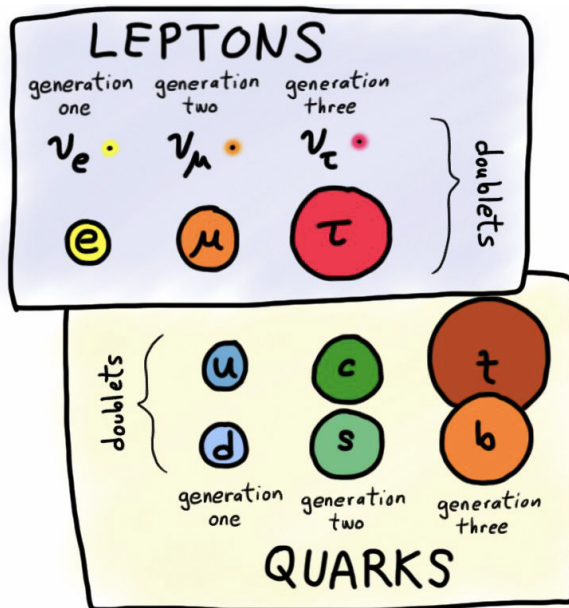


# La ricerca indiretta di nuova Fisica: test di Universalità Leptonica ad LHCb

*Marta Calvi, Simone Meloni*

Seminari INFN in Bicocca, 29 Maggio 2020

- La scoperta del **bosone di Higgs** ha **concluso la ricerca delle particelle fondamentali previste dal Modello Standard**, che ci fornisce un'ottima descrizione di **grande parte** dei fenomeni osservati fino ad ora in fisica delle particelle.
  - Ma lascia anche **tante domande aperte**, senza risposta (materia oscura, asimmetria materia-antimateria, gerarchia elettrodebole ecc...)
- Qual è il **completamento del MS** e come scoprirlo?
  - La non-osservazione di nuove particelle ad LHC ha alzato la scala di energie necessarie per poterle produrre direttamente (es. SUSY:  $m_{\text{stau}} \gtrsim 400 \text{ GeV}/c^2$ ,  $m_{\text{slepton}} \gtrsim 700 \text{ GeV}/c^2$ )



### Tre generazioni:

- Nel MS ci sono 12 fermioni elementari raggruppati in 3 generazioni di massa crescente:  $m_t/m_u \sim O(10^5)$ 
  - *nessuna spiegazione perchè le particelle abbiano masse così diverse*
  - molti parametri liberi (anche accoppiamenti, potenziale di Higgs ecc.)

**“Fisica del sapore”** = studio del **mondo di quark e leptoni** e di tutti i fenomeni che distinguono tra le generazioni di fermioni.

# Potenziale di scoperta dei contributi “virtuali”

- Abbiamo sperimentato negli anni che **particelle pesanti possono influenzare la fisica di bassa energia**

Qualche esempio:

- Lo scattering dei neutrini è controllato dal **bosone  $Z^0$**

I bosoni  $Z^0$  (e  $W^\pm$ ) sono stati osservati dagli esperimenti UA1 e UA2 nel 1983, in collisioni  $p\bar{p}$  al SpS del Cern, ma l'esistenza delle correnti deboli neutre è stata dimostrata nel 1973 dall'esperimento Gargamelle osservando lo scattering  $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \text{hadrons}$

Volume 46B, number 1

PHYSICS LETTERS

3 September 1973

## OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

F.J. HASERT, S. KABE, W. KRENZ, J. Von KROGH, D. LANSKE, J. MORFIN, K. SCHULTZE and H. WEERTS

*III. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, Aachen, Germany*

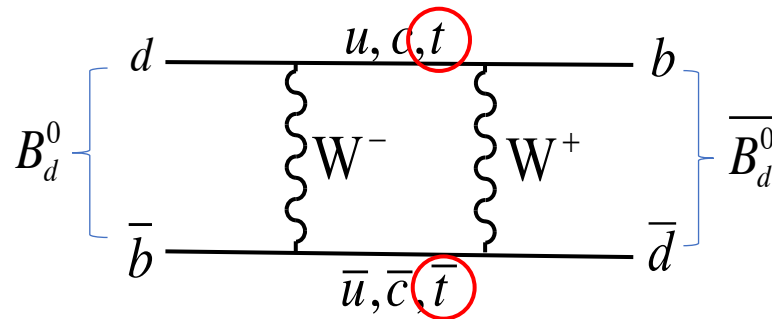
G.H. BERTRAND-COREMANS, J. SACTON, W. Van DONINCK and P. VILAIN\*<sup>1</sup>  
*Interuniversity Institute for High Energies, U.L.B., V.U.B. Brussels, Belgium*

U. CAMERINI\*<sup>2</sup>, D.C. CUNDY, R. BALDI, I. DANILCHENKO\*<sup>3</sup>, W.F. FRY\*<sup>2</sup>, D. HAIDT, S. NATALI\*<sup>4</sup>, P. MUSSET, B. OSCULATI, R. PALMER\*<sup>4</sup>, J.B.M. PATTISON, D.H. PERKINS\*<sup>6</sup>, A. PULLIA, A. ROUSSET, W. VENUS\*<sup>7</sup> and H. WACHSMUTH  
*CERN, Geneva, Switzerland*



Camera a bolle Gargamelle esposta nel giardino del museo Microcosm (Cern)

