

# Vázlat

- A 2HDM-modell töltött Higgs-bozonjai
- Az OPAL-detektor
- $e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow qqqq$
- Elővágások
- Likelihood-optimalizálás
- Tömegfüggő analízis
- $e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$
- $e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow \tau\nu\tau\nu$
- Kombináció, kizárás



# 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)

$g^2 \sim 0.425$  SU(2) csatolási állandó

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

Tömeget a SM nem jósol, csak limitál:

$30 \text{ GeV} < m_H < 500 \text{ GeV}$  (unitaritás)

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

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



# A SM érzékenysége Higgs-tömegre (2007)

LEP:

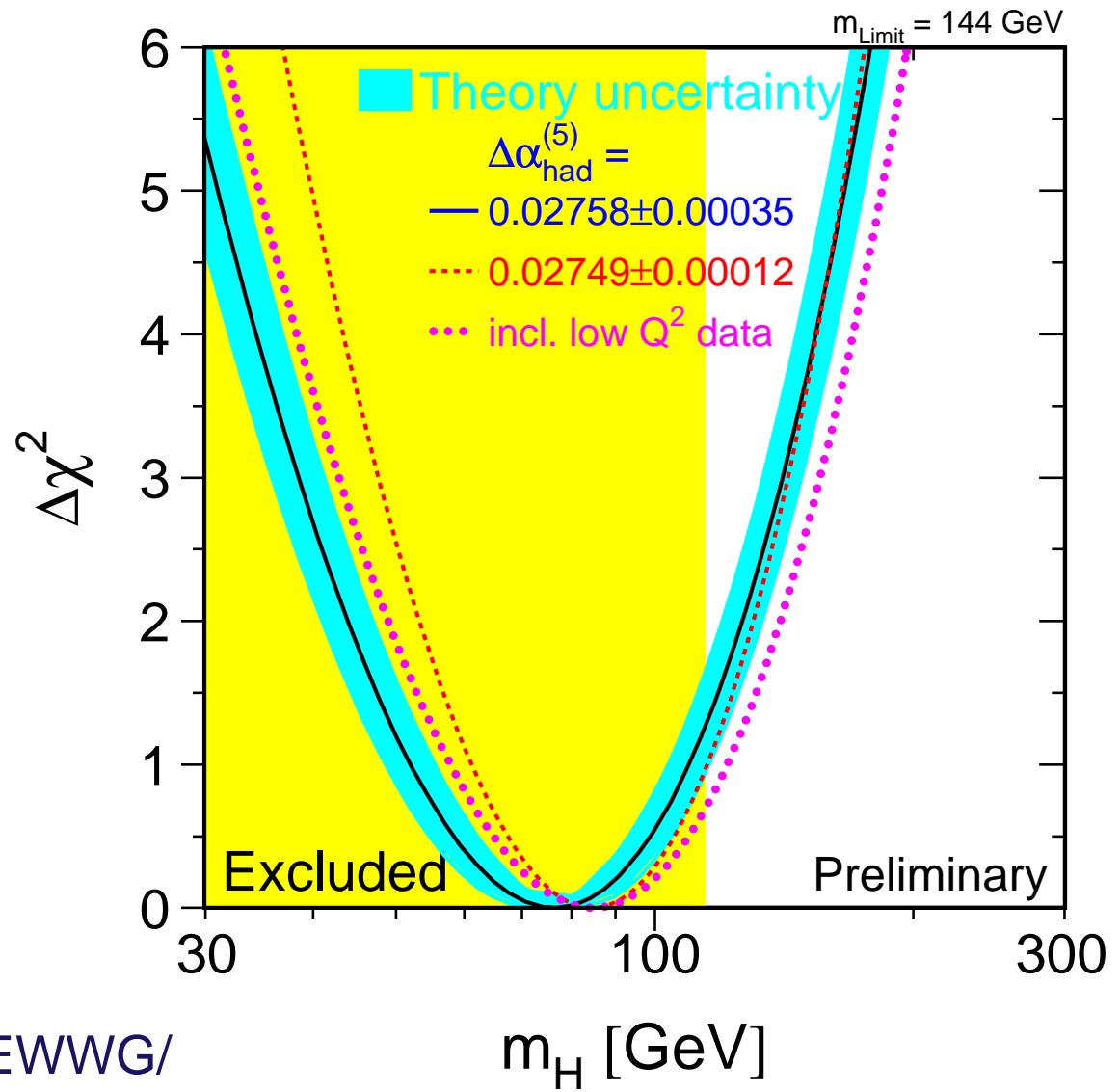
$$M_H > 114.4 \text{ GeV}$$

SM fitt (mind):

$$\overline{M_H} = 76^{+33}_{-24} \text{ GeV}$$

NuTeV-mérés eltér  
többtől

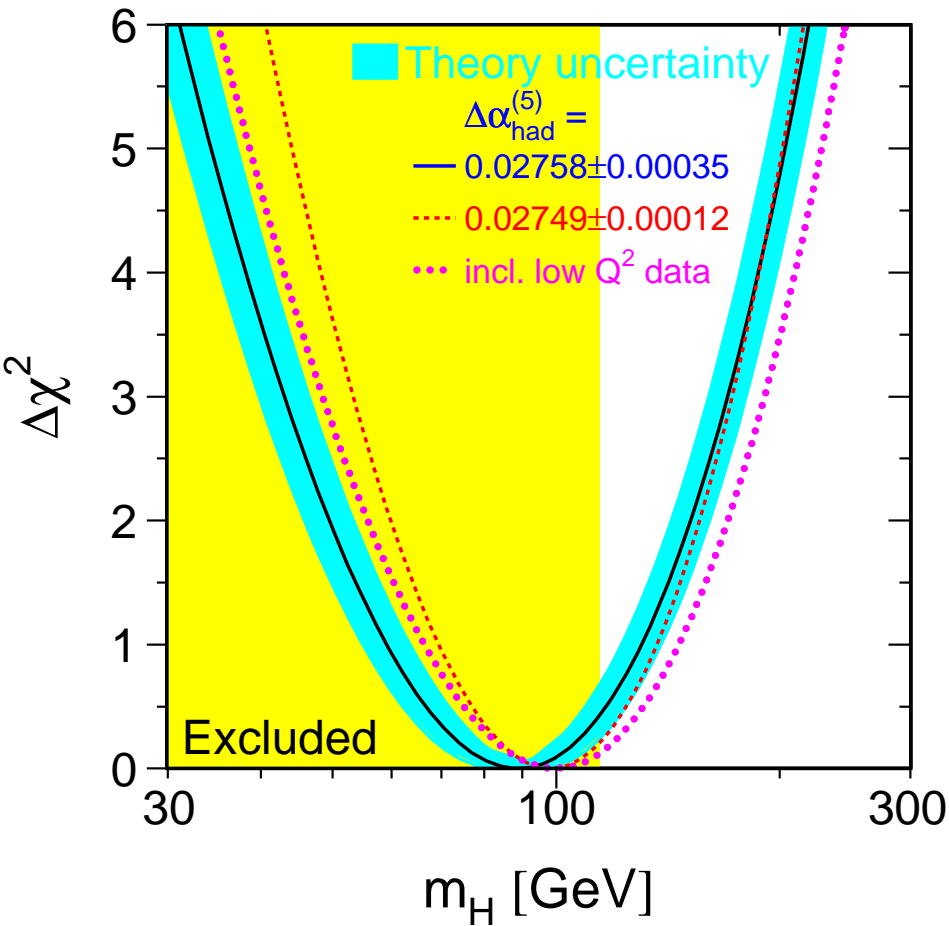
$$114.4 < M_H < 182 \text{ GeV} \\ (95\% \text{ CL})$$



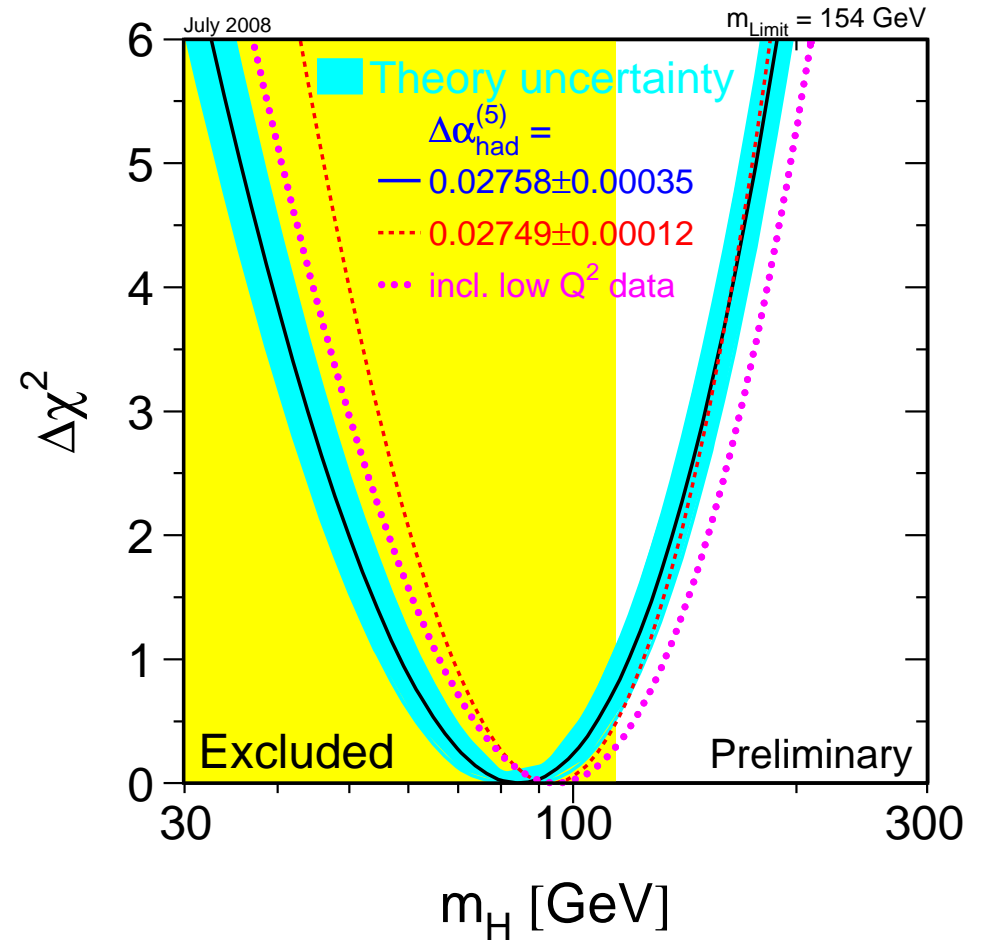
<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>



