

Töltött Higgs-bozon keresése az OPAL kísérletben

*Budapest-Debrecen-CERN szeminárium,
2008. okt. 31.*

Horváth Dezső

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



Vázlat

- Higgs-bozonok
- Az OPAL-detektor
- $e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow qqqq$
- Előválgások
- Likelihood-optimalizálás
- Tömegfüggő analízis
- $e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$
- 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:

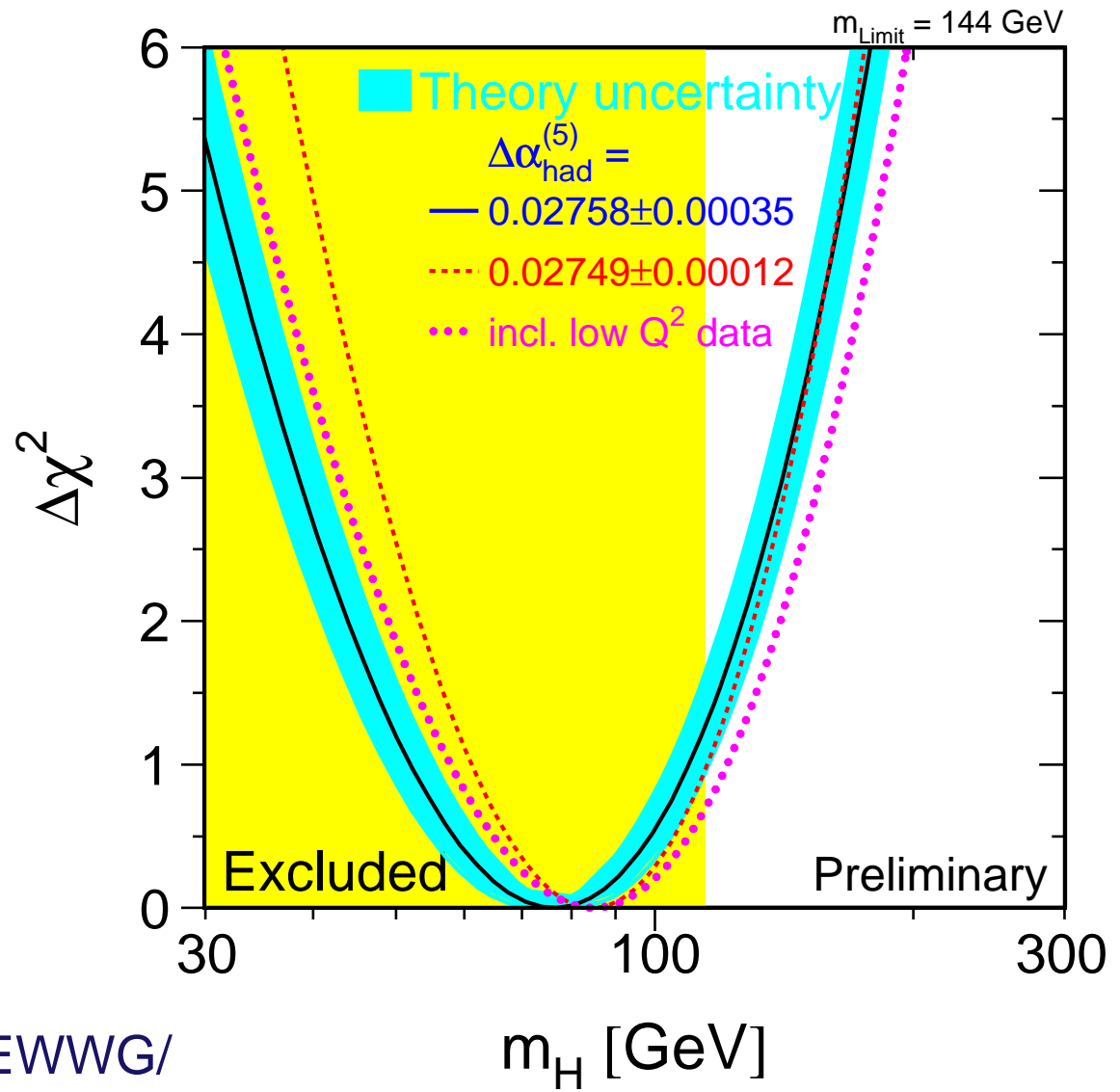
$$M_H > 114.4 \text{ GeV}$$

SM fitt (mind):

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

NuTeV-mérés eltér
többtől

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



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



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

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

ϕ_1 a felső, ϕ_2 az alsó fermionokhoz csatol

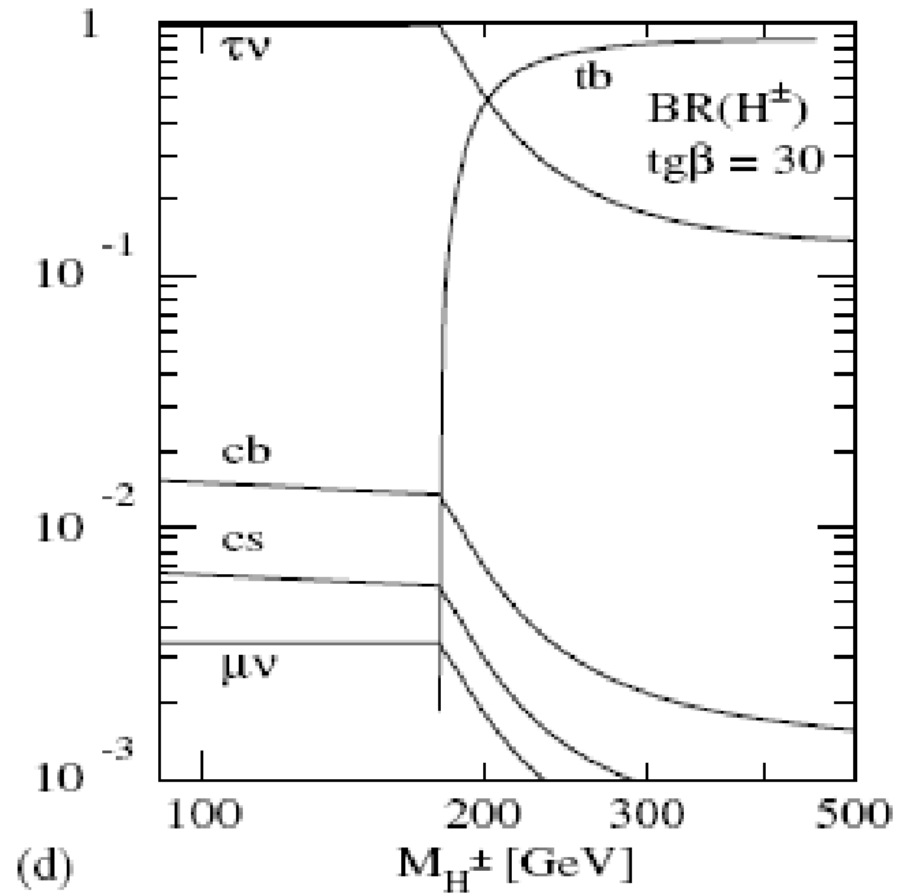
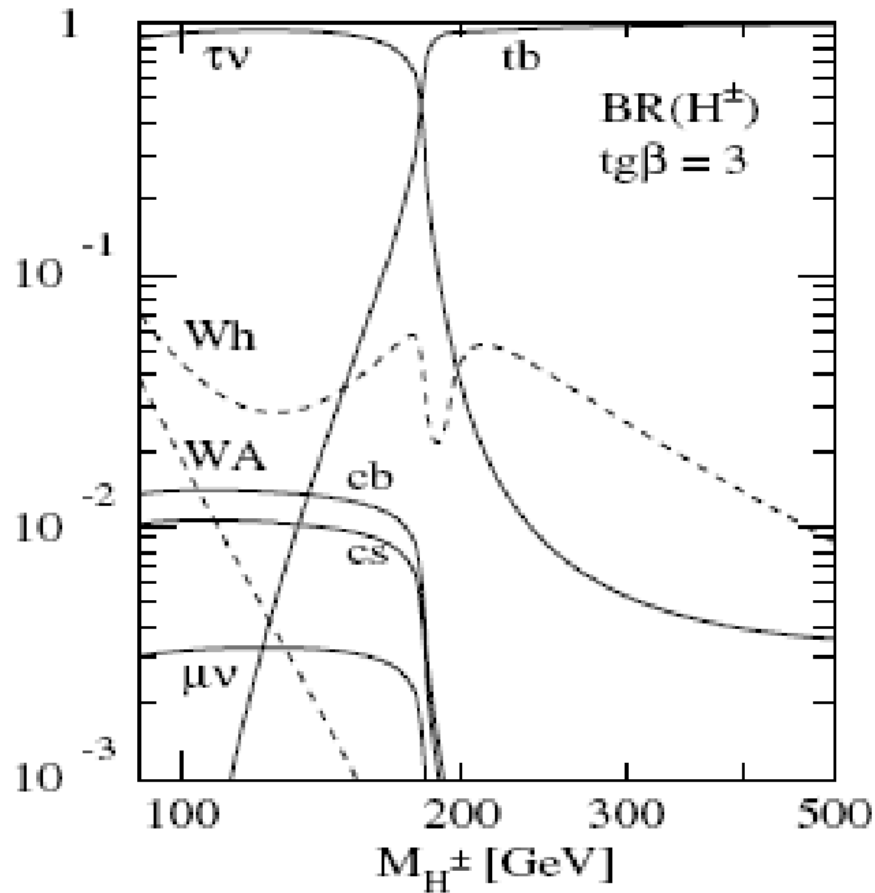
$$v_1^2 + v_2^2 = 2 \frac{m_W^2}{g^2}$$

