

(Fundamentalna) Fizika Elementarnih Čestica

Dan 07b: Posle standardnog modela, veliko ujedinjenje

Tristan Hübsch

Department of Physics and Astronomy, Howard University, Washington DC

Department of Mathematics, University of Maryland, College Park, MD

Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, Novi Sad, Serbia

<https://tristan.nfshost.com/>

Modeli velikog ujedinjenja

Opšte napomene

- Fundamentalni fermioni Standardnog Modela:

porodica fermiona			naboji		
1	2	3	Q	I_w	Y_w
$\Psi_- = \gamma_- \Psi \left\{ \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right]_L \quad \left[\begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right]_L \quad \left[\begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right]_L \\ \left[\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right]_L \quad \left[\begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array} \right]_L \quad \left[\begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau^- \end{array} \right]_L \end{array} \right.$	$+2/3$	$+1/2$	$+1/3$	$-1/3$	$-1/2$
			0	$+1/2$	-1
			-1	$-1/2$	-1
$\Psi_+ = \gamma_+ \Psi \left\{ \begin{array}{c} u_R \quad c_R \quad t_R \\ d_R \quad s_R \quad b_R \\ e_R^- \quad \mu_R^- \quad \tau_R^- \\ \nu_{eR} \quad \nu_{\mu R} \quad \nu_{\tau R} \end{array} \right.$	$+2/3$	0	$+4/3$	$-1/3$	-2
			0	0	0

Primetiti vrednosti slabog hipernaboga!

Modeli velikog ujedinjenja

Opšte napomene

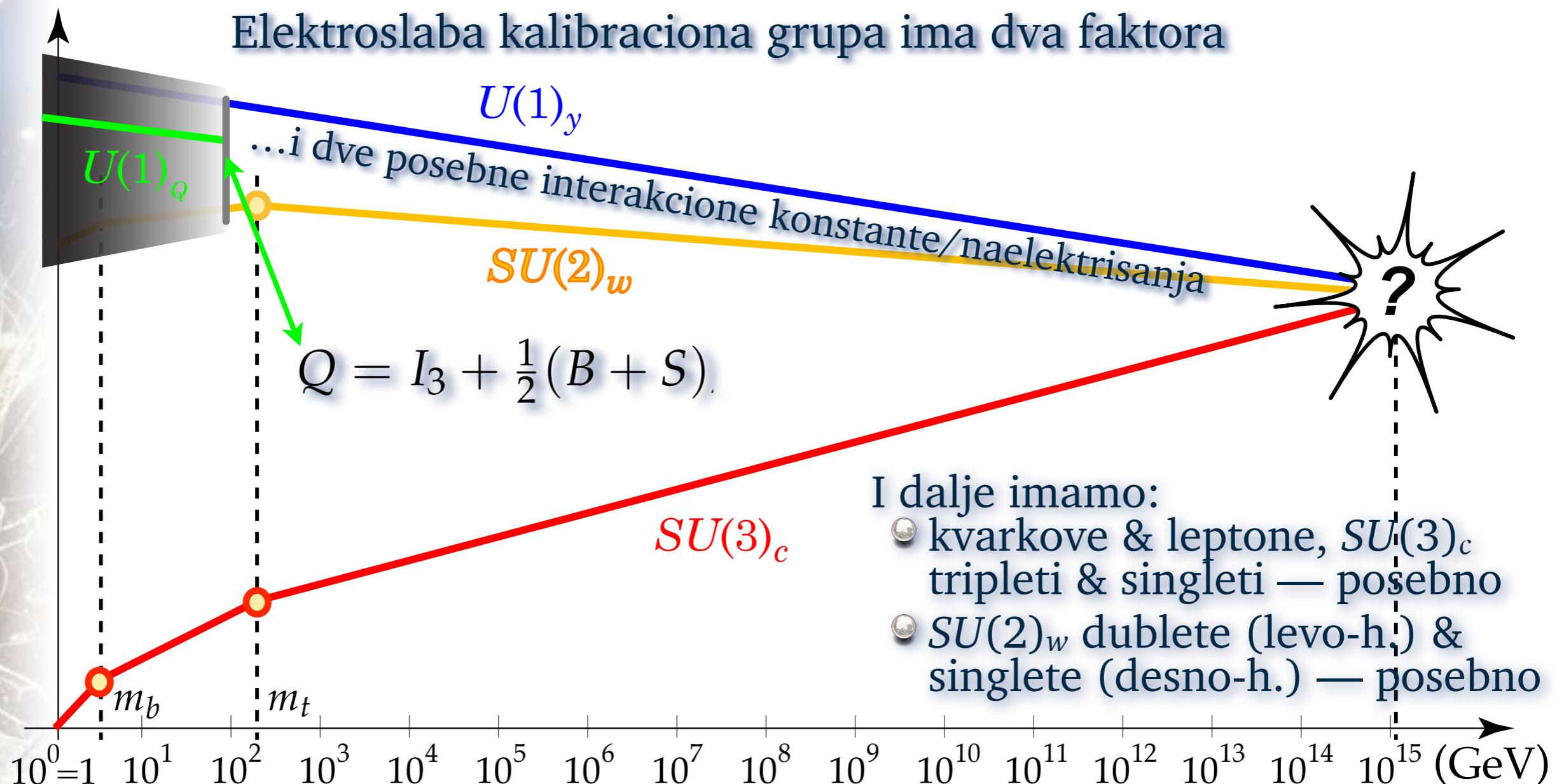
- S obzirom na $SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_y$ kalibracionu grupu
 - levo-hiralni kvarkovi $(d, u)_L$ čine $(3, 2)_{1/3}$
 - levo-hiralni leptoni $(e^-, \nu_e)_L$ čine $(1, 2)_{-1}$
 - desno-hiralni kvarkovi čine: $u_R = (3, 1)_{4/3} \oplus d_R = (3, 1)_{-2/3}$
 - desno-hiralni leptoni čine: $e_R^- = (1, 1)_{-2} \oplus \nu_{e,R} = (1, 1)_0$ “sterilan”
- Reprezentacija kalibracione grupe određuje interakciju
 - $SU(3)_c$ 3 interaguju sa gluonima, 1 ne
 - $SU(2)_w$ 2 interaguju sa W^\pm i W^3 , 1 ne
 - $U(1)_y$ $q_y \neq 0$ interaguje sa hyper-fotonima, $q_y = 0$ ne
 - Svaki faktor kalibr. grupe ima poseban interakcioni parametar/naboj i “parametar fine strukture”: $\alpha_c, \alpha_w, \alpha_y$
- Pored fundamentalnih fermiona, u Standardnom Modelu je još jedino kalibr. bozoni i Higgs-ov bozon, $(1, 2)_{+1}$.

