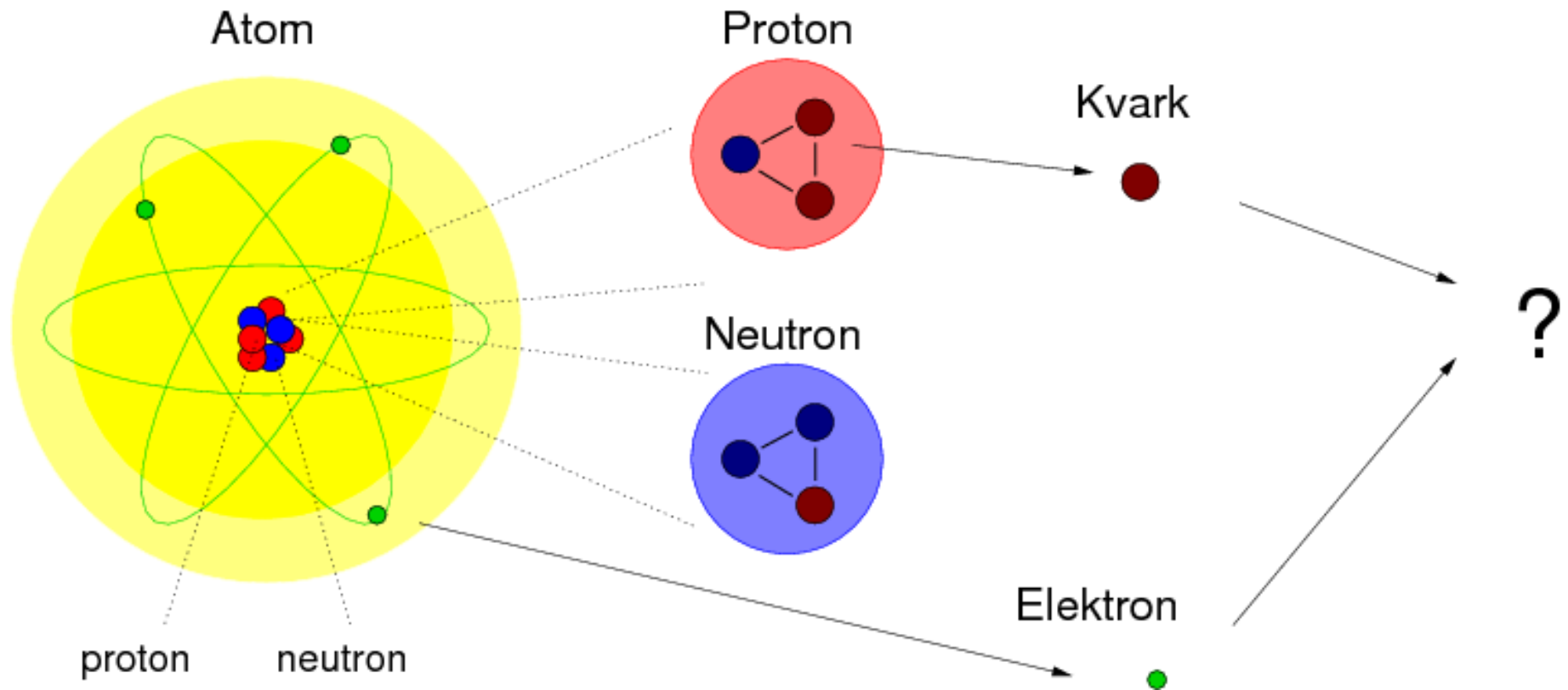


# A legkisebb részecskék a világ legnagyobb gyorsítójában

Varga Dezső, ELTE Fiz. Int. Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék  
AtomCsill 2010 november 18.

- Az ismert világ építőkövei: az elemi részecskék
- Elemi részek megfigyelése, a kvarkok rejtélye
- A játékszabályok: relativitás és kvantumelmélet
- A részecskegyorsító működése
- A Nagy Hadronütköztető (LHC) a CERN-ben
- A Higgs-részecske és az anyag tömegének eredete
- Az LHC első éve

