

# Bevezetés a részecskefizikába

*Előadássorozat fizikatanárok részére*

*(CERN, 2014 aug. 19.)*

*(Pásztor Gabriella helyett)*

**Horváth Dezső**

horvath.dezso@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest  
és ATOMKI, Debrecen

# Részecskefizika 2: SM és Higgs-bozon

## Vázlat

### C. A standard modell (SM) ellenőrzése

- Z-szélesség és a 3 család
- A SM diadalmenete
- CPT-invariancia és ellenőrzése

### D. A Higgs-bozon felfedezése

- A Compact Muon Solenoid (CMS)
- LHC: p-p ütközések
- A Higgs-bozon megfigyelése

# A standard modell

Kölcsönhatások mértékszimetriákból  $\rightarrow$  zérus tömegek

Elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítése és szétválasztása

a BEH-mechanizmus jótékony közreműködésével

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

Vákuumhoz 4-komponensű, szimmetriasértő mező.

Elrontott kombinált mértékszimetriából leválasztunk jó elektromágnesest  $\Rightarrow$  zérus tömegű foton, OK!

Maradék: gyenge kölcsönhatás.

BEH-mező 3 szab. foka  $\Rightarrow$  Z,  $W^+$ ,  $W^-$  tömege

Gyenge kölcsönhatás 3 nehéz bozonnal + fermiontömegek

Negyedik szab. fok: nehéz skalár bozon

A tárgyak tömege NEM a BEH-mechanizmustól van,

a nukleonok tömege csaknem tiszta energia!

# A standard modell állatkertje



# A Z-csúcs ( $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \dots$ )

Rezonancia:  $E_{CM}^2 = M_Z^2$



$$M_Z = 91.1875 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

Bomlási szélesség:

$$\Gamma_Z = \Gamma_{e^+e^-} + \Gamma_{\mu^+\mu^-} + \Gamma_{\tau^+\tau^-} + \Gamma_{\text{had}} + \Gamma_{\text{inv}}$$

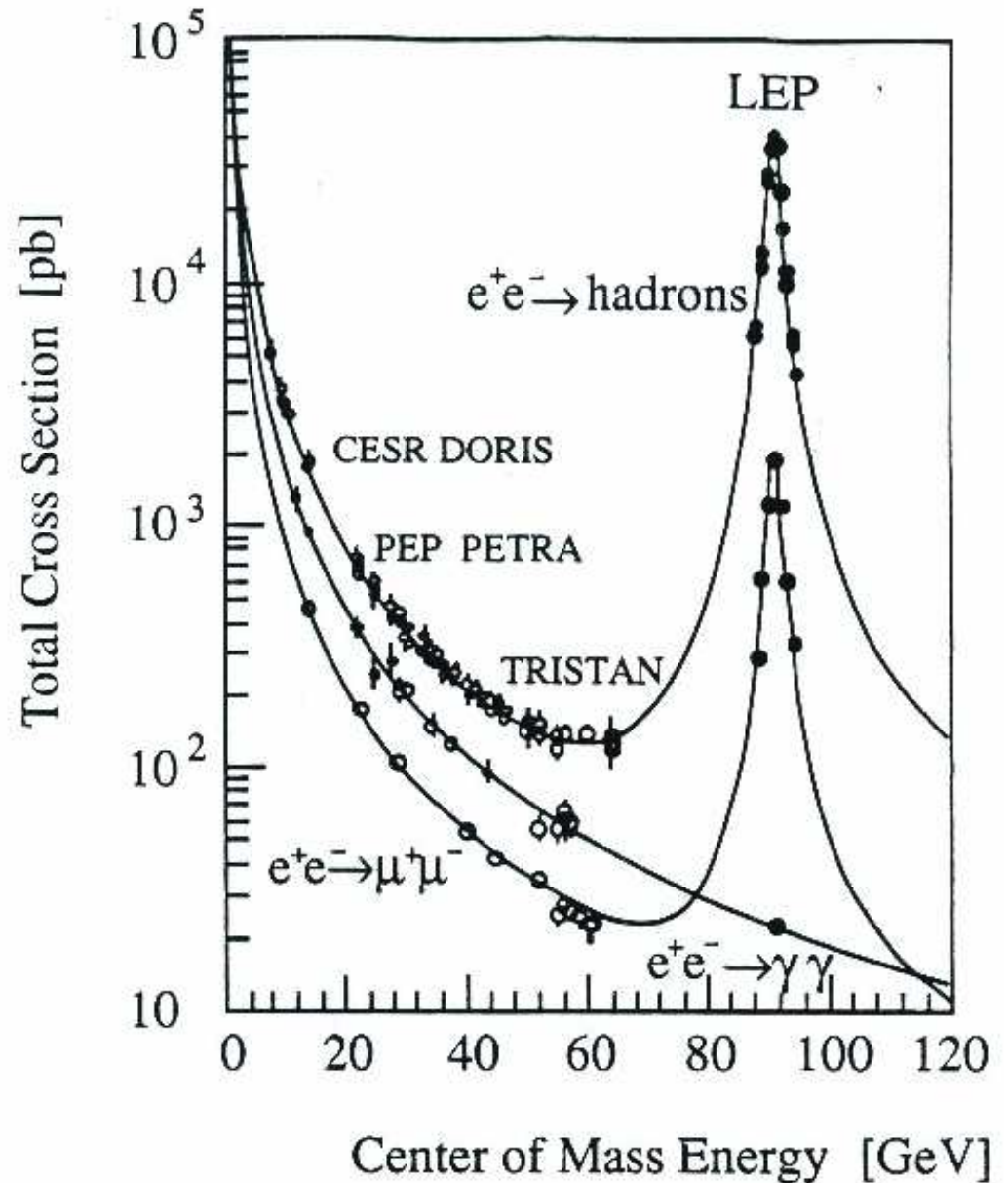
SM mindegyiket megjósolja

Illesztés LEP-adatokhoz  $\Rightarrow$

$M_Z, \Gamma_Z, \Gamma(Z \rightarrow \dots)$  vs.  $E_{CM}$

A láthatatlan szélesség:

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_Z &= \\ 1 - \Gamma_{\text{hadr}}/\Gamma_Z - 3 \times \Gamma_{e^+e^-}/\Gamma_Z &= \\ &= (20,0 \pm 0.6)\% \end{aligned}$$



# A 3 fermioncsalád

A láthatatlan szélesség:

$$\Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_Z = (20,0 \pm 0,06)\%$$

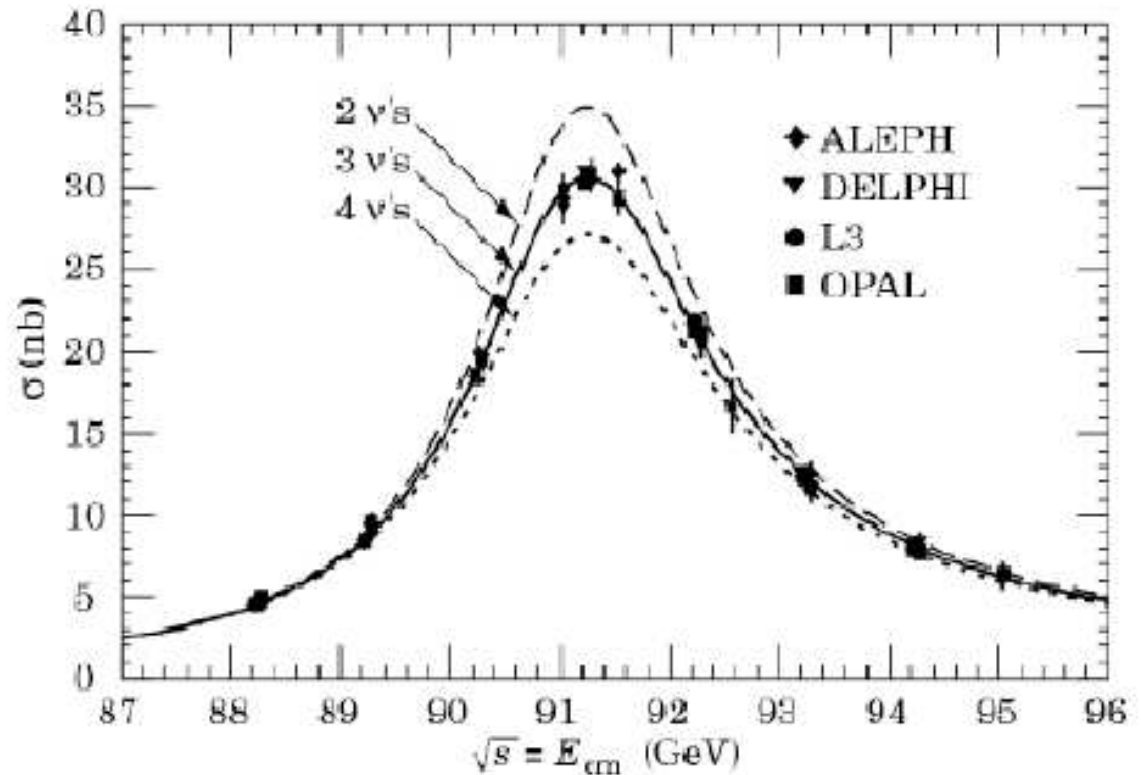
Standard modell: neutrínók

$$\Gamma_{\nu\bar{\nu}} = 1,979 \Gamma_{\ell+\ell^-}$$
$$\text{LEP: } \Gamma_{\ell+\ell^-}/\Gamma_Z = (3,3658 \pm 0,0023)\%$$

Könnyű neutrínók száma:

