

Higgs-bozonok keresése az LHC-nál

MAFIHE téli iskola, Gyenesdiás, 2008.02.04.

Horváth Dezső

MTA KFKI Részecske– és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest
és ATOMKI, Debrecen



Higgs-bozonok keresése

- **A Standard modell Higgs-bozonja**
 - A Higgs-bozon lehetséges keletkezése és bomlása.
 - Higgs-keresés a nagy elektron-pozitron ütköztetőnél (LEP).
 - Higgs-keresés a nagy hadronütköztetőnél (LHC).
- **A Standard modell kiterjesztése**
 - Szuperszimmetrikus részecskék.
 - Két Higgs-dublett.
 - Semleges Higgs-bozonok keresése (LEP, LHC)
 - Töltött Higgs-bozonok keresése (LEP, LHC)
 - Szuperszimmetria keresése

A SM Higgs–bozonja

A Standard modell Higgs–mechanizmusa

1 komplex dublett–tér \rightarrow 4 szab. fok

\rightarrow 3 tömeg (W^\pm , Z) + H

$$V_{\min} \text{ at } \phi = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

$v \sim 246 \text{ GeV} =$ vákuum-beli várható érték

Spin nélküli, semleges, nehéz részecske

Renormálás skalár részecskéje, kvantumszámok nélkül

Létezik? SM: muszáj!

A SM Higgs–bozonja

A SM megadja a keletkezési és bomlási valószínűségeit.

Minden tömegfüggő, pl. fermion–párra bomlásé

$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = \frac{N_c g^2 m_f^2}{32\pi m_W^2} \beta^3 m_H$$

N_c színek száma (leptonok: 1; kvarkok: 3)

$g^2 \sim 0.425$ csatolási állandó

$\beta^2 = 1 - 4 \frac{m_f^2}{m_H^2}$ fermion–sebesség ($c = 1$).

Legnehezebb részecskék előnyben

Tömeget a SM nem jósol, csak limitál:

$$30 \text{ GeV} < m_H < 500 \text{ GeV}$$

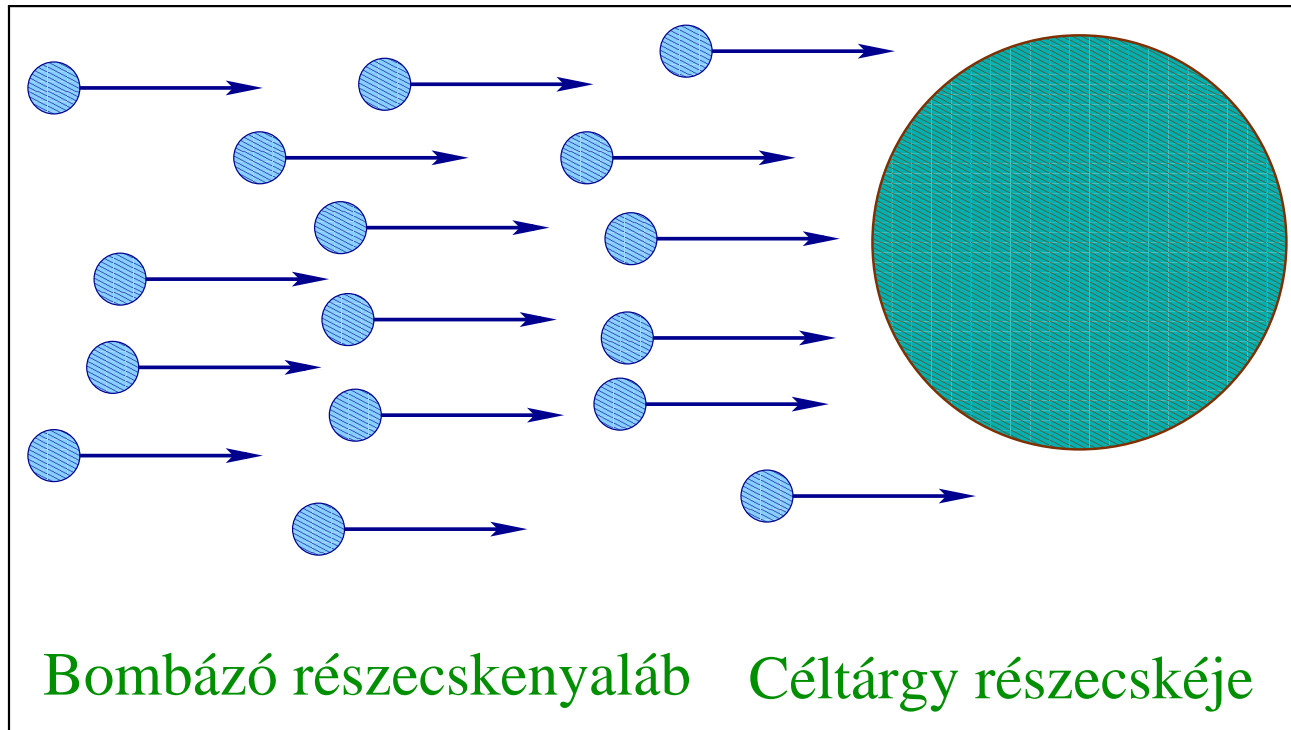
Ha a SM perturbatív $E_{\text{GUT}} = 10^{16}$ GeV-ig:

$$130 \text{ GeV} < m_H < 190 \text{ GeV}$$

(GUT: Grand Unification Theory)



Amit mérünk: hatáskeresztmetszet



$\sigma = W/\Phi$ átmeneti valószínűség/fluxus

Egysége: 1 barn = 10^{-28} m² (1 pb = 10^{-40} m²)

Fluxus = részecskék sűrűsége \times sebessége nyalábbbban:

$\Phi = n_b \cdot v_b =$ részecskeszám/felület/sec

Amit mérünk: rezonancia

$\tau = \Gamma^{-1}$ élettartam \Rightarrow exp. bomlás: $N(t) = N_0 e^{-\Gamma t}$

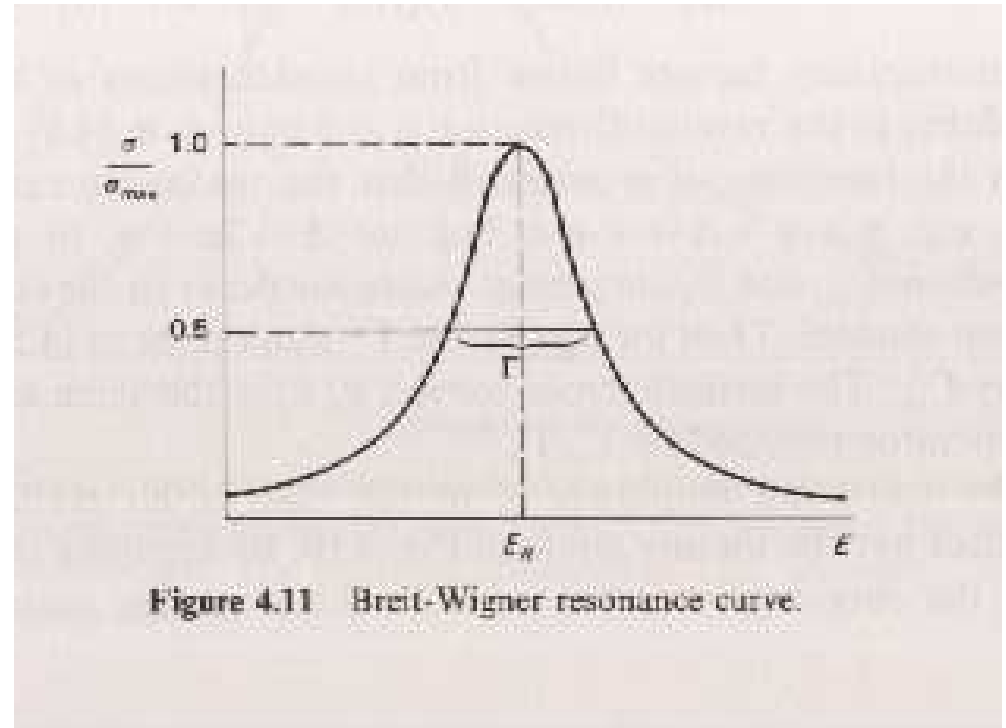
Valószínűségeloszlás:

$$|\chi(E)|^2 = \frac{1}{(E-M)^2 + \Gamma^2/4}$$

Breit-Wigner-formula

M } rezonancia { helye
 Γ } { szélessége

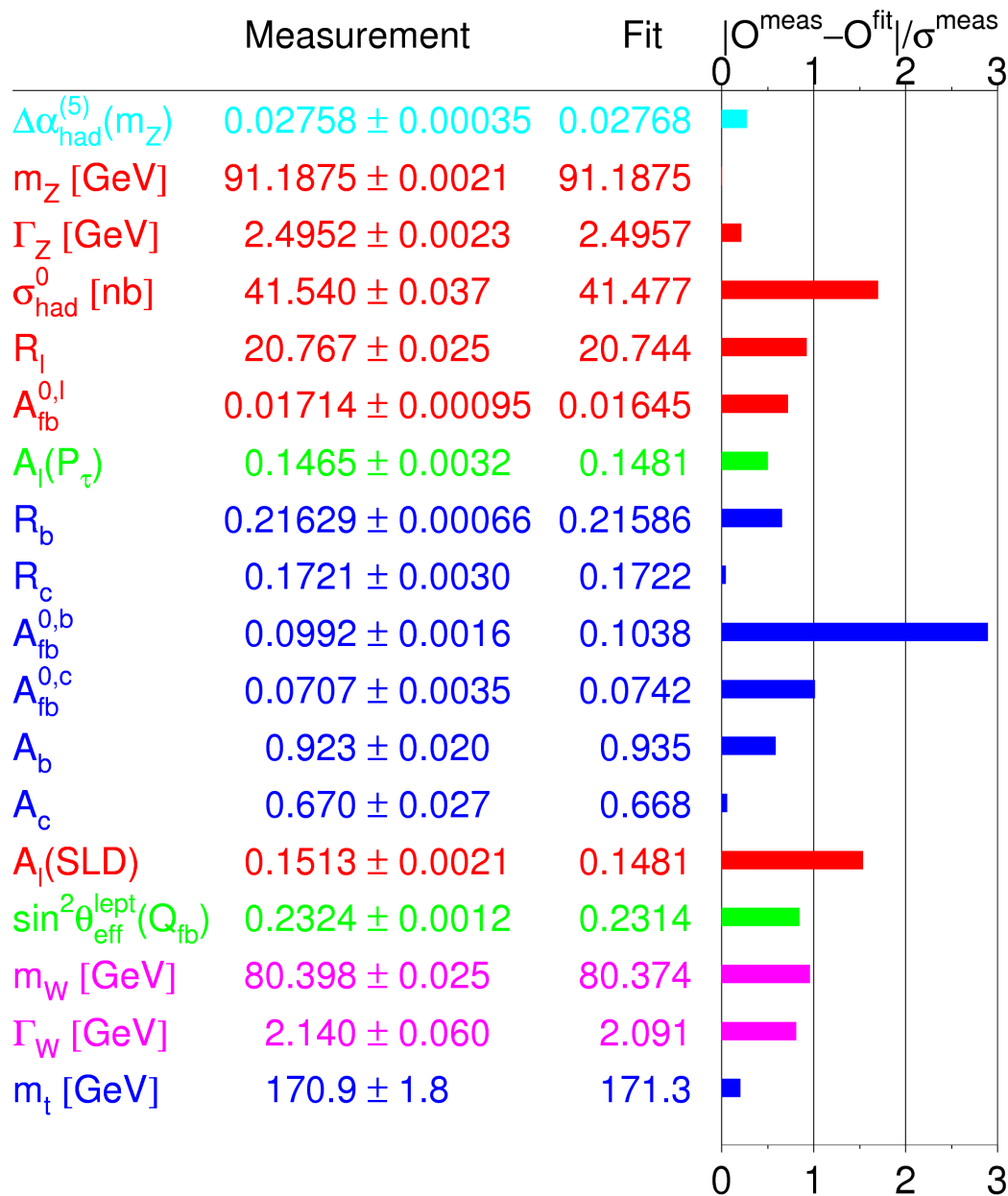
$$(\hbar = 1, c = 1)$$



Lorentz-görbe

Új részecske felfedezése:
rezonancia a tömegnek megfelelő ütközési energiánál

A Standard modell diadalútja



Állapot 2007 telén

Valamennyi kísérlet

sokszáz eredményéből

$|Mért-számolt|/szórás$

Enyhén eltérő adat évről

évre változik

Most éppen a

$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow b\bar{b}$

előre-hátra aszimmetriája

LEP elektroyenge munkacsoport:

<http://lepewwg.web.cern.ch/>



De hol van a Higgs-bozon?

A fizika legkeresettebb részecskéje, mivel a Standard modell egyetlen hiányzó alkatrésze.

Kísérletileg (még?) nem figyeltük meg,

$$\text{LEP: } M(H) > 114.4 \text{ GeV}$$

Az elmélet szerint léteznie kell mert tömeget teremt és rendbeteszi a divergenciákat

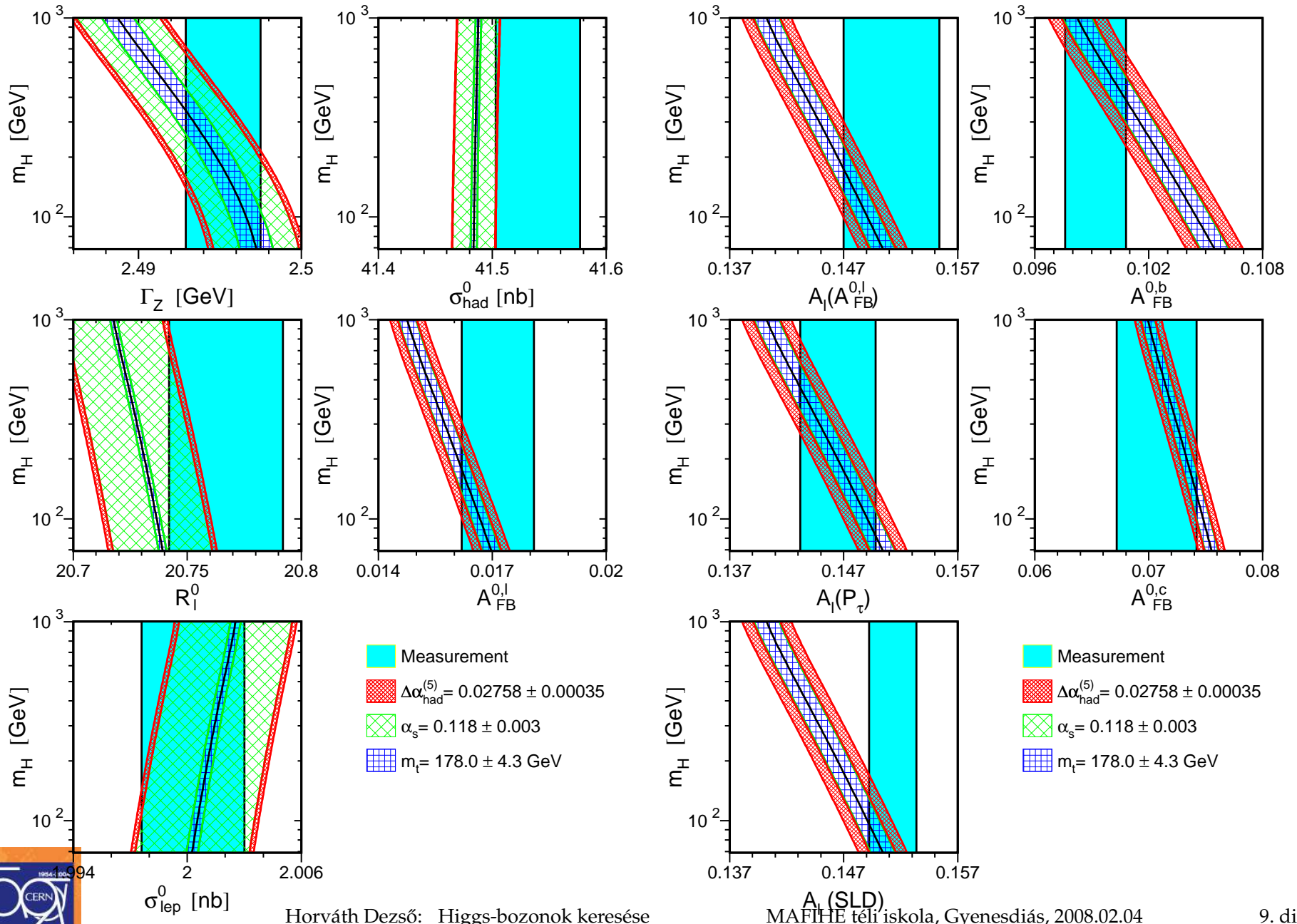
*„It was in 1972 ...
that my life as a boson really began”*

Peter Higgs:

*My Life as a Boson: The Story of „The Higgs”,
Int. J. Mod. Phys. A 17 Suppl. (2002) 86-88.*



SM-fitt \Leftrightarrow Higgs-tömeg (2005!)



Mekkora a Higgs-bozon tömege?

• Legalább 55 elméleti jóslat különböző modellekből:

- | | | |
|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|
| • $115.3 \pm 0.1 \text{ GeV}$ | • $131 \pm 10 \text{ GeV}$ | • $154 \pm 6 \text{ GeV}$ |
| • $117 \pm 4 \text{ GeV}$ | • $134 \pm 9 \text{ GeV}$ | • $155 \pm 8 \text{ GeV}$ |
| • $120 \pm 6 \text{ GeV}$ | • $135 \pm 6 \text{ GeV}$ | • $160 \pm 8 \text{ GeV}$ |
| • $121 \pm 6 \text{ GeV}$ | • $135 \pm 15 \text{ GeV}$ | • $160.9 \pm 0.1 \text{ GeV}$ |
| • $121.8 \pm 11 \text{ GeV}$ | • $137 \pm 23 \text{ GeV}$ | • 161.803399 GeV |
| • $122 \pm 10 \text{ GeV}$ | • $143 \pm 37 \text{ GeV}$ | • $170 \pm 10 \text{ GeV}$ |
| • $124 \pm 21 \text{ GeV}$ | • $144 \pm 4 \text{ GeV}$ | • $182 \pm 4 \text{ GeV}$ |
| • $124.2 \pm 13.2 \text{ GeV}$ | • $146 \pm 8 \text{ GeV}$ | • $185 \pm 5 \text{ GeV}$ |
| • $125 \pm 4 \text{ GeV}$ | • $146 \pm 19 \text{ GeV}$ | • $185.7 \pm 0.1 \text{ GeV}$ |
| • 129.6 GeV | • $148 \pm 34 \text{ GeV}$ | • $186 \pm 8 \text{ GeV}$ |
| • $130 \pm 6 \text{ GeV}$ | • $150 \pm 20 \text{ GeV}$ | • $197.2 \pm 124.8 \text{ GeV}$ |
| • $131 \pm 10 \text{ GeV}$ | • $153 \pm 3 \text{ GeV}$ | • ... |

Trócsányi Zoltán gyűjtése



A Higgs-bozon keresése

- Monte Carlo szimulációval teljes SM–háttér: SM–eseménytípusok, folyamatonként hatáskeresztmetszettel súlyozva.
- Higgs–jel: szimuláció összes lehetséges folyamatra és Higgs–tömegre.
- Mindez átengedve a detektor–szimuláción.
- Optimális válogatás: háttér = min, jel = max.
Pl. $\text{jel}/\sqrt{\text{háttér}} = \text{max}$.
- Adott luminozitásnál várható eseményszám jelre és háttérre különböző feltételek mellett.
- SM–háttér \sim kísérlet? (igen \downarrow / nem \uparrow).

A Higgs-bozon keresése

Mennyire jelszerű a mérés?

- Kísérleti eseményekhez MC alapján valószínűség: mennyire **jel** vagy **háttér**.
- Összegezés: kísérlet egésze mennyire **jel** vagy **háttér**.
- Így a különböző kísérletek eredménye **kombinálható**.
- Sok *kandidátus* esemény \Rightarrow jelszerű;
- kevesebb \Rightarrow háttérszerű.

Fizikai/filozófiai/statisztikai problémák:

- És ha a mért adat kevesebb, mint a várt háttér?
- És ha több, mint a várt háttér + jel?

Felfedezés vagy kizárás?

Likelihood: Mennyire jelszerű, amit látunk

$$L = \frac{P_{\text{Poisson}}(\text{kis} \mid j + h)}{P_{\text{Poisson}}(\text{kis} \mid h)} \quad j = \text{jel}, \quad h = \text{háttér}$$

Konfidenciaszint: CL

Ha a jel 5σ -val meghaladja a háttérét:
 \Rightarrow felfedeztük.

Ha nincs jel: $CL_h > 95\% \Rightarrow$ kizártuk.

Teszt-változó: $2 \ln Q \quad Q = L(j + h) / L(h)$



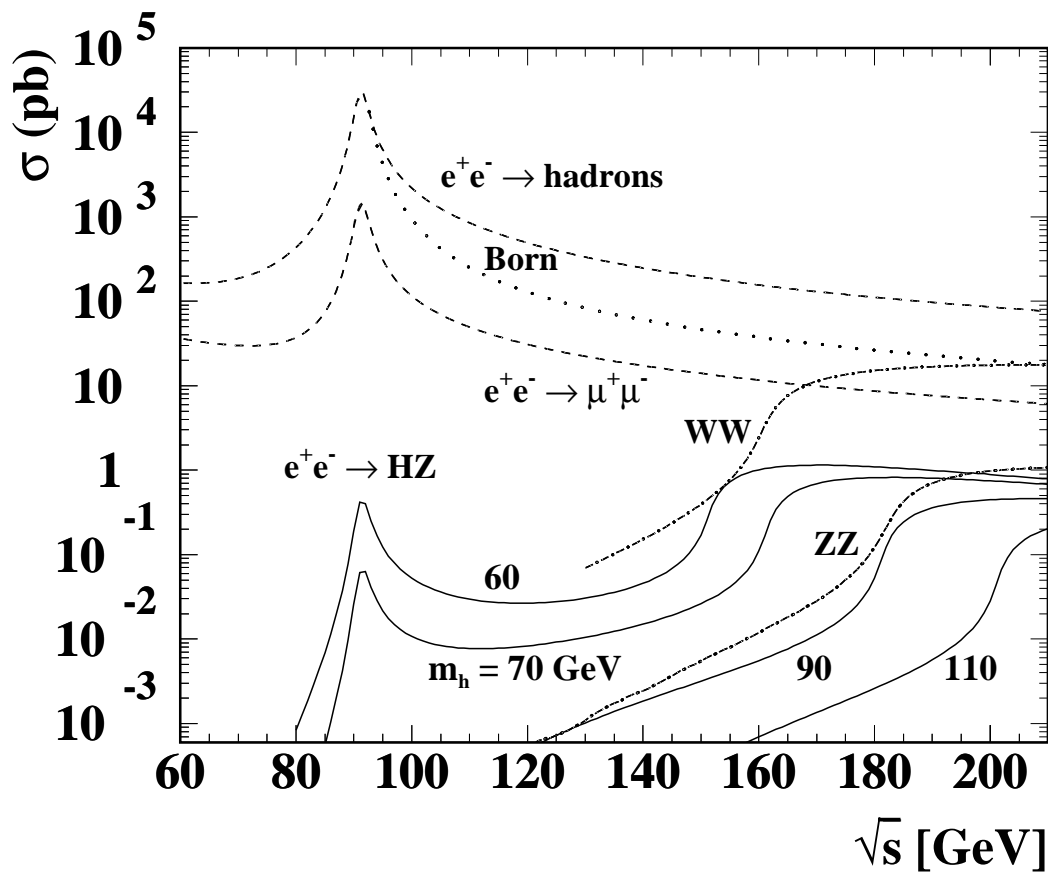
Higgs-sugárzás

SM jóslata:

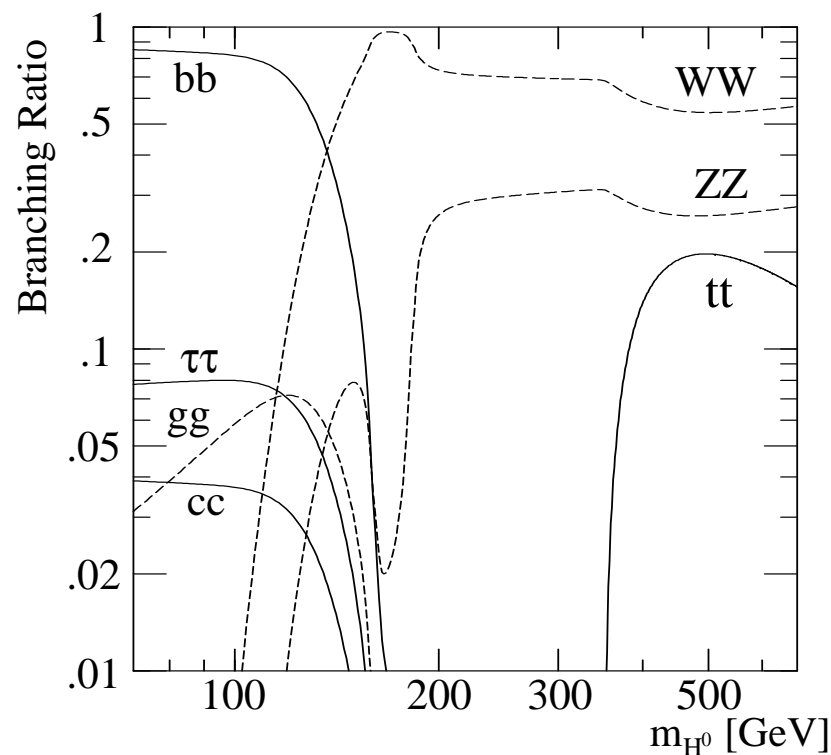
LEP-nél domináns keletkezés



Domináns bomlás ($m_{H^0} < 2M_{W^\pm}$):



$$\sigma(e^+e^- \rightarrow ZH)$$



Elágazási arány: $H \rightarrow XX$

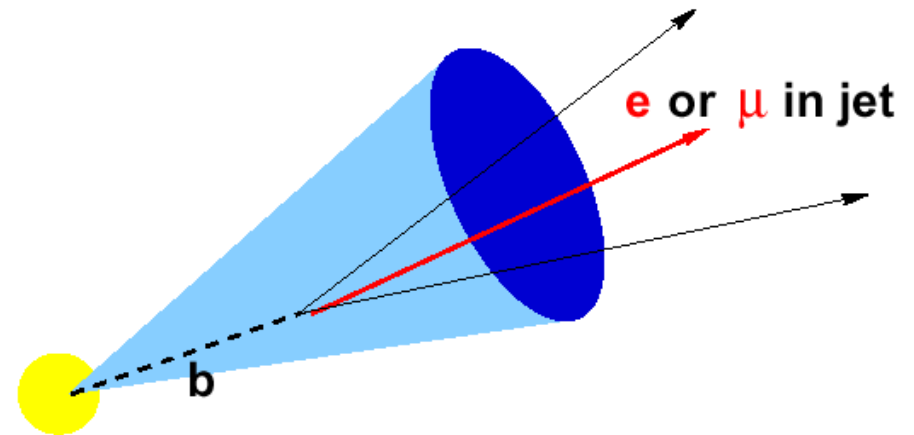
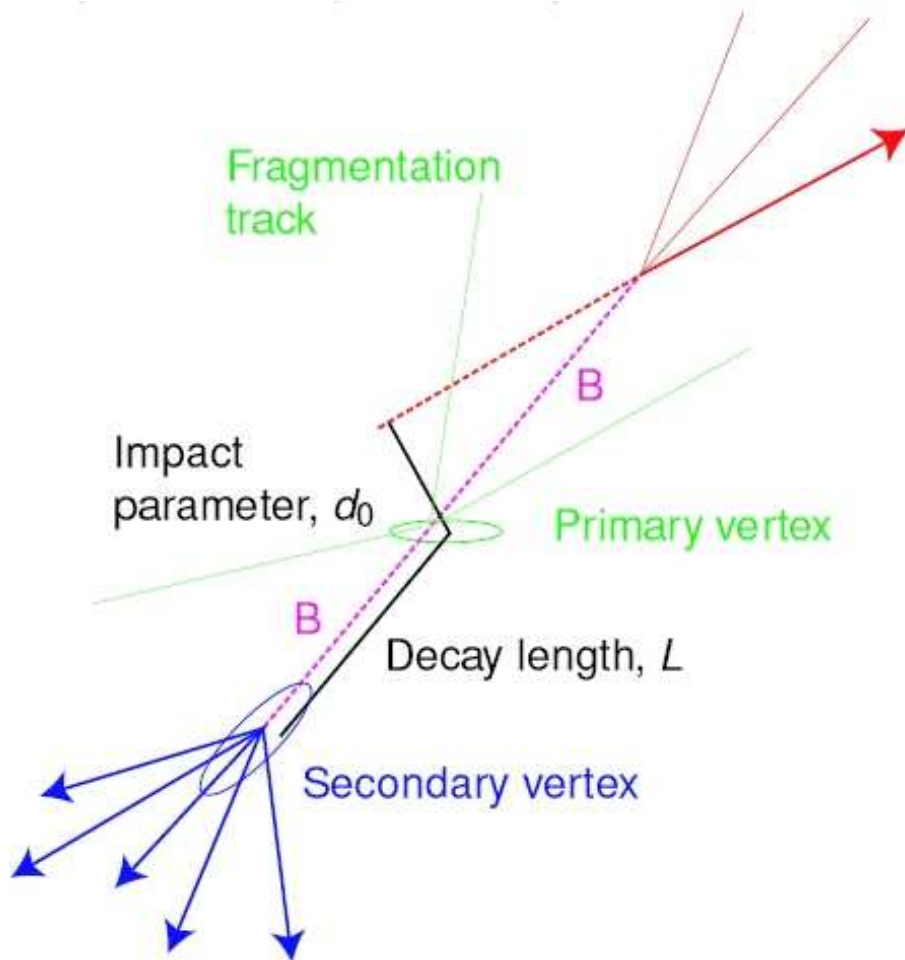


