



Verifiche di teoria perturbativa chirale in decadimenti K^4 e decadimenti $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \gamma$ a NA48/2

Mauro Piccini
(Università di Perugia & INFN)

A nome della collaborazione NA48/2

IFAE
Bari
15-17 Aprile 2009

Outline

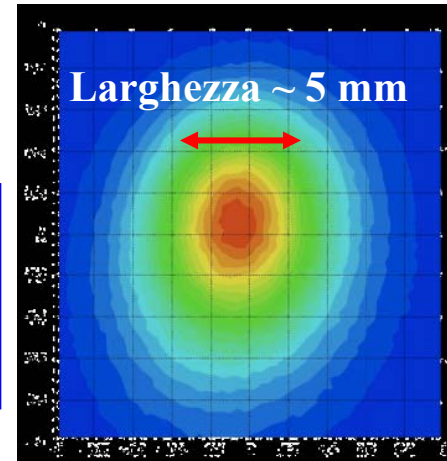
- Il fascio e il rivelatore dell'esperimento NA48/2 al CERN
- Il decadimento $K^{\pm} \rightarrow \pi\pi e\nu$ (Ke4)
 - Estrazione dei fattori di forma
 - Ampiezze di scattering a_0 e a_2
- Il decadimento $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm}\pi^0\gamma$
 - Misura dei termini di IB, DE e loro interferenza
 - Misura delle componenti X_E and X_M della DE
- Conclusioni

Il fascio simultaneo K^+/K^-

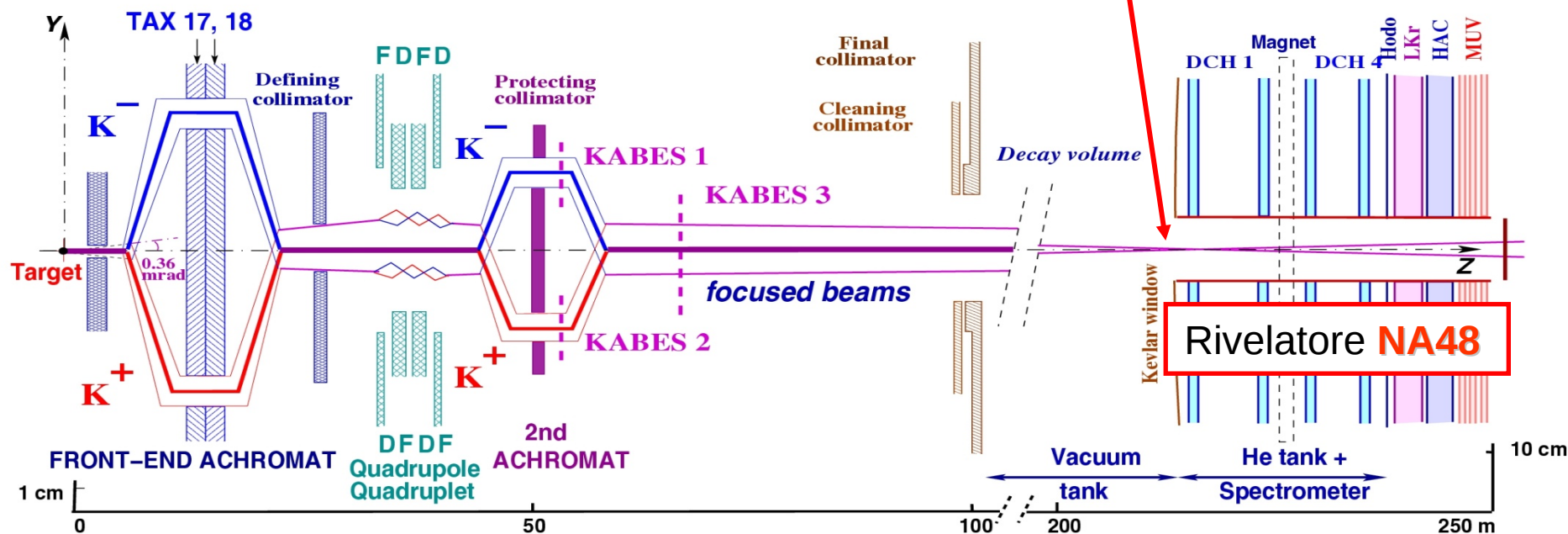
Fasce quasi collineari K^+ e K^-
Rapporto dei flussi: $K^+/K^- \sim 1.8$

Energia dei Kaoni:
 60 ± 3 GeV/c

Presi dati:
2003 – 50 giorni
2004 – 60 giorni



I fasci **coincidono** a meno di **1 mm**



Il rivelatore NA48

Spettrometro magnetico (4 DCHs):

4 viste: ridondanza $\Rightarrow$ efficienza

$$\sigma(p)/p = 1.0\% + 0.044\% p \text{ [GeV/c]}$$

Odoscopio Carico:

Trigger veloce di primo livello e ottima
risoluzione temporale

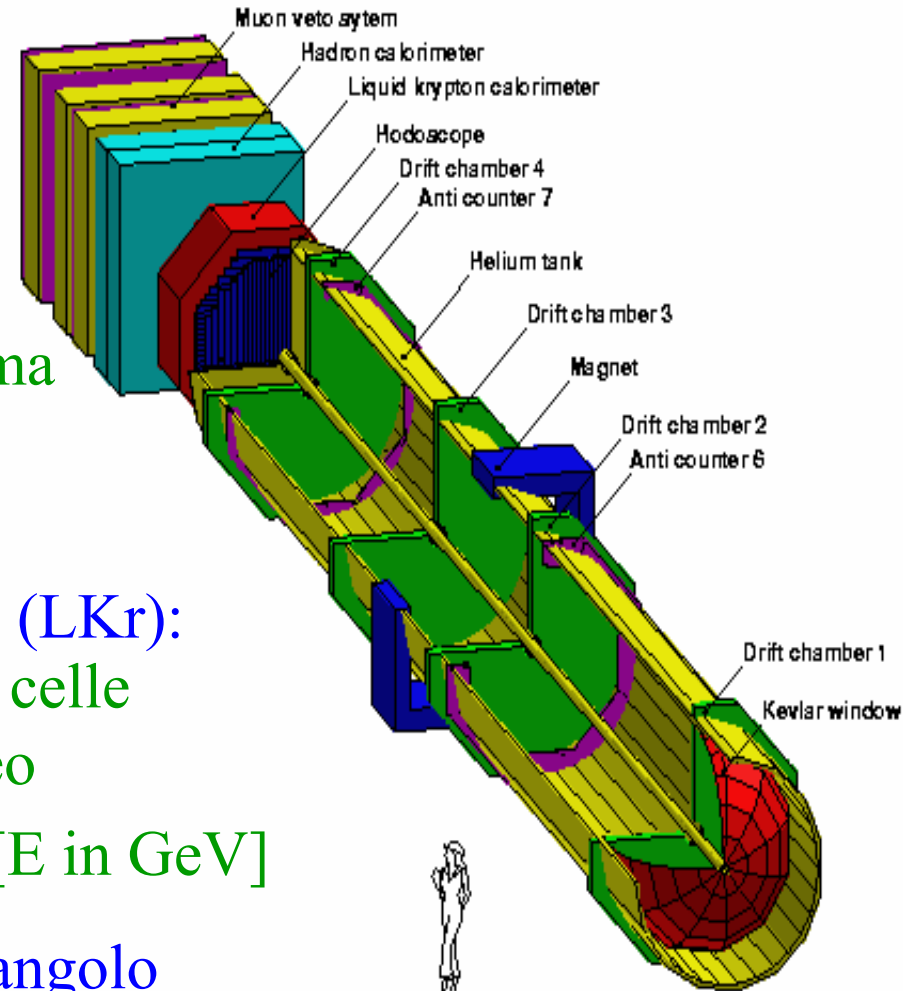
(~ 250 ps sulla singola traccia)