# SM-fitt $\Leftrightarrow$ Higgs-tömeg: 2006 $\Rightarrow$ 2008



2006



2008



# Két Higgs–dublett $\rightarrow$ 5 Higgs–bozon

2 Higgs–dublett  $\rightarrow$  8 szabadsági fok  
3 tömeg  $W^\pm, Z$  + 5 Higgs–bozon  $h^0, H^0, H^\pm, A^0$

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

$\phi_1$  a felső,  $\phi_2$  az alsó fermionokhoz csatol

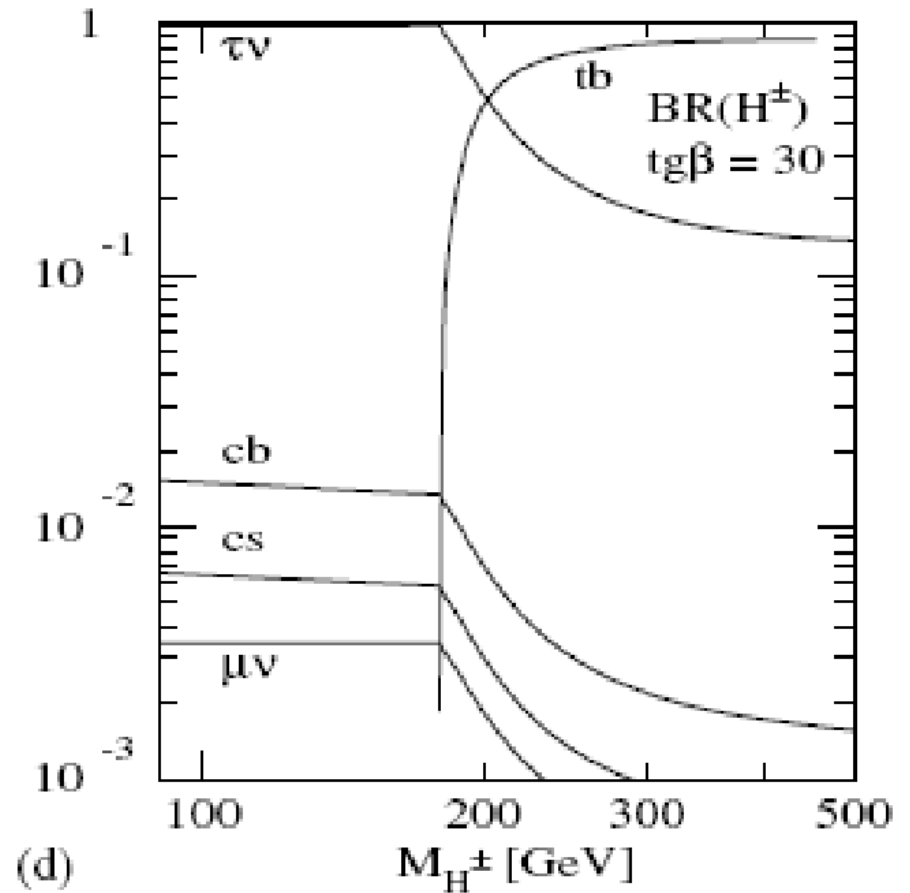
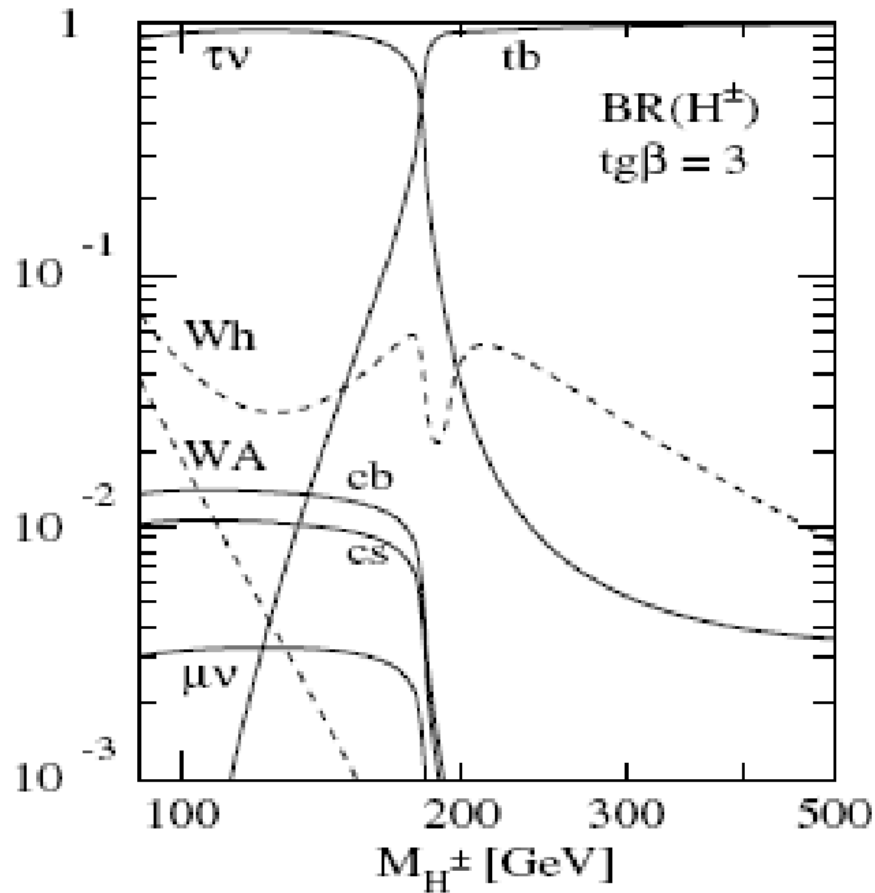
$$v_1^2 + v_2^2 = 2 \frac{m_W^2}{g^2}$$

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

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



# Töltött Higgs-bozon az LHC-nál



$M(H^\pm) < 200$  GeV:  $H^\pm \rightarrow \tau\nu$  dominál

$BR(H^\pm \rightarrow bc)$  függ  $\text{tg}\beta$ -tól



# Töltött Higgs-bozon a LEP-nél

LEP: keltés párban (ha egyáltalán):  $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$

Bomlás nehéz fermionra:  $H^+ \rightarrow \{q\bar{q}' (\sim c\bar{s})$

Három csatorna  $\Rightarrow$  három analízis:

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

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

Összesítés: (Pásztor Gabriella)





# Higgs-bozonok keresése

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



# A Higgs-bozonok 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.
- És ha kevesebb, mint a várt háttér?
- És ha több, mint a várt háttér + jel?



# Felfedezés vagy kizárás?

**Likelihood:** Mennyire jelszerű, amit látunk

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

**Konfidencia:** Milyen határok közé esik

$$CL_{j+h} = P(L \leq L_{\text{exp}} | j+h)$$

Ha van jel:  $L_{\text{exp}} - L > 5\sigma \Rightarrow$   
felfedeztük.

