



# Fisica del sapore a LHC

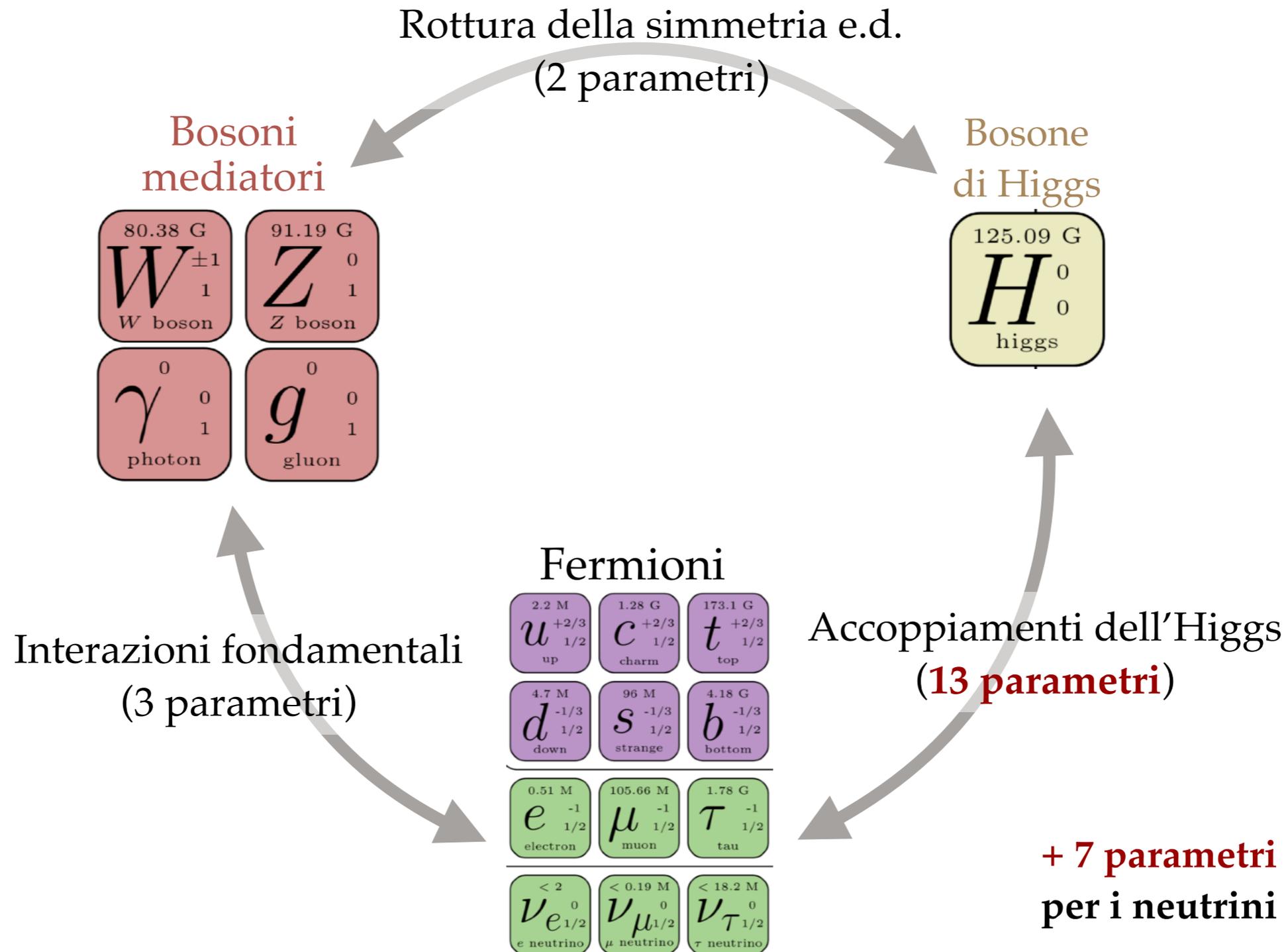
+ *fisica con fasci di muoni*

23 Gennaio 2024

*Presentazione delle  
attività di tesi triennali*

[martino.borsato@unimib.it](mailto:martino.borsato@unimib.it)