Calorimetro E.M. A Krypton liquido (LKr):

10 m³ (~ 22 t), 1.25 m ($27 X_0$), 13212 celle
granularità: 2x2 cm², quasi-omogeneo

$$\sigma(E)/E = 3.2\%/\sqrt{E} + 9\%/E + 0.42\% \text{ [E in GeV]}$$

Calorimetro adronico, veto a grande angolo
e rivelatore di muoni (scintillatori)



Il decadimento K_{e4}

Motivi di interesse:

- Misura dei fattori di forma e della loro dipendenza da q^2
- Estrazione delle ampiezze di scattering nucleare a_0 e a_2

Topologia K_{e4} :

- 3 tracce e 1 vertice
- 1 elettrone ($E_{LKr}/p_{DCH} \sim 1$)
- due particelle di carica opposta
- Calcolo di $P_K \rightarrow$ prendere la soluzione più vicina a 60 GeV/c
- (L'alternativa è quella di ricostruire la missing mass del ν assumendo $P_K=60$ GeV/c)

Fondi:

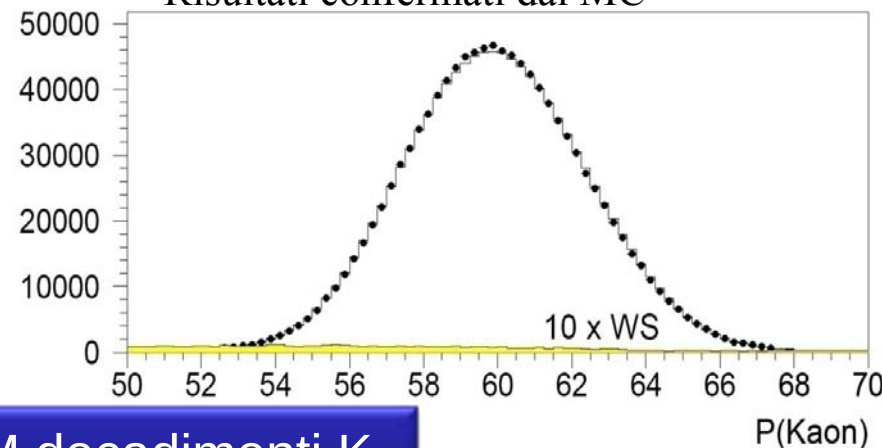
- $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^+ \pi^-$ (dominante) con decadimento $\pi \rightarrow e \nu$ o misID
- $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ con $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ e con l'elettrone misID come π

Il fondo contribuisce per lo
~0.5% nel campione finale



Stima dei fondi:

- Selezione “wrong sign”, con la carica dell'elettrone opposta a quella del vertice (decadimento soppresso a livello 10^{-10} da $\Delta S = \Delta Q$)
- Stima da riscalar in base alla relativa probabilità di misID:
 - RS/WS=2 per fondo da K in 3π carichi
 - RS/WS=1 per fondo da K in $\pi^0 \pi^0 \pi^\pm$
- Risultati confermati dal MC



Statistica totale 1.15 M decadimenti K_{e4}

I fattori di forma del decadimento Ke4

5 variabili cinematiche [Phys.Rev. 137, B438 (1965)]:

$$S_\pi(M_{\pi\pi}^2) \quad S_e(M_{e\nu}^2) \quad \cos\theta_\pi \quad \cos\theta_e \quad \phi$$

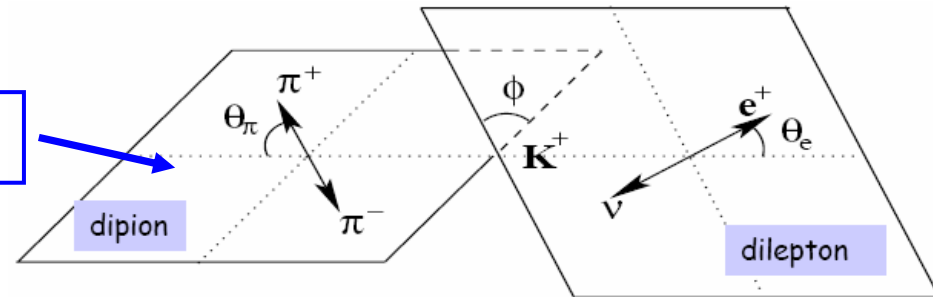
3 fattori di forma (F,G,H) – espansione in onde parziali [Pais-Treiman1968]:

$$\begin{array}{l} \text{axial} \left\{ \begin{array}{l} F = F_s e^{i\delta_s} + F_p e^{i\delta_p} \cos\theta_\pi \\ G = G_p e^{i\delta_g} \end{array} \right. \\ \text{vector} \left\{ \begin{array}{l} H = H_p e^{i\delta_h} \end{array} \right. \end{array} \quad + \text{onde } d...$$

Ulteriore espansione in funzione di $q^2 = (S_\pi/4m_\pi - 1)$ e S_e [Amoros-Bijnens1999]:

$$\begin{array}{l} F_s = f_s + f'_s q^2 + f''_s q^4 + f_e (S_e / 4m_\pi^2) + ... \\ F_p = f'_p + f''_p q^2 + ... \\ G_p = g_p + g'_p q^2 + ... \\ H_p = h_p + h'_p q^2 + ... \end{array}$$

