



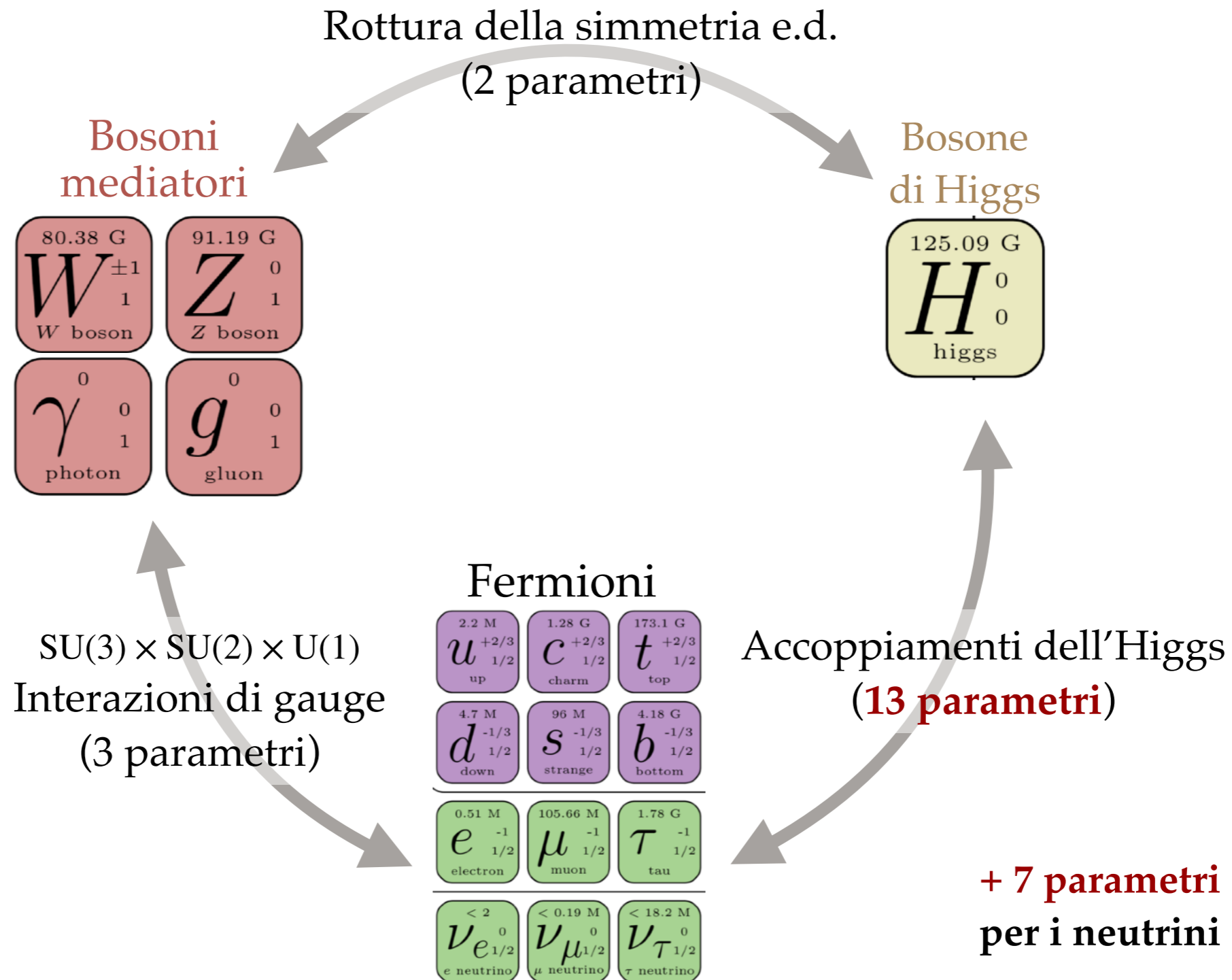
Fisica del sapore a LHC - *l'esperimento LHCb* -

6 Marzo 2024

*Presentazione delle
attività di tesi magistrali*

martino.borsato@unimib.it

Il Modello Standard



Il Modello Standard

un film di
SERGIO LEONE

Rottura della simmetria e.d.
(2 parametri)

Bosoni mediatori

80.38 G $W^{\pm 1}$ 1 W boson	91.19 G Z^0 1 Z boson
γ^0 1 photon	g^0 1 gluon



IL CATTIVO

Bosone di Higgs

125.09 G H^0 0 higgs

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
Interazioni di gauge
(3 parametri)

Fermioni

2.2 M $u^{+2/3}$ 1/2 up	1.28 G $c^{+2/3}$ 1/2 charm	173.1 G $t^{+2/3}$ 1/2 top
4.7 M $d^{-1/3}$ 1/2 down	96 M $s^{-1/3}$ 1/2 strange	4.18 G $b^{-1/3}$ 1/2 bottom
0.51 M e^{-1} 1/2 electron	105.66 M μ^{-1} 1/2 muon	1.78 G τ^{-1} 1/2 tau
< 2 ν_e^0 1/2 e neutrino	< 0.19 M ν_μ^0 1/2 mu neutrino	< 18.2 M ν_τ^0 1/2 tau neutrino

Accoppiamenti dell'Higgs
(13 parametri)

+ 7 parametri
per i neutrini



IL BUONO



IL BRUTTO

Il Modello Standard

un film di
SERGIO LEONE

Rottura della simmetria e.d.
(2 parametri)

Bosoni mediatori

80.38 G $W^{\pm 1}$ 1 W boson	91.19 G Z^0 1 Z boson
0 γ 1 photon	0 g 1 gluon



IL CATTIVO

Bosone di Higgs

125.09 G H^0 0 higgs

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
Interazioni di gauge
(3 parametri)

Fermioni

2.2 M $u^{+2/3}$ 1/2 up	1.28 G $c^{+2/3}$ 1/2 charm	173.1 G $t^{+2/3}$ 1/2 top
4.7 M $d^{-1/3}$ 1/2 down	96 M $s^{-1/3}$ 1/2 strange	4.18 G $b^{-1/3}$ 1/2 bottom
0.51 M e^{-1} 1/2 electron	105.66 M μ^{-1} 1/2 muon	1.78 G τ^{-1} 1/2 tau
< 2 ν_{e^0} 1/2 e neutrino	< 0.19 M ν_{μ^0} 1/2 μ neutrino	< 18.2 M ν_{τ^0} 1/2 τ neutrino

Accoppiamenti dell'Higgs
(13 parametri)

+ 7 parametri
per i neutrini

Settore del sapore



IL BRUTTO



IL BUONO

Il settore del sapore

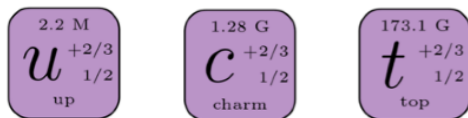


Accoppiamenti dell'Higgs (Yukawa)

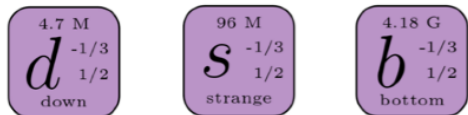
13 parametri liberi



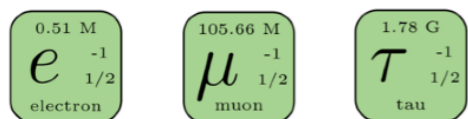
Masse dei fermioni



$$m_u \ll m_c \ll m_t$$

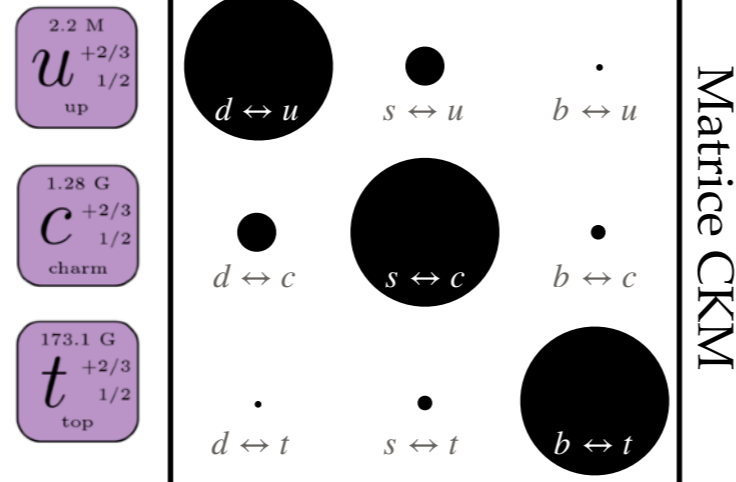
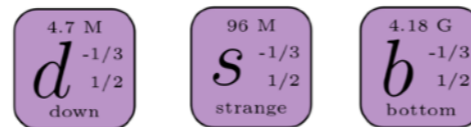


$$m_d \ll m_s \ll m_b$$



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

Mescolamento dei quark



Matrice CKM

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

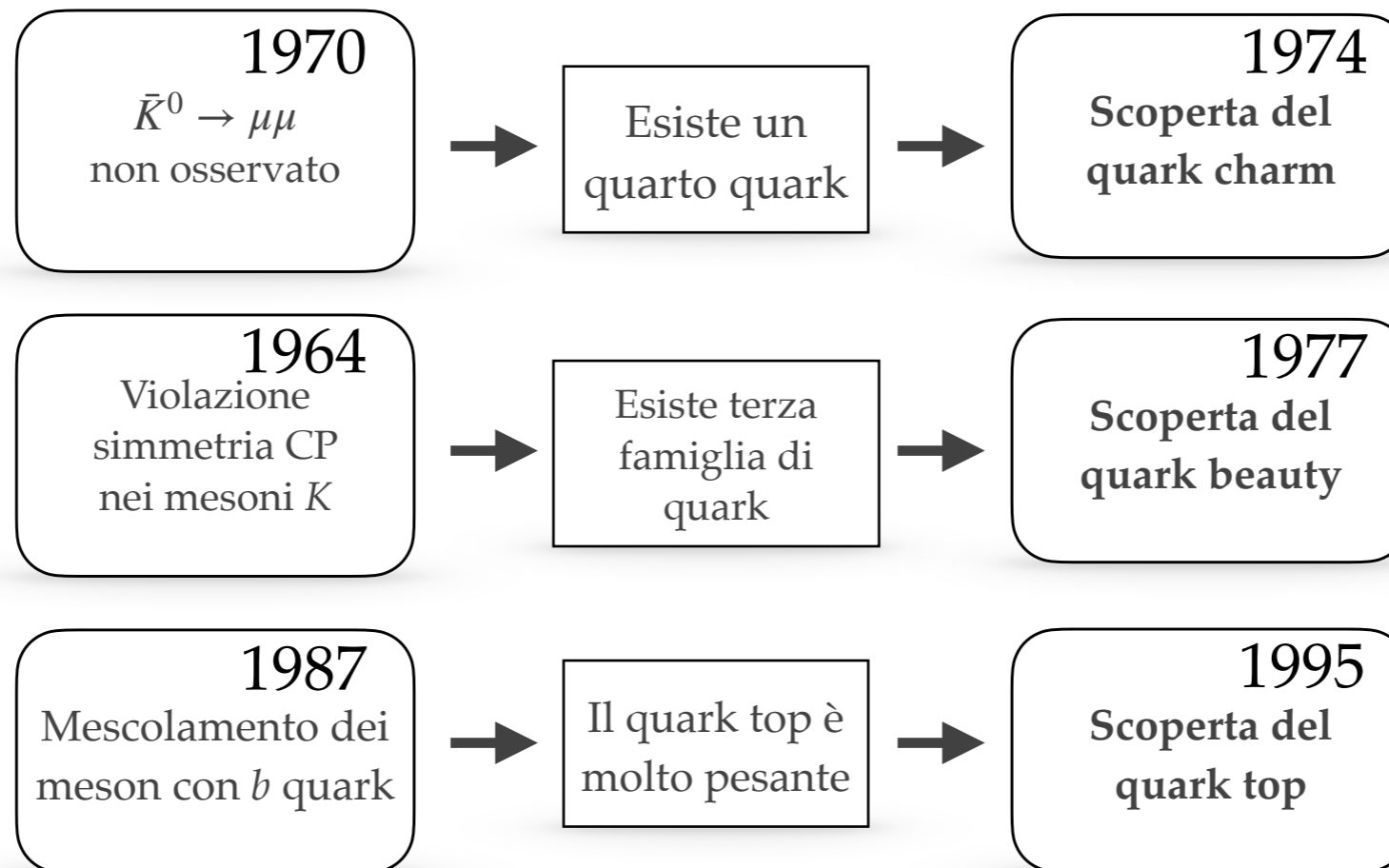
❖ Pattern peculiare di masse dei fermioni