# Az anyag építőkövei



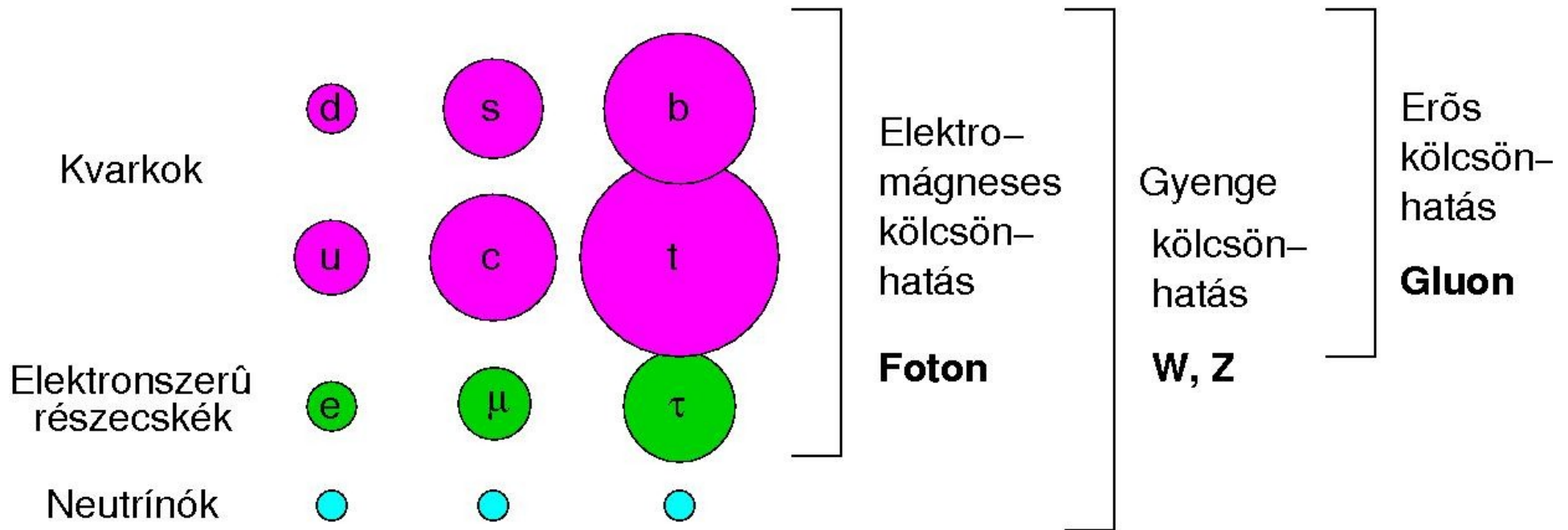
A kémia kérdései:

Miért ilyenek az atomok?  
Hányféle atom, molekula van?

A részecskefizika kérdései:

Miért ilyen a proton?  
Hányféle elemi részecske van?

# Rendszerezés: legegyszerűbb objektumok



A kölcsönhatás-fajtákhoz tartoznak a közvetítő részecskék:

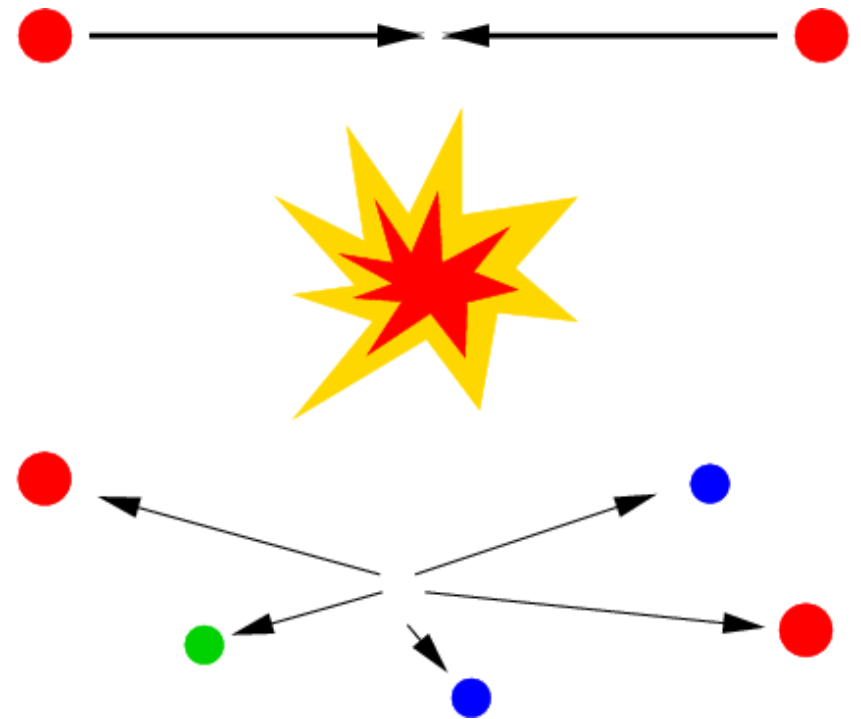
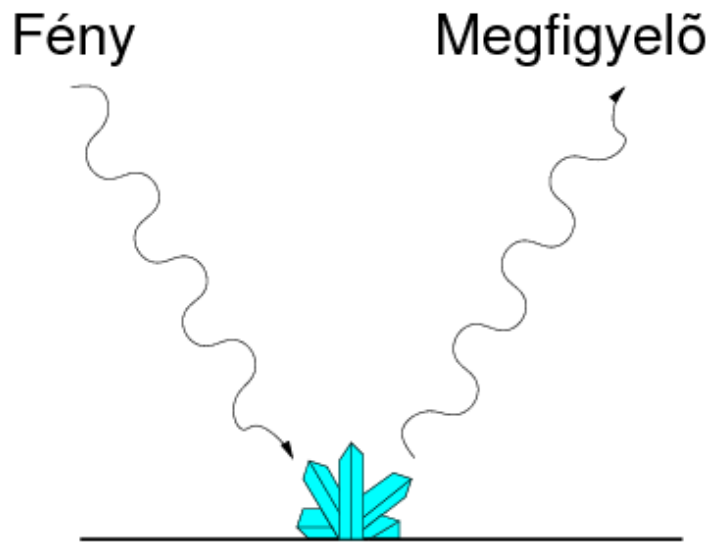
**foton, Z, W, gluonok**

