TEORIJE POENOTENJA

Borut Bajc

Institut J. Stefan, Ljubljana

O čem bo govora

- Standardni model
- Teoretska vprašanja v SM
- Umeritvene interakcije v SM
- Poenotenje
- Magnetni monopoli
- Razpad protona
- Mase fermionov
- Zaključek

Standardni model (SM)

Sestavljajo tri tipi delcev, ki se razlikujejo po spinu:

- fermioni (spin 1/2), to so
  kvarki q (u, d, $\ldots$), interagirajo preko g
  leptoni l (e, ν_e, $\ldots$), ne interagirajo preko g
- umeritveni bozoni (spin 1), posredniki interakcij
  foton γ (elektrodinamika)
  bozoni W (šibka interakcija)
  gluoni g (močna interakcija - kromodinamika)
- Higgs (spin 0), da maso vsem osnovnim delcem
  H (pravkar odkrit)

SM izredno natančno (tudi do ~ 10 decimalk) opisuje pojave do energij $\lesssim 1$ TeV

O višjih energijah vemo malo (špekulacije)

Fenomenološke težave standardnega modela:

- v SM nevtrini brezmasni(dober približek), ampak v resnici imajo zelo majhno neničelno maso
- ni kandidata za temno snov

Teoretska vprašanja v standardnem modelu

- Zakaj 3 interakcije?
- Zakaj sploh dve skupini fermionov q in l? Med sabo se ne poznata (ne interagirata)
- Zakaj so električni naboji kvantizirani?
- Zakaj so mase nabitih fermionov dosti večje od mas nevtrinov?

$$m_{q,l} \gg m_\nu$$

- ...

Umeritvene interakcije v SM

Pri velikih razdaljah ($r \gg 1$ fm oz. $E \ll$ GeV) te interakcije zelo različne med sabo.

Poglejmo npr. kako se obnašata dva mirujoča delca, nabita na ustrezno interakcijo:

- γ (1 foton)

$$F_1(r) \sim \frac{1}{r^2}$$

- W (3 šibki bozoni)

$$F_2(r) \sim \exp\left(-m_W r\right)$$

- g (8 gluonov)

$$F_3(r) \sim r$$

Kaj pa pri majhnih razdaljah ($r \ll 1$ fm oz. $E \gg$ GeV) ?

Vse tri interakcije se obnašajo dokaj podobno:

$$F_i \sim \frac{e_i^2(r)}{r^2}$$

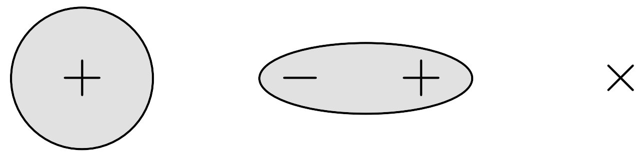
Drseče sklopitvene konstante se spreminjajo z razdaljo oz. energijo:

$$e_i(E) \sim \frac{e_i(E_0)}{1 + b_i \log\left(E/E_0\right)}$$

$b_i \ldots$ beta funkcija

$E \sim 1/r$

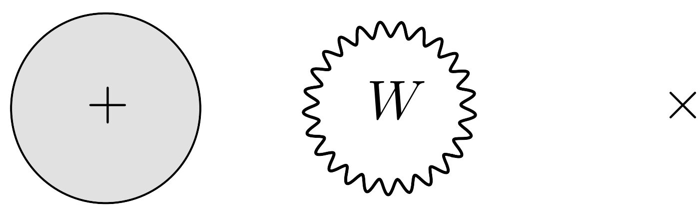
Kako to razumemo?



