

# A Világegyetem leghidegebb pontja: az LHC

*Székesfehérvár, 2010 jan. 19.*

**Horváth Dezső**

horvath@rmki.kfki.hu

MTA KFKI Részecske– és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest  
és MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen



# Vázlat

- Részecskék és kölcsönhatások
- A CERN és gyorsítói
- A nagy hadron-ütköztető  
(*Large Hadron Collider, LHC*)
- A *Compact Muon Solenoid (CMS)* kísérlet
- 2008. szeptember: átütő siker és katasztrófa
- 2008-2009: javítás
- 2009 nov-dec: diadalmas újraindulás
- A részecskefizika haszna

Jéki László: *Indul a legnagyobb részecskegyorsító*  
10-részes cikksorozat az LHC-ről: <http://origo.hu/tudomany>



# Előszó

A (részecske)fizika egzakt tudomány:

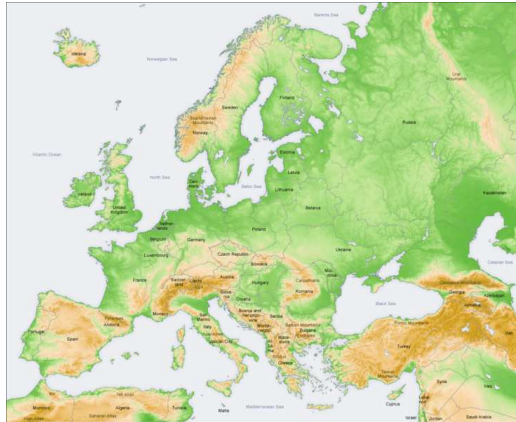
- Pontos matematikai formalizmuson alapszik.
- Elmélet érvényes, ha kiszámítható, és eredmény egyezik kísérlettel.
- Az igazi fogalmak mérhető mennyiségek, a szavak csak mankók.

Szavak  $\Leftrightarrow$  pontos matematika és kísérleti tapasztalat

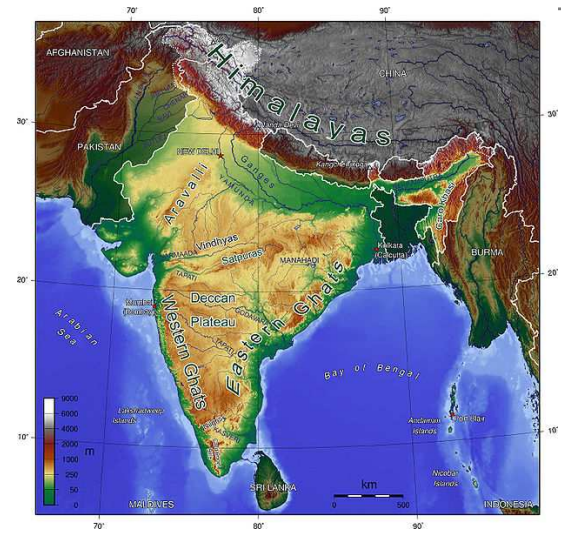


# A felfedezés rögös útja, 1492

A kutatás  
frontvonala:  
Az  
Atlanti-óceán  
partja



A kutatás  
célja:  
India elérése



A kutatás  
eszköze:  
Columbus hajói

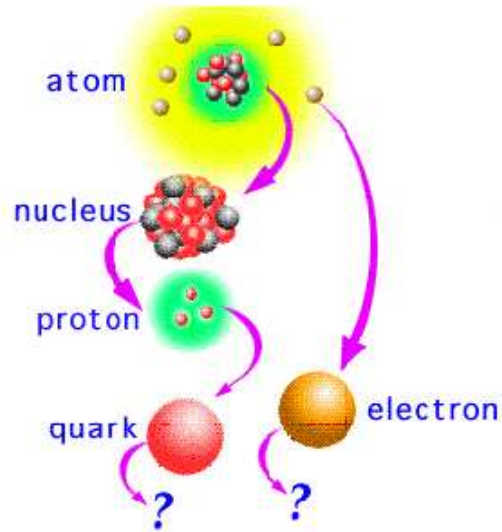


A kutatás  
eredménye:  
Amerika  
felfedezése

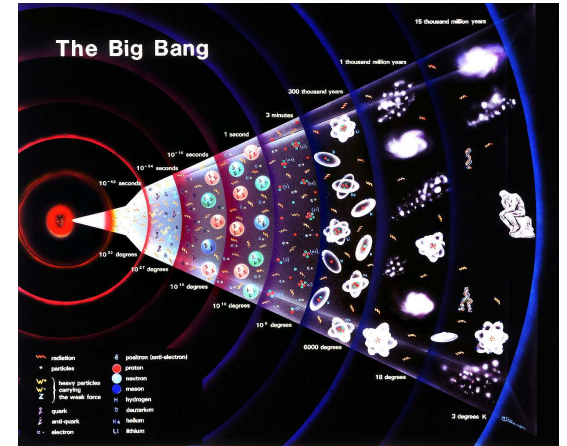


# A felfedezés rögös útja, 2009

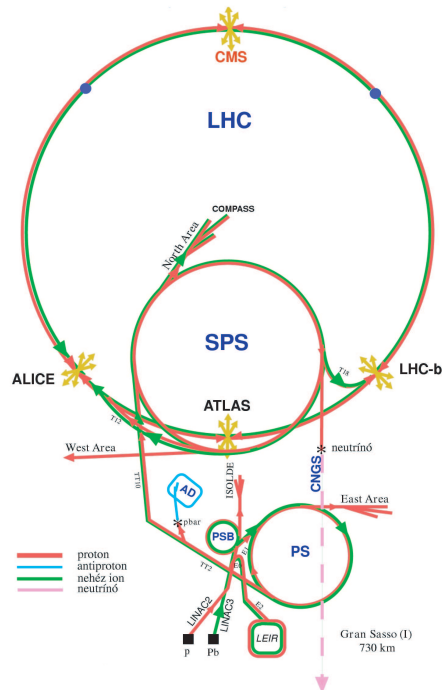
A kutatás frontvonala:  
Az anyag mély szerkezete



A kutatás célja:  
Higgs-bozon, űsrobbanás utáni állapot



A kutatás eszköze:  
nagyenergiájú gyorsítók

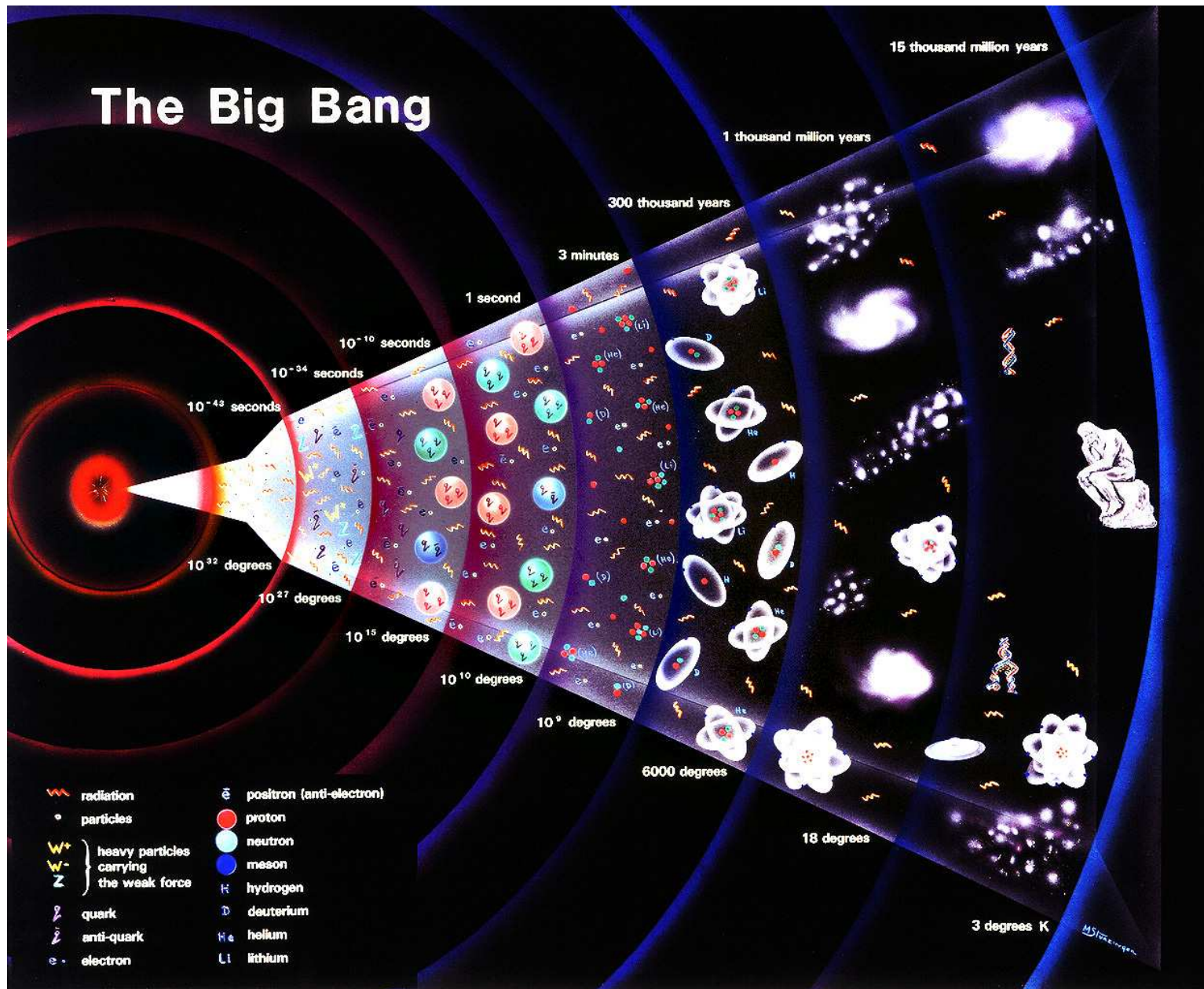


A kutatás eredménye:  
Új fizika?

?



# A Világegyetem története



# LHC = időgép??

Kezdet: ősrobbanás 14.5 milliárd éve

Hogyan mehetünk vissza időben, az Ősrobbanás közelébe?

- Távcső: 4 milliárd év a Nagy Bumm után (Európai Déli Obszervatórium, Chile, Very Large Telescope)
- Mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás: Párszáz ezer év (amikor az Univerzum átlátszó lett).
- Nagyenergiájú részecskeütközés: Milliomod másodperc (mielőtt az atomok kialakultak volna)

Ükanyánkkal nem találkozunk...



# A mikrovilág vizsgálata: nagy energia

1 eV = kinetikus energia, amelyet 1 V átszelésekor szerez egy elektron

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV};$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

| Tárgy            | méret, m   | energia |
|------------------|------------|---------|
| kicsi            | $10^{-3}$  |         |
| baktérium        | $10^{-5}$  |         |
| $\lambda$ (fény) | $10^{-7}$  | 1 eV    |
| atom             | $10^{-10}$ | 1 keV   |
| atommag          | $10^{-14}$ | 1 GeV   |
| elektron         | $10^{-18}$ | 1 TeV   |

Nagyobb energia  $\Rightarrow$  kisebb távolság  $\Rightarrow$  mélyebb szerkezet



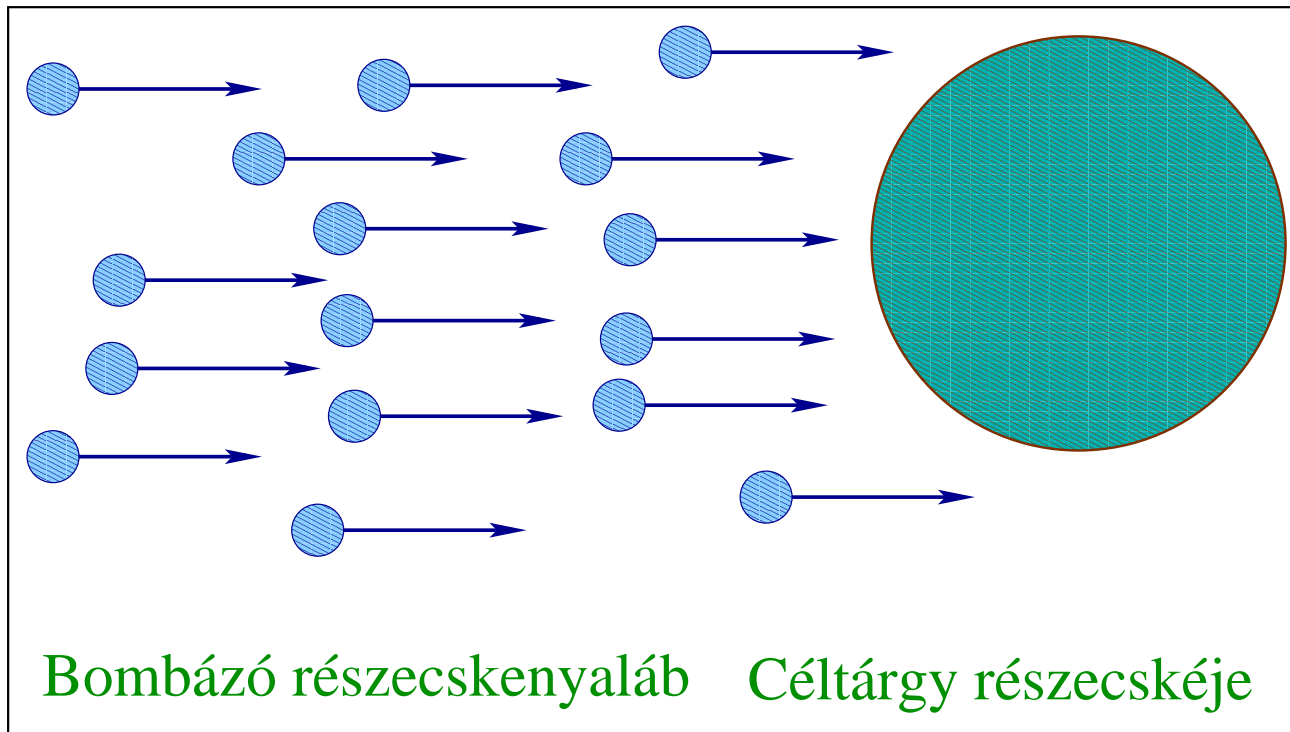


# Hatáskeresztmetszet

$$\sigma = W / \Phi \quad \text{átmeneti valószínűség/fluxus} \quad (1 \text{ mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2)$$