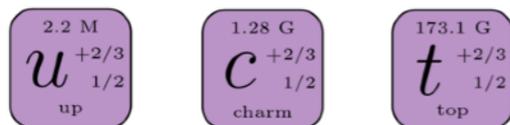
# Il Modello Standard



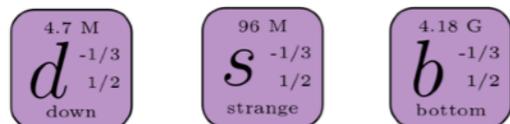
# Il settore del sapore

## Accoppiamenti dell'Higgs (13 parametri)

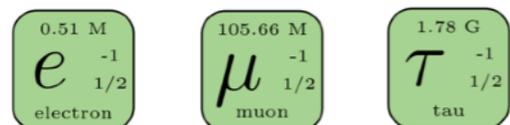
### Masse dei fermioni



$$m_u \ll m_c \ll m_t$$



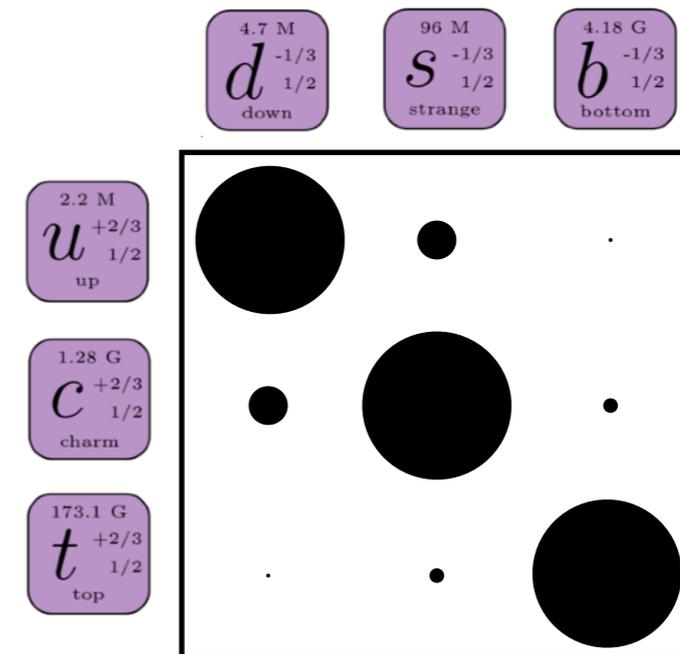
$$m_d \ll m_s \ll m_b$$



$$m_e \ll m_\mu \ll m_\tau$$

- ❖ Strano pattern di masse dei fermioni

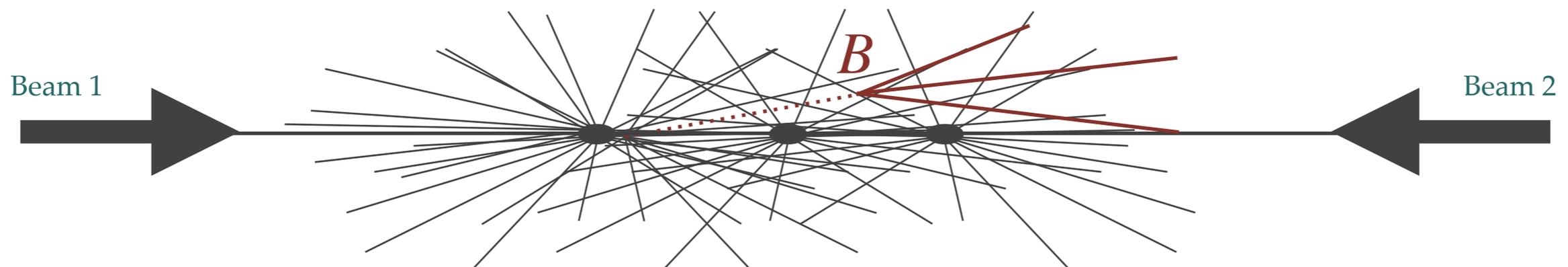
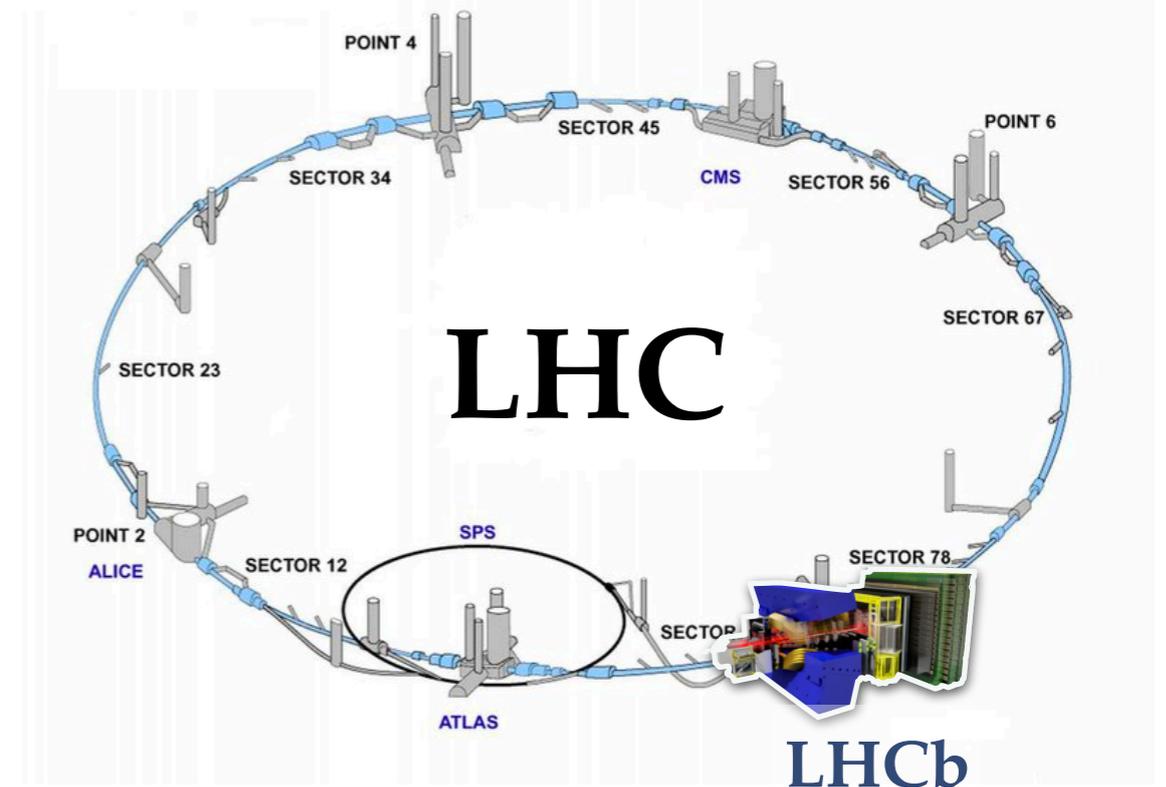
### Mescolamento dei quark



- Transizioni di sapore gerarchiche (matrice CKM)
- Unica fonte di asimmetria materia-antimateria nel MS

# Fisica del sapore a LHC

- Collisioni di protoni con energia 13 TeV a 40 MHz
- Quark  $b$  pesa solo 5 GeV  
→ 10 milioni al secondo
- Molto difficili da identificare e misurare con precisione
- Uno dei 4 grandi detector di LHC ha un design dedicato: **LHCb**