Na razdalji $r \sim 1/E$ lahko "vidimo" samo virtualne delce mase $\lesssim E$

V primeru električnega naboja je to vse. Vsi (nabiti) osnovni delci prispevajo *negativno* k b

V primeru e_2 in e_3 vplivajo še umeritveni bozoni:



Ti prispevajo *pozitivno* k b

$$e_i(E) \sim \frac{e_i(E_0)}{1 + b_i \log\left(E/E_0\right)}$$

Ali se večajo ali manjšajo z energijo, odvisno od predznaka b_i:

$b_1 < 0$ (senčenje) , $\quad e_1$ se z energijo veča

$b_{2,3} > 0$ (prineslo Nobelovo nagrado) , $\quad e_{2,3}$ se manjšata

Ker $b_3 > b_2$, se e_3 manjša hitreje kot e_2

Zanimivo, ker pri $E = m_W$ imamo izmerjene vrednosti:

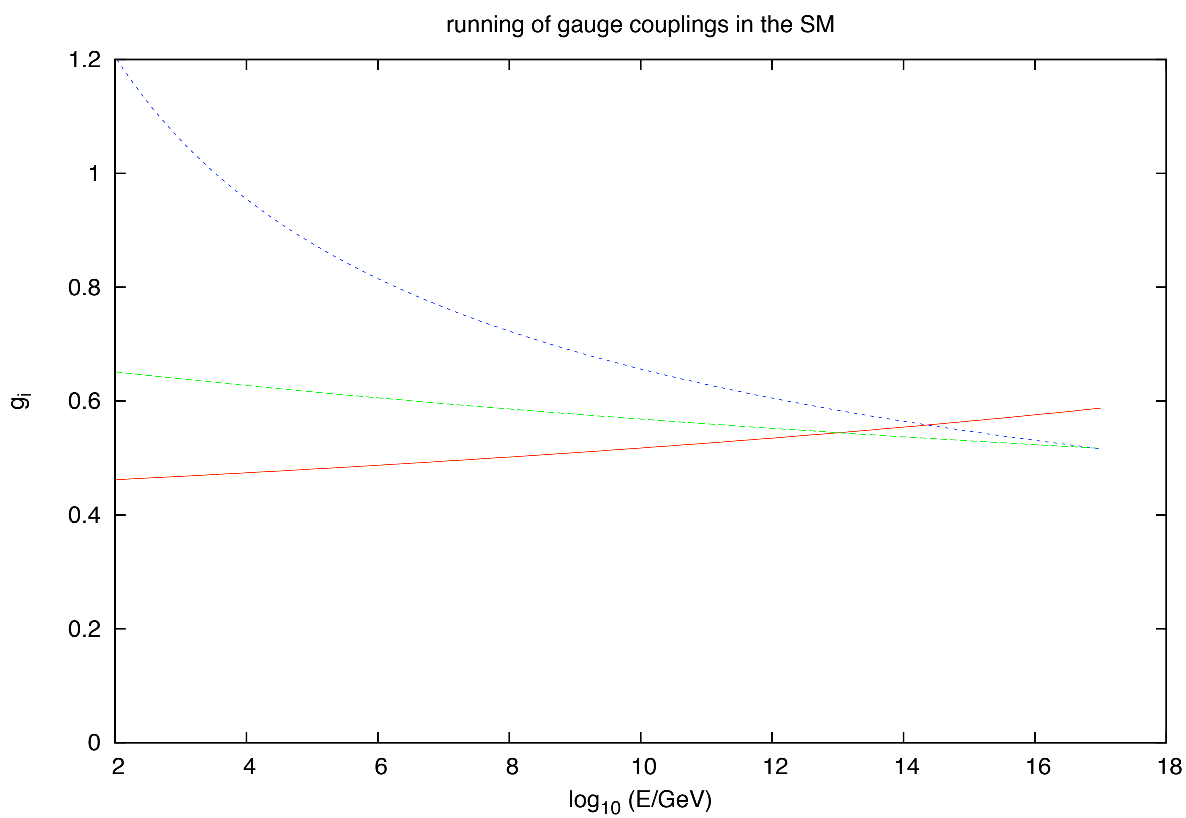
$$e_3(m_W) : e_2(m_W) : e_1(m_W) \sim \sqrt{6} : \sqrt{3} : 1$$

Ali lahko pri visoki energiji $E \gg m_W$ postanejo enaki?

$$e_1(E) = e_2(E) = e_3(E)$$

In če ja, pri kakšni energiji E?

V SM se sklopitvene konstante skoraj ujemajo pri visoki energiji, $M_{GUT} \approx 10^{16}$ GeV



Poenotenje

Kakšen naj bi bil razlog, da se vse tri sklopitvene konstante ujemajo pri $E \approx 10^{16}$ GeV?