Fluxus = részecskék sűrűsége  $\times$  sebessége nyalámban:

$$\Phi = n_b \cdot v_b = \text{részecskeszám/felület/sec}$$



# Szimmetriák a részecskefizikában

fontosabbak, mint kémiában vagy szilárdtestfizikában

## Noether-tétel:

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Globális szimmetria     | ⇒ megmaradási törvény |
| Eltolás térben          | ⇒ impulzus            |
| Eltolás időben          | ⇒ energia             |
| Forgatás                | ⇒ impulzusmomentum    |
| Elektromágneses mérték- | ⇒ töltés              |

**Mértékelmélet:** Lokális szimmetria ⇒ kölcsönhatás

Lokális szimmetria: pontról pontra, meghatározott módon módosuló

Spontán szimmetriasértés (Higgs-mechanizmus)  
⇒ tömegek, kiszámíthatóság



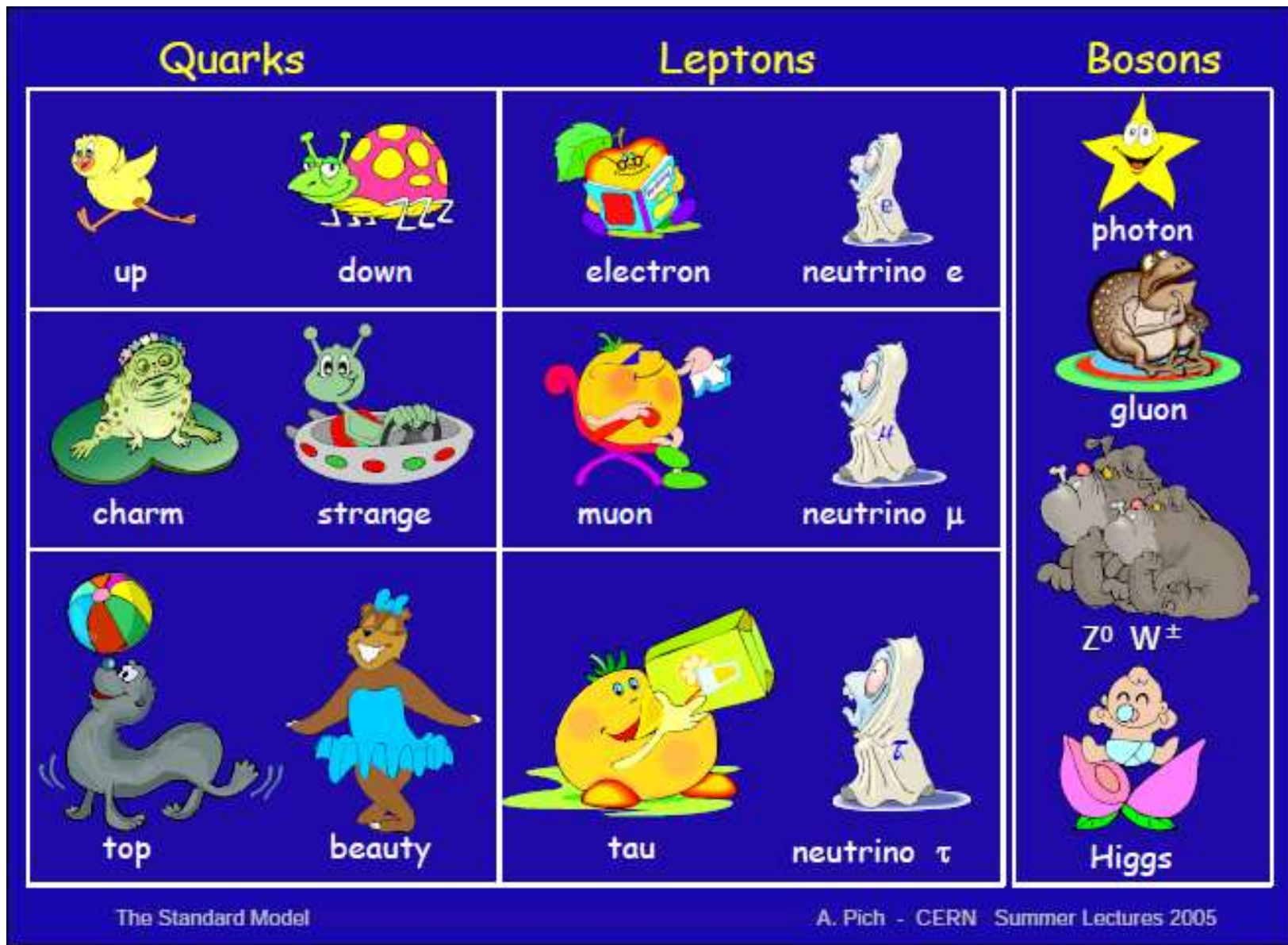
# Spontán szimmetriasértés $\Rightarrow$ tömeg



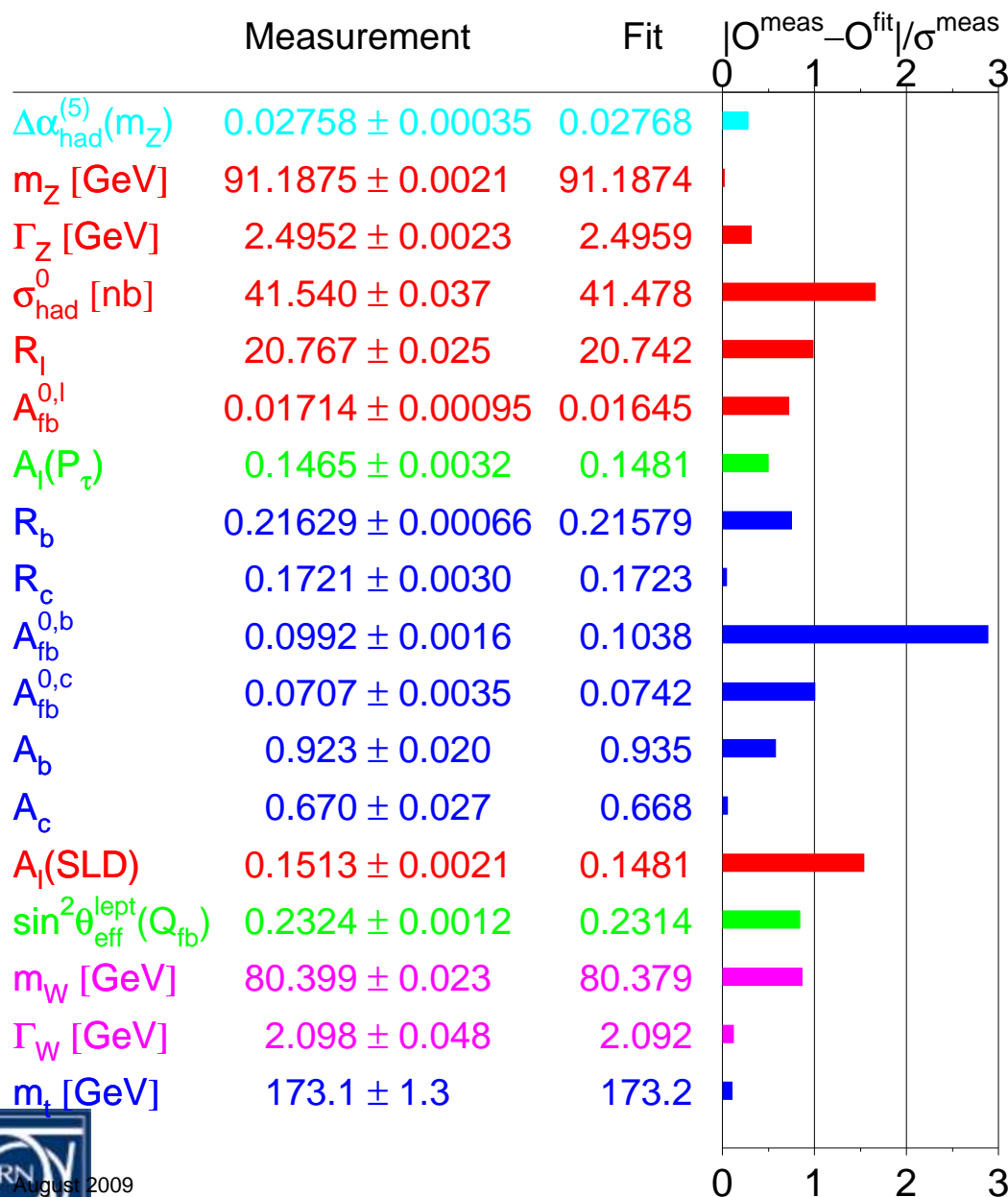
David J. Miller és CERN: <http://www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html>



# A Standard Modell állatkertje



# A Standard modell diadalútja



Állapot 2009 nyarán

valamennyi kísérlet

sokszáz eredményéből

$|Mért\text{-számolt}|/\text{szórás}$

Enyhén eltérő adat évről  
évre változik

(egy időre így marad)

Most éppen a

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

előre-hátra aszimmetriája

LEP elektroyenge munkacsoport:

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



August 2009

# De hol van a Higgs-bozon?

A spontán szimmetriasértés *mellékterméke*

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

Kísérletileg (*még?*) nem figyeltük meg,  
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*

Igazából 1972-ben kezdődött az életem, mint bozon

Peter Higgs:

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



# A Standard Modell problémái

- **Aszimmetriák:** jobb  $\Leftrightarrow$  bal világ  $\Leftrightarrow$  antivilág
- **Sötét anyag és energia ??** Az Univerzum tömegének 4%-a közönséges anyag (csillag, gáz, por,  $\nu$ ), 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

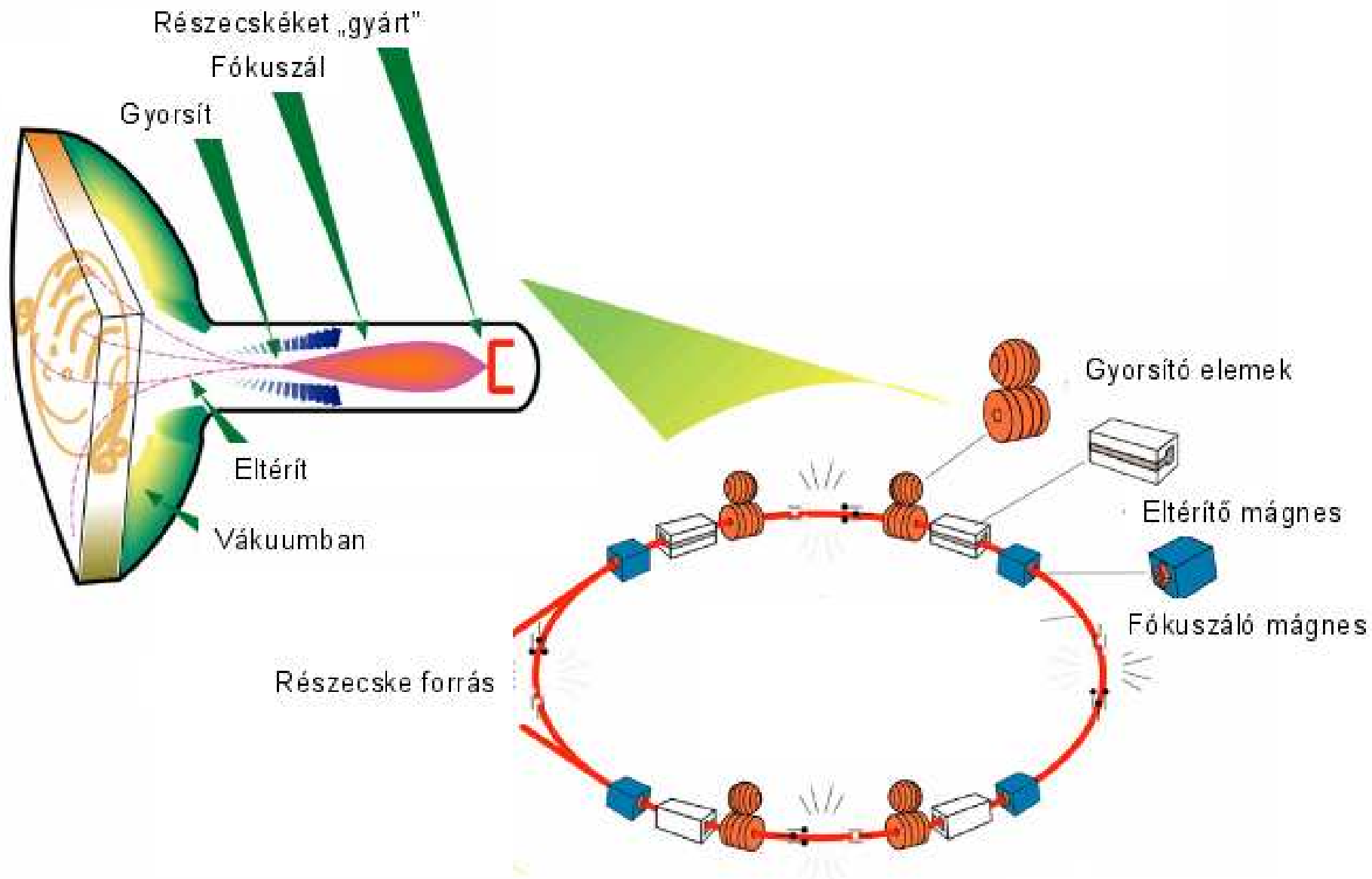
⇒ kísérletileg ellenőrizhető az LHC-nál!





# Otthon is lehet gyorsítónk

a hagyományos televíziós készülék!



