

Ultimi risultati e misure di precisione dell'esperimento NA62

Ilaria Rosa

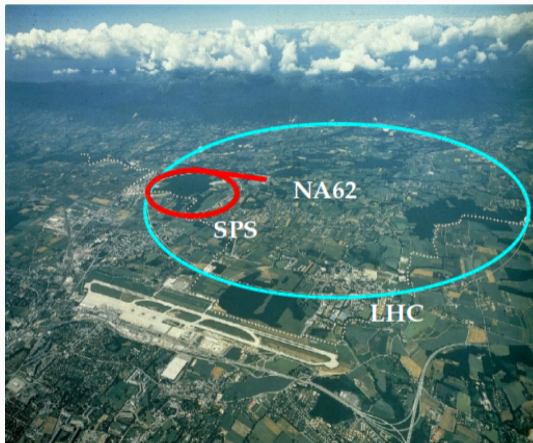
(per conto della collaborazione NA62)

13 aprile 2023

IFAE 2023 - Incontri di Fisica delle Alte Energie, Catania



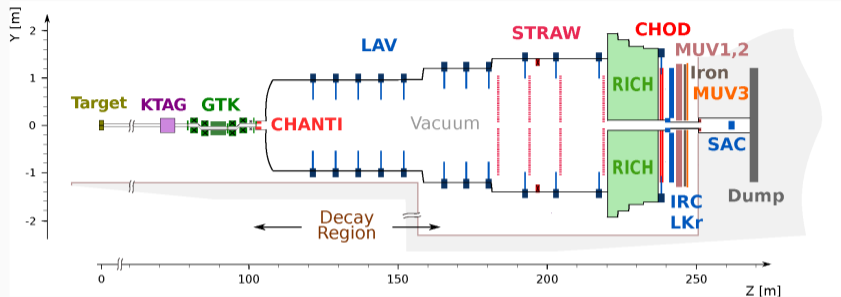
Una fabbrica di Kaoni



- fascio dall'SPS: **protoni a 400 GeV/c** su un bersaglio di Be
- **tecnica del decadimento in volo**: i kaoni ad alte energie decadono in una regione fiduciaria di ~ 60 m
- fascio secondario di adroni a 75 GeV/c (70% π , 24% p , **6% K**)

750 MHz tasso totale di particelle nel fascio secondario \longrightarrow 45 MHz di K^+

L'esperimento NA62



Tracciatore del fascio: GTK ($\sigma_p = 0.15 \text{ GeV}/c$)

ID Kaoni: KTAG ($\sigma_t = 70 \text{ ps}$)

Tracciatore a valle: STRAW (π, μ, e)

$\sigma_p/p = 0.3\% \oplus 0.005\% \cdot p[\text{GeV}/c]$

Veto fotoni: LAV, IRC, SAC

Contatore Cherenkov : RICH

Trigger e sincronizzazione: CHOD ($\sigma_t = 200 \text{ ps}$)

Calorimetro elettromagnetico: LKr

$\sigma_E/E = 4.8\%/\sqrt{E} \oplus 11\%/E \oplus 0.9\%$, $[E] = [\text{GeV}]$

Calorimetri adronici: MUV1,2

Veto muoni: MUV3 ($\sigma_t = 500 \text{ ps}$)

Un vasto programma scientifico

Fisica del sapore

Test della robustezza delle predizioni del SM attraverso **processi FCNC**

Main goal

misura della frazione di decadimento del

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$$

(JHEP 06 (2021) 093)

Misure di precisione di decadimenti rari e proibiti

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma \\ K^+ &\rightarrow l_1^+ \nu l_2^+ l_2^- \\ K^+ &\rightarrow \pi^- \mu^+ \mu^+ \\ K^+ &\rightarrow \pi^- e^+ e^+ \\ K^+ &\rightarrow \pi^+ \gamma \gamma \\ K^+ &\rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^- \end{aligned}$$

Settore nascosto

Ricerca di **processi esotici** attraverso rivelazione diretta di particelle debolmente interagenti con lunga vita media

