



L'esperienza NA62 al CERN: studio dei decadimenti rari del mesone K^+

Giuseppina Anzivino
a nome del gruppo NA62/LHCb

Perugia, 28-3-2025

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

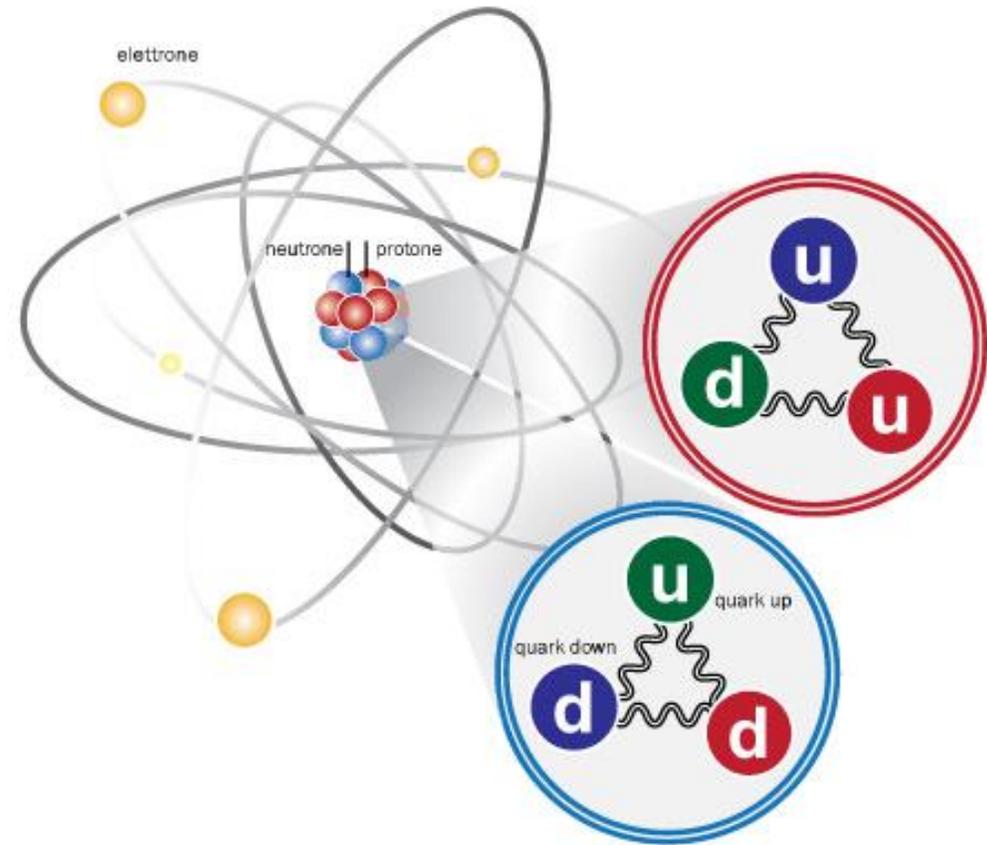
TUTTAVIA

- 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