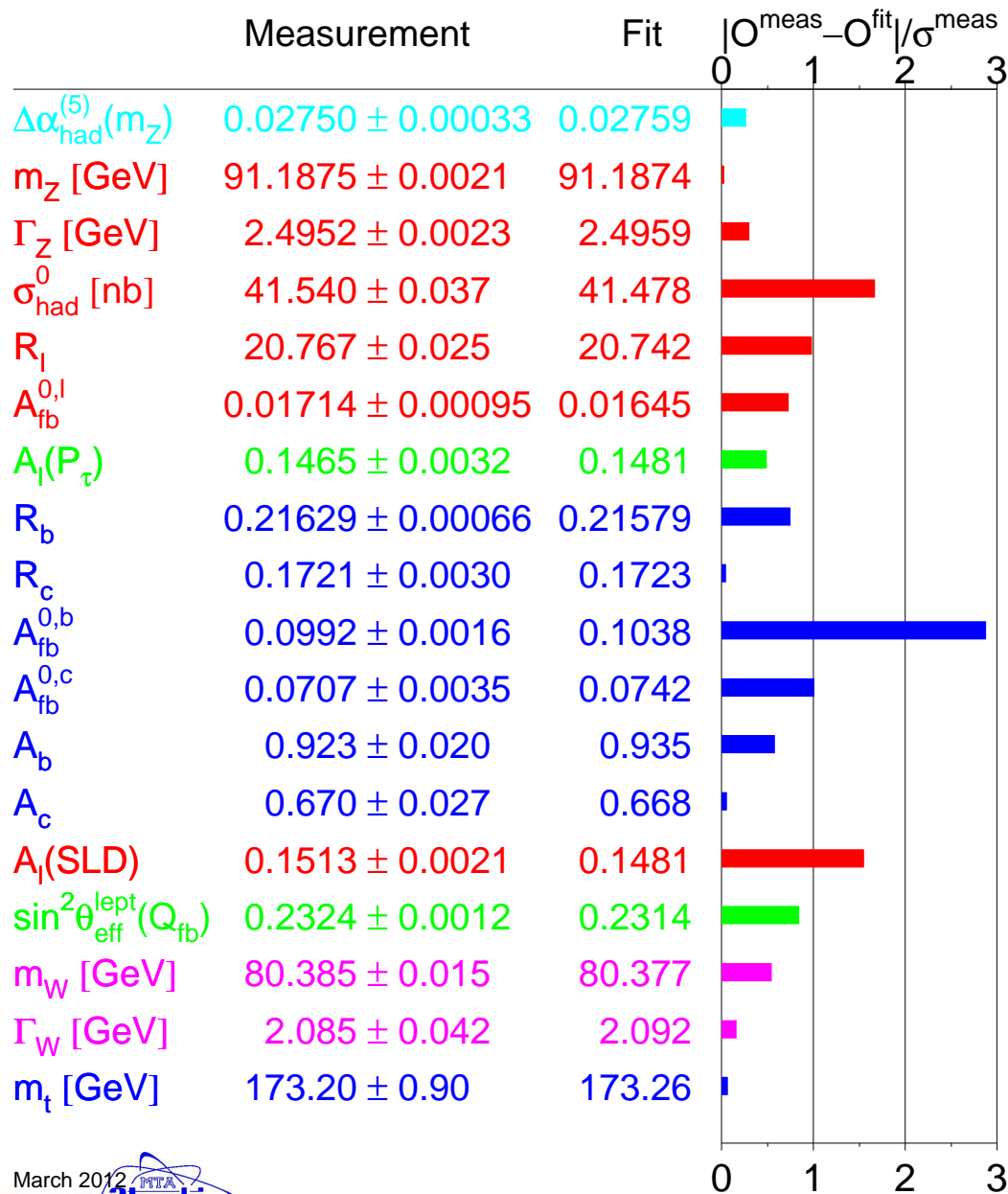
$$N_\nu = \Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_{\nu\bar{\nu}} = 3,003 \pm 0,002$$

$\sigma(Z \rightarrow \text{hadrons})$



SM-ben 3 leptoncsalád  $\Rightarrow$  3 kvarkcsalád (össztöltés 0!)

# A standard modell diadalmenete



Állapot 2012 óta

Valamennyi kísérlet  
sokszáz mérésének  
analízise:

$|Mért\text{-számolt}|/\text{szórás}$

Kilógó adat:

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

előre-hátra aszimmetriája

LEP Electroyenge munkacsoport:

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

# *CPT*-invariancia

A térelmélet alaptétele:

$$CPT|p(r, t)\rangle \sim |\bar{p}(-r, -t)\rangle \sim |p(r, t)\rangle$$

azaz szabad **antirészecske**  $\sim$  **részecske**,  
amely téridőben visszafelé mozog.

*CPT* sérülése sértené:

- a kölcsönhatások **lokálisát** azaz a **kauzalitást**, vagy
- **unitaritást**, az **anyag, információ, ...** megmaradását,
- vagy a Lorentz-invarianciát.

Elmélet általában: *CPT* nem sérül

De vannak *CPT*-sértő modellek  $\Rightarrow$  ellenőrizni



# Részecske = – antirészecske ?

- $[m(K^0) - m(\bar{K}^0)]/m(\text{átlag}) < 10^{-18}$
- proton  $\sim$  antiproton? ( $m, q, \mu$  összehasonlítása)
- hidrogén  $\sim$  antihidrogén? ( $2S - 1S$ )

Kétfotonos  
spektroszkópia

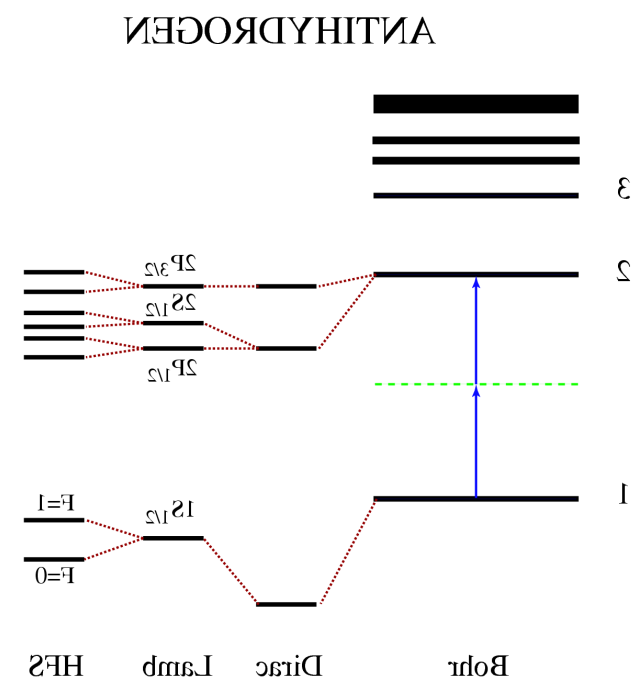
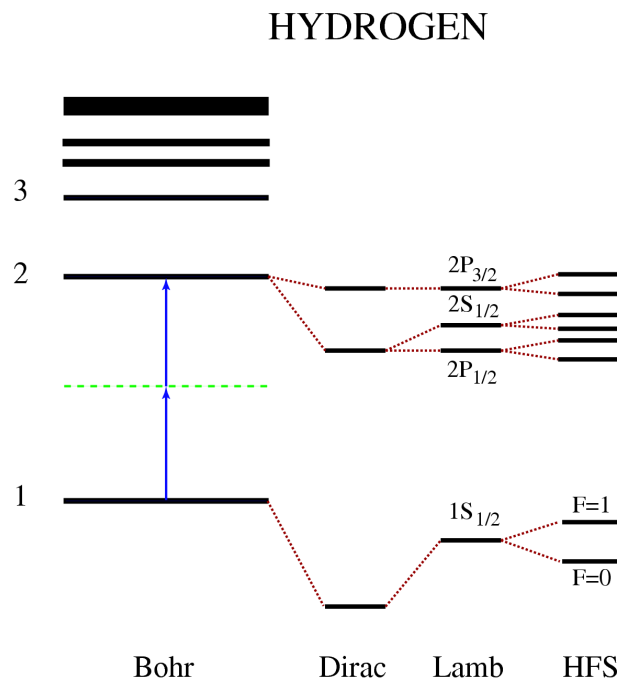


keskeny vonal

ellentétes irányú  
lézerek



Doppler-mentes



# A CERN antiproton–lassítója (AD)

a *CPT*–invariancia ellenőrzésére épült

Három *CPT*–kísérlet az AD-nál:

ATRAP:  $q(\bar{p})/m(\bar{p}) \leftrightarrow q(p)/m(p)$   
 $\bar{H}(2S - 1S) \leftrightarrow H(2S - 1S)$

ALPHA:  $\bar{H}(2S - 1S) \leftrightarrow H(2S - 1S)$

ASACUSA:

$$q(\bar{p})^2 m(\bar{p}) \leftrightarrow q(p)^2 m(p)$$
$$\mu_e(\bar{p}) \leftrightarrow \mu_e(p)$$

Vörös: működik, zöld: tervben



ASACUSA: Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons

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



5 magyar résztvevő



# Az antiproton tömege és töltése

Protoné jól ismert:

$$m(p)/m(e) = 1836.15267261(85)$$

$$q(e) = 1.602176462(63) \text{ C}$$

$$\text{Pontosság: } 5 \cdot 10^{-10} \text{ és } 4 \cdot 10^{-8}$$

Relatív mérés: proton  $\Leftrightarrow$  antiproton

Ciklotron-frekvencia csapdában  $\rightarrow q/m$

TRAP (LEAR)  $\Rightarrow$  ATRAP (AD)

Harvard, Jülich, München, Szöul

Atomi átmenetek energiája  $\bar{p}$ -atomban:

$$E_n \approx -m_{\text{red}} c^2 (Z\alpha)^2 / (2n^2) \rightarrow m \cdot q^2$$

PS-205 (LEAR)  $\Rightarrow$  ASACUSA (AD)

