

Stati Esotici nella Fisica BSM: il Modello 331, un caso di studio

Antonio Costantini

IFAE 2019

17th Aprile 2019



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Napoli



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II - DIPARTIMENTO DI
FISICA "ETTORE PANCINI"



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Bologna

Alcuni problemi dello SM

- ◇ evidenza della materia oscura da e.g. la curva di rotazione delle galassie
- ◇ evidenza di una (molto piccola) massa dei neutrini dall'oscillazione dei neutrini solari
- ◇ mancanza di una spiegazione della gerarchia $v \ll M_{Planck}$
- ◇ mancanza di una spiegazione per $n_{Q_f} = n_{L_f} = 3$
- ◇ ...

Sommario

Il Modello 331

Formulazione Minimale

Fenomenologia dei Leptoni Same-Sign

Il Modello 331 per β^{em} Generico

Sommario

Il Modello 331

Formulazione Minimale

Fenomenologia dei Leptoni Same-Sign

Il Modello 331 per β^{em} Generico

Contenuto di Campi

$$\mathcal{G} \equiv SU(3)_c \times \mathbf{SU(3)}_L \times U(1)_X$$

Contenuto di Campi

$$\mathcal{G} \equiv SU(3)_c \times \mathbf{SU(3)}_L \times U(1)_X$$

$$Q_1 = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ D_L \end{pmatrix}, \quad Q_2 = \begin{pmatrix} c_L \\ s_L \\ S_L \end{pmatrix}, \quad Q_{1,2} \in (3, 3, -1/3)$$

$$Q_3 = \begin{pmatrix} b_L \\ t_L \\ T_L \end{pmatrix}, \quad Q_3 \in (3, \bar{3}, 2/3)$$

Contenuto di Campi

$$\mathcal{G} \equiv SU(3)_c \times \mathbf{SU(3)}_L \times U(1)_X$$

$$Q_1 = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ D_L \end{pmatrix}, \quad Q_2 = \begin{pmatrix} c_L \\ s_L \\ S_L \end{pmatrix}, \quad Q_{1,2} \in (3, 3, -1/3)$$

$$Q_3 = \begin{pmatrix} b_L \\ t_L \\ T_L \end{pmatrix}, \quad Q_3 \in (3, \bar{3}, 2/3)$$

$$l = \begin{pmatrix} l_L \\ \nu_l \\ l_R^c \end{pmatrix}, \quad l \in (1, \bar{3}, 0), \quad l = e, \mu, \tau$$

Contenuto di Campi

$$\mathcal{G} \equiv SU(3)_c \times \mathbf{SU(3)}_L \times U(1)_X$$

$$Q_1 = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ D_L \end{pmatrix}, \quad Q_2 = \begin{pmatrix} c_L \\ s_L \\ S_L \end{pmatrix}, \quad Q_{1,2} \in (3, 3, -1/3)$$

$$Q_3 = \begin{pmatrix} b_L \\ t_L \\ T_L \end{pmatrix}, \quad Q_3 \in (3, \bar{3}, 2/3)$$

$$l = \begin{pmatrix} l_L \\ \nu_l \\ l_R^c \end{pmatrix}, \quad l \in (1, \bar{3}, 0), \quad l = e, \mu, \tau$$

$$\chi = \begin{pmatrix} \chi^{++} \\ \chi^+ \\ \chi^0 \end{pmatrix} \in (1, 3, 1), \quad \rho = \begin{pmatrix} \rho^+ \\ \rho^0 \\ \rho^- \end{pmatrix} \in (1, 3, 0), \quad \eta = \begin{pmatrix} \eta^0 \\ \eta^- \\ \eta^{--} \end{pmatrix} \in (1, 3, -1)$$

Definizione dell'Ipercarica Y

L'operatore della carica elettromagnetica nel modello 331 è definito da

$$Q_{\mathbf{3}}^{\text{em}} = Y_{\mathbf{3}} + T_3 \quad Q_{\bar{\mathbf{3}}}^{\text{em}} = Y_{\bar{\mathbf{3}}} - T_3$$

