

A GYORSÍTÓS FIZIKA KILÁTÁSAI (LHC/FCC)



ELTE
EÖTVÖS LORÁND
TUDOMÁNYEGYETEM

ZOLTÁN TRÓCSÁNYI
ESPP FORUM
16 DECEMBER 2024



**UNIVERSITY of
DEBRECEN**

CERN ELKÖTELEZETT A HL-LHC ÉS FCC MELLETT

A SLALÁR SZEKTOR FELTÁRÁSA A LEGFONTOSABB

EDDIGI GYORSÍTÓK ÉS AZ LHC ÜZENETE

- * *A Higgs-bozon felfedezése és az elektrogyenge szimmetriasértés megértésének kezdete*
- * *Elképesztő egyezés a SM elmélet és a mérési eredmények között*
- * *Új fizikára utaló jelek a TeV skála körül a legjobb esetben is csalókák*
- * *A gyorsítók és a detektorok tulajdonságai sokkal jobbak, mint az eredeti várakozások*

EDDIGI GYORSÍTÓK ÉS AZ LHC ÜZENETE

- * *A Higgs-bozon felfedezése és az elektrogyenge szimmetriasértés megértésének kezdete*
- * *Elképesztő egyezés a SM elmélet és a mérési eredmények között*
- * *Új fizikára utaló jelek a TeV skála körül a legjobb esetben is csalókák*
- * *A gyorsítók és a detektorok tulajdonságai sokkal jobbak, mint az eredeti várakozások*

EDDIGI GYORSÍTÓK ÉS AZ LHC ÜZENETE

- * *A Higgs-bozon felfedezése és az elektrogyenge szimmetriasértés megértésének kezdete*
- * *Elképesztő egyezés a SM elmélet és a mérési eredmények között*
- * *Új fizikára utaló jelek a TeV skála körül a legjobb esetben is csalókák*
- * *A gyorsítók és a detektorok tulajdonságai sokkal jobbak, mint az eredeti várakozások*

EDDIGI GYORSÍTÓK ÉS AZ LHC ÜZENETE

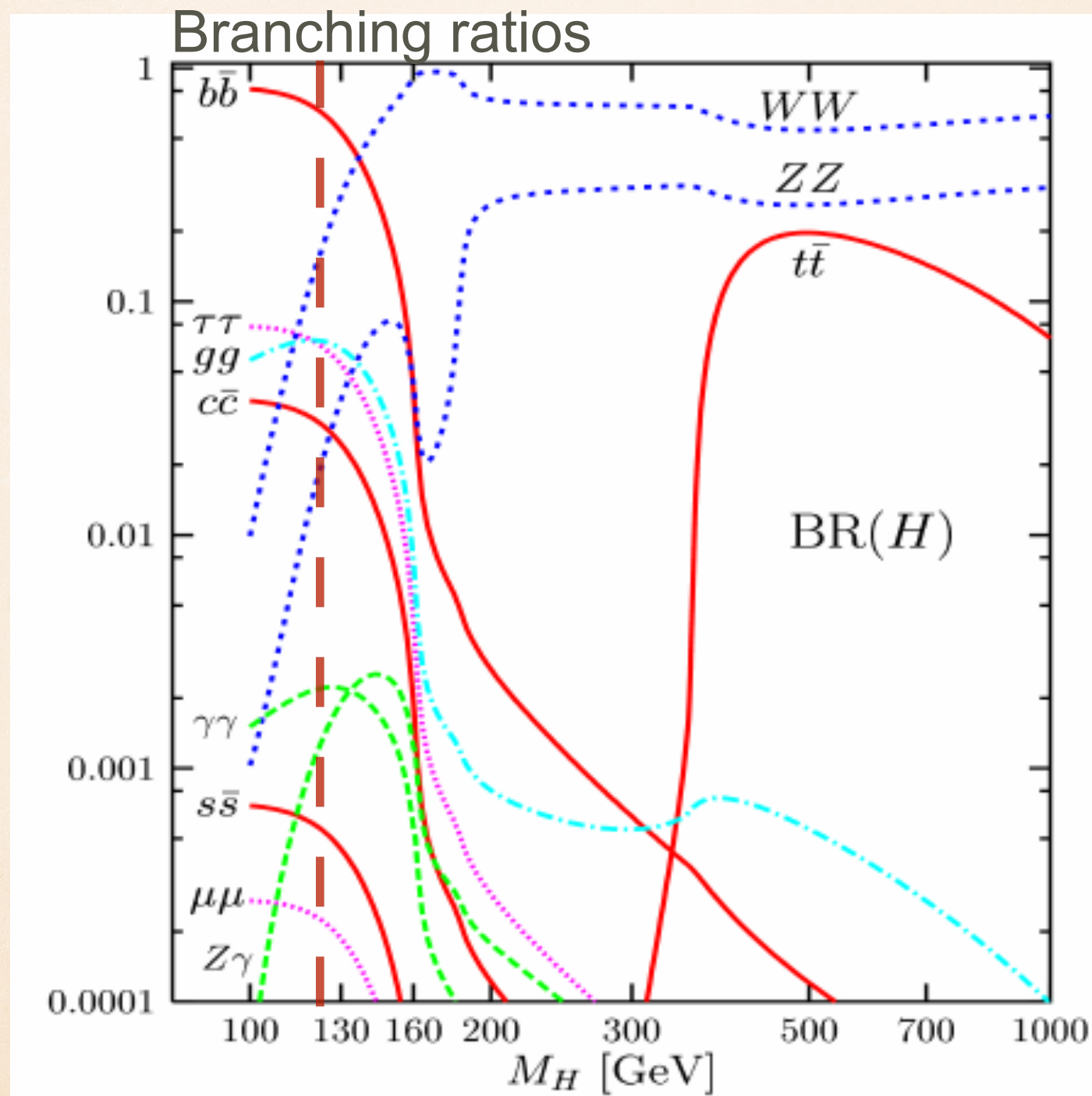
- * *A Higgs-bozon felfedezése és az elektrogyenge szimmetriasértés megértésének kezdete*
- * *Elképesztő egyezés a SM elmélet és a mérési eredmények között*
- * *Új fizikára utaló jelek a TeV skála körül a legjobb esetben is csalókák*
- * *A gyorsítók és a detektorok tulajdonságai sokkal jobbak, mint az eredeti várakozások*