# A CERN 20 tagországa

## The Twenty Member States of CERN

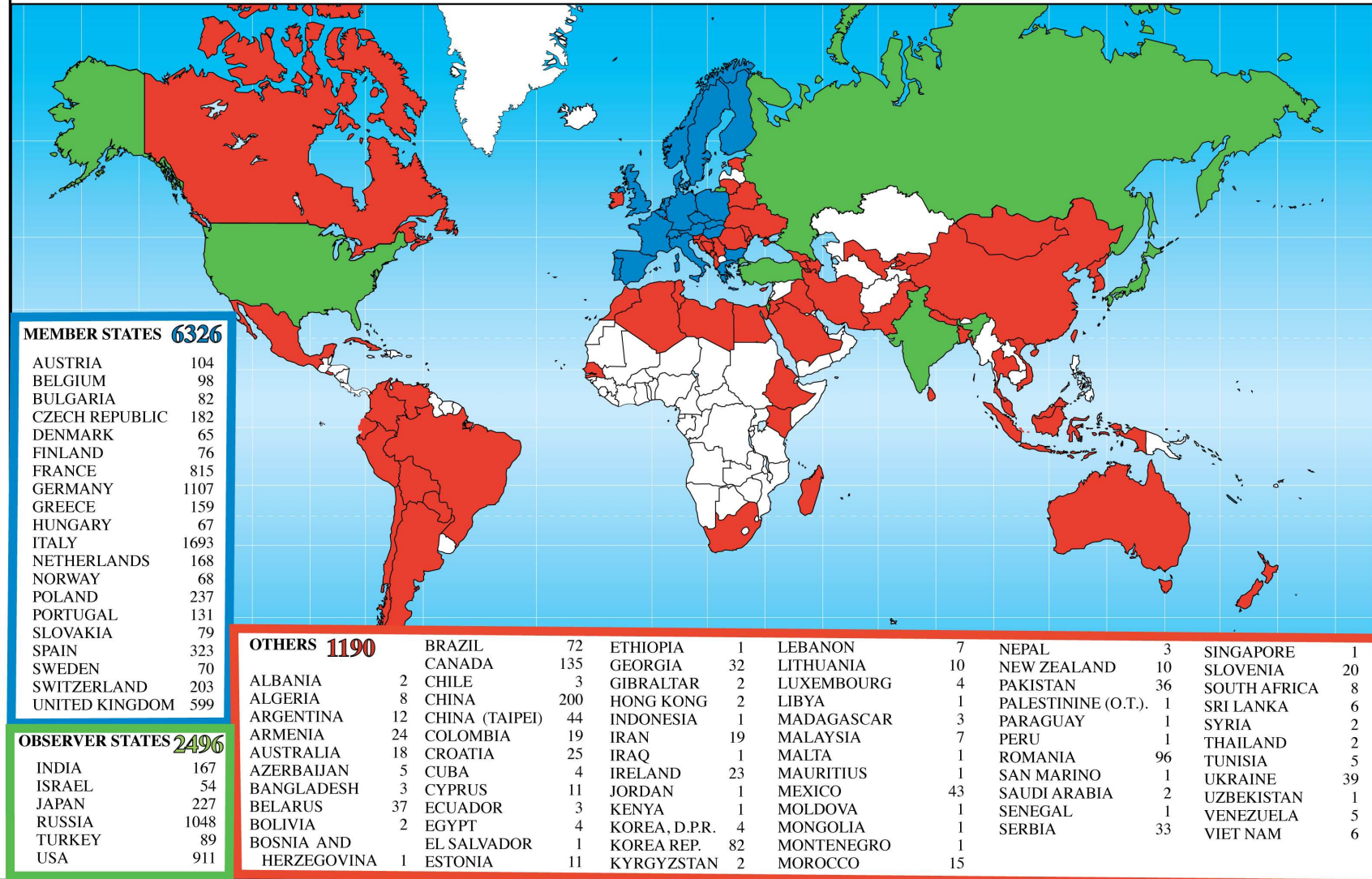


### Member States (Dates of Accession)

|   |  |  |  |   |
|---|--|--|--|---|
|  AUSTRIA (1959)  |  DENMARK (1953) |  GREECE (1953)      |  NORWAY (1953)    |  SPAIN (1/1961-12/1968-1/1983) |
|  BELGIUM (1953)  |  FINLAND (1991) |  HUNGARY (1992)     |  POLAND (1991)    |  SWEDEN (1953)                 |
|  BULGARIA (1999) |  FRANCE (1953)  |  ITALY (1953)       |  PORTUGAL (1986)  |  SWITZERLAND (1953)            |
|  CZECH FR (1993) |  GERMANY (1953) |  NETHERLANDS (1953) |  SLOVAK FR (1993) |  UNITED KINGDOM (1953)         |

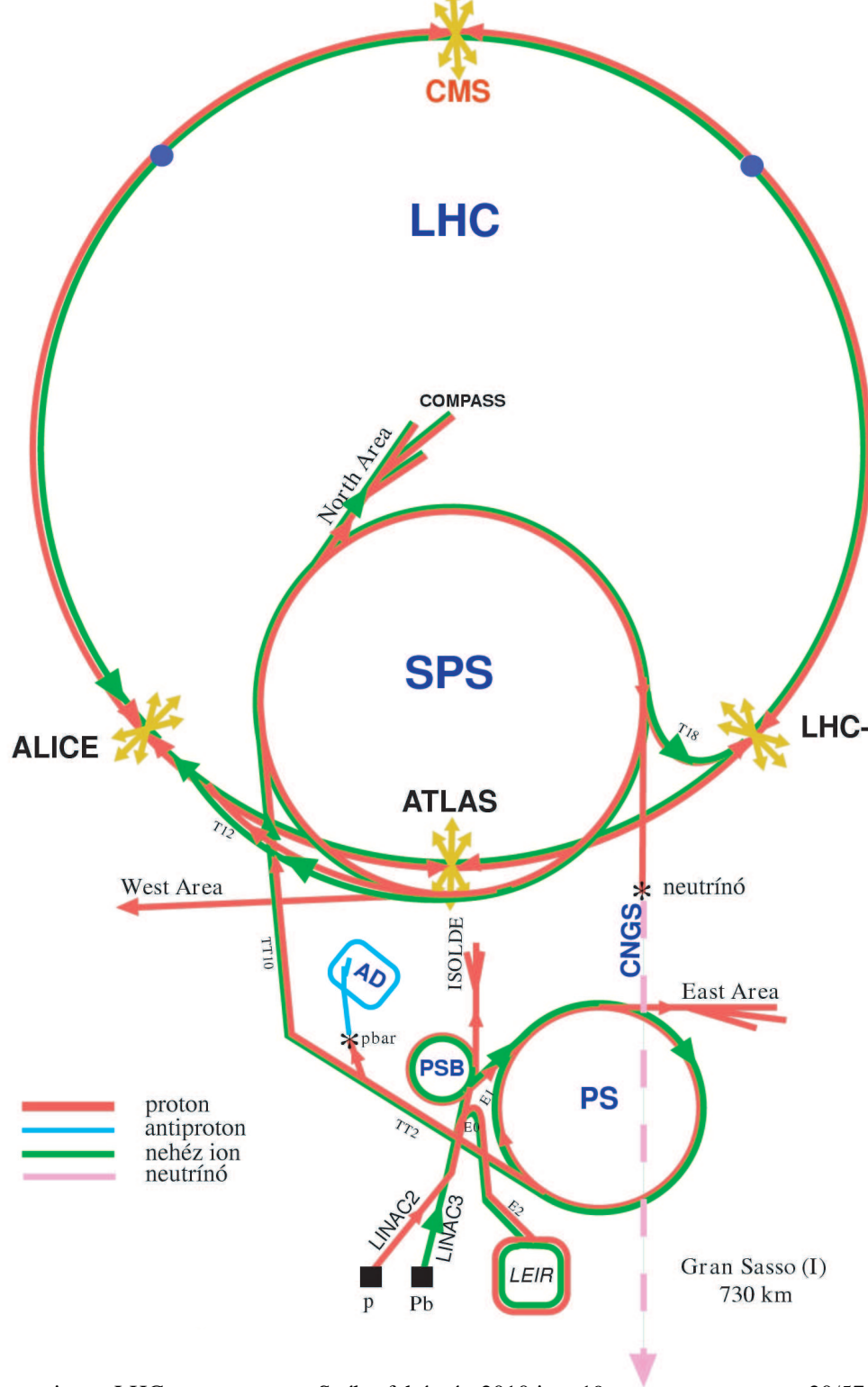
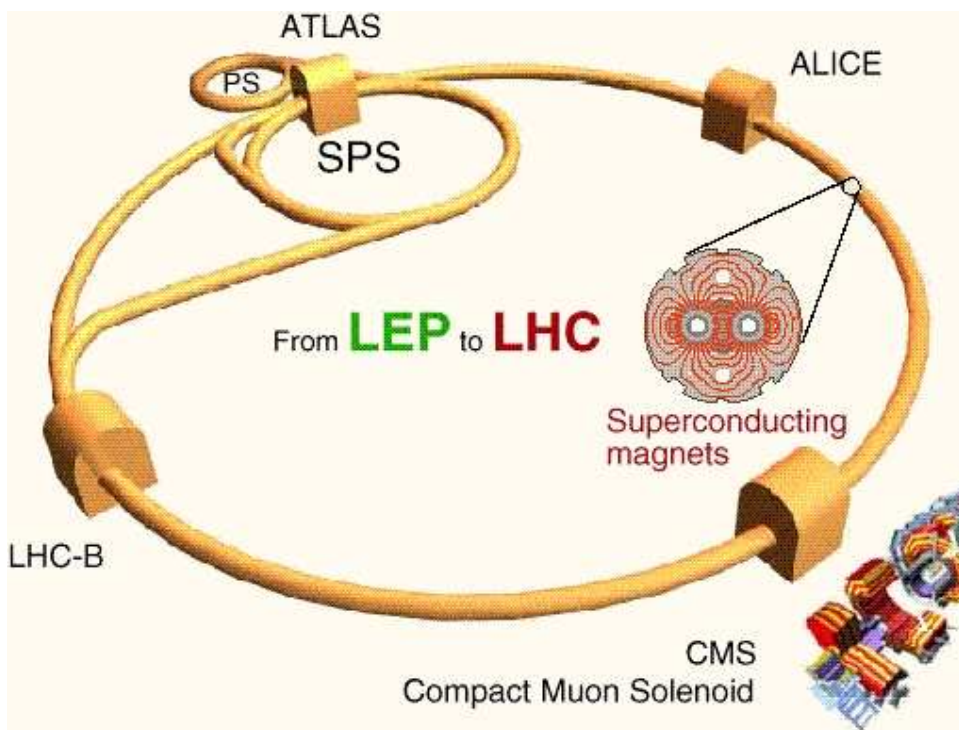
# A CERN kutatói (felhasználói)