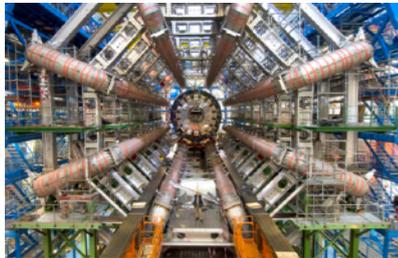
# L'esperimento LHCb

## LHCb

design dedicato alla fisica del sapore

Accettanza in avanti

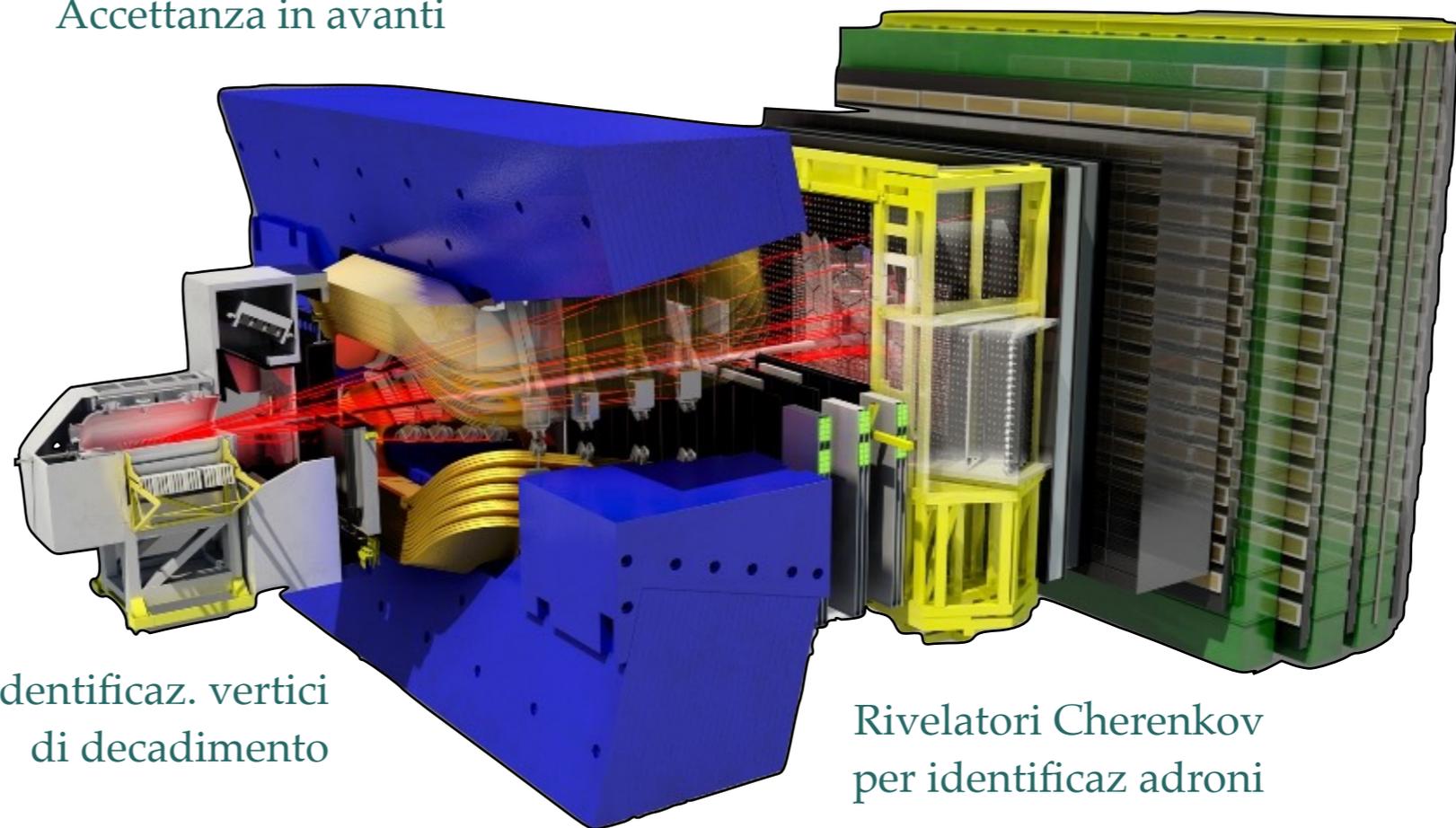
ATLAS



CMS



ALICE



→ Più grande dataset al mondo di adroni beauty e charm

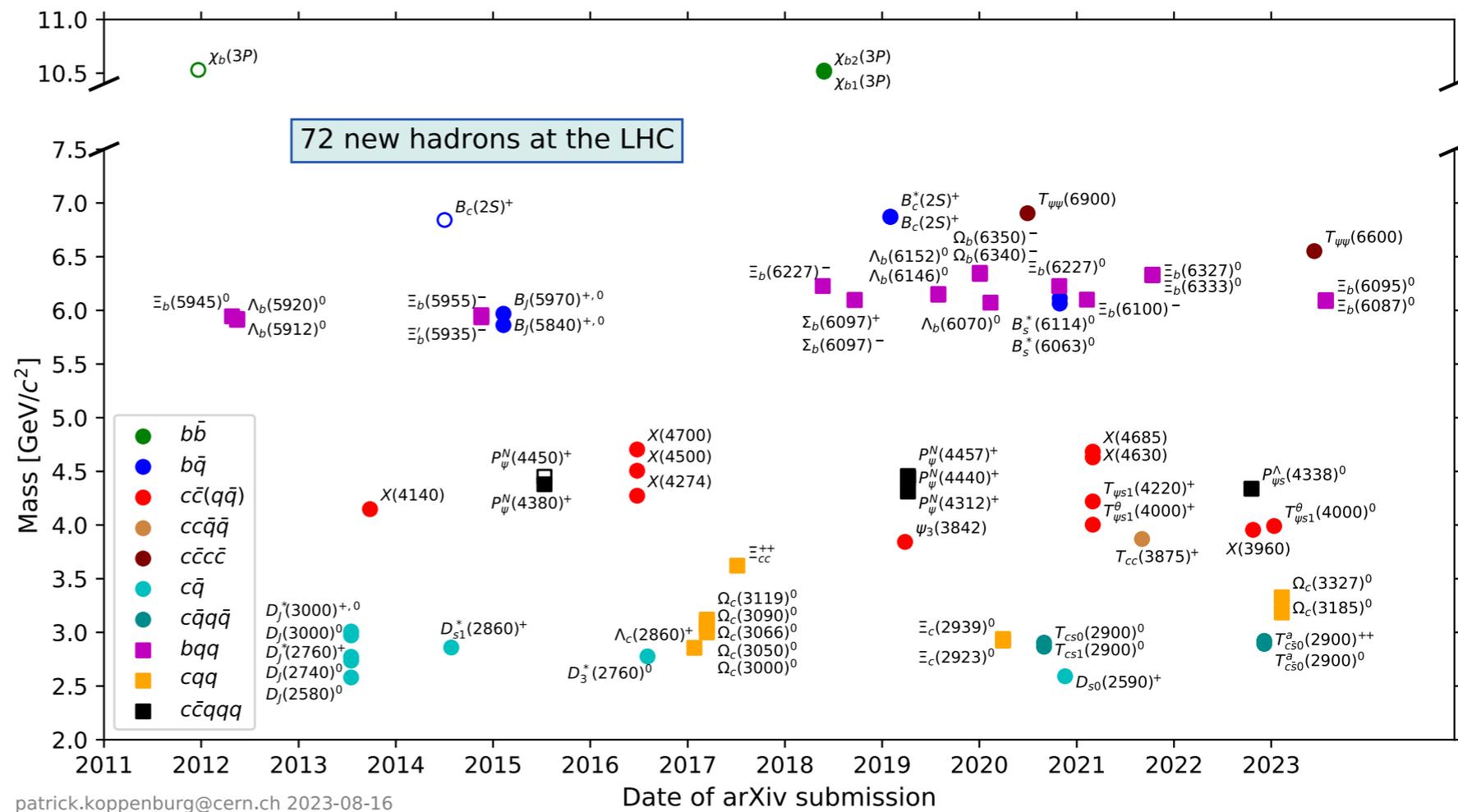
# Adroni a LHC

- I quark  $b$  e  $c$  formano stati legati con altri quark
- Un grande zoo di adroni composti di 2, 3, 4, 5 quarks
- Studio di risonanze, spin, numeri quantici (MQ)
- Sii il primo ad osservare una nuova particella

