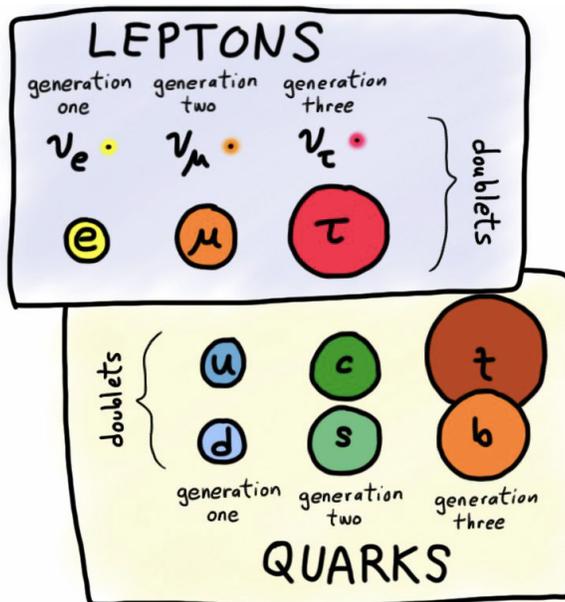


La ricerca indiretta di nuova Fisica: test di Universalità Leptonica ad LHCb

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

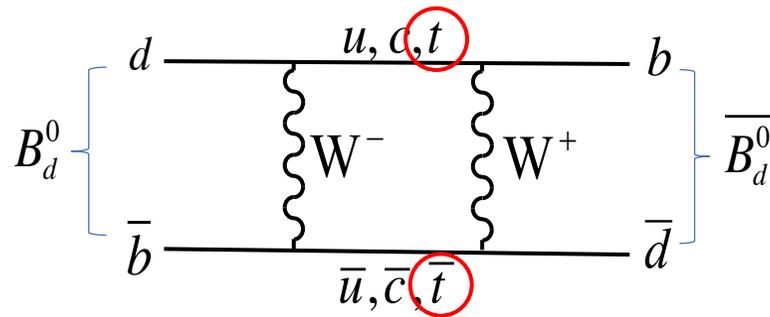
G.H. BERTRAND-COREMANS, J. SACTON, W. Van DONINCK and P. VILAIN*¹
Interuniversity Institute for High Energies, U.L.B., V.U.B. Brussels, Belgium

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



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

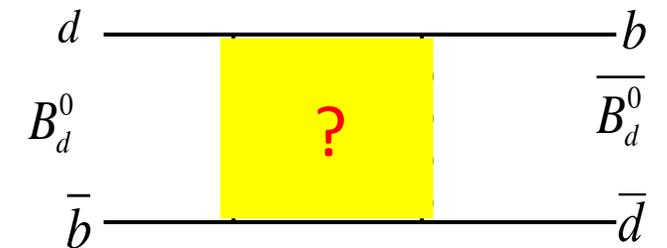
- L'assenza di correnti deboli neutri con cambiamento di sapore (no FCNC a livello albero) ha introdotto l'esistenza del quark charm.
- L'osservazione della violazione di CP nel sistema $K^0 \bar{K}^0$ ha suggerito l'esistenza di una terza generazione di quarks (è possibile incorporare la CPV nella teoria 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



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



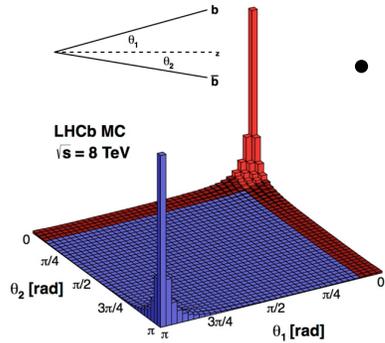
- La misura di **precisione** di un processo descrivibile solo da **diagrammi a loop** può dare informazioni su contributi di possibili **particelle virtuali** che intervengono nel fenomeno.
 - è necessario che anche le previsioni del MS siano calcolate con buona precisione



