



# *L'esperimento NA62 al CERN: studio dei decadimenti rari del mesone $K^+$*

*Giuseppina Anzivino  
a nome del gruppo NA62*

*Perugia, 23-3-2023*

# Contesto e motivazioni

- La teoria che descrive le particelle elementari e le loro interazioni è il **Modello Standard**
- Ad oggi, la validità del MS è verificata con estrema precisione

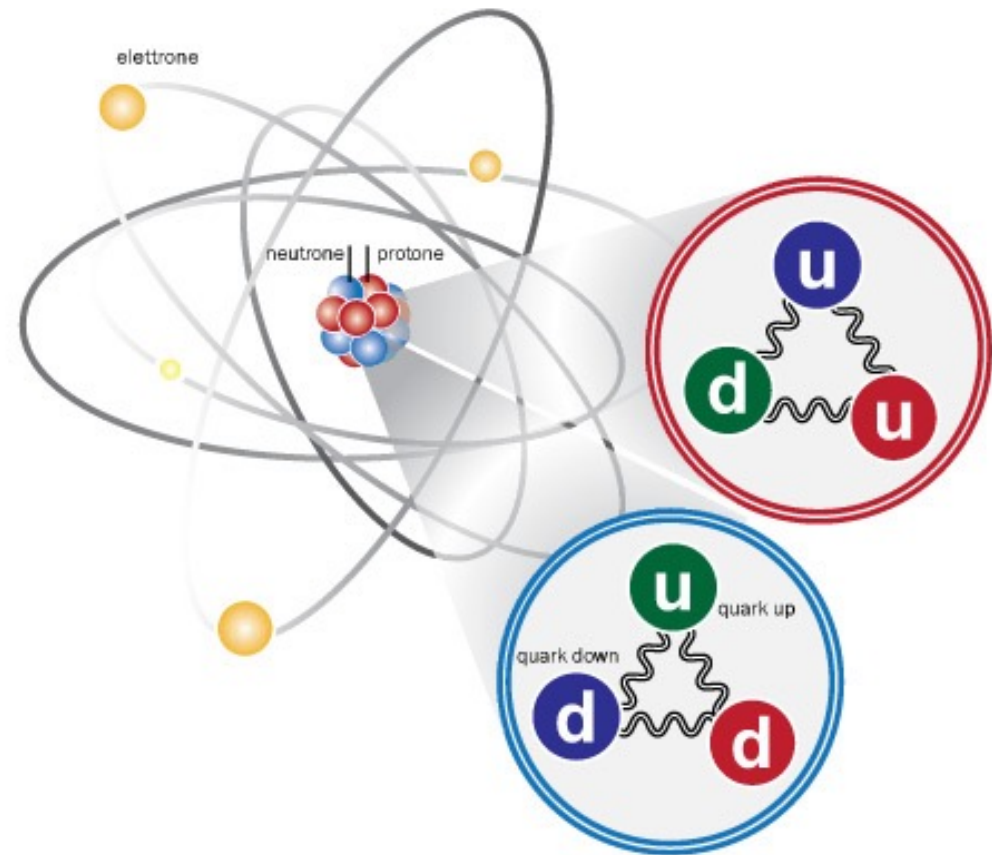
## TUTTAVIA

- il MS non fornisce risposte a domande ancora aperte sull'origine ed evoluzione dell'Universo: materia oscura, energia oscura, antimateria, etc ...
- Se il MS non è la teoria definitiva, ma solo la sua versione efficace, dobbiamo cercare il modo di accedere a informazioni su cosa ci sia **“oltre il MS”**
- Gli esperimenti di Fisica delle Particelle Elementari perseguono l'obiettivo di effettuare misure sempre più precise per spingere al limite le verifiche del MS e mettere in luce eventuale esistenza di Nuova Fisica oltre il Modello Standard
- L'esperimento **NA62** si inserisce in questo ambito


# Le particelle elementari

La materia stabile è composta da un numero molto ristretto di costituenti elementari:

→ quark up  
quark down  
elettrone



# Le particelle elementari

- Il quadro completo delle particelle elementari:  
**POCHISSIMI** 
- E gli altri quark? Sono i costituenti di particelle instabili, che vivono per un tempo molto breve prima di decadere