## Distribution of All CERN Users by Nationality on 27 October 2009

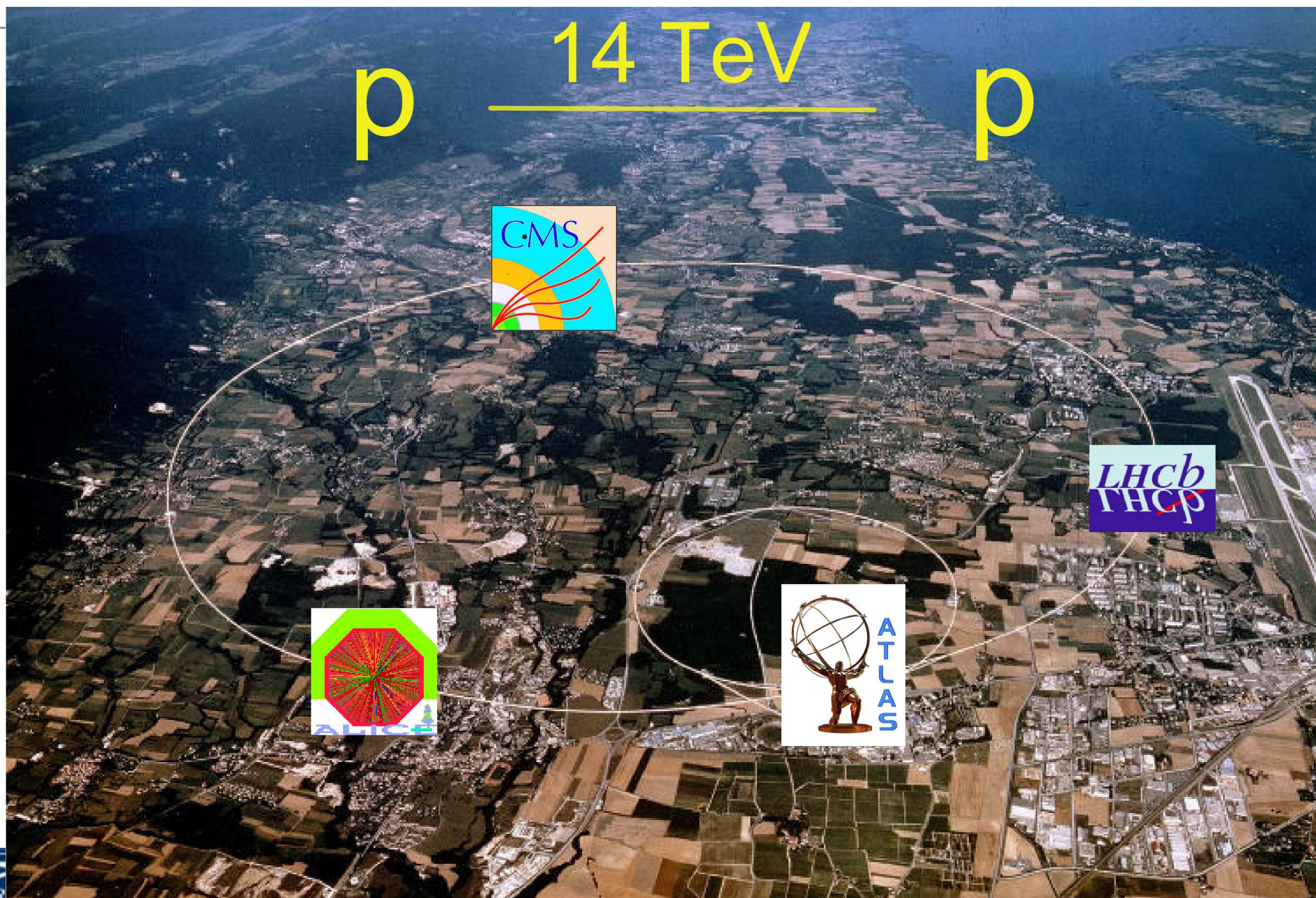


2009: 2500 alkalmazott, 10000 kutató

# A CERN gyorsítói ma



# A CERN és környéke



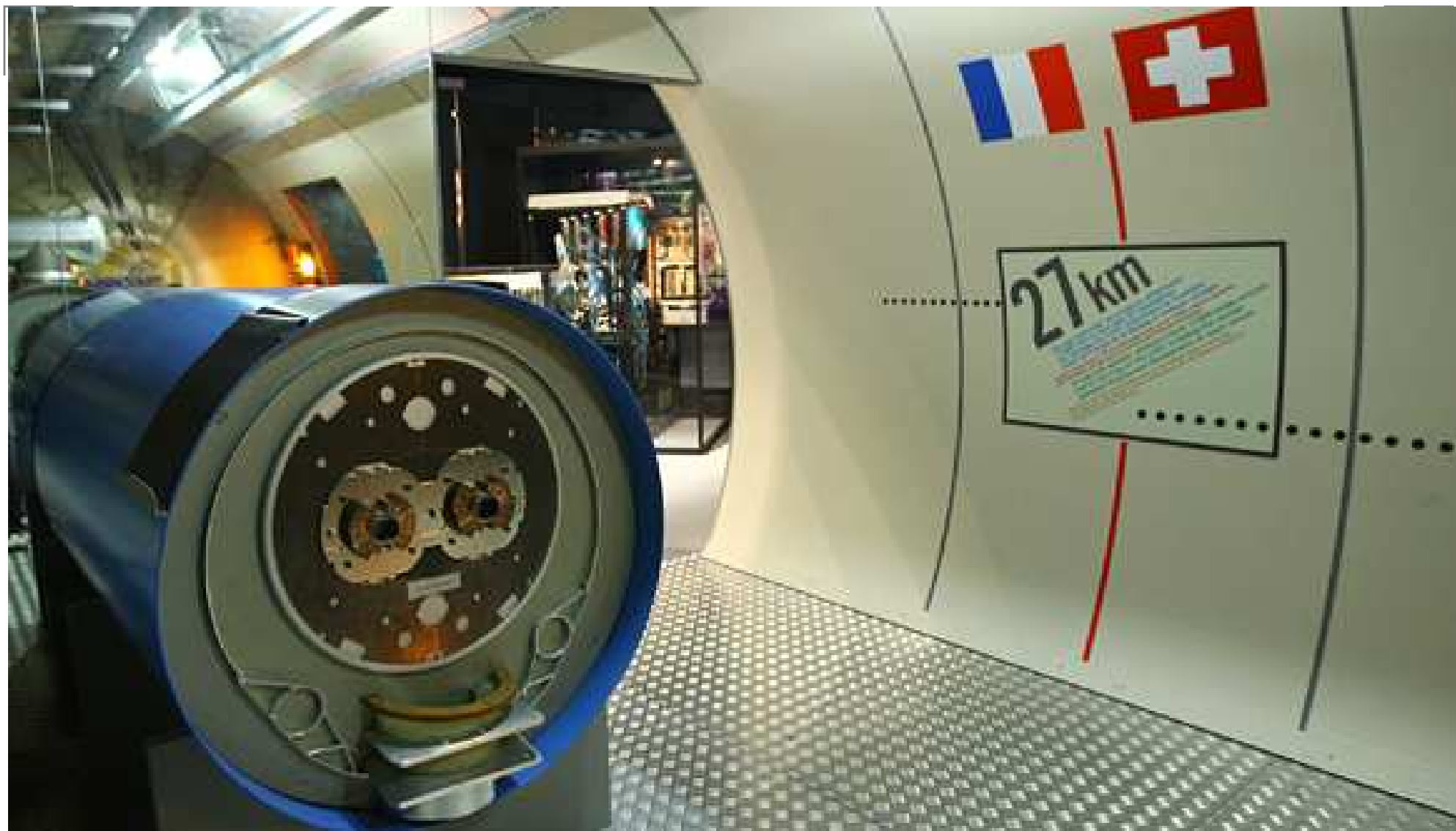
# Az LHC eltérítő-mágnesei



1232 szupravezető mágnes (beszerelés előtt)  
( $L = 15$  m,  $M = 35$  t,  $T = 1.9$  K,  $B = 8.3$  T)



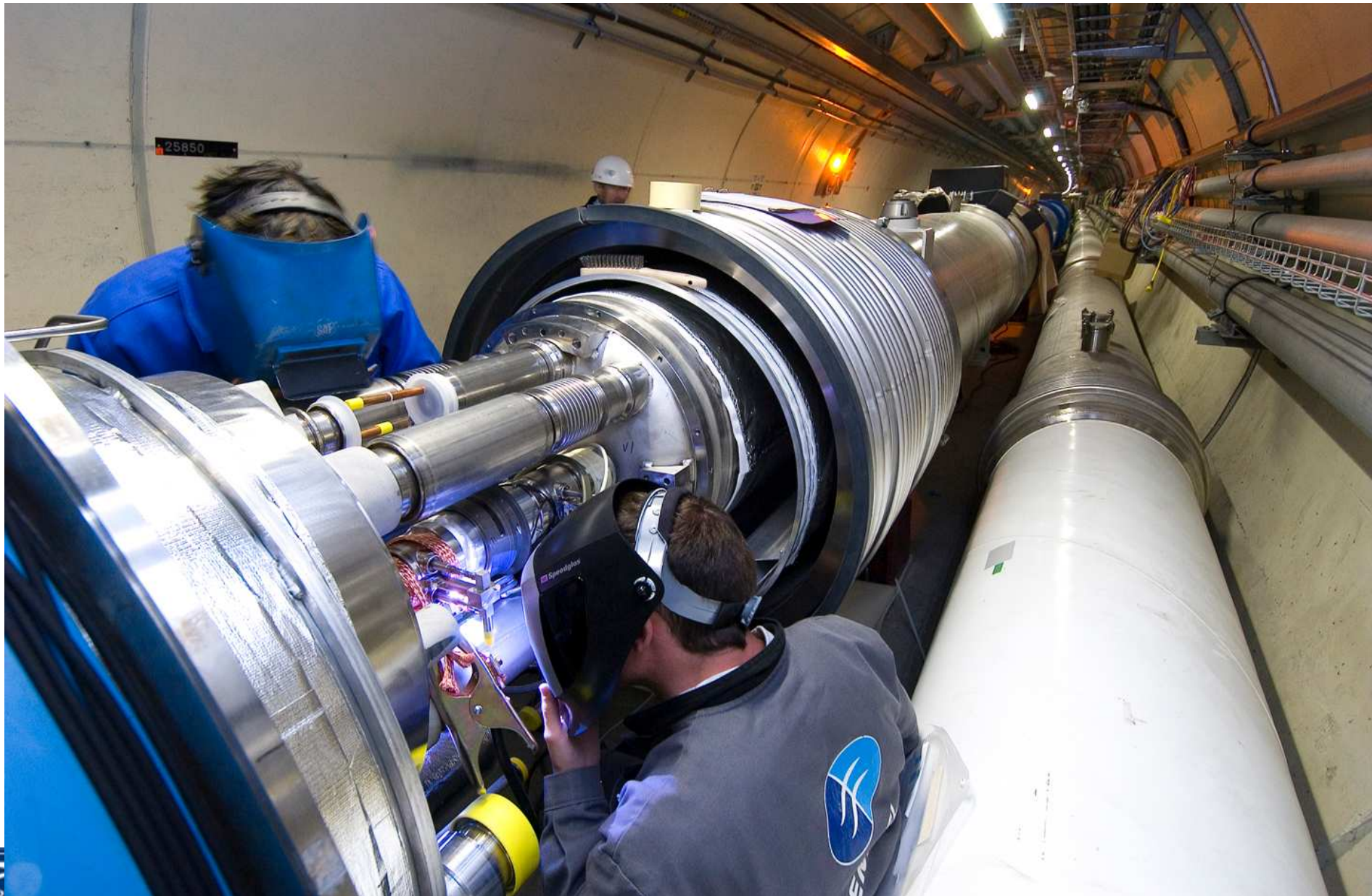
# Az LHC eltérítő-mágnesese: keresztmetszet



a CERN *Mikrokozmosz* kiállításán

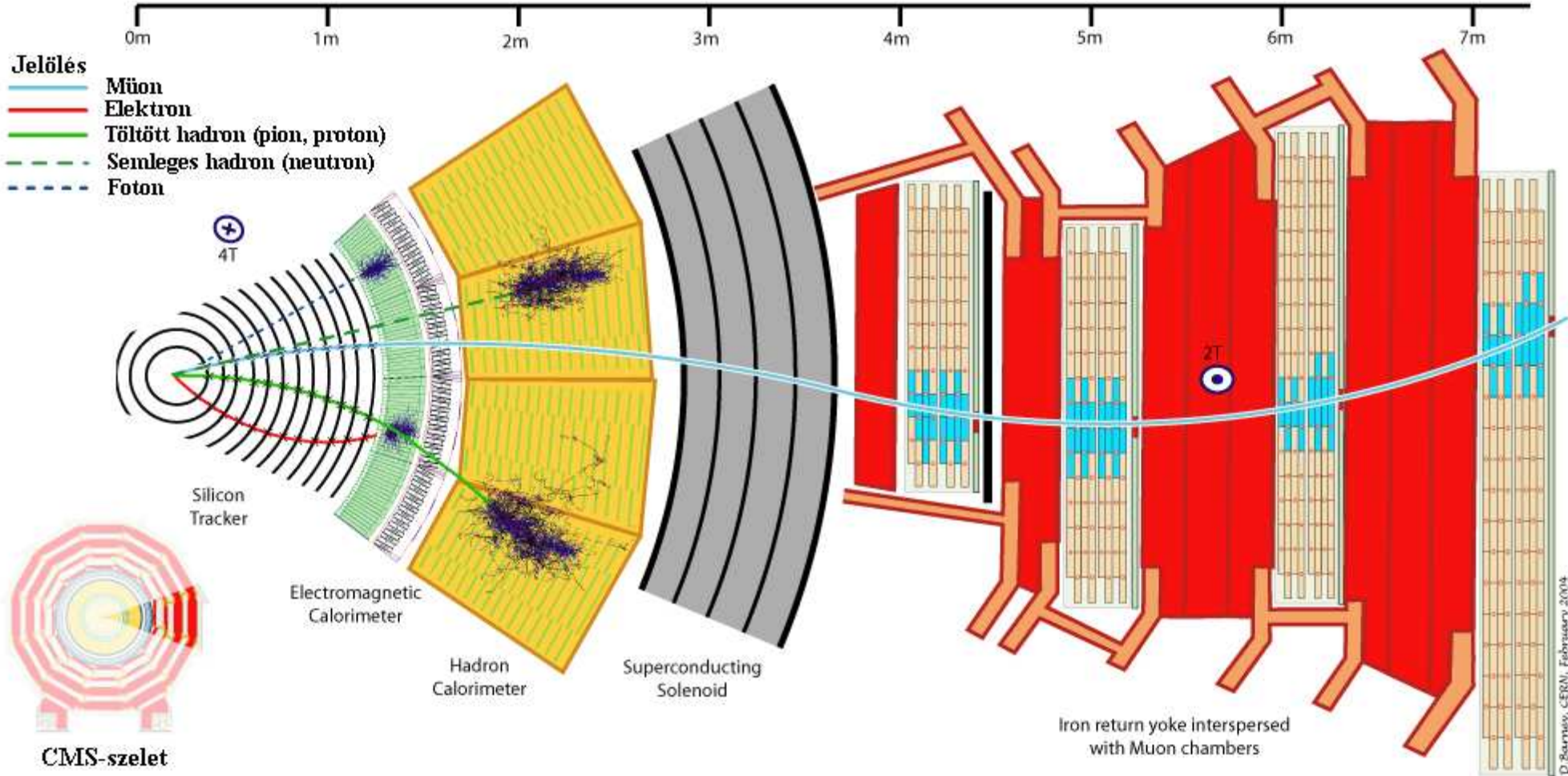


# Az LHC mágneseit szerelik





# Az LHC CMS–detektora



Compact Muon Solenoid: 12500 tonnás digitális kamera  
 100 M pixel, 40 M kép/mp, 1000 GB/mp adat  
 Tárolás: 100 kép/mp  $\Rightarrow$  szűrés!!



# Az LHC CMS–detektora

(Compact Muon Solenoid)

**Súly:** 12500 tonna, kétszer annyi vas, mint Eiffel–toronyban

> 2500 résztvevő a világ 35 országából

**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

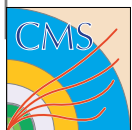
**Előreszórt részecskék észlelése:** (*Hadron Forward calorimeter, HF*)

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

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

**Adatkezelés:** LHC Computing Grid

**RMKI: BUDAPEST LCG-állomás**



# Magyar részvétel a CMS-kísérletben:

- MTA KFKI RMKI, Budapest (18 fő)
- Debreceni Egyetem Kísérleti Fiz. Int. (9 fő)
- MTA ATOMKI, Debrecen (7 fő)
- Összesen: 34 magyar kutató



# Munka 160 műonkamrán



Béni Noémi és Szillási Zoltán (Debrecen)