Higgs-keresés a LEP-nél: végállapotok

Z-bomlás	H-bomlás	csatorna	részarány
$Z \rightarrow q\bar{q}$	$H^0 \rightarrow b\bar{b}$	qqbb	61%
$Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$	$H^0 \rightarrow b\bar{b}$	bb + E_{mis}	17%
$Z \rightarrow e^+e^-$	$H^0 \rightarrow b\bar{b}$	bb + e^+e^-	3%
$Z \rightarrow \mu^+\mu^-$	$H^0 \rightarrow b\bar{b}$	bb + $\mu^+\mu^-$	3%
$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$	$H^0 \rightarrow b\bar{b}$	bb + $\tau^+\tau^-$	3%
$Z \rightarrow q\bar{q}$	$H^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$	bb + $\tau^+\tau^-$	5%
Összesen			92%

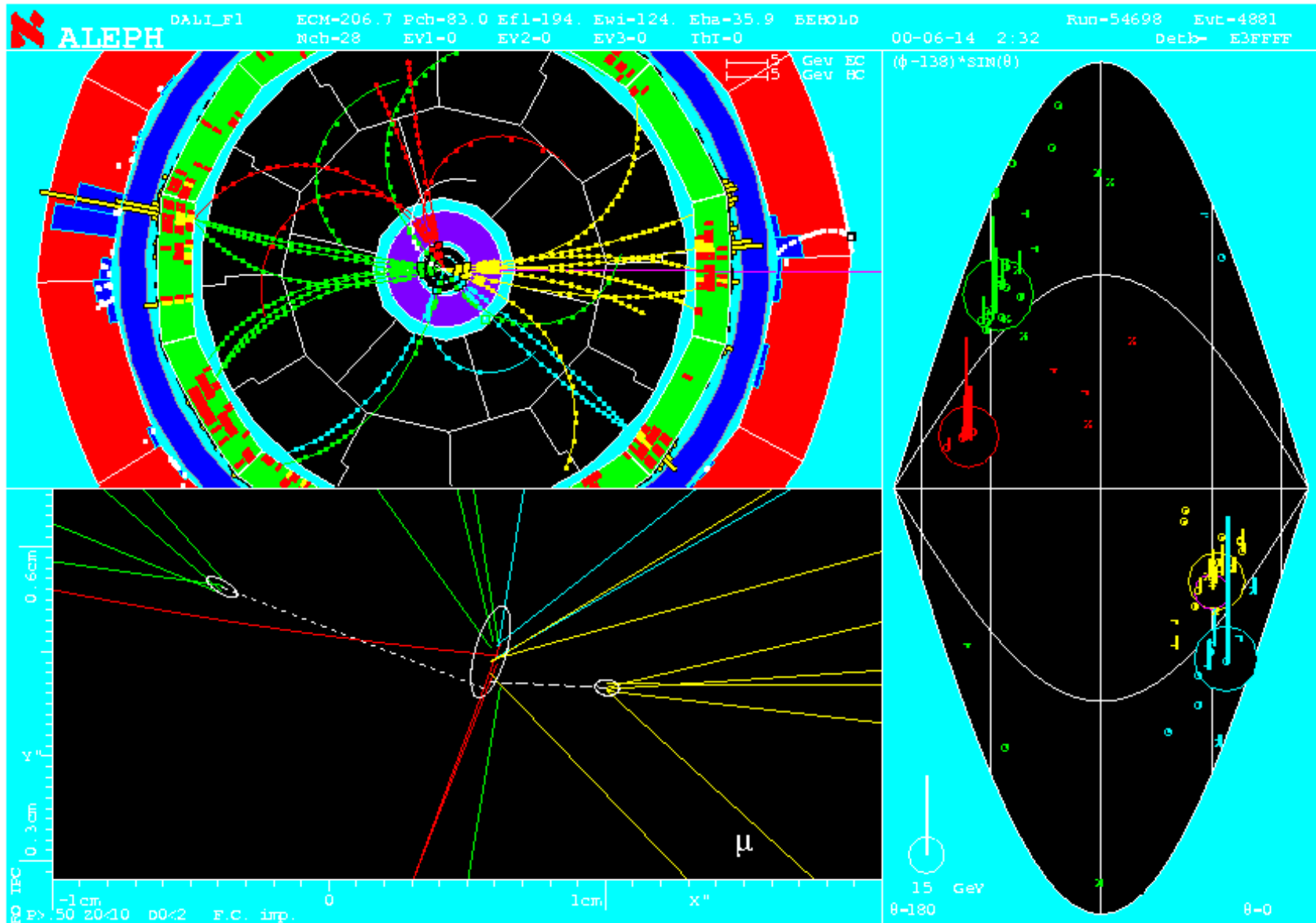
A b-kvark azonosítása

Több lépésben bomlik: $b \rightarrow W c$; $c \rightarrow W d$; $W \rightarrow \ell \nu$ vagy qq
hosszú élettartam \Rightarrow másodlagos vertex, lágy leptonok

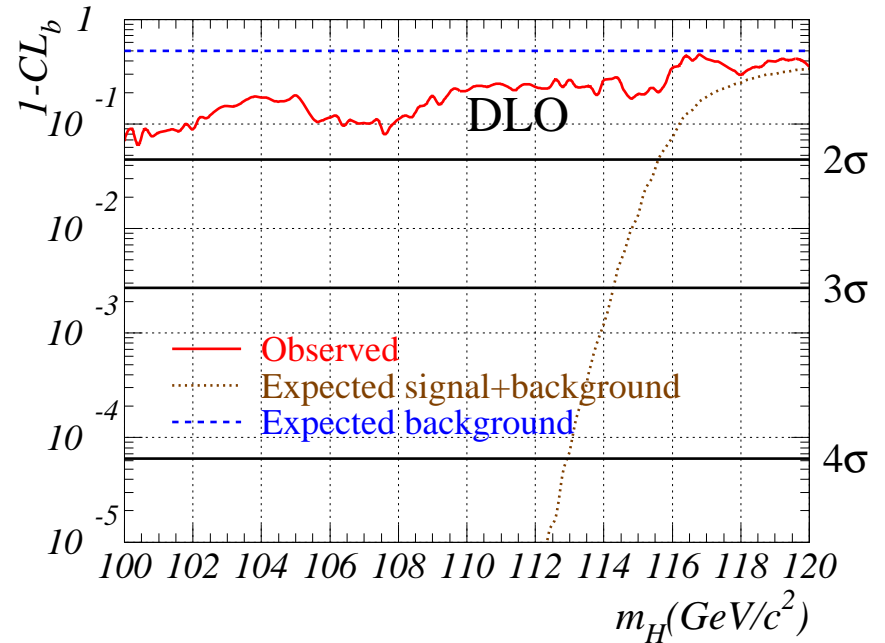
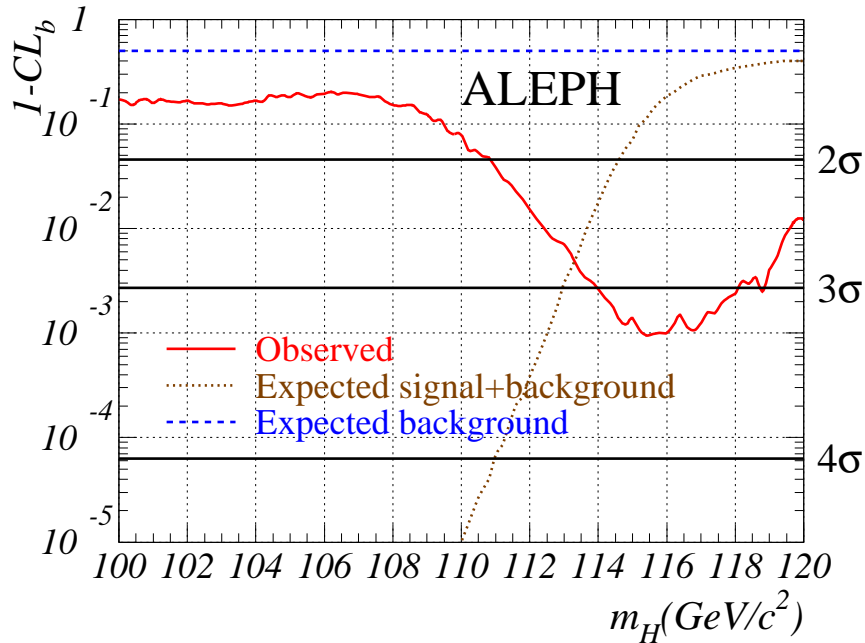


- $b \rightarrow \ell \nu c$ (BR \sim 20%)
- $b \rightarrow c \rightarrow \ell \nu s$ (BR \sim 20%)

ALEPH-esemény ($e^+e^- \rightarrow HZ \rightarrow bbqq$)



A Higgs-bozon nincs meg



Várt és megfigyelt jel-konfidencia csak háttér feltételezésével

(ALEPH, DELPHI, L3 és OPAL: Phys. Lett. B 565 (2003) 61-75.)

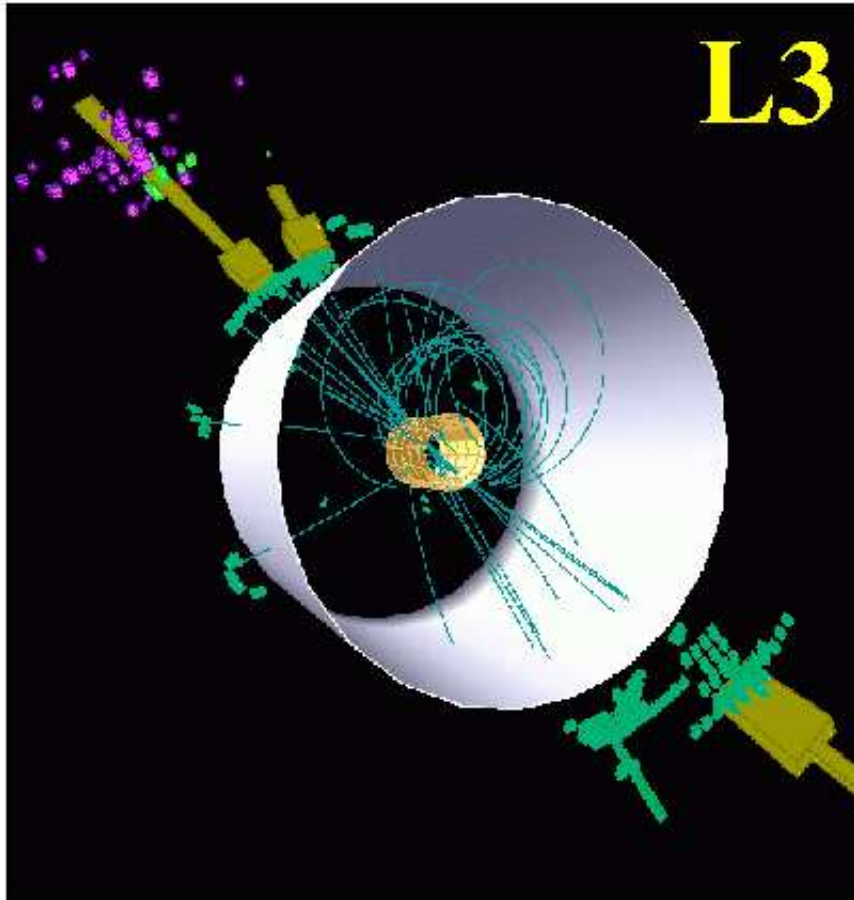
Többlet ALEPH 4-jetes eseményeiben 115 GeV-nél:

$$\overline{E}_{\text{LEP2000}} = 206 \text{ GeV} \quad m_H(115) + m_Z(91) = 206 \text{ GeV} !!$$



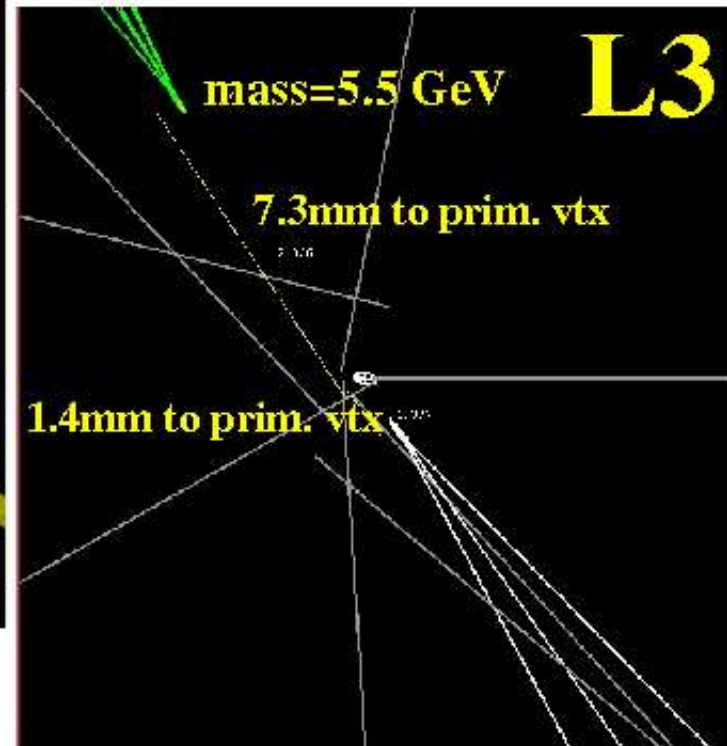
L3-eseemény ($e^+e^- \rightarrow HZ \rightarrow bb\nu\nu$)

most significant H $\nu\nu$ candidate

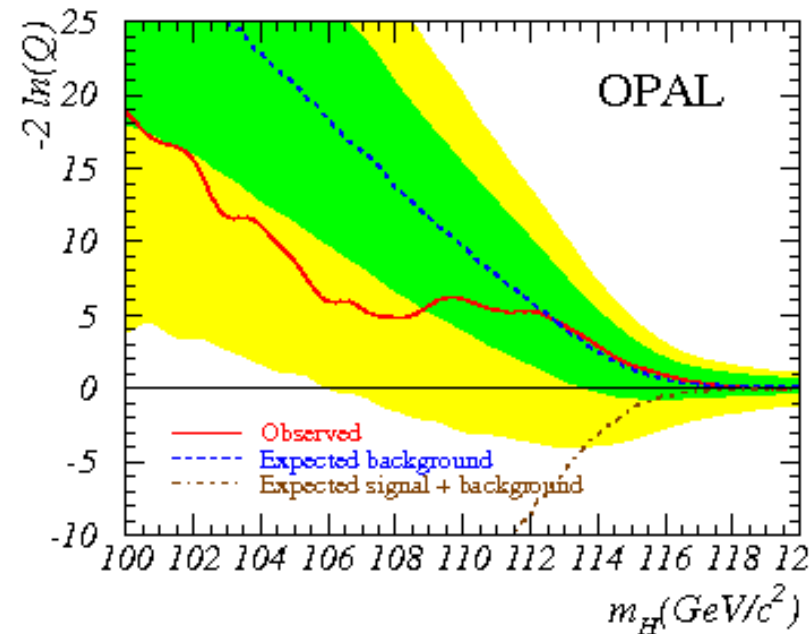
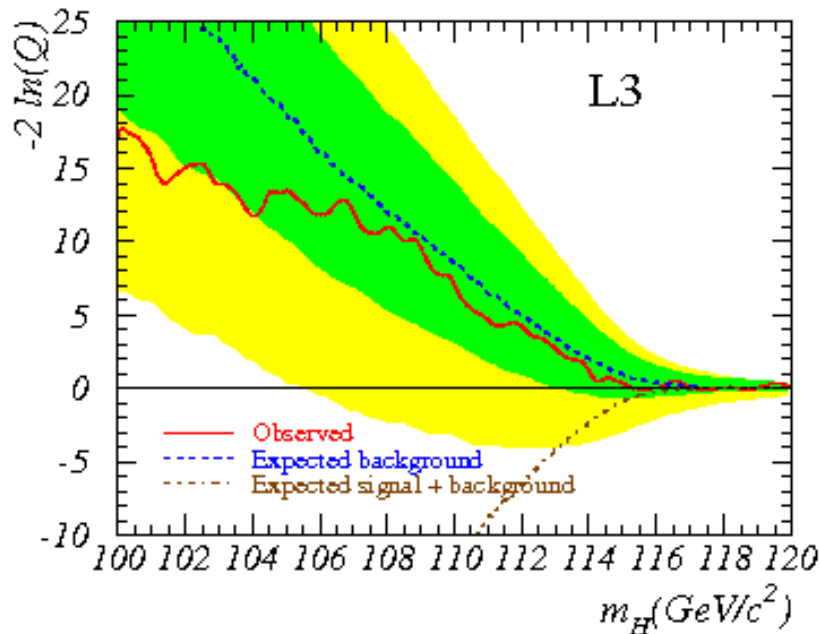
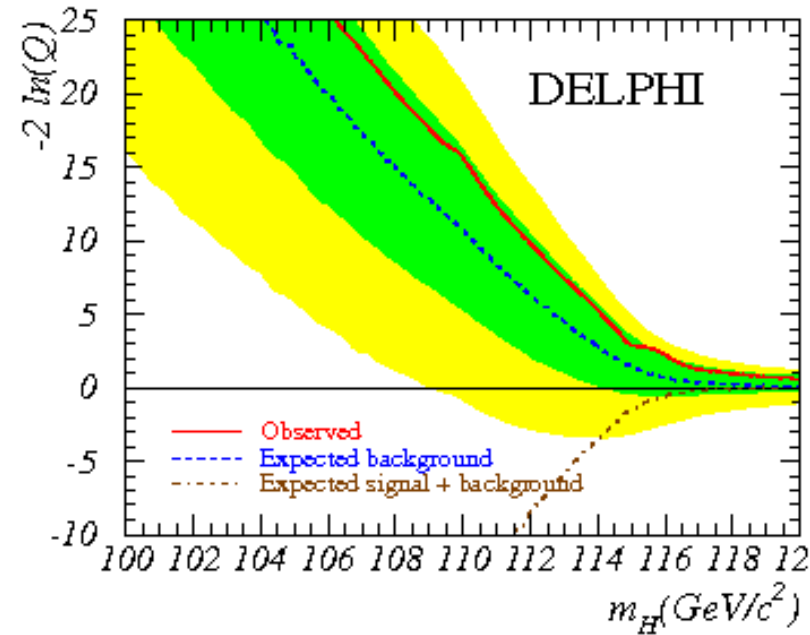
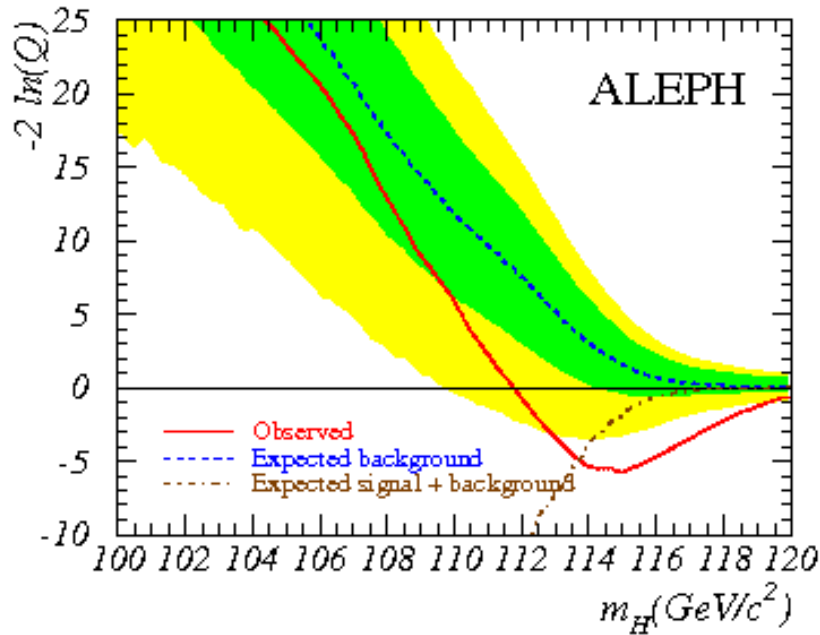


measured H mass=115 GeV
H mass resolution ~3 GeV

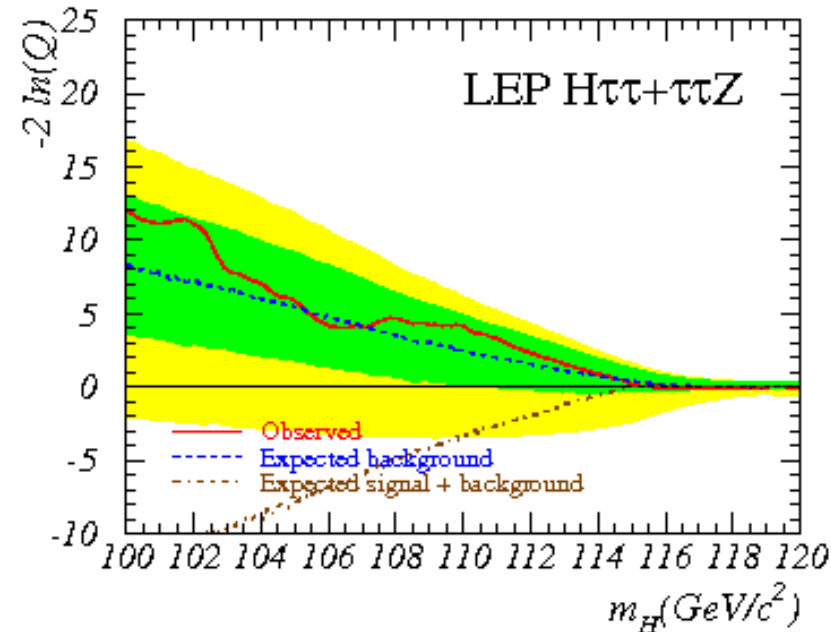
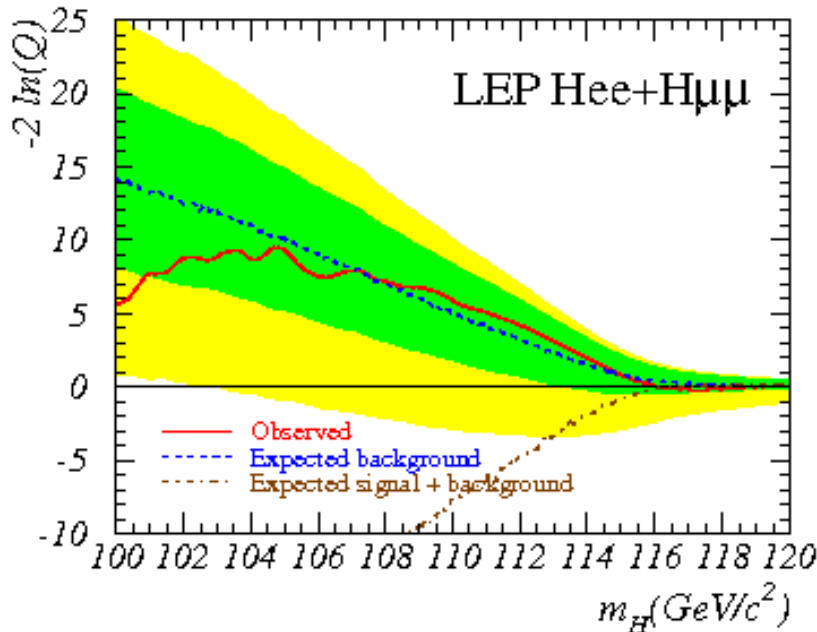
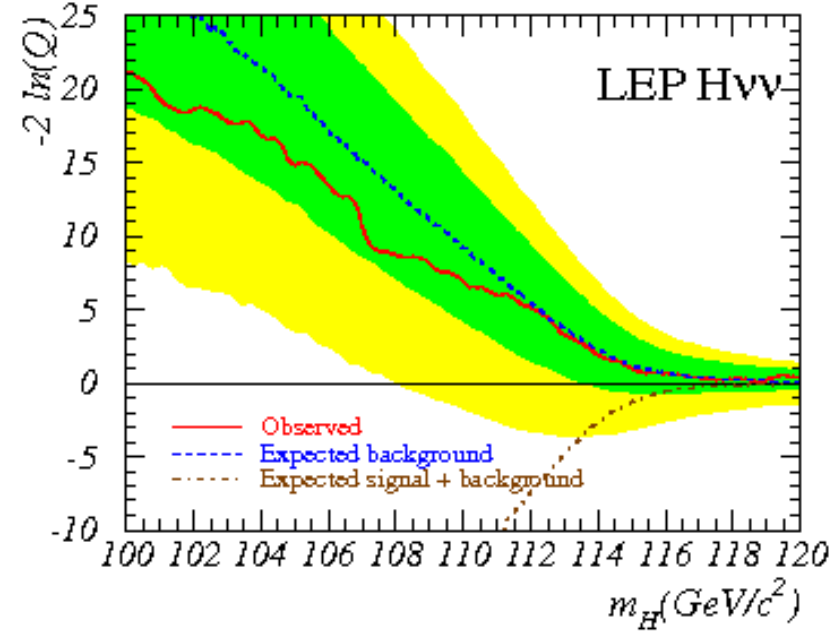
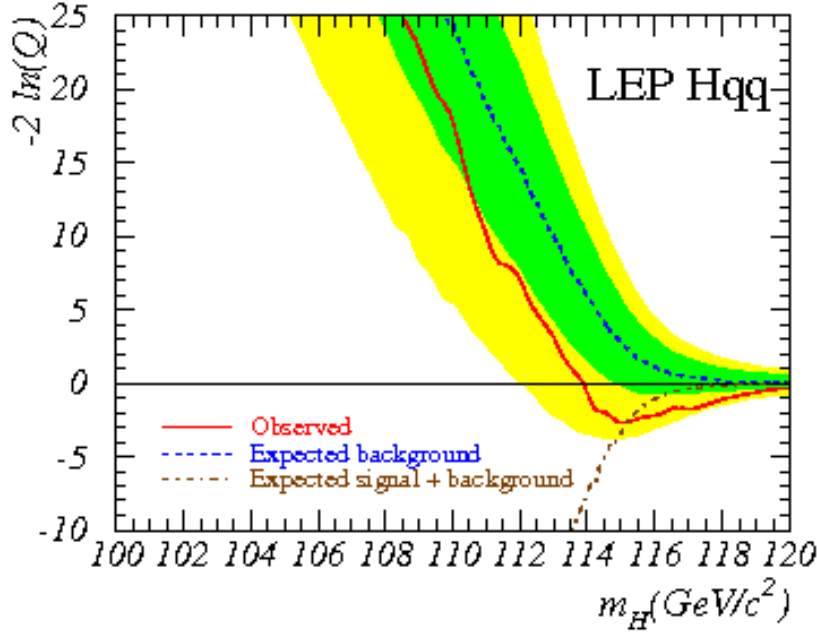
Secondary vtx's view



LEP–kizárás kísérletenként



LEP-kizárás csatornánként



A SM érzékenysége Higgs-tömegre

SM fit (minden mérés):

$$\overline{M_H} = 76 \begin{cases} +33 \\ -24 \end{cases} \text{ GeV}$$

Alsó határ (illesztés és elmélet bizonytalansága):

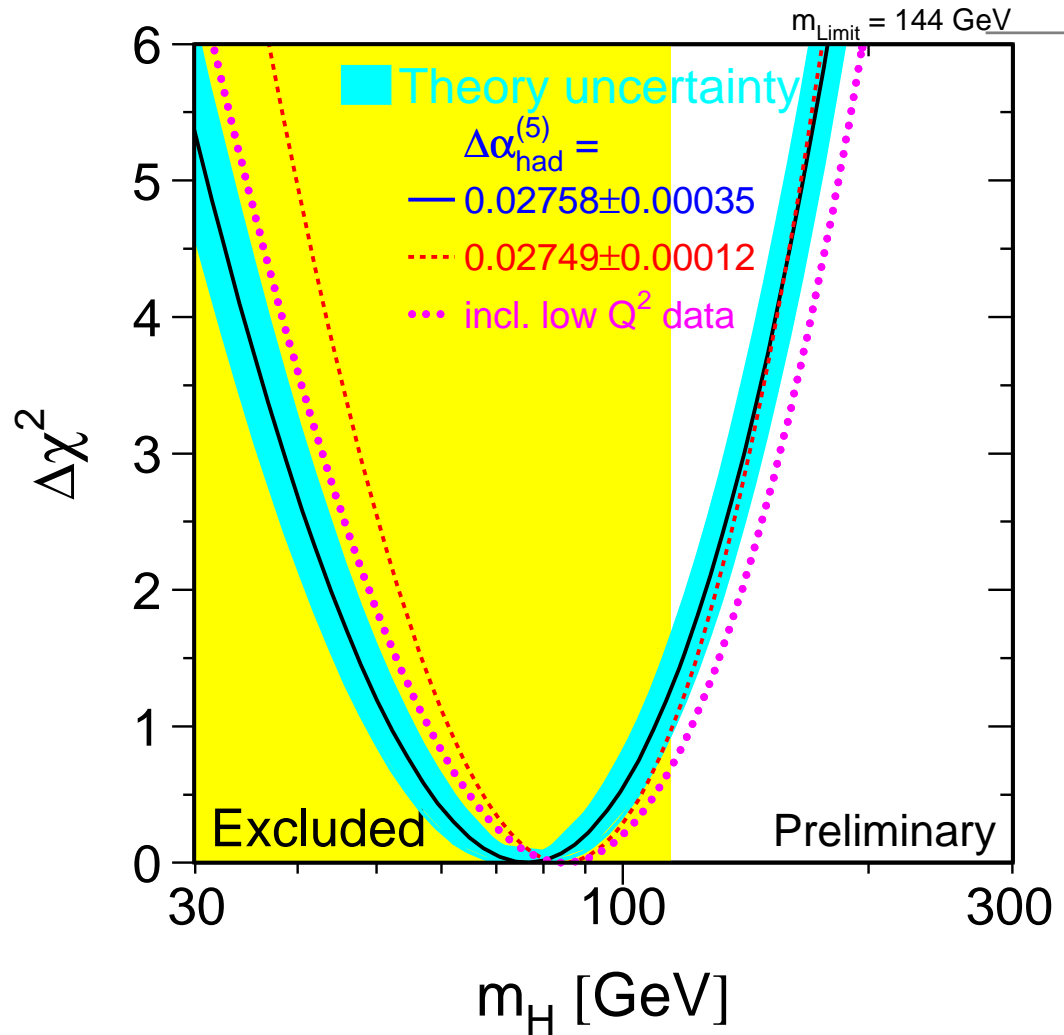
$$M_H > 144 \text{ GeV (95 \% konf.)}$$

LEP-keresés:

$$M_H > 114.4 \text{ GeV}$$

Megengedett régióra normalva:

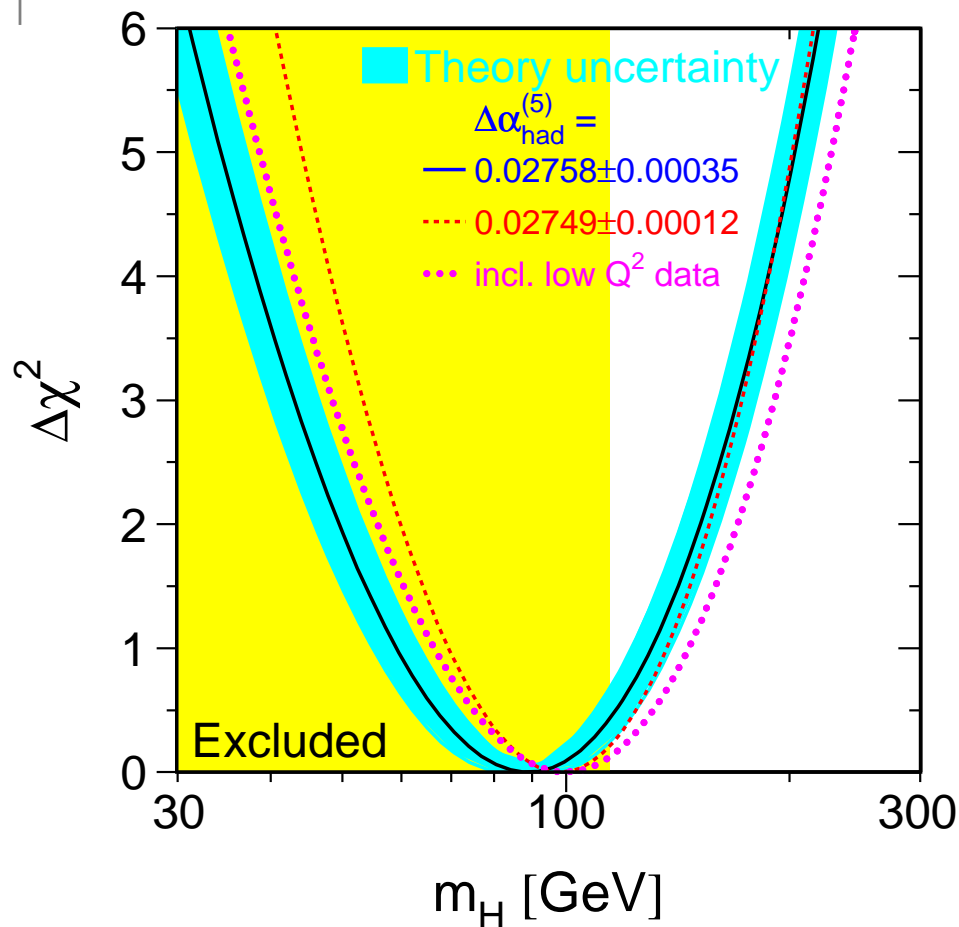
$$114.4 < M_H < 182 \text{ GeV} \\ \text{(95\% CL)}$$



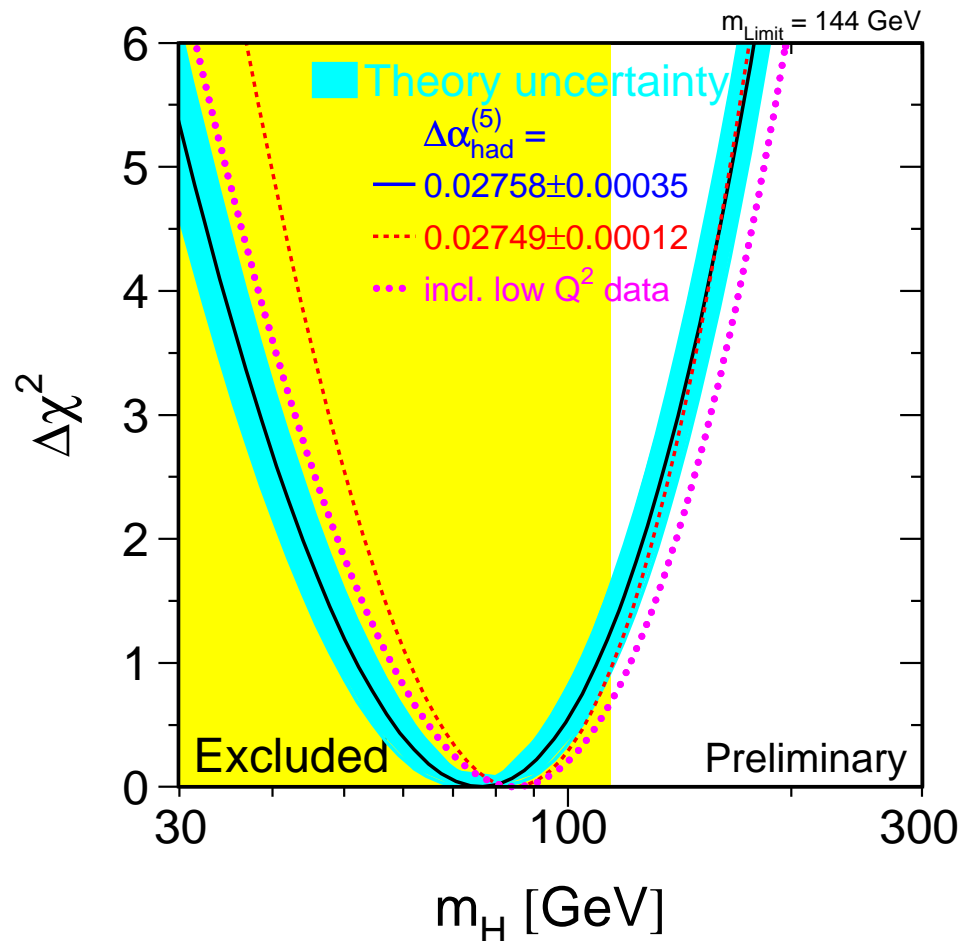
LEP Elektroyenge munkacsoport (<http://lepewwg.web.cern.ch/>)



SM-fitt \Leftrightarrow Higgs-tömeg: 2006 \Rightarrow 2007



2006: $m_t = 174$ GeV



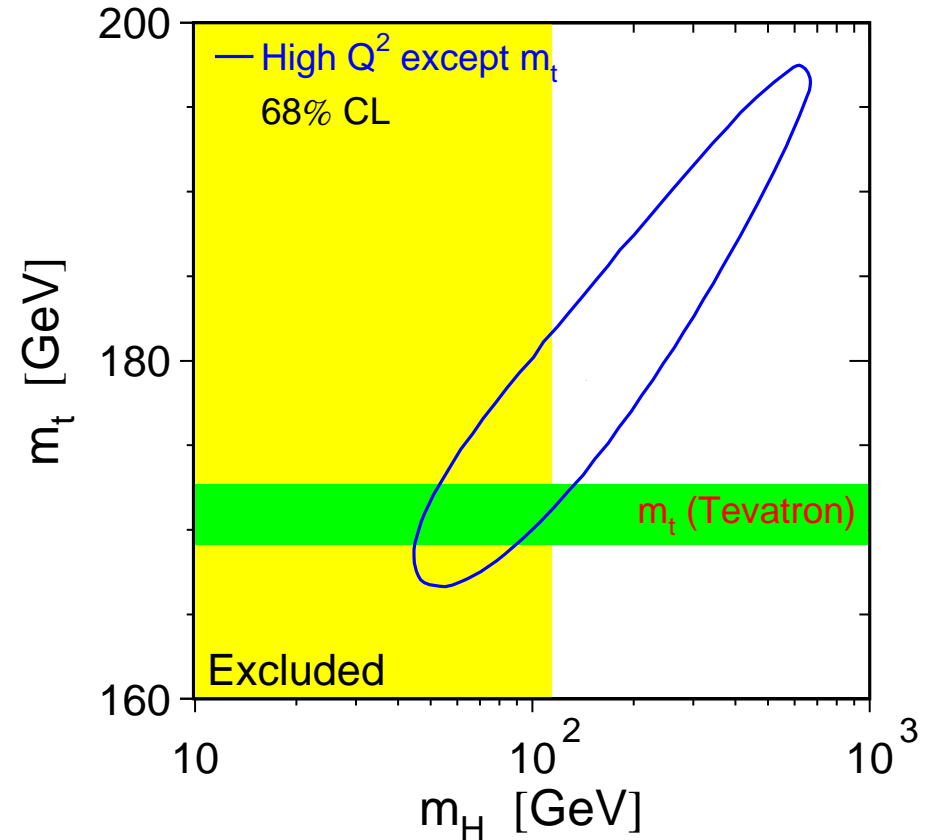
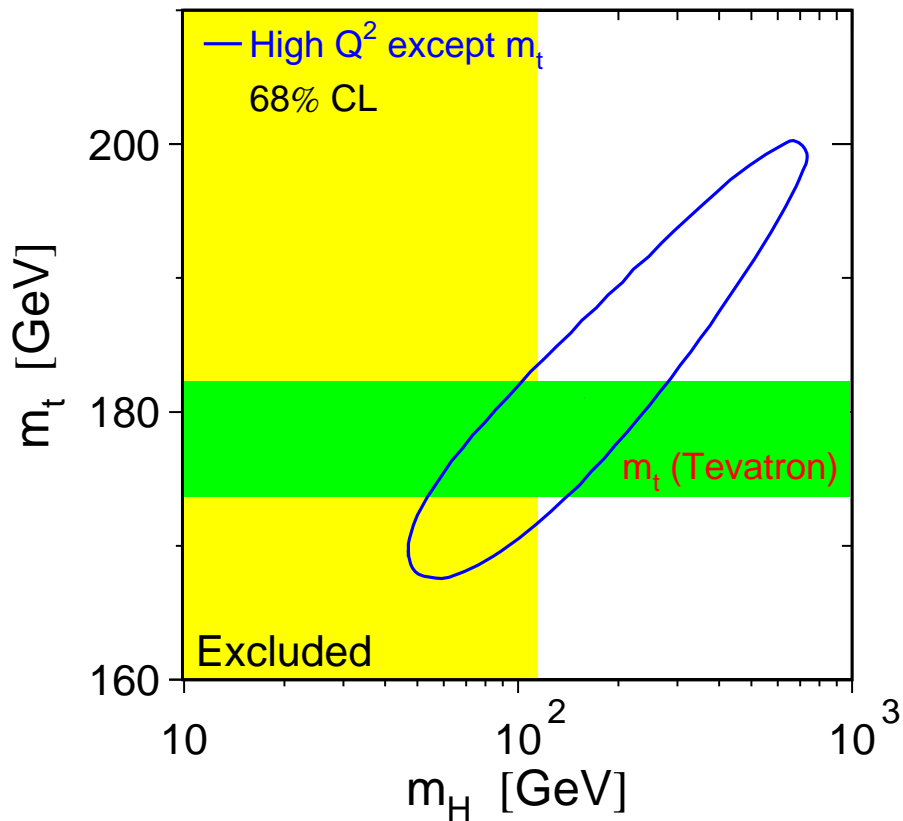
2007: $m_t = 172$ GeV

2008: $m_t = 170$ GeV ??

LHC!!



SM-Higgs: $M_H - M_t$



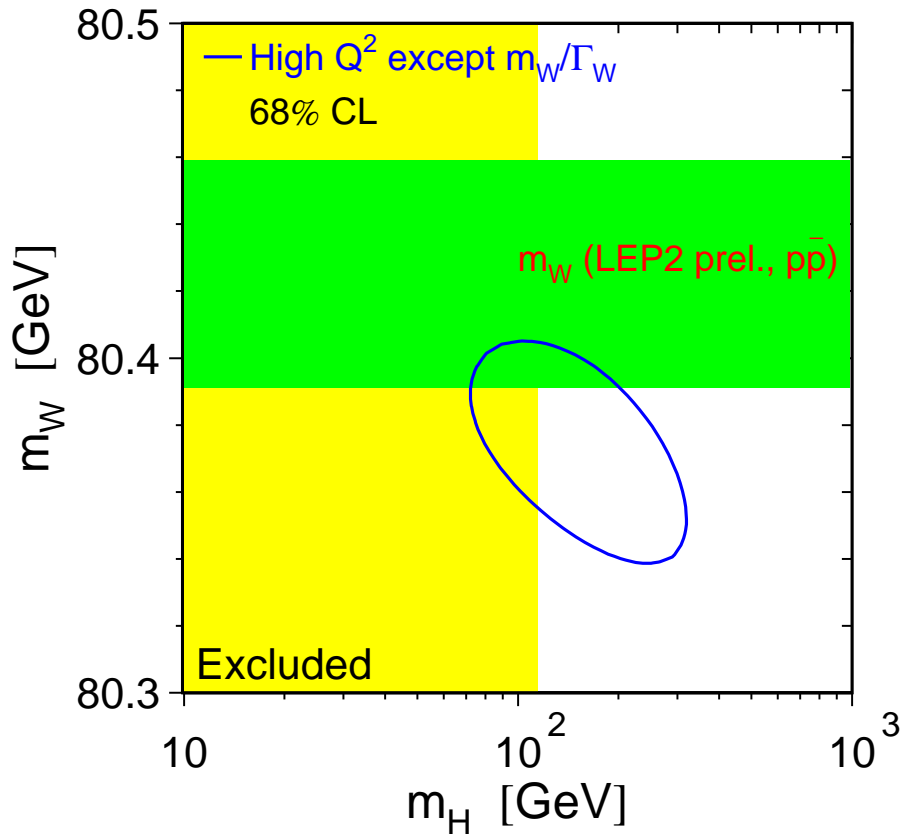
Tevatron, 2004: $m_t = 178$ GeV

2007: $m_t = 172$ GeV

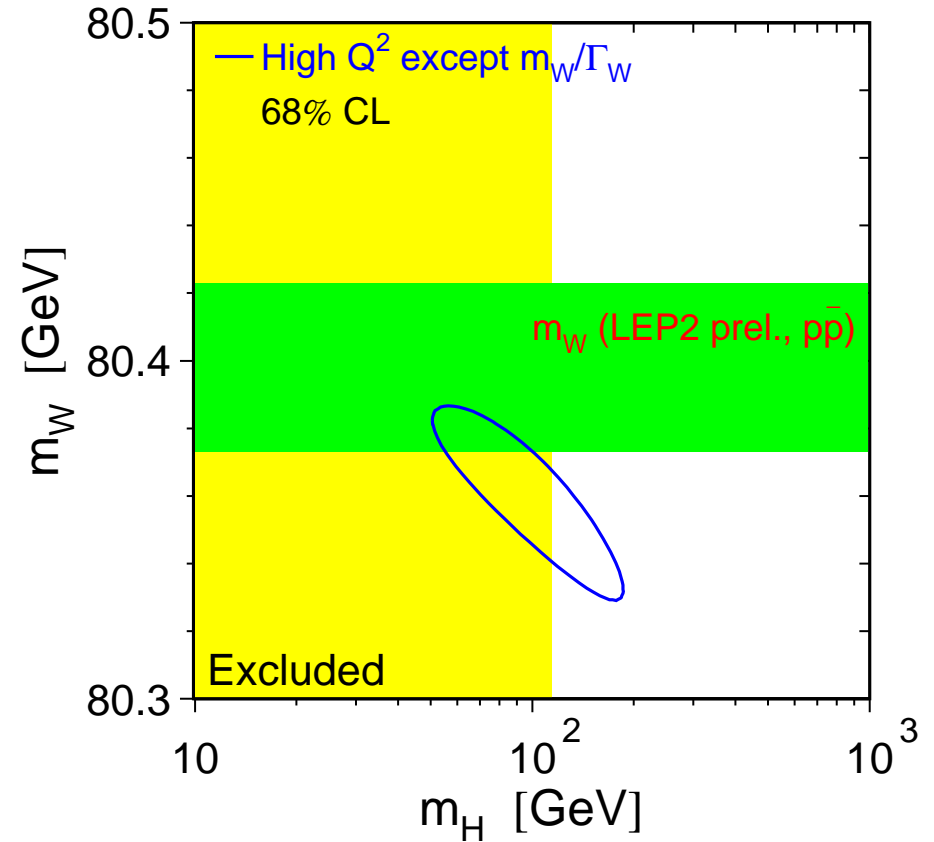
LHC, 2009 – ...: $m_t = ?$



SM-Higgs: $M_H - M_W$



2005



2007

LHC, 2009...: top-fizika !!



LHC: A p-p ütközések bonyolultak!



A relativisztikus proton impulzusának
felét kvarkok, másik felét gluonok adják
p-p ütközés = kiterjedt, összetett objektumoké

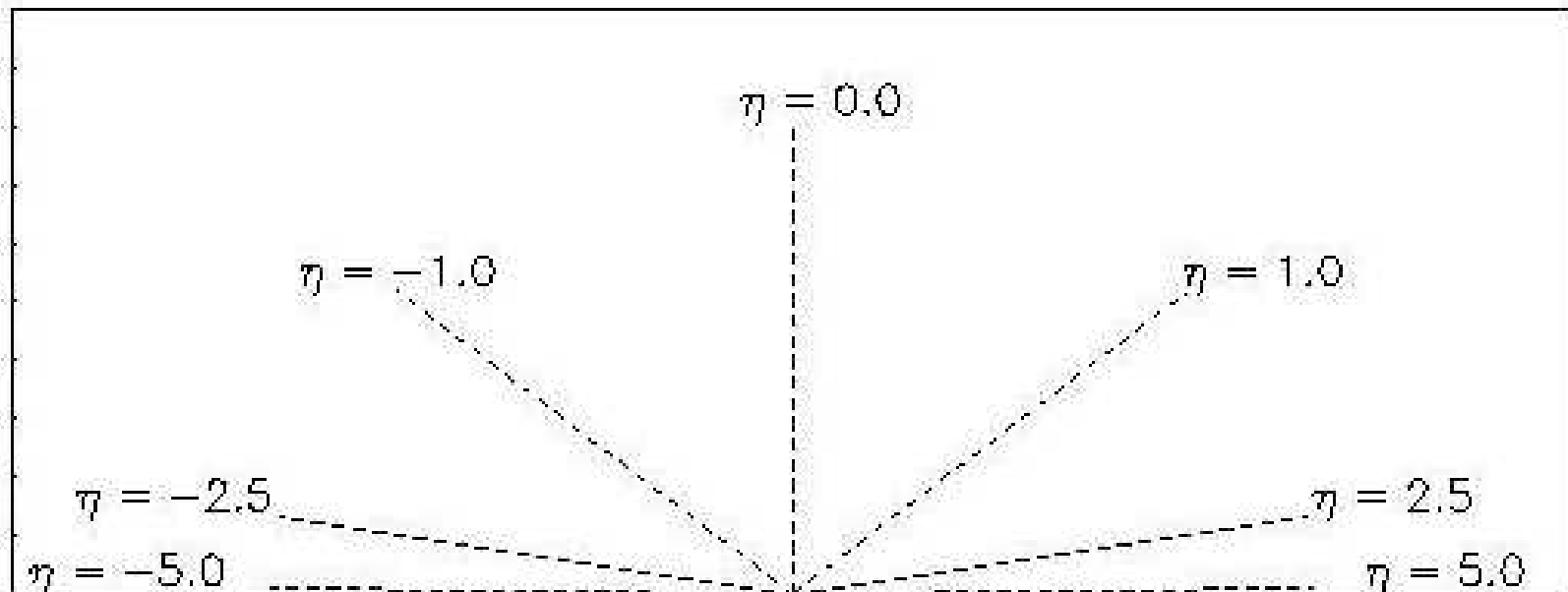
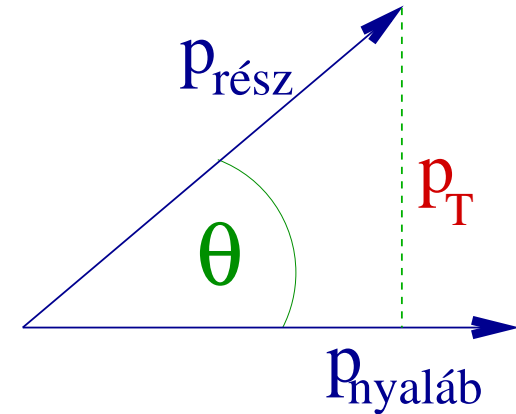
Pseudorapiditás, transzverzális impulzus

Hadron- és nehézion-ütközések fontos jellemzői

Pseudorapiditás

$$\eta = -\ln \operatorname{tg} \frac{\Theta}{2}$$

Polárszög helyett használatos



Ütközőnyaláb hozama: luminozitás

$$L = fn \frac{N_1 N_2}{A}$$

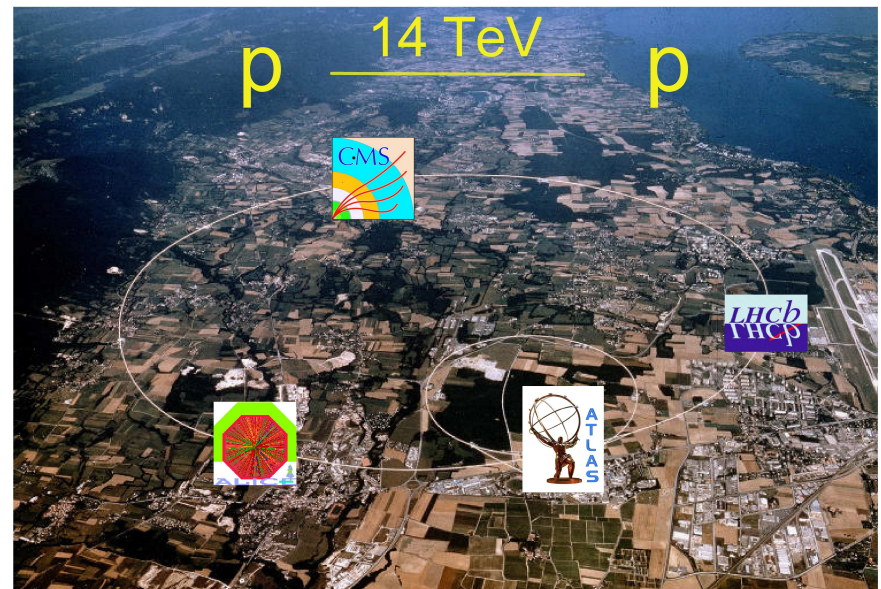
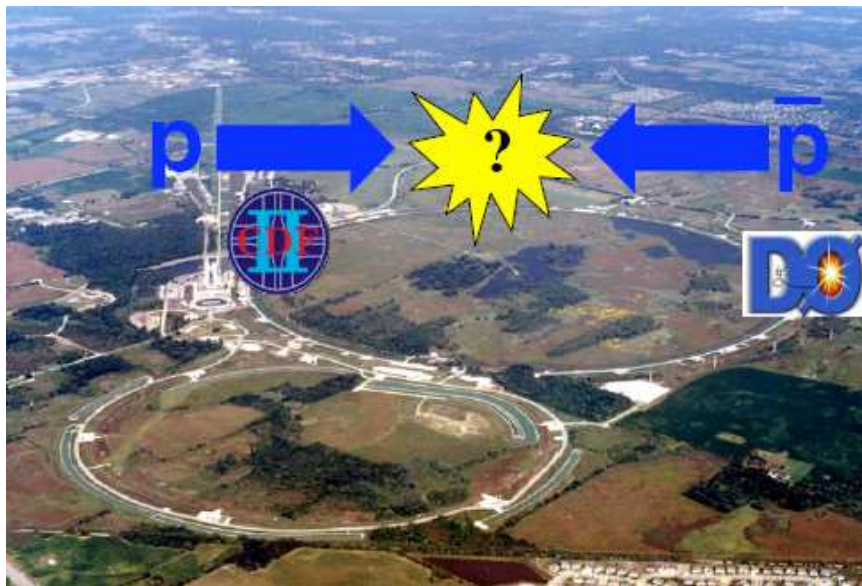
f : körfrekvencia; n : csomagok száma

N_1, N_2 részecske/csomag; A :
nyalábok átfedése

σ hkm-ű reakció gyakorisága ϵ
hatásfoknál $R = \epsilon \sigma L$

Integrális luminozitás: (fb^{-1})

Gyorsító	ütközési energia	időszak	$\int L dt$ (fb^{-1})
Tevatron	2 TeV	2001-2006	2,5
LHC	14 TeV	első pár nap	0,1
LHC	14 TeV	első pár hónap	1
LHC	14 TeV	első év (kis int.)	10



Az LHC eltérítő-mágnesei



1232 db, egyenként 15 m hosszú, 35 tonnás

Az LHC mágnesei összeszerelve



LHC: a Jó, a Rossz és a Csúf



Jó

Hatalmas felfedezési potenciál:
nagy energia, sokféle ütközés,
óriási luminozítás.



Rossz

Rettenetes SM háttér, az
érdekesebb dolgok előfordulási
gyakorisága $10^{-6} - 10^{-3}$

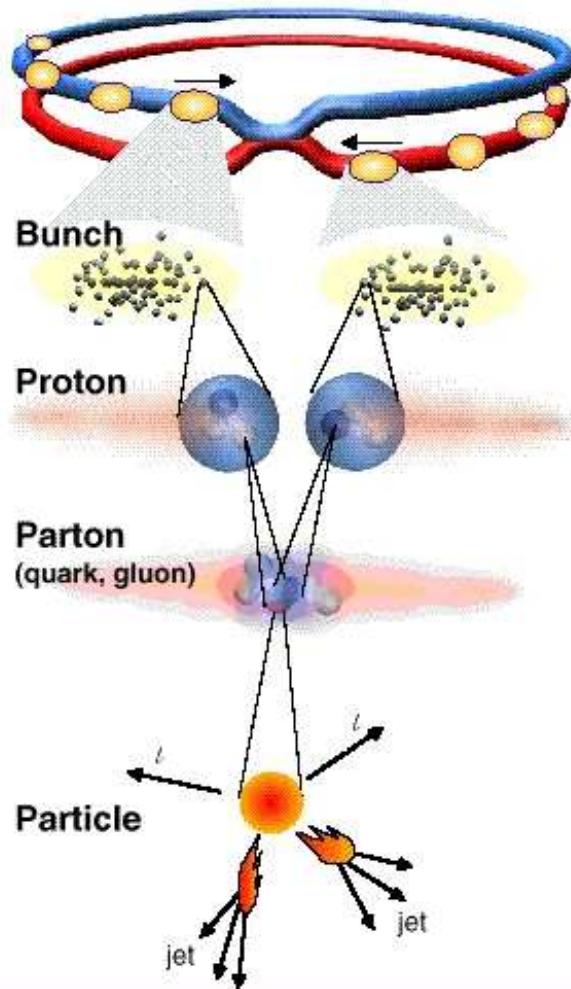


Csúf

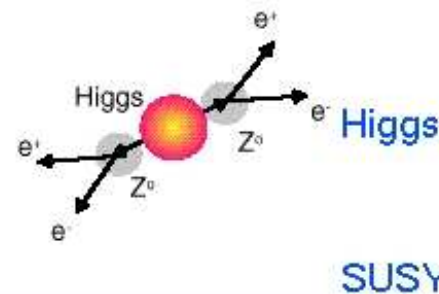
Az érdekes folyamat mellett
eseményenként még 10-20 p-p
ütközés, hatalmas kombinatorikus
háttér.

Higgs-bozon keresése az LHC-nál

Collisions at LHC



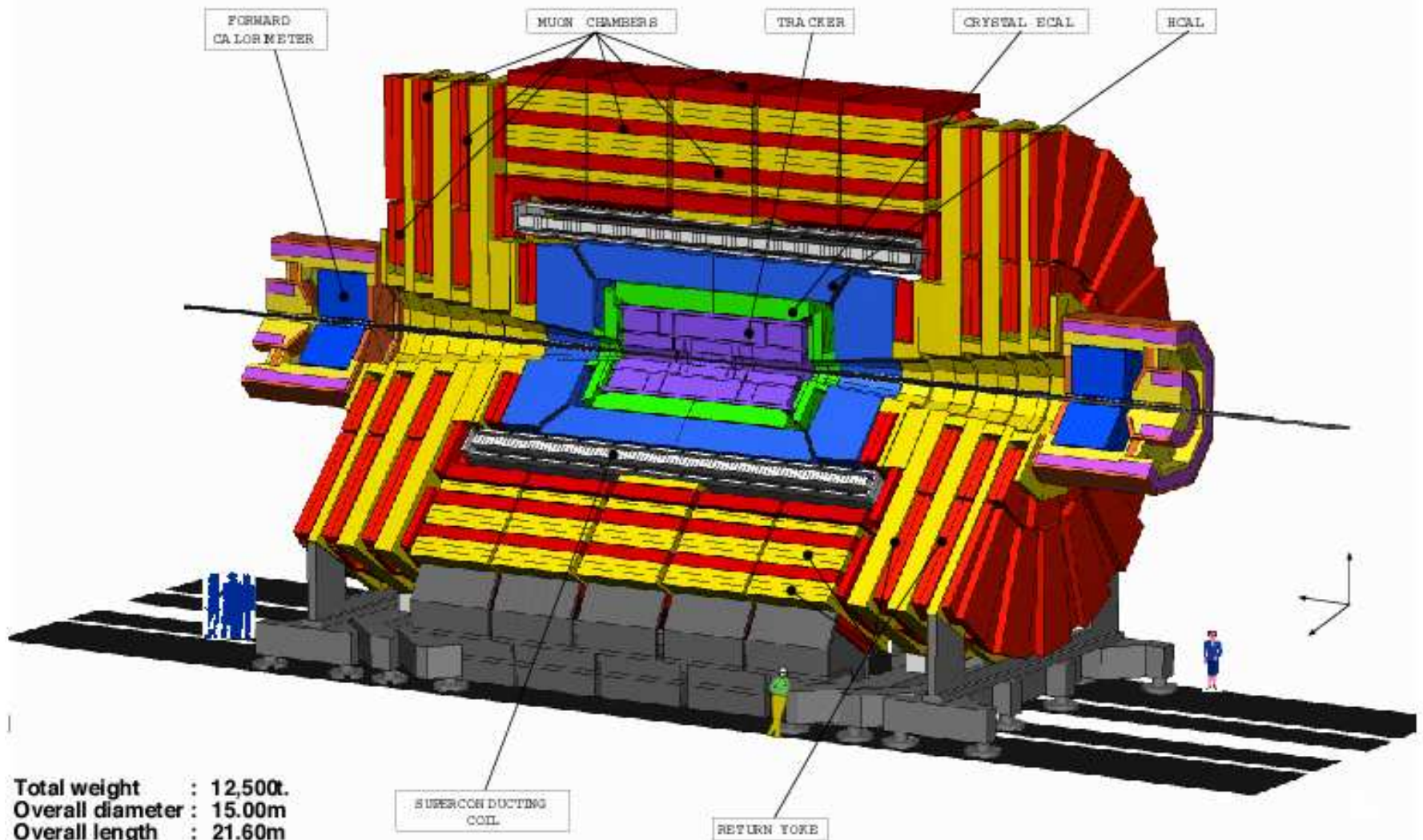
Proton-Proton	(2835 x 2835 bunches)
Protons/bunch	10^{11}
Beam energy	7 TeV (7×10^{12} eV)
Luminosity	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Crossing rate	40 MHz
Collisions »	$10^7 - 10^8 \text{ Hz}$



Selection of 1 in 10,000,000,000,000

Az LHC CMS–detektora

CMS A Compact Solenoidal Detector for LHC



Total weight : 12,500t.
Overall diameter : 15.00m
Overall length : 21.60m
Magnetic field : 4 Tesla



Az LHC CMS–detektora

(Compact Muon Solenoid)

Súly: 12500 tonna, több vas, mint Eiffel–toronyban

> 2000 résztvevő a világ minden tájáról

A világ legnagyobb (szupravezető) szolenoidja:

belső átmérője 6 m, mágneses tere 4 Tesla

Detektorépítésben magyar részvétel:

Müondetektorok pozicionáló rendszere:

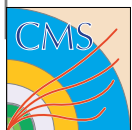
DE Kisérleti Fizikai Int. és ATOMKI

Előreszórt részecskék észlelése: (*Hadron Forward calorimeter, HF*)

Készült USA-RU-TR-HU együttműködésben: RMKI, Budapest

Az első leeresztett CMS-detektorrész: 2006. nov. 11.