I'll be back

Modeli velikog ujedinjenja

Opšte napomene

- Sugestivan grafikon:



Pati-Salam model

Unifikacija kvarkova i leptona

- Struktura fundamentalnih fermiona u svakoj generaciji, zanemarujući hiralnost je

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c|c} \hline SU(3)_c & \\ \hline q^r & q^y & q^b \\ \hline \end{array} & \ell \\ \hline \begin{array}{ccc|c} u^r & u^y & u^b & \nu_e \\ d^r & d^y & d^b & e^- \\ \hline \end{array} & \rightarrow \end{array} \quad \begin{array}{c} \begin{array}{c|c} \hline SU(4)_c & \\ \hline SU(3)_c & \\ \hline q^r & q^y & q^b & \ell^l \\ \hline \end{array} & \\ \hline \begin{array}{ccc|c} u^r & u^y & u^b & \nu_e^l \\ d^r & d^y & d^b & e^{-l} \\ \hline \end{array} & \end{array}$$

- Leptonstvo (ne-kvarknost) letona se identificuje sa 4. bojom, “*lila*” (ili “*lavanda*”) veće, $SU(4)_c$ kalibracione grupe
 - ...koja onda mora da se naruši u $SU(4)_c \rightarrow SU(3)_c \times U(1)_{y'}$ kalibracionu grupu
 - ...pomoću nekog Higgs-ovog skalara.

Pati-Salam model

Unifikacija kvarkova i leptona

- Dodajući hiralnost, imamo

elektro-slabi interakciji				hiralnost
$SU(2)_L$	$+1/2$	$-1/2$	L	
$SU(2)_R$	$+1/2$	$-1/2$	R	$SU(4)_c$
				$SU(3)_c$
				$c \quad \check{z} \quad p \quad l$
				$u^c \quad u^{\check{z}} \quad u^p \quad \nu_e^l$
				$d^c \quad d^{\check{z}} \quad d^p \quad e^{-l}$
				$u^c \quad u^{\check{z}} \quad u^p \quad \nu_e^l$
				$d^c \quad d^{\check{z}} \quad d^p \quad e^{-l}$

- “Ogledalska” kalibraciona grupa $SU(2)_R$ slabog izospina i diskretna (konačna) simetrija parnosti, \mathbb{Z}_2 .
- Pati-Salam grupa: $SU(4)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R \rtimes \mathbb{Z}_2$.