$$CL_h = P(L \leq L_{\text{exp}} | h)$$

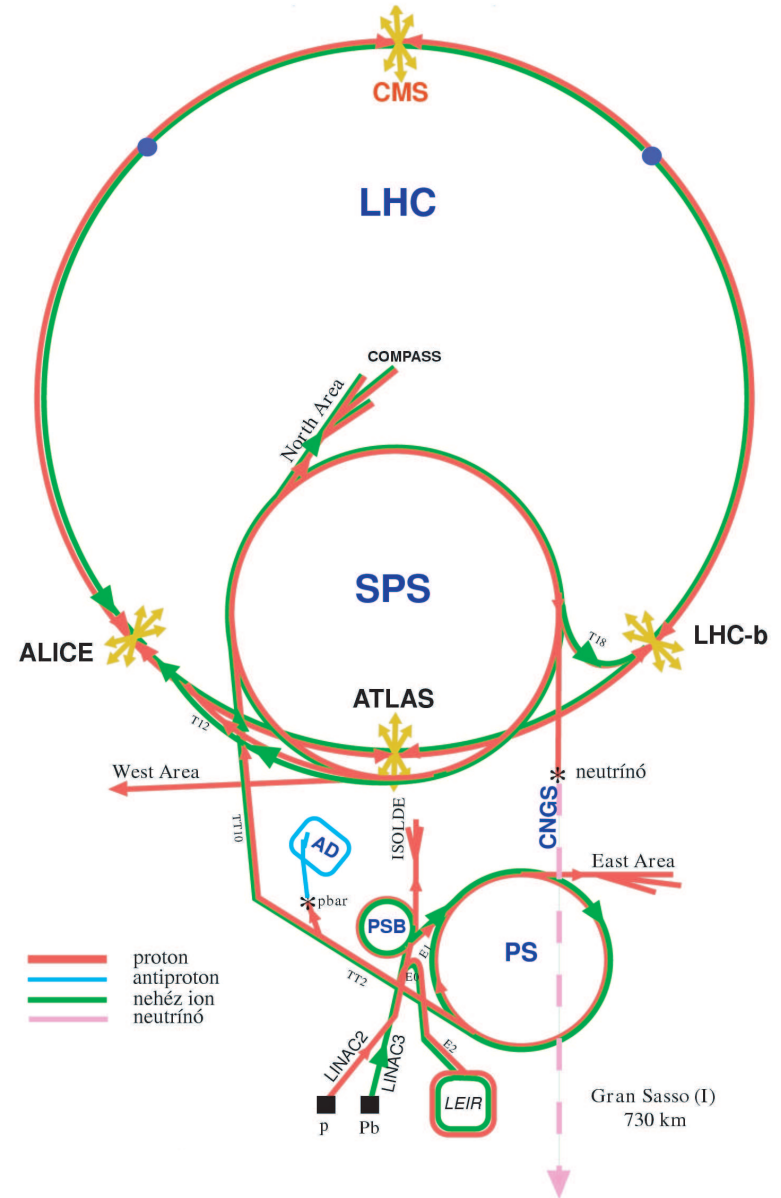
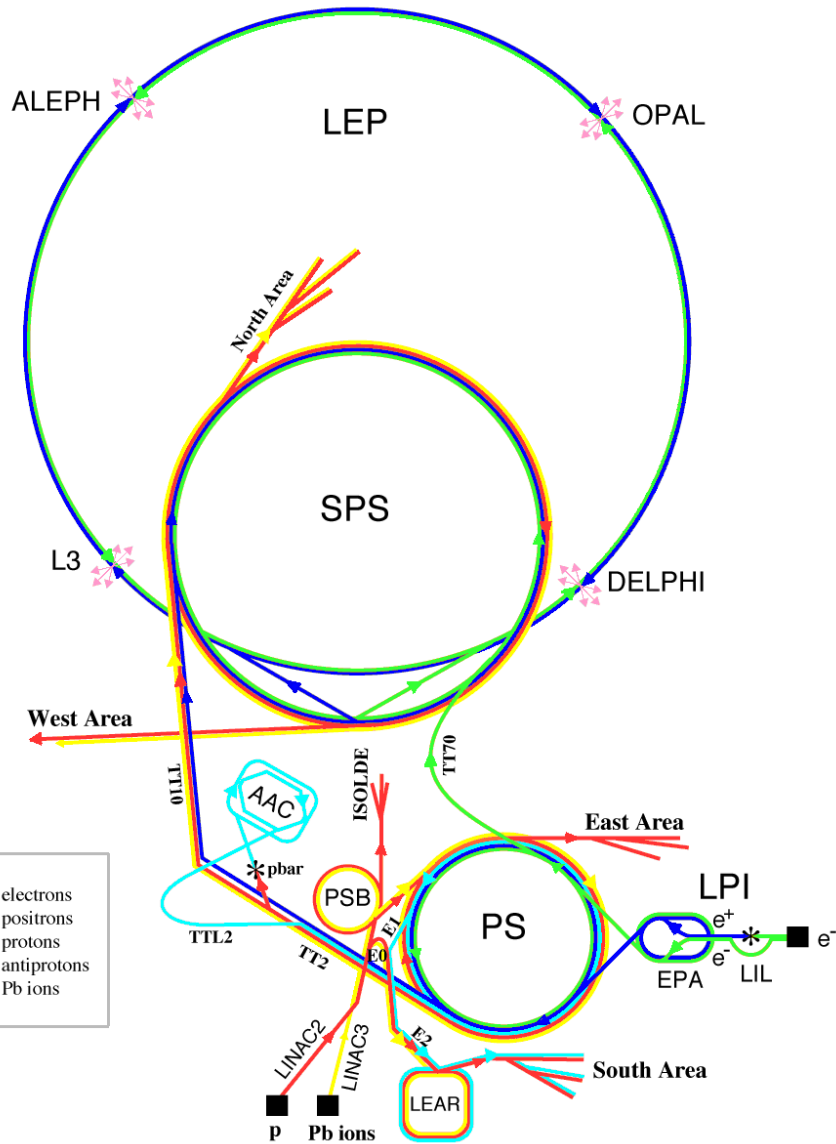
Ha nincs jel:  $CL_h > 95\% \Rightarrow$   
kizártuk.

$$CL_{\text{jel}} = CL_{j+h} / CL_h$$

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



# A CERN gyorsítói: múlt és jelen



# A LEP gyorsító

LEP = Large Electron Positron ütköztető

Év	$E(e^+e^-)$ , GeV	$\int Ldt/4$ , pb <sup>-1</sup>	fő cél
1989–94	~ 91	140	Z <sup>0</sup>
1995	130–136	5	
1996	161–172	20	W <sup>+</sup> W <sup>-</sup>
1997	184	60	WW, ZZ
1998	189	190	WW, ZZ
1999	192–202	220	Higgs
2000	204–209	220	Higgs

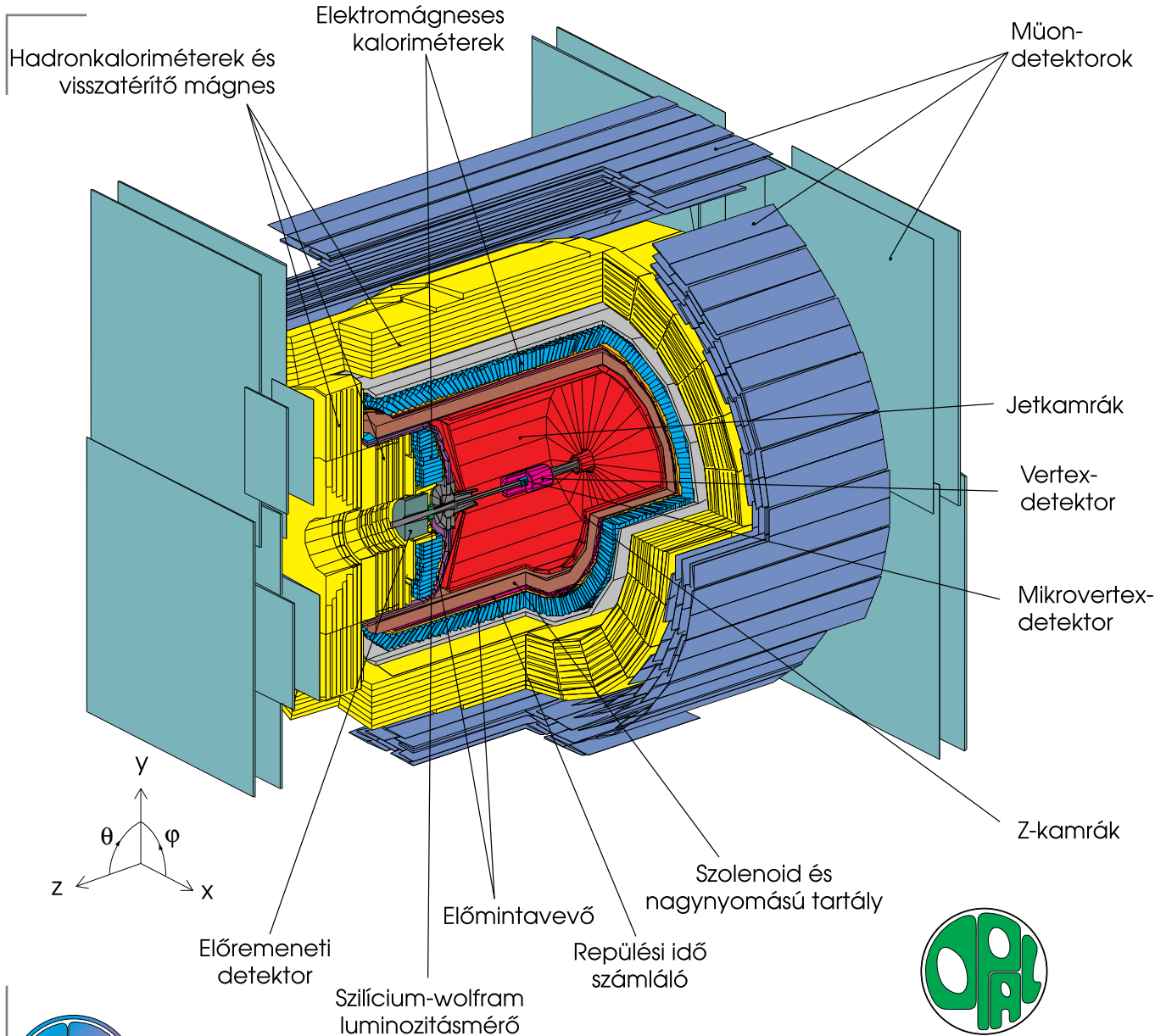
$\int Ldt$ : integrális luminozitás

Detektorok: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL

Magyar csoportok LEP-nél: L3, OPAL (Budapest, Debrecen)