“The Flavour Puzzle”

- Che origine ha il pattern peculiare di sapori del MS?
- La soluzione a questo e altri problemi del MS potrebbe trovarsi ben oltre l'energia di LHC
- Piccoli effetti quantistici potrebbero essere visibili a più bassa energia
- Studi di precisione della “struttura di sapore” del MS hanno il potenziale di rivelare questi effetti, specialmente se la nuova fisica ha una struttura di sapore diversa

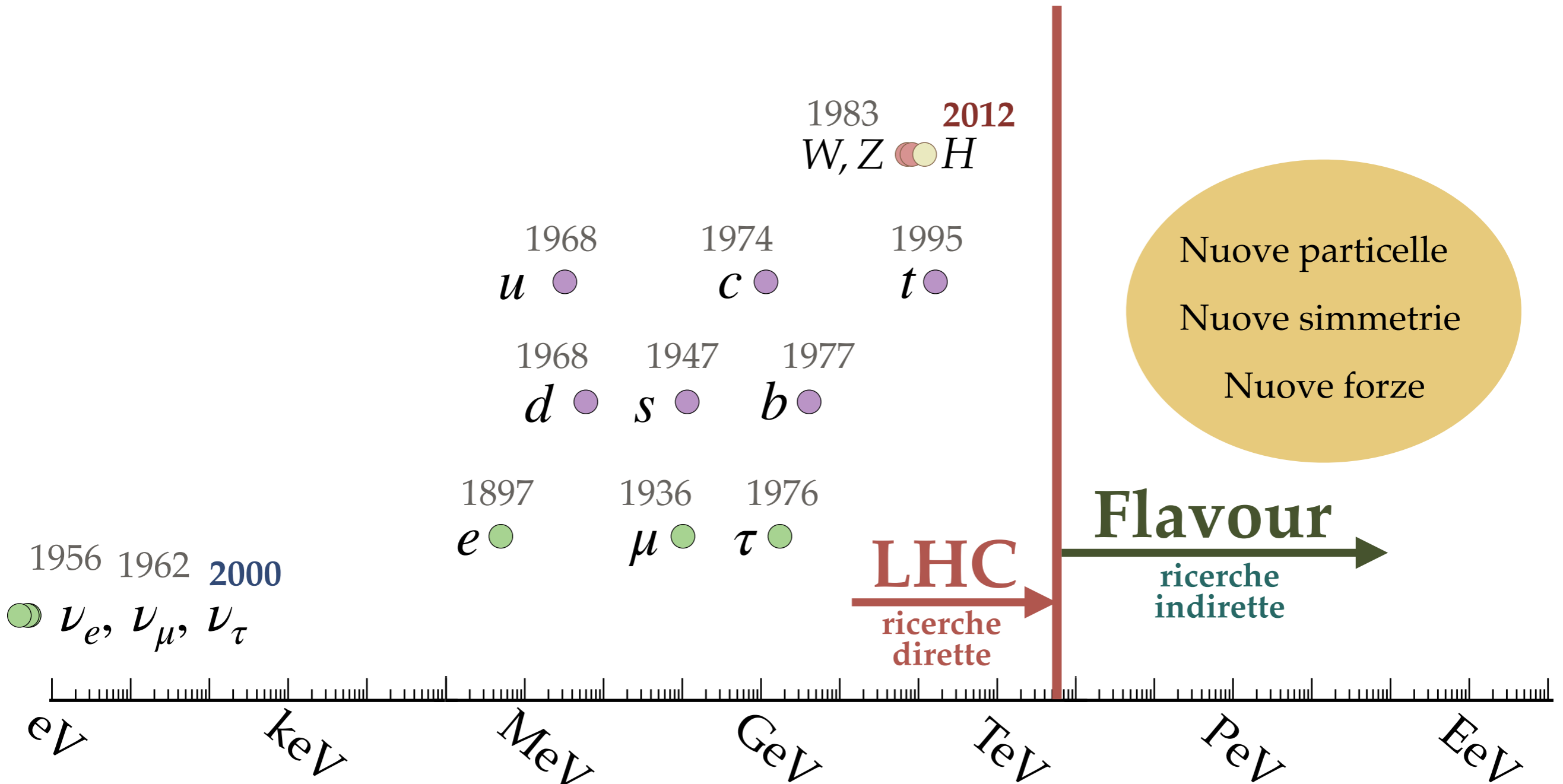
Il sapore nella storia del MS

Alcune scoperte indirette nel sapore



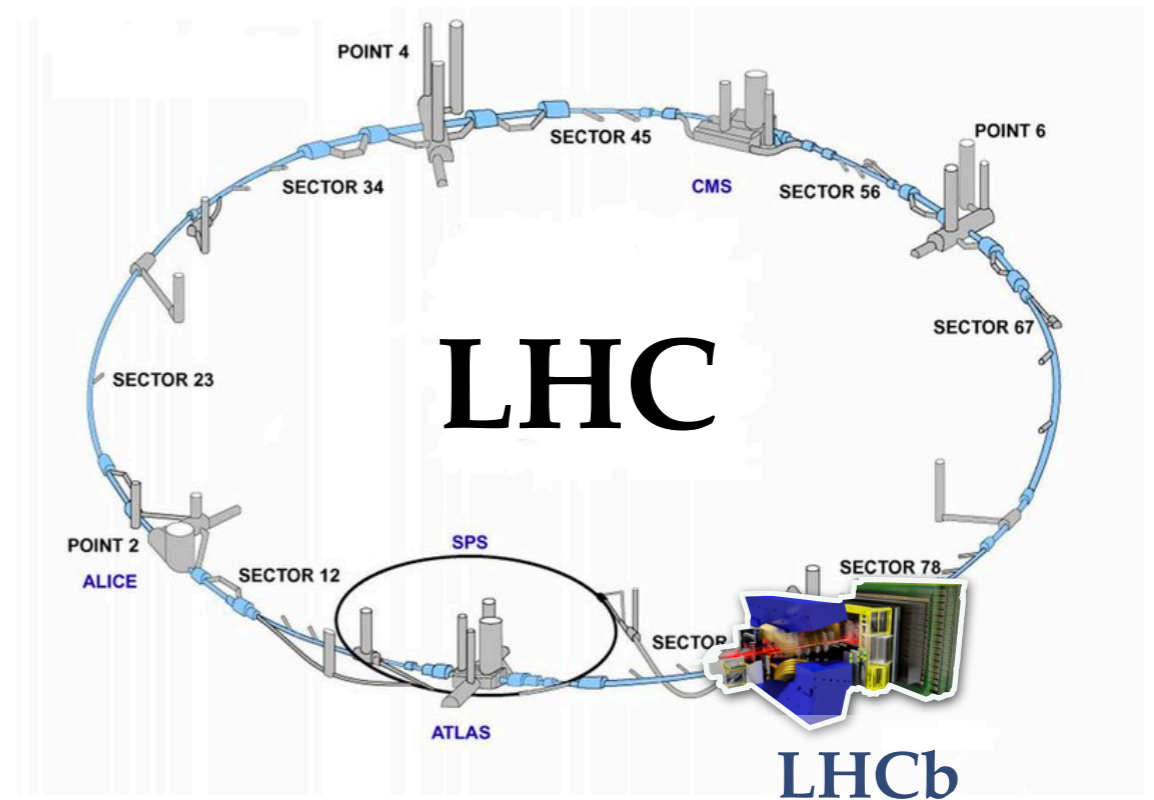
Il sapore oltre il MS

Si vedano per esempio [UTFit](#) e [JHEP 0803:049,2008](#)



Fisica del sapore a LHC

- Fisica del sapore necessita **sorgente di quark pesanti**
- **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**



