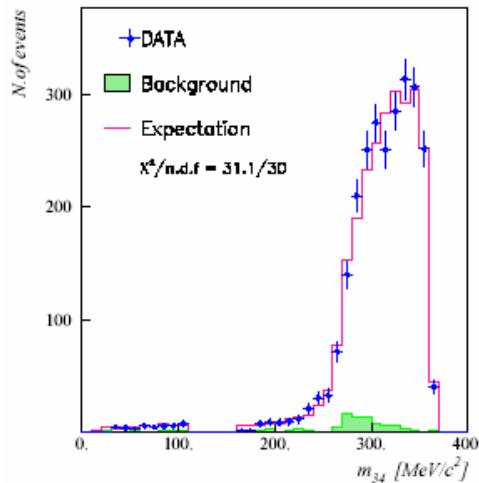
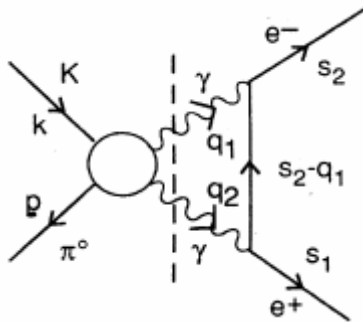
- "Greenlee background":  $\gamma \gamma e^+ e^-$  (BR  $\approx 6 \times 10^{-7}$  )

# Prospettive per $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$

- Limite principale dal fondo di Greenlee.
  - ◆ Misura di KTEV:
    - ❖ 90%C.L. upper limit:  $5.1 \times 10^{-10}$  corrispondente a 4.8 eventi
    - ❖ Fondo stimato 1 ev principalmente  $\gamma\gamma e^+ e^-$
  - ◆ Per misura al 20% , assumendo B.R.  $7 \times 10^{-12}$  , B.R. del fondo  $10^{-10}$ , fondo stimato con precisione molto maggiore del segnale
    - ❖ Fattore 15 in SES: richiesta  $\sim 2 \times 10^{-14}$ 

$$\frac{\sqrt{SES \times 10^{-10}}}{SES \times 7 \times 10^{-12}} = 0.2$$
- Difficoltà di interpretazione
  - ◆  $K_S \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  : scenario migliore se NA48 desse un upper limit  $\sim 10^{-9}$ 
    - ❖  $a_S \approx \pm 0.5$ : Interferenza/direct  $\sim 1$  
  - ◆ CP conserving
    - ❖ contributo stimato da dati di NA48 di  $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma\gamma < \sim 1 \times 10^{-12}$  

# Contributo CP conserving a $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$



- I dati di KTEV, in disaccordo con quelli di NA48, indicherebbero un contributo maggiore

- Oltre al rate di  $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$ , è importante il momento angolare dei due fotoni

- Nella parametrizzazione

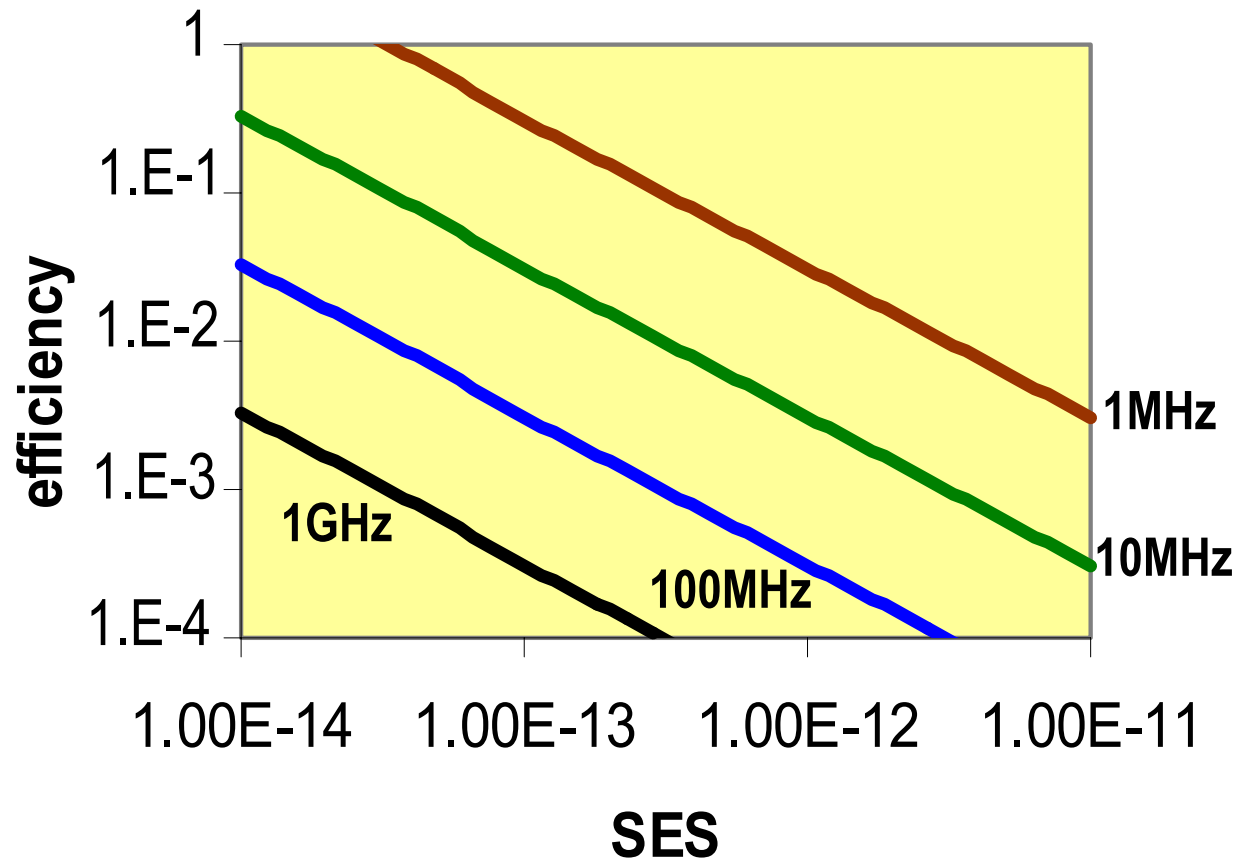
$$\frac{d^2\Gamma}{dydz} \propto z^2 |A+B|^2 + (y^2 - y_{\max}^2)^2 B \quad \text{con } z = \left(\frac{m_{\gamma\gamma}}{m_K}\right)^2, y = \frac{|p_K(k_{\gamma 1} - k_{\gamma 2})|}{m_K^2}$$

A e B  $\propto$  ai contributi J=0, J=2 e B sensibile alla regione a basse masse dello spettro  $m_{\gamma\gamma}$

- J=0 non contribuisce a  $\pi^0 e^+ e^-$  per conservazione elicità ed è prevista piccola ad  $O(p^4)$  in  $\chi$ PT
- Dati di NA48 favoriscono B piccolo
- Valutazione contributo a  $\pi^0 e^+ e^-$  dipende dalla forma del fit allo spettro  $m_{\gamma\gamma}$

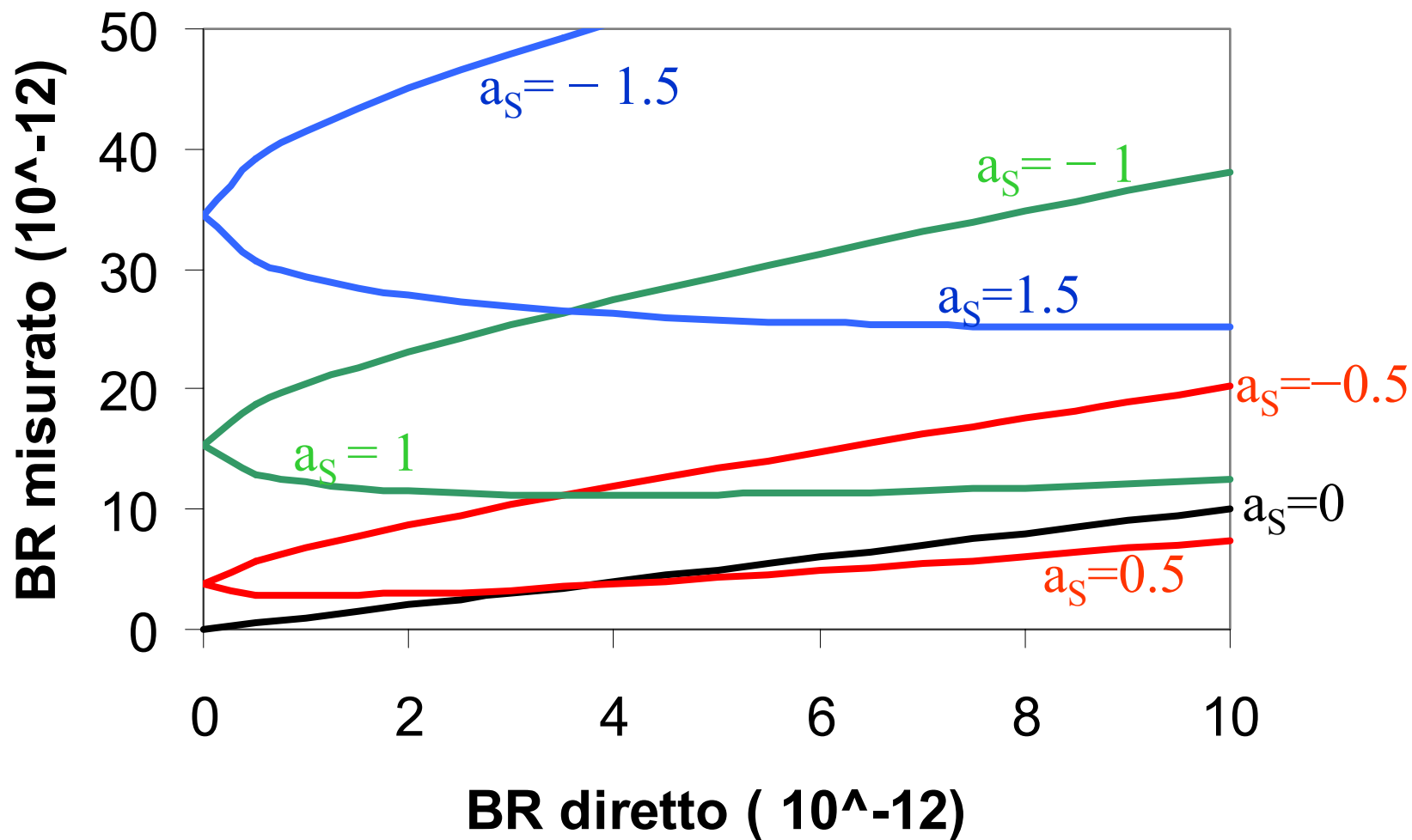
NA48	Fit spettro $m_{\gamma\gamma}$ :VMD	$0.47^{+0.22}_{-0.17} \times 10^{-12}$
Gabbiani-Valencia	Fit spettro e rate :VMD	$13.8^{+0.09}_{-0.21} \times 10^{-12}$
Gabbiani-Valencia	Fit spettro e rate: fit a 3 parametri à la $O(p^6)\chi$ PT	$0.46^{+0.22}_{-0.17} \times 10^{-12}$