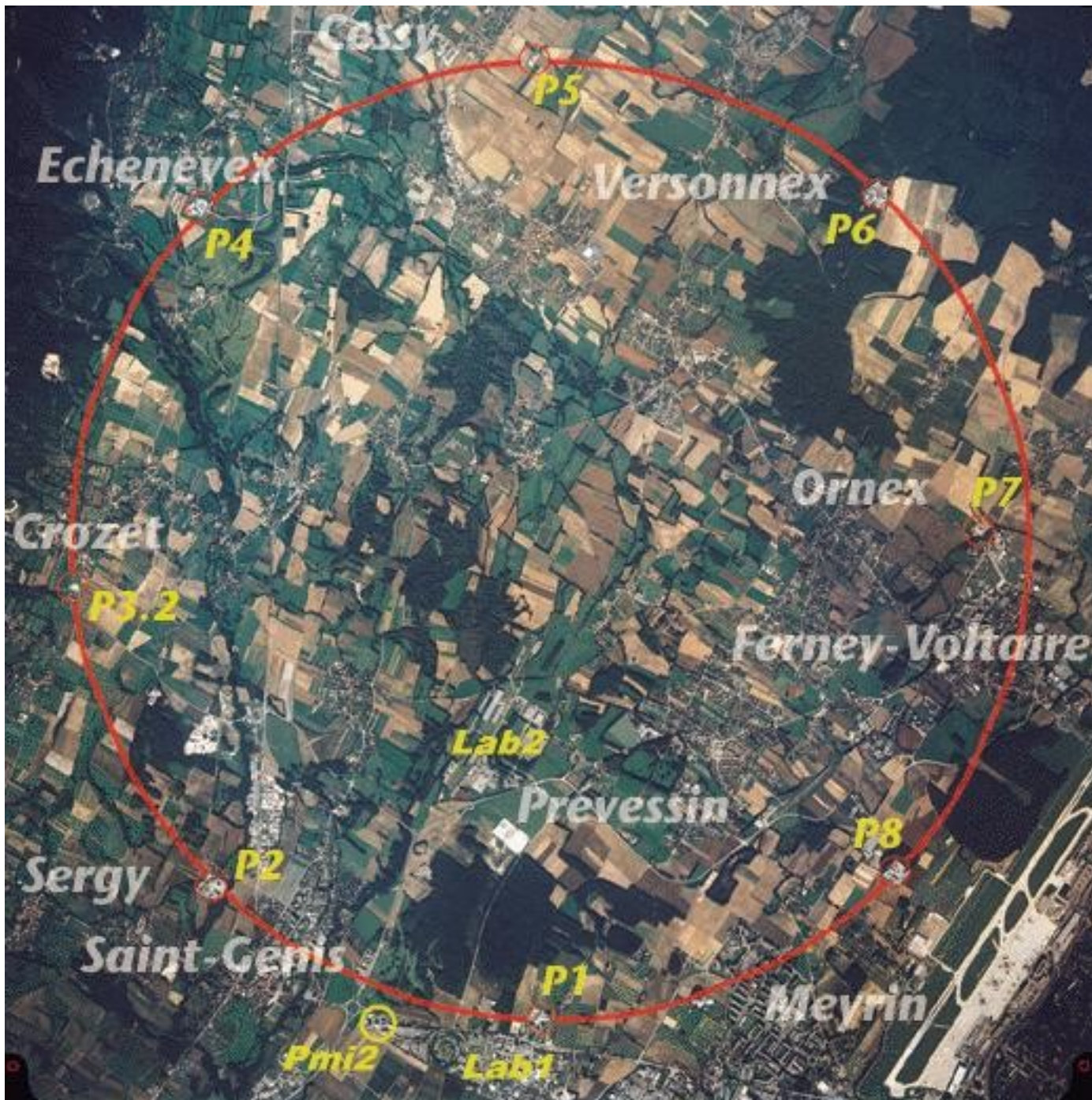
Csak közvetítő részecskén keresztül zajlik mind!

