



Universität
Zürich^{UZH}

Compositezza dell'Higgs e dinamiche non universali

SEBASTIANO COVONE

UNIVERSITÄT ZÜRICH

BASATO SU 2407.10950

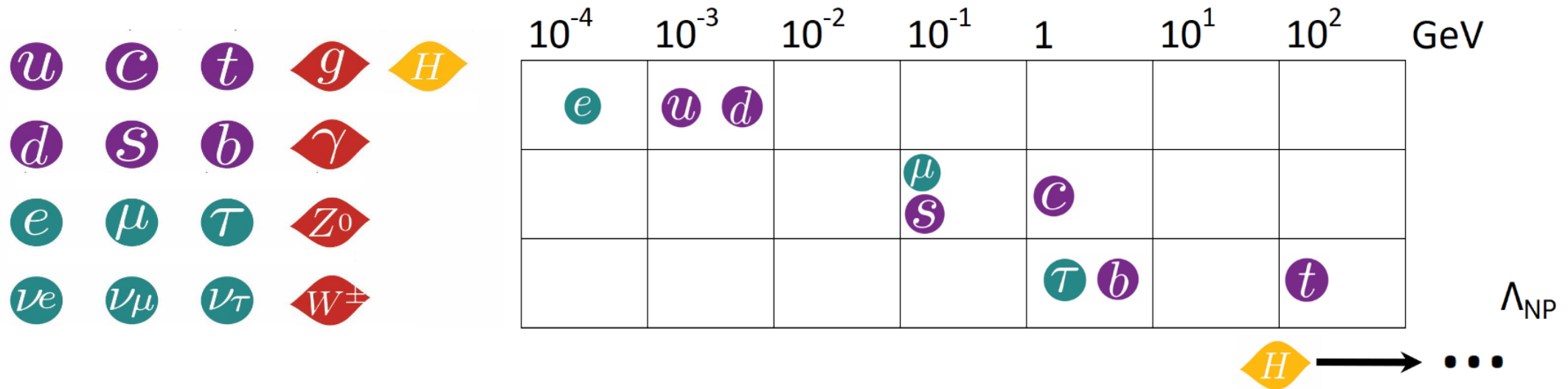
IN COLLABORAZIONE CON J. DAVIGHI, G. ISIDORI, M. PESUT

10/04/2025, CAGLIARI

Outline

- Perchè cercare fisica oltre il Modello Standard (MS)
- Interazioni non flavour-universali e compositezza del bosone di Higgs
- Caratteristiche del modello: settore di Yukawa e potenziale dell'Higgs
- Analisi fenomenologica del modello

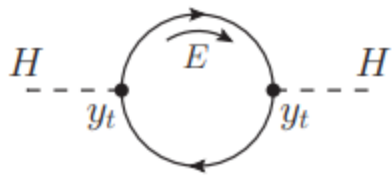
Flavour puzzle



- Struttura fortemente gerarchica nel settore Yukawa (masse e mixing dei fermioni) : Flavour Puzzle
- Possibile spiegazione dinamica con introduzione di nuova fisica (NF) ad alte energie
- Conseguenze sul "Problema della Gerarchia" del bosone di Higgs

Problema della Gerarchia

- NF pesante (scala Λ) : correzioni alla massa di Higgs molto lontane dal valore misurato;
- Fine tuning (Δ) = rapporto tra correzioni e massa osservata;
- Per $\Lambda = M_{\text{GUT}}$ si ottiene $\Delta = 10^{24}$;
- Tuning accettabile ($O(1\%)$) ottenuto per $\Lambda \sim \text{TeV}$.


$$\longrightarrow \delta_{\text{SM}} m_H^2 = \frac{3y_t^2}{8\pi^2} \Lambda_{\text{SM}}^2 \longrightarrow \Delta \geq \frac{\delta_{\text{SM}} m_H^2}{m_H^2} = \frac{3y_t^2}{8\pi^2} \left(\frac{\Lambda_{\text{SM}}}{m_H} \right)^2 \simeq \left(\frac{\Lambda_{\text{SM}}}{450 \text{ GeV}} \right)^2$$