## Standard Model of Elementary Particles

|        | three generations of matter (fermions)         |  |  | interactions / force carriers (bosons) |                                  |
|--------|--|--|--|--|----------------------------------|
|        | I  | II   | III  |  |                                  |
| mass   | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$                  | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$               | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$              | 0                                      | $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ |
| charge | $\frac{2}{3}$                                  | $\frac{2}{3}$                                | $\frac{2}{3}$                                | 0                                      | 0                                |
| spin   | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                      | 0                                |
|        | <b>u</b><br>up                                 | <b>c</b><br>charm                            | <b>t</b><br>top                              | <b>g</b><br>gluon                      | <b>H</b><br>higgs                |
|        | <b>d</b><br>down                               | <b>s</b><br>strange                          | <b>b</b><br>bottom                           | <b><math>\gamma</math></b><br>photon   |                                  |
|        | <b>e</b><br>electron                           | <b><math>\mu</math></b><br>muon              | <b><math>\tau</math></b><br>tau              | <b>Z</b><br>Z boson                    |                                  |
|        | <b><math>\nu_e</math></b><br>electron neutrino | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>muon neutrino | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>tau neutrino | <b>W</b><br>W boson                    |                                  |

**QUARKS** (vertical label on the left)

**LEPTONS** (vertical label on the left)

**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS** (vertical label on the right)

**SCALAR BOSONS** (vertical label on the right)

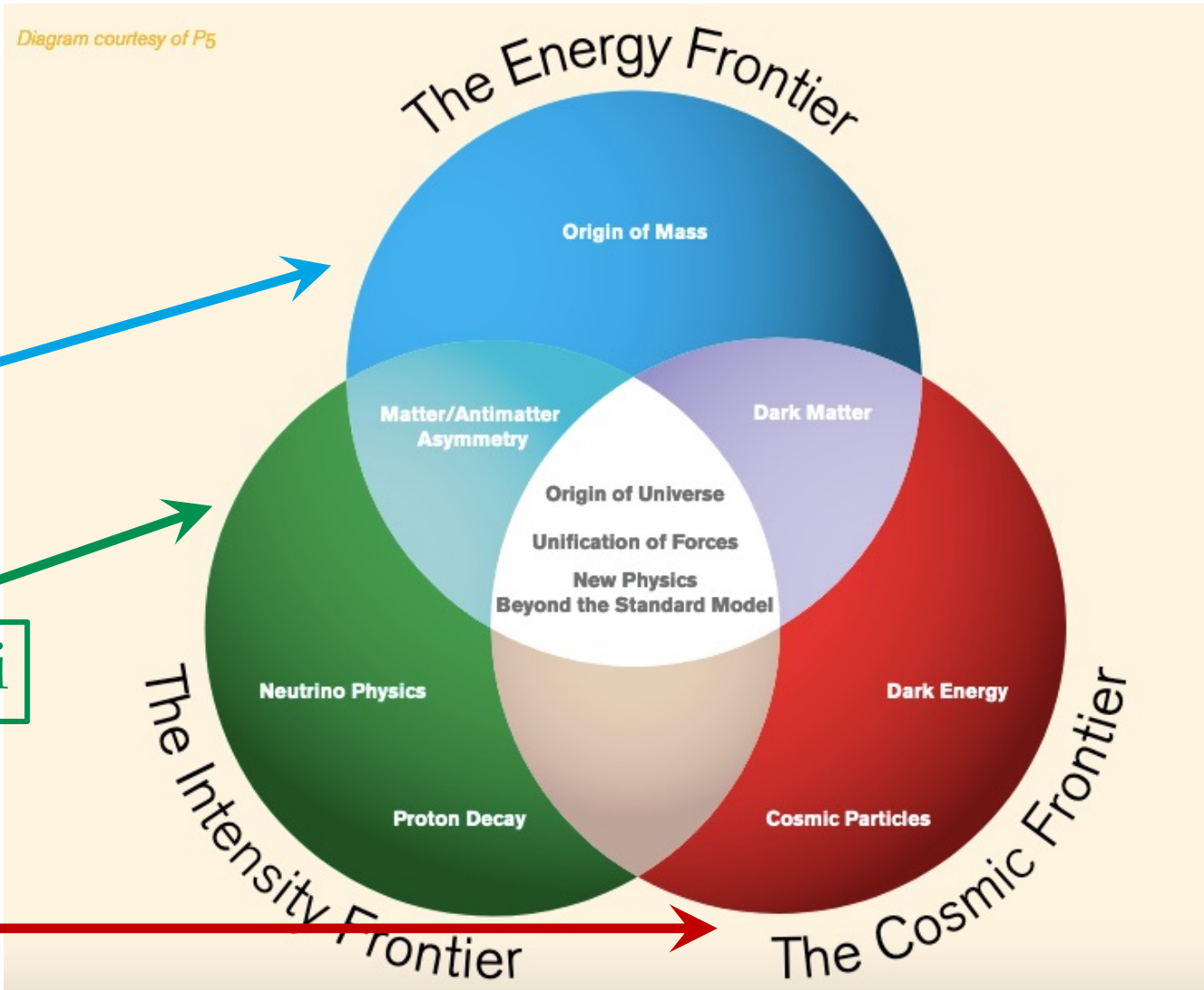
# Le tre frontiere


Come e dove cercare le risposte?  
Le tre frontiere →

Esperimenti ai collider

Misure di precisione con fasci estratti

Esperimenti nello spazio





# L'esperimento NA62

# Il CERN



# L'esperienza NA62



- Collaborazione internazionale, circa 200 partecipanti, 30 istituzioni
- Installato su un fascio estratto dal SPS del CERN
- Scopo principale: misura del BR del decadimento ultra-raro ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ ) ( $\sim 10^{-10}$ )
- Segnatura sperimentale debole e decadimenti di fondo molto più abbondanti
- Molte altre misure: misura degli elementi della matrice CKM, ricerca di leptoni neutri pesanti, studi dell'universalità leptonica, ricerca di particelle esotiche, etc....
- Presa dati :  
RUN1 (2016-2018), RUN2 2022-2025

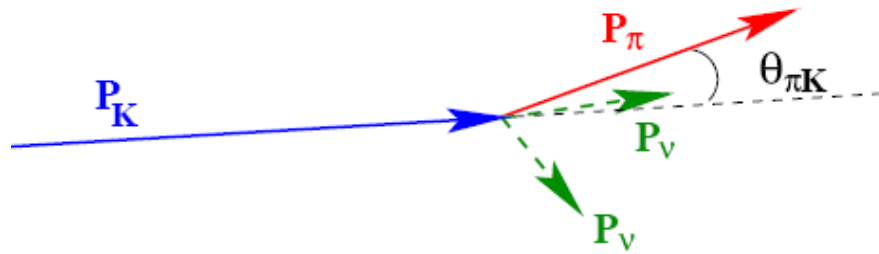


# Mesoni K - Fisica del flavour

- NA62 usa un fascio di **mesoni K**, particelle strane (contengono il quark s, strange)
- Si inquadra nel contesto della Fisica del flavour, che studia le **proprietà dei diversi tipi (flavour) di quark**, di come i vari flavour sono **mescolati** fra di loro e delle modalità e regole che governano le **transizioni** da un tipo di quark a un altro, descritto dalla matrice CKM
- Gli studi nel settore di fisica del flavour sono principalmente motivati dalla ricerca di **Fisica oltre il Modello Standard**.
- La Fisica del flavour è studiata estensivamente anche nei decadimenti dei mesoni B (contenenti il quark b, bottom) e dei mesoni D (contenenti il quark c, charm)
- La maggior parte dei parametri liberi dello MS sono legati al settore del flavour
- Dato l'interesse in questo settore della fisica, il gruppo è entrato recentemente a far parte anche della collaborazione LHCb al CERN

# Sfida sperimentale

Segnale



$$\text{BR} (K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) \approx 10^{-11}$$



