

# top-BESS model

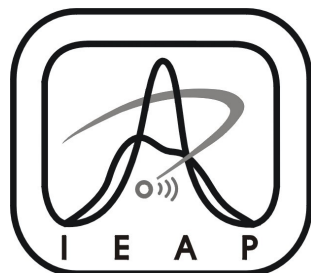
aneb

**Efektivní popis rozšíření Standardního modelu bez Higgse**



**Josef Juráň**

Ústav technické a experimentální fyziky  
České vysoké učení technické v Praze



**Mikuláš Gintner, Ivan Melo**

Katedra fyziky  
Žilinská univerzita



# Abstrakt

Navzdory velkému úspěchu Standardního modelu zůstává jeho jedna klíčová část nevyjasněna - a tím je skutečný **mechanismus narušení elektroslabé symetrie**.

Toto narušení je ve Standardním modelu popsáno způsobem, jehož přímým důsledkem je **existence** nové částice - tzv. **Higgse**. Ten však nebyl doposud experimentálně potvrzen.

Existuje celá řada modelů, které nabízejí vlastní popis narušení elektroslabé symetrie. Jedním z nich je i **top-BESS model**, jenž je modifikací BESS modelu - narušení elektroslabé symetrie novou silnou silou.

# Efektivní popis rozšíření Standardního modelu bez Higgse

## OSNOVA

- Symetrie, kalibrační symetrie, QED
- **Standardní model** (a jeho nedostatky)
- Narušení elektroslabé symetrie (ESB)
- Higgsův bozon, alternativní popis ESB
- Efektivní Lagrangián
- BESS a **top-BESS model**, jejich vlastnosti
- předpovědi top-BESS modelu na LHC, ILC

# Symetrie

- Věc (jev, rovnice) má určitou symetrii, když se při určité **operaci** aplikované na tuto věc, **nemění** její (určité) vlastnosti.
- Věc je tzv. **invariantní** vůči této **transformaci** (popř. celé třídě transformací --> grupy transformací).

Symetrie v přírodě je v těsném vztahu:

Emma Noether (1882-1935)

- k zákonům zachování (prostorčasové, globální symetrie)
- k existenci základních sil a interakcí (lokální kalibrační symetrie)

## Symetrie

- diskrétní a spojité, externí a interní, globální a lokální
- přesné, přibližné, anomální, skryté

# Kalibrační symetrie

Symetrie je vůdčím principem při hledání nových fyzikálních zákonů.

- speciální třída symetrií - kalibrační (vnitřní fázové transformace)
- stala se základem moderní teorie interakcí elementárních částic

**Kvantová teorie pole:** QM ( $\hbar$ ) + STR ( $c$ )

## KALIBRAČNÍ TEORIE

- elektřina + magnetismus + optika:  
kvantová elektrodynamika (QED)  $\gamma$   
 $U(1)_Q$
- QED + slabé interakce:  
elektroslabá teorie (GWS)  $\gamma, Z, W^{\pm}$   
 $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
- silná interakce:  
kvantová chromodynamika (QCD) 8 gluonů  
 $SU(3)_C$

# Kvantová elektrodynamika

volné Diracovo pole  $\mathcal{L}_0 = \bar{\psi} (i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi$

fázová transformace (globální)  $\psi \longrightarrow \psi' = e^{-iQ\theta} \psi$

absolutní fáze jsou nepozorovatelné  $\bar{\psi} \longrightarrow \bar{\psi}' = e^{iQ\theta} \bar{\psi}$

libovolné  $\theta \longrightarrow$  jednoparametrická Abelova grupa  $U(1)_Q$

invariance Lagrangiánu  $\longrightarrow$  zachovávající se proud  $\longrightarrow ZZQ$

**Kalibrační princip:**

$$\theta = \theta(x)$$

fázová invariance by měla být splněna lokálně

ale gradient pole se transformuje jinak než pole samotné

$$\partial_\mu \psi \longrightarrow e^{iQ\theta} (\partial_\mu - iQ \partial_\mu \theta) \psi$$

$$\mathcal{L}'_0 = \mathcal{L}_0 + Q \bar{\psi} \gamma^\mu \psi \partial_\mu \theta$$

kompensace: nové pole  $A_\mu \longrightarrow$  spřažení s proudem  $\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 - j^\mu A_\mu$

$\longrightarrow$  transf. vztah pro nové kalibrační pole  $A_\mu \longrightarrow A'_\mu \equiv A_\mu + \partial_\mu \theta$

# Kvantová elektrodynamika

Princip min. elmag. interakce:  $\partial_\mu \longrightarrow D_\mu \equiv \partial_\mu + i Q A_\mu$

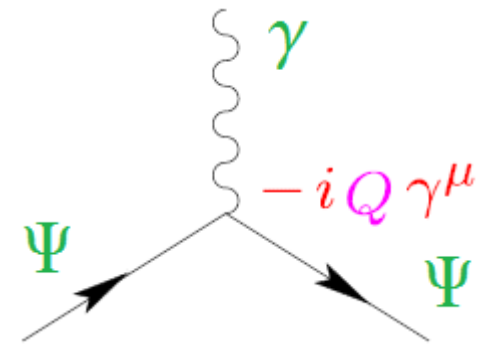
kovariantní derivace  $(D_\mu \psi)' \equiv (\partial_\mu + i Q A'_\mu) \psi' \longrightarrow e^{-i Q \theta} D_\mu \psi$

## Spinorová elektrodynamika

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} (i \gamma^\mu D_\mu - m) \psi = \bar{\psi} (i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi + \mathcal{L}_I = \mathcal{L}_0 + \mathcal{L}_I$$

$$\mathcal{L}_I = - Q \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu \quad \text{elmag. interakce}$$

Nové pole jako nedílná součást celého dynamického systému - kalib. inv. lagrangián



• Kinetický člen:  $\mathcal{L}_K = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \quad F^{\mu\nu} \equiv \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$

• Hmotnostní člen:  $\mathcal{L}_m = \frac{1}{2} m_\gamma^2 A^\mu A_\mu$  kalibračně neinvariantní

$$m_\gamma = 0 \quad [\text{exp: } m_\gamma < 2 \cdot 10^{-16} \text{ eV}]$$

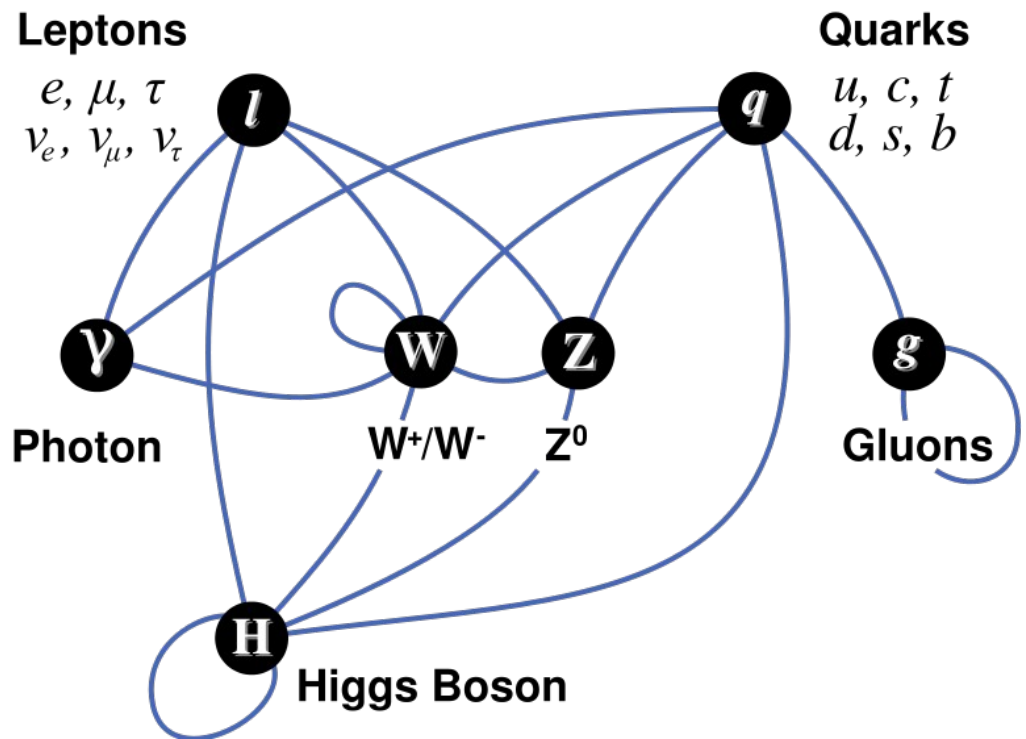
Kalibrační princip ---> QED dynamika

# Standardní model

SM je teorií mikrosvěta. Popisuje **elementární částice** a **tři fundamentální interakce**, které působí mezi těmito částicemi.

