



Recent kaon results at NA62

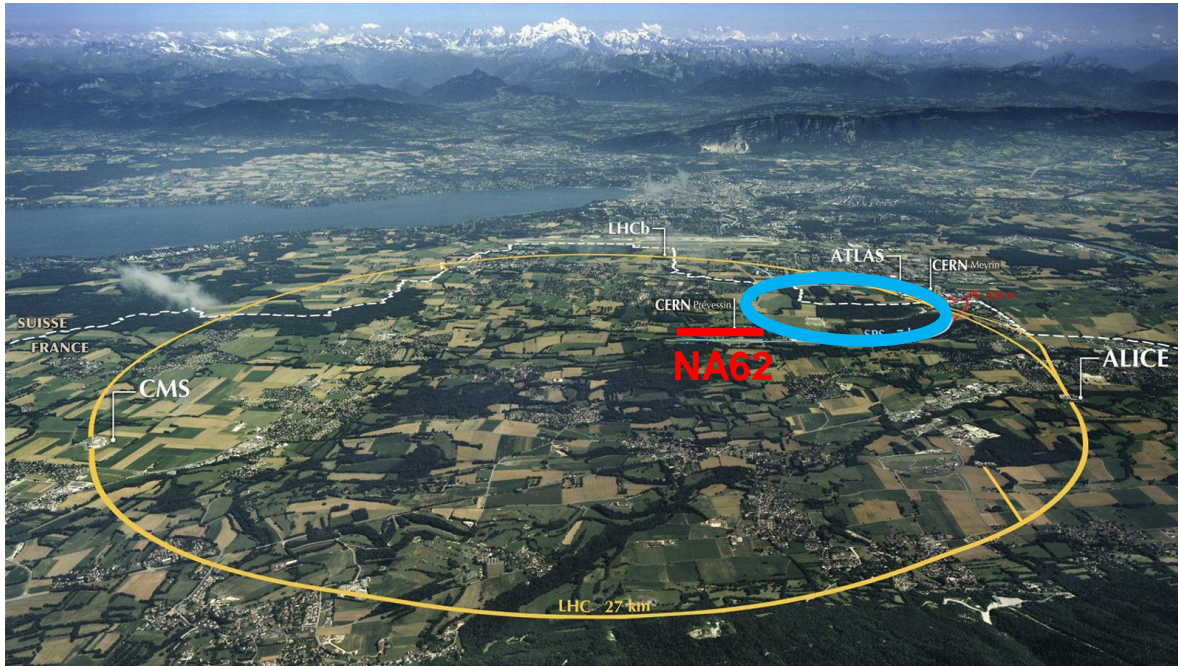
Michele Corvino, CERN

michele.corvino@cern.ch

107° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, 13/09/2021

L'esperimento NA62 al CERN

- Esperimento a bersaglio fisso
- Decadimento in volo dei K
- **Obiettivo principale:** misura di $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ con precisione del 10%



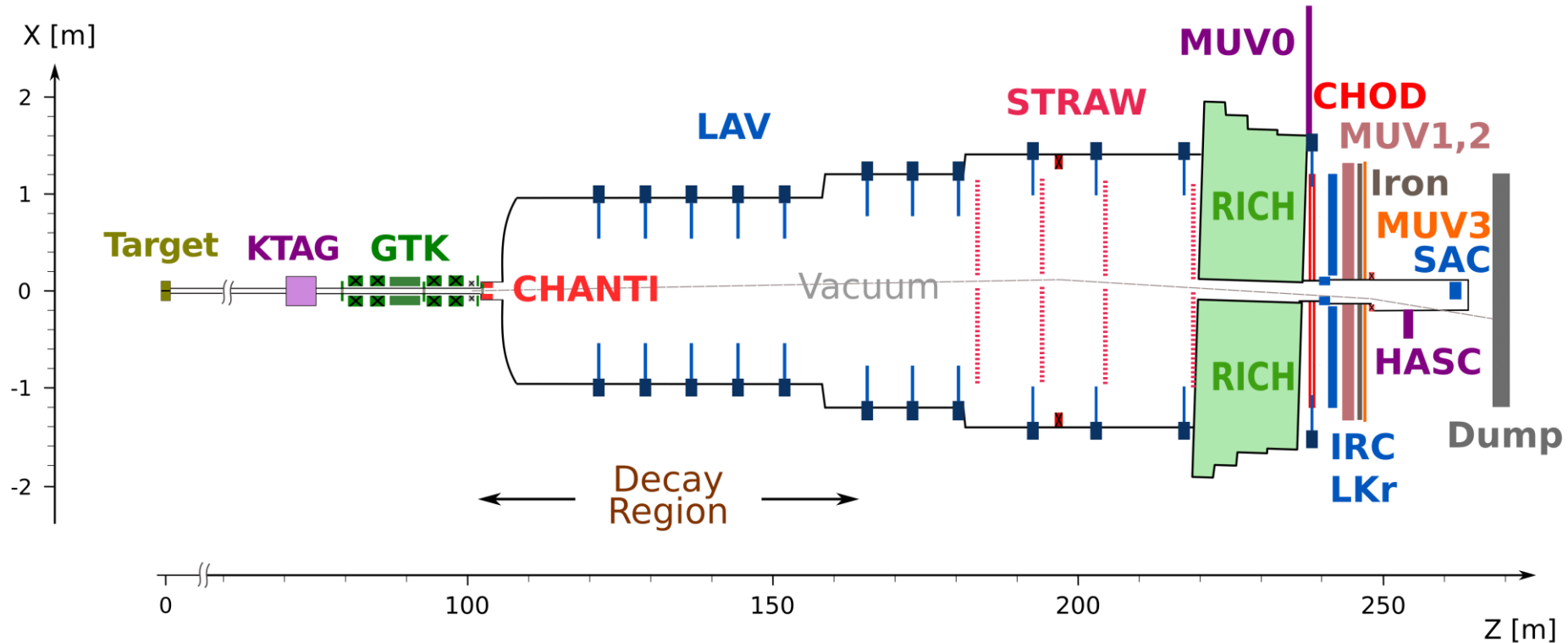
Fascio primario di protoni dal SPS (400 GeV/c)

Fascio secondario (75 GeV/c, 800 MHz)

- **Pioni (70%)**
- **Protoni (23%)**
- **K (6%)**
- **Muoni (0.7%)**

2.2×10^{18} POT raccolti nel Run1 (2016-2018), presa dati ricominciata a luglio 2021

