

Út a Higgs-bozonhoz: a nagyenergiás fizika negyvenéves kalandja

A Magyar Tudomány Ünnepe, MTA, 2018.11.14.

Horváth Dezső

horvath.dezso@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet,
Budapest
és MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen



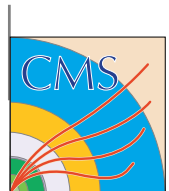
Vázlat

- A Standard Modell Higgs-bozonja
- A CERN és részecskegyorsítói
- Keresési módszerek
- Kizárás a LEP-nél
- Megfigyelés az LHC-nál
- Anyag–antianyag szimmetria?

D. Horváth: *Twenty years of searching for the Higgs boson: exclusion at LEP, discovery at LHC*, Modern Physics Letters A 29 (2014) 1430004.

és

XXXth International Workshop on High Energy Physics, Protvino, Russia,
23-27 Jun 2014



A Standard Modell állatkertje



A Higgs-részecskén kívül mind régen megvolt!

Rejtélyes Higgs-bozon??

A részecskefizika szimmetriákon alapuló elmélete **nem** tűrte az elemi részecskék tömegét, és nem írta le az atommagok bomlását vezérlő *gyenge kölcsönhatást*.

A teljes elmélet, a *standard modell (SM)* a Higgs-mechanizmus jótékony közreműködésével született.

(Igazából Anderson-Brout-Englert-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble (BEH-) mechanizmus, 1963-64)

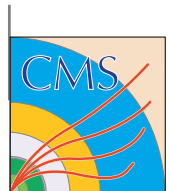
Vákuumhoz szimmetriasértő mezőt ad 4 szabadsági fokkal

⇒ jó gyenge kölcsönhatás 3 nehéz közvetítő bozonnal.

BEH-mező 3 szab. foka ⇒ Z , W^+ , W^- tömege

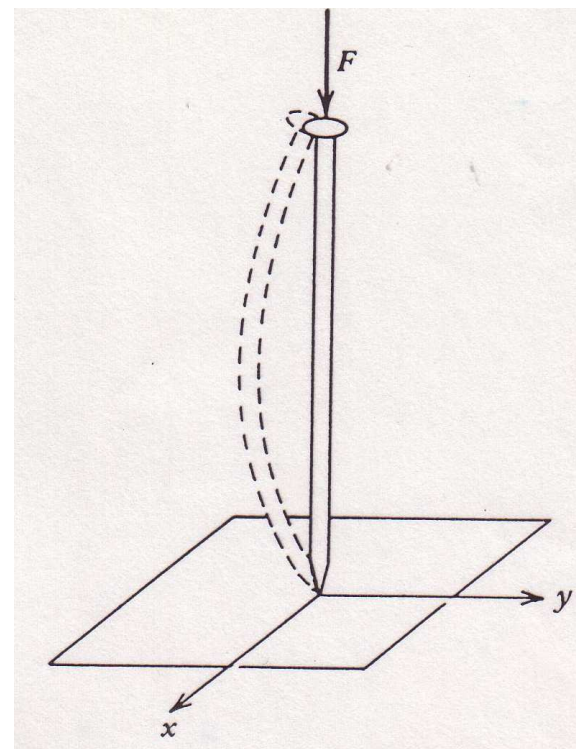
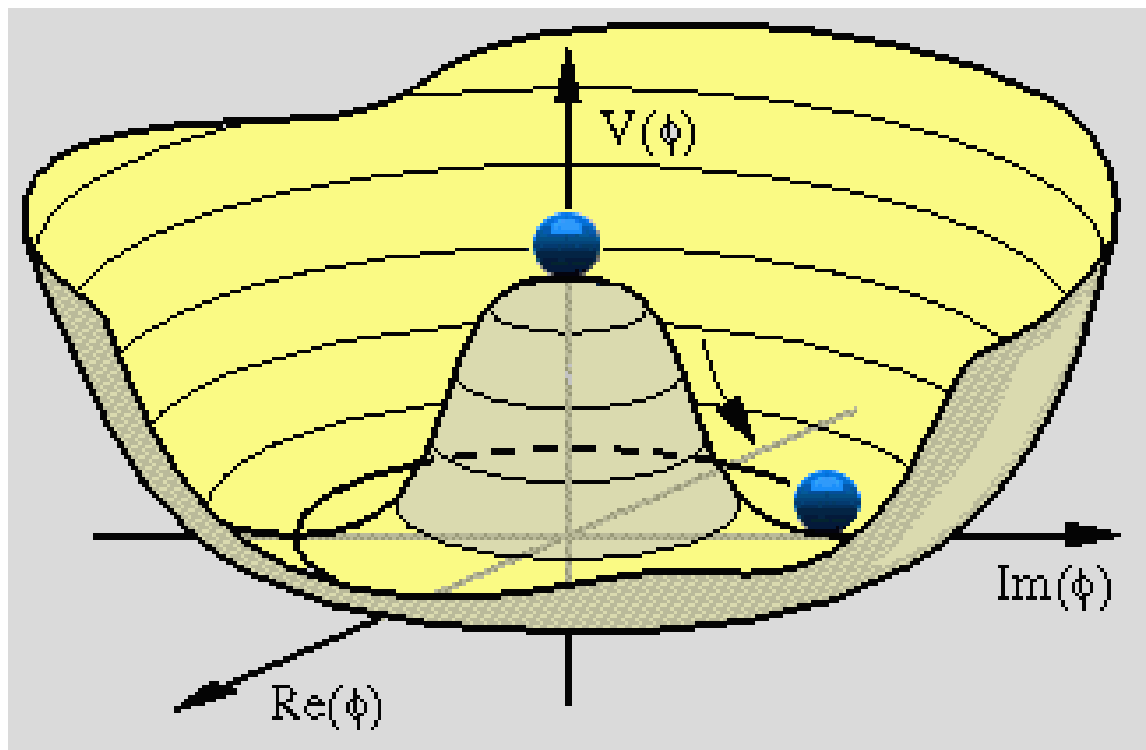
4. szab. fok ⇒ nehéz semleges részecske: Higgs-bozon

A tárgyak tömege **NEM** a BEH-mechanizmustól van, csaknem tiszta energia!



A Standard Modell BEH-mechanizmusa

Spontán szimmetriasértés!

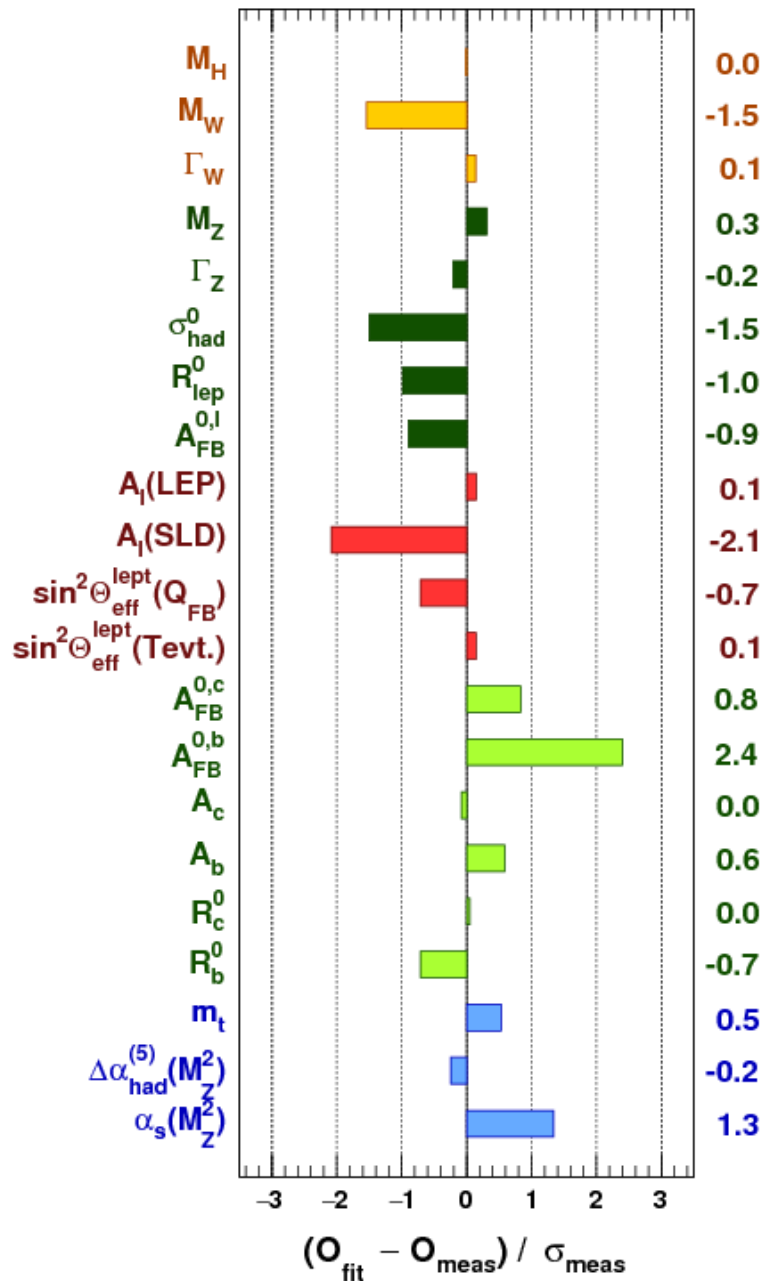


Higgs-bozon: furcsa részecske,
minden kvantumszáma zérus, csak tömege van

Létezik? SM: muszáj!