Definizione dell'Ipercarica Y

L'operatore della carica elettromagnetica nel modello 331 è definito da

$$Q_3^{\text{em}} = Y_3 + T_3 \quad Q_{\bar{3}}^{\text{em}} = Y_{\bar{3}} - T_3$$

$$Y_3 = \sqrt{3}T_8 + X1 \quad Y_{\bar{3}} = -\sqrt{3}T_8 + X1$$

Definizione dell'Ipercarica Y

L'operatore della carica elettromagnetica nel modello 331 è definito da

$$Q_3^{\text{em}} = Y_3 + T_3 \quad Q_{\bar{3}}^{\text{em}} = Y_{\bar{3}} - T_3$$

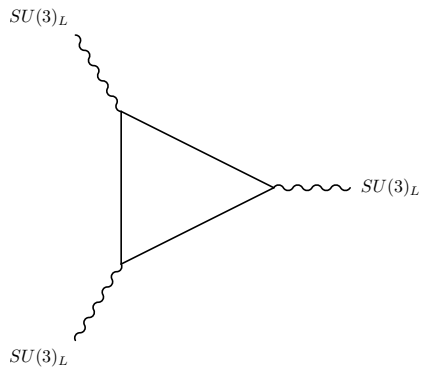
$$Y_3 = \sqrt{3}T_8 + X\mathbf{1} \quad Y_{\bar{3}} = -\sqrt{3}T_8 + X\mathbf{1}$$

$$T_i = \lambda_i/2, i = 1, \dots, 8$$

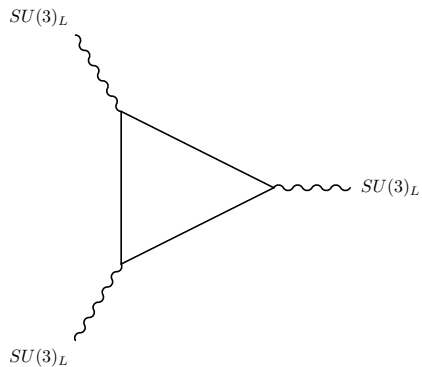
λ_i matrici di Gell-Mann

$$T_8 = \text{diag} \left[\frac{1}{2\sqrt{3}}(1, 1, -2) \right]$$

Cancellazione delle Anomalie: l'esempio di $SU(3)_L$



Cancellazione delle Anomalie: l'esempio di $SU(3)_L$



$$Q_1 = +9$$

$$Q_2 = +9$$

$$Q_3 = -9$$

$$L = -3 \times 3$$

$$n_{Q_f} = n_{L_f} = 3\kappa$$

$SU(3) \times SU(3) \times U(1)$: una possibilità...esotica

$$Q_1 = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ D_L \end{pmatrix}, \quad Q_2 = \begin{pmatrix} c_L \\ s_L \\ S_L \end{pmatrix}, \quad Q_{1,2} \in (3, 3, -1/3)$$

$$Q_3 = \begin{pmatrix} b_L \\ t_L \\ T_L \end{pmatrix}, \quad Q_3 \in (3, \bar{3}, 2/3)$$

$$Q_D^{\text{em}} = Q_S^{\text{em}} = -4/3$$

$$Q_T^{\text{em}} = 5/3$$

Quarks Esotici!

Da $SU(3)_L \times U(1)_X$ a $U(1)_{em}$

$$SU(3)_L \times U(1)_X$$

Da $SU(3)_L \times U(1)_X$ a $U(1)_{em}$

$$SU(3)_L \times U(1)_X$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \chi \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

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

Da $SU(3)_L \times U(1)_X$ a $U(1)_{em}$

$$SU(3)_L \times U(1)_X$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \chi \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

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

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \eta \rangle, \langle \rho \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

$$U(1)_{em}$$

Da $SU(3)_L \times U(1)_X$ a $U(1)_{em}$

$$SU(3)_L \times U(1)_X$$

$$W_1, \dots, W_8, B_X$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \chi \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