Apparato sperimentale di NA62



Programma di fisica di NA62

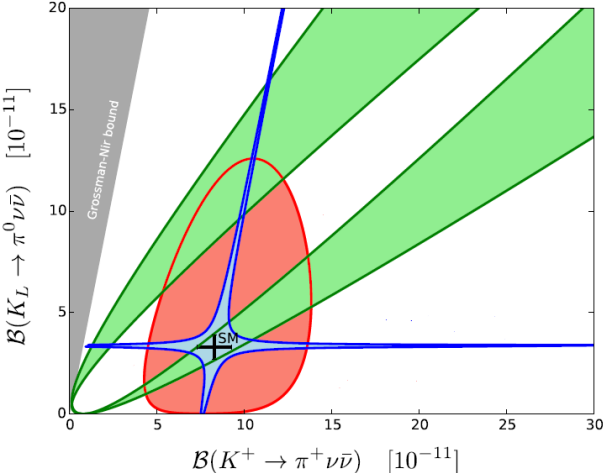
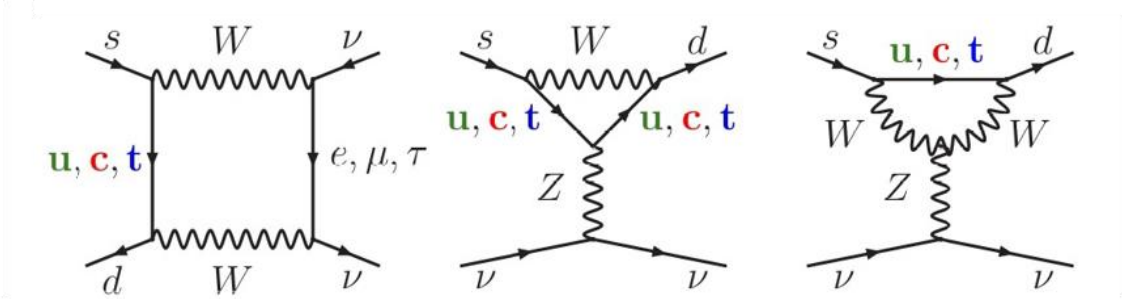
In questa presentazione:

- Misura di $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$
- Misura di $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)$
- Ricerca di Heavy Neutral Leptons (HNLs)
- Ricerca di violazione del numero leptonico

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

I decadimenti $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ (carico e neutro) sono soppressi nel Modello Standard (MS), ma la previsione teorica è molto precisa

$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}$
 [Buras et al. , JHEP 1511 (2015)]:

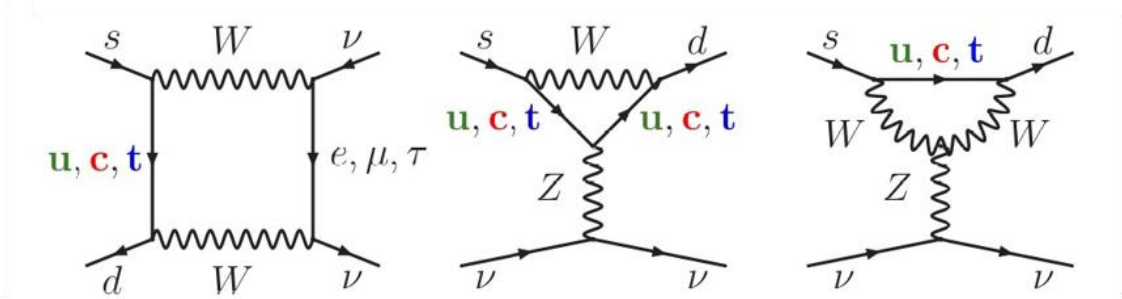


La loro misura può permettere di discriminare tra diversi scenari di fisica oltre il MS

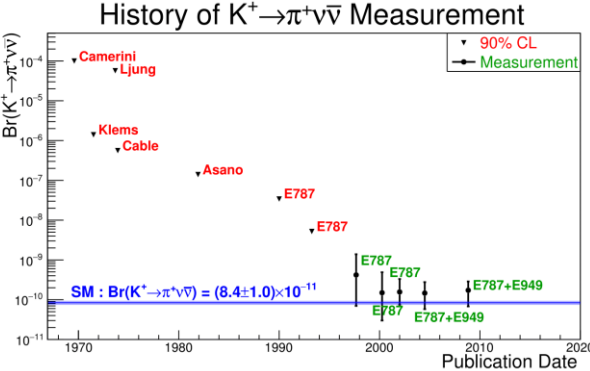
- Randall-Sundrum
- Littlest Higgs with T parity
- Minimal Flavour Violation

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

I decadimenti $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ (carico e neutro) sono soppressi nel Modello Standard (MS), ma la previsione teorica è molto precisa



$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}$
 [Buras et al. , JHEP 1511 (2015)]



Misura di E787/E949 con 7 candidati di segnale e K a riposo:

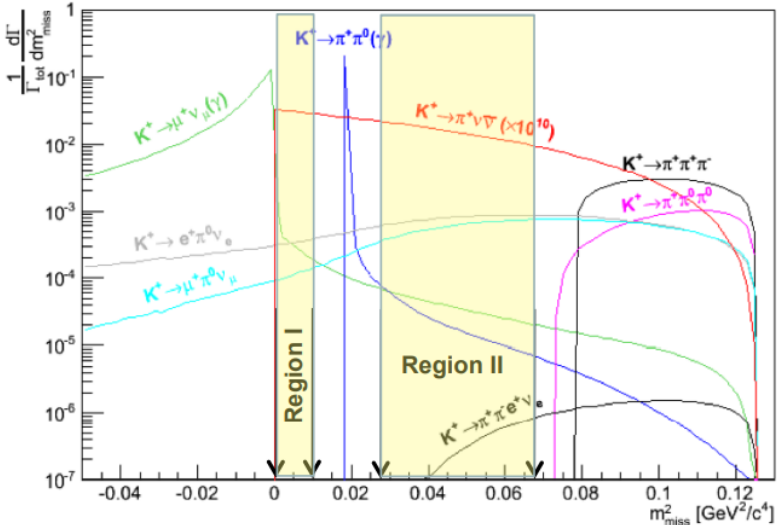
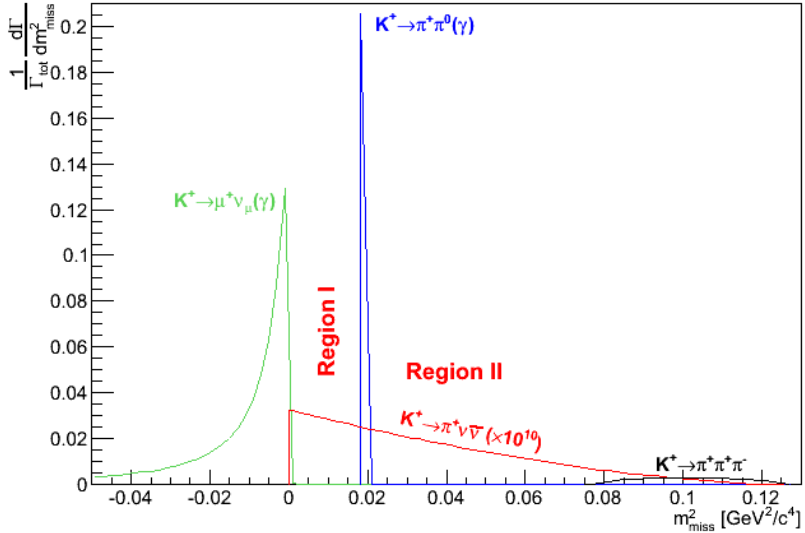
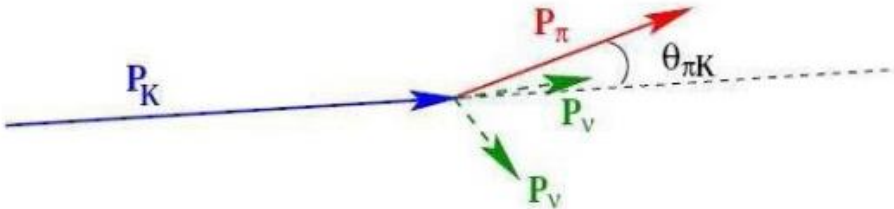
$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (1.73^{+1.15}_{-1.05}) \times 10^{-10}$