**Che rate di decadimenti ci vuole per avere una data SES in un anno di presa dati?**



# $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ : violazione diretta vs indiretta

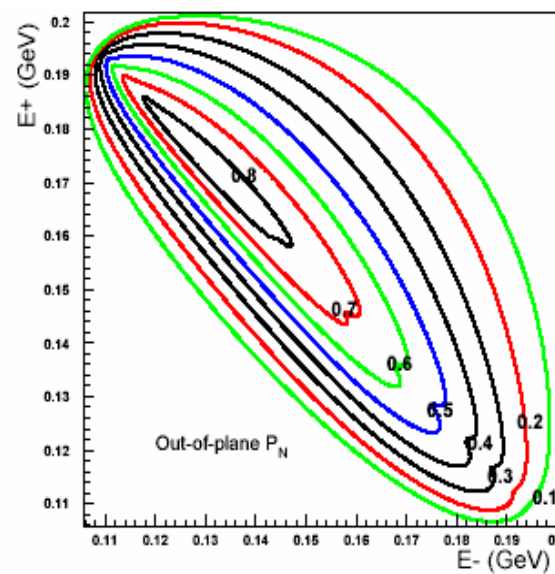
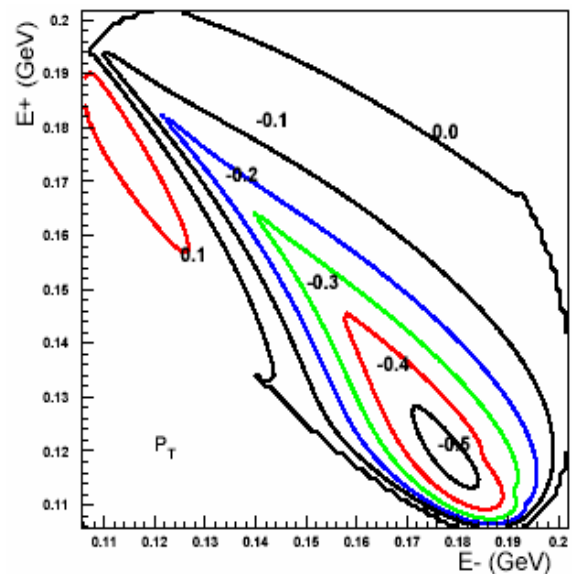
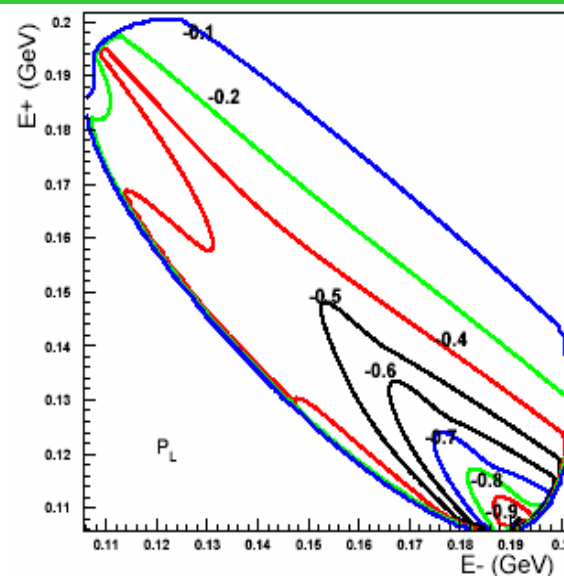
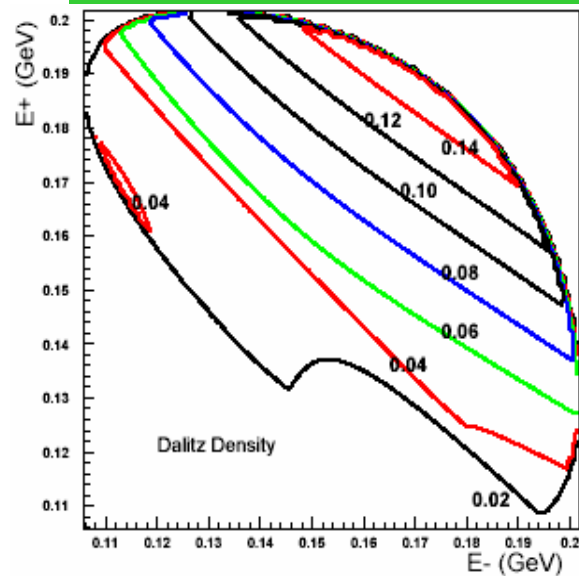
Littenberg hep-ex/0212005



$$\mathbf{K_L \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-}$$

- Parente povero di  $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$  ?
  - ◆ Rate da violazione diretta di CP più basso di un fattore  $\sim 5$
  - ◆ Rate CP conserving presumibilmente più alto
    - ❖ Argomento conservazione di elicità non si applica
  - ◆ Limite attuale (KTeV):  $BR < 3.8 \times 10^{-10}$  al 90% C.L. con fondo stimato  $0.87 \pm 0.15$  eventi (0.35 da Greenlee background)
- Aspetti positivi
  - ◆ Background di Greenlee minore
    - ❖ Stima QED  $BR(K_L \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma \gamma)$  da  $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ :  $(9.1 \pm 0.8) \times 10^{-9}$   
vs  $BR(K_L \rightarrow e^+ e^- \gamma \gamma)_{k_\gamma > 5\text{MeV}} = (5.84 \pm 0.35) \times 10^{-7}$
  - ◆  $P_{\text{long}}$  del  $\mu^+$  grande per violazione diretta di CP
    - ❖ Analisi sistematica della polarizzazione potrebbe fornire informazioni utili alla separazione dei diversi meccanismi

# Polarizzazione del $\mu^+$ in $K_L \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$



Diwan et al.,

Phys.Rev. D65,054020(2002)

- Previsione per B.R.:  $\approx 6.6 \times 10^{-12}$
- dominato da contributo CP conserving ?





# Osservabili dispari sotto T

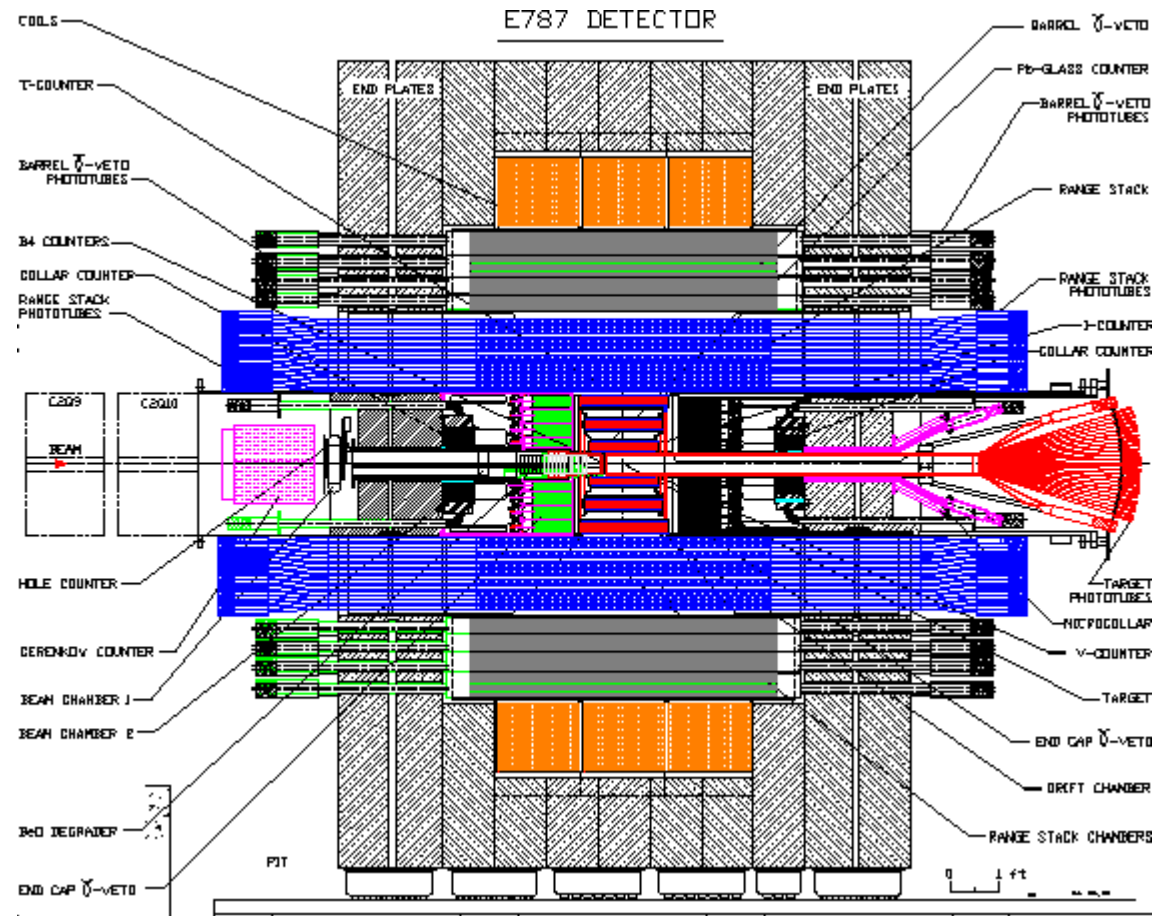
Table 1. Decay modes and polarization asymmetries (or correlations) of interest in  $K$  decays. The symbols  $\mathbf{s}$  and  $\mathbf{p}$  refer to the spin and momentum vectors in the decays.

Decay	Correlations	Symmetries tested	Branch. fraction	Standard model	Final state int.	Non-SM value
(1) $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$	$\mathbf{s}_\mu \cdot (\mathbf{p}_\mu \times \mathbf{p}_\pi)$	T	0.032	0.0	$\sim 10^{-6}$	$\leq 10^{-3}$
(2) $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$	$\mathbf{s}_\mu \cdot (\mathbf{p}_\mu \times \mathbf{p}_\gamma)$	T	$5.5 \times 10^{-3}$	0.0	$\sim 10^{-3}$	$\leq 10^{-3}$
(3) $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$	$\mathbf{s}_\mu \cdot \mathbf{p}_\mu$	P, CP	$7.2 \times 10^{-9}$	$\sim 0.002$	0.0	$\leq 10^{-2}$
(4) $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$	$\mathbf{s}_\mu \cdot \mathbf{p}_\mu$	P	$7.6 \times 10^{-8}$	$\sim 10^{-2}$	–	–
(5)	$\mathbf{s}_\mu \cdot (\mathbf{p}_{\mu^+} \times \mathbf{p}_{\mu^-})$	T		0.0	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-3}$
(6)	$(\mathbf{s}_{\mu^\pm} \cdot \mathbf{p}_{\mu^\pm}) \mathbf{s}_{\mu^\mp} \cdot (\mathbf{p}_{\mu^+} \times \mathbf{p}_{\mu^-})$	P, T		$\sim 0.06$	$\sim 0.0$	$\sim 0.1$
(7) $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$	$\mathbf{s}_\mu \cdot \mathbf{p}_\mu$	P	$\sim 5 \times 10^{-12}$	–	–	–
(8)	$\mathbf{s}_\mu \cdot (\mathbf{p}_{\mu^+} \times \mathbf{p}_{\mu^-})$	T		$\sim 0.5$	–	–

- Interesse per quei canali dove il modello standard prevede valori trascurabili
  - ◆ Richiesta conoscenza del contributo della interazione di stato finale
  - ◆ Caso più favorevole:  $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$

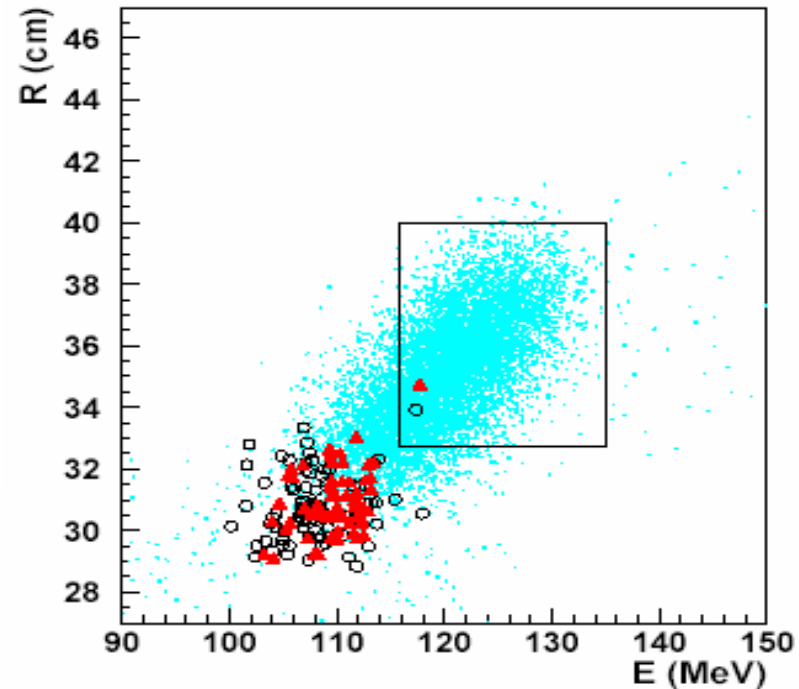
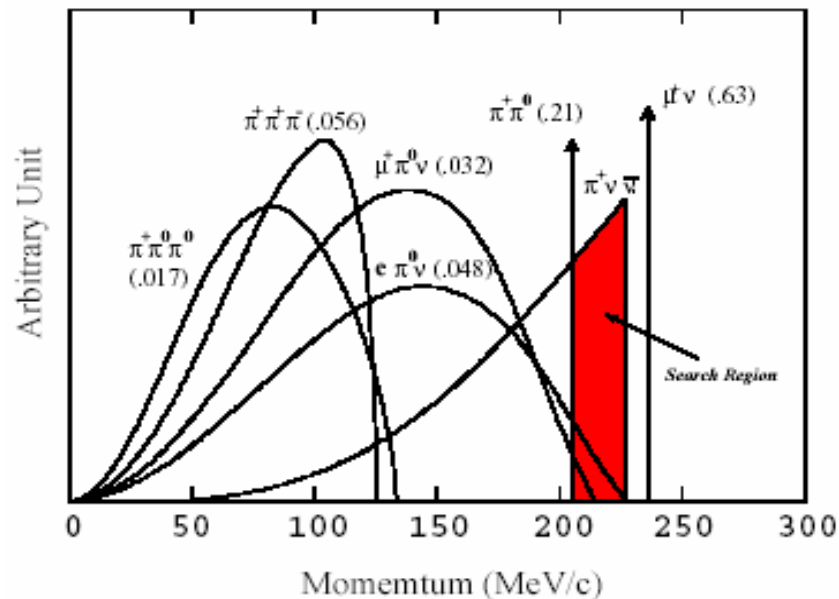
# E787 a BNL ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ )

- $K^+$  stop
- Fascio separato
- Copertura veto
- Misure ridondanti del  $\pi$ 
  - ✓ Impulso
  - ✓ Range
  - ✓ Energia
  - ✓ Sequenza di decadimento  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$



# Risultati finali di E787

- $p_\pi$  tra i picchi del  $\pi\pi$  e del  $\mu\nu$
- Fondo stimato con dati
  - ◆ Per ogni sorgente set di tagli indipendenti incrociati
  - ◆ Correlazioni verificate sui dati allargando i tagli
- $5.9 \times 10^{12} K^+$  con  $\varepsilon = 2 \times 10^{-3}$
- 2 eventi con fondo stimato di 0.15



