



# *Fisica del flavour al CERN: gli esperimenti NA62 e LHCb*

Giuseppina Anzivino  
a nome del gruppo NA62/LHCb

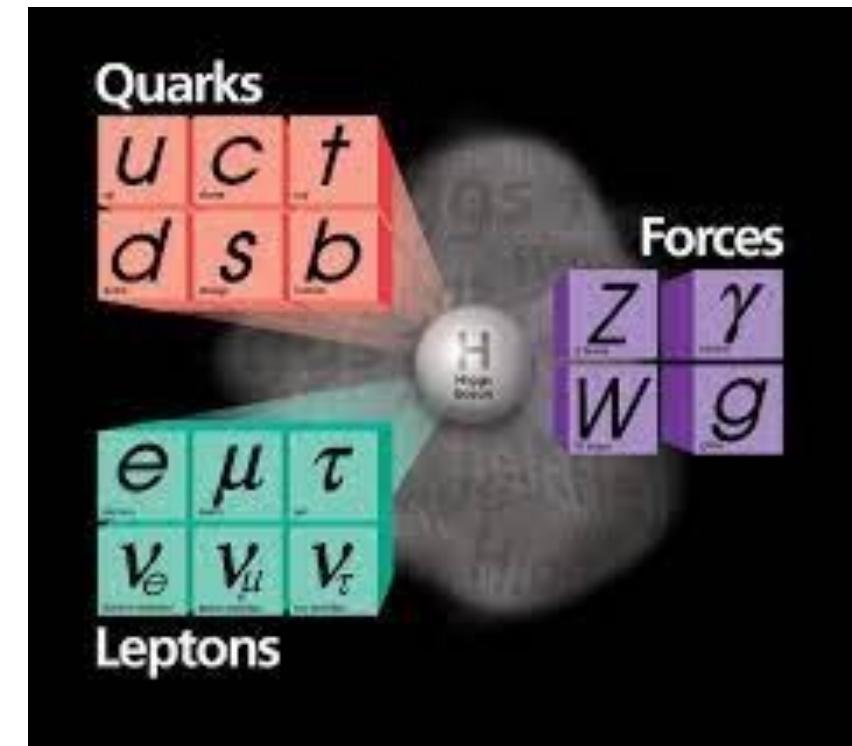
Perugia, 19-4-2022

# Sommario

- Fisica del Flavour: contesto e motivazioni
- Mesoni strani e Mesoni belli
- L'esperimento NA62
  - Descrizione dell'esperimento
  - Contributi del gruppo di Perugia
  - Argomenti per tesi
- L'esperimento LHCb
  - Descrizione dell'esperimento
  - Contributi del gruppo di Perugia
  - Argomenti per tesi
- Conclusioni e prospettive

# Contesto e motivazioni

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



# Le tre frontiere

Come e dove cercare le risposte?