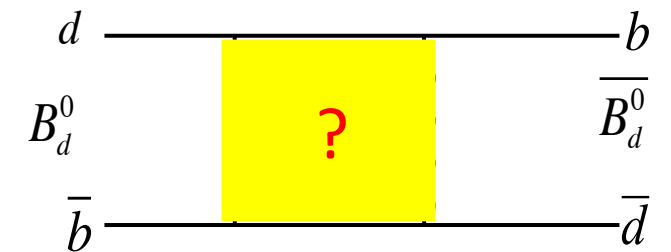
- L'assenza di correnti deboli neutri con cambiamento di sapore (no FCNC a livello albero) ha introdotto l'esistenza del quark charm.
- L'osservazione della violazione di CP nel sistema  $K^0 \bar{K}^0$  ha suggerito l'esistenza di una terza generazione di quarks (è possibile incorporare la CPV nella teoria se esistono 6 quarks)
- L'osservazione delle oscillazioni  $B^0 \bar{B}^0$  ha dato la stima della massa del quark top molto più alta dell'atteso



$$m_t (GeV/c^2) \gtrsim 220 \sqrt{\Delta m_d (ps^{-1})}$$



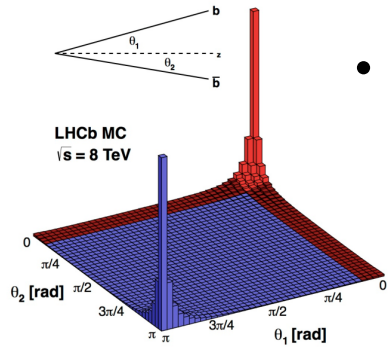
- La misura di **precisione** di un processo descrivibile solo da **diagrammi a loop** può dare informazioni su contributi di possibili **particelle virtuali** che intervengono nel fenomeno.
  - è necessario che anche le previsioni del MS siano calcolate con buona precisione



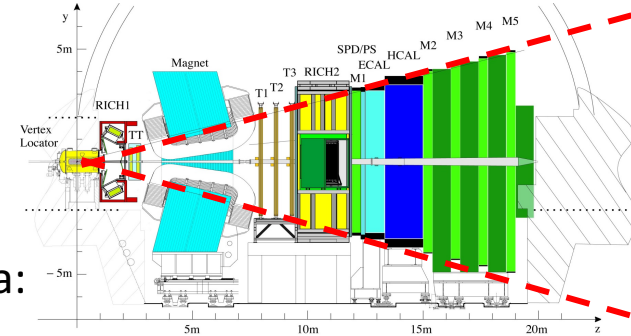
# Adroni beauty e charm per la ricerca di Nuova Fisica ad LHC

- Quarks b e c sono **prodotti copiosamente** in collisioni adroniche ad alta energia
  - sezione d'urto  $\sigma_{bb} \sim 600 \mu\text{b}$  a  $E_{\text{c.m.}} = 13 \text{ TeV} \rightarrow \sim 10^{12} \text{ b prodotti /fb}^{-1}$   
(rispetto  $\sigma_{bb} \sim 7 \text{ nb}$  in  $e^+e^-$  allo  $Z^0$  e  $\sigma_{BB} \sim 1 \text{ nb}$  alla  $Y(4S)$ )
  - $\sigma_{cc} \sim 20$  volte maggiore
- Da collisioni pp si producono tutte le specie di mesoni e barioni con b e c
- Gli adroni “pesanti” presentano una **ricca fenomenologia** (molti modi di decadimento aperti, anche a molti corpi, oscillazioni dei mesoni neutri) che permettono di accedere a **studi di violazione di CP, ricerca di decadimenti rari ecc.**
- Gli adroni sono prodotti con grande boost relativistico: percorrono distanze “facilmente” **misurabili** e sono ricostruibili **con precisione** dagli stati finali
  - Ma il rapporto segnale/fondo è basso ( $\sigma_{bb}/\sigma_{\text{inelastic}} \sim 10^{-2}$ ) e i branching fraction generalmente sono piccoli ( $\sim 10^{-5}$ )  $\rightarrow$  necessario un trigger potente per selezionare i processi di interesse

# LHCb: un rivelatore per il beauty e per il charm



- Spettrometro in avanti  $2 < \eta < 5$
- La **produzione** di coppie  $b\bar{b}$  in collisioni adroniche ad alta energia avviene prevalentemente a **piccoli angoli**
  - buona accettazione per entrambi  $b$  e  $\bar{b}$  in una regione angolare ristretta:  $\sim 50 \text{ kHz } b\bar{b}$  e  $\sim 1 \text{ MHz } c\bar{c}$  nel rivelatore



- Progettato per funzionare a luminosità controllata per **ottimizzare la ricostruzione degli eventi** (numero medio di collisioni per scontro dei fasci:  $\mu \sim 1$ )

- Fasci di protoni disallineati localmente per ridurre la luminosità istantanea

$$\mathcal{L} = 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ nei Run 1 e 2 (rispetto } \sim 10^{34} \text{ in ATLAS/CMS)}$$