**Proposta di tesi:**

Fun with particles! Ricerca di nuovi adroni e determinazione dei loro numeri quantici

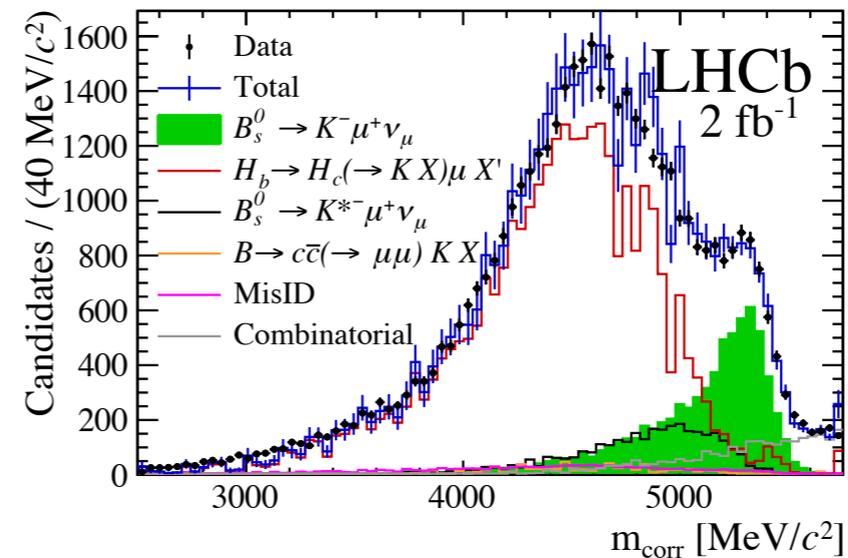
## 72 adroni scoperti a LHC di cui 64 a LHCb



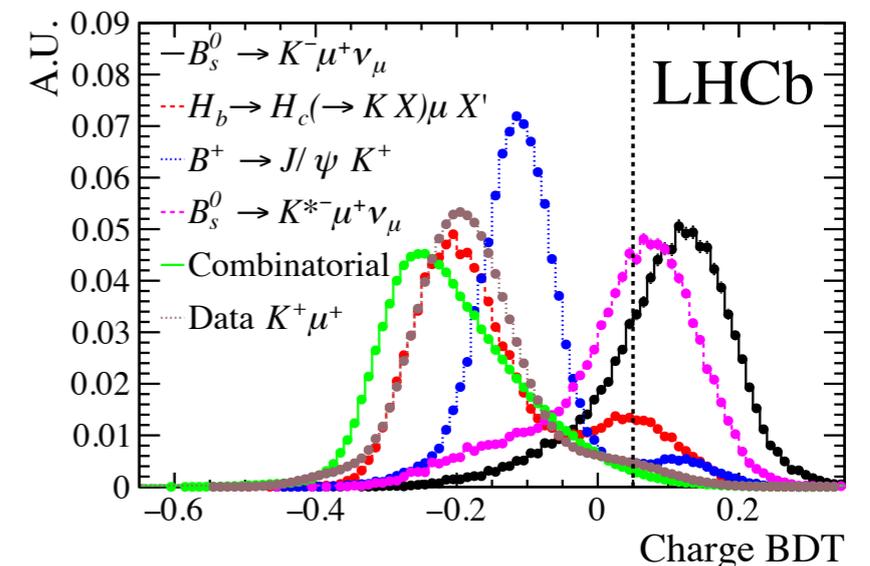
# Transizioni del quark beauty ( $b$ )

1. Misura della transizione  $b \rightarrow u$   
(usando  $B_s \rightarrow K\mu\nu$ )
2. Struttura del mesone ( $b\bar{u}$ )  
(usando  $B \rightarrow \mu\nu\gamma$ )
3. Test di universalità leptonica  
 $b \rightarrow c\nu\tau = b \rightarrow c\nu\mu$  ?