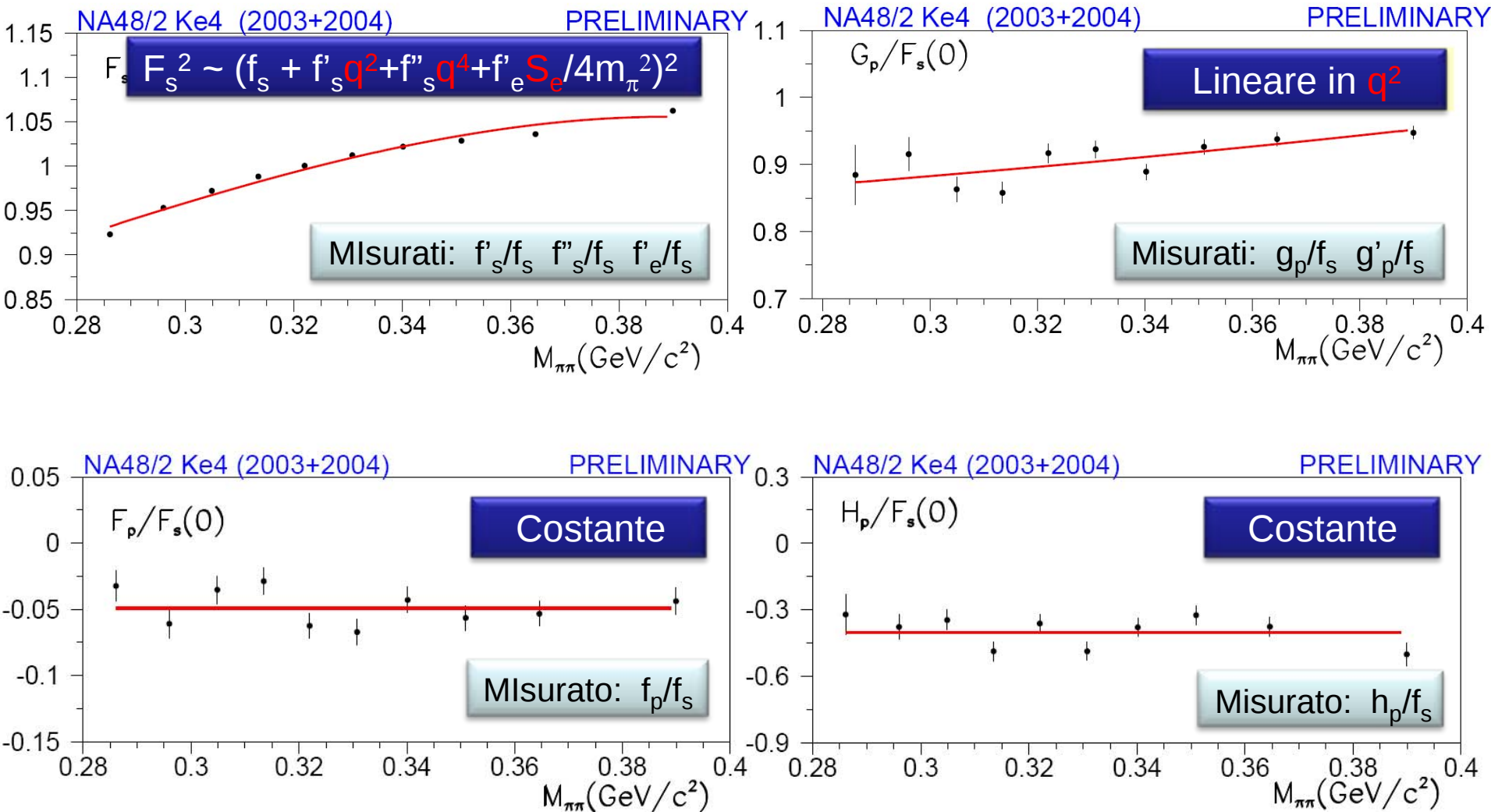
Calcolare F_s, F_p, G_p, H_p e $\delta = \delta_s - \delta_p$ in bin di q^2
Estrarre i parametri finali dalla dipendenza dal q^2
Estrarre a_0 da dipendenza di $\delta(q^2)$ dal q^2



Fit dei fattori di forma:

- Si definiscono 10x5x5x5x12 bin similmente popolati in $(M_{\pi\pi}, M_{e\nu}, \cos\theta_\pi, \cos\theta_e, \phi)$
- 10 fits indipendenti (uno per ogni bin di $M_{\pi\pi}$) per $F_s, F_p, G_p, H_p, \delta$ nello spazio 4D
- I 4 set di punti sono poi fittati con un polinomio **in potenze di q^2** (Espansione di Taylor valida nel limite di validità della simmetria di isospin)
- L'analisi è "Model independent"** → nessuna assunzione fatta sulla dipendenza di δ e dei FF fra un bin e l'altro
- Mancanza di una normalizzazione complessiva (BR non misurato), solo **fattori di forma relativi** (F_p, G_p, H_p)/ F_s sono misurati.

Estrazione dei fattori di forma



Risultati

Preliminare
2003+2004

f'_s/f_s	$0.158 \pm 0.007_{\text{stat}} \pm 0.006_{\text{syst}}$
f''_s/f_s	$-0.078 \pm 0.007_{\text{stat}} \pm 0.007_{\text{syst}}$
f'_e/f_s	$0.067 \pm 0.006_{\text{stat}} \pm 0.009_{\text{syst}}$
f_p/f_s	$-0.049 \pm 0.003_{\text{stat}} \pm 0.004_{\text{syst}}$
g_p/f_s	$0.869 \pm 0.010_{\text{stat}} \pm 0.012_{\text{syst}}$
g'_p/f_s	$0.087 \pm 0.017_{\text{stat}} \pm 0.015_{\text{syst}}$
h_p/f_s	$-0.402 \pm 0.014_{\text{stat}} \pm 0.008_{\text{syst}}$

- ◆ Risultati in accordo con quelli estratti dalla sola presa dati del 2003 → **EPJ C54 (2008)**
- ◆ Al momento i sistematici sono conservativamente stati ripresi dall'analisi dei dati del 2003 → molti sistematici erano limitati dalla statistica → saranno rivalutati con l'intero campione
- ◆ Alcuni degli effetti sistematici studiati:
geometria del fascio, accettazione, ID particelle, fondi, correzioni radiative...

