

# 108° CONGRESSO NAZIONALE

Milano, 12-16 settembre 2022

Comunicazioni - Sessione di Fisica Nucleare e Subnucleare



## Ricerca di mediatori della materia oscura nel decadimento raro $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X$ , $X \rightarrow \gamma\gamma$ con il rivelatore NA62 al CERN

Ilaria Panichi

INFN e Università degli Studi di Firenze,  
CERN NA62 Collaboration



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
SEZIONE DI FIRENZE



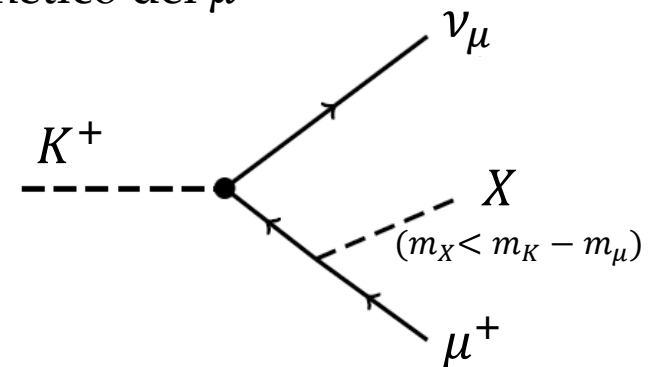
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE



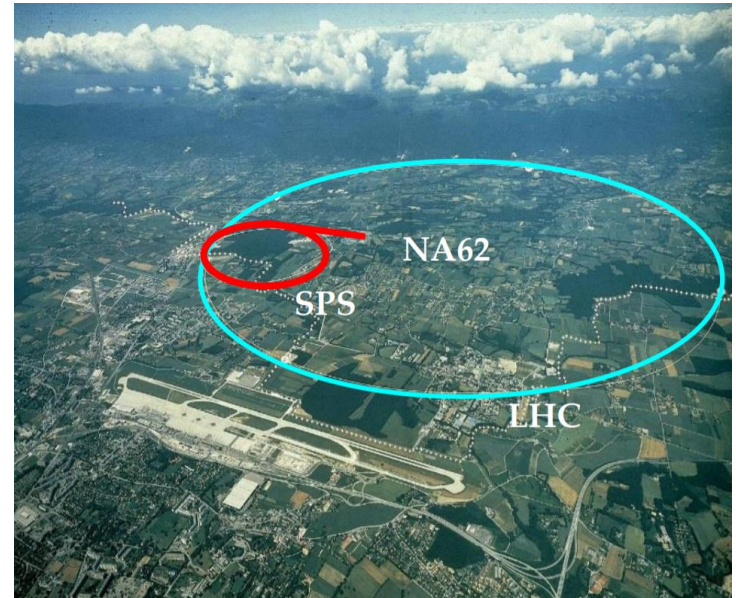
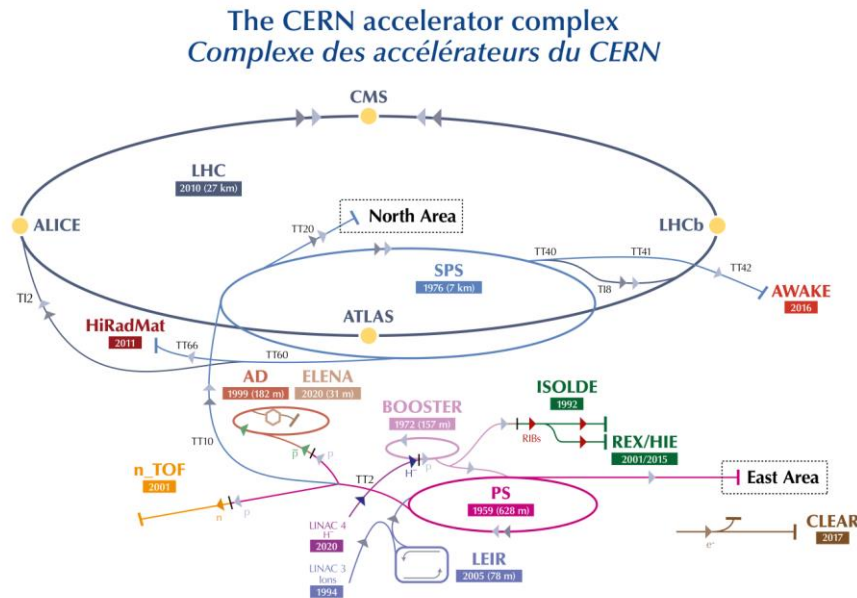
# Il mediatore $X$

