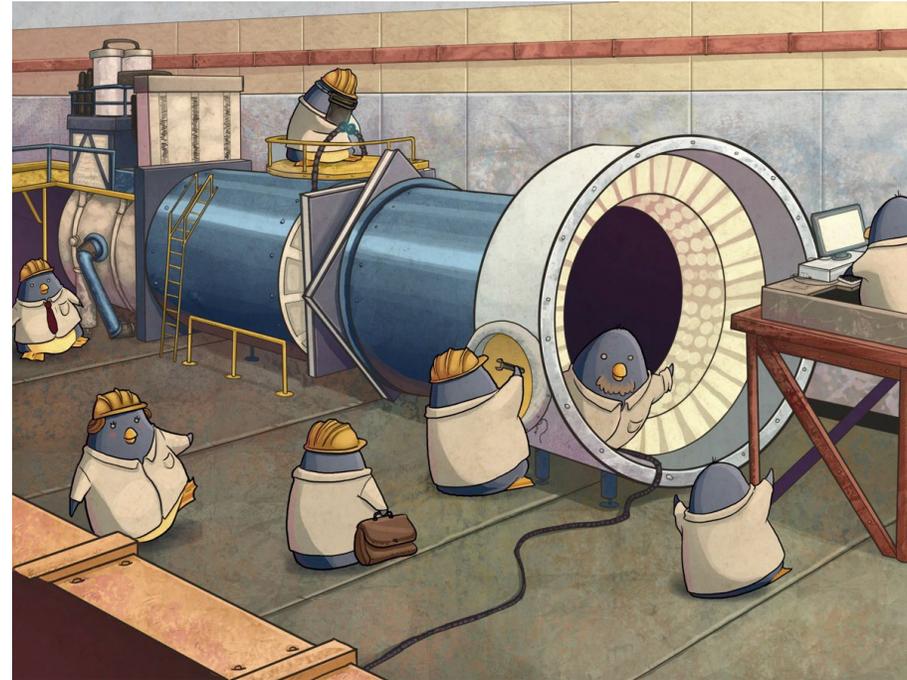


L'esperimento NA62



Jacopo Pinzino

Consiglio di sezione
07/02/24

Ricerca di Nuova fisica

L'osservazione del **bosone di Higgs** nel 2012 ha fornito l'ultima verifica sperimentale del Modello Standard. Nonostante ciò, argomenti teorici e osservazioni sperimentali (la materia oscura, l'asimmetria barionica, le oscillazioni dei neutrini, ecc) suggeriscono **l'esistenza di fisica oltre il Modello Standard**. La ricerca di nuova fisica usando gli acceleratori di particelle segue due possibili strade:



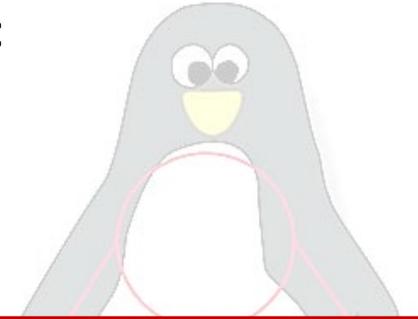
Frontiera dell'energia

- Ricerca diretta di particelle con grande massa o debolmente interagenti
- Limitata dall'energia a cui possiamo arrivare
- ATLAS, CMS, ecc



Frontiera dell'intensità

- Utilizzo di fasci molto intensi
- Misure di precisione su processi molto rari
- La nuova fisica può influenzare e deviare dal valore atteso le proprietà misurabili di particelle e processi

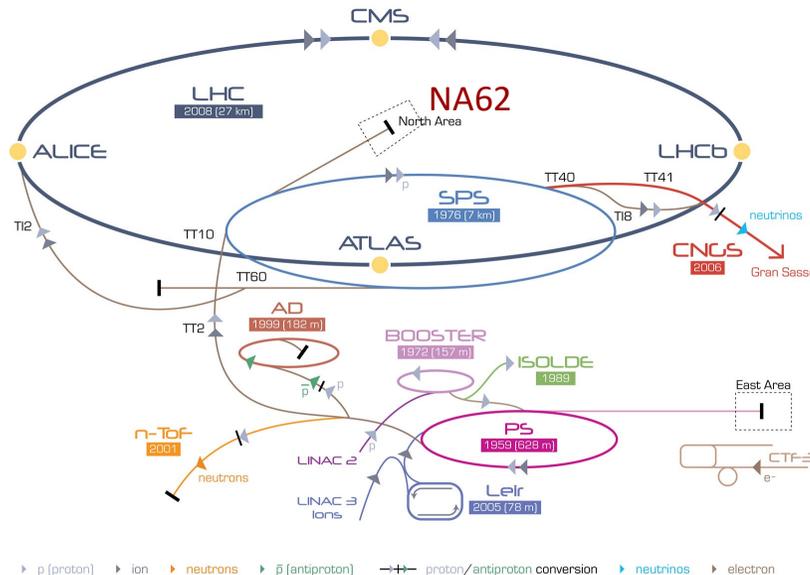


L'esperimento NA62

- NA62 è un esperimento a bersaglio fisso al SPS del CERN
- Usa un fascio non separato di K a 75 GeV
- Il suo scopo principale è la misura del Branching Ratio del decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- Ha un programma di fisica ampio: LFV / LNV nei decadimenti del K^+ , ricerca di particelle di nuova fisica.

NA62 Timeline

- 2008: approvazione di NA62
- 2014 - 2015: primi RUN di collaudo
- Installazione dei rivelatori completata a Settembre 2016
- 2016 : prima vera presa dati
- Quasi 1100 giorni di presa dati fino al 2024
- La presa dati ricomincerà ad Aprile



~ 200 partecipanti da: Birmingham, Bratislava, Bristol, Bucharest, CERN, Dubna, GMU-Fairfax, Ferrara, Firenze, Frascati, Glasgow, Lancaster, Liverpool, Louvain, Mainz, Moscow, Napoli, Perugia, Pisa, Prague, Protvino, Roma I, Roma II, San Luis Potosi, Torino, TRIUMF, Vancouver UBC

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

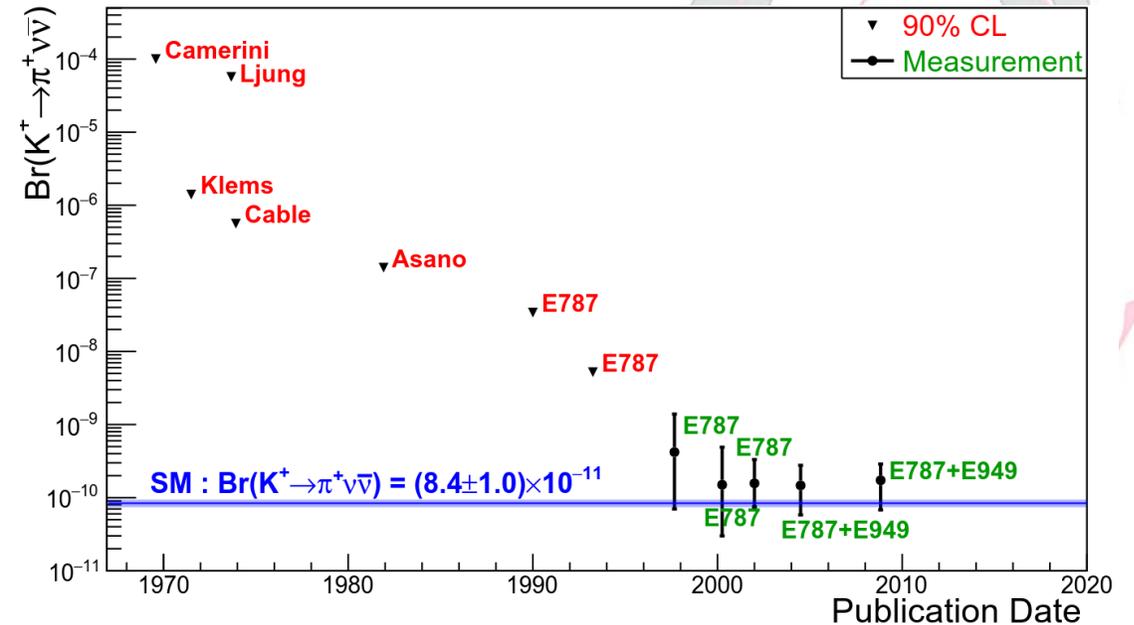
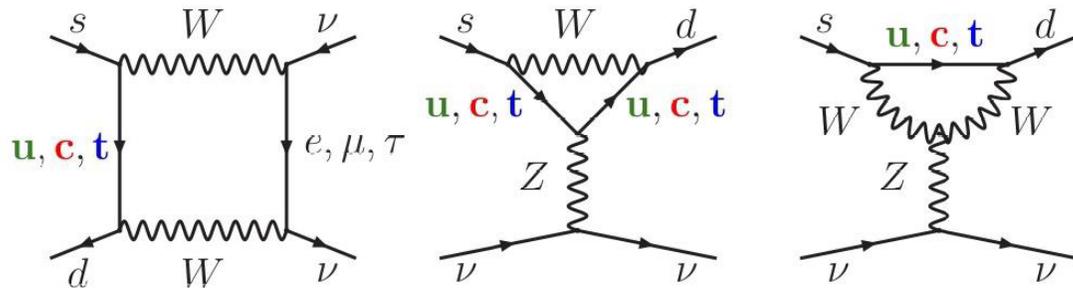
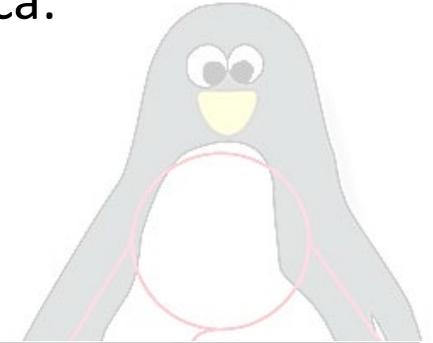
Lo studio del $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ è importante in quanto è un decadimento molto raro altamente sensibile a processi di nuova fisica.

Inoltre è possibile calcolare il suo branching ratio con un'alta precisione teorica:

- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})_{\text{Buras}} = (8.60 \pm 0.42) \times 10^{-11}$
- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})_{\text{D'ambrosio}} = (7.86 \pm 0.61) \times 10^{-11}$

Da confrontare con la misura più precisa precedente ad NA62:

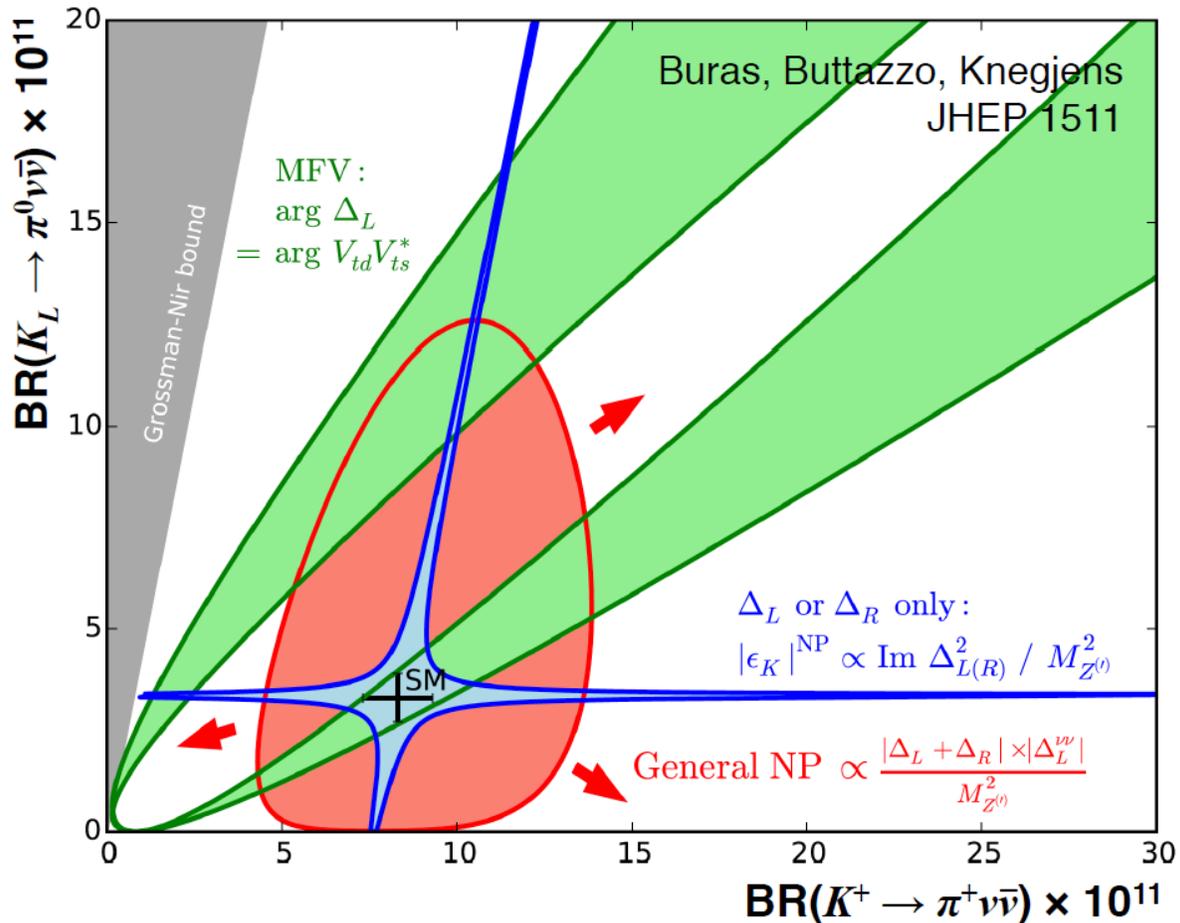
- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})(\text{E787/E949}) = (17.3^{+11.5}_{-10.5}) \times 10^{-11}$



d

$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ e la ricerca di nuova fisica

La misura del decadimento carico ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$) e di quello neutro ($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$) possono **discriminare tra diversi scenari di nuova fisica**



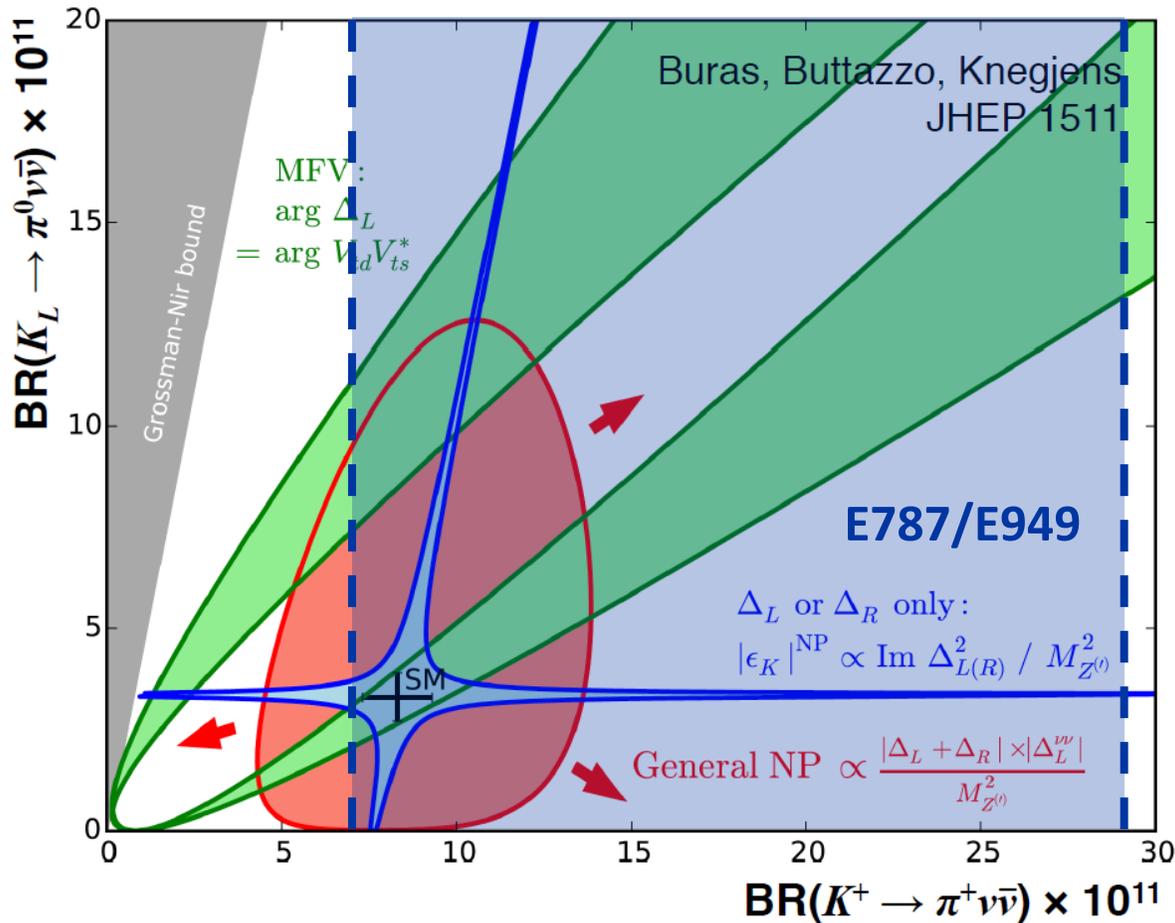
Essendo calcolabile molto precisamente all'interno del modello standard, basta una piccola deviazione dalla predizione teorica per dare un indizio di nuova fisica.

Ecco alcuni modelli di nuova fisica:

- **Models with CKM-like flavor structure (Models with MFV)**
 [Buras, Buttazzo, Knejiens, JHEP11(2015)166]
- **Custodial Randall-Sundrum**
 [Blanke, Buras, Duling, Gemmler, Gori, JHEP 0903 (2009) 108]
- **Simplified Z, Z' models**
 [Buras, Buttazzo, Knejiens, JHEP11(2015)166]
- **Littlest Higgs with T-parity**
 [Blanke, Buras, Recksiegel, Eur.Phys.J. C76 (2016) 182]
- **LFU violation models**
 [Isidori et al., Eur. Phys. J. C (2017) 77: 618]
- **Leptoquarks**
 [S. Fajfer, N. Košnik, L. Vale Silva, arXiv:1802.00786v1 (2018)]
- **MSSM analyses**
 [Blazek, Matak, Int.J.Mod.Phys. A29 (2014) no.27], [Isidori et al. JHEP 0608 (2006) 064]

$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ e la ricerca di nuova fisica

La misura del decadimento carico ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$) e di quello neutro ($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$) possono **discriminare tra diversi scenari di nuova fisica**



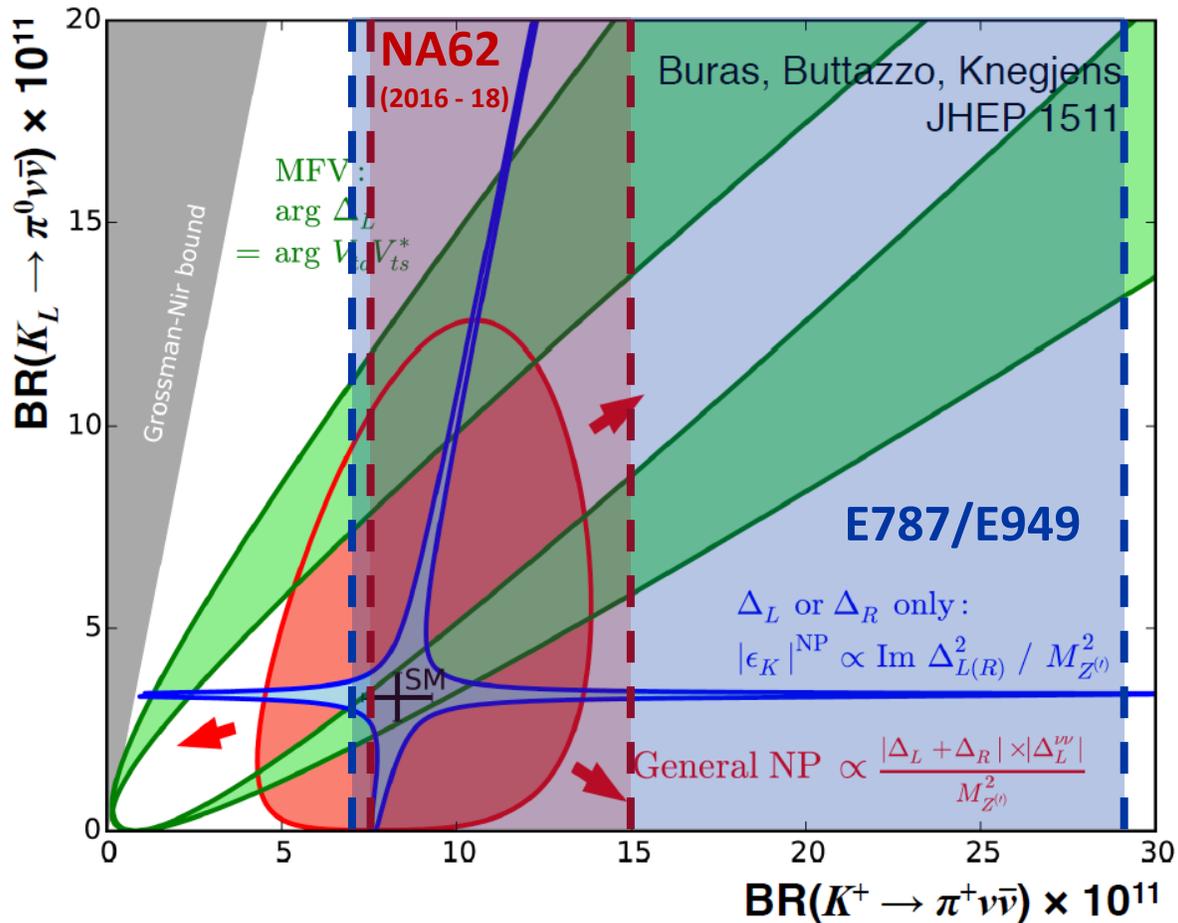
Essendo calcolabile molto precisamente all'interno del modello standard, basta una piccola deviazione dalla predizione teorica per dare un indizio di nuova fisica.