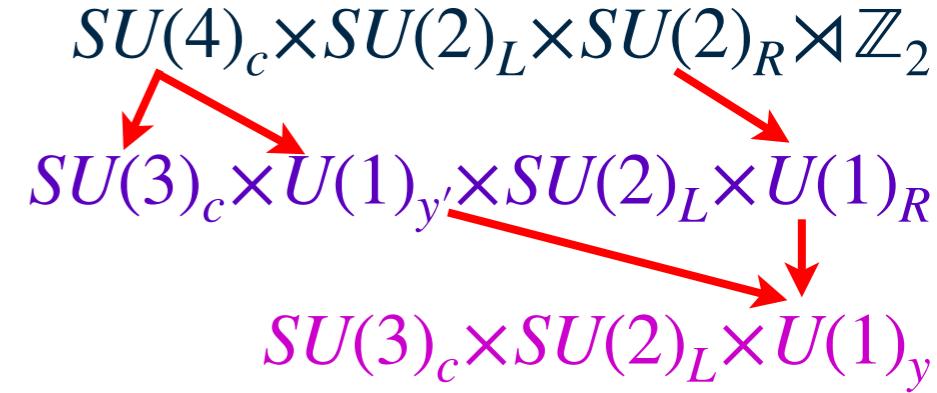
Pati-Salam model

Struktura fermionskih masa

- Fundamentalni fermioni: $(4, 2, 1)_L \oplus (4, 1, 2)_R$ irreducibilno pod \mathbb{Z}_2
- Pod $SU(4)_c \rightarrow SU(3)_c \times U(1)_{y'}: 4 \rightarrow \mathbf{3}_{\frac{1}{3}} \oplus \mathbf{1}_{-1}$ (“ q ” \oplus “ ℓ ”)
- Pod $SU(2)_R \rightarrow U(1)_R: \mathbf{2} \rightarrow (+\frac{1}{2}) \oplus (-\frac{1}{2})$ (“spin- \uparrow ”, “spin- \downarrow ”)
- Tako, $(4, 2, 1)_L \rightarrow [(\mathbf{3}_{\frac{1}{3}}, \mathbf{2})_0 \oplus (\mathbf{1}_{-1}, \mathbf{2})_0]_L$ i
 $(4, 1, 2)_R \rightarrow [(\mathbf{3}_{\frac{1}{3}}, \mathbf{1})_{+\frac{1}{2}} \oplus (\mathbf{3}_{\frac{1}{3}}, \mathbf{1})_{-\frac{1}{2}} \oplus (\mathbf{1}_{-1}, \mathbf{1})_{+\frac{1}{2}} \oplus (\mathbf{1}_{-1}, \mathbf{1})_{-\frac{1}{2}}]_R$
- Isto, $U(1)_{y'} \times U(1)_R \rightarrow U(1)_y$, prema $q_y = q_{y'} + 2I_{3R}$, tako da je
- $(4, 2, 1)_L \oplus (4, 1, 2)_R \rightarrow [(\mathbf{3}, \mathbf{2})_{\frac{1}{3}} \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{-1}]_L \oplus$
 $[(\mathbf{3}, \mathbf{1})^4_{\frac{1}{3}} \oplus (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-\frac{2}{3}} \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{1})_0 \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{1})_{-2}]_R$
- ... $U(1)_y$ hipernaboji reprodukuju Standardni Model
- I samo Higgs-ovo polje mora da je $(4, 1, 2)$, tako da
... $\langle (4, 1, 2) \rangle = \dots + \langle (1, 1)_0 \rangle \neq 0$. Ovo simultano narušava
 $SU(4)_c \times SU(2)_R \rtimes \mathbb{Z}_2 \rightarrow SU(3)_c \times U(1)_y$ i ostavlja $SU(2)_w$.

Pati-Salam model

Struktura fermionskih masa



- Šta? Vi niste sve to memorisali?!

- OK: “P-S 4-2-2”

	“3 _{y'} -2-1 ^(R) ”	“S.M. 3-2-1”
(4, 2, 1)	(3 _{1/3} , 2) ₀ ⊕ (1 ₋₁ , 2) ₀	(3, 2) _{1/3} ⊕ (1, 2) ₋₁
(4, 1, 2)	(3 _{1/3} , 1) _{1/2} ⊕ (1 ₋₁ , 1) _{1/2} ⊕ (3 _{1/3} , 1) _{-1/2} ⊕ (1 ₋₁ , 1) _{-1/2}	(3, 1) _{4/3} ⊕ (1, 1) ₀ ⊕ (3, 1) _{-2/3} ⊕ (1, 1) ₋₂
$U(1)_{y'} \times U(1)_R \rightarrow U(1)_y : q_y = q_{y'} + 2I_{3,R}$		

- Setimo se: $\overline{\Psi} [i\hbar c \gamma^\mu \mathcal{D}_\mu - \frac{mc}{\hbar} \mathbf{1}] \Psi = \dots - \frac{mc}{\hbar} (\overline{\Psi_-} \Psi_+ + \overline{\Psi_+} \Psi_-)$

- Stoga $SU(4)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R \rtimes \mathbb{Z}_2$ -invariantna masa potiče

$(\overline{4}, 1, 2) \langle \mathbb{H} \rangle (4, 2, 1) \Rightarrow \mathbb{H} \sim (1, 2, 2) \Rightarrow \mathbb{H} \sim (1_0, 2, \pm \frac{1}{2}) \Rightarrow \langle \mathbb{H} \rangle \sim (1, 2)_{\pm 1}$
jedna od četiri komponente ima vev

Pati-Salam model

Hijerarhija i struktura fermionskih masa

- Fundamentalni fermioni: $(4, 2, 1)_L \oplus (4, 1, 2)_R$ se razlažu pri $SU(4)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R \rtimes \mathbb{Z}_2 \rightarrow SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_y$ kao

$$(4, 2, 1) = \left\{ \begin{array}{l} u^{\textcolor{red}{r}}, u^{\textcolor{brown}{y}}, u^{\textcolor{blue}{b}}, \nu_e^{\textcolor{violet}{l}} \\ d^{\textcolor{red}{r}}, d^{\textcolor{brown}{y}}, d^{\textcolor{blue}{b}}, e^{\textcolor{violet}{l}-} \end{array} \right\}_L$$
$$\rightarrow \left[(3, 2)_{\frac{1}{3}} = \left\{ \begin{array}{l} u^{\textcolor{red}{r}}, u^{\textcolor{brown}{y}}, u^{\textcolor{blue}{b}} \\ d^{\textcolor{red}{r}}, d^{\textcolor{brown}{y}}, d^{\textcolor{blue}{b}} \end{array} \right\} \right]_L \oplus \left[(1, 2)_{-1} = \left\{ \begin{array}{l} \nu_e^{\textcolor{violet}{l}} \\ e^{\textcolor{violet}{l}-} \end{array} \right\} \right]_L,$$