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Quarks</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Leptons</b>	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force





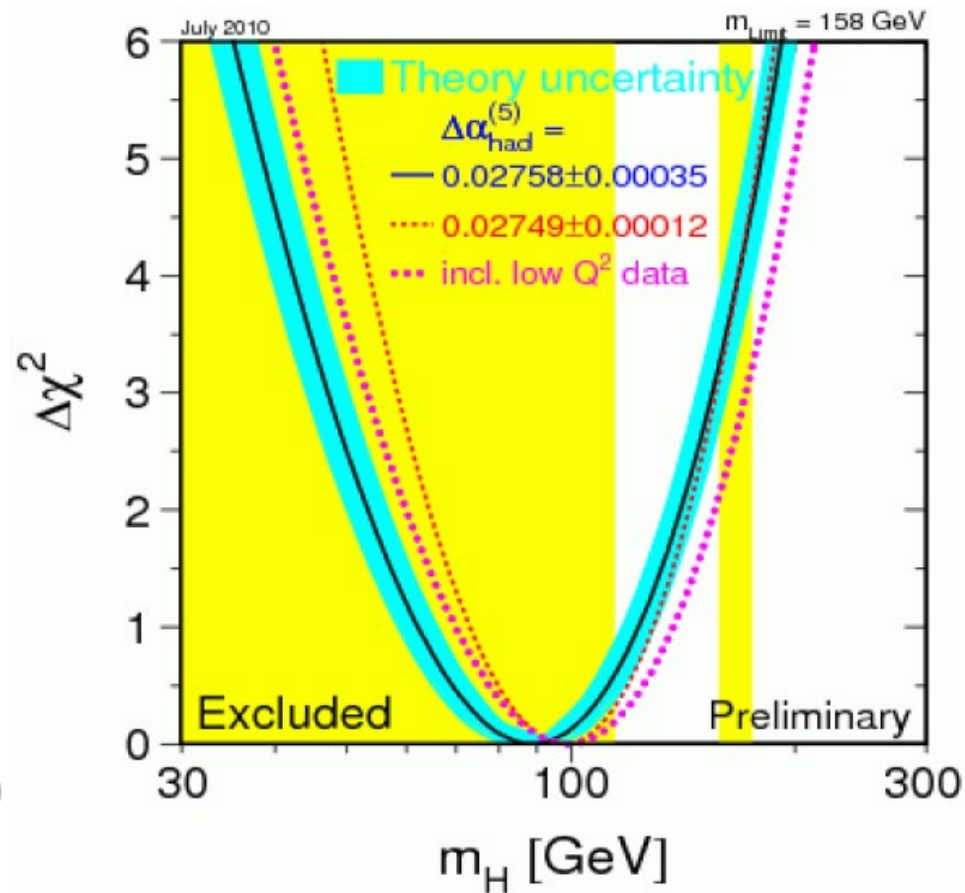
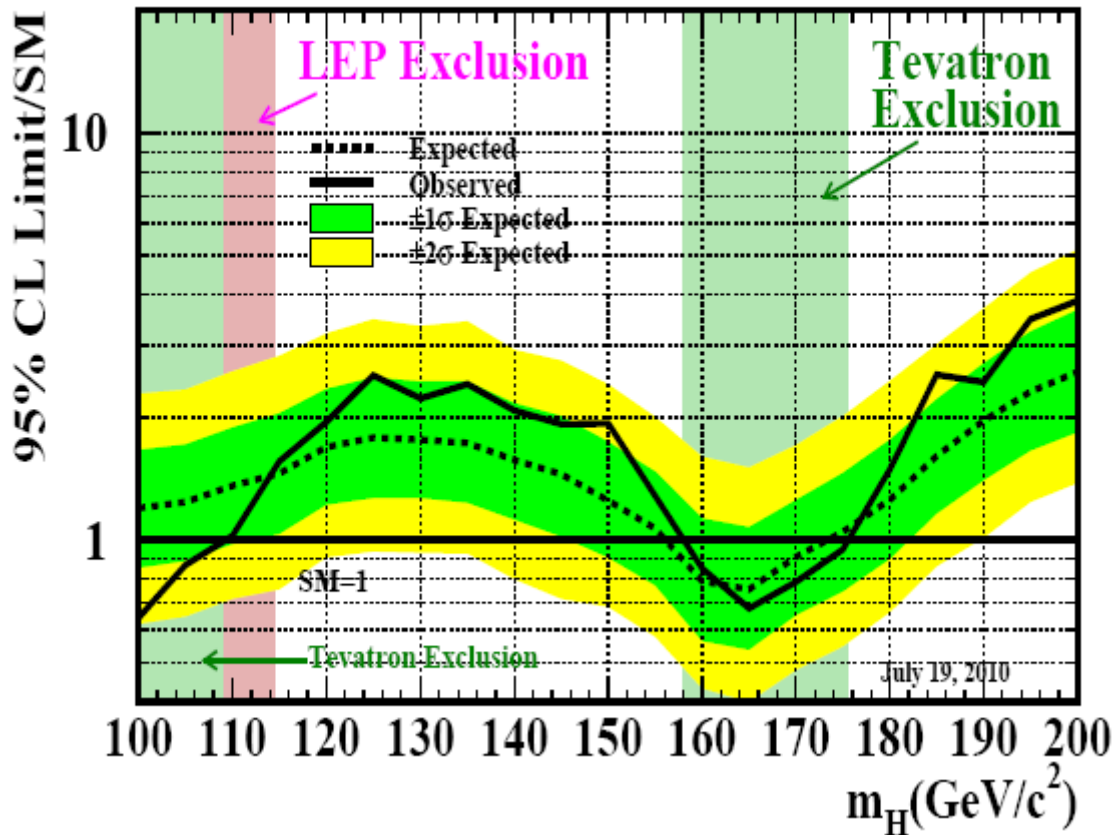
# Standardní model

- teorie **silné** a **elektroslabé** interakce založena na lok. kalib. principu  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
- kalibrační symetrie Lagrangiánu  $\longrightarrow$  nehmotné  $g, A, W^\pm, Z$   
... + narušení parity  $\longrightarrow$  nehmotné fermiony
- rozpor s realitou:  $W^\pm, Z$  bosony a fermiony jsou hmotné
- elektroslabá symetrie je narušena (resp. skryta)
- **Higgsův mechanismus** založen na **spontánním narušení symetrie (SSB)**
- SSB:  $G \rightarrow H$  (Lagrangián vs vakuum)  $\longrightarrow$  GT: reálné částice  $m=0$   
Nambu-Goldstonovy bozony,  $\#NGB = \dim G - \dim H$
- řešení (hypotéza):  
přidání skal. dubletu  $\Phi(x) = \begin{pmatrix} \pi_2(x) + i\pi_1(x) \\ v + h(x) - i\pi_3(x) \end{pmatrix}, \quad \langle \Phi \rangle_0 = v$   
odtrafo. 3 ze 4 st.volnosti  $\Rightarrow$  **Higgs boson**  
-> hmotnost kalib. bozonů,  
Yukawa int. -> hmotnost fermionů

# Hledání Higgsovy částice

- hmotnost Higgsova bozonu je volný parametr ve SM
- experimentálně nepotvrzen -> limity @ 95% CL
- přímý: LEP+Tevatron  $m_H = 114.4 - 158 \text{ GeV}$  a  $m_H > 175 \text{ GeV}$
- nepřímý: glob. fit EWPO vylučuje  $m_H > 185 \text{ GeV}$  (best  $87^{+36}_{-27} \text{ GeV}$ )

Tevatron Run II Preliminary,  $\langle L \rangle = 5.9 \text{ fb}^{-1}$



# Standardní model

- úspěšná teorie - mnoho předpovědí
- experimentálně ověřen do  $E \sim 200 \text{ GeV}$
- neobjeven Higgs - není to jediný problém SM

## SM není finální teorií:

- nezahrnuje gravitaci
- obsahuje mnoho volných parametrů bez souvislostí
- nevysvětluje narušení elektroslabé symetrie
- proč 3 generace fermionů, generace hmotností fermionů
- nevysvětluje silný CP problém
- problém s hmotností Higgse (hierarchy/fine-tuning problem)
- žádný kandidát na tmavou hmotu
- nepopisuje tmavou energii
- ...

# Nová fyzika - modely za SM

## Dělení dle možného scénáře elektroslabého narušení

- **slabě-interagující**: ESB je narušena perturbativní interakcí (SM Higgsův sektor - 1 Higgsův bozon, SUSY - více Higgsů)
- **silně-interagující**: ESB je narušena novou silnou interakcí (žádný Higgs, kompozitní částice, Technicolor, ...)
- **extra-dimenze**, ... (AdS/CFT korespondence, Kaluza-Kleinovy věže, ...)