Ecco alcuni modelli di nuova fisica:

- **Models with CKM-like flavor structure (Models with MFV)**
[Buras, Buttazzo, Kneijens, JHEP11(2015)166]
- **Custodial Randall-Sundrum**
[Blanke, Buras, Duling, Gemmler, Gori, JHEP 0903 (2009) 108]
- **Simplified Z, Z' models**
[Buras, Buttazzo, Kneijens, JHEP11(2015)166]
- **Littlest Higgs with T-parity**
[Blanke, Buras, Recksiegel, Eur.Phys.J. C76 (2016) 182]
- **LFU violation models**
[Isidori et al., Eur. Phys. J. C (2017) 77: 618]
- **Leptoquarks**
[S. Fajfer, N. Košnik, L. Vale Silva, arXiv:1802.00786v1 (2018)]
- **MSSM analyses**
[Blazek, Matak, Int.J.Mod.Phys. A29 (2014) no.27],[Isidori et al. JHEP 0608 (2006) 064]

K → πνū e la ricerca di nuova fisica

La misura del decadimento carico ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$) e di quello neutro ($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$) possono **discriminare tra diversi scenari di nuova fisica**



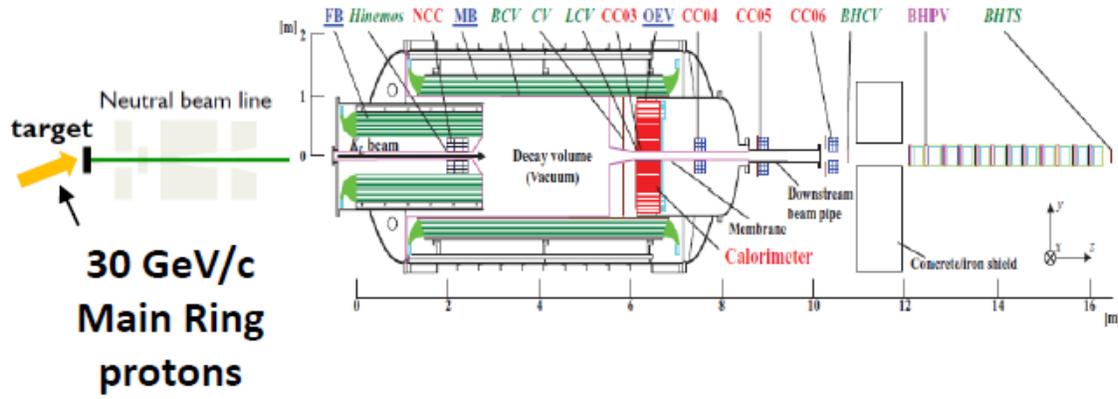
Essendo calcolabile molto precisamente all'interno del modello standard, basta una piccola deviazione dalla predizione teorica per dare un indizio di nuova fisica.

Ecco alcuni modelli di nuova fisica:

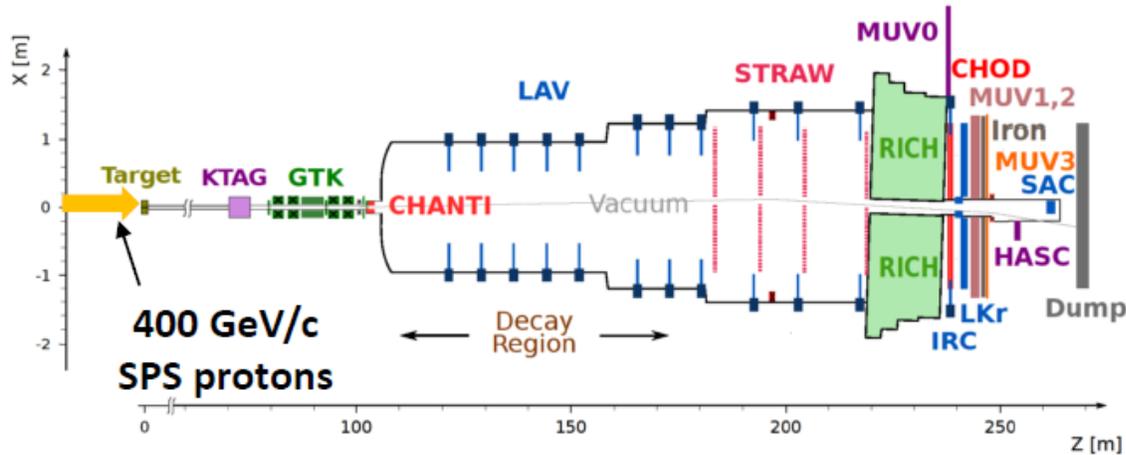
- **Models with CKM-like flavor structure (Models with MFV)**
[Buras, Buttazzo, Kneijens, JHEP11(2015)166]
- **Custodial Randall-Sundrum**
[Blanke, Buras, Duling, Gemmler, Gori, JHEP 0903 (2009) 108]
- **Simplified Z, Z' models**
[Buras, Buttazzo, Kneijens, JHEP11(2015)166]
- **Littlest Higgs with T-parity**
[Blanke, Buras, Recksiegel, Eur.Phys.J. C76 (2016) 182]
- **LFU violation models**
[Isidori et al., Eur. Phys. J. C (2017) 77: 618]
- **Leptoquarks**
[S. Fajfer, N. Košnik, L. Vale Silva, arXiv:1802.00786v1 (2018)]
- **MSSM analyses**
[Blazek, Matak, Int.J.Mod.Phys. A29 (2014) no.27], [Isidori et al. JHEP 0608 (2006) 064]

$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ Today

-  experiment at JPARC: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$



-  experiment at CERN: $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$



Come è possibile migliorare la misura

Per ottenere una misura più precisa del Branching Ratio del $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, bisogna ridurre il più possibile sia l'errore statistico che quello sistematico:

Errore Statistico

Raccogliere $O(100)$ eventi del decadimento

- Fascio molto intenso di K^+
- Massimizzare l'accettanza dei rivelatori e dell'analisi
- Ridurre la percentuale di veti casuali

Errore sistematico

- Ridurre gli errori di identificazione delle particelle
- Aumentare la conoscenza dei fondi
- Massimizzare l'accettanza dei rivelatori e dell'analisi
- Ridurre gli errori di accoppiamento tra la particella decaduta e le particelle figlie
- Calibrare bene i vari rivelatori (calorimetro, spettrometro, ecc)

Lesperimento NA62

Il decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ ha un lunga storia di esperimenti a lui dedicati, ma prima di NA62 erano stati raccolti solo **7 candidati eventi** dagli esperimenti **E787+E949**. [Phys. Rev. D 79, 092004 (2009)]
In questi anni **NA62** ha osservato **51 candidati eventi** di questo decadimento arrivando a misurarlo per la prima volta con una separazione di 5 sigma dal fondo. [arXiv.2412.12015]



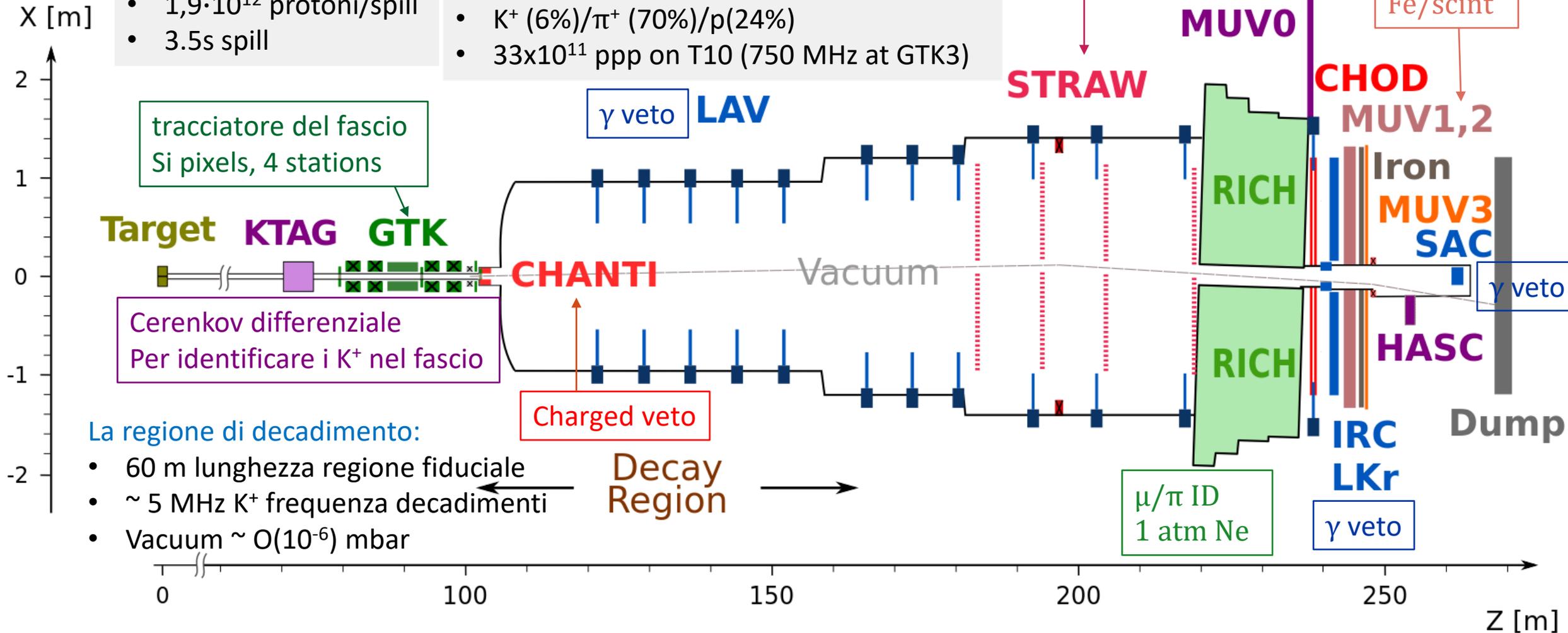
NA62 Layout

SPS Beam:

- 400 GeV/c protoni
- $1,9 \cdot 10^{12}$ protoni/spill
- 3.5s spill

Secondary positive Beam:

- 75 GeV/c impulso
- 1 % bite 100 mrad divergenza (RMS)
- 60×30 mm² dimensioni trasverse
- K^+ (6%)/ π^+ (70%)/p(24%)
- 33×10^{11} ppp on T10 (750 MHz at GTK3)



La regione di decadimento:

- 60 m lunghezza regione fiduciale
- ~ 5 MHz K^+ frequenza decadimenti
- Vacuum $\sim O(10^{-6})$ mbar

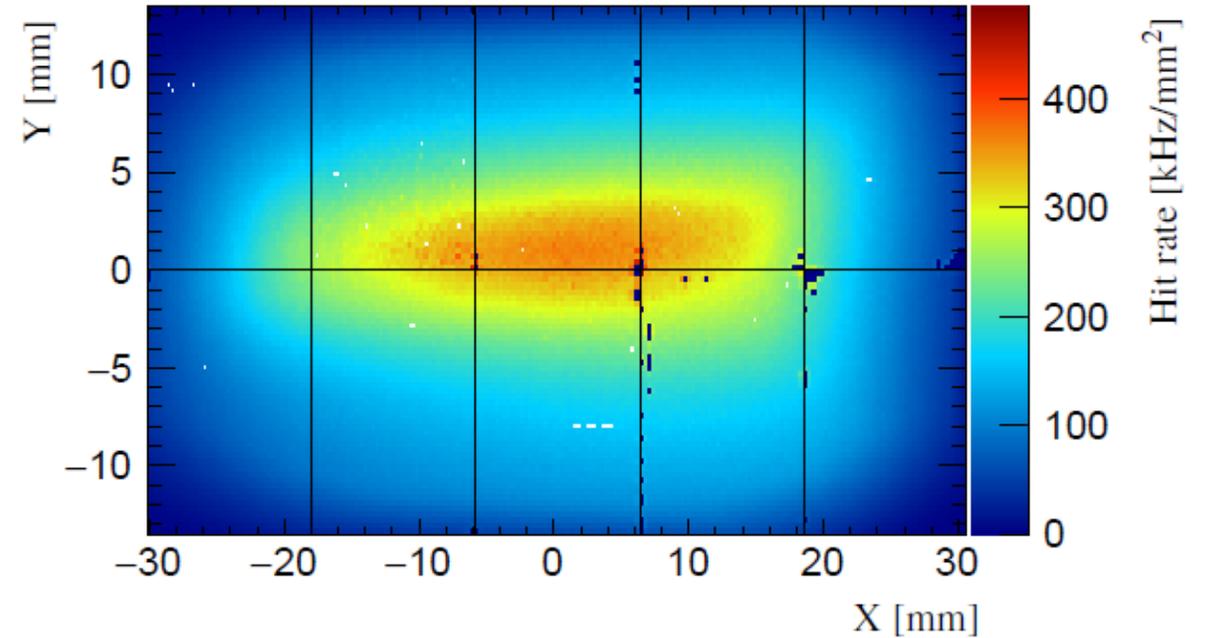
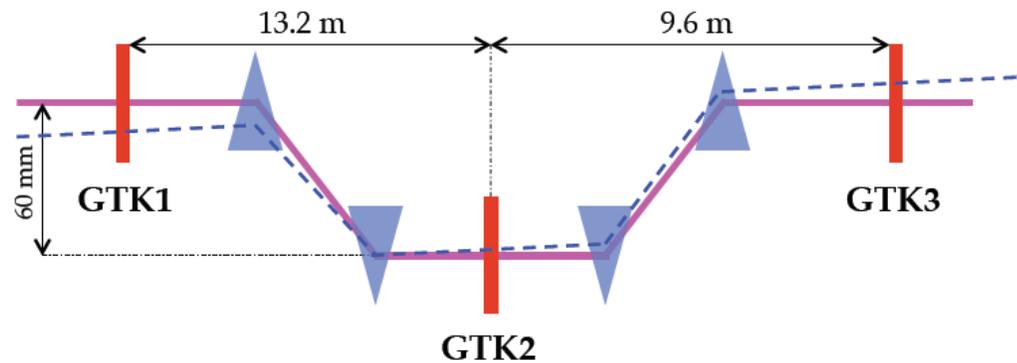
GigaTracker (GTK)

Condizioni del fascio:

- frequenza nominale 750 MHz
- frequenza al centro 140 KHz/pixel

Precisione:

- Risoluzione temporale singolo hit < 200 ps
- Risoluzione angolare = 16 μ rad
- Risoluzione sull'impulso = 0.2%

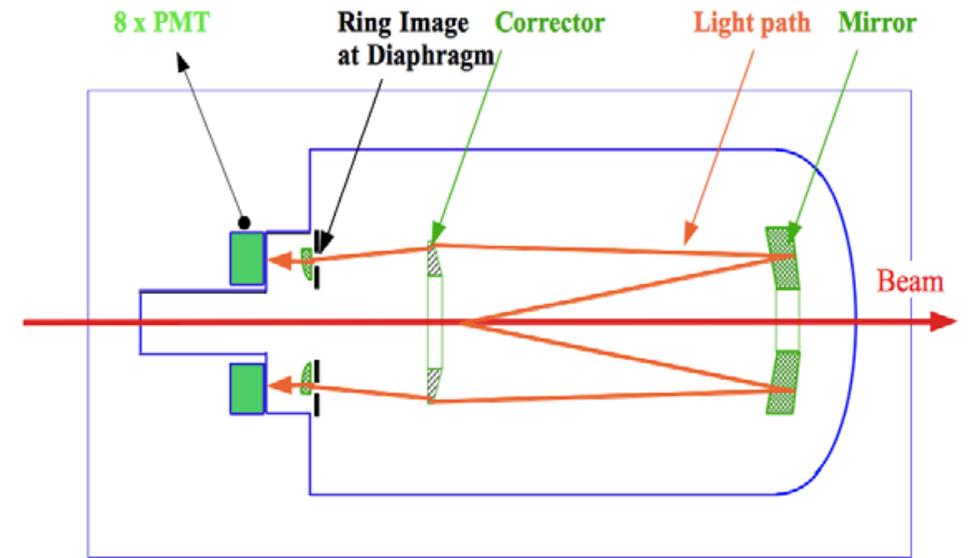


Dimensioni:

- 18000 pixel/stazione (200 x 90)
- 300 x 300 μ m²
- spessore = 500 μ m (< 0.5% X_0)
- Area totale = 62.8 x 27 mm²
- 4 stazioni (3 fino al 2018)

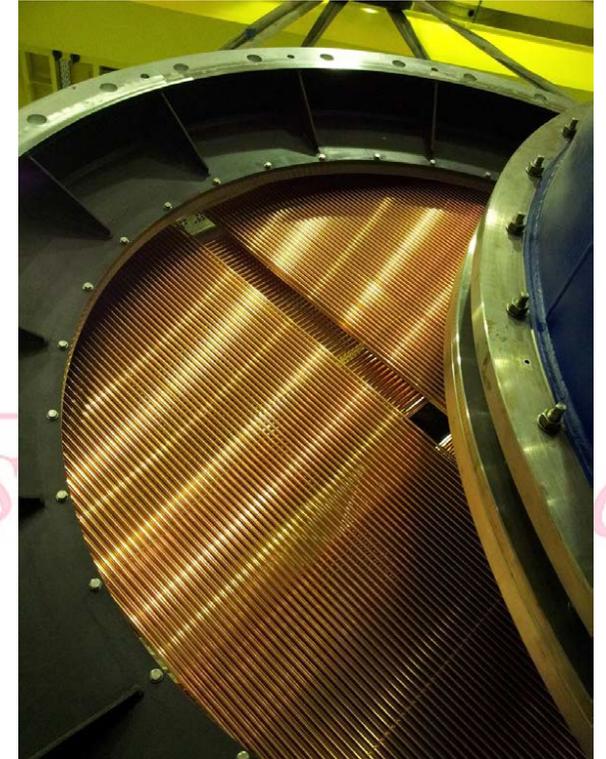
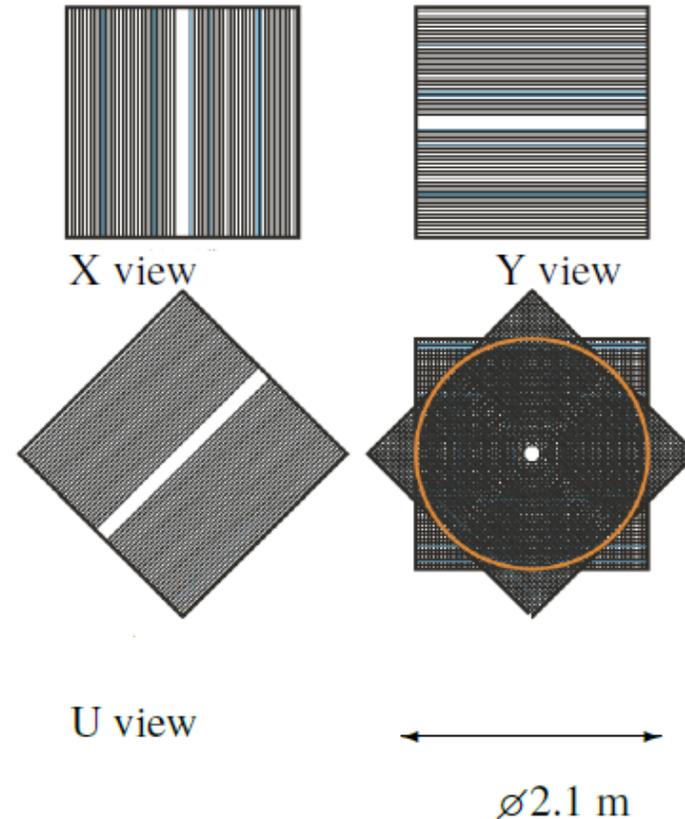
KTAG

- Riempito con azoto o idrogeno
- totale di $3.5 \times 10^{-2} X_0$ ($7 \times 10^{-3} X_0$) di materiale usando l'azoto (idrogeno)
- Risoluzione temporale = 70 ps