A Standard Modell diadalútja, 2018



Valamennyi kísérlet sokszáz mérésének összesítése:

| Mért–számolt | / szórás

Kilógó adat:

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

előre–hátra aszimmetriája

J. Haller et al, arXiv:1803.01853

Elméleti problémák:

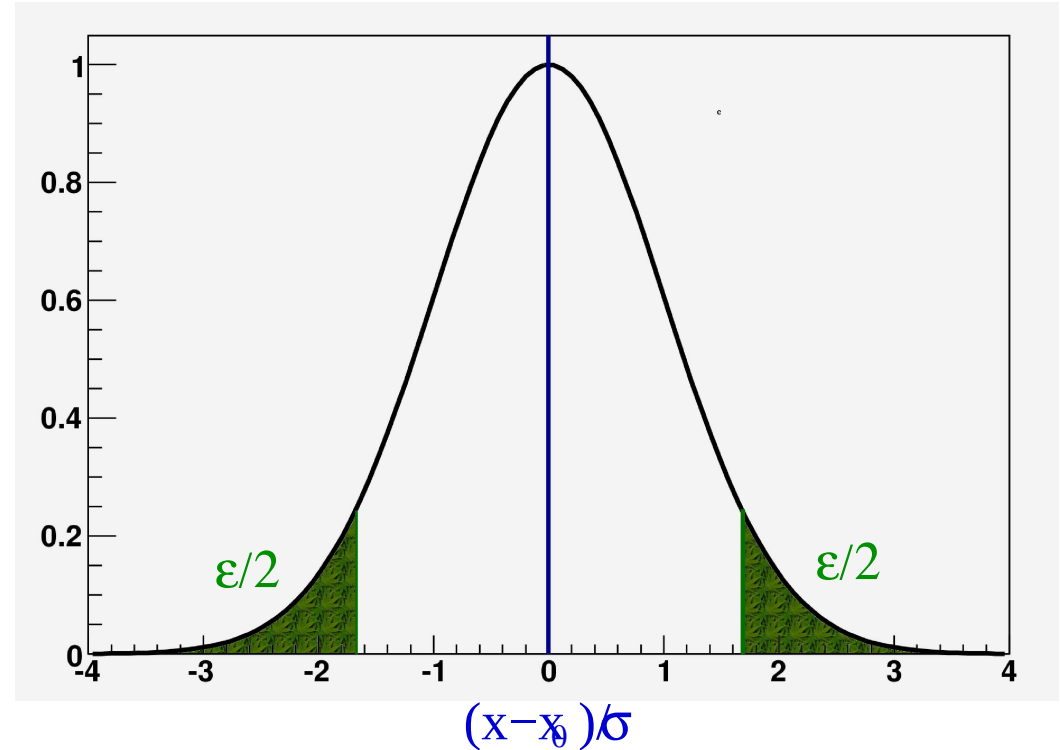
Óriási matematikai korrekciók,
sötét anyag, neutrínótömegek,
antianyag hiánya...

Kizárás és megfigyelés (felfedezés :-)

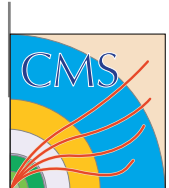
Gyorsító kísérletek
megállapodása:

Egy keresett jelenség
kizárási küszöbe:
 $\geq 95\%$
konfidenciaszint.

Valami újat sikerült
megfigyelnünk, ha az:
 $> 5\sigma$ a **háttér felett.**



Kizárás egyik oldalon:
 $X < X_0$ at 95% CL ha
 $X_{\text{megfigy}} - X_0 < 1.64\sigma$



És mi az a σ ?

A fizikai paraméterek teljes bizonytalansága a kísérletező legjobb becslése szerint.

Van statisztikus összetevője
(a megfigyelt kísérleti események számából)

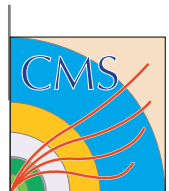
és **szisztematikus** különböző forrásokból:

A felhasznált szimulációk adatmennyisége és bemenő paraméterei, kalibrációs tényezők, hatásfokok, stb. Ezekkel együtt a **zavaró paraméterekkel** (Θ) együtt, a korrelációk figyelembevételével kapjuk a teljes bizonytalanságot, igen durva közelítéssel például:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{stat}}^2 + \sigma_{\text{syst}}^2}$$

A gyakorlatban azonban fejlettebb statisztikus módszereket használunk, mint pl. a marginalizációt, amikor a $\mathcal{L}$ teljes maximalizálandó likelihood függvényből kiintegráljuk a zavaró paraméterek $\mathcal{W}$ eloszlását:

$$\mathcal{L}(P; x) = \mathcal{W}(x|P) = \int \mathcal{W}(x|P, \Theta) \mathcal{W}(\Theta|P) d\Theta$$



Vak analízis

Olyan mérés, amelyet az eredmény figyelembe vétele nélkül végzünk, az akaratlan torzítások elkerülése céljából.

A. Roodman: *Blind Analysis in Particle Physics*,
<http://arxiv.org/abs/physics/0312102>, SLAC, 2003

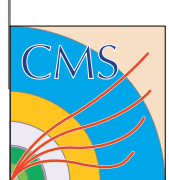
Az orvostudományból átvéve.

A LEP- és LHC-kísérletek alapeszköze:

Az adatelemzés módszerét szimulációk és korábbi mérések felhasználásával optimalizáljuk anélkül, hogy a kritikus tartomány adatait vizsgálánánk. A módszert publikáljuk és megvédjük, és csak jóváhagyás után alkalmazzuk.

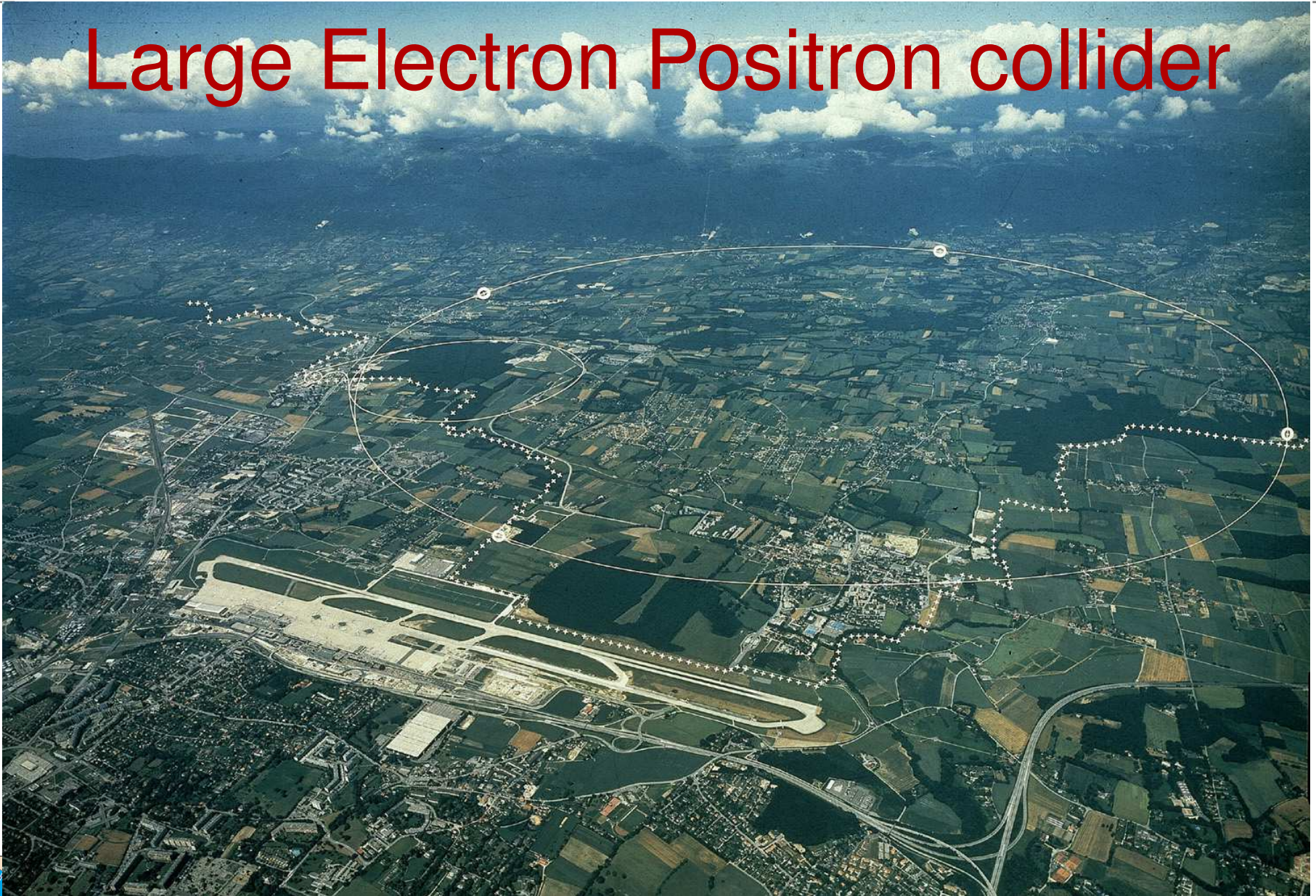
CMS, 2012: a $110 < M_H < 140$ GeV kitakarva
mert ott 2011-ben 3σ többletet láttunk.

Egyszerre nyitjuk meg valamennyi elemzőcsoport számára, nehogy egymást befolyásolják.

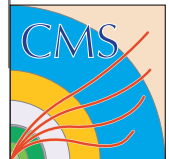
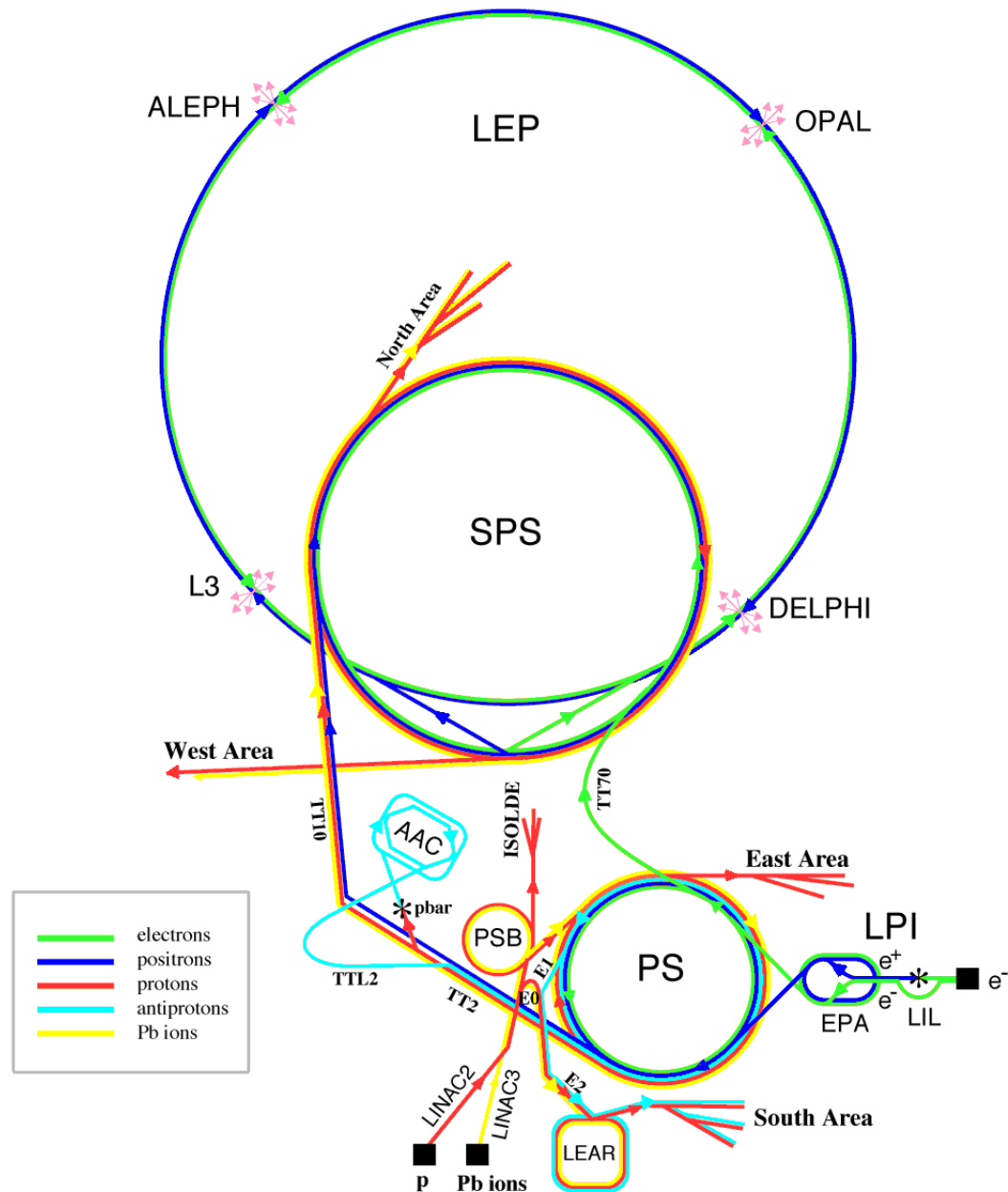