[Phys. Rev. D 79, 092004 (2009)]

Strategia sperimentale

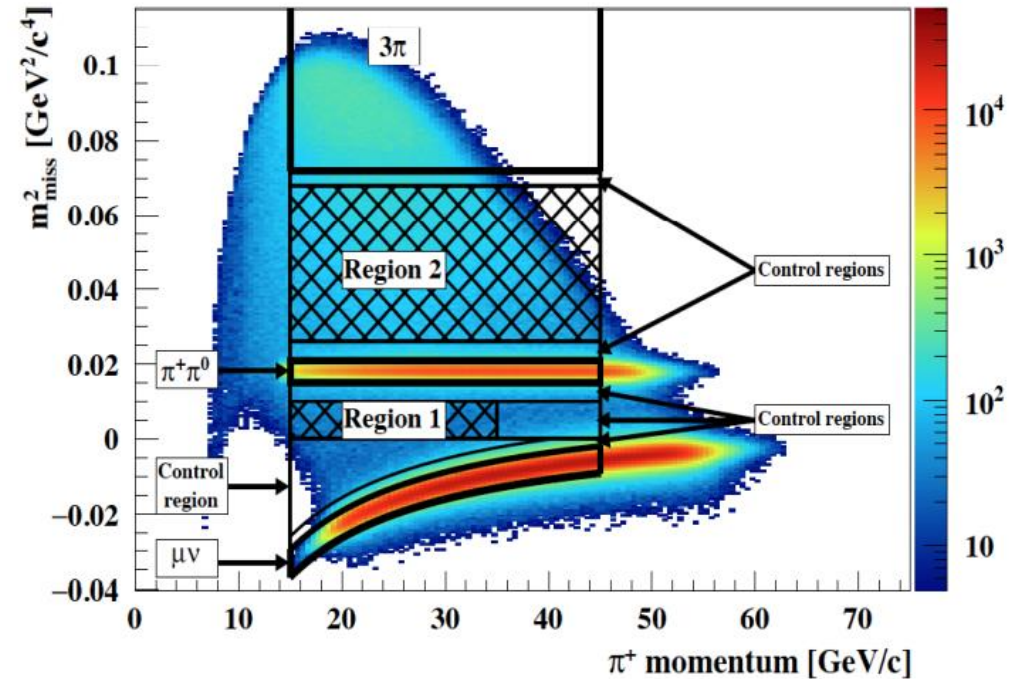
Principale variabile cinematica:

$$m_{miss}^2 = (P_K - P_\pi)^\mu (P_K - P_\pi)_\mu$$



Selezione del segnale

- Ricostruzione del π^+ e associazione con K
 - $\sigma_T^{KTAG,RICH,GTK} \sim 70 \text{ ps}$
- Ricostruzione del vertice di decadimento
- Identificazione del π^+ : **RICH (Calorimetri)**
 - $\epsilon(\pi) \approx 0.85$ (0.82)
 - $\epsilon_{mistag}(\mu \rightarrow \pi) \approx 3 \times 10^{-3}$ (10^{-5})
- Reiezione dei fotoni
 - $\epsilon(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 2 \times 10^{-8}$
- Reiezione di eventi multitraccia
- Vincoli sulla cinematica
 - $\sigma_{m_{miss}^2} = 10^{-3} \text{ GeV}^2/c^4$



Principali fondi

Decadimenti del K

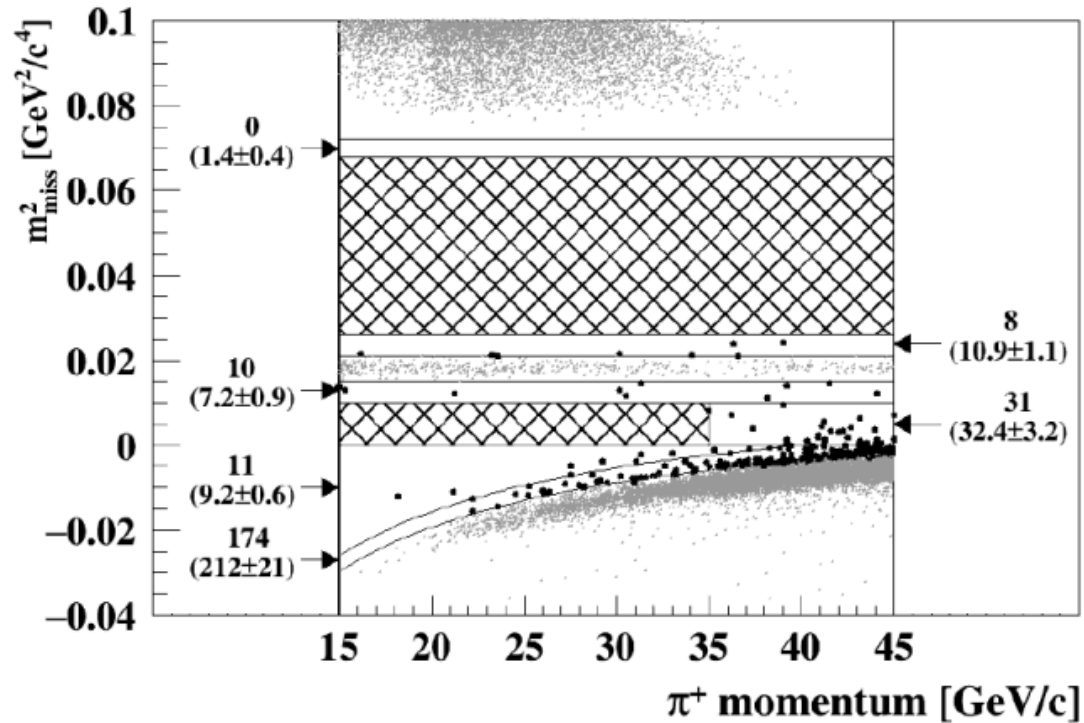
- $BR(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu) = 63.5\%$
- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0) = 20.7\%$
- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-) = 5.6\%$
- ...