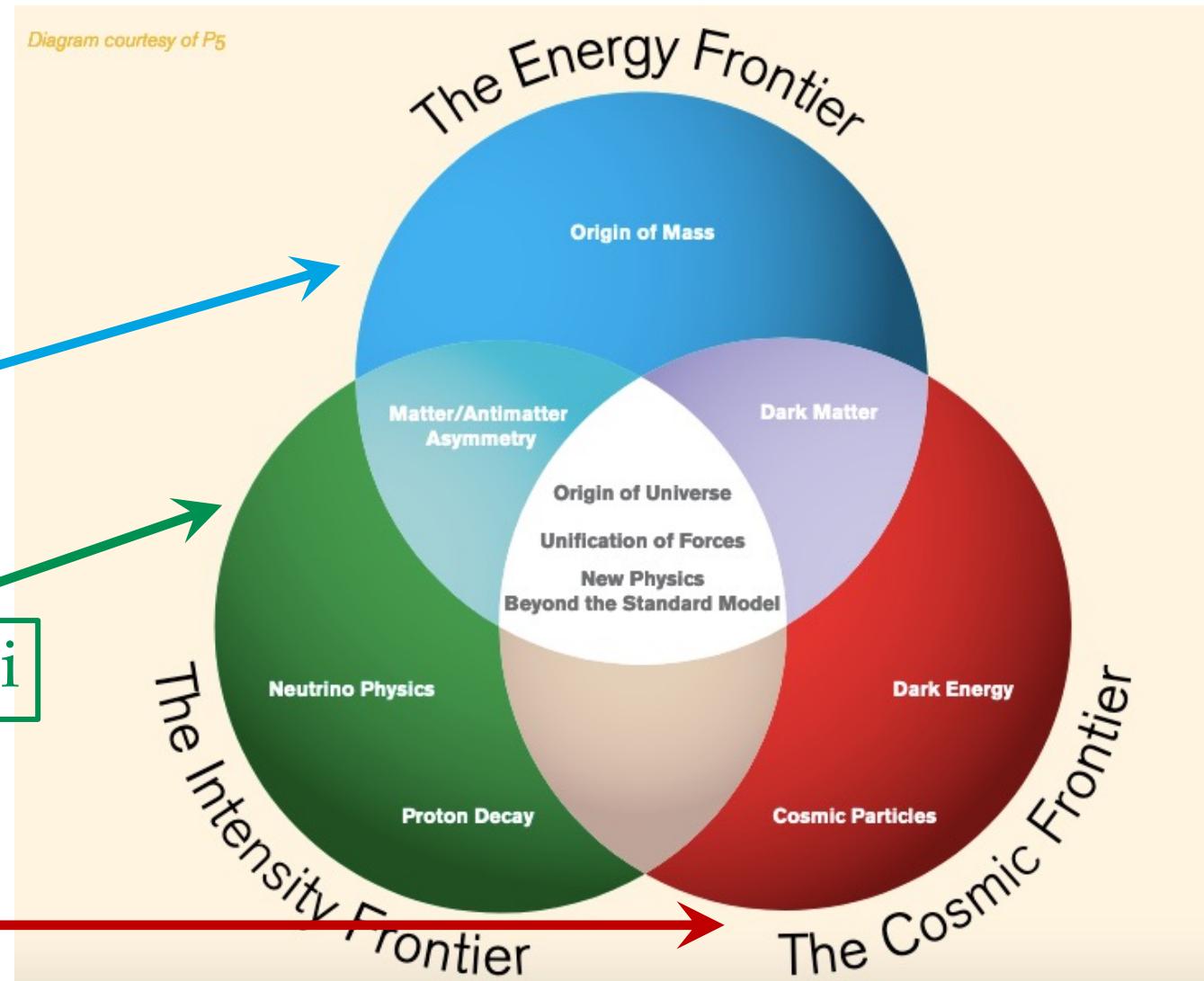
Le tre frontiere



Esperimenti ai collider

Misure di precisione con fasci estratti

Esperimenti nello spazio



# Fisica del flavour

- Gli studi nel settore di fisica del flavour sono principalmente motivati dalla ricerca di **Fisica oltre il Modello Standard**.
- Lo SM lascia completamente priva di spiegazione l'origine di molti aspetti fondamentali (es. il numero di famiglie di leptoni e quark, le gerarchie delle loro masse, materia oscura, asimmetria materia-antimateria) facendo ricorso a numerose **costanti fenomenologiche** misurate solo sperimentalmente.
- La Fisica del flavour 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
- La maggior parte dei parametri liberi dello MS sono legati a questo settore
- Un esempio: il settore del flavour fornisce l'unica sorgente di **violazione di CP** nello SM
- Quali particelle?
  - Mesoni strani (**K**, contengono il quark 'strange') per **NA62**
  - Mesoni belli (**B**, contengono il quark 'beauty' o 'bottom') per **LHCb**

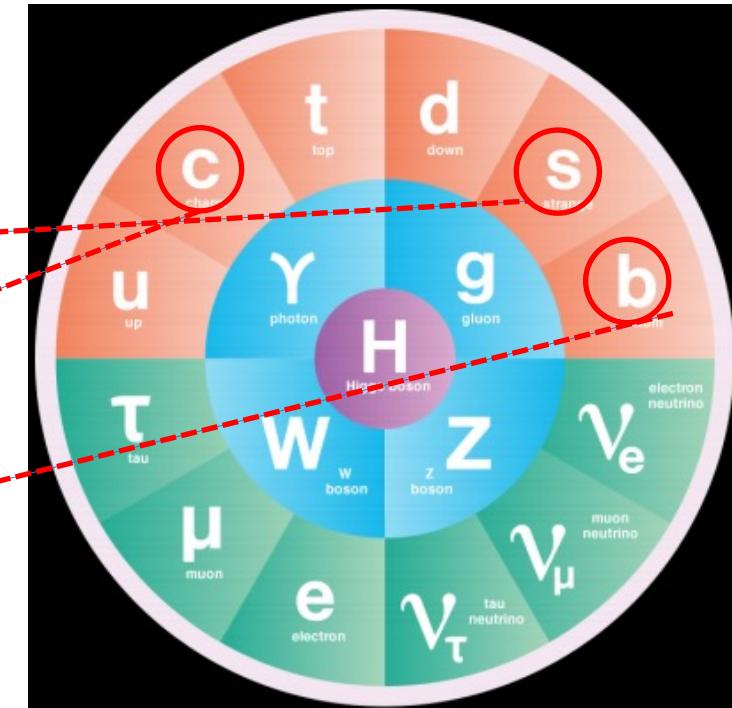
# Fisica del flavour – il nostro gruppo

- Storicamente impegnato in esperimenti con fascio incidente su bersaglio fisso (NA48, NA48/I, NA48/II, **NA62**)
- Fisica del sapore con fasci ad alta intensità di particelle con massa ‘leggera’, mesoni **K**
  - Misure di precisione
  - Misure di processi rari o proibiti



Da inizio 2020 il gruppo è entrato a far parte della collaborazione **LHCb**, per perseguire il filone di ricerca della fisica del sapore (mesoni **D** e **B**) e per usare le competenze acquisite nel passato nella costruzione di rivelatori per i futuri aggiornamenti di tale esperimento:

- Sviluppo e costruzione di sensori di radiazione
- Sviluppo di elettronica di acquisizione ad alte prestazioni



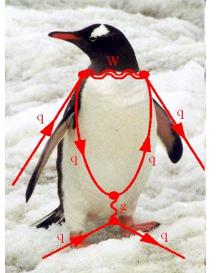
# L'esperimento NA62

# L'esperimento NA62

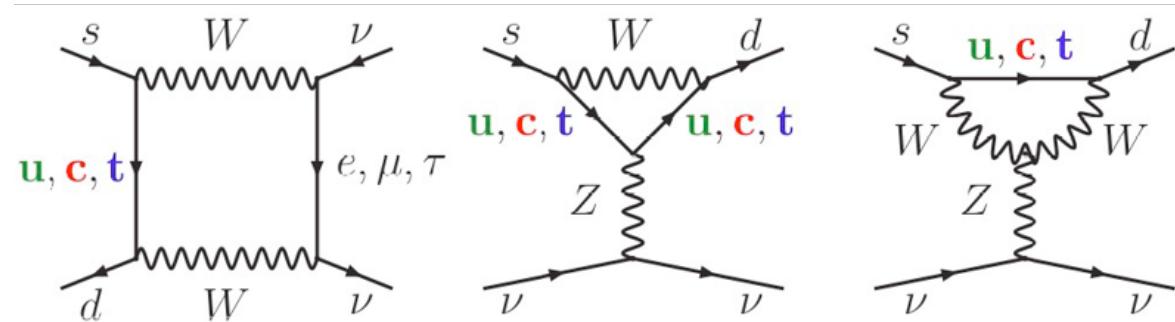


- Collaborazione internazionale, circa 200 partecipati, 30 istituzioni
- Installato su un fascio estratto dal SPS del CERN
- Scopo principale: misura del BR del decadimento ultra-raro ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ ) ( $\sim 10^{-11}$ )
- Segnatura sperimentale debole e decadimenti di fondo molto più abbondanti (es: 0.63)
- Molte altre misure: ricerca di leptoni neutri pesanti, studi dell'universalità leptonica, ricerca di particelle esotiche, etc....
- Presa dati RUN1 (2016-2018), approvato RUN2 2022-2024 (2025?)