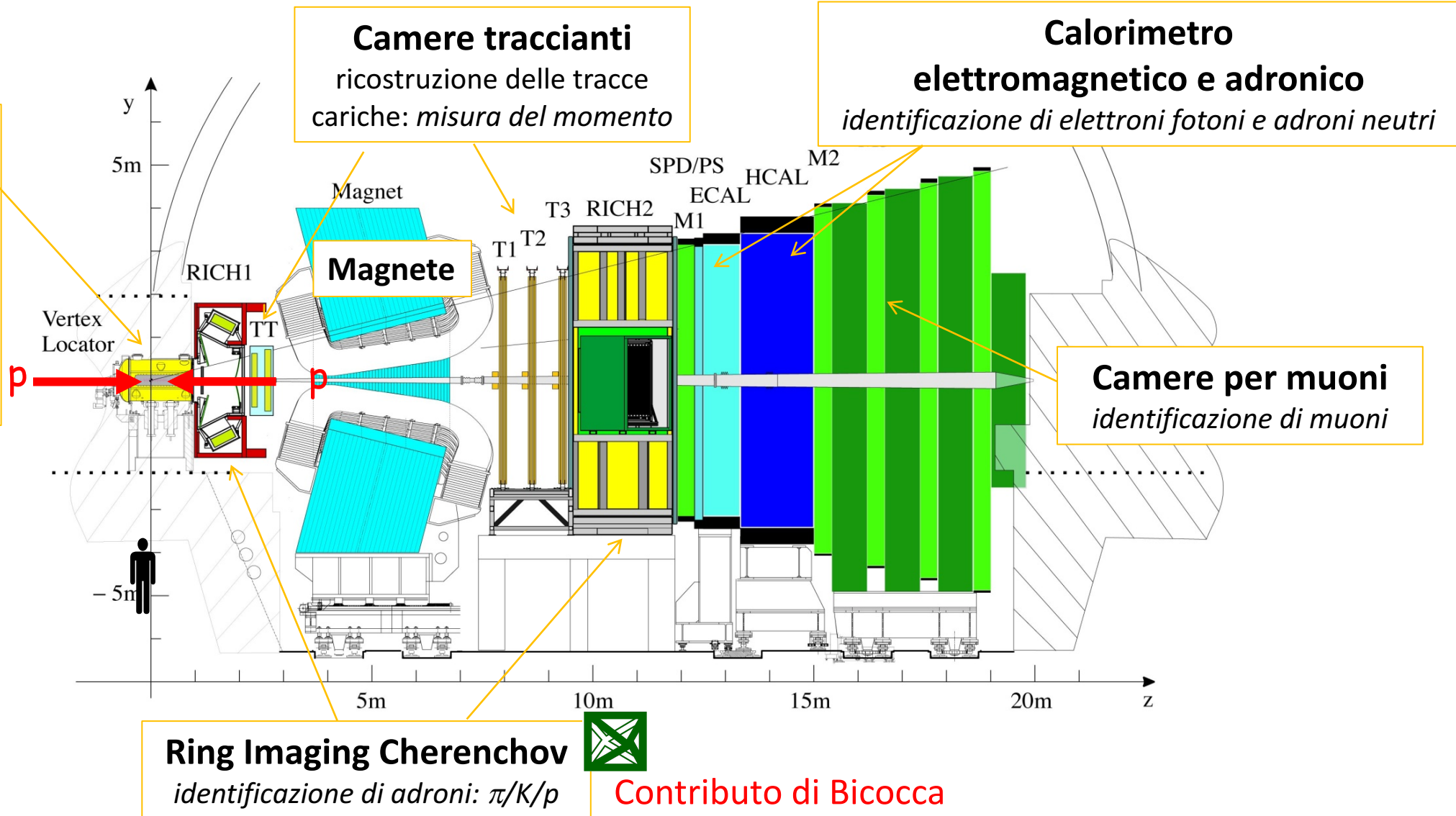
- **LHC** 2010-2012 (Run1) collisioni pp a  $E_{c.m.} = 7-8 \text{ TeV}$   
2015-2018 (Run2) collisioni pp a  $E_{c.m.} = 13 \text{ TeV}$

in totale  $\int \mathcal{L} dt \sim 9 \text{ fb}^{-1}$

- **Con questo tesoro di dati raccolti > 500 pubblicazioni e molti studi ancora in corso**

# Il rivelatore LHCb

**Rivelatore di vertici**  
ricostruzione di punto di interazione pp e di vertici di decadimento delle particelle a vita breve (B,D ..)  
*misura lunghezza di decadimento*




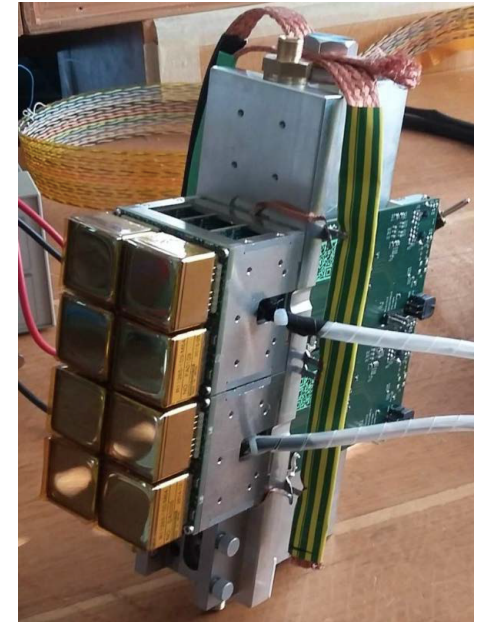
Contributo di Bicocca

# LHCb Upgrade

- Prossima presa dati ad LHC con un **nuovo rivelatore**:
  - Durante lo shutdown in corso (2019-20) LHCb viene quasi completamente rinnovato per renderlo idoneo a raccogliere dati nel Run3 (dal 2021) a luminosità superiore

$$\mathcal{L} = 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad \text{e accumulare in totale} \quad \int \mathcal{L} dt \sim 50 \text{ fb}^{-1}$$