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

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \eta \rangle, \langle \rho \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

$$U(1)_{em}$$

Da $SU(3)_L \times U(1)_X$ a $U(1)_{em}$

$$SU(3)_L \times U(1)_X$$

$$W_1, \dots, W_8, B_X$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \chi \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \chi \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

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

$$W_1, W_2, W_3, B_Y, Y^\pm, Y^{\pm\pm}, Z'$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \eta \rangle, \langle \rho \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

$$U(1)_{em}$$

Da $SU(3)_L \times U(1)_X$ a $U(1)_{em}$

$$SU(3)_L \times U(1)_X$$

$$W_1, \dots, W_8, B_X$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \chi \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \chi \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

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

$$W_1, W_2, W_3, B_Y, Y^\pm, Y^{\pm\pm}, Z'$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \eta \rangle, \langle \rho \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \langle \eta \rangle, \langle \rho \rangle \\ \Downarrow \end{array}$$

$$U(1)_{em}$$

$$\gamma, Z, Z', W^\pm, Y^\pm, Y^{\pm\pm}$$

Interazioni di Yukawa: il Settore dei Quark

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{q,triplet}^{Yuk.} = & (y_d^1 Q_1 \rho^* d_R + y_d^2 Q_2 \rho^* s_R + y_d^3 Q_3 \eta b_R^* \\ & + y_u^1 Q_1 \eta^* u_R^* + y_u^2 Q_2 \eta^* c_R^* + y_u^3 Q_3 \rho t_R^* \\ & + y_E^1 Q_1 \chi^* D_R^* + y_E^2 Q_2 \chi^* S_R^* + y_E^3 Q_3 \chi T_R^*) + \text{h.c.}\end{aligned}$$

Interazioni di Yukawa: il Settore dei Quark

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{q,\text{triplet}}^{\text{Yuk.}} = & (y_d^1 Q_1 \rho^* d_R + y_d^2 Q_2 \rho^* s_R + y_d^3 Q_3 \eta b_R^* \\ & + y_u^1 Q_1 \eta^* u_R^* + y_u^2 Q_2 \eta^* c_R^* + y_u^3 Q_3 \rho t_R^* \\ & + y_E^1 Q_1 \chi^* D_R^* + y_E^2 Q_2 \chi^* S_R^* + y_E^3 Q_3 \chi T_R^*) + \text{h.c.}\end{aligned}$$

Interazioni di Yukawa: il Settore dei Quark

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{q,triplet}^{Yuk.} = & (y_d^1 Q_1 \rho^* d_R + y_d^2 Q_2 \rho^* s_R + y_d^3 Q_3 \eta b_R^* \\ & + y_u^1 Q_1 \eta^* u_R^* + y_u^2 Q_2 \eta^* c_R^* + y_u^3 Q_3 \rho t_R^* \\ & + y_E^1 Q_1 \chi^* D_R^* + y_E^2 Q_2 \chi^* S_R^* + y_E^3 Q_3 \chi T_R^*) + \text{h.c.}\end{aligned}$$

$$v_\chi \gg v_{\eta,\rho}$$

↓

$$m_{D,S,T} = \mathcal{O}(\text{TeV}) \text{ if } y_E^i \sim 1$$

Interazioni di Yukawa: il Settore dei Leptoni

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{l, \text{triplet}}^{\text{Yuk}} &= G_{ab}^{\eta} (l_{a\alpha}^i \epsilon^{\alpha\beta} l_{b\beta}^j) \rho^{*k} \epsilon^{ijk} + \text{h.c.} \\ &= G_{ab}^{\eta} l_a^i \cdot l_b^j \rho^{*k} \epsilon^{ijk} + \text{h.c.}\end{aligned}$$

a e b sono indici di flavour

α e β sono indici di Weyl ($l_a^i \cdot l_b^j \equiv l_{a\alpha}^i \epsilon^{\alpha\beta} l_{b\beta}^j$)