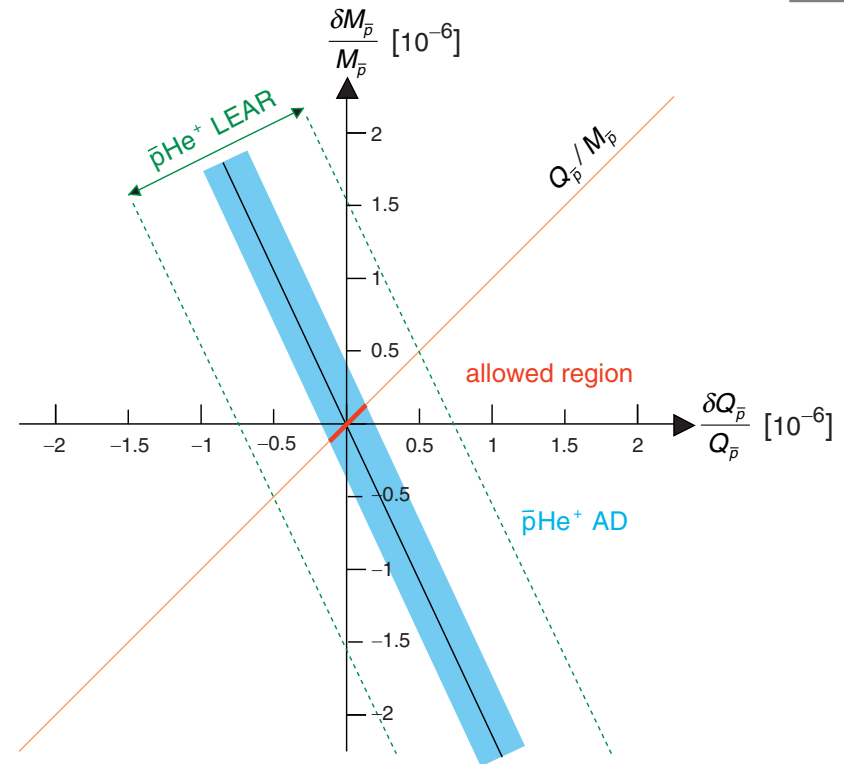
Felső határ  $CPT$ -sértésre: 2 ppb ( $2 \times 10^{-9}$ )

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:

Nature 475 (2011) 484-488



Tokió  
Asakusa-  
negyede  
télén

# CMS (Compact Muon Solenoid) detektor

Súly: 14000 tonna, kétszer annyi vas, mint Eiffel-toronyban

A legnagyobb szupravezető szolenoid:

belső átmérő 6 m,  $B = 4$  Tesla

3275 fizikus (44 magyar), 790 mérnök és technikus 41 ország 179 intézményéből (USA > Olaszo. > Németo. > Oroszo.)

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: Worldwide LHC Computing Grid

Tier-2 állomás Budapesten, Tier-3 Debrecenben



# Munka 160 müonkamrán



Béni Noémi és Szillási Zoltán (Debrecen)



# HF: kvarcszálak acélban

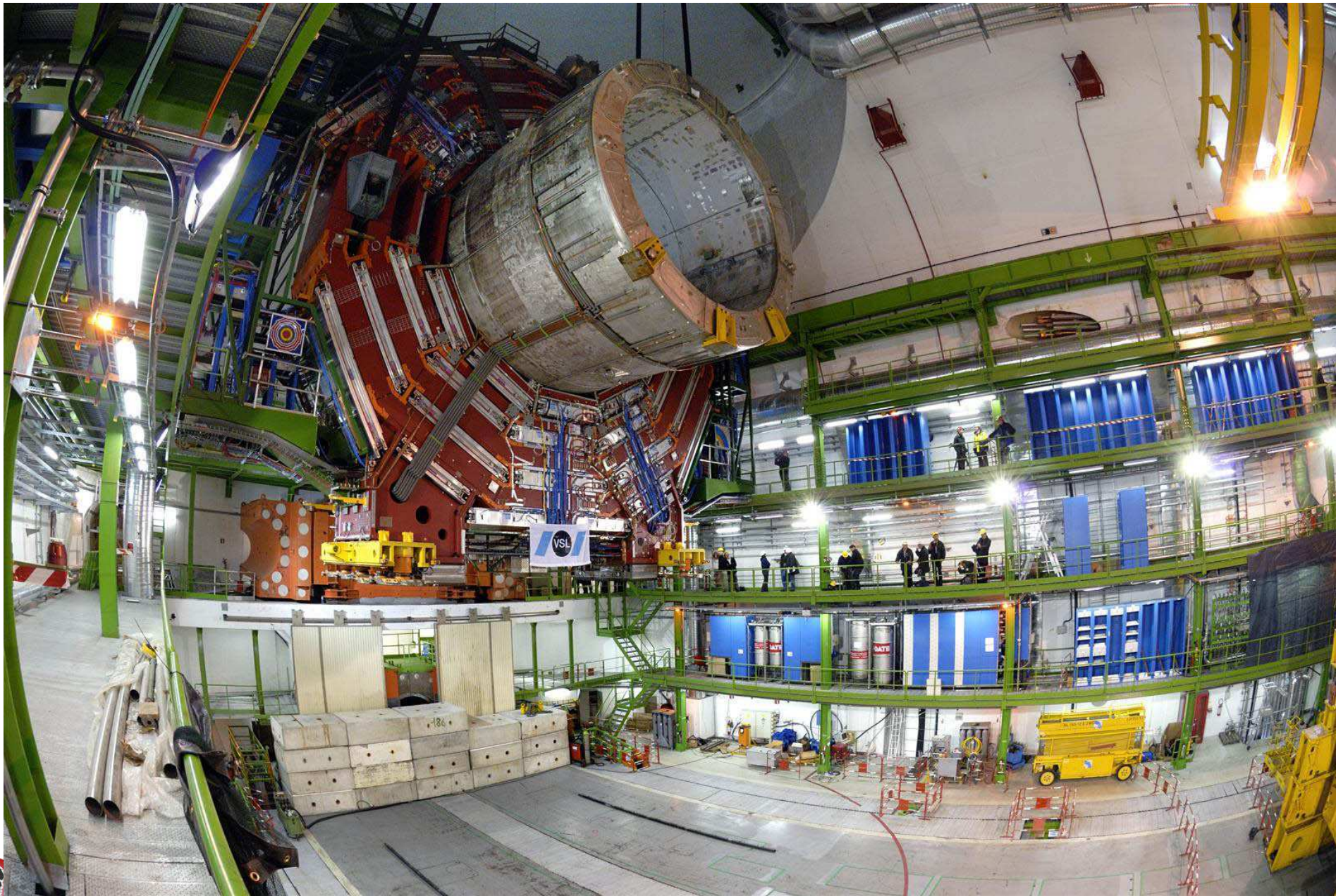


Minden CERN-es magyar fűzte

Szálkalibráció kész darabon



# A CMS mágnesese



# LHC: a Jó, a Rossz és a Csúf



**Jó**

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



**Rossz**

Az érdekesebb dolgok előfordulási  
gyakorisága nagyon kicsi  
( $10^{-6} - 10^{-3}$ )