- La Materia Oscura (*dark matter* DM) costituisce  $\sim 27\%$  dell'Universo; non è spiegata dal Modello Standard (MS) della fisica delle particelle
- Candidati di DM sono previsti in teorie di Nuova Fisica, alcune delle quali includono l'esistenza di «nuove» forze (*dark forces*) e dei loro mediatori (*dark matter mediators*)
- Un **mediatore di DM** ( $X$ ):
  - scalare ( $\Phi$ ) o vettoriale ( $V$ ), con  $m_X \leq GeV/c^2$ , neutro rispetto al MS
  - che si accoppi preferenzialmente con i  $\mu$potrebbe spiegare il  $(g - 2)_\mu$  del momento magnetico del  $\mu$

- La produzione di  $X$  può essere investigata alla Kaon factory NA62 tramite i decadimenti di  $X$



# L'esperimento NA62



- Kaon factory
- Esperimento a bersaglio fisso all'SPS del CERN
- Obiettivo principale: **misura del  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$  con una precisione 10%**

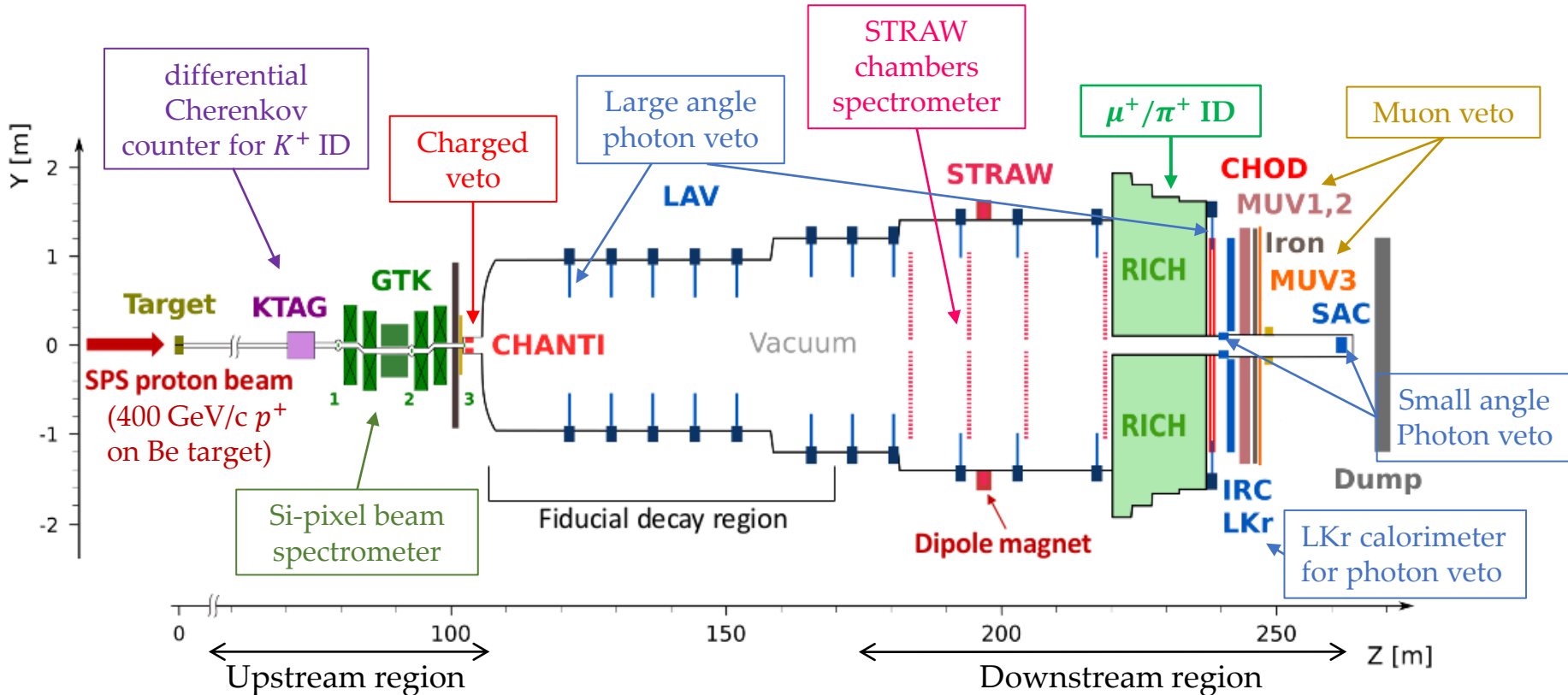
$$BR_{SM}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0,84 \pm 0,10) \times 10^{-10} \quad [\text{Buras et al., JHEP11(2015)033}]$$

$$BR_{NA62 \text{ Run1}}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10,6_{-3,4}^{+4,0} \text{ stat} \pm 0,9_{\text{syst}}) \times 10^{-11} @ 68\% \text{ CL} \quad (3,4 \sigma \text{ significance})$$