# Miért elemi egy objektum (részecske)?

Törjük darabokra: ha nem osztható, elemi

Részecskefizikai mikroszkóp: legnagyobb energia



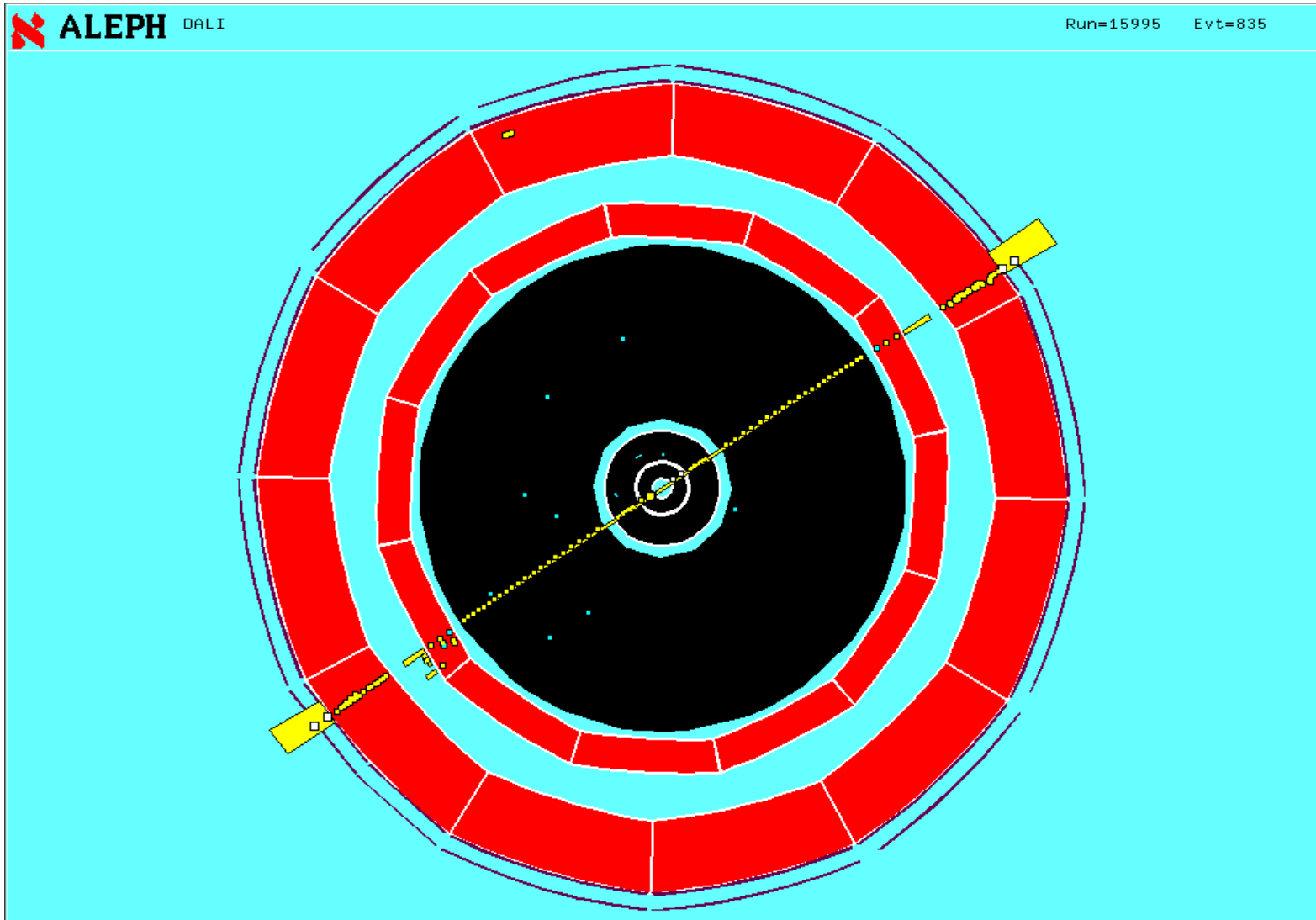