$i, j, k = 1, 2, 3$, sono indici di $SU(3)_L$

Interazioni di Yukawa: il Settore dei Leptoni

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{l, \text{triplet}}^{\text{Yuk}} &= G_{ab}^{\eta} (l_{a\alpha}^i \epsilon^{\alpha\beta} l_{b\beta}^j) \rho^{*k} \epsilon^{ijk} + \text{h.c.} \\ &= G_{ab}^{\eta} l_a^i \cdot l_b^j \rho^{*k} \epsilon^{ijk} + \text{h.c.}\end{aligned}$$

a e b sono indici di flavour

α e β sono indici di Weyl ($l_a^i \cdot l_b^j \equiv l_{a\alpha}^i \epsilon^{\alpha\beta} l_{b\beta}^j$)

$i, j, k = 1, 2, 3$, sono indici di $SU(3)_L$

$l_a^i \cdot l_b^j \rho^{*k} \epsilon^{ijk}$ è antisimmetrico

⇓

G_{ab}^{η} deve essere antisimmetrico

Interazioni di Yukawa: il Settore dei Leptoni

$$\mathcal{L}_{l,\text{sextet}}^{\text{Yuk.}} = G_{ab}^{\sigma} l_a^i \cdot l_b^j \sigma_{i,j}^*$$

con

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^{++} & \sigma_1^+/\sqrt{2} & \sigma^0/\sqrt{2} \\ \sigma_1^+/\sqrt{2} & \sigma_1^0 & \sigma_2^-/\sqrt{2} \\ \sigma^0/\sqrt{2} & \sigma_2^-/\sqrt{2} & \sigma_2^{--} \end{pmatrix} \in (1, 6, 0)$$

G_{ab}^{σ} è simmetrica

Interazioni di Yukawa: il Settore dei Leptoni

$$\mathcal{L}_{l,\text{sextet}}^{\text{Yuk.}} = G_{ab}^{\sigma} l_a^i \cdot l_b^j \sigma_{i,j}^*$$

con

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^{++} & \sigma_1^+/\sqrt{2} & \sigma^0/\sqrt{2} \\ \sigma_1^+/\sqrt{2} & \sigma_1^0 & \sigma_2^-/\sqrt{2} \\ \sigma^0/\sqrt{2} & \sigma_2^-/\sqrt{2} & \sigma_2^{--} \end{pmatrix} \in (1, 6, 0)$$

G_{ab}^{σ} è simmetrica

$H^{\pm\pm} \rightarrow l^{\pm} l^{\pm}$ permesso ($\rho \not\neq \rho^{\pm\pm}$)

Sommario

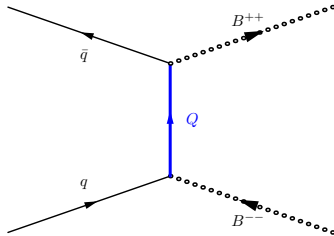
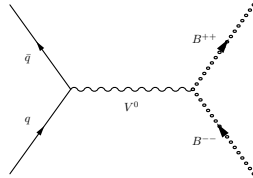
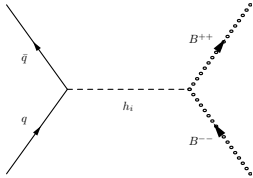
Il Modello 331

Formulazione Minimale

Fenomenologia dei Leptoni Same-Sign

Il Modello 331 per β^{em} Generico

$B^{\pm\pm}$ @ LHC



Segnale & Backgrounds a 13 TeV

Benchmark Point

$$m_{Y^{\pm\pm}} \simeq m_{H^{\pm\pm}} \sim 870 \text{ GeV}$$

$$Br(Y^{\pm\pm} \rightarrow l^{\pm}l^{\pm}) = Br(H^{\pm\pm} \rightarrow l^{\pm}l^{\pm}) = \frac{1}{3}$$

SEGNALE

$$pp \rightarrow Y^{++}Y^{--} (H^{++}H^{--}) \rightarrow (l^{+}l^{+})(l^{-}l^{-}) \quad l = e, \mu$$

$$\sigma(pp \rightarrow YY \rightarrow 4l) \simeq 4.3 \text{ fb} \quad \sigma(pp \rightarrow HH \rightarrow 4l) \simeq 0.3 \text{ fb}$$