$$(4, 1, 2) = \left\{ \begin{array}{l} u^{\textcolor{red}{r}}, u^{\textcolor{brown}{y}}, u^{\textcolor{blue}{b}}, \nu_e^{\textcolor{violet}{l}} \\ d^{\textcolor{red}{r}}, d^{\textcolor{brown}{y}}, d^{\textcolor{blue}{b}}, e^{\textcolor{violet}{l}-} \end{array} \right\}_R$$
$$\rightarrow \begin{cases} \left[(3, 1)_{\frac{4}{3}} = \{ u^{\textcolor{red}{r}}, u^{\textcolor{brown}{y}}, u^{\textcolor{blue}{b}} \} \right]_R \oplus \left[(1, 1)_{-2} = \{ e^{\textcolor{violet}{l}-} \} \right]_R \\ \left[(3, 1)_{-\frac{2}{3}} = \{ d^{\textcolor{red}{r}}, d^{\textcolor{brown}{y}}, d^{\textcolor{blue}{b}} \}_R \right] \oplus \left[(1, 1)_0 = \{ \nu_e^{\textcolor{violet}{l}} \} \right]_R \end{cases}$$

Pati-Salam model

Hijerarhija i struktura fermionskih masa

- Tako:

- Na primer $-h_u \bar{u}_R (\mathbb{H}^c)^\dagger \begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix}_L$

- potiče od Pati-Salam
masenog člana

$$\begin{aligned}
 & (3^*, \mathbf{1})_{-\frac{4}{3}} \cdot (1, \mathbf{2})_{\pm 1} \cdot (3, \mathbf{2})_{+\frac{1}{3}} \\
 & \quad \uparrow \qquad \uparrow \qquad \uparrow \\
 & (3^*_{-\frac{1}{3}}, \mathbf{1})_{-\frac{1}{2}} \cdot (1_0, \mathbf{2})_{\pm \frac{1}{2}} \cdot (3_{\frac{1}{3}}, \mathbf{2})_0 \\
 & \quad \uparrow \qquad \uparrow \qquad \uparrow \\
 & (\bar{4}, \mathbf{2}, \mathbf{1}) \cdot (1, \mathbf{2}, \mathbf{2}) \cdot (4, \mathbf{1}, \mathbf{2})
 \end{aligned}$$

- A očekivana vrednost je u donjoj komponenti, tako da

- $\langle \mathbb{H} \rangle = (1, -\frac{1}{2})_{+1} = \mathbf{1}_0$ je neutralno prema $Q = I_3 + \frac{1}{2}Y$.

- Maseni član sa $(1, \mathbf{2}, \mathbf{2})$ sadrži sve fermione jedne generacije!

porodica fermiona			naboji		
1	2	3	Q	I_w	Y_w
$\begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix}_L$	$\begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix}_L$	$\begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$
$\begin{bmatrix} \nu_e \\ e^- \end{bmatrix}_L$	$\begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{bmatrix}_L$	$\begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{bmatrix}_L$	$-1/3$	$-1/2$	$+1/3$
			0	$+\frac{1}{2}$	-1
			-1	$-1/2$	-1
<hr/>			<hr/>		
u_R	c_R	t_R	$+\frac{2}{3}$	0	$+\frac{4}{3}$
d_R	s_R	b_R	$-1/3$	0	$-\frac{2}{3}$
e_R^-	μ_R^-	τ_R^-	-1	0	-2
ν_{eR}	$\nu_{\mu R}$	$\nu_{\tau R}$	0	0	0

stoga moramo da biramo
 $\langle \mathbb{H} \rangle \subset (1, \mathbf{2})_{+1}$

Pati-Salam model

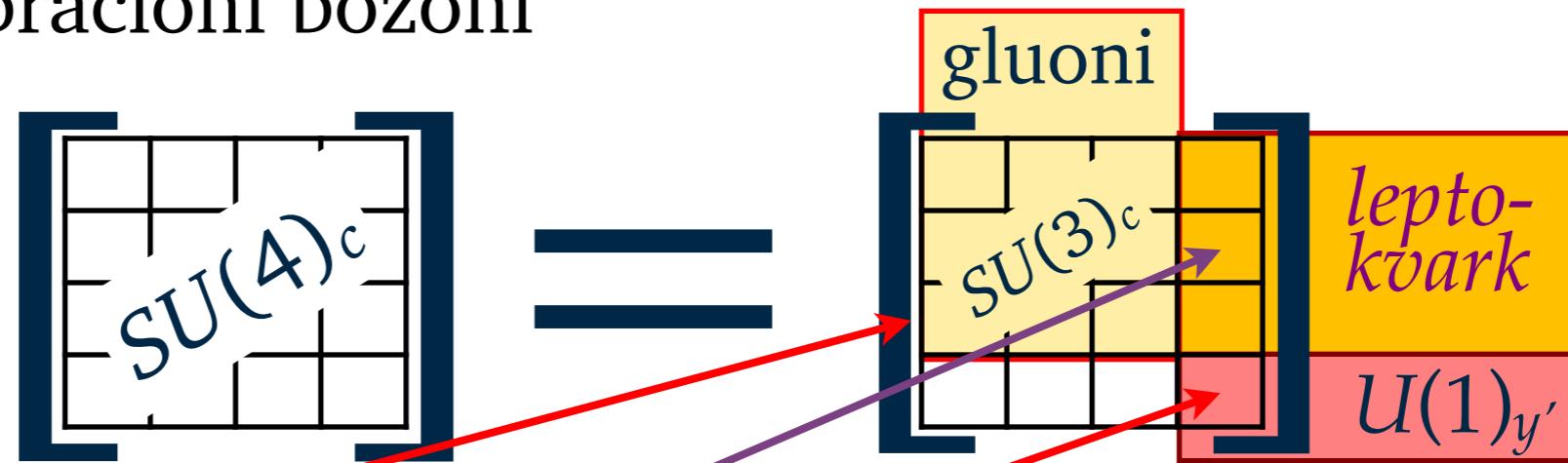
Hijerarhija i struktura fermionskih masa