Adatkezelés: LHC Computing Grid (RMKI) (Debreczeni Gergő előadása)



Higgs-keresés a CMS-nél

Proton-proton-ütközésből ($uud + uud$) sok hadron
Kvarkok elsüvítenek egymás mellett vagy enyhén
szóródnak

LHC: regisztrált eseményben 10-15 p-p kölcsönhatás

Tiszta jel: nyalábra merőleges lepton vagy zápor,

Legfontosabb jel: gyors müon kibocsátása

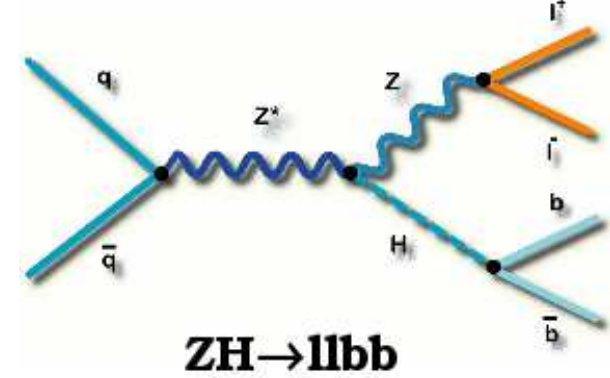
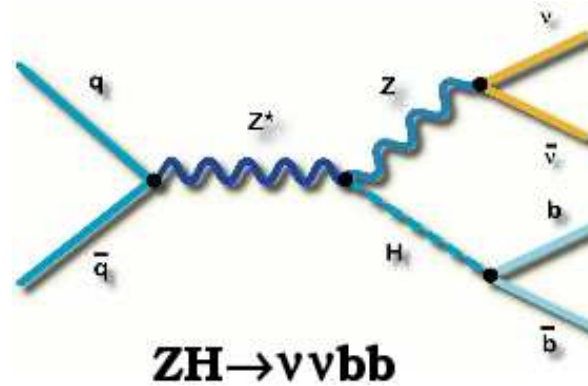
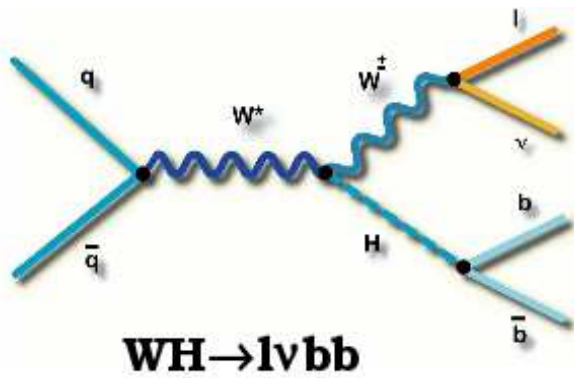
Müondetektorok: fontos magyar szerep

Különböző Higgs-tömeghez más kedvező reakció

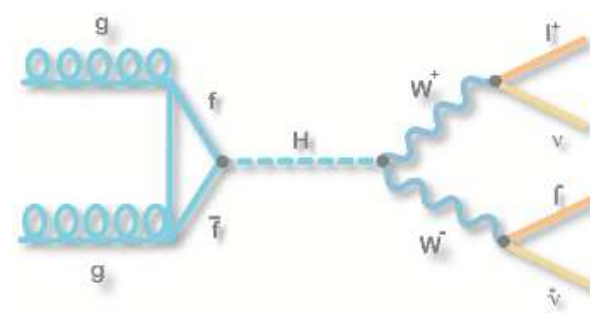
Nagyobb tömegű részecske bomlását könnyebb észlelni.



Higgs-keltés az LHC-nál

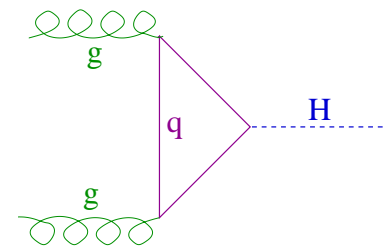
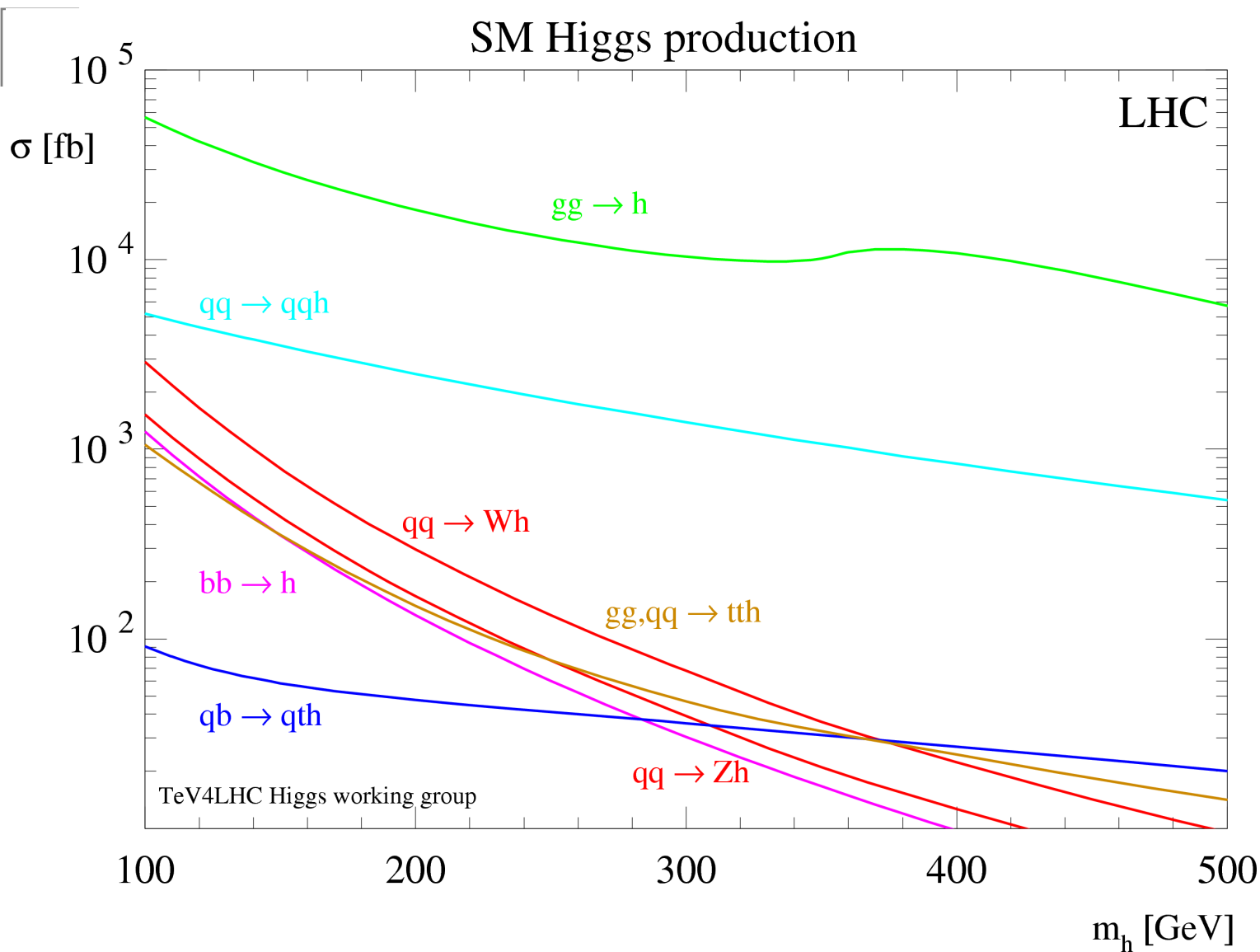


Kisebb ütközési energia (Tevatron), kisebb tömegű Higgs-bozon: keltés W , Z -vel együtt

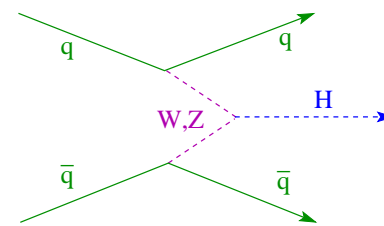


LHC, nagyobb tömegű Higgs-bozon: gluon-fúzió

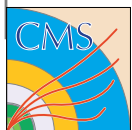
Higgs-keltés az LHC-nál



gluon-
fúzió

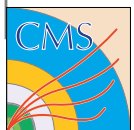
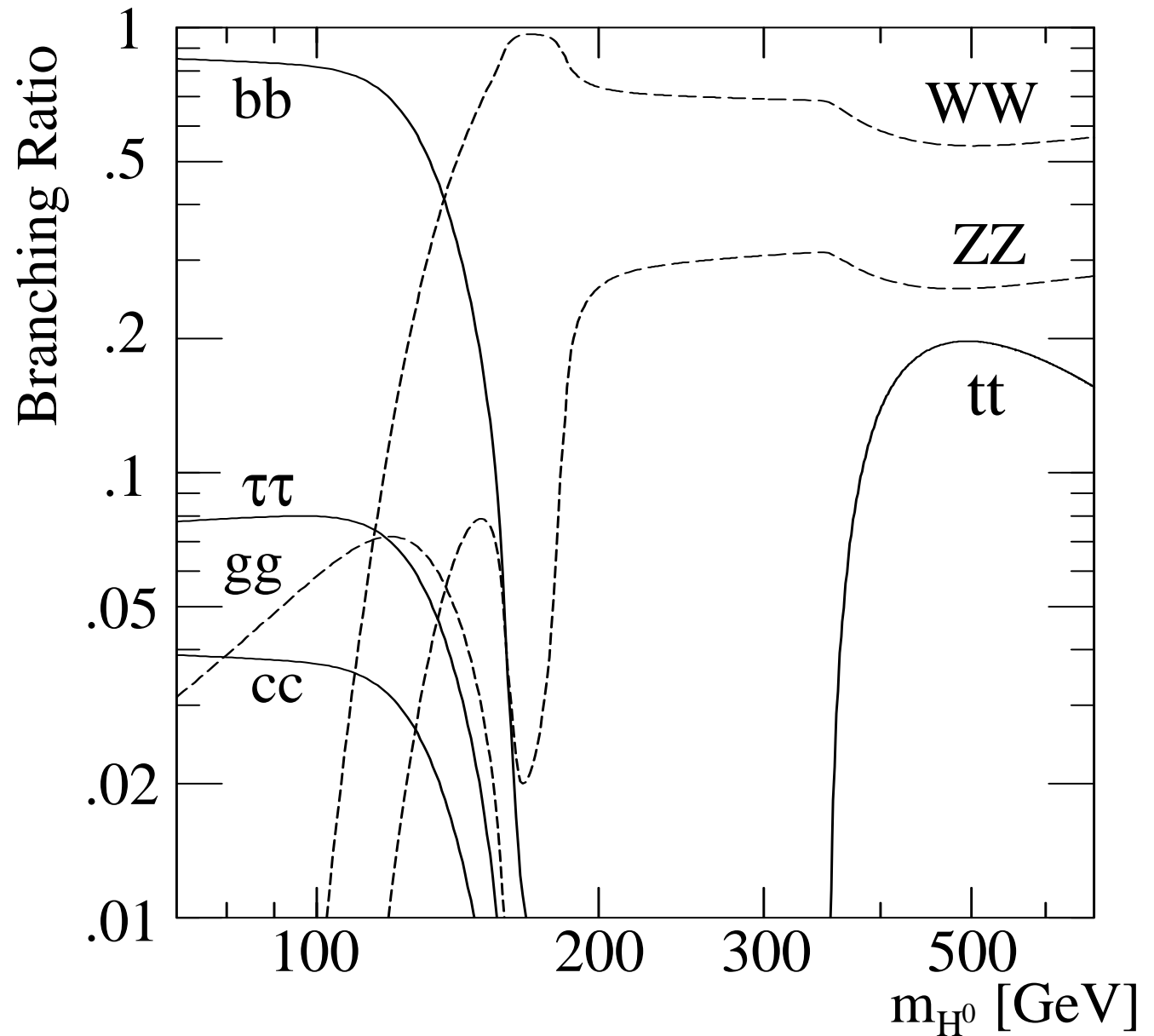


vektorbozon-
fúzió

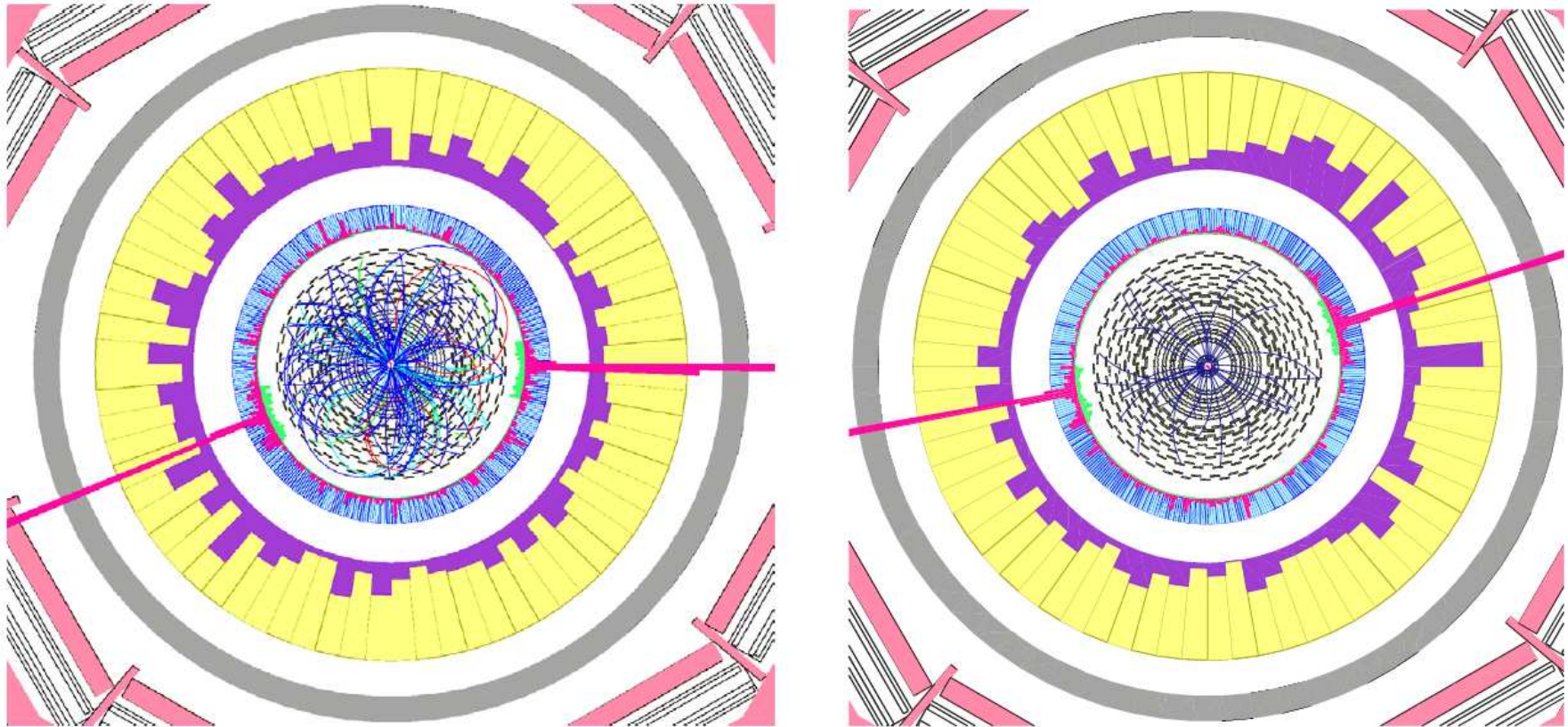


A Higgs-bomlás csatornáí

$gg \Rightarrow \gamma\gamma$



CMS, $H \rightarrow \gamma\gamma: m_H < 140 \text{ GeV}$



Jól azonosítható, igen kicsi valószínűségű (2×10^{-3})
Könnyű Higgs-bozonra ez a leghatékonyabb
CMS elektromágneses kaloriméterét erre tervezték

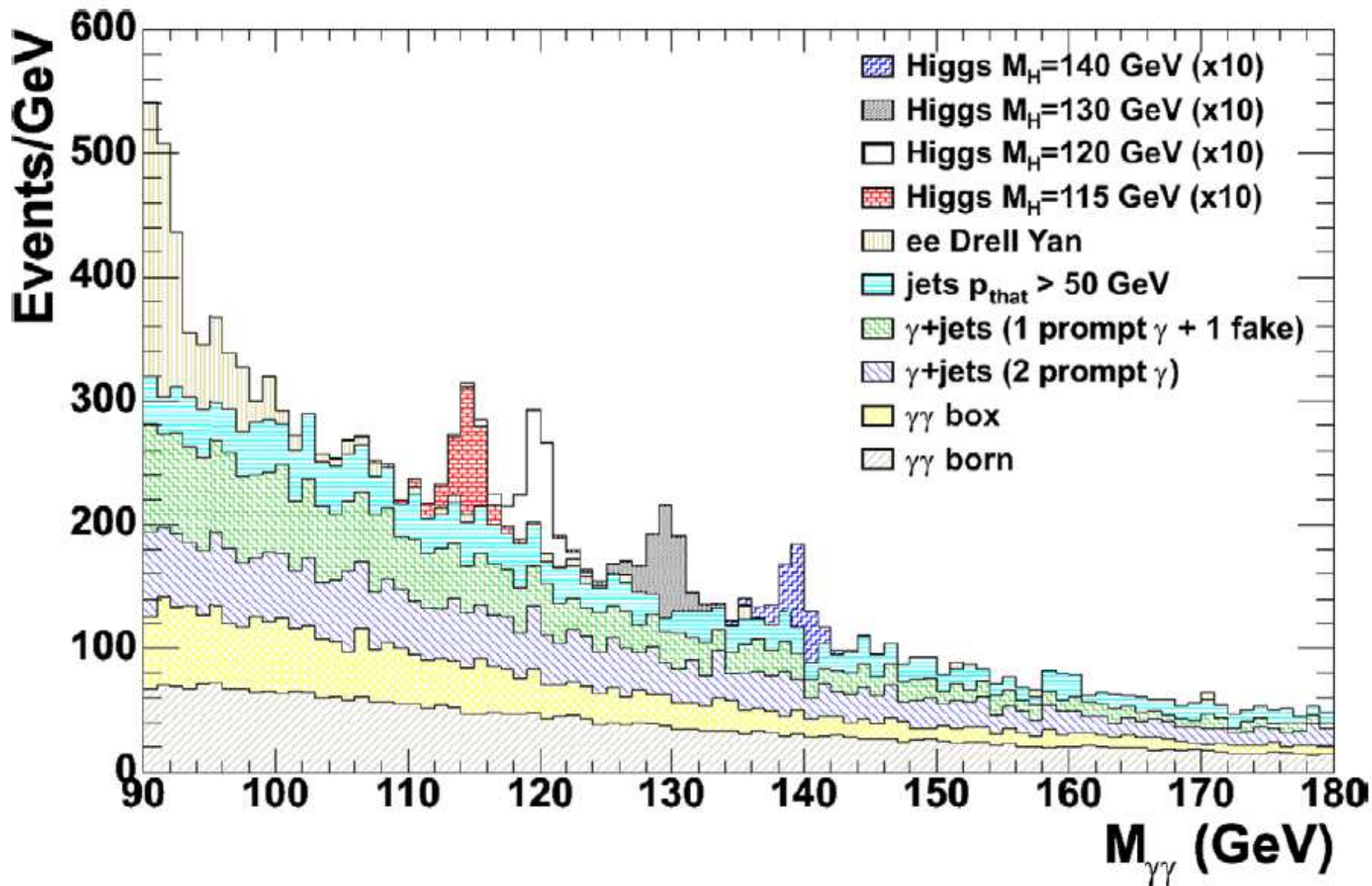
A CMS elektromágneses kalorimétere



80000 PbWO_4 szcintillátor-hasáb



$H \rightarrow \gamma\gamma$: csak vágásokkal



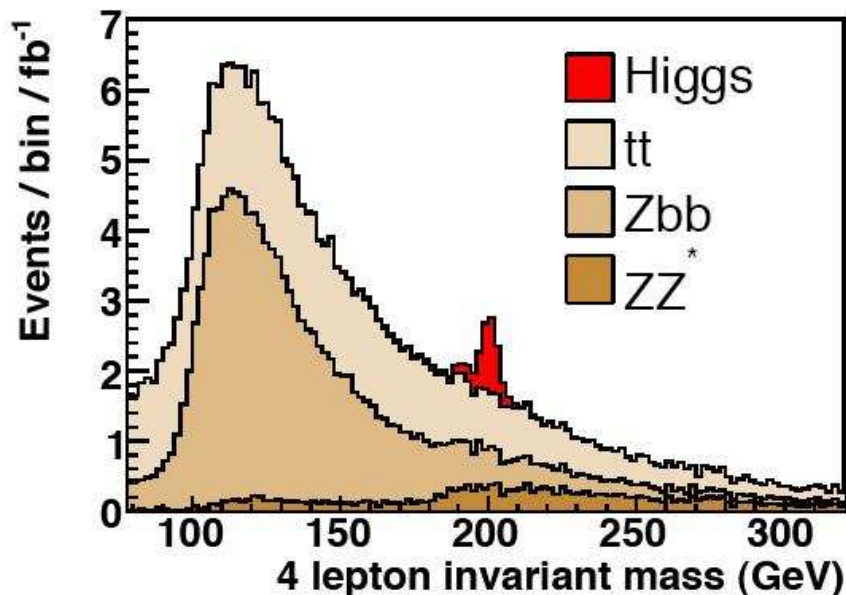
Statisztikus módszerek sokat javítanak (ANN)

SM-Higgs, $m_H > 140$ GeV

Aranyozott csatorna

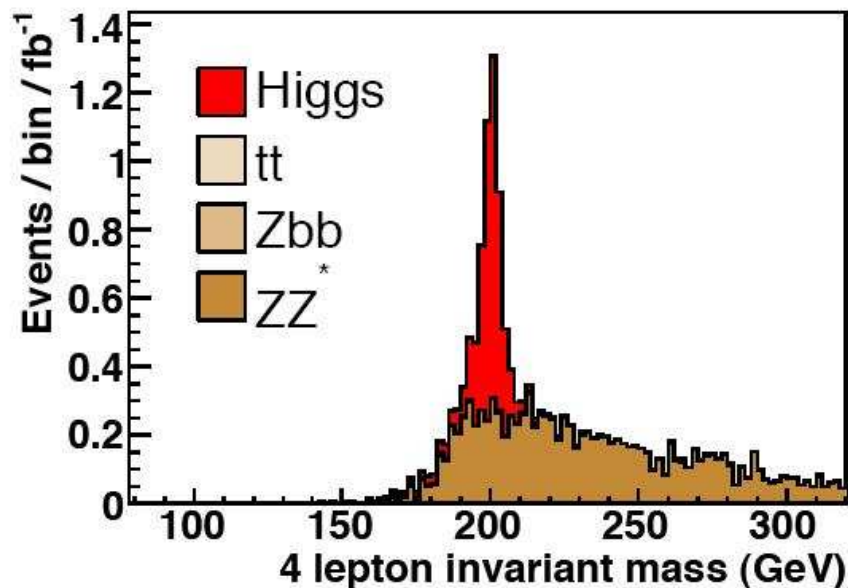
Válogatás:

4 izolált lepton

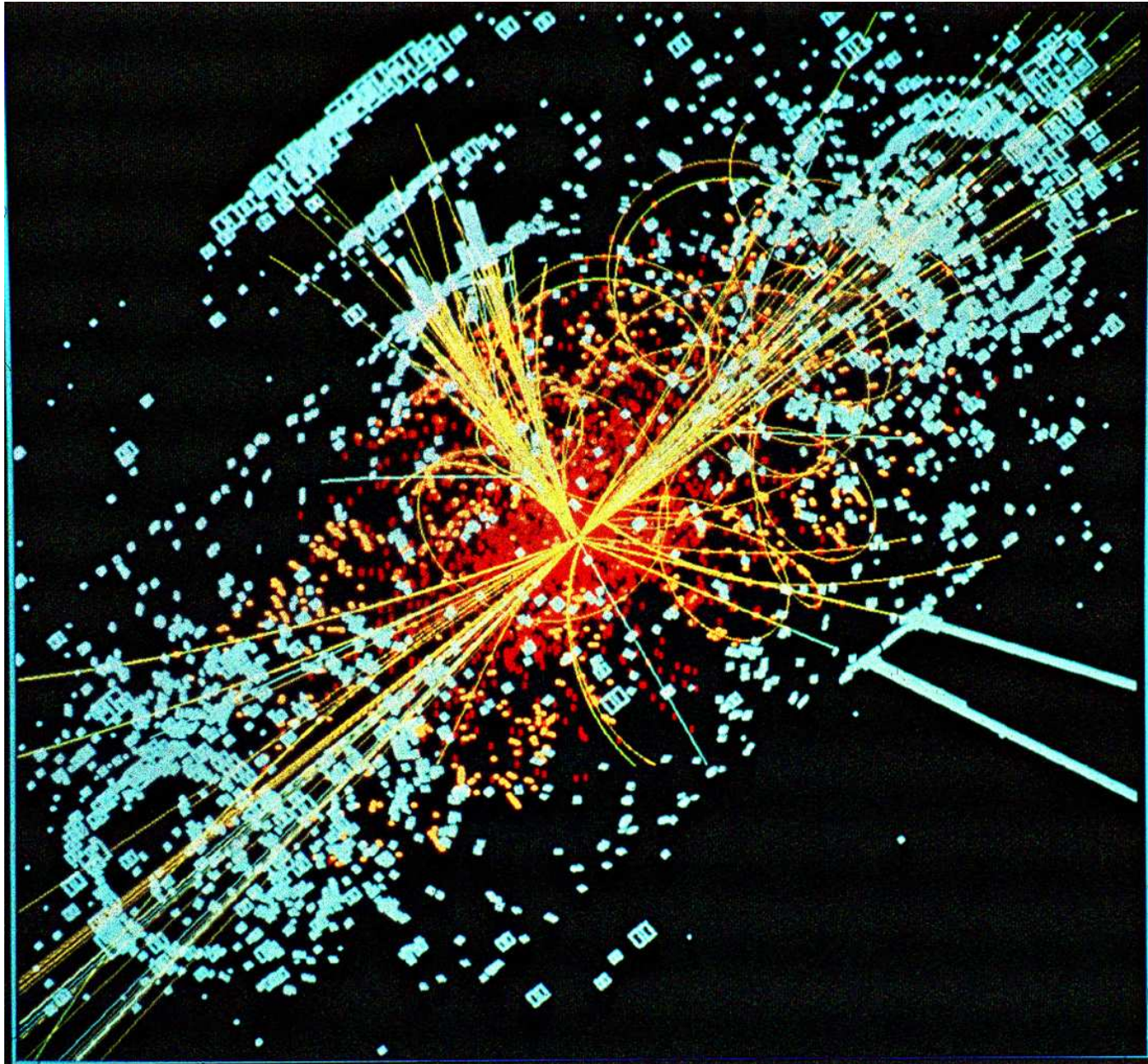


2 leptonpár
fő vertexből

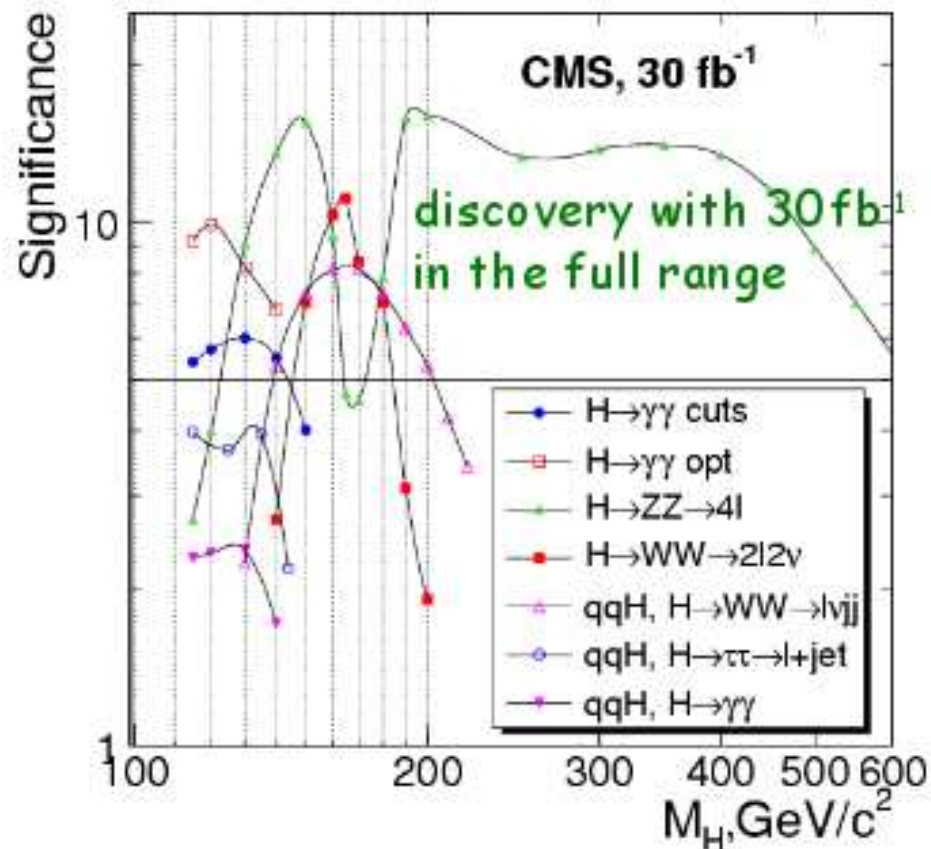
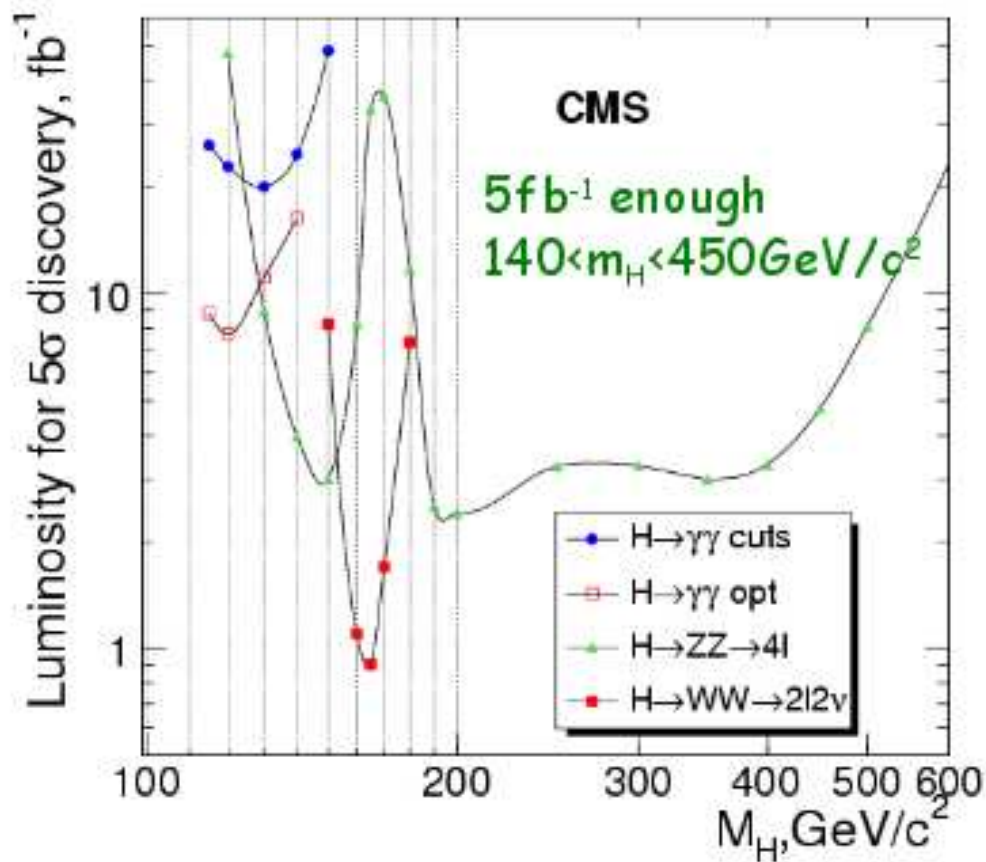
$m_{\ell\ell} \sim m_Z$



$H \rightarrow ZZ \rightarrow eeqq$ a CMS-nél



SM-Higgs: a CMS felfedezési potenciálja

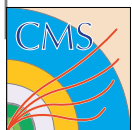


$m_H \sim 120 \text{ GeV}: H \rightarrow \gamma\gamma, L < 10 \text{ fb}^{-1}$

$m_H \sim 165 \text{ GeV}: H \rightarrow WW, L < 1 \text{ fb}^{-1}$

$m_H \sim 180 \text{ GeV}: H \rightarrow ZZ, L < 3 \text{ fb}^{-1}$

$120 < m_H < 600 \text{ GeV}: \text{minden}, L < 30 \text{ fb}^{-1}$



A részecskefizika problémái

- **Aszimmetriák:** jobb \Leftrightarrow bal világ \Leftrightarrow antivilág
- **Sötét anyag és energia ??** Az Univerzum tömegének 4%-a közönséges anyag (csillag, gáz, por, ν), 23 %-a láthatatlan *sötét anyag*, 73 %-a rejtélyes *sötét energia*
- **Természetesség:** A Higgs-bozon tömege divergál, fermion-bozon szimmetria eltűntetné.

Megoldás: szuperszimmetria, ha a fermionok és bozonok párban léteznének, azonos tulajdonságokkal (tömeg, töltés)

A szuperszimmetria (SUSY) nyilvánvalóan sérül:
nincsenek ilyen részecskék, vagy sokkal nagyobb tömeggel

Higgs-tér **létező** szimmetriát **sért** \Leftrightarrow SUSY *nemlétezőt vezet be*

Cél: racionális, konzisztens elmélet



Szuperszimmetria (SUSY)

SUSY-részecskék párban keletkeznek,
közönséges és más SUSY-részecskére bomlanak

Sötét anyag: legkönnyebb SUSY-részecske

Végállomás (jel): Fermionsorozat hiányzó energiával

Együttműködés elméleti kollégákkal:
kiválasztott jellemző pontok ellenőrzése

Adott modell és paraméterek

⇒ számszerű előrejelzés a SUSY-tulajdonságokra
és a reakciók valószínűségeire

⇒ kísérletileg ellenőrizhető az LHC-nál!

Keresés előkészítése:

Budapesti és debreceni PhD-hallgató



Két Higgs–dublett \rightarrow 5 Higgs–bozon

SUSY-modellekben 2 Higgs–dublett
tömeg alsó és felső fermionoknak
 \rightarrow 8 szabadsági fok

3 tömeg W^\pm , Z + 5 Higgs–bozon h^0 , H^0 , H^\pm , A^0

$$V_{\min} \text{ at } \phi_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \end{pmatrix}; \quad \phi_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 e^{i\xi} \end{pmatrix}$$

ϕ_1 a felső, ϕ_2 az alsó fermionokhoz csatol

$$v_1^2 + v_2^2 = 2 \frac{m_W^2}{g^2}$$

kulcsparaméter: $\tan \beta = v_1 / v_2$

β : töltött Higgs-terek keveredési szöge

$h^0 \sim$ SM Higgs; $m(h^0) \ll m(H^0)$



H^\pm keresése a LEP-nél

Képződés párban: $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$

Bomlás nehéz fermionokra: $H^+ \rightarrow \begin{cases} \tau^+ \nu_\tau \\ q\bar{q}' (\sim c\bar{s}) \end{cases}$

Három csatorna \Rightarrow három analízis:

$$e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow \begin{cases} \tau^+ \nu_\tau \tau^- \bar{\nu}_\tau & \text{(leptonos : Manchester)} \\ \tau^+ \nu_\tau c\bar{s} + \tau^- \bar{\nu}_\tau c\bar{s} & \text{(vegyes : Hajdu Csaba)} \\ c\bar{s}c\bar{s} & \text{(hadronos : HD)} \end{cases}$$

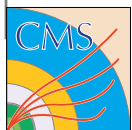
Előzetes OPAL-összesítés (Pásztor Gabriella):

$$M(H^\pm) > 75.5 \text{ GeV (95\%)}$$

$e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow AW^*$ készül (Peter Bock, Heidelberg)

D. Horváth: *Search for charged Higgs bosons with the OPAL detector at LEP,*

PANIC'02, Osaka, 2002; *Nucl. Phys. A*, 721 (2003) 453c-456c.

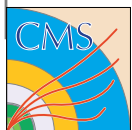


$e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow qqqq$: vágások

2000-es adatok, $\int \mathcal{L} dt = 217.4 \text{ pb}^{-1}$, 206 GeV MC,
 $\sqrt{s} = 204 \dots 209 \text{ GeV}$, $M(H^\pm) = 65 \text{ GeV}$

Vágás	adat	háttér	4f	$q\bar{q}(\gamma)$	H^\pm
Típus: Multihadron-esemény	19241	18997.7	4300.6	14406.5	99.8
Energia: $\sqrt{s'} > 0.82\sqrt{s}$; $E_{\text{vis}} > 0.7\sqrt{s}$	6158	6225.5	2230.7	3991.2	96.5
Felépítés: $y_{34} > 0.0025$; $N_{\text{ct}} \geq 1$	2582	2519.9	1790.6	728.6	89.9
Kinematikai illesztés: $P_{\chi^2}(4C) > 10^{-5}$; $P_{\chi^2}(5C) > 10^{-5}$	1988	1980,8	1510.7	469.4	79.5
Alak: C-paraméter > 0.45	1728	1727.6	1462.6	265.0	77.9
Minősítés: $L_{\text{jel}} > 0.45$	223	217.2	180.2	37.0	51.6

Jel/háttér $M(H^\pm) = 65 \text{ GeV}$ -re $37.8/(217 \pm 12)$,
 75 GeV -re $23.5/(382 \pm 21)$.



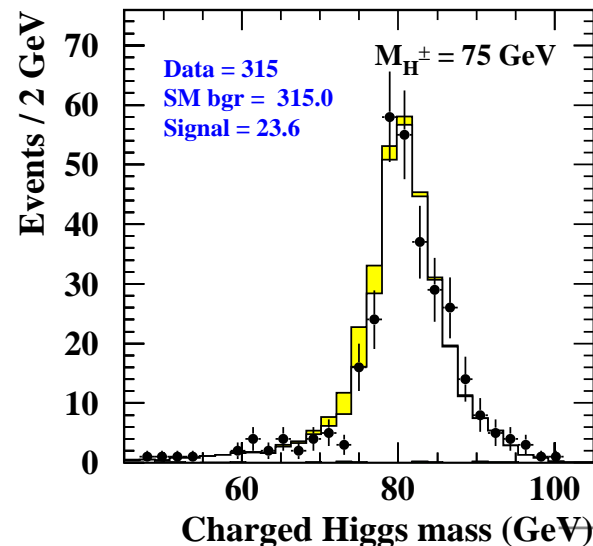
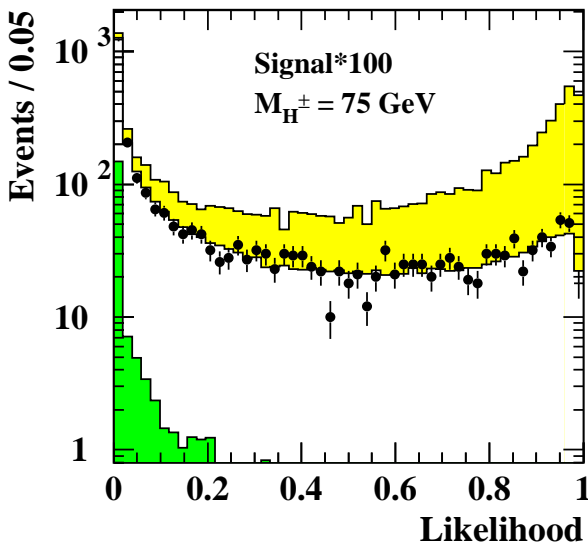
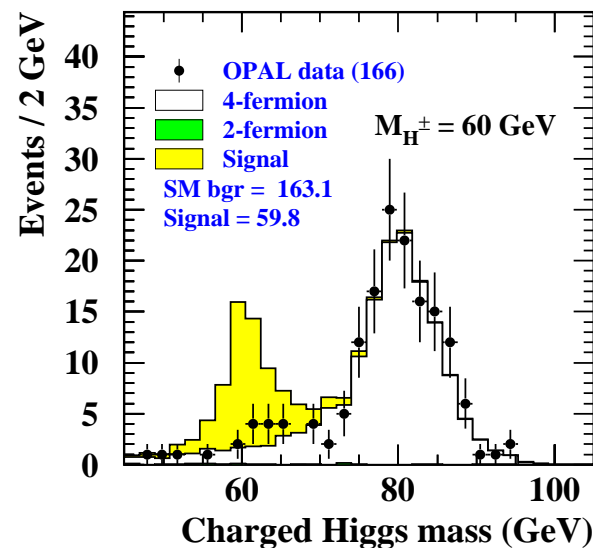
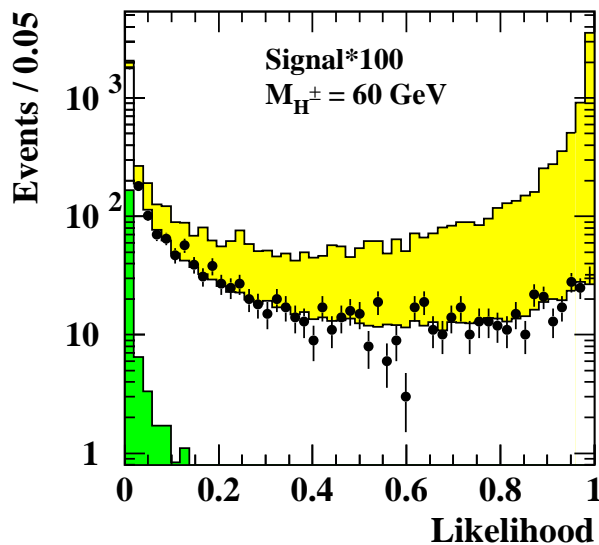
$$e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$$

OPAL Preliminary: $H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$, 189 - 209 GeV

A LEP OPAL-kísérlete

1998-2000

Likelihood-eloszlás és
 LH-vágás utáni
 tömegspektrum két
 Higgs-tömegre a
 vegyes csatornában

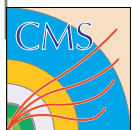
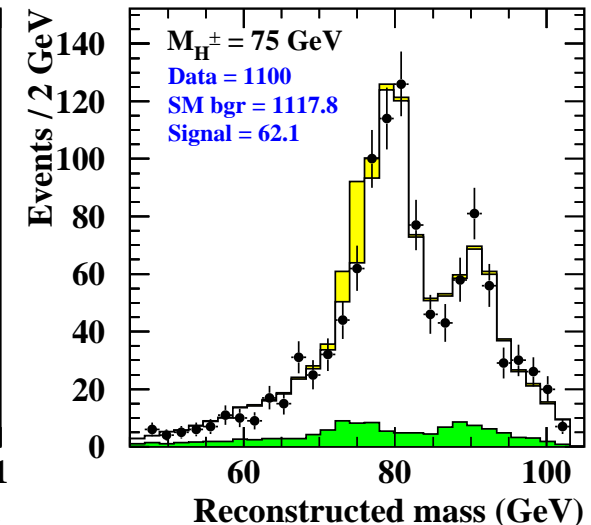
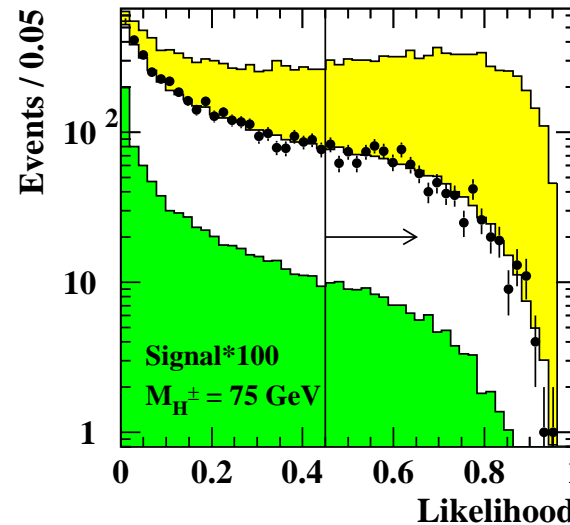
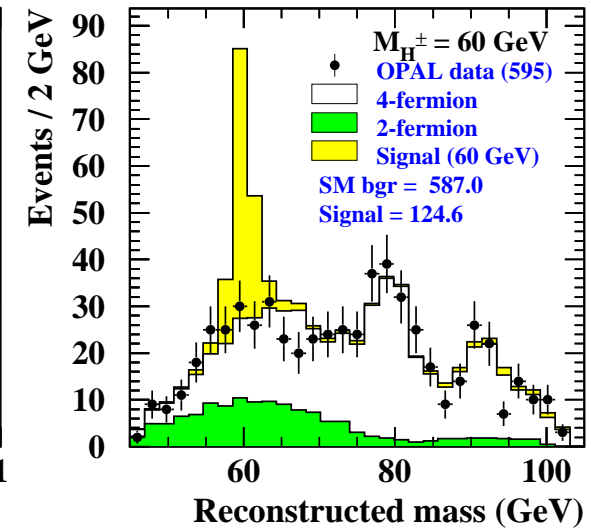
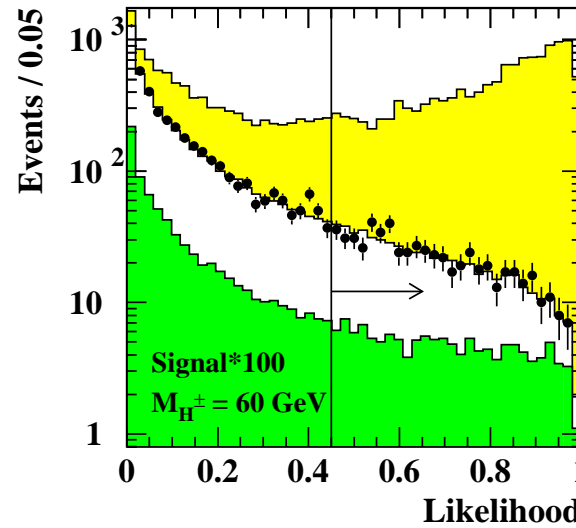


$$e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow qqqq$$

OPAL Preliminary: $H^+H^- \rightarrow qqqq$, 189 - 209 GeV

A LEP OPAL-kísérlete 1998-2000

Likelihood-eloszlás és
LH-vágás utáni
tömegspektrum két
Higgs-tömegre a
hadronos csatornában



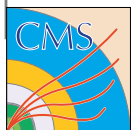
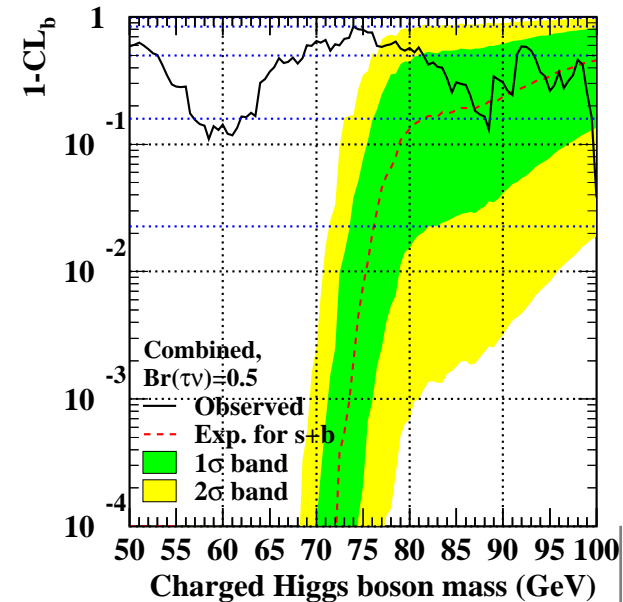
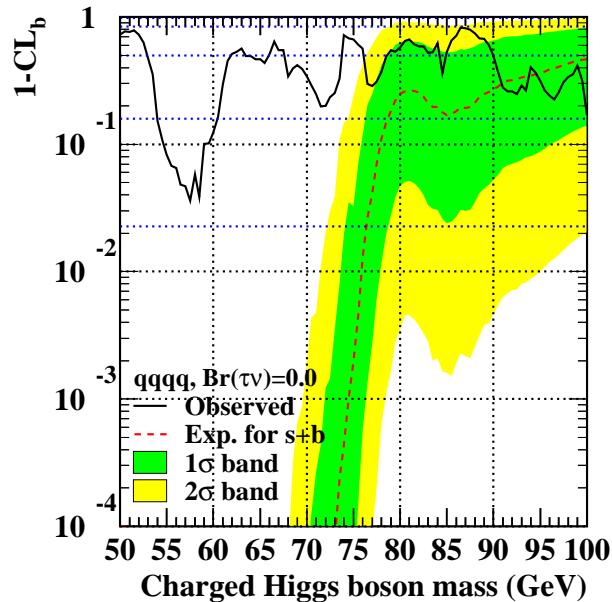
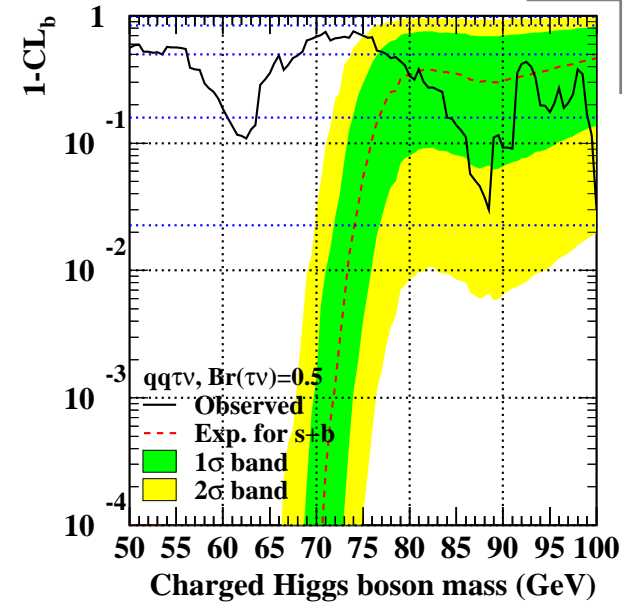
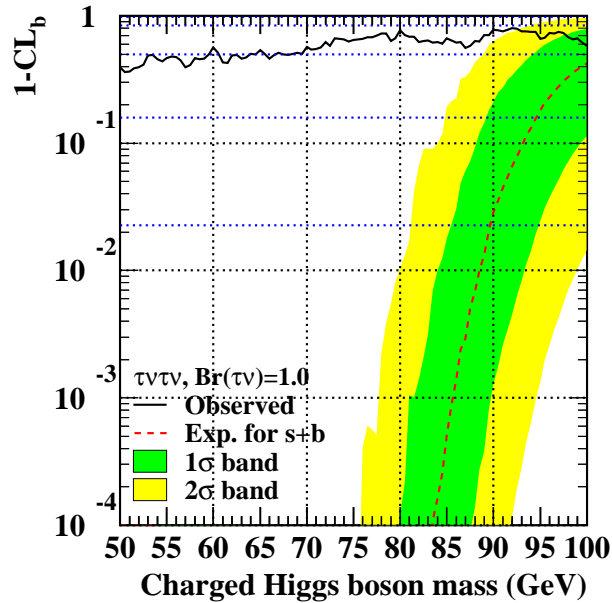
$e^+e^- \rightarrow H^+H^-$: a háttér

A LEP
OPAL-kísérlete

1998-2000

Konfidencia-szint az
adatok

háttér-értelmezése
esetén a háttér+jel
szimuláció alapján várt
értékekkel együtt a
leptonos, a vegyes és a
hadronos csatornában,
valamint az összesítésre
50%-os elágazási arány
esetén

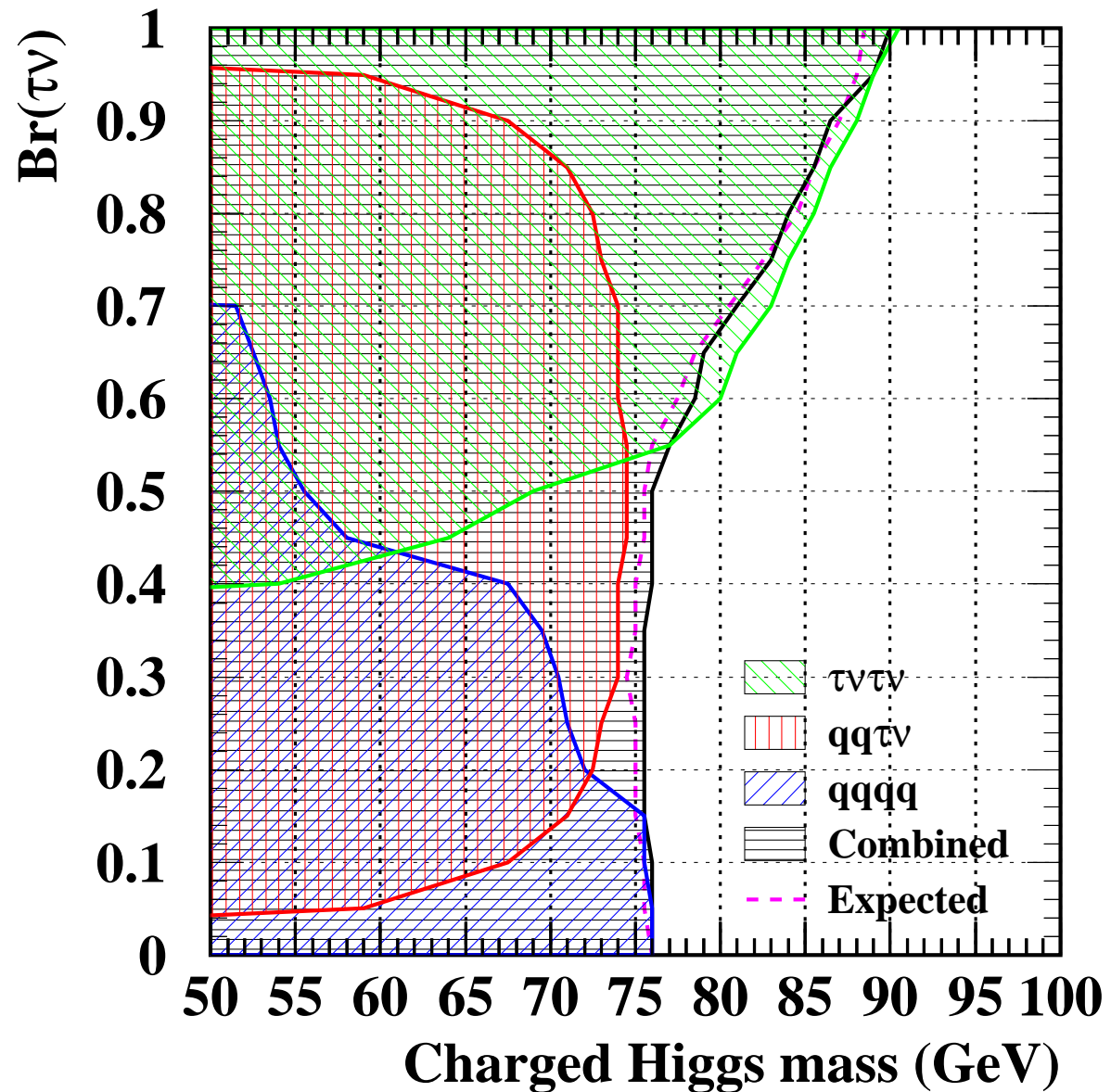


$e^+e^- \rightarrow H^+H^-$: kizárás

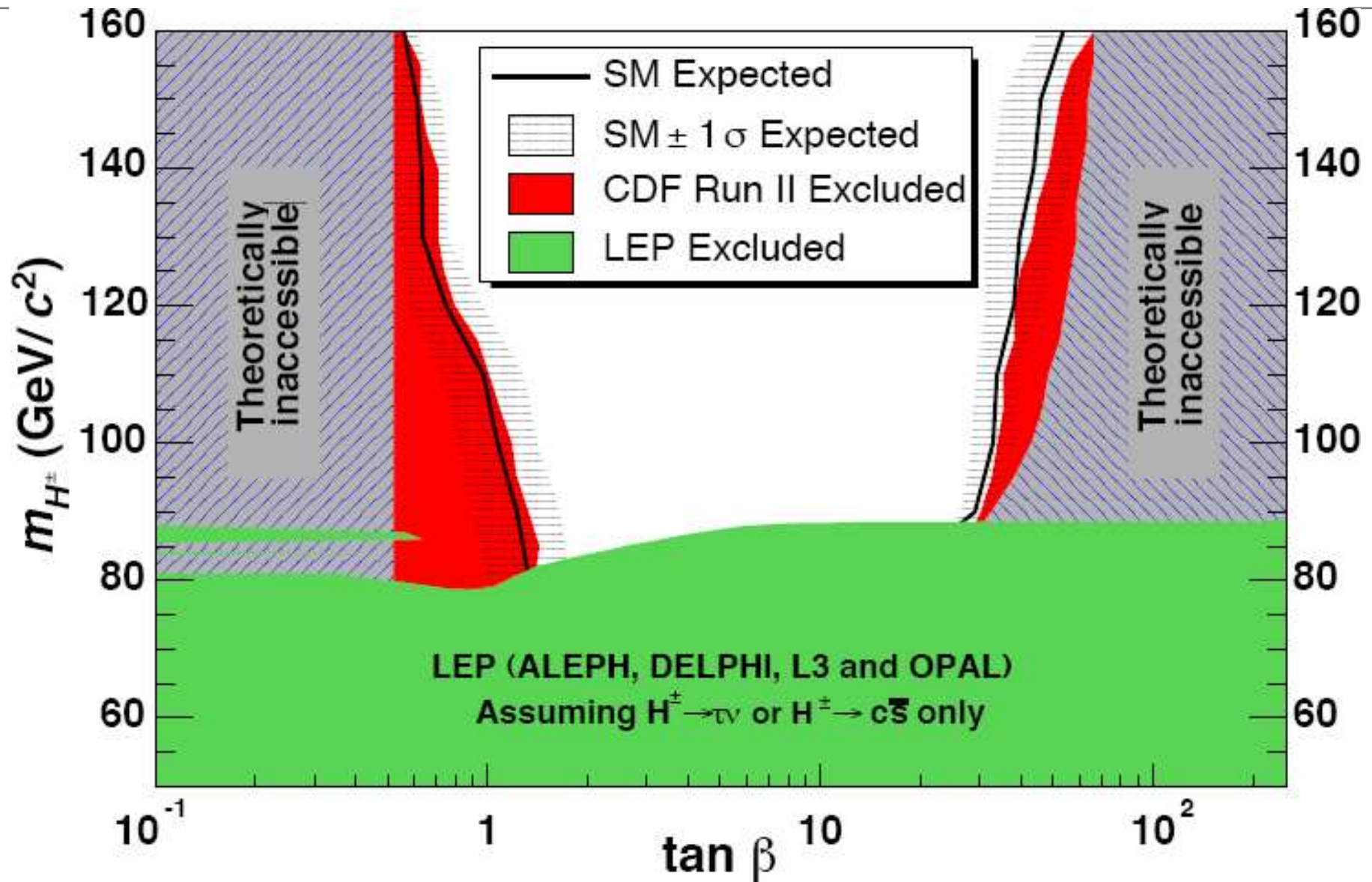
Kizárás a tömeg –
elágazási arány síkon
(95% CL mellett).