Indizi dal Modello Standard

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}$$

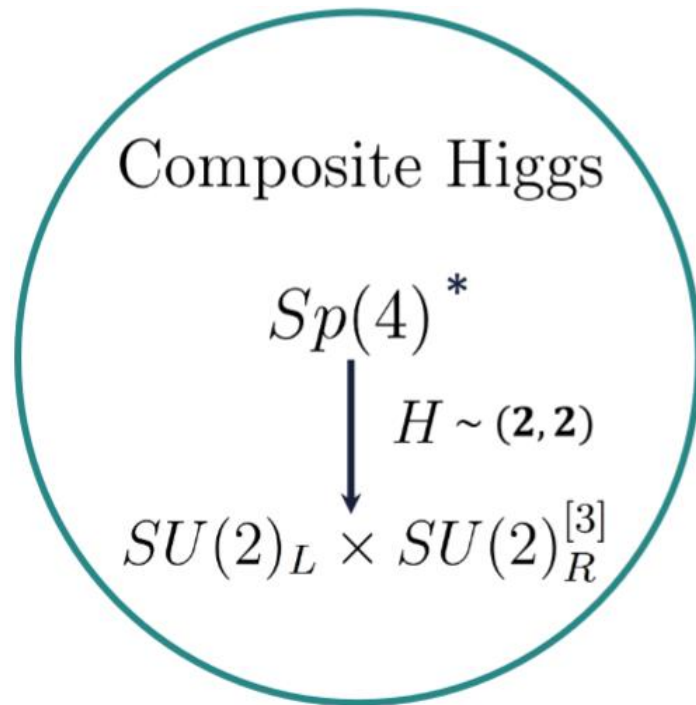
- Il settore di Gauge non distingue le tre famiglie di fermioni (flavour-universale, $U(3)^5$ simmetrico);
- Il settore di Higgs rompe questa simmetria, introducendo gerarchie tra le famiglie; $\frac{m_t}{m_u} \approx \frac{173 \text{ GeV}}{2 \text{ MeV}} \approx 10^5$
- Simmetria approssimata $U(2)^5$ per le famiglie leggere;
- Separazione marcata con la terza famiglia.

$$V_{\text{CKM}} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.004 \\ 0.2 & 1 & 0.04 \\ 0.009 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

Simmetria approssimata $U(2)^5$
FCNC piccole tra famiglie leggere e pesanti

Forse il MS è flavour-universale
solo a basse energie!

Dinamiche non universali e Higgs composito



Dinamiche non universali + Higgs composito



Gerarchia Yukawa + m_H stabile

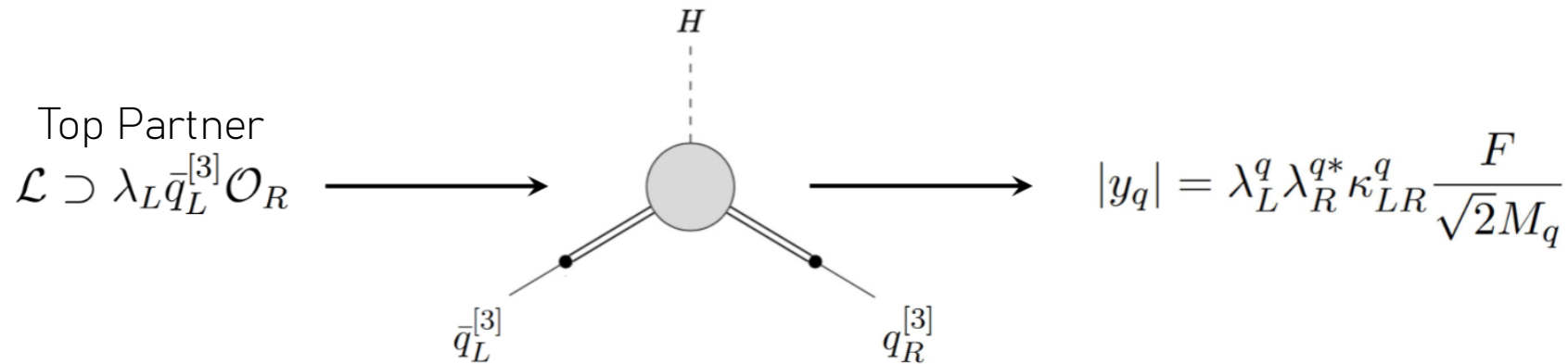
- ➡ Higgs : pNGB dalla rottura di $Sp(4)$ globale.
- ➡ Simmetria di traslazione: massa assente a LO.
Potenziale generato a 1-loop.
- ➡ Protezione della massa di Higgs da correzioni ad alta energia.