# HF: kvarcszálak acélban (RMKI)



Minden CERN-es magyar fűzte

Szálkalibráció kész darabon



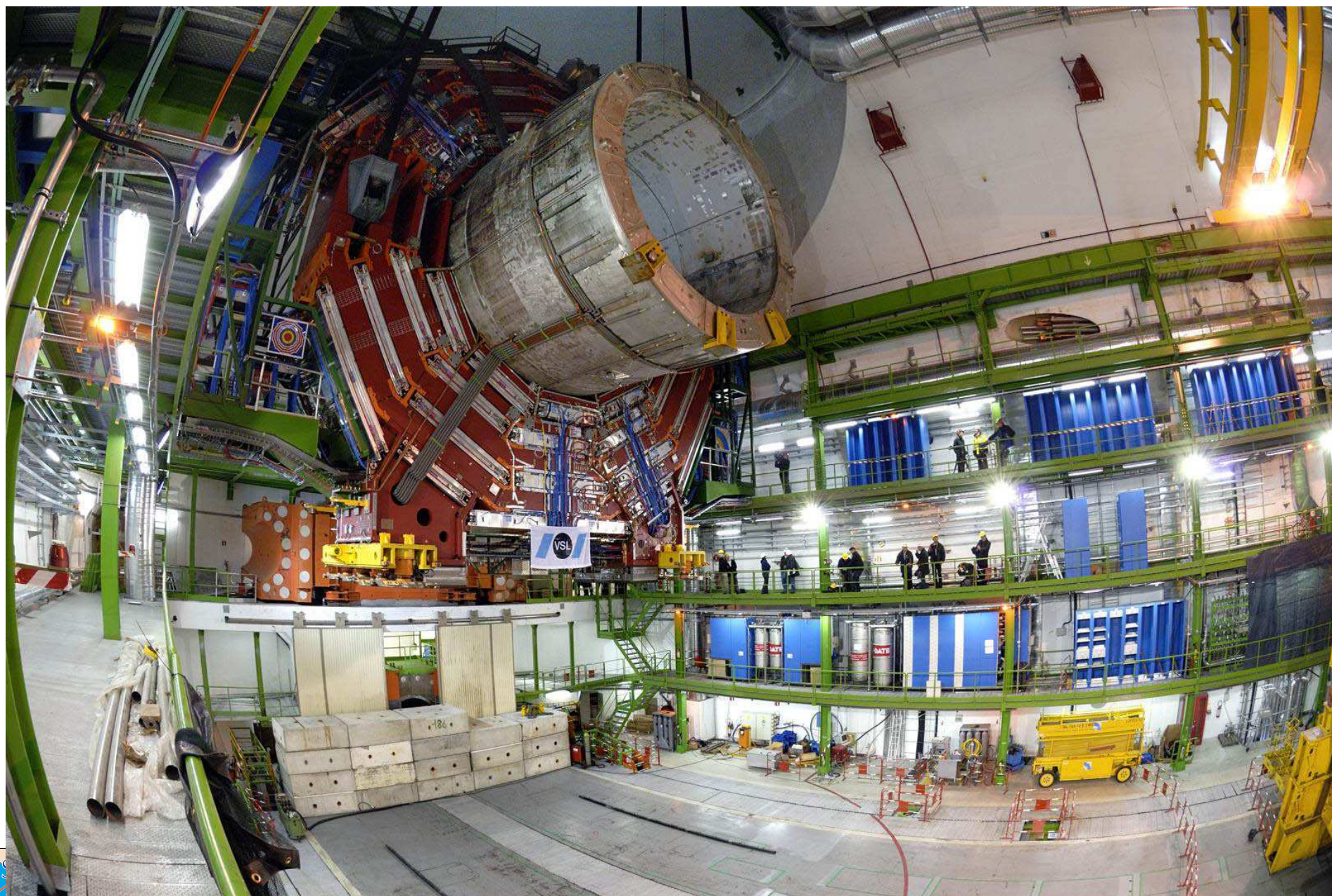
# A CMS elektromágneses kalorimétere



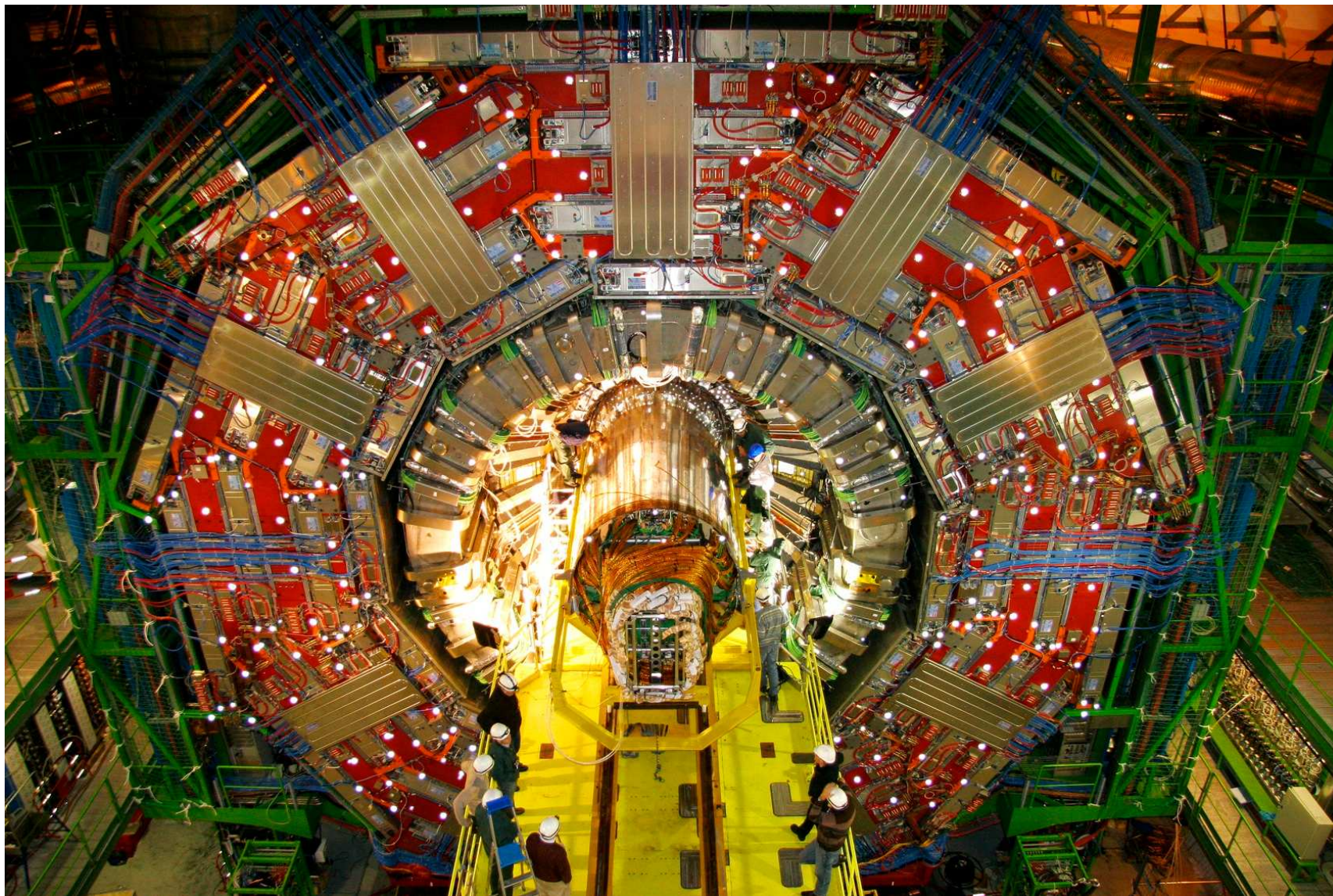
80000  $\text{PbWO}_4$  szcintillátor-hasáb



# Beillesztik a CMS mágnesét

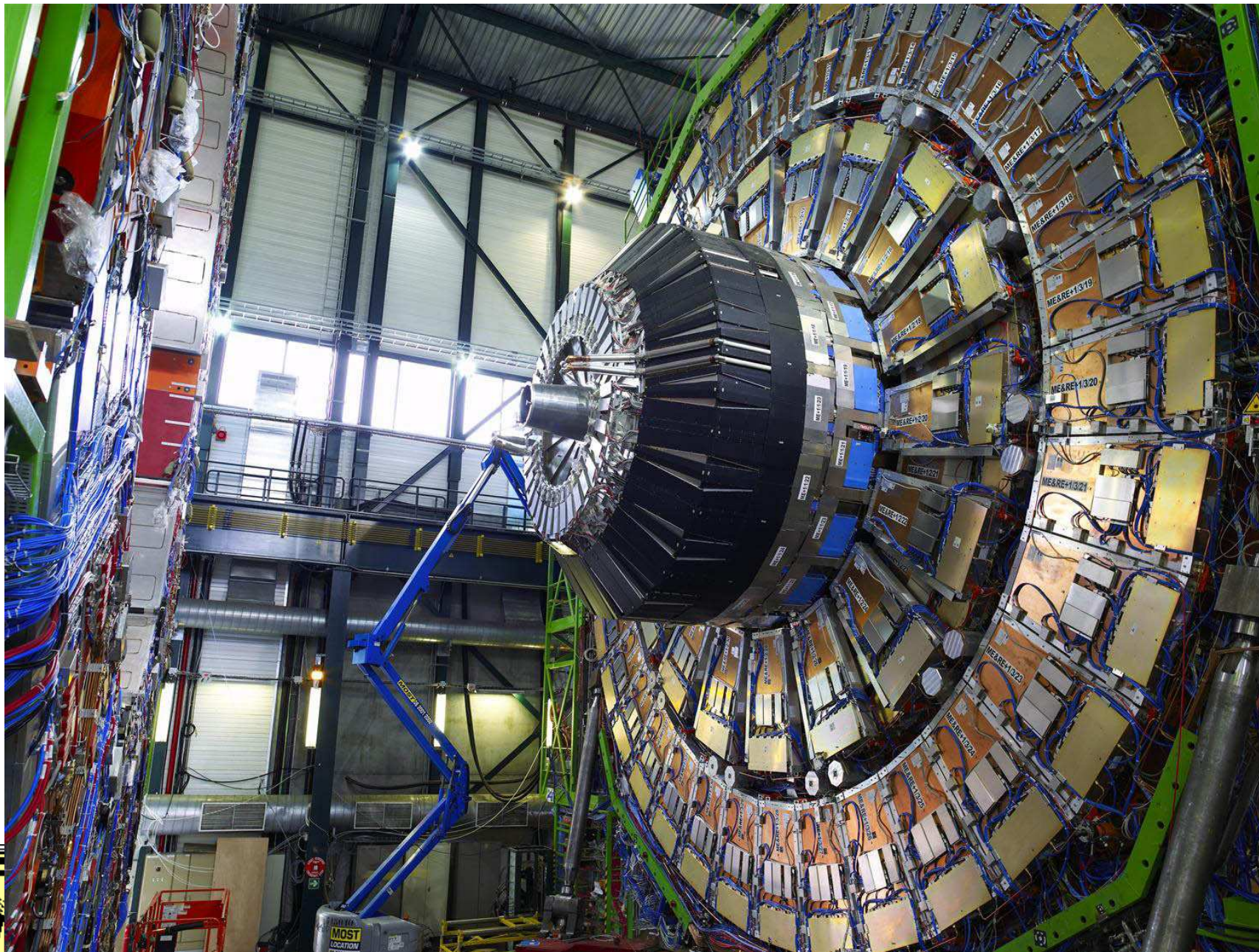


# A CMS belső része

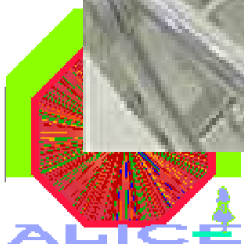
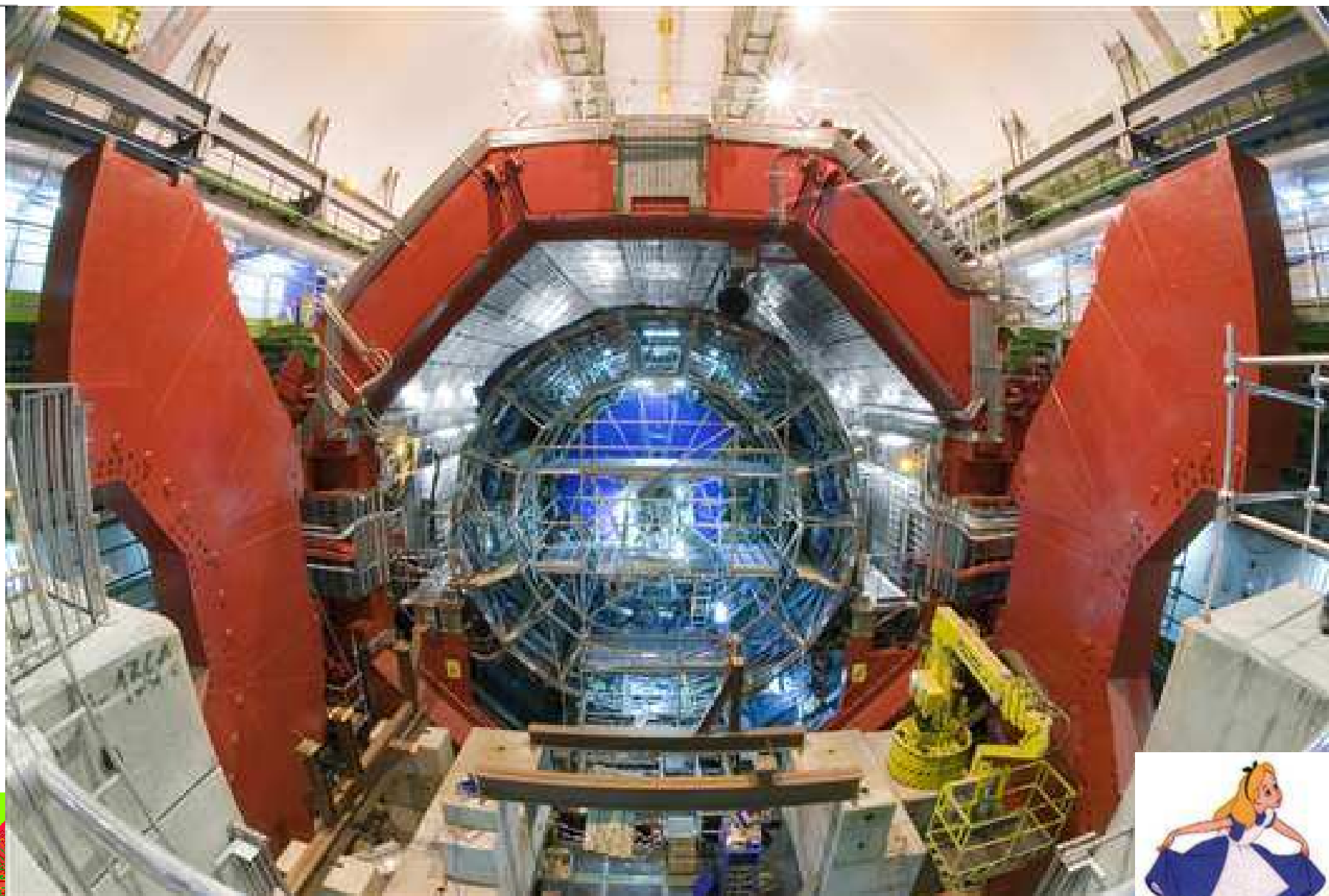