- Pošto “elektroslabi” Higgs $(1, 2, 2)$ daje svim fundamentalnim fermionima $(4, 2, 1)_L \oplus (4, 1, 2)_R$ iste generacije istu masu
- ...hijerarhija masa unutar generacije mora da se dobije
 - spregom sa dodatnim Higgs-ovim poljem, koje se spreže drugačije sa raznim komponentama u $(4, 2, 1)_L$ i u $(4, 1, 2)_R$
 - kao što je $(15, 1, 2)$ i/ili $(15, 2, 2)$ i/ili $(1, 1, 2)$.
- Razloženo u $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ bazisu, ova nova Higgs-ova polja uvode (tri) nova parametra,
 - ...koji onda mogu da proizvedu strukturu u hijerarhiji masa.
- Ovo prikazuje GUT reorganizaciju problem hijerarhije masa.
 - Hijerarhija i struktura masa je ograničena GUT simetrijom
 - ...čak i kada je broj parametara jednak.
 - Ovo zahteva mnogostruko više Higgs-ovih polja.

Pati-Salam model

Posledice: raspad protona, faze

- $SU(4)_c$ kalibracioni bozoni



- ...osim gluona i $L-R$ “hiper-fotona,” $SU(4)_c$ takođe sadrži i “lepto-kvark” bozone.

- Kao što $q^{\textcolor{red}{r}} \rightarrow q^{\textcolor{blue}{b}} + g^{\textcolor{red}{r}}_{\textcolor{blue}{b}}$, tako $q^{\textcolor{red}{r}} \rightarrow \ell^{\textcolor{pink}{\ell}} + X^{\textcolor{red}{r}}_{\ell}$ omogućuje da kvarkovi predju u leptone, ali čuvajući “ $B+3L$ ” broj.

- Stoga je najjednostavniji protonski raspad

- $p^+ \rightarrow 3\nu_e + (\text{mezoni}^+, \text{foton})$

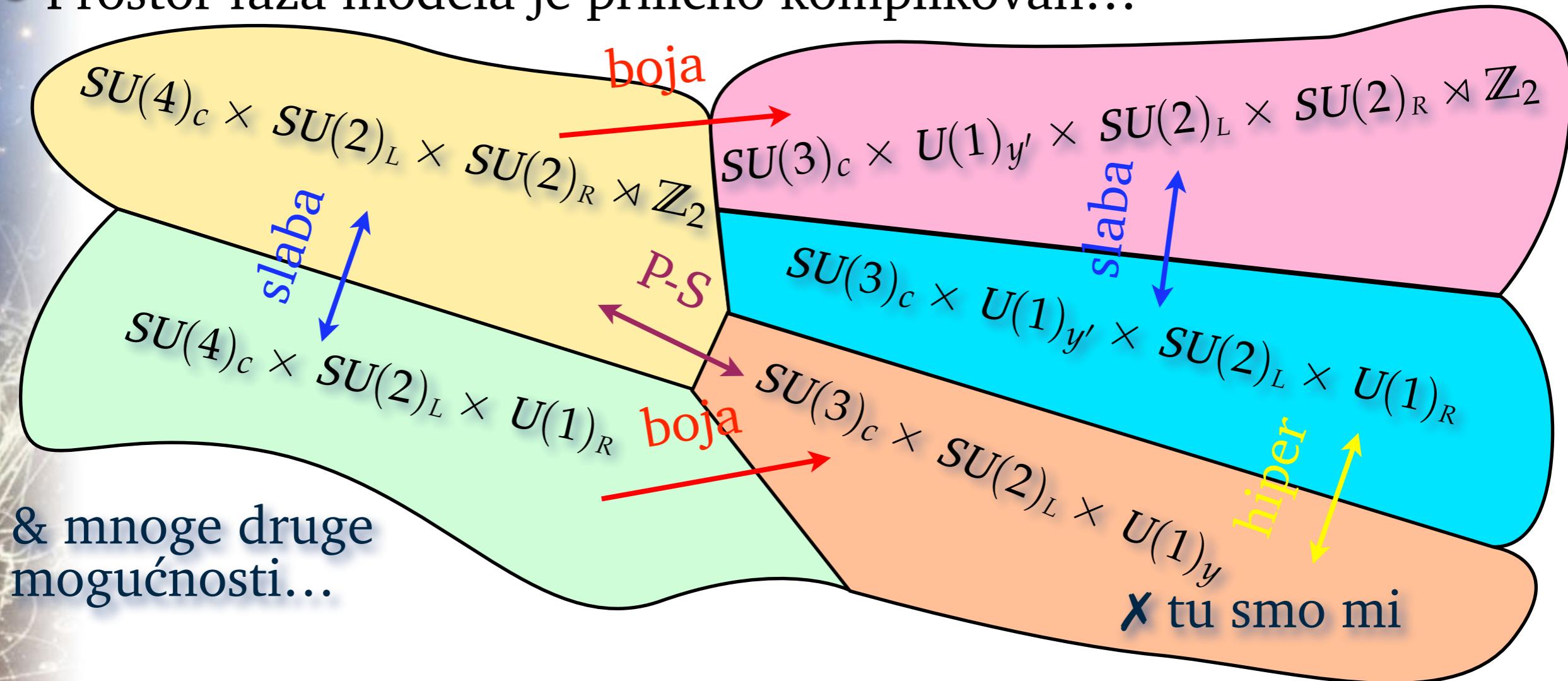
- $p^+ \rightarrow 4\nu_e + e^+ + (\text{mezoni}^0, \text{foton})$ (*mora da uključi i Higgs-ovo polje*)