Misura delle ampiezze di scattering

Input esterni necessari per estrarre le ampiezze di scattering in onda S dalla variazione di $\delta = (\delta_0^0 - \delta_1^1)$:

Teoria: soluzione numerica dell' **equazione di Roy**

[ACGL Phys. Rep.353 (2001), DFGS EPJ C24 (2002)]

che mette in relazione δ e (a_0, a_2)

Universal band: soluzioni permesse in base ai risultati di tutti gli altri esperimenti

Previsione dalla χ PT [CGL NPB603(2001)]:

$$a_0 = 0.220 \pm 0.005 \quad a_2 = -0.0444 \pm 0.0008$$

2p fit → Estrazione di a_0 e a_2
come due parametri liberi

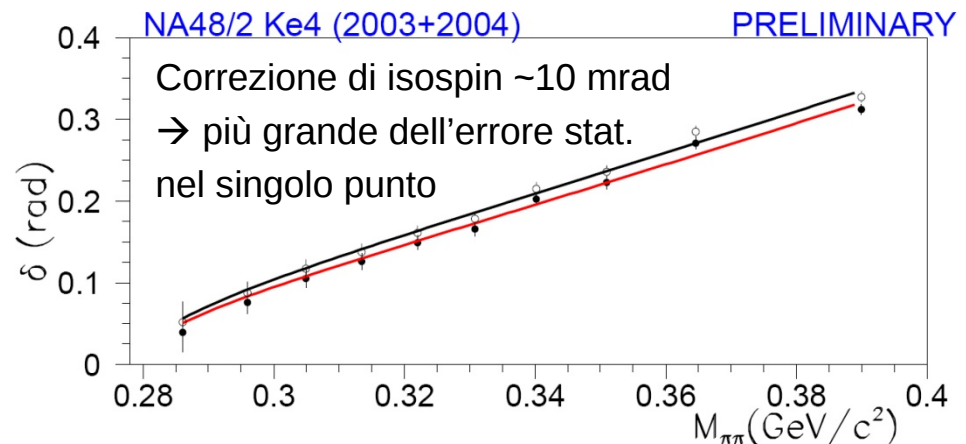
1p fit → Estrazione di a_0 usando
il vincolo dato da χ PT

Correzioni radiative considerate nel MC

Correzione di isospin applicate!

2p fit	Isospin corr OFF	Isospin corr ON
a_0	0.244 ± 0.013	0.218 ± 0.013
a_2	-0.0385 ± 0.0084	-0.0457 ± 0.0084

Effetto a 2σ !



Risultati

Preliminare 2003+2004:

2p fit:

$$a_0 = 0.218 \pm 0.013_{\text{stat}} \pm 0.007_{\text{syst}} \pm 0.017_{\text{theor}}$$

$$a_2 = -0.0457 \pm 0.0084_{\text{stat}} \pm 0.0041_{\text{syst}} \pm 0.0030_{\text{theor}}$$

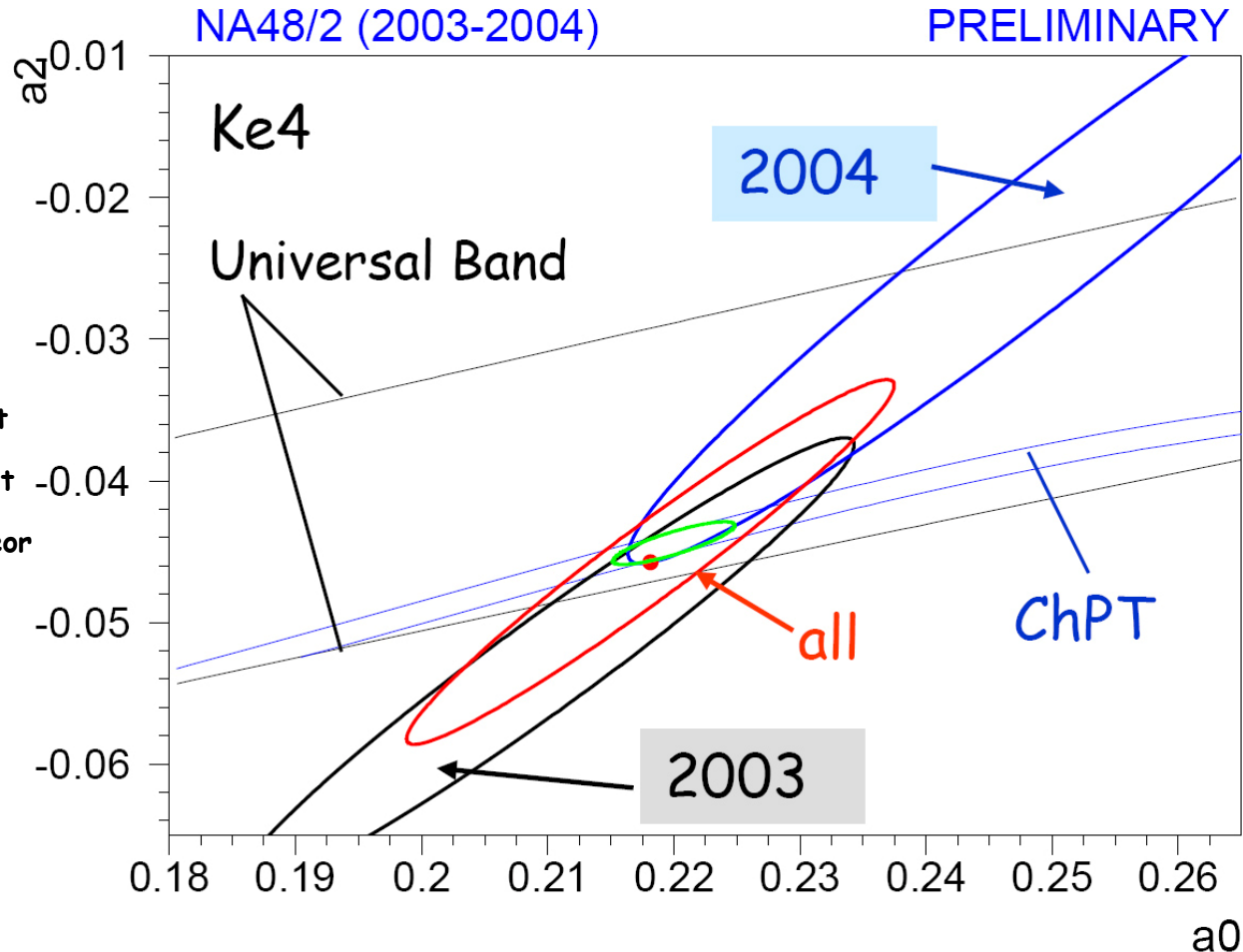
1p χ PT fit:

$$a_0 = 0.220 \pm 0.005_{\text{stat}} \pm 0.002_{\text{syst}} \pm 0.006_{\text{theor}}$$