A LEP ütköztető

Large Electron Positron collider



A CERN gyorsítói, 1989-2000



Higgs-keresés az LEP-nél: megvan??



Peter Higgs a LEP-alagútban (de a bozonját ott nem találtuk meg)

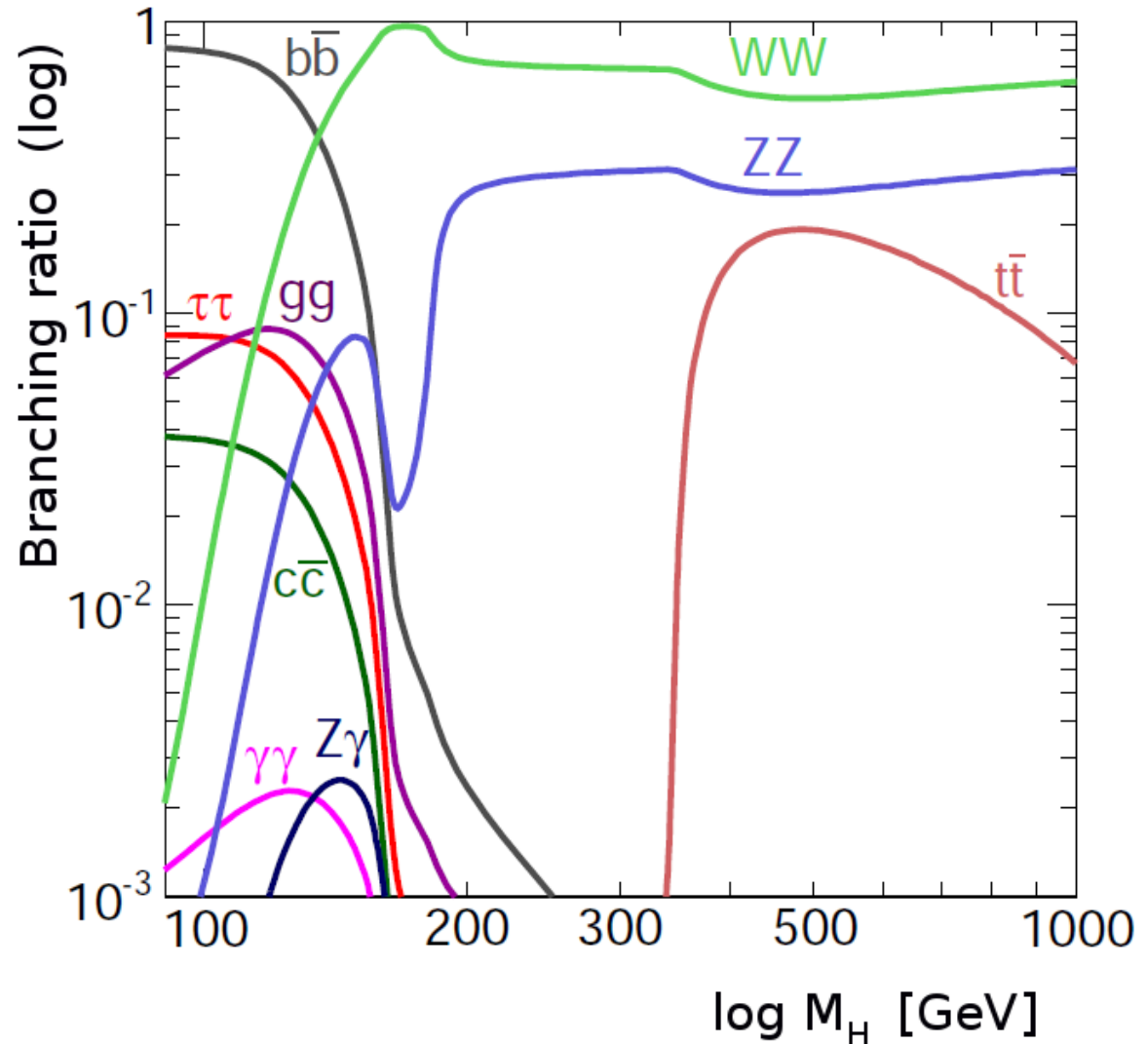
A Higgs-bozon keresése a LEP-nél

Domináns képződés a
Standard Modell
szerint:

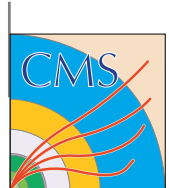
Higgs-sugárzás
 $e^-e^+ \rightarrow ZH$

Domináns bomlási
mód:

$H \rightarrow b\bar{b}$



Különböző vizsgálati csatornák a Z-bozon lehetséges
bomlásainak megfelelően



Amit megfigyelünk: rezonanciacsúcs

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

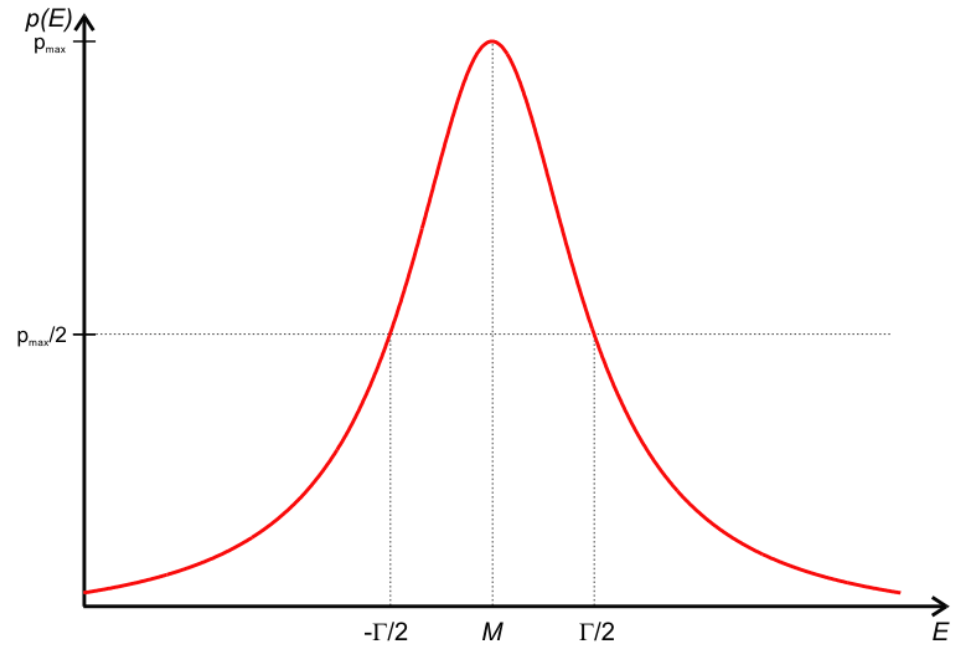
Megfigyelési valószínűség
energiafüggése:

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

Breit-Wigner formula

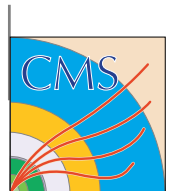
Csúcs M energiánál (tömegnél),
 Γ szélességgel.