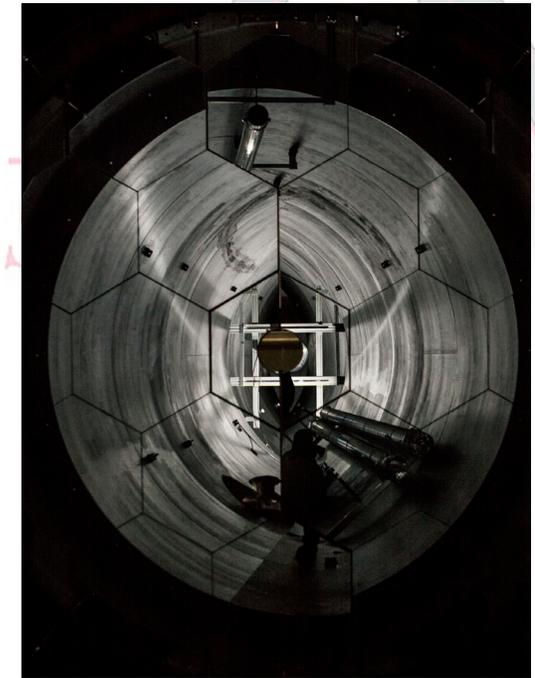
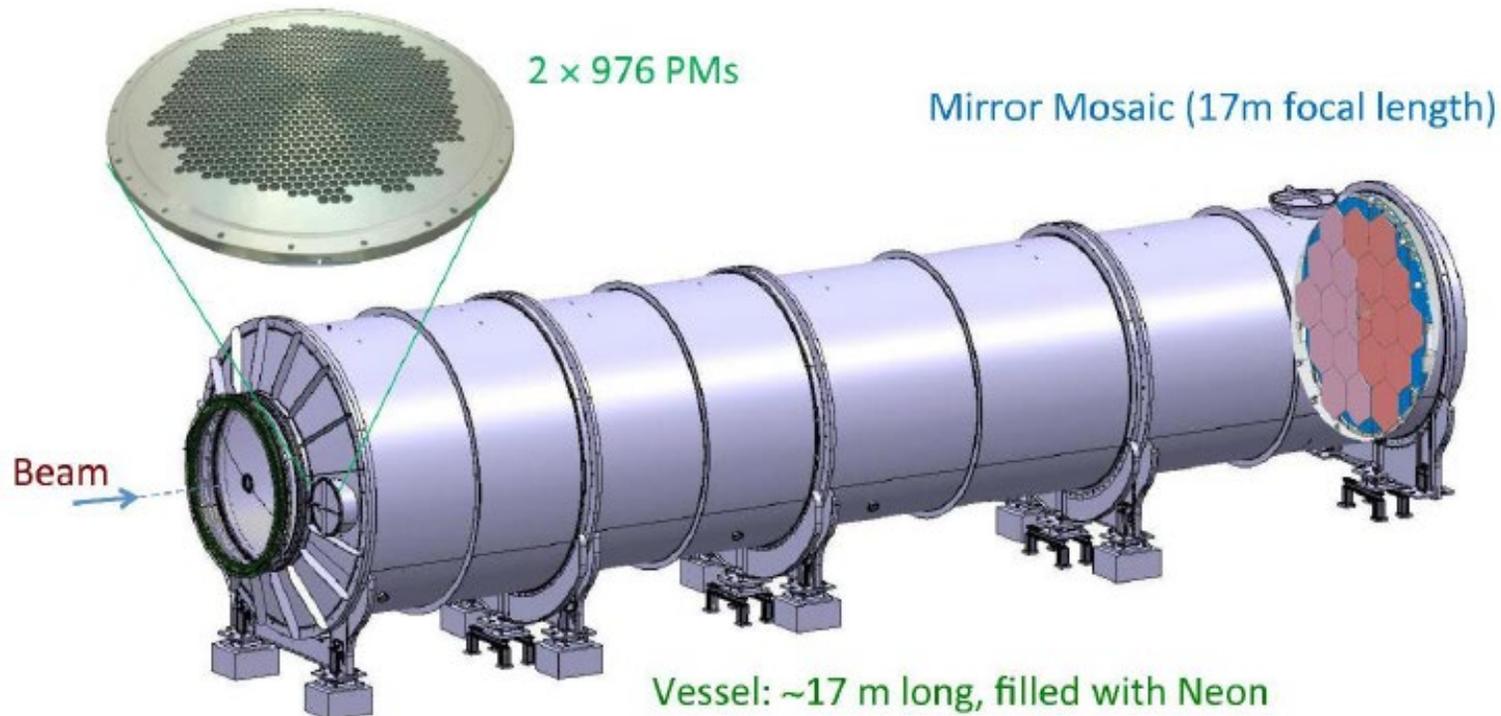
Straw Tracker

- Straws ultra-fini installate nel vuoto
- 4 camere con ognuna 4 viste
- Ottima risoluzione spaziale ($130\mu\text{m}$ per vista)
- Altamente efficiente
- Straws: lunghe 2.1 m
- Materiale delle straw: 50 nm Cu + 20 nm Au on $36\mu\text{m}$ of Mylar
- 7168 Straws ($4 \times 4 \times 4 \times 112$)
- Gas: Ar/CO₂ (70/30)
- Quantitativo di materiale: 1.8% of X0



RICH

- Lungo 17.5 m
- Largo 4.2 m
- 18 specchi esagonali
- Neon a circa 990 mbar
- Risoluzione temporale < 100 ps



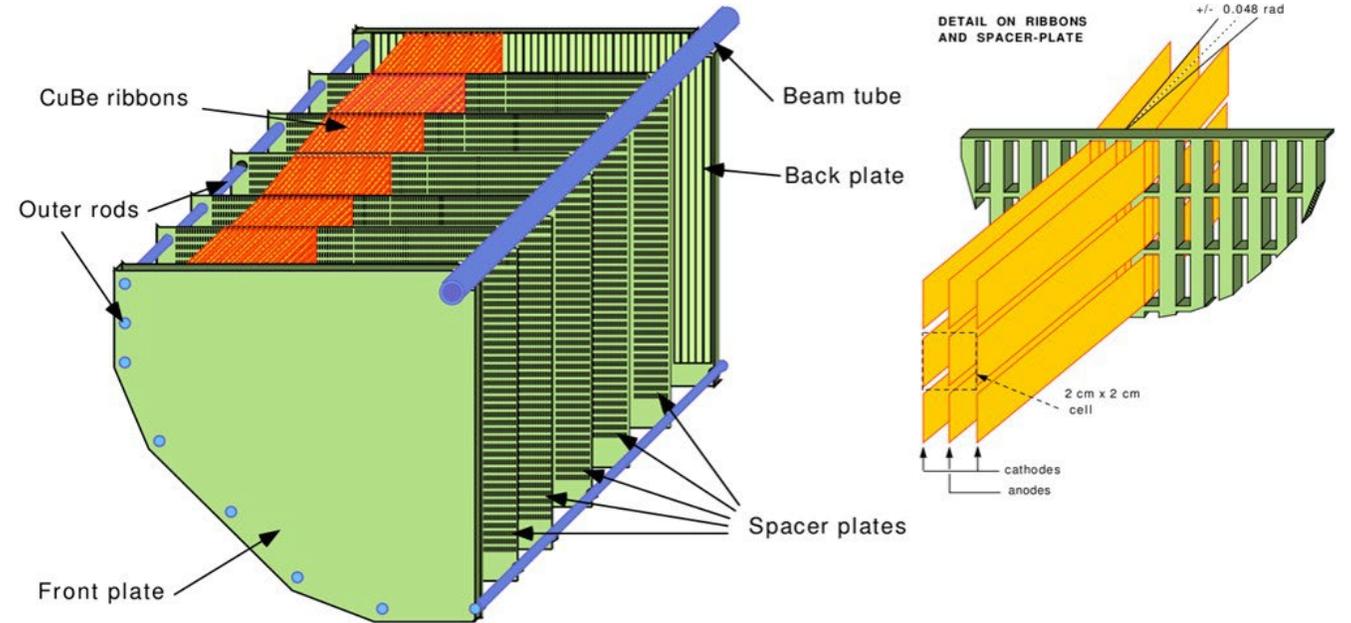
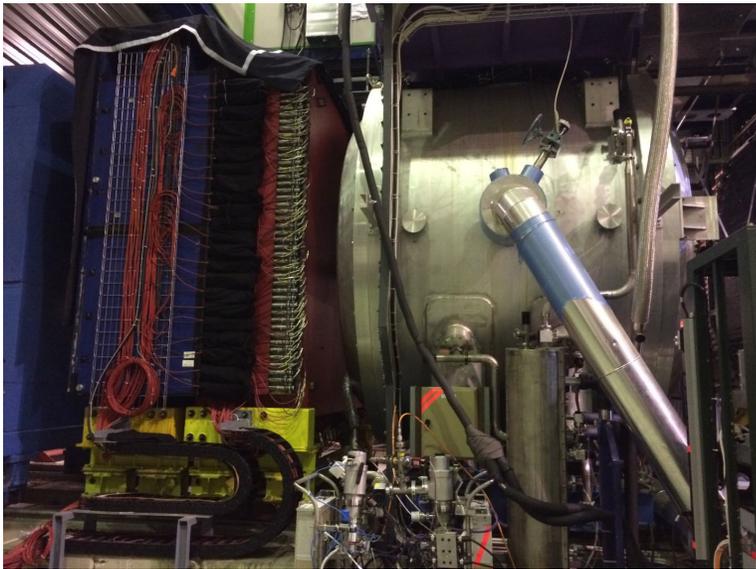
Large-angle veto system (LAV)

- 12 stazioni
- Copertura geometrica piena tra 8.5 to 50 mrad
- Solo nello 0.2% dei $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, decaduti nella zona fiduciale ha un fotone fuori accettazione
- inefficienza $< 10^{-4}$



Calorimetro a Krypton Liquido (LKr)

- Calorimetro quasi-omogeneo
- Riempito con ~9000 litri di kripton liquido a 120 K
- profondo 127 cm (27 X₀)
- 13248 celle longitudinali di 2 x 2 cm²



$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.032}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.09}{E} \oplus 0.0042 \text{ GeV}$$

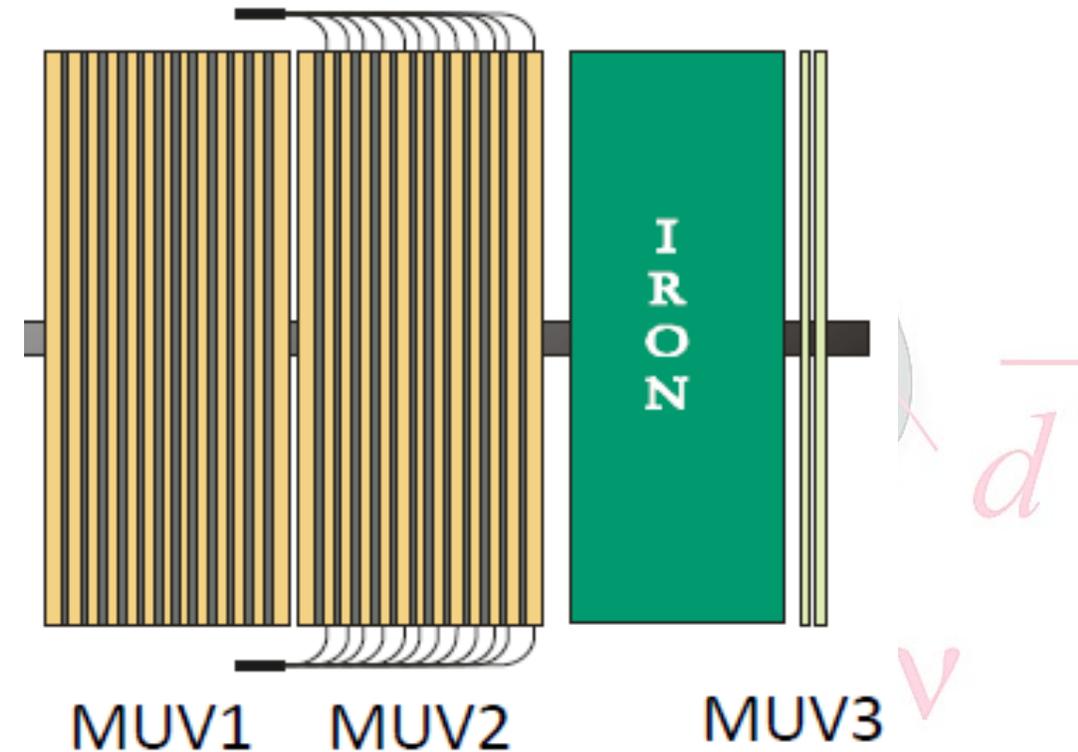
Muon Veto

MUV 1 + 2

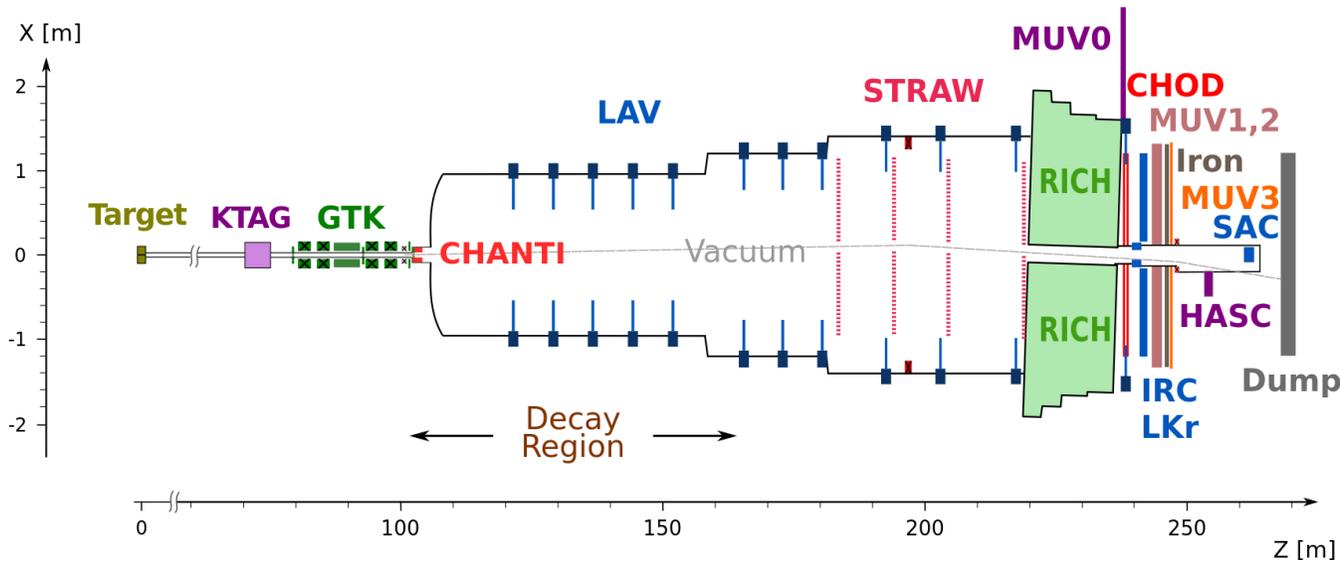
- Sandwich di ferro/scintillatori
- 24(MUV1) and 22(MUV2) strati
- Strisce scintillanti alternate verticalmente e orizzzontalmente

MUV3

- Situato dopo 80 cm di ferro
- Usato come trigger veloce per i muoni
- Piastrelle scintillanti + PMT



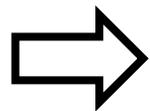
Migliorie per il RUN2



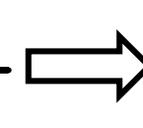
Background	N(exp) 2018 (S2)
Upstream	$2.76^{+0.90}_{-0.70}$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	0.52 ± 0.05
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	0.45 ± 0.06
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$	0.41 ± 0.10
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	0.17 ± 0.08
Total	$4.31^{+0.91}_{-0.72}$

Per ridurre i fondi
Più importanti:

1. Fondi dal fascio
2. $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$



- Una nuova stazione del GTK: **GTK0**
- Abbiamo migliorato la PID: K^+ - **KTAG**, π^+ - **RICH**, Calorimeters (**LKr**, **MUV1,2**), **MUV3** (μ -detector) \rightarrow random veto and acceptance
- Nuovi veti: upstream (**VetoCounter**, **ANTI0**) and downstream **HASC2**
- Un nuovo collimatore
- Un nuovo elaboratore di trigger L0: **LOTP+**
- Nuovi algoritmi di trigger L1: **STRAW** and **LAV**



- Efficienza di trigger
- Sfruttamento della banda

inoltre:

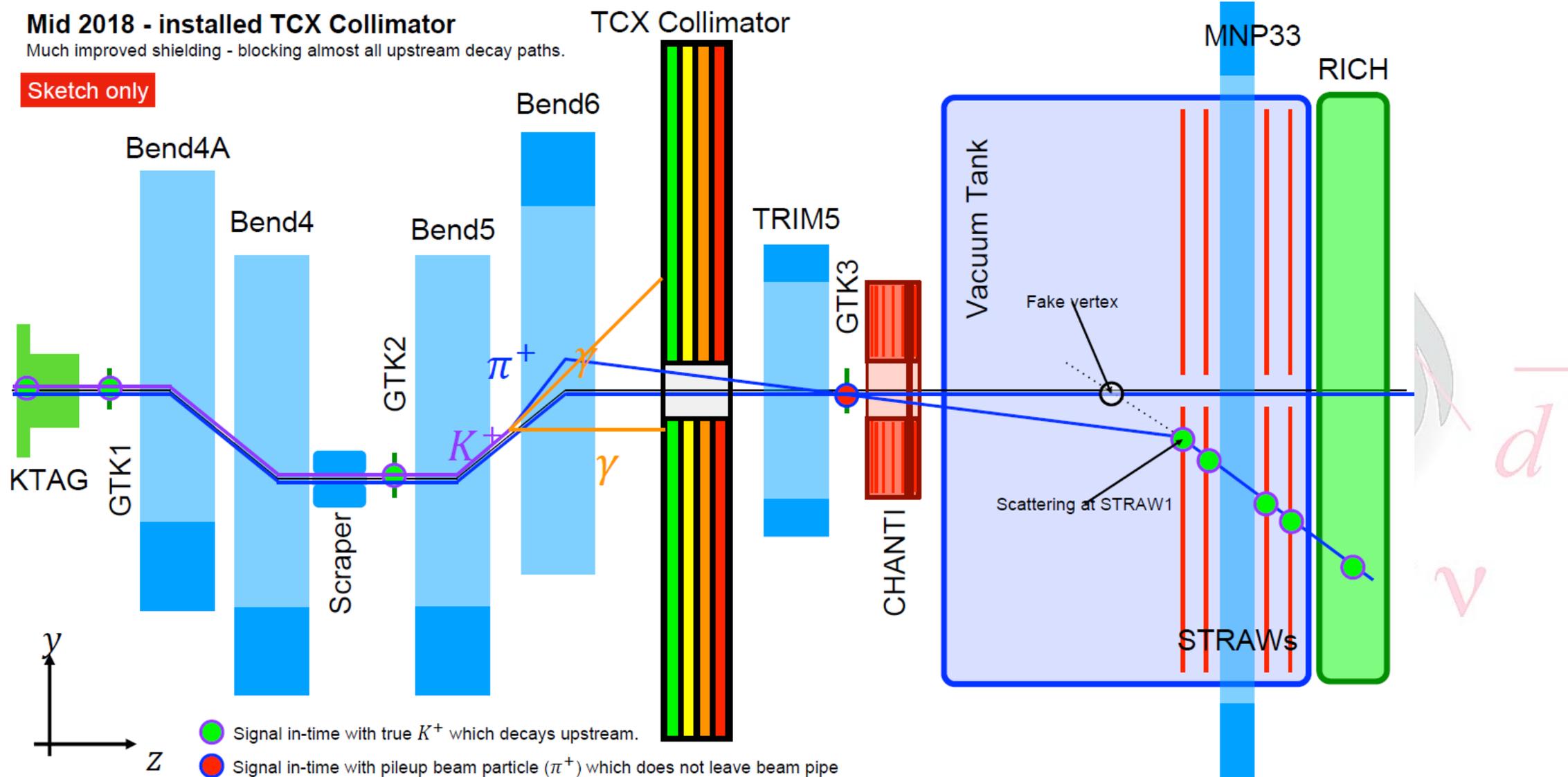
- L'intensità è cresciuta di $\sim 35\%$ rispetto al 2018 [450 \rightarrow 600 MHz].
- Abbiamo migliorato la configurazione del trigger.

new collimator

Mid 2018 - installed TCX Collimator

Much improved shielding - blocking almost all upstream decay paths.

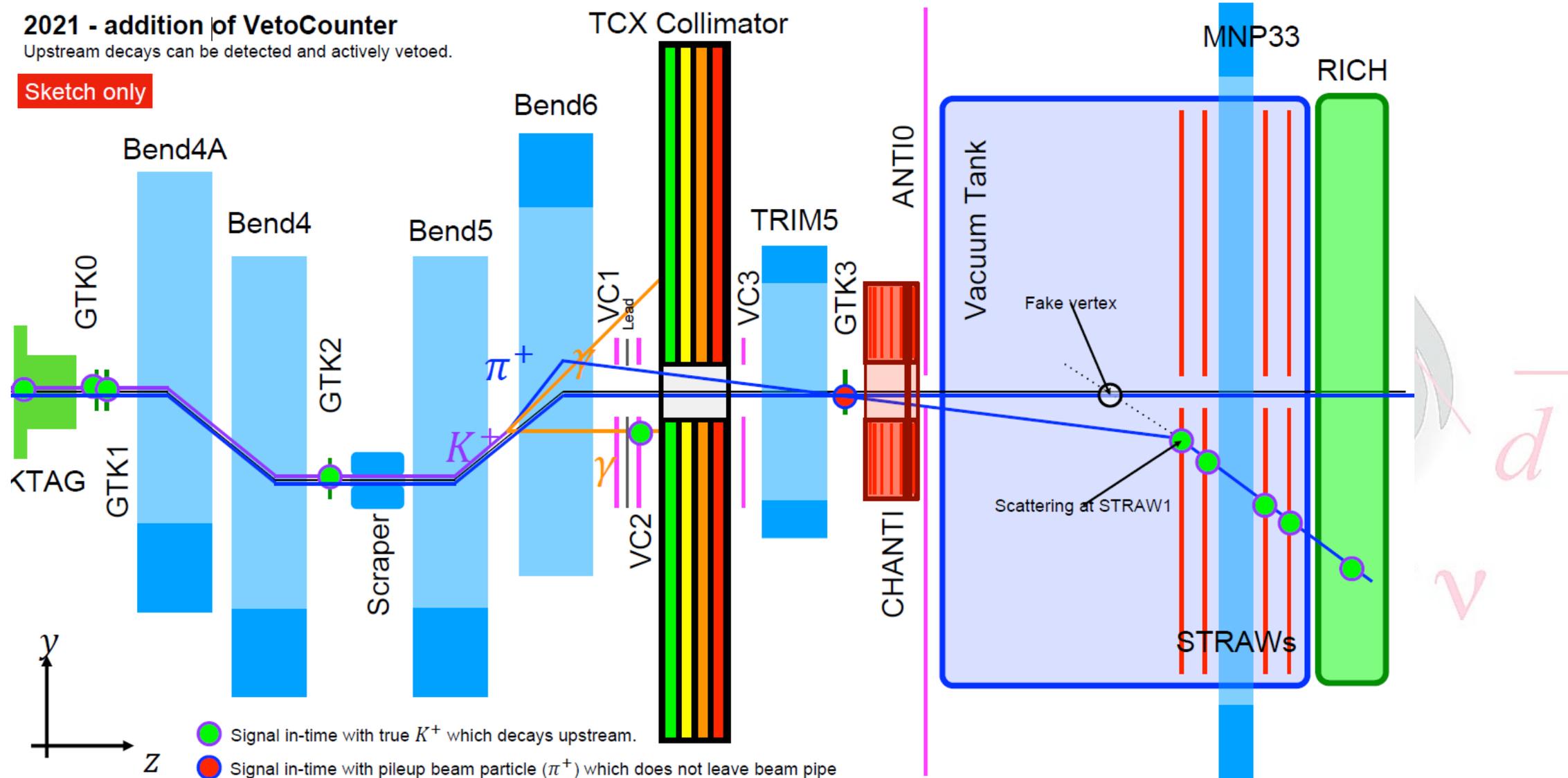
Sketch only



New Upstream Vetoes

2021 - addition of VetoCounter
 Upstream decays can be detected and actively vetoed.