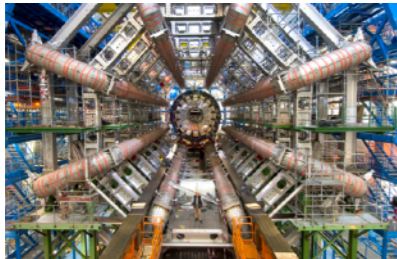
L'esperimento LHCb

LHCb

design dedicato alla fisica del sapore

Accettanza in avanti

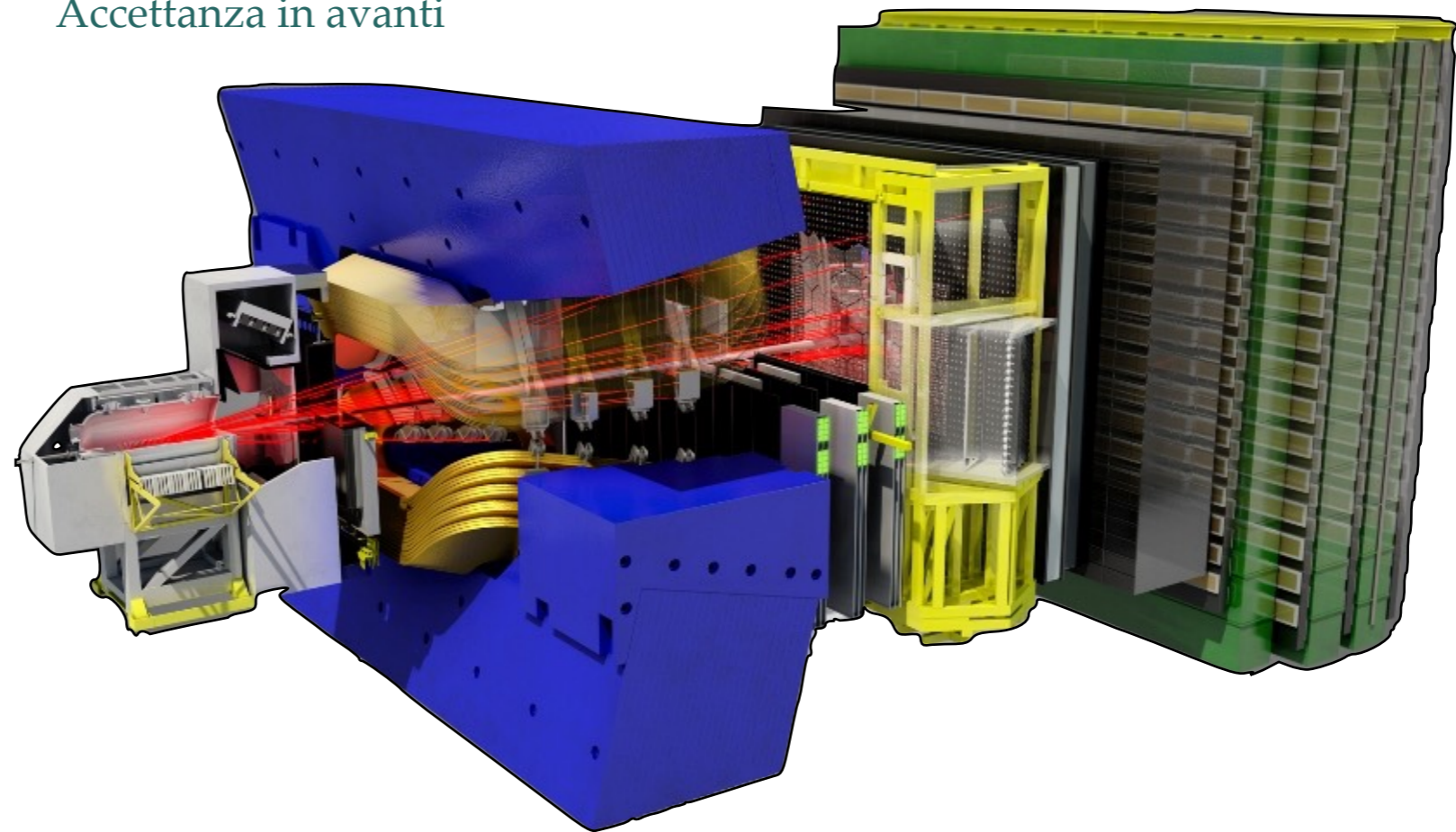
ATLAS



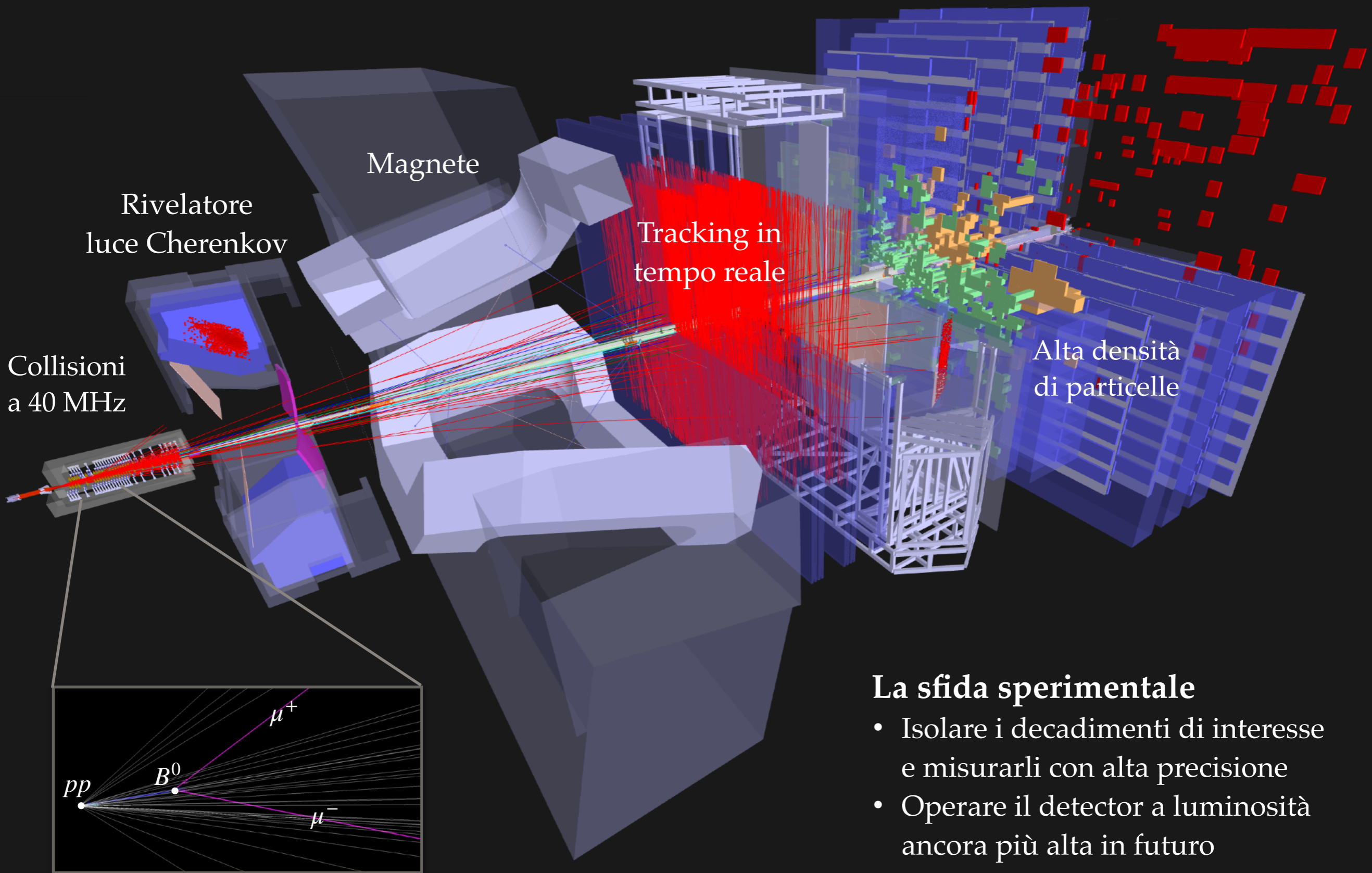
CMS



ALICE



→ Più grande dataset al mondo di adroni beauty e charm



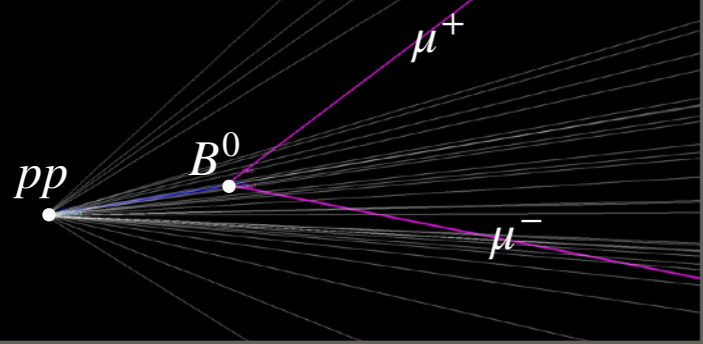
Collisioni
a 40 MHz

Rivelatore
luce Cherenkov

Magnete

Tracking in
tempo reale

Alta densità
di particelle



Identificazione vertici secondari

La sfida sperimentale

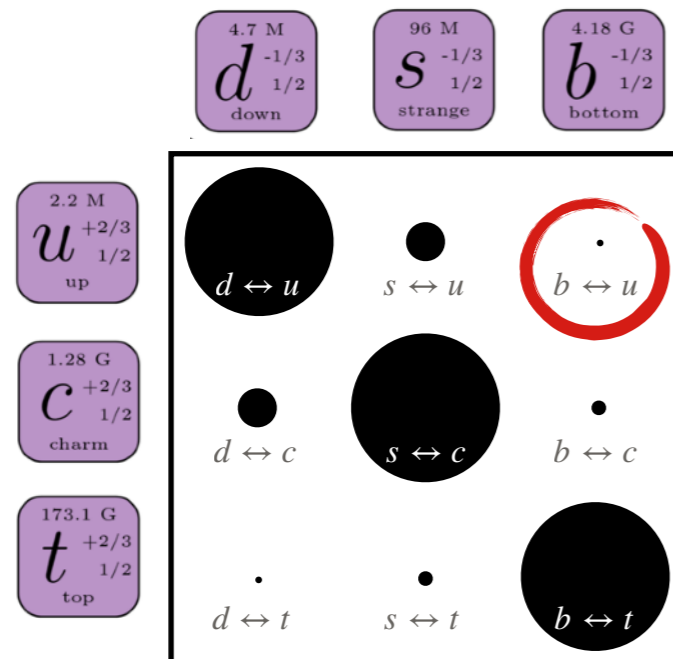
- Isolare i decadimenti di interesse e misurarli con alta precisione
- Operare il detector a luminosità ancora più alta in futuro

fattore $\times 5$ nel 2024 e $\times 50$ nel 2033

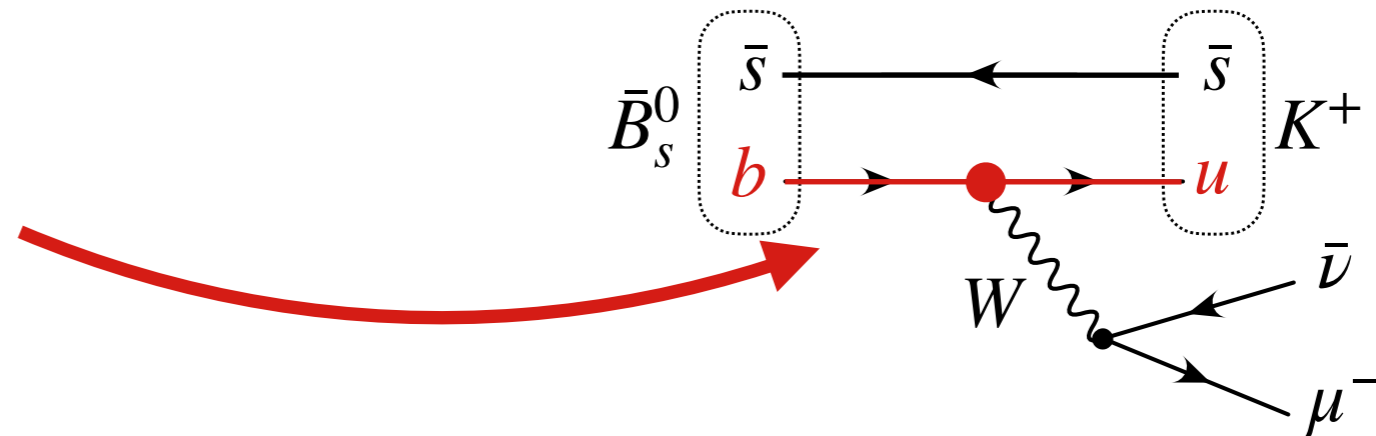
Le analisi di fisica del gruppo LHCb-Bicocca

Contatti: marta.calvi@unimib.it, maurizio.martinelli@unimib.it, martino.borsato@unimib.it