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

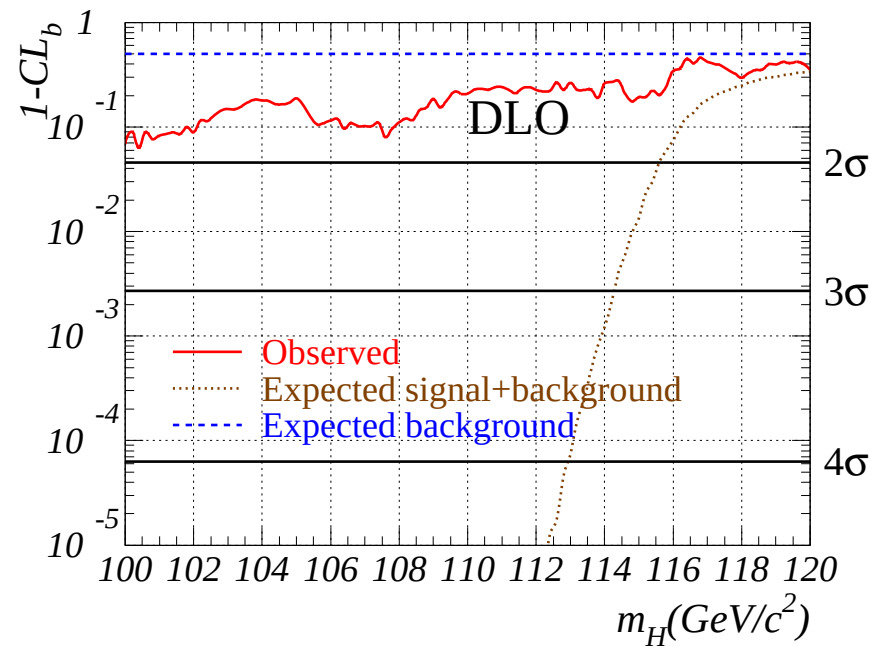
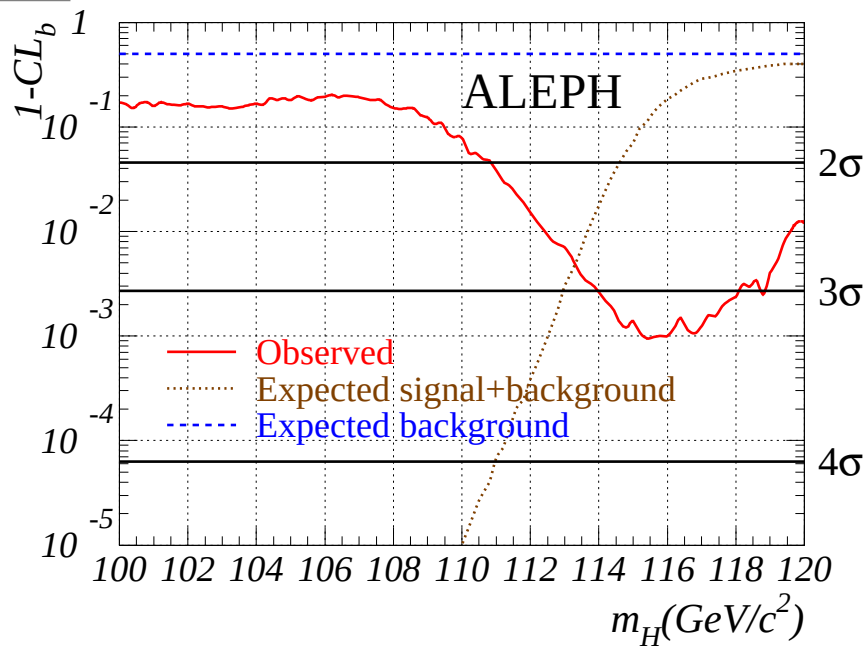


Lorentz-görbe

Új részecske megfigyelése: rezonanciacsúcs a részecske
tömegének megfelelő bomlási energiánál



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

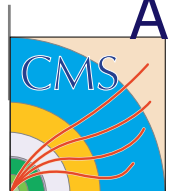


A jel konfidenciaszintje: várt és megfigyelt értékek
csak háttérrel feltételezve

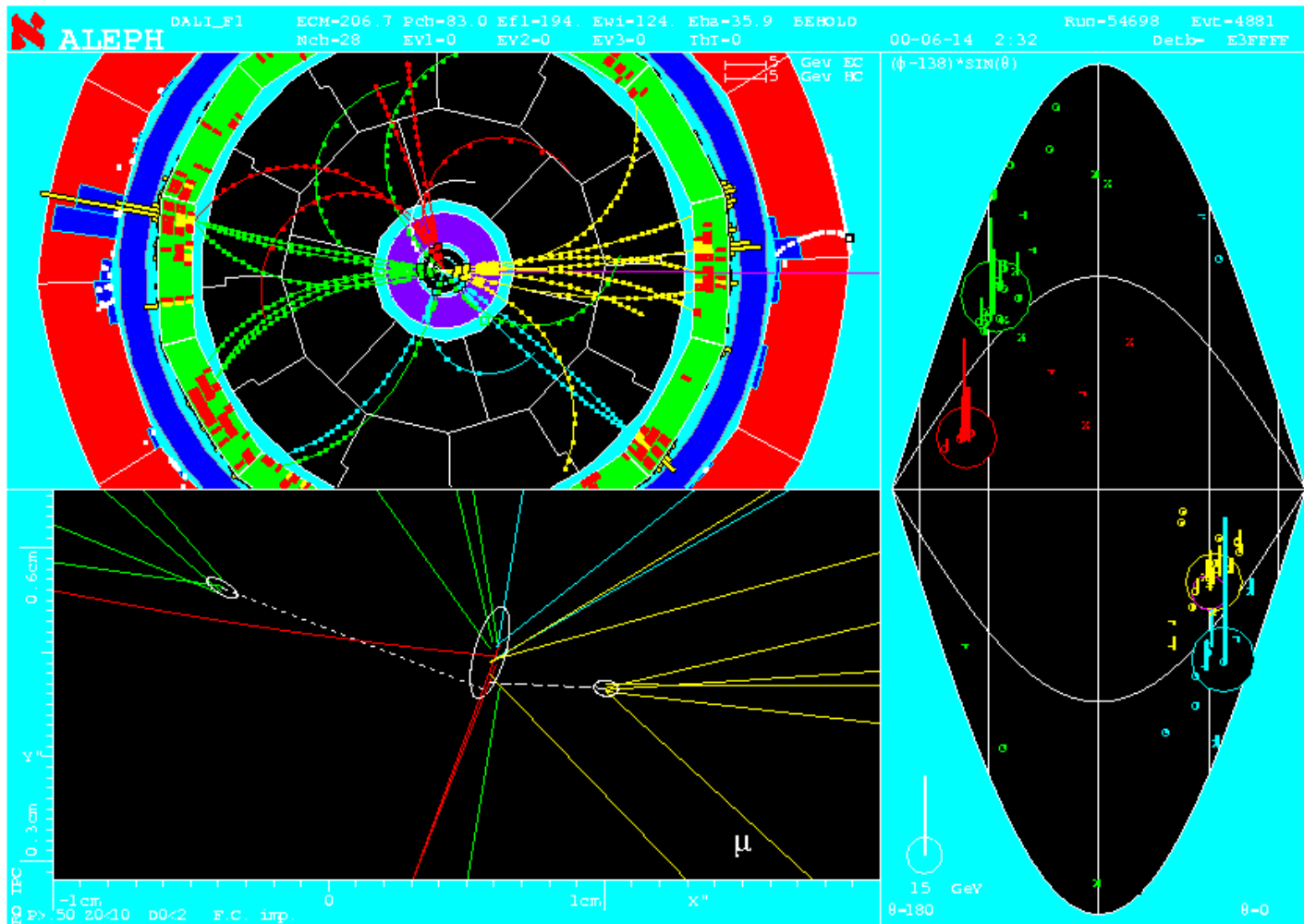
Többlet ALEPH 4-kvarkos eseményeiben 115 GeV-nél:

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

ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL: Phys. Lett. B 565 (2003) 61-75.
(1310 szerző, 16 magyar: L3 és OPAL)



ALEPH: $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}q\bar{q}$ esemény

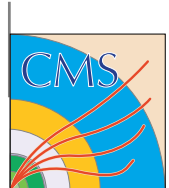
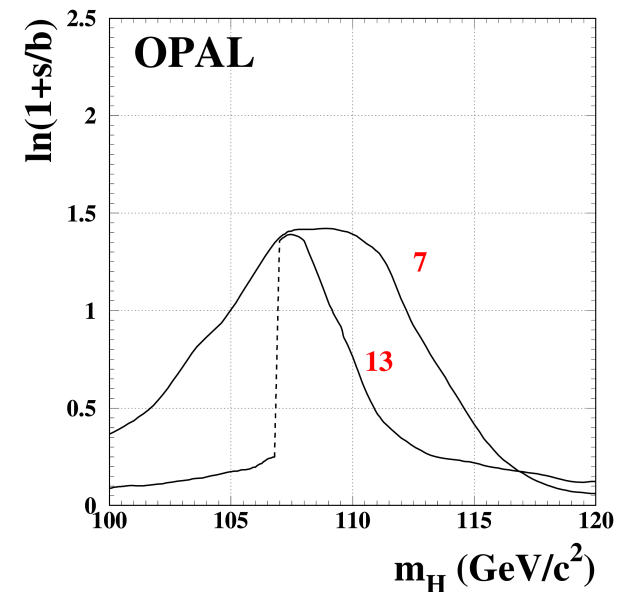
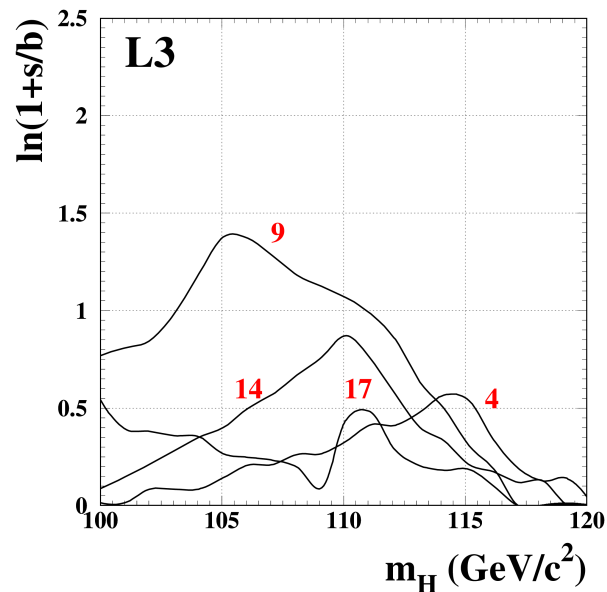
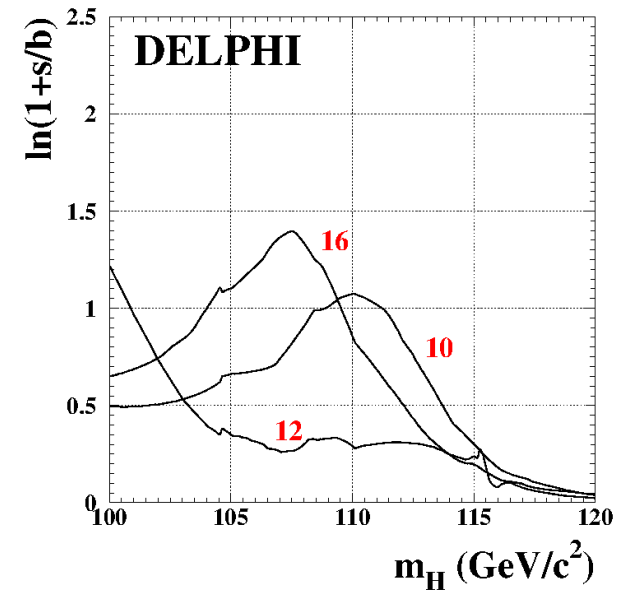
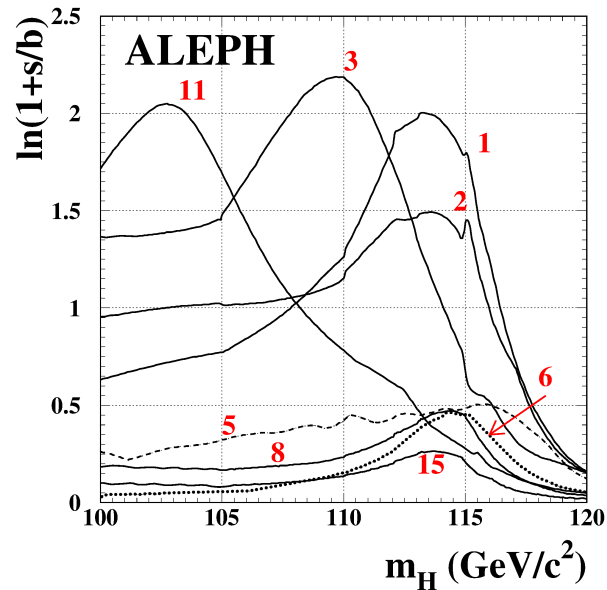


A b-kvark hosszabb élettartama másodlagos bomlási vertexet okoz.