Studio della composizione del campione



Classificazione con Machine Learning



Proposta di tesi:

Applicazioni di ML per la misura dell'elemento di matrice CKM  $V_{ub}$  dal decadimento  $B_s \rightarrow K\mu\nu$

Proposta di tesi:

Composizione del campione di decadimenti semileptonici  
 $B_s \rightarrow K\mu\nu$

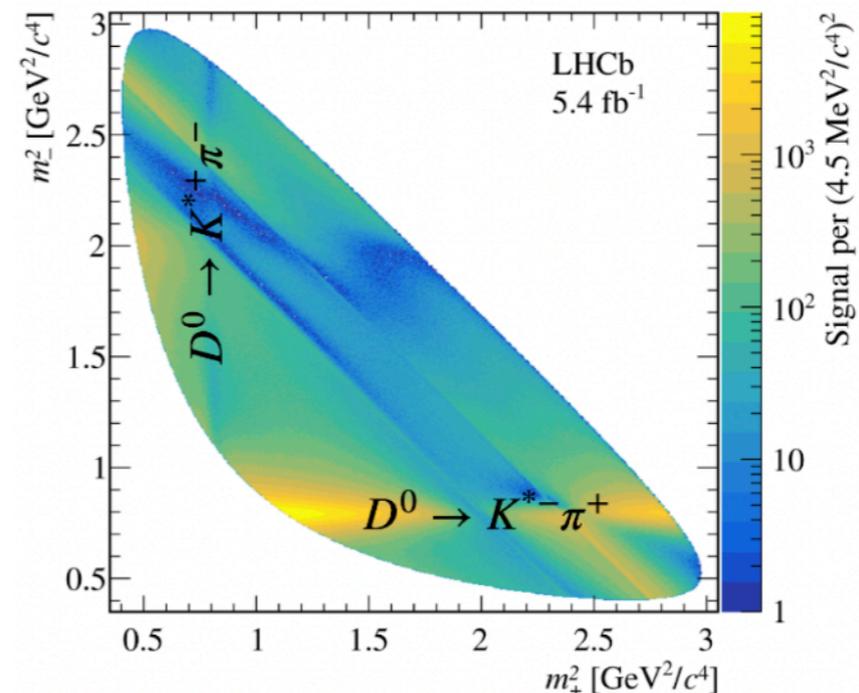
Proposta di tesi:

Studio di variabili angolari per test di universalità leptonica nei mesoni  $B$  con leptoni  $\tau$  e  $\mu$

# Transizioni del quark charm ( $c$ )

1. Violazione CP nel charm ( $\sim 10^{-4}$ )  
(usando  $D^0 \rightarrow K_S \pi^+ \pi^-$ )
2. Transizioni rare  $c \rightarrow u\gamma$   
(usando  $D^0 \rightarrow V\gamma$ )
3. Ricerca di fotoni oscuri  
(usando  $D^* \rightarrow D^0 \gamma$ )

Sample dati gigantesco ( $\sim 10^6$ )  
con interferenze quantistiche



Analisi su GPU  
con TensorFlow



## Proposta di tesi:

Studio dell'efficienza di ricostruzione di  $D^0 \rightarrow K_S \pi^+ \pi^-$  con simulazione e ML

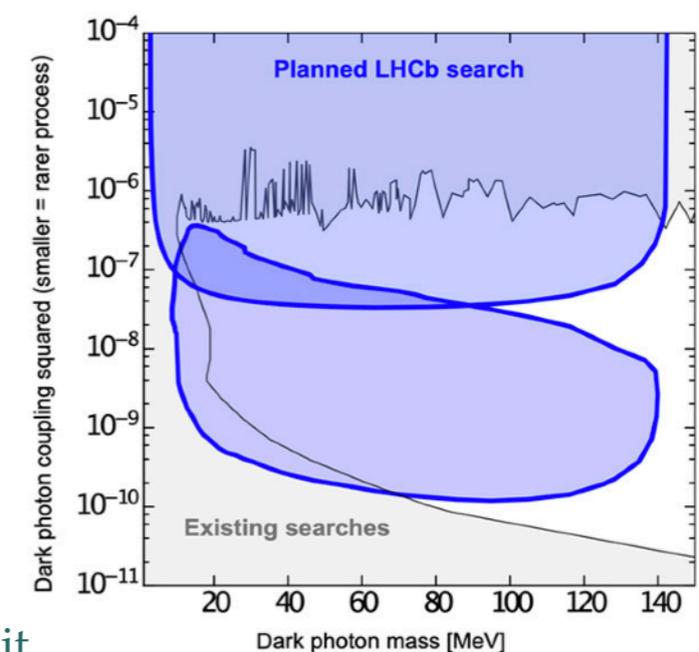
## Proposta di tesi:

Studio della selezione online basata su ML per selezionare fotoni oscuri di bassa massa

## Proposta di tesi:

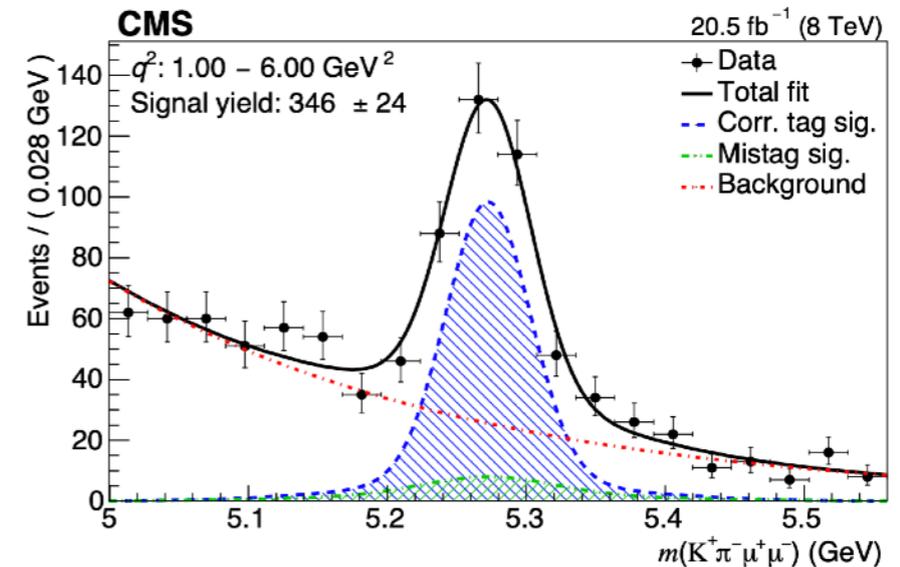
Studio delle componenti del decadimento  $D^0 \rightarrow K_S \pi^+ \pi^-$  con fit basato su TensorFlow

