

HIGGSOLÓGIA V PREDVEČER LHC

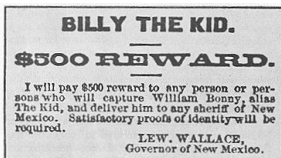
Mikuláš Gintner
Katedra fyziky ŽU

seminár na Ústave fyziky v Opave

17.4.2008

PRELÚDIUM

Higgsov bozón - najhl'adanejšia častica dnešných dní!



- Prečo ho hl'adáme?
- Ako sme pokročili?
- Čo ak ho nenájdem?

LHC = najväčšie a najdrahšie experimentálne zariadenie sveta
(Leto 2008?)

OBSAH

- 1 HIGGS V ŠTANDARDNOM MODELI
- 2 EXPERIMENTÁLNE LIMITY PRE SM HIGGSA
- 3 AK (NE)OBJAVÍME SM HIGGSA
- 4 ZHRNUTIE

OBSAH

- 1 HIGGS V ŠTANDARDNOM MODELI
- 2 Experimentálne limity pre SM Higgssa
- 3 Ak (ne)objavíme SM Higgssa
- 4 Zhrnutie

FYZIKA MIKROSVETA

- **formalizmus:**
QTP = QM + ŠTR + bodové častice (interakcie)
- **experiment:**
zrážky častíc \longrightarrow pozorovanie produktov

FYZIKA MIKROSVETA

- **formalizmus:**
QTP = QM + ŠTR + bodové častice (interakcie)
- **experiment:**
zrážky častíc \longrightarrow pozorovanie produktov

DÁTA \longrightarrow SYMETRIE \longrightarrow TEÓRIA

ŠTANDARDNÝ MODEL

QTP pre interakcie

- 1 elmag
- 2 silné
- 3 slabé

ŠTANDARDNÝ MODEL

QTP pre interakcie

- 1 elmag
- 2 silné
- 3 slabé

reprezentácia	spin	častica
skalár	0	Higgs ?
R,L-spinor	1/2	leptóny, kvarky
4-vektor	1	fotón, gluón, W^\pm , Z

ŠTANDARDNÝ MODEL

QTP pre interakcie

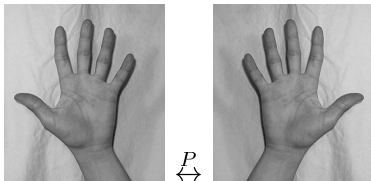
- 1 elmag
- 2 silné
- 3 slabé

reprezentácia	spin	častica
skalár	0	Higgs ?
R,L-spinor	1/2	leptóny, kvarky
4-vektor	1	fotón, gluón, W^\pm , Z

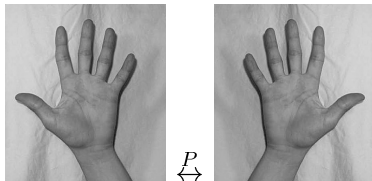
verifikovaná platnosť:

- LEP: e^+e^- , $\sqrt{s} = 209$ GeV
- Tevatron: $p\bar{p}$, $\sqrt{s} = 2$ TeV

PARITA

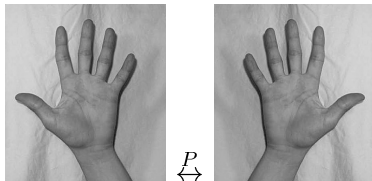


PARITA



ľavý fermión $\overset{P}{\leftrightarrow}$ pravý fermión

PARITA



ľavý fermión $\overset{P}{\leftrightarrow}$ pravý fermión

skalár $\overset{P}{\rightarrow}$ \pm skalár
 4-vektor $\overset{P}{\rightarrow}$ $(1, \mp 1, \mp 1, \mp 1)$ 4-vektor

NARUŠENIE PARITY

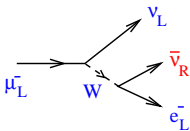
interakcia	P je symetria
elmag	áno
silná	áno
slabá	nie

slabo interagujú len **ľavé fermióny** a **pravé antifermióny** (Lee, Yang, Wu)