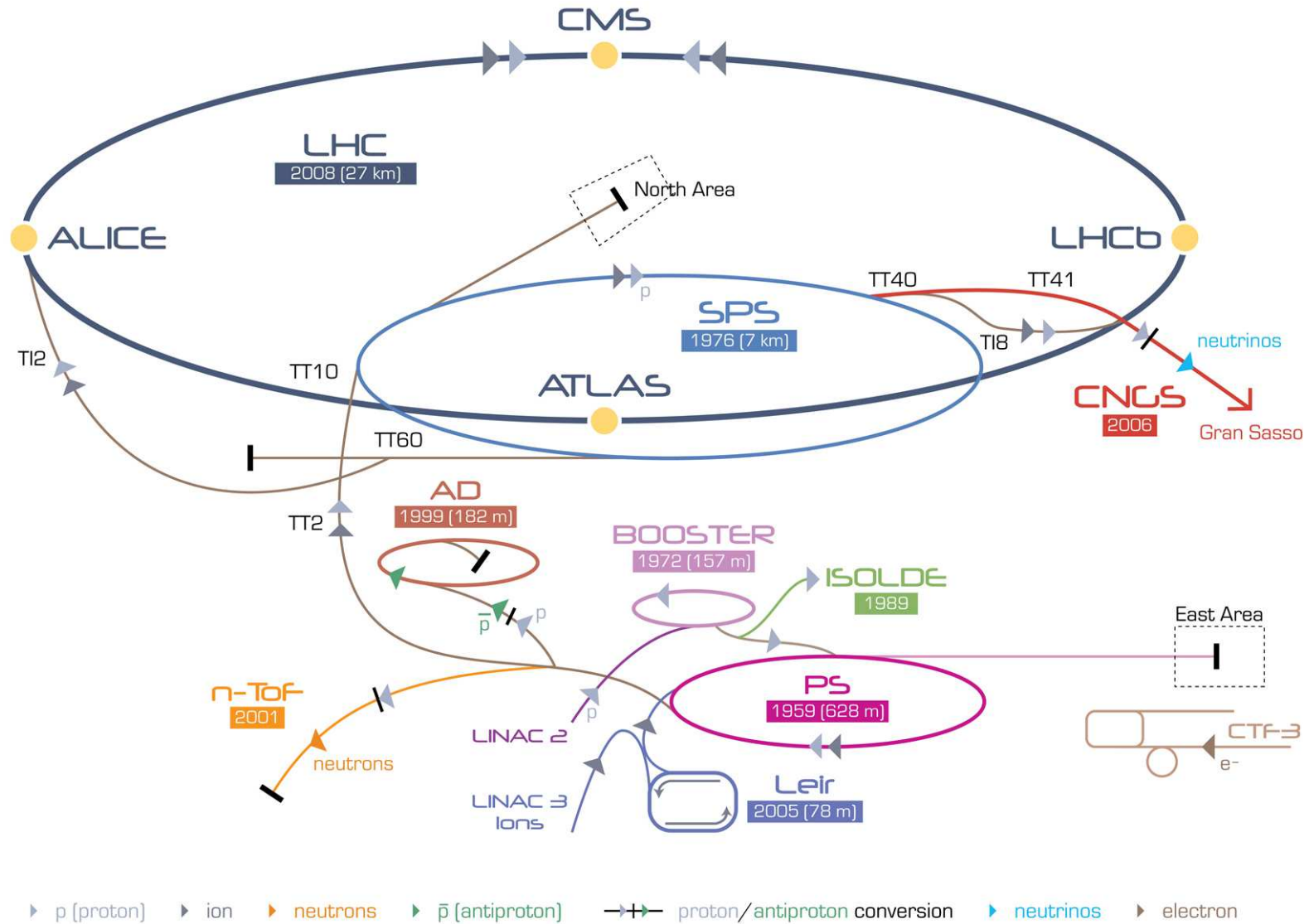
LEP: spagetti-gráfok

Események
jelszerűségi
valószínűsége
a Higgs-bozon
feltételezett
tömegének
függvényében
a 17 legjobb
LEP-eseményre.

The LEP
Collaborations,
Phys. Lett. B
565 (2003) 61.