[NA62 Collaboration, JHEP06(2021)093]

# NA62: Detector Layout

[ NA62 Collaboration, JINST 12 (2017) P05025 ]



## Fascio secondario:

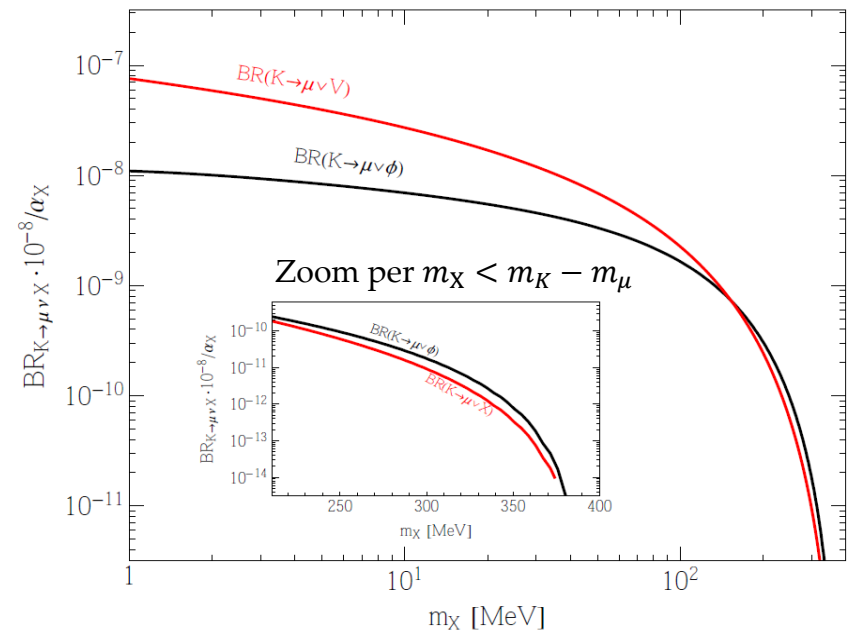
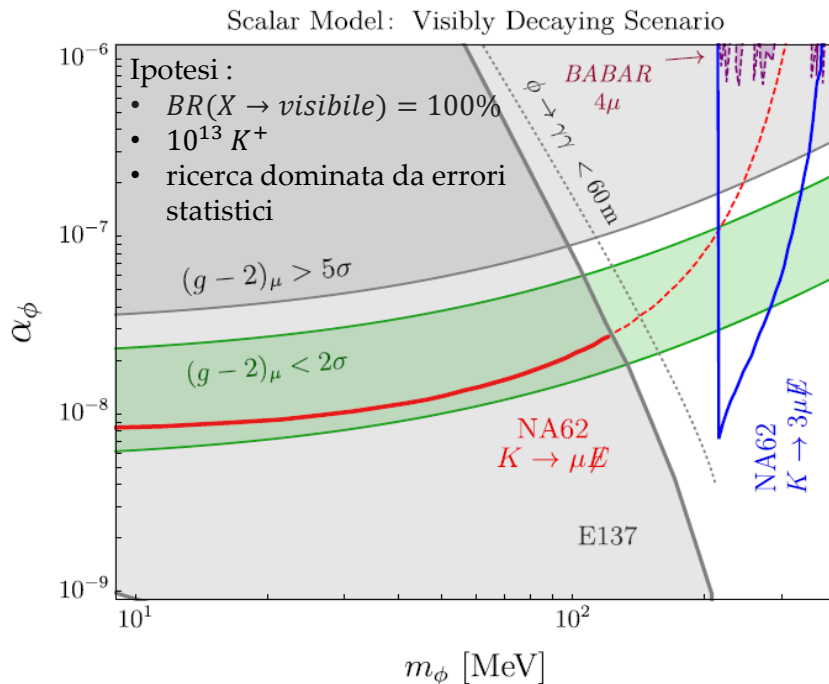
- $(70\%)\pi^+$ ,  $(24\%)p$ ,  $(6\%)K^+$  non separate, di impulso 75 GeV/c ( $\Delta p/p \sim 1,1\%$ )
- Rate nominale delle particelle al GTK3: **750 MHz**
- Rate di decadimento dei  $K^+$  nella regione di decadimento fiduciale ( $Z \in [105; 170] m$ ): 3 MHz