EDDIGI GYORSÍTÓK ÉS AZ LHC ÜZENETE

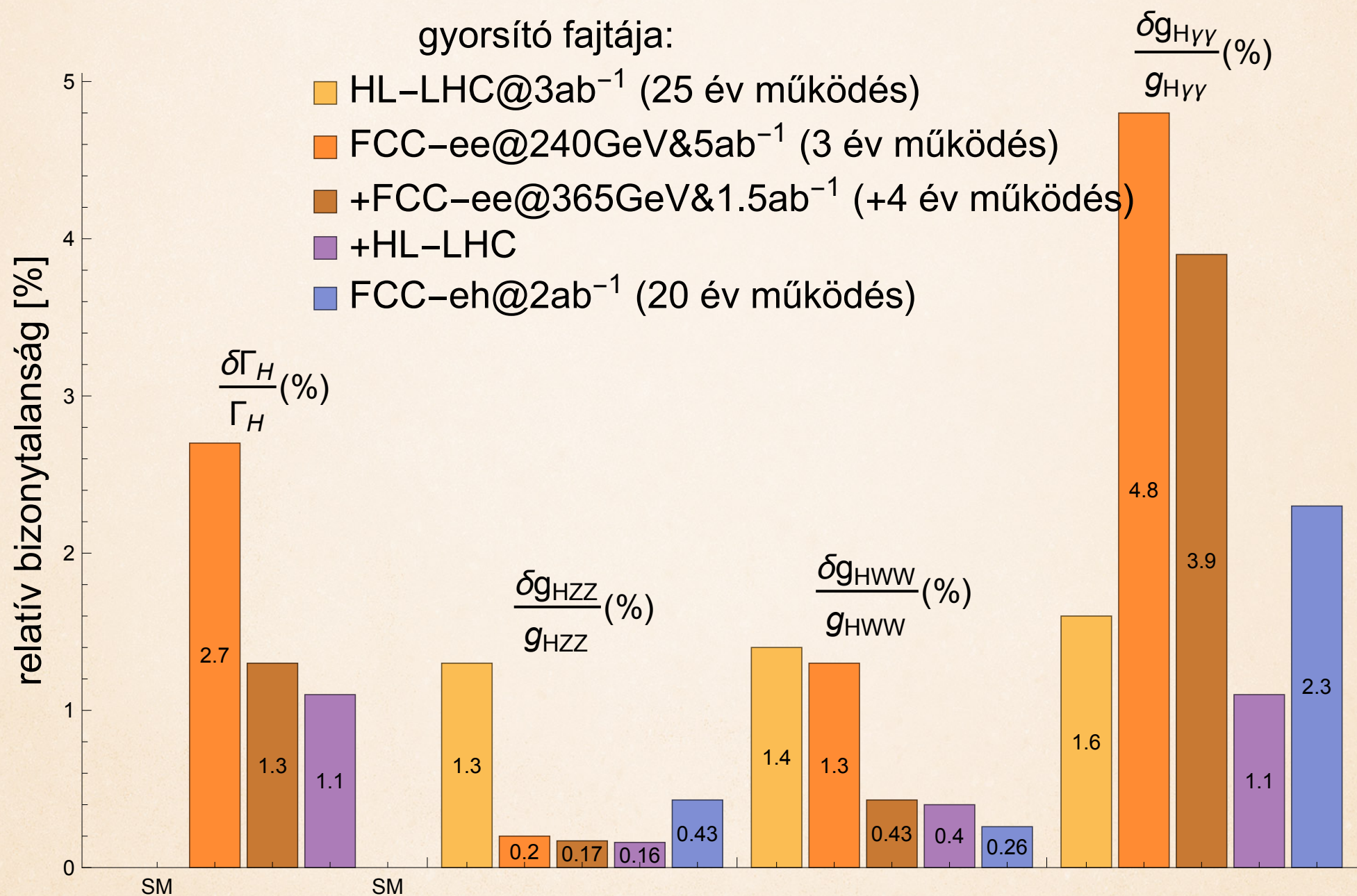
- * *A Higgs-bozon felfedezése és az elektrogyenge szimmetriasértés megértésének kezdete*
- * *Elképesztő egyezés a SM elmélet és a mérési eredmények között*
- * *Új fizikára utaló jelek a TeV skála körül a legjobb esetben is csalókák*
- * *A gyorsítók és a detektorok tulajdonságai sokkal jobbak, mint az eredeti várakozások*
- * *Az elméleti becslések pontosságának javulása fokozza a pontos mérések fontosságába vetett bizalmat*