Fondo

$$\text{BR} (K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = 63.5\%$$

$$\text{BR} (K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0) = 20.7\%$$



## sfida sperimentale ardua!

Armi

- alta intensità (tanti K)
- alta statistica (tanti dati)
- alta reiezione del fondo
- alta precisione e ridondanza in tutte le misure



# NA62: apparato sperimentale



- Rivelatori di traccia (GTK e STRAW)
- Rivelatori per identificazione di particelle (KTAG e RICH)
- Rivelatori di veto per fotoni (LK<sub>r</sub>, LAV, SAV)

- Ottima risoluzione temporale  $O(100 \text{ ps})$
- soppressione dei decadimenti con fotoni  $O(10^7)$
- Reiezione cinematica e soppressione fondi con  $\mu$

# NA62: apparato sperimentale

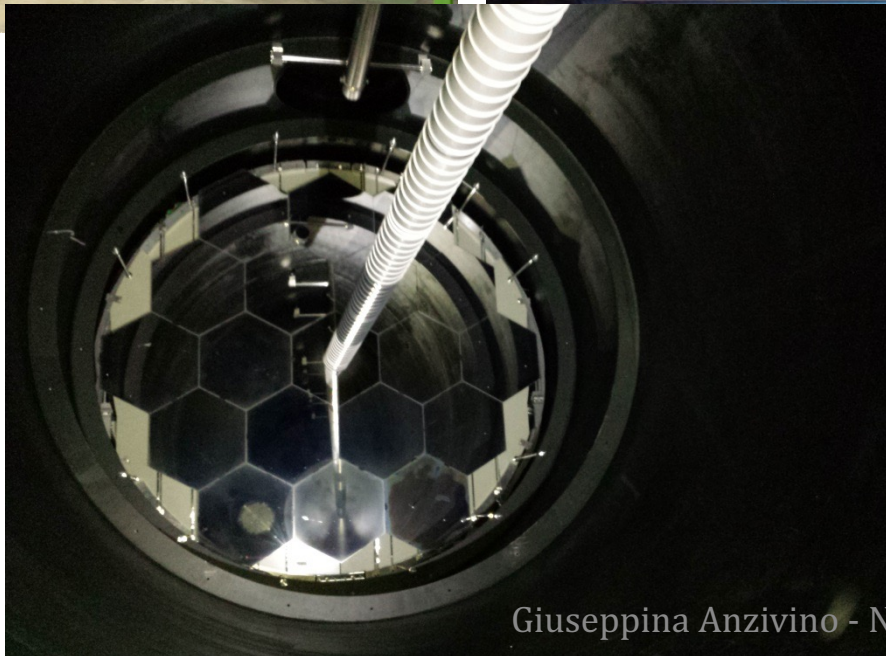
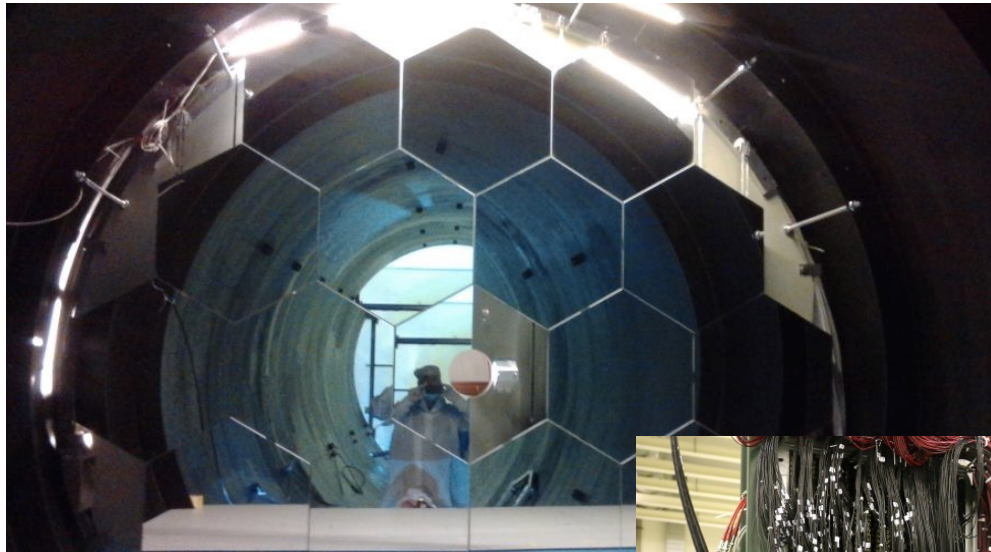