## Ricerca di fotoni oscuri

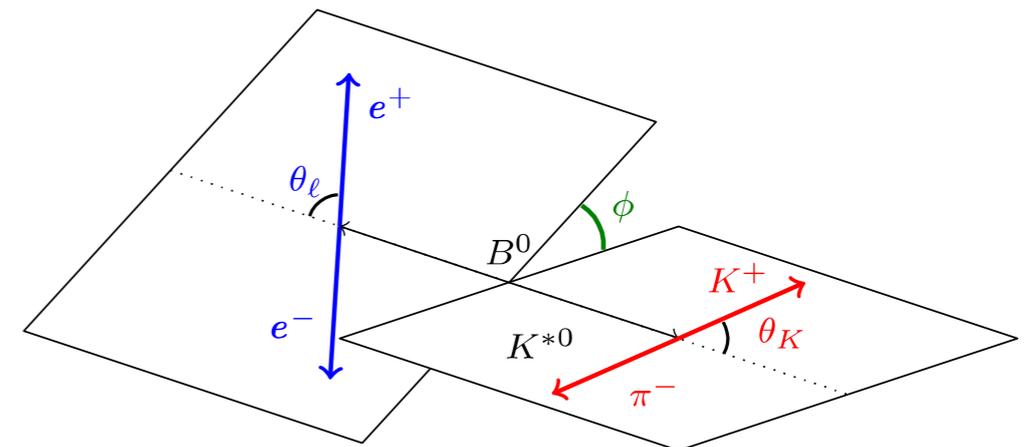


# Decadimenti rari

- Transizioni proibite  $\tau \rightarrow \mu$   
(ricerca di  $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$  a LHCb)
- Transizioni rare  $b \rightarrow s$ 
  - Studio angolare di  $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$  a CMS
  - Studio angolare di  $b \rightarrow se^+e^-$  a LHCb



Identificazione del segnale  
usando algoritmi di ML



Analisi angolari multidimensionali

## Proposta di tesi:

Search for Flavour Changing  
Neutral Current decays of B0  
mesons with ML techniques



Contatti: M. Dinardo, P. Dini, S. Malvezzi, D. Pedrini

## Proposta di tesi:

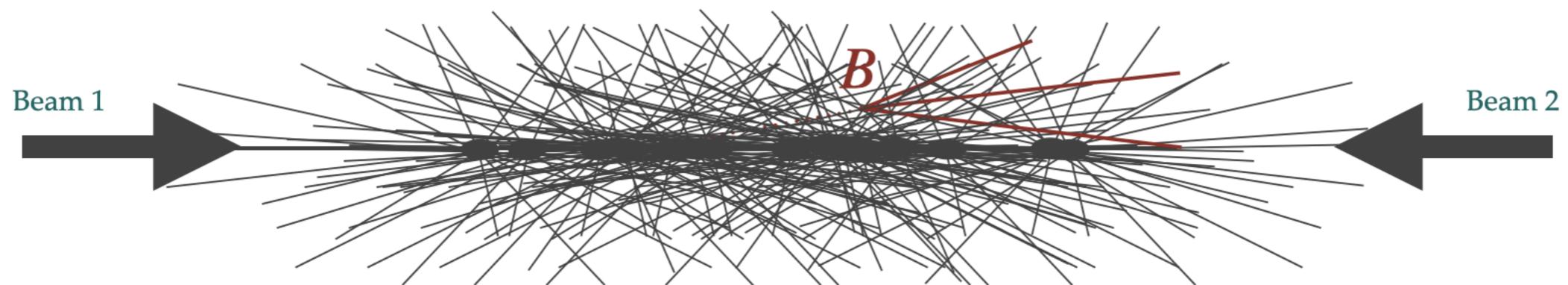
Study of the performance of the  
upgraded LHCb using the  
benchmark  $B^0 \rightarrow K^*ee$  decay



Contatti: M. Borsato, M. Calvi, M. Martinelli

# LHCb upgrade

- Scopo: collezionare dati più rapidamente
  - Fattore  $\times 5$  nel 2024 e  $\times 50$  nel 2033
  - Necesari più granularità, **timing**, resistenza alla radiazione, high-performance computing, tecniche di analisi avanzate
- Il gruppo LHCb@Bicocca si occupa di:
  - Upgrade del calorimetro elettromagnetico  $\rightarrow$  *prossima slide*
  - Studio del design dei rivelatori "RICH" a luce Cherenkov
  - Analisi globale della collisione basata su Deep Learning (Progetto DFEI)



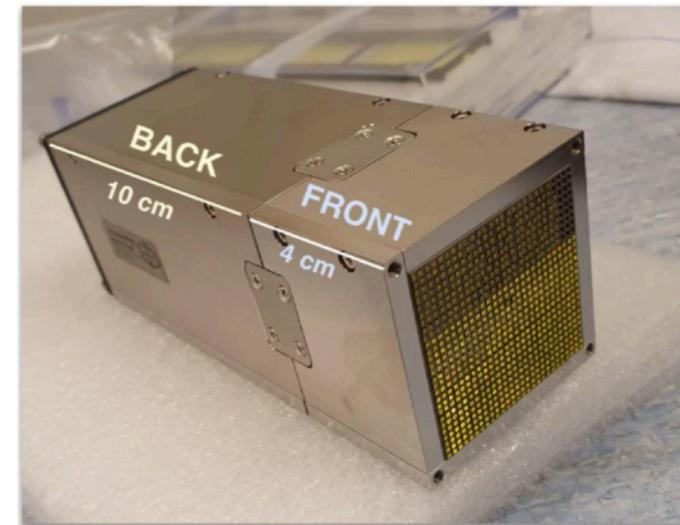
# Upgrade del calorimetro elettromagnetico