Breaking pattern

Dinamiche
non perturbative

$$\begin{array}{c}
 SU(3)_c \times Sp(4) \times U(1)_{B-L}^{[3]} \times U(1)_Y^{[12]} \\
 \swarrow \quad \searrow \quad \downarrow \Lambda_{\text{HC}} \quad H \sim (2, 2) \\
 SU(3)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R^{[3]} \times U(1)_{B-L}^{[3]} \times U(1)_Y^{[12]}
 \end{array}$$

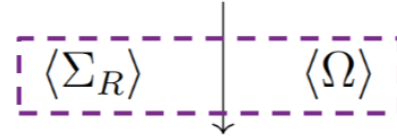
Compositezza parziale: mixing 3^a generazione con settore composito.



Breaking pattern

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R^{[3]} \times U(1)_{B-L}^{[3]} \times U(1)_Y^{[12]}$$

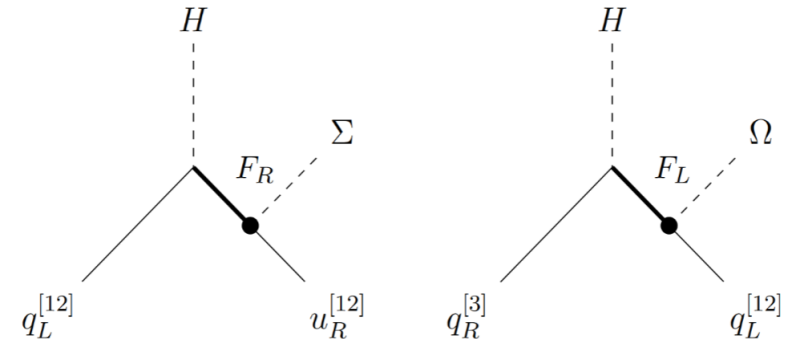
Breaking
orizzontale



$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$$\left(\begin{array}{l} SU(2)_R^{[3]} \times U(1)_{T_R^3}^{[12]} \xrightarrow{\langle \Sigma \rangle} U(1)_{T_R^{[3]}} \\ U(1)_{B-L}^{[3]} \times U(1)_{B-L}^{[12]} \xrightarrow{\langle \Omega \rangle} U(1)_{B-L} \end{array} \right) \xrightarrow[\epsilon_\Omega = \frac{\langle \Omega \rangle}{M_F}]{\epsilon_R = \frac{\langle \Sigma \rangle}{M_F}} Y_{u,d,e} \sim \begin{pmatrix} \overset{U(2)^5}{\boxed{\epsilon_R}} & \epsilon_\Omega \\ \epsilon_R \epsilon_\Omega & 1 \end{pmatrix}$$

- VEV di scalari elementari generano breaking a G_{SM} a basse energie;
- Accoppiamenti di Yukawa generati effettivamente tramite inserzione di fermioni pesanti (100 TeV).