# NA62-Perugia: il RICH



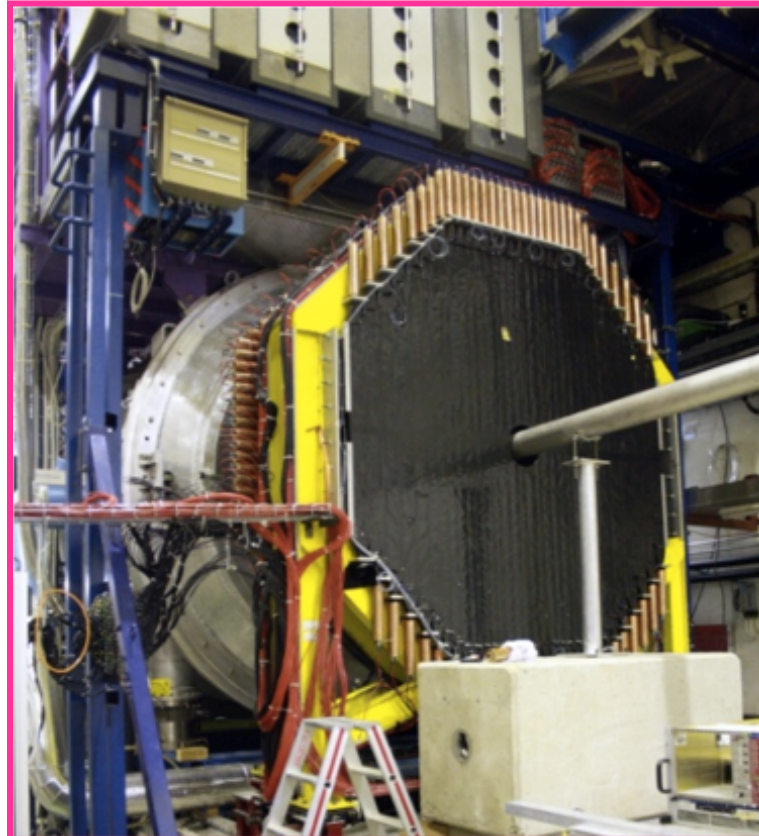
- Rivelatore Cherenkov, contenitore riempito di neon a pressione atmosferica, lungo 18 metri, con diametro da 3.5 a 4 metri
- responsabilità della costruzione dei prototipi, installazione della meccanica di supporto e degli specchi, con relativo sistema di movimentazione, e del collaudo finale del rivelatore
- responsabilità della manutenzione, sia hardware, sia software, durante i periodi di presa dati
- responsabilità dei programmi di ricostruzione degli anelli Cherenkov
- studi delle prestazioni del rivelatore per evidenziare eventuali modifiche da apportare