Smiselen fizikalen razlog je poenotenje (GUT - grand unified theory): vse znane interakcije so tam enake:

$$\underbrace{\gamma}_{1}\,,\ \underbrace{W}_{3}\,,\ \underbrace{g}_{8}\ \rightarrow\ (\gamma, W, g, X)$$

$1 + 3 + 8 = 12$

Koliko je teh novih umeritvenih bozonov X?

Lahko različno (odvisno od modela poenotenja), vendar število X-ov ni poljubno:

$$
\begin{array}{rcll}
12, 23, 36, \ldots & (N^2-1) - 12 \;\; , \;\; N \geq 5 & \rightarrow & SU(N) \\
33, 43, 54, \ldots & N(N-1)/2 - 12 \;\; , \;\; N \geq 10 & \rightarrow & SO(N) \\
66 & 78 - 12 & \rightarrow & E_6
\end{array}
$$

Zakaj jih ne vidimo?

Ker je njihova masa ogromna $m_X \sim M_{GUT} \sim 10^{16}$ GeV

Tudi snov (fermioni) se poenoti:

$$q_i \ , \ l_j \ \rightarrow \ (q_i, l_j, f_k)$$

Kaj to pomeni? Pri visoki energiji ni razlike med njimi, so v bistvu eden in isti delec v različnih stanjih

Možni tudi nove prostostne stopnje, stanja (f_k)

Tudi ta nova stanja so tipično zelo težka

Vse kar je v SM: $m \sim m_W$

Vse kar je v GUT in ne v SM: $m \sim M_{GUT}$

Za natančno poenotenje potrebna nova stanja.

Kakšna? Popularno je SM supersimetrizirat:

fermion $\leftrightarrow$ bozon

V SM

vsakemu fermionu (spin 1/2) SM dodamo bozon (spin 0)

vsakemu bozonu (spin 0 ali 1) dodamo fermion (spin 1/2)

Npr:

elektron ($s = 1/2$) $\to$ selektron ($s = 0$)

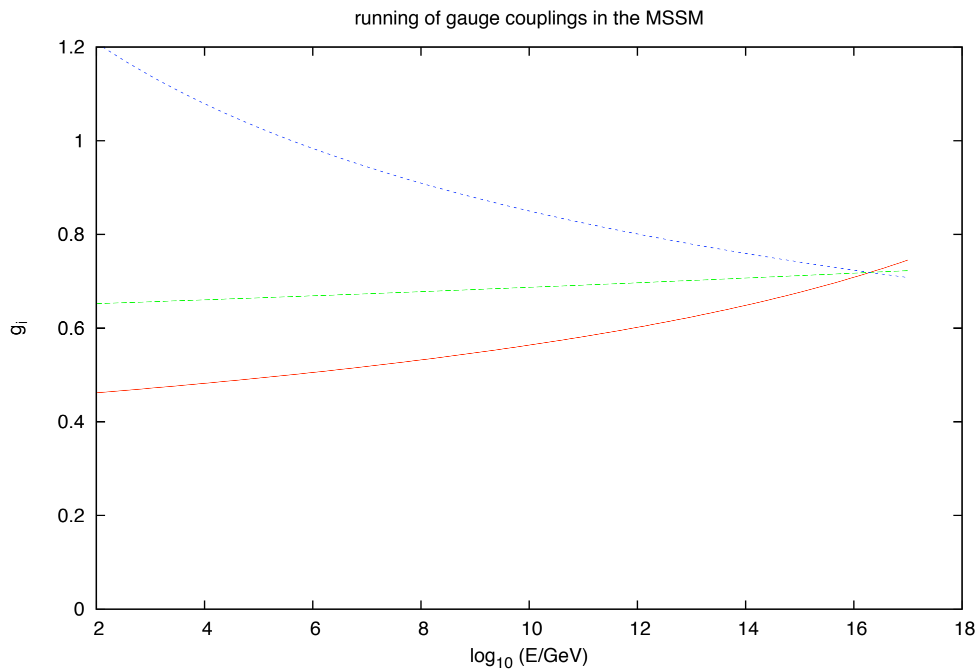
Higgs ($s = 0$) $\to$ Higgsino ($s = 1/2$)