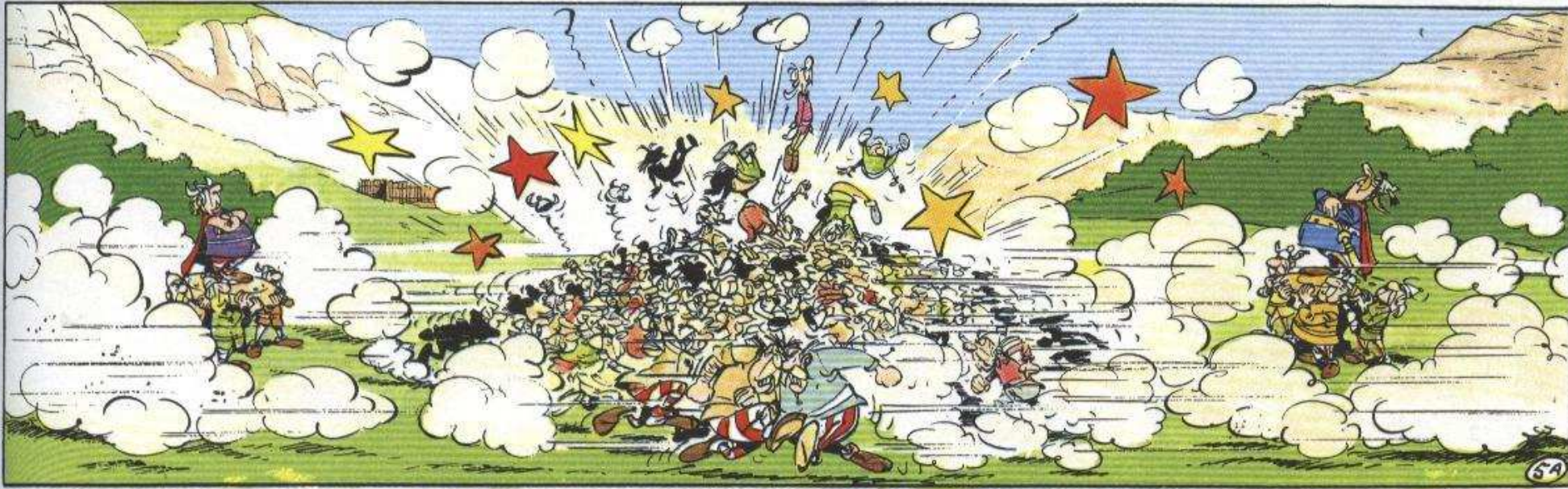


**Csúf**

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



# LHC: A p-p ütközések bonyolultak!

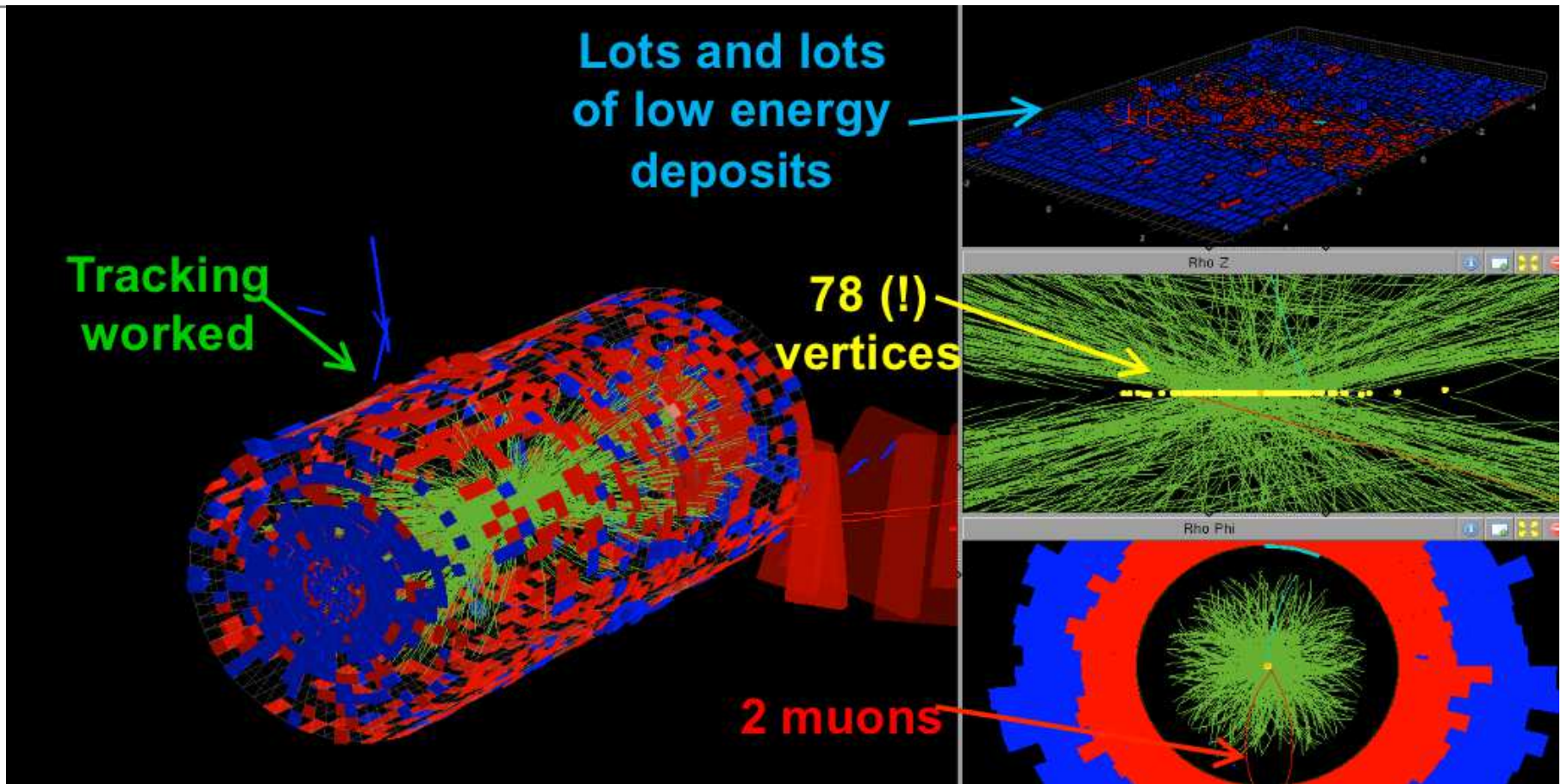


A relativisztikus proton impulzusának  
felét kvarkok, másik felét gluonok adják

p-p ütközés = kiterjedt, összetett objektumoké

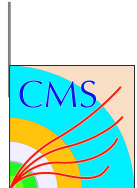
$e^+ - e^- \Leftrightarrow p - p \sim$  acélgolyó  $\Leftrightarrow$  túrógombóc

# CMS: 78 p-p ütközés egyszerre!



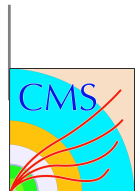
Sok p-p ütközés lehet ugyanabban az eseményben (csomag-ütközésben).

Rekord: 78 azonosított p-p ütközés. Csak müonok miatt felírva.



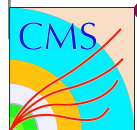
# Viccek a Higgs-bozonról, előtte

- A bárba besétál egy Higgs-bozon.  
Azt mondja neki a csapos: *Vigyázzon, magát sokan keresik!*
- A bárba besétál egy Higgs-bozon. A csapos nem érti...
- Szeretnék végre látni egy jó Higgs-bozonos viccet. Biztosan létezik, de évekbe telhet, amíg rátalálunk
- A templomba besétál egy Higgs-bozon. Azt mondja neki a pap: *Magát nem szívesen látjuk itt.. Mire ő: Pedig nélkülem itt soha nem lesz tömeg!*  
Angolul: *But without me how can you have mass?*  
(Mass: súlyos tömeg, embertömeg, mise)



# Viccek a Higgs-bozonról, utána

- A bárba besétál egy Higgs-bozon. Csapos: *Mi van?* mire ő: *ÉN!!*
- A Higgs-bozon felfedezése rossz viccek ősrobbanásához vezetett.
- A Higgs-bozon felfedezését a fizikusok *tömegesen* ünnepelték.
- A Higgs-mező szabályozása valóban lehetővé tenné a *tömegpusztító* fegyvereket.
- Nem tudom, mi a csuda az, de klassz, hogy felfedezték!
- Gondosan ellenőrizni kell. A múltkor is azt hittem, Higgs-bozont találtam az ágyam alatt, de csak egy üveggolyó volt.
- Összeveszett a top-kvark a Higgs-bozonnal. A kvark elrohant, mert a bozon csak a súlyát emlegette, semmi mást nem mondott magáról.
- Jó, hogy megvagy, Isten-részecske. Én csak egy átlagember vagyok, aki nem ért téged.



# Magyarázatok, analógiák

## Mozgás közegben

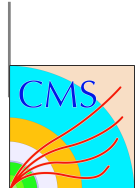
Vízben futás, híresség fékeződése emberek között. Megmagyarázza a különböző tömegeket, de nem a BEH-mezőben való mozgás hozza létre a részecske tömegét.

## Elektromos mező

Töltött részecskére hat, semlegesre nem. A BEH-mező a legtöbb részecskével kölcsönhatásba lép, tömeget adva nekik, a fotonnal és a gluonokkal viszont nem, azoknak zérus marad a tömege.

## Szivárvány

Vákuumban mindenféle fénynek azonos a sebessége, közegben viszont felbomlik: a kölcsönhatás (szóródás) miatt a hosszabb hullámhosszú kevésbé szóródik, gyorsabban halad. Különböző részecskékre a BEH-mező különbözőképpen hat, ezért különböző a tömegük.

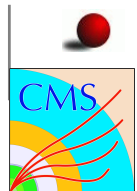


# Spontán szimmetriasértés: a történet

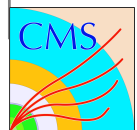
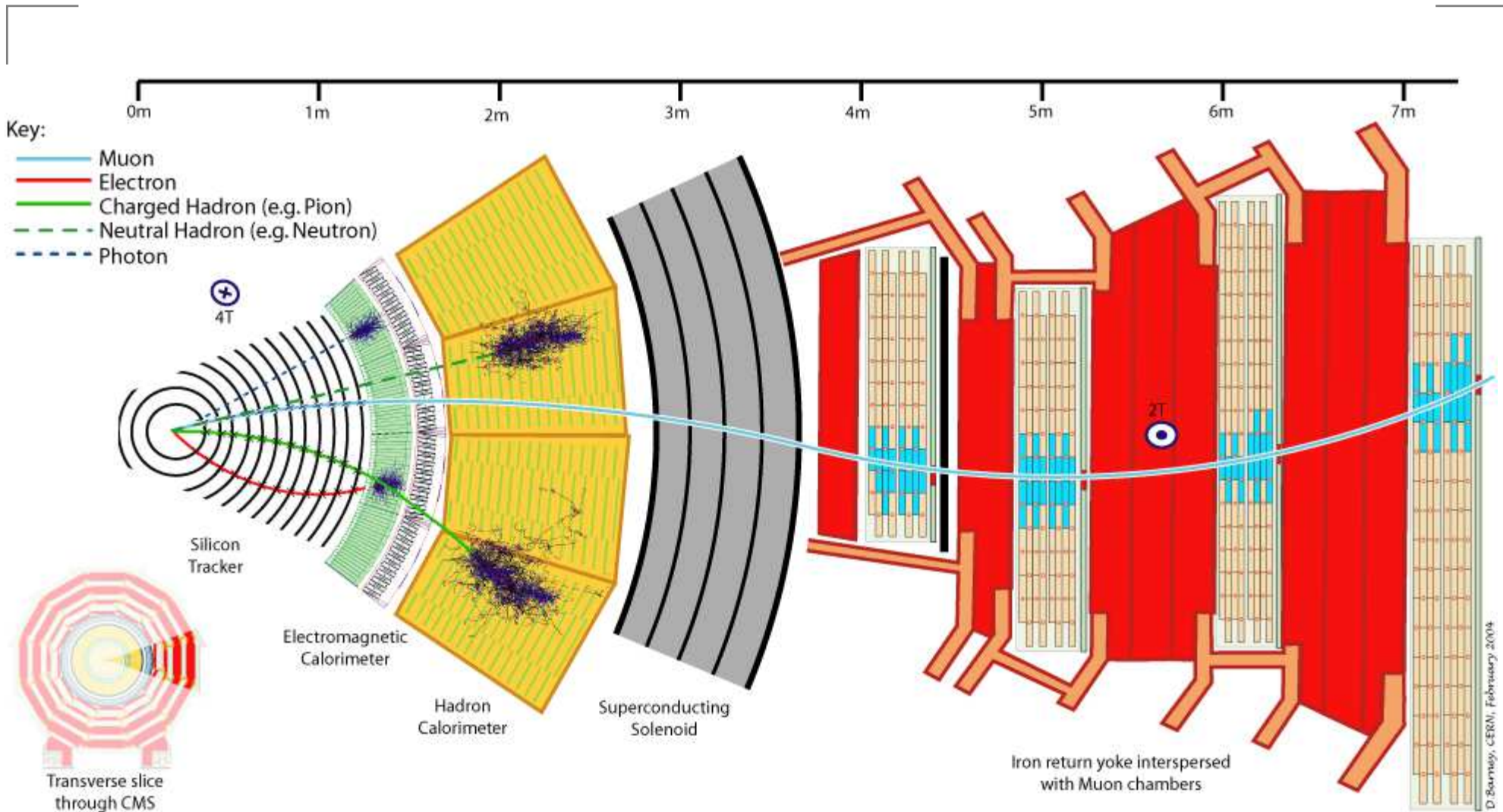
- Mechanizmus: Anderson javasolja 1963-ban
- Kidolgozzák és publikálják:
  - F. Englert és R. Brout: 1964.08.31.
  - P. Higgs: 1964.09.15.
  - G.S. Guralnik, C.R. Hagen és T.W.B. Kibble: 1964.11.16.
- Skalár bozon: Peter Higgs, 1964-65
- Bozon megfigyelve: ATLAS és CMS, 2012
- Nobel-díj: F. Englert és P. Higgs, 2013

## Az elnevezés (vitatéma)

- Igazságos: Higgs-bozon, BEH-mechanizmus
- Igazságtalan: Higgs-mechanizmus, -potenciál, -mező



# Kalorimetria: a CMS-detektor szelete



# A SM Higgs–bozonja

Spin nélküli, semleges, nehéz részecske  
kvantumszámok nélkül

A SM megadja a keletkezési és bomlási valószínűségeit.