# NA62-Perugia: il RICH



# NA62: CHOD e NHOD

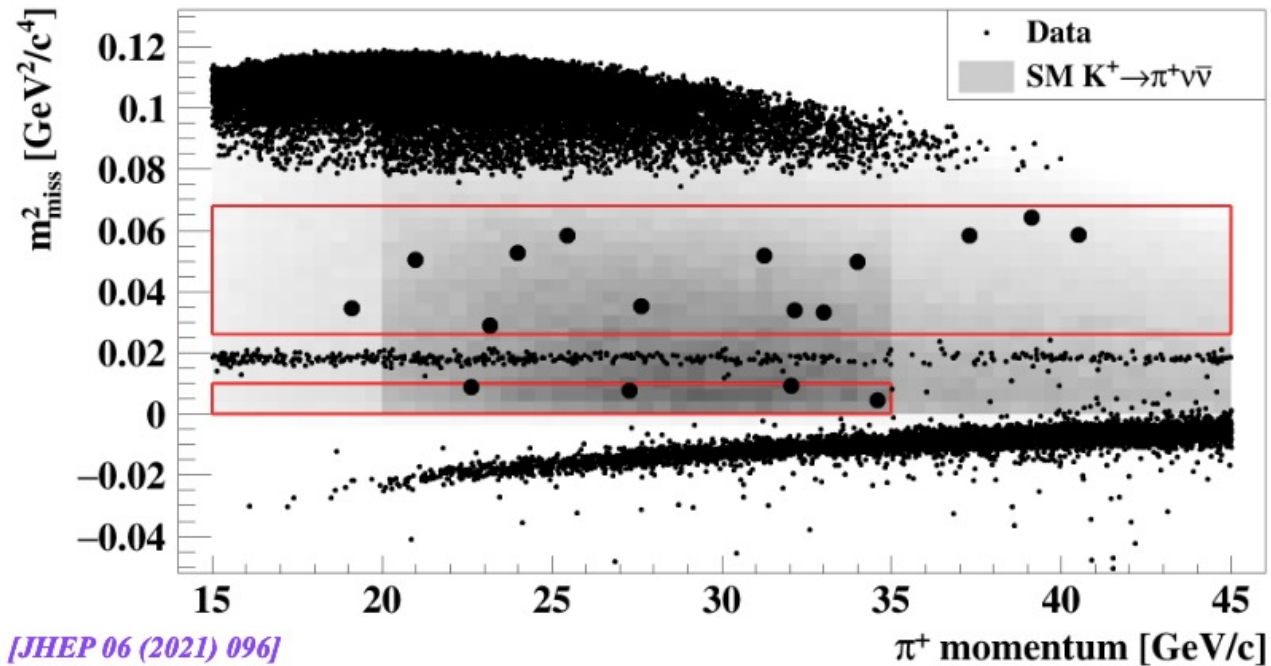
- Installati già nel precedente esperimento (NA48)
- CHOD (2 piani di rivelatori a scintillazione) riveste ancora un ruolo fondamentale
- Attività
  - manutenzione hardware del rivelatore e della sua elettronica di lettura
  - calibrazioni temporali
  - programmi di ricostruzione



# NA62: analisi dati

Ruolo rilevante nell'analisi del  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ , con due tesi di dottorato

- F. Brizioli, uno dei 3 analisti e corresponding authors dell'articolo con il risultato finale
- R. Lollini ha svolto l'analisi complessa del fondo principale: l'upstream background



- Predizione teorica molto precisa:
- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}$

Osservati 17 eventi dai dati 2018  
Altri 3 eventi dai dati 2016-2017

La più forte evidenza, ad oggi,  
dell'esistenza di questo decadimento

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



# NA62: altre analisi

Non solo  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ , molte altre analisi in corso, grazie alla grande quantità di dati

$K^+ \rightarrow \pi^+ X$ , V. Duk

- Motivazione: molte estensioni del SM prevedono l'esistenza di una nuova particella feebly interacting (FIP), a lunga vita media, scalare o pseudoscalare
- Ricerca della produzione di questa particella può restringere il campo per modelli BSM
- Analisi completata, articolo finale in corso di pubblicazione

$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ , F. Brizioli

- Misura del BR - risultato migliorato di un fattore fra 2 e 3.6 rispetto alle misure precedenti, in termini di precisione relativa
- Misura dell'asimmetria T - compatibile con zero, precisione aumentata di un fattore 3
- Analisi completata, articolo finale in corso di pubblicazione
- $K^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$ , G. Romolini (tesi di laurea magistrale)
- $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu e^+ e^-$ , I. Rosa (tesi di laurea magistrale)

# NA62: impegni futuri

## Corto termine

- analisi del decadimento principale e completamento delle altre analisi in corso
- analisi dei dati 2022 per dimostrarne la qualità alla intensità nominale e con i nuovi rivelatori

## Medio termine (2023-2025)

- raccolta dati, efficiente e stabile (inizio presa dati 2023, 1° maggio fino a settembre)
- responsabilità del funzionamento dei rivelatori RICH e CHOD

