



**University of
Zurich^{UZH}**

Un modello di gauge a tre siti per **anomalie** e gerarchie **di sapore**

Claudia Cornella
Università di Zurigo

IFAE 2018

Basato su **1712.01368** e sul lavoro attualmente in corso
In collaborazione con M.Bordone, J.Fuentes Martín e G.Isidori

Stato attuale delle anomalie di sapore

Dati recenti sui decadimenti semileptonici del mesone B mostrano **indicazioni convincenti di violazione dell'universalità del sapore leptonic**:

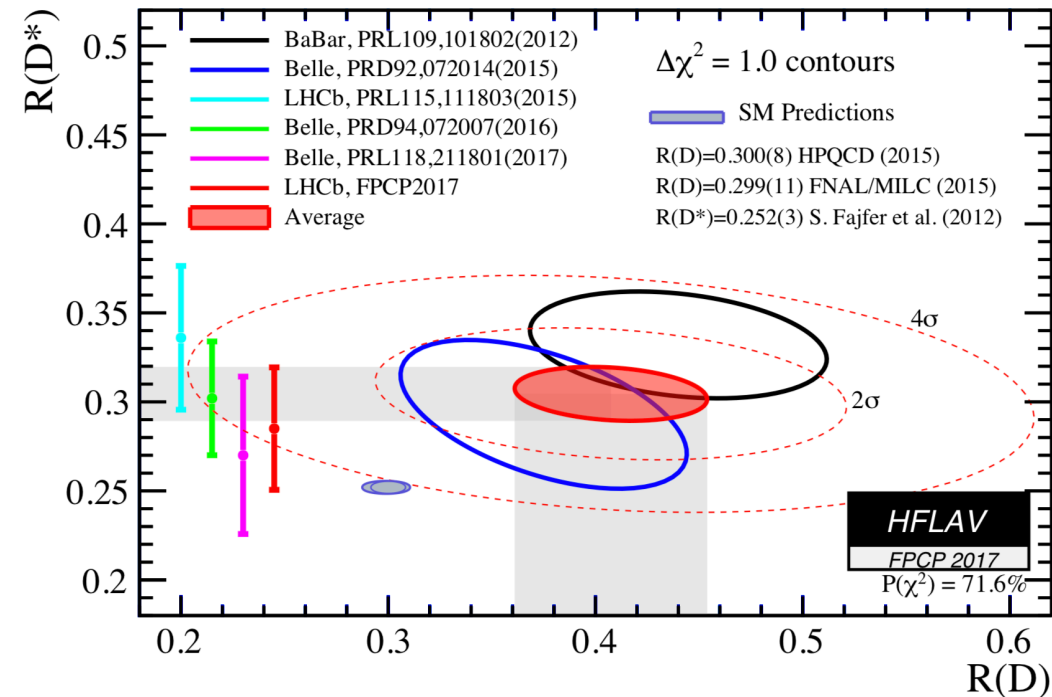
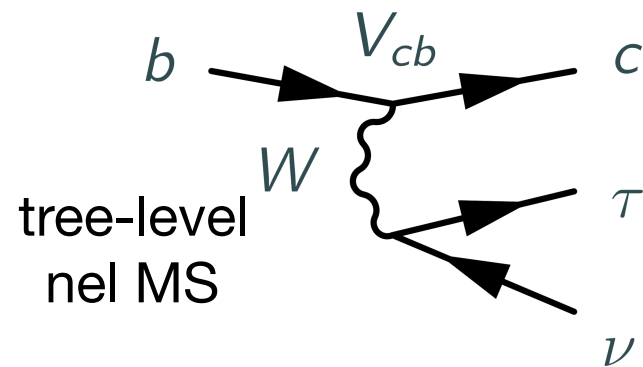
- violazione dell'universalità $\tau/\mu, e$ in transizioni $b \rightarrow c$ (corrente carica)
- violazione dell'universalità μ/e in transizioni $b \rightarrow s$ (corrente neutra)

Stato attuale delle anomalie di sapore

Dati recenti sui decadimenti semileptonici del mesone B mostrano **indicazioni convincenti di violazione dell'universalità del sapore leptónico**:

- violazione dell'universalità $\tau/\mu, e$ in transizioni $b \rightarrow c$ (corrente carica)
- violazione dell'universalità μ/e in transizioni $b \rightarrow s$ (corrente neutra)

$$R_{D^{(*)}} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu)}$$



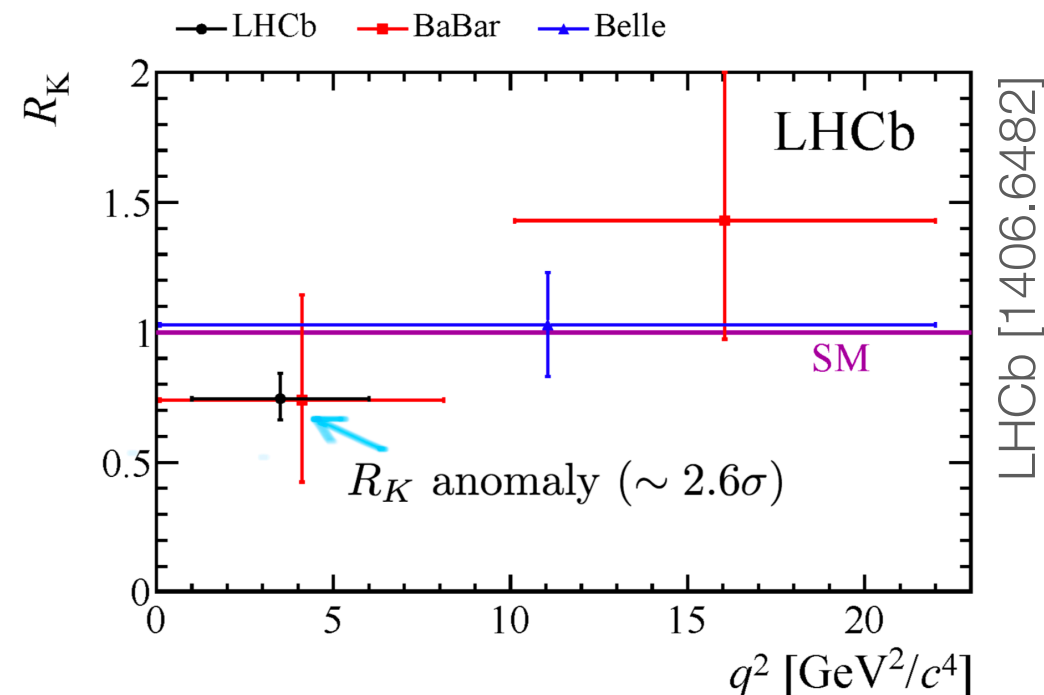
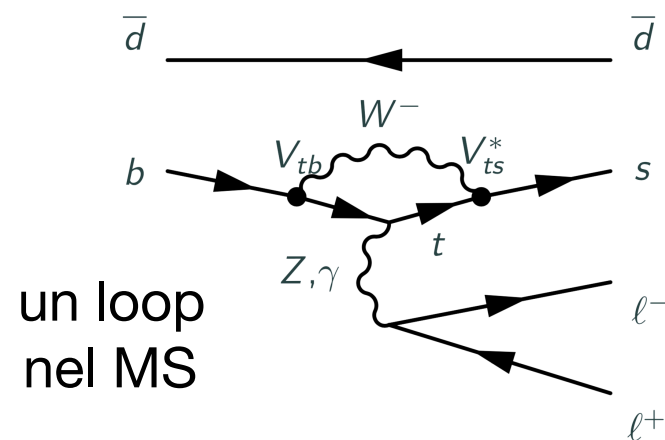
- Predizione teorica *pulita* (cancellazione dei fattori di forma adronici nel rapporto)
- Dati coerenti da 3 distinti esperimenti; la misura combinata di R_D e R_{D^*} presenta un **eccesso di $\sim 4\sigma$ rispetto al MS**

Stato attuale delle anomalie di sapore

Dati recenti sui decadimenti semileptonici del mesone B mostrano **indicazioni convincenti di violazione dell'universalità del sapore leptónico**:

- violazione dell'universalità $\tau/\mu, e$ in transizioni $b \rightarrow c$ (corrente carica)
- violazione dell'universalità μ/e in transizioni $b \rightarrow s$ (corrente neutra)

$$R_{K^{(*)}} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-)}$$



- Predizione teorica molto precisa: $R_{K^{(*)}}^{SM} = 1.00 \pm 0.01$ nel $q^2 \in [1, 6] \text{ GeV}^2$
Bordone et al. [1605.07633]
- Discrepanze di **$\sim 2.1-2.6 \sigma$** in R_K e R_{K^*}
- $\sim 3.4 \sigma$ in P'_5 , ulteriori tensioni in $\mathcal{B}(B_s \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-)$, $\mathcal{B}(B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-)$

Alla ricerca di una spiegazione simultanea

Se considerate nel loro insieme, le anomalie di sapore sono un insieme significativo coerente di deviazioni dal MS...