Tömegfüggő, pl. fermion–párra bomlásé

$$\sigma(H \rightarrow f\bar{f}) \sim m_f^2 / m_W^2$$

A legnehezebb elérhető fermionokra bomlik

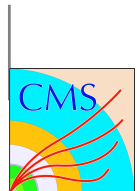
Tömeget a SM nem jósol, csak limitál:

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

Megfigyelnünk 2012 előtt nem sikerült.

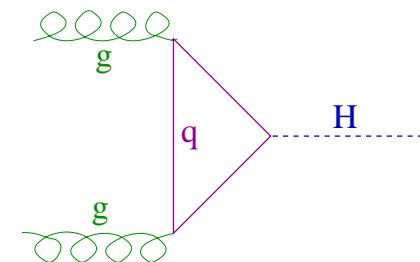
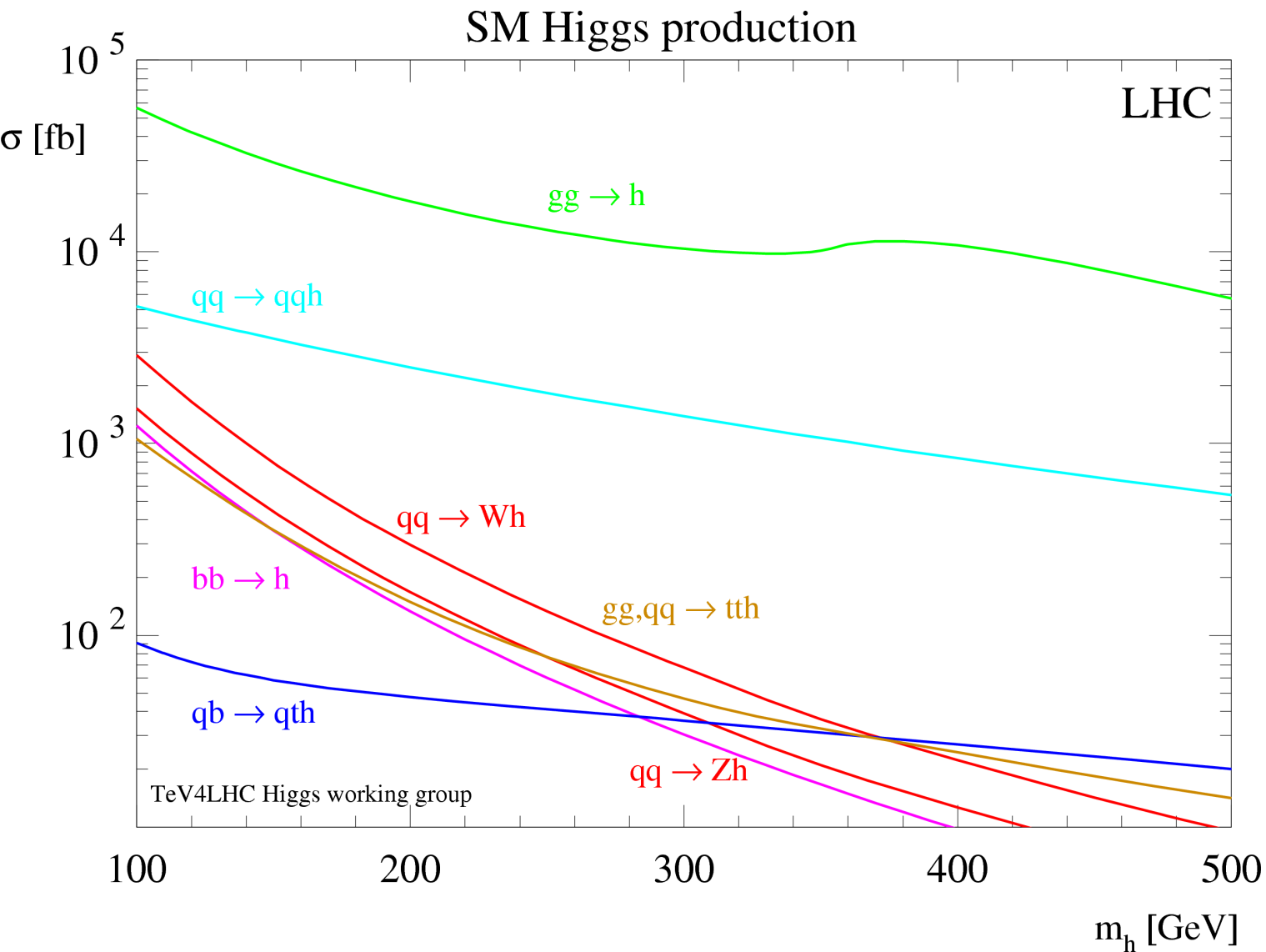
$$\text{LEP: } m_H > 114.4 \text{ GeV}$$

SM: muszáj léteznie!

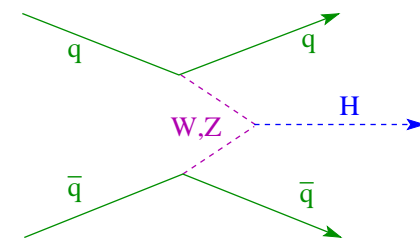




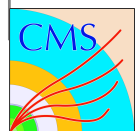
# Higgs-bozon keltése az LHC-nál



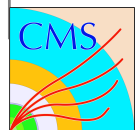
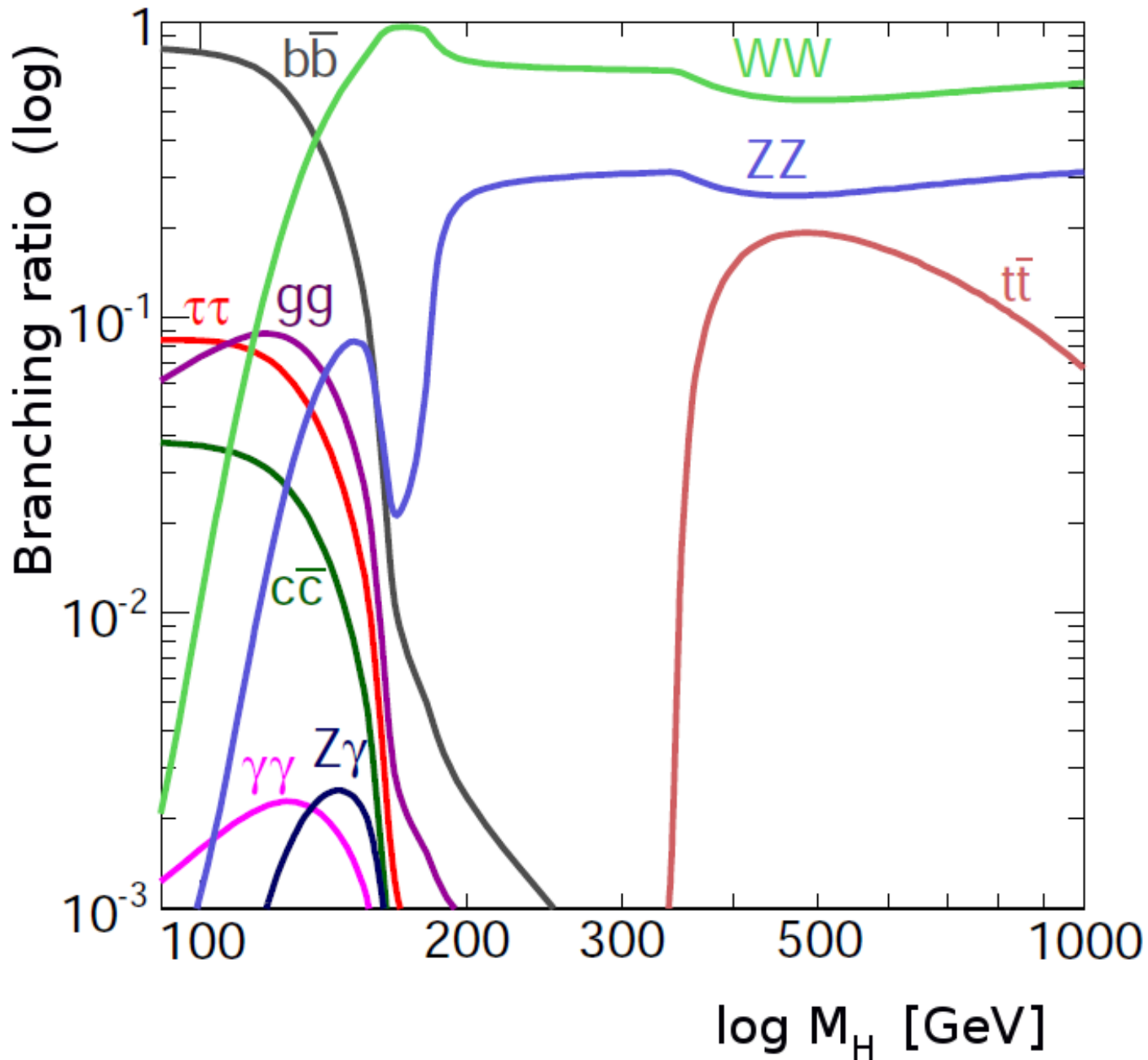
gluon-fúzió