- Kompletní popis jakékoliv nové fyziky za SM vyžaduje fund. teorii
- SM ověřen, SM jako nízko-energetická teorie, součást nové teorie
- mnoho různých modelů (nové částice, nové interakce)
- nutný jednotný popis jejich nízko-energetické fenomenologie
- modelově nezávislý přístup založena na

**Efektivních Lagrangiánech**

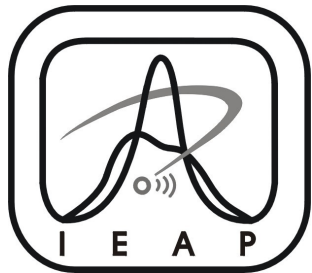
# Efektivní Lagrangián

- $\Lambda$  - škála nové fyziky za SM
- $\Lambda < \sim 1$  TeV - přímé pozorování NP na urychlovačích
- $\Lambda \gg 1$  TeV - parametrizace efektů NP pomocí výšerozměrných operátorů potlačených inverzními mocninami jejich škály
- pokud NP těžká pro přímé pozorování v nízkých energiích - vyintegrování z Lagrangiánu (efekt na konstanty)

$$L_{eff} = L_0 + \frac{1}{\Lambda} L_1 + \frac{1}{\Lambda^2} L_2 + \dots$$

- $L_0$  je SM Lagrangián [4],  $L_1$  je nová interakce [5], ...
- maximálně obecný Lagrangián - jediné omezení: symetrie
- má  $\infty$  mnoho členů (třídí se podle mocnin energie, resp. počtu  $\partial_\mu$ )
- **nízkoener. procesy** ----> omezení do určitého řádu (konečný počet)

# top-BESS model



Mikuláš Gintner<sup>1,2</sup>

Josef Juráň<sup>1</sup>

Ivan Melo<sup>2</sup>

- 1) Ústav technické a experimentální fyziky, ČVUT  
2) Katedra fyziky, Žilinská univerzita



- efektivní popis ESB
- modifikace BESS modelu
- speciální role **top** kvarku

# BESS model

- efektivní popis narušení EW symetrie silnou interakcí (BESS)
- globální symetrie:  $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \times SU(2)_{HLS}$
- lokální symetrie:  $SU(2)_L \times U(1)_Y \times SU(2)_{HLS}$
- HLS (Hidden Local Symmetry) -
- pomocná kalibrační symetrie

$$SU(2)_L \text{ triplet: } W_\mu = igW_\mu^a \tau^a$$

$$U(1)_Y \text{ singlet: } B_\mu = ig' B_\mu Y$$

$$SU(2)_{HLS} \text{ triplet: } V_\mu = i\frac{g''}{2} V_\mu^a \tau^a$$

## Částicový obsah

- SM kalibrační bozony
- SM fermiony, žádný Higgs
- 3 vektorové rezonance  $\rho = (\rho^0, \rho^\pm)$  (vázaný stav nové silné síly)
- ESB sector: 6 reálných skalárních polí (NGB`s, nefyzikální)

[1] R. Casalbuoni, S. De Curtis, D. Dominici, R. Gatto, *Phys. Lett.* **B155** (1985) 95.

[2] R. Casalbuoni, S. De Curtis, D. Dominici, R. Gatto, *Nucl. Phys.* **B282** (1987) 235.

[3] R. Casalbuoni, P. Chiappetta, S. De Curtis, F. Feruglio, R. Gatto, B. Mele, J. Terron, *Phys. Lett.* **B249** (1990) 130.

# BESS model

$$\mathcal{L} = -v^2[\text{Tr}(\bar{\omega}_\perp^\mu)^2 + \alpha \text{Tr}(\bar{\omega}_\parallel^\mu)^2] + \mathcal{L}_{Wkin} + \mathcal{L}_{Bkin} + \mathcal{L}_{Vkin} + \mathcal{L}_f$$

$v, \alpha$  free real parameters

- přímá vazba  $V_\mu^a$  na fermiony: mezigenerační univerzalita (L, R)
- nová rezonance se míchá se SM kalibračními bozony (jejich interakce se modifikuje)

## BESS vs top-BESS

**Motivace:** hmotnost top kvarku ( $m_t \sim 170 \text{ GeV}$ )

příliš velká a blízko škále ESB ( $v \sim 240 \text{ GeV}$ )

- speciální role t-kvarku (nebo 3.generace kvarků) v mechanismu ESB
- generace  $m_t$  stejným mechanismem jako  $M_Z, M_w$  (stejná Sin)
  - silná vazba rezonance na t-kvark jako na SM kalib. bozony



# top-BESS model

**Modifikace:** pouze ve fermionovém sektoru

- mezigenerační univerzalita narušena
- není přímá vazba na leptony a kvarky  $u, d, c, s$
- přímá interakce  $\sim g''$
- přímá interakce na levý  $(t,b)$  dublet:  $\sim b_L$
- přímá interakce na pravý  $t$  kvark:  $\sim b_R$
- přímá interakce na pravý  $b$  kvark:  $\sim p \cdot b_R$   $p \in \langle 0;1 \rangle$   
 $p$  - rozdělení  $\rho$ -to- $t_R$  od  $\rho$ -to- $b_R$  vazby,  $U(1)_{R3}$  symetrie
- modifikace SM GB-to-fermion vazby díky novému členu neuvažovanému v původním BESS modelu
- ... na levý  $(t,b)$  dublet:  $\sim \Lambda_L$
- ... na pravý  $(t,b)$  dublet:  $\sim \Lambda_R$

# top-BESS model

Model = Lagrangián

Parametry top-BESS Lagrangiánu:

$v, g, g'$

$\alpha, g'', b_L, b_R, p, \lambda_L, \lambda_R$

limit (tBESS)<sub>{ $g'' \rightarrow \infty$ }</sub> = SM/{H}

Omezení hodnot parametrů:

- unitární limity -  $SS^\dagger = 1$ , ZZ pravděpodobnosti
- nízkoenergetické limity - existující experimenty omezují odchylky od SM

# Unitární limity

## SM bez Higgse

- rozptyl longitudinálních kalib. bozonů
- Equivalence Theorem ( $\pi$ 's vs  $GB_L$ 's)
- parciální amplitudy

$$a_l^I = \frac{1}{64\pi} \int_{-1}^1 P_l(\cos \theta) T^I d \cos \theta$$

- U-limit:  $|a_0^0| \leq 1$   $E = 1.7 \text{ TeV}$

$$M(W_L^+ W_L^- \rightarrow Z_L Z_L)$$

$$M(W_L^+ W_L^- \rightarrow W_L^+ W_L^-)$$

$$M(Z_L Z_L \rightarrow Z_L Z_L)$$

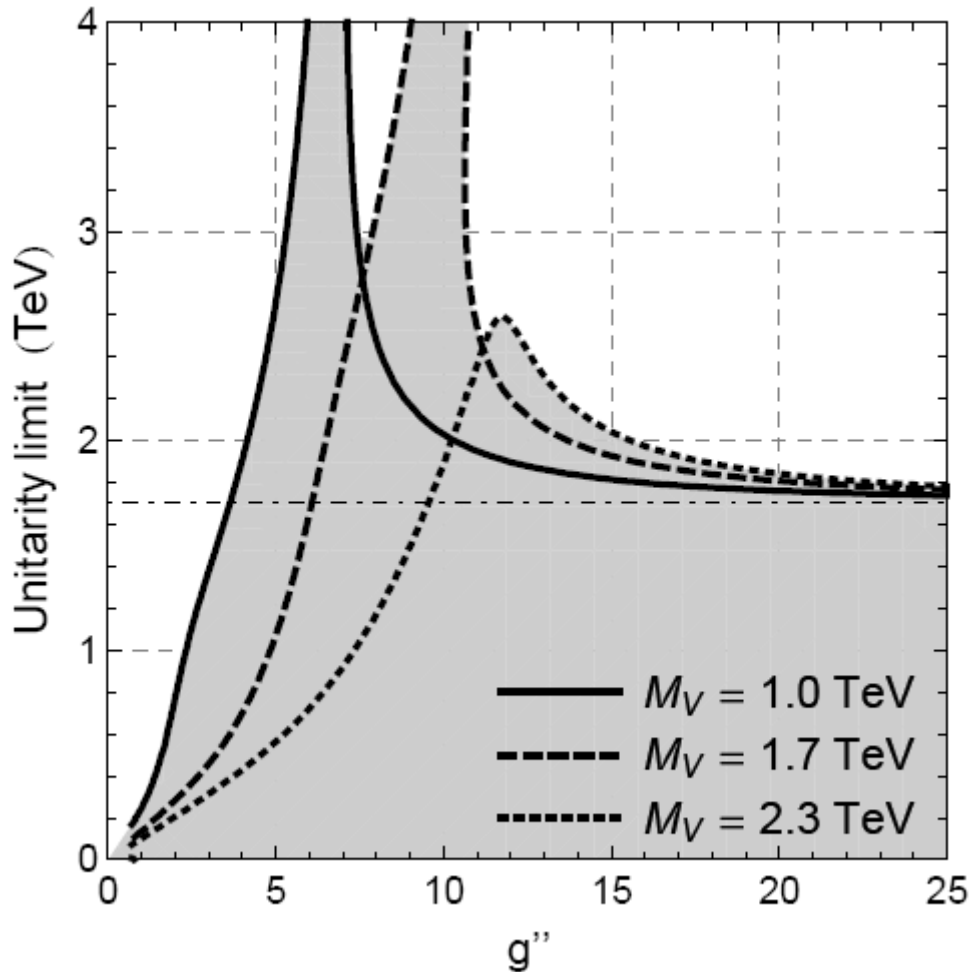
$$M(W_L^\pm Z_L \rightarrow W_L^\pm Z_L)$$