Settore di Yukawa

- Per riprodurre le matrici di Yukawa osservate è sufficiente regolare il rapporto tra scala di decostruzione e massa dei fermioni pesanti

$$\epsilon_R = \frac{\langle \Sigma \rangle}{M_F} \quad \epsilon_\Omega = \frac{\langle \Omega \rangle}{M_F}$$

- I requisiti sul tuning del potenziale di Higgs fissano la scala della non-universalità di flavour

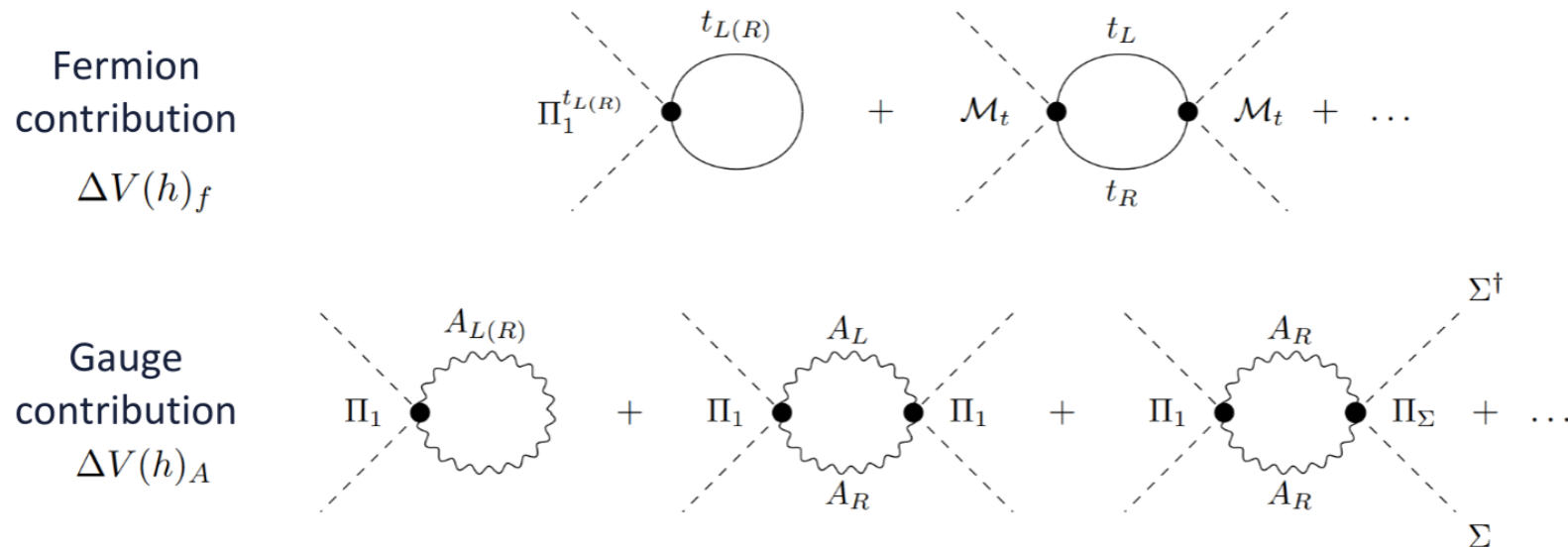
$$Y_{u,d,e} \sim \overset{U(2)^5}{\begin{pmatrix} \boxed{\epsilon_R} & \epsilon_\Omega \\ \epsilon_R \epsilon_\Omega & 1 \end{pmatrix}}$$

$$\epsilon_\Omega = O(|V_{cb}|) = O(10^{-1})$$

$$\epsilon_R = O(m_c/m_t) = O(10^{-2})$$

Potenziale di Higgs

- Rottura esplicita di $Sp(4)$ da interazioni di Gauge e mixing col settore composito;
- Potenziale generato radiativamente (Coleman – Weinberg);
- Il vev di Σ induce cambiamenti sul tuning.