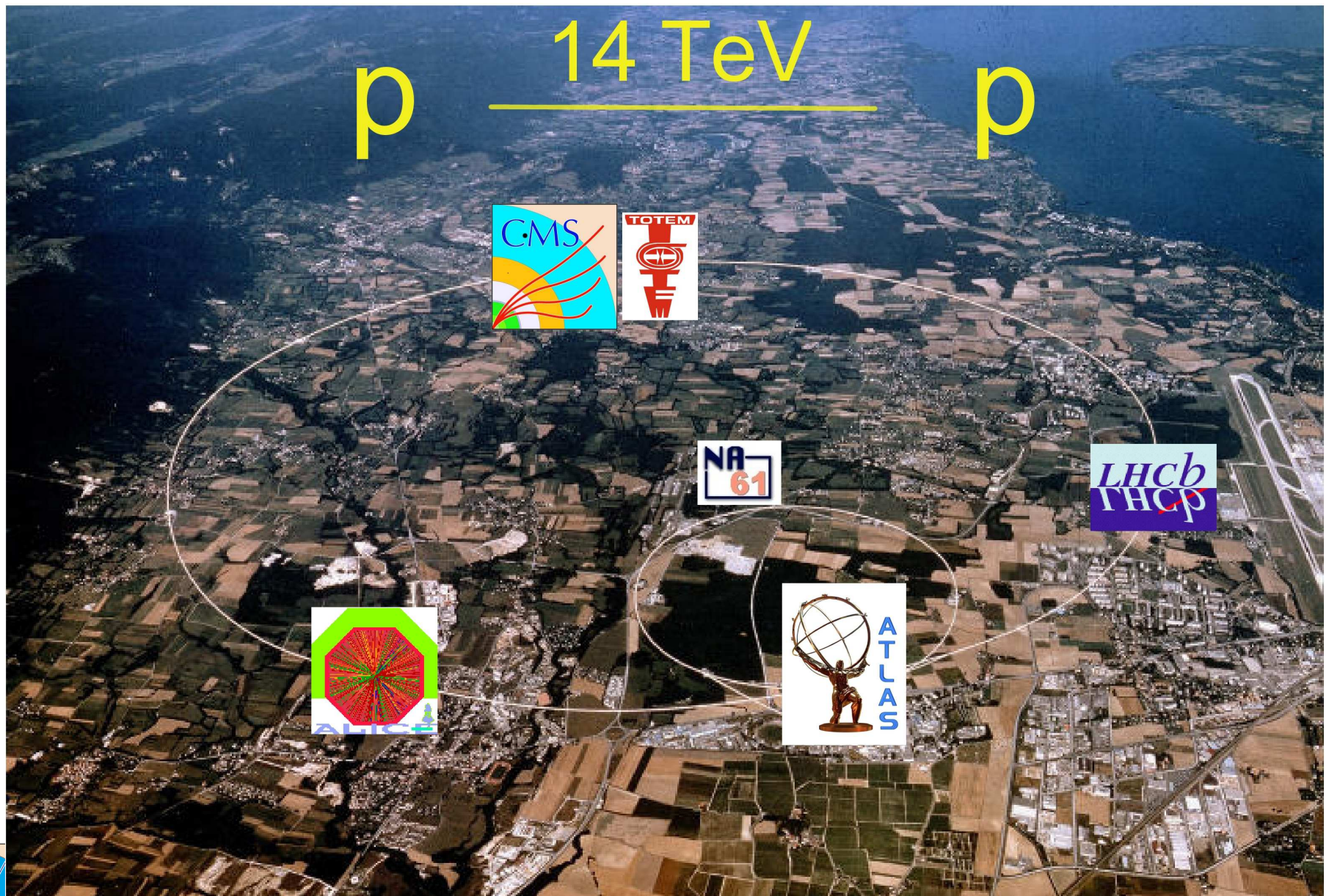
A CERN gyorsítói



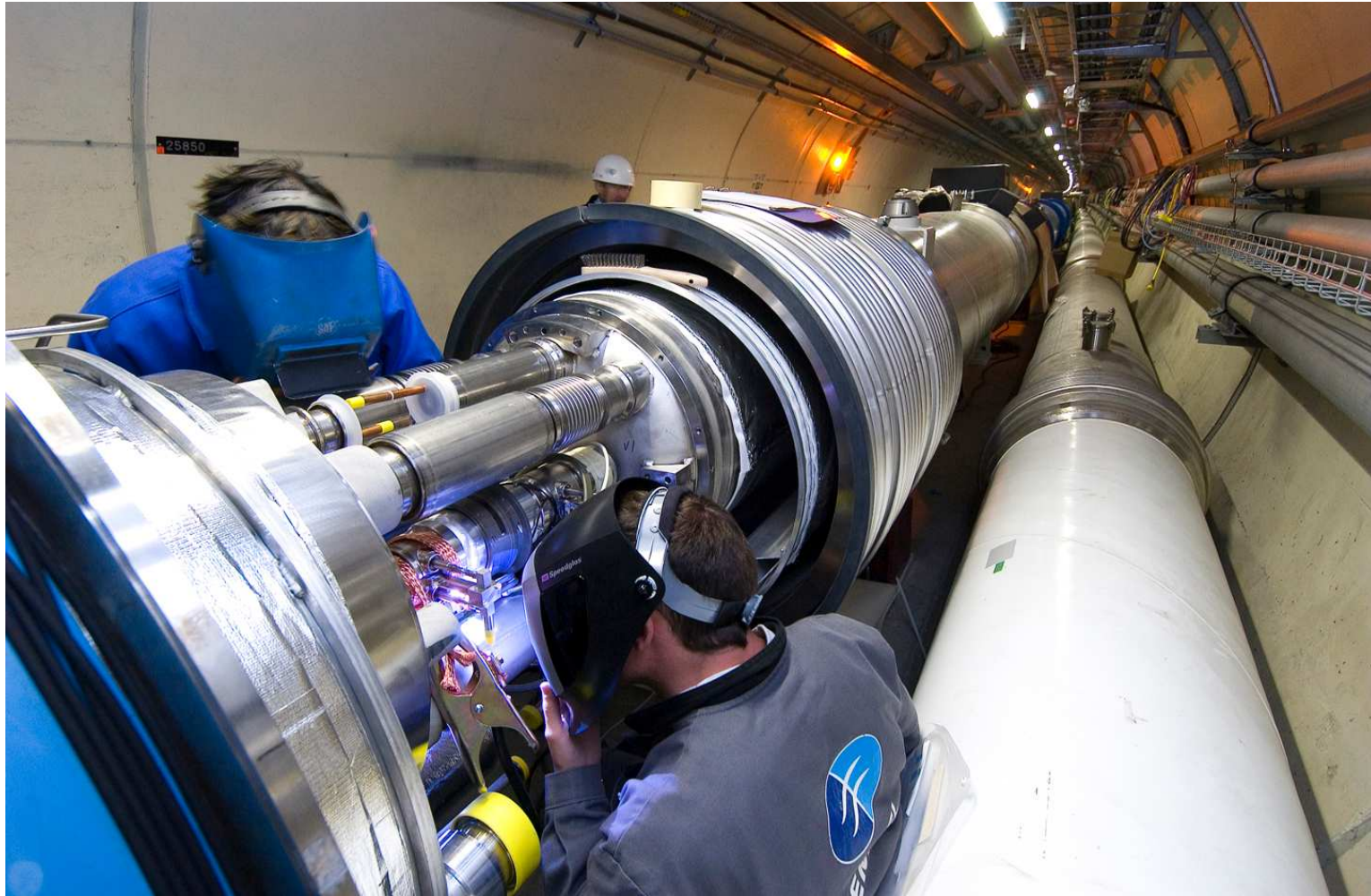
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF-3 Clic Test Facility CNCS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

LHC és főbb kísérletei



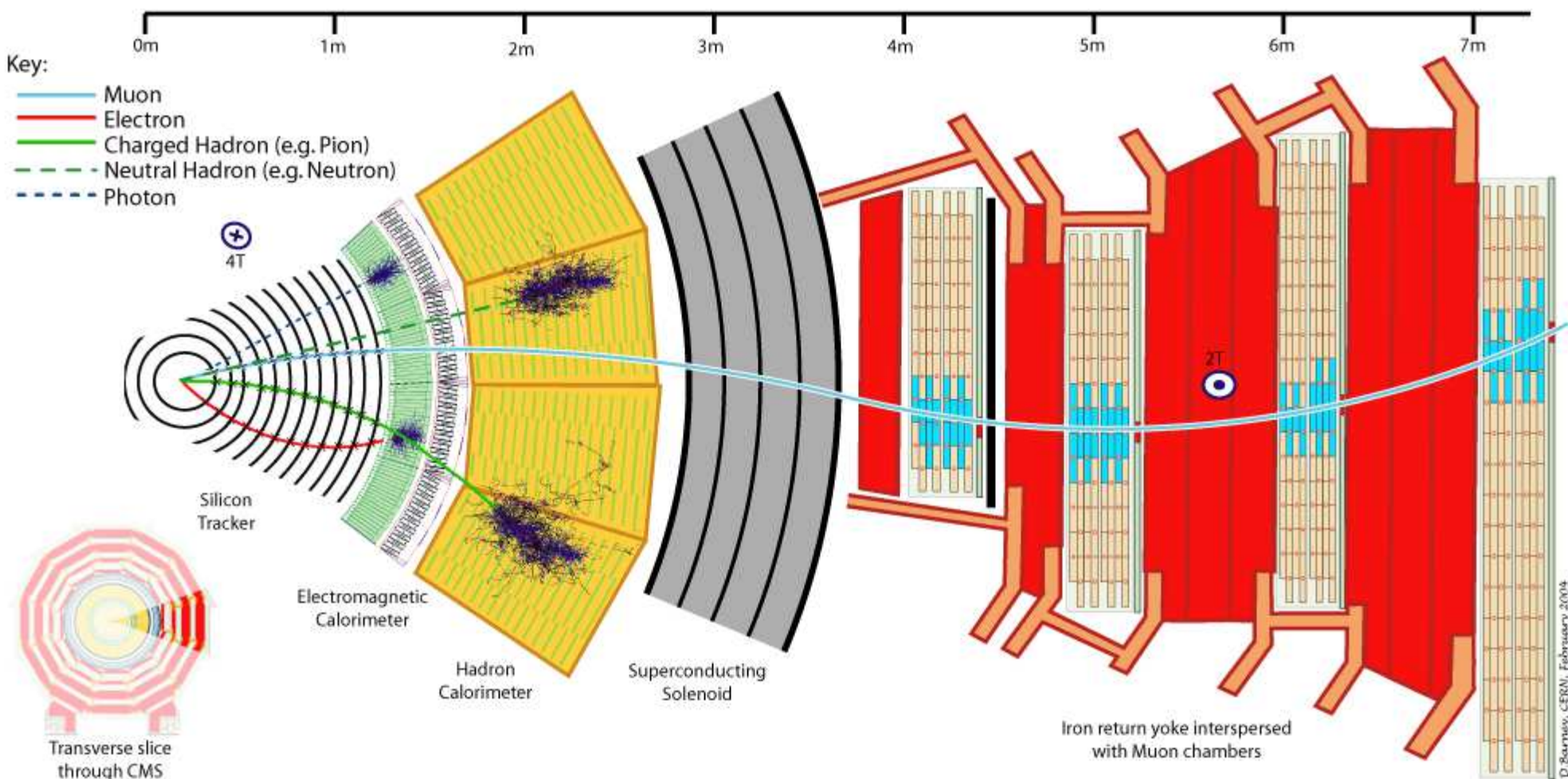
Az LHC mágnesei



1232 szupravezető dipólusmágnes tartja a protonokat a 27 km-es kettős körpályán.

($L = 15$ m, $M = 35$ t, $T = 1.9$ K, $B = 8.3$ T)

CMS: Compact Muon Solenoid



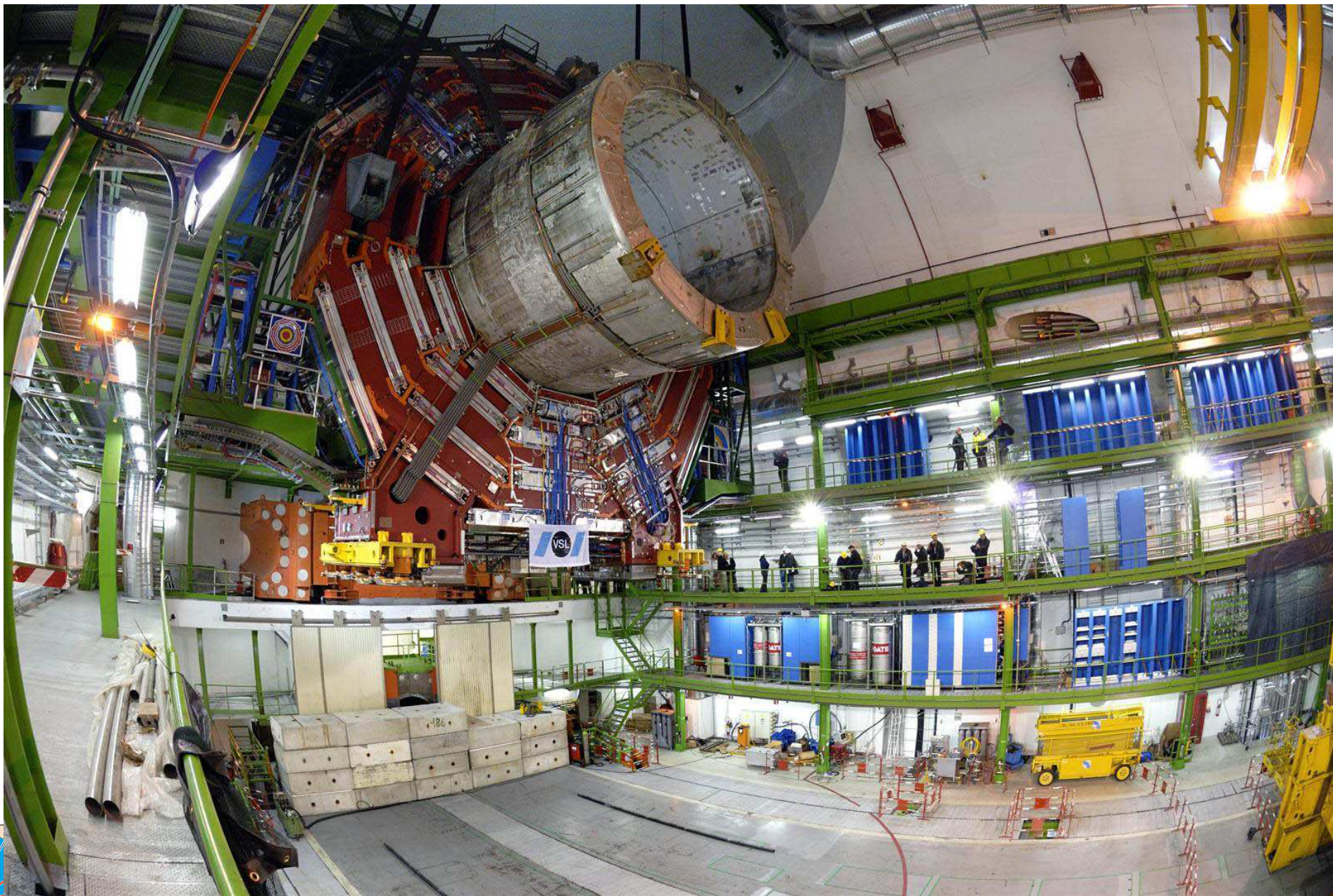
14000 tonnás kamera

100 M pixel, 40 M kép/sec, 1000 GB/sec data

Felvehető max. 1000 kép/sec $\Rightarrow$ intelligens válogatás!!