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

$h^0 \sim$ 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 $tg\beta$ -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

$$CL_{j+h} = P(L \leq L_{\text{exp}} | j+h) \quad \text{Ha van jel: } L_{\text{exp}} - L > 5\sigma \Rightarrow \text{felfedeztük.}$$

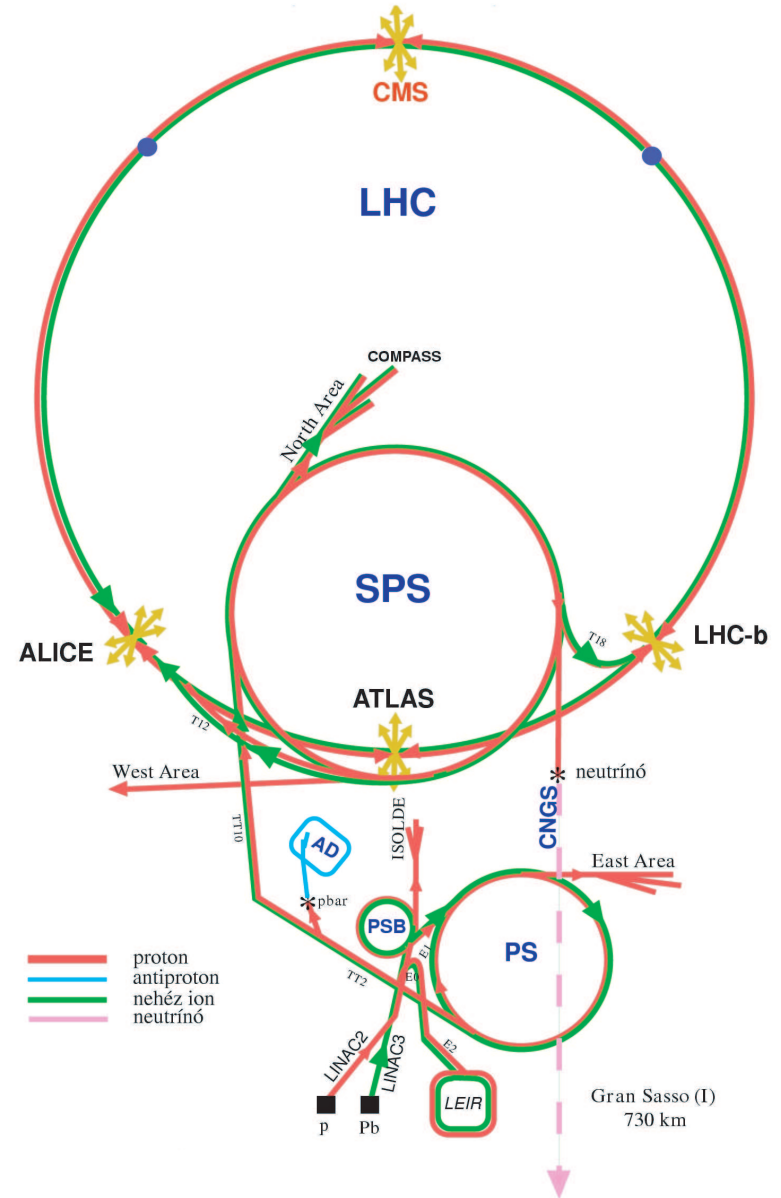
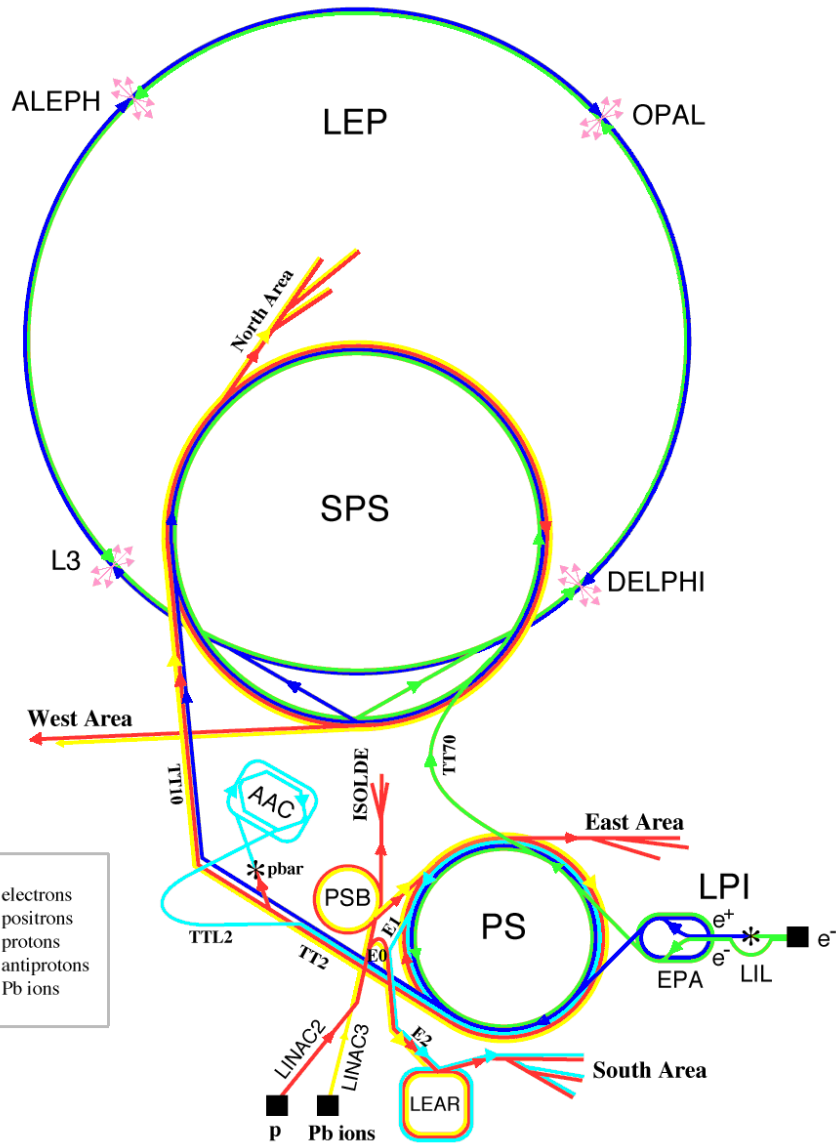
$$CL_h = P(L \leq L_{\text{exp}} | h) \quad \text{Ha nincs jel: } CL_h > 95\% \Rightarrow$$