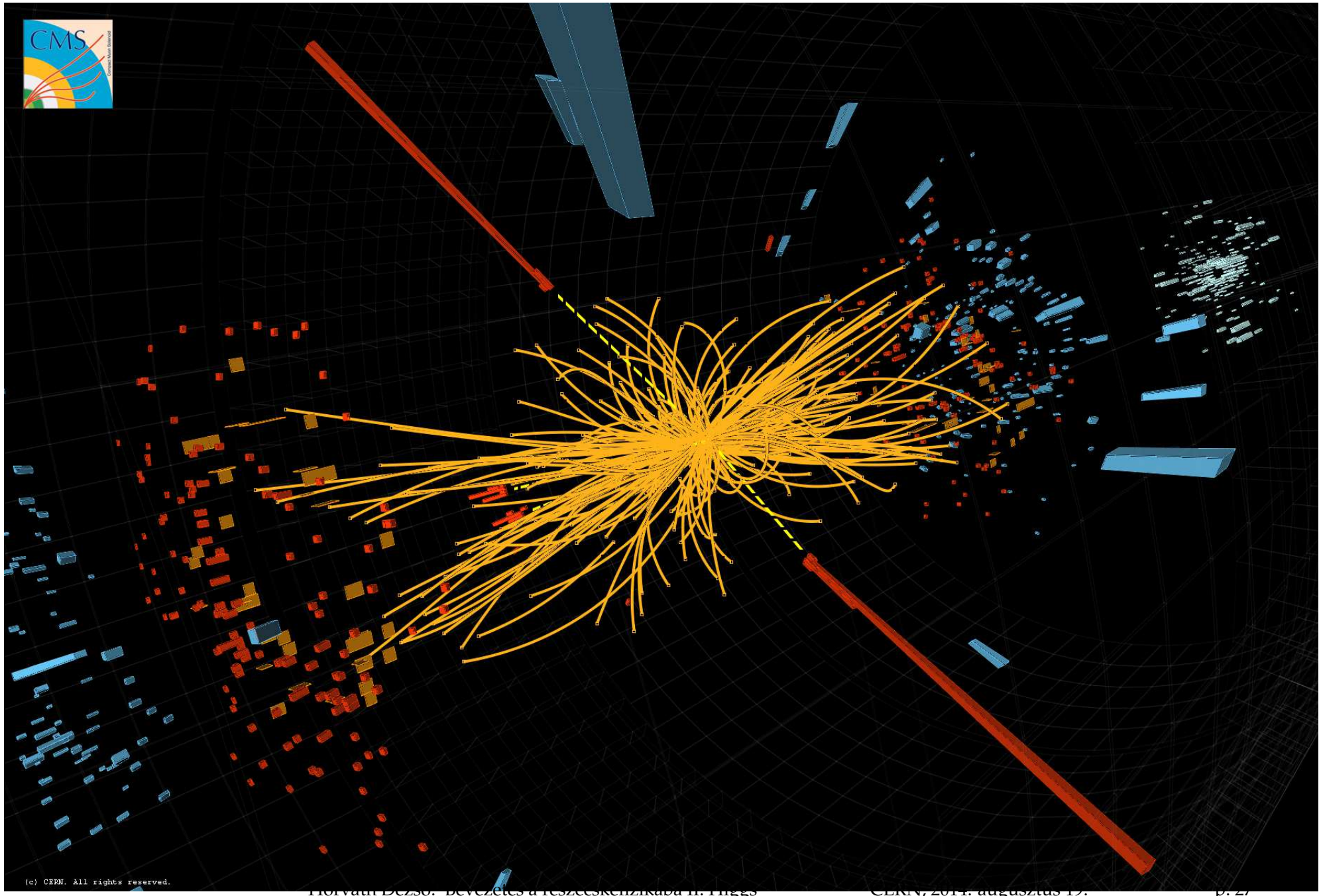
vektorbozon-fúzió



# A Higgs-bomlás csatornáit



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



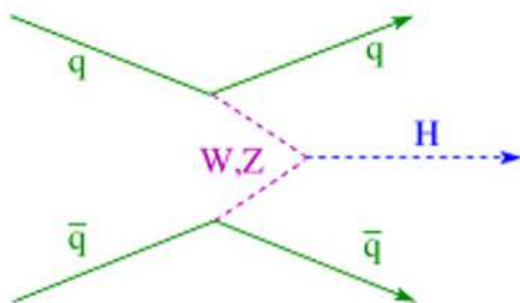
# 2012 július 4: valami van!

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  $5\sigma$  szignifikanciával) lát egy új H részecskét a SM Higgs-bozonjának megfelelő tulajdonságokkal.



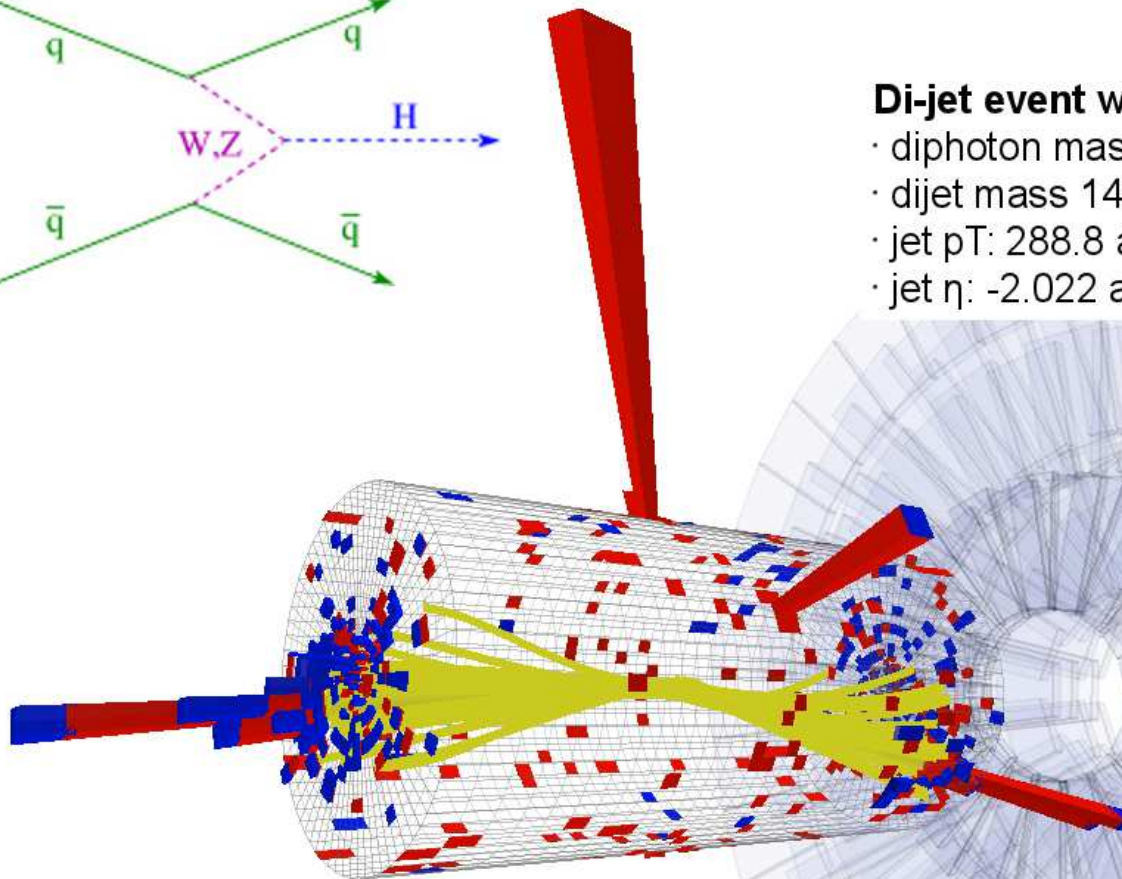
François Englert és Peter Higgs első találkozója

# CMS: $H \rightarrow \gamma\gamma$ (VBF)



## Di-jet event with:

- diphoton mass 121.9 GeV
- dijet mass 1460 GeV
- jet pT: 288.8 and 189.1 GeV
- jet  $\eta$ : -2.022 and 1.860

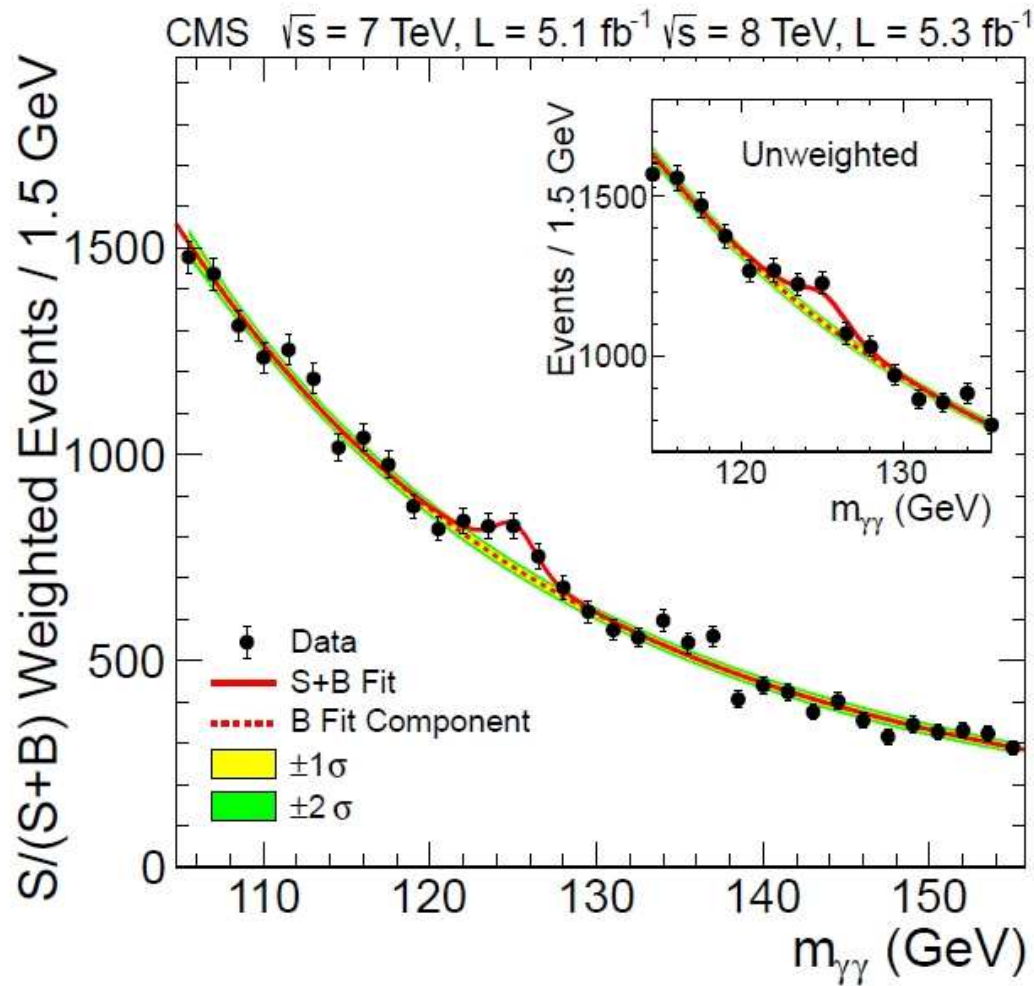


CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Sep 26 20:18:07 2011 CEST  
Run/Event: 177201 / 625786854  
Lumi section: 450