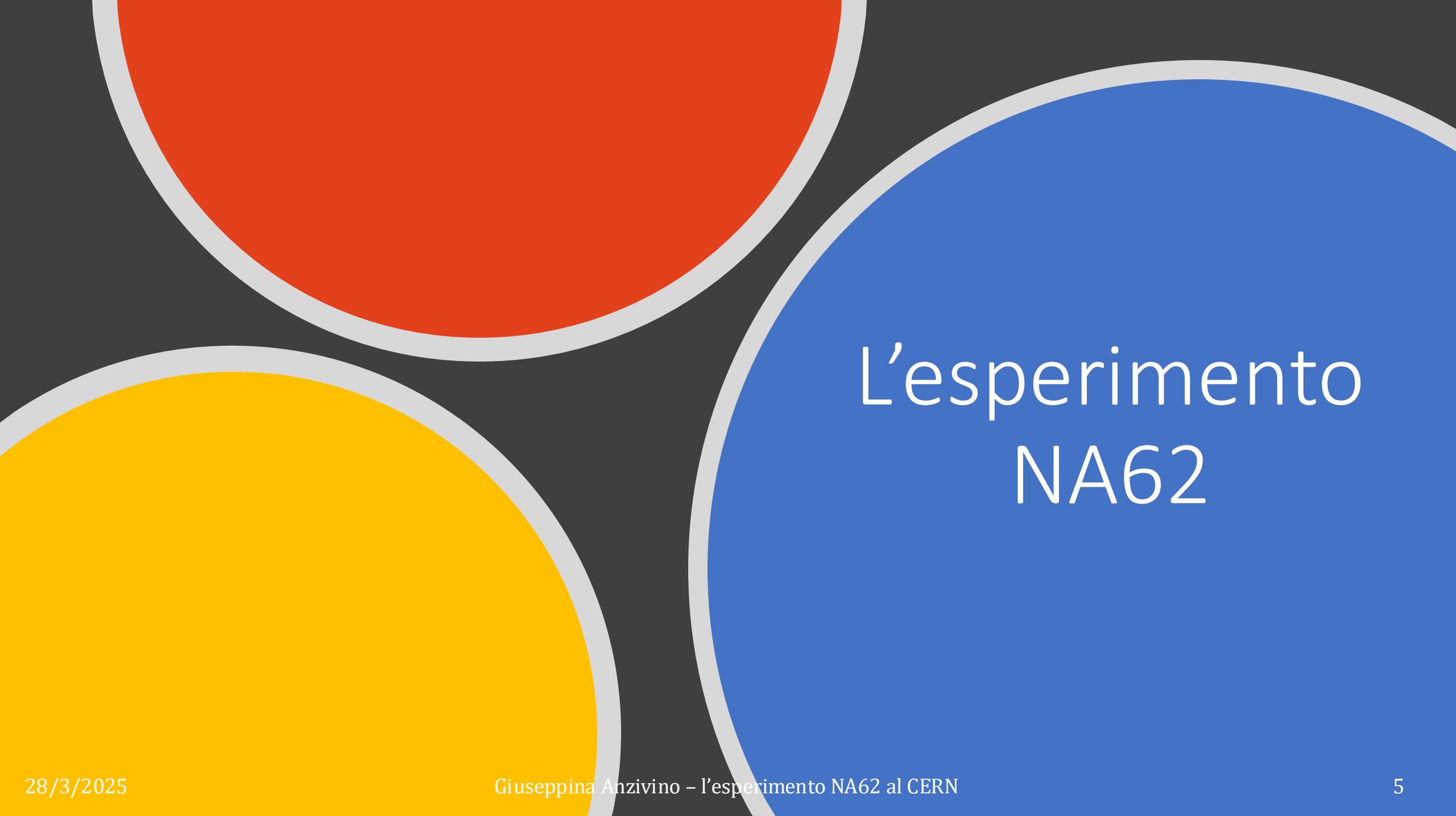


Le particelle elementari

- 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
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS
					SCALAR BOSONS



L'esperimento NA62

II CERN



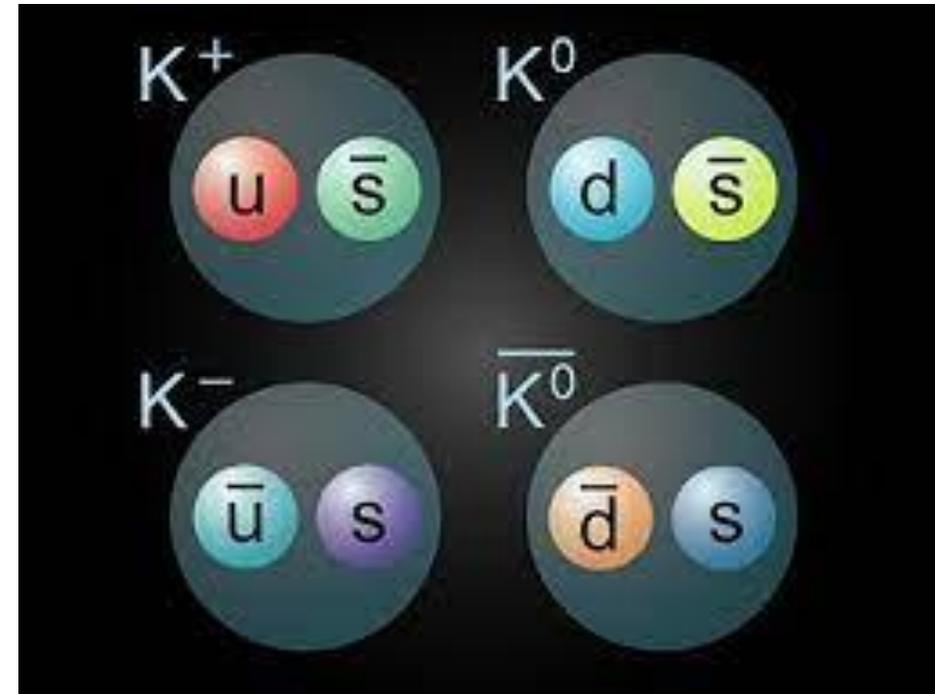
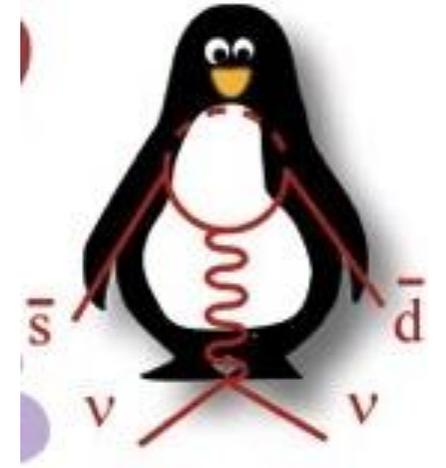
L'esperienza NA62