$$M(W_L^\pm W_L^\pm \rightarrow W_L^\pm W_L^\pm)$$

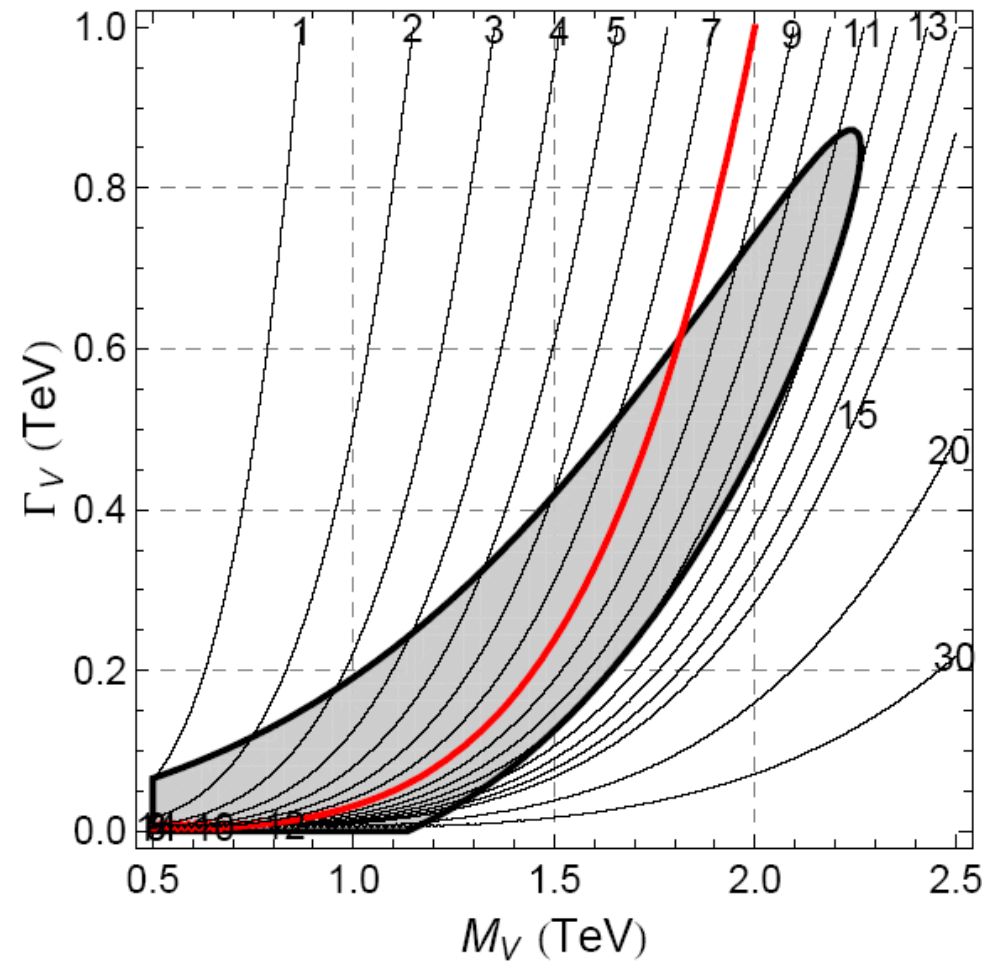
## top-BESS model

- nová částice unitarizuje amplitudy -  $\rho$  jako Higgs ( $m_H < 1 \text{ TeV}$ )
- efekt. model - nerenormalizovatelný - horní limit Eq.Th.  $\sim 3 \text{ TeV}$ 
  - narušení unitarity při nějaké energii

# Unitární limity



Omezení  $g''$  (SM U-limit).



Omezení hmotnosti a šířky.  
(U-limit =  $1.5 M_V$ )

Grafy pro  $b_L = b_R = b = 0$  (p nehraje roli),  $\lambda$ 's zanedbatelné.

# Nízkoenergetické limity

- nízkoenergetický tBESS Lagrangián  
(vyintegrování  $\rho$  rezonance,  $M_V \rightarrow \infty$ ,  $g''$  fixní, substituce EoM)
- z omezení anomálních  $tbW$ ,  $ttZ$  a  $bbZ$  vazeb (LEP/SLC a CLEO)
- $\epsilon'$  s analýza

$$g'' \geq 8 \quad (95\% \text{ C.L.})$$

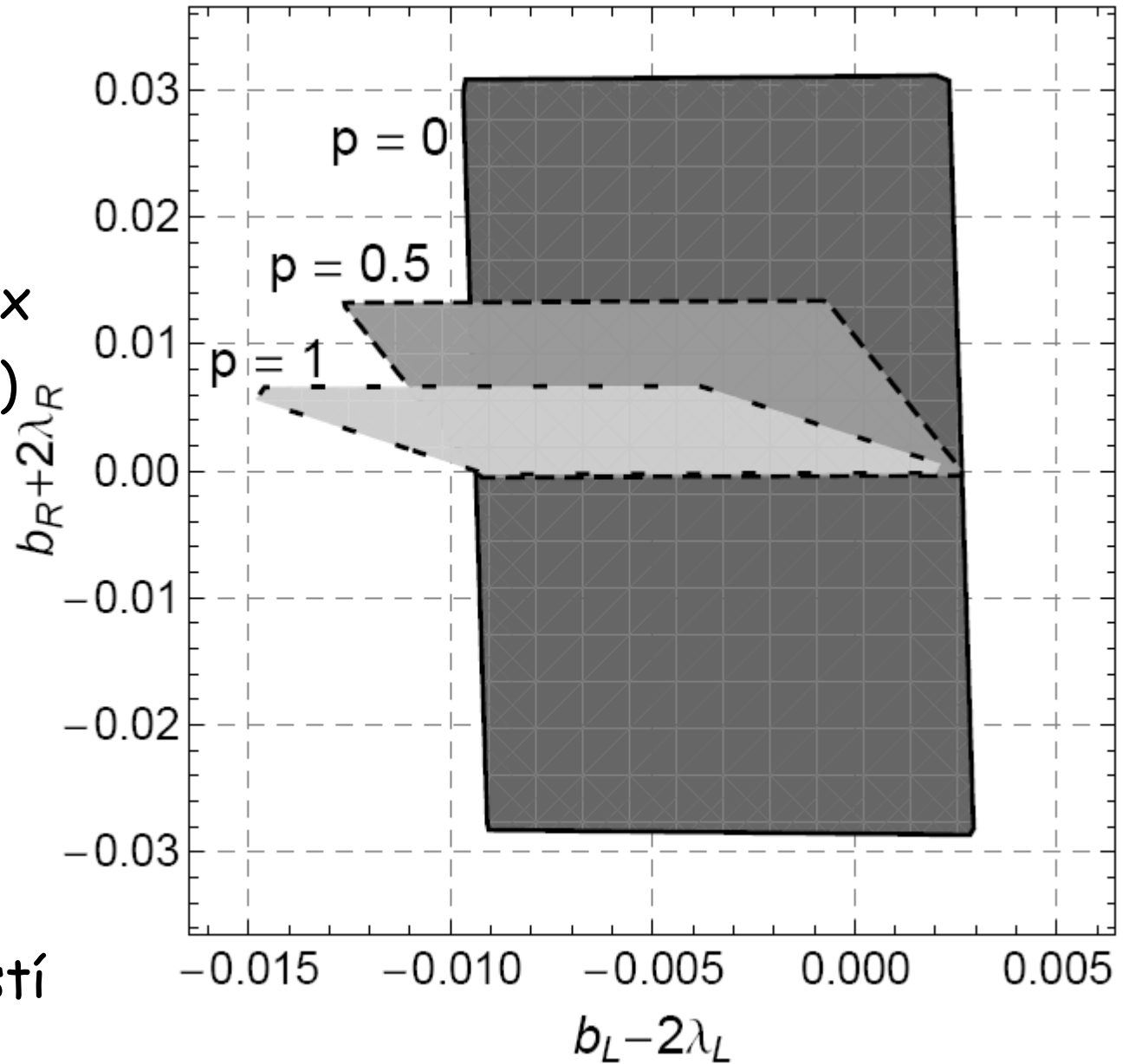
$$p = 0 \quad \begin{aligned} -0.009 &\leq b_L - 2\lambda_L \leq 0.003 & (\Lambda = 1, 2 \text{ TeV}) \\ -0.029 &\leq b_R + 2\lambda_R \leq 0.031 & (\Lambda = 1 \text{ TeV}) \\ -0.020 &\leq b_R + 2\lambda_R \leq 0.023 & (\Lambda = 2 \text{ TeV}) \end{aligned}$$

$$\text{BESS limits: } b \lesssim 0.01, \quad b' = 0$$

Naše modifikace BESS modelu uvolňuje nízkoenergetické limity původních BESS parametrů (díky  $\lambda'$  s a také  $p$ ).