# NA62: il decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$



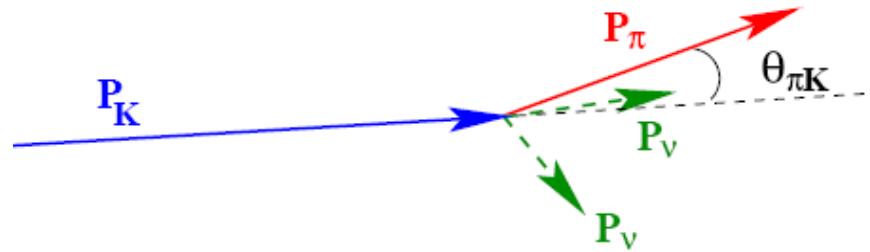
- Processo FCNC proibito a livello ad albero
- Dominato da contributi a corta distanza e descritto da diagrammi a box e pinguino



- Predizione teorica molto precisa:  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}$
- Necessità di effettuare una misura con (altrettanta) estrema precisione
- Dalla misura del BR si possono estrarre informazioni sulla matrice CKM
- Diversi modelli di estensione del SM predicono valori del BR che si discostano in modo significativo da quello previsto dal SM

# Sfida sperimentale

Segnale



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



Fondo

$$\begin{aligned} \text{BR} (K^+ \rightarrow \mu^+ \nu) &= 63.5\% \\ \text{BR} (K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0) &= 20.7\% \end{aligned}$$



## sfida sperimentale ardua!

Armi

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



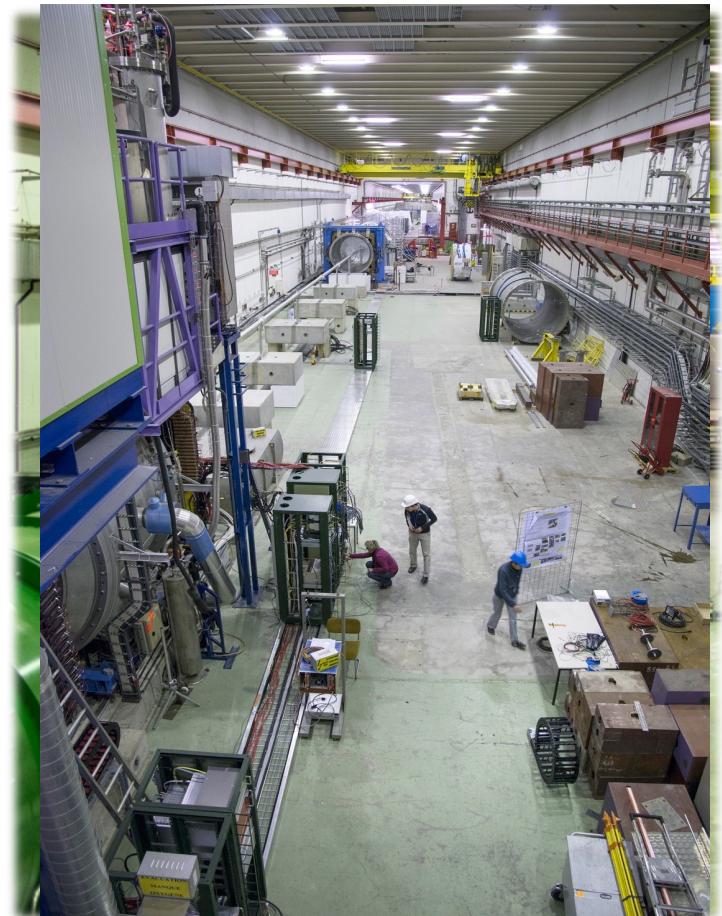
# NA62: apparato sperimentale



- Rivelatori di traccia (GTK e STRAW)
- Rivelatori per identificazione di particelle (KTAG e RICH)
- Rivelatori di vetro 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  $m$

# NA62: apparato sperimentale

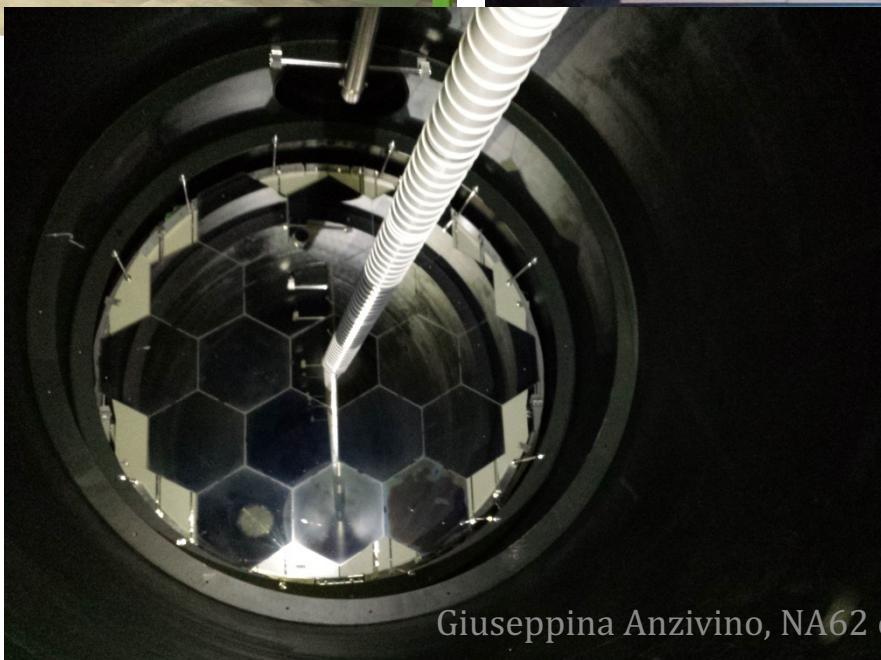
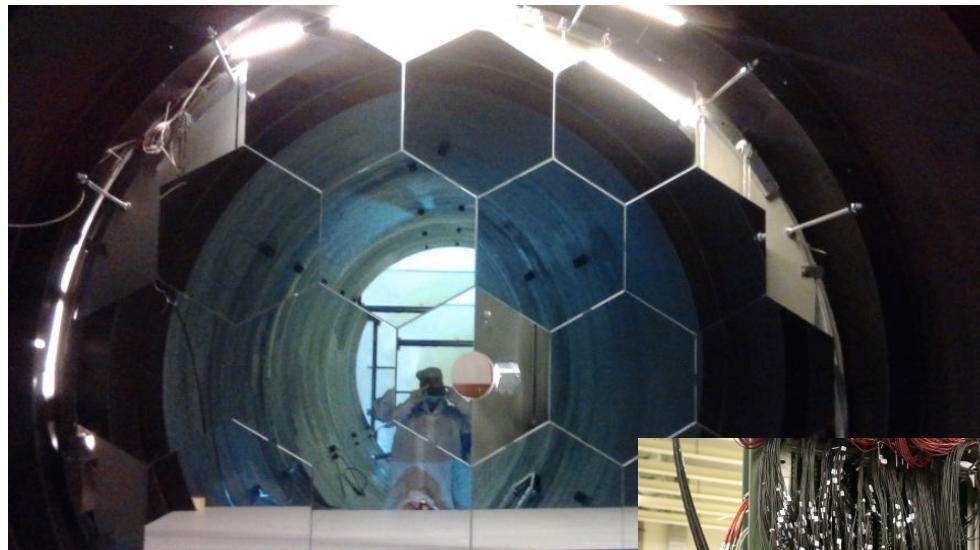