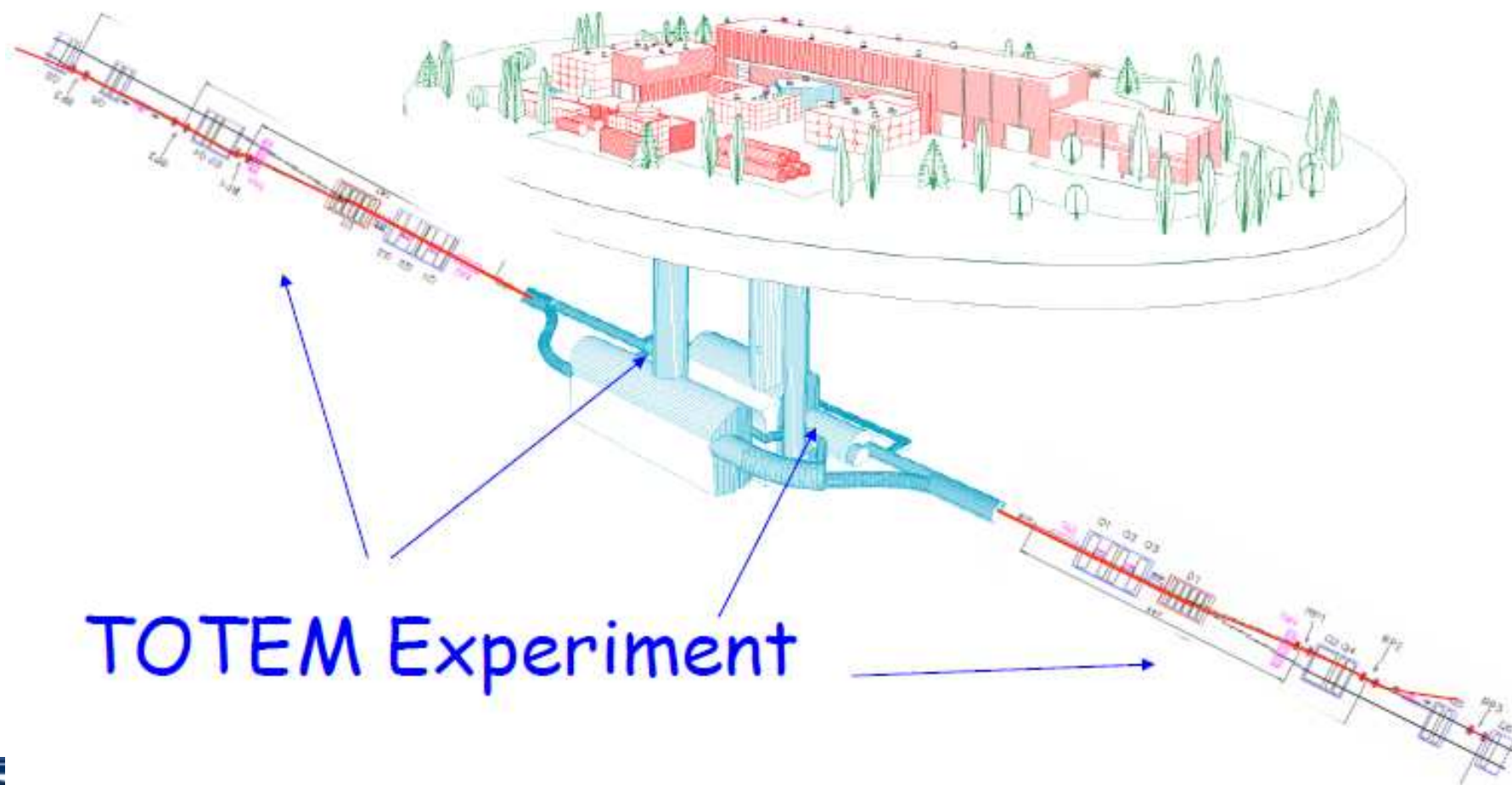
# A CMS lezáró sapkája



# ALICE: A Large Ion Collider Experiment



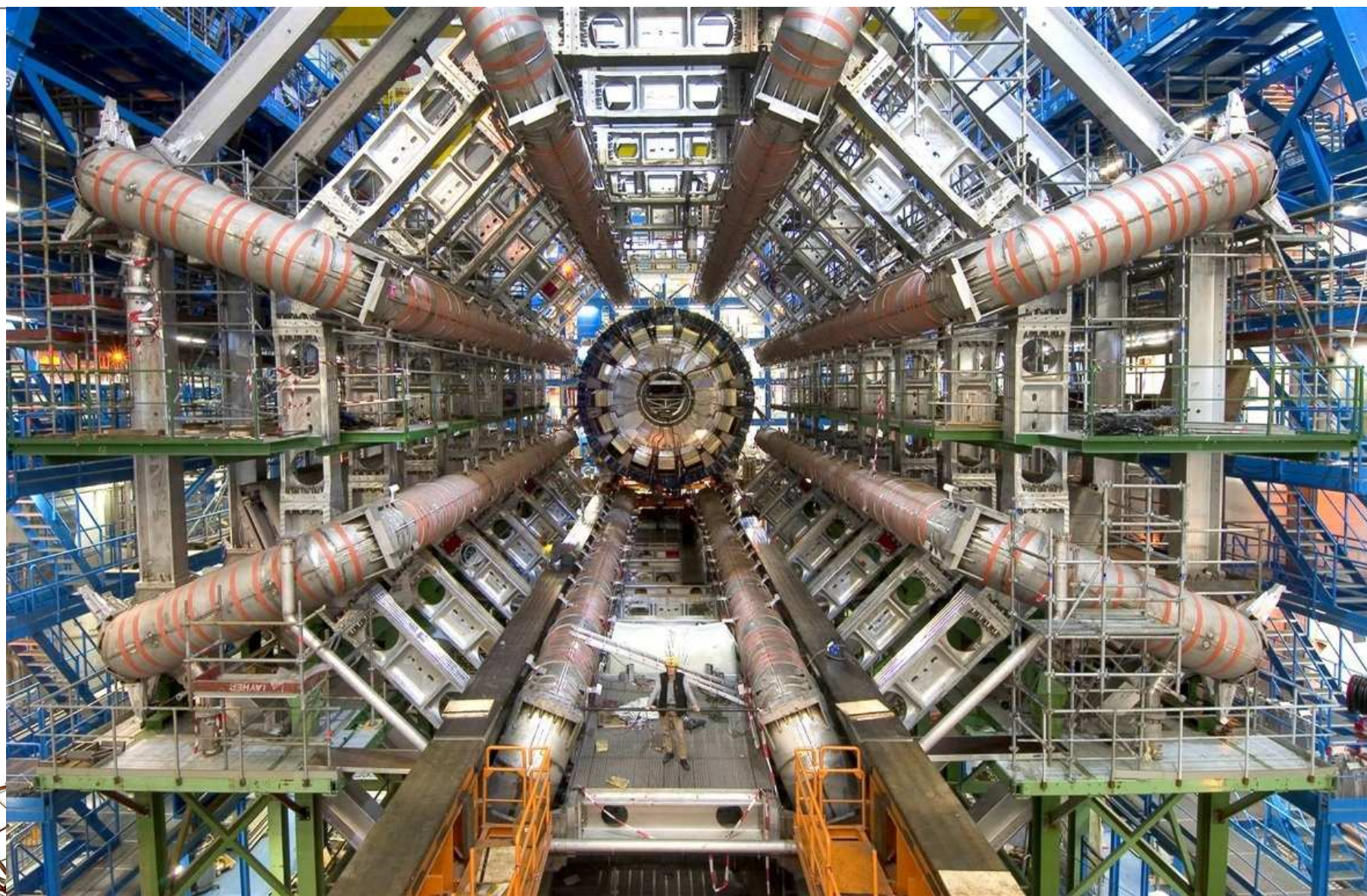
# A TOTEM-kísérlet (a CMS két végén)



TOTEM Experiment

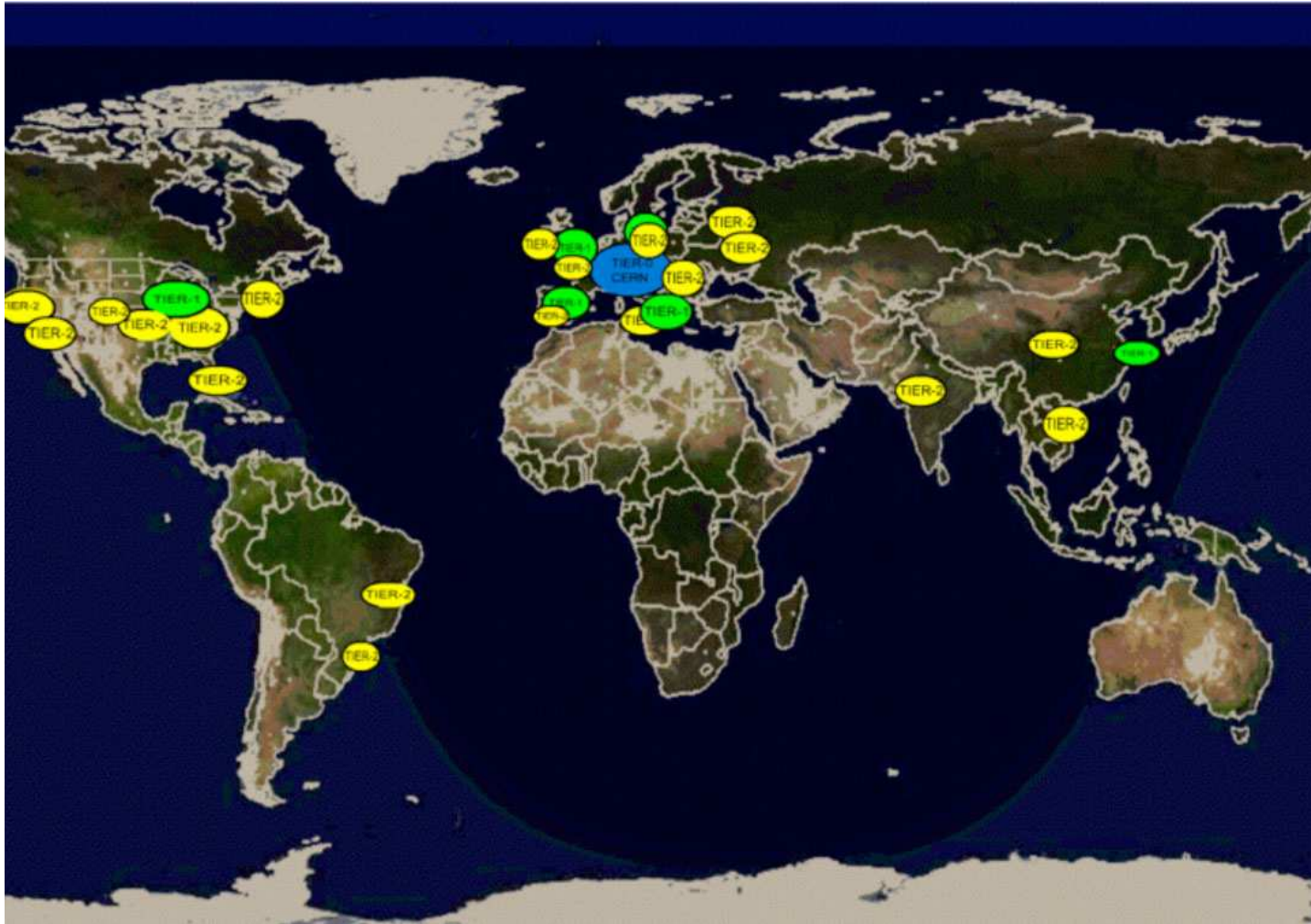


# ATLAS: A Toroidal Lhc ApparatuS



# Worldwide LHC Computing Grid

A CMS-kísérlet fő WLCG-állomásai



Magyar Tier-2: RMKI, ELTE, BME, NIIFI

RMKI: 426 CPU és 144 TB tároló a CMS és ALICE VO számára)



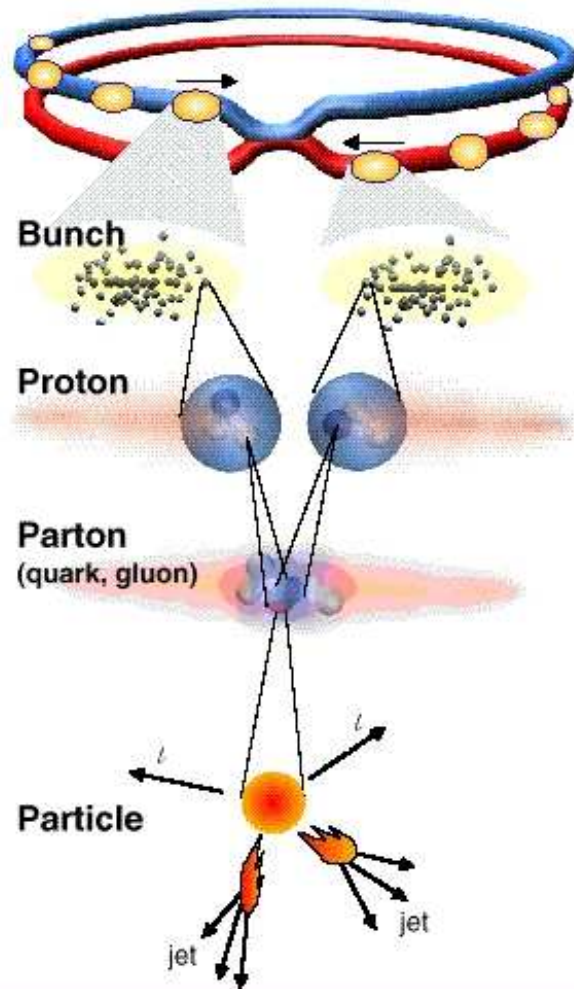
# Az LHC működésének első időszaka

1. Értsük meg a *detektort*: működés, trigger, kalibráció
2. Mennyire hiteles a *szimulációnk*? Leírja a SM folyamatait és a detektort? Egyezik a mért adatokkal?
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 többletet, hiányt vagy más jellegzetes tulajdonságokat (Higgs-bozon, SUSY, ...)
5. Ha tényleg új fizika: Micsoda? Melyik modell? Milyen paraméterekkel?

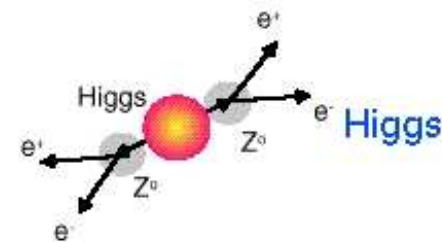


# Higgs-bozon keresése az LHC-nál

## Collisions at LHC



|               |  |
|---------------|--|
| Proton-Proton | (2835 x 2835 bunches)                    |
| Protons/bunch | $10^{11}$                                |
| Beam energy   | 7 TeV ( $7 \times 10^{12}$ eV)           |
| Luminosity    | $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ |
| Crossing rate | 40 MHz                                   |
| Collisions »  | $10^7 - 10^9 \text{ Hz}$                 |



SUSY.....

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

# Rengetegféle modell van





# LHC: a Jó, a Rossz és a Csúf



**Jó**

Hatalmas felfedezési potenciál:  
nagy energia, sokféle ütközés  
(acélgolyó  $\Leftrightarrow$  tőrógombóc),  
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.

# Előkészületek az LHC indításához

- Tervezés kezdete: 1984 (5 évvel a LEP indulása előtt!)
- Új detektorüregek kiásása 1998-tól LEP-alagút megemelkedik működés közben  $\Rightarrow$  mágnesek pozíciójának folyamatos kompenzálása
- LEP leállítása (óriási ellenállás): 2000 vége.
- LEP-gyorsító és detektorok eltávolítása: 2001
- 9300 mágnes ellenőrzése (javítása!), levitele, összehegesztése: 2002-2007.
- Mágnesek lehűtése 1,9 K-re (hidegebb, mint a világűr!): 2008 jan-aug
- Protoncsomag belövése, körbevitele: 2008. szept.