# Nízkoenergetické limity

- $\varepsilon$ 's analýza
- měření  $B \rightarrow X_s \gamma$
- $GB$ 's self-interakce  
anomální  $WWZ$  vertex  
 $g'' > 3.4$  (slabší než  $\varepsilon_3$ )



průnik povolených oblastí  
pro  $g'' = 10$ ,  $\Lambda = 1$  TeV

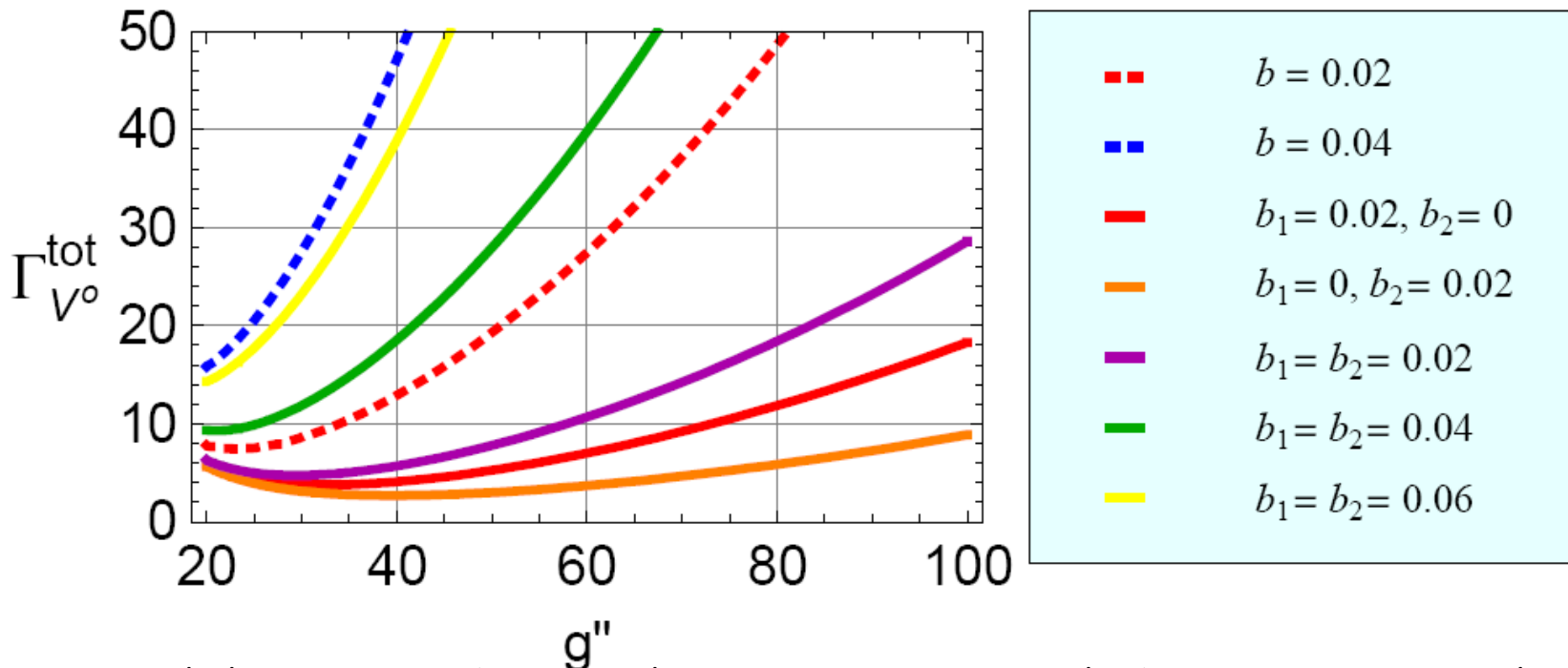
# BESS vs tBESS: celkové rozpadové šířky

$$M_{V^0} \approx M_{V^\pm} \approx \frac{\sqrt{\alpha} v g''}{2} \quad \text{Rozštěpení hmotnostní degenerace} < 1 \text{ promile}$$

$$M_{V^0} = 1 \text{ TeV}$$

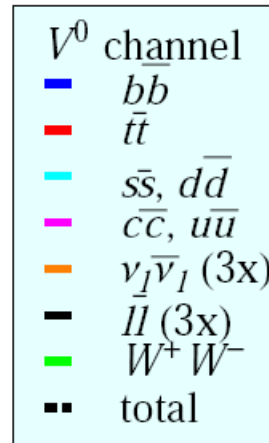
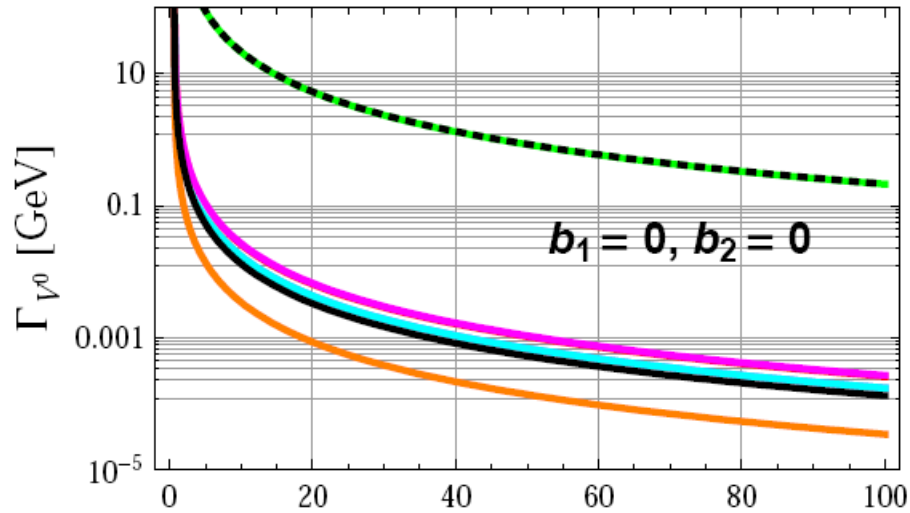
Rozpady:  $V^{+-}$  7 kanálů,  $V^0$  13 kanálů

Jiná vazba rezonance na fermiony pro BESS a top-BESS model.  
Díky **mixingu kalibračních bozonů** interagují s rezonancí také první a druhá generace kvarků a všechny leptony (kromě  $\nu_R$ ).



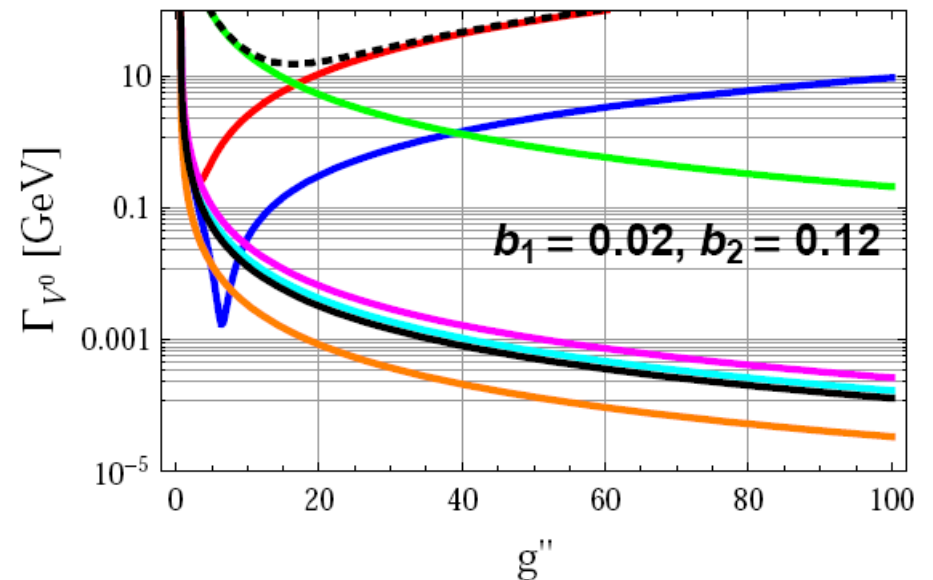
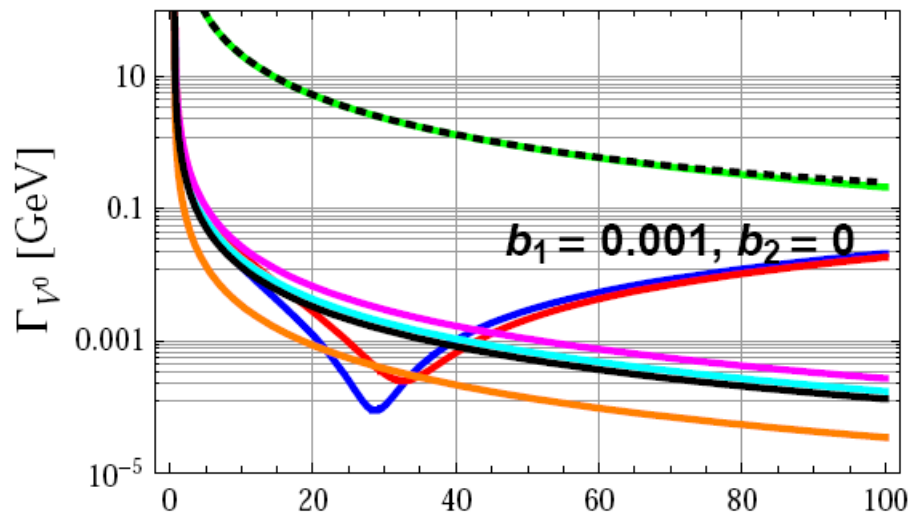
Srovnání BESS (tečkované) a tBESS (spojité křivky) rozpadových šířek.  
Grafy pro  $p = 0, \lambda' s = 0$ .