- Necessario acquisire ed elaborare i dati delle collisioni a 40 MHz
- Per il RICH: sostituzione dei **foto-rivelatori** dei RICH con MaPMT  
→ **Bicocca** per l'elettronica di front-end 







Non finisce qui

- In vista del periodo di LHC alta-luminosità, è stato proposto all'European Strategy Panel un successivo upgrade di LHCb. La sfida è reggere una luminosità istantanea x10 e poter integrare  $300 \text{ fb}^{-1}$





# Quale programma?

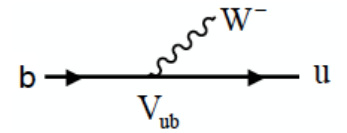
- Aumentare la precisione con cui sono conosciuti i parametri liberi del MS
  - es. Misura dei parametri della matrice CKM 
- Ricerca di segnali nei decadimenti in cui il contributo del MS è soppresso, e la Nuova Fisica ha spazio per manifestarsi
  - FCNC (es  $b \rightarrow s$ ); Decadimenti ultra rari (es.  $B_s \rightarrow \mu\mu$ ); decadimenti “proibiti” (es. LFV )
- Ricerca di nuove sorgenti di violazione di CP
  - una violazione di CP maggiore di quella prevista dal MS è necessaria per spiegare l'asimmetria materia/anti-materia dell'Universo
  - Misure di parametri di CPV nel beauty e nel charm 
- Attenzione all'inatteso, ma plausibile: es. Violazione di Lepton Flavour Universality 

*Prossimo  
seminario 26/6*

# Mescolamento dei quarks e matrice CKM

- La matrice CKM mette in relazione gli stati di sapore con gli stati deboli (autostati di massa): 4 parametri liberi.

- Introduce le **transizioni con cambiamento di sapore** a livello albero nelle correnti cariche



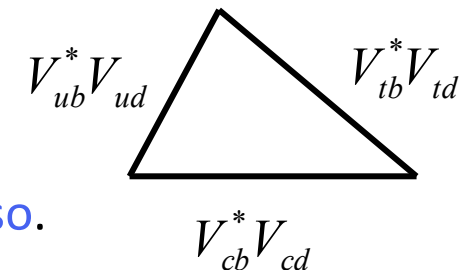
- Si osserva una forte gerarchia, esplicita nella parametrizzazione di Wolfenstein
  - suggestiva, ma non se ne conosce la ragione (e completamente diversa nel settore dei neutrini)*

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad V = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

- L' **unitarietà** di CKM implica relazioni di ortogonalità tra i parametri, es:

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$$

- Esprimibili anche in termini di elementi di un **triangolo nel piano complesso**.



# Misure di precisione: consistenza nei parametri di CKM

- I decadimenti dei B danno accesso a molte misure indipendenti degli stessi parametri.

- Consistenza del modello → un solo unico triangolo**

- Tra le variabili più sensibili, misurate a LHCb:

Rateo dei decadimenti  $b \rightarrow u$  da cui  $|V_{ub}|$

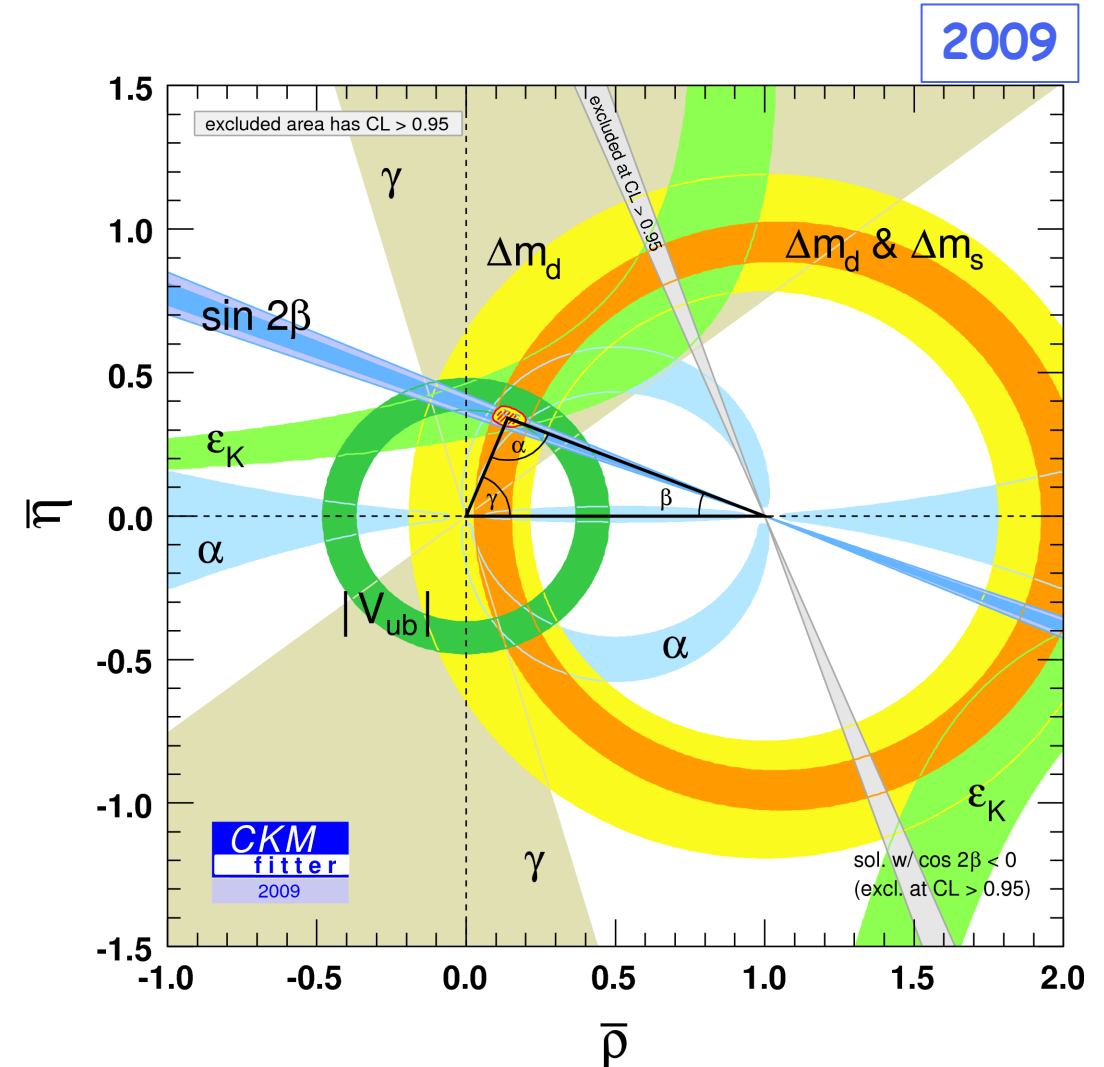
Fase del mixing  $B^0 \bar{B}^0$  da cui  $\beta$

Frequenza delle oscillazione di  $B_{(s)}^0 \bar{B}_{(s)}^0$

Rateo dei decadimenti  $B \rightarrow DK$  da cui  $\gamma$

- Tutti i risultati sono concordanti entro le attuali incertezze sperimentali e teoriche.**

- Una possibile discrepanza indica la presenza di NP: necessaria maggior precisione nelle misure per poterla evidenziare



# Misure di precisione: consistenza nei parametri di CKM

- I decadimenti dei B danno accesso a molte misure indipendenti degli stessi parametri.

- **Consistenza del modello → un solo unico triangolo**

- Tra le variabili più sensibili, misurate a LHCb:

Rateo dei decadimenti  $b \rightarrow u$  da cui  $|V_{ub}|$

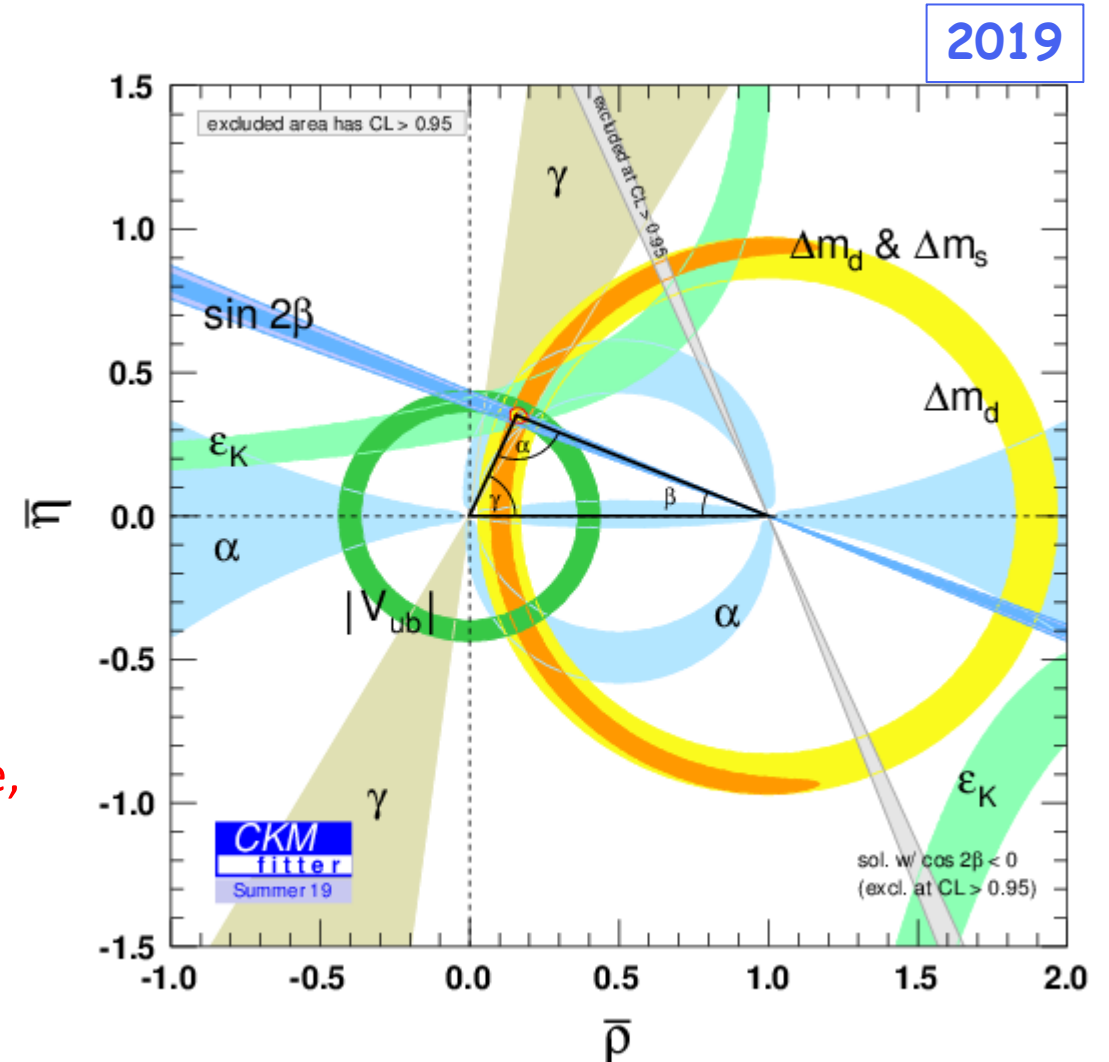
Fase del mixing  $B^0 \bar{B}^0$  da cui  $\beta$