CERN,  
Genf

LHC / LEP  
alagútja

(Svájc-  
Franciao.)

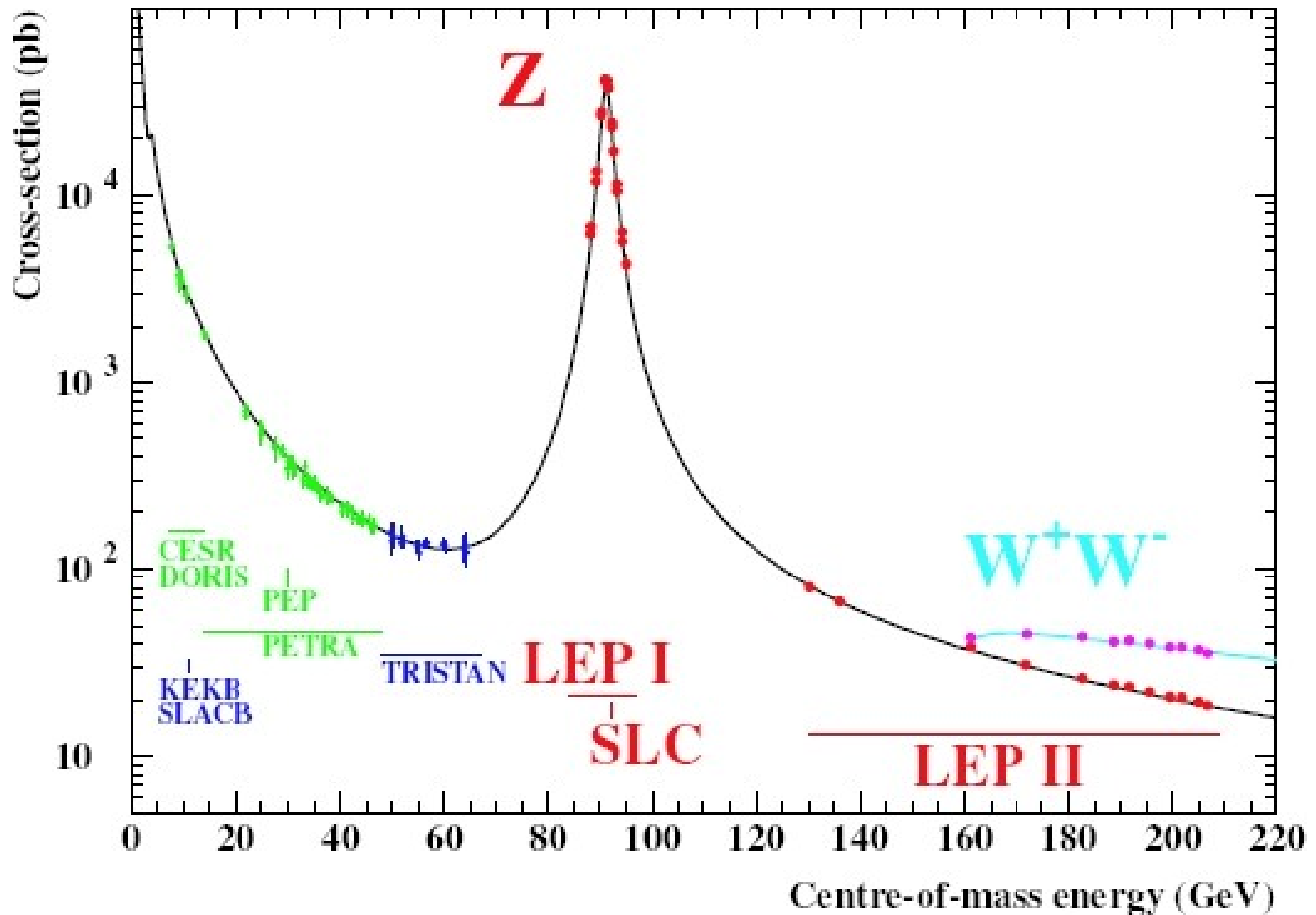
# Instabil részecskék megfigyelése: bomlástermékek