Branching Ratio

$$B(K^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu} \nu) = 1.57 \pm_{0.82}^{1.75} \times 10^{-10}$$

$$SM: (0.72 \pm 0.21) \times 10^{-10}$$

# BNL E949

- Upgrade di E787

- ◆ Con due anni di presa dati SES  $\sim 10^{-11}$ / evt ( 7 eventi per il BR dello S.M.)
- ◆ Sensibilità  $14 \times$  (miglioramenti della efficienza del DAQ e uso di pioni soft)

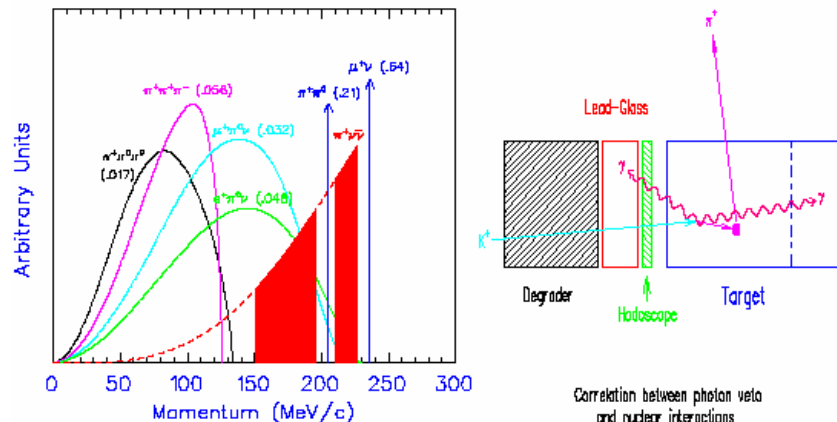
Increased spill length ( $\times 1.56$ )

Lower momentum ( $\times 1.38$ )

Increased efficiency (trigger, DAQ, analysis) ( $\times 3.2$ )

Acc. below  $K\pi 2$  + higher rate analysis reopt. ( $\times 2$ )

Total gain -  $\times 14$  per hour of data taking



- Analisi pioni soft dimostrata con dati del 1996

- ◆ Migliore individuazione di  $\pi^+$  che scatterano nel bersaglio:  $t_\pi > 0.5\tau_K$ 
  - ❖ 1 evento di fondo su  $10^{12}K^+$
- ◆ Miglioramenti della ermeticità dei veto  $\Rightarrow S/B \sim 1$  in quella regione

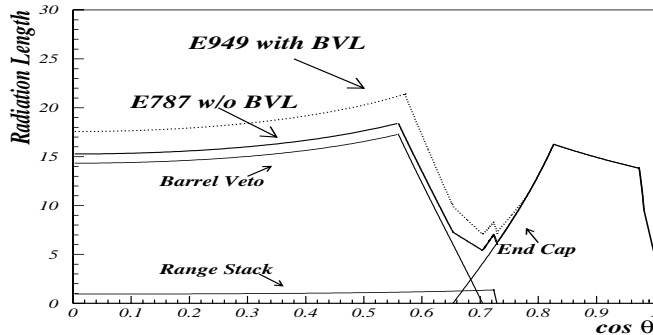
- Run 2002

- ◆  $\sim 1/3$  di E787 ad alto impulso
- ◆  $\sim 1/3$  di E787 da pioni soft

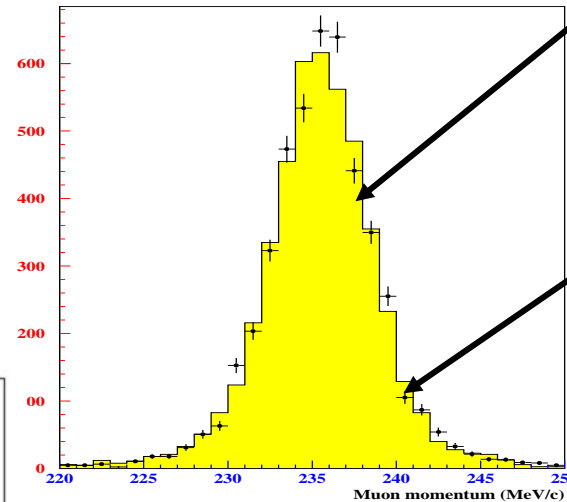
- Ulteriore presa dati (2003 e 2004) non finanziata dal DOE ⚡👁️⚡

# Run 2002 di E949

## E949 Photon Veto Upgrade

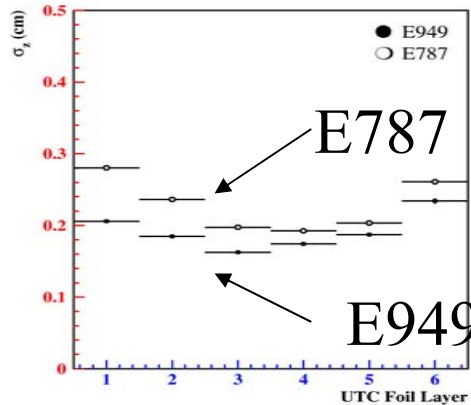


**Preliminary:  
2.3 x better  
Photon  
efficiency**

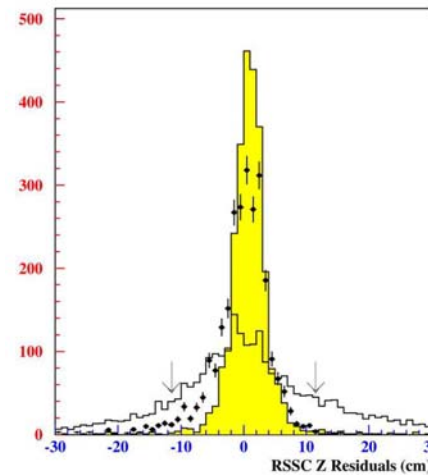


**E949 at  
2x rate  
of  
E787**

**$\mu^+$  momentum  
from  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$**



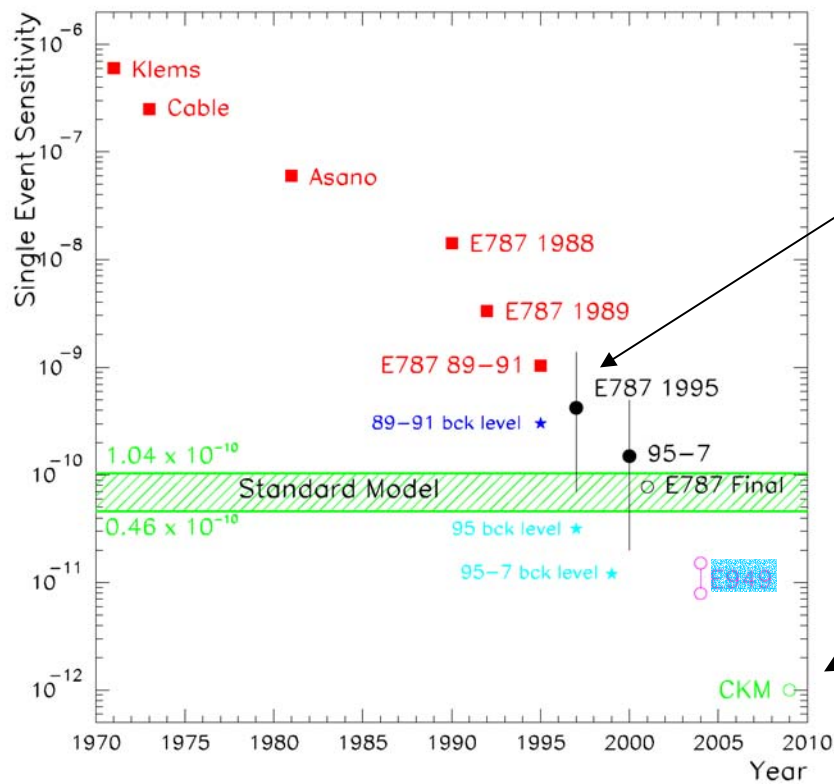
**Improved UTC  $\sigma_z$**



**Range Stack Straw  
Chamber tracking  
Improved by 5 x**



# Progresso sul $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

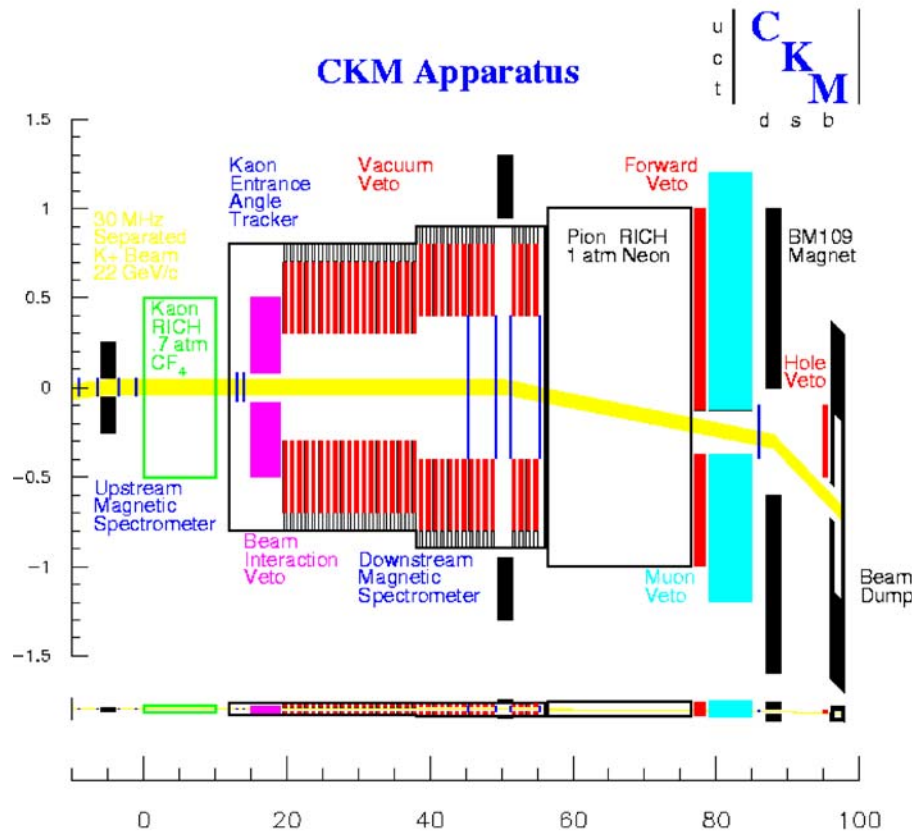


- Esperimento dedicato a FNAL (CKM)

- ◆ 100 eventi per il B.R. dello S.M.
- ◆ Approvazione scientifica nel 2001

( courtesy of L.Littenberg)

# CKM al M.I. di FNAL

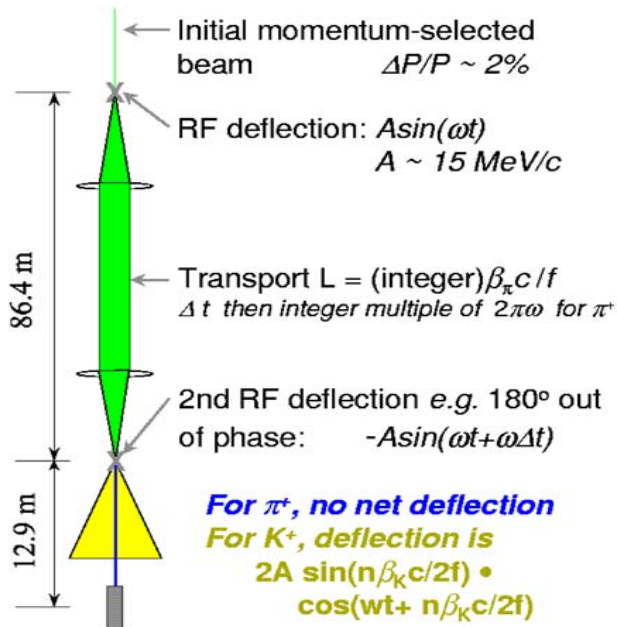


## ● Caratteristiche

- ◆ Primo tentativo di misurare  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  con decadimenti in volo
- ◆ Fascio separato a R.F. con cavità superconduttrici
  - ❖ Purezza hadronica  $> 70\%$
  - ❖ 33MHz 22GeV/c  $K^+$
- ◆ Determinazione ridondante dell'impulso di  $K^+$  e  $\pi^+$ 
  - ❖ spettrometro + RICH
- ◆ veto con inefficienza totale per  $\pi^0$  da  $\pi^+ \pi^0 \sim 10^{-7}$
- ◆ previsti 100 eventi del segnale con  $\sim 10$  di fondo