Az FCC PRECÍZIÓS MŰSZER LESZ

A HIGGS-BOZON BOMLÁSI SZÉLESSÉGEI A SM-BEN

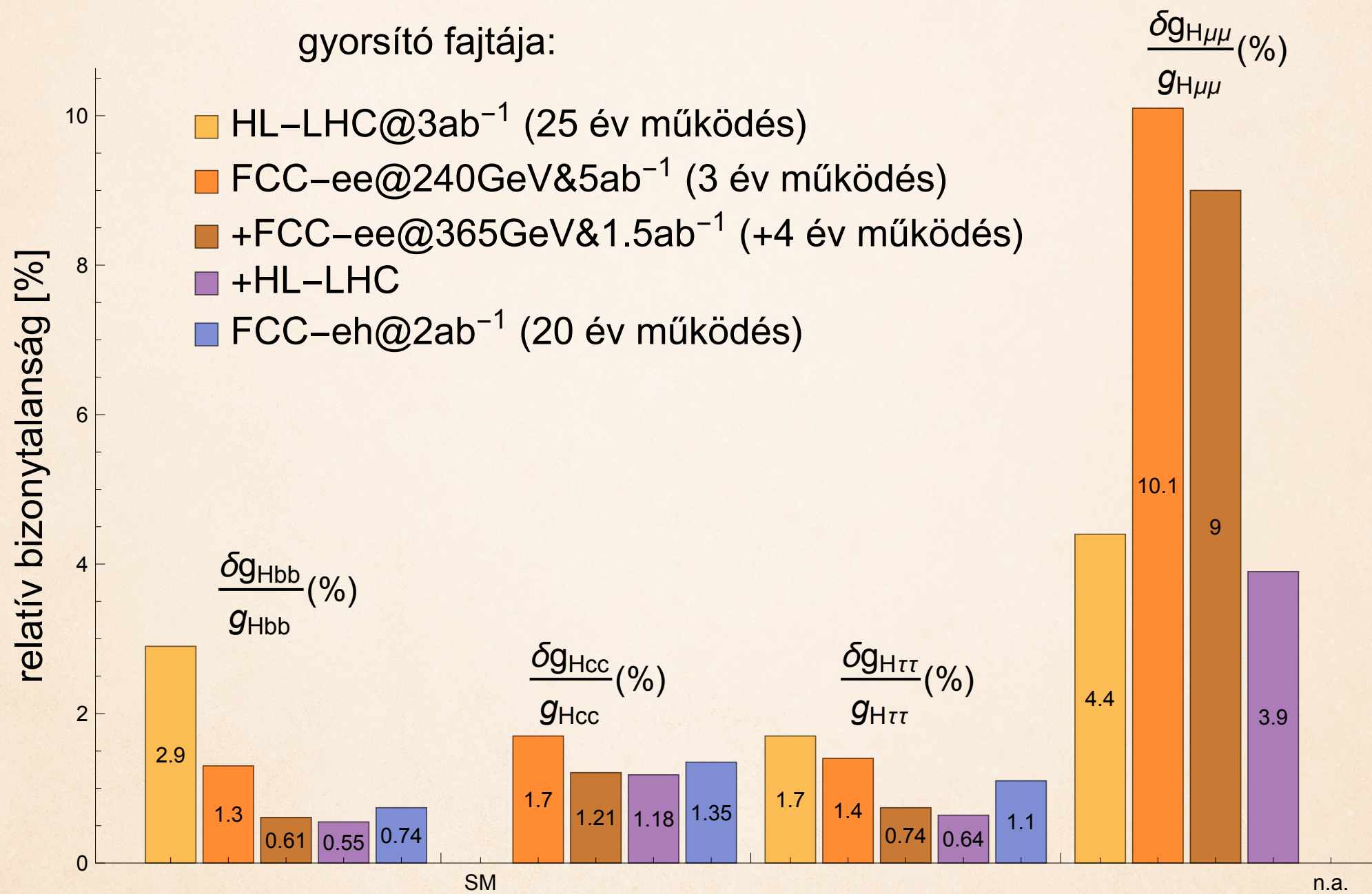


A HIGGS SZÉLESSÉGÉNEK ÉS CSATOLÁSAINAK VÁRT PONTOSSÁGA



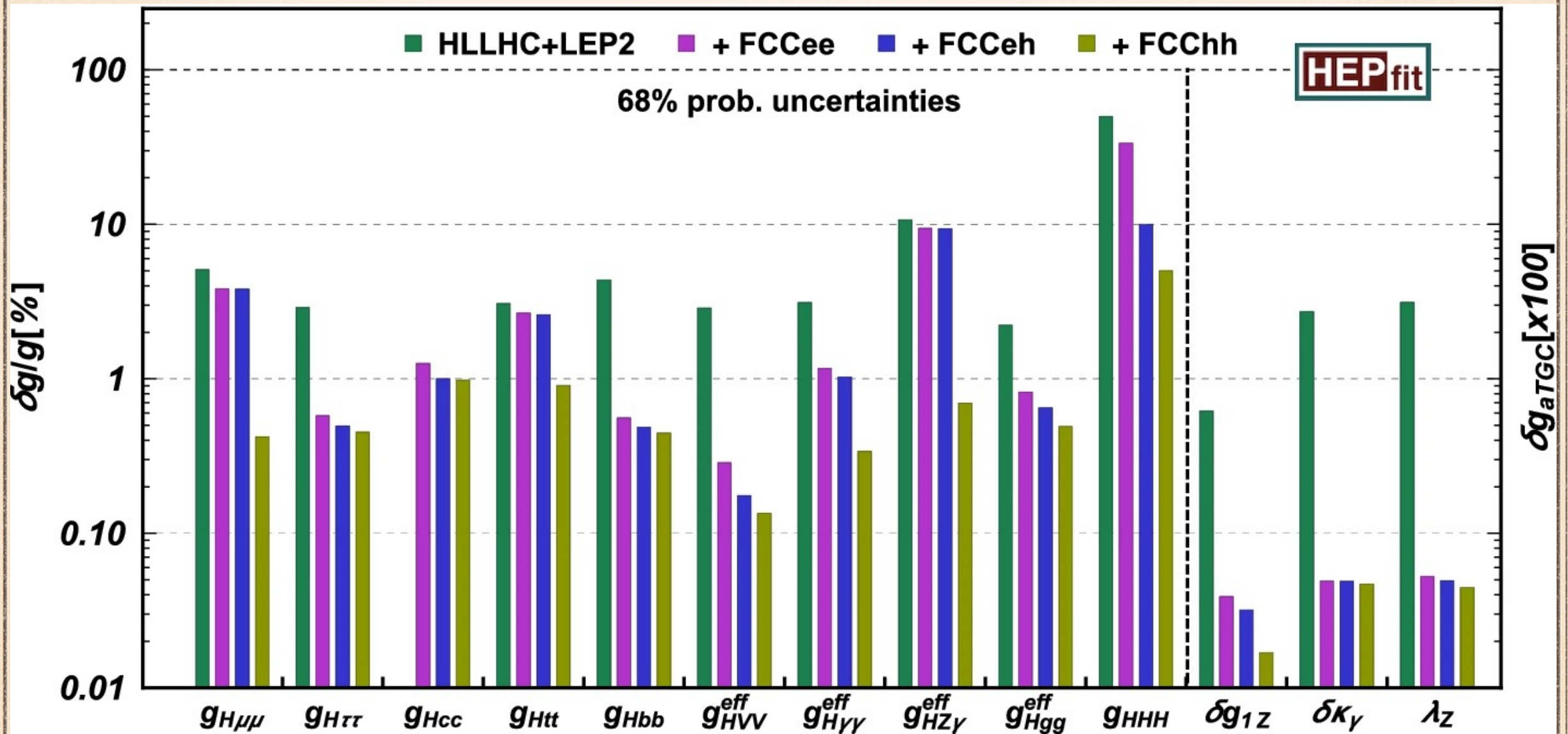
SM = SM BECSLÉSHEZ RÖGZÍTETT ÉRTÉK

A HIGGS CSATOLÁSAINAK VÁRT PONTOSSÁGA AZ FCC-LEPTON MÓDBAN



SM = SM BECSLÉSHEZ RÖGZÍTETT ÉRTÉK

A HIGGS CSATOLÁSAINAK VÁRT PONTOSSÁGA AZ FCC ÖSSZES MÓDBAN



ELECTROWEAK PRECISION OBSERVABLES VÁRHATÓ ÉRZÉKENYSÉGE AZ FCC-EE-N

Observable	present value \pm error	FCC-ee Stat.	FCC-ee Syst.	Comment and dominant exp. error
m_Z (keV/c ²)	91186700 \pm 2200	5	100	From Z line shape scan Beam energy calibration
Γ_Z (keV)	2495200 \pm 2300	8	100	From Z line shape scan Beam energy calibration
R_ℓ^Z ($\times 10^3$)	20767 \pm 25	0.06	0.2-1	ratio of hadrons to leptons acceptance for leptons
$\alpha_s(m_Z)$ ($\times 10^4$)	1196 \pm 30	0.1	0.4-1.6	from R_ℓ^Z above