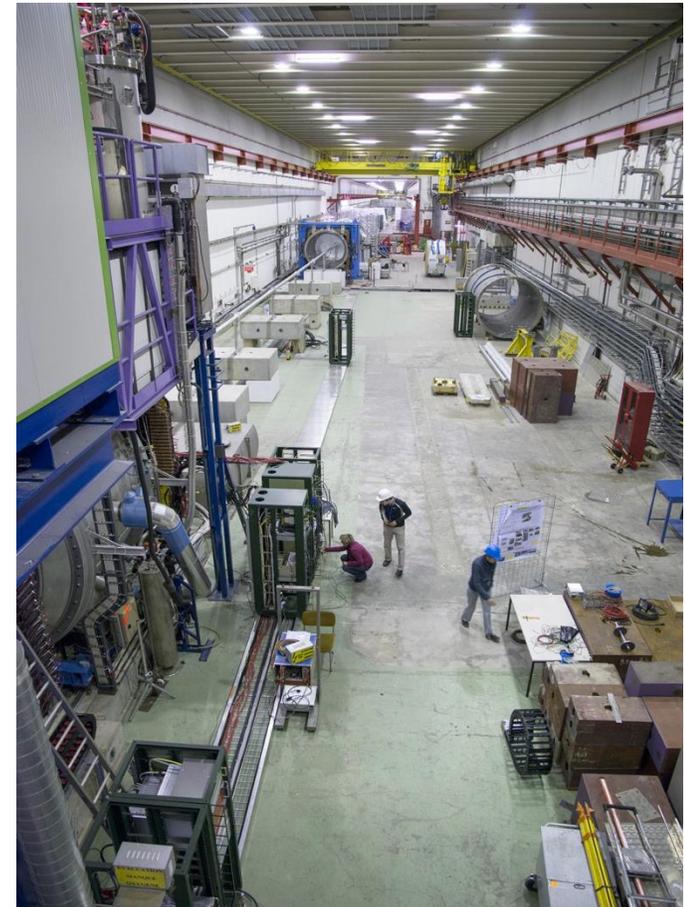
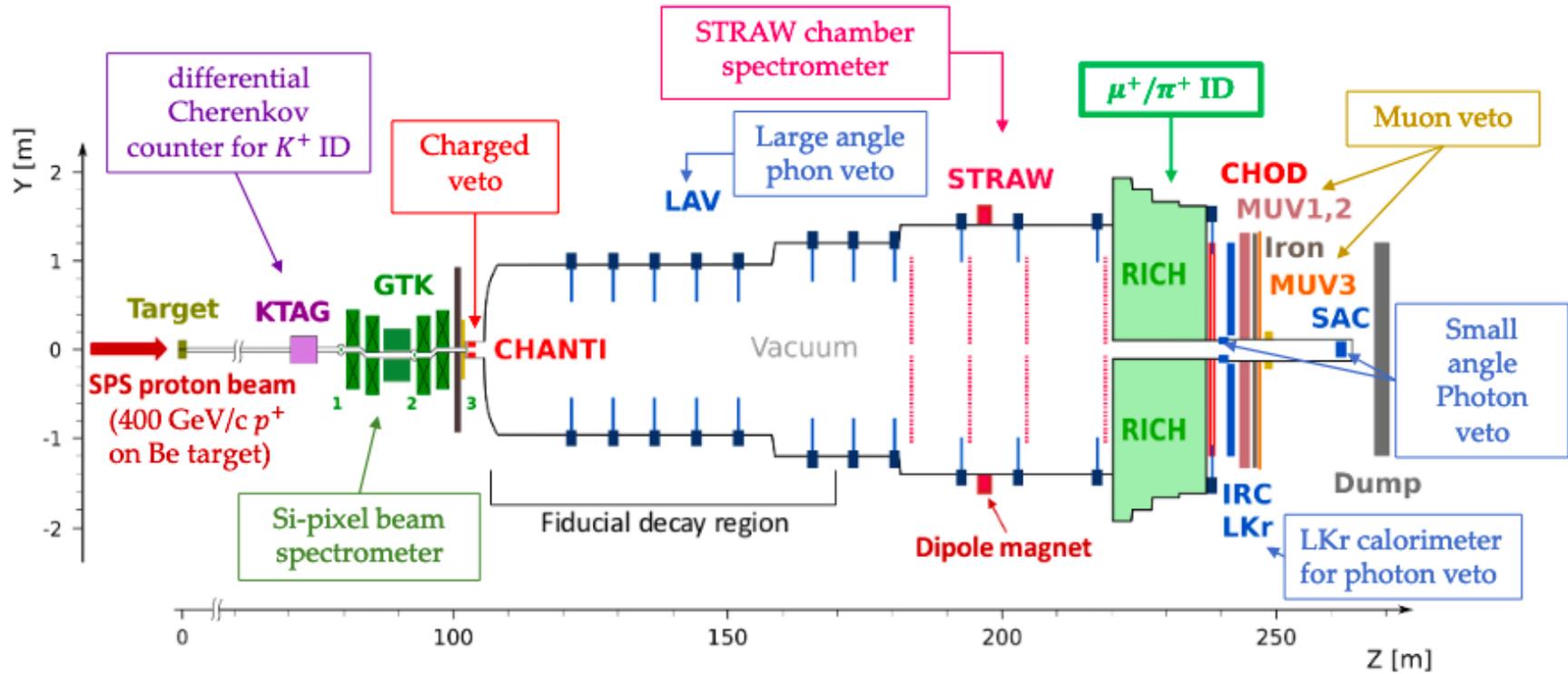
- Collaborazione internazionale, circa 200 partecipanti, 30 istituzioni
- Installato su un fascio estratto dal SPS del CERN
- Scopo principale: misura del rapporto di decadimento (BR) del decadimento ultrararo ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$) ($\sim 10^{-10}$)
- Segnatura sperimentale debole e 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 (2021-2026)