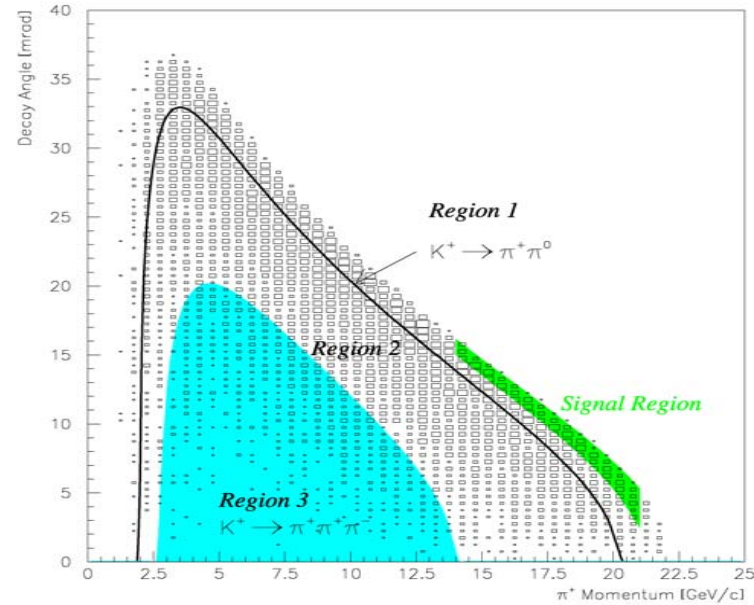
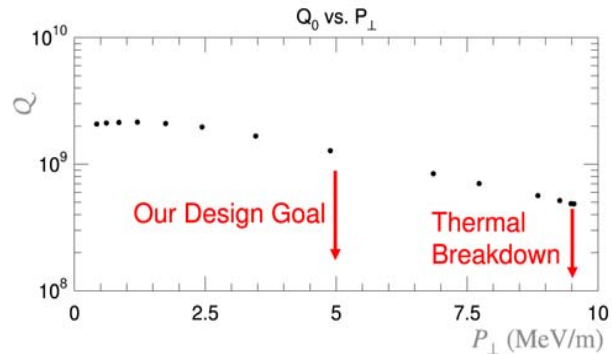
# Aspetti della tecnica di CKM t

## RF separated K<sup>+</sup> beams



Stop π<sup>+</sup> with beam plug, collect K<sup>+</sup>

recent 1-cell test result:



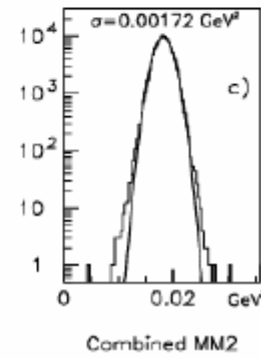
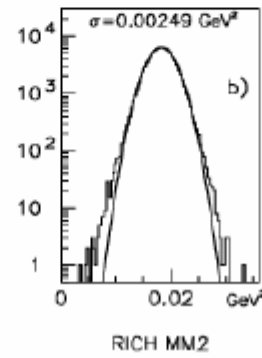
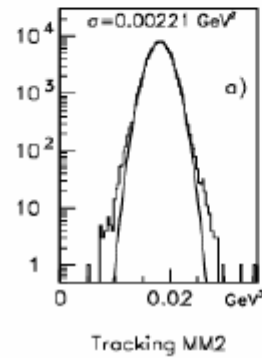
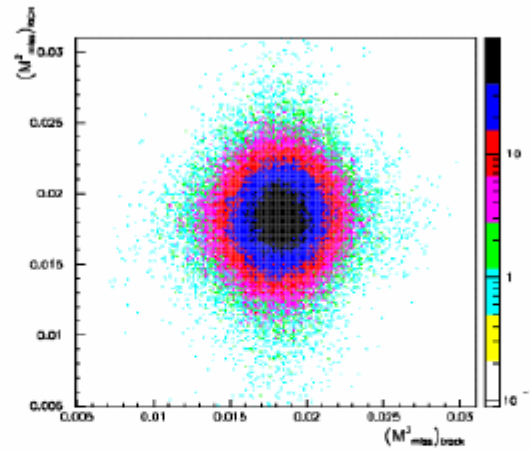
Background Source	Effective BR (×10 <sup>-12</sup> )
K <sup>+</sup> → μ <sup>+</sup> ν <sub>μ</sub>	< 0.04
K <sup>+</sup> → π <sup>+</sup> π <sup>0</sup>	3.7
K <sup>+</sup> → μ <sup>+</sup> ν <sub>μ</sub> γ	< 0.09
K <sup>+</sup> A → K <sub>L</sub> X followed by K <sub>L</sub> → π <sup>+</sup> e <sup>-</sup> ν	< 0.14
K <sup>+</sup> A → π <sup>+</sup> X in trackers	< 4.0
K <sup>+</sup> A → π <sup>+</sup> X in residual gas (10 <sup>-6</sup> torr)	< 2.1
Accidentals (2 K <sup>+</sup> decays)	0.51
Total	< 10.6



# Simulazione delle misure di massa mancante

Little Correlation between Magnetic and Velocity Measurements

Full GEANT simulation of:  
 $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  Bkg.



# Sviluppo di CKM ( marzo 2003 )

---

- Active work on Detector, DAQ/Trigger systems and SCRF
  - photon veto ineff. measurements → engineering
  - High rate testbeam for *K*-tracker, Beam Time Stamp, KRICH and Straws in 2003
  - DAQ/Trigger design, simulation and testing
  - 13-cell SCRF cavity under testing w/ plan// towards production prototype RF station in 2004.
- This will validate technology and enable accurate cost estimates for detector, DAQ and beam.
- Fermilab is providing engineering to improve accuracy of civil construction and conventional beamline costs.



Assuming favorable P5 recommendation: plan for Lehman baseline in 2004.

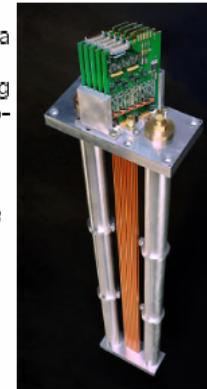
# Sviluppo di CKM

- Require 5 MeV/m deflecting gradient
  - Have achieved in prototype 1 & 3-cell cavities
- Design requires 12 structures of 13-cell cavities
  - First prototype built and under test.

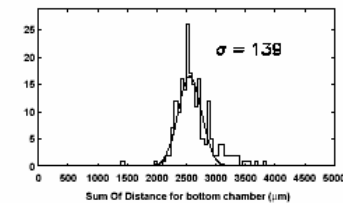
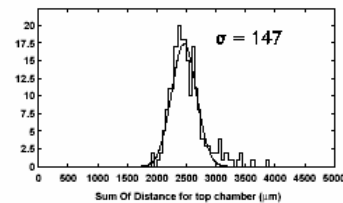
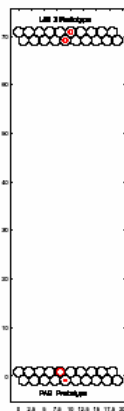


## DMS: Straws in Vacuum

- Follows BNL871 design
- Each view consists of a doublet layer.
- 5 mm diam., 1 m long straws having 30  $\mu\text{m}$  kapton walls.
- expected rate 120 kHz
- operation in vacuum
  - mechanical tolerance maintained
  - diffusion rate negligible



## Cosmic-ray Test of Strawtubes in Vacuum



## Photon Veto Technology

- 0.3% VVS prototype built.
- Instrumented with ADC's and TDC's (1MeV threshold).
- Tested at JLAB in an  $e^-$  beam.



# $\pi^0 \nu \bar{\nu}$ dagli upper limits alla misura

- ◆ KTEV ha misurato U.L.  $5.9 \times 10^{-7}$  usando  $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$
- ◆ E391a è un esperimento pilota a KEK
  - ❖ Impulso medio dei  $K^0 \sim 2 \text{ GeV}/c$
  - ❖ Pencil beam
  - ❖ Dopo studi dettagliati dei limiti fisici alle efficienze di rivelazione di  $\gamma, e, \pi$  si attendono una sensibilità  $\sim 10^{-10}$
- ◆ KOPIO a BNL
  - ❖ Il sistema di veto è complementato dal rigetto cinematico del fondo dominante
    - Impulso del  $K^0$  misurato con tempo di volo utilizzando un fascio microbunchato
    - Misura completa del  $\pi^0$ , inclusa la direzione dei  $\gamma$  mediante un preradiatore tracciante

# $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ : upper limit di KTeV

A. ALAVI-HARATI *et al.*

PHYSICAL REVIEW D **61** 072006

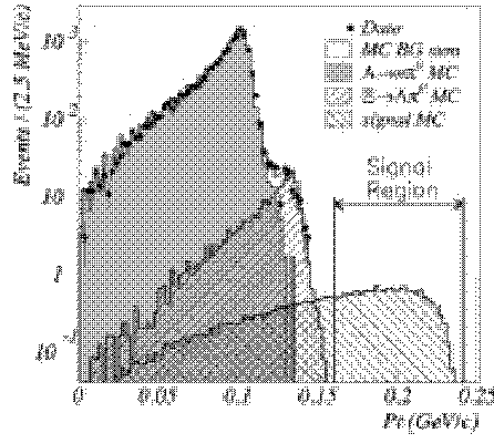


FIG. 3. Final  $p_T$  distribution. The dots represent data, and open histogram is for MC expectation. Two main background contributions are overlaid. Also shown is the signal distribution predicted from the MC simulation whose normalization is arbitrary.

TABLE I. Summary of expected background contribution in the final signal region.

Decay mode	Expected number of events
$K_L \rightarrow \pi e \nu + \gamma$	$0.02 \pm 0.02$
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi_D^0$	$< 0.01$
$\Lambda \rightarrow n \pi_D^0$	$< 0.04$
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 (\rightarrow p \pi^-) \pi_D^0$	$0.01^{+0.006}_{-0.004}$
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 (\rightarrow n \pi^0) \pi_D^0$	$0.01^{+0.006}_{-0.004}$
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 (\rightarrow n \pi_D^0) \pi^0$	$0.01 \pm 0.01$
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi_D^0$	$0.03 \pm 0.03$
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi_D^0$	$< 0.01$
$n + X \rightarrow \pi^0 X'$	$0.04^{+0.04}_{-0.01}$
Total	$0.12^{+0.05}_{-0.04}$

**B.R.  $< 5.9 \times 10^{-7}$  al 95% CL**

- Uso di  $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$  permette
  - ◆ vincolo sulla massa del  $\pi^0$  ( per  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  vertice non conosciuto)
  - ◆ miglioramento della risoluzione sulla misura del  $p_T$  ( senza pencil beam)
- ma
  - ❖ B.R. ( $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$ ) = 1.2%



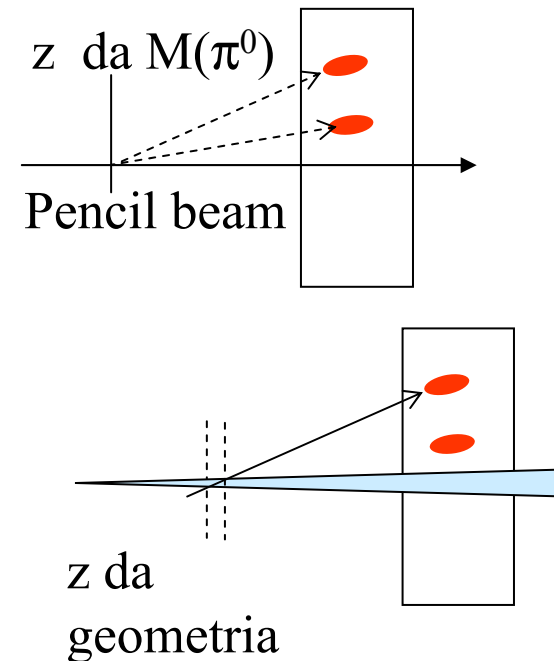
# Confronto dei due U.L. di KTEV

- $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$  (U.L.  $1.6 \times 10^{-6}$ )
  - ◆ inefficienza dei veto per  $\pi^0 \pi^0$ 
    - ❖  $5 \times 10^{-3}$
  - ◆ eff per  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ :
    - ❖ 3.6%
  - ◆ # KL dec:  $6.9 \times 10^7$
  - ◆ fondo: 3.7 eventi
  - ◆ SES:  $4.0 \times 10^{-7}$
- Estrapolando # KL dec finche' fondo = 1 ev.
  - ◆ SES:  $1.5 \times 10^{-6}$
- Come sopra, ma escludendo il fondo di interazioni di n
  - ◆ SES:  $2.4 \times 10^{-7}$
- $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$  (U.L.  $5.9 \times 10^{-7}$ )
  - ◆ inefficienza dei veto per  $\pi^0 \pi^0_D$ 
    - ❖  $5 \times 10^{-3}$
  - ◆ eff per  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ :
    - ❖  $1.52 \times 10^{-3} \times \text{B.R.} = 1.8 \times 10^{-5}$
  - ◆ # KL dec:  $2.1 \times 10^{11}$
  - ◆ fondo: 0.12 eventi
  - ◆ SES:  $2.5 \times 10^{-7}$
- Estrapolando # KL dec finche' fondo = 1 ev.
  - ◆ SES:  $3.1 \times 10^{-8}$
- Come sopra, ma escludendo il fondo di interazioni di n
  - ◆ SES:  $1.6 \times 10^{-8}$