# Perché $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X$ a NA62: proiezioni teoriche

[G. Krnjaic et al., Phys. Rev. Lett. 124, 041802 (2020)]

- Potenzialmente NA62 ha una sensibilità a  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X$  ( $\Phi$  o  $V$ ) senza precedenti perché per misurare il  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu} \nu)$  con una precisione del  $O(10\%)$  con  $O(100)$  eventi di  $K^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu} \nu$  necessita di  $O(10^{13})$  decadimenti del  $K^+$
- Per  $X$  scalare ( $y_\Phi \equiv$  accoppiamento di Yukawa  $\Phi - \mu \rightarrow \alpha_\Phi \equiv y_\Phi^2/4\pi$ ) i decadimenti cinematicamente permessi per  $m_\Phi < m_K - m_\mu$  sono:
  - ✓  $\Phi \rightarrow$  invisibile  $\rightarrow$  misurato sui dati del Run 1 [NA62 Collaboration, Phys. Lett. B 816 (2021) 136259]
  - ✓  $\Phi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  (dominante per  $m_\Phi > 2m_\mu$ ) oppure  $\Phi \rightarrow \gamma\gamma$  (dominante per  $m_\Phi < 2m_\mu$ )

analisi in questa comunicazione



# Strategia di analisi

Obiettivo: ottenere una **stima preliminare** della sensibilità sperimentale di NA62 al decadimento  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X$ ,  $X \rightarrow \gamma\gamma$

- Sperimentalmente,  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X$ ,  $X \rightarrow \gamma\gamma$  è caratterizzato da:

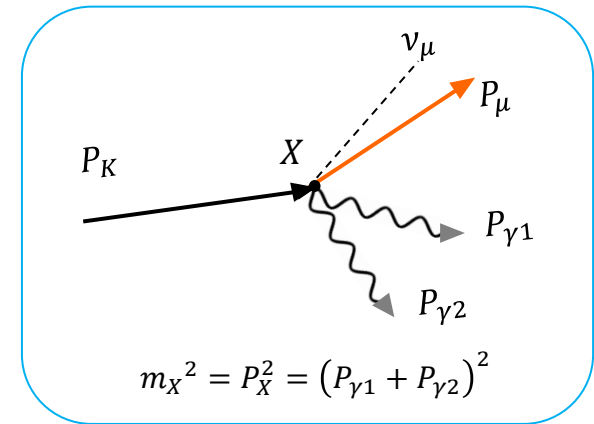
- ✓ una singola traccia carica nello spettrometro STRAW ( $\mu^+$ )
- ✓ due clusters nel LKr ( $\gamma\gamma$ )

- Variabile discriminante:

$$m_{\gamma\gamma} \equiv \sqrt{2(E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} - \vec{p}_{\gamma 1} \cdot \vec{p}_{\gamma 2})}$$