BACKGROUNDS

$$pp \rightarrow ZZ \rightarrow (l^{+}l^{-})(l^{+}l^{-})$$

$$\sigma(pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4l) \simeq 6.1 \text{ fb}$$

Numero di Eventi (13 TeV e $\mathcal{L}=300 \text{ fb}^{-1}$)

Definendo la significanza s per discriminare tra segnale S e background B come

$$\sigma_S = \frac{S}{\sqrt{B + \sigma_B^2}},$$

σ_B errore sistematico su B ($\sigma_B \simeq 0.1B$)

$$N(\gamma\gamma) \simeq 1302, \quad N(HH) \simeq 120, \quad N(ZZ) \simeq 1836$$

Numero di Eventi (13 TeV e $\mathcal{L}=300 \text{ fb}^{-1}$)

Definendo la significanza s per discriminare tra segnale S e background B come

$$\sigma_S = \frac{S}{\sqrt{B + \sigma_B^2}},$$

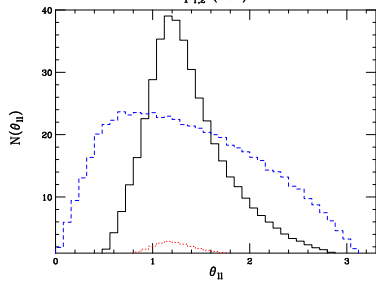
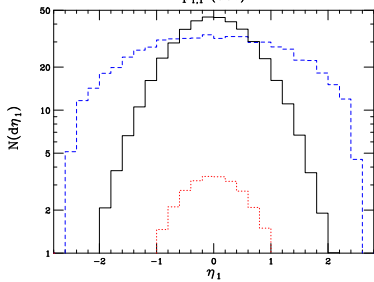
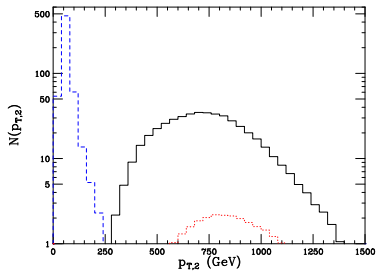
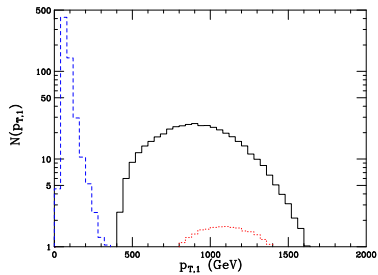
σ_B errore sistematico su B ($\sigma_B \simeq 0.1B$)

$$N(\gamma\gamma) \simeq 1302, \quad N(HH) \simeq 120, \quad N(ZZ) \simeq 1836$$

↓

$$\sigma_{\gamma\gamma} \simeq 6.9, \quad \sigma_{HH}^{B_{SM}} = 0.6, \quad \sigma_{HH}^{B_{\gamma\gamma}} = 0.9$$

Distribuzioni



Sommario

Il Modello 331

Formulazione Minimale

Fenomenologia dei Leptoni Same-Sign

Il Modello 331 per β^{em} Generico

L'Operatore di Carica Elettromagnetica nel caso Generale

Nel modello 331 l'operatore di carica elettromagnetica è dato in generale da

$$Q_{\mathbf{3}}^{\text{em}} = Y_{\mathbf{3}} + T_3 \quad Q_{\bar{\mathbf{3}}}^{\text{em}} = Y_{\bar{\mathbf{3}}} - T_3$$

L'Operatore di Carica Elettromagnetica nel caso Generale

Nel modello 331 l'operatore di carica elettromagnetica è dato in generale da

$$Q_{\mathbf{3}}^{\text{em}} = Y_{\mathbf{3}} + T_3 \quad Q_{\bar{\mathbf{3}}}^{\text{em}} = Y_{\bar{\mathbf{3}}} - T_3$$

$$Y_{\mathbf{3}} = \beta^{\text{em}} T_8 + X\mathbf{1} \quad Y_{\bar{\mathbf{3}}} = -\beta^{\text{em}} T_8 + X\mathbf{1}$$

Parametro β^{em} : Possibili Valori

Il parametro $\beta^{(\text{em})}$ è vincolato dall'espressione della massa dello Z' .