Várt limit a kombinált
esetre:

$\sim 75,5$ GeV



Töltött Higgs-bozon: LEP és CDF



$$M(H^\pm) > 80 \text{ GeV}; 0,7 < \tan \beta < 40$$



MSSM Higgs-bozonjai

Három paraméter jellemzi:

- $\tan \beta = v_1/v_2; [v_1^2 + v_2^2 = \frac{2m_Z^2}{g^2+g'^2} \approx (174 \text{ GeV})^2]$
- Egyik Higgs-bozon tömege, pl. m_A
- α keveredési szög, h^0 -t és H^0 -t tömeg-sajátállapotba hozza (a semleges tömegmátrixot diagonalizálja)

Fagráf-szinten: $m_{h^0} < (m_A, M_Z) < m_{H^0}; M_W < m_{H^\pm}$

LEP-energiáknál Higgs-sugárzás és párképződés dominál:

$$e^+e^- \rightarrow Z^0 h^0; \quad e^+e^- \rightarrow A^0 h^0$$

$$\sigma_{\text{MSSM}}(Z^0 h^0) = \sin^2(\beta - \alpha) \sigma_{\text{SM}}(Z^0 H)$$

$$\sigma_{\text{MSSM}}(A^0 h^0) = \bar{\lambda} \cos^2(\beta - \alpha) \sigma_{\text{SM}}(Z^0 H)$$

ahol a $\bar{\lambda}$ kinematikai tényező
az energiától és a tömegektől függ.



Kizárás az $m_{h^0}^{\max}$ – $\tan \beta$ síkon

$m_{h^0}(\tan \beta) = \max$
Konzervatív limit!

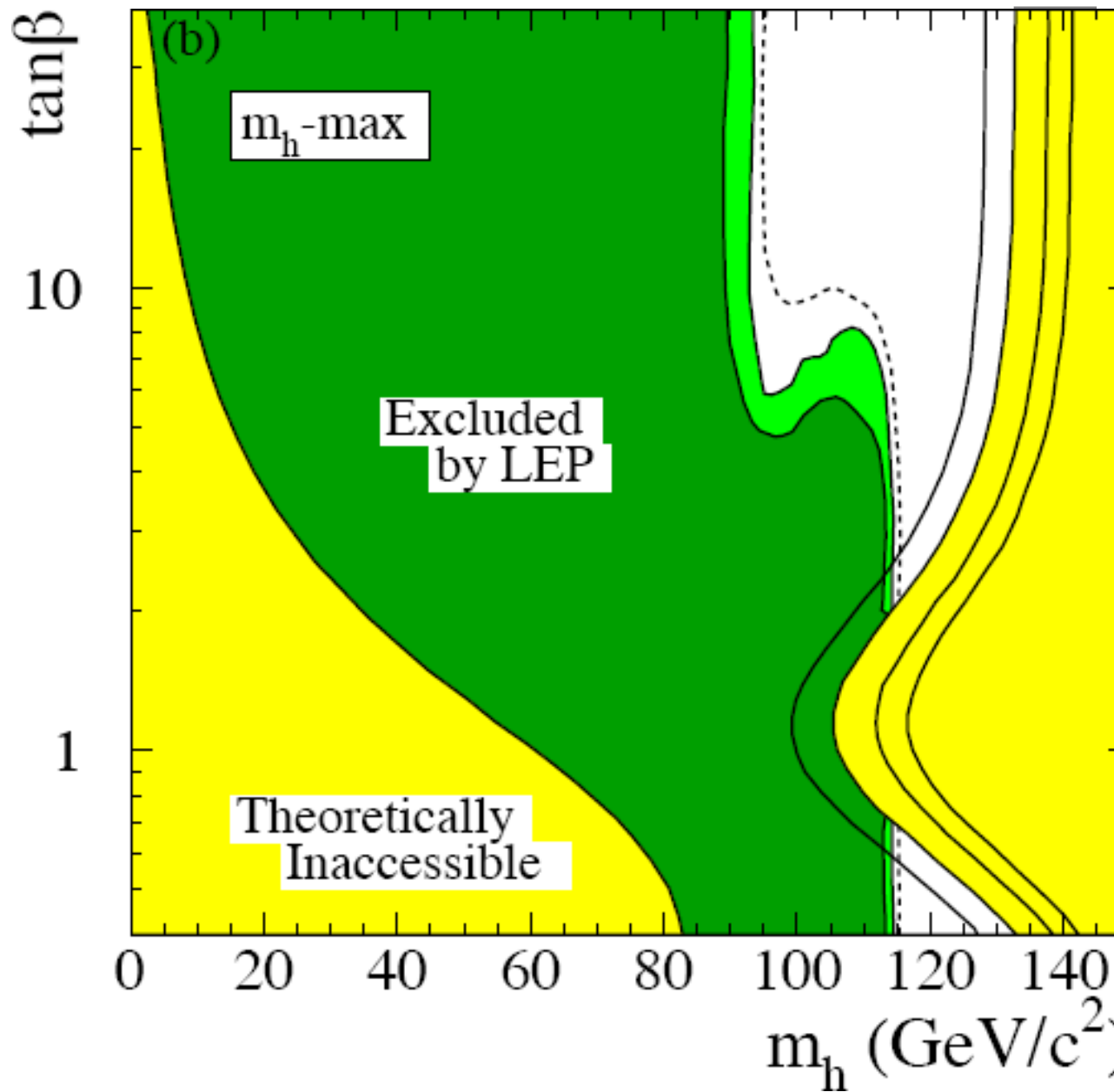
Fekete vonalak:

$m_{\text{top}} =$
169, 3; 174, 3; 179, 3
és 183, 0 GeV

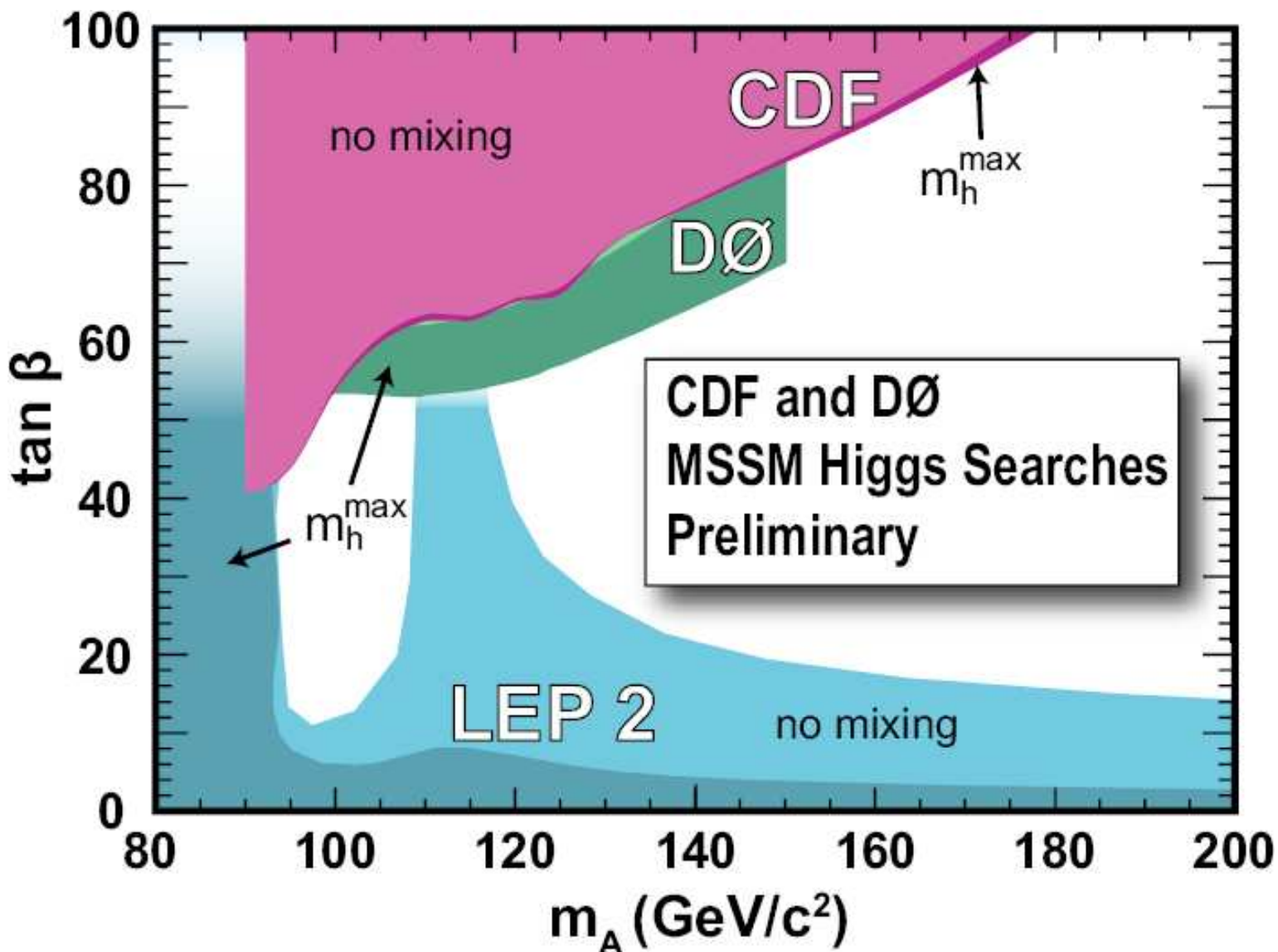
LEP-kizárás CL-je:
sötét zöld: 99,7 %
világos zöld: 95 %

$\tan \beta \sim 1 \dots 5 \Rightarrow$
 $m_{h^0} \sim 115 - 130$ GeV

$\tan \beta > 8 \Rightarrow$
 $m_{h^0} \sim 90 - 130$ GeV

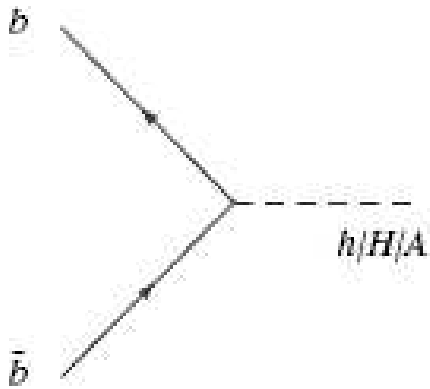


Kizárás a $m_{A^0} - \tan \beta$ síkon

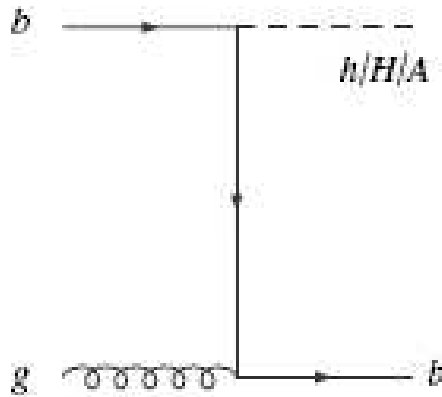


No mixing: \tilde{t}_1 és \tilde{t}_2 nem keveredik

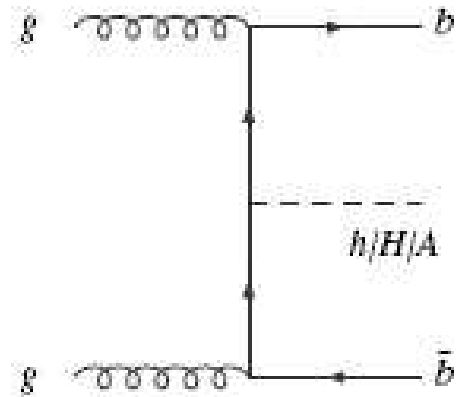
LHC: Semleges Higgs-bozonok képződése



(a)



(b)



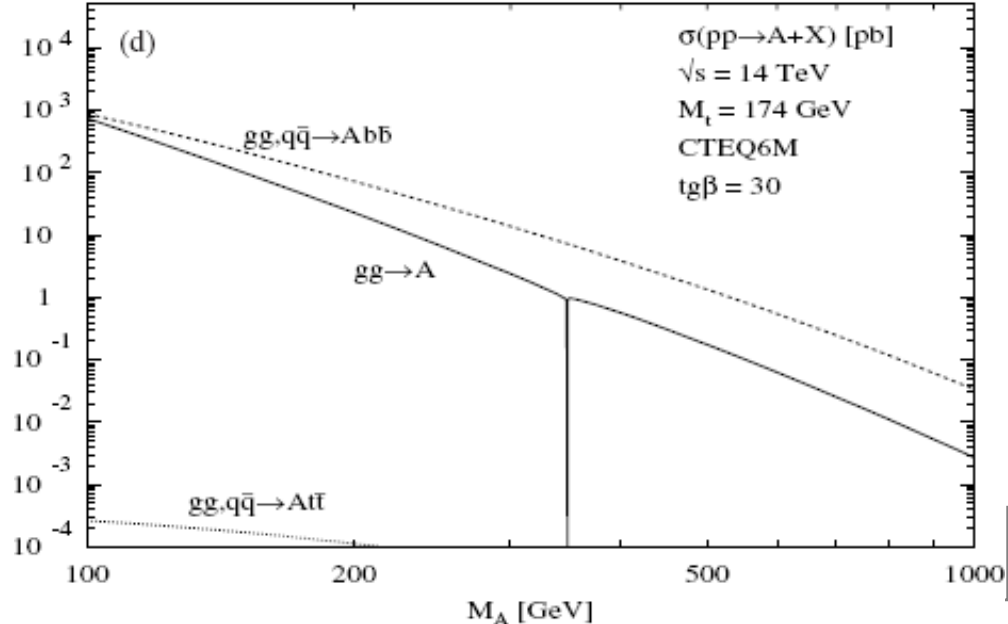
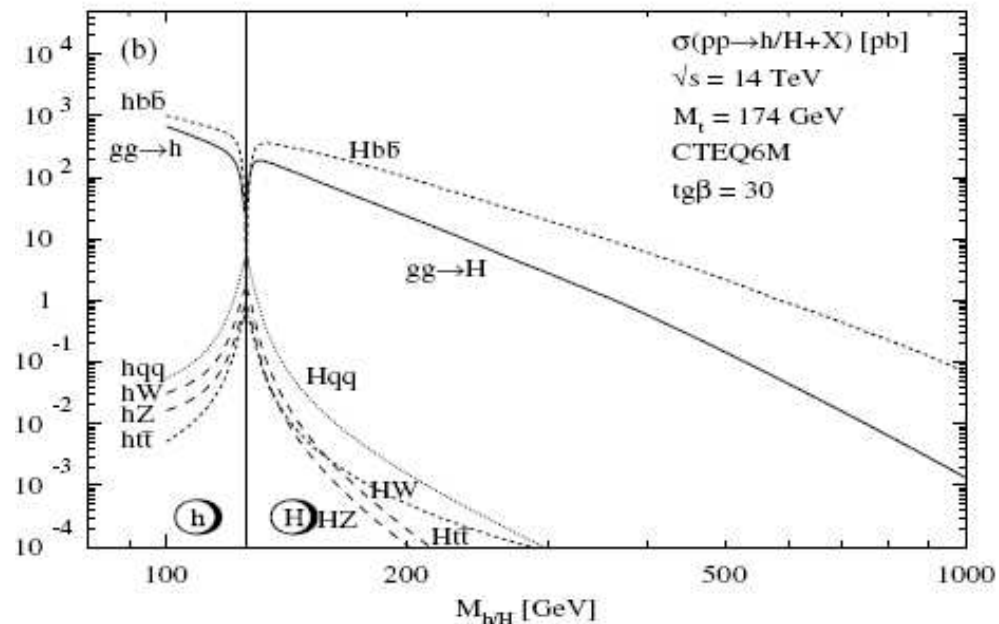
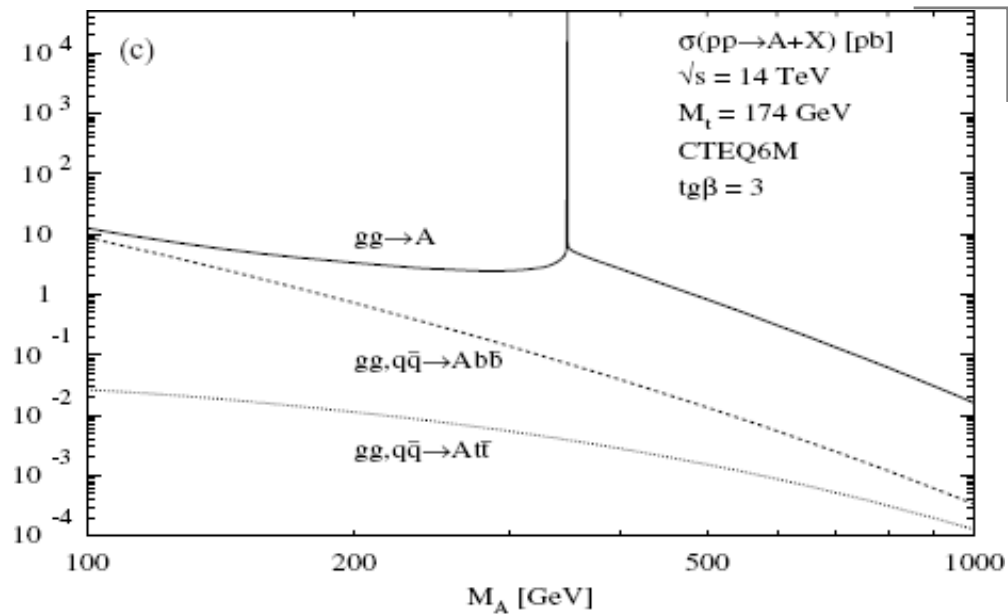
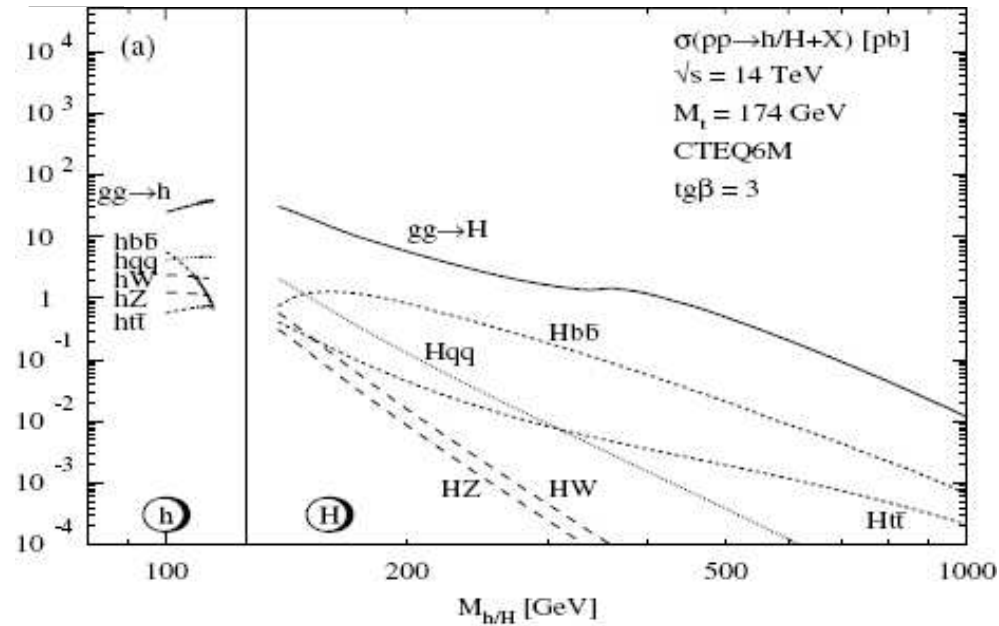
(c)

$$b + \bar{b} \rightarrow h/A/H$$

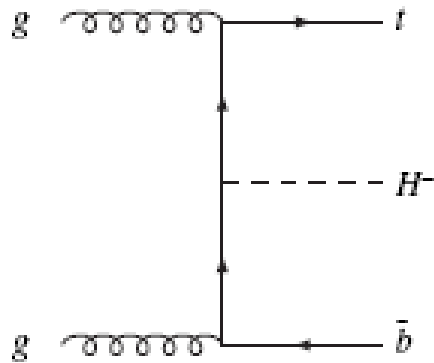
$$b + g \rightarrow b + h/A/H$$

$$g + g \rightarrow b\bar{b} + h/A/H$$

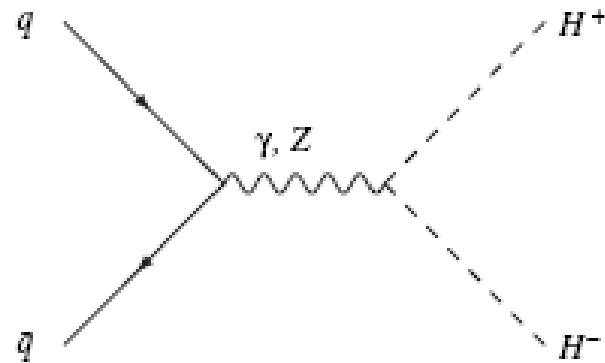
LHC: Semleges Higgs-bozonok képződése



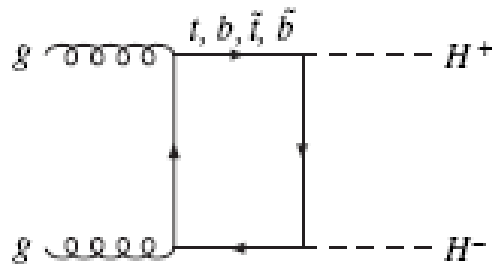
LHC: Töltött Higgs-bozonok képződése



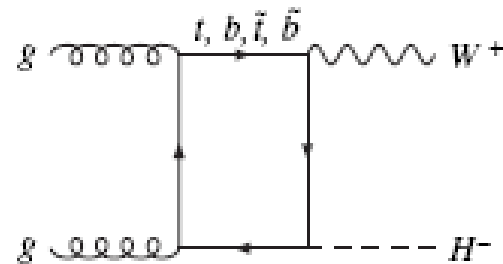
(a)



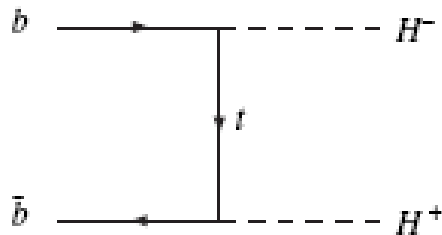
(b)



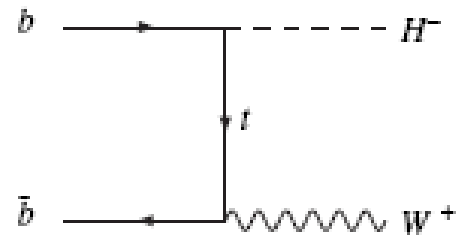
(c)



(d)



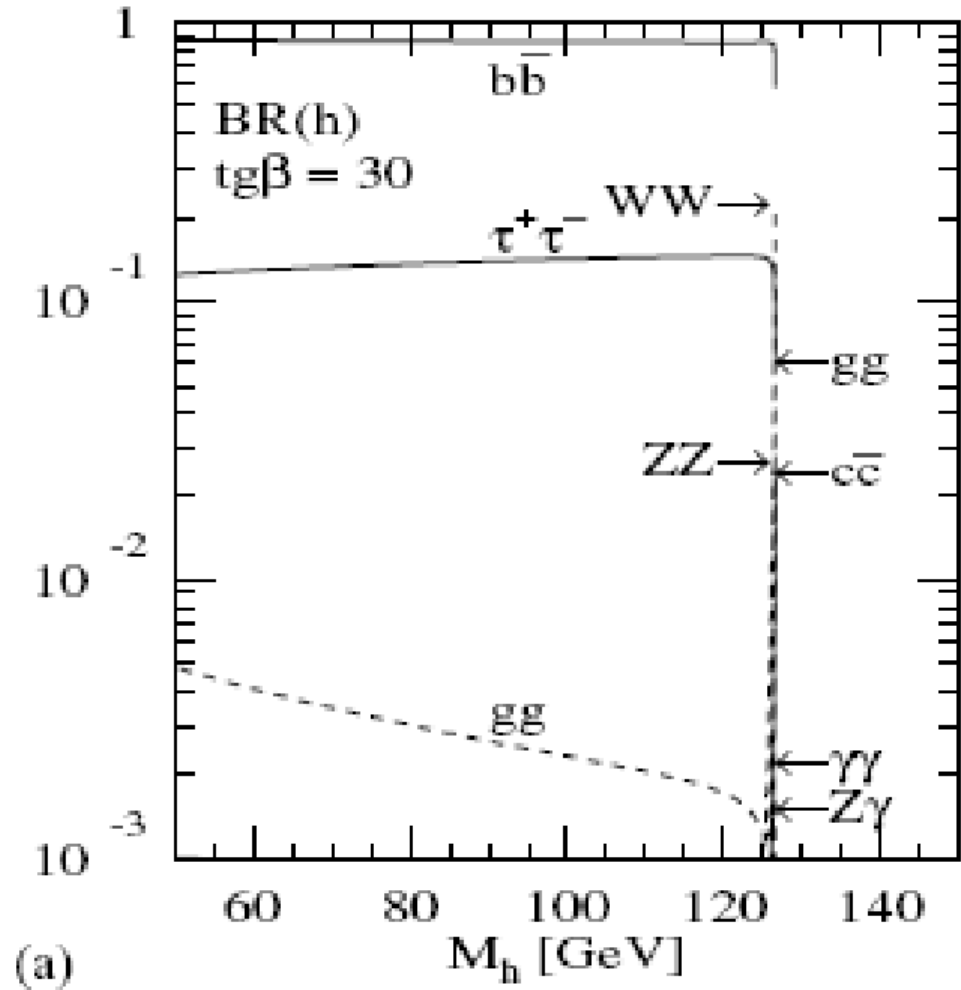
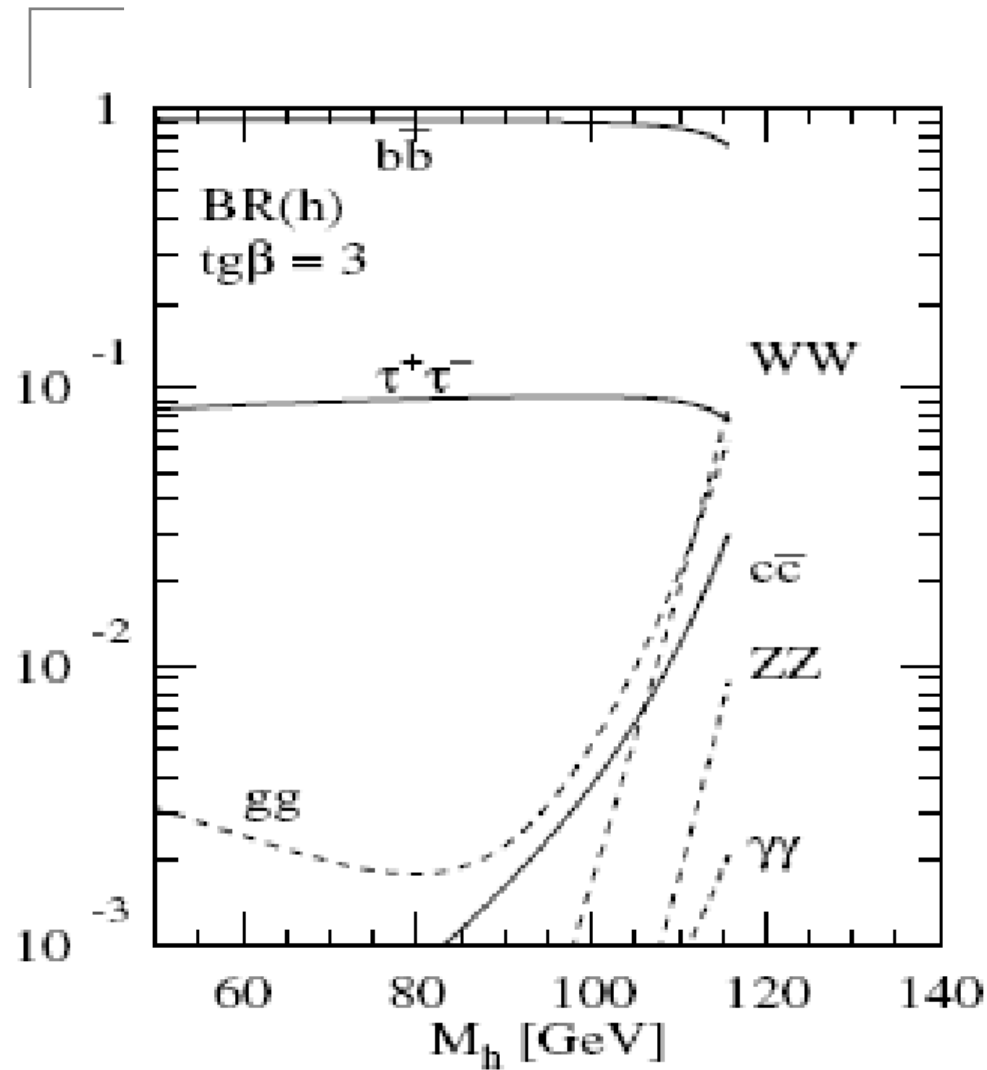
(e)