Upstream background:

- **Interazione del fascio con GTK**
- **Decadimenti prima dell'inizio della regione fiduciale**
- **Nuovo collimatore per ridurre questo fondo**

Fondo	S1 (old col)	S2 (new col)
$\pi^+ \pi^0$	0.23 ± 0.02	0.23 ± 0.02
$\mu^+ \nu$	0.19 ± 0.06	0.45 ± 0.06
$\pi^+ \pi^- e^+ \nu$	0.10 ± 0.03	0.41 ± 0.10
$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	0.05 ± 0.02	0.17 ± 0.08
$\pi^+ \gamma \gamma$	< 0.01	< 0.01
$\pi^0 l^+ \nu$	< 0.001	< 0.001
Upstream	$0.54^{+0.39}_{-0.21}$	$2.76^{+0.91}_{-0.70}$
Totale	$1.11^{+0.40}_{-0.22}$	$4.31^{+0.91}_{-0.72}$

Principali fondi



Fondo	S1 (old col)	S2 (new col)
$\pi^+\pi^0$	0.23 ± 0.02	0.23 ± 0.02
$\mu^+\nu$	0.19 ± 0.06	0.45 ± 0.06
$\pi^+\pi^-\nu$	0.10 ± 0.03	0.41 ± 0.10
$\pi^+\pi^+\pi^-$	0.05 ± 0.02	0.17 ± 0.08
$\pi^+\gamma\gamma$	< 0.01	< 0.01
$\pi^0 l^+\nu$	< 0.001	< 0.001
Upstream	$0.54^{+0.39}_{-0.21}$	$2.76^{+0.91}_{-0.70}$
Totale	$1.11^{+0.40}_{-0.22}$	$4.31^{+0.91}_{-0.72}$

Risultati

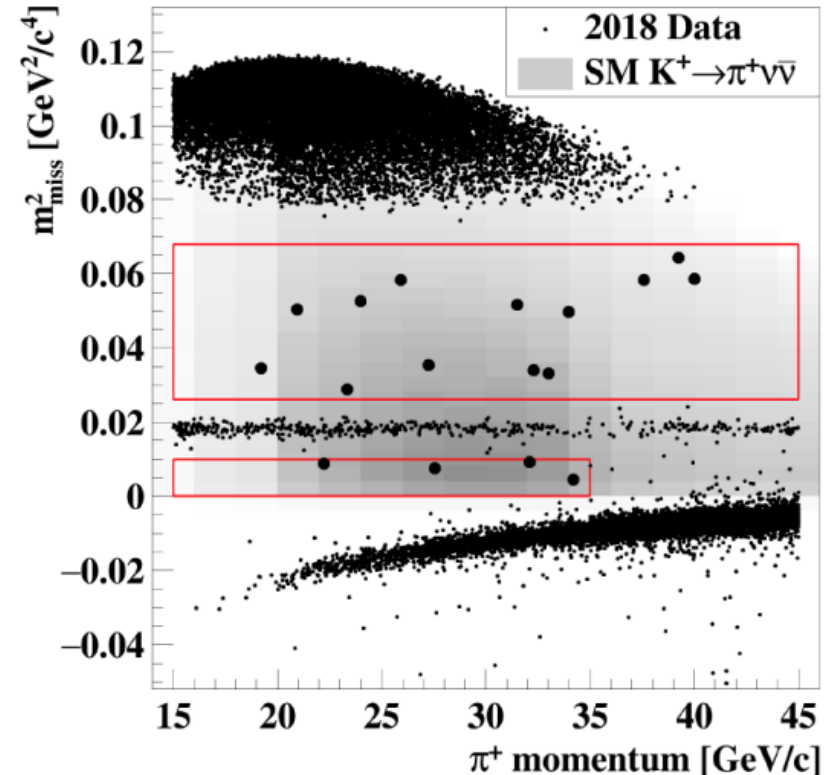
20 eventi osservati in R1+R2

$$N_{\pi\nu\nu}^{exp} = 10.01 \pm 0.42_{sys} \pm 1.19_{ext}$$
$$N_{bkg}^{exp} = 7.03^{+1.05}_{-0.82}$$

Significatività: 3.6σ

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6^{+4.0}_{-3.4} \Big|_{stat} \pm 0.9_{sys}) \times 10^{-11}$$

Misura più precisa di $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ finora



Misura di $BR(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma)$

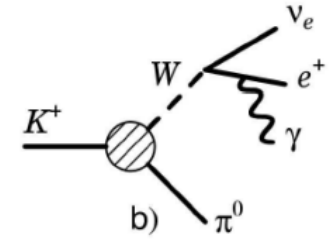
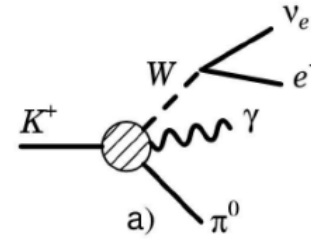
Processo descritto da DE (a) + IB (b) + INT

$$R_j = \frac{B(K_{e3\gamma}^j)}{B(K_{e3})}$$

$$R_1: E_\gamma^* > 10 \text{ MeV}, \theta_{e,\gamma}^* > 10^\circ$$

$$R_2: E_\gamma^* > 30 \text{ MeV}, \theta_{e,\gamma}^* > 20^\circ$$

$$R_3: E_\gamma^* > 10 \text{ MeV}, \\ 0.6 < \cos\theta_{e,\gamma}^* < 0.9$$



Osservabile dispari sotto trasformazione di T

$$\xi = \frac{\vec{p}_\gamma \cdot (\vec{p}_e \times \vec{p}_\pi)}{m_K^3}$$

$$A_\xi = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}$$

$$A_\xi^{theory} < 10^{-4}$$

$$A_\xi^{ISTRA+}(R_3) = (1.5 \pm 2.1) \times 10^{-2}$$

	ChPT	ISTRA+	OKA
$R_1(\times 10^2)$	1.804 ± 0.021	$1.81 \pm 0.03 \pm 0.07$	$1.990 \pm 0.017 \pm 0.021$
$R_2(\times 10^2)$	0.640 ± 0.008	$0.63 \pm 0.02 \pm 0.03$	$0.587 \pm 0.010 \pm 0.015$
$R_3(\times 10^2)$	0.559 ± 0.006	$0.47 \pm 0.02 \pm 0.03$	$0.532 \pm 0.010 \pm 0.012$