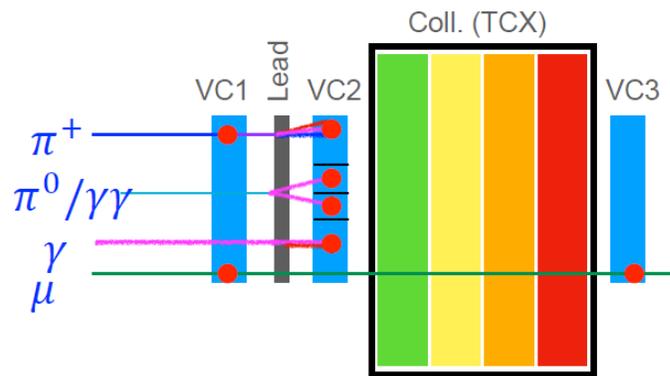
Sketch only



New upstream vetos: VetoCounter & ANTI0

VetoCounter

- Rivela le particelle decadute prima del collimatore.
- Fattore di reiezione ~ 3 con $\sim 2\%$ di veto accidentale.



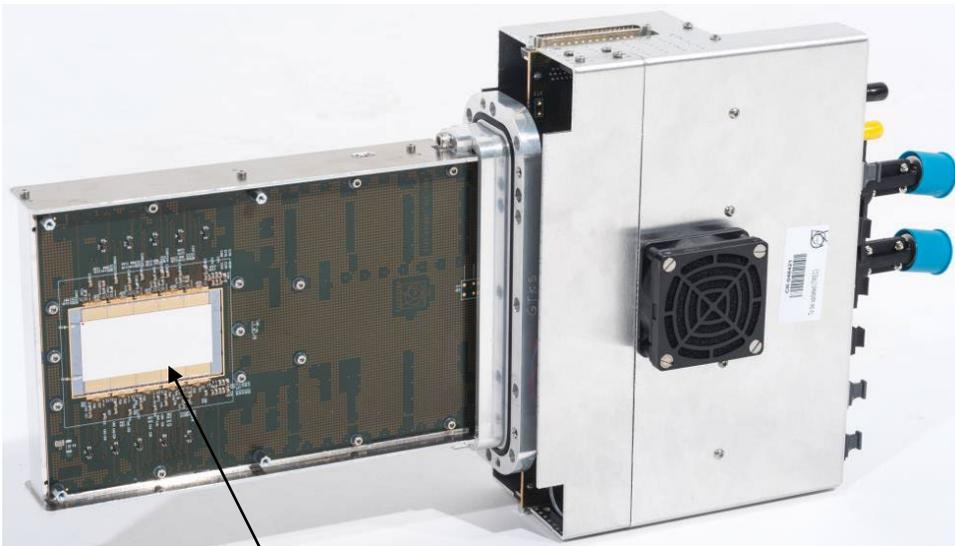
ANTI0

- Rivela particelle fino a ~ 1 m dalla linea del fascio.
- **elimina** $\sim 20\%$ del fondo dovuto al fascio con **<1%** di perdite di segnale.

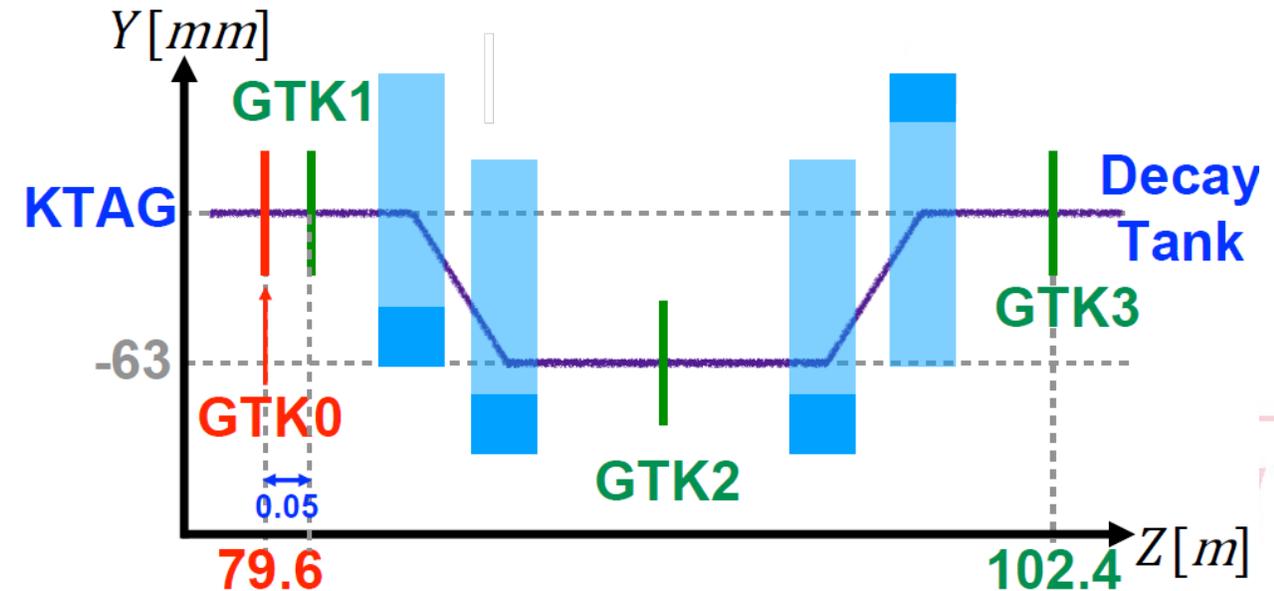


4th GTK station

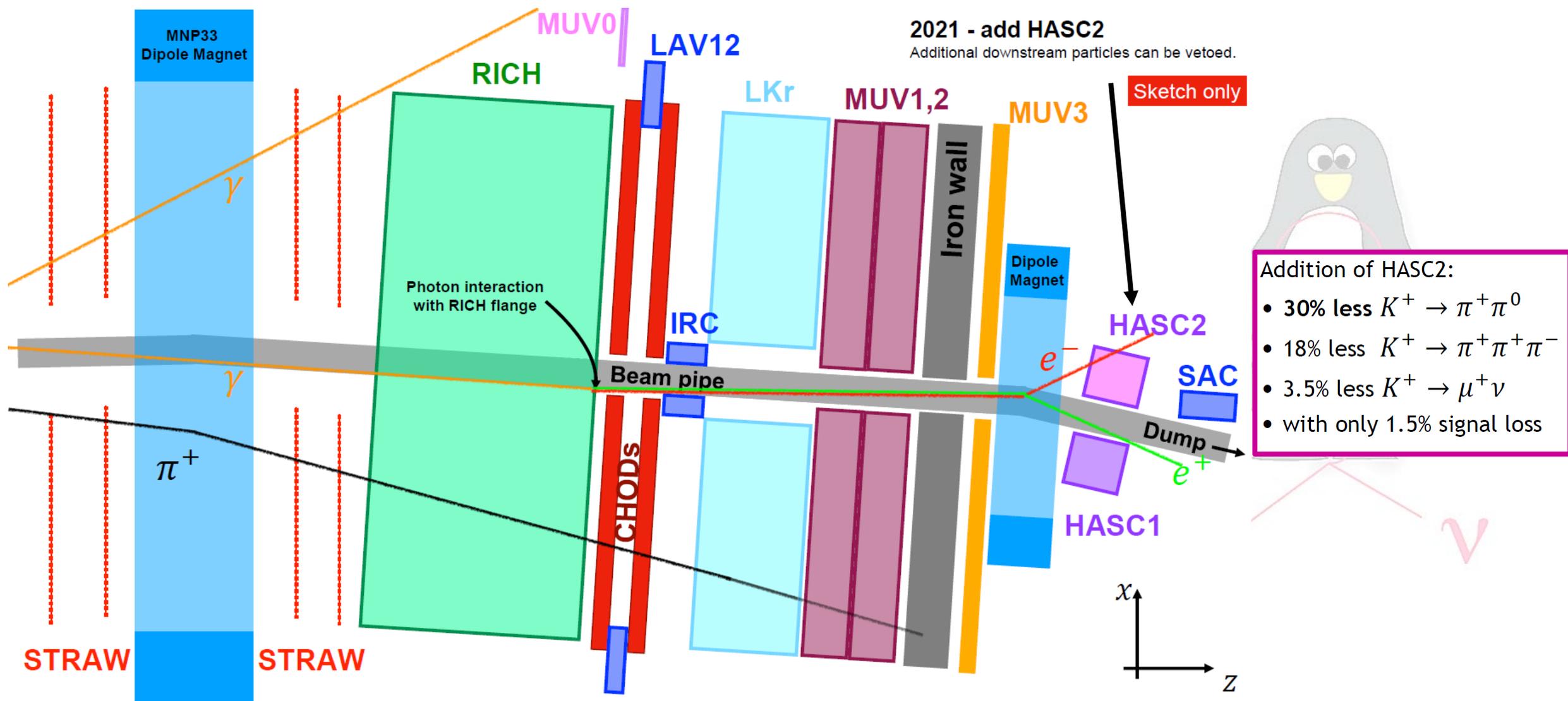
- Rivelatore con Pixel di Si esposto a $\sim 1\text{GHz}$ di particelle.
- Essenziale per l'associazione $K^+ - \pi^+$.
- Misura 3-mom ed il tempo del K^+
- La 4° GTK migliora l'efficienza e riduce gli errori di associazione



Si Pixels $\sim (30 \times 60 \text{ mm active area})$



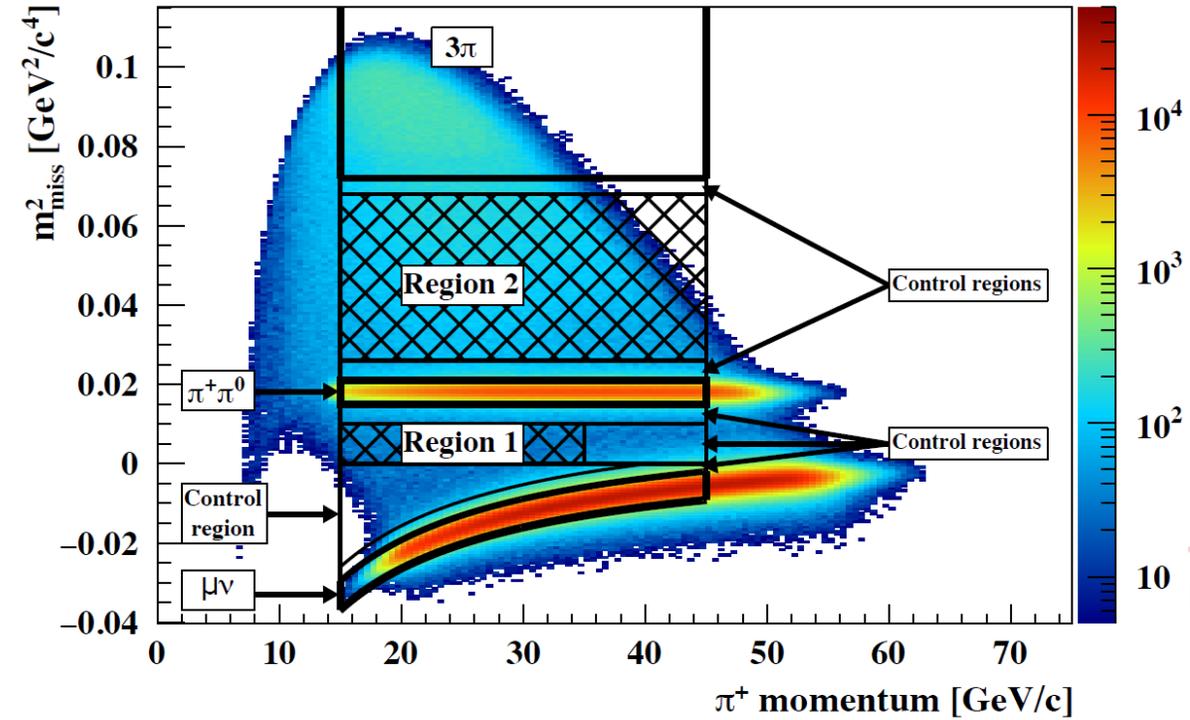
New downstream Veto



Strategia di analisi del $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

Punti chiave:

- I decadimenti hanno un grande boost di Lorentz ($\gamma \sim 150$)
- è presente una grande energia mancante (neutrini)
- tutta l'energia delle altre particelle deve essere misurata
- i rivelatori devono fornire una copertura angolare ermetica
- Il segnale viene valutato in 2 regioni di m_{miss}^2
- $15 < P_{\pi^+} < 45$ GeV/c
- la zona di decadimento fiduciale è di 60 m



Performance:

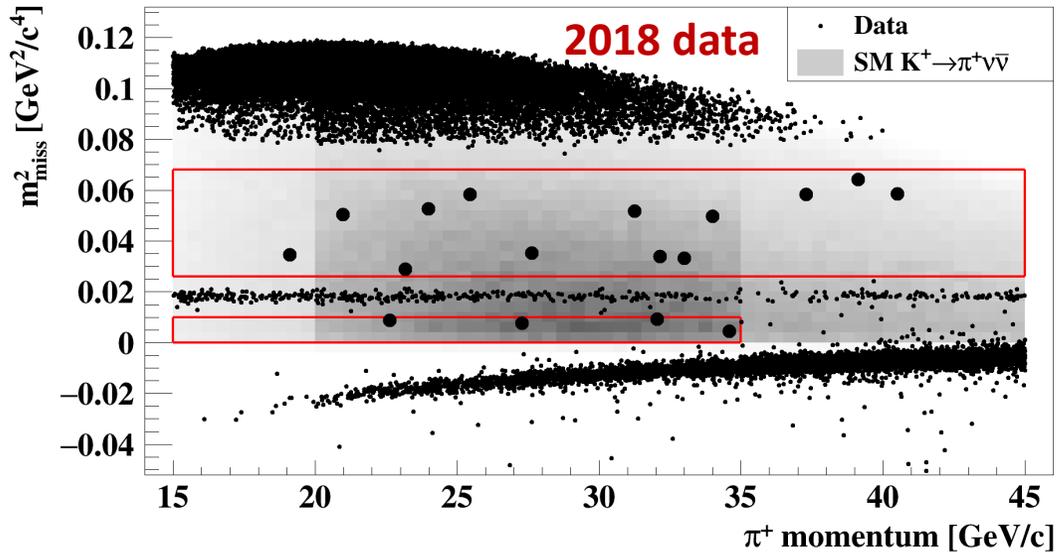
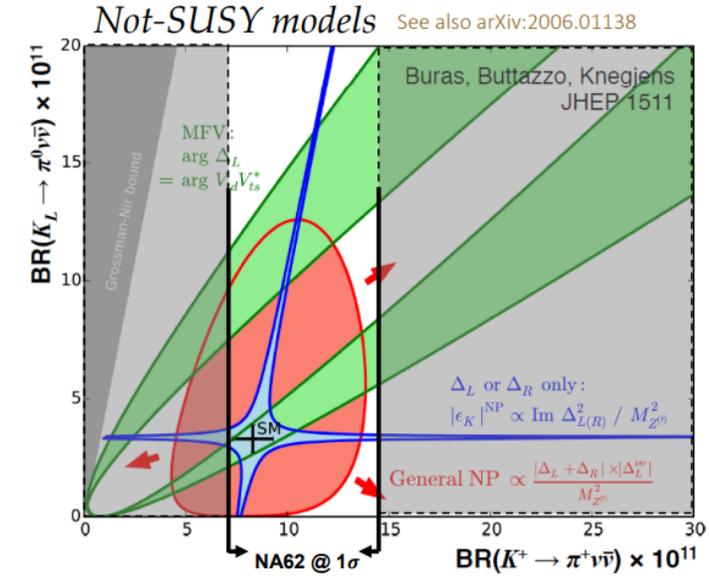
- $10^{-3} \text{ GeV}^2/c^4$ risoluzione sulla m_{miss}^2
- $> 10^3$ soppressione cinematica dei fondi
- $> 10^8$ soppressione sui muoni
- $> 10^8$ soppressione sui π^0 (from $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$)
- $O(100 \text{ ps})$ risoluzione temporale sugli eventi

Process	Branching ratio
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 (\gamma)$	0.2067
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu (\gamma)$	0.6356
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	0.0558
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$	$4.25 \cdot 10^{-5}$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$: RUN1 result (2016 -2018)

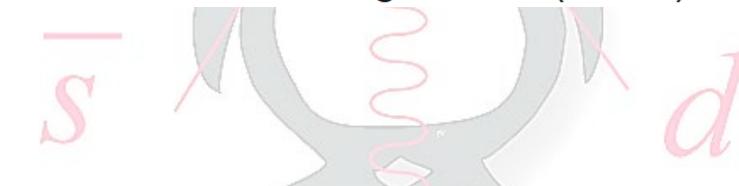
Data-taking year	[Reference]	N_{bg}	$N_{\pi\nu\bar{\nu}}^{SM,exp}$	N_{obs}
2016	[PLB 791 (2019) 156]	$0.152^{+0.093}_{-0.035}$	0.267 ± 0.020	1
2017	[JHEP 11 (2020) 042]	1.46 ± 0.33	2.16 ± 0.13	2
2018	[JHEP 06 (2021) 093]	$5.42^{+0.99}_{-0.75}$	7.58 ± 0.40	17
2016–18	[JHEP 06 (2021) 093]	$7.03^{+1.05}_{-0.82}$	10.01 ± 0.42	20

$N_{\pi\nu\bar{\nu}}^{SM,exp}$ assumes:
 $B_{\pi\nu\bar{\nu}}^{SM} = 8.4 \times 10^{-11}$

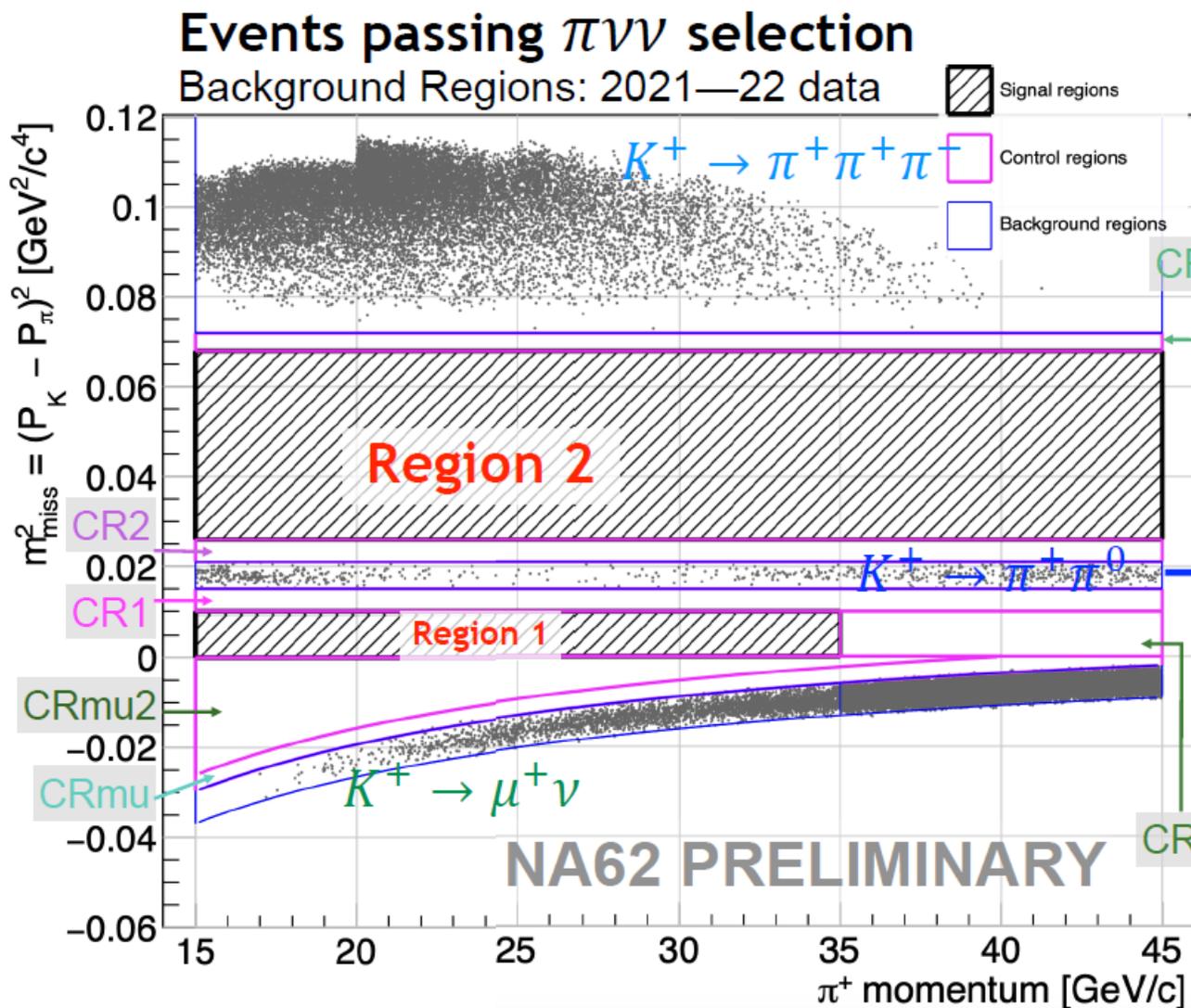


$$B(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6^{+4.0}_{-3.4} |_{stat} \pm 0.9 |_{syst}) \times 10^{-11} @ 68\% CL$$

$$\text{Background-only hypothesis: } p = 3.4 \times 10^{-4} \Rightarrow \text{significance} = 3.4\sigma$$