R_b ($\times 10^6$)	216290 \pm 660	0.3	<60	ratio of $b\bar{b}$ to hadrons stat. extrapol. from SLD
σ_{had}^0 ($\times 10^3$) (nb)	41541 \pm 37	0.1	4	peak hadronic cross-section luminosity measurement
N_ν ($\times 10^3$)	2991 \pm 7	0.005	1	Z peak cross sections Luminosity measurement
$\sin^2 \theta_W^{\text{eff}}$ ($\times 10^6$)	231480 \pm 160	3	2 - 5	from $A_{\text{FB}}^{\mu\mu}$ at Z peak Beam energy calibration
$1/\alpha_{\text{QED}}(m_Z)$ ($\times 10^3$)	128952 \pm 14	4	small	from $A_{\text{FB}}^{\mu\mu}$ off peak

⇒ ÚJ FIZIKÁRA ÉRZÉKENY 70 TeV-IG 6 DIM OPERÁTOROKKAL

ELECTROWEAK PRECISION OBSERVABLES VÁRHATÓ ÉRZÉKENYSÉGE AZ FCC-EE-N

Observable	present value \pm error	FCC-ee Stat.	FCC-ee Syst.	Comment and dominant exp. error
$A_{\text{FB}}^b, 0 (\times 10^4)$	992 ± 16	0.02	1-3	b-quark asymmetry at Z pole from jet charge