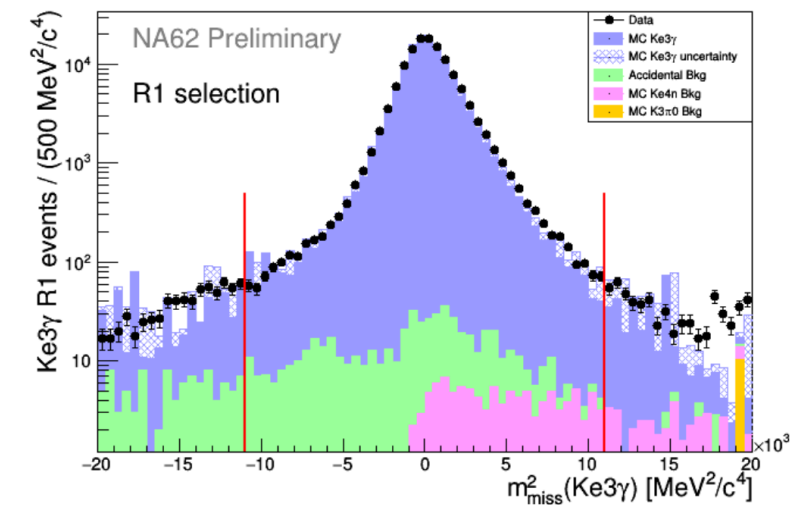
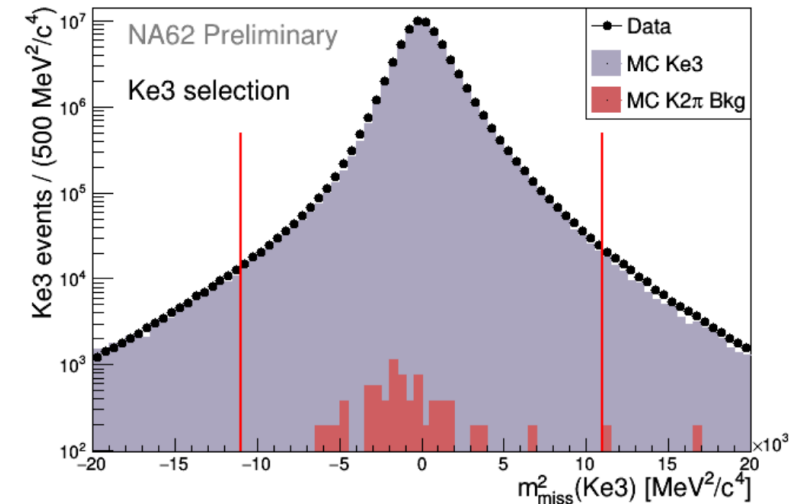
Selezione

Campione: 2017+2018

Normalizzazione: K_{e3}

- Traccia identificata come e^+ da RICH e LKr
- π^0 ricostruito con due fotoni nel LKr, fotone radiativo isolato nel LKr
- No extra attività in tempo nel sistema di veto per fotoni e muoni
- Associazione con K nello stato iniziale (KTAG e GTK)
- Selezione cinematica in $m_{miss}^2(K_{e3\gamma})$ e $m_{miss}^2(K_{e3})$

Validazione della stima del fondo in regioni di controllo

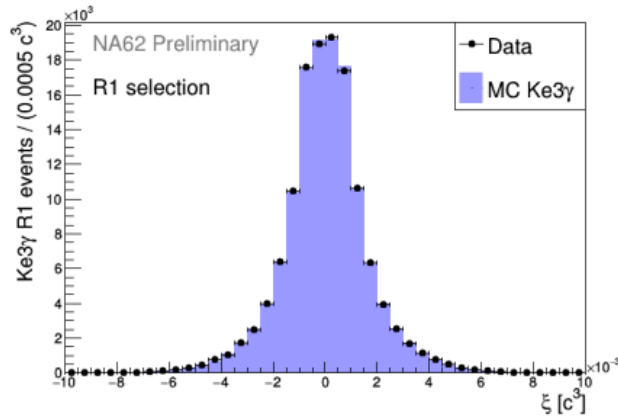


Risultati

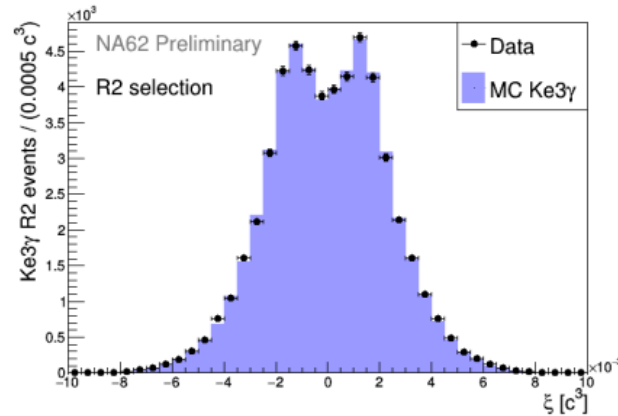
	ChPT	ISTRA+	OKA	NA62 preliminary
$R_1(\times 10^2)$	1.804 ± 0.021	$1.81 \pm 0.03 \pm 0.07$	$1.990 \pm 0.017 \pm 0.021$	$1.684 \pm 0.05 \pm 0.010$
$R_2(\times 10^2)$	0.640 ± 0.008	$0.63 \pm 0.02 \pm 0.03$	$0.587 \pm 0.010 \pm 0.015$	$0.599 \pm 0.003 \pm 0.005$
$R_3(\times 10^2)$	0.559 ± 0.006	$0.47 \pm 0.02 \pm 0.03$	$0.532 \pm 0.010 \pm 0.012$	$0.523 \pm 0.003 \pm 0.003$