NARUŠENIE PARITY

interakcia	P je symetria
elmag	áno
silná	áno
slabá	nie

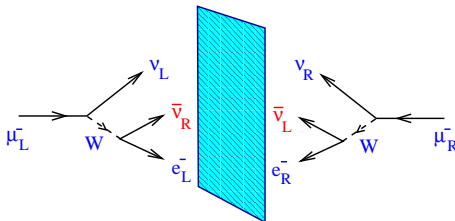
slabo interagujú len **ľavé fermióny** a **pravé antifermióny** (Lee, Yang, Wu)



NARUŠENIE PARITY

interakcia	P je symetria
elmag	áno
silná	áno
slabá	nie

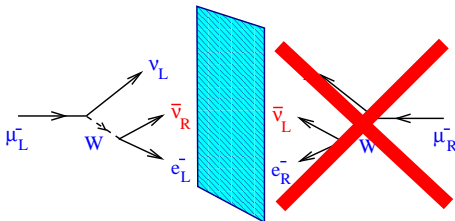
slabo interagujú len **ľavé fermióny** a **pravé antifermióny** (Lee, Yang, Wu)



NARUŠENIE PARITY

interakcia	P je symetria
elmag	áno
silná	áno
slabá	nie

slabo interagujú len **ľavé fermióny** a **pravé antifermióny** (Lee, Yang, Wu)



INTERNÉ SYMETRIE

- interakcie fermiónov (dáta):

$$f_1 \rightarrow f_2 + f_3 \quad , \quad f_1 + f_2 \rightarrow f_3 + f_4 \quad , \dots$$

INTERNÉ SYMETRIE

- interakcie fermiónov (dáta):

$$f_1 \rightarrow f_2 + f_3 \quad , \quad f_1 + f_2 \rightarrow f_3 + f_4 \quad , \dots$$

- symetrie:

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

INTERNÉ SYMETRIE

- interakcie fermiónov (dáta):

$$f_1 \rightarrow f_2 + f_3 \quad , \quad f_1 + f_2 \rightarrow f_3 + f_4 \quad , \dots$$

- symetrie:

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

- Lagrangián (teória):

$$\mathcal{L}_f = K(f) + aI_a(f) + \frac{b}{\Lambda}I_b(f) + \dots$$

INTERNÉ SYMETRIE

- interakcie fermiónov (dáta):

$$f_1 \rightarrow f_2 + f_3 \quad , \quad f_1 + f_2 \rightarrow f_3 + f_4 \quad , \dots$$

- symetrie:

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

- Lagrangián (teória):

$$\mathcal{L}_f = K(f) + aI_a(f) + \frac{b}{\Lambda}I_b(f) + \dots$$

platnosť: $E \ll \Lambda$

presnosť \propto počet členov

Fermi

KALIBRAČNÁ SYMETRIA

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

globálna \longrightarrow lokálna



KALIBRAČNÁ SYMETRIA

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

globálna \longrightarrow lokálna



- kalibračné bozóny (fotón, gluóny, W^\pm , Z)

KALIBRAČNÁ SYMETRIA

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

globálna \longrightarrow lokálna



- kalibračné bozóny (fotón, gluóny, W^\pm , Z)
- tvar interakcií (f-KB, KB-KB)

KALIBRAČNÁ SYMETRIA

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

globálna \longrightarrow lokálna



- kalibračné bozóny (fotón, gluóny, W^\pm , Z)
- tvar interakcií (f-KB, KB-KB)
- konečný \mathcal{L} pre $\forall E$ a 'ubovoľnú presnosť'

$$\mathcal{L} = K(f) + K(\text{KB}) + gI(f, \text{KB}) + J(\text{KB}, \text{KB}; g)$$

PROBLÉM S HMOTNOSŤAMI

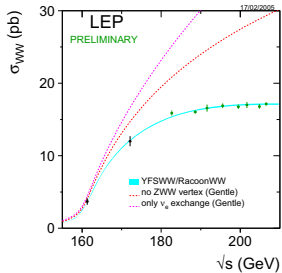
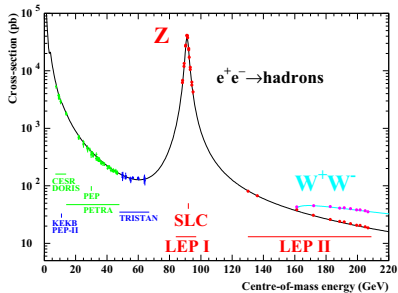
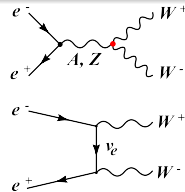
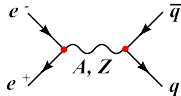
- kalibračná symetria $\Rightarrow \forall$ KB bez hmotnosti
- KS + narušenie parity $\Rightarrow \forall$ fermióny bez hmotnosti