$A_{\text{FB}}^{\text{pol}, \tau} (\times 10^4)$	1498 ± 49	0.15	<2	τ polarisation and charge asymmetry τ decay physics
$m_W (\text{keV}/c^2)$	803500 ± 15000	600	300	From WW threshold scan Beam energy calibration
$\Gamma_W (\text{keV})$	208500 ± 42000	1500	300	From WW threshold scan Beam energy calibration
$\alpha_s(m_W)(\times 10^4)$	1170 ± 420	3	small	from R_ℓ^W
$N_\nu (\times 10^3)$	2920 ± 50	0.8	small	ratio of invis. to leptonic in radiative Z returns
$m_{\text{top}} (\text{MeV}/c^2)$	172740 ± 500	20	small	From $t\bar{t}$ threshold scan QCD errors dominate
$\Gamma_{\text{top}} (\text{MeV}/c^2)$	1410 ± 190	40	small	From $t\bar{t}$ threshold scan QCD errors dominate
$\lambda_{\text{top}}/\lambda_{\text{top}}^{\text{SM}}$	1.2 ± 0.3	0.08	small	From $t\bar{t}$ threshold scan QCD errors dominate
ttZ couplings	$\pm 30\%$	<2%	small	From $E_{\text{CM}} = 365\text{GeV}$ run