p^+ -raspad još nikada nije detektovan...

Pati-Salam model

Posledice: raspad protona, faze

- Prostor faza modela je prilično komplikovan...

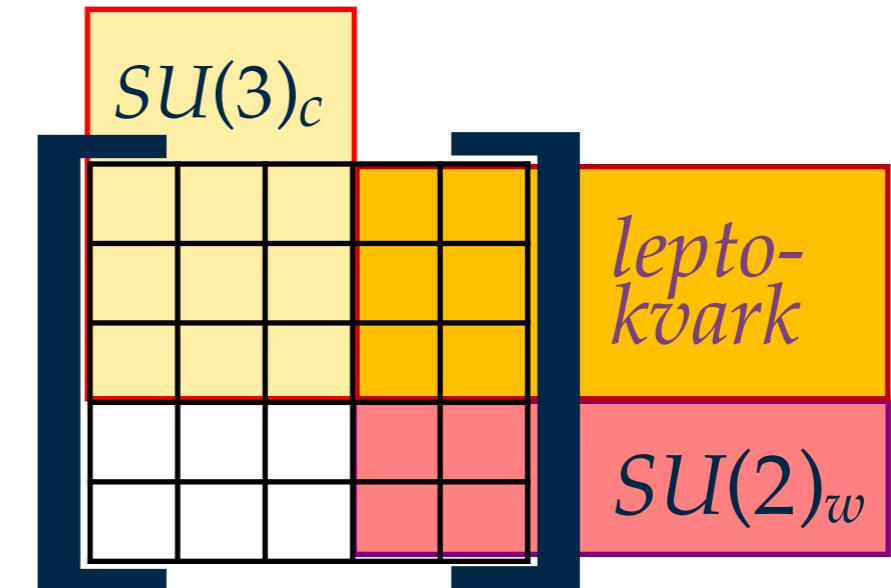
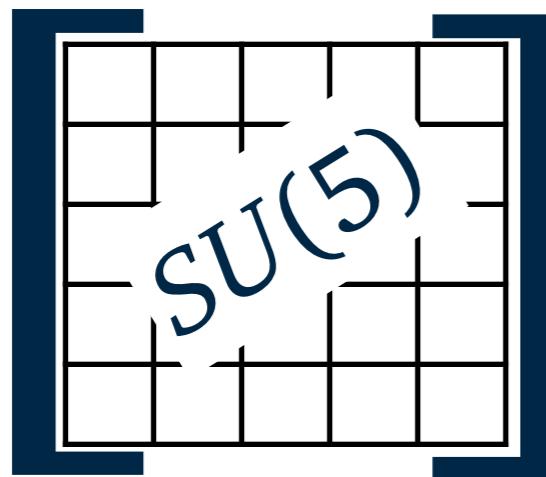


- Parametri $SU(4)_c$ i $SU(2)_L \times SU(2)_R$ interakcija ostaju nezavisni: α_c i α_w .

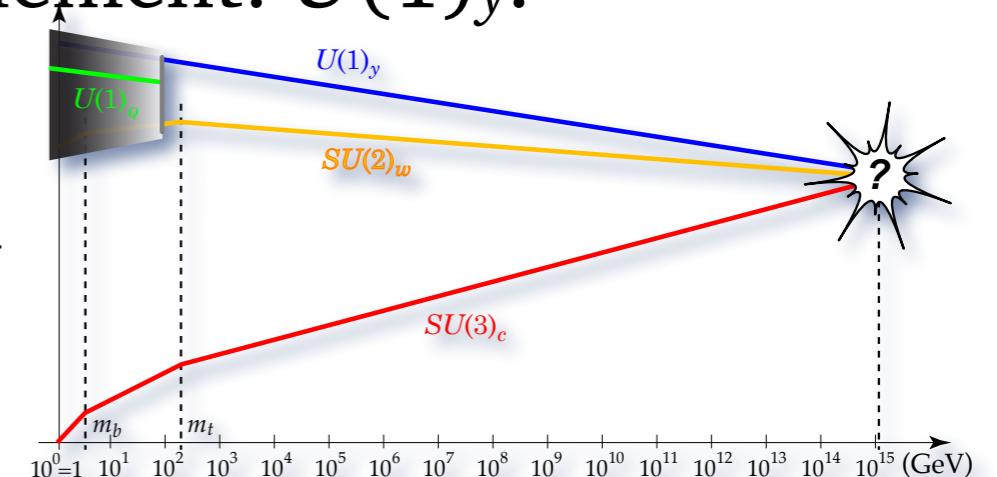
Georgi-Glashow model

Ujedinjenje kalibracionih interakcija

- Najmanja Lie-jeva grupa koja sadrži $SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_y$ je $SU(5)$.