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

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



A CERN gyorsítói: múlt és jelen



A LEP gyorsító

LEP = Large Electron Positron ütköztető

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

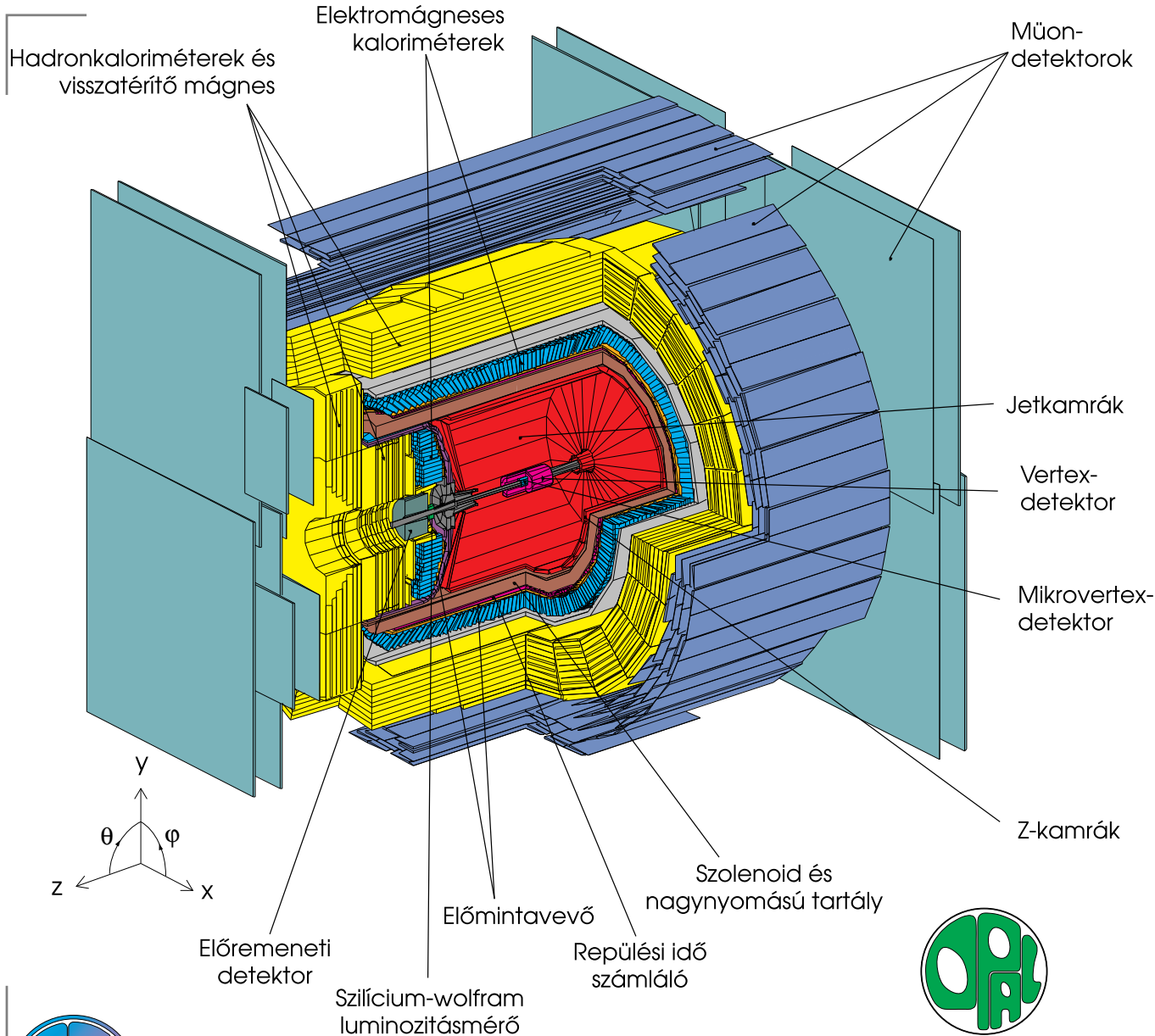
$\int Ldt$: integrális luminozitás

Detektorok: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL

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



A néhai OPAL kaloriméter



LEP-
események:



pontszerű
leptonok
ütközése

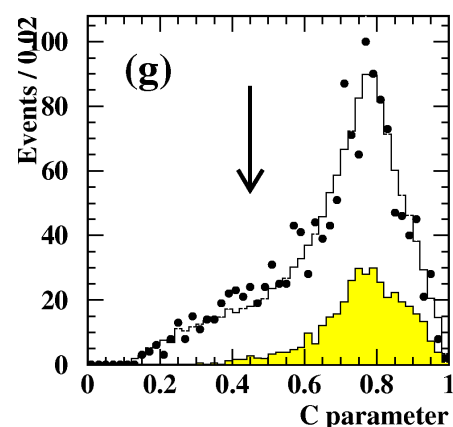
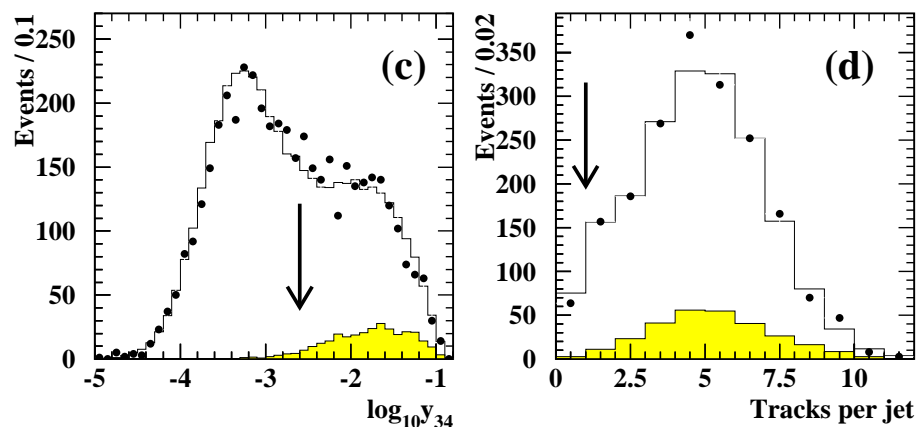
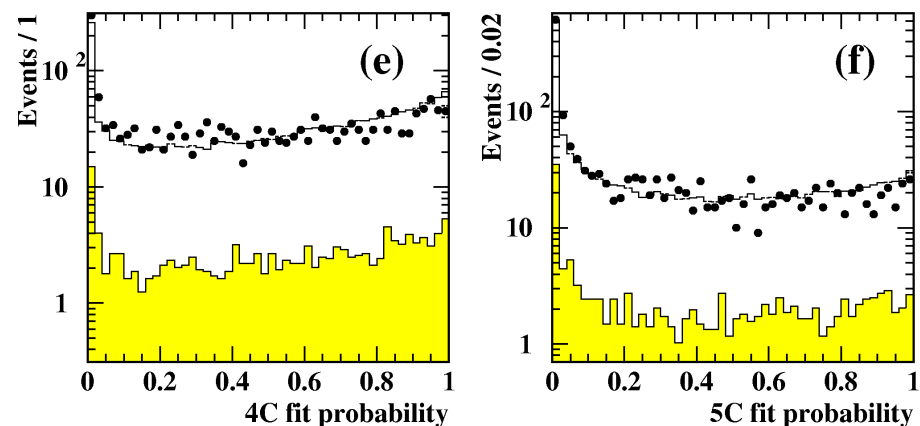
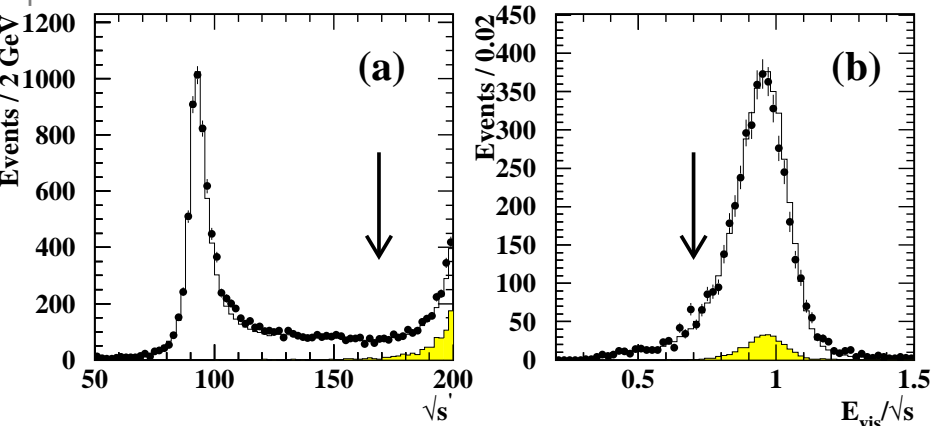
tiszta folyamatok