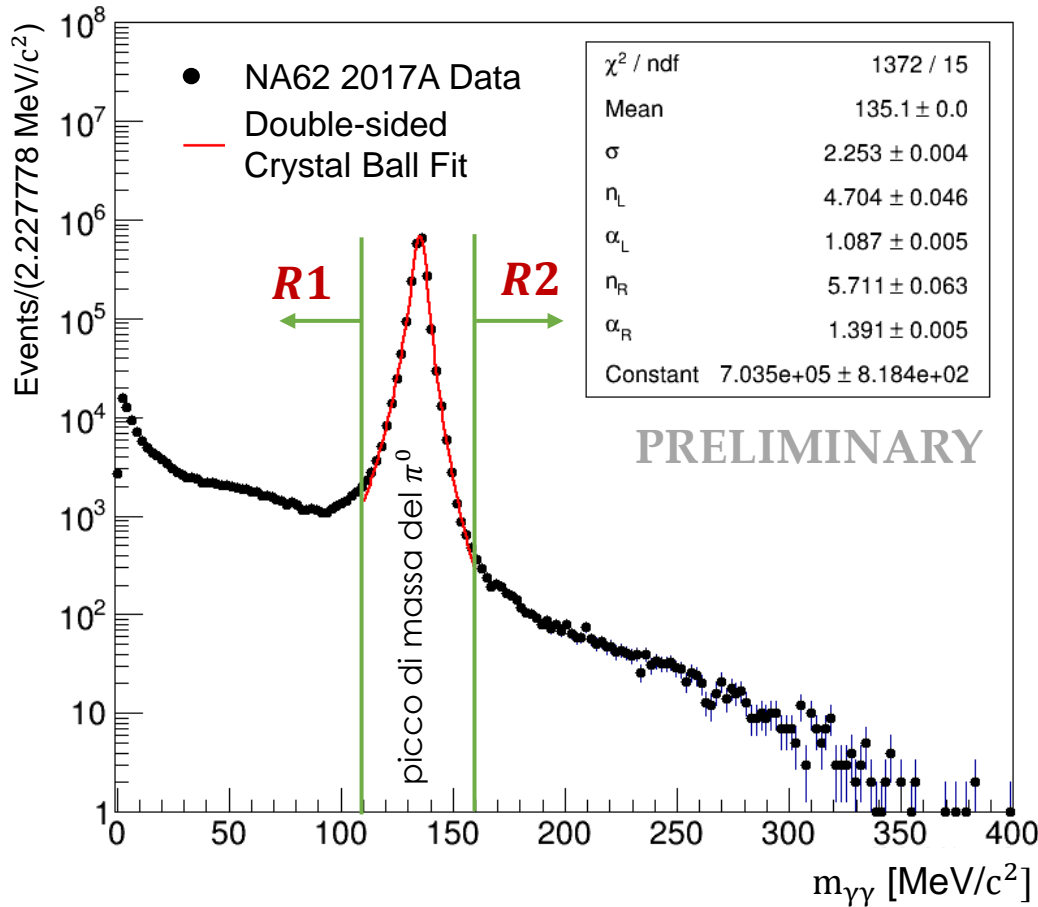
- Fondi principali: (studiati tramite simulazioni MC)

Canali di decadimento del $K^+$	BR
$BR(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$	$(63,56 \pm 0,11)\%$
$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0)$	$(20,67 \pm 0,08)\% \rightarrow \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
$BR(K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \pi^0)$	$(5,07 \pm 0,04)\%$
$BR(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \pi^0)$	$(3,352 \pm 0,033)\%$
$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0)$	$(1,760 \pm 0,023)\%$



# Preselezione

Per la stima è stato  
usato solo un  
sotto-campione di  
dati del Run1!



- $\vec{p}_K$  misurato dal GTK
- $15 < |\vec{p}_{Track}| < 35 \text{ GeV}/c$   
(separazione  $\mu/\pi$  ottimale con il RICH di NA62)
- $|\vec{p}_{\gamma 1} + \vec{p}_{\gamma 2} + \vec{p}_{Track}| < 77 \frac{\text{GeV}}{c}$
- Identificazione di particelle (PID) per selezionare eventi in cui è probabile che la particella downstream sia un  $\mu^+$  (RICH, calorimetri e MUV3)
- **Numero di tracce downstream = 1**
- **Numero di clusters e.m. = 2**