W ($s = 1$) $\to$ wino ($s = 1/2$)

Tako novo teorijo imenujemo MSSM (minimalen supersimetrični standardni model)

Mase superpartnerjev $\gtrsim 1$ TeV

Če damo MSSM na ≈ 1 TeV: poenotenje pri $M_{GUT} \approx 10^{16}$ GeV



Rešitev ni enolična, ampak dovolj za motivirat supersimetrijo

Magnetni monopoli

Zakaj so električni naboji kvantizirani?

$$\begin{aligned} e_1(u) &= \frac{2}{3}e \\ e_1(d) &= -\frac{1}{3}e \\ e_1(e) &= -e \\ &\ldots \end{aligned}$$

V naravi poznamo samo magnetne dipole (vedno skupaj severni *in* južni pol)

Dirac že davno nazaj dokazal:

Če obstaja en sam magnetni monopol (samo severni pol ali samo južni pol) v vesolju z magnetnim nabojem e_M, potem velja za poljuben električni naboj e_E v vesolju

$$e_M e_E = n 2\pi$$

$\rightarrow$ e_E kvantiziran!

V SM je problem, ker ima električna interakcija en sam foton: ta ne more spremenit delcev (enega v drugega), elektron izseva foton, a ostane vedno elektron.

V primeru šibke in močne interakcije stvar različna: trije W in osem g meša delce:

$$
\begin{aligned}
e &\rightarrow W\nu \\
u_{plav} &\rightarrow g u_{zelen}
\end{aligned}
$$

V GUT pa imamo več umeritvenih bozonov, tako da recimo

$$q \rightarrow X l$$

Tako je npr. v najenostavnejši teoriji poenotenja

$$(q_i, l_j)$$

in torej velja da se vsota nabojev v isti upodobitvi izniči:

$$\sum_{i=1}^{3} e_E(q_i) + \sum_{j=1}^{2} e_E(l_j) = 0$$

Bolj natančno: iz

$$(\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3, e, \nu)$$

dobimo ($e_E(\nu) = 0$)

$$e_E(\bar{d}) = -\frac{1}{3} e_E(e)$$

Dirac: če obstaja magnetni monopol $\rightarrow$ električni naboji kvantizirani

GUT: naboji kvantizirani

Ali odtod sledi tudi obratno, da obstajajo magnetni monopoli?

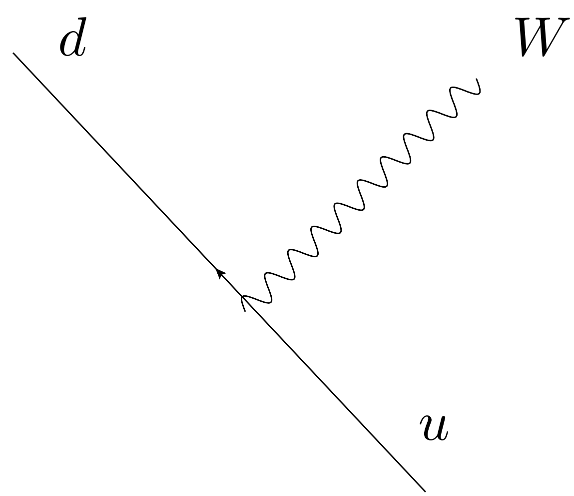
JA

Lahko sestavimo tako (topološko netrivialno) konfiguracijo (rešitev enačb gibanja) ki ima monopolen magnetni naboj