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

α_{\min} : min. jet-jet szög

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

Θ_{thrust} : döflet-tengely polárszöge

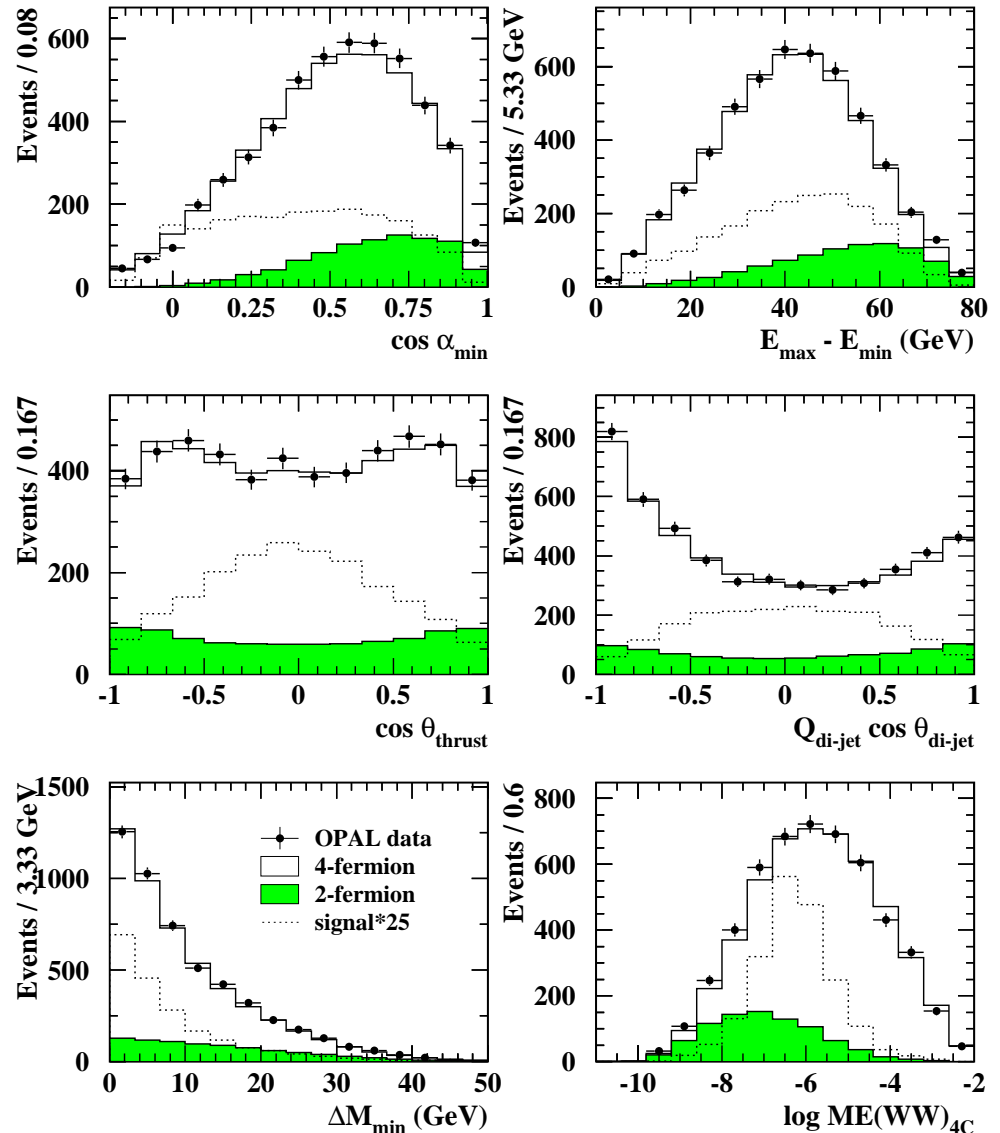
$Q_{\text{di-jet}}, \Theta_{\text{di-jet}}$: két-jet töltés és
szög

ΔM_{\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

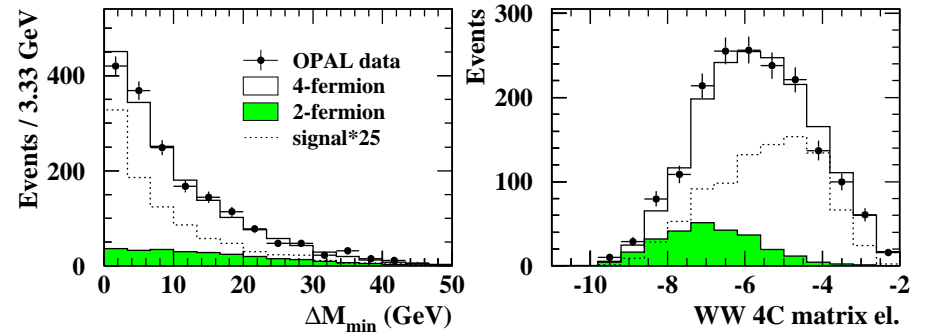
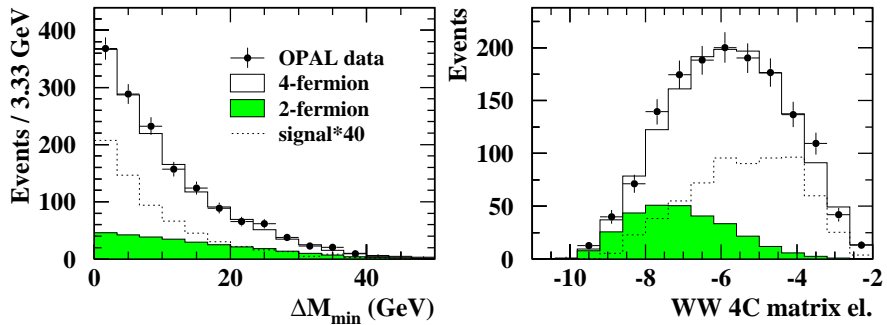
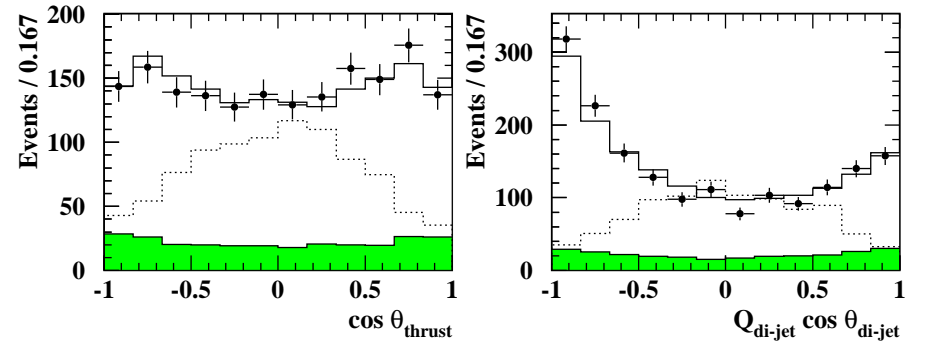
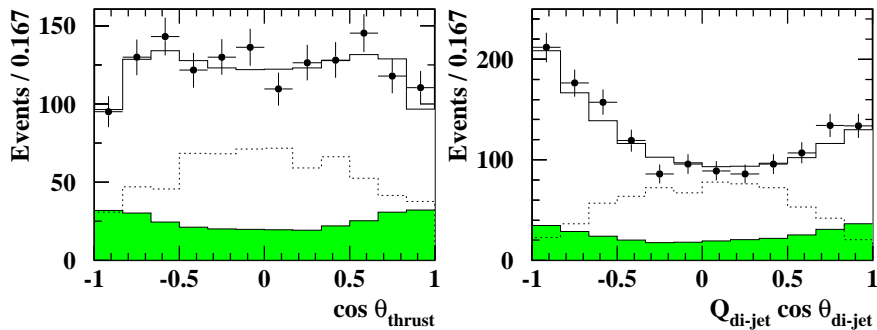
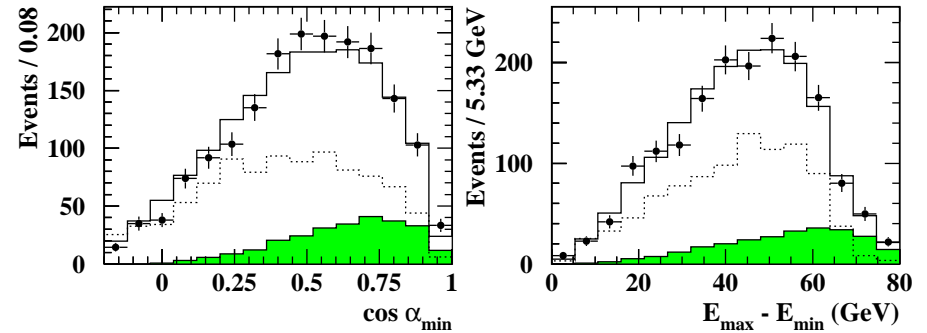
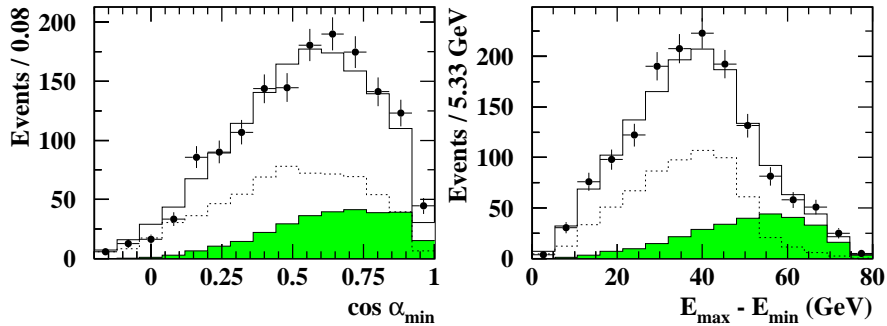