Precisione: $\leq 1\%$

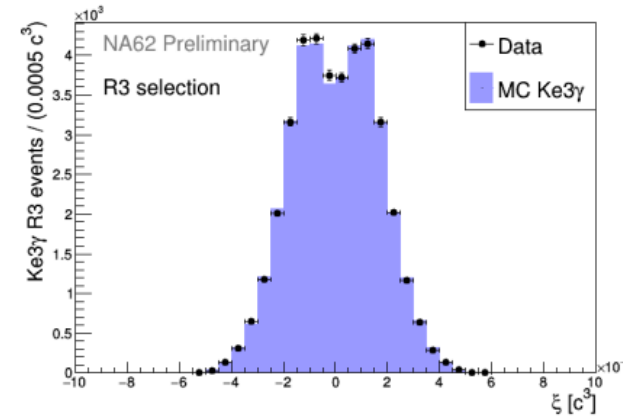
Miglioramento di un fattore 2 - 3.6



$$A_{\xi}^{R1} = (-0.1 \pm 0.3_{stat} \pm 0.2_{MC}) \times 10^2$$



$$A_{\xi}^{R2} = (-0.3 \pm 0.4_{stat} \pm 0.3_{MC}) \times 10^2$$



$$A_{\xi}^{R3} = (-0.9 \pm 0.5_{stat} \pm 0.4_{MC}) \times 10^2$$

Prima misura di A_{ξ} in R1 e R2

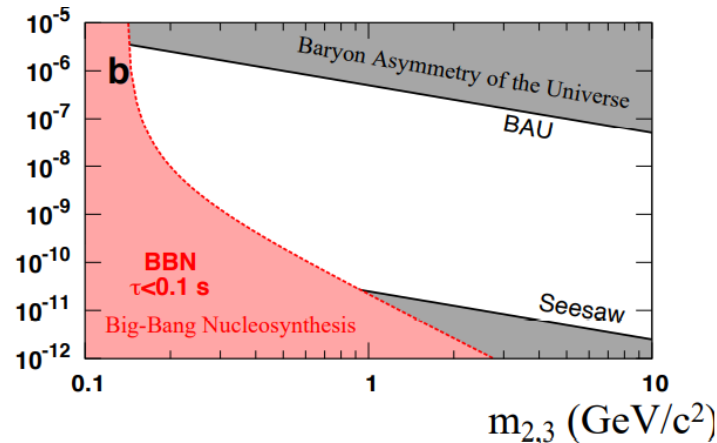
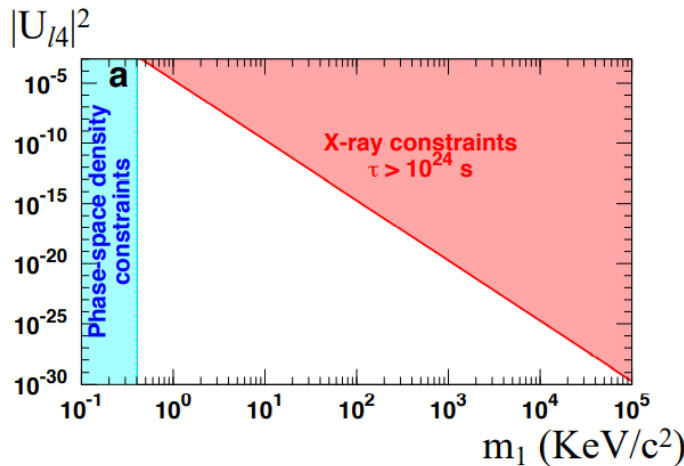
Heavy neutral leptons (HNLs)

I neutrini sono considerati a massa nulla nel MS

Generico modello con k neutrini sterili (autostati di massa): $\nu_\alpha = \sum_{i=1}^{3+k} U_{\alpha i} \nu_i \quad (\alpha = e, \mu, \tau)$

ν MSM: estensione minimale del MS

3 neutrini sterili: $m_1 \sim 10 \text{ keV}/c^2, m_{2,3} \sim 1 \text{ GeV}/c^2$



$K^+ \rightarrow l^+ N$: selezione

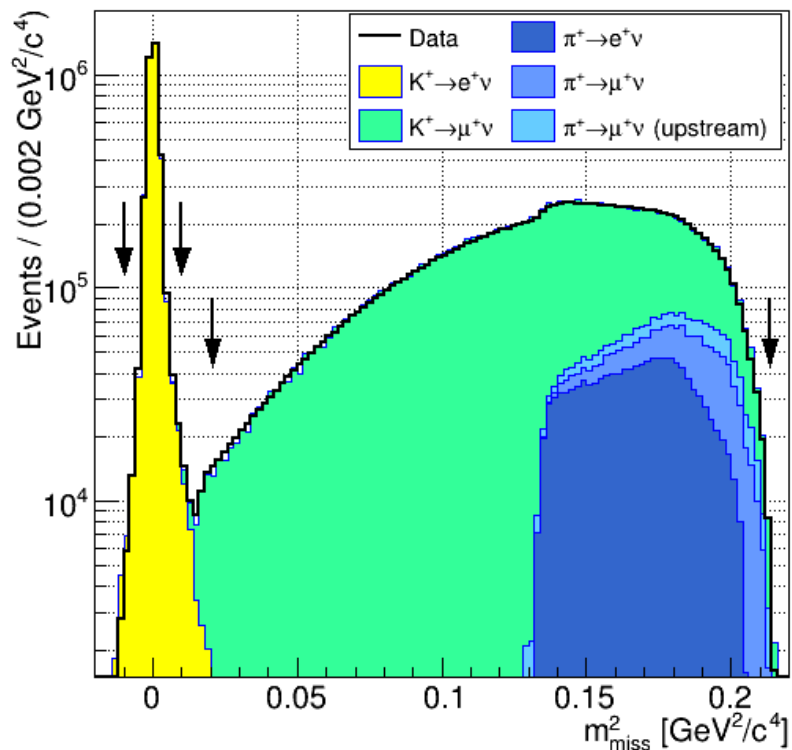
- Particella carica nello stato finale, con momento ricostruito dallo STRAW tracker
- Richiesta sul momento dei leptoni: $5 < p_e < 30 \text{ GeV}/c$, $5 < p_\mu < 70 \text{ GeV}/c$
- Traccia in accettazione di LKr e MUV3
- Associazione con un K nello stato iniziale identificato da KTAG e GTK
- Identificazione della particella usando RICH e MUV3 (solo nel caso di muone)