→ vale la pena di cercare una **spiegazione simultanea** in termini di Nuova Fisica!

Sfide:

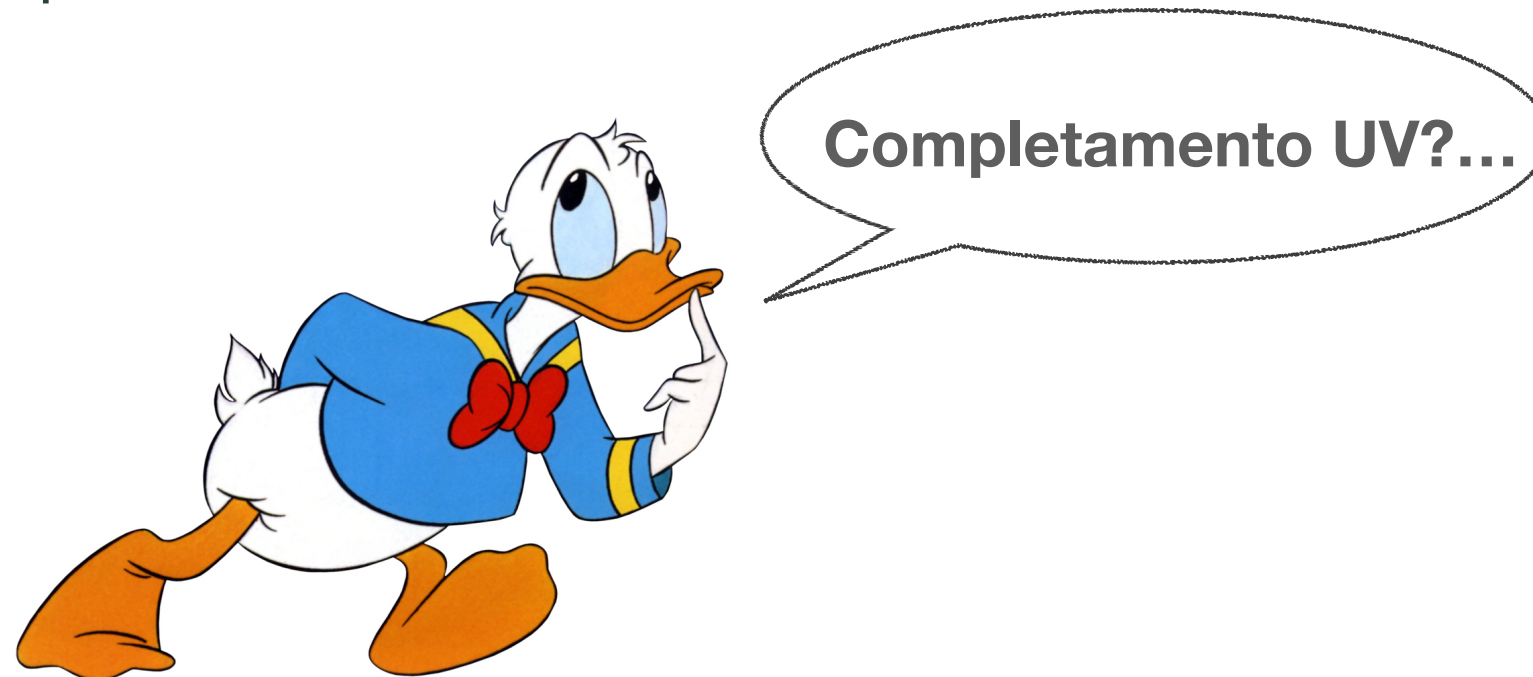
- La nuova fisica deve avere una **struttura di sapore non generica**:

$$\begin{array}{ccc} \text{nuova} & \begin{array}{c} \textcircled{b \rightarrow sll} \\ 3_Q \rightarrow 2_Q 2_L 2_L \\ \sim 25\% \text{ di un loop nel MS} \end{array} & \ll & \begin{array}{c} \textcircled{b \rightarrow c\tau\nu} \\ 3_Q \rightarrow 2_Q 3_L 3_L \\ \sim 20\% \text{ di un effetto tree-level nel MS} \end{array} \\ \text{fisica:} & & & \end{array}$$

Ipotesi tipica: nuova fisica accoppiata prevalentemente alla terza generazione [e.g. U(2)]

- Possibile **connessione alle gerarchie di sapore**: l'unica fonte di violazione dell'universalità del sapore leptonico nel MS, gli Yukawa, segue un andamento simile: $y_e \ll y_\mu \ll y_\tau \dots$ c'è una connessione?

- La *Zurich Guide* mostra che è possibile descrivere le anomalie del mesone B e le gerarchie di sapore in modo consistente all'interno di una **teoria effettiva**, rispettando tutti i vincoli fenomenologici senza fine tuning.
 - la *Guida* rappresenta una potente **dimostrazione concettuale** della possibilità di spiegare simultaneamente anomalie e gerarchie di sapore!
- L'applicazione dell'analisi effettiva a modelli dinamici con un unico mediatore identifica nel leptoquark vettore $U_\mu(3, 1)_{2/3} (\sim \text{TeV})$ il candidato più promettente.



Completamento UV per un leptoquark vettore

Se interpretiamo il LQ come bosone di gauge massivo di una simmetria di gauge spontaneamente rotta, viene naturale cercare un completamento UV in variazioni del gruppo di gauge di **Pati-Salam** (PS):

$$\mathbf{PS} = \mathbf{SU}(4) \times \mathbf{SU}(2)_L \times \mathbf{SU}(2)_R$$

Pati, Salam, Phys. Rev. D10 (1974) 275

$$\Psi_{L,R} = \begin{bmatrix} Q_{L,R}^\alpha \\ Q_{L,R}^\beta \\ Q_{L,R}^\gamma \\ L_{L,R} \end{bmatrix}$$

“quarto colore”

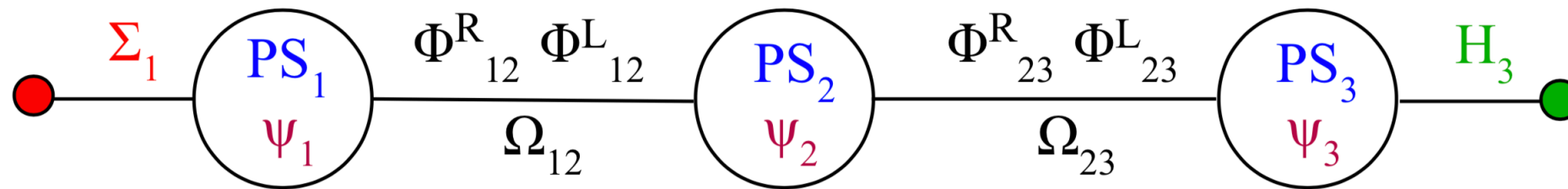
- ✓ SU(4) è la scelta minimale per ottenere un LQ vettore con i corretti numeri quantici
- ✗ il LQ di Pati-Salam **non distingue i sapori** → per rispettare i vincoli da processi che coinvolgono le generazioni leggere ($K_L \rightarrow \mu e$) dovrebbe giocoforza essere molto pesante, intorno ai 100 TeV.

Pati-Salam “minimale” non funziona!

La nostra proposta: Pati Salam...al cubo!

Idea chiave: ad alte energie ciascuna generazione è carica rispetto a un gruppo di gauge indipendente

$$PS^3 = [SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R]^3$$



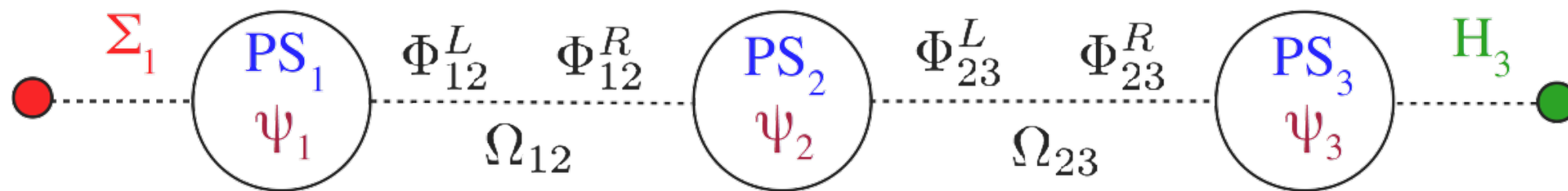
**rottura verticale alla
scala alta [$\sim 10^3$ TeV]
[$PS_1 \rightarrow SM_1$]**

← campi di link →
 $\Omega_{ij}, \Phi_{ij}^{L,R}$

**rottura verticale alla
scala bassa [EWSB]
[$SM_3 \rightarrow QED_3$]**

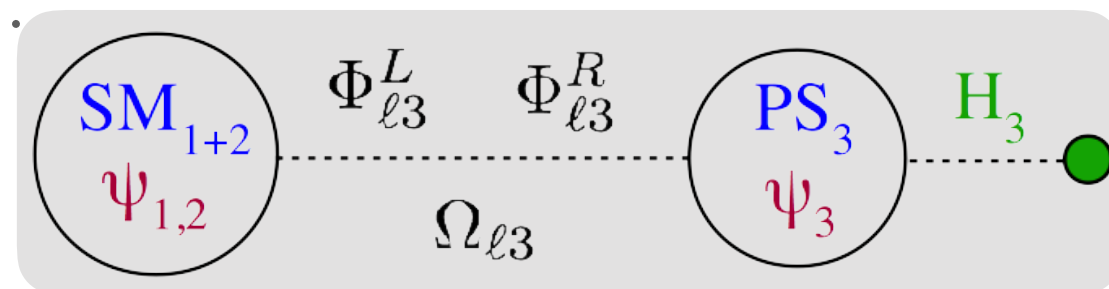
La rottura al MS diagonale è ottenuta mediante opportuni **campi scalari** con valore di aspettazione non nullo, responsabili anche delle gerarchie di sapore.