Likelihood-változók: energiafüggés

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

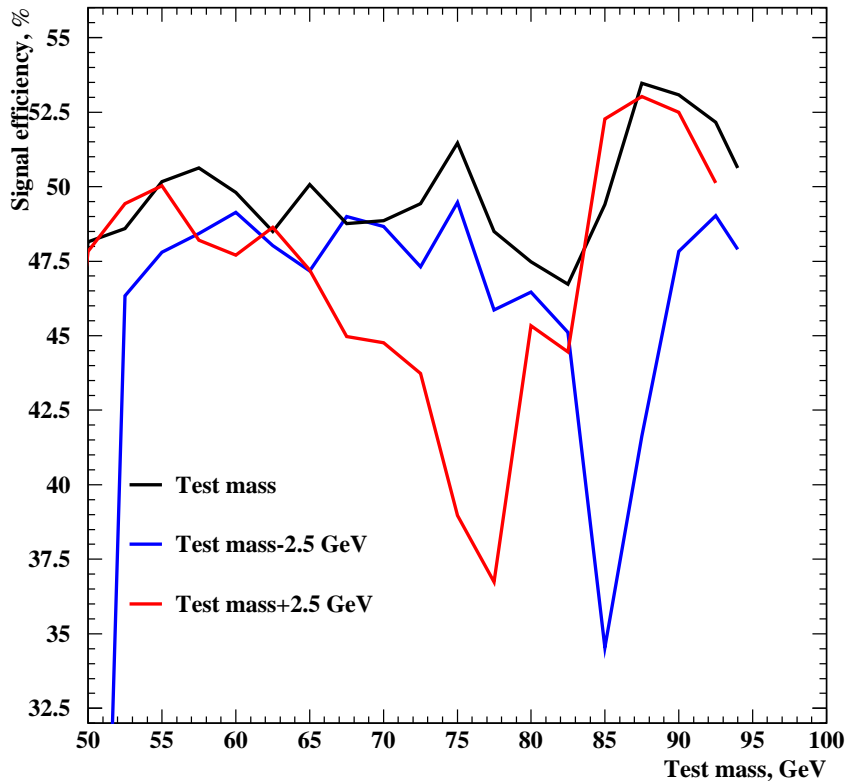
Eredmény: tömegfüggő jel- és háttérszimuláció és adatválogatás

Közbenső tömegekre interpoláció

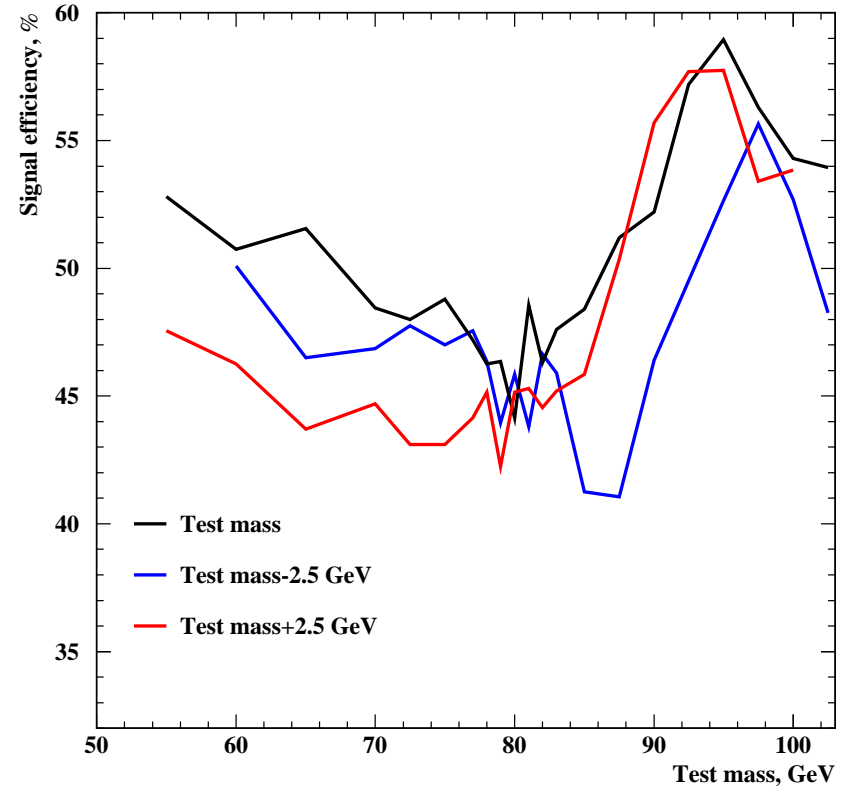


Interpoláció jelre

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 $\pm 2,5 \text{ GeV}$ -et feltételezve



$e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$: 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	$q\bar{q}(\gamma)$	$H^\pm \gamma$
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

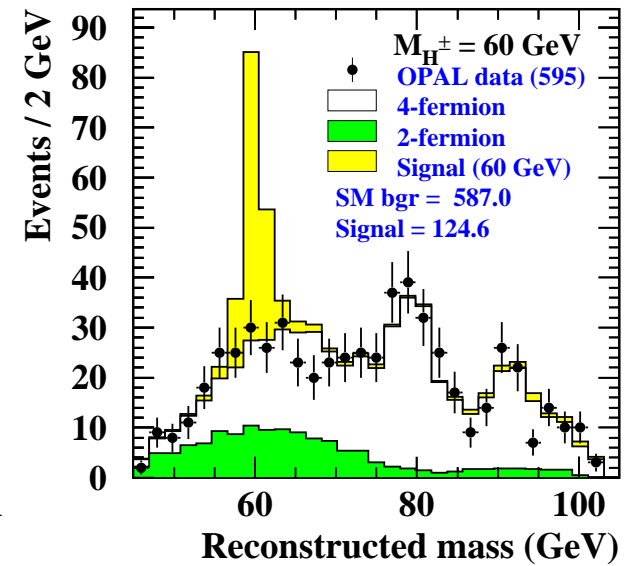
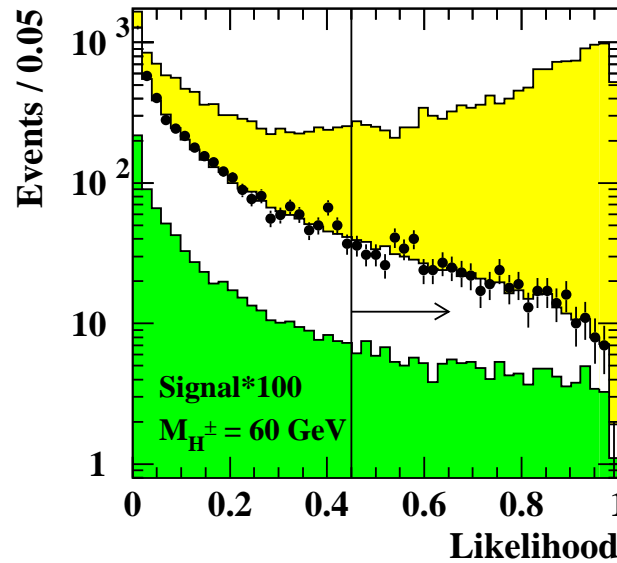
Jel/háttér $M(H^\pm) = 65 \text{ GeV}$ -re $37.8/(217 \pm 12)$,
 75 GeV -re $23.5/(382 \pm 21)$.