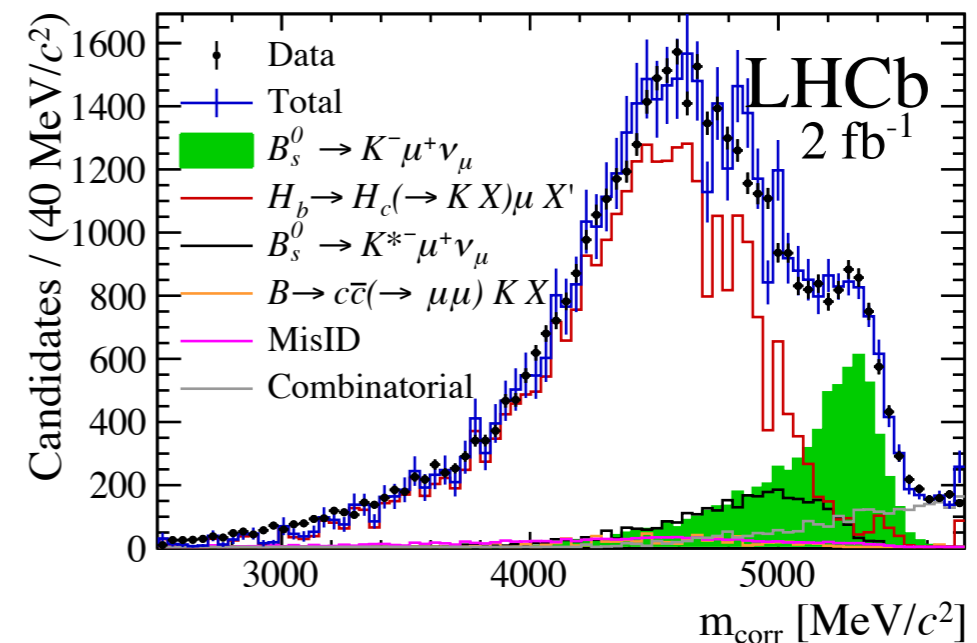
Transizioni $b \rightarrow u$



$b \rightarrow u$ adronizzata in $\bar{B}_s^0 \rightarrow K^+ \mu^- \bar{\nu}$



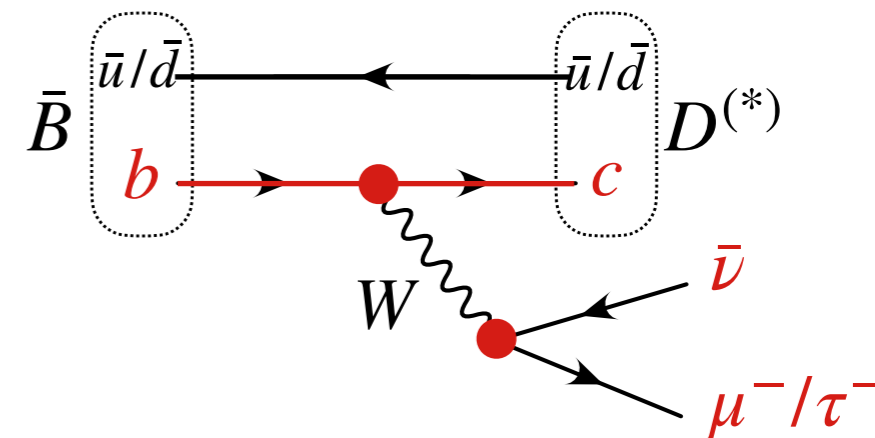
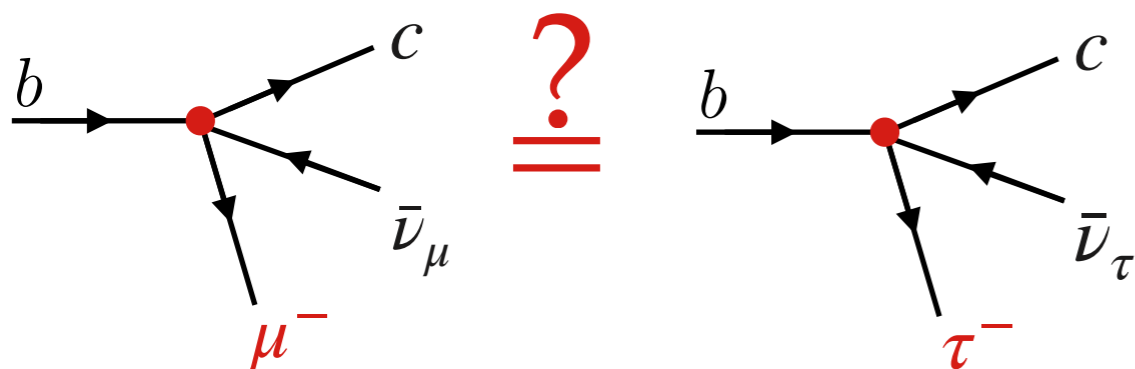
- Transizione quark $b \rightarrow u$ soppressa nel MS
- Precisione di misura dell'elemento di matrice V_{ub} ancora limitata
- **Tensioni** tra determinazioni "esclusive" e "inclusive"
- Cosa c'è dietro?



Proposta di tesi: Misura V_{ub} con il decadimento $B_s \rightarrow K \mu \nu$. Classificazione del segnale con ML, modellizzazione e sottrazione statistica del fondo, determinazione dell'elemento di matrice CKM V_{ub} con fit multidimensionale

Universalità leptonica

$b \rightarrow c\ell\nu$ adronizzata in $\bar{B} \rightarrow D^{(*)}\ell^{-}\bar{\nu}$

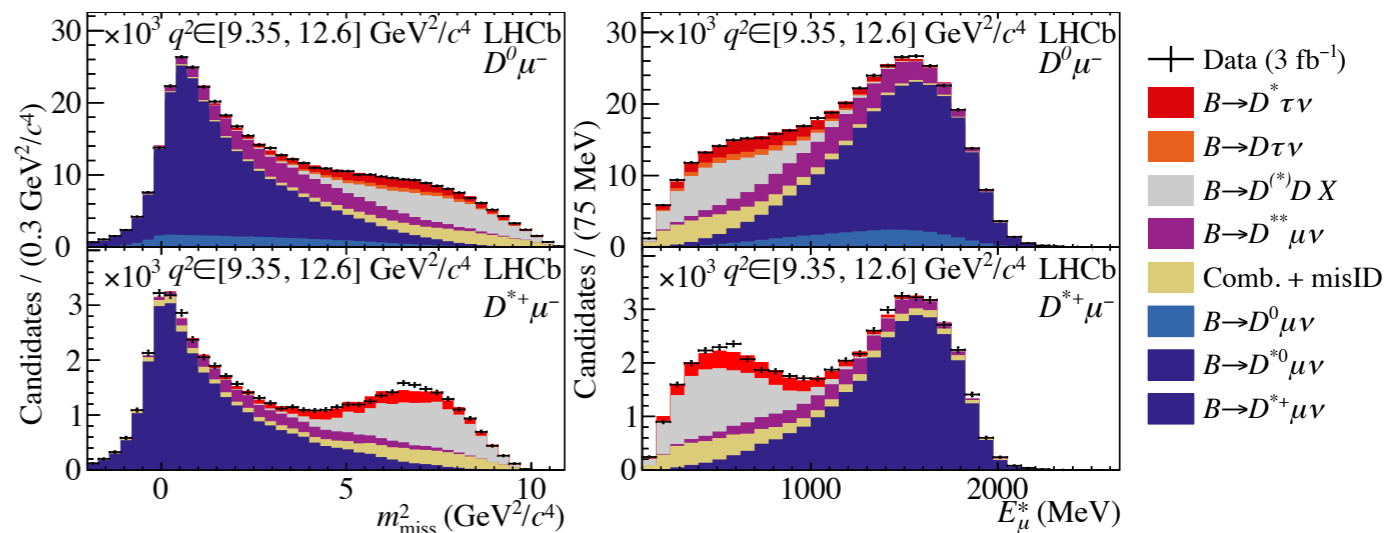


- **“Universalità leptonica”**

Il MS prevede che le interazioni di gauge siano indipendenti dal sapore dei leptoni (μ, τ)

- Nuove interazioni potrebbero violare questa simmetria \rightarrow sarebbe un segno chiarissimo di fisica oltre il MS

- I dati indicano una possibile ($\sim 3\sigma$) violazione dell’universalità leptonica \rightarrow necessarie altre misure



Proposta di tesi: Test dell’universalità leptonica in $b \rightarrow c\ell\nu$. Prima analisi del grande dataset di Run2 e possibilità di partecipare all’analisi dei nuovi dati 2024. Test con nuovi osservabili. Studio della sensibilità di una analisi angolare ai coefficienti della teoria effettiva di campo.

Mixing e violazione CP nel charm

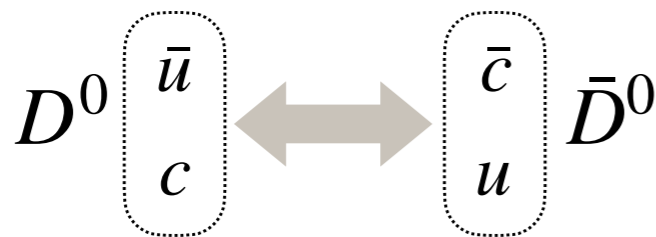
● Breve storia della violazione CP:

- 1964: CPV in $s \rightarrow d$ (Cronin & Fitch)
- 2001: CPV in $b \rightarrow d$ (BaBar & Belle)
- 2013: CPV in $b \rightarrow s$ (LHCb)
- **2019: CPV in $c \rightarrow u$ (LHCb)**

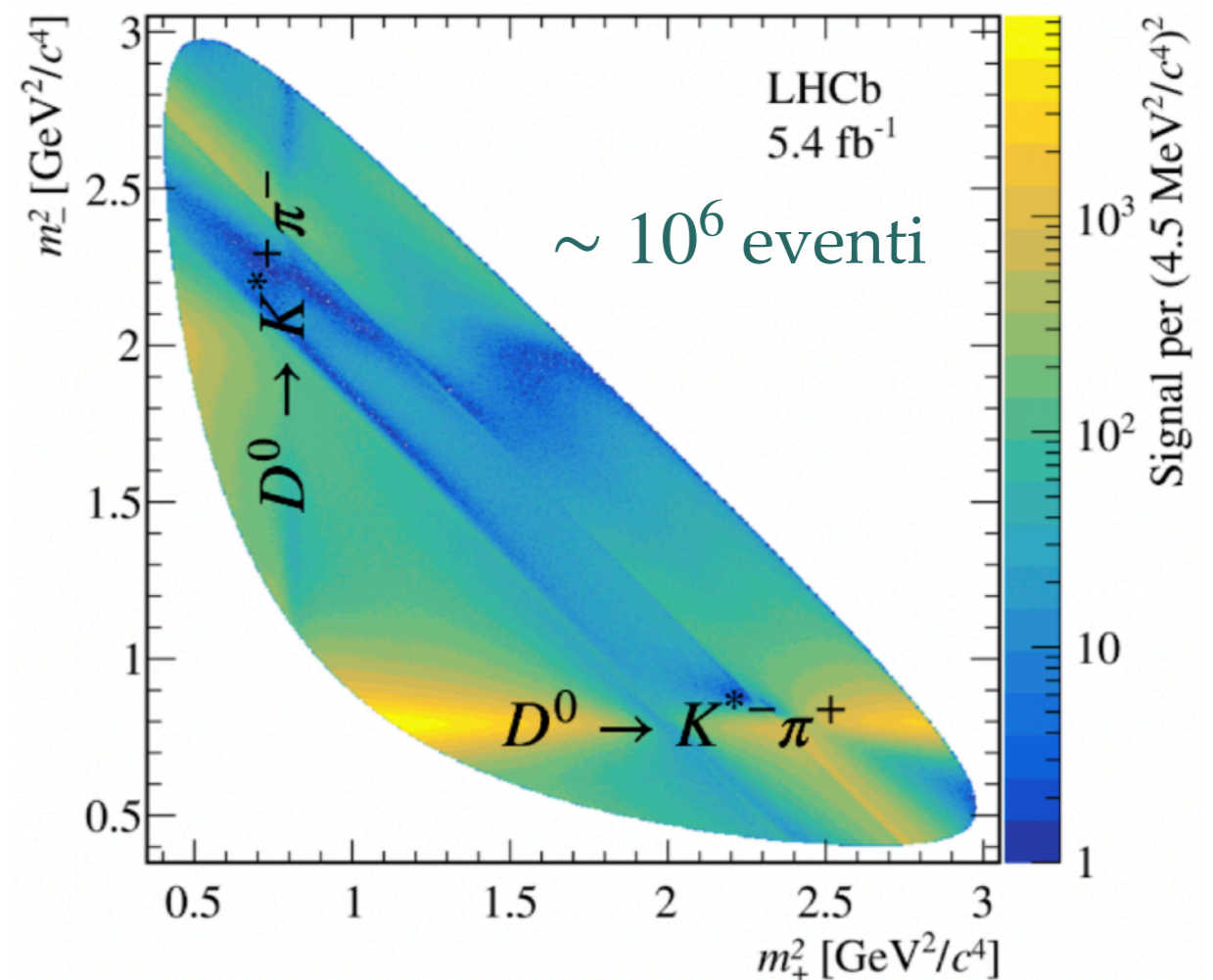


Prossimo step:

Misura CPV nelle interferenze quantistiche nel mixing $D^0 - \bar{D}^0$



Dataset di $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$



2 Proposte di tesi:

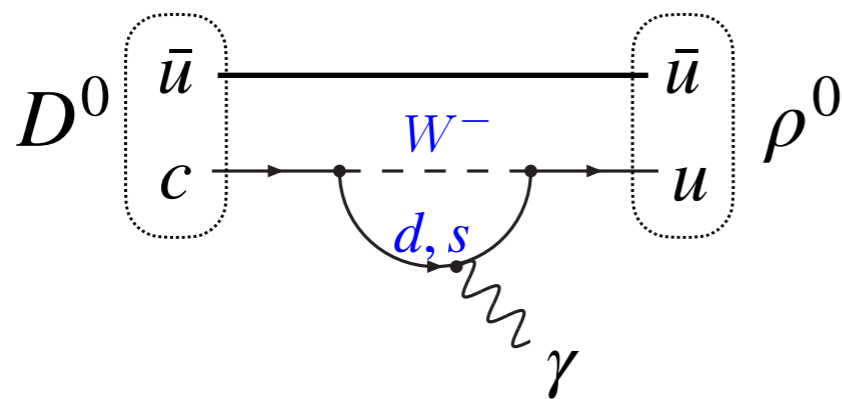
- 1) Mixing e CPV in decadimenti multibody del D^0
- 2) Mixing e CPV in decadimenti semileptonici del D^0

Misure di precisione con dataset molto grandi. Fit complessi di effetti quantistici di interferenza e CPV.

Identificazione di $c \rightarrow u\gamma$

● Transizioni $c \rightarrow u$ molto rare nel MS

- Cancellazione delle ampiezze (GIM)
 $A(c \rightarrow d \rightarrow u) + A(c \rightarrow s \rightarrow u) \simeq 0$
- Sensibile a contributi di nuova fisica!

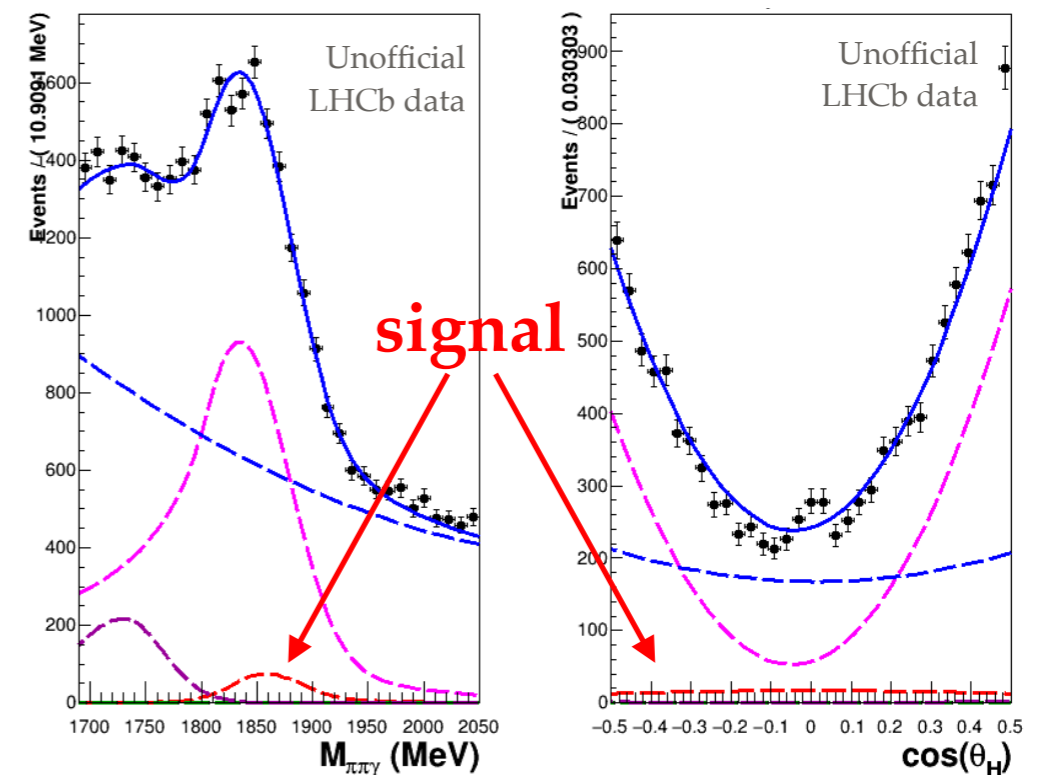


$$\text{BR}(D^0 \rightarrow \rho^0 \gamma) = (1.77 \pm 0.30) \times 10^{-5}$$

● Sfida sperimentale

- ✓ Miliardi di charm prodotti
- ⊖ Grande fondo da $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Analisi LHCb con tecnica “standard”



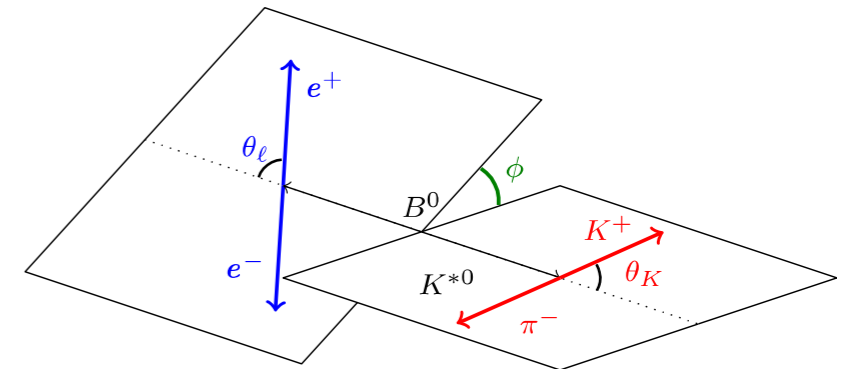
➔ Sviluppo nuova tecnica basata su conversioni $\gamma \rightarrow e^+e^-$

Proposta di tesi

Sviluppo di un classificatore basato su ML per ridurre il fondo. Fit delle distribuzioni cinematiche per la quantificazione del fondo residuo. Calcolo delle efficienze e ottimizzazione della selezione. Stima della sensibilità della misura e confronto con metodo standard.

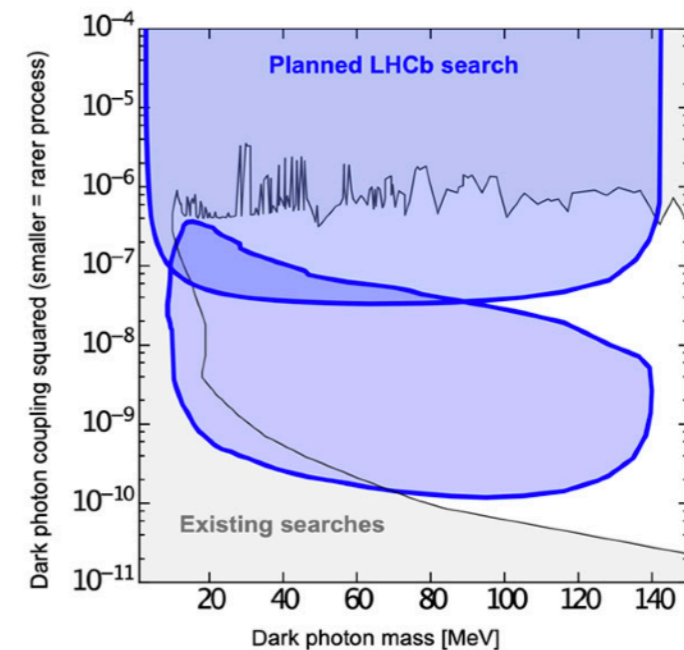
Altre analisi

- Studio della struttura del meson B con il decadimento $B^+ \rightarrow \mu\nu\gamma$
- Studio delle transizione rare $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ con analisi angolare di $B^0 \rightarrow K^*e^+e^-$
- Ricerca di transizioni $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$ che violano il sapore leptonic
- Ricerca di *fotoni oscuri* molto leggeri con nuove tecniche di analisi in real time



Analisi angolari multidimensionali

Ricerca di fotoni oscuri



**Venite a
parlarne
con noi!**

marta.calvi@unimib.it

maurizio.martinelli@unimib.it

martino.borsato@unimib.it

Sviluppi software e hardware del gruppo LHCb-Bicocca

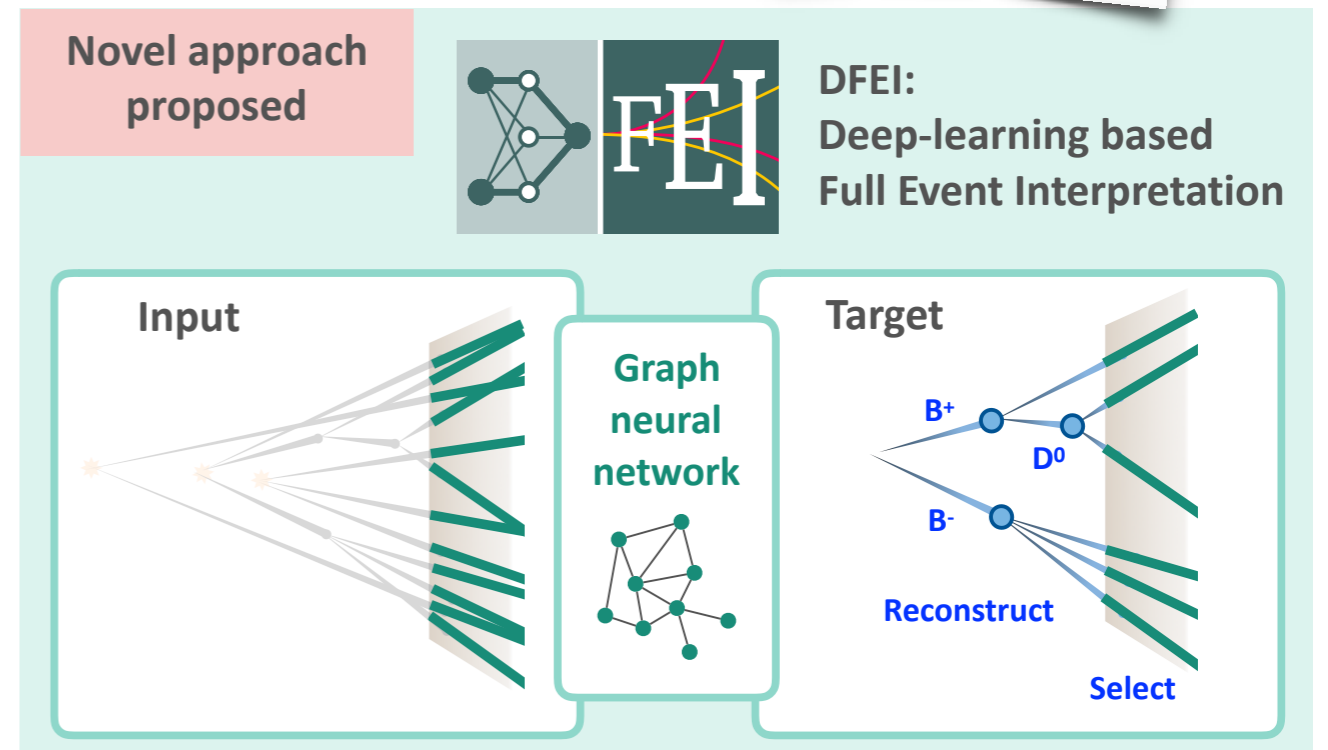
Contatti: marta.calvi@unimib.it, maurizio.martinelli@unimib.it, martino.borsato@unimib.it, marco.pizzichemi@unimib.it