$K^+ \rightarrow l^+ N$: campioni selezionati

$$m_{miss}^2 = (P_K - P_l)^\alpha (P_K - P_l)_\alpha$$

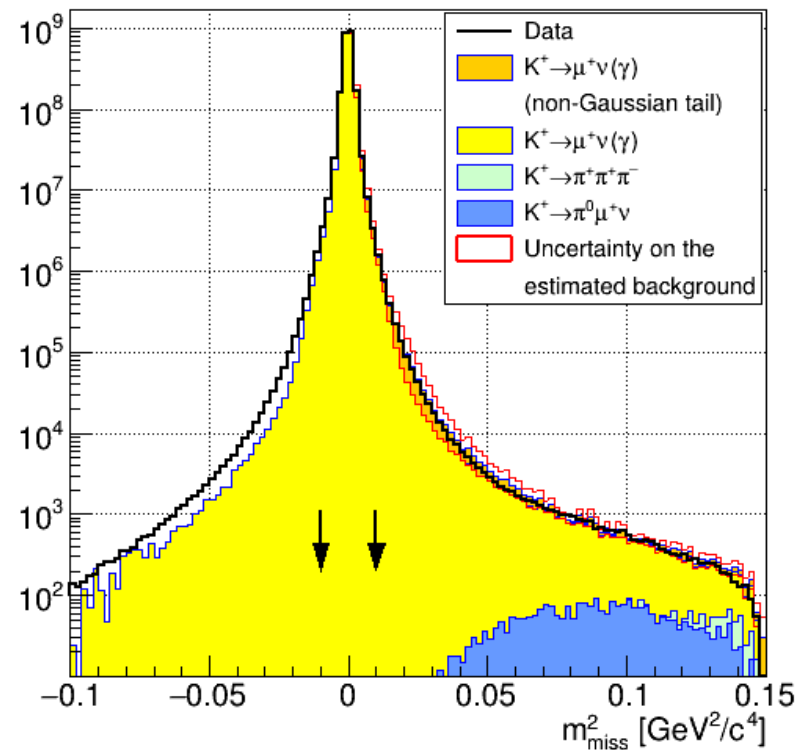
Segnale da HNL: eccesso di eventi rispetto al fondo

$$N_K = (3.52 \pm 0.02) \times 10^{12}$$



canale e^+

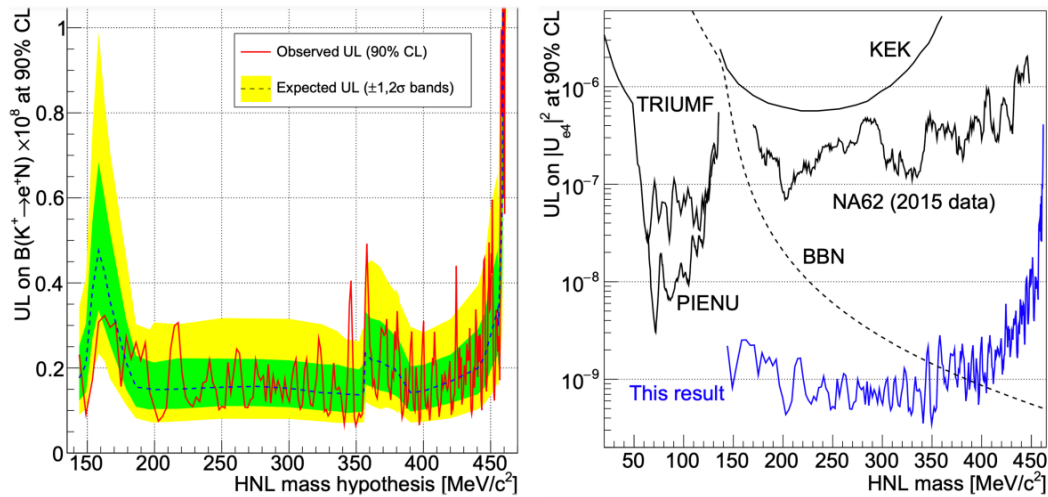
$$N_K = (1.14 \pm 0.02) \times 10^{10}$$



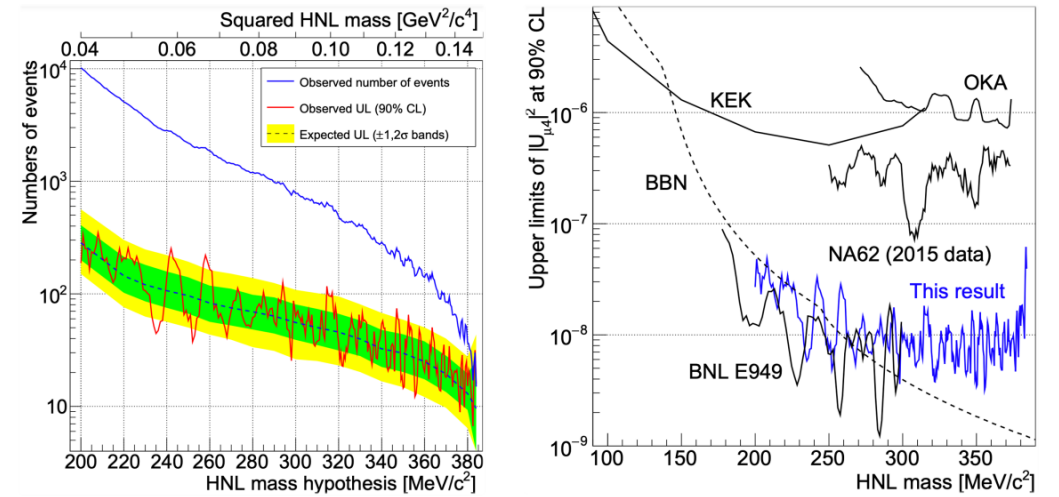
canale μ^+

Ricerca di HNL: risultati

canale e^+



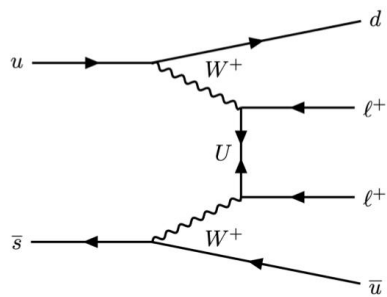
canale μ^+



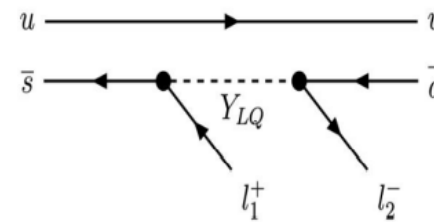
Nessun eccesso significativo osservato, limiti superiori al 90% CL su $|U_{l4}|^2$ ottenuti