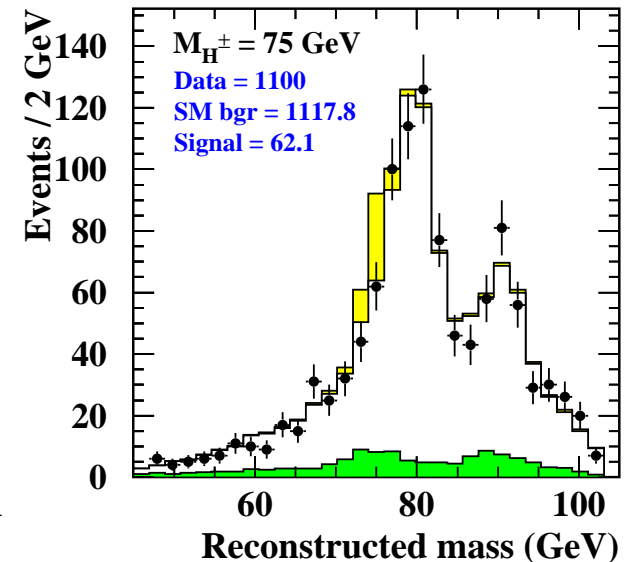
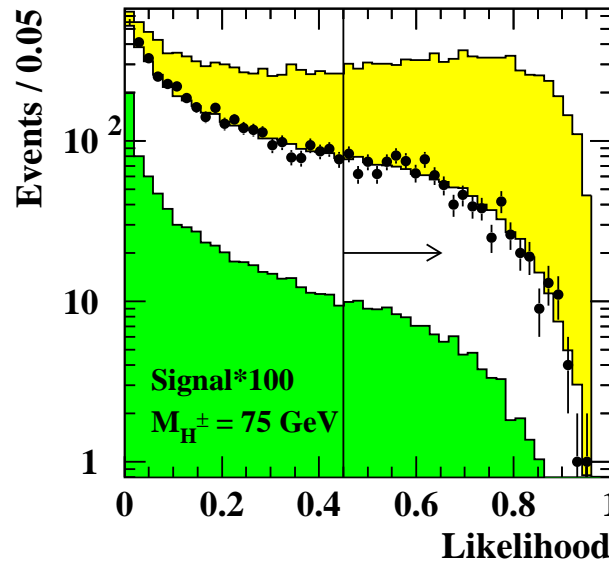
$H^+H^- \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$: LH és tömeg, 189-209 GeV

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

$M(H^\pm) = 60$
GeV

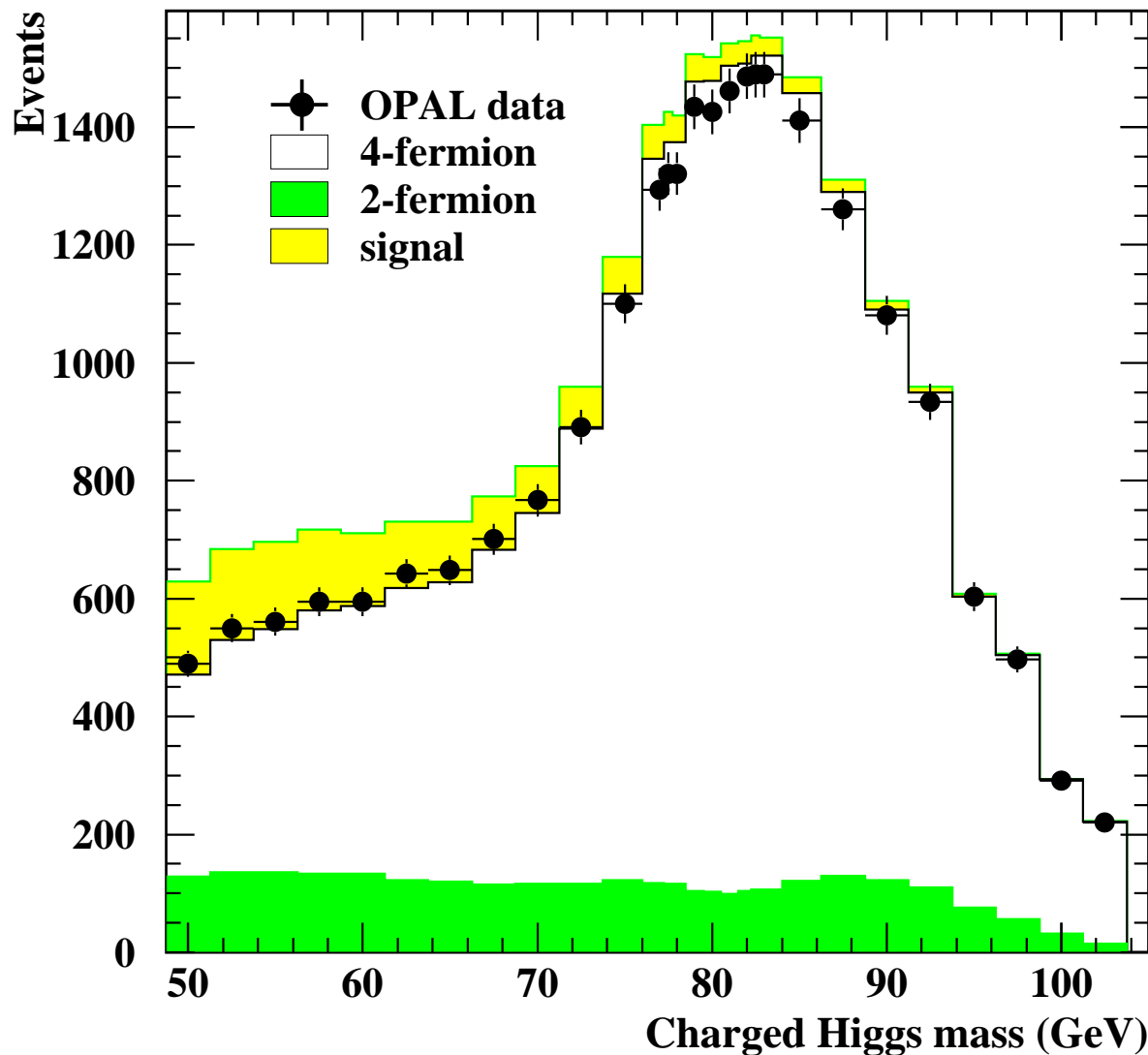


$M(H^\pm) = 75$
GeV



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

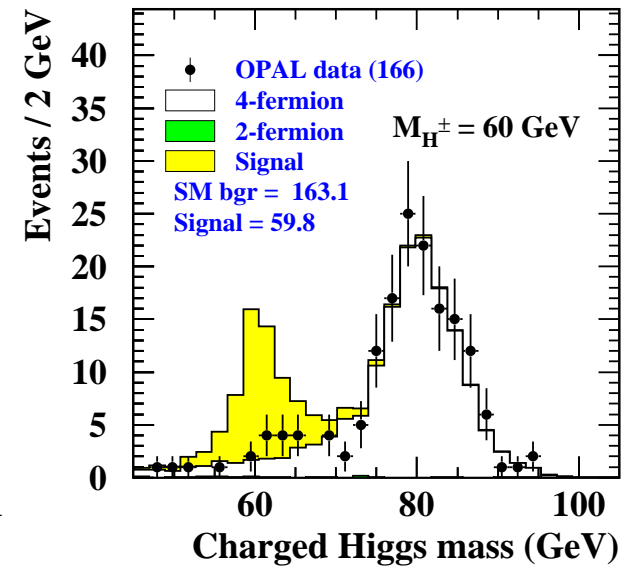
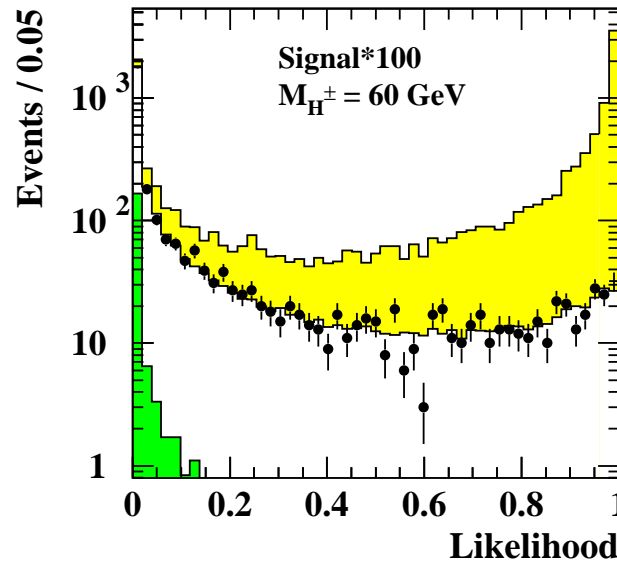
OPAL Preliminary: $H^+H^- \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$, 189-209 GeV