Il vincolo è

$$1 - (1 + (\beta^{\text{em}})^2)s_W^2 > 0$$

Parametro β^{em} : Possibili Valori

Il parametro $\beta^{(\text{em})}$ è vincolato dall'espressione della massa dello Z' .
Il vincolo è

$$1 - (1 + (\beta^{\text{em}})^2)s_W^2 > 0$$

⇓

$$|\beta^{\text{em}}| < \sqrt{3}$$

$\beta^{\text{em}} = \frac{n}{\sqrt{3}}$, $n = 1, 2, 3$ implica cariche elettriche frazionarie per le particelle. Per $n = 2$ si ha $\pm 5/6$ and $\pm 7/6$ per la carica elettrica dei fermioni pesanti e $\pm 1/2$ and $\pm 3/2$ i bosoni di gauge.

Contenuto di Campi per β^{em} Generico

particles	$Q(\beta^{\text{em}})$	$\beta^{\text{em}} = -\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\beta^{\text{em}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$	$\beta^{\text{em}} = -\sqrt{3}$	$\beta^{\text{em}} = \sqrt{3}$
D, S	$\frac{1}{6} - \frac{\sqrt{3}\beta^{\text{em}}}{2}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{5}{3}$	$-\frac{4}{3}$
T	$\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}\beta^{\text{em}}}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{4}{3}$	$\frac{5}{3}$
E	$-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}\beta^{\text{em}}}{2}$	-1	0	-2	1
V	$-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}\beta^{\text{em}}}{2}$	-1	0	-2	1
Y	$\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}\beta^{\text{em}}}{2}$	0	1	-1	2
H_V	$-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}\beta^{\text{em}}}{2}$	-1	0	-2	1
H_Y	$\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}\beta^{\text{em}}}{2}$	0	1	-1	2
H_W	1	1	1	1	1

Conclusioni

◇ problemi dello SM: dark matter, masse dei neutrini ... → deve essere ampliato

- ◇ problemi dello SM: dark matter, masse dei neutrini ... → deve essere ampliato
- ◇ modelli con gruppo di gauge più ampio hanno una ricca fenomenologia

- ◇ problemi dello SM: dark matter, masse dei neutrini ... → deve essere ampliato
- ◇ modelli con gruppo di gauge più ampio hanno una ricca fenomenologia
- ◇ il modello 331 model(s) spiega il numero di famiglie fermioniche ($n_{Q_f} = n_{L_f} = 3\kappa$)

- ◇ problemi dello SM: dark matter, masse dei neutrini ... → deve essere ampliato
- ◇ modelli con gruppo di gauge più ampio hanno una ricca fenomenologia
- ◇ il modello 331 model(s) spiega il numero di famiglie fermioniche ($n_{Q_f} = n_{L_f} = 3\kappa$)
- ◇ la versione minimale del modello 331 ha la caratteristica pressochè unica di avere dei bosoni di gauge a carica elettrica doppia

- ◇ problemi dello SM: dark matter, masse dei neutrini ... → deve essere ampliato
- ◇ modelli con gruppo di gauge più ampio hanno una ricca fenomenologia
- ◇ il modello 331 model(s) spiega il numero di famiglie fermioniche ($n_{Q_f} = n_{L_f} = 3\kappa$)
- ◇ la versione minimale del modello 331 ha la caratteristica pressochè unica di avere dei bosoni di gauge a carica elettrica doppia
- ◇ modelli con gruppi di gauge ampi appaiono in teorie GUT