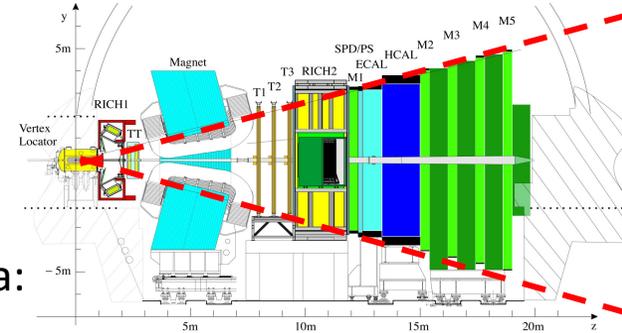
Adroni beauty e charm per la ricerca di Nuova Fisica ad LHC

- 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: ~ 50 kHz $b\bar{b}$ e ~ 1 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

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

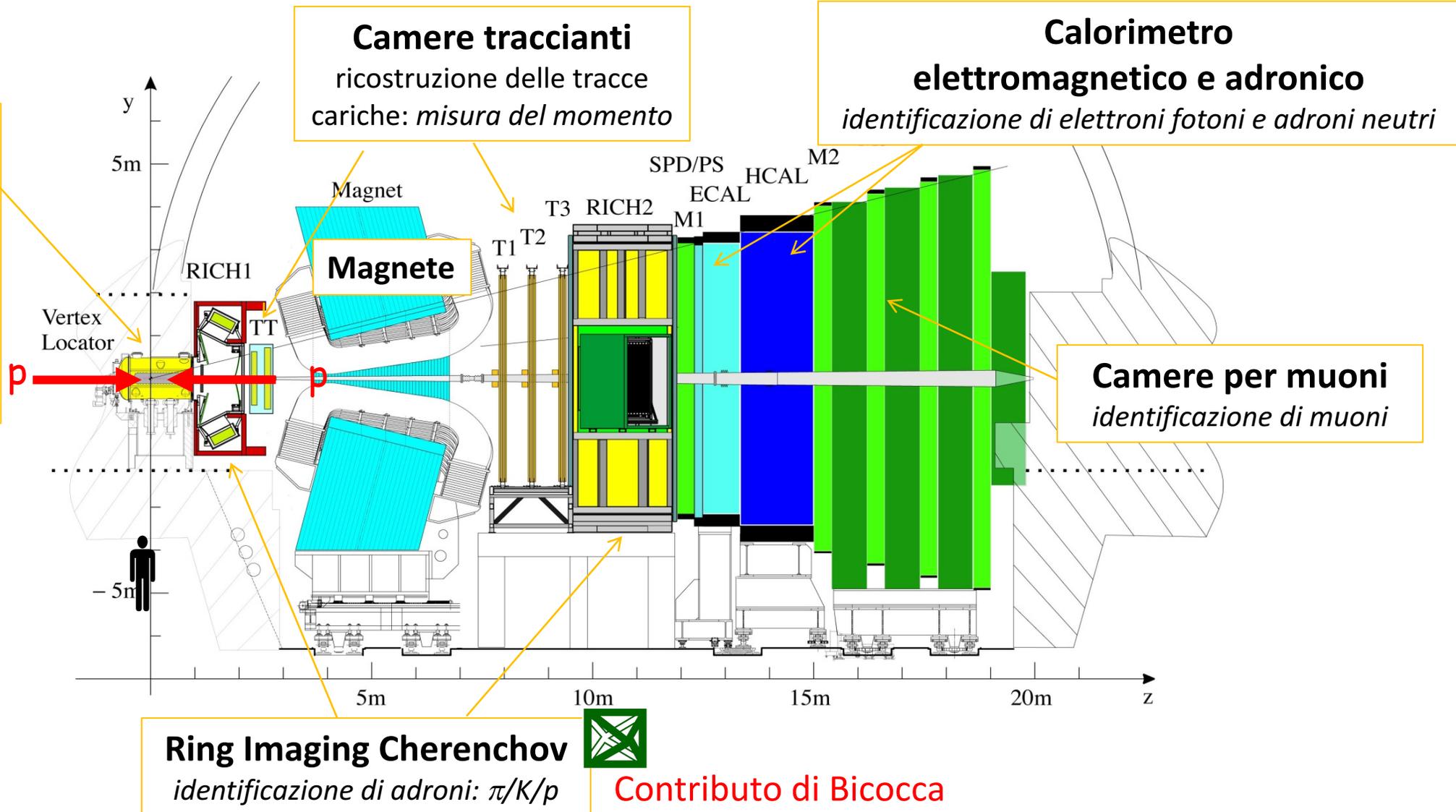
- **LHC** 2010-2012 (Run1) collisioni pp a $E_{c.m.} = 7-8$ TeV
2015-2018 (Run2) collisioni pp a $E_{c.m.} = 13$ TeV

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 fb^{-1}



Quale programma?