Potenziale di Higgs

- Potenziale periodico in h , con due funzioni trigonometriche linearmente indipendenti

$$V(h) = \Delta V_f(h) + \Delta V_A(h) \approx c_0 - c_1 \sin^2 \left(\frac{h}{2F} \right) + c_2 \sin^4 \left(\frac{h}{2F} \right)$$

- Tuning ottenuto da matching con MS

$$\left. \frac{c_1}{F^4} \right|_{\text{phys.}} = \frac{m_h^2}{F^2} \longrightarrow \text{Tuning (} m_h^2/F^2 \lesssim 0.03 \text{)} \qquad \left. \frac{c_2}{F^4} \right|_{\text{phys.}} = \frac{2m_h^2}{v^2} \approx \frac{1}{2}$$

- Decostruzione delle interazioni di gauge: libertà di scelta su costante di accoppiamento di $SU(2)_R$

Potenziale di Higgs: termine quadratico

- Tuning proveniente esclusivamente da c_1

$$\left. \frac{c_1}{F^4} \right|_{\text{phys.}} = \frac{m_h^2}{F^2} \longrightarrow \text{Tuning } (m_h^2/F^2 \lesssim 0.03)$$

- Potenziale di Higgs stabilizzato tramite:
 - Introduzione di simmetria L-R
 - Scelta di g_R per sopprimere il contributo del top-partner

$$\frac{c_1}{F^4} = \underbrace{\frac{N_c}{8\pi^2} \left[(\lambda_R^t)^2 \kappa_R^t - (\lambda_L^t)^2 \kappa_L^t \right]}_{\text{Simmetria L-R}} \frac{M_f^2}{F^2} + \underbrace{\boxed{\frac{N_c y_t^2}{4\pi^2} \frac{M_T^2}{F^2}}}_{\text{Top partner}} \downarrow \underbrace{\frac{9g_R^2}{32\pi^2} \left(1 - \frac{g_R^2 v_\Sigma^2}{2M_\rho^2} \right) \frac{M_\rho^2}{F^2}}_{\text{Contributo di gauge}} + \mathcal{O}(g_L g_R, g_L^2)$$

Potenziale di Higgs: termine quadratico

$$\frac{c_1}{F^4} \supset \frac{N_c y_t^2}{4\pi^2} \frac{M_T^2}{F^2} - \frac{9g_R^2}{32\pi^2} \left(1 - \frac{g_R^2 v_\Sigma^2}{2M_\rho^2} \right) \frac{M_\rho^2}{F^2}$$

- Potenziale stabilizzato da scelta appropriata di g_R (consentita da non-universalità di flavour)
- Abbastanza grande da essere paragonabile al contributo di y_t
- Non tanto grande da generare un'inversione di segno nel contributo di gauge

$$g_{R,3} = O(1) \gg g_{R,12} \approx g_Y^{\text{SM}}$$

$$M_{W_R}^2 = \frac{1}{4} g_R^2 v_\Sigma^2 < \frac{1}{2} M_\rho^2$$

Constraint sperimentali: settore forte

- Modifiche ai coupling VVh e VVhh



$$\Lambda_{\text{HC}} \gtrsim 12 \text{ TeV (95\% CL)}$$

- Top partners, risonanze alla scala del TeV



$$M_T \gtrsim 1.5 \text{ TeV} \longrightarrow \Lambda_{\text{HC}} \gtrsim 15 \text{ TeV}$$