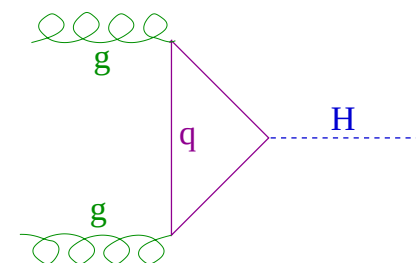
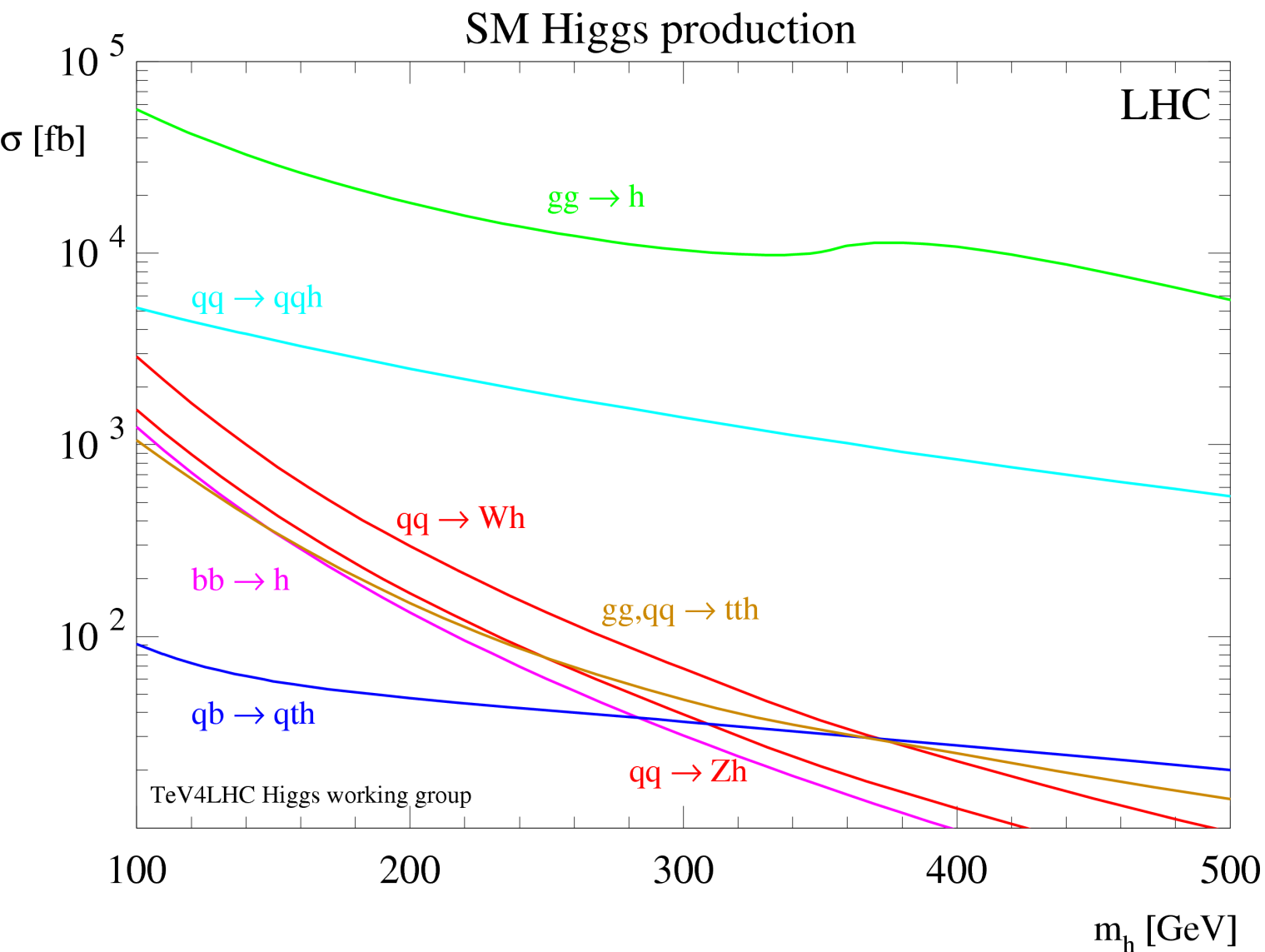


Helyére kerül a szolenoid

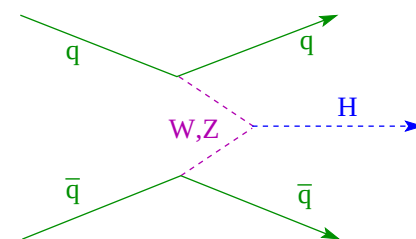


A SM Higgs-bozonja

keltés p-p ütközésben az LHC-nál

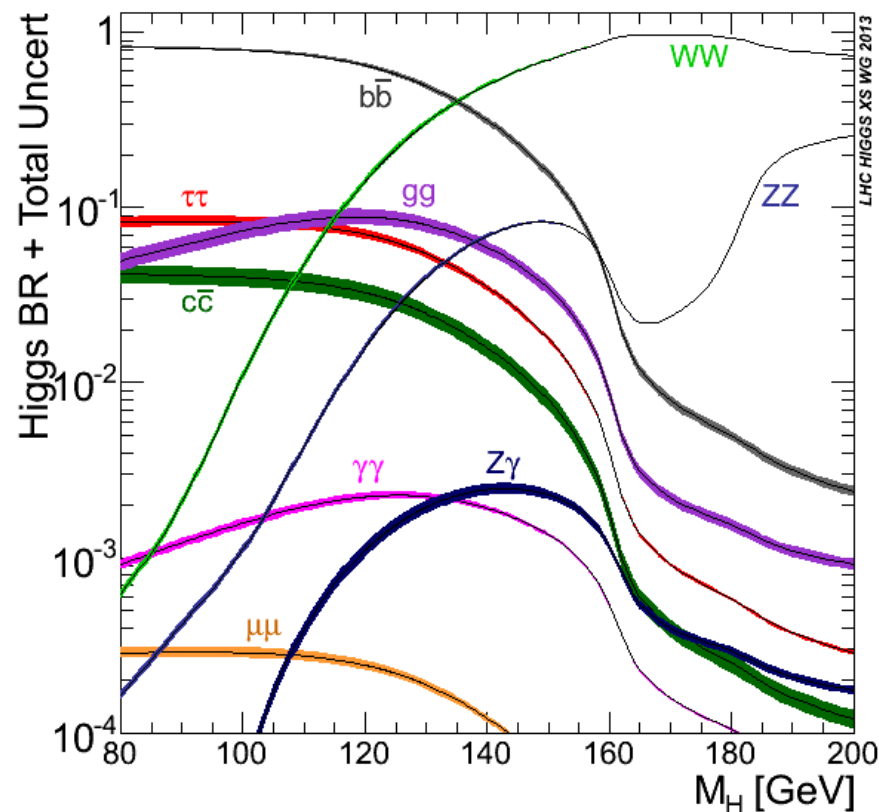
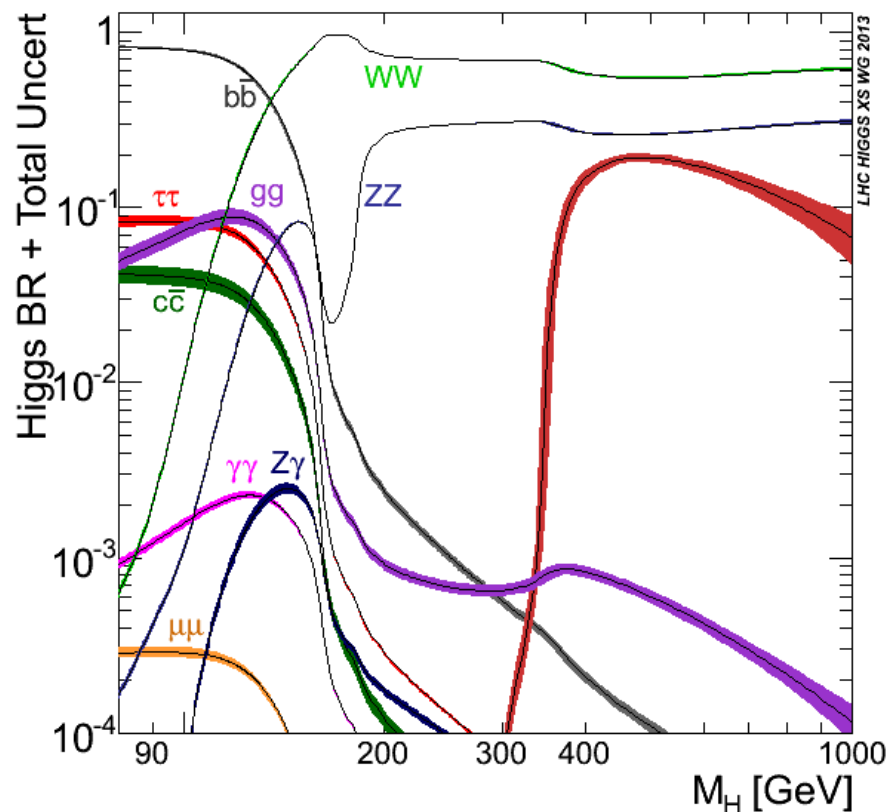


gluon-fúzió



vektorbozon-fúzió

A SM Higgs-bozonja: bomlás



125 GeV-nél sokféle bomlási folyamat.

LHC-nál legjobban azonosítható ($\Delta M/M = 1 \dots 2\%$):

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$ ($\ell = e, \mu$): $BR = 1.24 \times 10^{-4}$, $S/B > 1$)