χ PT prediction:

$$a_0 = 0.220 \pm 0.005$$

$$a_2 = -0.0444 \pm 0.0008$$



I sistematici derivano dai dati del 2003 → da rivalutare

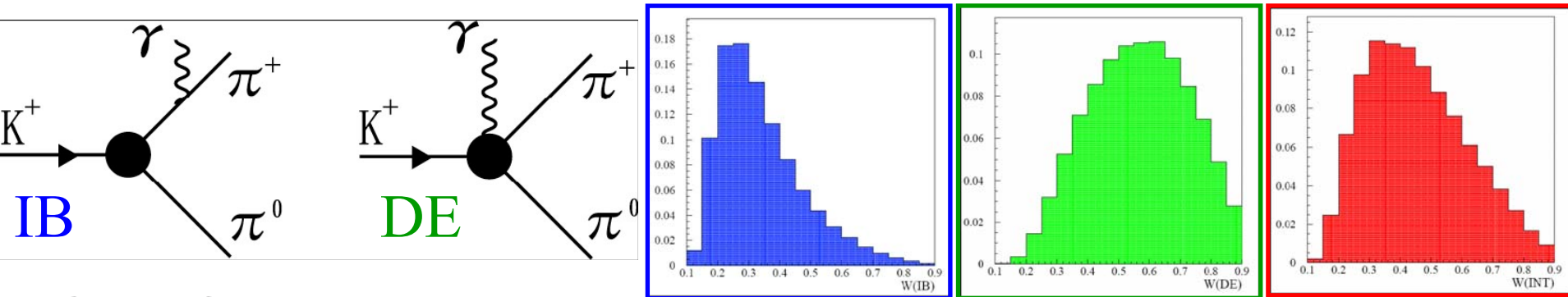
Errore teorico → Implementazione delle corr. di isospin e da alcuni parametri da inserire nell'equazione di Roy

Il decadimento $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \gamma$

Motivi di interesse:

➤ Test della QCD a bassa energia (χ PT)

$$W^2 = \frac{(P_\pi^* \cdot P_\gamma^*)(P_K^* \cdot P_\gamma^*)}{(m_K m_\pi)^2}$$



$$\frac{\partial \Gamma^\pm}{\partial W} = \underbrace{\frac{\partial \Gamma_{IB}^\pm}{\partial W}}_{\text{IB}} \left[1 + \underbrace{2 \cos(\pm \phi + \delta_1^1 - \delta_0^2) m_\pi^2 m_K^2 |X_E|}_{\text{INT}} \underbrace{W^2 + m_\pi^4 m_K^4 (|X_E|^2 + |X_M|^2)}_{\text{DE}} \right]$$

Il termine di **IB** può essere calcolato dal $\text{BR}(K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0) + \text{correzioni di QED}$

Il termine di **DE** a $O(p^4)$ è divisibile in due componenti:

$X_E \rightarrow$ componente elettrica (Model Dependent)

$X_M \rightarrow$ componente magnetica, somma di 2 contributi

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Riducibile: } X_M \sim 260 \text{ GeV}^{-4} (\chi\text{PT}) \\ \text{Diretto} : \text{MD} \end{array} \right.$

Statistica e metodo di fit

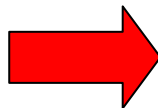
La ricostruzione punta ad identificare il gamma radiativo (probabilità di mistagging $< 10^{-3}$, uguale per le tre componenti)

Il fondo è minore dell'1% rispetto alla frazione di eventi di DE (dovuto a decadimenti $K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0 \pi^0$)

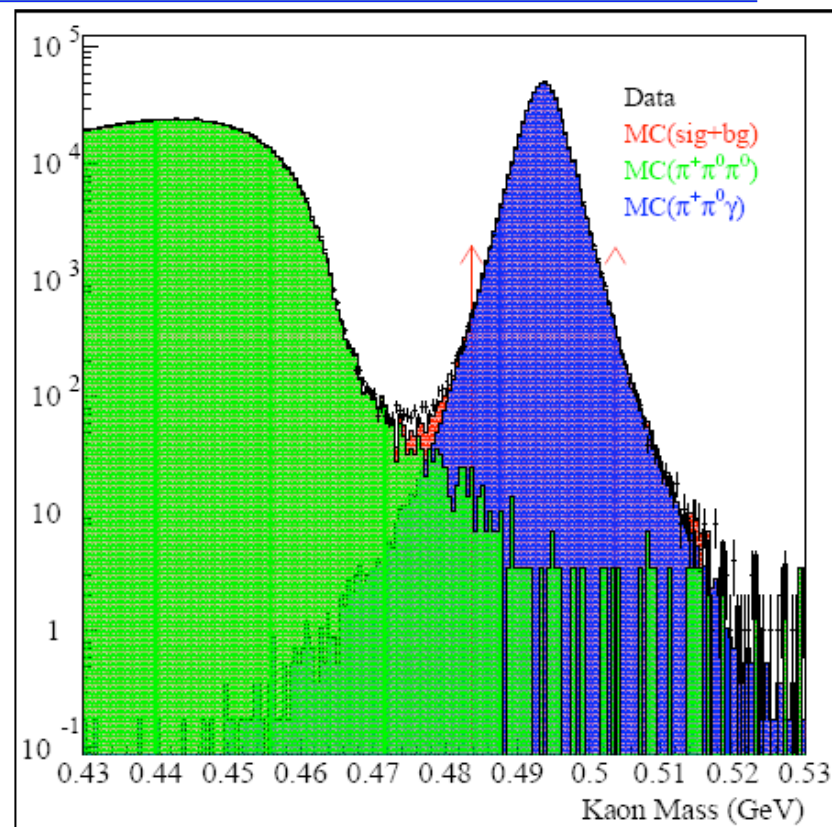
Risoluzione sulla misura di W migliore dell'1%

Statistica finale dati 2003+2004:

600K candidati $\pi^{\pm} \pi^0 \gamma$ nella regione di fit (0.2 < W < 0.9, 14 bin)



Altre condizioni: $E_{\gamma} > 5$ GeV, $T_{\pi}^{*} < 80$ MeV



2 tecniche di misura possibili per estrarre i tre termini

➤ Maximum Likelihood, in ogni bin:

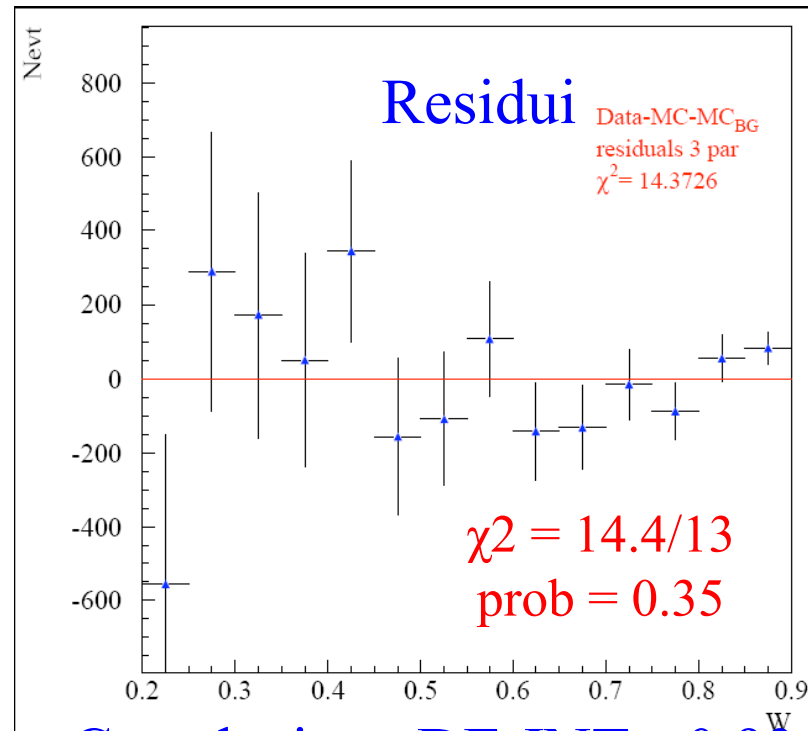
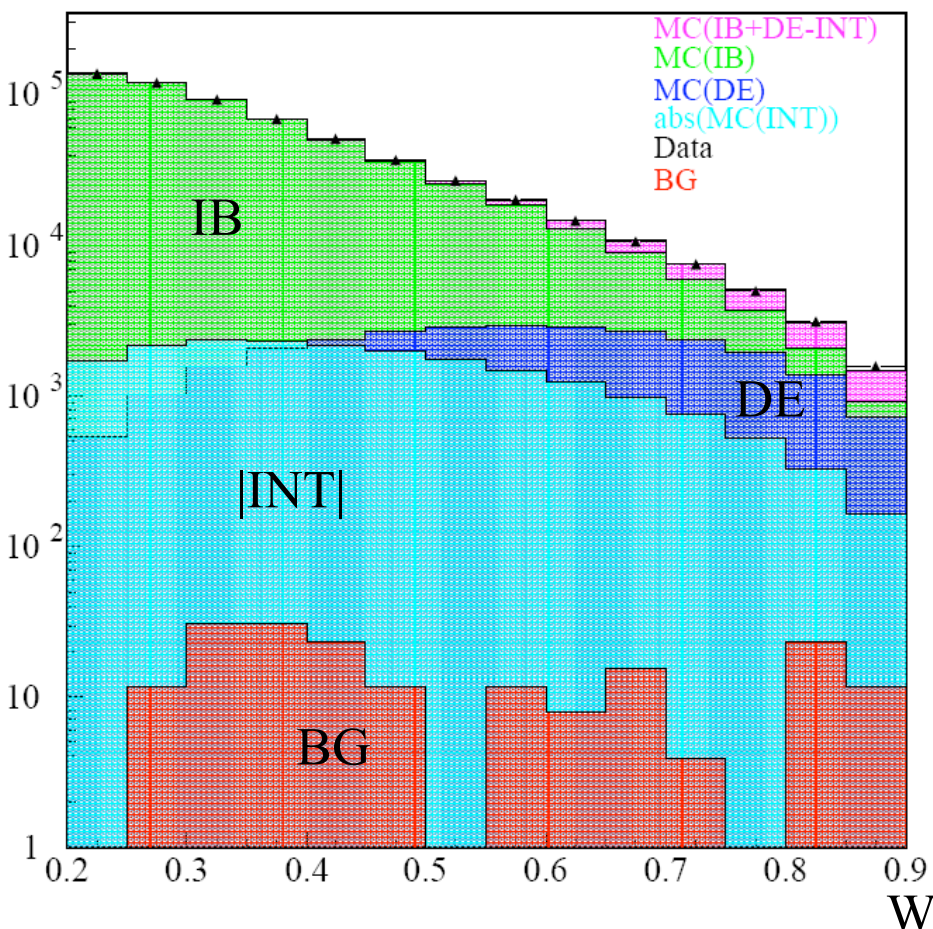
$$\text{Dati} = N_0[(1-\alpha-\beta) \cdot \text{MC}_{\text{IB}}(i) + \alpha \cdot \text{MC}_{\text{INT}}(i) + \beta \cdot \text{MC}_{\text{DE}}(i)]$$

➤ Fit polinomiale:

Fit di $W(\text{Data})/W(\text{MC}_{\text{IB}})$ con : $F = c(1 + aW^2 + bW^4)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Frac}(\text{DE}) = b \cdot 2.27 \cdot 10^{-2} \\ \text{Frac}(\text{INT}) = a \cdot 0.105 \end{array} \right.$$

Estrazione dei termini di DE e INT



Correlazione DE-INT: -0.93

New!

NA48/2 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \gamma$ risultati:

Frac(DE)_{T* π (0-80)MeV} = $(3.32 \pm 0.15_{\text{stat}} \pm 0.14_{\text{sys}}) \times 10^{-2}$

Frac(INT)_{T* π (0-80)MeV} = $(-2.35 \pm 0.35_{\text{stat}} \pm 0.39_{\text{sys}}) \times 10^{-2}$

Source	Sys. DE	Sys. INT
Acceptance	$<0.10 \times 10^{-2}$	$<0.15 \times 10^{-2}$
L1 Trigger	0.01×10^{-2}	0.03×10^{-2}
L2 Trigger	0×10^{-2}	0.30×10^{-2}
Energy scale	0.09×10^{-2}	0.21×10^{-2}
Total sys.	0.14×10^{-2}	0.39×10^{-2}

Misura delle componenti X_E e X_M

Approssimando $\varphi = 0$ e $\cos(\delta_1^1 - \delta_0^2) = \cos(6.5^\circ) \sim 1$

Si può estrarre X_E dal termine di interferenza e quindi X_M da quello di emissione diretta:

$$X_E = \frac{Frac(INT)}{2 \cdot (0.105 \cdot m_K^2 m_\pi^2)}$$

$$X_M = \sqrt{\frac{Frac(DE) - m_K^4 m_\pi^4 |X_E|^2}{2.27 \cdot 10^{-2} \cdot m_K^4 m_\pi^4}}$$

$$X_E = -24 \pm 4_{\text{stat}} \pm 4_{\text{sys}} \text{ GeV}^{-4}$$

$$X_M = 254 \pm 11_{\text{stat}} \pm 11_{\text{sys}} \text{ GeV}^{-4}$$

La parte riducibile dell'anomalia chirale satura il valore di X_M
($X_M \sim 260 \text{ GeV}^{-4}$)

Conclusioni

Dai dati raccolti negli anni 2003 e 2004,
NA48/2 ha misurato i fattori di forma del
decadimento $K^\pm \rightarrow \pi\pi e \nu$