# A néhai OPAL kaloriméter



LEP-  
események:

$$e^+e^- \rightarrow Z^* \rightarrow \dots$$

pontszerű  
leptonok  
ütközése

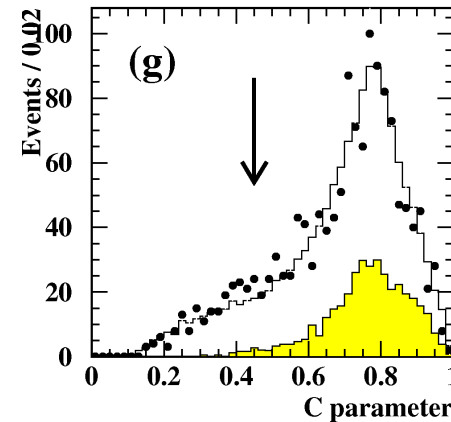
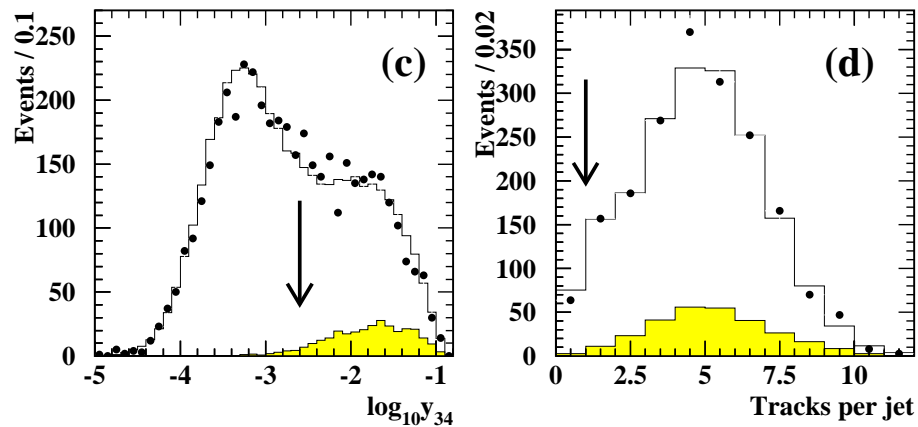
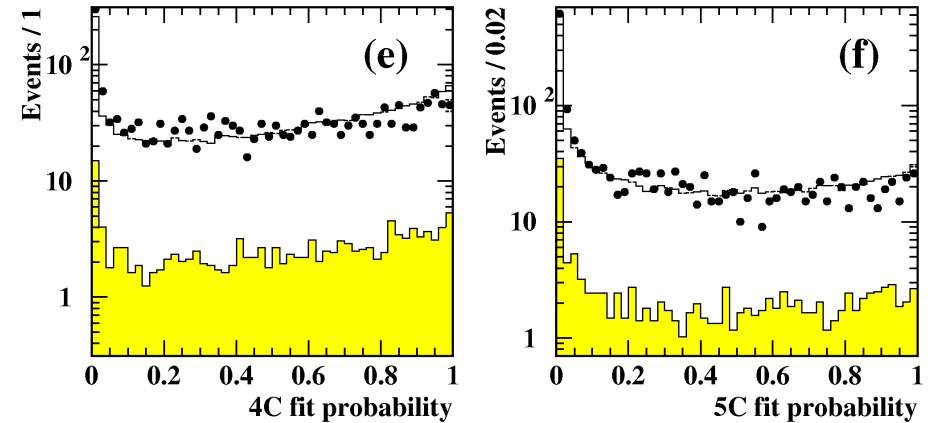
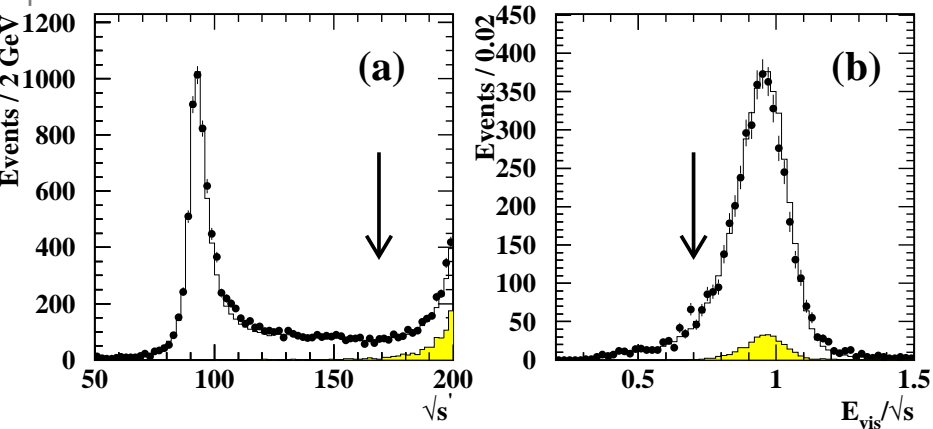
tiszta folyamatok

A tradicionális  
LEP-detektor

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

2002/06/23 16.42  
OPAL preliminary:  $H^+H^- \rightarrow qqqq$ , 206 GeV preselection

2002/06/23 16.43  
OPAL preliminary:  $H^+H^- \rightarrow qqqq$ , 206 GeV preselection



Szimuláció  $\approx$  adat    Sárga jel marad, háttér megy

$s'$ :  $E_{CM}$  izolált foton nélkül     $E_{vis}/\sqrt{s}$ :  $E_{CM}$  látható része     $y_{34}$ :  $3 \rightarrow 4$  jet

Domináns háttér:  $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow qqqq$



# Likelihood-változók

$\alpha_{\min}$ : min. jet-jet szög

$E_{\min} - E_{\max}$ : min, max.  
jet-energia

$\Theta_{\text{thrust}}$ : döflet-tengely polárszöge

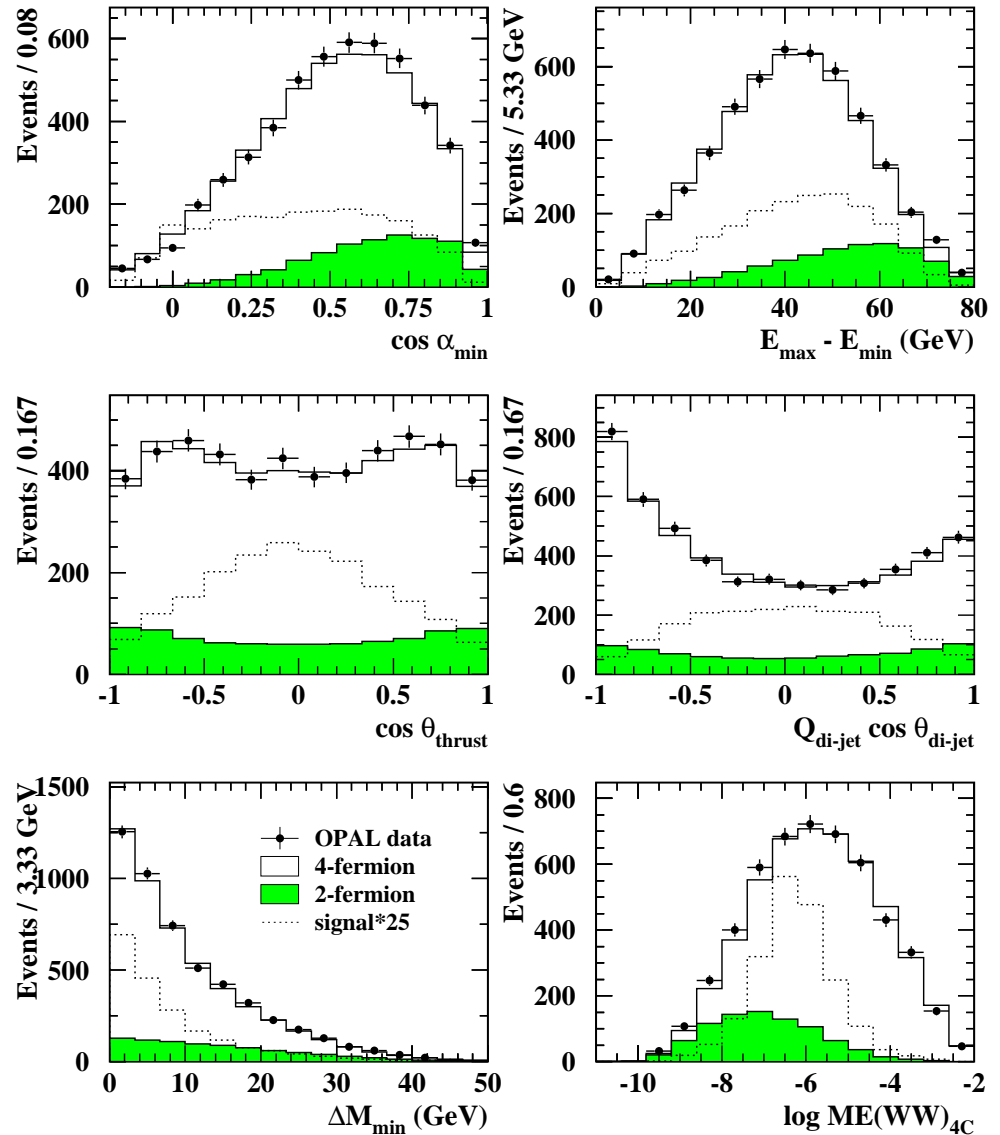
$Q_{\text{di-jet}}, \Theta_{\text{di-jet}}$ : két-jet töltés és  
szög

$\Delta M_{\min}$ : minim. jet-jet  
tömegkülönbség

4C-fittel kapott WW-mátrixelem  
(Excalibur) valószínűsége

Jel:  $M(H^\pm) = 75 \text{ GeV}$   
( $\sim$  határeset)

OPAL preliminary:  $H^+H^- \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$ , 189 - 209 GeV