$H \rightarrow \gamma\gamma$: $BR = 2.27 \times 10^{-3}$, $S/B \ll 1$

LHC Higgs Cross Section Working Group, arXiv:1610.07922



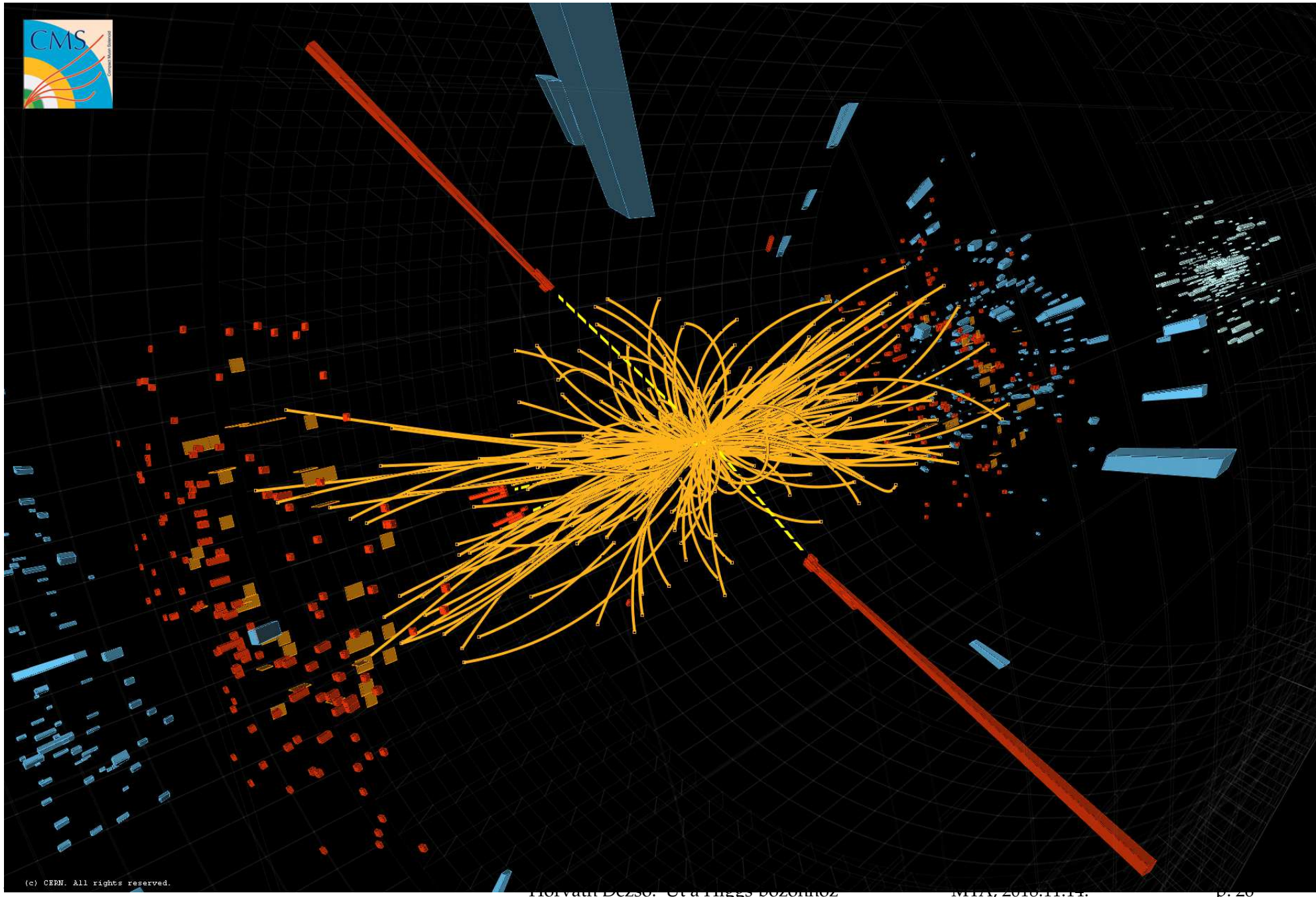
CMS: elektromágneses kaloriméter

$H \rightarrow \gamma\gamma$ vizsgálatára optimalizálva



75,848 PbWO_4 egykristály szcintillátor

CMS-esemény: $H \rightarrow \gamma\gamma$ jelölt



2012 július 4: valami van!

ATLAS és CMS, 7 és 8 TeV ütközési energián, $H \rightarrow \gamma\gamma$ és $H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ csatornában, $m \approx 125$ GeV tömegnél statisztikusan jelentősen (kísérletenként 5σ szignifikanciával) lát egy új H részecskét a SM Higgs-bozonjának megfelelő tulajdonságokkal.

Matthew Chalmers: Nature on-line, 2 July 2012!!
„Physicists Find New Particle, but is it the Higgs?”

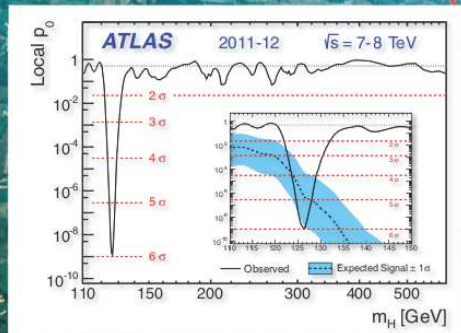
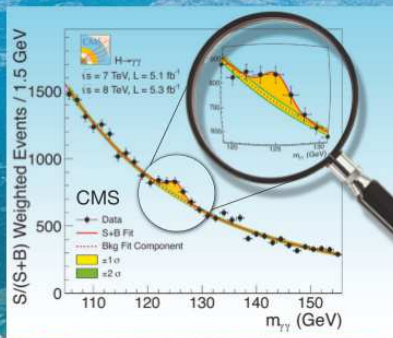


François Englert és Peter Higgs (első találkozás?)

CMS és ATLAS: Egy új bozon



First observations of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson at the LHC



www.elsevier.com/locate/physletb

Physics Letters B 716 (2012) 1–29



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC ☆

ATLAS Collaboration*

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

ARTICLE INFO

Article history:
Received 31 July 2012
Received in revised form 8 August 2012
Accepted 11 August 2012
Available online 14 August 2012
Editor: W.-D. Schlatter

ABSTRACT

A search for the Standard Model Higgs boson in proton–proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The datasets used correspond to integrated luminosities of approximately 4.8 fb^{-1} collected at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ in 2011 and 5.8 fb^{-1} at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ in 2012. Individual searches in the channels $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ in the 8 TeV data are combined with previously published results of searches for $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels in the 7 TeV data and results from improved analyses of the $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels in the 7 TeV data. Clear evidence for the production of a neutral boson with a measured mass of $126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (syst.) GeV}$ is presented. This observation with a significance of 5.9 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of 6.3×10^{-9} , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

ATLAS: 2011 szerző,
4 magyar

Phys.Lett.B.716.1-29.12



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC ☆

CMS Collaboration*

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.

ARTICLE INFO

Article history:
Received 31 July 2012
Received in revised form 9 August 2012
Accepted 11 August 2012
Available online 18 August 2012
Editor: W.-D. Schlatter

ABSTRACT

Results are presented from a search for the standard model Higgs boson in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the Compact Muon Solenoid experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to 5.1 fb^{-1} at 7 TeV and 5.3 fb^{-1} at 8 TeV . The search is performed in five decay modes: $\gamma\gamma$, ZZ , W^+W^- , $\tau^+\tau^-$, and $b\bar{b}$. An excess of events is observed above the expected background, with a local significance of 5.0 standard deviations, at a mass near 125 GeV , signaling the production of a neutral boson with a spin and parity quantum number consistent with the standard model Higgs boson. The excess is significant at the 5σ level in the $\gamma\gamma$ and ZZ channels. The excess is most significant in the two decay modes with the best mass resolution, $\gamma\gamma$ and ZZ , and a combined fit to these signals gives a mass of $125.3 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.5 \text{ (syst.) GeV}$. The decay to two photons indicates that the new particle is a boson with spin different from one.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

CMS: 2009 szerző,
21 magyar

CMS: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$

CMS : $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$ animated



CMS-vezérlő, 2012 május 2, 15h 45p



<http://cms.web.cern.ch/content/cms-control-room-webcams>

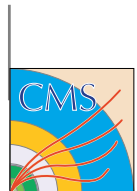
DCS-koordinátor: Szillási Zoltán, ATOMKI; DQM-felügyelő: HD

Ügyelet: Spanyol, holland, kínai (hölgy), francia, magyar, orosz (férfi)



A Higgs-bozon vizsgálata 2012 óta

- Feltételezve: 1964, megfigyelve: 2012, Nobel-díj: 2013.
- $M_H = 125$ GeV, nem látunk több Higgs-bozont
- Minden tulajdonsága megfelel a Standard Modell előrejelzéseinek
- Tanulmányozni fogjuk, mint a Z-bozont a LEP-nél
- Megfigyelése mérföldkő, de nem oldja meg a SM elméleti problémáit



Másik szimmetriasértés: antianyag

Minden anyagi részecskének van antirészecskéje

Pl. proton (a hidrogénatom magja) $\Leftrightarrow$ antiproton.

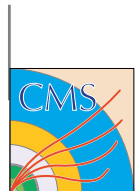
Ha részecske antirészecskéjével ütközik,
megsemmisülnek, energiájuk szétsugároz.

Sugárzás atommag terében részecske + antirészecske
párokat tud kelteni.

Kisebb energián elektron-pozitron párt,
nagy energián pl. ($E > 2$ protontömeg) proton-antiprotont.

Nincsenek antianyag-csillagok: ősrobbanás után hova lett
az antianyag?

Lehet különbség részecske és antirészecskéje között??



A CERN antianyaggyára, 2000–



Megvalósíthatósági tanulmány, 1992

M. Charlton, J. Eades, D. Horváth, R. J. Hughes, C. Zimmermann:
Antihydrogen physics, Physics Reports 241 (1994) 65.



A CERN antianyaggyára (AD)

az anyag–antianyag szimmetria ellenőrzésére
épült



Hat antianyag-kísérlet az AD-nál, antiprotonos atomok, antihidrogén vizsgálata.

Antihidrogén: antiproton és antielektron (pozitron)

ASACUSA: Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons



Tokió, Aarhus, Bécs, Brescia, Budapest, Debrecen, München

Proton és antiproton tömege egyezik?

M. Hori, A. Sótér, D. Barna, A. Dax, R.S. Hayano, S. Friedreich, B. Juhász, T. Pask, E. Widmann, D. Horváth, L. Venturelli, N. Zurlo:

Two-photon laser spectroscopy of $p\bar{b}ar-He^+$ and the antiproton-to-electron mass ratio,

Nature 475 (2011) 484-488

M. Hori, H. Aghai-Khozani, A. Sótér, D. Barna, A. Dax, R. Hayano, T. Kobayashi, Y. Murakami, K. Todoroki, H. Yamada, D. Horváth, L. Venturelli:

Buffer-gas cooling of antiprotonic helium to 1.5 to 1.7 K, and antiproton-to-electron mass ratio,

Science 354 (2016) 610.

Egyezik, 10^{-12} pontossággal!



Köszönöm a figyelmet!