Le ampiezze di scattering a_0 e a_2
sono state estratte



Predizione χ PT (banda gialla):

$$a_0 = 0.220 \pm 0.005$$

Per i risultati da ke4 a tutti i punti degli esperimenti è stata
applicata la correzione di isospin, i successivi fit tengono
conto del vincolo posto dalla χ PT

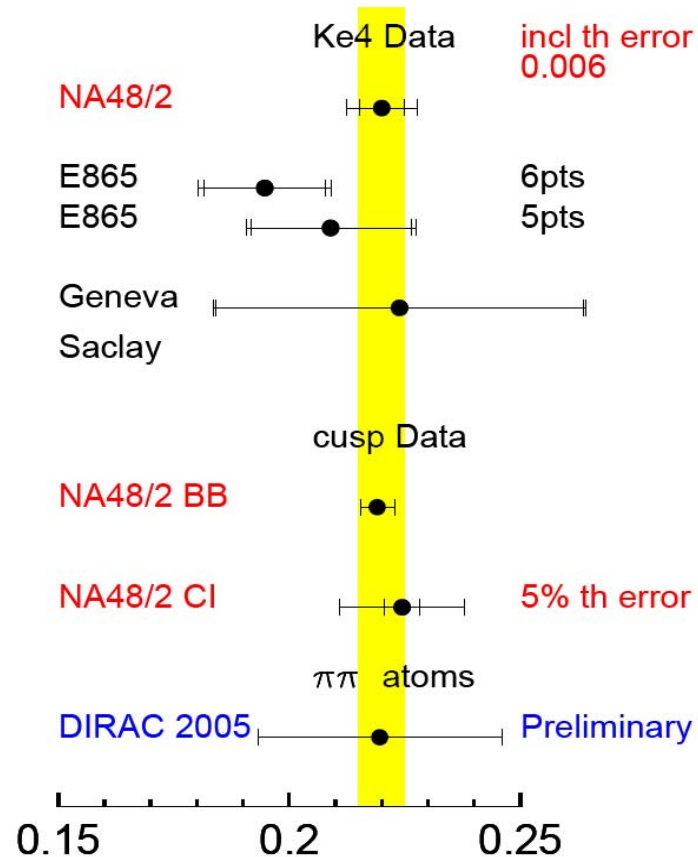
Inoltre nuovi risultati dal decadimento $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \gamma$

$$\text{Frac(DE)} = (3.32 \pm 0.15_{\text{stat}} \pm 0.14_{\text{sys}}) \times 10^{-2}$$

$$\text{Frac(INT)} = (-2.35 \pm 0.35_{\text{stat}} \pm 0.39_{\text{sys}}) \times 10^{-2}$$

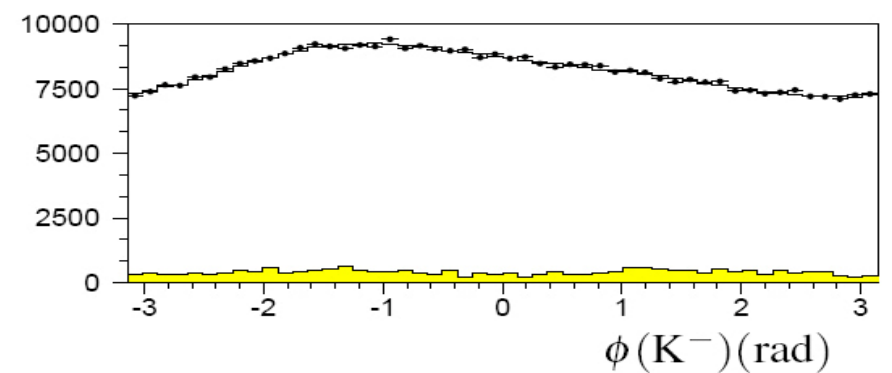
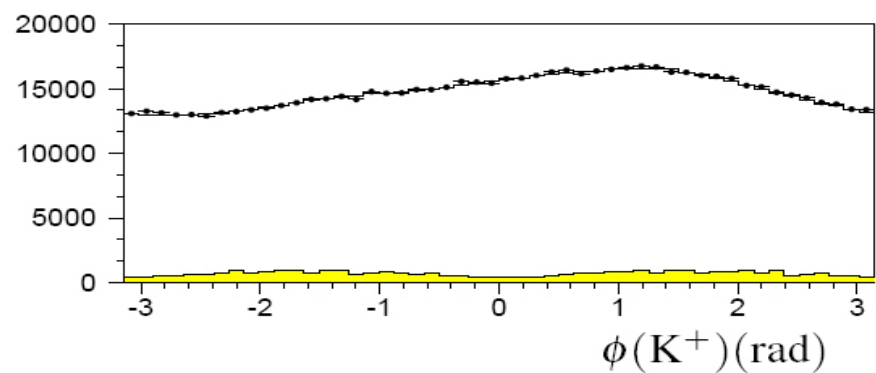
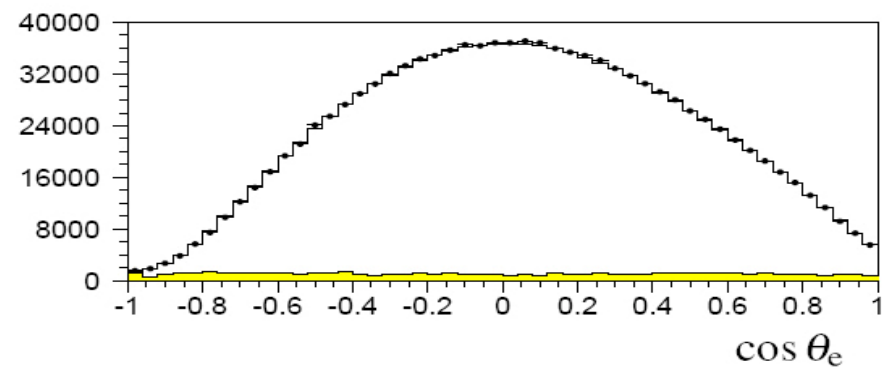
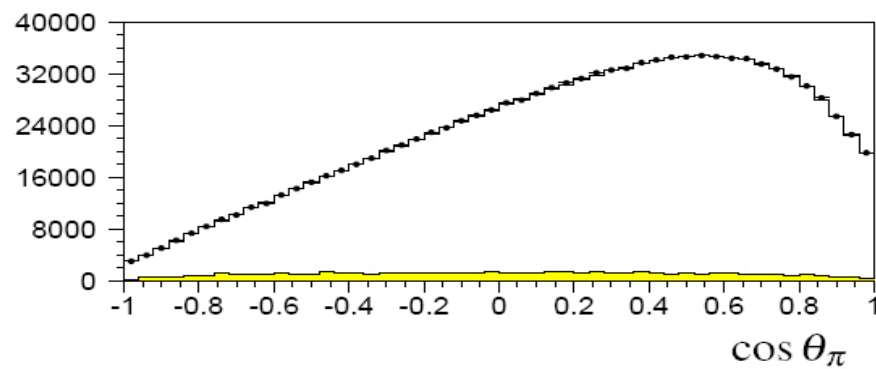
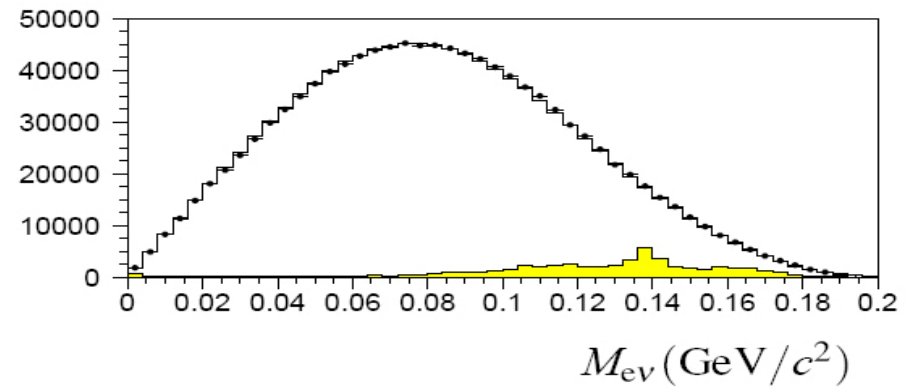
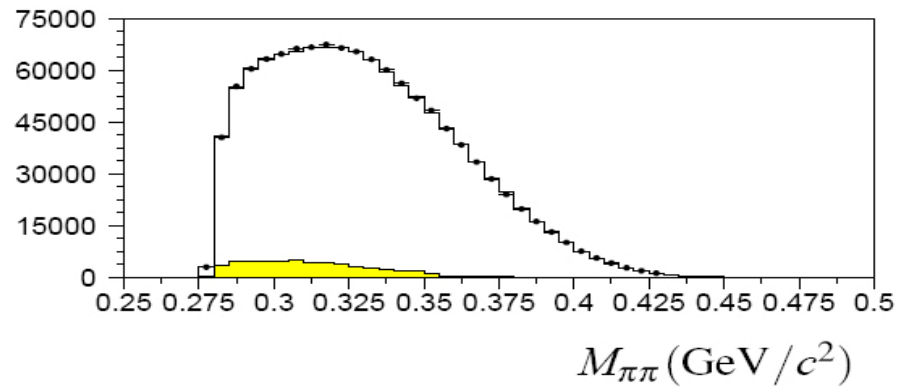
$$X_E = -24 \pm 4_{\text{stat}} \pm 4_{\text{sys}} \text{ GeV}^{-4}$$