Deep Learning per analisi in real time

- Goal: prendere dati a luminosità più alta
 - Tantissime combinazioni di particelle e fondo
 - Throughput limitato permette di salvare solo parte dell'evento
- Soluzione proposta:
 - Deep-learning based Full-Event Interpretation
 - Consiste in vari step di filtri basati su Graph Neural Networks (GNNs)
 - Ricostruzione dei decadimenti interessanti e riduzione del fondo
 - La parte dell'evento non interessante non viene scritta su disco

*Prototipo dell'algoritmo
in fase di ottimizzazione*

Proposta di Bicocca+Zurich in
un [articolo di Novembre 2023](#)



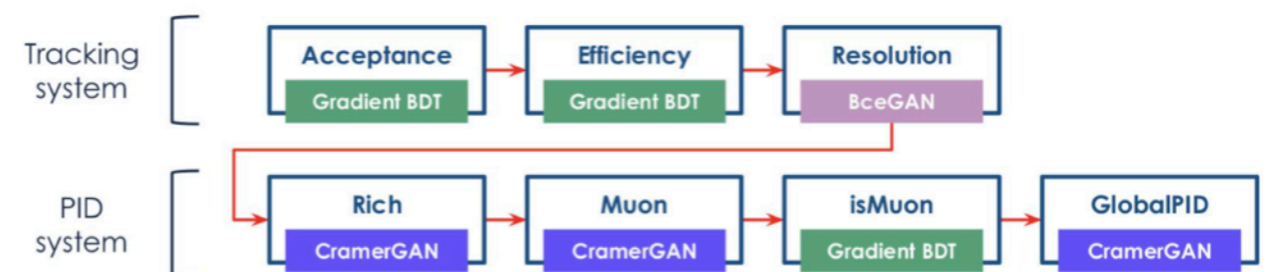
Proposta di tesi

Sviluppo e test di Graph Neural Networks per la ricostruzione e selezione di decadimenti di adroni pesanti ad LHC. Selezione delle particelle neutre. Estensione agli adroni charmati. Applicazioni offline. Validazione sui dati.

Deep Learning per ultra-fast simulation

- Simulazioni dettagliate necessarie per l'interpretazione degli eventi di LHC
- Oggi 90% della CPU → non sostenibile nella fase di alta luminosità
- Soluzione proposta:
 - Velocizzare alcune fasi della simulazione con algoritmi di Deep Learning
 - In particolare **Generative AI** con GANs (Generative Adversarial Network)
 - Algoritmi più veloci su GPUs

In LHCb stiamo sviluppando il progetto Lamarr



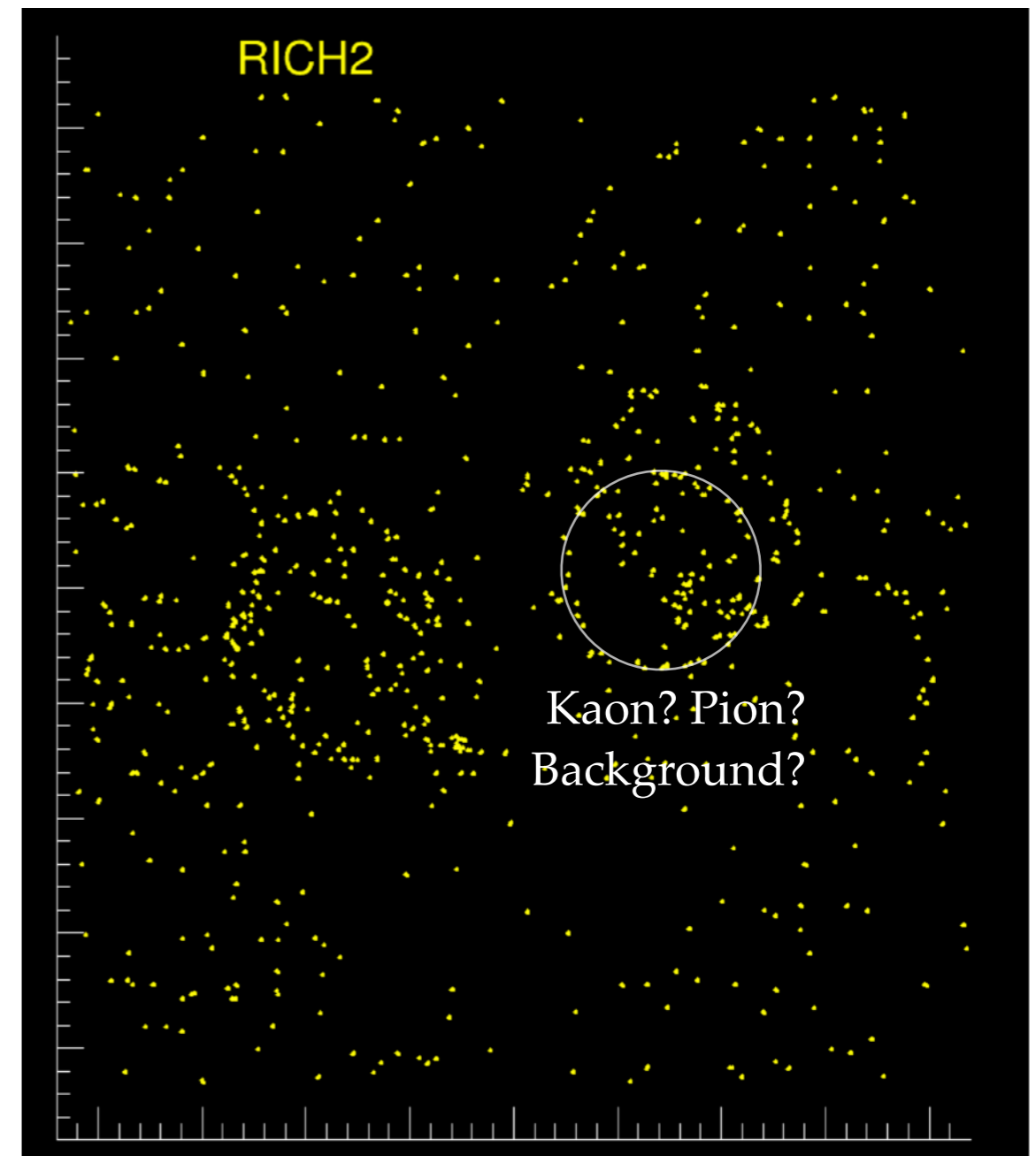
Deep Learning per ricostruzione RICH

RICH = Ring Imaging Cherenkov (detector)

- LHCb ha un detector RICH per identificare gli adroni carichi
- Raggio cerchio Cherenkov → Angolo di emissione luce → massa della particella
- Migliaia di tracce per evento, qualche decina di fotoni per traccia
- Problema complesso di pattern recognition e classificazione → Deep Learning?

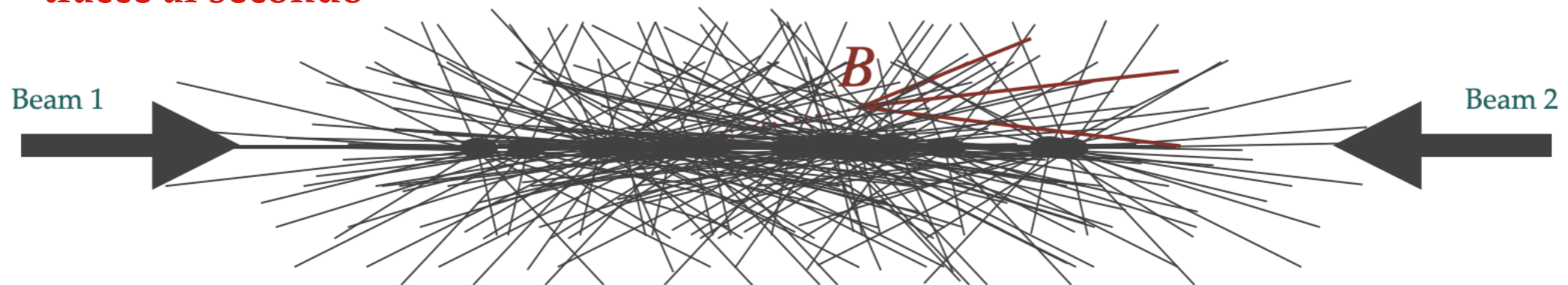


Piano di rivelazione dei fotoni



Nuove tecniche di tracciamento delle particelle

Circa 10^{10} tracce al secondo



Tracking con FPGA

- Sviluppo di algoritmi di tracking su FPGA
- Basato su algoritmo di tracking RETINA che stiamo testando a LHCb
- Algoritmo può essere esteso per il tracking di particelle che decadono più tardi
- Nuove schede FPGA a Bicocca vanno testate!