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)



NA62: apparato sperimentale

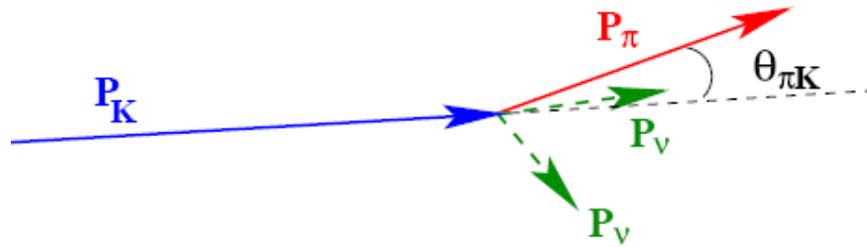


NA62: sala controllo



Sfida sperimentale

Segnale



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



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: i rivelatori



- Rivelatori di traccia (GTK e STRAW)
- Rivelatori per identificazione di particelle (KTAG e RICH)
- Rivelatori di veto per fotoni (LKr, LAV, SAV)

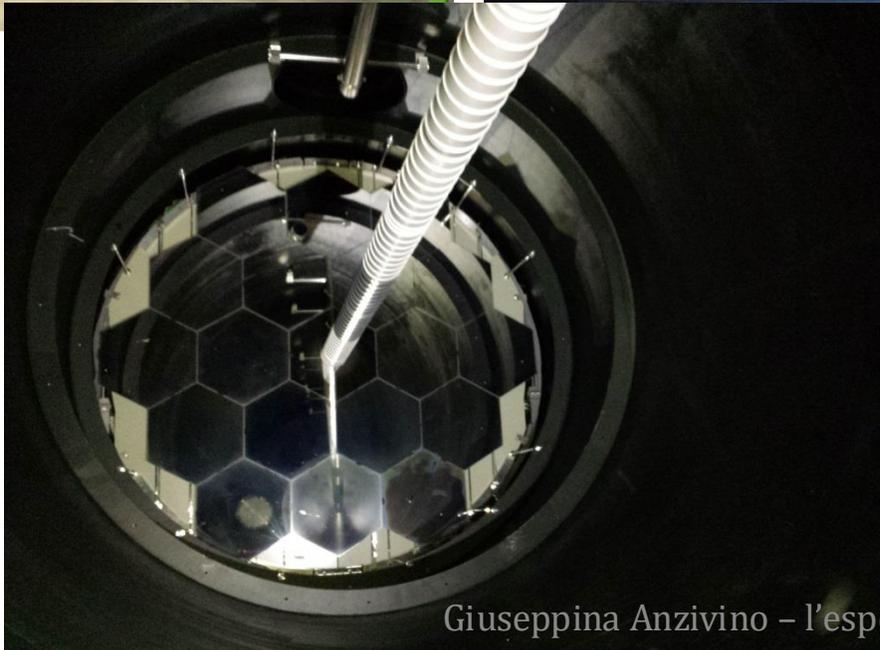
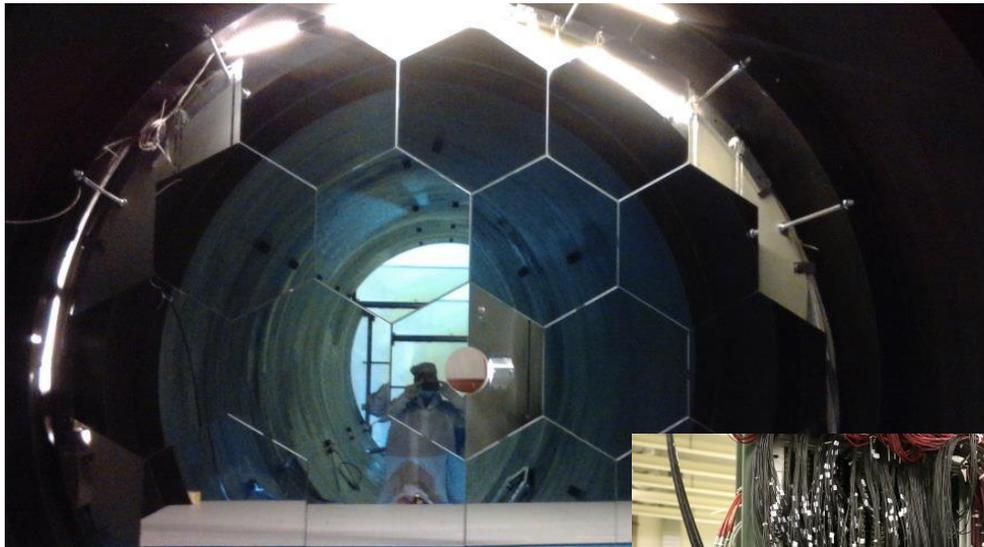
- Ottima risoluzione temporale $O(100 \text{ ps})$
- soppressione dei decadimenti con fotoni $O(10^7)$
- Reiezione cinematica e soppressione fondi con μ