$$X_M = 254 \pm 11_{\text{stat}} \pm 11_{\text{sys}} \text{ GeV}^{-4}$$

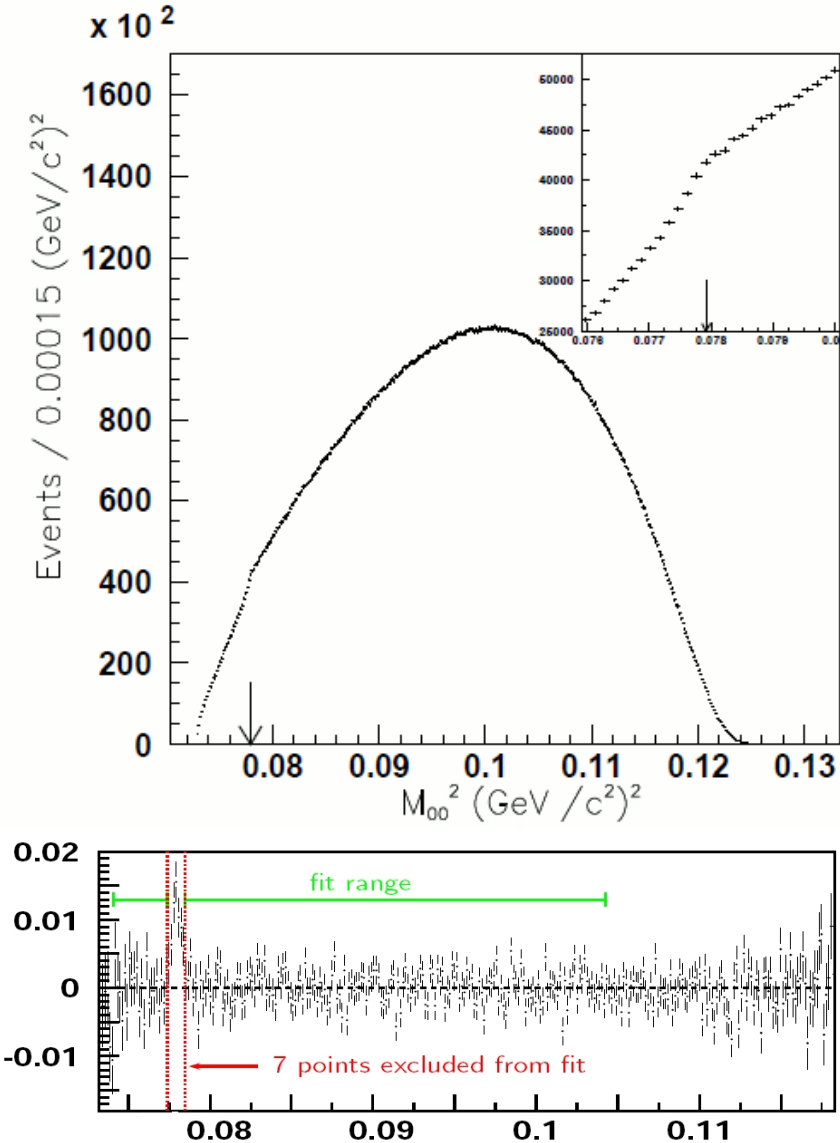


SPARES

Ke4: Variabili cinematiche



CUSP



Nel decadimento $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ evidenza di un singolarità nella massa invariante quadrata dei due pioni neutri in corrispondenza a $(2m_\pi)^2$

Dallo studio di tale fenomeno è possibile estrarre le ampiezze di scattering a_0 e a_2 (dipendenti dal modello utilizzato per il fit):

$$\text{CGKR: } a_0 - a_2 = 0.266 \pm 0.003_{\text{stat}} \pm 0.002_{\text{syst}} \pm 0.001_{\text{ext}}$$

$$\text{CI : } a_0 - a_2 = 0.268 \pm 0.003_{\text{stat}} \pm 0.002_{\text{syst}} \pm 0.001_{\text{ext}} \pm 0.013_{\text{theor}}$$