# NA62-Perugia: il RICH



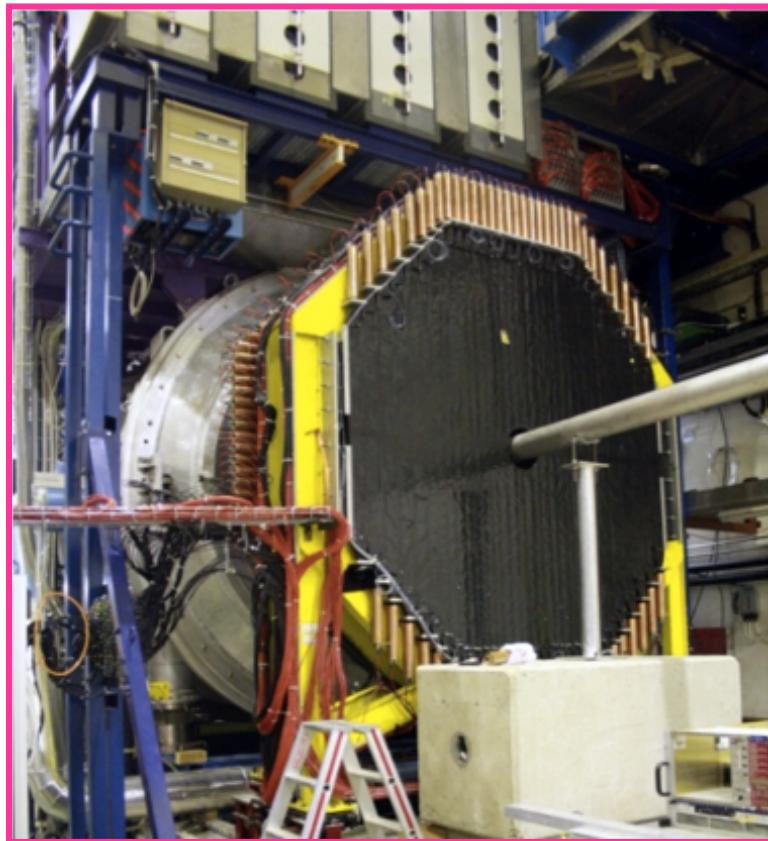
- Rivelatore Cherenkov, contenitore riempito di neon a pressione atmosferica, lungo 18 metri, con diametro da 3.5 a 4 metri
- responsabilità della costruzione dei prototipi, installazione della meccanica di supporto e degli specchi, con relativo sistema di movimentazione, e del collaudo finale del rivelatore
- 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*

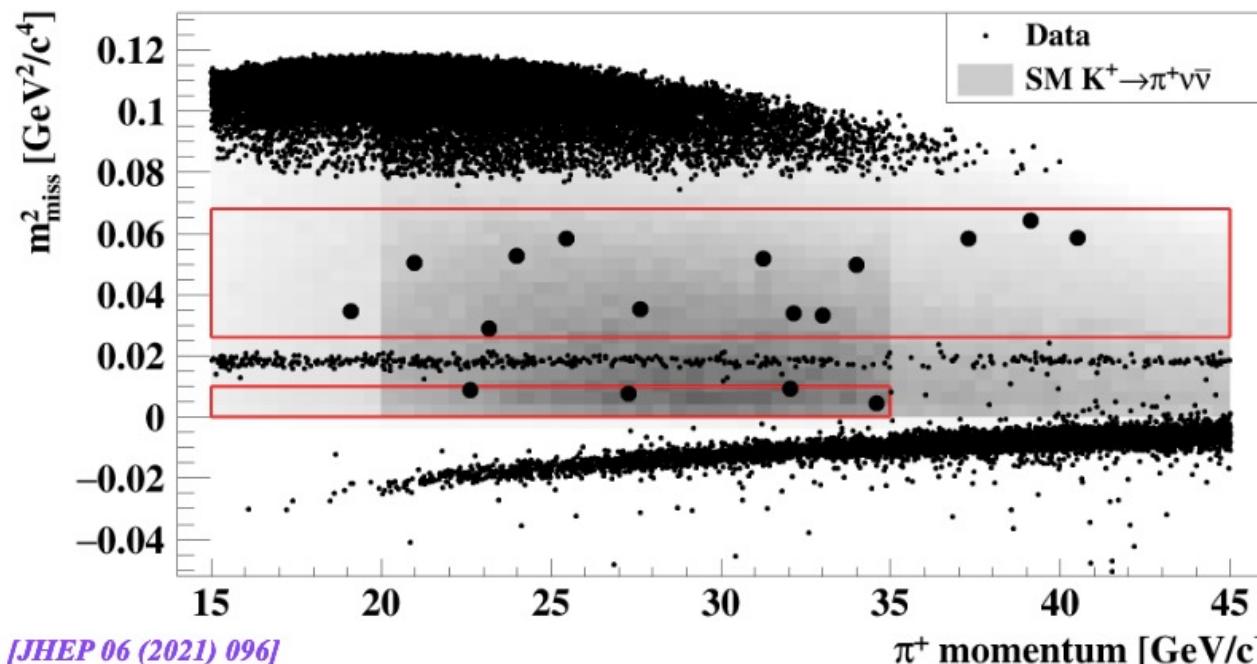
- Installati già nel precedente esperimento (NA48)
- CHOD (2 piani di rivelatori a scintillazione) riveste ancora un ruolo fondamentale
- Attività
  - manutenzione hardware del rivelatore e della sua elettronica di lettura
  - calibrazioni temporali
  - programmi di ricostruzione



# 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



Prima misura con la tecnica del decadimento in volo!  
La più forte evidenza, ad oggi, dell'esistenza di questo decadimento