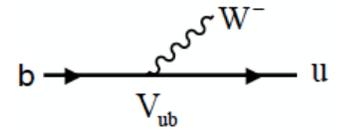
- Aumentare la precisione con cui sono conosciuti i parametri liberi del MS
 - es. Misura dei parametri della matrice CKM 
- Ricerca di segnali nei decadimenti in cui il contributo del MS è soppresso, e la Nuova Fisica ha spazio per manifestarsi
 - FCNC (es $b \rightarrow s$); Decadimenti ultra rari (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



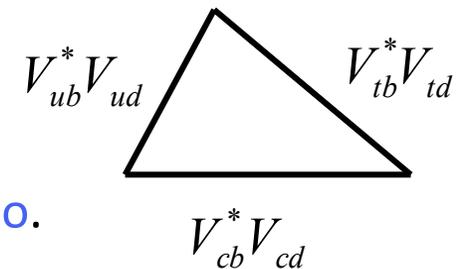
- Si osserva una forte gerarchia, esplicita nella parametrizzazione di Wolfenstein
 - *suggestiva, ma non se ne conosce la ragione (e completamente diversa nel settore dei neutrini)*

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

- 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 $|V_{ub}|$

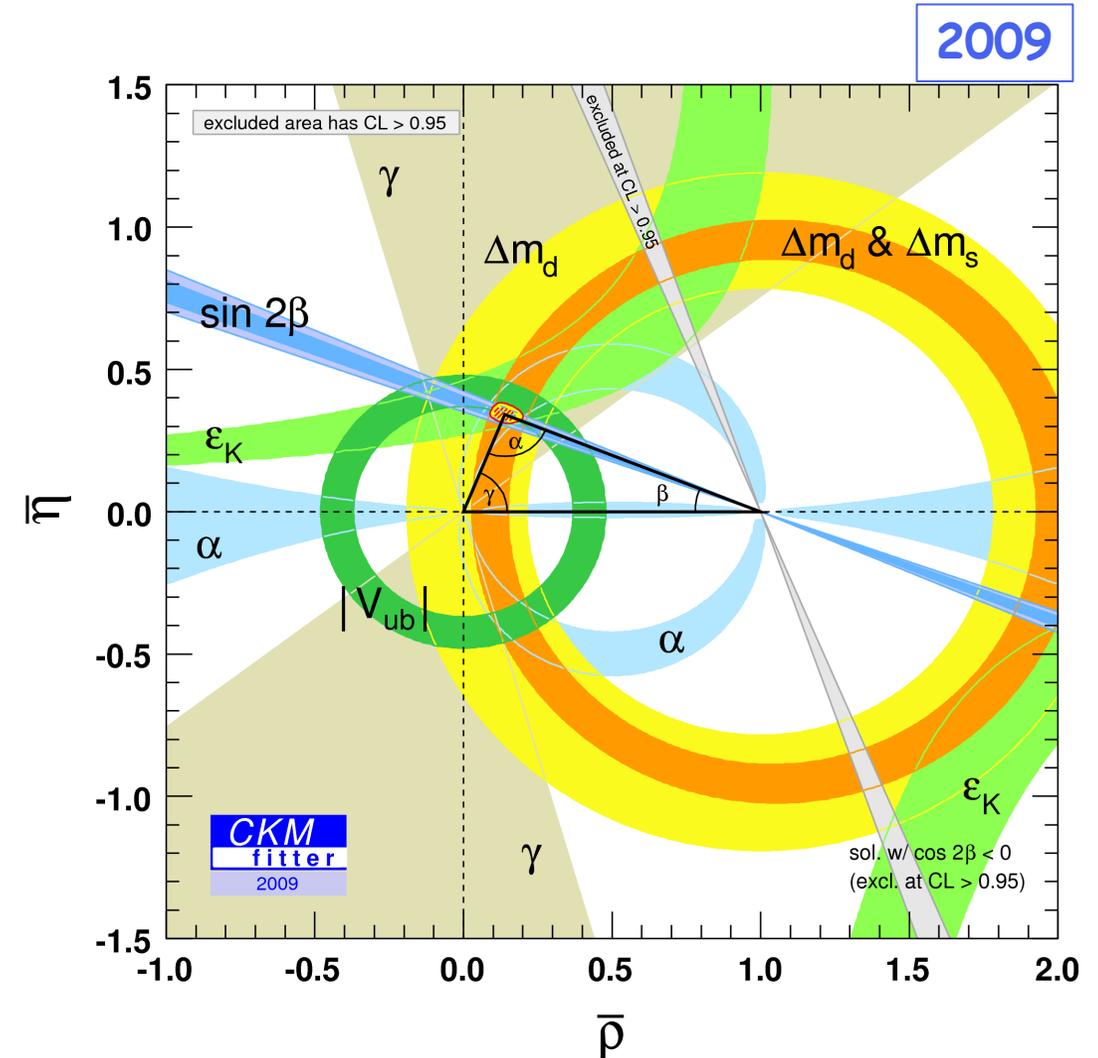
Fase del mixing $B^0 \bar{B}^0$ da cui β