NA62-Perugia: il RICH



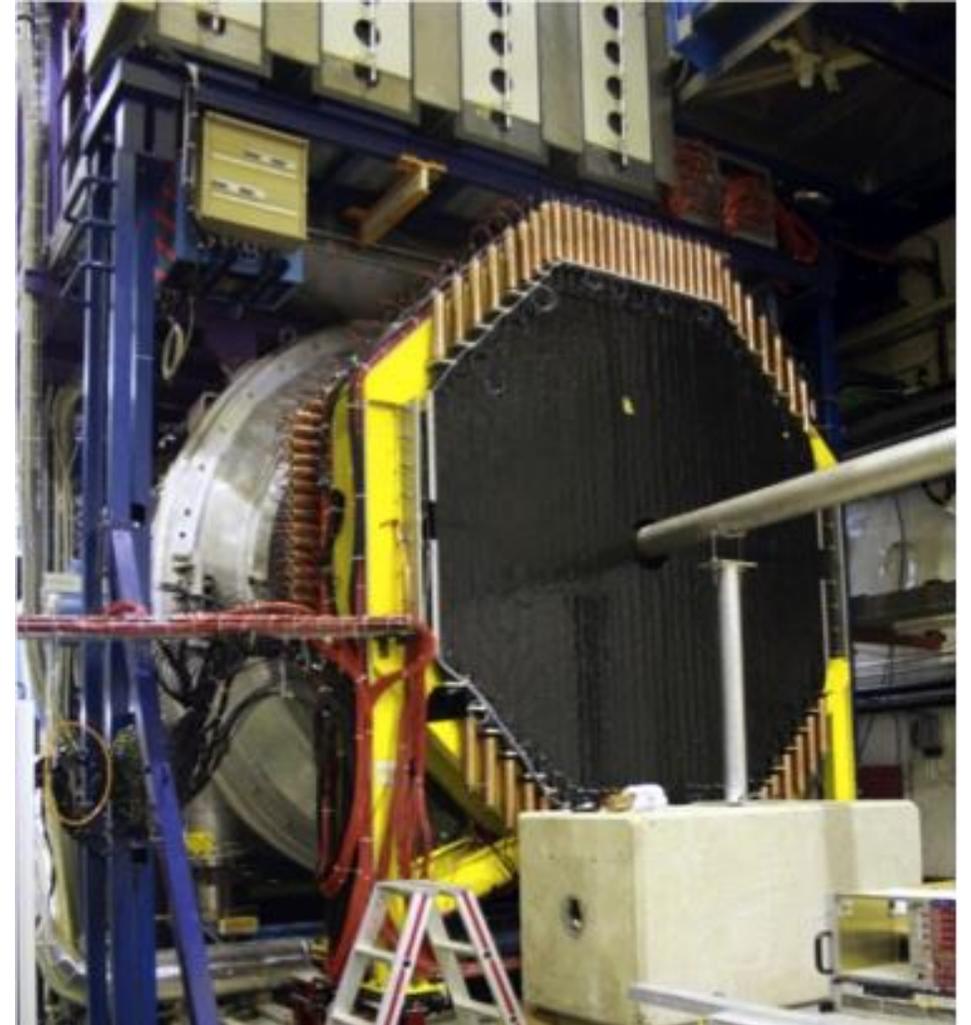
- Rivelatore Cherenkov, contenitore riempito di neon a pressione atmosferica, lungo 18 metri, con diametro da 3.5 a 4 metri
- costruzione dei prototipi, installazione della meccanica di supporto e degli specchi, con relativo sistema di movimentazione, e del collaudo finale del rivelatore
- manutenzione,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