$$M_\rho \gtrsim 5 \text{ TeV}$$

- EWPO, parametri S e T



$$g_{L,R}^2 \frac{v^2}{M_\rho^2} \lesssim 10^{-3}$$

Constraint sperimentali: gauge bosons

- Flavour (e.g. $B \rightarrow X_s + \gamma$) e Z-pole

$$v_\Sigma \gtrsim 3 \text{ TeV}$$

- Drell-Yan da LHC

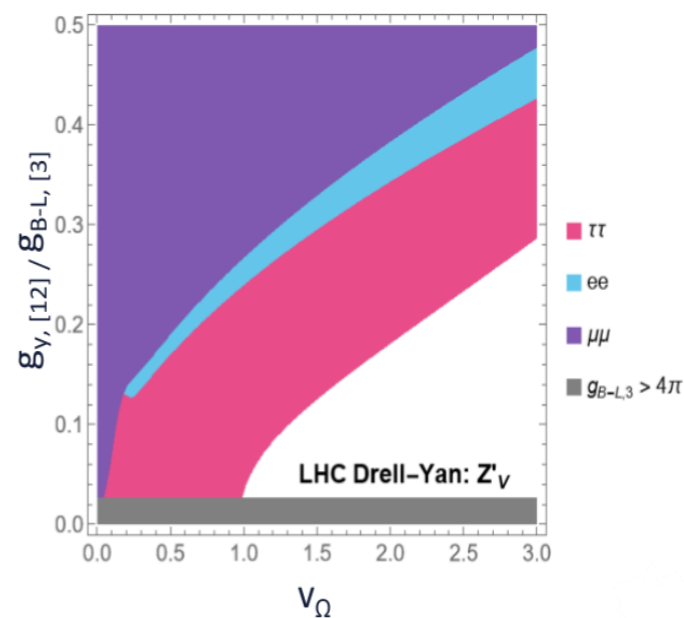
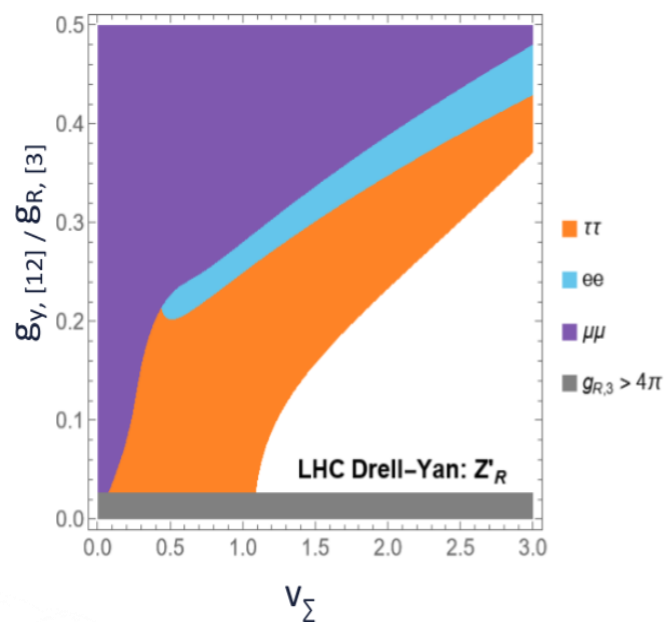
$$v_\Sigma \gtrsim 2.7 \text{ TeV}$$

- B_s mixing

$$v_\Sigma \gtrsim 2 \text{ TeV}$$

Caratteristiche del modello

- $SU(2)_R$ gauge coupling della terza famiglia $O(1)$
- Top partner "leggero" (2 TeV) e risonanze a 10 TeV
- Scala di compositezza $\Lambda \sim 20$ TeV e $v_\Sigma \sim 3$ TeV
- 3% fine tuning
- Modifiche al coupling di Higgs di ordine 1%
- Modifiche al settore EW di ordine 10^{-3}



Conclusioni

- NF accoppiata alla 3 generazione alla scala del TeV compatibile coi constraint correnti
- Higgs composito + non-universalità → Modello BSM predittivo
- Direzione futura: link fields compositi

$$Sp(6)_{\text{global}} \longrightarrow SU(2)_L \times SU(2)_R^{[3]} \times SU(2)_R^{[12]}$$

Grazie per l'attenzione!