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

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

# NA62: impegni futuri

## Corto termine

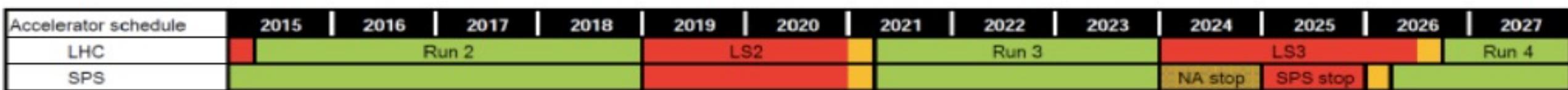
- completamento altre analisi in corso:  $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ ,  $K^+ \rightarrow e^+ \nu e^+ e^-$
- analisi dei dati 2021 per dimostrarne la qualità alla intensità nominale e con i nuovi rivelatori

## Medio termine (2022-2024 (2025?))

- raccolta dati, efficiente e stabile (inizio presa dati la settimana prossima, fino a novembre)
- responsabilità del funzionamento dei rivelatori RICH e CHOD

## Lungo termine

- Esperimenti con K ad alta intensità, nell'ambito dell'iniziativa Physics Beyond Colliders



# Argomenti di tesi – NA62

## Prestazioni dei rivelatori di NA62:

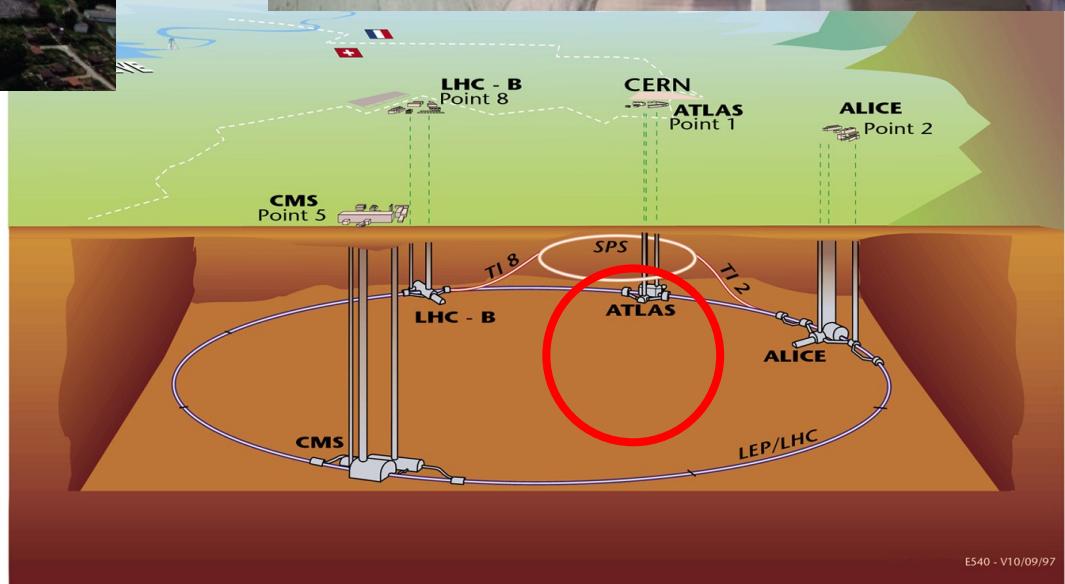
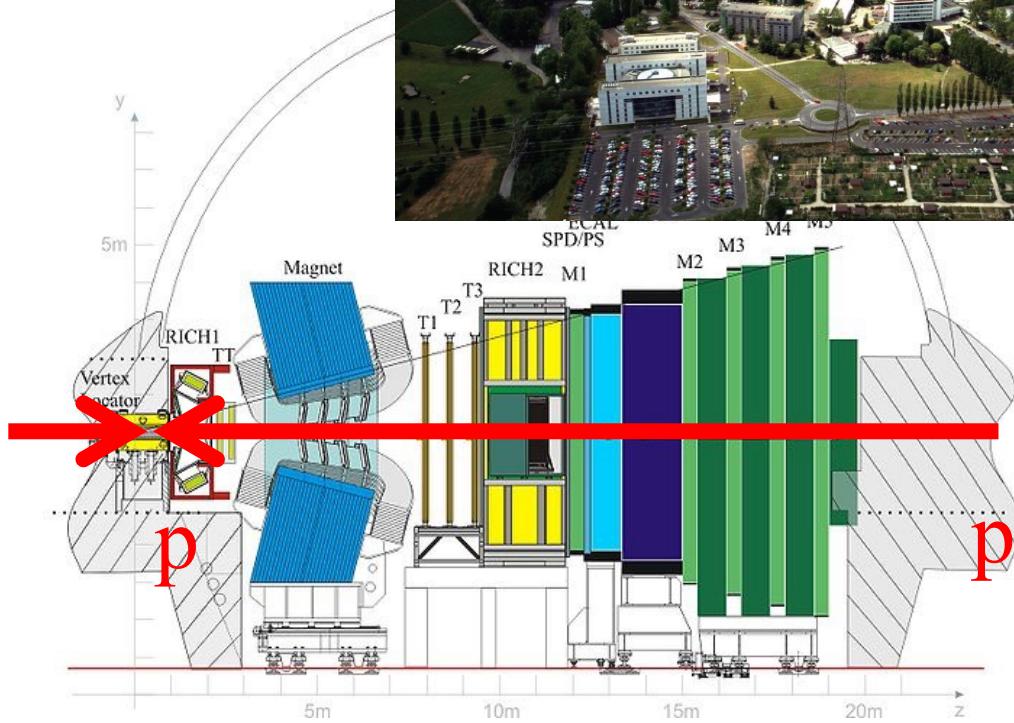
- Studio e ottimizzazione delle performance del rivelatore RICH (identificazione di  $\mu$  e  $\pi$ )
- Validazione, tramite confronto con i dati, delle simulazioni Monte Carlo del rivelatore RICH attraverso la selezione di decadimenti con muoni e pioni nello stato finale