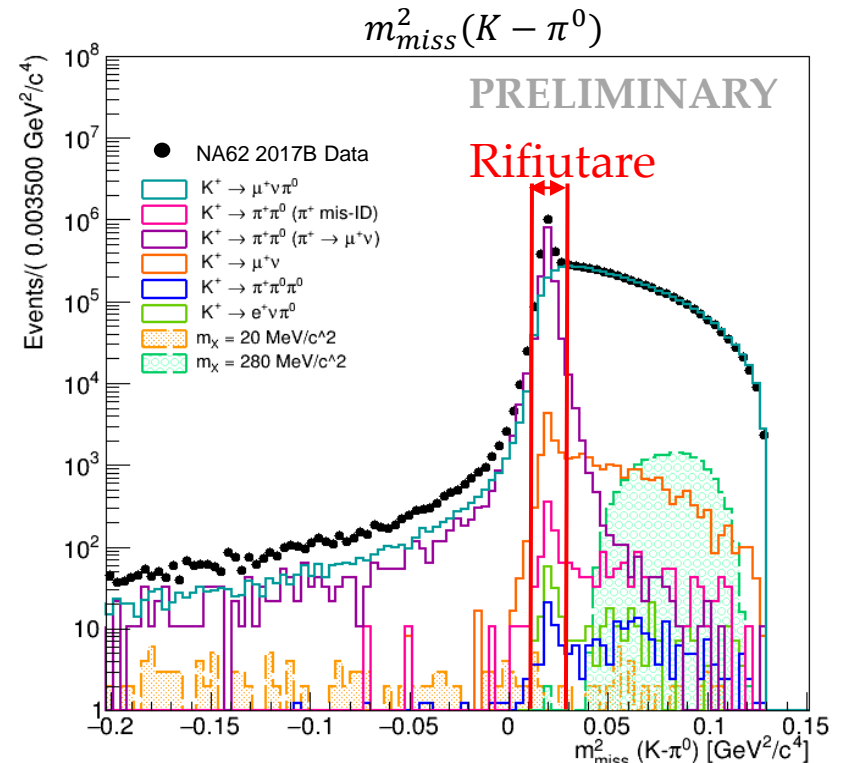
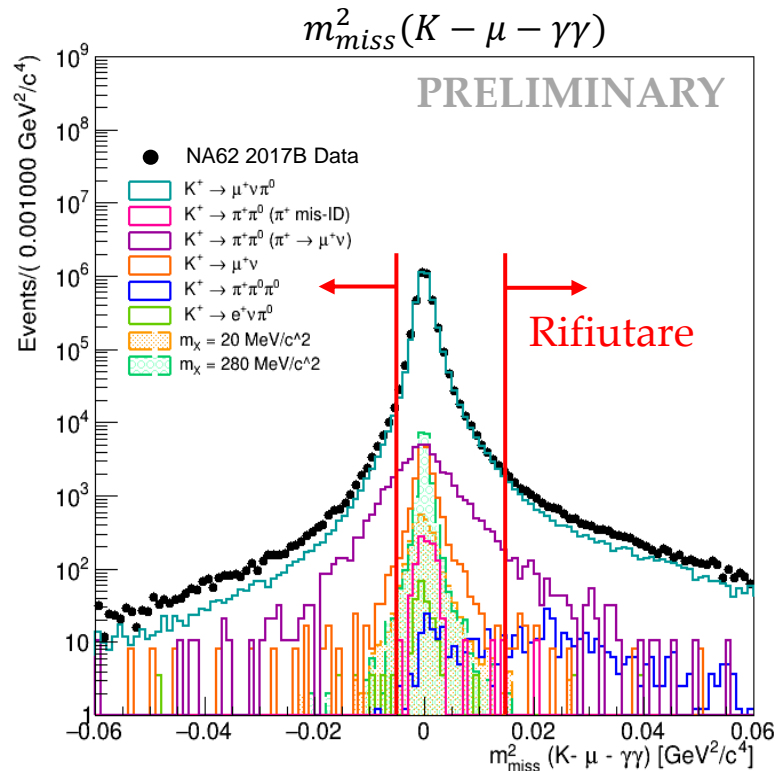
Regioni sensibili al segnale  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X, X \rightarrow \gamma\gamma$ :

$$R1: m_{\gamma\gamma} < 110 \frac{\text{MeV}}{c^2} \quad R2: m_{\gamma\gamma} > 160 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

# Selezione

Per la stima è stato usato solo un sotto-campione di dati del Run1!