ELECTROWEAK PRECISION OBSERVABLES VÁRHATÓ ÉRZÉKENYSÉGE AZ FCC-EE-N

Observable	present value \pm error	FCC-ee Stat.	FCC-ee Syst.	Comment and imp. error
$A_{\text{FB}}^b, 0 (\times 10^4)$	992 ± 16	0.02	1-3	from jet charge
$A_{\text{FB}}^{\text{pol}, \tau} (\times 10^4)$	1498 ± 49	0.15		and charge asymmetry τ decay physics
$m_W (\text{keV}/c^2)$	803500 ± 15000			From WW threshold scan Beam energy calibration
$\Gamma_W (\text{keV})$	208500		500	From WW threshold scan Beam energy calibration
$\alpha_s(m_W)(\times 10^4)$		3	small	from R_ℓ^W
$N_\nu (\times 10^3)$		0.8	small	ratio of invis. to leptonic in radiative Z returns
$m_{\text{top}} (\text{GeV})$	1740 ± 500	20	small	From $t\bar{t}$ threshold scan QCD errors dominate
$\Gamma_{\text{top}} (\text{MeV})$	1410 ± 190	40	small	From $t\bar{t}$ threshold scan QCD errors dominate
$\lambda_{\text{top}}/\lambda_{\text{top}}^{\text{SM}}$	1.2 ± 0.3	0.08	small	From $t\bar{t}$ threshold scan QCD errors dominate
ttZ couplings	$\pm 30\%$	$<2\%$	small	From $E_{\text{CM}} = 365\text{GeV}$ run

Legalább egy nagyságrenddel kisebb bizonytalanság mint a LEP-en mért értékek

FELFEDEZÉSI POTENCIÁL

* *A 10-100 TeV energiatartomány KÖZVETETT FELTÁRÁSA*

precíziós mérésekkel:

- Higgs-boson csatolások (szélesség, tömeg) akár 10-szer pontosabb és modellfüggetlen mérése
- A W , Z , H (bozonok) és b , c , t , τ (fermionok) részecskék korrelált tulajdonságainak feltárása
- Az összes EWPO (elektrogyenge precíziós mennyiség) mérése akár 20-50-szer pontosabban

* *Talán FELFEDEZÉSEK*

- a SM nem teljesen pontos [valószínű]
- lepton-íz függetlenség, megmaradás sérülése [nem a szívem csücske]
- új részecskék felfedezése [mindenki reménye]

PÉLDA ARRRA, HOGY

A SM NEM PONTOS/ÚJ RÉSZECSCKE FELFEDEZÉSE

A SM $U(1)$ KITERJESZTÉSE

$U(1)_Z$ kiterjesztés tulajdonságai:

- Renormálható
- Megmagyarázza az összes megalapozott BSM jelenséget
- Új, semleges Z' bozont jósol, amely nem lehet nulla tömegű (különben keveredne a fotonnal)
- a tömeges Z' megköveteli egy további komplex skalár létezését, amelynek alapállapota sérti az $U(1)_Z$ szimmetriát \Rightarrow az új Higgs-szerű skalár s keveredik az igazi h Higgs-bozonnal
- A mértékanomáliák kiejtése megköveteli a nehéz semleges leptonok (heavy neutral lepton, HNL) létezését: 3 jobbkezes SM-steril neutrínó részt vehet az aktív neutrínók tömeggenerálásában

Ha $M_{Z'}^2 \ll M_Z^2$ akkor a skalár szektor szabad paramétereit

- M_s skalártömeg (és m_{N_i} HNL tömegek)
- θ_s skalár keveredési szög és

- a VEVek hányadosa $\tan \beta = \frac{w}{v} \propto |\sin \theta_Z|^{-1} \frac{M_{Z'}}{M_Z}$