Zakaj jih ne vidimo: monopoli zelo težki $\sim M_{GUT} \sim 10^{16}$ GeV

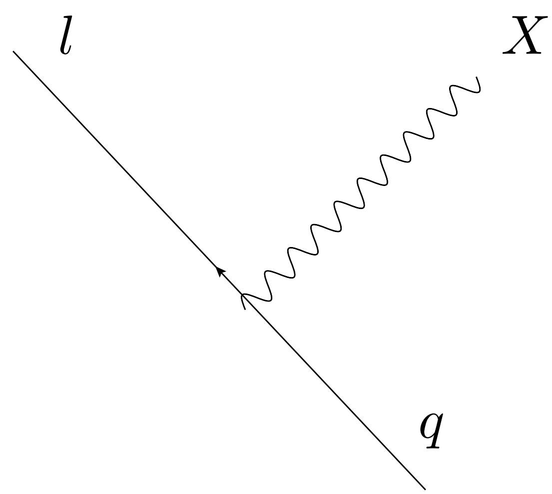
Razpad protona

V SM sta u in d povezana preko izseva W

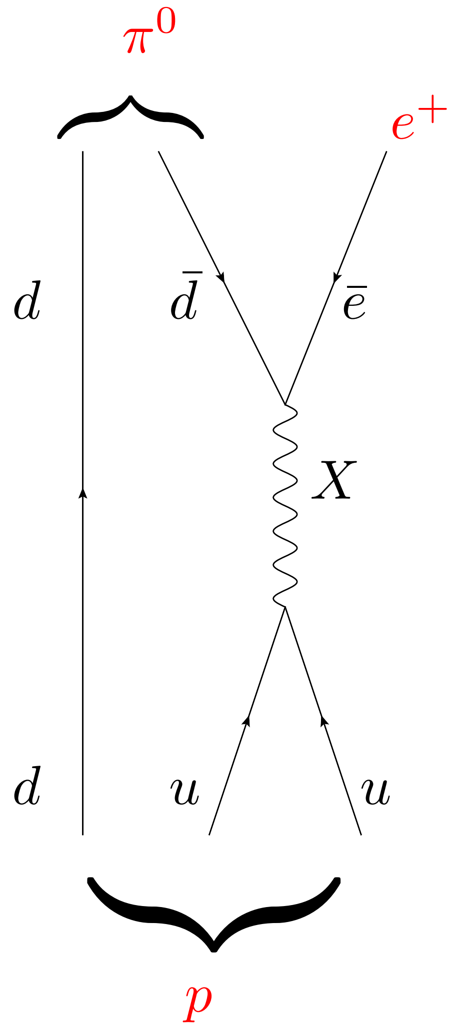


$u \to dW$

Podobno v GUT q in l povezana preko novega težkega umeritvenega bozona X

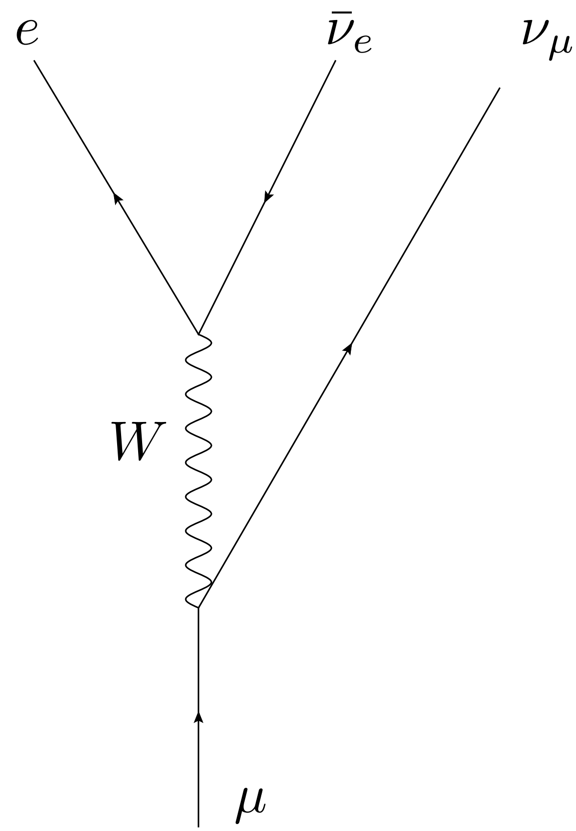


$q \to lX$



$p \to \pi^0 e^+$

Razpadni čas ocenimo podobno kot za razpad muona:



$\mu \to e \nu_\mu \bar{\nu}_e$

To znamo izračunat:

$$\tau(\mu) = c\frac{m_W^4}{m_\mu^5}$$

V poenotenju podobno

$$\tau(p) = c\frac{{m_X}^4}{m_p^5}$$

Iz $\tau_{exp}(\mu) \sim 10^{-6}$ s dobimo oceno ($m_W \sim 10^2$ GeV, $m_\mu \sim 10^{-1}$ GeV, $m_p \sim 1$ GeV, $m_X \sim M_{GUT} \sim 10^{16}$ GeV)

$$\tau(p) = \left(\frac{m_X}{m_W}\right)^4 \left(\frac{m_\mu}{m_p}\right)^5 \tau(\mu) \sim 10^{36} \;\text{ let}$$

Ali lahko take velike čase sploh merimo?