PROBLÉM S HMOTNOSŤAMI

- kalibračná symetria $\Rightarrow \forall$ KB bez hmotnosti
- KS + narušenie parity $\Rightarrow \forall$ fermióny bez hmotnosti

$\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L} + \text{hmotnostné členy} \Rightarrow \text{platnosť } E < \mathcal{O}(1) \text{ TeV}$

TESTOVANIE KALIBRAČNEJ SYMETRIE

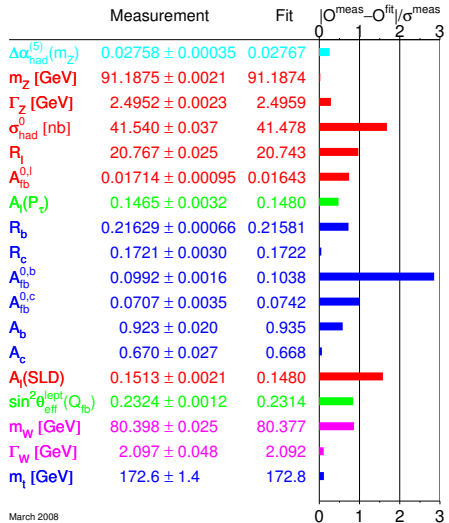


FITOVANIE SM 2008

Experimentálne ohraničenia SM: (marec 2008)

fitované hodnoty parametrov ŠM
 $\vec{p} = (p_1, \dots, p_{18})$ minimalizujú
 funkciu:

$$\chi^2(\vec{p}) = \sum_{k=1}^n \frac{[X_k^{(exp)} - X_k^{(th)}(\vec{p})]^2}{\sigma_k^2}$$



March 2008

SPONTÁNNE NARUŠENIE SYMETRIE

G je symmetriou $\mathcal{L}(\psi_1, \psi_2)$:

$$\left. \begin{array}{l} U|0\rangle = |0\rangle, \forall U \in G \\ U : \psi_1 \rightarrow \psi_2 \end{array} \right\} \Rightarrow m_1 = m_2$$

SPONTÁNNE NARUŠENIE SYMETRIE

G je symmetriou $\mathcal{L}(\psi_1, \psi_2)$:

$$\left. \begin{array}{l} U|0\rangle = |0\rangle, \forall U \in G \\ U : \psi_1 \rightarrow \psi_2 \end{array} \right\} \Rightarrow m_1 = m_2$$

$$\left. \begin{array}{l} U \in G : \psi_1 \rightarrow \psi_2 \\ m_1 \neq m_2 \end{array} \right\} \Rightarrow U|0\rangle \neq |0\rangle$$

SPONTÁNNE NARUŠENIE SYMETRIE

G je symetriou $\mathcal{L}(\psi_1, \psi_2)$:

$$\left. \begin{array}{l} U|0\rangle = |0\rangle, \forall U \in G \\ U : \psi_1 \rightarrow \psi_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{m_1 = m_2}$$

$$\left. \begin{array}{l} U \in G : \psi_1 \rightarrow \psi_2 \\ m_1 \neq m_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{U|0\rangle \neq |0\rangle}$$

$SU(2)_L$ je symetriou SM:

$$\left. \begin{array}{l} \left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e \end{array} \right) \dots SU(2)_L \text{ doublet} \\ m_e \neq m_{\nu_e} \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{\text{SM vákuum nemá } SU(2)_L \text{ symetriu}}$$

HIGGSOV BOZÓN

$$\boxed{\text{symetria } \mathcal{L}(f, \text{KB})\text{-vákua}} = \boxed{\text{symetria } \mathcal{L}(f, \text{KB})}$$