Violazioni del numero leptonic

La conservazione numero leptonic (L) o del numero leptonic di famiglia (L_e, L_μ, L_τ) non sono strettamente imposte nella costruzione del MS, per cui possono indicare presenza di nuova fisica



$\Delta L = 2$ con neutrino di Majorana



$\Delta L_i = 1, \quad \Delta L_j = 1 \quad i, j = [e, \mu]$
mediato da leptoquark

Violazioni del numero leptonico ad NA62

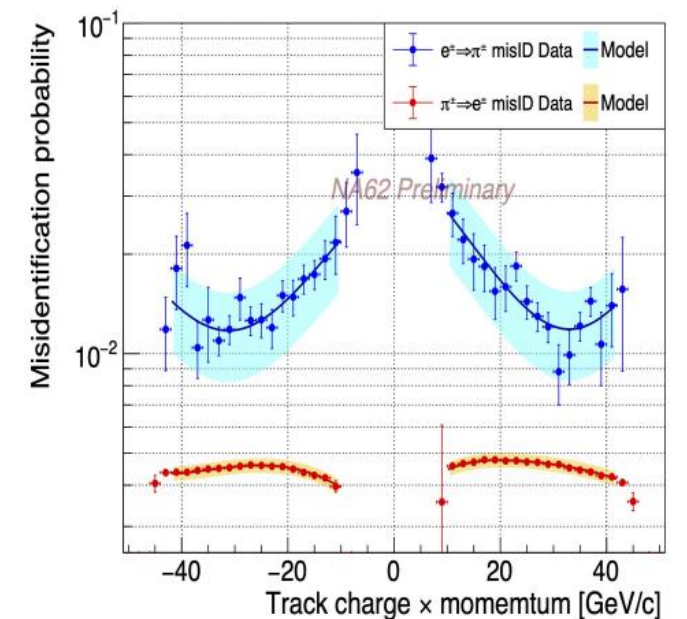
Ricerca di processi $K^+ \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp e^+$ e $\pi^0 \rightarrow \mu^- e^+$

Selezione del segnale: blind analysis

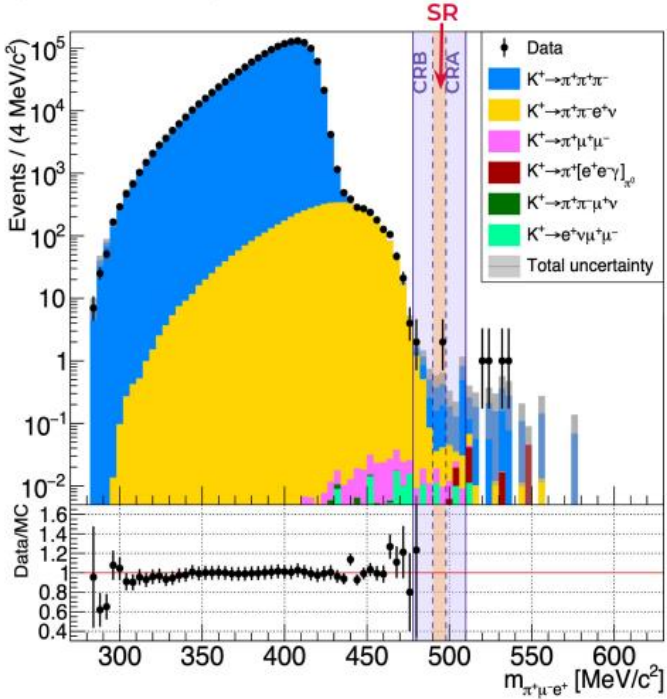
- Normalizzazione: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$
- K identificato dal KTAG
- 3 tracce nello stato finale
- Momento delle tracce compatibile con K
- PID con LKr e MUV3

Principali fondi

- Errata identificazione
- Decadimenti in volo



Campioni selezionati e risultati

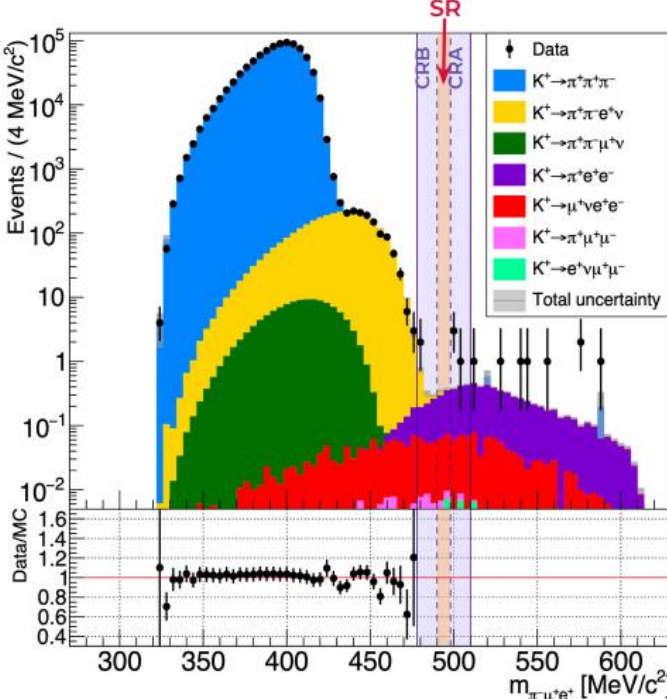


$$N_{bkg} = 0.92 \pm 0.34$$

$$N_{obs} = 2$$

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^- e^+) < 6.6 \times 10^{-11} \text{ (miglioramento: x8)}$$

$$BR(\pi^0 \rightarrow \mu^- e^+) < 3.2 \times 10^{-10} \text{ (miglioramento: x13)}$$



$$N_{bkg} = 1.06 \pm 0.20$$

$$N_{obs} = 0$$

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^- \mu^+ e^+) < 4.2 \times 10^{-11} \text{ (miglioramento: x12)}$$

Conclusioni

Importanti risultati raggiunti da NA62 con l'analisi dei dati del Run1 (2016-2018):

- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6_{-3.4}^{+4.0}|_{stat} \pm 0.9_{sys}) \times 10^{-11}$, misura migliore del BR finora [JHEP 06 \(2021\) 093](#)
- Misure di $BR(K_{e3\gamma})$ con precisione $<1\%$ e prima misura di A_ξ in tutti e tre gli intervalli cinematici
- HNL: nuovi limiti su $|U_{l4}|^2$ ottenuti
- Violazione del numero leptonico: miglioramento di un fattore 8-13 rispetto ai risultati precedenti [arXiv:2105.06759](#)

Run 2 cominciato a luglio 2021

Grazie per l'attenzione