# Az LHC vezérlőterme, 2008.09.10



# Felkészülés a gyorsító-üzemléódra: a hiba

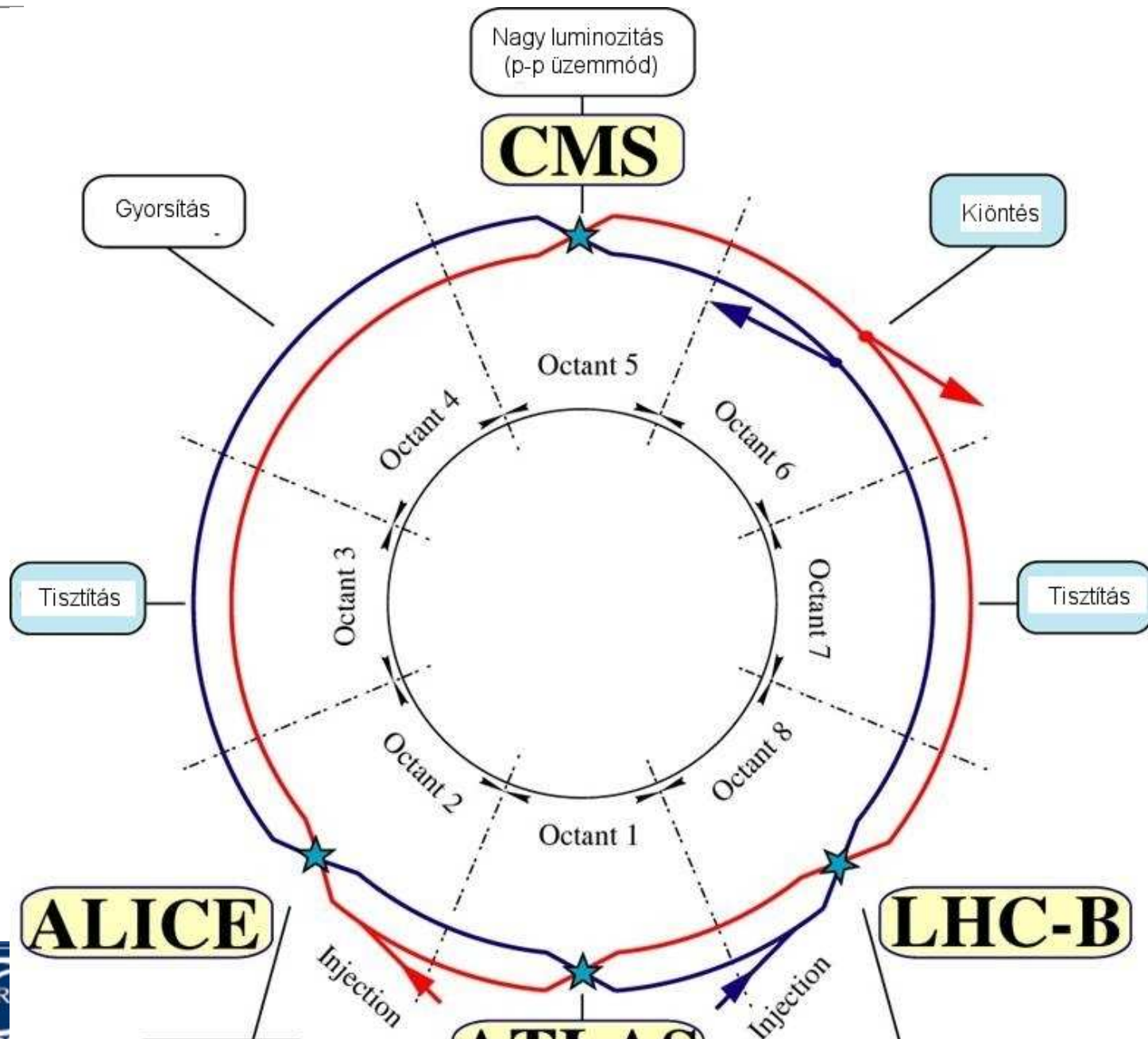
- A dipólmágnesek áramának fokozatos növelése (kb. 9000 A-re) szektoronként történt.
- A 8 szektorból 7 áramát sikeresen felhozták
- Szept. 19: A 8.-nál kiengedett egy csatlakozó két mágnes között. Sokezer volt, ív, lyuk a hűtőrendszer csövén, 6 tonna szuperfolyékony hélium lökészerűen kifújt, kilökve a helyéről több 35-tonnás mágneset.
- 53 egységet (39 terelőmágneset és 14 több kisebb mágneset tartalmazó dobozt) javítás céljából a felszínre kellett hozni: a felmelegítés nagyon lassú, hónapokig tartott.
- A tartalékokból pótolták őket, de a cserére is jó néhány hónap kellett.
- Ellenőrzés (ellenállás és hőmérséklet mérése, vészszelepek) beépítve, nehogy megisméltődjék.