HIGGSOV BOZÓN

$$\boxed{\text{symetria } \mathcal{L}(f, \text{KB})\text{-vákua}} = \boxed{\text{symetria } \mathcal{L}(f, \text{KB})}$$

$$\mathcal{L}(f, \text{KB}) \rightarrow \mathcal{L}(f, \text{KB}) + \mathcal{L}_H(h, \pi_1, \pi_2, \pi_3, f, \text{KB})$$

$$\boxed{\text{symetria } \mathcal{L}(f, \text{KB})} = \boxed{\text{symetria } \mathcal{L}_H} > \boxed{\text{symetria } \mathcal{L}_H\text{-vákua}}$$

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$$

HIGGSOV BOZÓN

$$\boxed{\text{symetria } \mathcal{L}(f, \text{KB})\text{-vákua}} = \boxed{\text{symetria } \mathcal{L}(f, \text{KB})}$$

$$\mathcal{L}(f, \text{KB}) \rightarrow \mathcal{L}(f, \text{KB}) + \mathcal{L}_H(h, \pi_1, \pi_2, \pi_3, f, \text{KB})$$

$$\boxed{\text{symetria } \mathcal{L}(f, \text{KB})} = \boxed{\text{symetria } \mathcal{L}_H} > \boxed{\text{symetria } \mathcal{L}_H\text{-vákua}}$$

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$$



- hmotnosti pre f , KB
- π_1, π_2, π_3 sú nefyzikálne
- h ... **Higgsov bozón**, $m_H > 0$ je voľný parameter SM
- platnosť pre $\forall E$, ak $m_H < 1$ TeV

OBSAH

- 1 Higgs v Štandardnom modeli
- 2 EXPERIMENTÁLNE LIMITY PRE SM HIGGSA
- 3 Ak (ne)objavíme SM Higgsa
- 4 Zhrnutie

HMOTNOSŤ HIGGSOVHO BOZÓNU

teória nepredpovedá m_H
experiment zatiaľ Higgso neobjavil

priamy dolný limit:

$$m_H > 114 \text{ GeV}$$

nepriamy limit:

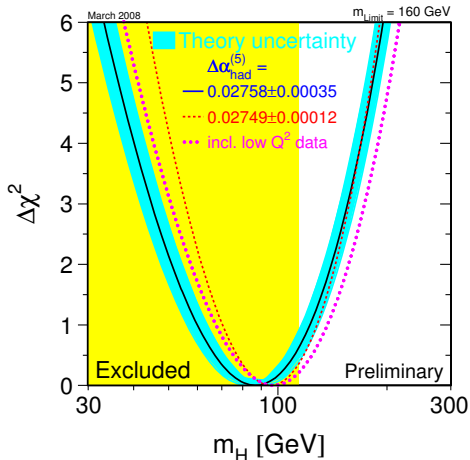
$$m_H = 87^{+36}_{-27} \text{ GeV}$$

priamy + nepriamy:

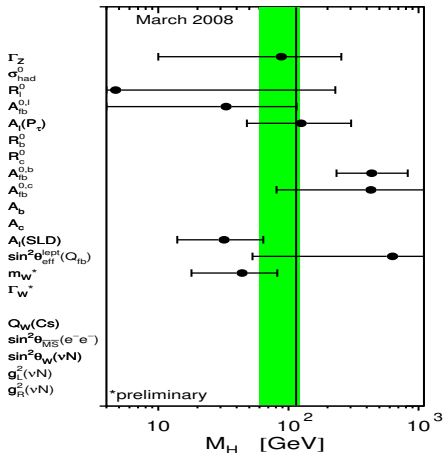
$$m_H < 160 \text{ GeV} \quad @ 95\% \text{ C.L.}$$

“teoretický” limit:

$$125 \text{ GeV} < m_H < 175 \text{ GeV}$$



m_H LIMITS FROM VARIOUS OBSERVABLES



Higgs mass values extracted from different EW observables. The average is shown as a green band.