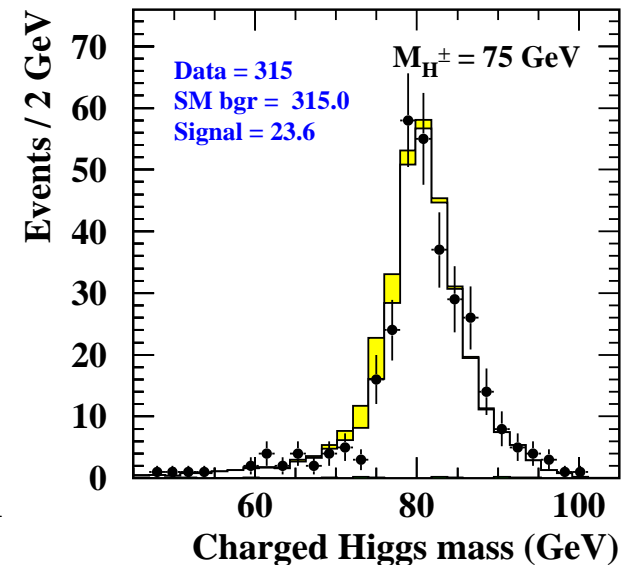
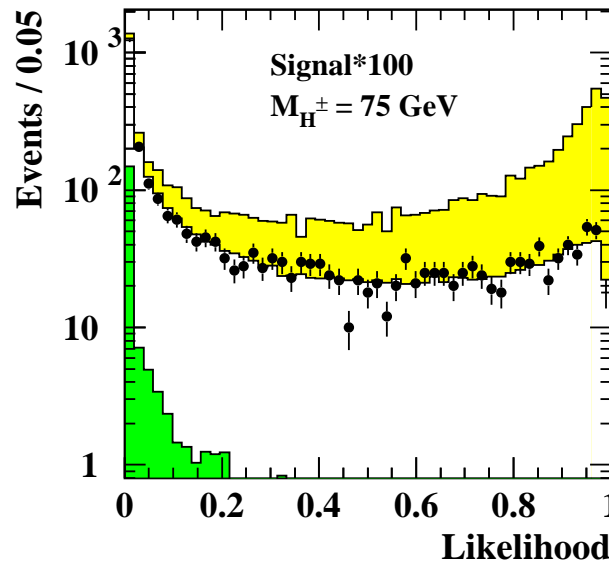
$H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$: LH és tömeg, 189-209 GeV