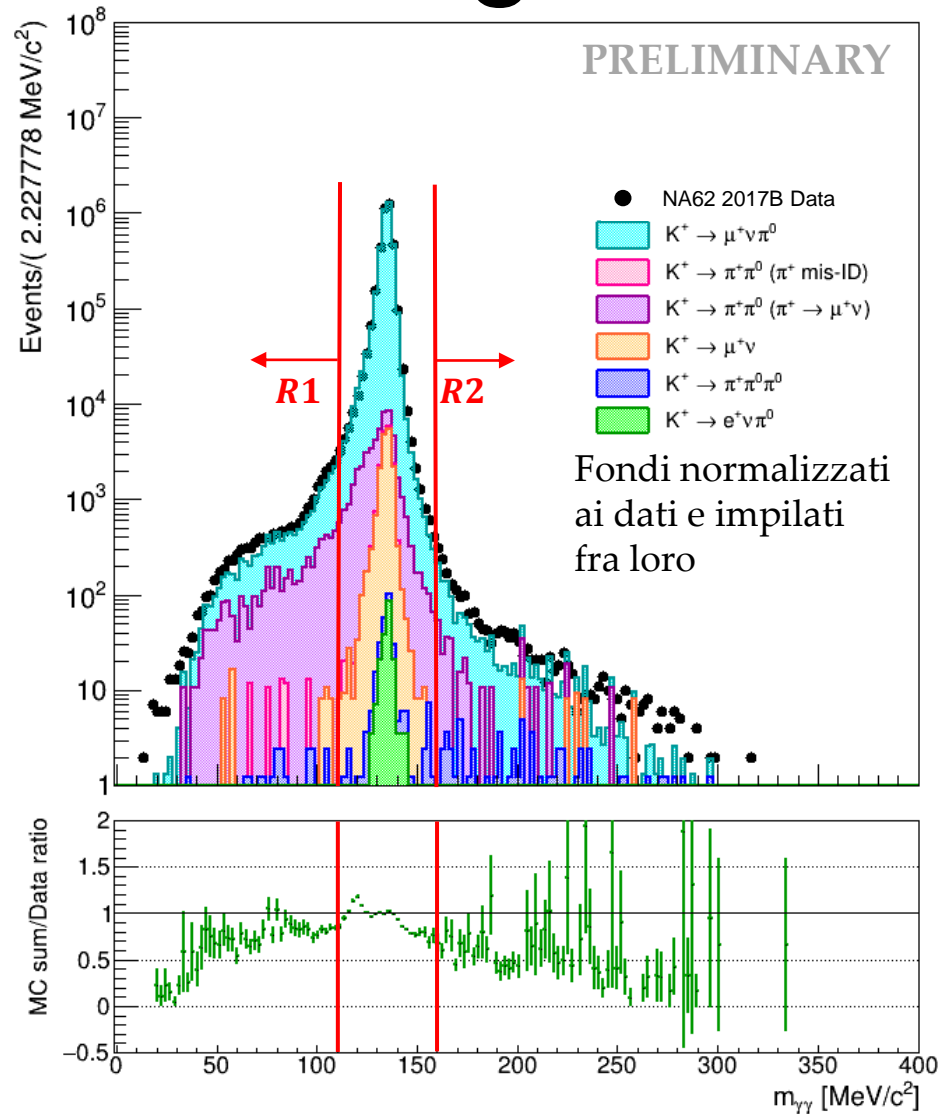
- Tagli di timing,
- sulla minima distanza fra i clusters e fra un cluster e fra un cluster la traccia carica al LKr,
- sulle variabili cinematiche:  $E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2}$ ,  $m_{miss}^2(K - \mu - \gamma\gamma)$ ,  $m_{miss}^2(K - \pi^0)$ ,  $m_{miss}^2(K - \mu)$



- MC fondi **normalizzati ai dati** e sovrapposti
- MC segnale **non normalizzati** e sovrapposti; le masse  $m_X$  simulate  $\in (20 - 360) \frac{MeV}{c^2}$  ma solo due valori sono raffigurati

# $m_{\gamma\gamma}$ dopo la selezione del segnale

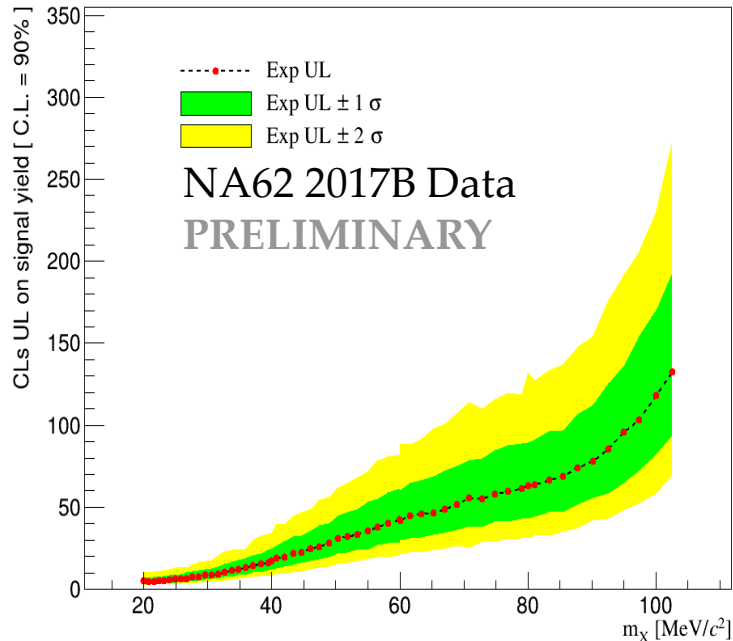
Per la stima è stato usato solo un sotto-campione di dati del Run1!