DP, HNL, DS, ALPs

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma \\ K^+ &\rightarrow l_1^+ \nu N \\ N &\rightarrow \pi^\pm l^\mp \\ K^+ &\rightarrow \pi^- e^+ e^+ \\ A' &\rightarrow l^+ l^- \end{aligned}$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: cornice teorica

- ◇ **Transizione FCNC** descritta nel contesto della ChPT
- ◇ Contributi dominanti mediati dallo **scambio di un fotone virtuale** γ^* (Nucl. Phys. B291 (1987) 692–719, Phys. Part. Nucl. Lett. 5 (2008) 76–84)
- ◇ Effetti adronici a lunga distanza racchiusi in un **fattore di forma vettoriale** (JHEP 08 (1998) 004)

$$\mathbf{W}(z) = G_F m_K^2 (\mathbf{a}_+ + \mathbf{b}_+ z) + W^{\pi\pi}(z)$$

$$z = \frac{m_{\mu^+\mu^-}^2}{M_K^2}$$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: cornice teorica

- ◇ **Transizione FCNC** descritta nel contesto della ChPT
- ◇ Contributi dominanti mediati dallo **scambio di un fotone virtuale** γ^* (Nucl. Phys. B291 (1987) 692–719, Phys. Part. Nucl. Lett. 5 (2008) 76–84)
- ◇ Effetti adronici a lunga distanza racchiusi in un **fattore di forma vettoriale** (JHEP 08 (1998) 004)

$$\mathbf{W}(z) = G_F m_K^2 (\mathbf{a}_+ + \mathbf{b}_+ z) + W^{\pi\pi}(z)$$

$$z = \frac{m_{\mu^+\mu^-}^2}{M_K^2}$$

- ▷ Banco di prova della **LFU** insieme al $K_{\pi ee}$ (J. Phys. Conf. Ser. 800 (2017) 1, 012014)
- ▷ Asimmetrie nelle distribuzioni angolari potrebbero evidenziare contributi di **Nuova Fisica** (Phys. Rev. D 67 (2003) 074029, Phys. Rev. D 69 (2004) 094030)

$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: selezione di segnale

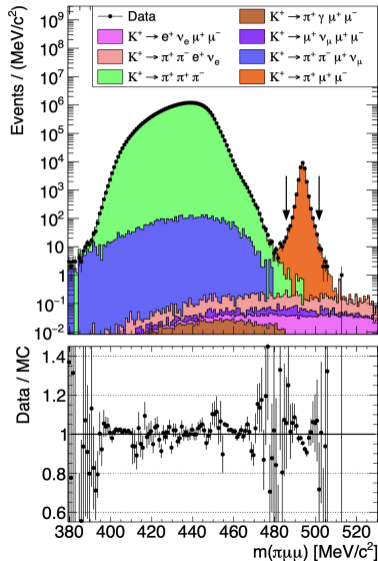
Normalizzazione $K_{3\pi}$

- campione abbondante e BR noto con alta precisione
- riduzione delle incertezze sistematiche

Selezione di segnale

- topologia vertice a tre tracce cariche
- tagli cinematici per ridurre eventi di fondo $K_{3\pi}$
- massimizzazione dei tagli comuni

Regione di segnale $|m(\pi\mu\mu) - m_K| < 8 \text{ GeV}/c^2$
27679 eventi (~ 8 eventi di fondo)



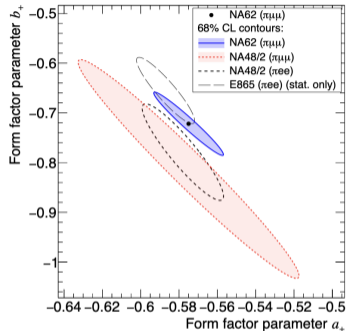
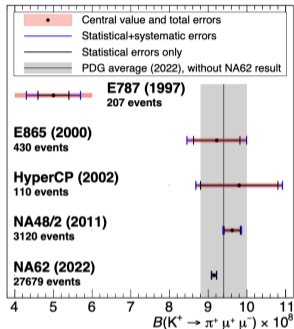
$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: risultati

$$BR_{\pi\mu\mu} = (9.15 \pm 0.08) \times 10^{-8}$$

$$a_+ = -0.575 \pm 0.013$$

$$b_+ = -0.722 \pm 0.043$$

(JHEP 011 (2022) 011)