NA62-Perugia: il RICH



NA62-Perugia: il CHOD

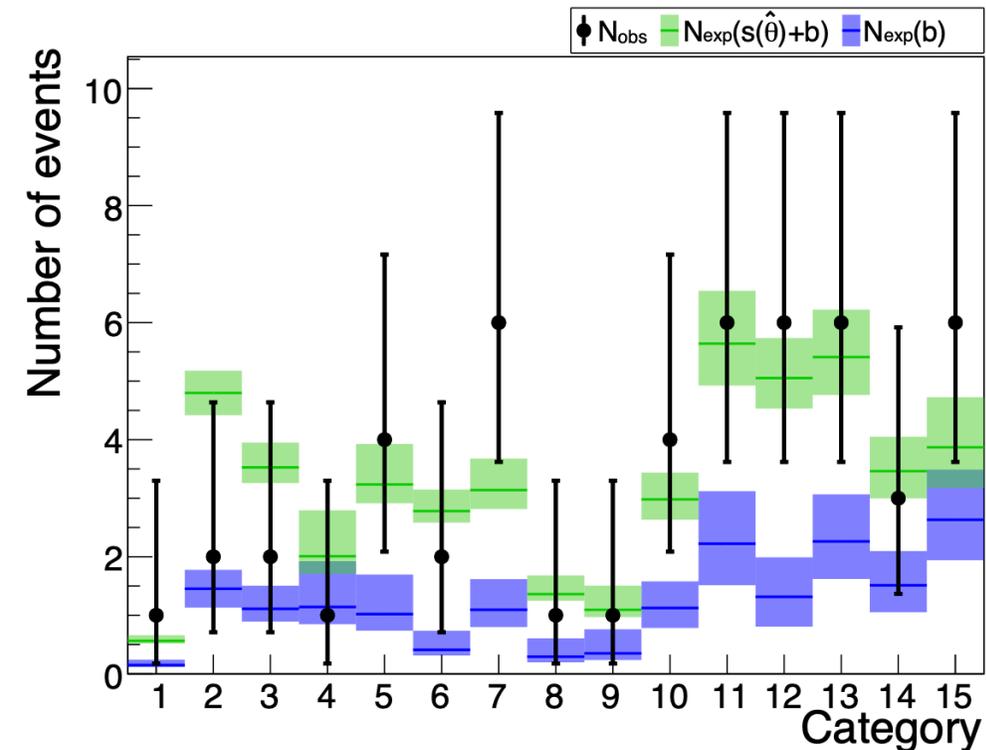
- Installato già nel precedente esperimento (NA48)
- CHOD (2 piani di rivelatori a scintillazione) riveste ancora un ruolo fondamentale
- Attività
 - manutenzione hardware del rivelatore e della sua elettronica di lettura
 - calibrazioni temporali
 - programmi di ricostruzione