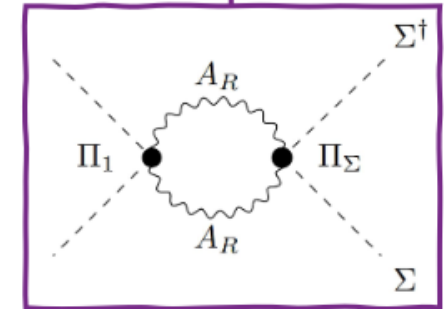
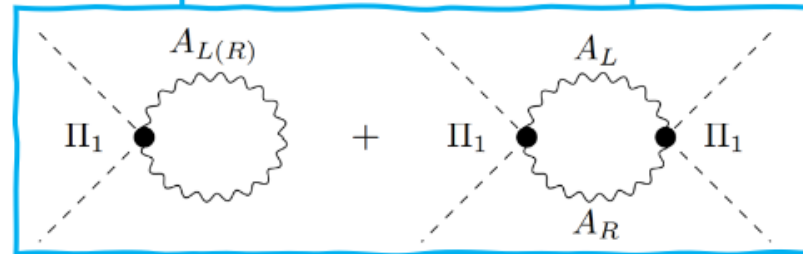
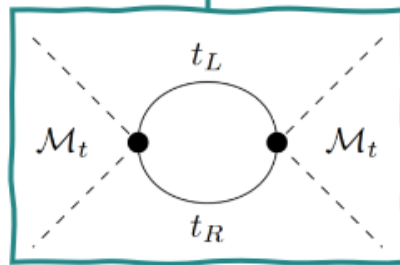
Backup slides

Elementary fields		$U(1)_{B-L}^{[3]}$	$U(1)_Y^{[12]}$	$SU(2)_L$	$SU(2)_R^{[3]}$
chiral light quarks	$q_L^{[12]}$	0	1/6	2	1
	$u_R^{[12]}$	0	2/3	1	1
	$d_R^{[12]}$	0	-1/3	1	1
chiral 3 rd gen. quarks	$q_L^{[3]}$	1/6	0	2	1
	$q_R^{[3]}$	1/6	0	1	2
vector-like quarks	F_L^q	1/6	0	2	1
	F_R^q	0	1/6	1	2
scalar link fields	Σ_R	0	1/2	1	2
	Ω_q	-1/6	1/6	1	1
	Ω_ℓ	1/2	-1/2	1	1

$$V(h) = \Delta V_f(h) + \Delta V_A(h) \approx c_0 - c_1 \sin^2 \left(\frac{h}{2F} \right) + c_2 \sin^4 \left(\frac{h}{2F} \right)$$

Gauge contributions

$$\frac{c_2}{F^4} = \frac{N_c y_t^2}{4\pi^2} \frac{M_T^2}{F^2} + \frac{9g_R^2}{32\pi^2} \delta_\pi \left(1 - \frac{g_R^2 v_\Sigma^2}{2M_\rho^2} \right) \frac{M_\rho^2}{F^2} - \frac{9g_R^4}{64\pi^2} \log \left(\frac{M_\rho^2}{M_{W_R}^2} \right) + \mathcal{O}(g_L g_R, g_L^2)$$



$$V(h) = \Delta V_f(h) + \Delta V_A(h) \approx c_0 - c_1 \sin^2 \left(\frac{h}{2F} \right) + c_2 \sin^4 \left(\frac{h}{2F} \right)$$

Gauge contributions

$$\frac{c_2}{F^4} = \boxed{\frac{N_c y_t^2}{4\pi^2} \frac{M_T^2}{F^2}} + \overbrace{\frac{9g_R^2}{32\pi^2} \delta_\pi \left(1 - \frac{g_R^2 v_\Sigma^2}{2M_\rho^2} \right) \frac{M_\rho^2}{F^2} - \frac{9g_R^4}{64\pi^2} \log \left(\frac{M_\rho^2}{M_{W_R}^2} \right)} + \mathcal{O}(g_L g_R, g_L^2)$$

Negligible for $g_R \lesssim 2$

Light Top partner

$\delta_\pi \ll 1$ from spurion analysis $\longrightarrow M_T \approx 2.5F$

Potenziale di Higgs: termine quartico

c_2 naturale ($O(1)$) dal matching con il MS

$$\frac{c_2}{F^4} \Big|_{\text{phys.}} = \frac{2m_h^2}{v^2} \approx \frac{1}{2}$$

Constraint sul rapporto M_T/F

$$\frac{c_2}{F^4} = \frac{N_c y_t^2}{4\pi^2} \frac{M_T^2}{F^2} + \text{Gauge contributions (suppressed)}$$

↑
Top partner

→ $M_T \approx 2.5F$