- Nuova tecnologia necessaria!
  - Resistenza alla radiazione, granularità, **misura di tempo**

## ➔ Spaghetti Calorimeter (SPACAL)

- Test dei prototipi su fascio
- Ottimizzazione design con simulazione
- Studio delle performance di identificazione delle particelle

Prototipo di modulo SPACAL



**Proposta di tesi:**  
Studio delle performance di diversi prototipi in test su fascio

**Proposta di tesi:**  
Ottimizzazione delle performance con simulazioni Monte Carlo

*Progetto di tesi triennale finanziato dall'INFN che permette di avere uno stage rimborsato di 1 mese al CERN (Progetto "CERN-10" a [questo link](#))*

**Proposta di tesi:**  
Studio delle prestazioni Particle Identification (PID) per SPACAL

# Perché fare una tesi in LHCb?



LHCb@Bicocca

- Fisica dei collider, adroni, sapore dei quark
- Simmetrie del MS e teorie oltre il MS
- Analisi statistica e Machine Learning
- Programmazione in python e/o C++
- Sviluppo detector di ultima generazione
- Un gruppo internazionale e in crescita

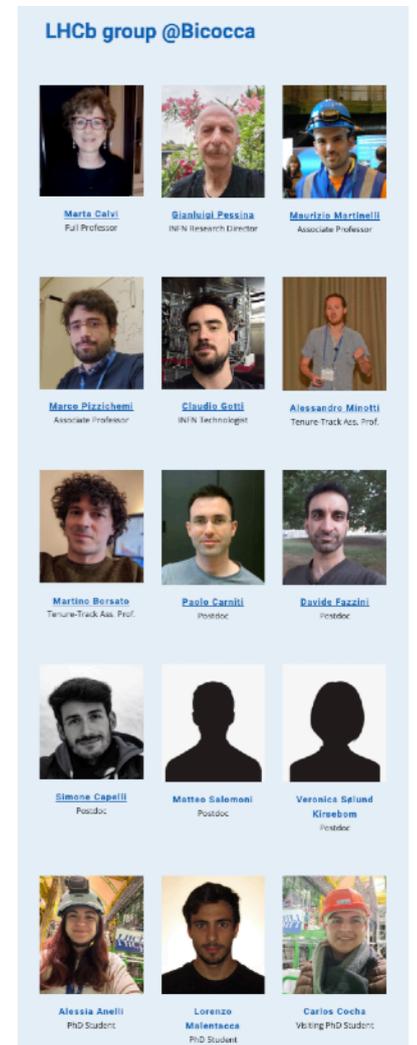
## Contatti:

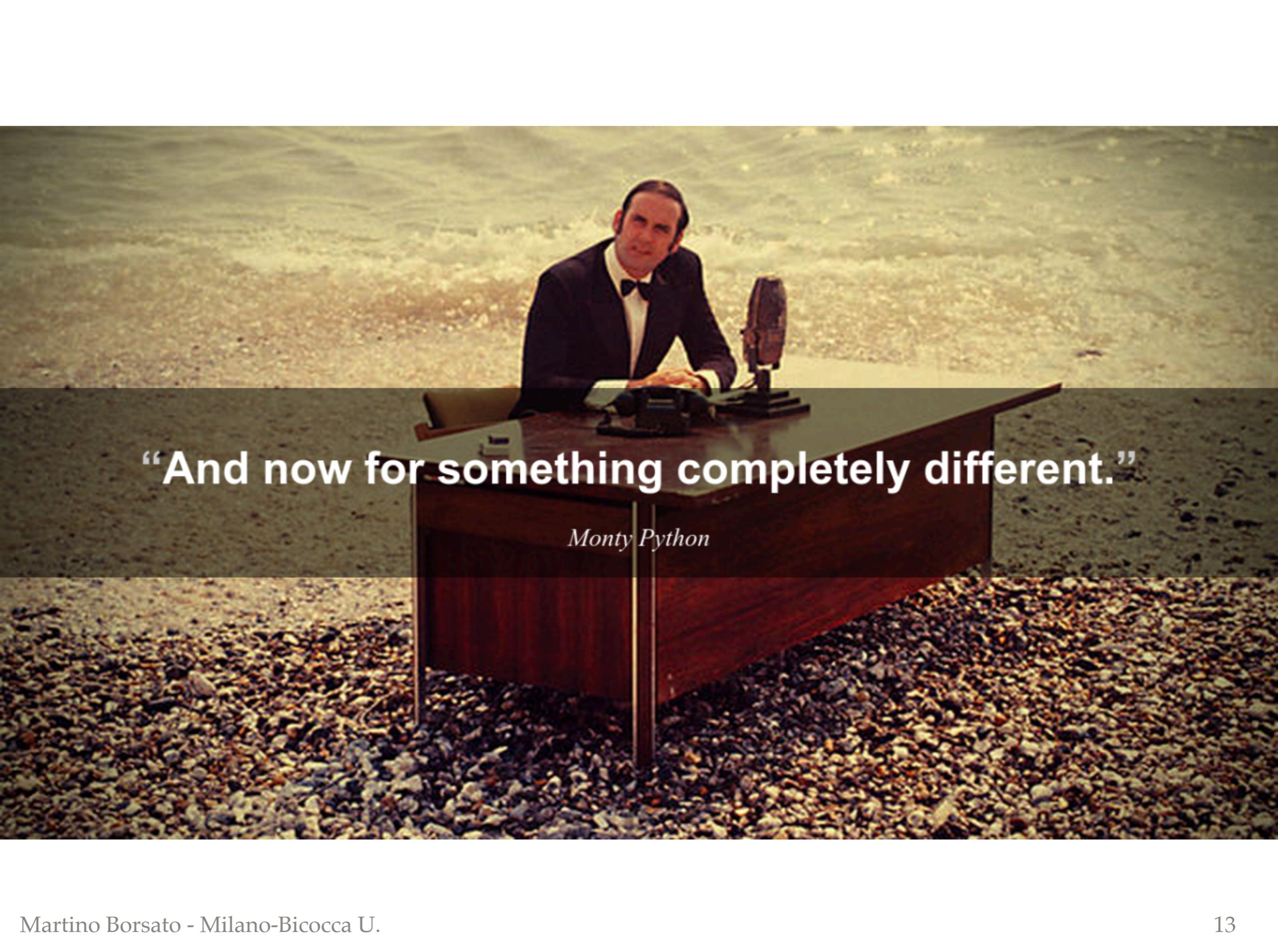
[marta.calvi@unimib.it](mailto:marta.calvi@unimib.it)