# top-BESS: parciální rozpadové šířky



rozpadové šířky  
neutrální rezonance

dominantní rozpady  
 $V^0 \rightarrow WW, bb, tt$





# top-BESS: parciální rozpadové šířky

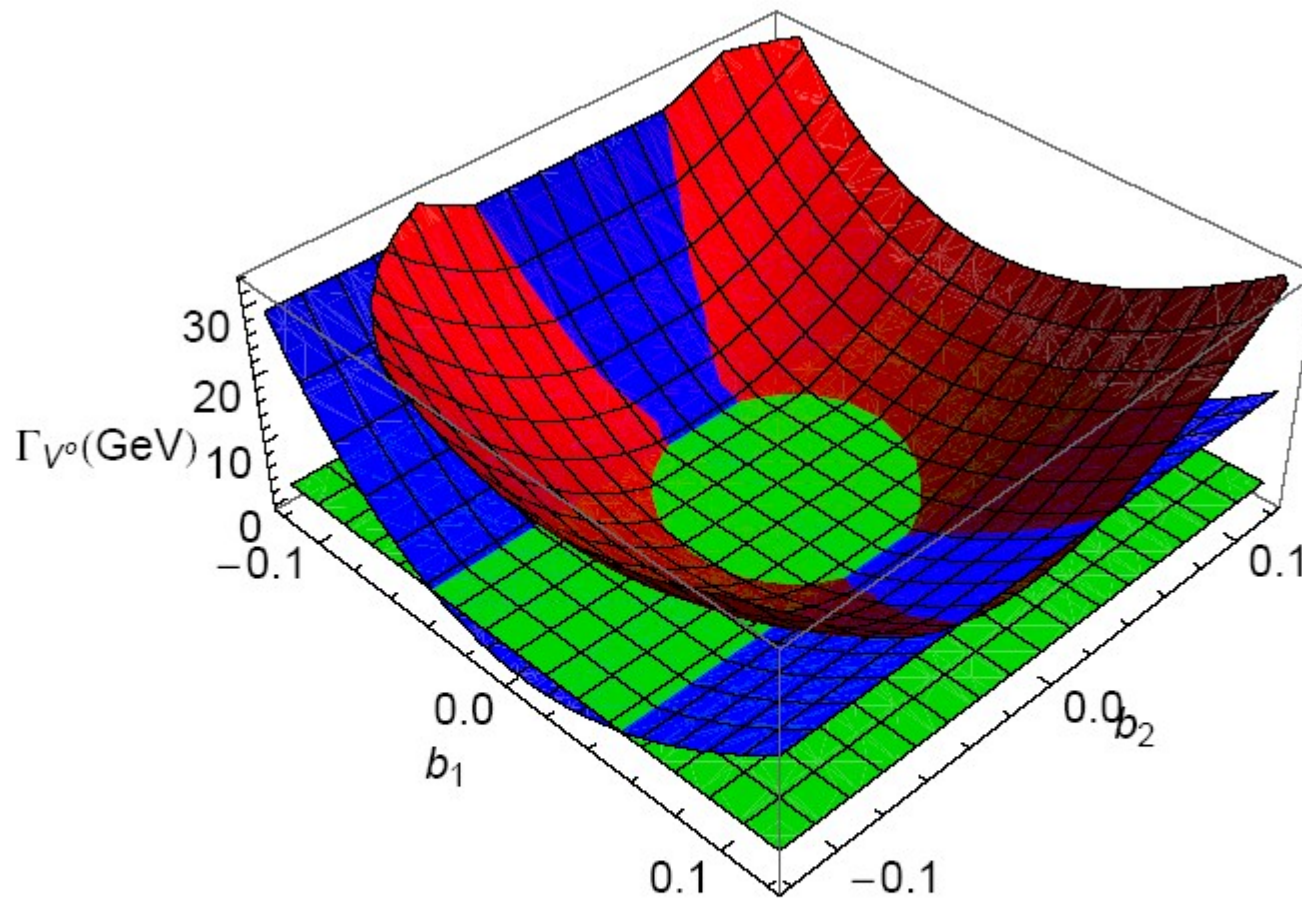
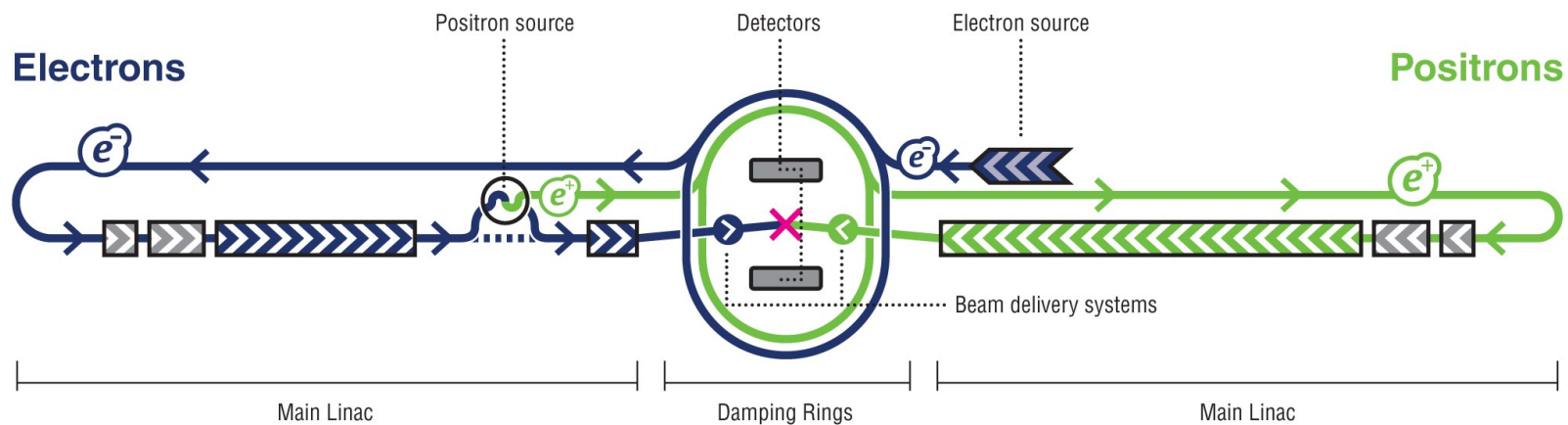


FIG. 8. The top-BESS dominant partial decay widths of  $V^0$  as functions of  $b_L$  and  $b_R$  for  $g'' = 25$ ,  $M_{V^0} = 1$  TeV,  $p = 0$ , and  $\lambda_{L,R} = 0$ . The green surface corresponds to the  $W^+W^-$  channel, the red surface corresponds to the  $t\bar{t}$  channel, and the blue surface represents the  $b\bar{b}$  channel.