- Pošto su generatori $SU(5)$, $SU(3)_c$ i $SU(2)_w$ bez traga, $SU(5)$ sadrži takođe jedan dijagonalan element: $U(1)_y$.
- Pošto su svi generatori ujedinjeni u istu algebru, postoji jedan jedini interakcioni parametar, α_5 .



Georgi-Glashow Model

Ujedinjenje kalibracionih interakcija

- Fermioni se uklapaju:

$$(f_{10})^{[AB]} = \begin{bmatrix} 0 & e^+ & | & u^c & u^{\check{z}} & u^p \\ & 0 & | & d^c & d^{\check{z}} & d^p \\ & & 0 & \bar{u}_p & \bar{u}_{\check{z}} & \bar{u}_c \\ & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_L, \quad (\bar{f}_{5^*})_A = \begin{bmatrix} e^- \\ \nu_e \\ \bar{d}_c \\ \bar{d}_{\check{z}} \\ \bar{d}_p \end{bmatrix}_L, \quad f_1 = (\bar{\nu}_e)_L, \quad 1 \rightarrow (1, 1)_0$$

anti-simetrični tenzor ranga 2

- koji se razlažu:

$$10 \rightarrow (3, 2)_{\frac{1}{3}} \oplus (3^*, 1)_{-\frac{4}{3}} \oplus (1, 1)_2, \quad 5^* \rightarrow (3^*, 1)_{\frac{2}{3}} \oplus (1, 2)_{-1},$$

- Lepto-kvarkovi sada čine $SU(2)_w$ -dublete:

$$\left\{ X^r \right\}, \quad \left\{ X^y \right\}, \quad \left\{ X^b \right\}; \quad \left\{ Y^r \right\}, \quad \left\{ Y^y \right\}, \quad \left\{ Y^b \right\}:$$

$$I_3(X) = +\frac{1}{2}, \quad I_2(Y) = -\frac{1}{2},$$

$$Q(X) = \frac{4}{3}, \quad Q(Y) = \frac{1}{3}.$$

The Georgi-Glashow Model

Posledice: raspad protona, faze

- SU(5) lepto-kvarkovi neposredno daju protonov raspad:

$$\begin{aligned} p^+ = (u + u + d) &\rightarrow (u + u + (\bar{X} + e^+)) \rightarrow (u + (u + \bar{X}) + e^+) \\ &\rightarrow (u + \bar{u} + e^+) \rightarrow \pi^0 + e^+ \rightarrow 2\gamma + e^+. \end{aligned}$$

- ...čuvajući “B–L” broj.
- Sa $M_X, M_Y \sim 10^{15} \text{ GeV}/c^2$, $\tau_p \sim 10^{28}\text{--}10^{29}$ godina
- Eksperimenti čekanja: $\tau_p > 6.6 \times 10^{33}$ godina
- Higgs: **24** of $SU(5)$ ima $SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_y$ -invarijantnu komponentu: diagonalni generator $U(1)_y$.
 - Ali, **24** ima i $SU(4) \times U(1)$ -invarijantnu komponentu...
 - ...pa ima bar tri faze.
- Ili, **75** of $SU(5)$ ima $SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_y$ -invarijantnu komponentu, nema $SU(4) \times U(1)$ -invarijantnu komponentu, ali ima jednu $SO(5)$ -invarijantnu komponentu...

Modeli velikog ujedinjenja

Posledice

- Ujedinjenje kvarkova i leptona predviđa raspad protona
 - ...čuvajući neki “ $\alpha B + \beta L$ ” broj.
 - “B+3L” u slučaju Pati-Salam modela
 - “B-L” u slučaju Georgi-Glashow modela
- Faze/režimi modela zavise od
 - Lie grupa velikog ujedinjavanja
 - Linci podgrupa u Lie-jevinim grupama — clasični rezultati, rekurzivno
 - Higgs-ova polja
 - Reprezentaciona razlaganja u odnosu na podgrupe
- Hijerarhija mase:
 - Tipično zahteva hijerarhiju Higgs-ovih polja
 - Jedno sa $\langle H_1 \rangle \sim 10^{15}$ GeV
 - jedno sa $\langle H_2 \rangle \sim 10^2$ GeV (elektroslaba interakcija)
 - mase iza Standardnog Modela
 - Standard Model masses