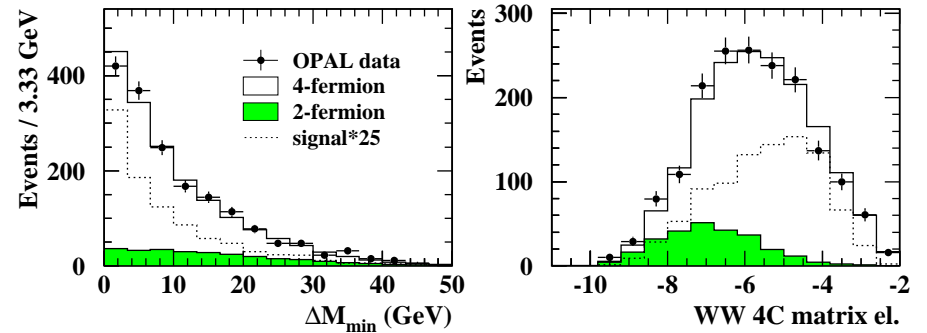
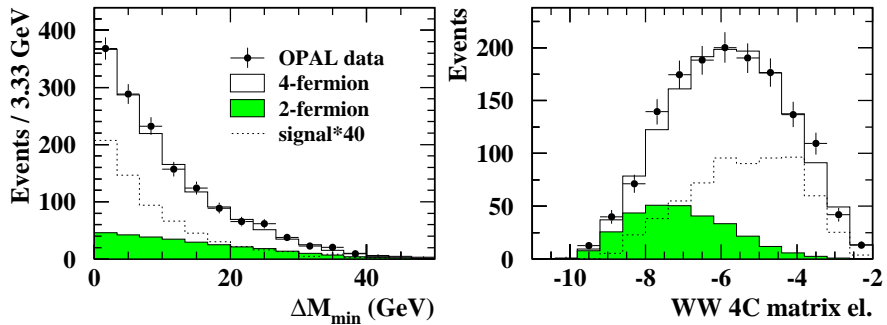
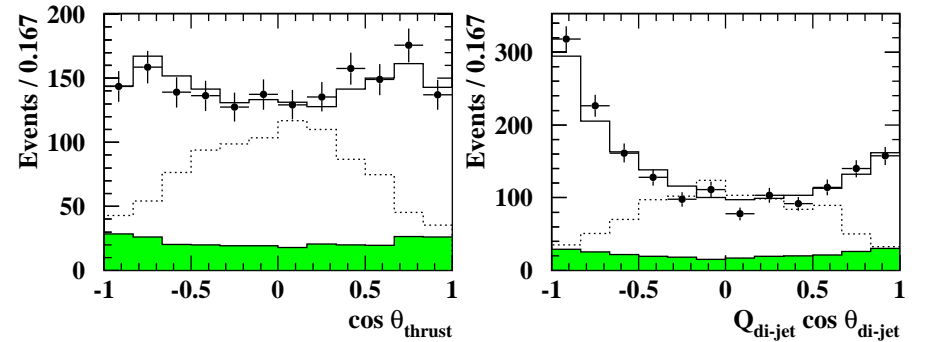
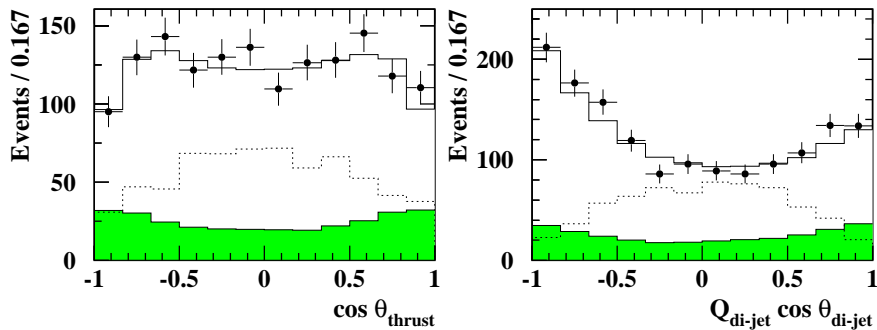
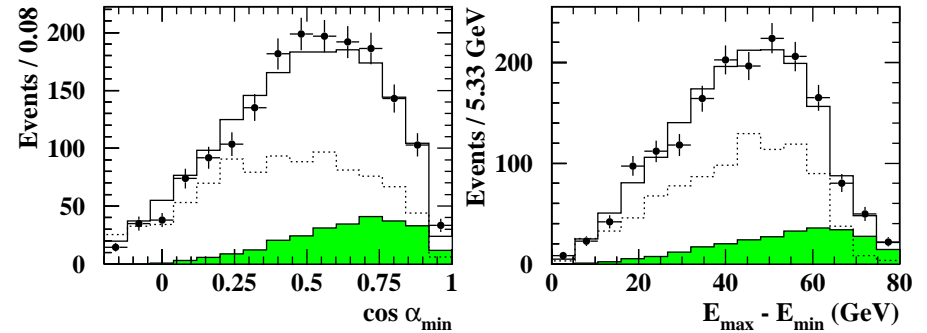
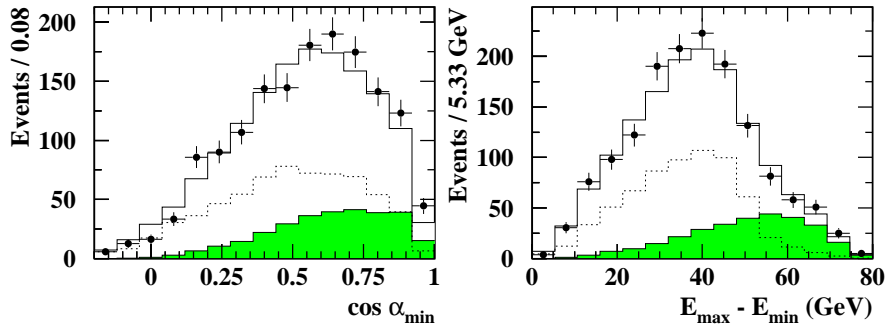


# Likelihood-változók: energiafüggés

2002/06/20 17.02

OPAL preliminary:  $H^+H^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ , 189 GeV

OPAL preliminary:  $H^+H^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ , 206 GeV, ref hist



# Tömegfüggő analízis

LH-módszer eredménye függ a szimulált Higgs-tömegtől

Feltételezünk egy Higgs-tömeget, beállítjuk a jel-referenciát, azzal megyünk végig a MC-n és adaton

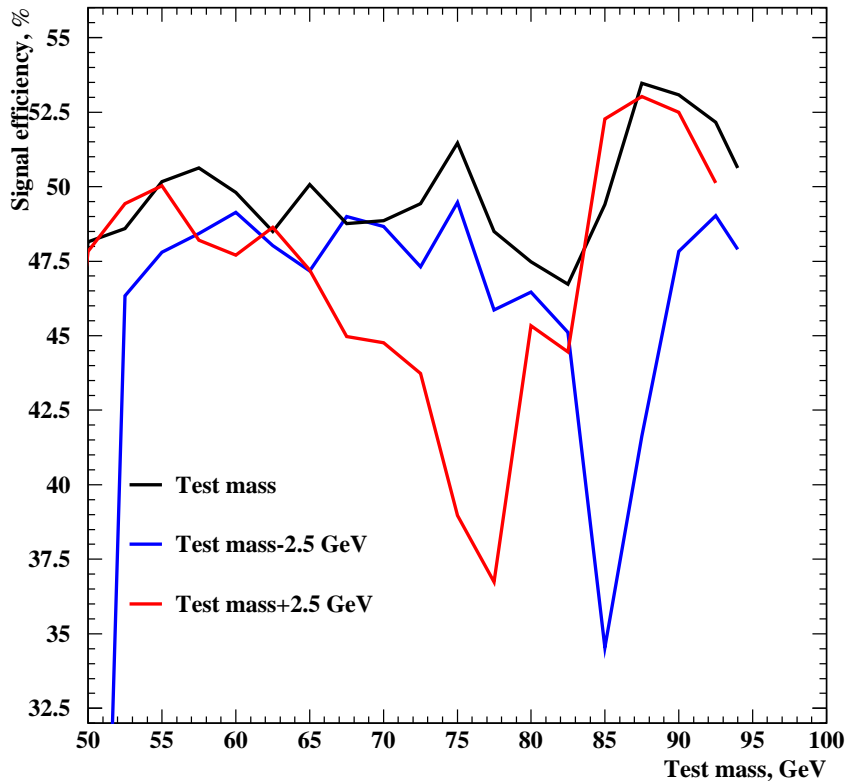
Eredmény: tömegfüggő jel- és háttérszimuláció és adatválogatás

Közbenső tömegekre interpoláció

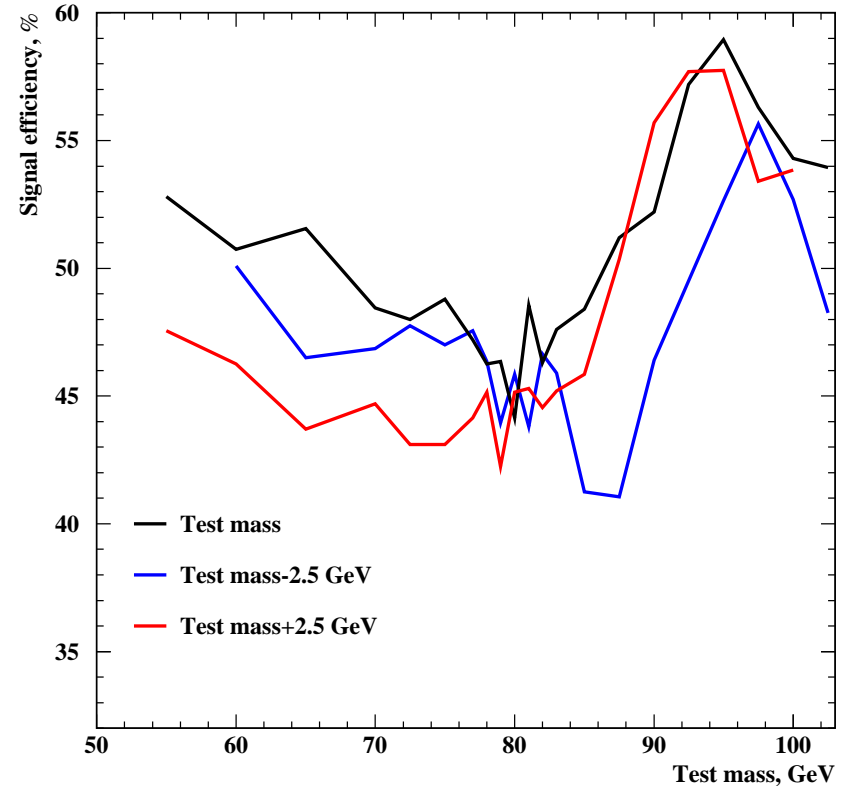


# Interpoláció jelre

2002/05/23 09.22  
OPAL Preliminary:  $H^+H^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ , 189 GeV,  $LH > 0.45$