Rottura spontanea di PS^3 e accoppiamenti di Yukawa



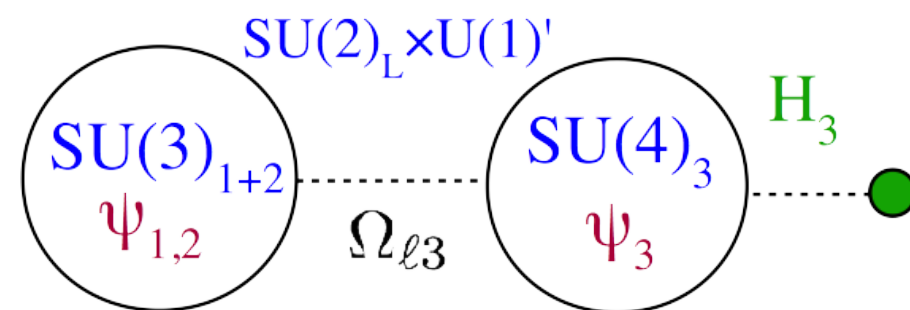
Al di sotto di ~ 1000 TeV

simmetria di sapore accidentale $U(2)^5$
 (= Yukawa solo per la 3^a famiglia)



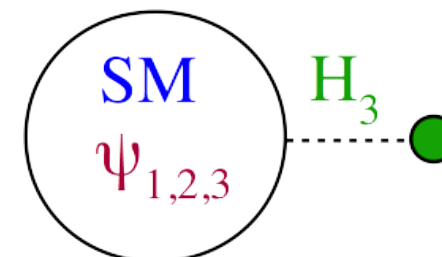
Sotto ~ 100 TeV, $U(2)^5$ è rotto
 lievemente da operatori con $d > 4$

→ **Yukawa per le generazioni leggere**
 e **altri (piccoli) termini di rottura**



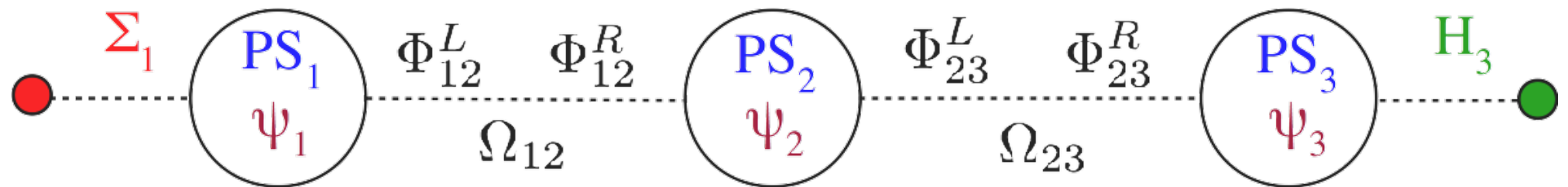
$$Y_f = \begin{bmatrix} \Delta & V \\ 0 & y_3 \end{bmatrix}$$

$\frac{\langle \Phi_{l3}^L \rangle \langle \Phi_{3l}^R \rangle}{\Lambda_{23}^2}$
 $\frac{\langle \Omega_{l3} \rangle}{\Lambda_{23}}$



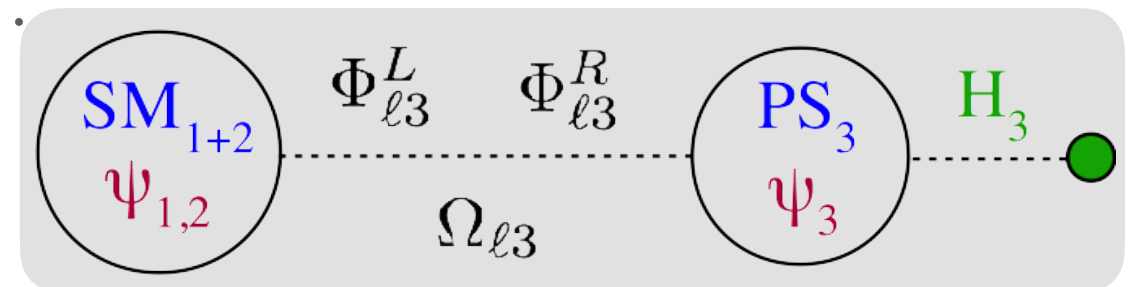
Ottima descrizione degli accoppiamenti di Yukawa del MS!

Rottura spontanea di PS^3 e accoppiamenti di Yukawa



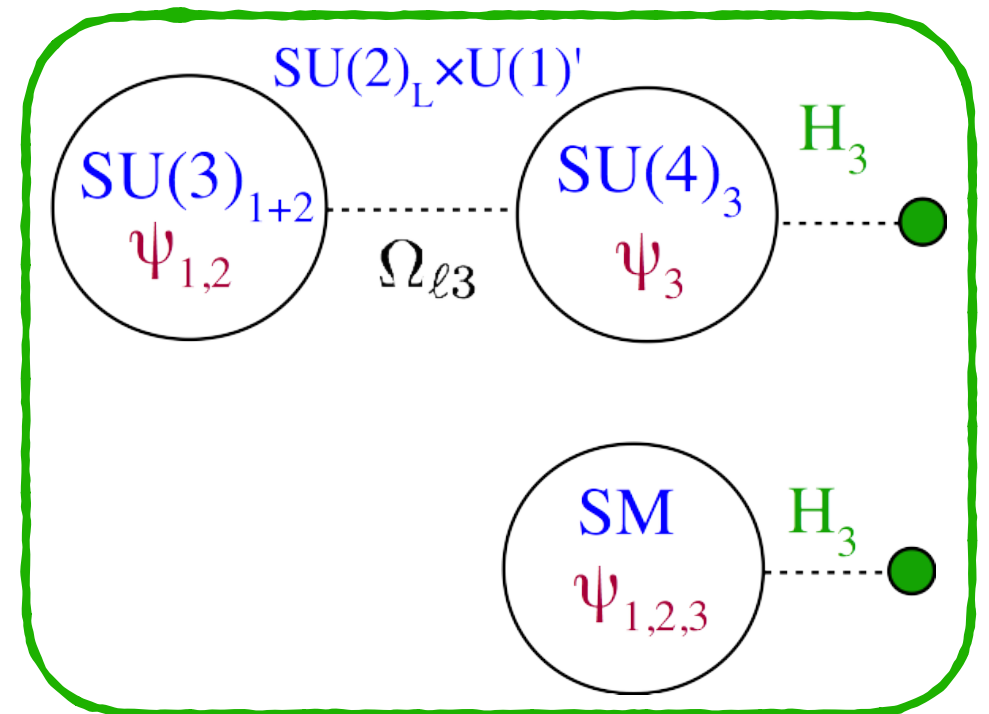
Al di sotto di ~ 1000 TeV

simmetria di sapore accidentale $U(2)^5$
 (= Yukawa solo per la 3^a famiglia)



Sotto ~ 100 TeV, $U(2)^5$ è rotto
 lievemente da operatori con $d > 4$

→ **Yukawa per le generazioni leggere**
 e **altri (piccoli) termini di rottura**



$$Y_f = \begin{bmatrix} \Delta & V \\ 0 & y_3 \end{bmatrix} \begin{matrix} \frac{\langle \Phi_{l3}^L \rangle \langle \Phi_{3l}^R \rangle}{\Lambda_{23}^2} \\ \frac{\langle \Omega_{l3} \rangle}{\Lambda_{23}} \end{matrix}$$

Ottima descrizione degli accoppiamenti di Yukawa del MS!

$$\begin{array}{c}
 \text{SU}(4)_3 \times \text{SU}(3)_{1+2} \times \text{SU}(2)_L \times \text{U}(1)' \\
 \Psi_3 \quad \quad \Psi_{1,2} \\
 \downarrow \\
 \langle \Omega_{\ell 3} \rangle \\
 \downarrow \\
 \text{SM} + \text{LQ, Z', G'} \\
 \Psi_{1,2,3} \quad \quad \sim 1-3 \text{ TeV}
 \end{array}$$

La fenomenologia dei collider e delle basse energie è determinata completamente dall'ultima rottura di simmetria.