## Lungo termine

- Esperimenti con K ad alta intensità, nell'ambito dell'iniziativa PBC.
- Proposta HIKE (High Intensity Kaon Experiments)



|                              | ECN3 High Intensity - Indicative Schedule & Constraints |      |      |      |      |      |                              |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|---|------|------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Machine/Facility/Experiments | 2023  | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029                         | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 |
| LHC                          |   |      |      | LS3  |      |      | Commission.                  |      |      |      |      | LS4  |      |
| SPS                          |   |      |      | LS3  |      |      |                              |      |      |      |      | LS4  |      |
| EHN1+2 NA-CONS (baseline)    |   |      |      | LS3  |      |      | Commissioning<br>+ Operation |      |      |      |      | LS4  |      |
| ECN3 HI TT20/TCC2/TDC2/TTs   |   |      |      | LS3  |      |      | Commissioning                |      |      |      |      | LS4  |      |

# Argomenti di tesi

## Analisi dei dati per studi dei decadimenti del $K^+$

- Misura dei fattori di forma dei decadimenti  $K^+ \rightarrow \pi^0 l^+ \nu$  per migliorare la conoscenza dell'elemento  $V_{us}$  della matrice CKM
- Test di unitarietà della prima riga della matrice CKM attraverso la misura di  $\Gamma(K\mu 3)/\Gamma(K\mu 2)$
- Studio della soppressione dei fondi e dei canali di normalizzazione per la ricerca dei decadimenti rari del  $K^+$  in stati finali con quattro leptoni
- Algoritmi di machine learning per l'ottimizzazione del rapporto segnale/ rumore nella ricerca del decadimento ultra-raro  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- Misure della massa e della vita media del mesone  $K^+$

# Argomenti di tesi

## Prestazioni dei rivelatori di NA62:

- Studio e ottimizzazione delle performance del rivelatore RICH (identificazione di  $\mu$  e  $\pi$ )
- Validazione, tramite confronto con i dati, delle simulazioni Monte Carlo del rivelatore RICH attraverso la selezione di decadimenti con muoni e pioni nello stato finale

## Test in laboratorio:

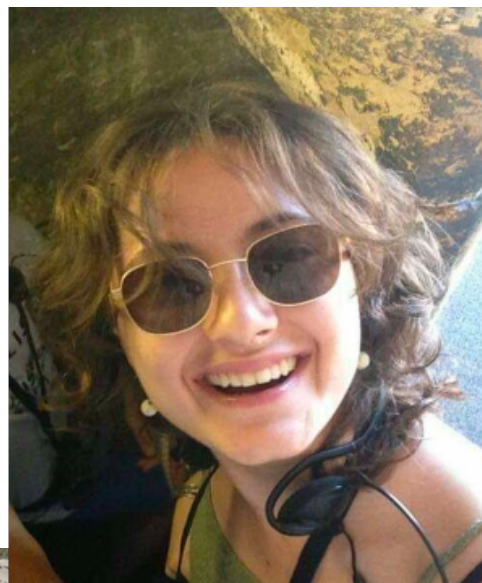
- Misura delle risoluzioni temporali di fotosensori di ultima generazione (SiPMs) da impiegare per il RICH del futuro esperimento HIKE

# Componenti del gruppo di ricerca NA62/LHCb

- Giuseppina Anzivino – professoressa associata (giuseppina.anzivino@unipg.it)
- Francesco Brizioli – ricercatore INFN
- Patrizia Cenci – dirigente di ricerca INFN
- Viacheslav Duk – ricercatore INFN
- Lisa Fantini – dottoranda
- Pasquale Lubrano - dirigente di ricerca INFN
- Gabriele Martelli – dottorando
- Matteo Pasqui - borsista
- Monica Pepe – dirigente di ricerca INFN
- Mauro Piccini – primo ricercatore INFN (mauro.piccini@pg.infn.it)

Hanno da poco concluso il percorso di studi 3 laureandi / a magistrali e 2 laureande

# Componenti del gruppo



19/4/22

Giuseppina Anzivino, NA62 e LHCb argomenti di tesi

22

22



Grazie per l'attenzione!

La Fisica del Flavour alla frontiera della fisica di precisione!  
Molta fisica interessante davanti a noi!