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

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

- 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 $|V_{ub}|$

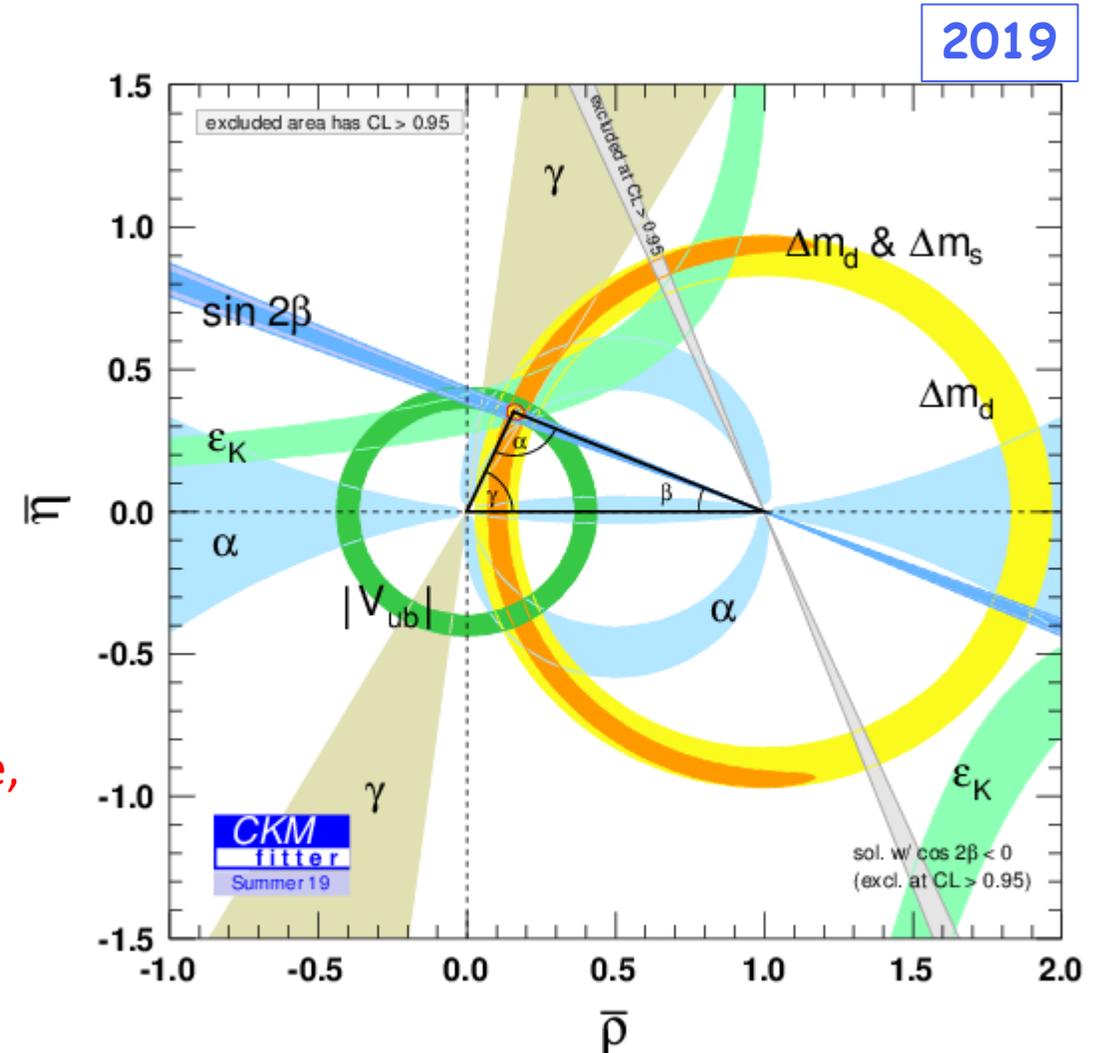
Fase del mixing $B^0 \bar{B}^0$ da cui β