La **struttura di sapore** degli accoppiamenti ai fermioni — prima della rotazione alla base di massa — è controllata dalla simmetria $U(2)$ e da (piccoli) termini che la violano :

$$U : g_4 \text{diag}(\epsilon'_U, \epsilon_U, 1)$$

$$G' : g_c \text{diag} \left(-\frac{g_3}{g_4}, -\frac{g_3}{g_4}, \frac{g_4}{g_3} \right)$$

$$Z' : g_c \text{diag} \left(-\frac{g_1}{g_4}, -\frac{g_1}{g_4}, \frac{g_4}{g_1} \right)$$

$$g_4 \gg g_3, g_1$$

$$\begin{array}{c}
 \text{SU}(4)_3 \times \text{SU}(3)_{1+2} \times \text{SU}(2)_L \times \text{U}(1)' \\
 \Psi_3 \quad \quad \Psi_{1,2} \\
 \downarrow \\
 \langle \Omega_{\ell 3} \rangle \\
 \downarrow \\
 \text{SM} + \boxed{\text{LQ, Z', G'}} \\
 \Psi_{1,2,3} \quad \quad \sim 1-3 \text{ TeV}
 \end{array}$$

La fenomenologia dei collider e delle basse energie è determinata completamente dall'ultima rottura di simmetria.

La **struttura di sapore** degli accoppiamenti ai fermioni — prima della rotazione alla base di massa — è controllata dalla simmetria $U(2)$ e da (piccoli) termini che la violano :

$$U : g_4 \text{diag}(\epsilon'_U, \epsilon_U, 1)$$

$$G' : g_c \text{diag} \left(-\frac{g_3}{g_4}, -\frac{g_3}{g_4}, \frac{g_4}{g_3} \right)$$

$$Z' : g_c \text{diag} \left(-\frac{g_1}{g_4}, -\frac{g_1}{g_4}, \frac{g_4}{g_1} \right)$$

$$g_4 \gg g_3, g_1$$

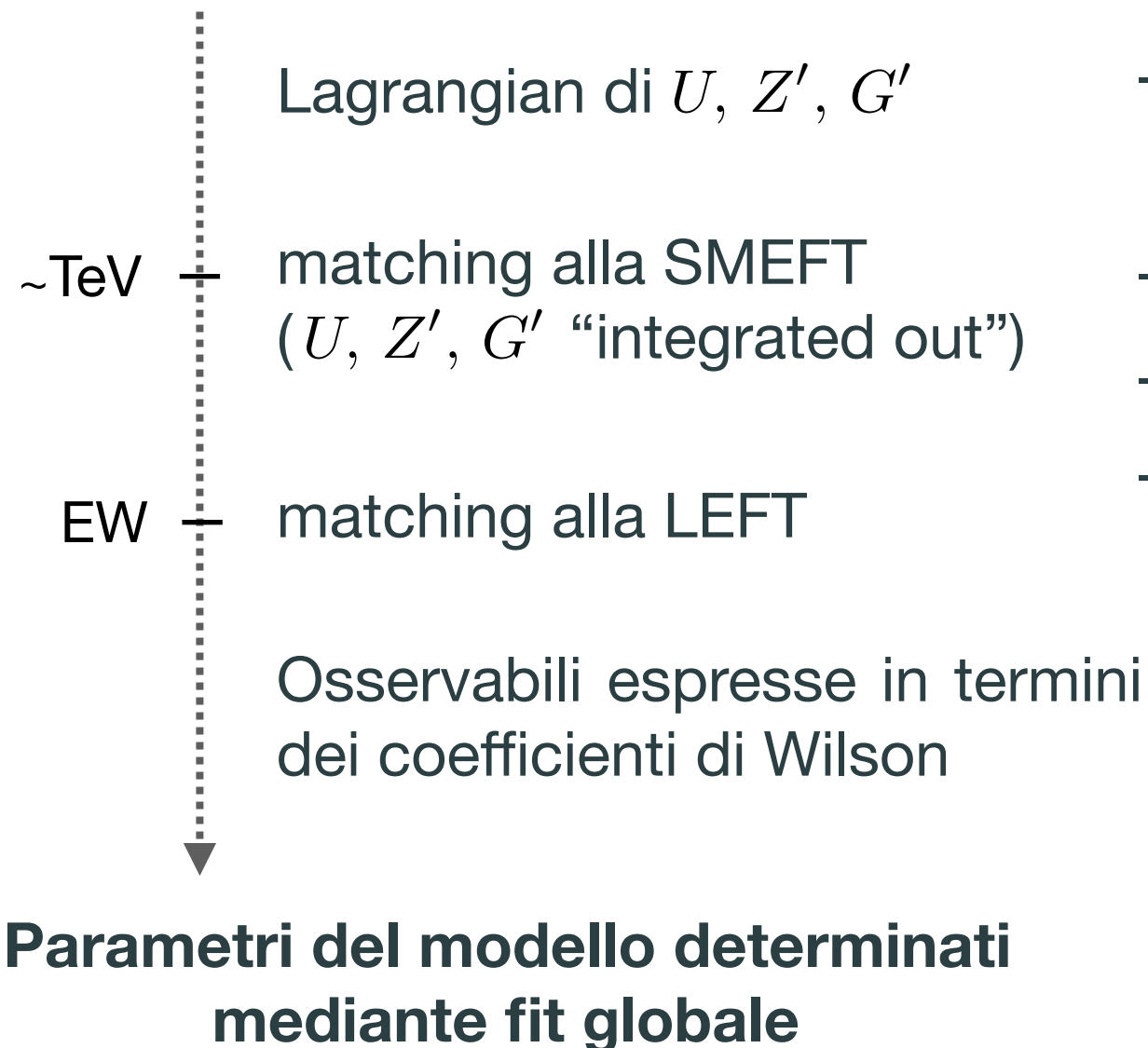
- **accoppiamenti $b_R - \tau_R$ del LQ non soppressi** [→ operatori scalari di corrente carica!]
- **Z' e G' inevitabili**, con masse vicine a quella del LQ [→ ricerche dirette a LHC!]

Fenomenologia di PS^3

Il modello deve confrontarsi con due tipi di vincoli:

- Ricerche dirette a LHC
- **Osservabili di bassa energia**

Metodo:

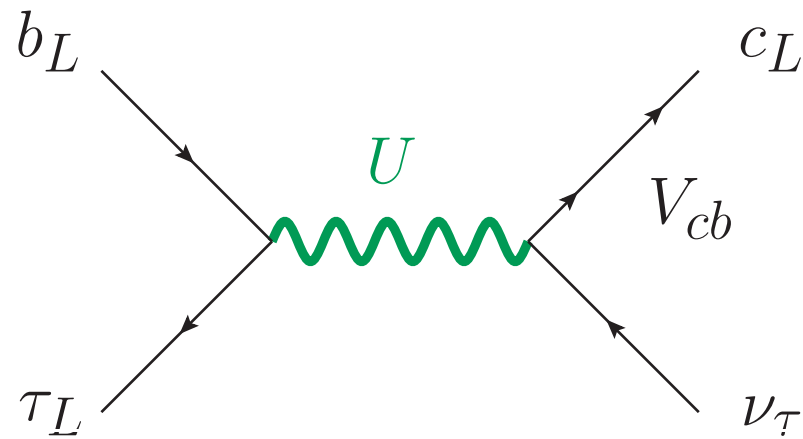


Osservabili incluse:

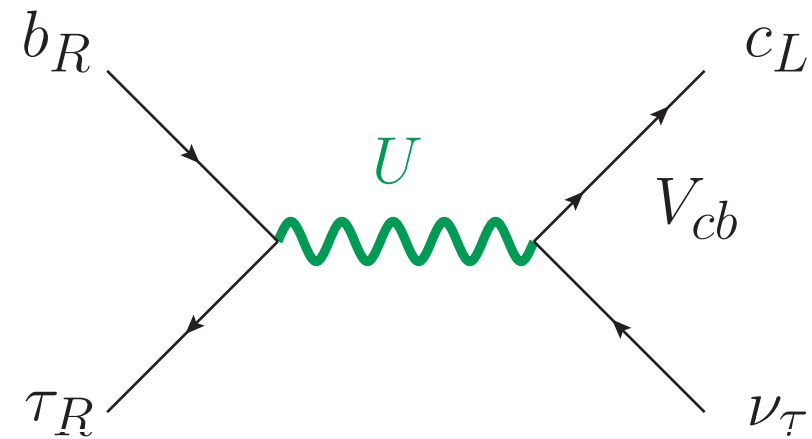
- decadimenti leptonici e semileptonici del B
 $C_9^{\mu\mu}, C_{10}^{\mu\mu}, B_s \rightarrow \mu\mu, R_D^{(*)}, B \rightarrow \tau\nu \dots$
- decadimenti del τ
- LEP
- $\Delta F = 2$



Interpretazione dell'anomalia in $b \rightarrow c\tau\nu$



$$C_{\nu edu}^{V,LL}$$



$$C_{\nu edu}^{S,RL} \star$$

Differenza chiave rispetto alle soluzioni standard!