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

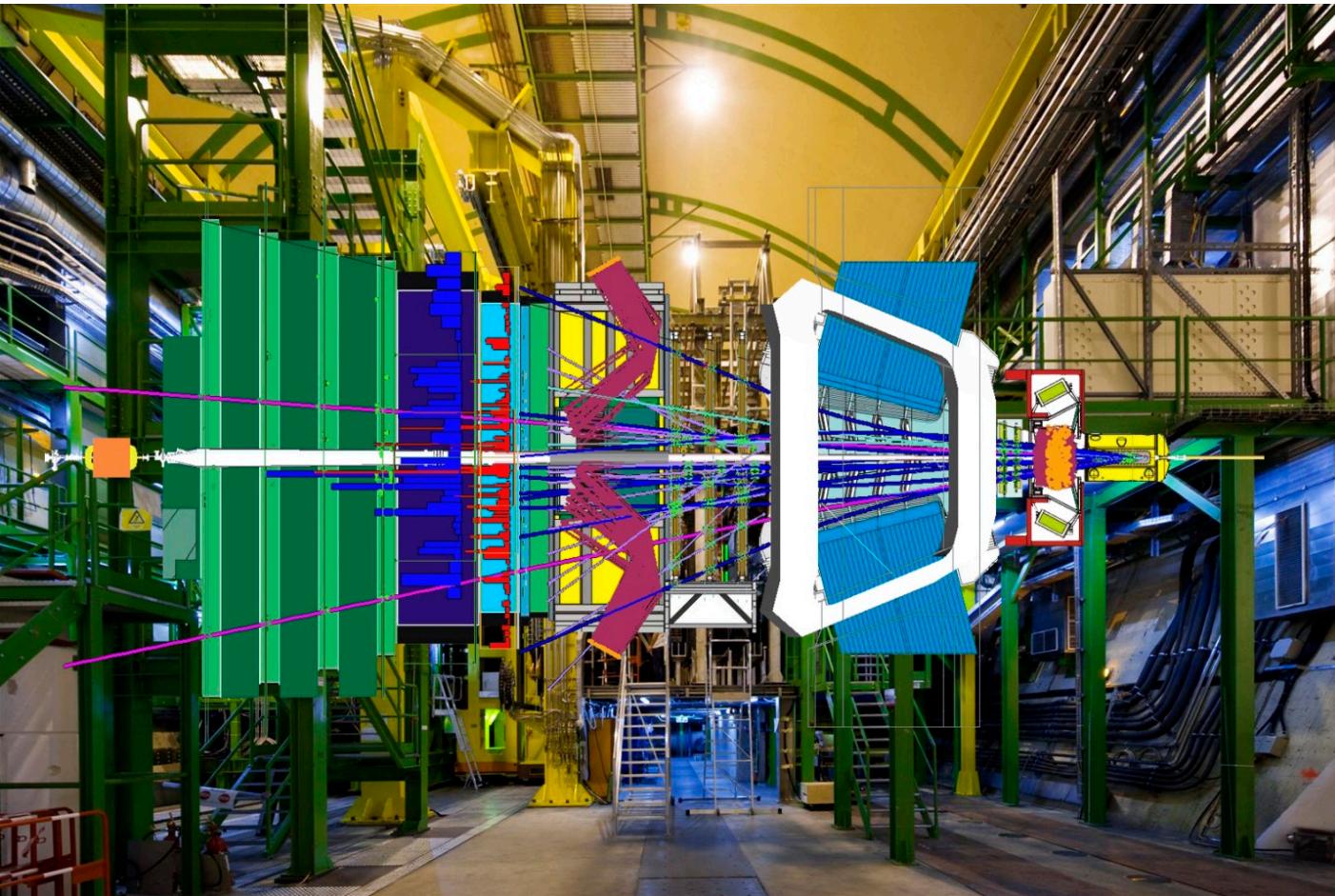
- Algoritmi di machine learning per l'ottimizzazione del rapporto segnale / rumore nella ricerca del decadimento ultra-raro  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- Test di universalità leptonica delle interazioni deboli attraverso i decadimenti semileptonici del mesone  $K$ :  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$
- Studio della soppressione dei fondi e dei canali di normalizzazione per la ricerca dei decadimenti rari del  $K^+$  in stati finali con quattro leptoni
- Misure della massa e della vita media del mesone  $K^+$  con i dati raccolti da NA62

# L'esperimento LHCb

# L'esperimento LHCb



# L'esperimento LHCb



- Collaborazione internazionale, circa 1400 partecipati, 80 istituzioni
- Installato in una delle 4 intersezioni del LHC del CERN
- Esperimento quasi 'general purpose', ma con focalizzazione alla direzione in avanti, rivelatore asimmetrico
- Scopo principale: studio della fisica del **beauty** e di decadimenti rari di particelle (**mesoni e barioni**) dotate di **quark b**
- Recenti importanti risultati raggiunti: misura del  $BR(B \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ ; misura dell'angolo  $\gamma$  della matrice CKM; scoperta di particelle esotiche; etc.....

# LHCb - contributi di Perugia

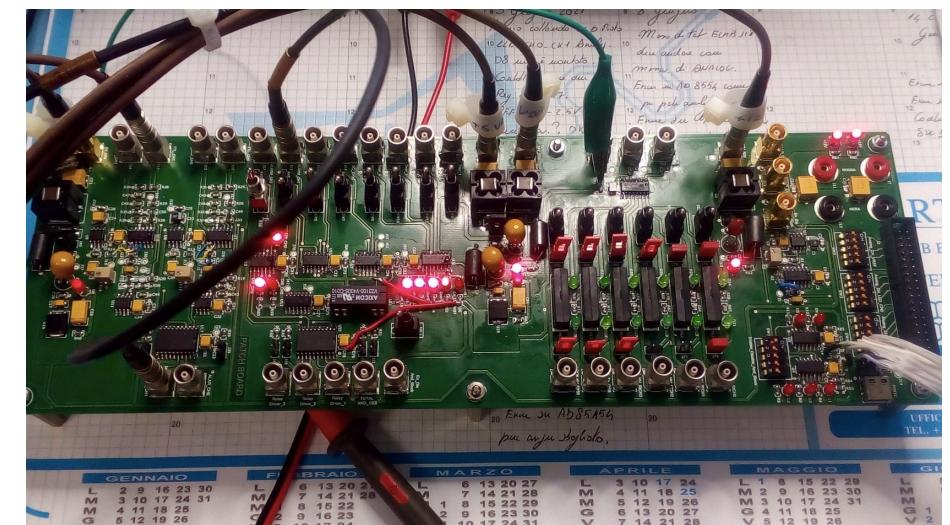
## Attività hardware

- Data l'esperienza acquisita in NA62, le prime attività in LHCb sono concentrate sui rivelatori RICH
- Progettazione, costruzione e installazione dei Light Leak Detector (LLD), sensori di sicurezza connessi direttamente al sistema DSS (Detector Safety System) del rivelatore per arrestare l'HV dei sensori principali
- Responsabilità dell'elettronica per processare i segnali e per gestire la logica di tutti i segnali di allarme