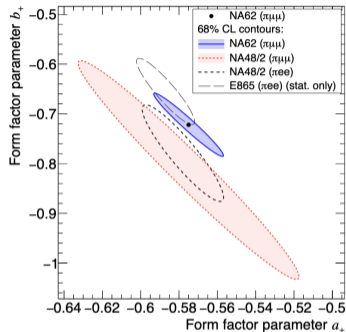
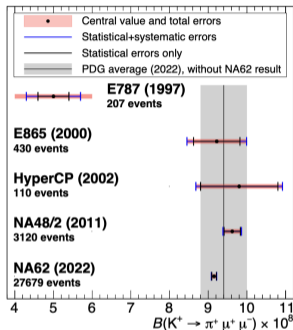
$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: risultati

$$BR_{\pi\mu\mu} = (9.15 \pm 0.08) \times 10^{-8}$$

$$a_+ = -0.575 \pm 0.013$$

$$b_+ = -0.722 \pm 0.043$$

(JHEP 011 (2022) 011)



- ▷ BR consistente con le misure precedenti con un miglioramento di un **fattore 3** (statistica del campione → fattore limitante)
- ▷ Introduzione di nuove **correzioni radiative** e parametri teorici differenti
- ▷ **BR($K_{3\pi}$)** differente rispetto a NA48/2
- ▷ Accordo tra misure in modalità elettronica → nessuna tensione nella **LFU** osservata

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma$$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma$: introduzione

- ▷ Le variabili cinematiche standard per il decadimento $K_{\pi\gamma\gamma}$ sono:

$$z = m_{\gamma\gamma}^2 / M_K^2$$

$$y = p_K (p_{\gamma 1} - p_{\gamma 2}) / M_K^2$$

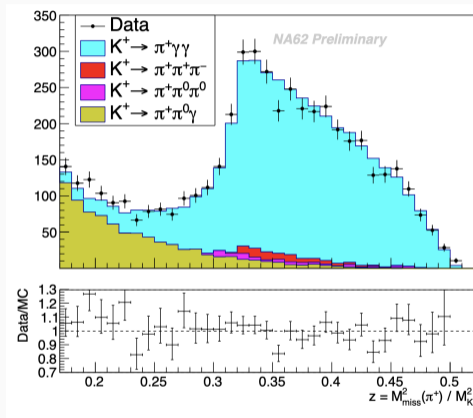
- Decadimento radiativo non leptónico come **test della ChPT** (Phys. Lett. B 386 (1996) 403)
- Tasso di decadimento e spettro parametrizzati attraverso un **parametro reale \hat{c}**
 - ◇ dipendenza da numerosi parametri esterni fissati in questa analisi
- Permette ricerche di **particelle assioniche** nella catena di decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ X, X \rightarrow \gamma\gamma$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$: segnale e fondo

Selezione

- topologia evento ad **una traccia carica** (CDA, χ^2 , posizione vertice)
- taglio cinematico personalizzato su **z**
- **taglio ellittico** su E e $m_{\pi\gamma\gamma} - M_K$
- **fondo** dal $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ e $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$

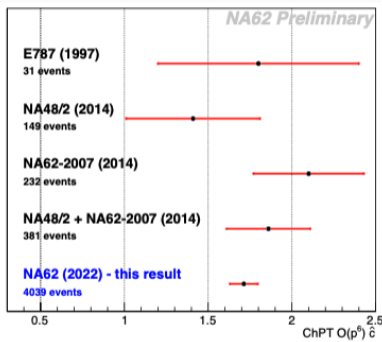
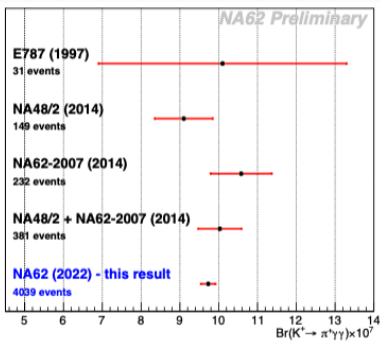
4039 candidati nella regione di segnale ($z > 0.25$) e **393 ± 20** eventi di fondo