Valutazione del fondo, dati 21-22



Backgrounds from kinematic misconstruction tails in m_{miss}^2

Number of events passing signal selection in background region

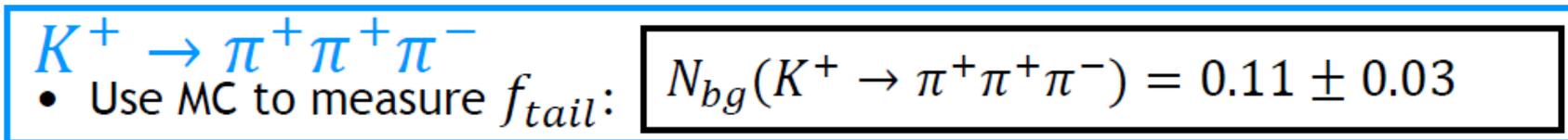
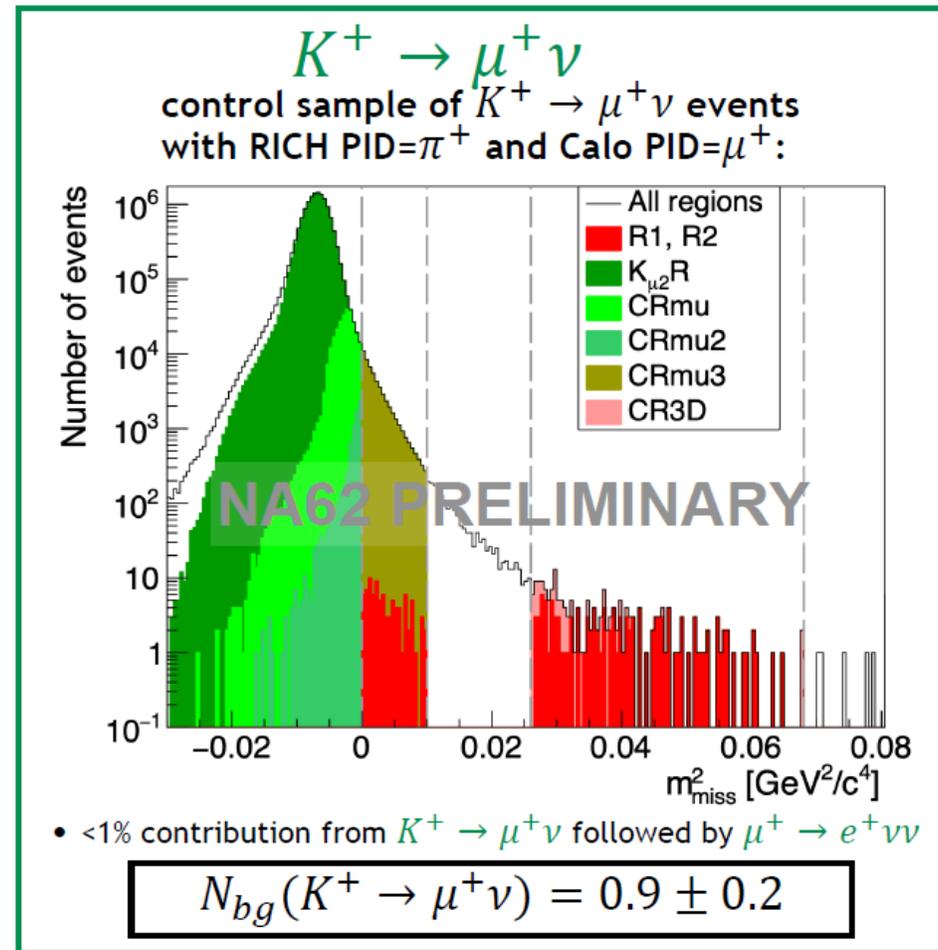
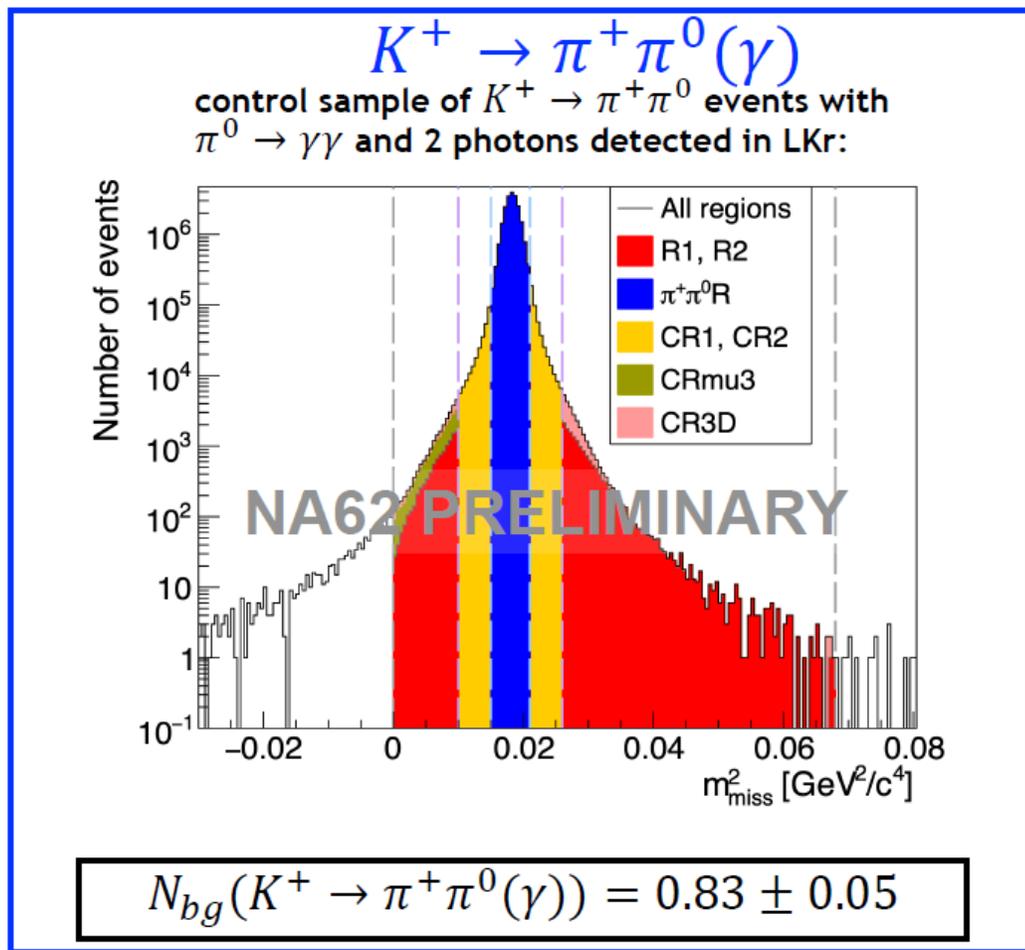
$$N_{bg} = N_{bkgR} \cdot f_{tail} = N_{bkgR} \cdot \frac{N_{SR}^{CS}}{N_{bkgR}^{CS}}$$

Kinematic tail fraction: measured in control sample

Control sample events in Signal Regions

Control sample events in Background Region

Fondo dovuto alle code cinematiche



Fondi attesi

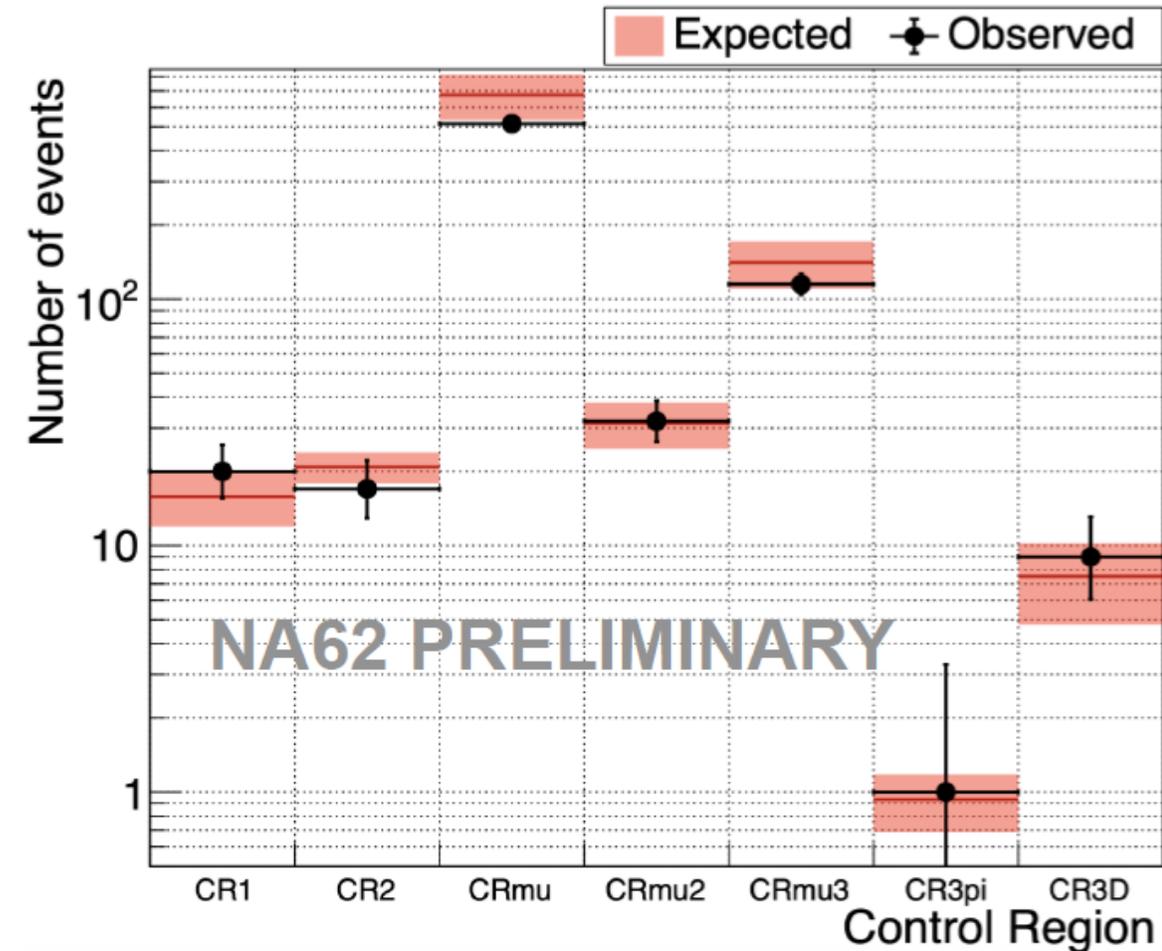
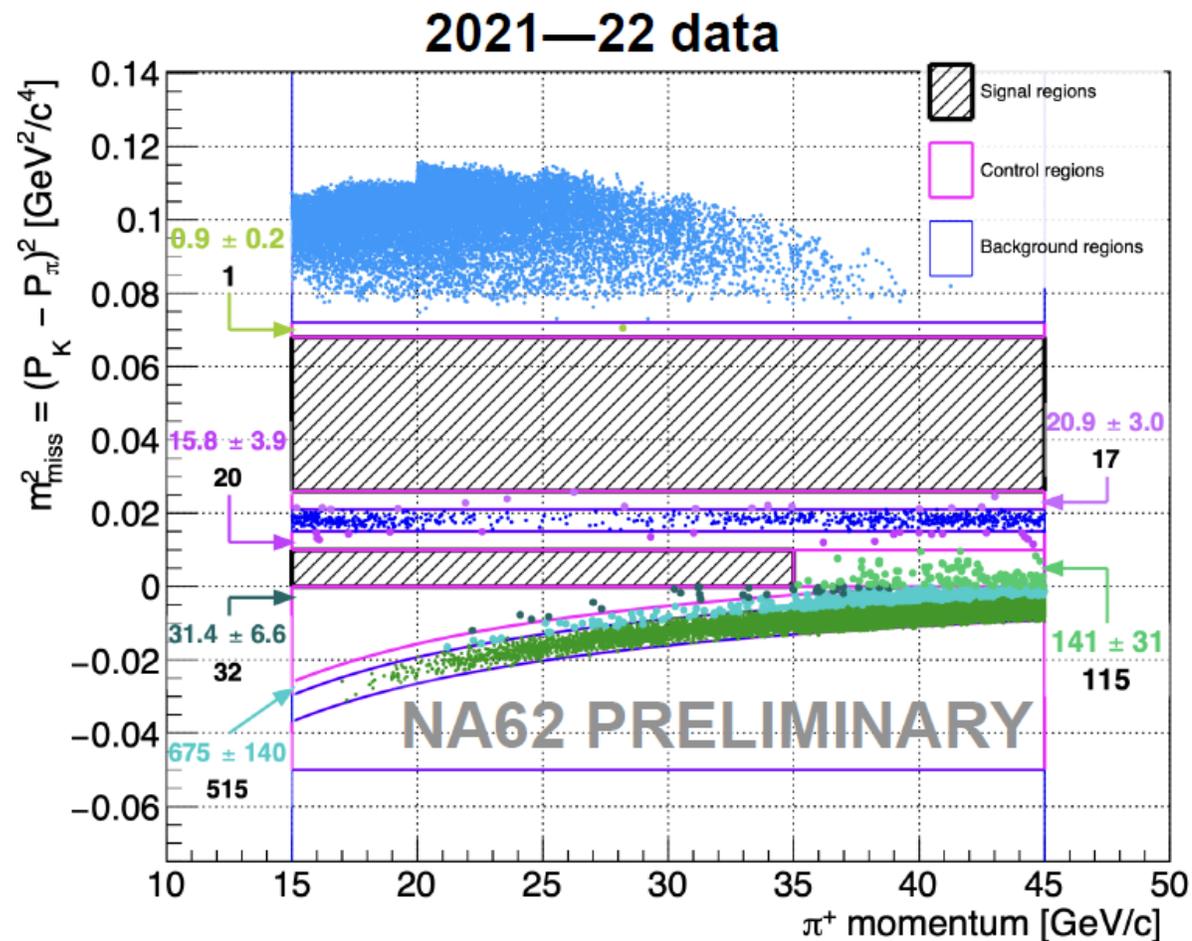
Backgrounds

$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0(\gamma)$	0.83 ± 0.05
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	0.76 ± 0.04
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$	0.07 ± 0.01
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu(\gamma)$	1.70 ± 0.47
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	0.87 ± 0.19
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$	0.82 ± 0.43
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	0.11 ± 0.03
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$	$0.89^{+0.34}_{-0.28}$
$K^+ \rightarrow \pi^0 \ell^+ \nu$	< 0.001
$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$	0.01 ± 0.01
Upstream	$7.4^{+2.1}_{-1.8}$
Total	$11.0^{+2.1}_{-1.9}$

Eventi di segnale attesi $N_{\pi\nu\nu} = 10.00 \pm 0.34$

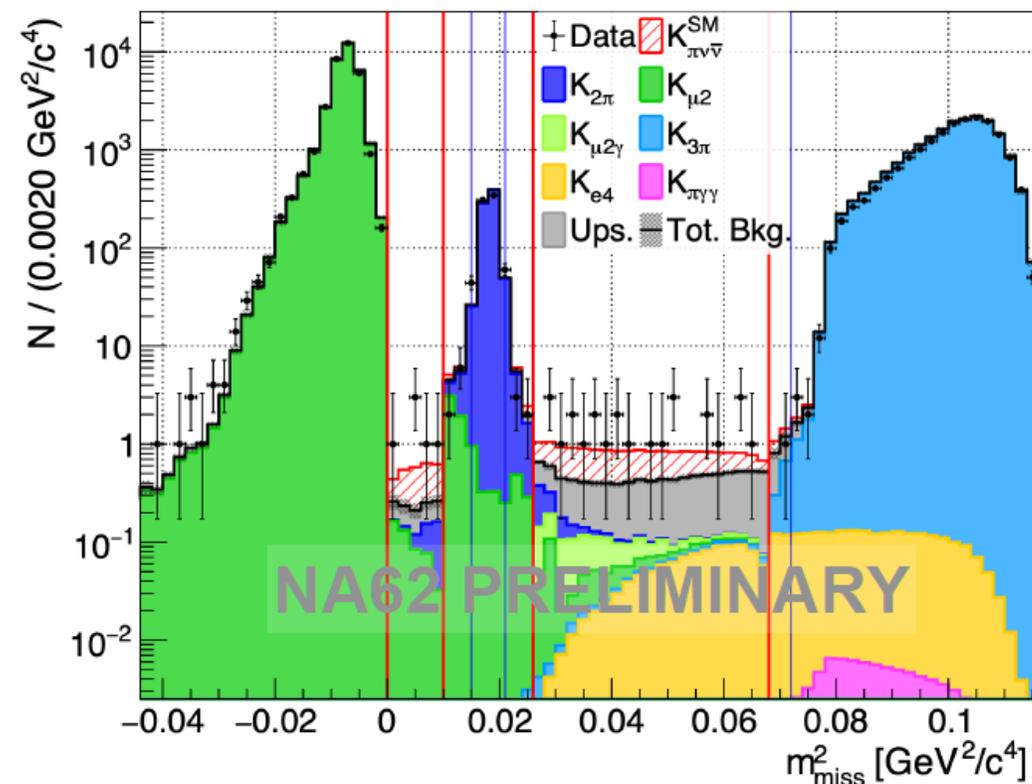
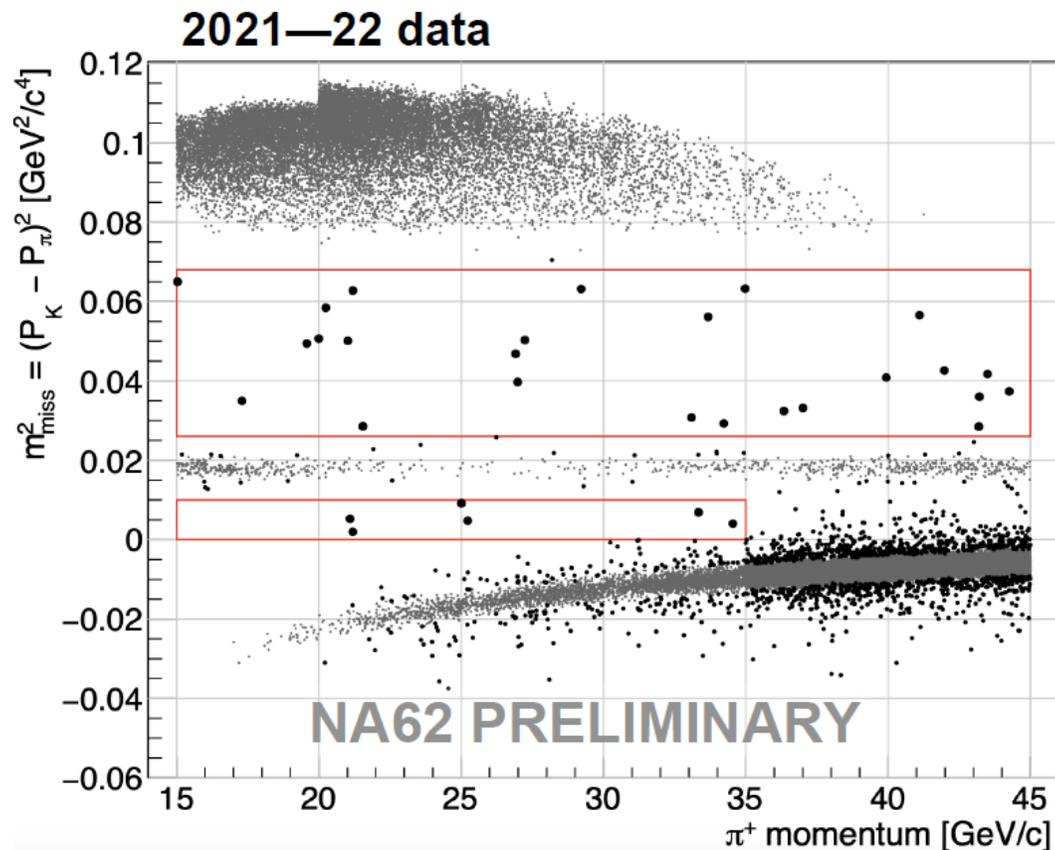
- $N_{\pi\nu\nu}^{SM}$ per impulso del SPS: 2.5×10^{-5} in 2022
- c.f. 1.7×10^{-5} nel 2018. \Rightarrow un aumento di circa il 50%