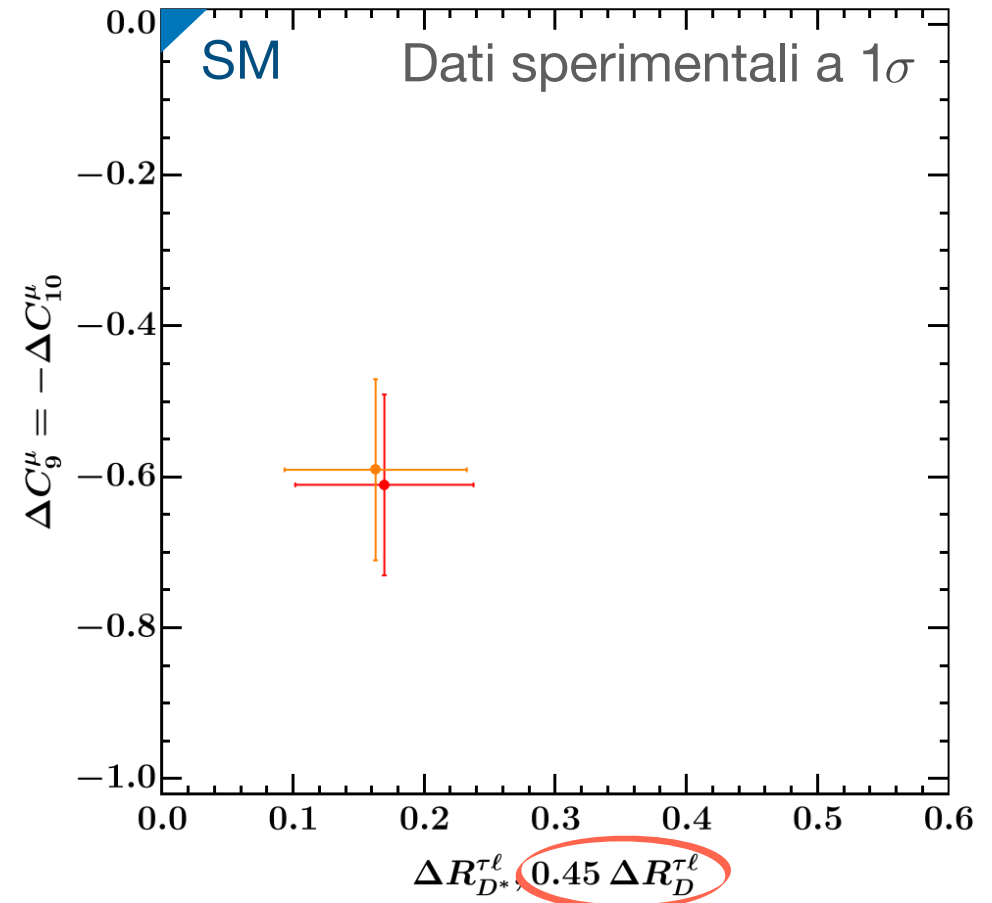
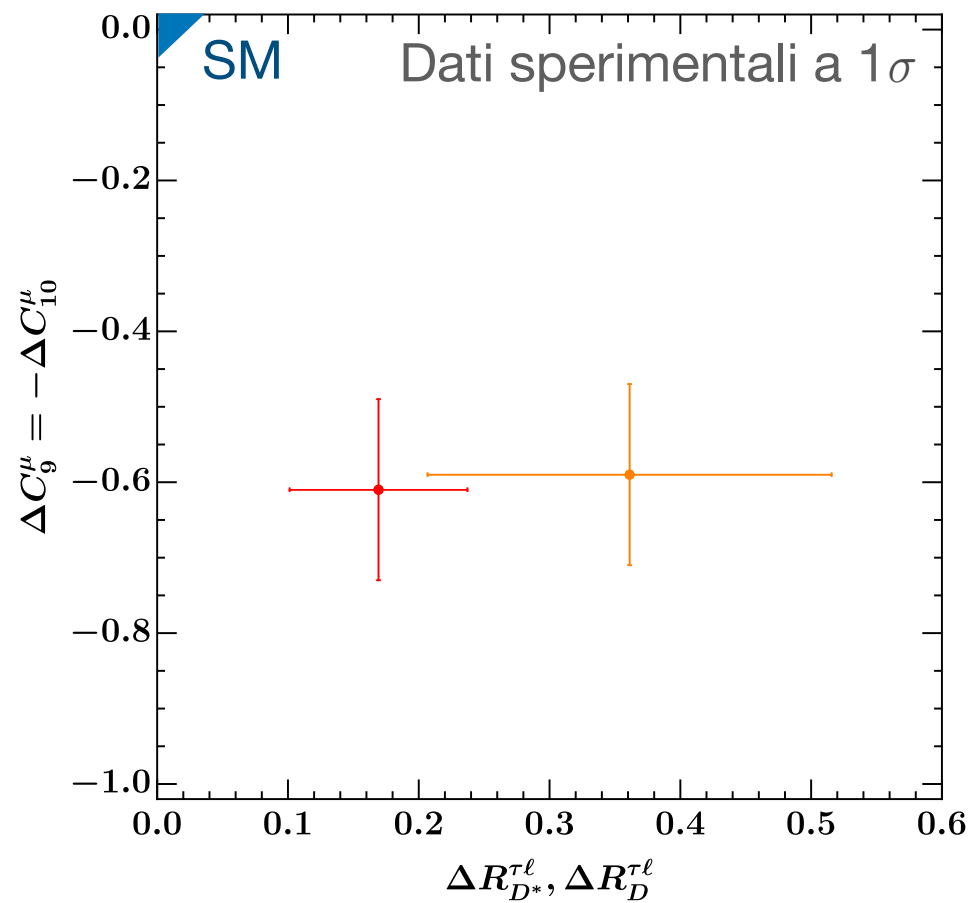
$$\Delta R_{D^*} = R_{D^*} / R_{D^*}^{\text{SM}} - 1 \approx 2(1 + 0.12) C_U$$