Frequenza delle oscillazione di  $B_{(s)}^0 \bar{B}_{(s)}^0$

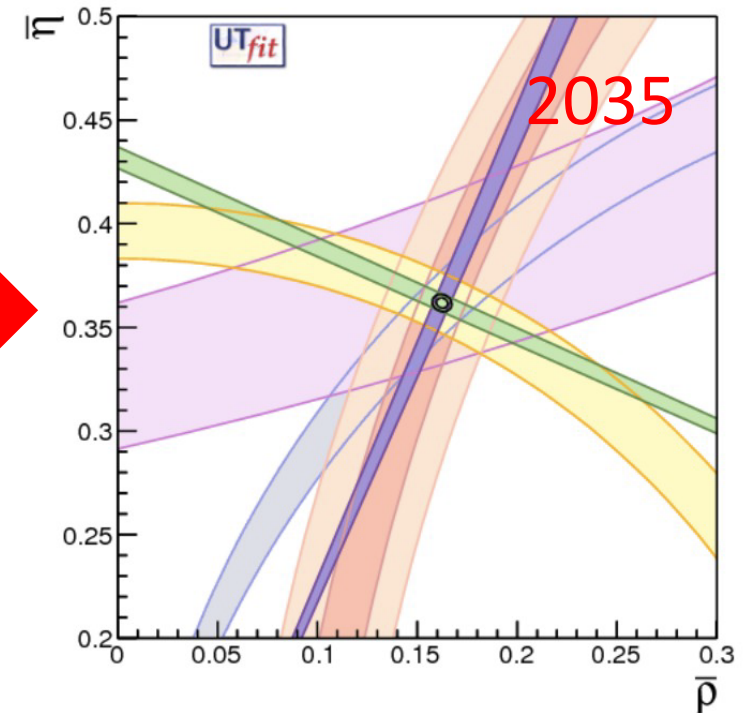
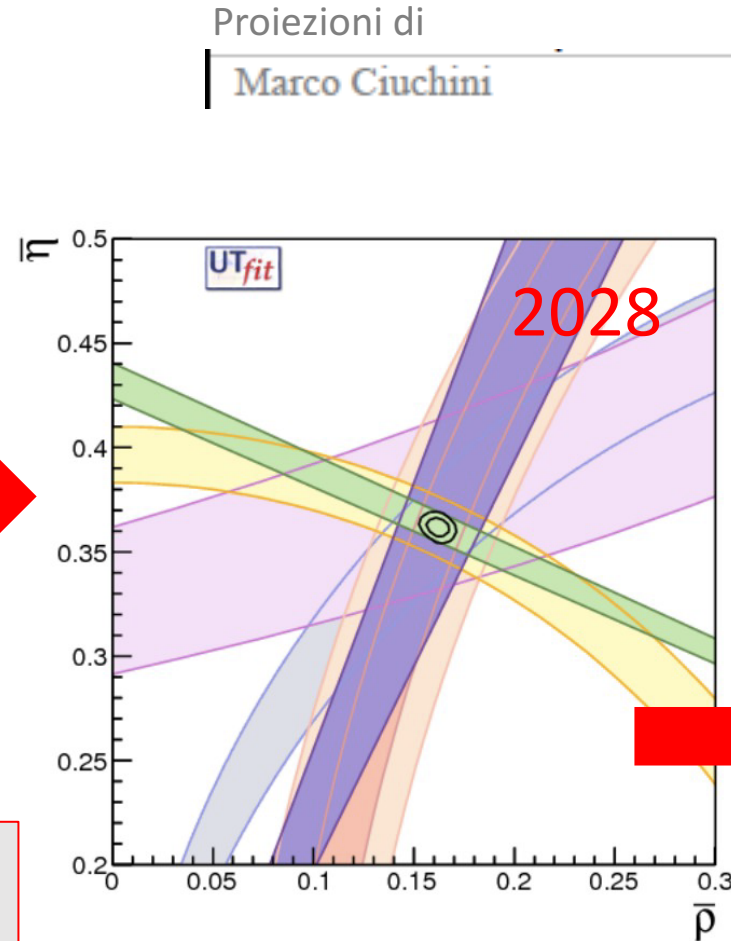
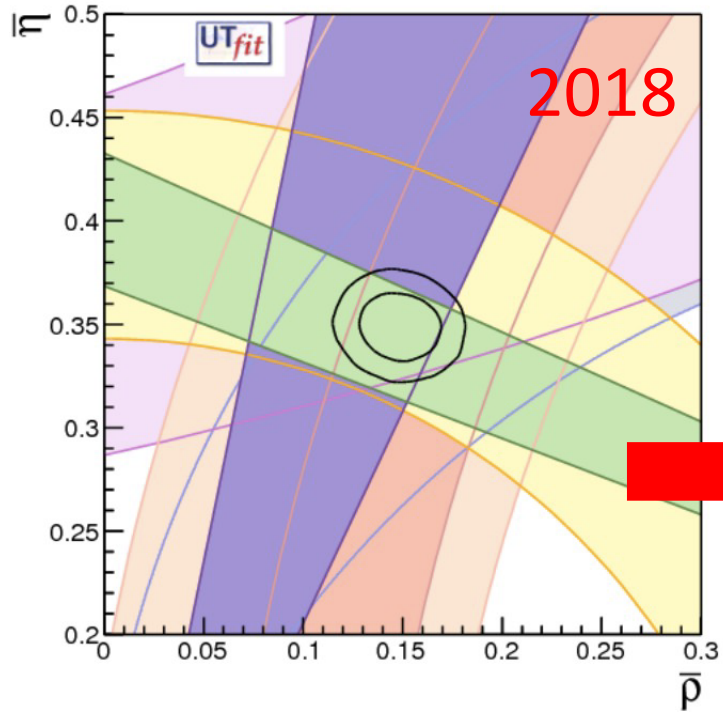
Rateo dei decadimenti  $B \rightarrow DK$  da cui  $\gamma$