# Experimentální zařízení

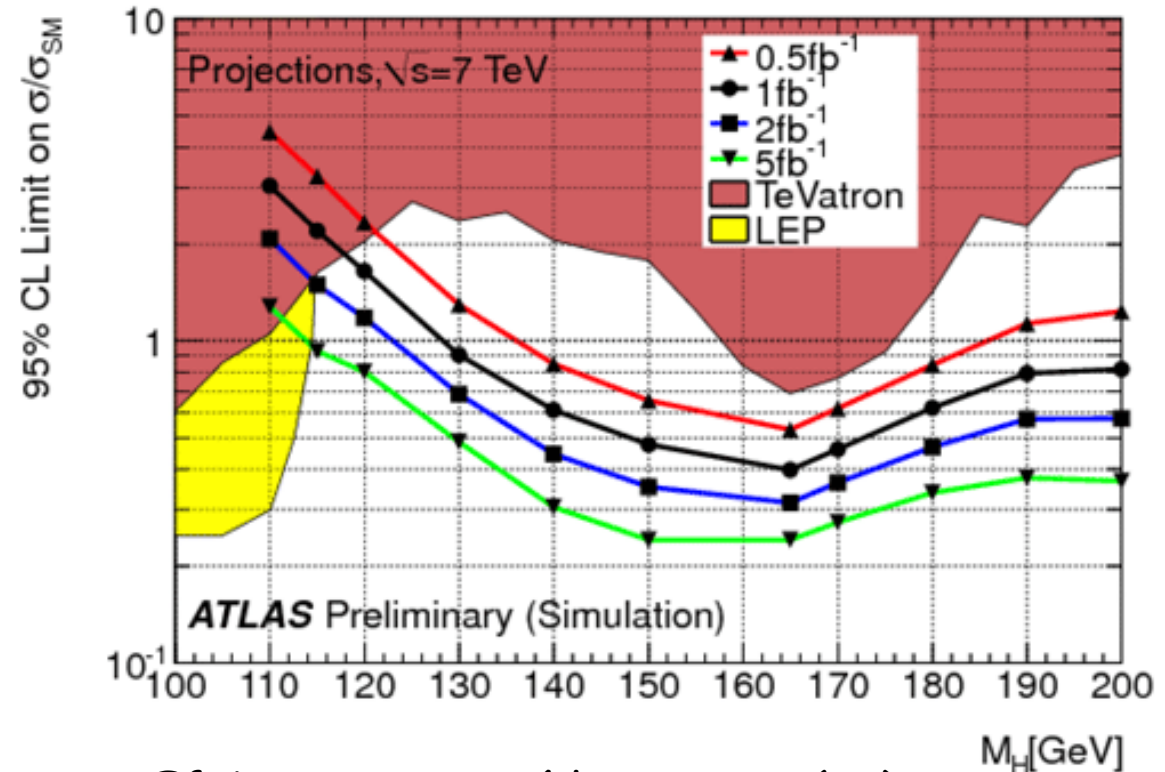
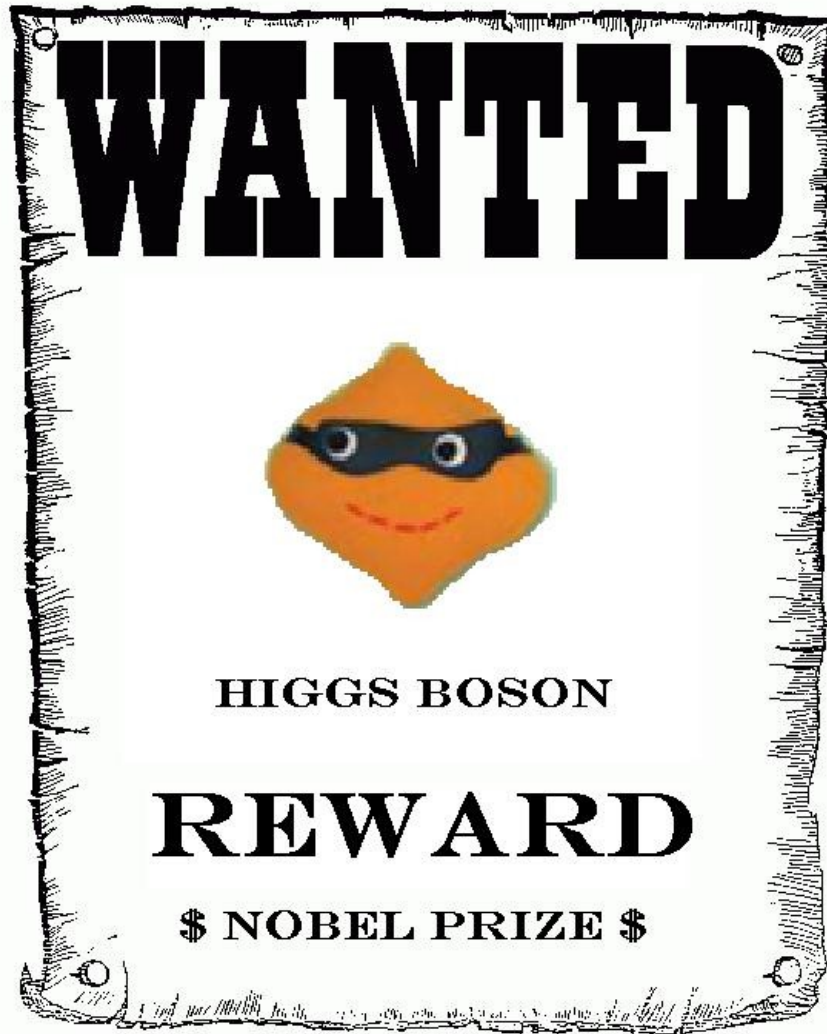


## International Linear Collider



# Large Hadron Collider

Multifunkční zařízení mající za úkol zodpovědět fundamentální otázky ve fyzice vysokých energií související s „nedokonalostí“ SM, např. najít H.

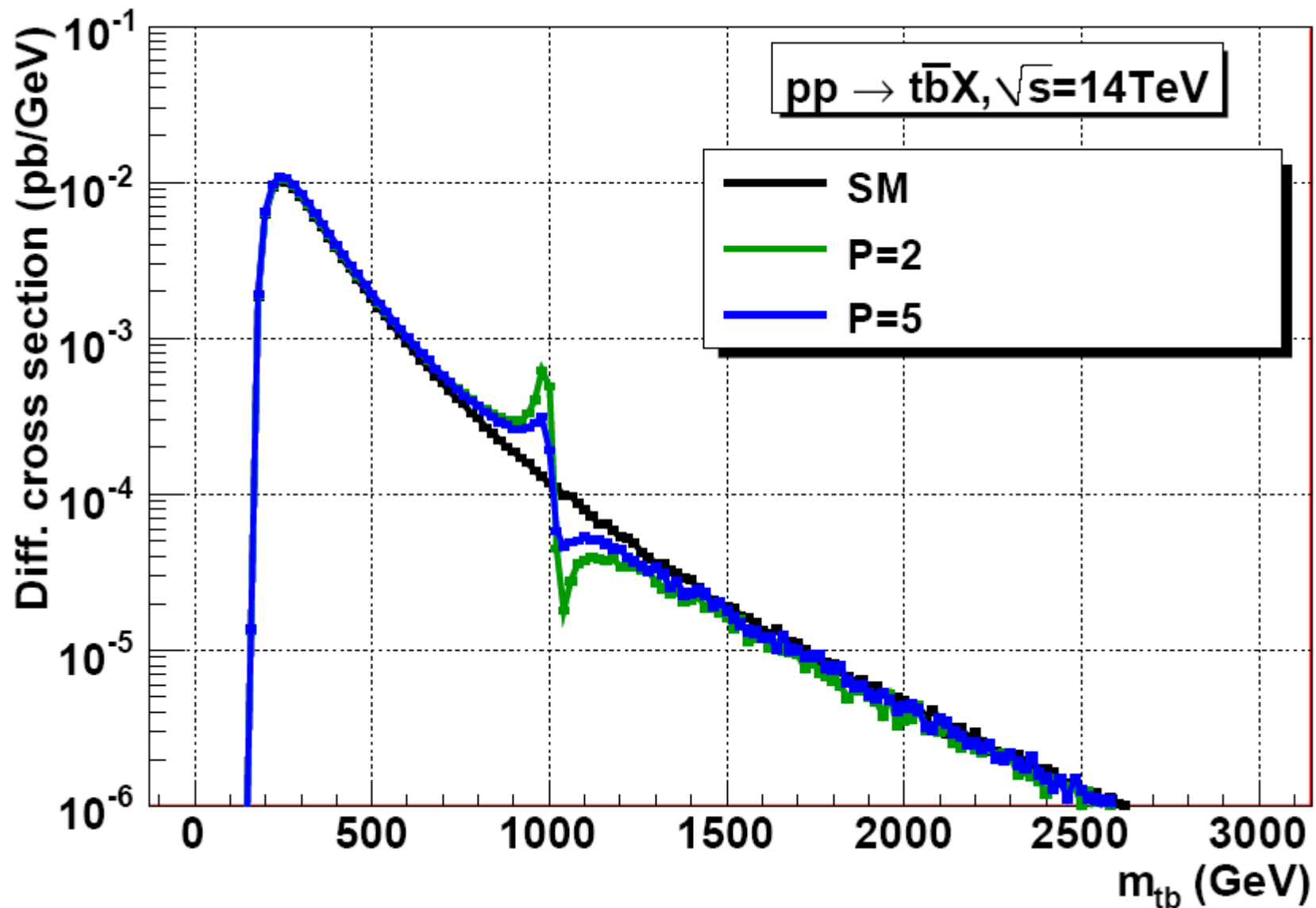


Efekt integrované luminozity (IL)