## Attività di analisi dati

- Ricerca di risonanze nel decadimento  $\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$ , oggetti di tesi di dottorato di G. Martelli
- Studio di LFUV nei processi  $B \rightarrow e \mu \pi$ , oggetto di tesi di dottorato di L. Fantini



# LHCb – attività previste nel 2022

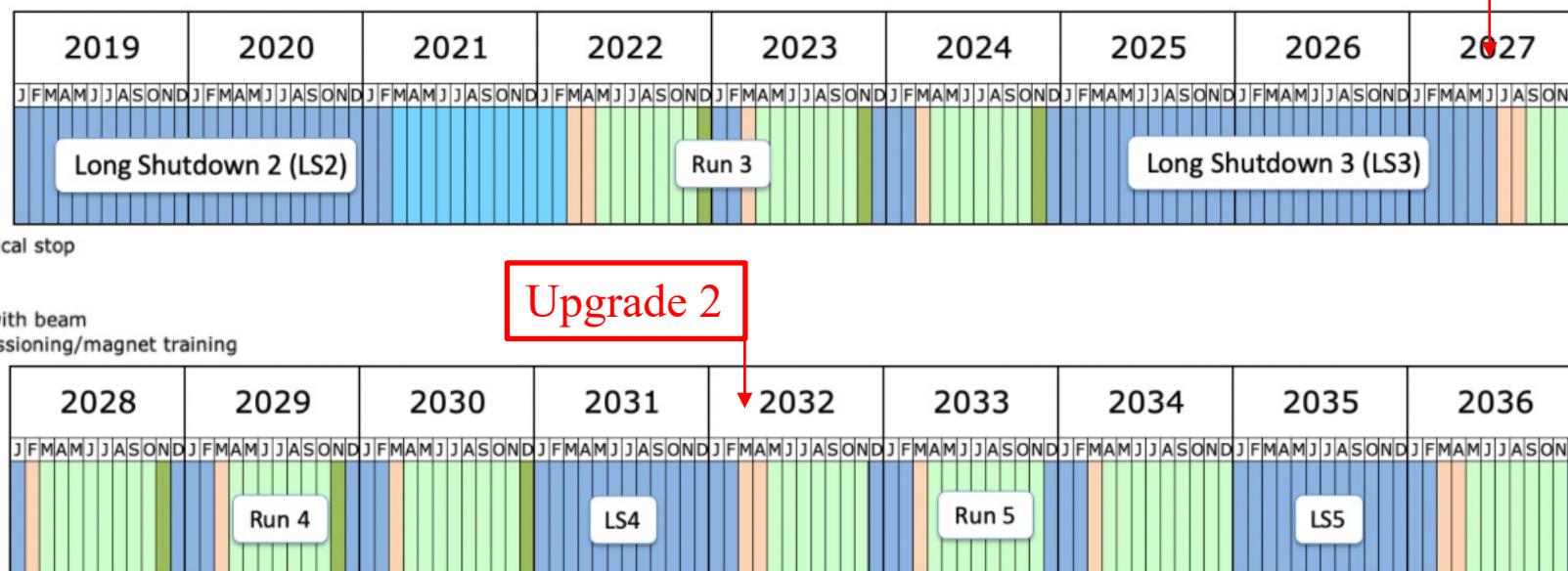
- Partecipazione al completamento del collaudo dei RICH di LHCb:
  - Fine dell'integrazione dei LLD nel DSS dell'esperimento
- Analisi dati:
  - Continuazione delle analisi in corso,  $\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$  e  $B \rightarrow e \mu \pi$
- Contributo alla definizione degli High Level Trigger e delle linee di selezione dei canali in cui siamo coinvolti nell'analisi
- Contributo allo sviluppo del MonteCarlo dei RICH
- Presa dati
- Inizio R&D per gli upgrade dei RICH per le fasi successive, in vista di High-Lumi LHC (2028):
  - Nuovi sensori, nuova elettronica di read-out, nuova meccanica degli specchi



# LHCb - futuro

- In Run-3, attuale, LHC avrà una luminosità maggiore, con un conseguente incremento in statistica rispetto a Run-1 e Run-2
- Grande attesa per gli aggiornamenti delle misure dei valori anomali nel settore del flavour

LHC era			HL-LHC era	
Run 1 (2010-12)	Run 2 (2015-18)	Run 3 (2021-24)	Run 4 (2027-30)	Run 5+ (2031+)
$3 \text{ fb}^{-1}$	$9 \text{ fb}^{-1}$	$23 \text{ fb}^{-1}$	$50 \text{ fb}^{-1}$	$300 \text{ fb}^{-1}$



# Argomenti di tesi – LHCb

## Attività legate ai rivelatori:

- Calibrazione del sistema di sicurezza dei RICH di LHCb

## Attività di analisi dei dati:

- Studio del processo  $\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$  e ricerca di risonanze nella coppia  $\mu^+ \mu^-$
- Studio dei processi  $B \rightarrow e N$  ( $N \rightarrow \mu \pi$ ),  $B \rightarrow \mu N$  ( $N \rightarrow e \pi$ ), con  $N$  Heavy Neutral Lepton
- Studi dei relativi canali di normalizzazione
- Studi di identificazione di particelle in relazione alle misure del decadimento  $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$