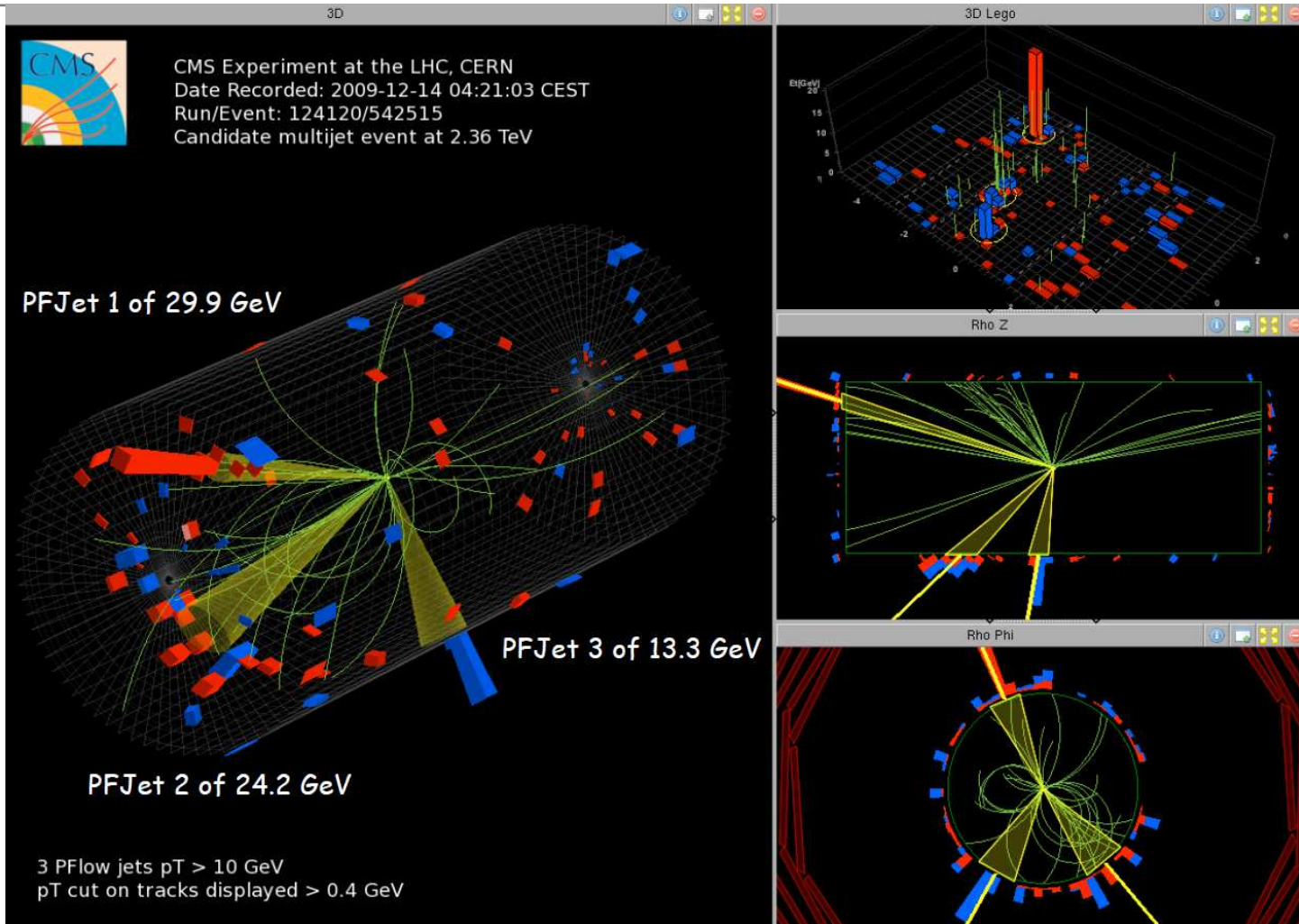
# LHC-mágnes a baleset után



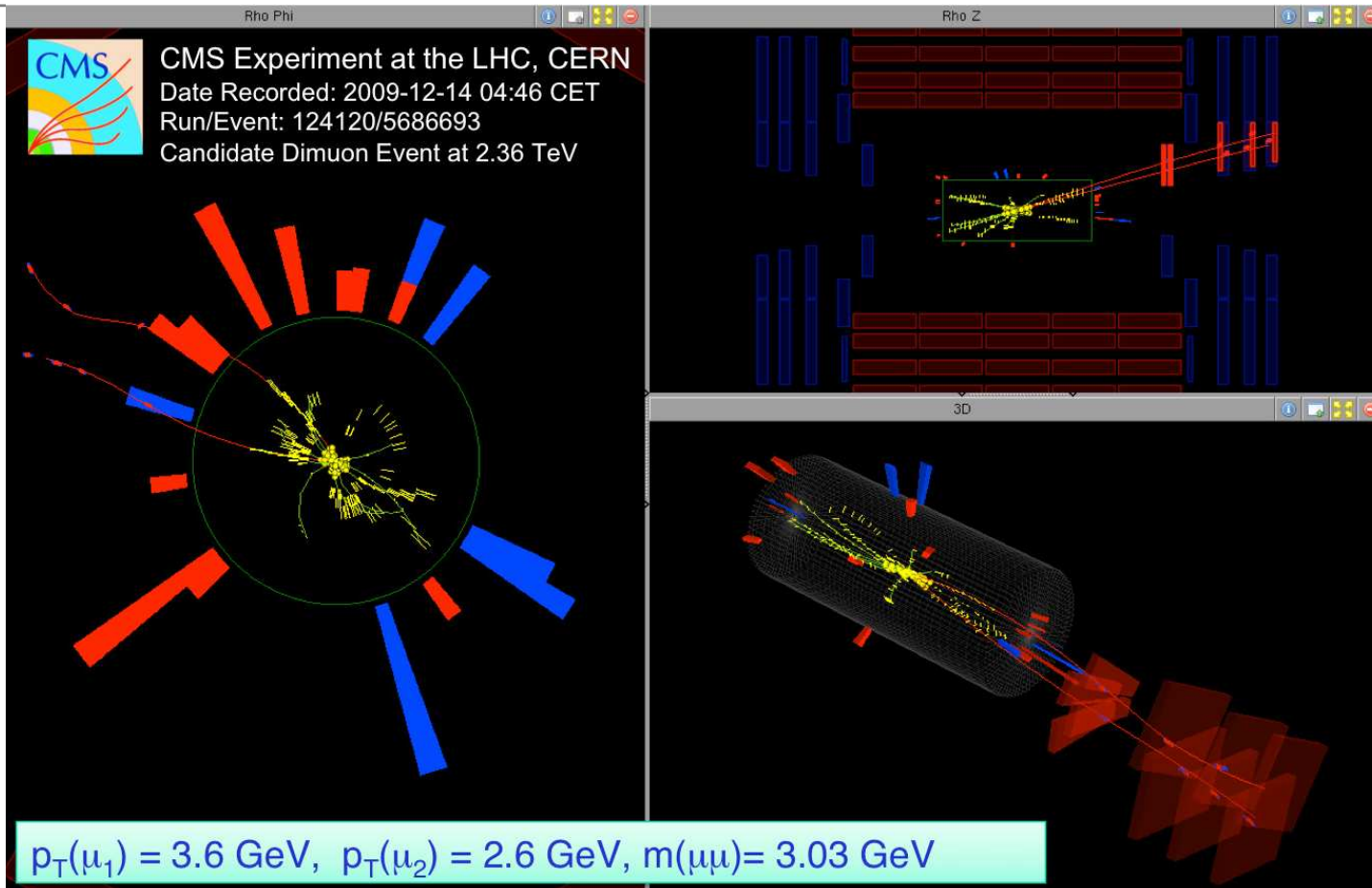
# Az LHC működése



# MS-esemény 3 hadronzáporral, 2,36 TeV-n

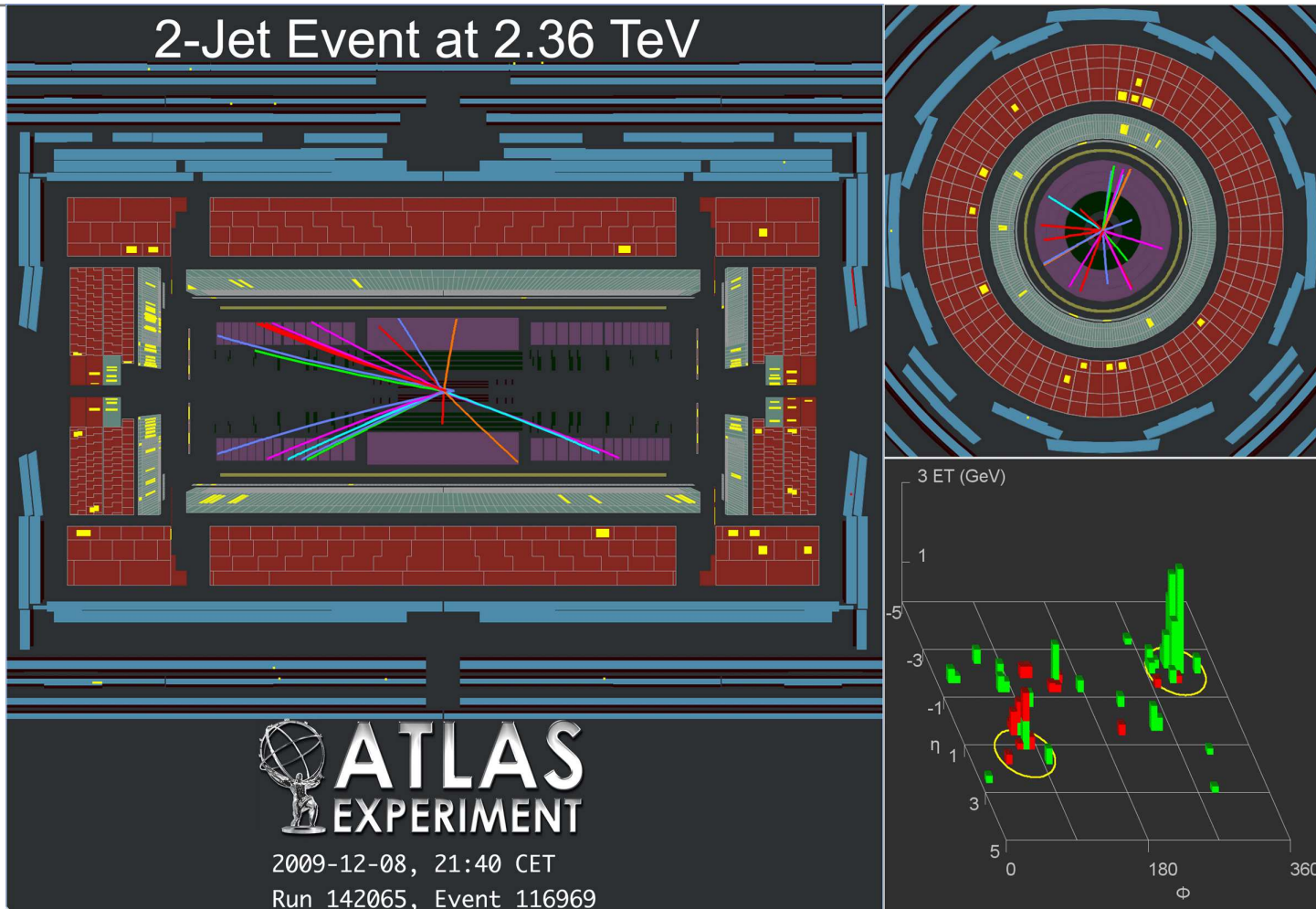


# CMS-esemény 2 müonnal, 2,36 TeV-nél

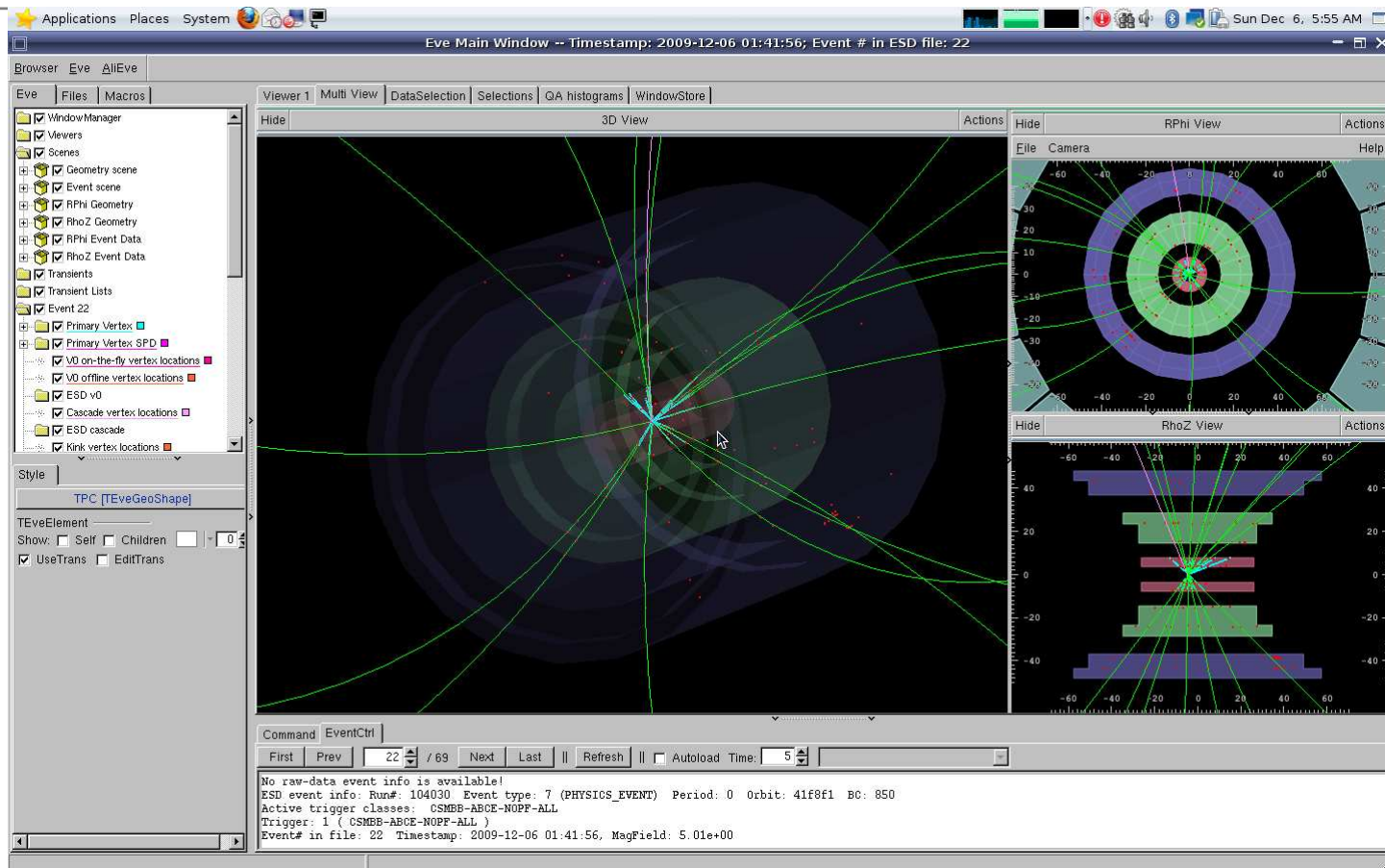




# Proton-proton ATLAS-esemény 2,36 TeV-nél

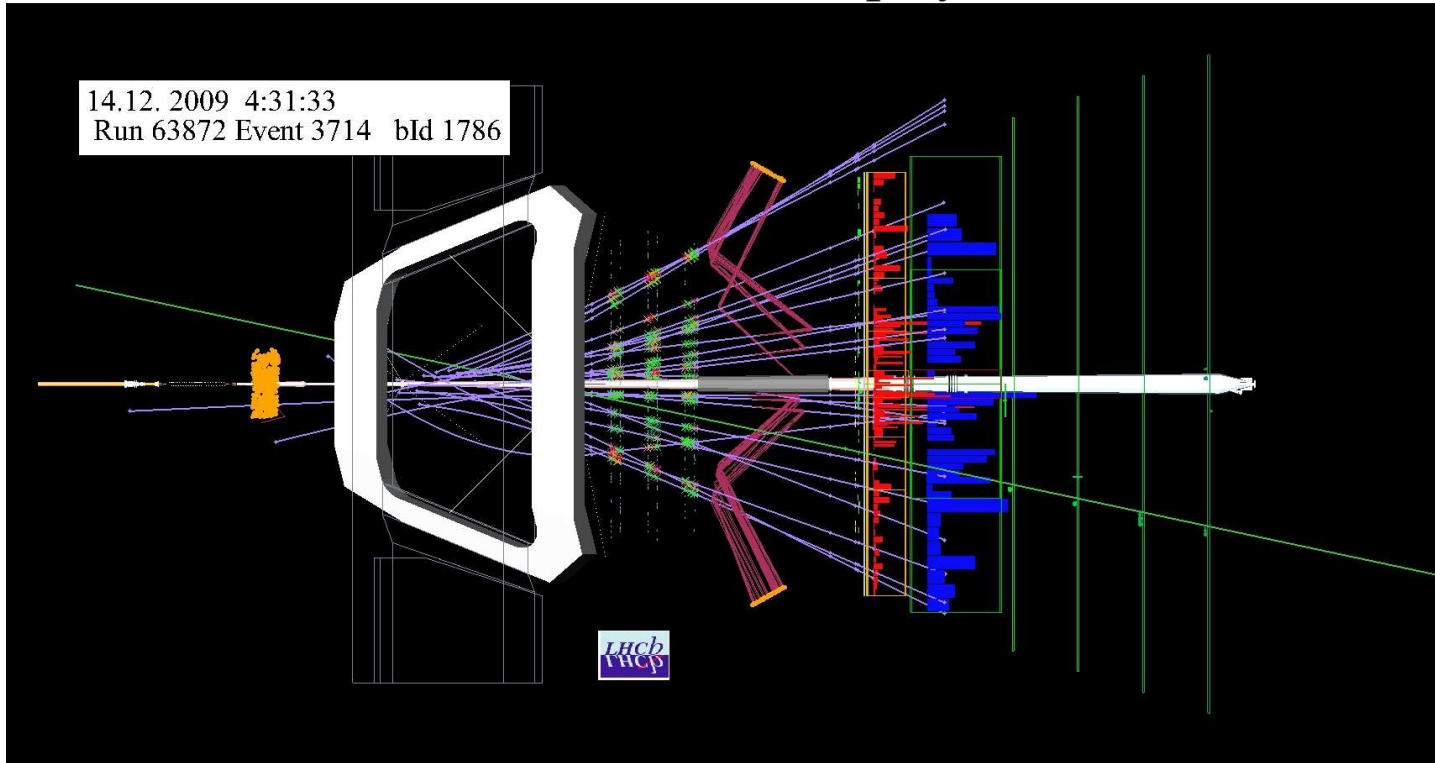


# Sokhadronos ALICE-esemény 0,9 TeV-nél



# Sokhadronos LHCb-esemény 2,36 TeV-nél

## LHCb Event Display



# Fekete lyukak

Galaxisok magjában fekete lyukak (*black hole, BH*):

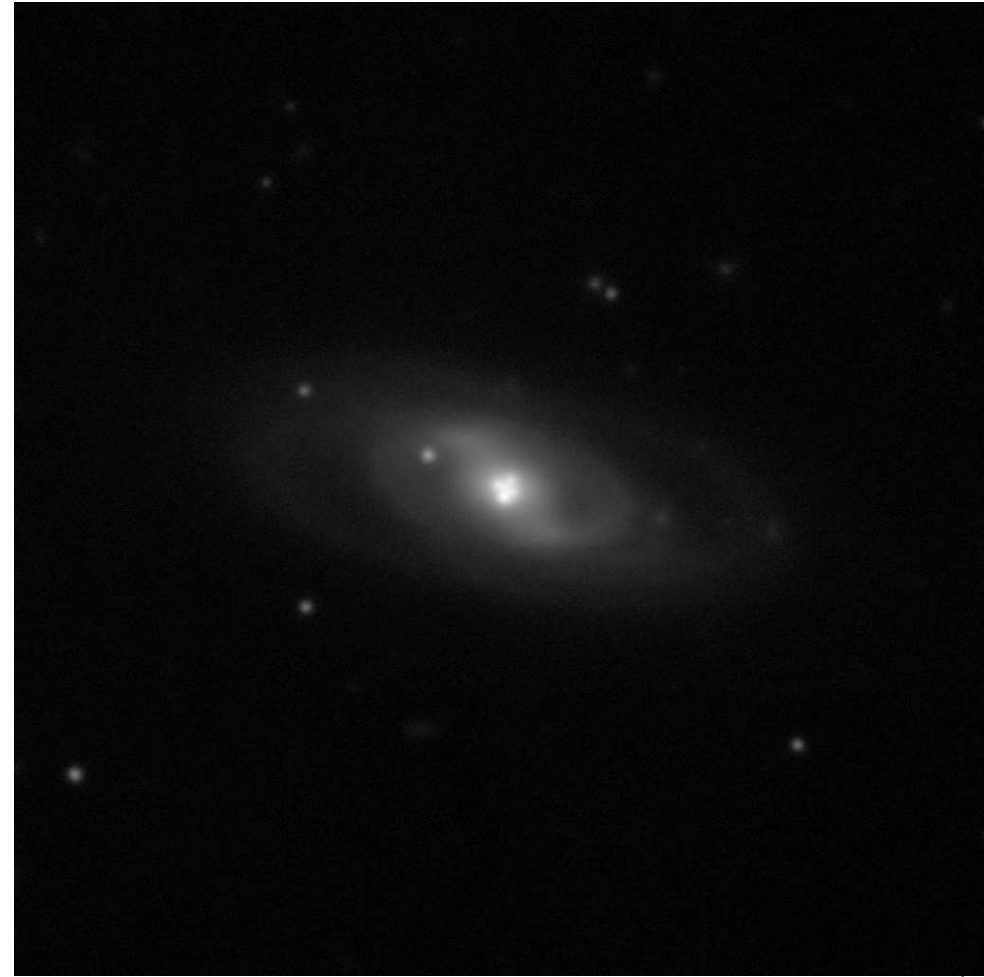
$M_{\text{BH}} > 3$  naptömeg,  $R_{\text{BH}}$  pár km

Einstein-kereszt:

10 milliárd fényévre levő pulzárt  
több pontba nagyít és fókuszál 1  
milliárd fényévre levő galaxis  
fekete lyukkal a közepén

(ESO, Very Large Telescope,  
Chile, 2008)

Többszörös kép: nem  
egyenletes tömegeloszlás



# Veszélyeztetjük-e a Naprendszert?

Bizonyos elméleti modellek szerint nagyenergiájú p-p ütközésben keletkezhetnek mikroszkópikus fekete lyukak. Kis tömegűek, azonnal elpárolognak.

A kozmikus sugarak milliárdszor nagyobb energiával bombázzák a légkört, Holdat, bolygókat évmilliárdok óta, de nem keletkezett nagy fekete lyuk.

Az LHC-ben sem valószínű, de meglátjuk???

YouTube animáció



# Rengetegféle modell van



# Részecskefizikai módszerek *haszna*

- Világháló: CERN, 1989  $\Rightarrow$  nagyvilág: 1994–
- Müonspin-rezonancia módszere (kémia, szilárdtestfizika)
- Pozitronemissziós tomográfia az orvosi diagnosztikában
- Részecskefizika: 120 gyorsító, gyógyászat: 7000, anyagtudomány: 7000 (2004-es adatok)
- Grid-hálózatok a számítástechnikában
- Az órási méretek miatt komoly technikai fejlesztéseket indukál: **100000 egyforma műszerre tender!**
- Élenjáró programozástechnikai gyakorlat: bankok előszeretettel alkalmaznak HEP-PhD-t szerzett fizikusokat (**rossz nyelvek szerint ennek köszönhető a jelenlegi világválság**)



# Köszönöm a figyelmet!





# Köszönetnyilvánítás

- Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal
- OTKA NK67974, K72172 és H07C-74153
- EU FP6 MC-ToK 509252 és FP7 III 031688
- Magyar és Osztrák Tudományos Akadémia
- Tét JAP-21/2006 és Tokiói Egyetem
- Megértő együttműködő partnereink