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

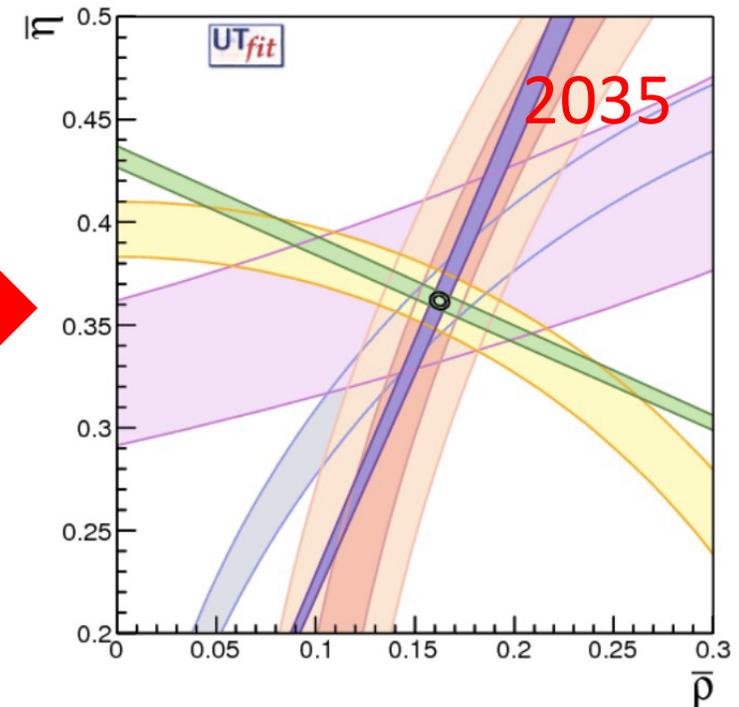
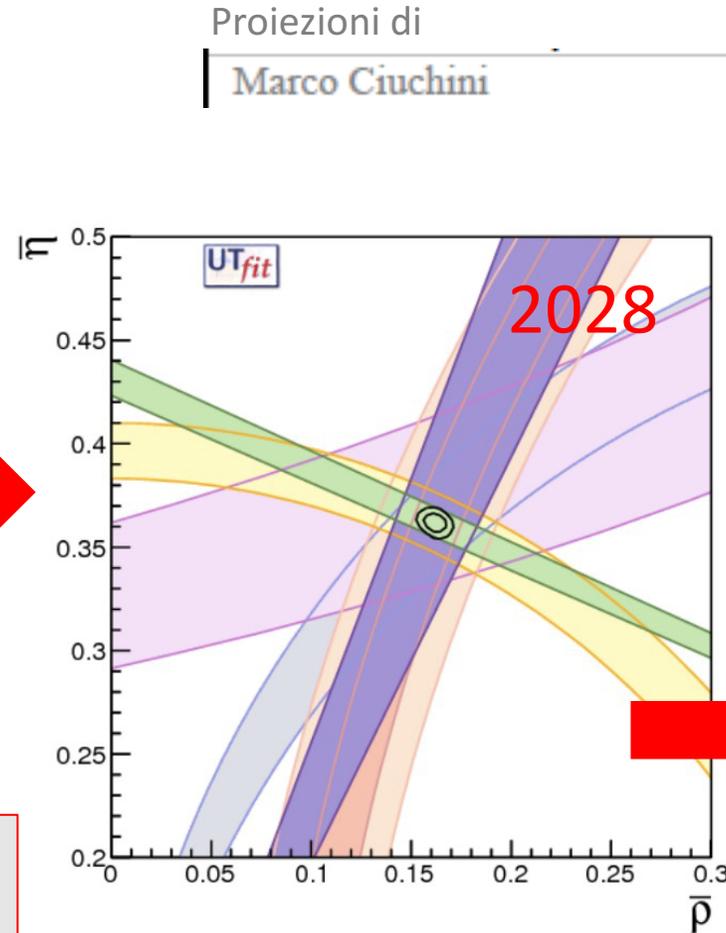
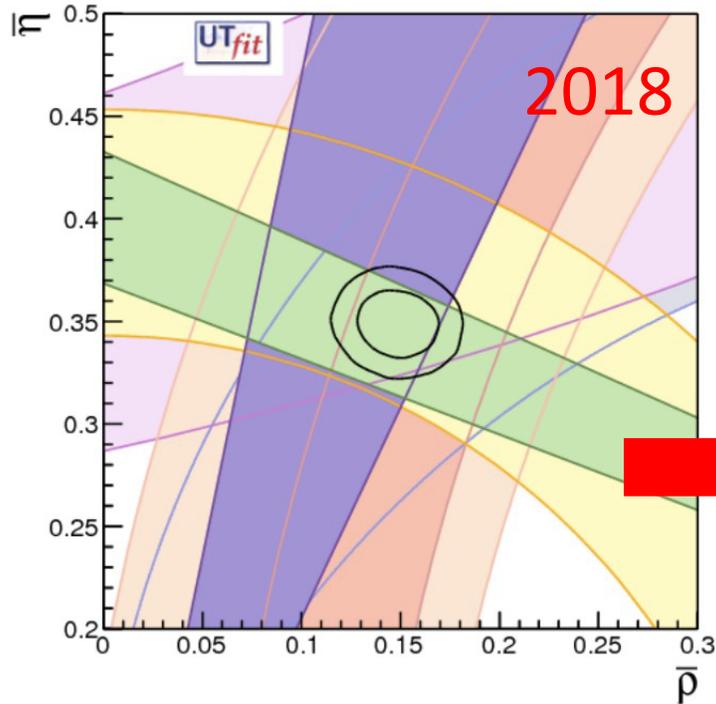
Rateo dei decadimenti $B \rightarrow DK$ da cui γ