Grazie



BACKUP

Trinification

$$[SU(3)]^3 \equiv SU(3)_C \times SU(3)_L \times SU(3)_R$$

....sottogruppo massimale di E_6

Trinification: Contenuto di Campi

$$H = \begin{pmatrix} h_{11}^0 & h_{12}^+ & h_{13}^+ \\ h_{21}^- & h_{22}^0 & h_{23}^0 \\ h_{31}^- & h_{32}^0 & h_{33}^0 \end{pmatrix} \in (\mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3})$$

$$L = \begin{pmatrix} L_1^1 & E^- & e^- \\ E^+ & L_2^2 & \nu \\ e^+ & \hat{\nu} & L_3^3 \end{pmatrix} \in (\mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3})$$

$$Q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ D_L \end{pmatrix} \in (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$$

$$Q_R = \begin{pmatrix} \bar{u}_R & \bar{d}_R & \bar{D}_R \end{pmatrix} \in (\mathbf{3}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}})$$

Trinification: Contenuto di Campi

$$H = \begin{pmatrix} h_{11}^0 & h_{12}^+ & h_{13}^+ \\ h_{21}^- & h_{22}^0 & h_{23}^0 \\ h_{31}^- & h_{32}^0 & h_{33}^0 \end{pmatrix} \in (\mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3})$$

$$L = \begin{pmatrix} L_1^1 & E^- & e^- \\ E^+ & L_2^2 & \nu \\ e^+ & \hat{\nu} & L_3^3 \end{pmatrix} \in (\mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3})$$

$$Q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ D_L \end{pmatrix} \in (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$$

$$Q_R = \begin{pmatrix} \bar{u}_R & \bar{d}_R & \bar{D}_R \end{pmatrix} \in (\mathbf{3}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}})$$

$$\mathcal{Q}^{\text{em}} = \mathcal{J}_L^3 + \mathcal{J}_R^3 + \frac{1}{\sqrt{3}}\mathcal{J}_L^8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\mathcal{J}_R^8$$

Trinification: Contenuto di Campi

$$H = \begin{pmatrix} h_{11}^0 & h_{12}^+ & h_{13}^+ \\ h_{21}^- & h_{22}^0 & h_{23}^0 \\ h_{31}^- & h_{32}^0 & h_{33}^0 \end{pmatrix} \in (\mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3})$$

$$L = \begin{pmatrix} L_1^1 & E^- & e^- \\ E^+ & L_2^2 & \nu \\ e^+ & \bar{\nu} & L_3^3 \end{pmatrix} \in (\mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3})$$

$$Q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ D_L \end{pmatrix} \in (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$$

$$Q_R = \begin{pmatrix} \bar{u}_R & \bar{d}_R & \bar{D}_R \end{pmatrix} \in (\mathbf{3}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}})$$

$$\mathcal{Q}_{D_i}^{\text{em}} = -1/3$$

Quarks non-Esotici!

$\mathcal{G}_{331} \subset [SU(3)]^3$: Cascata di SSB

$$SU(3) \rightarrow SU(2)_a \times U(1)_b$$

\Downarrow

$$3 \rightarrow 2_b + 1_{-2b}$$

$\mathcal{G}_{331} \subset [SU(3)]^3$: Cascata di SSB

$$SU(3) \rightarrow SU(2)_a \times U(1)_b$$

$$\Downarrow$$

$$3 \rightarrow 2_b + 1_{-2b}$$

$$SU(2)_a \rightarrow U(1)_a$$

$$\Downarrow$$

$$2_b + 1_{-2b} \rightarrow 1_{a,b} + 1_{-a,b} + 1_{0,-2b}$$

$G_{331} \subset [SU(3)]^3$: Cascata di SSB

$$SU(3) \rightarrow SU(2)_a \times U(1)_b$$

$$\Downarrow$$

$$3 \rightarrow 2_b + 1_{-2b}$$

$$SU(2)_a \rightarrow U(1)_a$$

$$\Downarrow$$

$$2_b + 1_{-2b} \rightarrow 1_{a,b} + 1_{-a,b} + 1_{0,-2b}$$

Quando $SU(3)_R$ si rompe in $U(1)_a \otimes U(1)_b$ abbiamo

$$3_R \rightarrow (a)(b) + (-a)(b) + (0)(-2b)$$