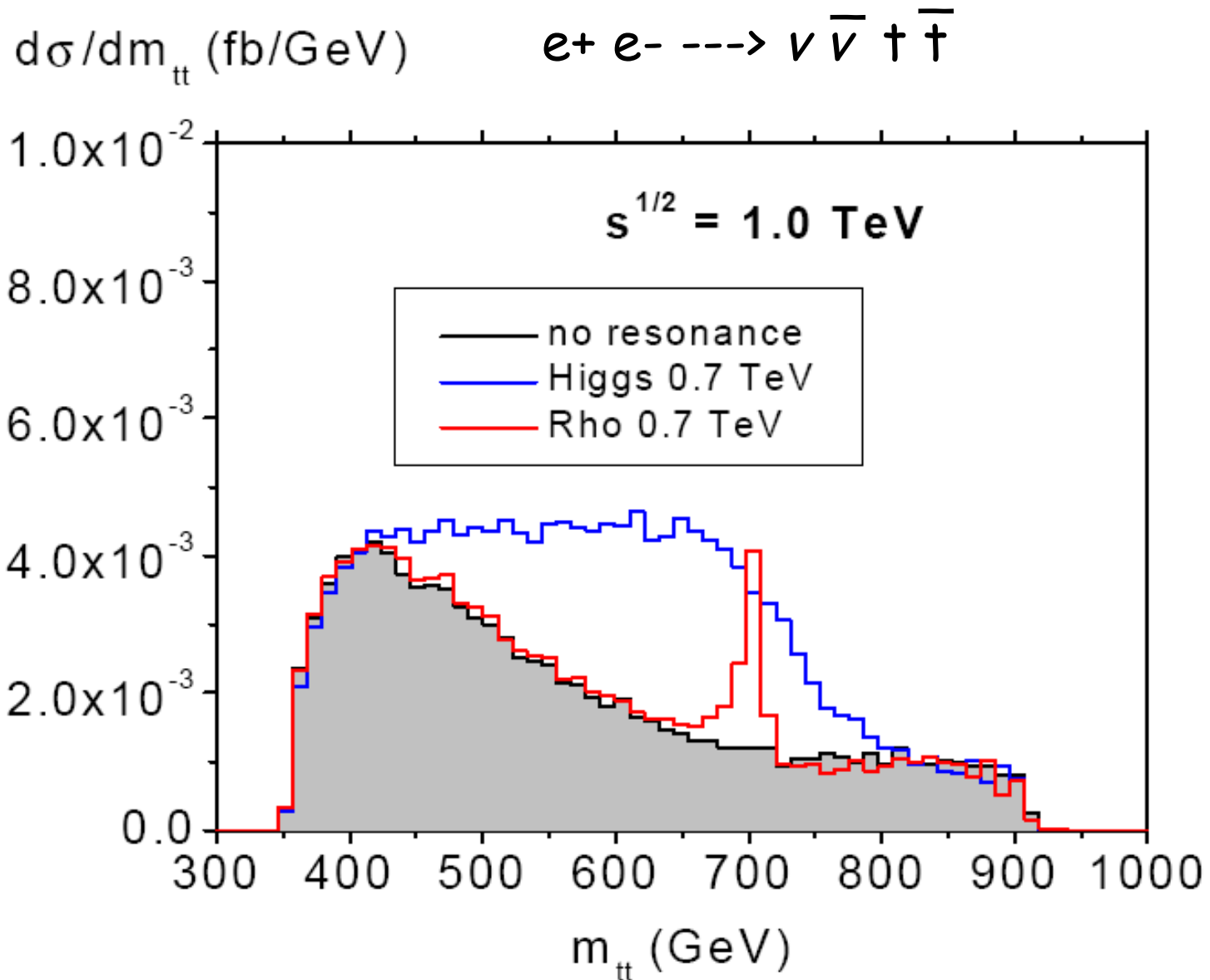
na 95% limit vyloučení SM Higgse .

Např. s IL=0.5 fb<sup>-1</sup> vyloučení hmotnosti mezi 135-188 GeV. Nebo rozšíření od LEP limit 114 GeV až několik stovek GeV s IL= 5 fb<sup>-1</sup>.

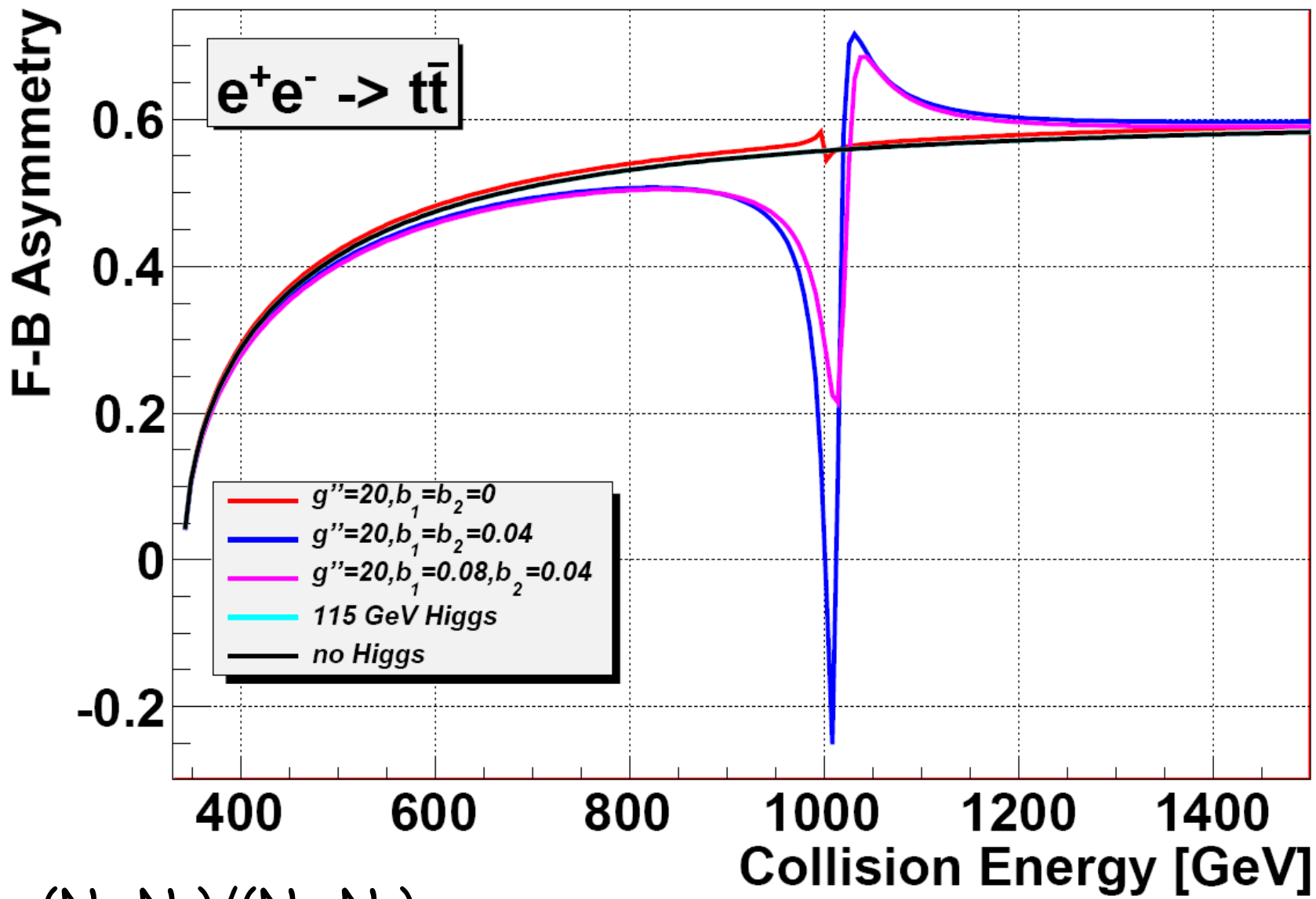
# top-BESS model na LHC



# top-BESS model na ILC



# top-BESS model na ILC



$$A_{FB} = (N_F - N_B) / (N_F + N_B)$$

$$\text{Dom}(A_{FB}) = \langle -1; 1 \rangle$$

# Závěrem

- mechanismus narušení elektroslabé interakce stále neznáme
- SM ---> SSB + Higgsův mechanismus; Higgs stále nenalezen
- mnoho alternativních modelů, fyzika za SM
- efektivní top-BESS model jako modifikace BESS modelu
- **BESS model versus top-BESS model**
- naše rezonance se rozpadá především na SM kalib. bozony a/nebo na třetí generaci kvarků; máme menší, tj. užší rozp. šířky
- uvolnění L-E limitů původních BESS parameterů
- účinné průřezy, FB asymetrii + jejich statistická významnost
- vlastnosti našeho modelu lze studovat na LHC a ILC
- nutný další výzkum (studium pozadí, účinnosti rekonst. detektoru)

**Děkuji za Vaši pozornost.**