*Detalji ujedinjenja
kvarkova i leptona*

Kompleksniji modeli

Ujedinjenje generacija fundamentalnih fermiona

- Pošto P-S model ujedinjuje fermione ali ne i kalibr. polja
- A G-G model ujedinjuje kalibraciona polja ali ne i fermione
- ...treba nam veći model koji ujedinjuje i jedno i drugo.
- “Sledeći” po veličini:

$$\begin{array}{ccc} SO(10) & \xrightarrow{\hspace{1cm}} & SO(6) \quad \quad \quad SO(4) \\ & \xrightarrow{\hspace{1cm}} & SU(4)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R, \\ & & SU(5) \times U(1)', \\ \\ 16_L & \xrightarrow{\hspace{1cm}} & (4, 2, 1)_L \oplus (4^*, 1, 2)_L, \\ & \xrightarrow{\hspace{1cm}} & (10_{-1})_L \oplus (5^*_{-3})_L \oplus (1_{-5})_L. \end{array}$$

- Nema “ekstra” fermiona (osim ν_{eR}), ali ima ekstra kalibr. bozona: $45 = ((8+3+1)+6+3)+24 = ((8+3+1)+12)+20+1$
- ...ipak, još uvek ne ujedinjuje sve *tri* generacije fermiona.

Kompleksniji modeli

Ujedinjenje generacija fundamentalnih fermiona

- Najjednostavnije: dodati $SU(3)_g$ kalibr. grupu koja “rotira” bilo koju generaciju u linearu kombinaciju sve tri
 - Simetrije se narušavaju postepeno
 - Svih 48 fermiona \rightarrow tri generacije po 16
 - Narušenje (levo-desno) parnosti
 - elektroslaba \rightarrow slaba + elektrodinamika
 - $SU(3)_g$ je *ad hoc* [“za ovo”], a nema nikakvih eksperimentalnih indikacija za tako neku generacijsku *kalibr.* interakciju.
 - “Generacijska simetrija” bi, medjutim, mogla da bude
 - narušena globalna (ne lokalna) simetrija
 - simetrija koja je narušena na jako visokoj energiji
 - slučajni “ostatak” strukture neke veće GUT simetrije

Zahteva hierarhiju Higgs
polja, da reprodukuje
fermionsku hijerarhiju

Kompleksniji modeli

Druge grupe kalibracionih simetrija

- Trinifikacija (Georgi, Glashow i de Rujula)
 - Kalibraciona grupa: $SU(3)_c \times SU(3)_L \times SU(3)_R$,
 - sa fermionima $(\mathbf{3}, \bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}) \oplus (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{3}) \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{3}, \bar{\mathbf{3}}) \rightarrow \mathbf{27}$
 - i Higgs poljem $(\mathbf{1}, \mathbf{3}, \bar{\mathbf{3}})$ + možda konjugovano – (*string teorija*)
 - jedna od maksimalnih podgrupa grupe E_6 , sa fermionima u “**27**”
- *Stvarno velika*: $SO(18) \supset SO(10) \times [SO(8)]$ = “generacijska”
 - Fundamentalni fermioni: $\mathbf{256} = (\mathbf{16}, \mathbf{8}_s) \oplus (\overline{\mathbf{16}}, \mathbf{8}_c)$
 - Georgi-Bagger “no-go” teorema: “ne mogu ostati 3 lake generacije”
 - u ortogonalnim podgrupama, fermioni se uvek dele na dva
 - D.Chang, T.H., R.Mohapatra: $SO(8)$ ima trijalinost: $\langle \mathbf{8}_v, \mathbf{8}_s, \mathbf{8}_s \rangle$
 - $SO(8) \supset SO(5) \times SO(3)$: $\mathbf{8}_s \rightarrow \mathbf{8}_v = (\mathbf{5}, \mathbf{1}) \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{3})$, $\mathbf{8}_c \rightarrow \mathbf{8}_s = (\mathbf{4}, \mathbf{2})$
 - Higgs: $(\mathbf{16}, \mathbf{8}_s) \cdot \langle \mathbb{H} \rangle \cdot (\overline{\mathbf{16}}, \mathbf{8}_c) \neq 0$ za $(\mathbf{16}, (\mathbf{5}, \mathbf{1}))$,
 - masivni!
 - ...ostave $(\mathbf{16}, (\mathbf{1}, \mathbf{3}))$ bez mase, zajedno sa $3 \subset (\overline{\mathbf{16}}, (\mathbf{4}, \mathbf{2}))$
 - ogledalski!
 - ...naruše generacijsku $SO(8) \rightarrow SO(5) \times SO(3)$ kalibracionu simetriju
 - do $SU(2)$

koaka

Kompleksniji modeli

Napomene i uspomene

- Da bi ujedinili kako sve fundamentalne fermione (jedne generacije) i sve (Yang-Mills) kalibr. interakcije: $SO(10)$
 - 33 ekstra kalibracionih bozona!
 - Treba na stotine Higgs-ovih polja!
- Da ujedinimo tri generacije jednom grupom, treba $SO(18)$
 - 141 ekstra kalibracionih bozona!!
 - ogledalski fermioni!!
 - Treba na (desetine) hiljada Higgs-ovih polja!!
- Dodate strukture (Higgs-ova polja, ekstra kalibracioni bozoni)
 - su *ad hoc* [“za ovo”, nema eksperimentalnih indikacija]
 - postanu komplikovaniji i obilniji
 - ...od struktura koje navodno “objašnjavaju” — Standard Model

Kafica!

Tristan Hübsch

Department of Physics and Astronomy, Howard University, Washington DC

Department of Mathematics, University of Maryland, College Park, MD

Department of Physics, Faculty of Natural Sciences, Novi Sad, Serbia

<https://tristan.nfshost.com/>