$$\Delta R_D = R_D / R_D^{\text{SM}} - 1 \approx 2(1 + 1.5) C_U$$

$$C_U = \frac{g_U^2 v^2}{4M_U^2}$$

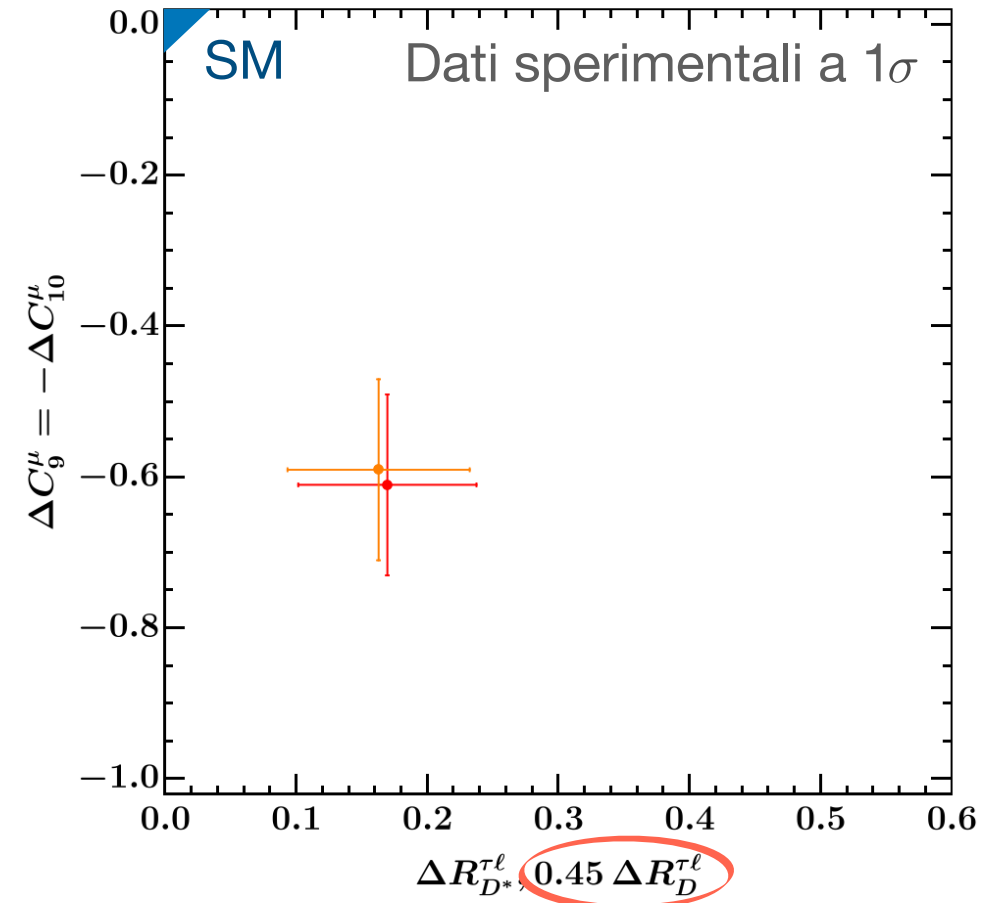
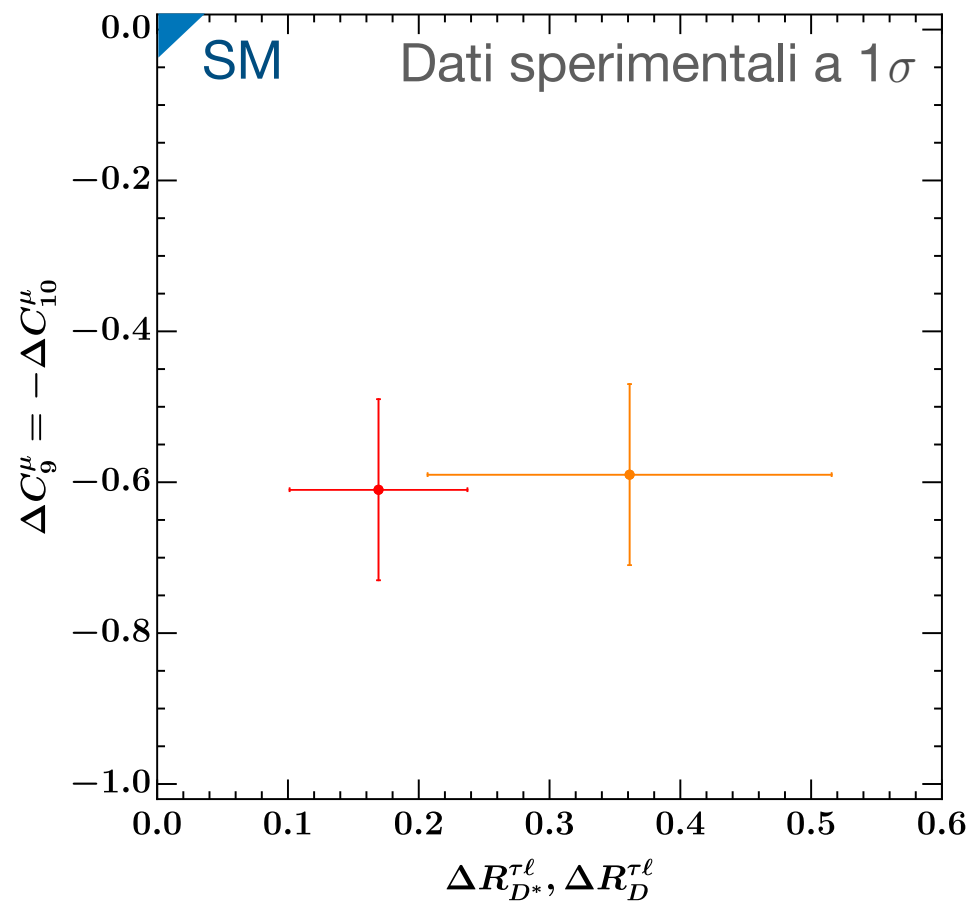
Contributi degli operatori **vettoriale/scalare** in **verde/blu**

Interpretazione dell'anomalia in $b \rightarrow c\tau\nu$



$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{D^*} &= R_{D^*}/R_{D^*}^{\text{SM}} - 1 \approx 2(1 + 0.12)C_U \\ \Delta R_D &= R_D/R_D^{\text{SM}} - 1 \approx 2(1 + 1.5)C_U \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{\frac{\Delta R_{D^*}}{\Delta R_D} \simeq 0.45} \star$$

Interpretazione dell'anomalia in $b \rightarrow c\tau\nu$



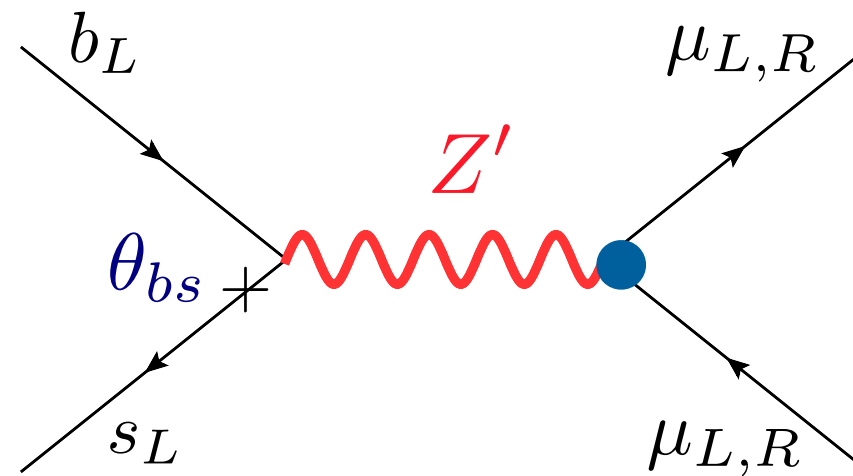
$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{D^*} &= R_{D^*}/R_{D^*}^{\text{SM}} - 1 \approx 2(1 + 0.12)C_U \\ \Delta R_D &= R_D/R_D^{\text{SM}} - 1 \approx 2(1 + 1.5)C_U \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta R_{D^*}}{\Delta R_D} \simeq 0.45 \star$$

Incremento fino a $\mathcal{O}(50\%) \times \text{SM}$ in $B \rightarrow \tau\nu$ \star

[Compatibili con i dati attuali (in attesa di Belle II)]

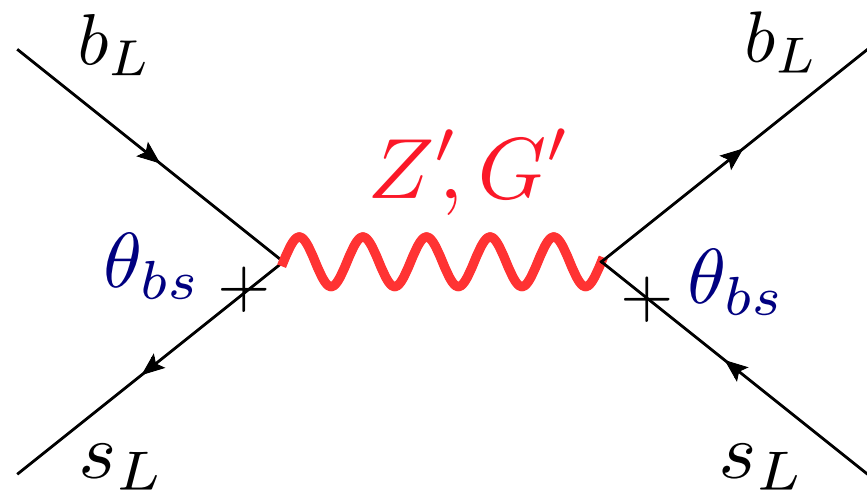
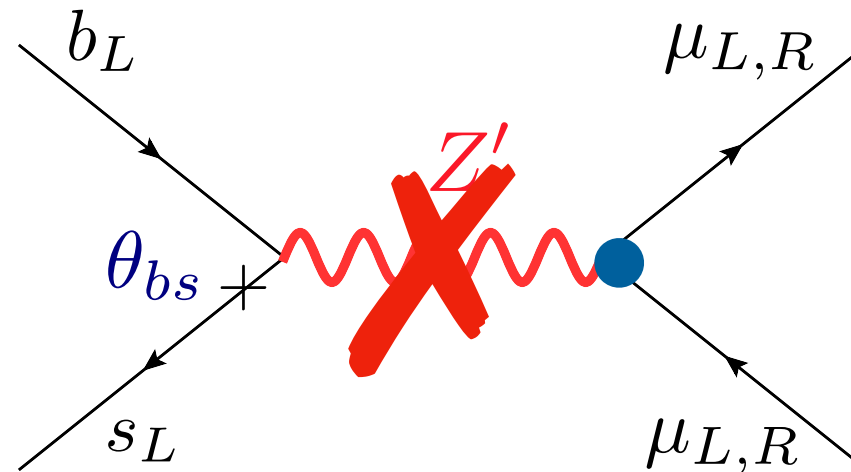
Interpretazione dell'anomalia in $b \rightarrow sll$

Verrebbe immediato pensare alla Z' ...