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:

- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) = (8.60 \pm 0.42) \times 10^{-11}$

- Risultato ad oggi dai dati di

- RUN 1 (2016-2018) 3 + 17 eventi

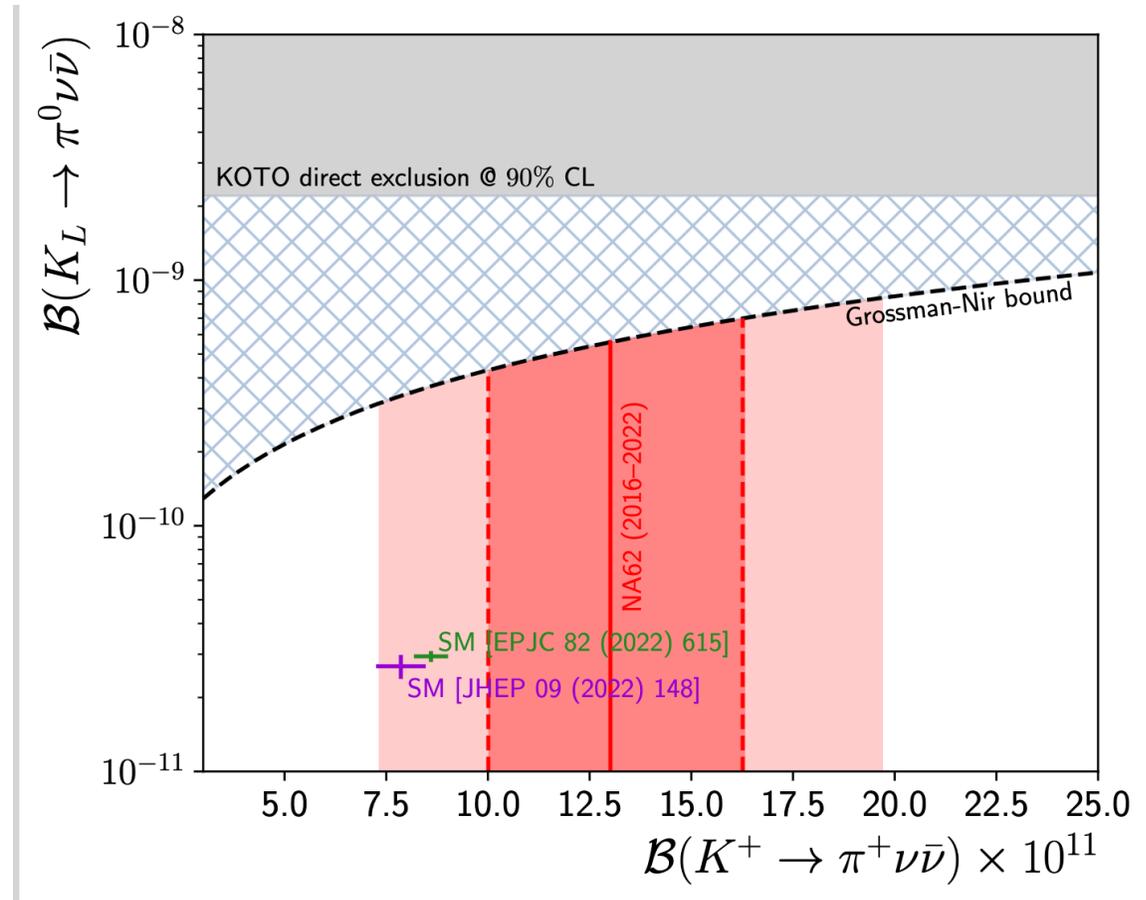
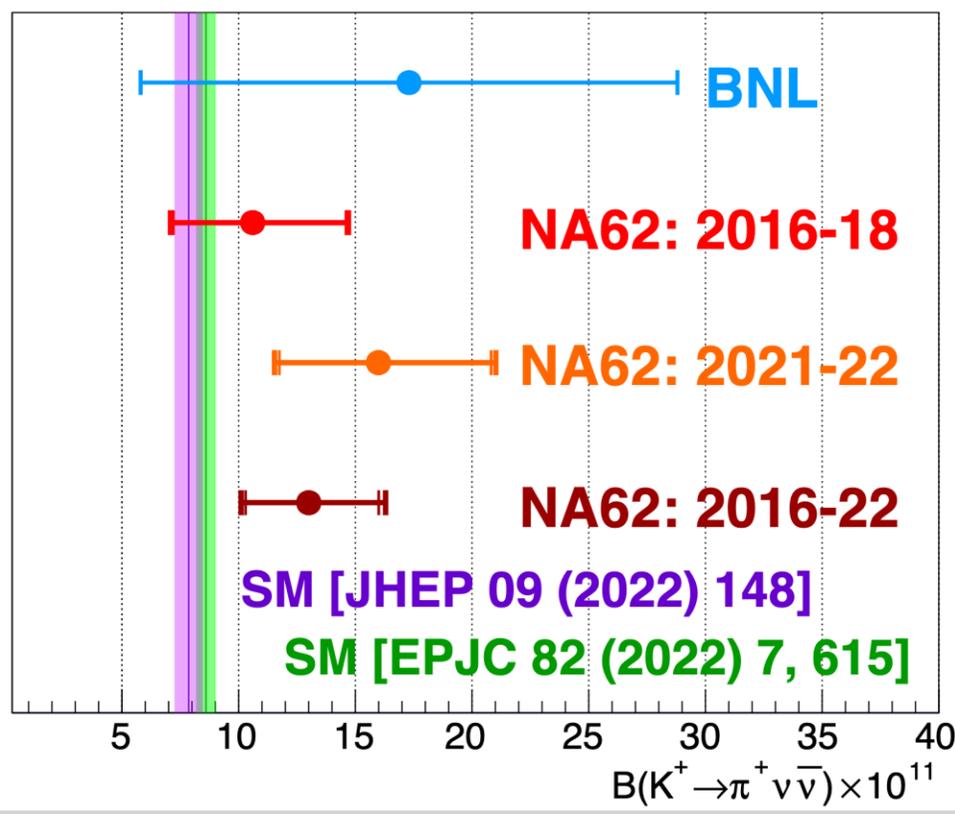
- RUN 2 (2021-2022) 31 eventi