## Attività di R&D:

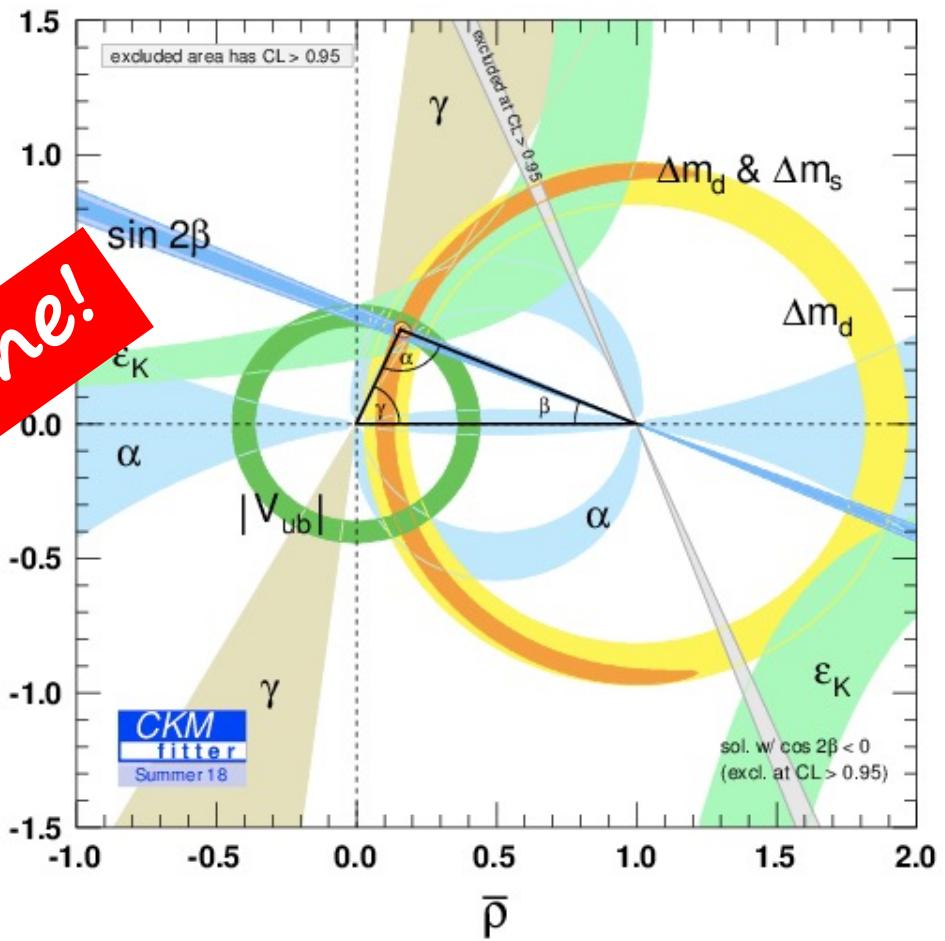
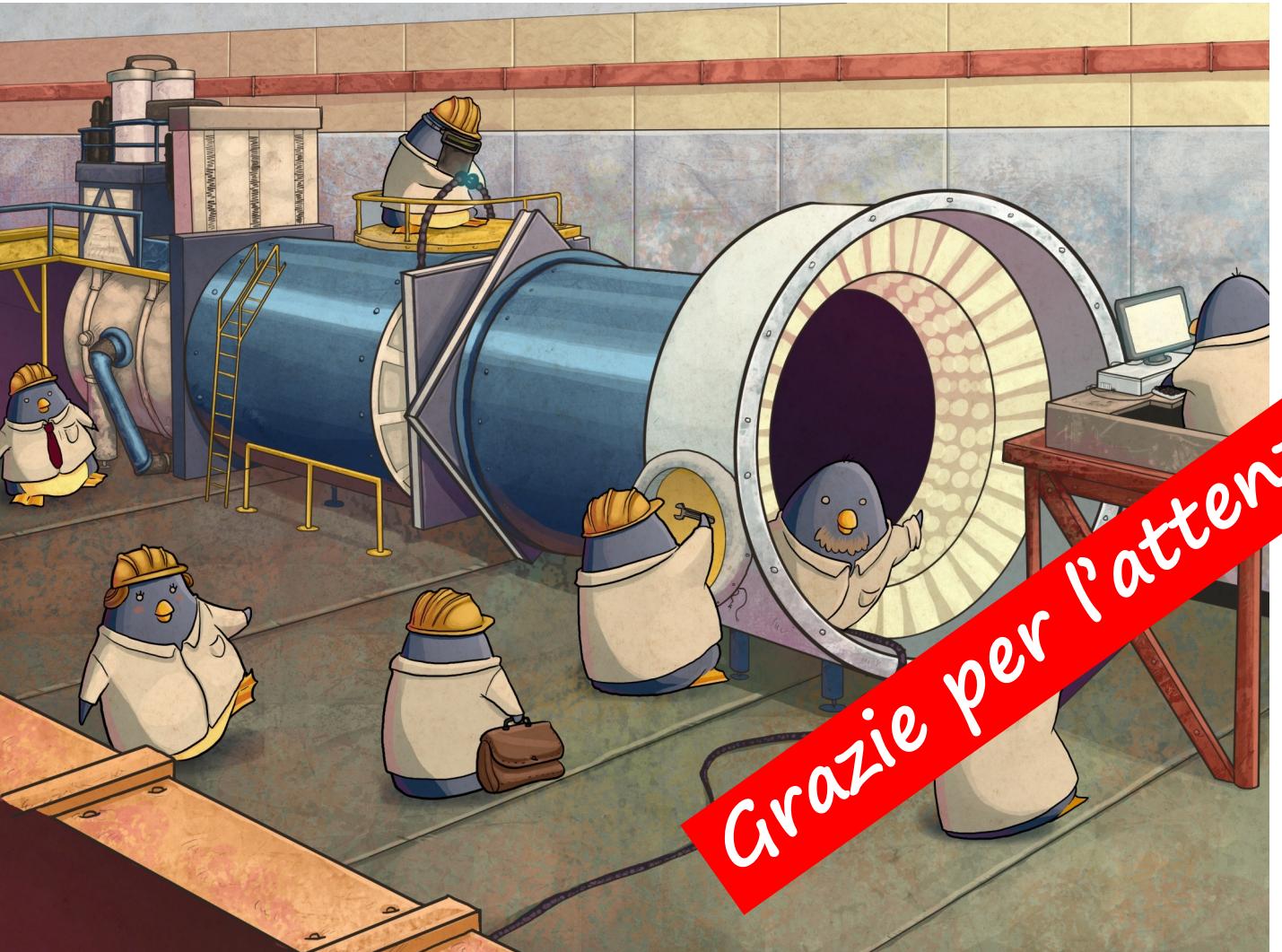
- Costruzione e test di un sistema di scintillatori per misure di tempo ad alta precisione
- Misure di efficienza e risoluzione temporale per SiPM che operano a basse temperature

# Componenti del gruppo di ricerca

- Giuseppina Anzivino – professoressa associata ([giuseppina.anzivino@unipg.it](mailto:giuseppina.anzivino@unipg.it))
- Francesco Brizioli – assegnista di ricerca INFN
- Patrizia Cenci – dirigente di ricerca INFN
- Viacheslav Duk – ricercatore INFN
- Lisa Fantini – dottoranda
- Pasquale Lubrano - dirigente di ricerca INFN
- Gabriele Martelli – dottorando
- Monica Pepe – I ricercatrice INFN
- Mauro Piccini – ricercatore INFN ([mauro.piccini@pg.infn.it](mailto:mauro.piccini@pg.infn.it))
- 3 laureandi/a magistrali e 2 laureande

# Componenti del gruppo





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