Podobno kot določit povprečno življenjsko dobo npr. v Sloveniji:

Če je ta npr. 80 let, ni treba čakat 80 let da jo določimo. Potrebno imet dovolj ljudi.

$\rightarrow$ rabimo dovolj veliko število protonov.

SuperKamiokande (Japonska), 50000 ton vode:

$$\tau_{exp}(p) > 10^{34} \text{ let}$$

Mase fermionov

poenotenje, vsi prihajajo iz iste upodobitve

$$
\begin{array}{lcll}
\text{1. generacija} & : & m_e \sim m_d & (0.5 \text{ MeV} \sim 1.3 \text{ MeV}) \\
\text{2. generacija} & : & m_\mu \sim m_s & (103 \text{ MeV} \sim 55 \text{ MeV}) \\
\text{3. generacija} & : & m_\tau \sim m_b & (1.7 \text{ GeV} \sim 2.9 \text{ GeV})
\end{array}
$$

To približno res, sploh ni tako slabo. V SM bi lahko bile v principu tudi za mnogo redov velikosti različne

V resnici relacije veljajo na skali poenotenja. Tako kot e tudi mase drseče.

Ko to upoštevamo je 3. generacija dobra na 30% (prvi dve pa še vedno za faktor 2)

Zakaj so mase nevtrinov $\ll$ mas nabitih fermionov?

$$0.1 \ \text{eV} \ll 10^6 \ \text{eV}$$

$$\begin{array}{lcl} q & : & u_L \ , \ d_L \ , \ u_R \ , \ d_R \\ l & : & e_L \ , \ \nu_L \ , \ e_R \ , \ \nu_R \end{array}$$

Desnoročnega nevtrina ν_R ni v SM!

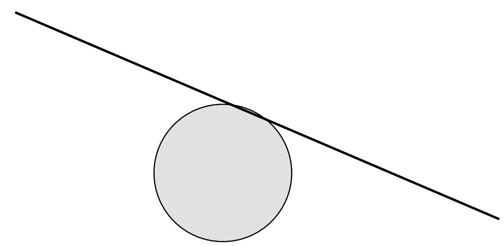
Najbolj obetajoče teorije poenotenja *napovejo* obstoj ν_R.

Vsi delci SM morajo imeti maso $\propto m_W$ ($\propto H$, vse mase osnovnih delcev prihajajo iz Higgsovega polja!)

ν_R pa lahko ima poljubno veliko maso m_{ν_R}. Ker interagira z ν_L so končne mase

$$m_\nu^{lahek} \sim m_W^2/m_{\nu_R} \quad , \quad m_\nu^{tezek} \sim m_{\nu_R}$$

gugalnični mehanizem:



Če torej $\sim m_W \ll m_{\nu_R} (\sim m_X)$

Mase nevtrinov pravi red velikosti

$\rightarrow m_{\text{nevtrino}} \ll m_{\text{nabiti delci}}$

Zaključek

- Smiselno poenotenje je lahko samo pri
  $E \gtrsim 10^{16}$ GeV (protonski razpad)
  in
  $E \lesssim 10^{18}$ GeV (Planckova masa, gravitacijski popravki veliki)
  In to se res zgodi (poenotenje drsečih sklopitvenih konstant)!
- Posledica je obstoj magnetnih monopolov in protonski razpad.
- Razloži generično zakaj
  $m_q \sim m_l$
  $m_\nu \ll m_{q,l}$
- Ob napovedi gugalničnega mehanizma teorije poenotenja napovejo obstoj kandidata za *temno snov*.
- Realistični modeli opisujejo naš svet natančno (= namesto $\sim$)