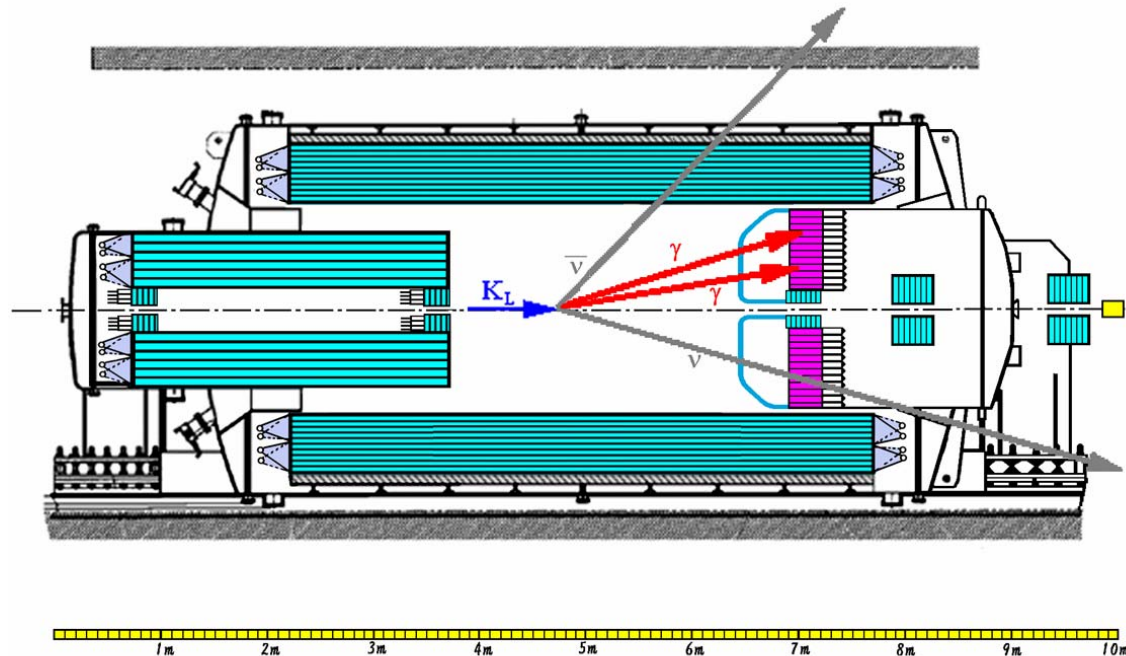


# Vincoli cinematici per $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

- Veto ermetico complementato da vincoli cinematici
  - ◆ End point dello spettro dei  $\pi^0$  da  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ :  $p_T > 209 \text{ MeV}/c$ 
    - ❖ Solo 9.5% dei  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  hanno  $\pi^0$  al di sopra
  - ◆  $p_T > x$  utile anche con  $x < 209 \text{ MeV}/c$ 
    - ❖ rigetto eventi con fotone lento dei due  $\pi^0$  non rivelato
  
- Misura  $p_T$ 
  - ◆ Rivelazione calorimetrica "normale" dei  $\pi^0$ 
    - ❖ Vincolo  $m(\pi^0)$  non disponibile
    - ❖ Senza pencil beam cattiva risoluzione  $p_T$
  - ◆ Misura della direzione di almeno un fotone
    - ❖ Permette uso vincolo  $m(\pi^0)$
    - ❖ Permette buona determinazione  $p_T$  senza pencil beam
  
- La conoscenza dell'impulso del K permetterebbe la trasformazione al centro di massa



# $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ : KEK E391a

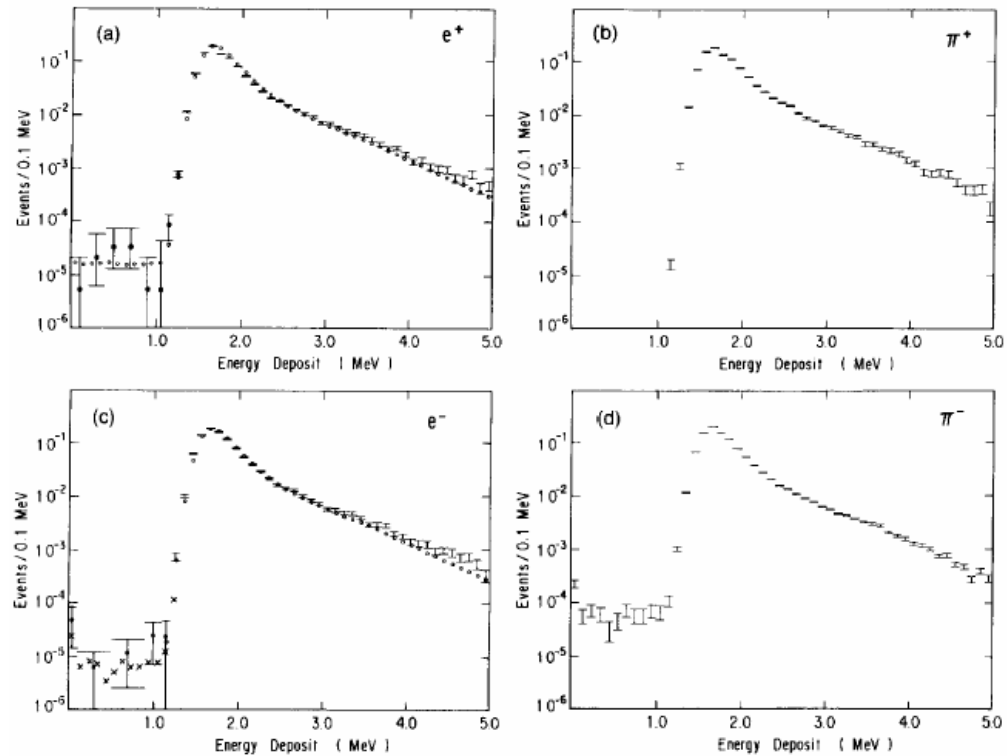
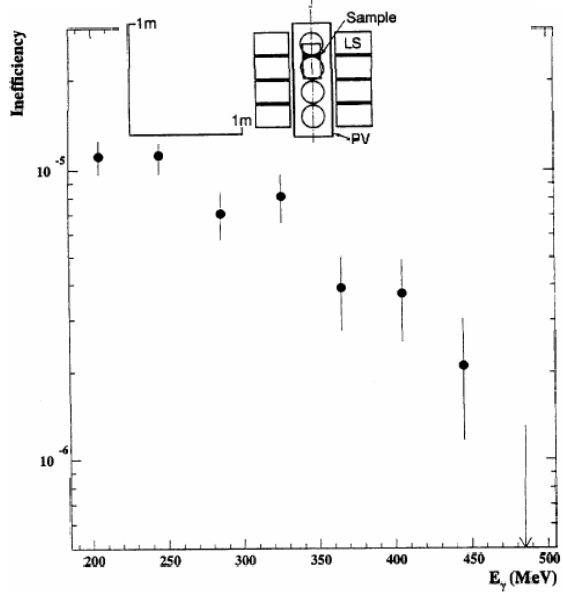
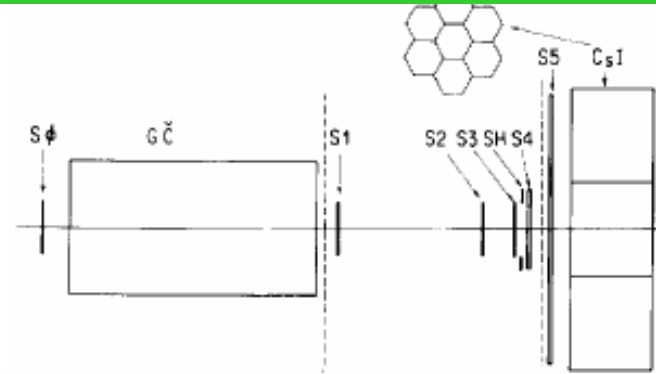
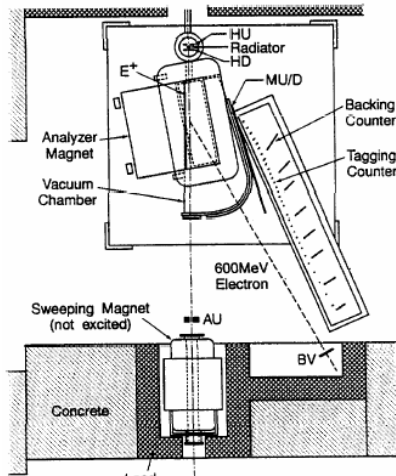


- $\langle p \rangle_K \sim 2 \text{ GeV}/c$
- Pencil beam per misura accurata dell'impulso trasverso del  $\pi^0$
- Calorimetro a CsI puro
- Doppia regione di veto per eliminare fondo da  $3\pi^0$  con  $\gamma$  all'indietro

- Approvato nel '97, ha seguito un programma di sviluppo graduale, con uno studio sistematico dei problemi sperimentali rilevanti
  - ◆ Misure delle inefficienze dei rivelatori e dei loro limiti fisici
  - ◆ Studio del fascio ( Dec. 2000 )
- Presa dati nel 2004, con sensibilità di progetto  $\sim 1 \times 10^{-10}$

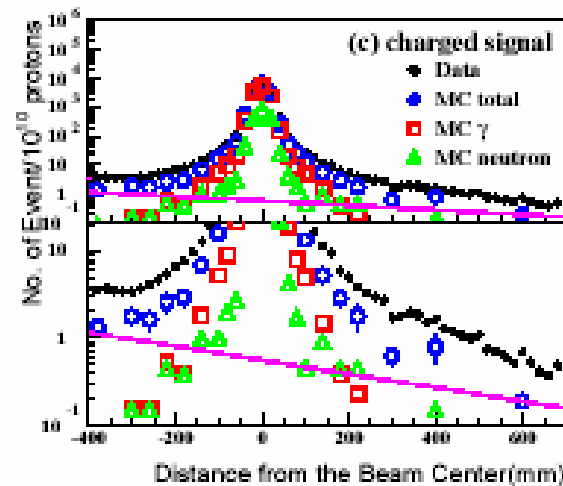
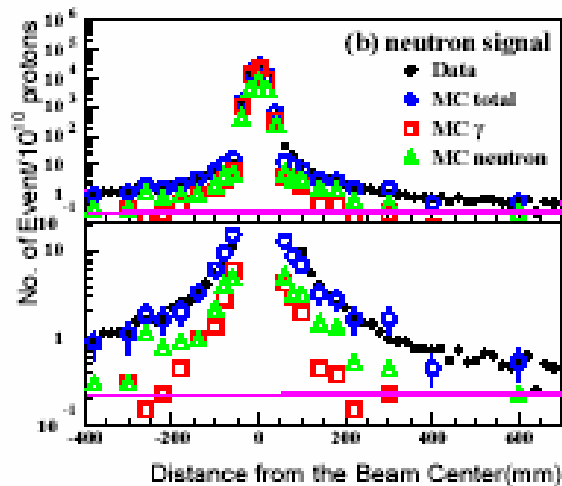
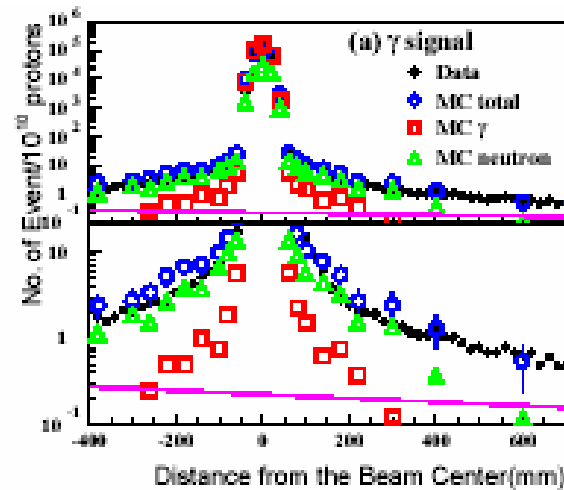


# E391: misura di inefficienza



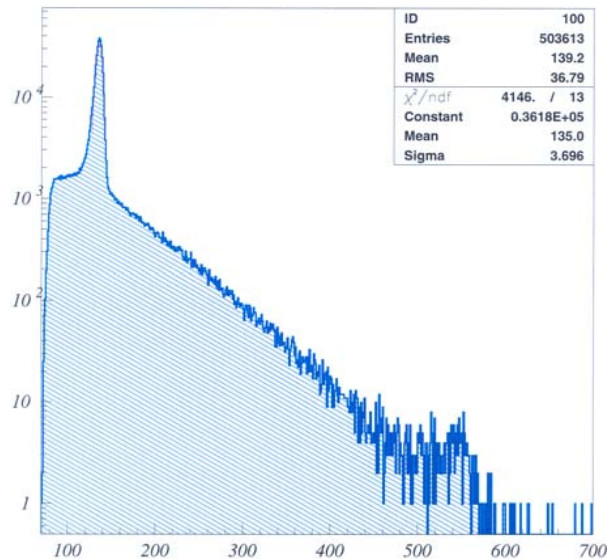
re 19: Detection inefficiencies of the CsI calorimeter due to the photonuclear inter-

# E391a: misura sul fascio



# Stato di E391 a

- In fase di completamento: presa dati prevista nel 2004
- Ha effettuato un engineering run a fine 2002 con rivelatore CsI



Two  $\gamma$  invariant mass  
( $\text{MeV}/c^2$ )