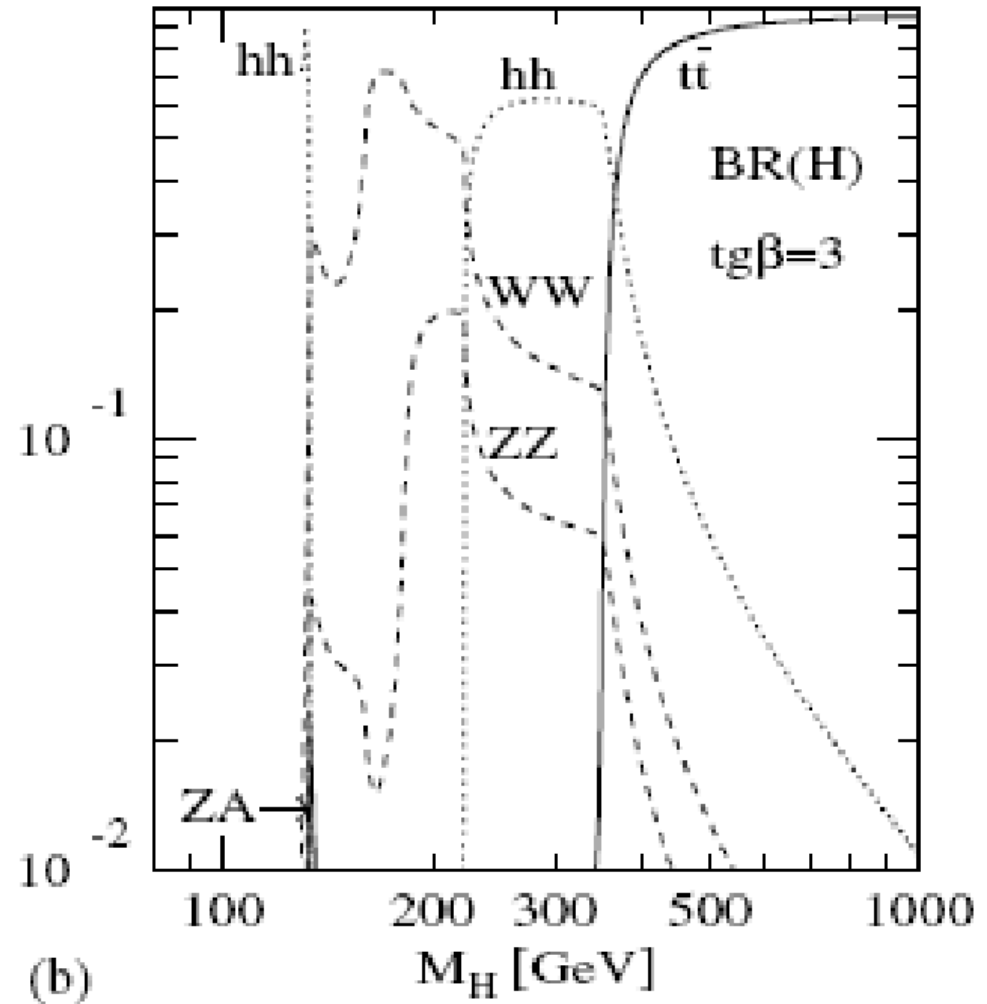
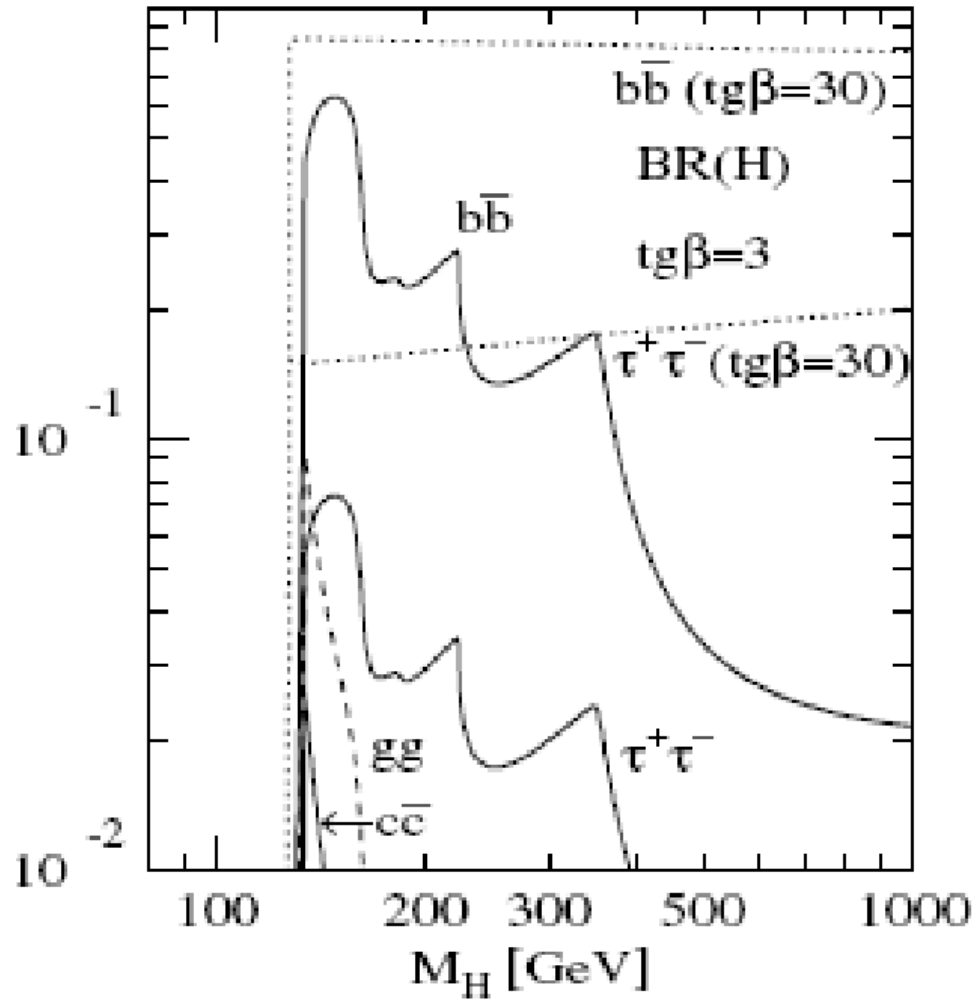
(f)



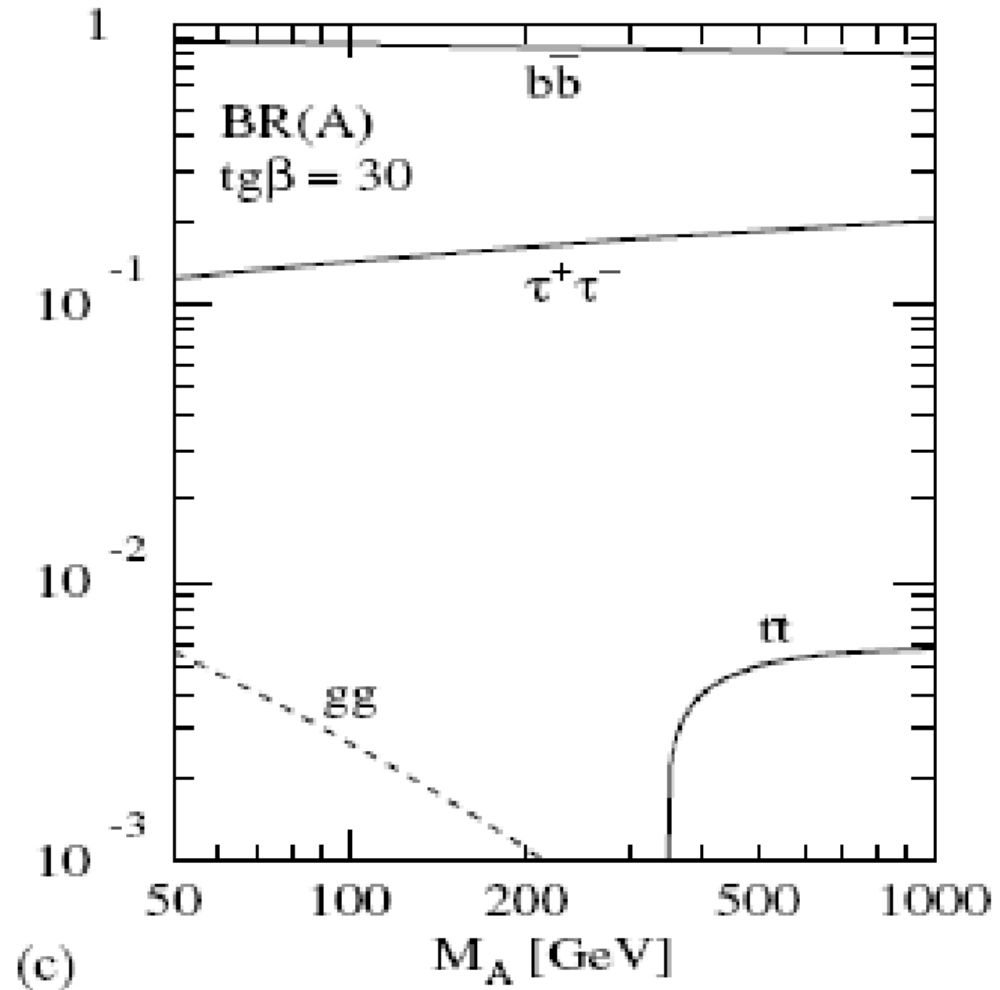
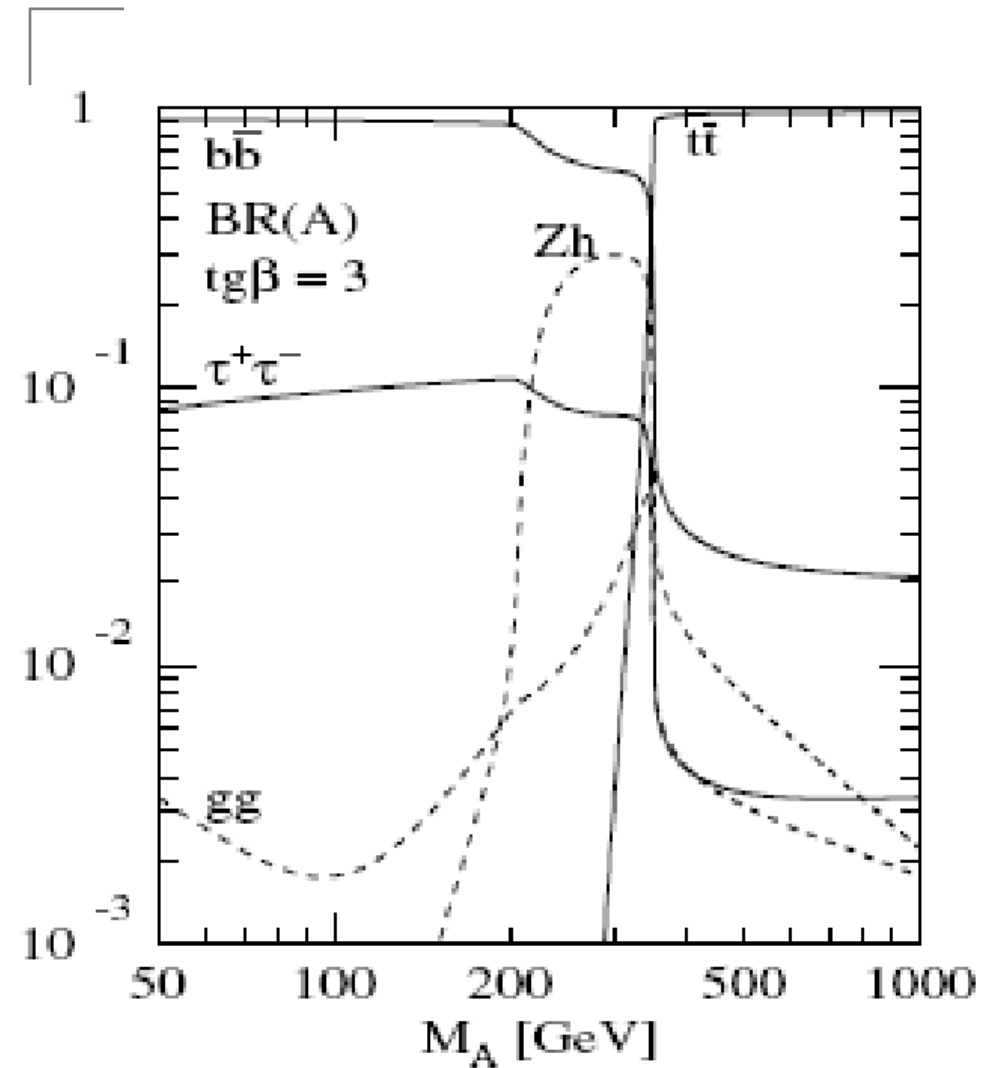
LHC: MSSM h bomlása



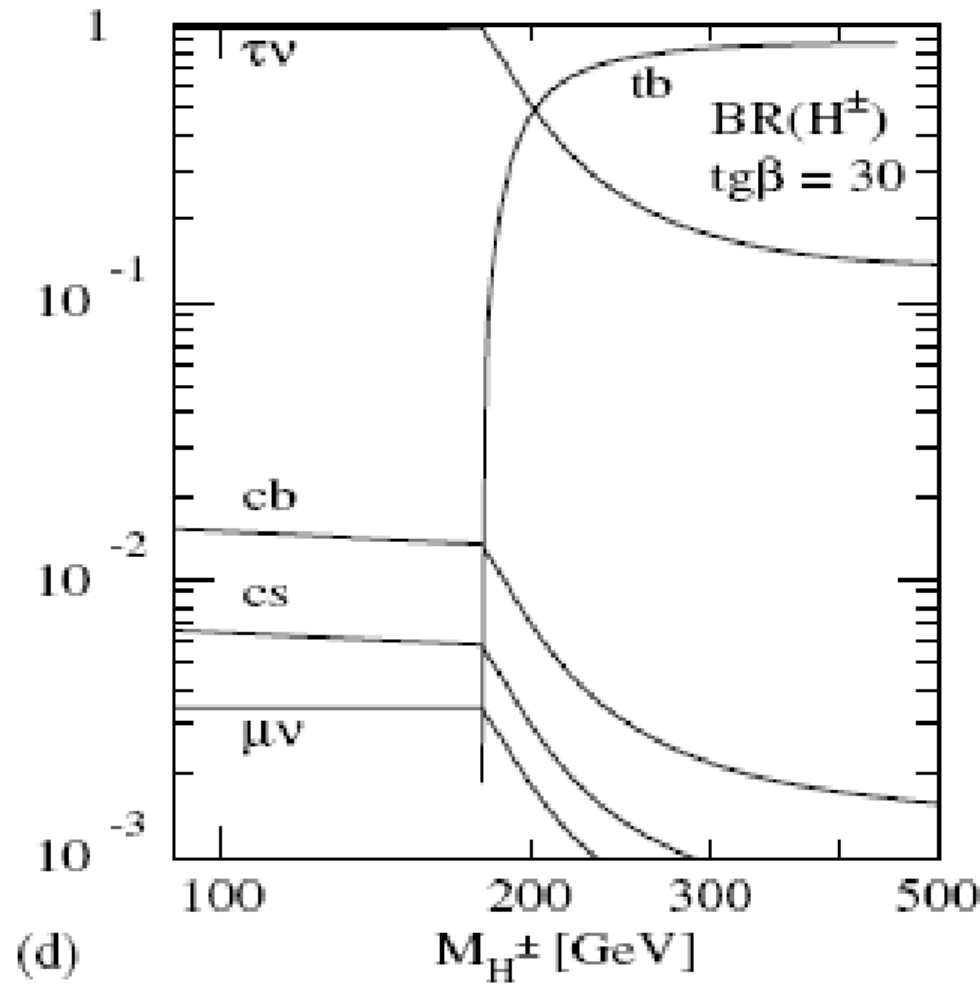
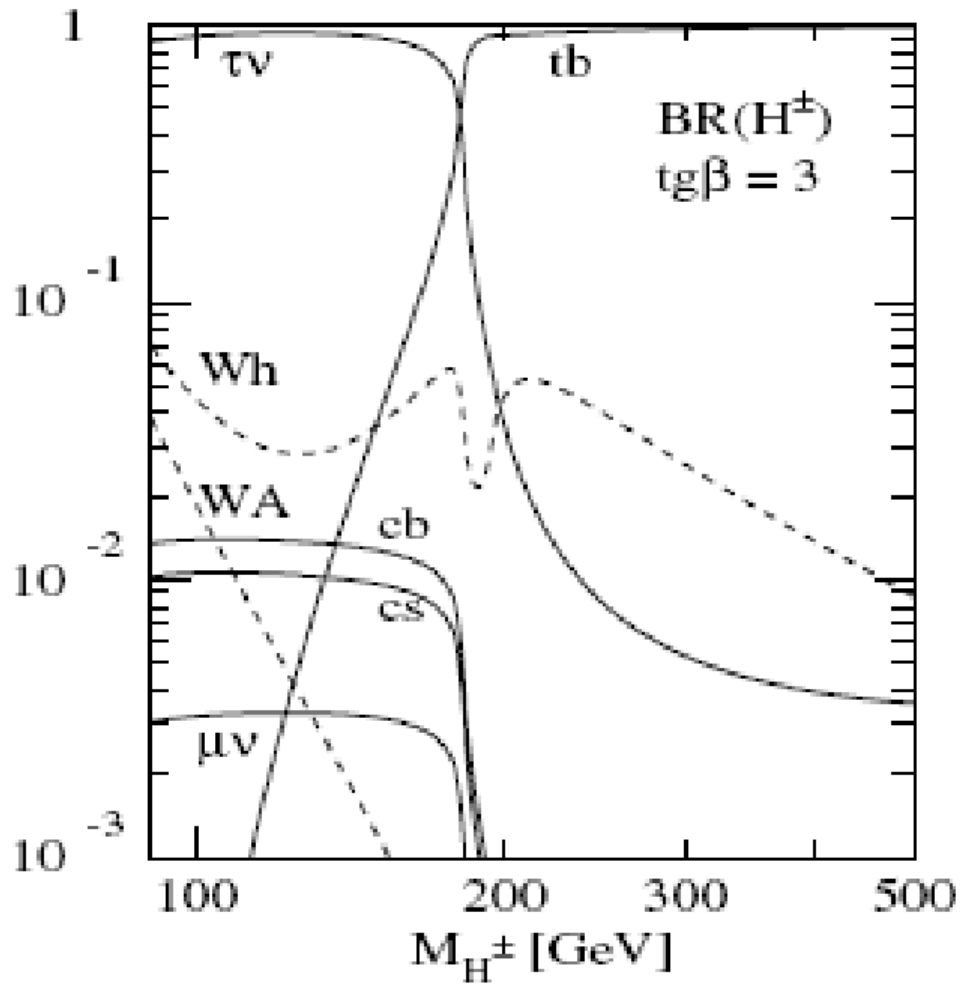
LHC: MSSM H bomlása



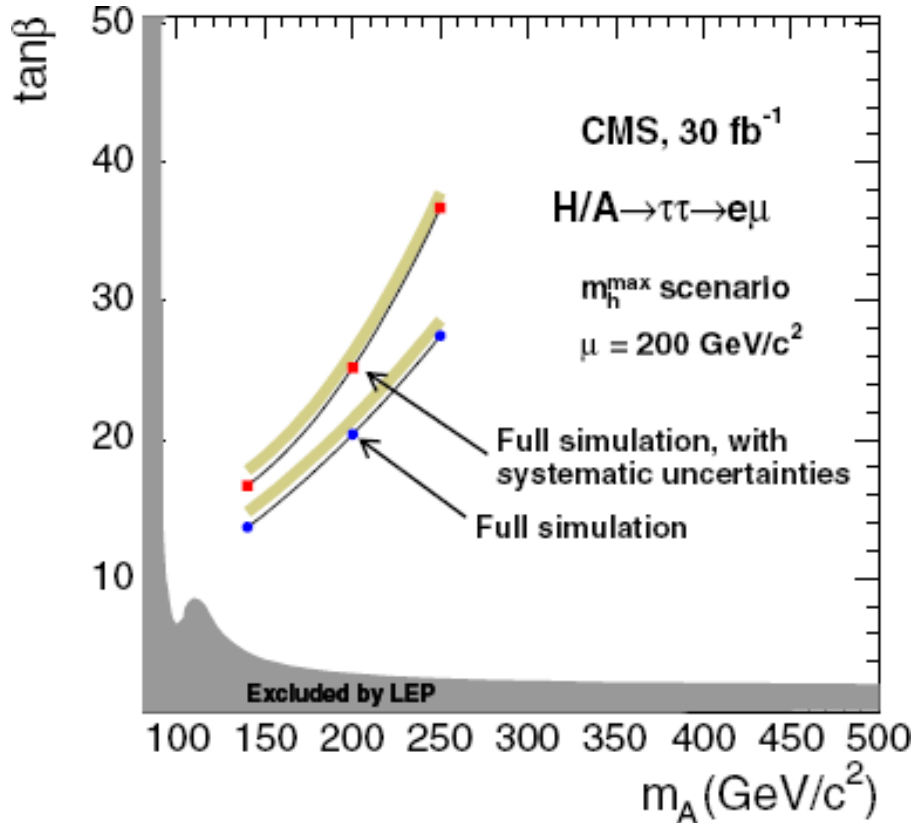
LHC: A bomlása



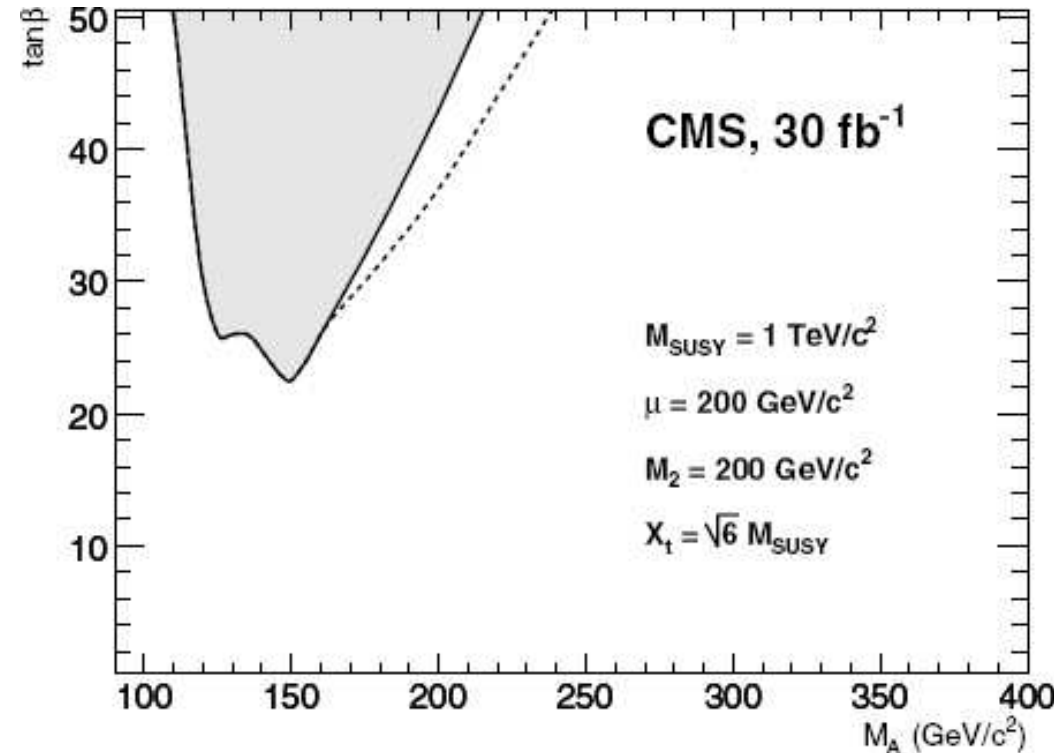
LHC: H^\pm bomlása



CMS: A/h felfedezési potenciálja

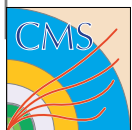


$h \rightarrow \tau\tau \rightarrow e\mu$



$b\bar{b}A; A \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\mu$

Szisztematikus bizonytalanság dominálja



Szuperszimmetria (SUSY)

Fermionok és bozonok párban:

$$Q|F\rangle = |B\rangle; \quad Q|B\rangle = |F\rangle \quad m_B = m_F$$

Azonos részecskék, csak spinjük különbözik

Kis energián sérül, partnereket nem látjuk: nagyobb tömeg?

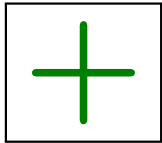
Minimális SUSY-menazséria (MSSM)

Királis multiplettek		mérték-multiplettek	
S=1/2	S=0	S=1	S=1/2
kvarok: q_L, q_R	skvarok: \tilde{q}_1, \tilde{q}_2	foton: γ	fotino: $\tilde{\gamma}$
lepton: ℓ_L, ℓ_R	slepton: $\tilde{\ell}_1, \tilde{\ell}_2$	gyenge bozonok W^\pm	wino: \tilde{W}^\pm
		bozonok Z	zino: \tilde{Z}
higgszínó: $\tilde{\Phi}, \tilde{\Phi}'$	Higgs: Φ, Φ'	gluon: g	gluínó: \tilde{g}

Skalár fermion: sfermion, bozon párja: bozínó



Szuperszimmetria: + és –



- elmélet természetessége
- világegyetem hideg sötét anyaga (23 %)
- kölcsönhatások egyesítése
- gravitáció beépítése

DE:



- SUSY-sértés mechanizmusa??
- sokféle modellfelépítés
- rengeteg új paraméter
- $\tilde{m} \sim 100$ GeV alatt nem látjuk

bár a SUSY-t már 50%-ig felfedeztük!!
(a SUSY-részecskék felét (1 híján :-)) látjuk...)

A MSSM tömeg-sajátállapotai

Elektroyenge szimmetria-sértés



MSSM-fermionok keverednek \Rightarrow tömeg-sajátállapotok

{Elektroyenge gaugínók + higgszínók} \Rightarrow
{chargínók és neutralínók }

$\{\tilde{\gamma}, \tilde{W}^\pm, \tilde{Z}; \tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^\pm\} \Rightarrow \{\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm; \tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0\}$
tömeg nő az index-szel

Legkönnyebb SUSY-részecske (LSP)

mSUGRA: $\tilde{\chi}_1^0$ vagy GMSB: gravitínó (\tilde{G})

SUSY-sérülés \Rightarrow rengeteg (> 100) új paraméter
tömegek, csatolások, keveredések

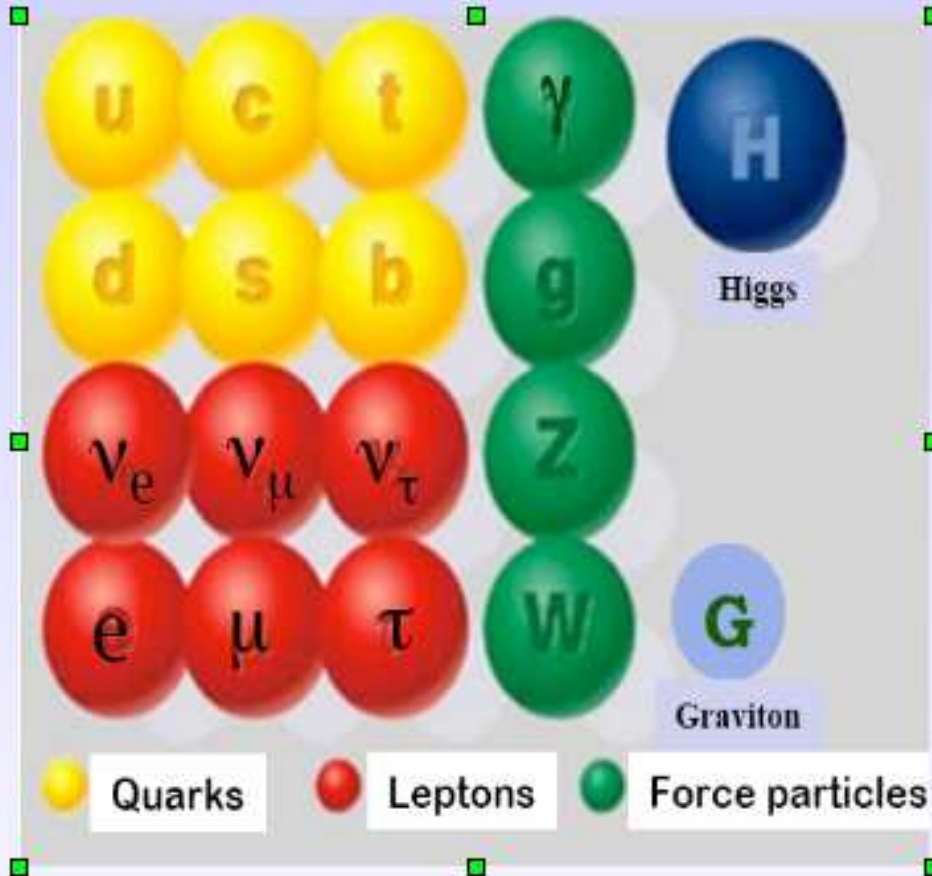
Rengetegféle SUSY-modell, óriási paraméterter, különféle
korlátozás.