Regioni di controllo



I dati sono in accordo con le attese nelle varie regioni di controllo

Risultato: dati 2021-22



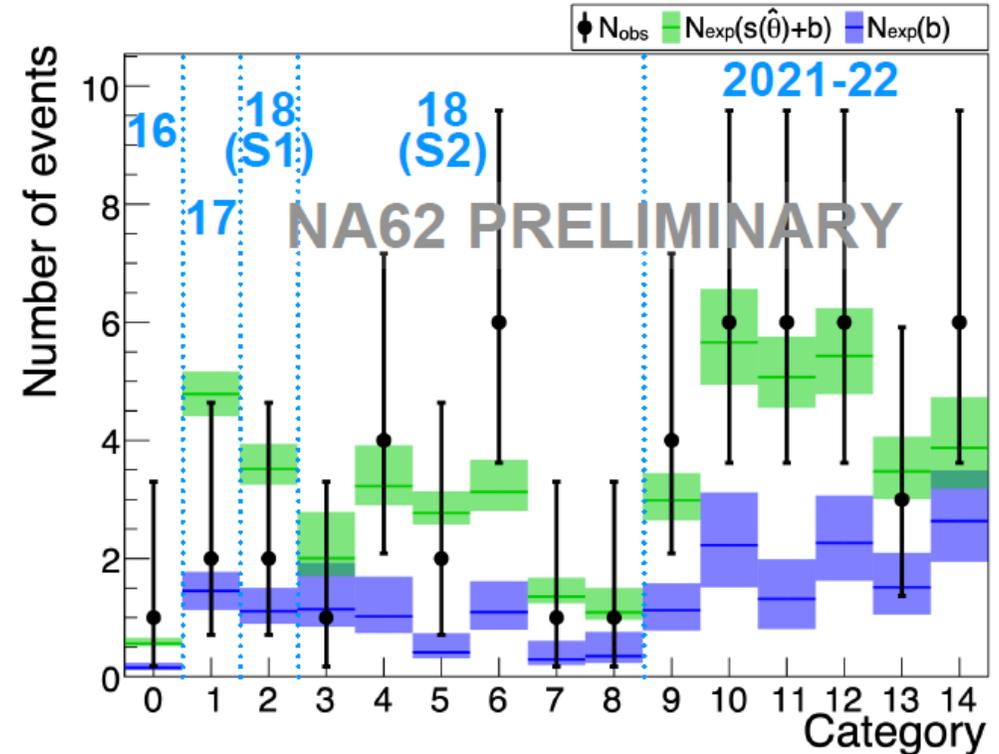
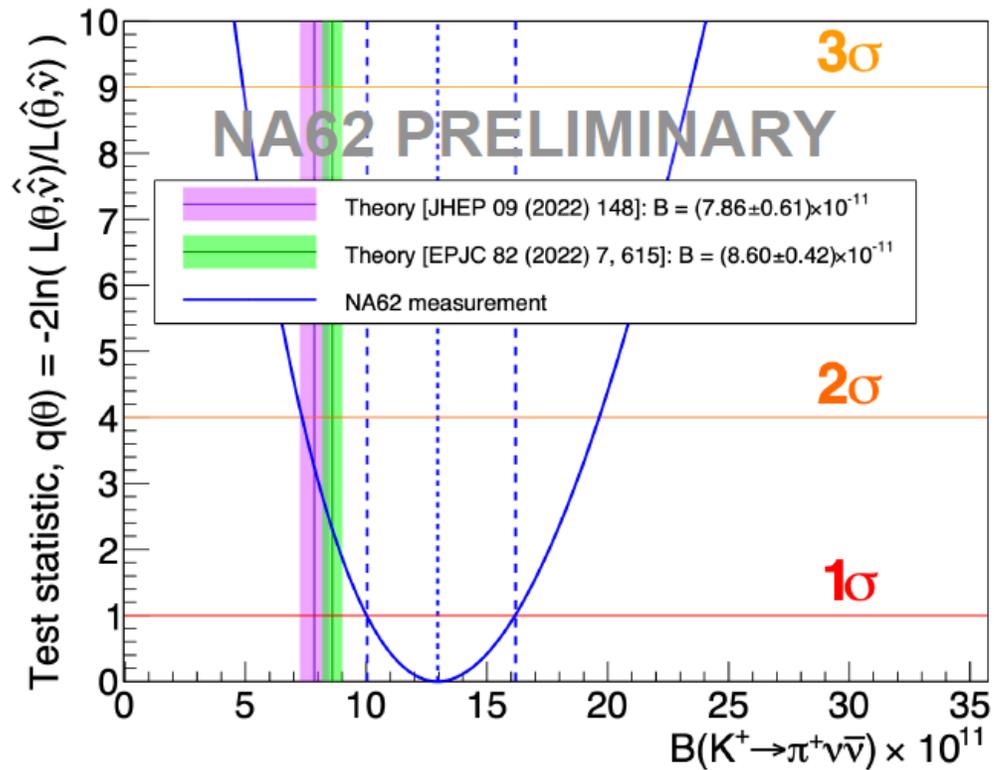
Segnale atteso per il MS $N_{\pi\nu\bar{\nu}}^{SM} = 10.00 \pm 0.34$
 Fondi attesi: $N_{bg} = 11.0^{+2.1}_{-1.9}$

osservati: $N_{obs} = 31$

$$\mathcal{B}_{21-22}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (16.0^{+5.0}_{-4.5}) \times 10^{-11} = (16.0^{(+4.8)}_{(-4.2)}_{stat} \quad ^{(+1.4)}_{(-1.3)}_{syst}) \times 10^{-11}$$

Combinando i risultati: 2016-22

Integrando su 2016—22: $N_{bg} = 18_{-2}^{+3}$, $N_{obs} = 51$

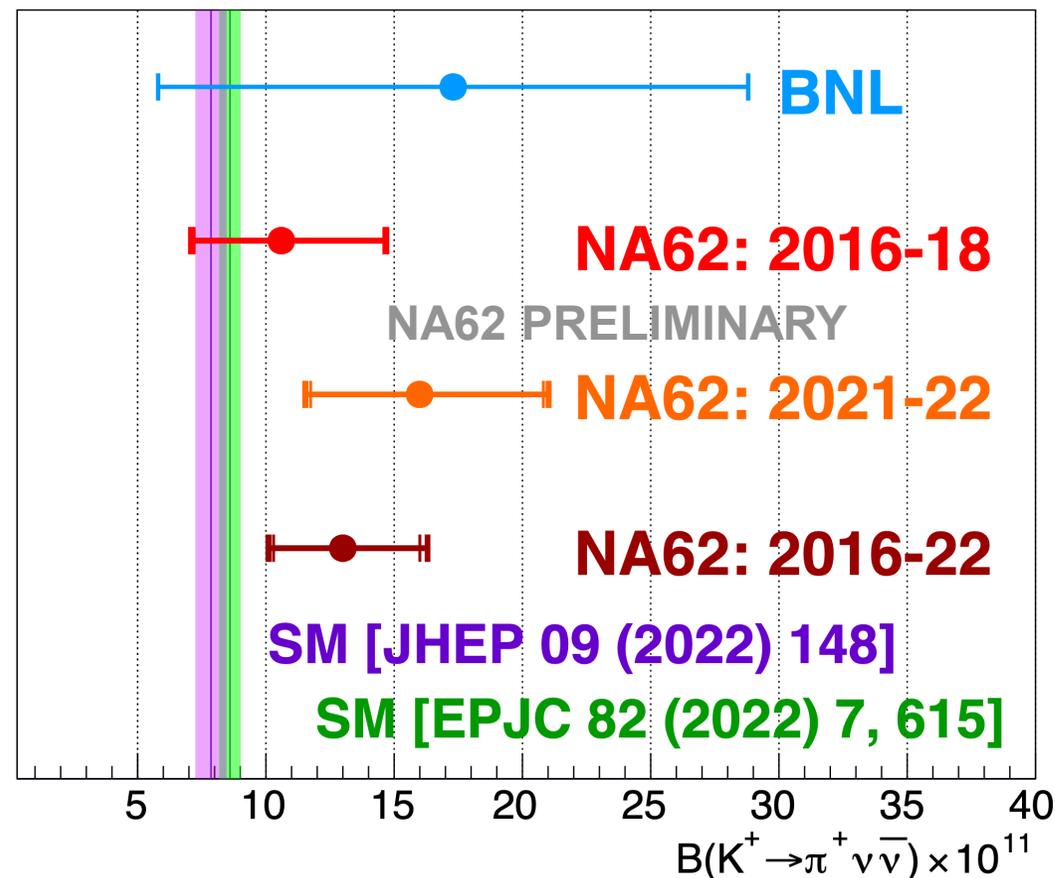
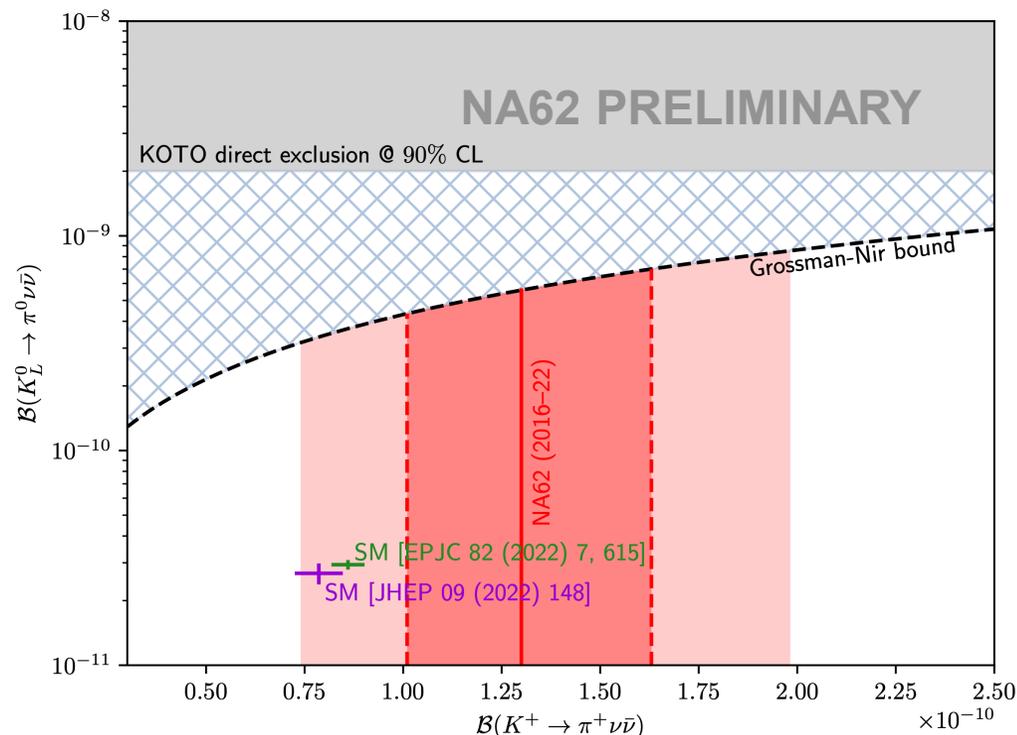


$$\mathcal{B}_{16-22}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (13.0_{-2.9}^{+3.3}) \times 10^{-11} = (13.0_{-2.7}^{+3.0})_{stat} (-1.2_{-1.2}^{+1.3})_{syst} \times 10^{-11}$$

Nell'ipotesi che sia presente solo il fondo: $p\text{-value} = 2 \times 10^{-7} \Rightarrow$ significatività $Z > 5$

Il risultato nel contesto

- I risultati dei run di NA62 sono consistenti
- Il valore centrale si è mosso in alto ($1.5\text{--}1.7\sigma$ above SM)
- L'incertezza sulla misura si è ridotta: dal 40% al 25%
- Questa è la prima osservazione del decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ (con significatività >5)
- È il decadimento più raro mai osservato



$$B_{\pi\nu\bar{\nu}}^{16-22} = (13.0_{-2.9}^{+3.3}) \times 10^{-11}$$

L'analisi del resto dei dati sarà utile per chiarire la tensione con il MS

Contributi del gruppo di Pisa: il Trigger

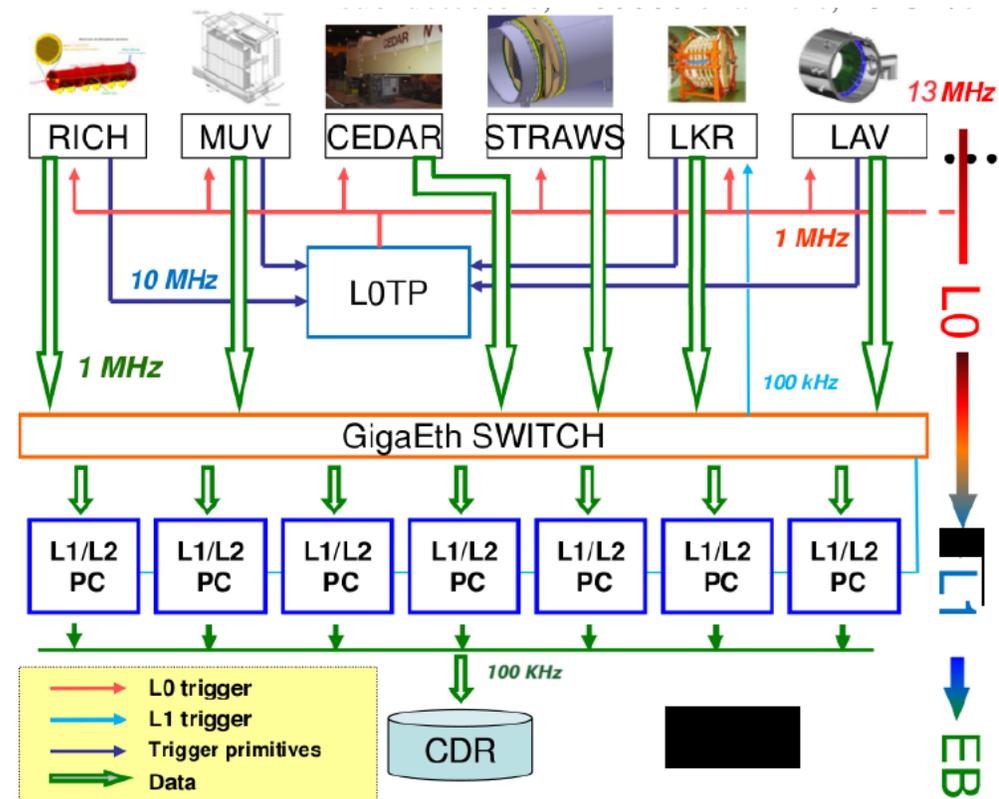
NA62 mira a misurare un decadimento molto raro $BR(\pi\nu\nu)_{\text{Buras}} = (8.60 \pm 0.42) \times 10^{-11}$

Si usa un fascio molto intenso di adroni:

- O(1) GHz
- Più di 13 MHz di decadimenti del K
- Impulsi di durata 4.8s

È necessario quindi un trigger:

- Con una buona risoluzione temporale al L0
- Deve essere veloce ma allo stesso tempo molto selettivo
- Il tempo morto deve essere ridotto al minimo



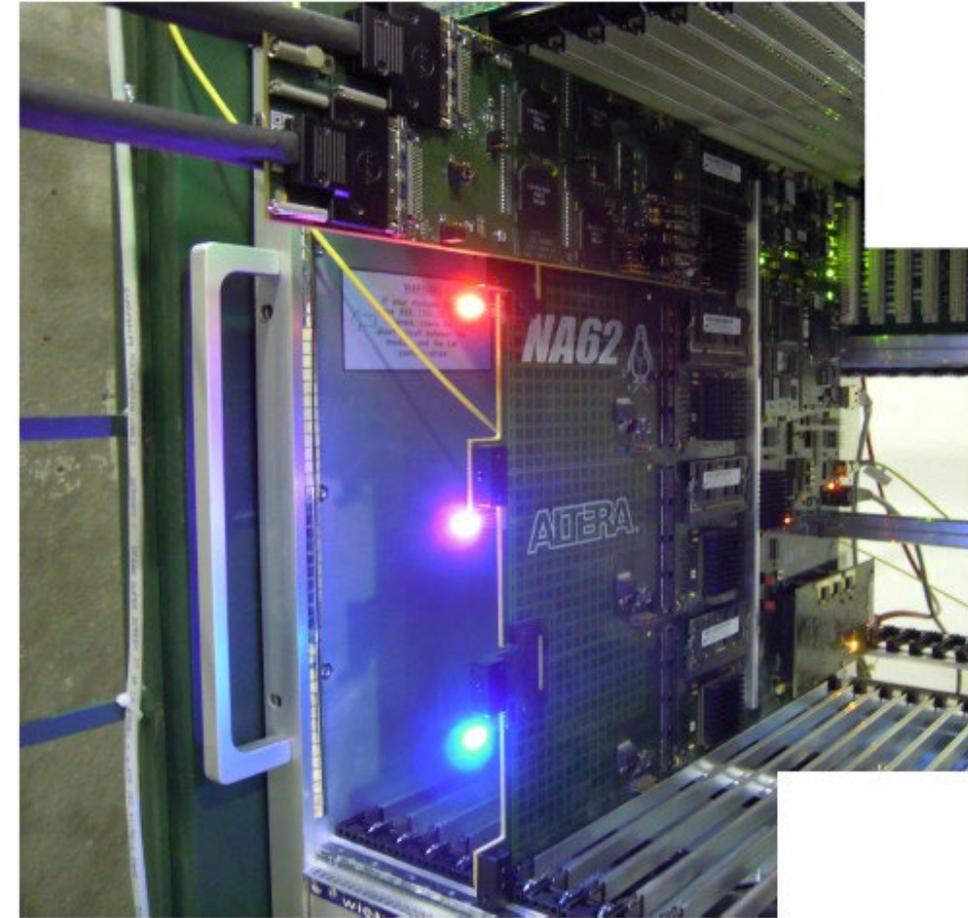
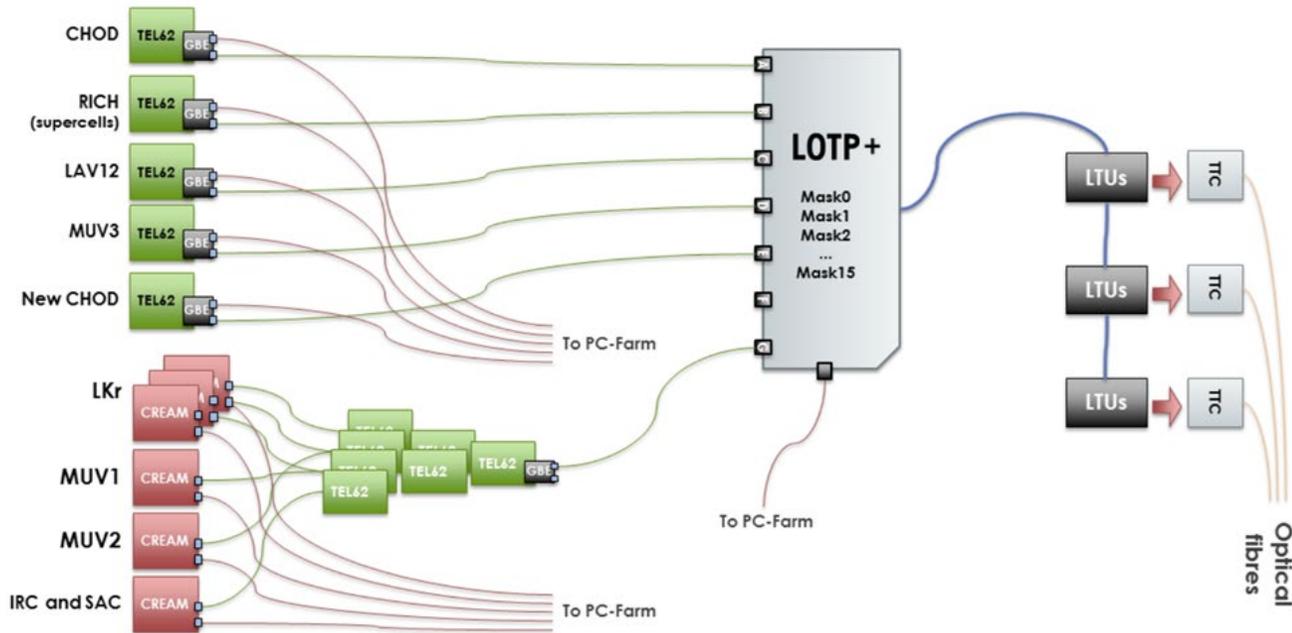
Trigger è stato composto da 2 livelli:

- Un livello hardware: **livello 0**
- Un livello software: **livello 1**

← Il gruppo di Pisa ha contribuito ad entrambi i livelli

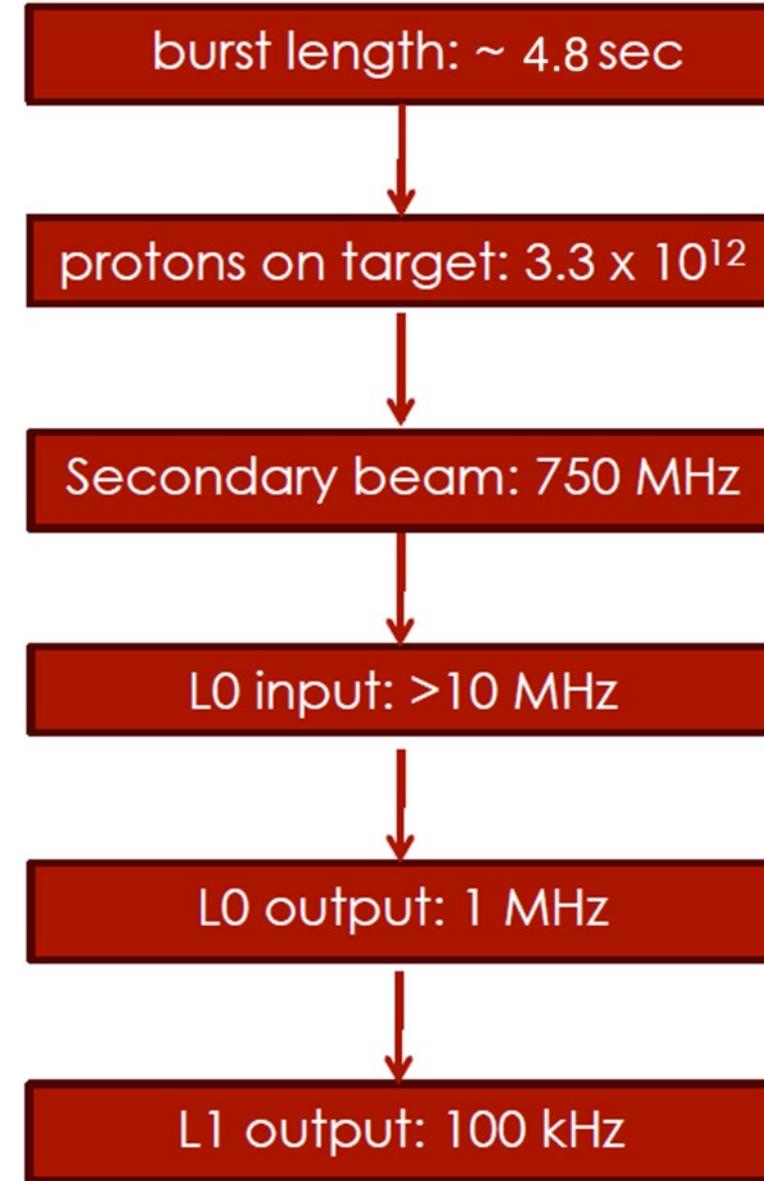
Trigger L0

- La scheda TEL62 e la sua mezzanina TDCB sono usate da quasi tutti i rivelatori per acquisire i dati e generare le primitive di trigger (**entrambe le schede sono state sviluppate a Pisa**)
- Le primitive generate dalle TEL62 sono mandate al processore del trigger di livello 0 chiamato L0TP+ (**responsabilità Pisana**);
- L0TP+ combina le primitive per generare le richieste per il trigger L0
- Tutti i rivelatori (a parte i calorimetri ed il GTK) devono rispondere al L0;
- Sono attualmente usate 10 diverse maschere di trigger.
- Efficienza del L0 $> 92\%$



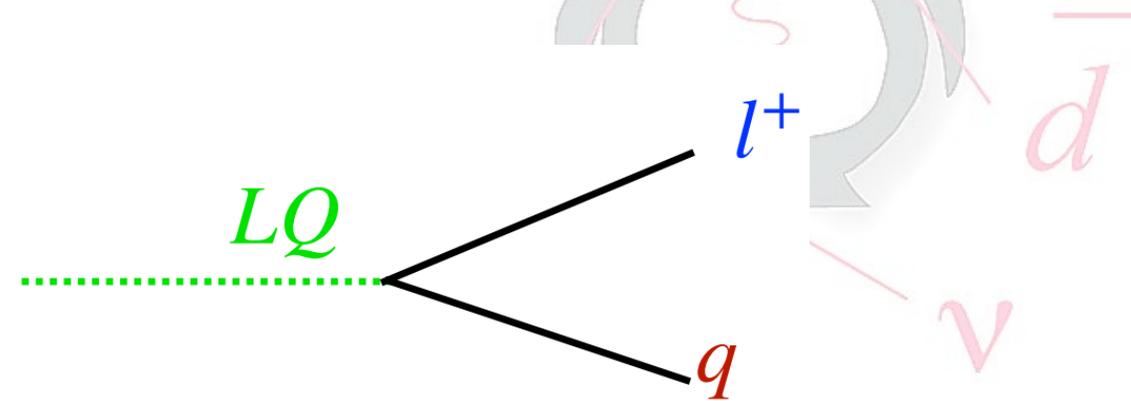
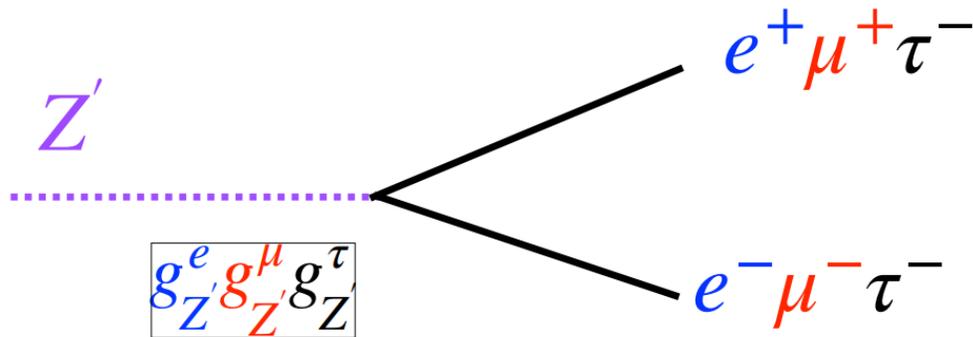
L1 Trigger

- Il trigger L1 è basato sui dati di 3 rivelatori: KTAG, LAV ed lo spettrometro (STRAW);
- Il trigger gira su un cluster di 30 computers, ognuno di loro esegue indipendentemente gli algoritmi di trigger su un sottoinsieme di eventi, che hanno passato il L0.
- Efficienza di L1 $\sim 98\%$
- Dimensione di un evento ~ 20 kB
- Il **gruppo di Pisa** si è occupato di sviluppare l'algoritmo che usa i dati dello **spettrometro**, attraverso una combinazione della trasformata di Hough e del filtro di Kalman (efficienza $\sim 99\%$, fattore di reiezione tra 2 e 10 a seconda del canale)



Analisi del canale $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$

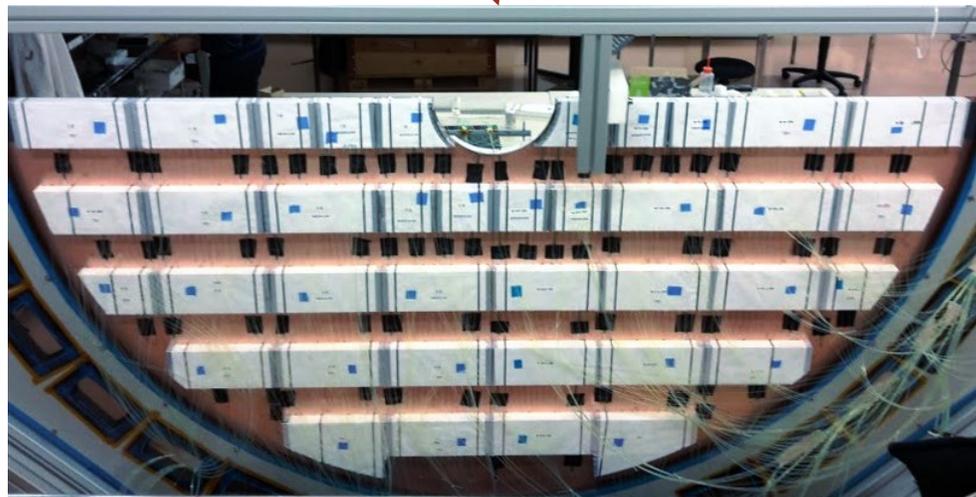
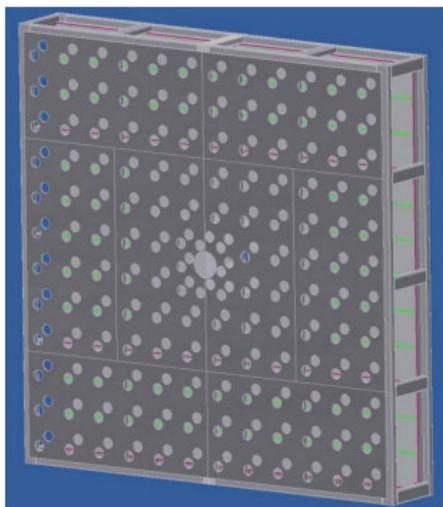
- In questo momento il **gruppo di Pisa** si sta occupando anche dell'analisi del decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$
- Insieme al decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ permette di eseguire un test sull'universalità del sapore leptonic, cioè di verificare se si misurano differenze nel processo con gli elettroni e con i muoni.
- Nel **Modello Standard** l'accoppiamento elettrodebole tra bosoni e leptoni è indipendente dal sapore leptonic
- Una eventuale differenza equivarrebbe ad un segnale di nuova fisica



Contributi ai rivelatori

Il gruppo di Pisa ha contribuito anche:

- Definizione delle specifiche dell'elettronica di lettura, mantenimento e responsabilità attuale del **calorimetro LKr**
- Al disegno e alla costruzione dei **Large-angle veto (LAV)**
- Al disegno e alla costruzione del **New-CHOD**
- Al disegno del **MUV3**



Il gruppo di NA62 Pisa



Riccardo Fantechi



Marcello Giorgi



Sergio Giudici



Sergei Kholodenko



Gianluca Lamanna



Italo Mannelli



Elena Pedreschi



Jacopo Pinzino



Marco Sozzi



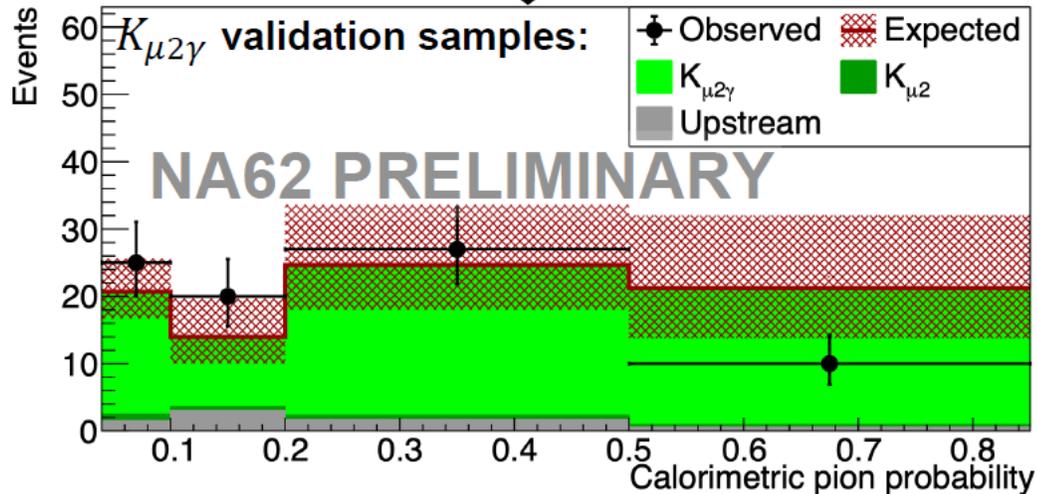
Franco Spinella

Spare

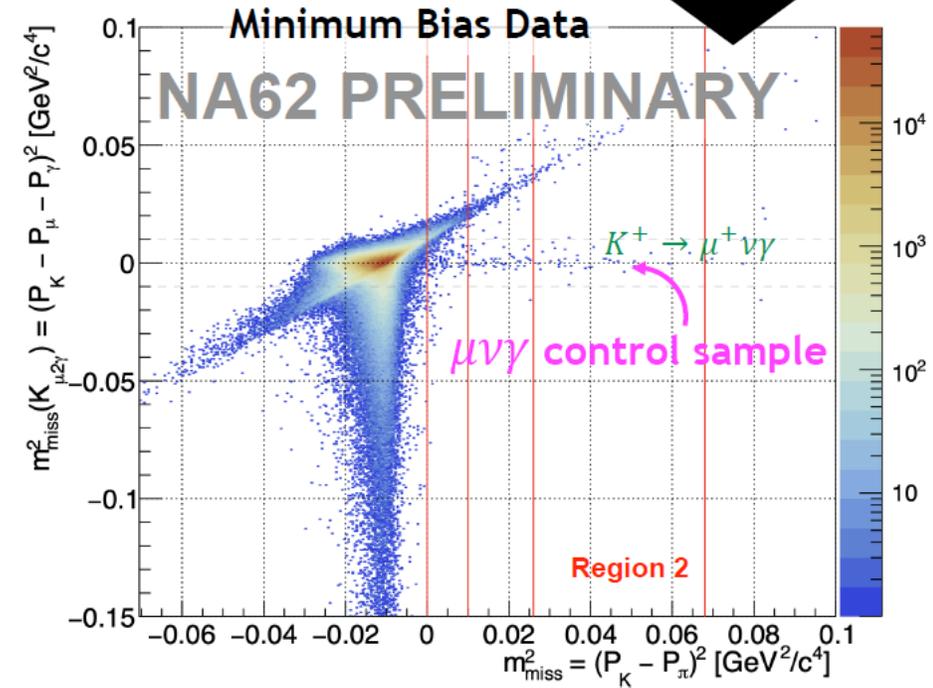
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ background

- Kinematically select $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ events: $m_{miss}^2(K_{\mu 2\gamma}) = (P_K - P_\mu - P_\gamma)^2$
 - P_K : 4-momentum of K^+ from GTK (as normal)
 - P_μ : 4-momentum of track with μ^+ mass hypothesis.
 - P_γ : reconstructed from energy and position of LKr cluster (and position of $K^+ - \mu^+$ vertex).

Validation: data sample with PID = “less pion-like” (Calo BDT bins below π^+ bin).



Evaluate background expectation using $\mu \nu \gamma$ control sample from MinimumBias trigger, not applying Calorimetric BDT classifier and MUV3 signal:



- Before $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ veto: found excess of events at $p > 35 \text{ GeV}/c$ in Region 2 relative to 2016–18 data.
- Additional background identified and studied in data control samples & MC.
- $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ veto added to selection criteria for final analysis.

Upstream background evaluation

$$N_{bg} = \sum_i N_i f_{cda} P_i^{match}$$

N

Upstream Reference Sample:
signal selection but invert CDA cut (CDA>4mm)

f_{cda}

Scaling factor : bad cda \rightarrow good cda

P_{match}

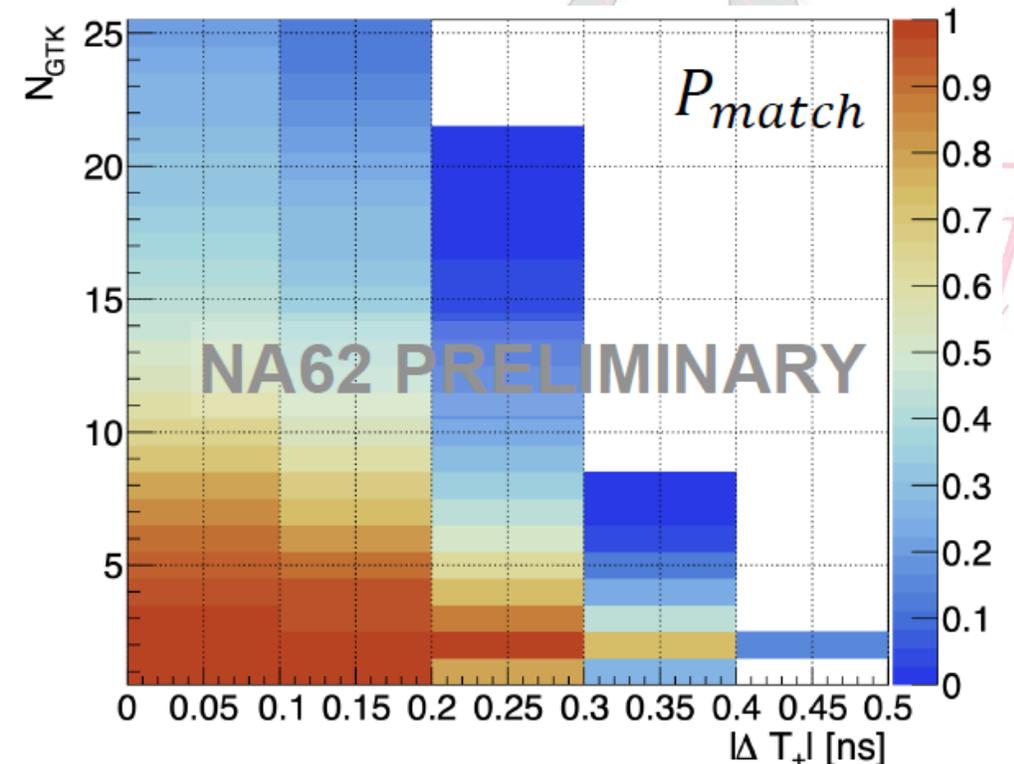
Probability to pass $K^+ - \pi^+$ matching

Calculate using bins (i) of $(\Delta T_+, N_{GTK})$
[Updated to fully data-driven procedure]

$$N = 51 \quad f_{CDA} = 0.20 \pm 0.03 \quad \langle P_{match} \rangle = 73\%$$

$$N_{bg}(Upstream) = 7.4^{+2.1}_{-1.8}$$

- Upstream reference sample contains all known upstream mechanisms.
- N provides normalisation.
- f_{CDA} depends only on geometry.
- P_{match} depends on $(\Delta T_+, N_{GTK})$.



$\pi^0 \rightarrow e^+e^-$: Overview

- Experimentally observable:

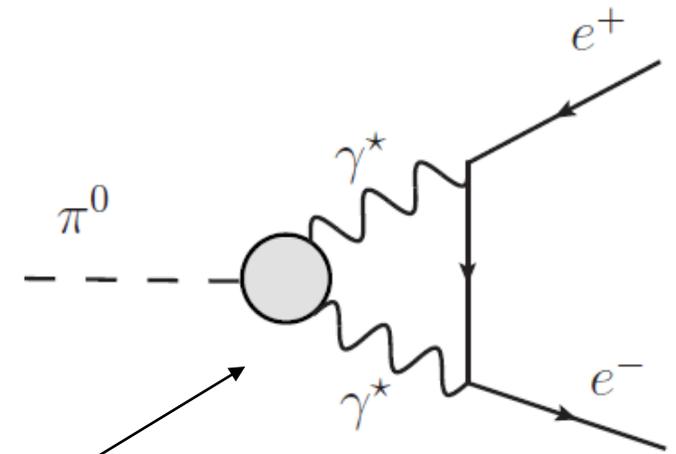
$$\text{BR}(\pi^0 \rightarrow e^+e^-(\gamma), X > X_{cut}), \quad X = m_{ee}^2/m_{\pi^0}^2$$

- Dalitz decay $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+e^-$ dominant in low-x region
- For $x > x_{cut} = 0.95$, Dalitz decay $\approx 3.3\%$ of $\text{BR}(\pi^0 \rightarrow e^+e^-(\gamma))$

- Previous best measurement by KTeV [Phys.Rev.D 75 (2007) 012004]:

$$\text{BR}(\pi^0 \rightarrow e^+e^-(\gamma), X > 0.95) = (6.44 \pm 0.25 \pm 0.22) \times 10^{-8}$$

- Diagram considered in theoretical predictions leading to $\text{BR}(\pi^0 \rightarrow e^+e^-(\gamma), \text{no-rad})$ for various $\pi^0 \rightarrow \gamma^*\gamma^*$ transition form factors.