Interpretazione dell'anomalia in $b \rightarrow sll$

Verrebbe immediato pensare alla Z' ...



....e invece no!

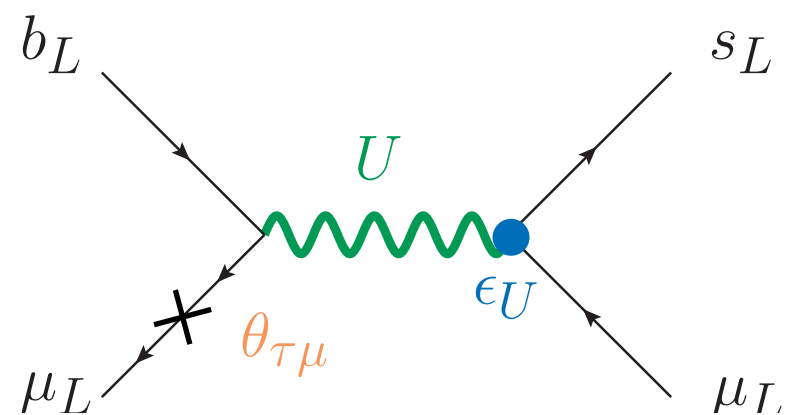
I vincoli provenienti dalle **oscillazioni del B** impongono **allineamento nel settore down**

$$|\theta_{bs}| \lesssim 0.1 |V_{ts}|$$

Interpretazione dell'anomalia in $b \rightarrow s\ell\ell$

Il contributo dominante alle transizioni $b \rightarrow s\ell\ell$ è mediato dal **leptoquark**:

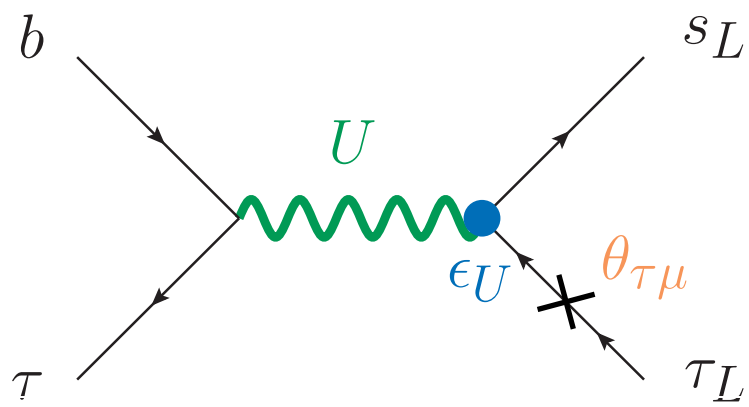
$b \rightarrow s\mu\mu$
(R_K, R_{K^*})



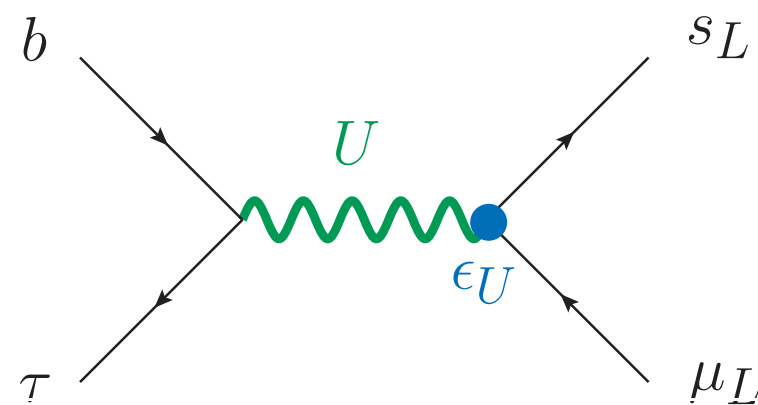
Altra differenza chiave rispetto ad altre soluzioni:

$$b \rightarrow s\tau\tau \sim b \rightarrow s\mu\mu$$

$$b \rightarrow s\tau\mu \sim \mathcal{O}(5) \times b \rightarrow s\mu\mu$$

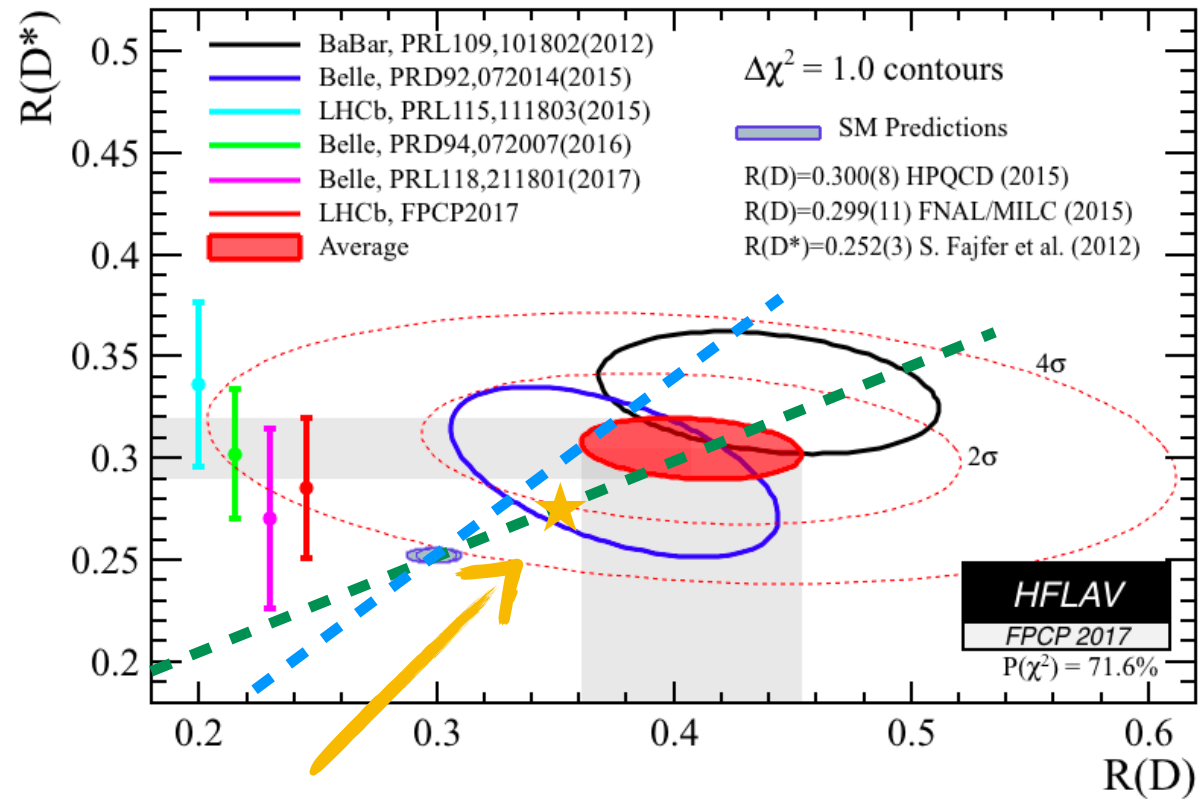


$b \rightarrow s\tau\tau$

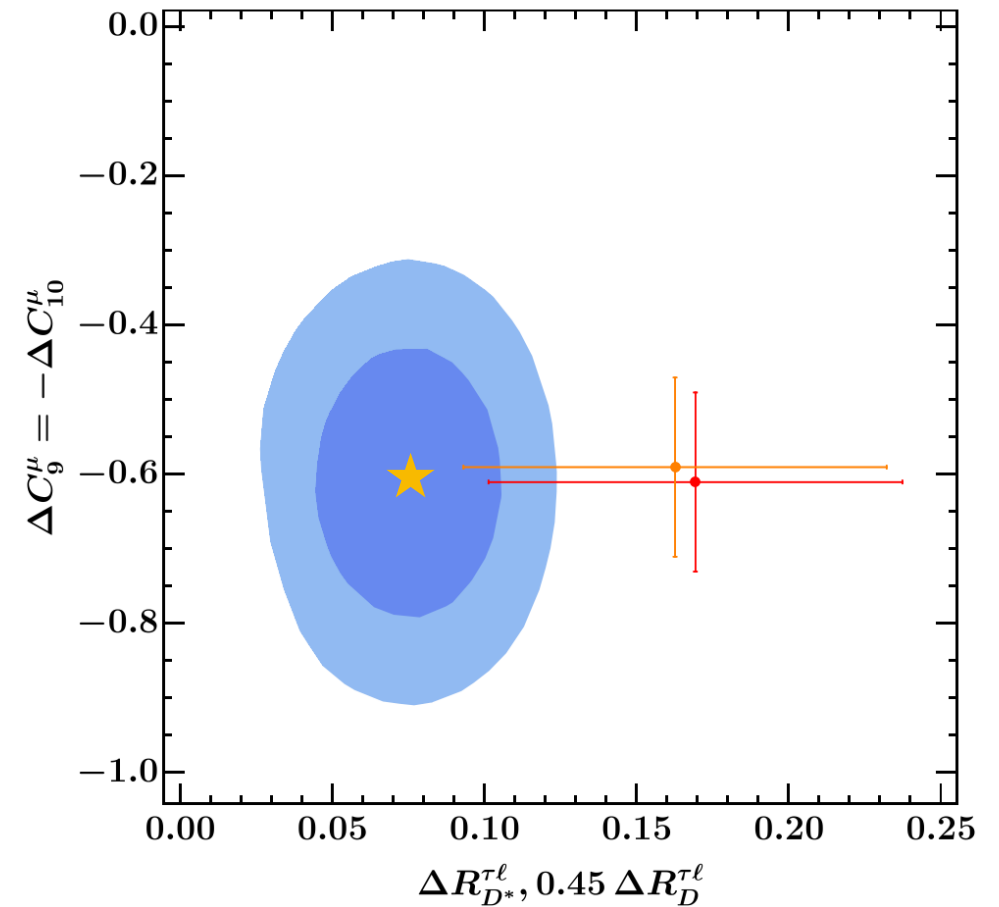


$b \rightarrow s\tau\mu$

Risultati del fit globale



Noi siamo QUI!

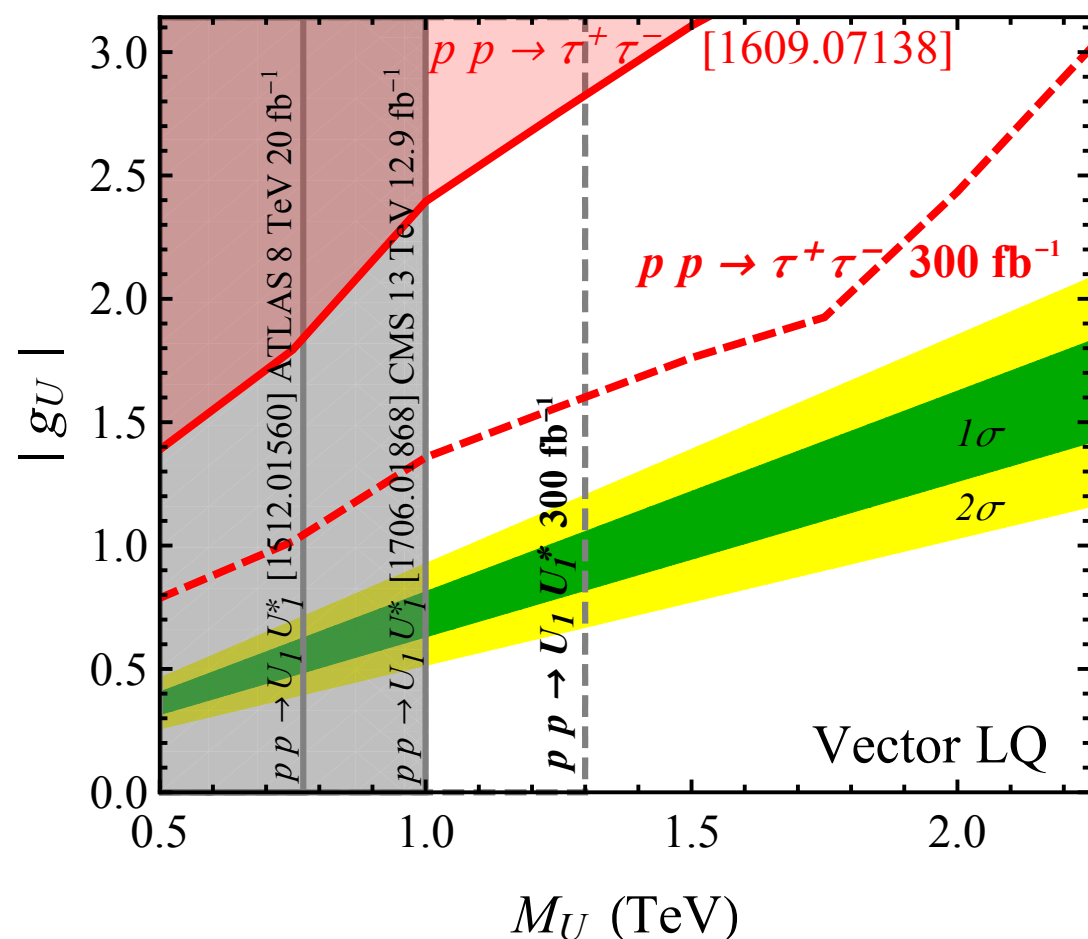


Il fit ai dati di bassa energia è molto buono!
 [anche se non riproduce il valore centrale di R_D/R_{D^*}]

Caratteristiche importanti dei nuovi bosoni massivi:

- **Accoppiamenti non universali**, prevalgono quelli con la **3^a generazione**
- **Risonanze larghe** (specialmente per G' e Z'); le ricerche svolte finora si concentrano su risonanze strette

Leptoquark



Colorone

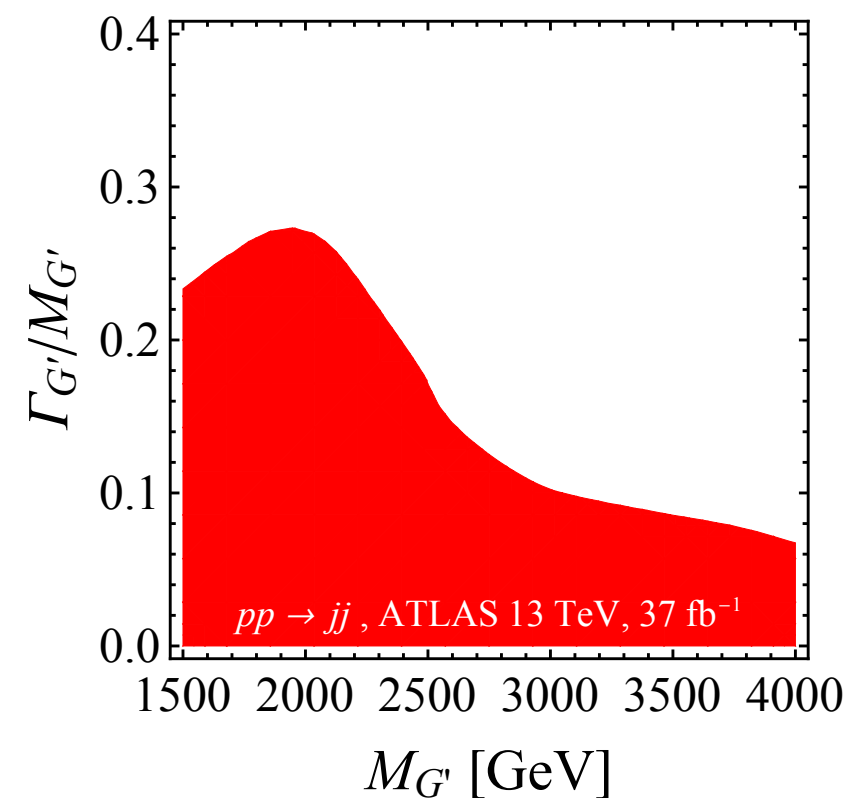


grafico per il modello model “4321” in [1708.08450]
(Conclusioni simili per PS³)

[Presentato da M. Nardecchia a La Thuile 2018]

Conclusioni

È possibile trovare una spiegazione simultanea ben motivata delle anomalie di sapore, compatibile con i dati attuali a basse e ad alte energie e legata alla struttura degli accoppiamenti di Yukawa.

Pati-Salam³ presenta varie caratteristiche che lo differenziano da altre soluzioni, e ha di conseguenza segnature molto peculiari:

Ruolo chiave dell' **operatore scalare (CC)**:

★ $\Delta R_{D^*} / \Delta R_D \simeq 0.45$

★ notevole incremento in $B \rightarrow \tau \nu$ [fino a $\mathcal{O}(50\%) \times \text{SM}$]

★ stesso contributo di nuova fisica in $b \rightarrow s\tau\tau$ e $b \rightarrow s\mu\mu$, 5x in $b \rightarrow s\tau\mu$

Se le anomalie del B sono veramente segnali di nuova fisica, ci aspettiamo che nuove indicazioni sperimentali (sia ad alte che a basse energie) compaiano presto in molte osservabili.

Ci attendono tempi interessanti!