- fit of **all** SM observables: **15%**
- fit of the SM observables **most sensitive to M_H** : **< 2%**

[P.Gambino, Proceedings of the EPS 2007
 Conference at Manchester]

LEP Electroweak Working Group, <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/plots/winter2007/>

m_H VS. MASS OF TOP QUARK

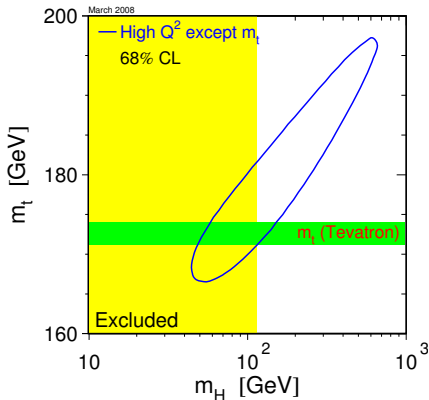
direct CDF/D0 measurement:

$$m_t = 172.6 \pm 1.4 \text{ GeV}$$

EW precision data (w/o direct
Tevatron measurements):

$$m_t = 178.9^{+11.7}_{-8.6} \text{ GeV}$$

the overall SM fit down to 15%
($\chi^2/\text{dof} = 18/13$)



LEP Electroweak Working Group, <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/plots/winter2008/>

m_H vs. MASS OF W BOSON

direct measurement:

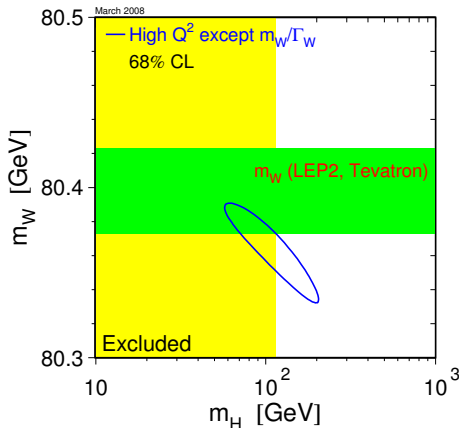
$$M_W^{world} = 80.398 \pm 0.025 \text{ GeV}$$

EW precision data (Z-peak + m_t
measurements):

$$M_W = 80.361 \pm 0.020 \text{ GeV}$$



$m_H <$ direct limit



LEP Electroweak Working Group, <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/plots/winter2008/>

m_H vs. $\sin^2 \theta_W$

2 most precise measurements of $\sin^2 \theta_W$ differ by more than 3σ :

- $A_{FB}^{LEP}(b\bar{b}) \rightarrow$ large $\sin^2 \theta_W \rightarrow$ heavy Higgs:

$$m_H = 420_{-190}^{+420} \text{ GeV}$$

- $A_{LR}^{SLD}(lepton) \approx A_{LR}^{LEP}(lepton) \rightarrow$ low $\sin^2 \theta_W \rightarrow$ light Higgs:

$$m_H = 31_{-19}^{+33} \text{ GeV}$$

OBSAH

- 1 Higgs v Štandardnom modeli
- 2 Experimentálne limity pre SM Higgso
- 3 AK (NE)OBJAVÍME SM HIGGSA**
- 4 Zhrnutie

AK OBJAVÍME SM HIGGSA

SM experimentálne overený po $E \approx 200$ GeV
“nová fyzika” nad touto škálou modifikuje m_H :

$$m_H^2 = (m_H^{(0)})^2 + \Delta, \quad \Delta \sim \Lambda_{NP}^2$$

AK OBJAVÍME SM HIGGSA

SM experimentálne overený po $E \approx 200$ GeV
“nová fyzika” nad touto škálou modifikuje m_H :

$$m_H^2 = (m_H^{(0)})^2 + \Delta, \quad \Delta \sim \Lambda_{NP}^2$$

SM nezahŕňa gravitáciu!

fundamentálna škála gravitácie — Planckova hmotnosť:

$$\hbar, c, G \Rightarrow M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 10^{19} \text{ GeV} \approx 10^{17} M_Z \sim \text{blcha}/10^3$$

$$\Delta \sim M_P^2 \sim 10^{38} \text{ GeV}^2, \quad m_H^2 = 10^4 \text{ GeV}^2 \Rightarrow \text{fine-tuning problem}$$

MOŽNÉ RIEŠENIA

... pri zachovaní minimálneho vzorca spontánneho narušenia symetrie:

- 1 znížiť škálu novej fyziky $\Rightarrow \Lambda_{NP} \rightarrow 1 \text{ TeV}$
- 2 modifikovať Higgs $\Rightarrow \Lambda_{NP} \rightarrow 1 \text{ TeV}$

ALTERNATÍVNE SCENÁRE

- **žiaden Higgs**
 - nelineárna realizácia elslabej symetrie v \mathcal{L}_H , $E_{SM} < 1$ TeV
- **kompozitný Higgs**
 - viazaný stav nových častíc a interakcií, $\Lambda_{NP} \approx 1$ TeV
- **SUSY Higgisy**
 - chirálne superpole \rightarrow {kvarky, leptóny, Higgisy}, $\Lambda_{SUSY} \approx 1$ TeV
- **fundamentálnosť elslabej škály**
 - extra-priestorové dimenzie $\Rightarrow \Lambda_G \rightarrow 1$ TeV

EFEKTÍVNY OPIS ESB

minimálne symetrie:

- globálna $G \rightarrow H$: $\dim G/H \geq 3$

EFEKTÍVNY OPIS ESB

minimálne symetrie:

- globálna $G \rightarrow H$: $\dim G/H \geq 3$
- $SU(2)_L \times U(1)_Y \subset G$, $U(1)_{em} \subset H$
 $\Rightarrow \dim G \geq 4$, $\dim H \geq 1$

EFEKTÍVNY OPIS ESB

minimálne symetrie:

- globálna $G \rightarrow H$: $\dim G/H \geq 3$
- $SU(2)_L \times U(1)_Y \subset G$, $U(1)_{em} \subset H$
 $\Rightarrow \dim G \geq 4$, $\dim H \geq 1$
- $\frac{\text{charged current}}{\text{neutral current}} \approx 1 \Rightarrow SU(2)_V \subset H \Rightarrow \dim H \geq 3$

EFEKTÍVNY OPIS ESB

minimálne symetrie:

- globálna $G \rightarrow H$: $\dim G/H \geq 3$
- $SU(2)_L \times U(1)_Y \subset G$, $U(1)_{em} \subset H$
 $\Rightarrow \dim G \geq 4$, $\dim H \geq 1$
- $\frac{\text{charged current}}{\text{neutral current}} \approx 1 \Rightarrow SU(2)_V \subset H \Rightarrow \dim H \geq 3$
- absencia vol'ných NGB $\Rightarrow \dim G/H = 3$

EFEKTÍVNY OPIS ESB

minimálne symetrie:

- globálna $G \rightarrow H$: $\dim G/H \geq 3$
- $SU(2)_L \times U(1)_Y \subset G$, $U(1)_{em} \subset H$
 $\Rightarrow \dim G \geq 4$, $\dim H \geq 1$
- $\frac{\text{charged current}}{\text{neutral current}} \approx 1 \Rightarrow SU(2)_V \subset H \Rightarrow \dim H \geq 3$
- absencia vol'ných NGB $\Rightarrow \dim G/H = 3$

$$G = SU(2)_L \times SU(2)_R, \quad H = SU(2)_V$$

EFEKTÍVNY OPIS ESB

minimálne symetrie:

- globálna $G \rightarrow H$: $\dim G/H \geq 3$
- $SU(2)_L \times U(1)_Y \subset G$, $U(1)_{em} \subset H$
 $\Rightarrow \dim G \geq 4$, $\dim H \geq 1$
- $\frac{\text{charged current}}{\text{neutral current}} \approx 1 \Rightarrow SU(2)_V \subset H \Rightarrow \dim H \geq 3$
- absencia vol'ných NGB $\Rightarrow \dim G/H = 3$

$$G = SU(2)_L \times SU(2)_R, \quad H = SU(2)_V$$

\Rightarrow efektívny Lagrangian

OBSAH

- 1 Higgs v Štandardnom modeli
- 2 Experimentálne limity pre SM Higgso
- 3 Ak (ne)objavíme SM Higgso
- 4 ZHRNUTIE**

ZHRNUTIE

- Higgsov bozón je najhľadanejšia častica (skoro už “po záruke”)
- HB rieši otázku hmotností častíc pri zachovaní KS
- teoretické problémy so ŠM HB: nová fyzika?
- LHC to rozhodne!