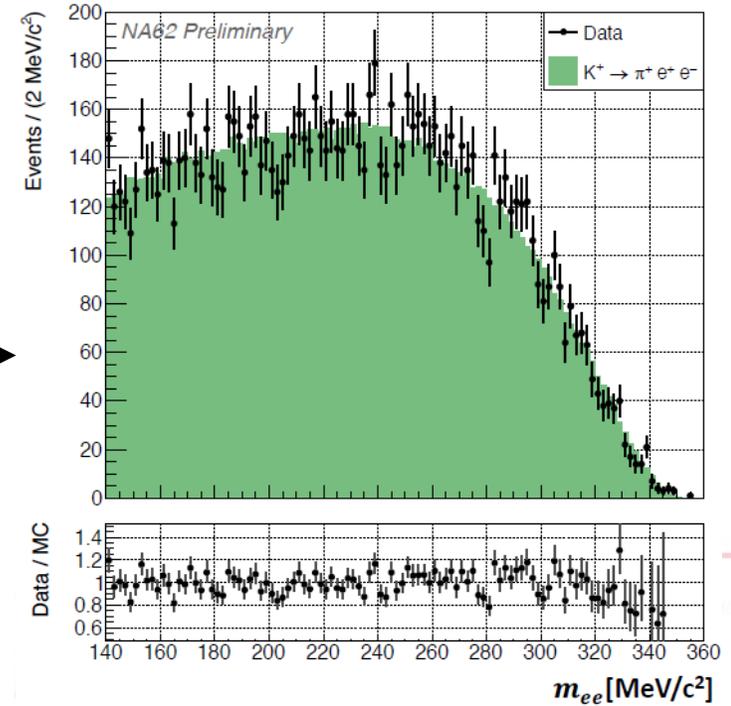


Using latest radiative corrections in [JHEP 10 (2011) 122], [Eur.Phys.J.C 74 (2014) 8, 3010], the result can be extrapolated and compared with theory:

	$\mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow e^+e^-, \text{no-rad}) \times 10^8$
KTeV, PRD 75 (2007)	6.84(35)
Knecht et al., PRL 83 (1999)	6.2(3)
Dorokhov and Ivanov, PRD 75 (2007)	6.23(9)
Husek and Leupold, EPJC 75 (2015)	6.12(6)
Hoferichter et al., PRL 128 (2022)	6.25(3)

$\pi^0 \rightarrow e^+e^-$: Data sample

- Data sample collected by NA62 in 2017 and 2018
- Signal decay mode: $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0, \pi^0 \rightarrow e^+e^- \equiv K^+ \rightarrow \pi^+\pi_{ee}^0$
- Latest radiative corrections included in the simulation
- Normalization decay mode: $K^+ \rightarrow \pi^+e^+e^-$
 - identical final state
 - **cancellation of systematics**
- **Multi-track electron trigger line** used to collect both $K^+ \rightarrow \pi^+\pi_{ee}^0$ and $K^+ \rightarrow \pi^+e^+e^-$



Backgrounds:

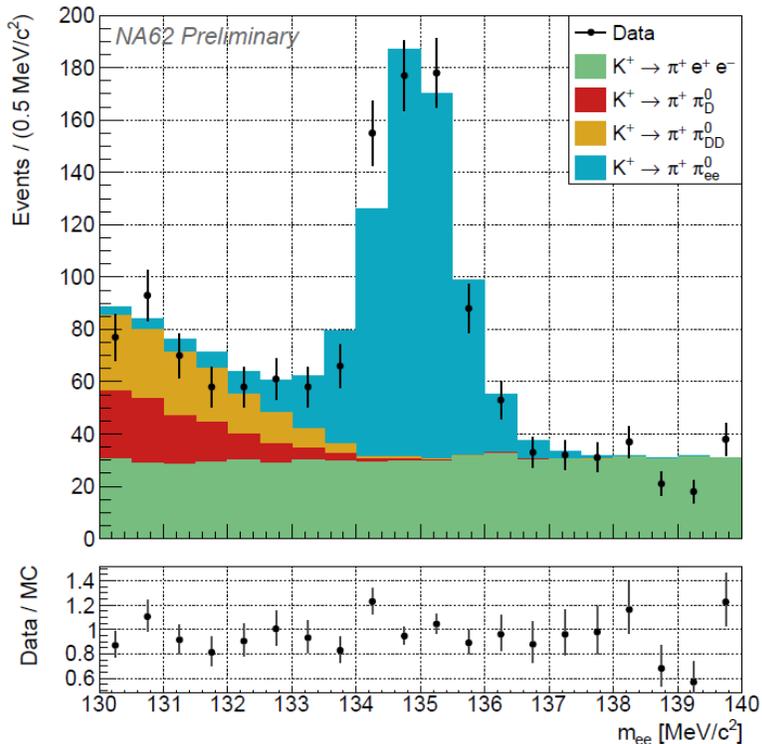
- $K^+ \rightarrow \pi^+e^+e^-$ → irreducible, flat in the signal region close to the π^0 mass
- $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0, \pi^0 \rightarrow \gamma e^+e^- \equiv K^+ \rightarrow \pi^+\pi_D^0$ → π^0 Dalitz decay distribution large-x tail
Photon conversion in STRAW + selection of a e^\pm track from
- $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0, \pi^0 \rightarrow e^+e^-e^+e^- \equiv K^+ \rightarrow \pi^+\pi_{DD}^0$ → π^0 double Dalitz decay with two undetected e^\pm

$\pi^0 \rightarrow e^+e^-$: result

- Fit region for signal extraction in $m_{ee} \in (130,140) \text{ MeV}/c^2$
- 597 ± 29 signal events
- The results are compatible with the previous measurement and the theoretical predictions:

$$\mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow e^+e^-(\gamma), x > 0.95) = (5.86 \pm 0.30_{stat} \pm 0.11_{syst.} \pm 0.19_{ext.}) \times 10^{-8}$$

$$= (5.86 \pm 0.37) \times 10^{-8}$$

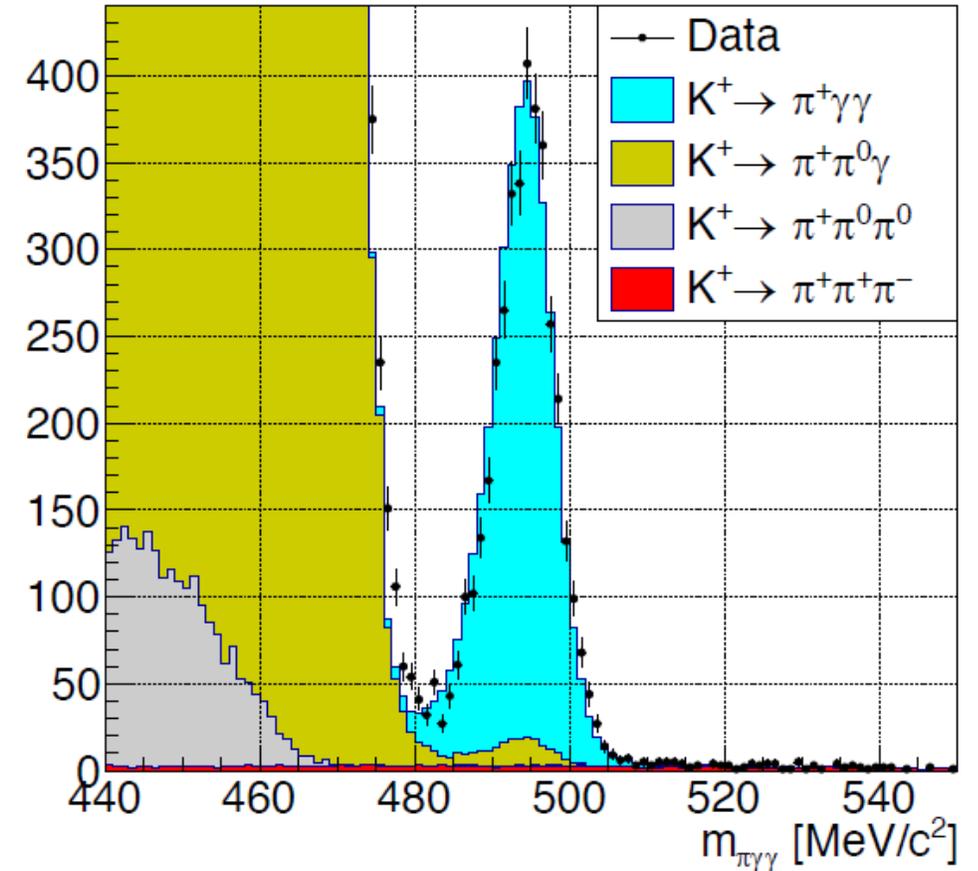


	$\delta\mathcal{B}[10^{-8}]$	$\delta\mathcal{B}/\mathcal{B}[\%]$
Statistical uncertainty	0.30	5.1
Trigger efficiency	0.07	1.2
Radiative corrections for $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$	0.05	0.9
Background	0.04	0.7
Reconstruction and particle-ID	0.04	0.7
Beam simulation	0.03	0.5
Total systematic uncertainty	0.11	1.9
Total external uncertainty	0.19	3.2

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

- Crucial test of Chiral Perturbation Theory (ChPT) describing low-energy QCD processes
 - ChPT at the leading order $\mathcal{O}(p^4)$ including next-to-leading order $\mathcal{O}(p^6)$ contributions necessary for observed di-photon mass spectrum
- $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma)$ parameterized in ChPT by **unknown $\mathcal{O}(1)$ parameter \hat{c}**
- Signal $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma$ in $z \in (0.20, 0.51)$ and normalization $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ in $z \in (0.04, 0.12)$
 - Same decay topology \rightarrow cancellation of systematics
- Main bkg source $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ with cluster merging in calorimeter
- $N_{\text{obs}} = 3894$ with $N_{\text{bkg}}(\text{expected}) = 291 \pm 14$

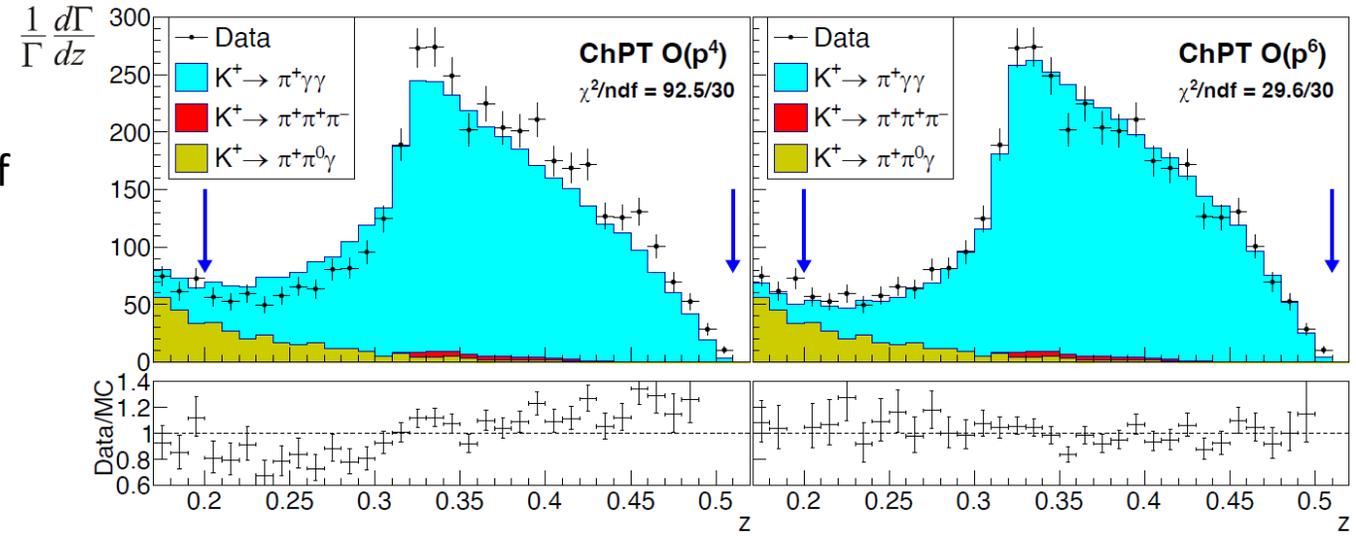
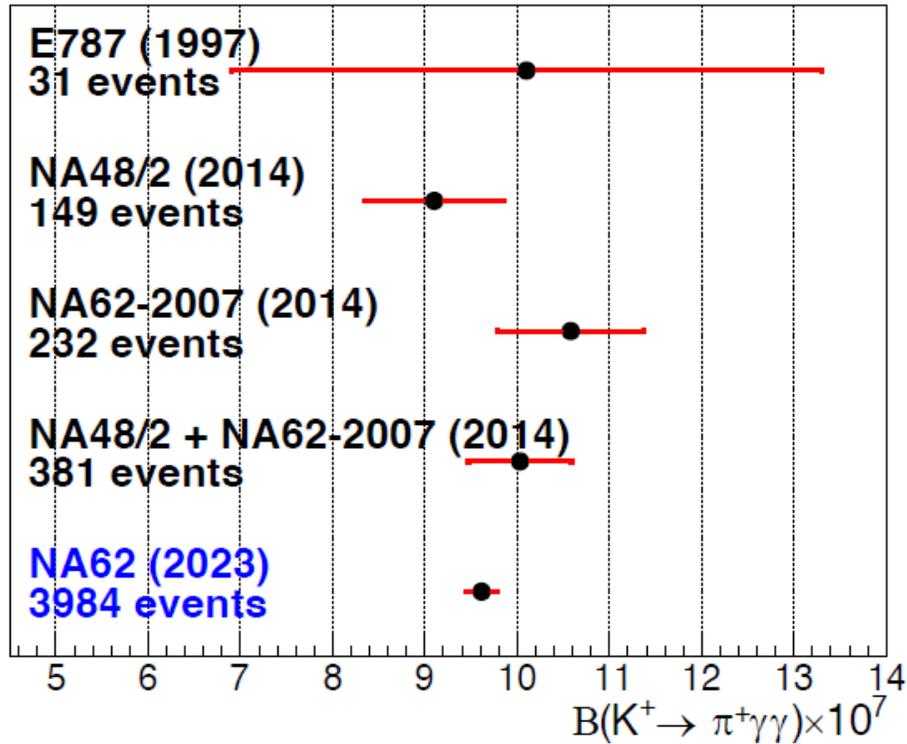
$$\mathbf{z} = \frac{(\mathbf{P}_K - \mathbf{P}_\pi)^2}{m_K^2} = \frac{m_{\gamma\gamma}^2}{m_K^2}$$



\mathcal{A}

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

- \hat{c} measured in $O(p_4)$ and $O(p_6)$ by χ^2 minimization of simulated samples to data
- ChPT $O(p_4)$ is not sufficient to describe the data
- $\hat{c}_{ChPT O(p_6)} = 1.144 \pm 0.069_{stat} \pm 0.034_{syst}$



Branching Ratio

- Differential decay-width in $O(p_6)$ with \hat{c} summed over the full z -range:

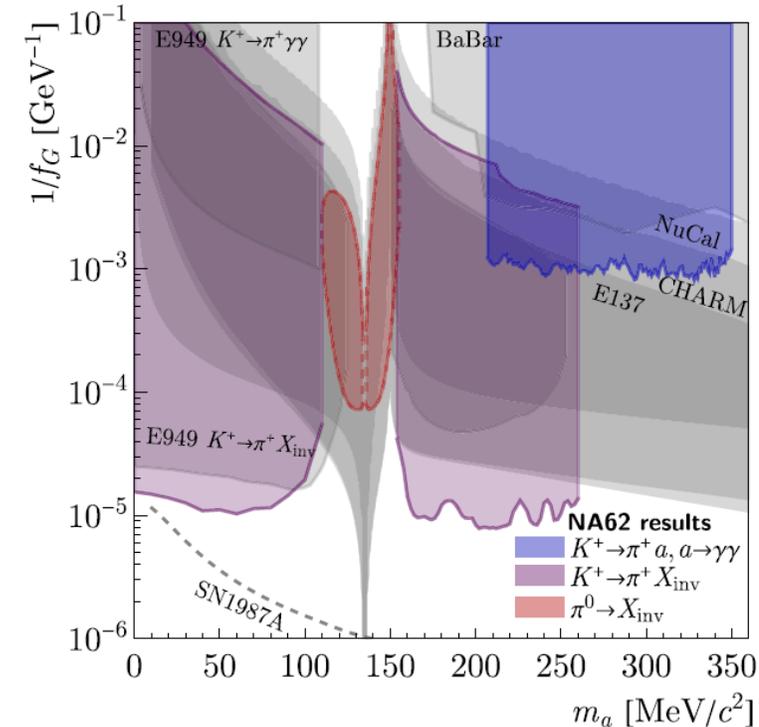
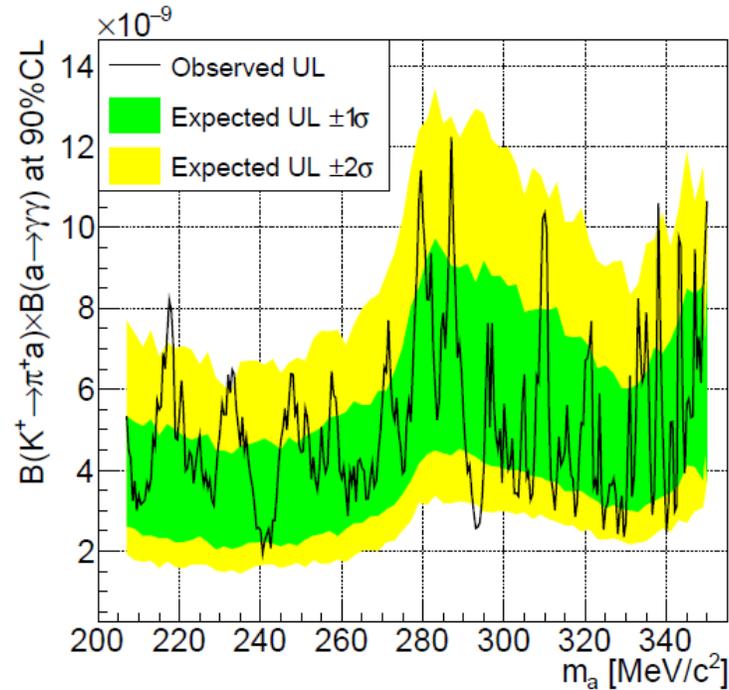
$$BR_{ChPT O(p_6)}(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma) = (9.61 \pm 0.15_{stat} \pm 0.07_{syst}) \times 10^{-7}$$

- Model independent measurement (markers) summed over z bins > 0.20 :

$$BR_{ChPT O(p_6)}(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma, z > 0.20) = (9.46 \pm 0.19_{stat} \pm 0.07_{syst}) \times 10^{-7}$$

First search for ALPs: $K^+ \rightarrow \pi^+ a, a \rightarrow \gamma\gamma$

- Peak search over $m_a = \sqrt{(P_K - P_\pi)^2}$ in the range 207–350 MeV/c² in steps of 0.5 MeV/c²
- m_a resolution: from 2.0 MeV/c² to 0.2 MeV/c² across the search range
- In each m_a hypothesis, bkg estimated with simulation and UL on the number of signal events set using CL_s method



- First UL on BR($K^+ \rightarrow \pi^+ a$) assuming prompt $a \rightarrow \gamma\gamma$ decay ($\tau_a = 0$)
- Limits on the coupling strength $f_G^{-1} \sim \tau_a^{-0,5}$ of the BC11 scenario

Long-Lived NP Particles: hadronic final state

- NA62 **beam-dump** mode
- Conducted a **blind analysis** until the opening of control and signal regions
- Various possibilities for exotic particle X with hadronic final state
- Background estimations with mix of data-driven and first-principle MC
 - **“Combinatorial”**: data-driven event overlay → negligible
 - **Neutrino-induced**: GENIE + PYTHIA + GEANT4 → negligible
 - **“Prompt”**: data-driven + GEANT4, inelastic interaction of halo μ
 - **“Upstream”**: data-driven + GEANT4, particles selected by the GTK achromat
- Search is **background free not only** at $N_{\text{POT}} = 1.4 \times 10^{17}$ but also in the future full Run 2 dataset of $N_{\text{POT}} = 10^{18}$

36 combinations of production and decay channels studied

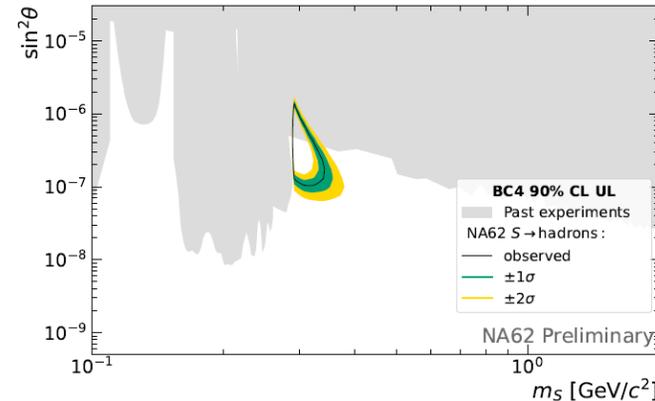
DP	DS	ALP
$\pi^+\pi^-$	$\pi^+\pi^-$	$\pi^+\pi^-\gamma$
$\pi^+\pi^-\pi^0$		$\pi^+\pi^-\pi^0$
$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
		$\pi^+\pi^-\eta$
K^+K^-	K^+K^-	
$K^+K^-\pi^0$		$K^+K^-\pi^0$



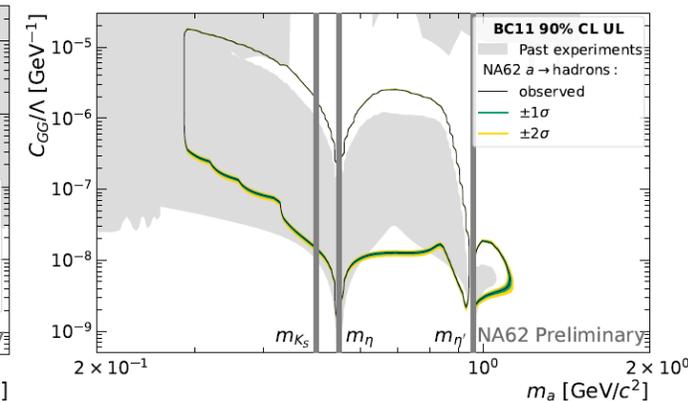
Channel	$N_{\text{exp,CR}} \pm \delta N_{\text{exp,CR}}$	$N_{\text{exp,SR}} \pm \delta N_{\text{exp,SR}}$	$N_{\text{obs,SR}}^{p>5\sigma}$	$N_{\text{obs,SR+CR}}^{p>5\sigma}$
$\pi^+\pi^-$	0.013 ± 0.007	0.007 ± 0.005	3	4
$\pi^+\pi^-\gamma$	0.031 ± 0.016	0.007 ± 0.004	3	5
$\pi^+\pi^-\pi^0$	$(1.3^{+4.4}_{-1.0}) \times 10^{-7}$	$(1.2^{+4.3}_{-1.0}) \times 10^{-7}$	1	1
$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	$(1.6^{+7.6}_{-1.4}) \times 10^{-8}$	$(1.6^{+7.4}_{-1.4}) \times 10^{-8}$	1	1
$\pi^+\pi^-\eta$	$(7.3^{+27.0}_{-6.1}) \times 10^{-8}$	$(7.0^{+26.2}_{-5.8}) \times 10^{-8}$	1	1
K^+K^-	$(4.7^{+15.7}_{-3.9}) \times 10^{-7}$	$(4.6^{+15.2}_{-3.8}) \times 10^{-7}$	1	2
$K^+K^-\pi^0$	$(1.6^{+3.2}_{-1.2}) \times 10^{-9}$	$(1.5^{+3.1}_{-1.2}) \times 10^{-9}$	1	1

Table: Expected number of background events (68% CL) in CR and SR. Minimum number of observed events N_{obs} for a background-only p -value above 5σ in SR and SR+CR (global significance, flat background in m_{inv} assumed).

BC4: Dark Scalar



BC11: Axion-Like Particle



0 events observed in all control and signal regions