2000/07/05 19.57  
OPAL Preliminary:  $H^+H^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ , 206 GeV,  $LH > 0.45$



$$E_{CM} = 189 \text{ GeV}$$

$$E_{CM} = 206 \text{ GeV}$$

Jel-események kiválogatási hatásfoka a Higgs-tömeg függvényében, az adott tömeget és  $\pm 2,5$  GeV-et feltételezve



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

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

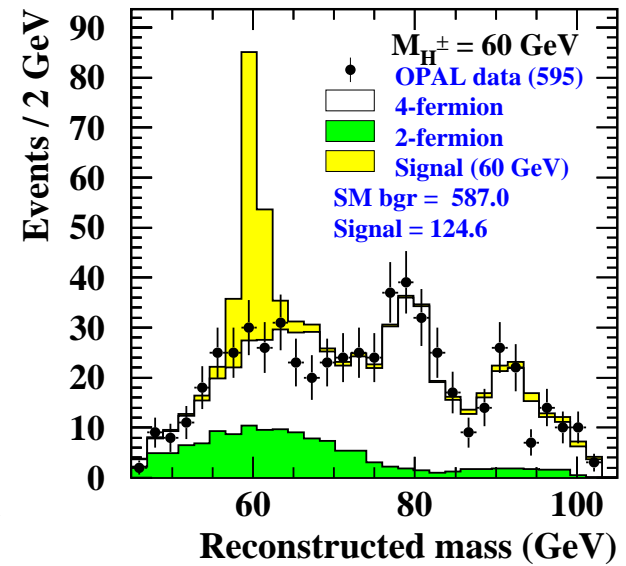
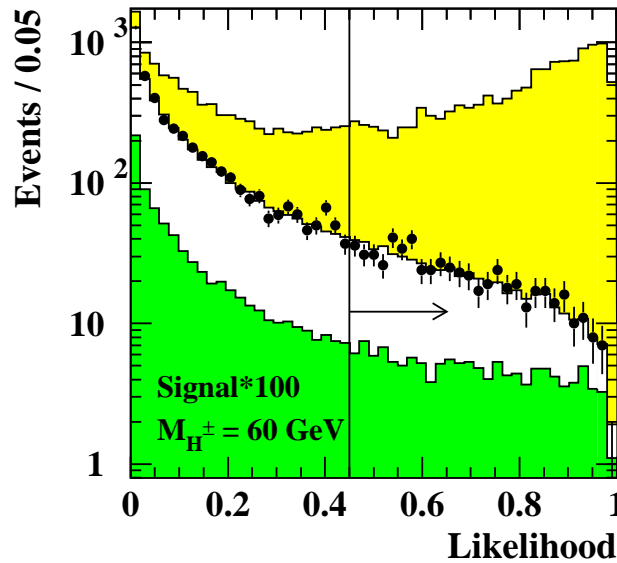
Jel/háttér  $M(H^\pm) = 65 \text{ GeV}$ -re  $37.8/(217 \pm 12)$ ,  
 $75 \text{ GeV}$ -re  $23.5/(382 \pm 21)$ .



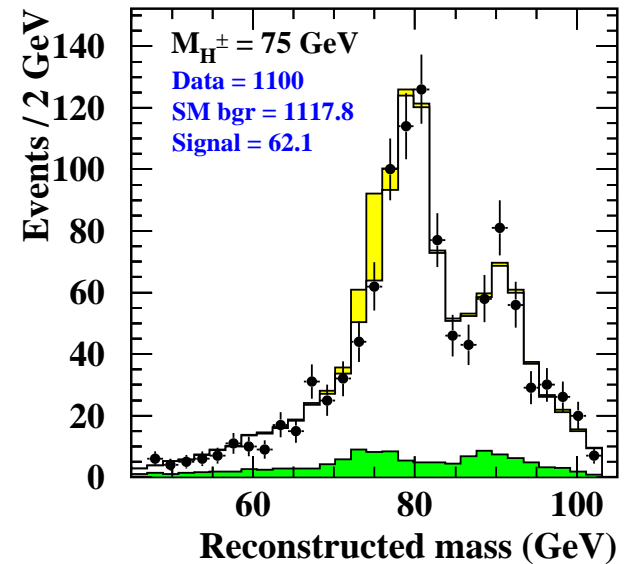
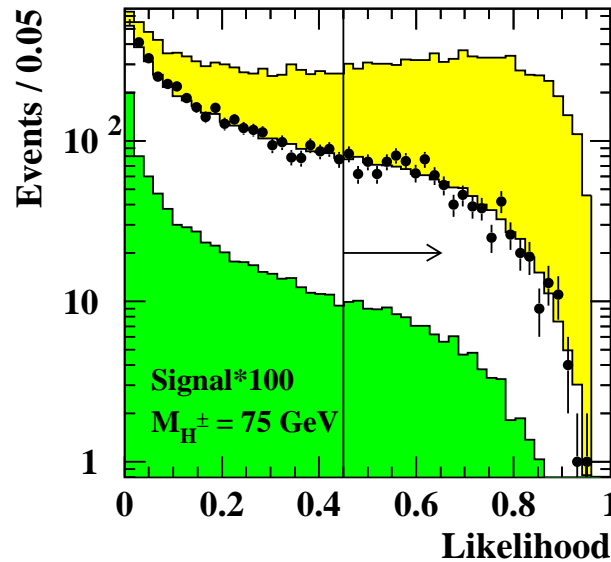
# $H^+H^- \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$ : LH és tömeg, 189-209 GeV

OPAL Preliminary:  $H^+H^- \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$ , 189 - 209 GeV