- ◆ DAQ using self-trigger of CsI

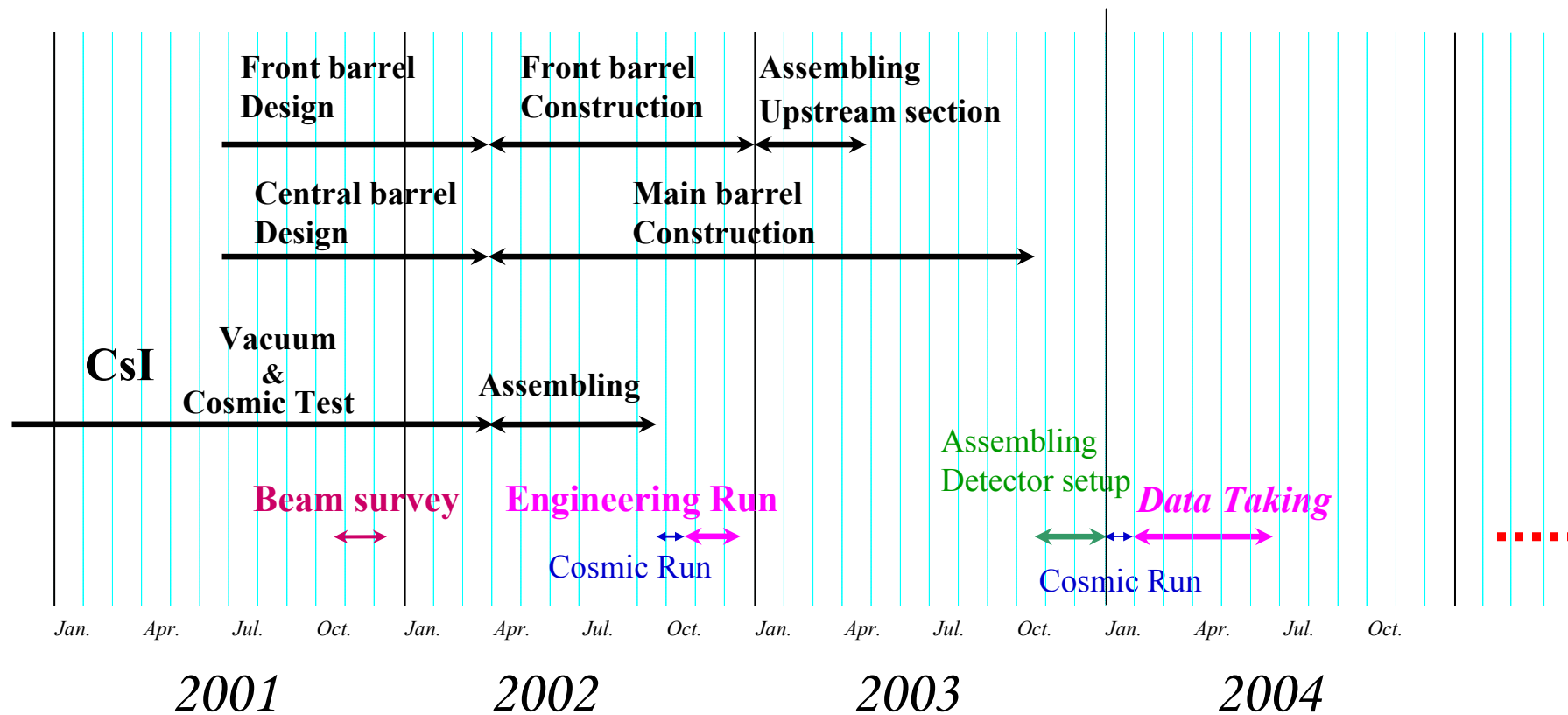
Same scheme of real run

Tuning / feed-back

- ◆ CsI calibration
  - Cosmic test in vacuum chamber
  - Cosmic test during stacking
  - Punch-through muon
  - Two gammas from single  $\pi^0$
  - Multi-gamma decay (Kpi2, Kpi3)
- ◆ KL decay data – same format of real run
  - Develop on-line/off-line software

# Prospettive di E391a

- Presa dati prevista nella prima metà del 2004
- La collaborazione si è ingrandita con gruppi provenienti da KTEV
- LOI per JPARC per sensibilità migliore del B.R. dello S.M. (>2008)



# KOPIO: approccio nuovo a $\pi^0 \nu \bar{\nu}$

- ◆ In aggiunta ai veto usare il maggior numero di vincoli cinematici possibili
  - ❖ Energia, posizione ed angolo dei  $\gamma$
  - ❖ Impulso del  $K_L$  mediante TOF per trasformazione al CM
- ◆ Fascio bunchato a RF,  $\langle p \rangle \sim 0.8 \text{ GeV}/c$

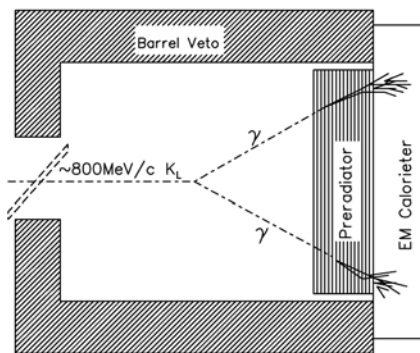
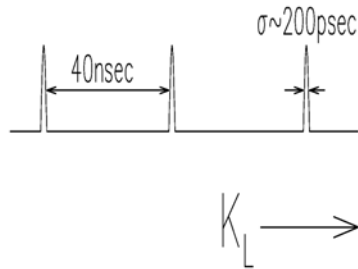
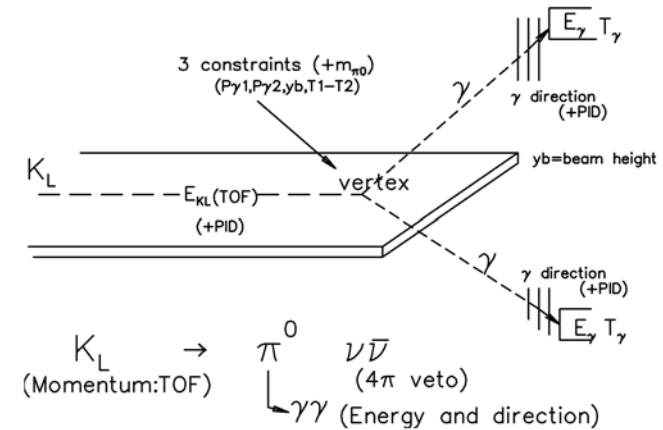
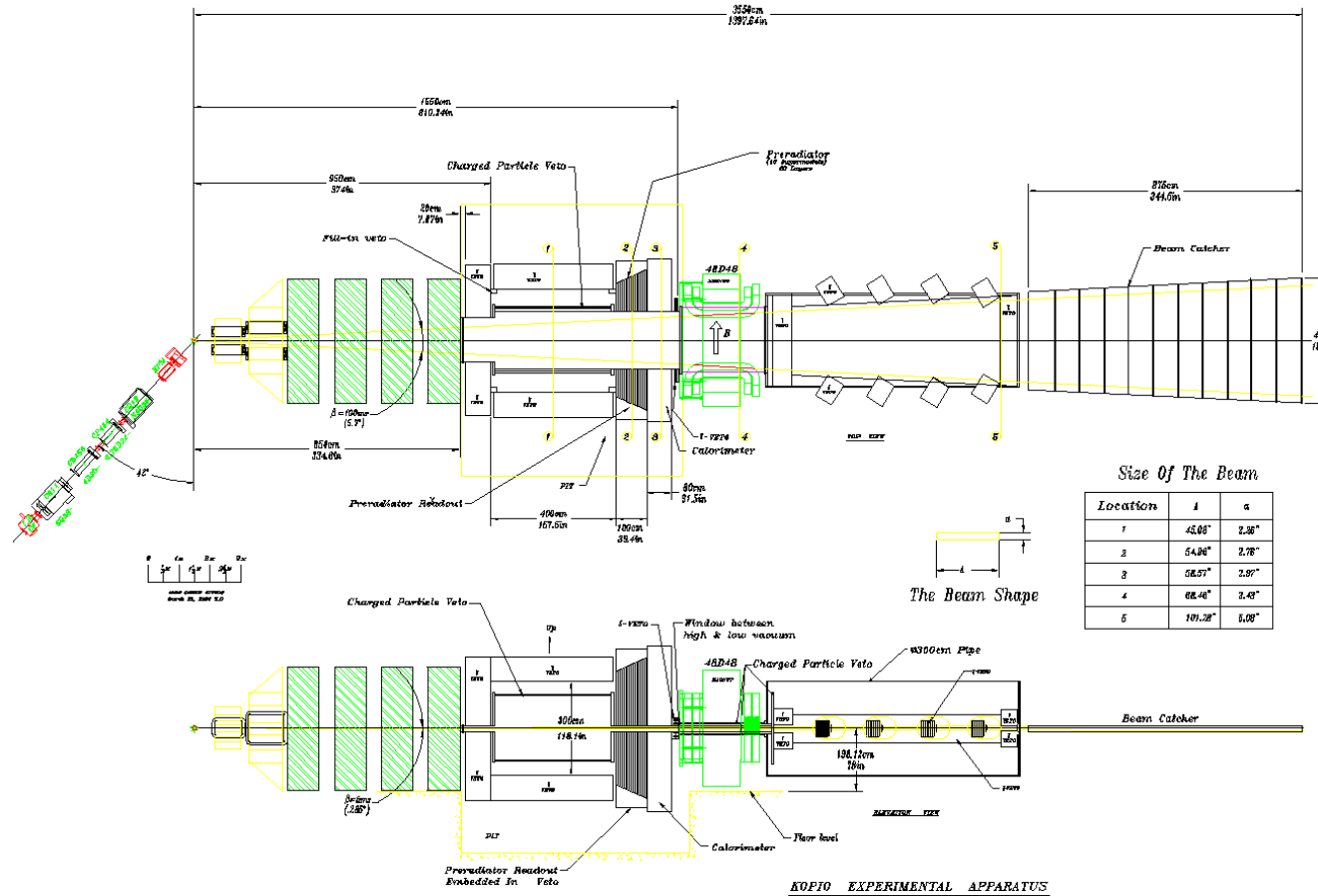


Fig. 4. Elements of the KOPIO concept : a pulsed primary beam produces low energy kaons whose time-of-flight reveals their momentum when the  $\pi^0$  from  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay is reconstructed.

- ◆ Preradiatore tracciante per la misura della direzione dei  $\gamma$
- ◆ Misura di E combinando prerad + Shashlik
- ◆ Copertura ermetica dei veto inclusa la regione del fascio

# KOPIO layout



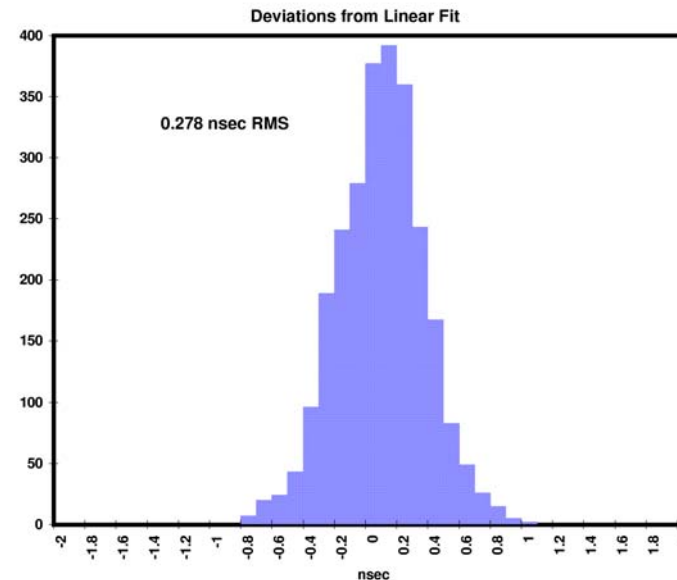
# Prove di esistenza per KOPPIO

- Molti parametri critici convalidati da misure di test
  - ◆ Beam bunching: raggiunta  $\sigma \approx 280$  ps con cavità 33MHz, 30 kV
    - ❖ Schema finale con 25MHz, 150kV + cavità armonica aggiuntiva a 100MHz
  - ◆ Risoluzione angolare del preradiatore: 25-30 mr per  $E_\gamma = 250$ MeV
  - ◆ Risoluzione in energia nello Shashlik 6.7% for 250MeV  $\gamma$ 
    - ❖ Studi Monte-Carlo mostrano che, insieme al preradiatore
 
$$\frac{\sigma}{E} \cong \frac{2.7\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$$
  - ◆ Efficienze di veto basate su misure di E787, ma leggermente superiori per il migliore campionamento ( bassa E ) e il maggior numero di lunghezze di radiazione ( alta E )
- Maggiori dettagli nel talk di G. Anzivino

# KOPIO: beam bunching

- Initial test of beam bunching with 93 MHz, 30kV cavity
  - ◆ Bunch width 280ps measured
- Present design based on 25MHz, 150kV cavity with addition of an harmonic cavity at 100MHz
  - ◆ Aiming at bunch width less than 200ps

Test of microbunching on extraction at AGS



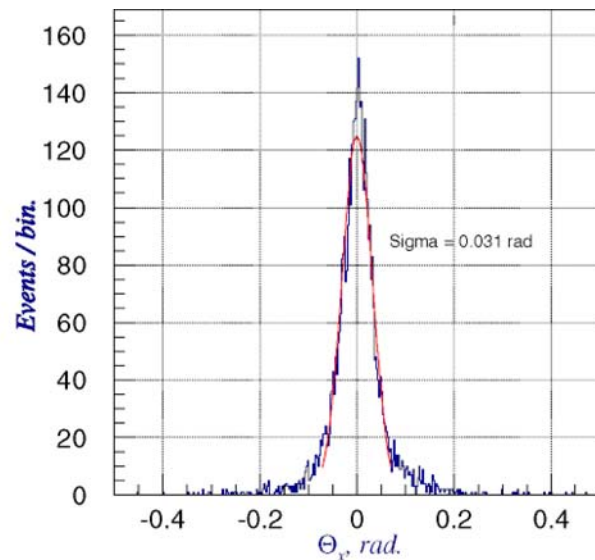
Technique now well established  
Very successfully used to smooth AGS spill