- **Tutti i risultati sono concordanti entro le attuali incertezze, sperimentali e teoriche.**

- Una possibile discrepanza indica la presenza di NP: necessaria maggior precisione nelle misure per poterla evidenziare



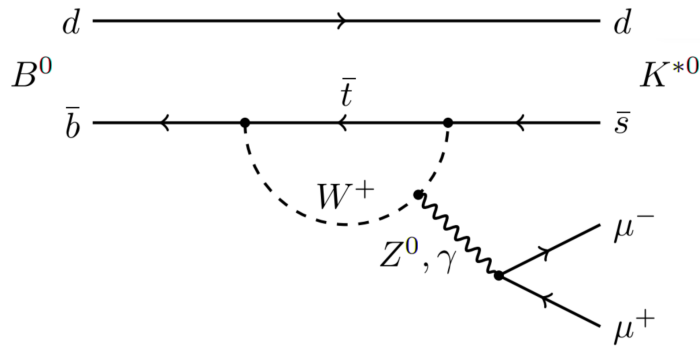
# Possibile evoluzione negli anni futuri



Qui si assumono gli stessi valori centrali, ma quali saranno i risultati delle misure future?

# Misure di precisione in decadimenti "rari" (FCNC): $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$

- Nel MS una transizione con cambio di sapore tra due quark con uguale carica è proibita a livello albero.
- Permessa ad ordini superiori. Nei loop possibili contributi significativi di altre particelle



## • Strategia:

**misurare variabili che sono calcolabili con precisione nel MS e cercare possibili deviazioni dalla previsione.**

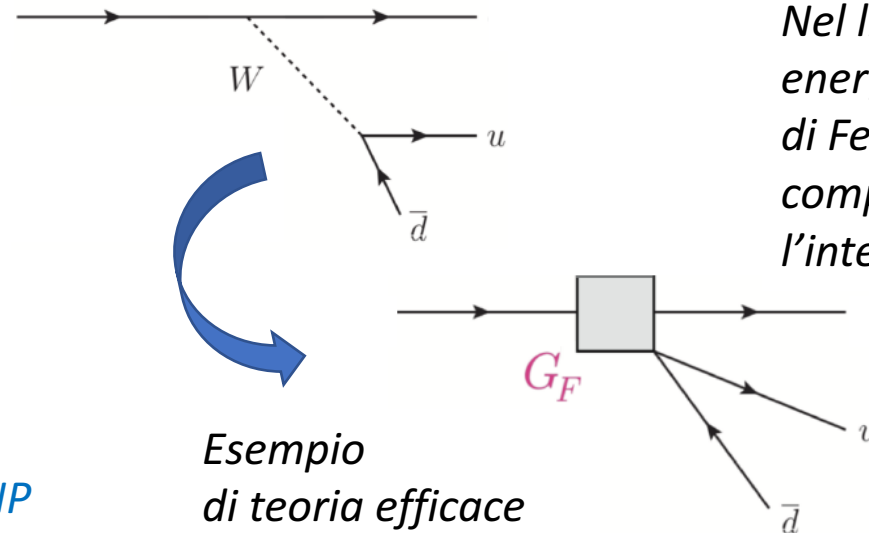
- EFT- teoria di campo efficace:

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \sum_i (C_i \mathcal{O}_i + C'_i \mathcal{O}'_i)$$

*Operatori locali, descrivono la QCD non-perturbativa*

*Coefficienti di Wilson*

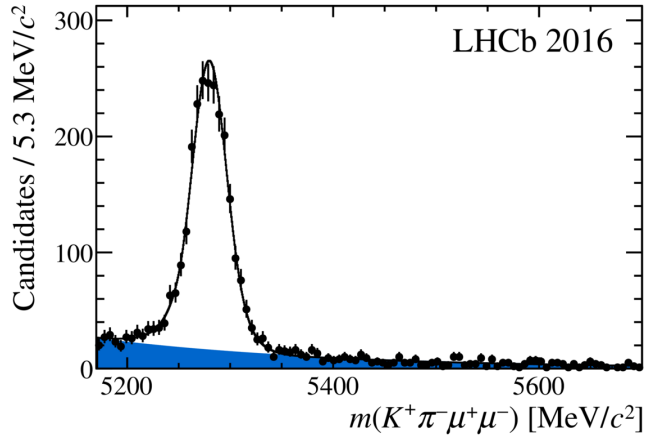
*contengono l'informazione sul modello di NP*



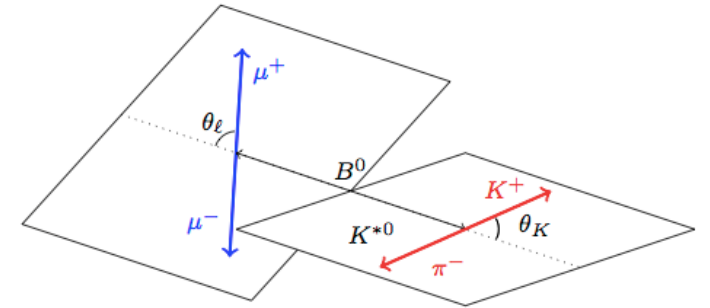
*Nel limite di bassa energia la costante di Fermi descrive completamente l'interazione*

*Esempio di teoria efficace*

# Misura di distribuzioni angolari di $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$

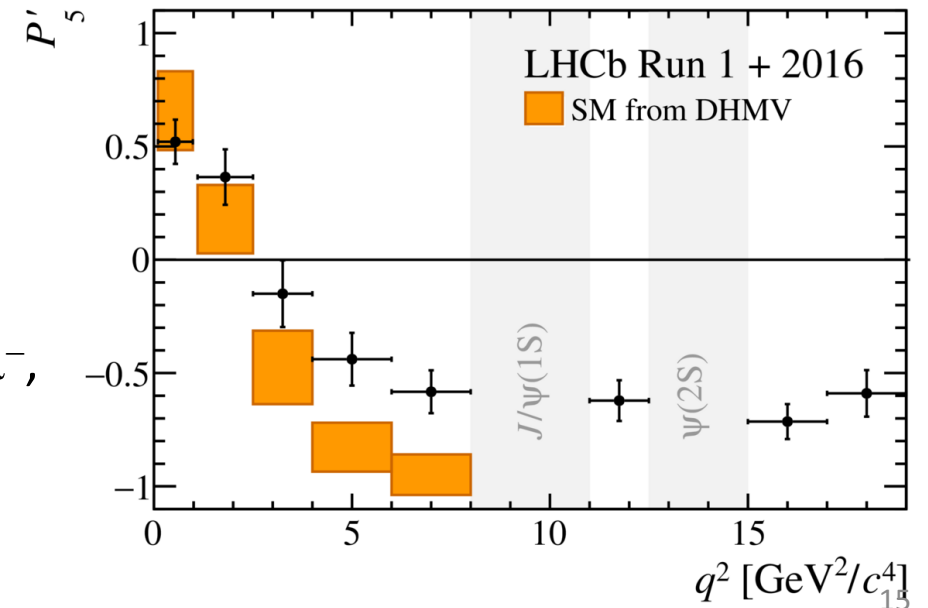


- $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ ,  $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$
- Dati Run1 + 2016 ( $4.7 \text{ fb}^{-1}$ )



- Le incertezze dovute alle interazioni adroniche vengono minimizzate definendo osservabile che sono rapporti tra i parametri che governano la distribuzione angolare.

- Es. **distribuzione dell'osservabile  $P'_5$  in funzione di  $q^2$**  (= massa invariante al quadrato della coppia  $\mu^+ \mu^-$ )
  - Nei bins  $4.0 < q^2 < 6.0$  e  $6.0 < q^2 < 8.0 \text{ GeV}^2/c^4$  bins la tensione con il MS è di  $2.5$  e  $2.9\sigma$ .
- Deviazioni osservate in altri decadimenti simili:  $B^0 \rightarrow K^0_s \mu^+ \mu^-$ ,  $B^+ \rightarrow K^- \mu^+ \mu^-$ ,  $\Lambda_b \rightarrow \Lambda \mu^+ \mu^-$



arXiv:2003.04831

# Collaborazione LHCb



79 Università e Laboratori  
da 18 Nazioni

## **Milano Bicocca**

Marta Calvi

Simone Capelli

Paolo Carniti

Davide Fazzini

Claudio Gotti

Maurizio Martinelli

Clara Matteuzzi

Simone Meloni

Gianluigi Pessina

Edward Shields

<https://lhcb-public.web.cern.ch/>