$M(H^\pm) = 60 \text{ GeV}$

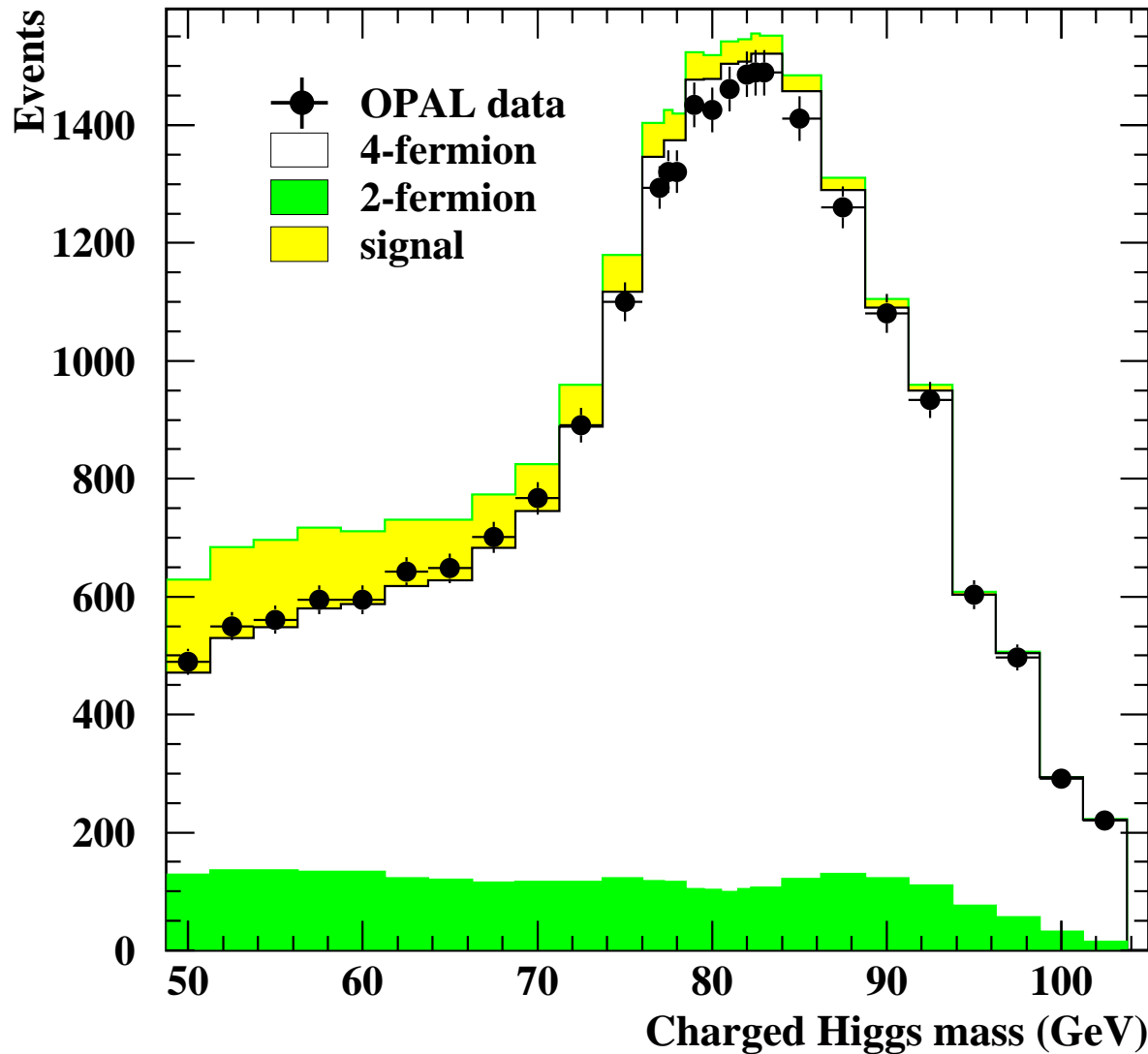


$M(H^\pm) = 75 \text{ GeV}$



# $H^+H^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ : tömegfüggés, 189–209 GeV

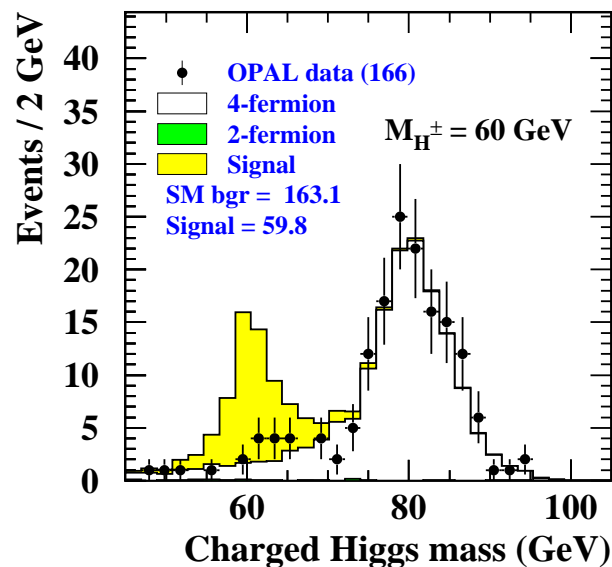
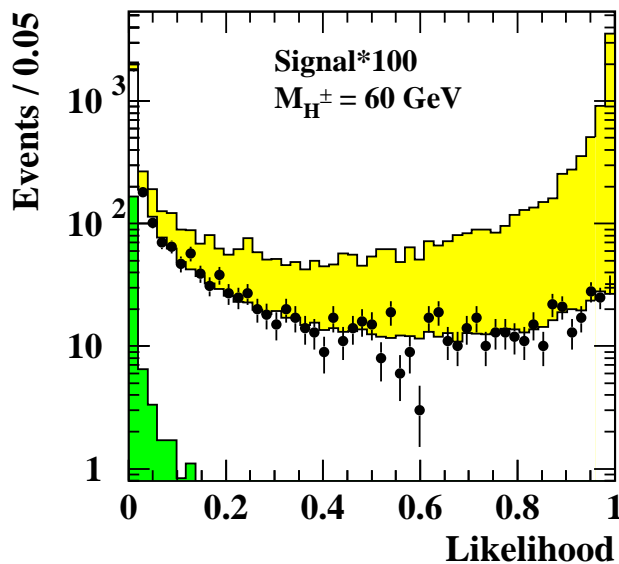
OPAL Preliminary:  $H^+H^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ , 189–209 GeV



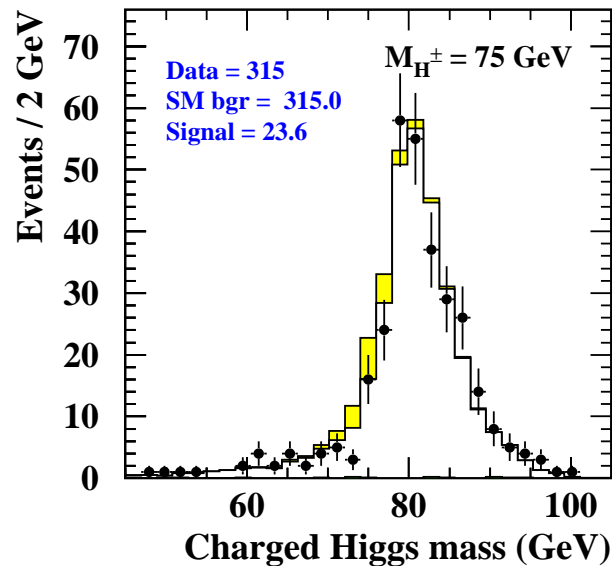
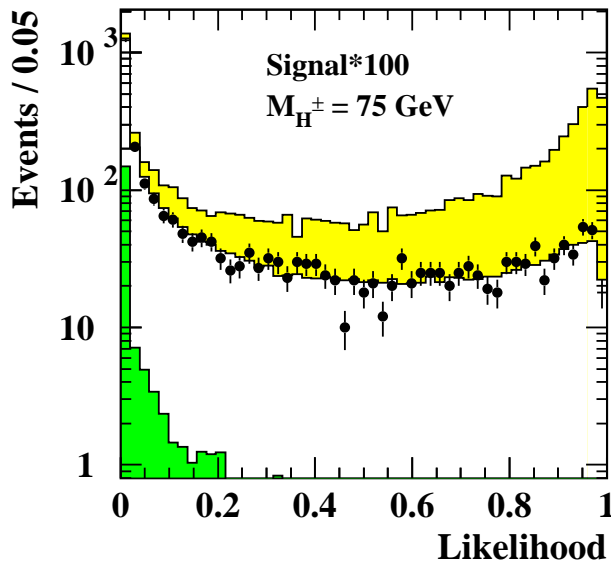
# $H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$ : LH és tömeg, 189-209 GeV