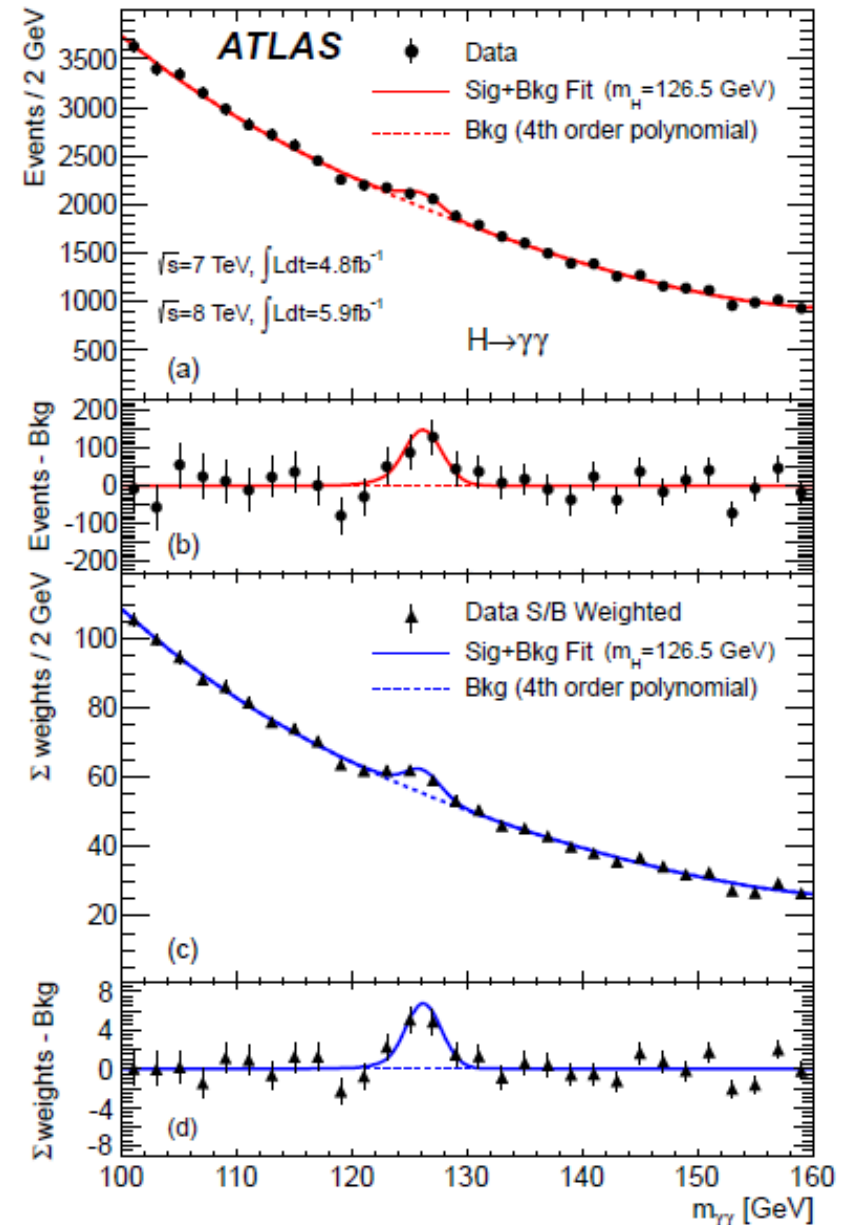
Bomlási pont a  $\gamma\gamma$  invariáns tömeg meghatározásához:  
Vektorbozon-fúziós események két hadronzápóra.