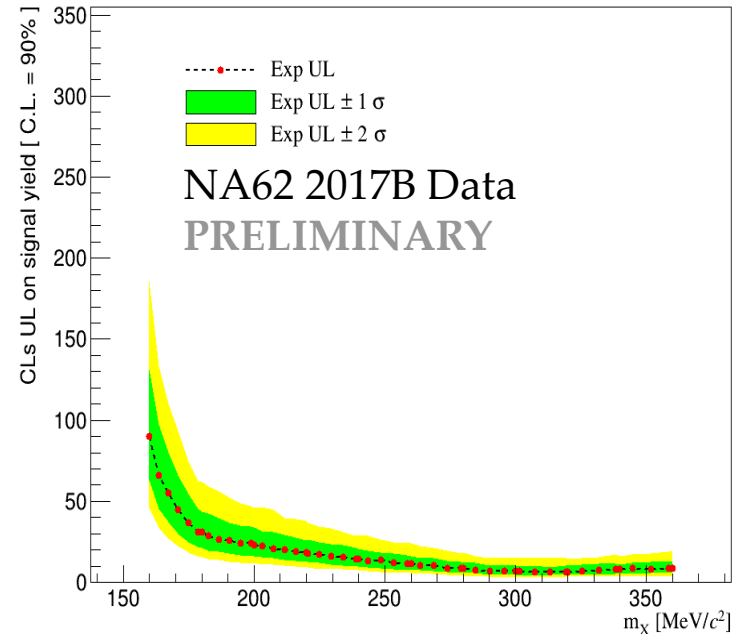
# Limite superiore atteso e $BR_{sensitivity}$

- Per  $m_X$  fissata, sono quotati il  $CL_s$  Expected UL al 90% CL sul numero di eventi di segnale atteso e suoi limiti a  $\pm 1\sigma$  e  $\pm 2\sigma$  rispetto al valore centrale

Regione R1 ( $m_{\gamma\gamma} < 110 \text{ MeV}/c^2$ )



Regione R2 ( $m_{\gamma\gamma} > 160 \text{ MeV}/c^2$ )



- $BR_{sensitivity}(m_X, N_{norm}) = \frac{Expected\ UL(m_X)}{\epsilon_s(m_X) N_{norm}}$

$N_{norm}$  = numero di  $K^+$  decaduti

$\epsilon_s(m_X)$  = efficienza di selezione del segnale

La miglior  $BR_{sensitivity}$ , di ordine  $10^{-7}$ , si ottiene per  $m_{\gamma\gamma} > 160 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

# Conclusioni

- Ricerca di  $X$  nei decadimenti rari  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X$  a NA62
  - $X$  mediatore di  $DM$  con  $m_X \leq GeV/c^2$ , neutro, con un accoppiamento preferenziale con i  $\mu$  accomoderebbe il valore sperimentale del  $(g - 2)_\mu$
  - prospettiva di raggiungere sensibilità mai ottenute in precedenza
- Stima preliminare della sensibilità di NA62 rispetto al segnale  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X, X \rightarrow \gamma\gamma$ 
  - $m_X \in (20 ; 360) MeV/c^2$
  - analisi dei dati raccolti dall'esperimento nel periodo 2017B
  - insieme a campioni MC del segnale e dei principali fondi
  - massa invariante  $m_{\gamma\gamma}$  dei due fotoni come variabile discriminante;
  - due regioni sensibili a segnali di nuova fisica :

$$R1: m_{\gamma\gamma} < 110 \frac{MeV}{c^2}; \quad R2: m_{\gamma\gamma} > 160 \frac{MeV}{c^2}$$

La miglior  $BR_{sensitivity}$ , di ordine  $10^{-7}$ , si ottiene per  $m_{\gamma\gamma} > 160 \frac{MeV}{c^2}$

- Prospettive:
  - sfruttare a pieno il probing power di NA62
    - usare l'intera statistica del Run1(2016/17/18) + Run2 (in corso)
    - rilassare i tagli stringenti introdotti (solo eventi con esattamente 1 traccia + 2 clusters)
    - raffinare la selezione
  - raggiungere la regione interessante dello spazio dei parametri  $\alpha_\Phi - m_\Phi$ 
    - è necessario guadagnare un fattore  $\sim O(10^{-3})$  in  $BR_{sensitivity}$

Grazie per l'attenzione!