[maurizio.martinelli@unimib.it](mailto:maurizio.martinelli@unimib.it)

[martino.borsato@unimib.it](mailto:martino.borsato@unimib.it)

[marco.pizzichemi@unimib.it](mailto:marco.pizzichemi@unimib.it)



A man in a dark tuxedo and bow tie sits behind a wooden desk on a beach. The desk is positioned on a bed of dark pebbles. In the background, the ocean waves are visible under a bright sky. A vintage microphone is on the desk to the right of the man. The scene is surreal, combining a formal office setting with a natural beach environment.

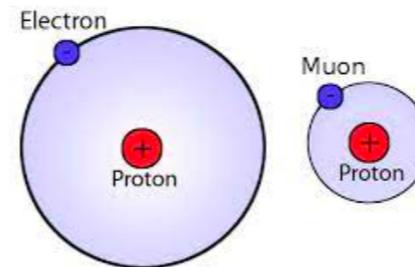
**“And now for something completely different.”**

*Monty Python*

# Fisica con fasci di muoni

- I fasci di muoni permettono:
  - **Misura del raggio del protone** con atomi muonici (progetto FAMU)
  - **Neutrino factory**: neutrini muonici ed elettronici da  $\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu$
  - **Muon collider**: Higgs factory o esplorazione della frontiera dell'energia

## Atomi muonici



MICE: Muon Ionisation Cooling Experiment



International  
MUON Collider  
Collaboration

**Proposta di tesi:**  
Studio della diagnostica di fascio per il dimostratore del muon collider

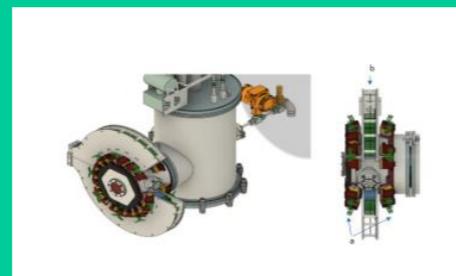
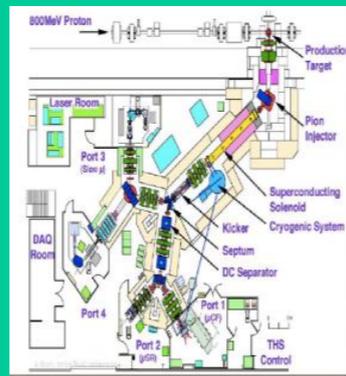
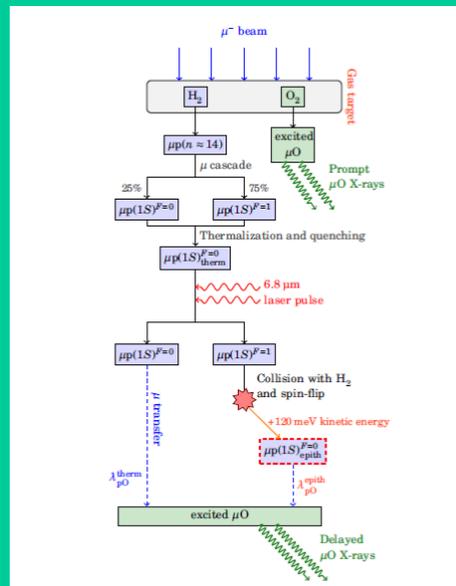
**Proposta di tesi:**  
Costruzione Sistema di time of flight (TOF) con risoluzione ~50 ps

**Proposta di tesi:**  
Atomi muonici: test in laboratorio, sviluppo modelli teorici, analisi dei dati

+ dettagli in backup slide

*BACKUP*

# FAMU - fisica degli atomi muonici



- The proton radius is extremely hard to measure with high precision and good control of systematics
- FAMU will realize a spectroscopic measurement of the hyperfine splitting (hfs) in the 1S state of muonic hydrogen, providing crucial informations on proton structure and muon-nucleon interaction
- The method is outlined in the figure:
- Experimental requirements:
  - ❑ An intense pulsed muon beam (RIKEN-RAL) → beam hodoscope for its characterization developed at MIB
  - ❑ detection of X-rays ~ 100 keV (LaBr3:Ce crystals with SiPM readout developed at MIB)
  - ❑ An intense tunable MIR laser with  $\lambda \sim 6785$  nm and a linewidth  $\sim 0.07$  nm

## Possible arguments for a master thesis:

- Laboratory tests of 1" LaBr3:Ce read by SiPM arrays
- Study at CNAO beam facility of the performances of a fiber-SiPM beam hodoscope
- Laboratory study of MIR detectors and characterization of specialty fibers for MIR light transport
- Theoretical models for modelling the transfer rates in  $\mu p$  interactions
- Analysis of data collected at RAL for measurement of the proton Zemach radius

## Bibliography:

1. R.Pohl et al. *Science* 353, 669 (2016)
2. A.Adamczack et al, *JINST* 11, P05007 (2016); C. Pizzolotto et al., *Eur.Phys.J.A* 56 (2020) 7, 185
3. M. Bonesini et al. *JINST* 12, C03035 (2017)
4. E. Mocchiutti et al, *Phys. Lett.A* 384 (2020) 126667
5. M. Bonesini et al., *Condens. Mat.* 8 (2023) 4,99
6. M. Stoilov et al. *Phys. Rev. A* (2023) 3,032823