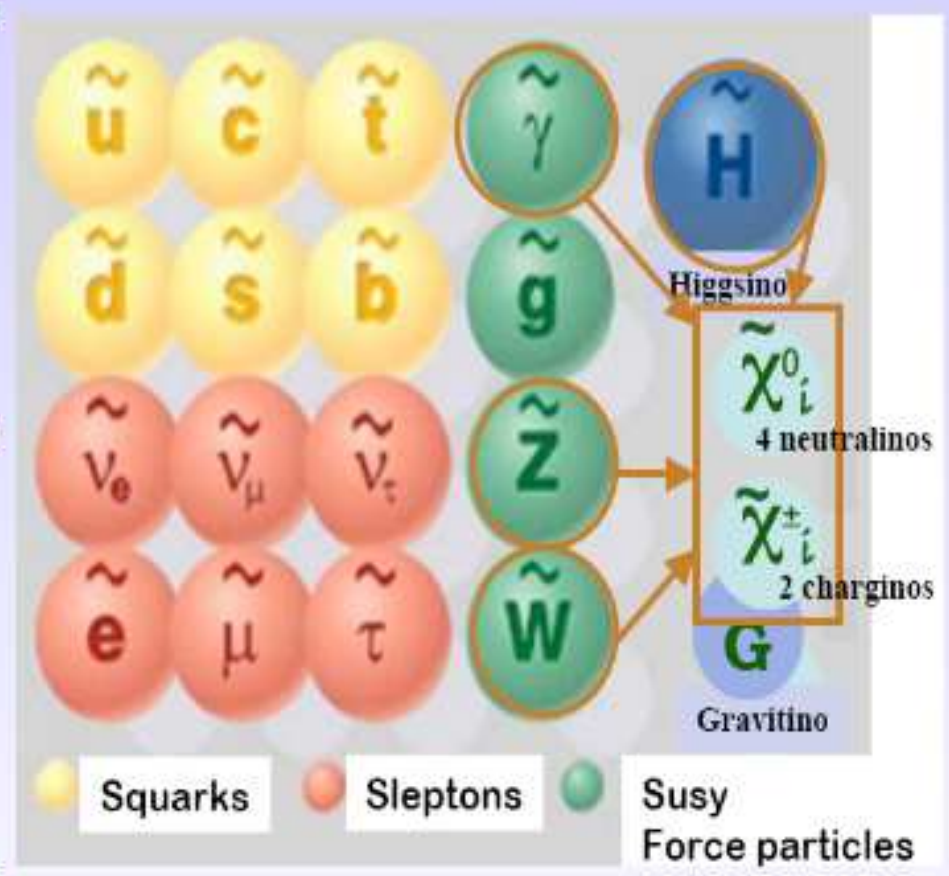
SM és MSSM: menázséria

Szuperszimmetria

Standard modell



SUSY



Rengetegféle modell van



Kísérleti korlátozások, megszorítások

SUSY-jelenséget nem észleltünk, negatív mérések a paraméterteret korlátozzák

- **LEP-mérések: Higgs-szektor**
 - SM-Higgs tömege keresésből
 $M_H > 114.4 \text{ GeV}; H \sim h^0$
 - Elektroyenge adatok illesztése
 - Semleges Higgs-bozonok (h és A) keresése
- $BR(b \rightarrow s\gamma)$ mérések B-gyáraknál
- A müon anomális mágneses momentuma (BNL)
- **WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe):** sötét anyag (DM) mennyisége, indirekt
- **DM direkt (nem-)észlelése ν -detektorokkal**



WMAP utáni CMSSM

Hideg sötét anyag sűrűsége (nagy távolságokra átlagolva)

$$\langle \rho_{\text{DM}} \rangle \approx 1,2 \times 10^{-6} \text{ GeV/cm}^3$$

Tejútrendszer dinamikája $\Rightarrow \rho_{\text{DM}}^{\text{itt}} \approx 0,3 \text{ GeV/cm}^3!!$

WIMP: Weakly Interacting Massive Particle?

Remek jelölt: LSP $\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\nu}, \tilde{G}$

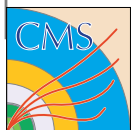
$\tilde{\nu}$ kiesik (direkt keresés ν -detektorokkal),
gravitínót nehéz megfigyelni (:-)

Megszorítás: Megfigyelt ρ_{DM} összeegyeztethető-e:

- korai Univerzum: LSP + más SUSY-rész. annihiláció hatáskeresztmetszetével közönséges részecskékre;
- most: LSP + LSP annihilációéval?

Komoly korlátok MSSM paraméter-terében

M. Battaglia et al, Eur. Phys. J. C33 (2004) 273



SUSY-keresés

Párban keletkezhethet, csak másik SUSY-ra bomolhat
(ha R megmarad)

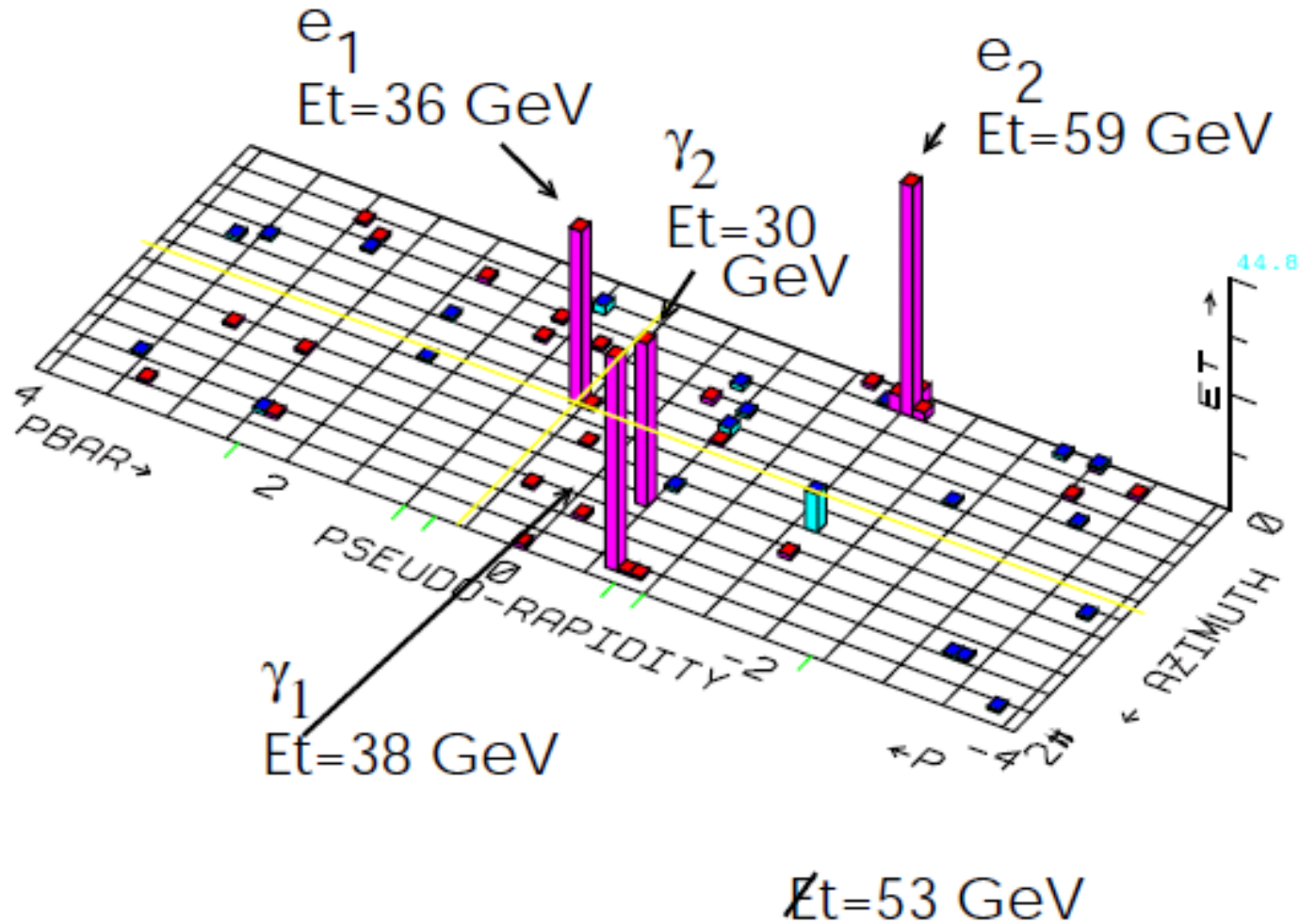
A legkönnyebb (LSP) stabil, semleges, észlelhetetlen

Jele: hiányzó energia

Tipikus SUSY-bomlások (LSP = $\tilde{\chi}_1^0$):

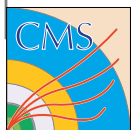
- skvark: $\tilde{q} \rightarrow q + \tilde{g}; \quad q + \tilde{\chi}_1^0$
- slepton: $\tilde{l} \rightarrow l + \tilde{\chi}_1^0$
- gluínó: $\tilde{g} \rightarrow q + \bar{q} + \tilde{\chi}_1^0; \quad g + \tilde{\chi}_1^0$
- wínó: $\tilde{W} \rightarrow e + \nu_e + \tilde{\chi}_1^0$

Tevatron: Rejtélyes CDF-esemény



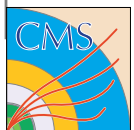
$p\bar{p} \rightarrow e^+ e^- \gamma\gamma$: SM kizárja

Elméleti cikkek özöne próbálta magyarázni SUSY??



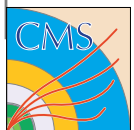
Az LHC működésének első időszaka

1. Értsük meg a *detektort*: működés, trigger, kalibráció
2. Mennyire hiteles a *szimulációnk*? Leírja a SM folyamatait és a detektort? Egyezik a mért eloszlásokkal?
3. Keresd, amit vársz, vedd észre, amit nem vársz. Látunk *eltérést (többletet)* valamilyen eloszlásban a háttérszimulációhoz képest? Új fizika vagy hibás háttérbecslés?
4. Új fizika! Keresünk levágást valamilyen tömegeloszlásban.
5. Ha tényleg új fizika: SUSY vagy valami más? Melyik modell? Milyen paraméterekkel?



SUSY-keresés az LHC-nál

- Keress SM-várakozás fölötti többletet **sokjetes, nagy E_T^{miss}** eseményekből.
- Ha van, járd körbe, **valódi**-e.
- Ha **valódi**, hajts végre rajta előre egyeztetett **SUSY-válogatást**.
- Keress sajátos jellemzőket (**pl. hosszú-élettartamú sleptonokra**).
- Keress **b-jeteket, leptonpárokat, τ -t**.
- Határozd meg a SUSY-paramétereket **globális illesztéssel, levágások keresésével**.

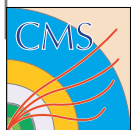
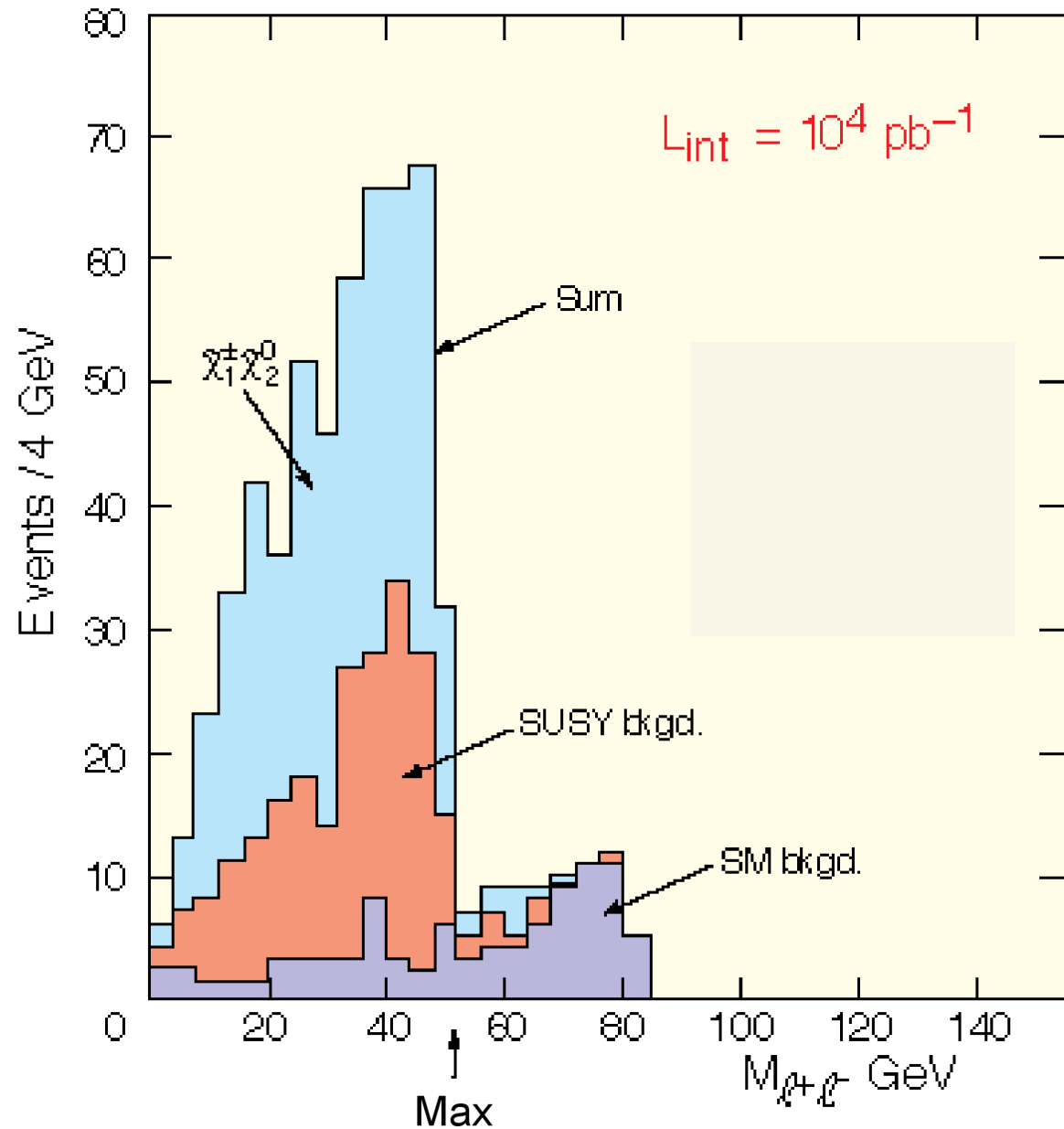


SUSY-keresés: tömegspektrum

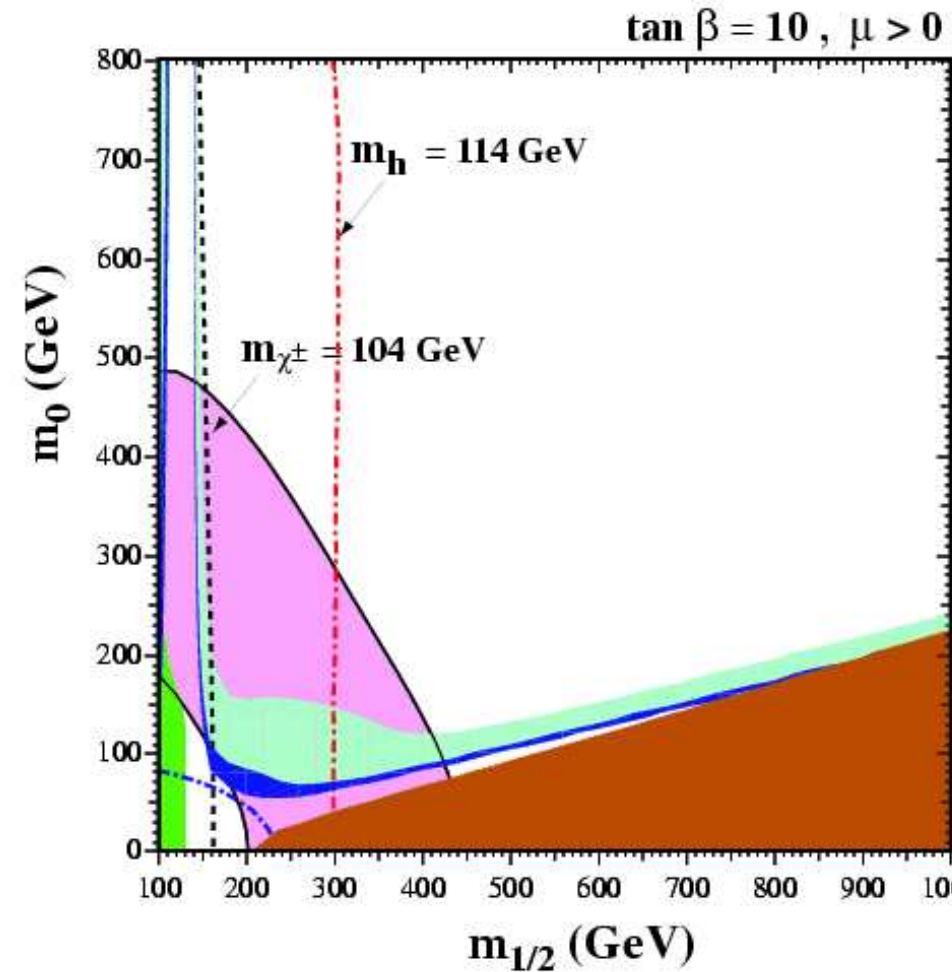
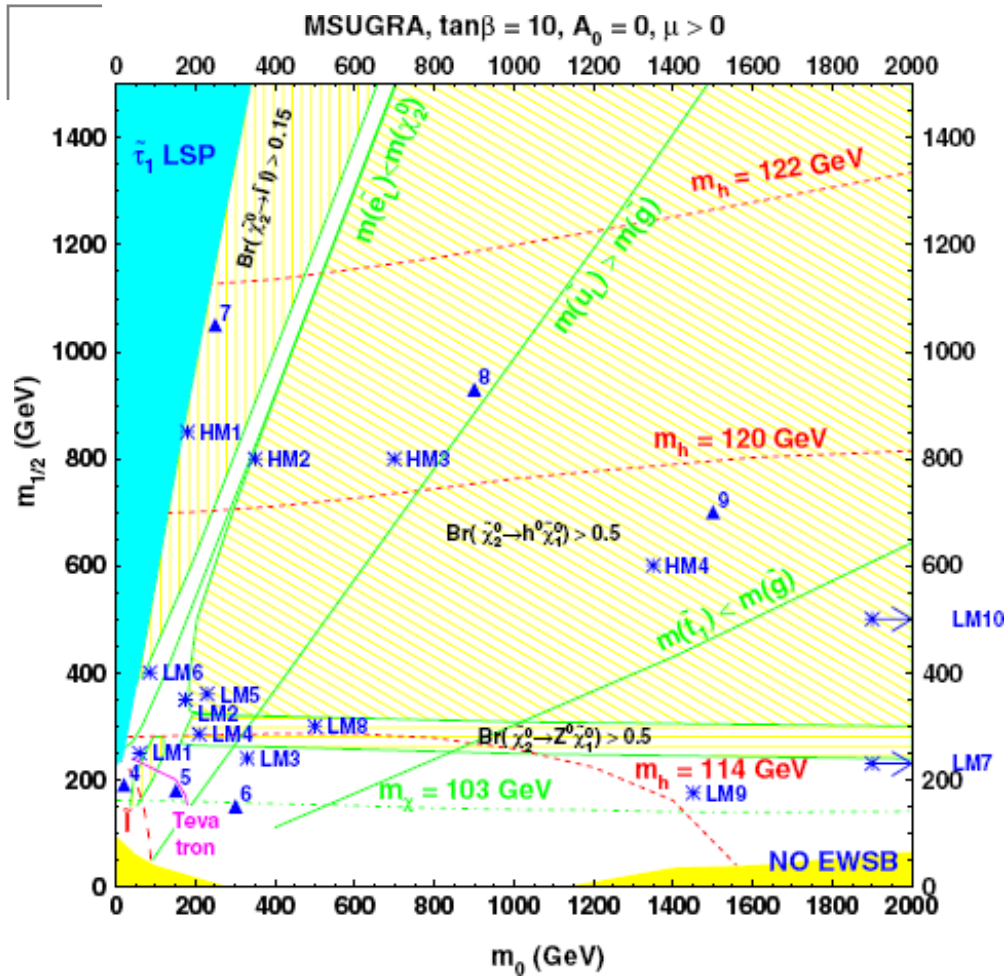
Tömegspektrum
levágása:

$$\text{Pl. } \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow l\tilde{l} \rightarrow l^+ l^- \tilde{\chi}_1^0$$

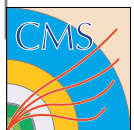
$$M_{ll}^{\text{max}} = m_{\tilde{\chi}_2^0} \sqrt{1 - m_{\tilde{l}}^2 / m_{\tilde{\chi}_2^0}^2} \times \sqrt{1 - m_{\tilde{\chi}_1^0}^2 / m_{\tilde{l}}^2}$$



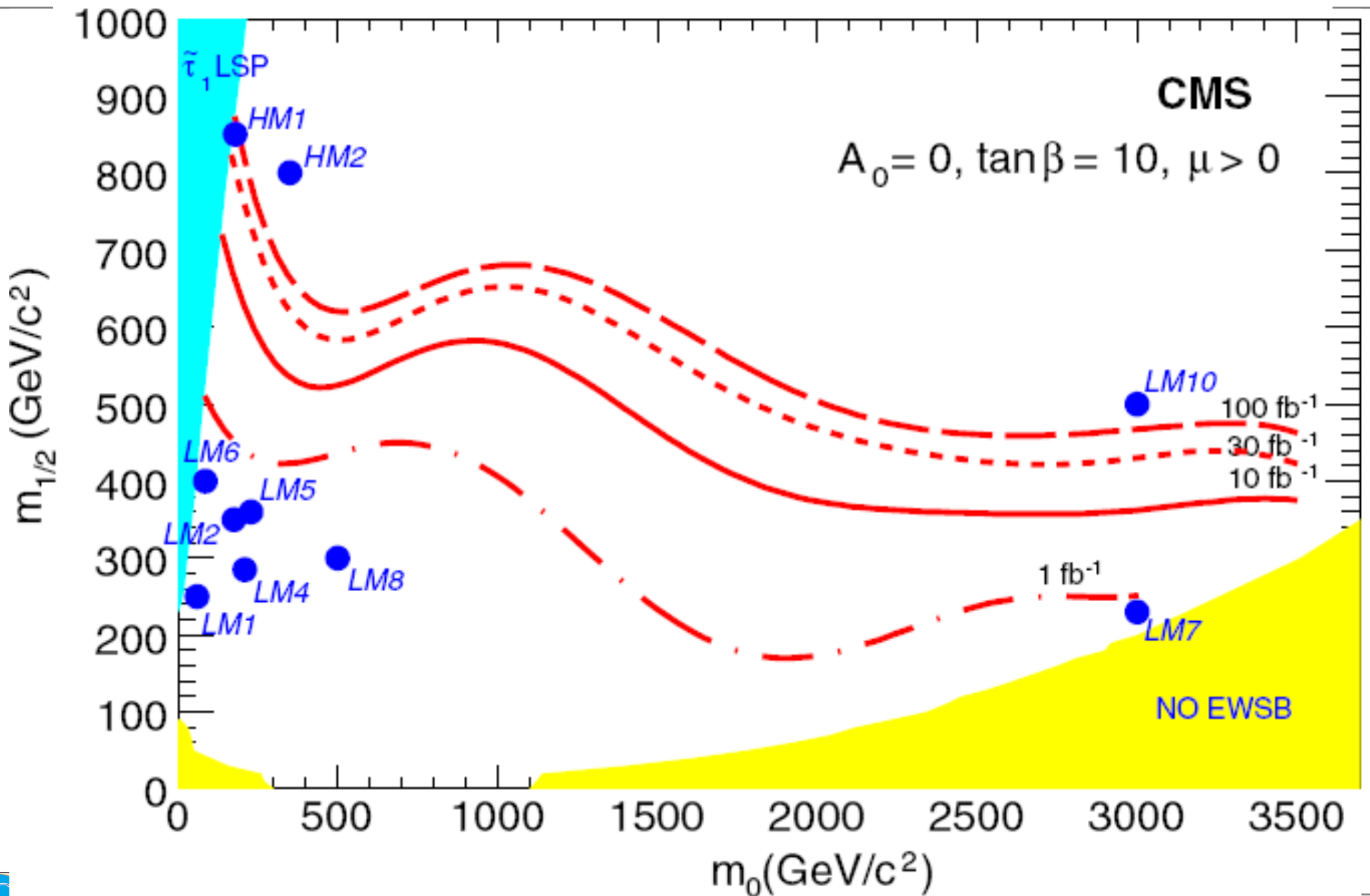
SUSY tesztpontok és a korlátozások



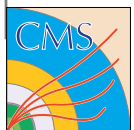
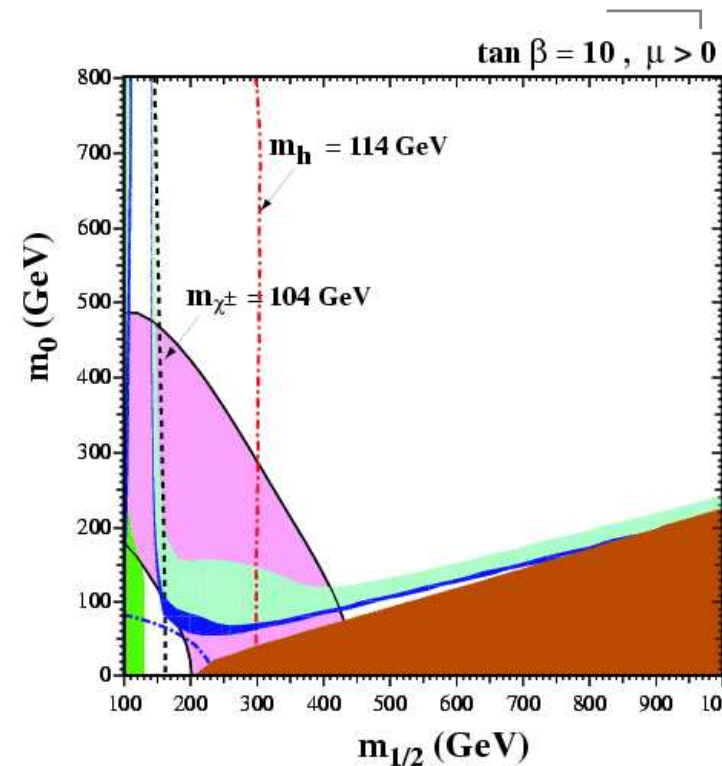
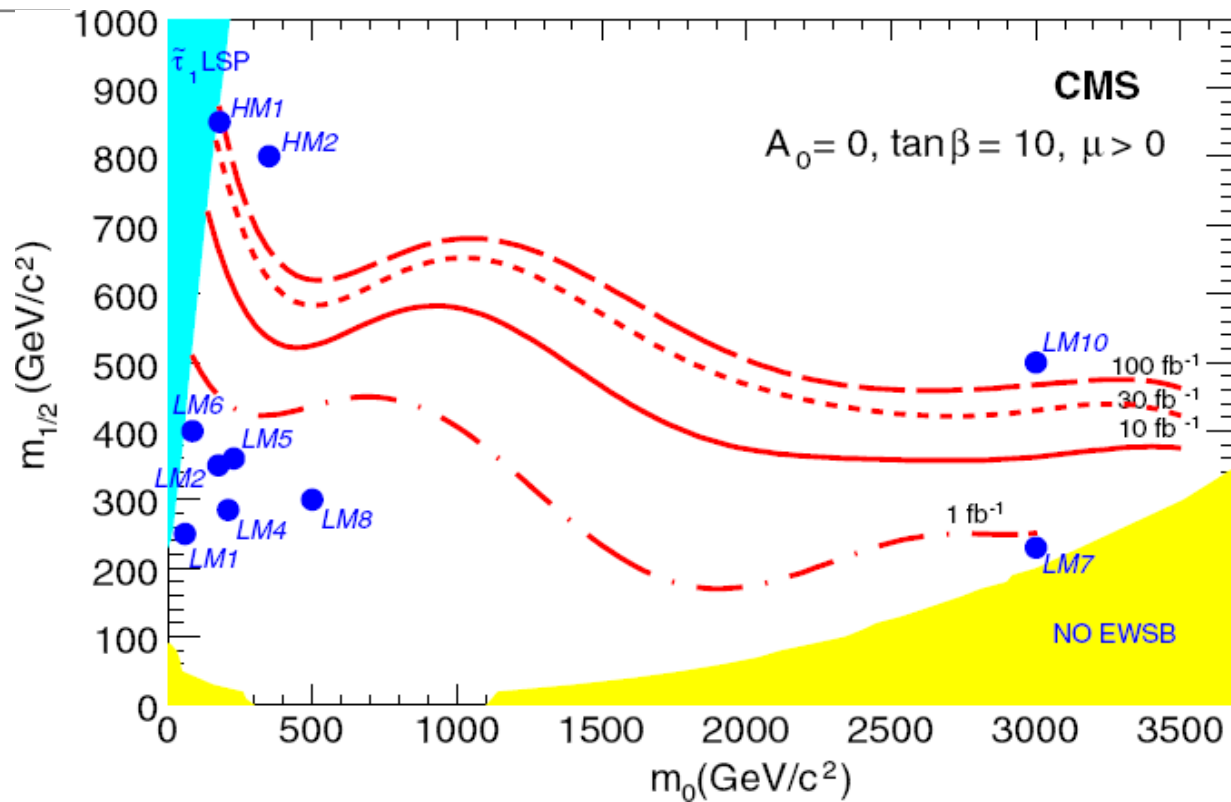
Kék csík:
WMAP-megengedte régió



SUSY elérési pontok $\mu^\pm \mu^\pm$ eseményekkel



SUSY elérési pontok $\mu^\pm \mu^\pm$ eseményekkel



Köszönetnyilvánítás

- Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal
- OTKA NK67974, K72172 és H07C-74153
- EU FP6 MC-ToK 509252 és III 031688
- Megértő együttműködő partnereink