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

$M(H^\pm) = 60 \text{ GeV}$

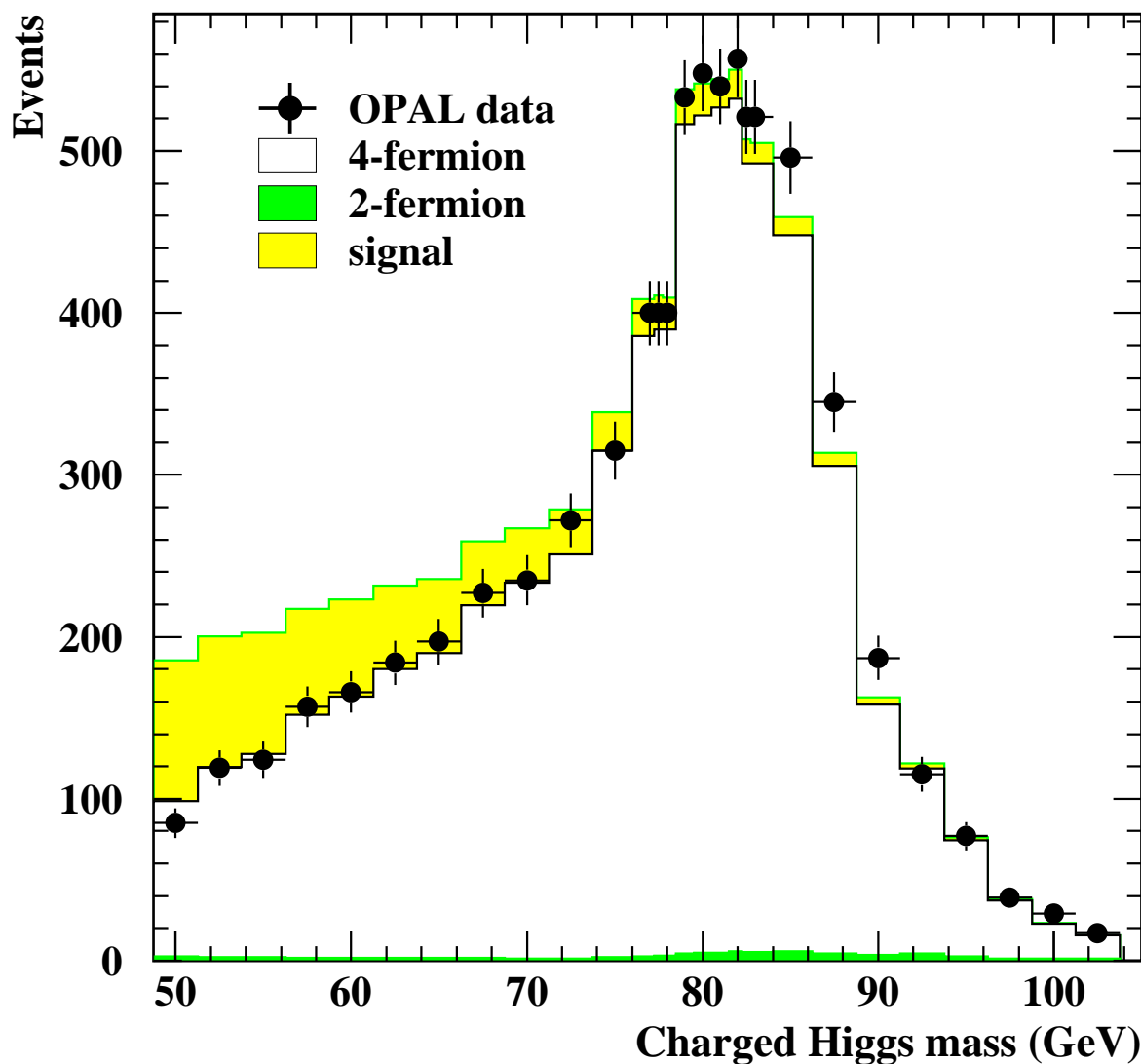


$M(H^\pm) = 75 \text{ GeV}$



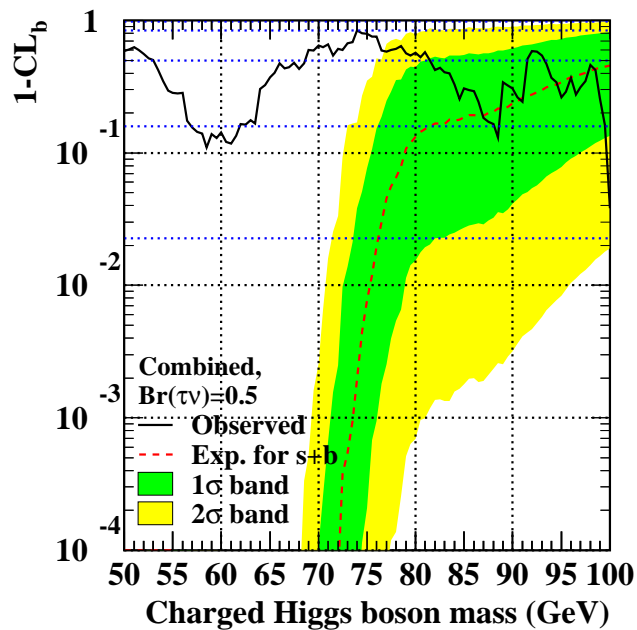
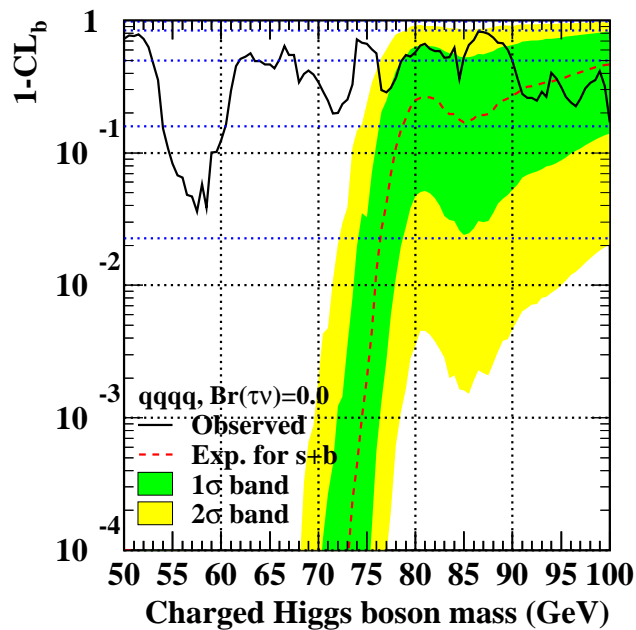
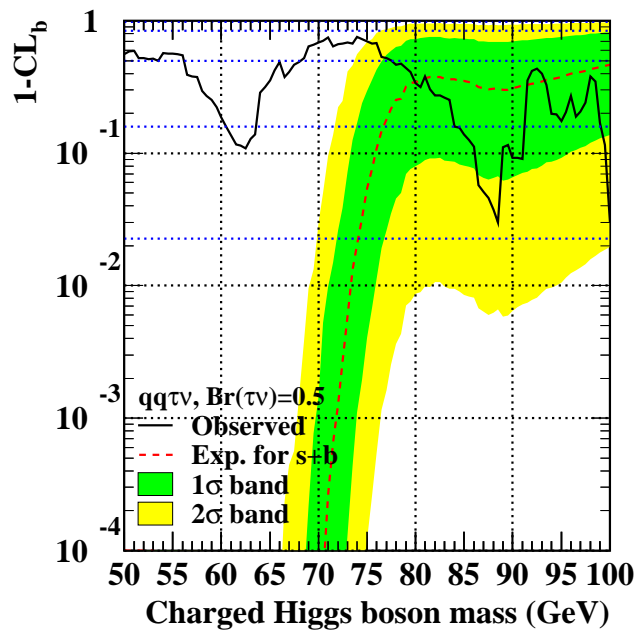
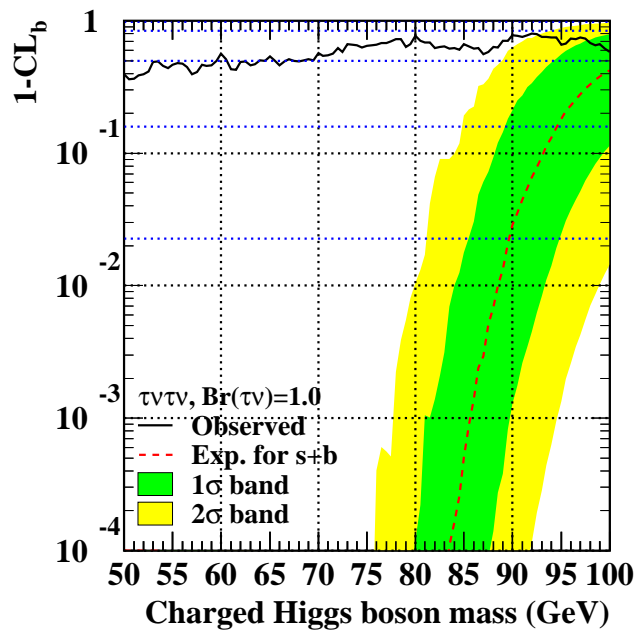
# $H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$ : tömegfüggés, 189–209 GeV

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

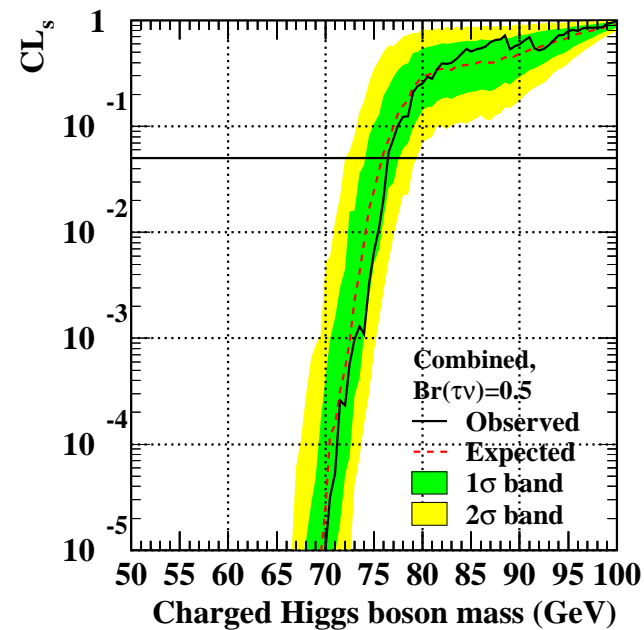
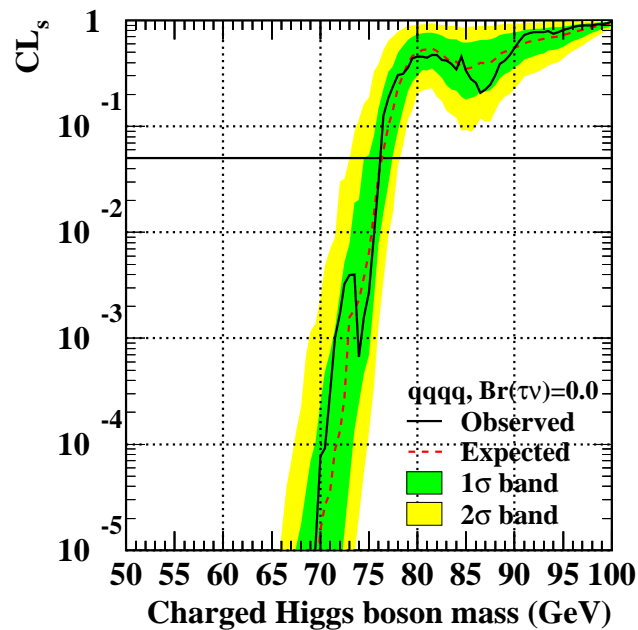
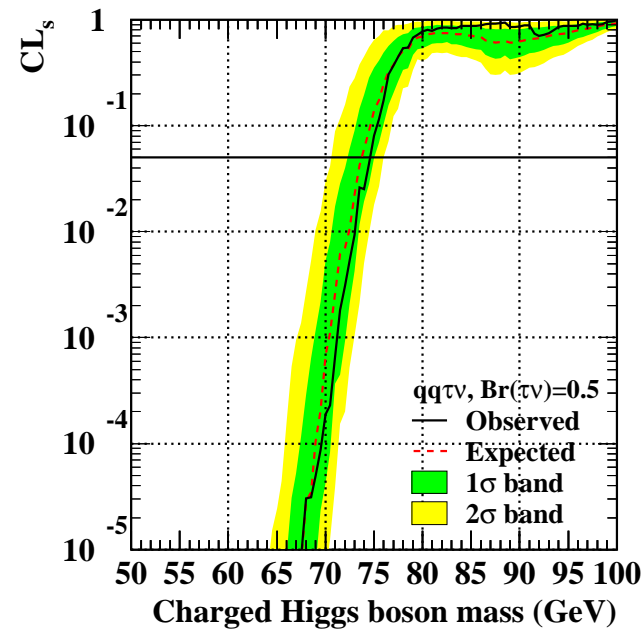
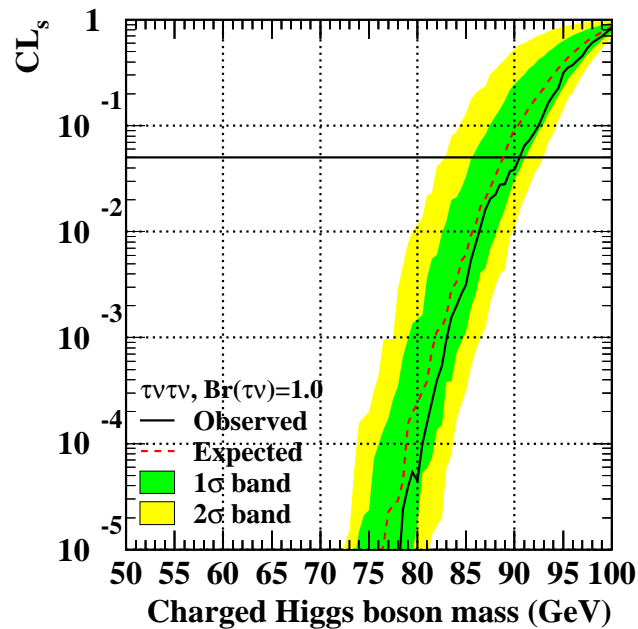




# $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$ : háttér-interpretáció (2002)



# $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$ : jel + háttér (2002)



# $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$ : kizárás (2002)

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

Várt limit a kombinált  
esetre:

$\sim 75,5$  GeV