- **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



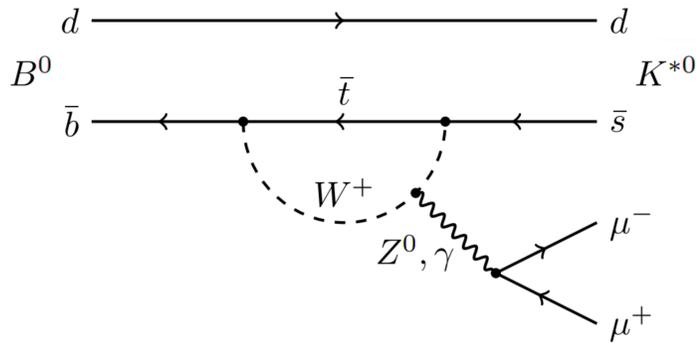
Possibile evoluzione negli anni futuri



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.
- Permissa 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.

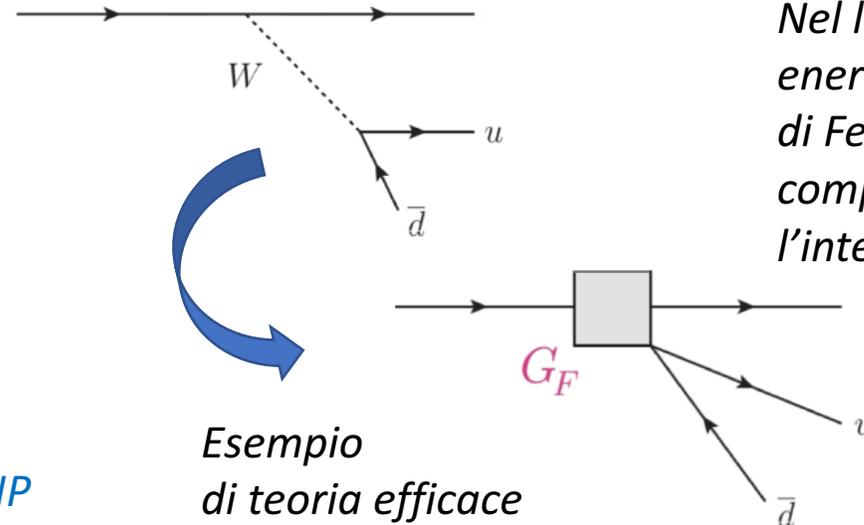
- EFT- teoria di campo efficace:

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

Operatori locali, descrivono la QCD non-perturbativa

Coefficienti di Wilson

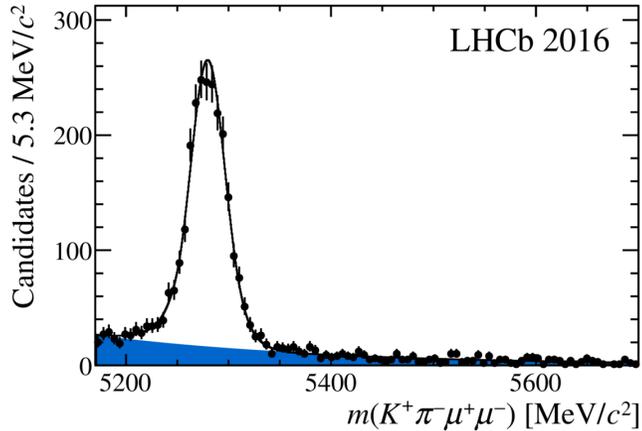
contengono l'informazione sul modello di NP



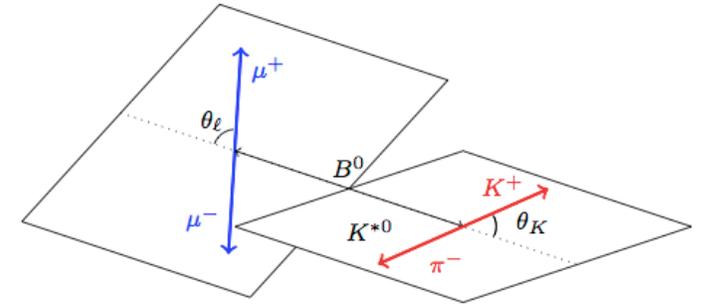
Nel limite di bassa energia la costante di Fermi descrive completamente l'interazione

Esempio di teoria efficace

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

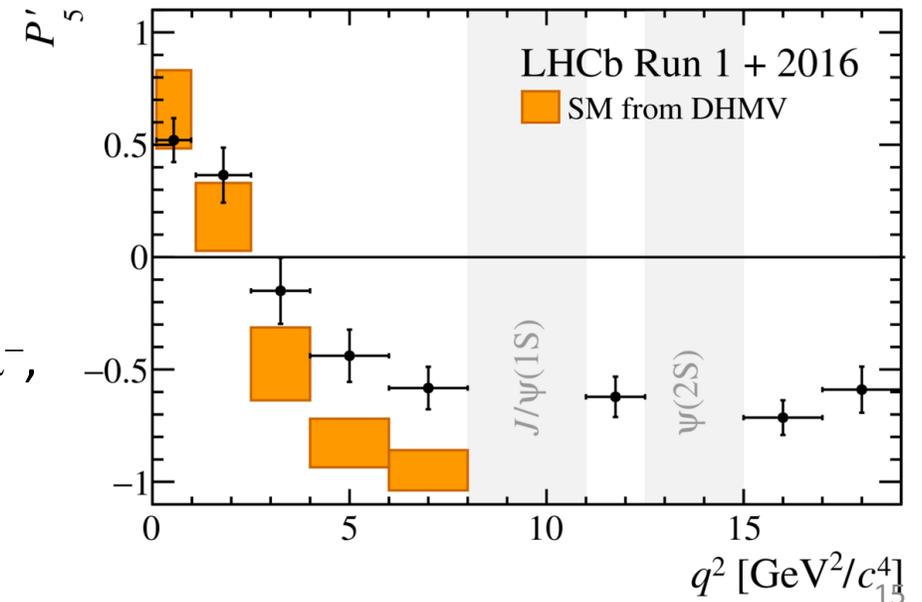


- $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$, $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$
- Dati Run1 + 2016 (4.7 fb⁻¹)



- 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 $6.0 < q^2 < 8.0$ GeV²/c⁴ bins la tensione con il MS è di 2.5 e 2.9σ.
- 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/>