EXISTENCE OF SCALARS AND ARE INTERCONNECTED

- Ha Z' elegendően könnyű, $M_{Z'}^2 \ll M_Z^2$, akkor $h \rightarrow Z'Z'$ bomlási csatorna mérhetően megváltoztathatja a Higgs-bozon szélességét, amit felhasználhatunk a model paraméterterének megszorításához (a többi csatorna járuléka elenyésző)

$$\Gamma(h \rightarrow Z'Z') = \underbrace{\frac{G_F M_h^3}{16\sqrt{2}\pi} \left(\frac{\sin \theta_S}{\tan \beta} \right)^2}_{= 320 \text{ MeV}} + \mathcal{O} \left(\frac{M_{Z'}^2}{M_Z^2} \right)$$

$$\Gamma_h^{\text{ATLAS}} = 3.2_{-1.7}^{+2.4} \text{ MeV} / \Gamma_h^{\text{CMS}} = 4.5_{-2.5}^{+3.3} \text{ MeV}$$

$$\Gamma_h = \cos^2 \theta_S \Gamma_h^{\text{SM}} + \Gamma(h \rightarrow Z'Z')$$

JELERŐSSÉGEK

$$\text{LHC: } \mu_{\text{exp}} = \frac{(\sigma \text{ Br})_{\text{obs}}}{(\sigma \text{ Br})_{\text{SM}}} \quad \text{BSM: } \mu_{\text{BSM}} = \frac{(\sigma \text{ B})_{\text{BSM}}}{(\sigma \text{ B})_{\text{SM}}}$$

$$\mu_{\text{tot}}^{\text{ATLAS}} = 1.05 \pm 0.06, \quad \mu_{\text{tot}}^{\text{CMS}} = 1.02 \pm 0.06, \quad \mu_{\text{tot}}^{\text{BSM}} = \cos^2 \theta_s$$

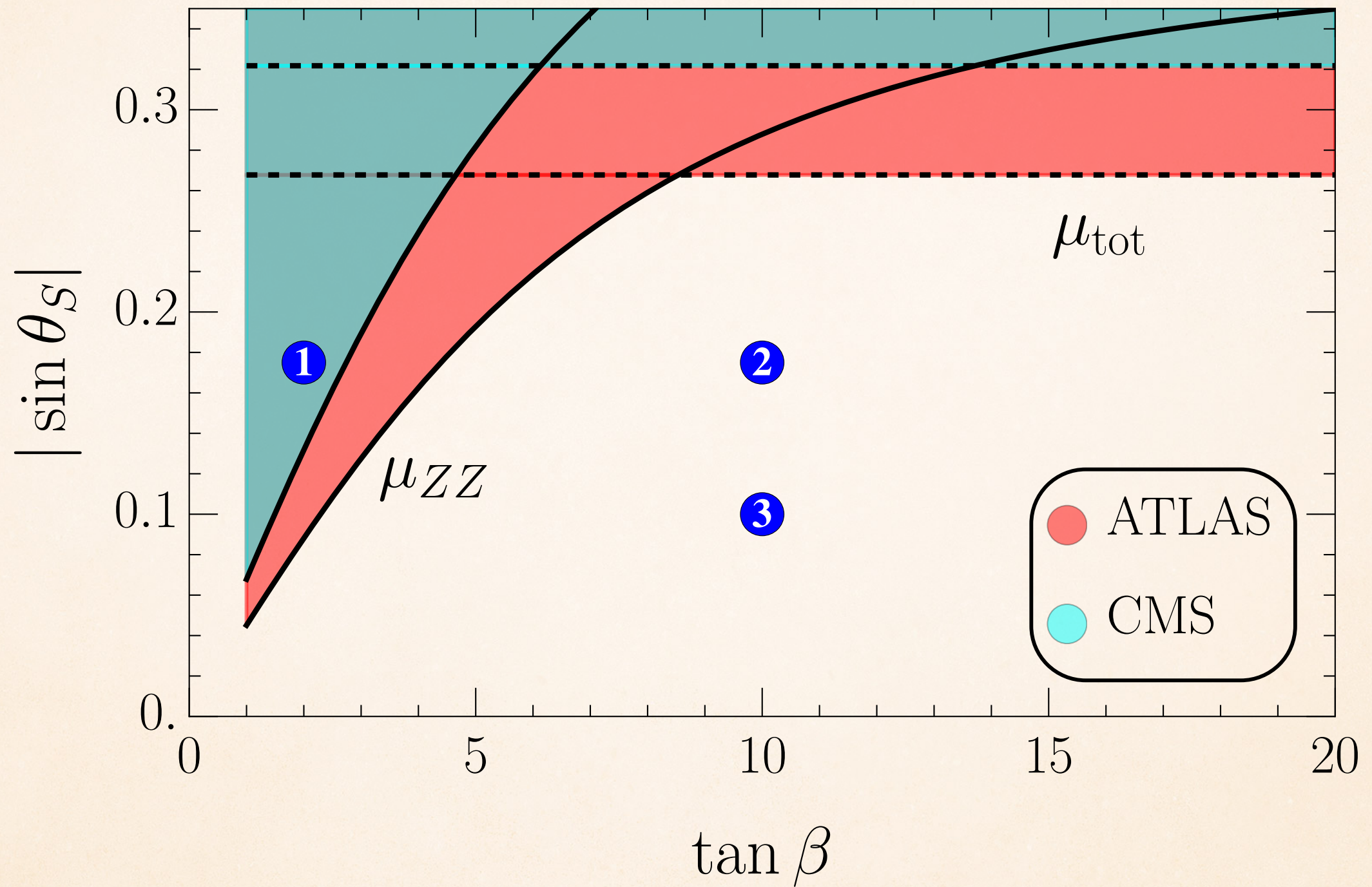
A legpontosabban mért csatorna a $h \rightarrow ZZ^*$ ($\rightarrow 4\ell$ felfedezési csatorna)