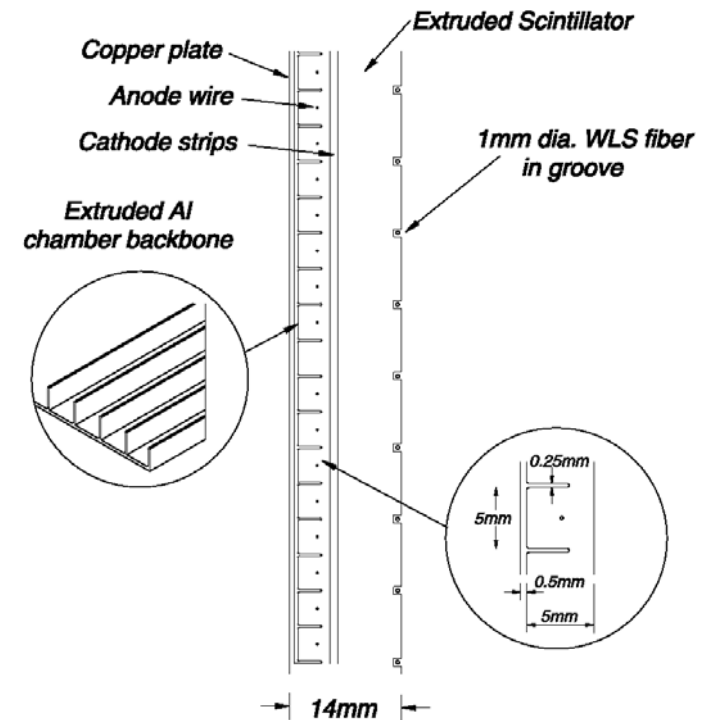


# KOPIO preradiator

- ◆ 64 layers. Each has 0.034  $X_0$ 
  - ❖ Drift cells ( wire and cathode strip r.o.)
  - ❖ Scintillator to complement Shashlik calorimeter E measurement
- ◆ Performance:
  - ❖ Angle resolution 25 mrad @250MeV ( $\propto E^{-0.7}$ )
  - ❖ Combined E res.  $\sigma/E \cong 2.7\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$



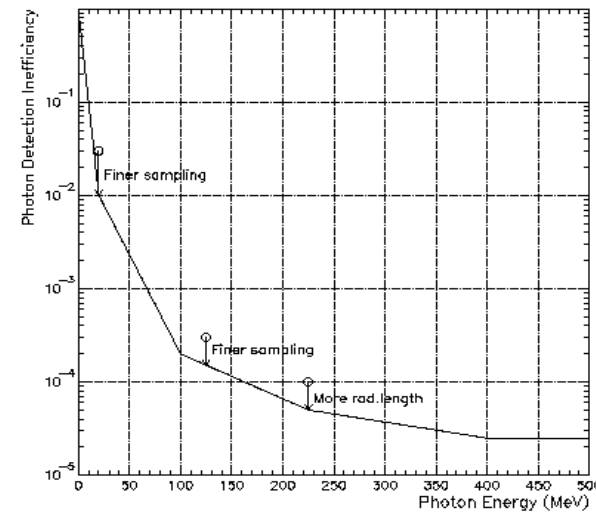
$\Theta_x$  distribution of detected photons.  $E_\gamma = 150$  MeV.



# KOPIO: veto performance

- ◆ Pb-Scintillator sandwich (WLS fiber readout)
- ◆ Inefficiencies from E787 data
  - ❖ improved at high E (more  $X_0$ ) and low E ( better sampling )
  - ❖ (20-100)MeV:  $10^{-2}$
  - ❖ 100-220 MeV:  $10^{-4}$
- ◆ Beam region covered by focusing aerogel device insensitive to n
- ◆ Overall inefficiency for  $\pi^0$ :  $10^{-4}$
- ◆ Charged veto counters inside vacuum pipe with inefficiencies  $10^{-4}$  for  $\pi^-$  and  $e^+$

Photon Detection Inefficiency



# KOPIO: uso della cinematica

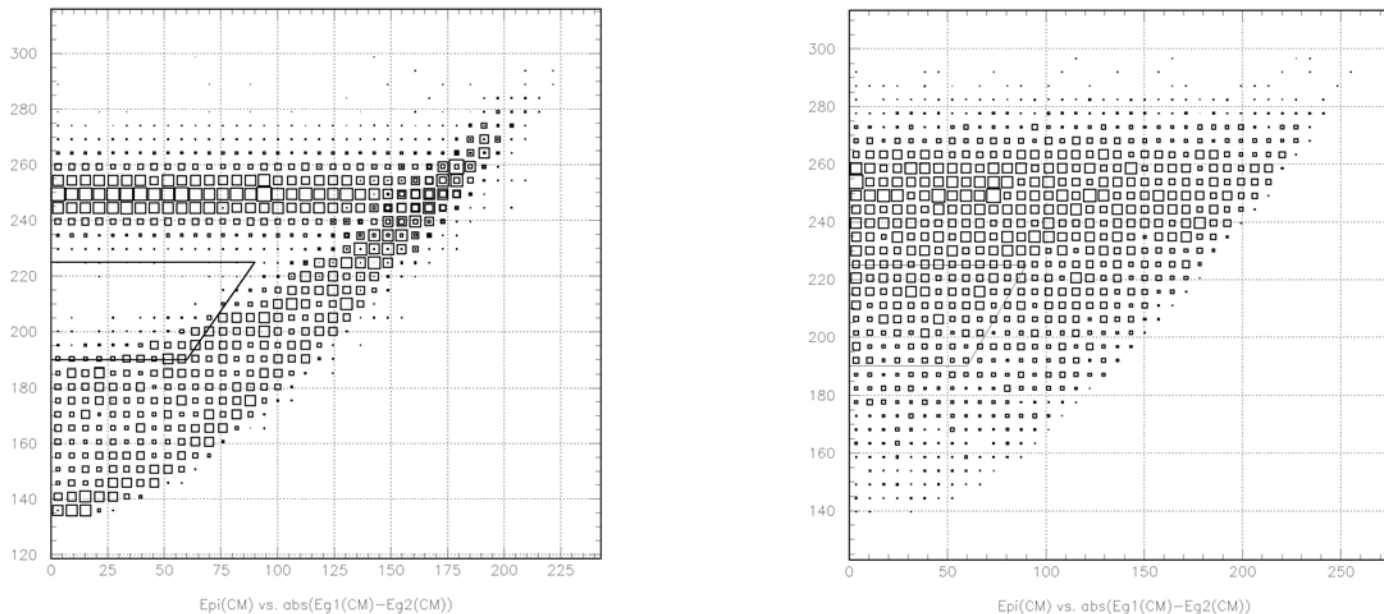
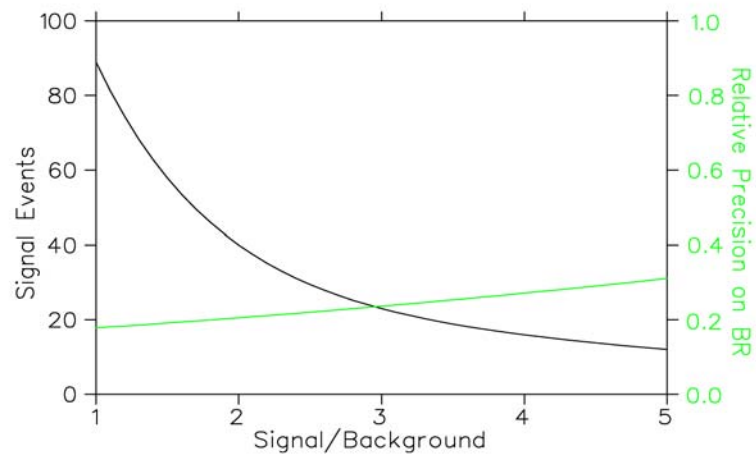


Fig. 9. Distributions of  $E_{\pi^0}^*$  vs.  $|E_{\gamma_1}^* - E_{\gamma_2}^*|$  after  $\pi^0$  mass requirement for the  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$  (left) and for the signal (right). The solid line encloses the signal region.

- La trasformazione al CM e la ricostruzione completa dei  $\gamma$  individuano una regione dove il fondo di  $2\pi^0$  è trascurabile
- Cinematica complementare ai veto (piccole  $E_{\pi^*}$   $\rightarrow$  maggiore efficienza di veto)

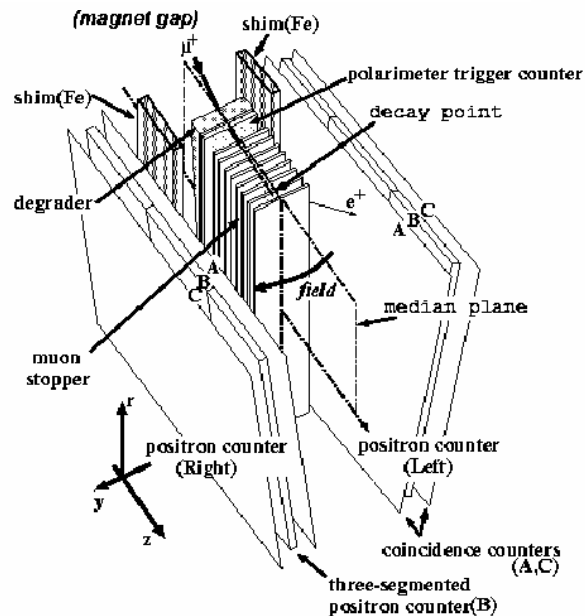
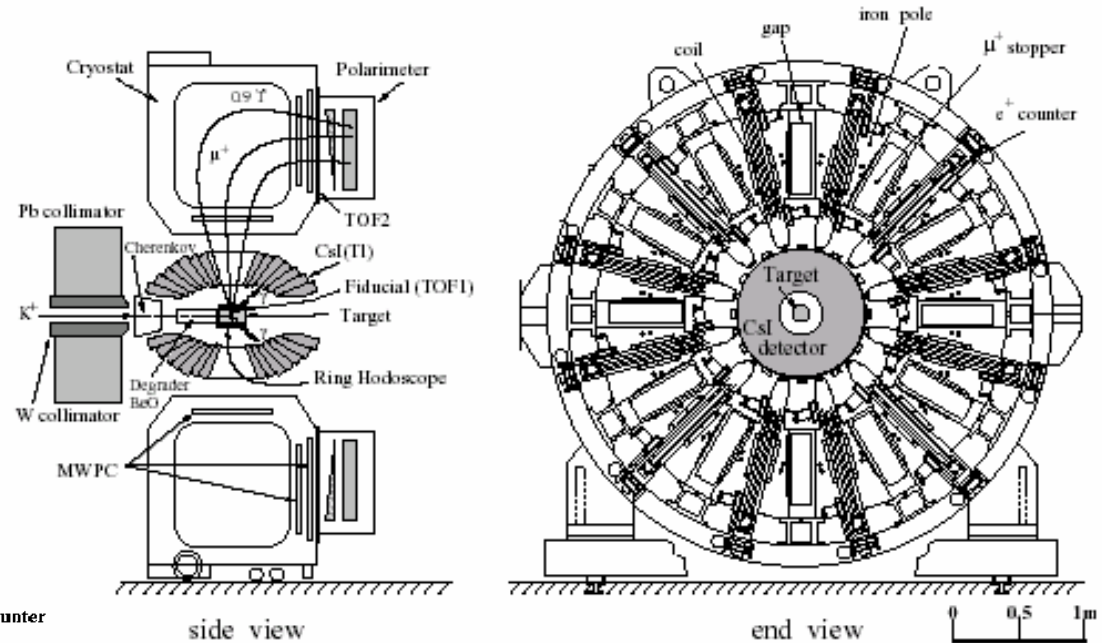
# KOPIO: risultati attesi

Process	Modes	Main source	Events
$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$			40
$K_L$ decays ( $\bar{\gamma}$ ) $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ $K_L \rightarrow \gamma \gamma$	$\pi^0 \pi^0, \pi^0 \pi^0 \pi^0, \pi^0 \gamma \gamma$	$\pi^0 \pi^0$	12.4 1.7 0.02
$K_L$ decays ( $\overline{charge}$ ) $K_L$ decays ( $\bar{\gamma}, \overline{charge}$ )	$\pi^\pm e^\mp \nu, \pi^\pm \mu^\mp \nu, \pi^+ \pi^-$ $\pi^\pm l^\mp \nu \gamma, \pi^\pm l^\mp \nu \pi^0, \pi^+ \pi^- \gamma$	$\pi^- e^+ \nu$ $\pi^- e^+ \nu \gamma$	0.02 4.5
Other particle decays	$\Lambda \rightarrow \pi^0 n, K_{\pi 2}^-, \Sigma^+ \rightarrow \pi^0 p$	$\Lambda \rightarrow \pi^0 n$	0.01
Interactions	$n, K_L, \gamma$	$n \rightarrow \pi^0$	0.2
Accidentals	$n, K_L, \gamma$	$n, K_L, \gamma$	0.6
<b>Total Background</b>			<b>19.5</b>