FPGA: Field Programmable Gate Array

Tracking con QC

- Algoritmi quantistici per sistemi lineari sono esponenzialmente più veloci dei metodi classici ($\mathcal{O}(\log N)$ vs $\mathcal{O}(N)$)
→ possiamo usarli per il tracking?
- Sviluppo di algoritmi di tracking per computer quantistici (QC)
- Confronto con algoritmi classici



Maastricht University



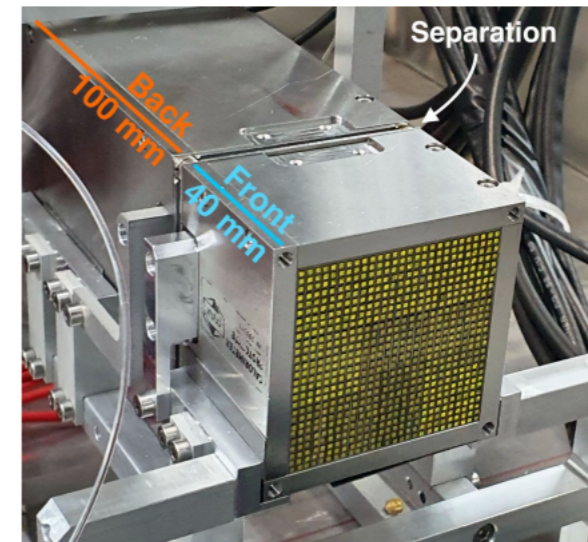
Qiskit

Upgrade del calorimetro elettromagnetico

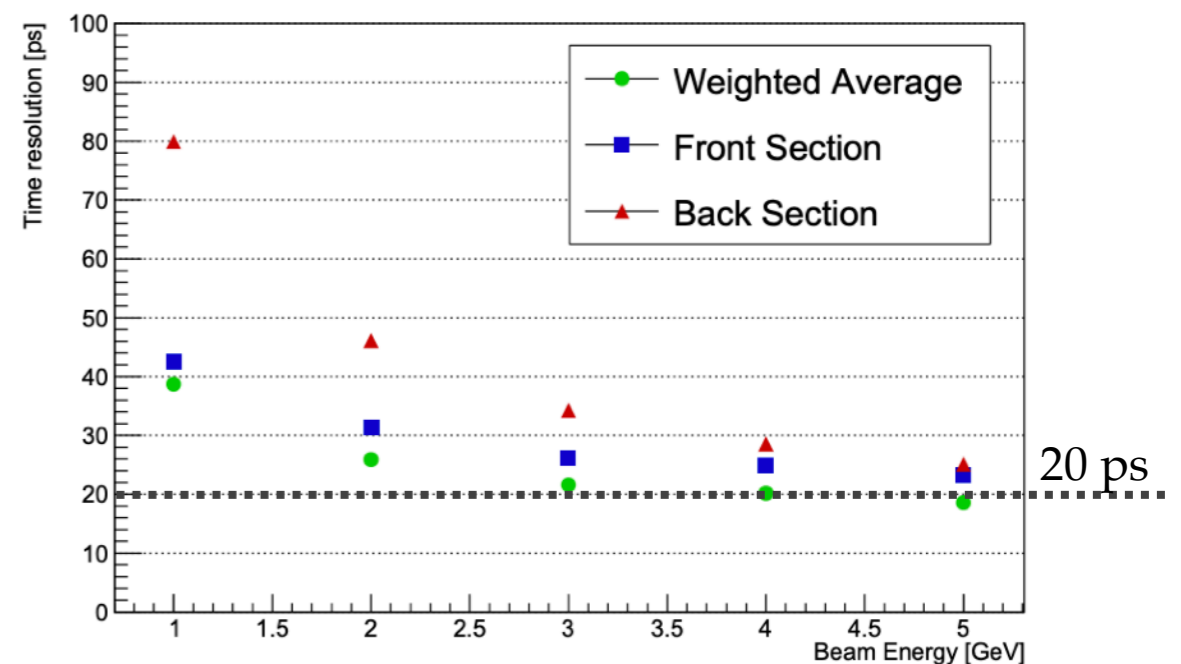
- Nuova tecnologia necessaria!
 - Resistenza alla radiazione, granularità, misura di tempo ($\sigma_t \simeq 20\text{ps}$)
- ➔ **Spaghetti Calorimeter (SPACAL)**
 - Possibilità di partecipare a test di prototipi con testbeam al CERN
 - Analisi dei dati ottenuti e confronto con simulazione Geant4
 - Studio delle performance dei prototipi
 - Studio di un algoritmo di identificazione delle particelle

Contatti: marta.calvi@unimib.it, marco.pizzichemi@unimib.it

Prototipo di modulo SPACAL



Time resolution with dual readout of W-SpaCal



LHCb@Bicocca



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:

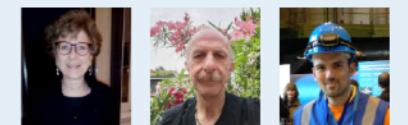
marta.calvi@unimib.it

maurizio.martinelli@unimib.it

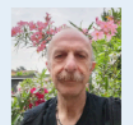
martino.borsato@unimib.it

marco.pizzichemi@unimib.it

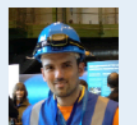
LHCb group @Bicocca



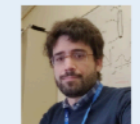
Marta Calvi
Full Professor



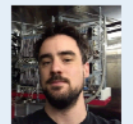
Gianluigi Pessina
INFN Research Director



Maurizio Martinelli
Associate Professor



Marco Pizzichemi
Associate Professor



Claudia Gatti
INFN Technologist



Alessandro Minetti
Tenure-Track Ass. Prof.



Martino Borsato
Tenure-Track Ass. Prof.



Paola Carniti
Postdoc



Davide Fazzini
Postdoc



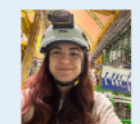
Simone Capelli
Postdoc



Matteo Salomoni
Postdoc



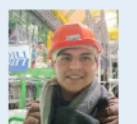
Veronica Selund Kirsebom
Postdoc



Alessia Anelli
PhD Student



Lorenzo Malentacca
PhD Student



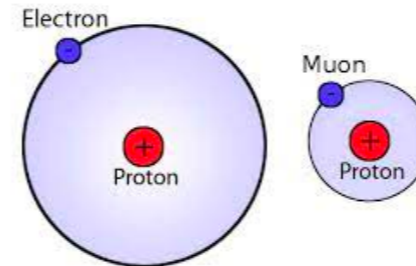
Carlos Cechá
Visiting PhD Student

BACKUP

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

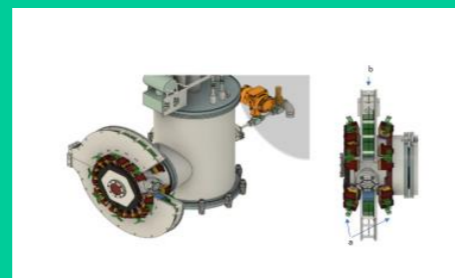
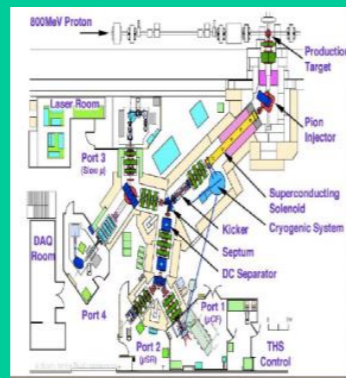
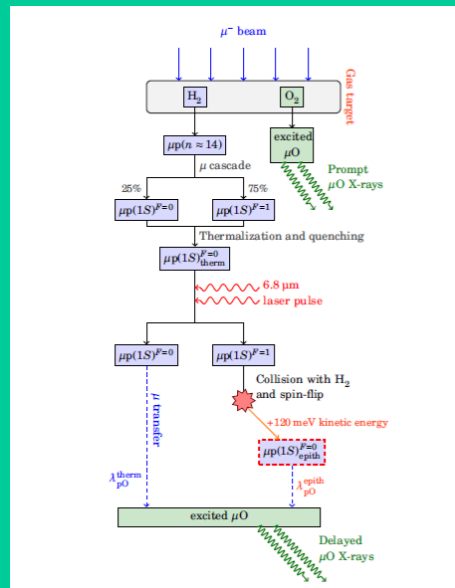
Proposta di tesi:

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

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 ~ 0.07 nm

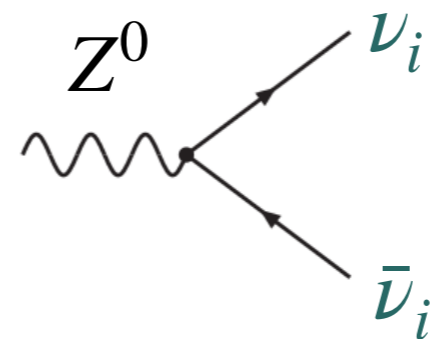
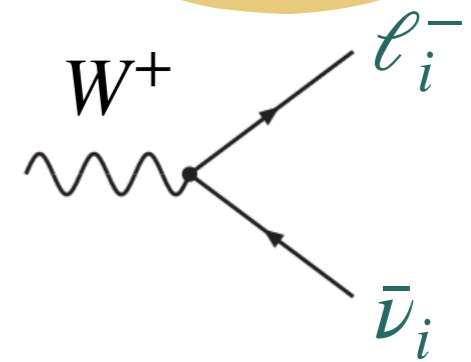
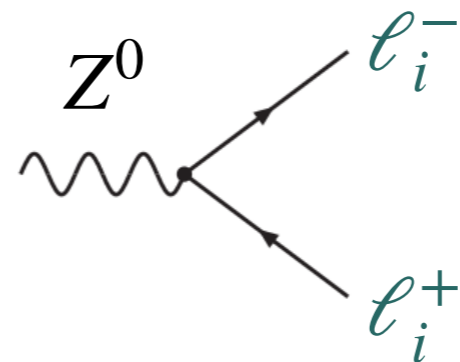
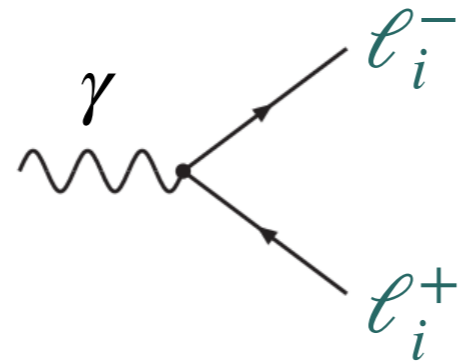
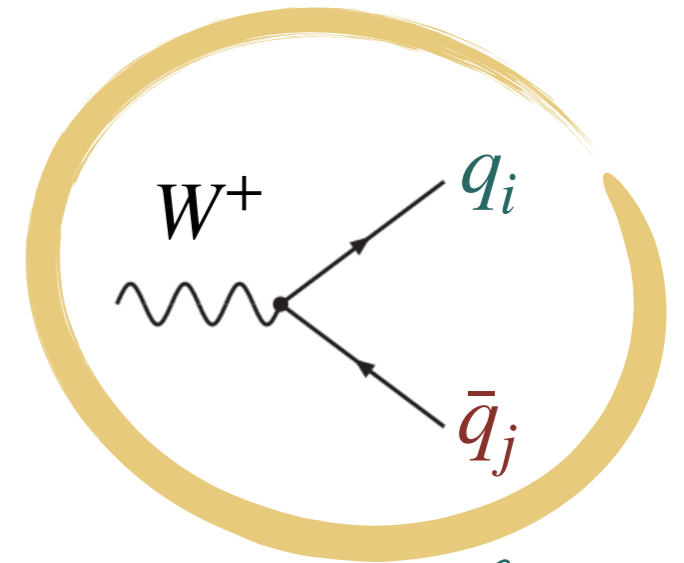
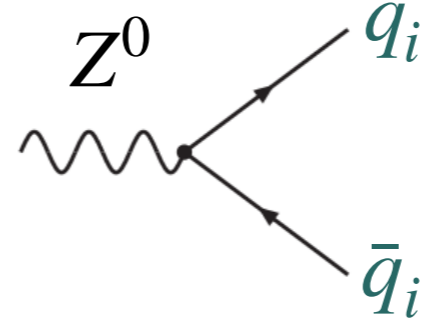
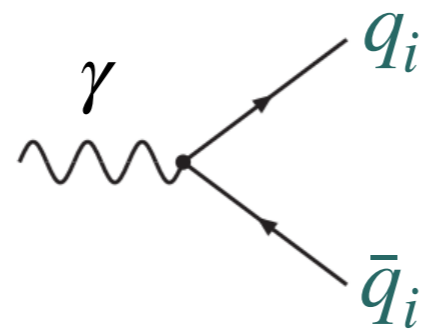
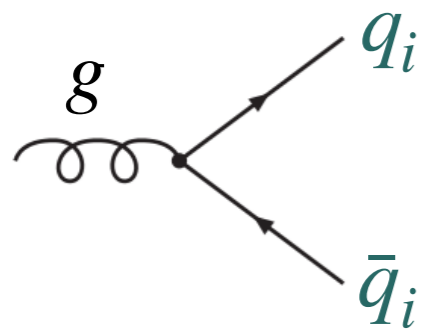
Possible arguments for a master thesis:

- 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 μp 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

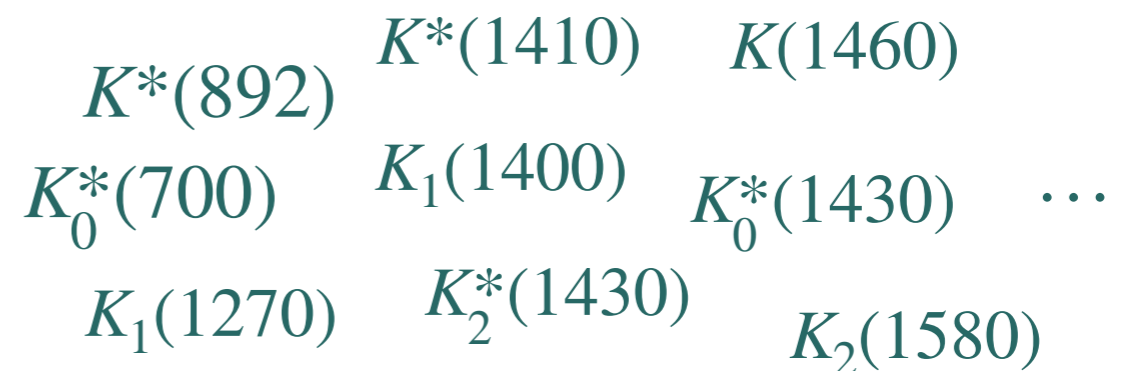
Flavour-changing current



Hadron decays

K mesons: $s\bar{u}$, $s\bar{d}$

- Quarks hadronise into bound states (hadrons):
 - Unflavoured $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $u\bar{d}$
 - Strange mesons: $s\bar{u}$, $s\bar{d}$
 - Charm mesons: $c\bar{u}$, $c\bar{d}$, $c\bar{s}$
 - Beauty mesons: $b\bar{u}$, $b\bar{d}$, $b\bar{s}$, $b\bar{c}$
 - Baryons $q_i q_j q_k \dots$
 - Tetraquarks, Pentaquarks
 - A huge zoo 🐆 🐊 🦖 🐋 🦩



strong and e.m. decays

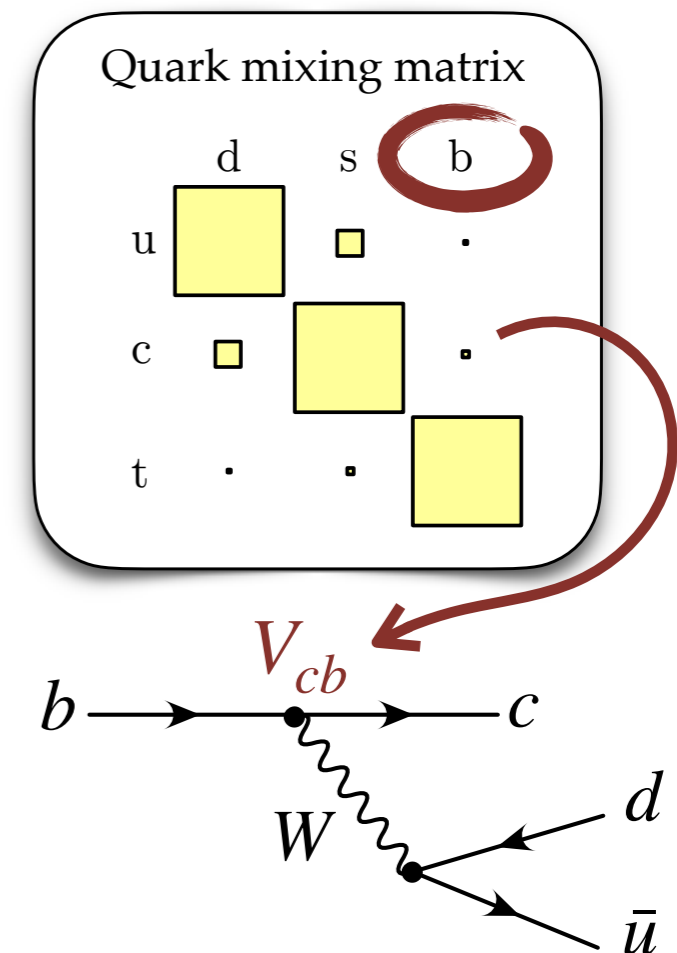
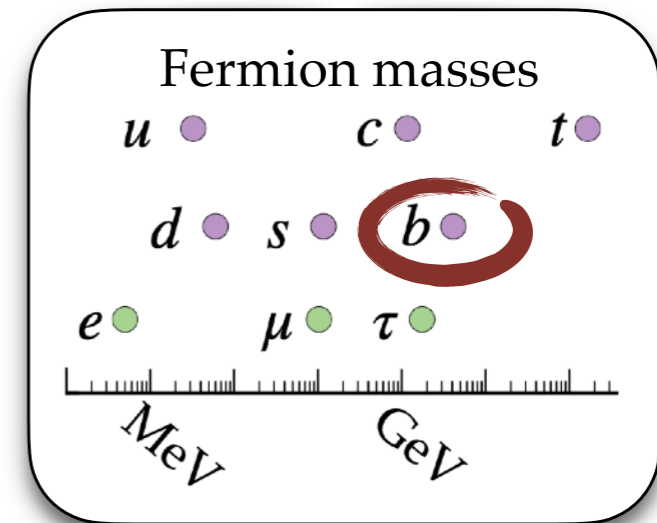
K^\pm K^0

weak decays

lighter mesons and leptons

The beauty of the beauty quark

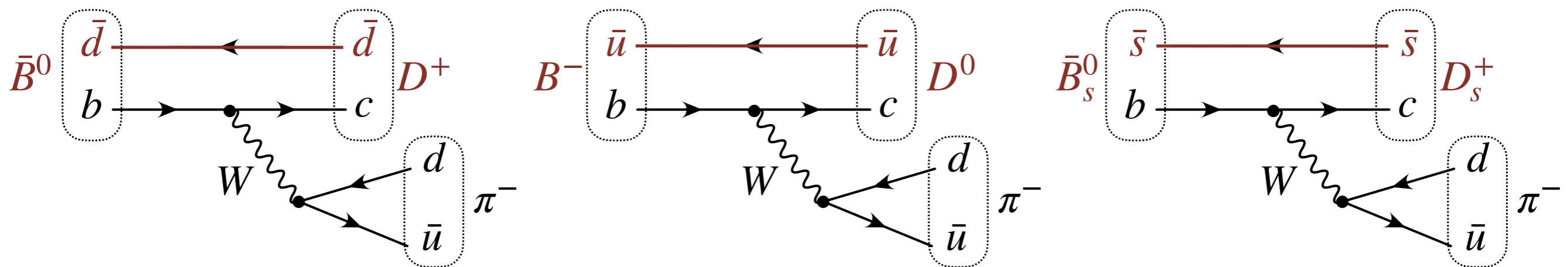
- Good theoretical properties:
 - Decays only via weak interaction
 - Can decay to 4 quarks and all leptons
 - Small SM decay width
 - Flavour suppressed $|V_{cb}|, |V_{ub}| \ll 1$
 - Weak suppressed $m_b/m_W \ll 1$
 - Sensitive to small new contributions
 - Large mass $m_b \gg \Lambda_{\text{QCD}}$
 \Rightarrow precise calculations
 - Hadronises before decaying



The beauty of the beauty quark

- Good experimental properties:

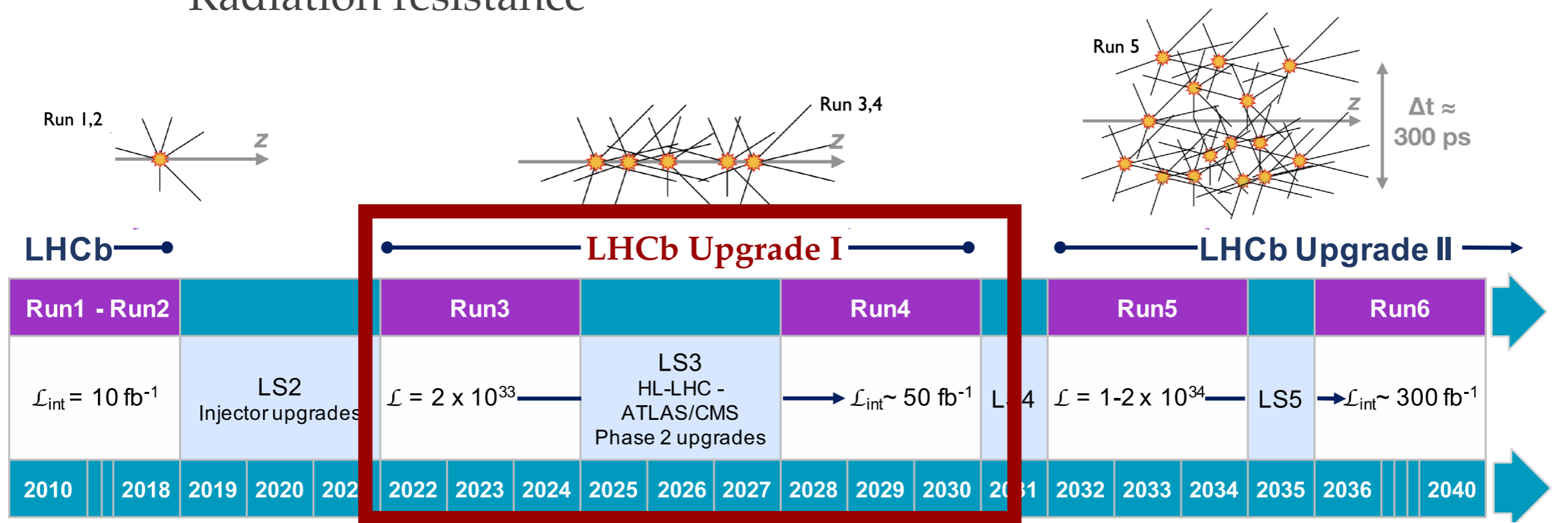
- $\tau_B \simeq 1.5$ ps \rightarrow displaced decay vertex
- $m_b \simeq 5$ GeV \rightarrow cheap to produce
- Huge phenomenology
 - Hadronises in many ways
 - Decays to hundreds of channels



LHCb upgrades

● **A detector challenge: cope with huge LHC cross sections**

- Precise real-time analysis (reduce throughput) → ultra-fast detectors and triggers
- Better data quality (segmentation, resolution)
- Track collisions in 4D → timing at 10 ps
- Radiation resistance



Now commissioning!

[See ICHEP talk by Federico](#)