# H $\rightarrow$ $\gamma\gamma$ tömegeloszlása

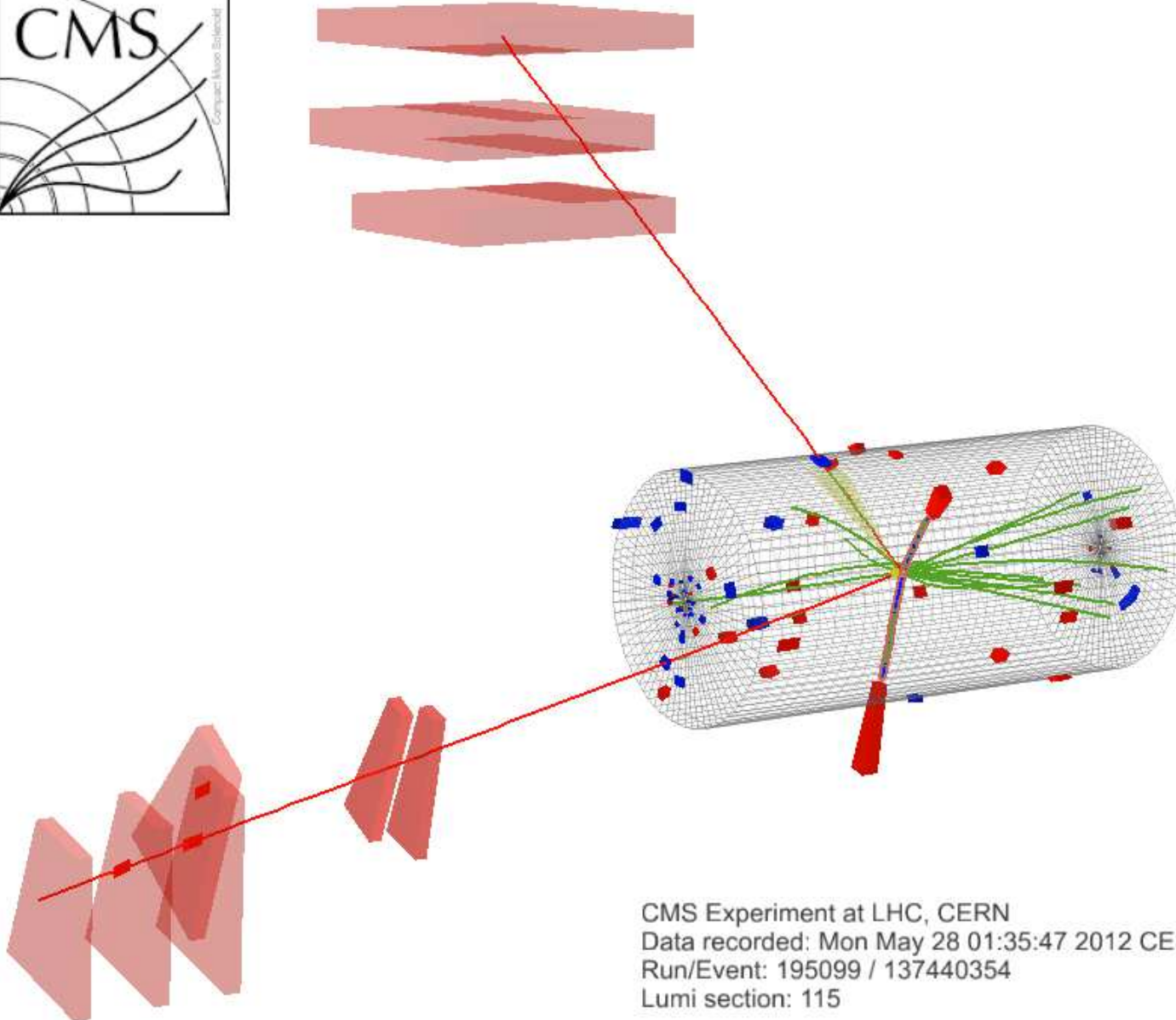
CMS



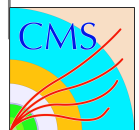
ATLAS  $\Rightarrow$



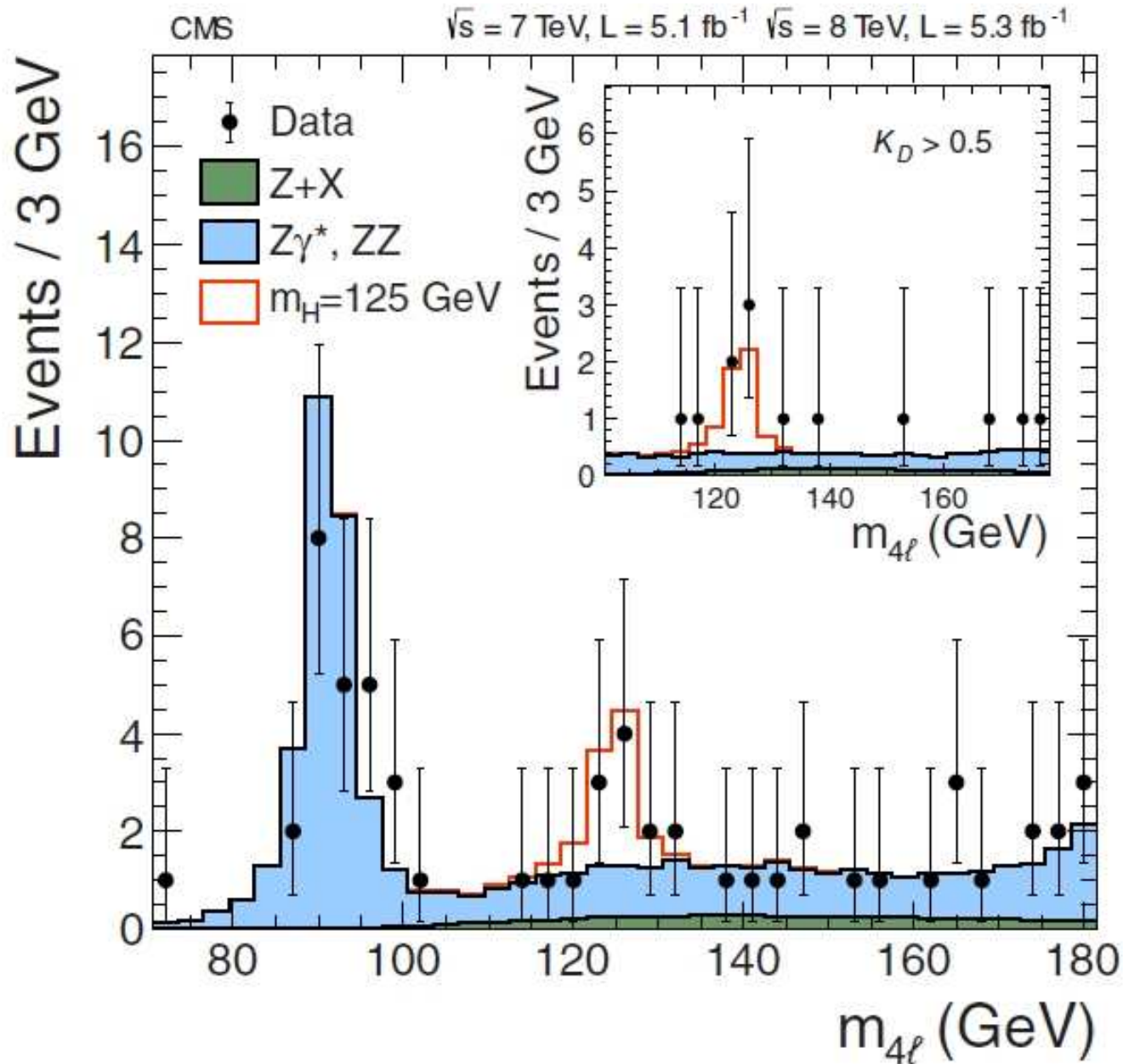
# CMS: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^- \mu^+ \mu^-$



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon May 28 01:35:47 2012 CEST  
Run/Event: 195099 / 137440354  
Lumi section: 115



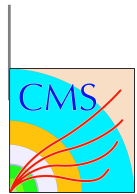
# CMS: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$



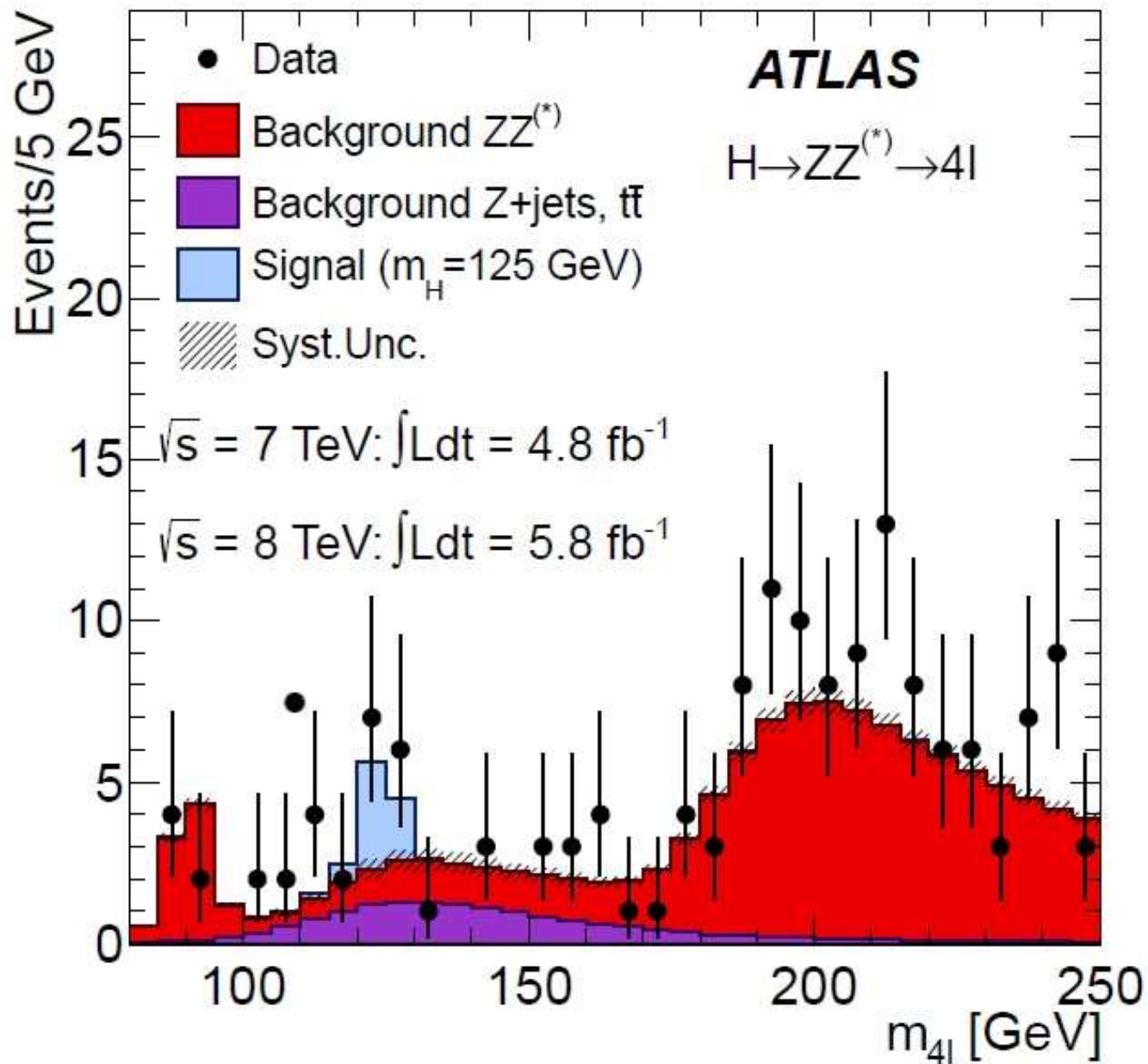


**CMS:  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$**

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



# ATLAS: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$



# Ez a SM Higgs-bozonja?

A Higgs-bozon tömege, 2014:

ATLAS:  $125.36 \pm 0.37$  (stat)  $\pm 0.18$  (syst) GeV

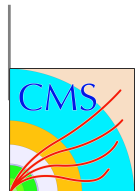
CMS:  $125.03 \left\{ \begin{array}{l} +0.26 \\ -0.27 \end{array} \right\}$  (stat)  $\left\{ \begin{array}{l} +0.13 \\ -0.15 \end{array} \right\}$  (syst) GeV

Relatív jelerősség a SM jóslatához képest:

CMS:  $1.00 \pm 0.09$  (stat)  $\left\{ \begin{array}{l} +0.08 \\ -0.07 \end{array} \right\}$  (theo)  $\pm 0.07$  (syst)

Nagyon úgy néz ki, hogy a SM Higgs-bozonját találtuk meg.  
Minden megfigyelt tulajdonsága arra vall

## SAJNOS!!

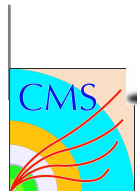


# Hogyan jutottunk idáig?

- CMS szándéknyilatkozat: 1992 (475 szerző)
- Technikai tervek (8 többszáz oldalas mű): 1995–2005
- Detektor jórészt felépítve a felszínen: 2000-2006
- Leeresztés darabokban, összerakás, befejezés: 2006-2008
- LHC elindul: 2008 (katasztrófa, javítás), majd 2009.
- 2010: 7 TeV, összegyűjtött luminozitás  $0.04 \text{ fb}^{-1}$
- 2011: 7 TeV,  $5.6 \text{ fb}^{-1}$
- 2012 április – december: 8 TeV,  $\sim 25 \text{ fb}^{-1}$

## LHC fejlődése:

- 2010 → 2011: 140-szeres luminozitás
- 2011 → 2012: 7 → 8 TeV, cca. ötszörös luminozitás



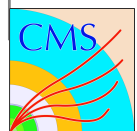
# CMS-vezérlő, 2012 május 2, 15h 45p



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

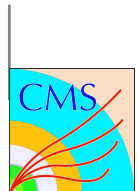
DCS-koordinátor: Szillási Zoltán, ATOMKI; DQM-felügyelő: HD

Ügyelet (ül): Spanyol, holland, kínai (hölgyek!), orosz, francia, magyar



# ATLAS és CMS: barátságos versengés

- Az amerikai Tevatronnál, amit az egyik kísérlet felfedezett, a másik később gyakran megcáfolta.
- ATLAS és CMS megállapodott, hogy ha valamelyik felfedez valamit, a szóvivő elmondja a főigazgatónak, aki odahívja a másik szóvivőt és megkéri, ellenőrizzék. Erre most nem volt szükség.
- CMS és ATLAS megállapodott, hogy nem használja a „Discovery” (*felfedezés*) szót, csak az „Observation”-t (*megfigyelés*).
- Egy időben, egymás után mondjuk el az új eredményeket, előre megállapodott menetrend alapján.
- Azonos folyóirat ugyanazon számában publikáltuk az új részecske (Higgs-bozon) megfigyelését.



# Fizikai Nobel-díj, 2013

A fizikai Nobel-díjat François Englert and Peter W. Higgs kapta „azon mechanizmus elméleti felfedezéséért, amely hozzájárul ahhoz, hogy megértsük a szubatomi részecskék tömegének eredetét, és amelyet mostanában megerősített a megjósolt alapvető részecske felfedezésével a CERN Nagy hadron-ütköztetőjénél az ATLAS és CMS kísérlet”.



Rolf-Dieter Heuer, a CERN főigazgatója, bejelenti a Nobel-díjat az ATLAS és CMS közös irodaépületében.