$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma$: risultati

$$\mathcal{B}(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma) = (9.73 \pm 0.19) \times 10^{-7}$$

$$\hat{c} = 1.713 \pm 0.084$$



- ▷ precisione del risultato preliminare NA62 $K_{\pi\gamma\gamma}$ migliorata di un **fattore 3** rispetto a NA48/2+NA62-2007
- ▷ **risultati finali** che includono i parametri esterni aggiornati verranno pubblicati presto

Settore oscuro

$$\mathcal{L} \propto -\epsilon \frac{1}{2\cos\theta_W} F'_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$

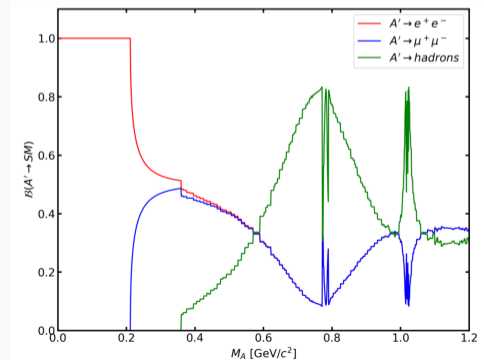
- ◇ **simmetria di gauge U(1)** addizionale
- ◇ campo mediatore vettoriale A'
- ◇ costante di accoppiamento ϵ

$$\mathcal{L} \propto -\epsilon \frac{1}{2\cos\theta_W} F'_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$

NA62 in “beam dump”

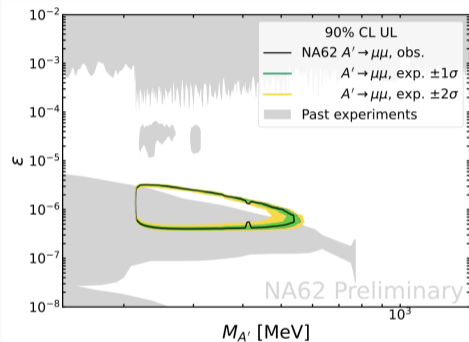
- ▷ rimozione del bersaglio di Be
- ▷ configurazione non ordinaria delle TAX
- ▷ due bersagli di Fe e Cu
- ▷ solo nel 2021 $(1.40 \pm 0.28) \times 10^{17}$ PoT

- ◇ **simmetria di gauge U(1)** addizionale
- ◇ campo mediatore vettoriale **A'**
- ◇ costante di accoppiamento **ϵ**



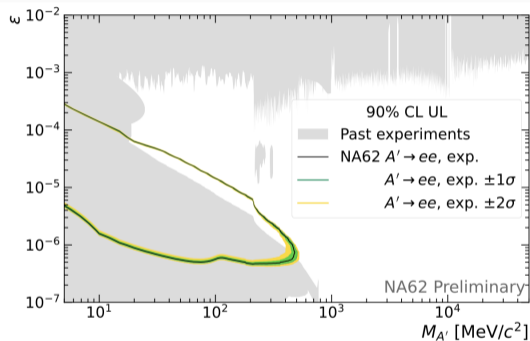
Decadimenti leptonici $A' \rightarrow l^+ l^-$

Regioni escluse al 90% di C.L. nello spazio dei parametri ϵ , $M_{A'}$



$$A' \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

1 evento osservato nella SR esperimento di conteggio con 2.4σ di significanza globale



$$A' \rightarrow e^+ e^-$$

0 eventi osservati nella SR

Misure di precisione

- ◇ $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ (risultato finale) JHEP11(2022)011
- ◇ $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ (preliminare) Talk a KAON 2022

Ricerche nel settore oscuro

- ◇ $A' \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (preliminare) arXiv:2303:08666
- ◇ $A' \rightarrow e^+ e^-$ (preliminare) Talk a La Thuile 2023

Rimanete sintonizzati per più risultati da NA62

Spares

$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: interpretazione dei dati

La larghezza di decadimento differenziale può essere espressa in termini di una variabile cinematica z

$$\frac{d\Gamma(z)}{dz} = g(z) \cdot |W(z)|^2 + \frac{d\Gamma_{4\text{-corpi}}(z)}{dz}$$