Ebben a csatornában a becsült jelerősség:

$$\mu_{ZZ} = \frac{\cos^4 \theta_s \Gamma_h^{\text{SM}}}{\cos^2 \theta_s \Gamma_h^{\text{SM}} + \Gamma(h \rightarrow Z'Z')} \cos^4 \theta_s$$

PDG értékekkel:
$$\mu_{ZZ} = \frac{\cos^4 \theta_s}{\cos^2 \theta_s + 78.74 (\sin \theta_s / \tan \beta)^2}$$

A SKALÁR KEVEREDÉSI SZÖG MEGSZORÍTÁSA



REFERENCIA PONTOK: KELETKEZÉSÉS BOMLÁS

BP1 : $\theta_S = 0.175, \tan \beta = 2, M_S = 500 \text{ GeV},$ BP1 : $M_{Z'} = 18 \text{ MeV}, s_Z = 10^{-4},$
 BP2 : $\theta_S = 0.175, \tan \beta = 10, M_S = 500 \text{ GeV},$ BP2 : $M_{Z'} = 91 \text{ MeV}, s_Z = 10^{-4},$
 BP3 : $\theta_S = 0.10, \tan \beta = 10, M_S = 1000 \text{ GeV}.$ BP3 : $M_{Z'} = 91 \text{ MeV}, s_Z = 10^{-4}.$

	h			s		
	BP1	BP2	BP3	BP1	BP2	BP3
–	BP1	BP2	BP3	BP1	BP2	BP3
$\sigma_{\text{prod}} [\text{pb}]$	53	53	54	0.16	0.16	0.001
$\Gamma [\text{GeV}]$	$6.4 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$	8.3	2.9	8.5
$\text{Br}(hh)$	–	–	–	0.09	0.23	0.20
$\text{Br}(W^+W^-)$	0.13	0.21	0.21	0.13	0.37	0.37
$\text{Br}(ZZ)$	0.016	0.026	0.026	0.06	0.18	0.18
$\text{Br}(Z'Z')$	0.38	0.024	0.008	0.6	0.07	0.19
$\text{Br}(b\bar{b})$	0.36	0.57	0.58	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$
$\text{Br}(t\bar{t})$	–	–	–	0.05	0.14	0.05
$2 \times \text{Br}(NN)$	–	–	–	0.07	0.009	0.07

FCC LEPTON MÓDBAN GAZDAG FIZIKÁVAL KECSEGTET

✓ *Javítani fogja az ismert fizika (EW és QCD) pontosságát*

- W, Z, t tömegei és szélességei; A_{FB}, R_ℓ, N_ν
- $\alpha_s(M_Z)$ ezrelékes pontossággal
- parton fragmentáció, nem-perturbatív QCD

✓ *A skalár szektor (majdnem) teljes feltárása*

- h tömege és szélessége, skalár öncsatolás (potenciál, Yukawák)

✓ *íz-gyár*

- FCC-ee $\mathcal{O}(10^{12})$ $c\bar{c}, b\bar{b}, \mathcal{O}(10^{11})$ $\tau^+\tau^-$ párt fog termelni
- lepton univerzalitás tesztelése,
- CKM mátrix és CP-sértés

✓ *Új fizika kezelése*

- Új könnyű részecskék (axion-szerű részecskék, Z')
- HNL-ek, hosszú élettartamú részecskék

Nagyon biztató, de nagy gonddal:
Óriási költségek és nagyon távoli időben



Vége