# KEK E246

- $K^+ \rightarrow \mu^+ \pi^0 \nu$  ( $\mu$  a  $90^\circ$ ,  $\pi^0$  avanti o indietro)
- $K^+$  stop
- CsI array per misura  $\pi^0$
- Magnete toroidale superconduttore
- Polarimetro con campo azimuthale



- Misura polarizzazione del  $\mu^+ \perp$  al piano  $\mu \pi^0$  dalla asimmetria dell'  $e^+$  di decadimento
  - ◆ Componenti non azimuthali di P precedono
  - ◆ Componente azimuthale da asimmetria tra i contatori di sinistra e di destra
- Selezionando  $\pi^0$  all'indietro o in avanti si cambia il segno della asimmetria

# Risultati finali di E246

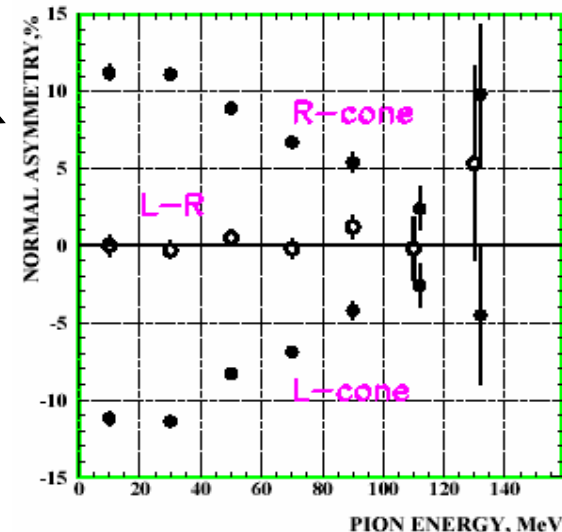
- $\sim 1.2 \times 10^7$  eventi
- Doppio rapporto per eventi con pioni forward e backward

$$A_T = \frac{1}{4} \left[ \frac{(N_{cw}/N_{ccw})_{fwd}}{(N_{cw}/N_{ccw})_{bwd}} - 1 \right]. \quad P_T = A_T / (\alpha \langle \cos \theta_T \rangle),$$

- Potere analizzante calibrato con  $P_N$  (normale nel piano)
  - ◆ pioni destra/sinistra
- Risultato per  $P_T$  compatibile con 0
  - ◆ migliora precisione di Blatt et al. (BNL 1983) di più di un fattore 2
- $P_T = (-1.12 \pm 2.17 \pm 0.90) \times 10^{-3}$
- LOI per nuovo esperimento a JPARC
  - ◆ Obiettivo ambizioso di precisione statistica/sistematica  $\sim 10^{-4}$
  - ◆  $\sim 10^{10}$  eventi, polarimetro tracciante

Source of error	$\Delta P_T \times 10^{-4}$
CsI(Tl) misalignment	1.6
Decay plane rotation	2.2
Misalignment of positron counters	2.3
MWPC $\phi$ -offset	2.5
$K^+$ stopping distribution	< 3.0
Analysis	3.8
Fringing field asymmetry	6.1
<b>Total</b>	<b>9.2</b>

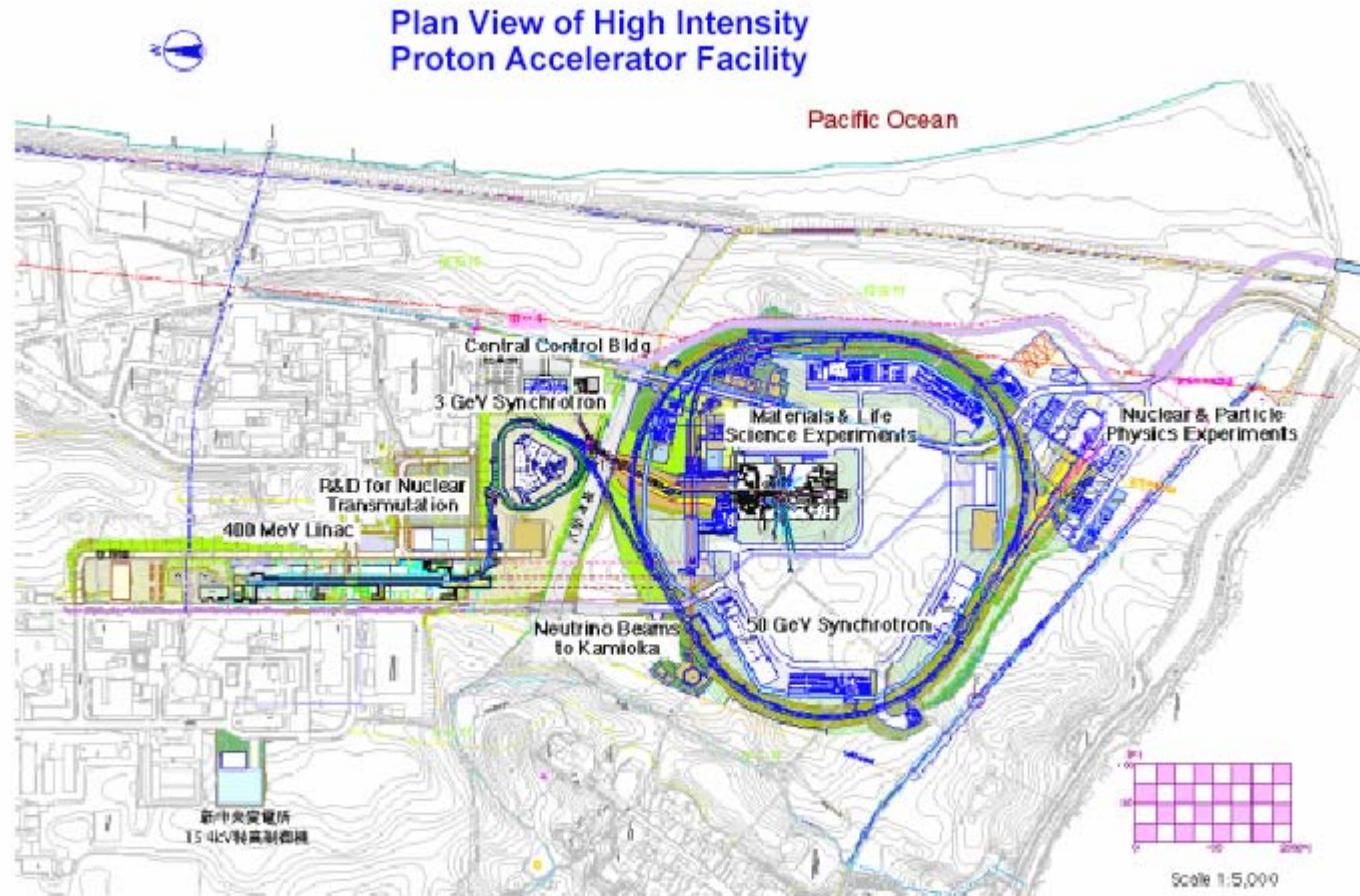
Table 1: Main systematic errors



# JPARC

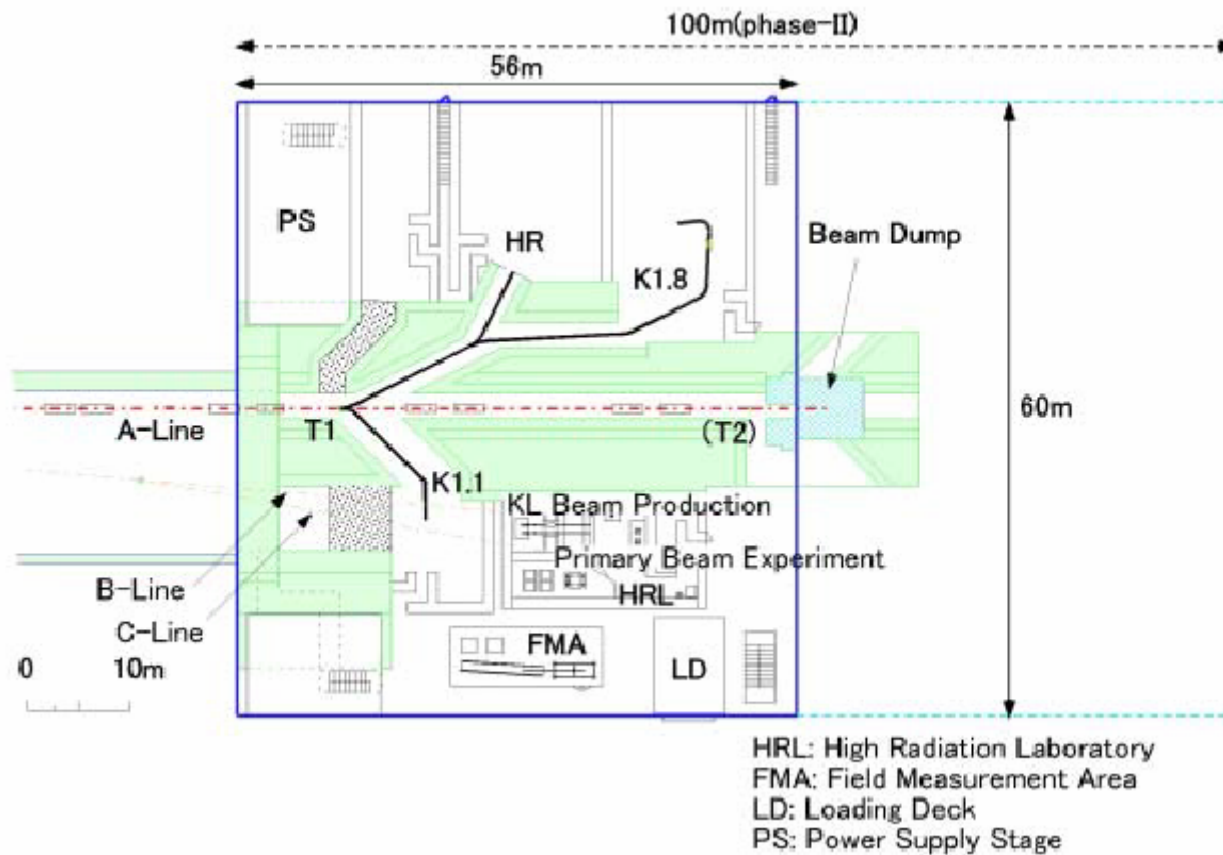
- Acceleratore per protoni in costruzione in Giappone
  - ◆ Obiettivo finale:  $E=50 \text{ GeV}$   $i=15\mu\text{A}$ 
    - ❖ Fase 1:  $E$  30 o 40 GeV
  - ◆ In aggiunta al fascio di neutrini per Kamioka è prevista una sala sperimentale (K-hall) con due beam lines
    - ❖ Nella fase 1 sono disponibili risorse per una sola beam-line
  - ◆ Partenza prevista per inizio 2008
- Call per LOI ( dicembre 2002 )
  - ◆ Diverse lettere di intenzione per fisica dei K , tra cui
    - ❖  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  (upgrade di E391a)
    - ❖  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  (à la BNL E787 con  $K^+$  stop)
    - ❖ T violating  $P_T$  in  $K^+ \rightarrow \mu^+ \pi^0 \nu$  a livello di  $10^{-4}$
    - ❖  $K^+ \rightarrow e^+ \pi^0 \nu$  per misura di  $V_{us}$

# JPARC site





# JPARC: K-hall



# Conclusioni

---

- L'estrazione di informazioni significative per le interazioni short range da  $K_L \rightarrow \pi^0 \ell^+ \ell^-$  e  $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$  richiederebbe
  - ◆ Maggiore sensibilità sperimentale
  - ◆ Misure più precise su diversi canali di decadimento radiativi
  - ◆ Migliore comprensione dell'approccio teorico
- Migliori prospettive per un confronto significativo con risultati ottenuti nel settore dei B da  $\pi \nu \bar{\nu}$ 
  - ◆ CKM ad FNAL
  - ◆ KOPIO a BNL
- C'è spazio e ci sono idee per una riduzione della gap tra previsioni del modello standard e misure sperimentali in diverse aree
  - ◆ Asimmetrie di carica
  - ◆ Parametri con violazione di T
- Nuove facilities per la fisica dei K negli anni 201x ?

# Confronto K-B: lo scenario di Buras

(Buras, 1999)



$$\sigma(|V_{cb}|) = \pm 0.002(0.001)$$

	$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$	B-Factory Era	LHCb/BTeV
$\sigma( V_{td} )$	$\pm 10\%(9\%)$	$\pm 5.5\%(3.5\%)$	$\pm 5\%(2.5\%)$
$\sigma(\bar{\rho})$	$\pm 0.16(0.12)$	$\pm 0.03$	$\pm 0.01$
$\sigma(\bar{\eta})$	$\pm 0.04(0.03)$	$\pm 0.04$	$\pm 0.01$
$\sigma(\sin 2\beta)$	$\pm 0.05$	$\pm 0.06$	$\pm 0.02$
$\sigma(\text{Im } \lambda_i)$	$\pm 5\%$	$\pm 14\%(11\%)$	$\pm 10\%(6\%)$