- altri dati da analizzare 2023-2024

} 51 eventi

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) = (13.0_{-2.7}^{+3.0}{}_{stat} \pm 1.3_{syst}) \times 10^{-11} \quad 68\% \text{ CL}$$

NA62: risultato nel contesto



Il più piccolo valore di un Branching Ratio misurato con una significanza $> 5 \sigma$

NA62: impegni futuri

Corto/medio termine

- raccolta dati (2025-2026)
- analisi del decadimento principale (dati 2023-2026)
- completamento delle altre analisi in corso
- controllo e manutenzione dei rivelatori RICH e CHOD

Lungo termine

- Eventuali nuovi esperimenti con mesoni K ad alta intensità

	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 + 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 $K^+ \rightarrow \pi^0 \ell^+ \nu$ 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^+
- e anche altri....

Argomenti di tesi

Prestazioni dei rivelatori di NA62

- Studio e ottimizzazione delle performance del rivelatore RICH (identificazione di μ e π)
- 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
- Studio degli effetti di diffusione della luce Cherenkov nel RICH in funzione degli anni per studi di invecchiamento del rivelatore
- Monitoraggio delle performance del CHOD (risoluzione temporale ed efficienza)

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 – primo ricercatore INFN
- Lisa Fantini – assegnista di ricerca
- Pasquale Lubrano - dirigente di ricerca INFN
- Gabriele Martelli – assegnista di ricerca
- Monica Pepe – dirigente di ricerca INFN
- Mauro Piccini – primo ricercatore INFN

- laureande e laureandi

Componenti del gruppo





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