- la funzione g descrive la cinematica del decadimento e include effetti elettromagnetici NLO in termini di correzioni radiative
- separazione dello spazio delle fasi a 4-corpi e 3-corpi attraverso un taglio cinematico sulla variabile $(p_\pi + p_\gamma)^2 - m_\pi^2 > 100 \text{ MeV}^2/c^4$
- in questa analisi la parte di decadimento a quattro corpi viene approssimata da una funzione triviale nel fattore di forma

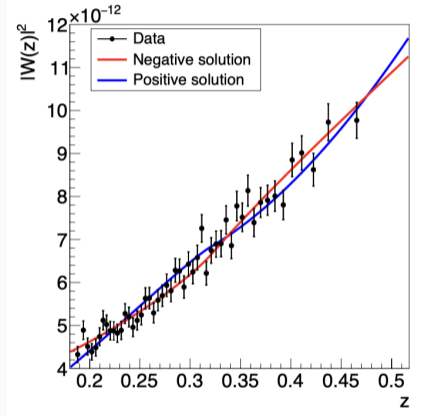
$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: $BR(K_{\pi\mu\mu})$ e misura del fattore di forma

Misura indipendente dal modello di $BR(K_{\pi\mu\mu})$

- ricostruzione di $d\Gamma/dz$ dallo spettro misurato di z
- integrazione dello spettro per ottenere il BR

Misura del fattore di forma

- estratto a partire dalla $|W(z)|^2$ contenuta in $d\Gamma/dz$
- parametri a_+ e b_+ ottenuti minimizzando $\chi^2(a_+, b_+)$
- la soluzione positiva dalla minimizzazione del χ^2 è sfavorita dalla teoria e non viene presa in considerazione



$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: asimmetria forward-backward

Definizioni

- Angolo $\theta_{K\mu}$ tra i trimpulsi del K^+ e μ^- nel sistema in cui la coppia $\mu^+ \mu^-$ è a riposo

- L'asimmetria backward-forward

$$A_{FB} = \frac{\mathcal{N}(\cos \theta_{K\mu} > 0) + \mathcal{N}(\cos \theta_{K\mu} < 0)}{\mathcal{N}(\cos \theta_{K\mu} > 0) - \mathcal{N}(\cos \theta_{K\mu} < 0)}$$

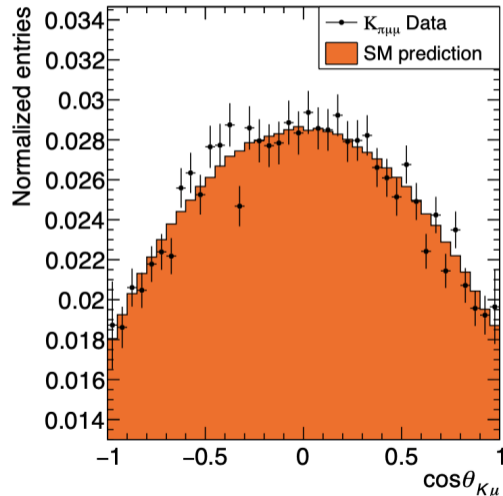
Definizioni

- misura al 68% CL

$$A_{FB} = (0.0 \pm 0.7) \times 10^{-2}$$

- limite superiore al 90% CL:

$$|A_{FB}| < 0.9 \times 10^{-2}$$



$K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$: parametrizzazione ChPT e fitting

Il rate di decadimento differenziale può essere parametrizzato in termini di un parametro incognito \hat{c}

$$\frac{d^2\Gamma}{dydz}(\hat{c}, y, z) = \frac{m_K}{2^9 \pi^3} \left[z^2 (|A(\hat{c}, z, y^2) + B(z)|^2 + |C(z)|^2) + \left(y^2 - \frac{1}{4} \lambda(1, r_\pi^2, z) \right)^2 |B(z)|^2 \right]$$

Procedura

- Trovare il valore di \hat{c} ottimale massimizzando la log-likelihood

$$\ln \mathcal{L} = \sum_i (k_i \ln \lambda_i(\hat{c}) - \lambda_i(\hat{c}) - \ln(k_i!))$$