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

$M(H^\pm) = 60$
GeV

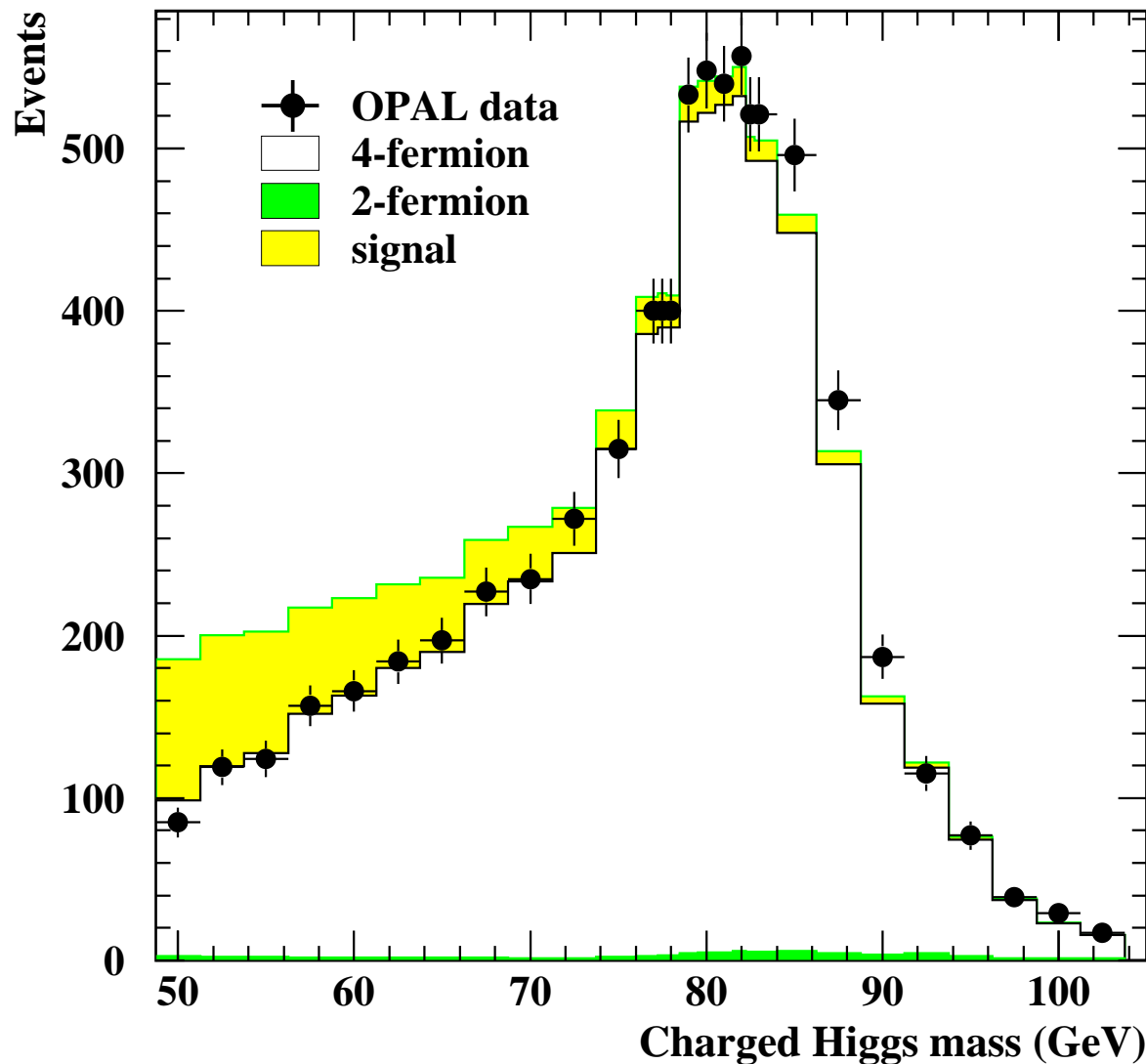


$M(H^\pm) = 75$
GeV

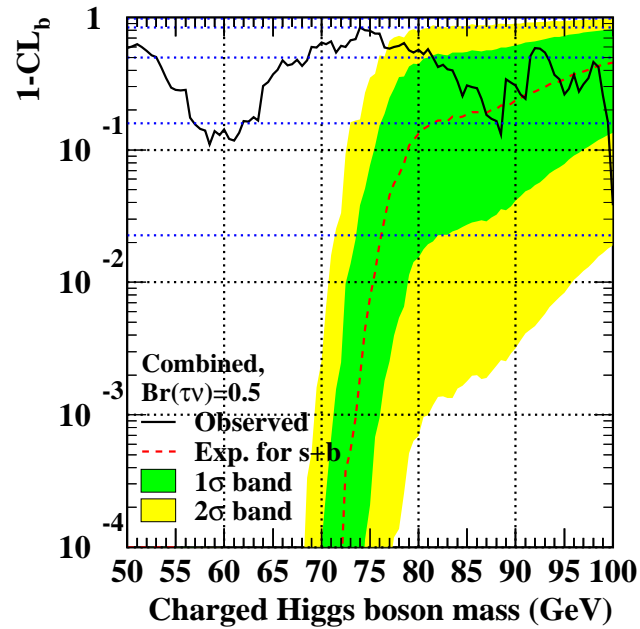
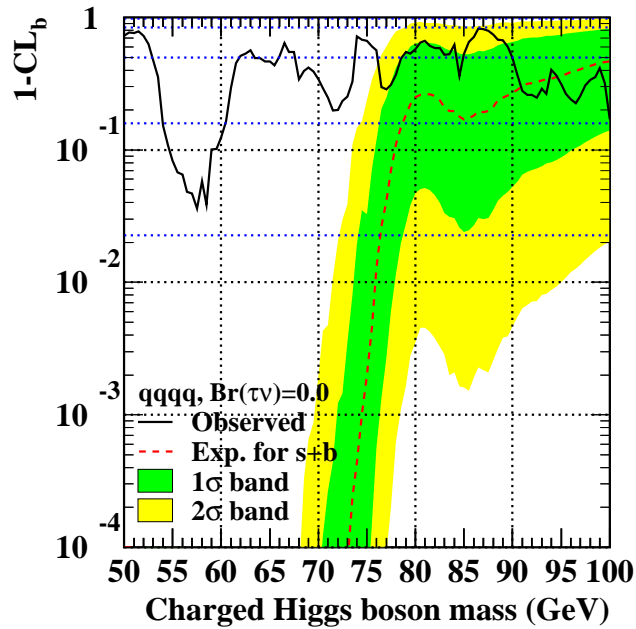
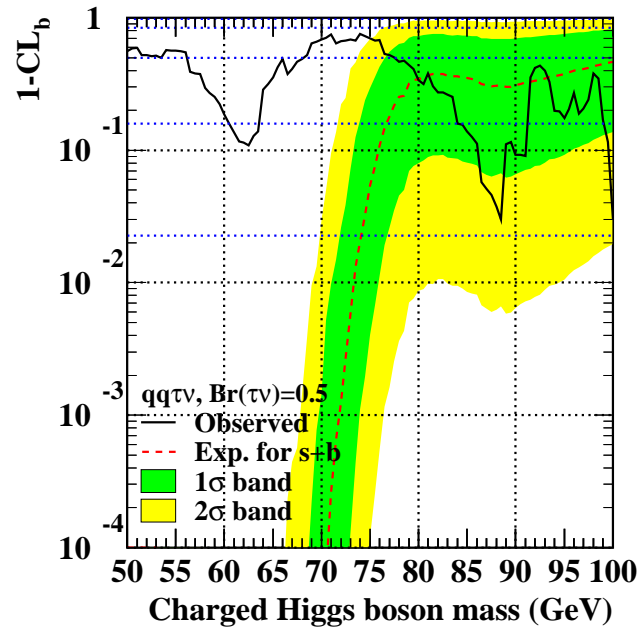
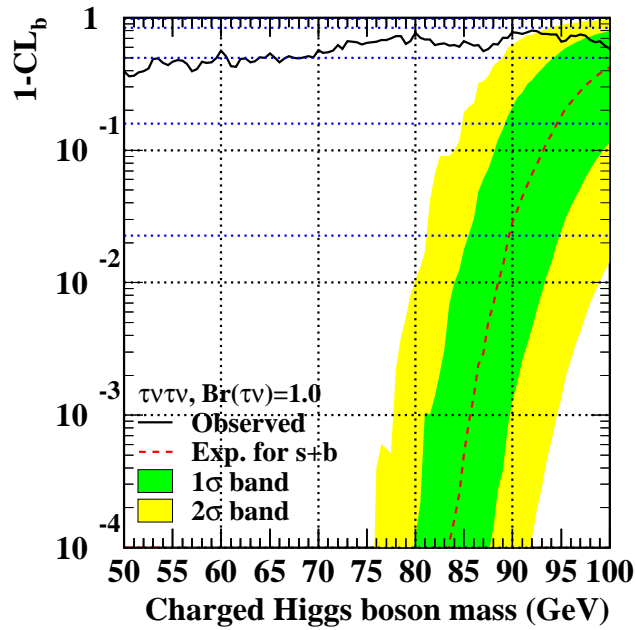


$H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$: tömegfüggés, 189–209 GeV

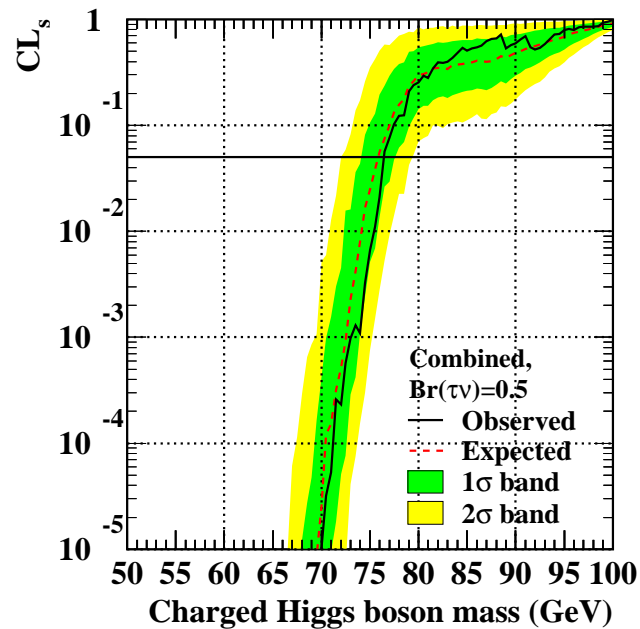
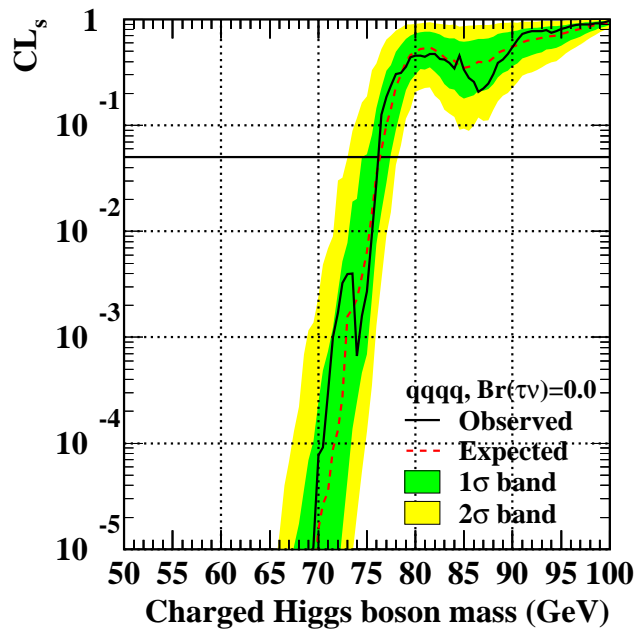
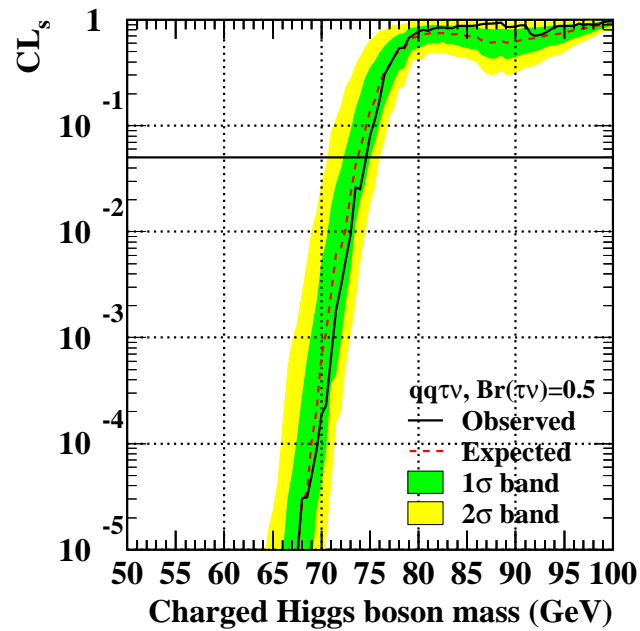
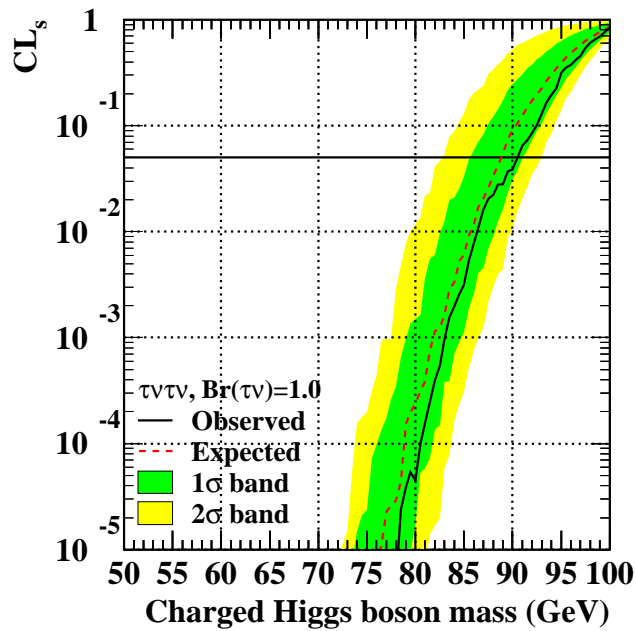
OPAL Preliminary: $H^+H^- \rightarrow qq\tau\nu$, 189-209 GeV



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