Z részecske bomlása két müonra

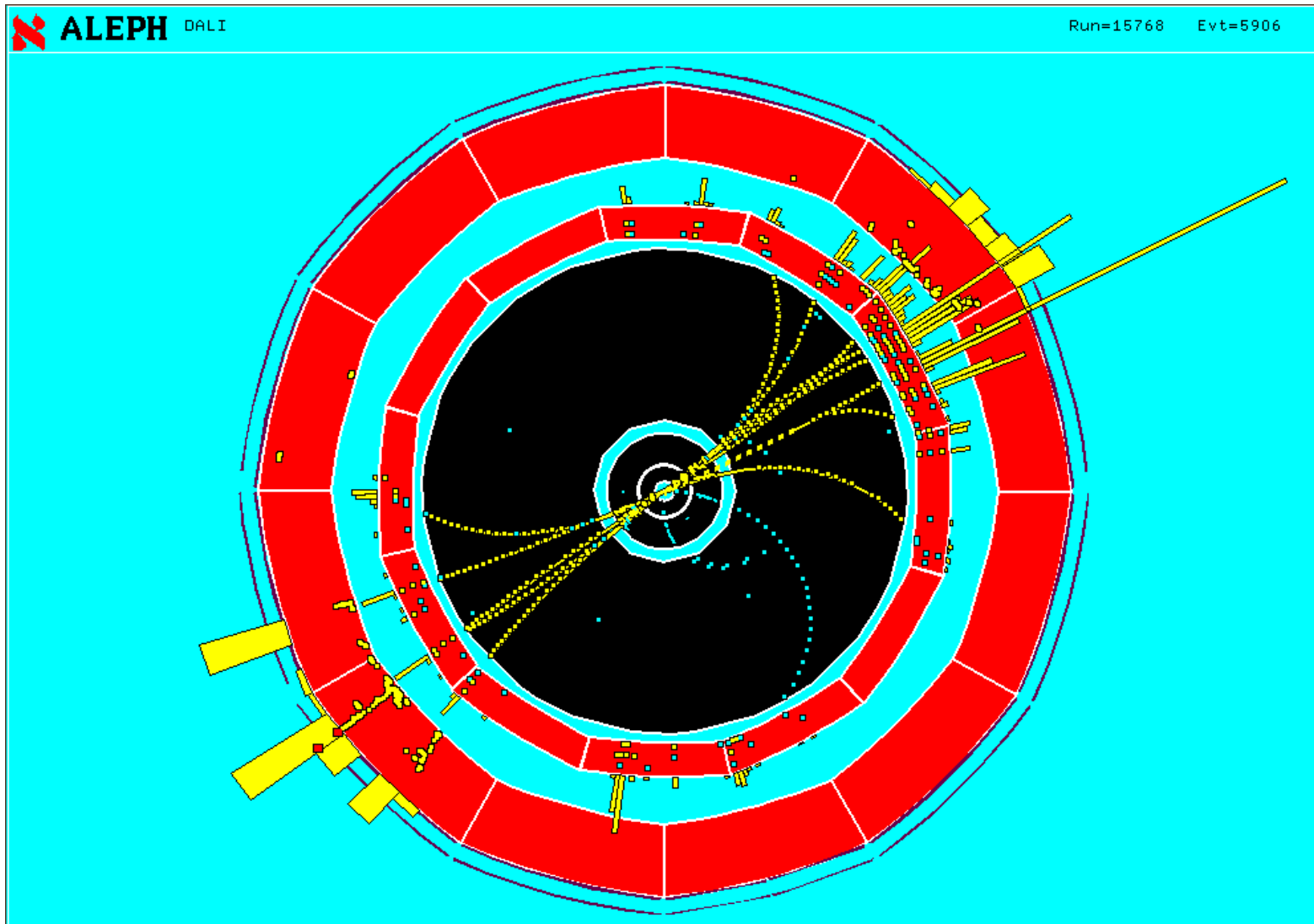
Z részecske (gyenge kölcsönhatást közvetíti): adott energián jelenik meg

Kölcsönhatás valószínűsége



Összenergia ( e+ e- részecskék)

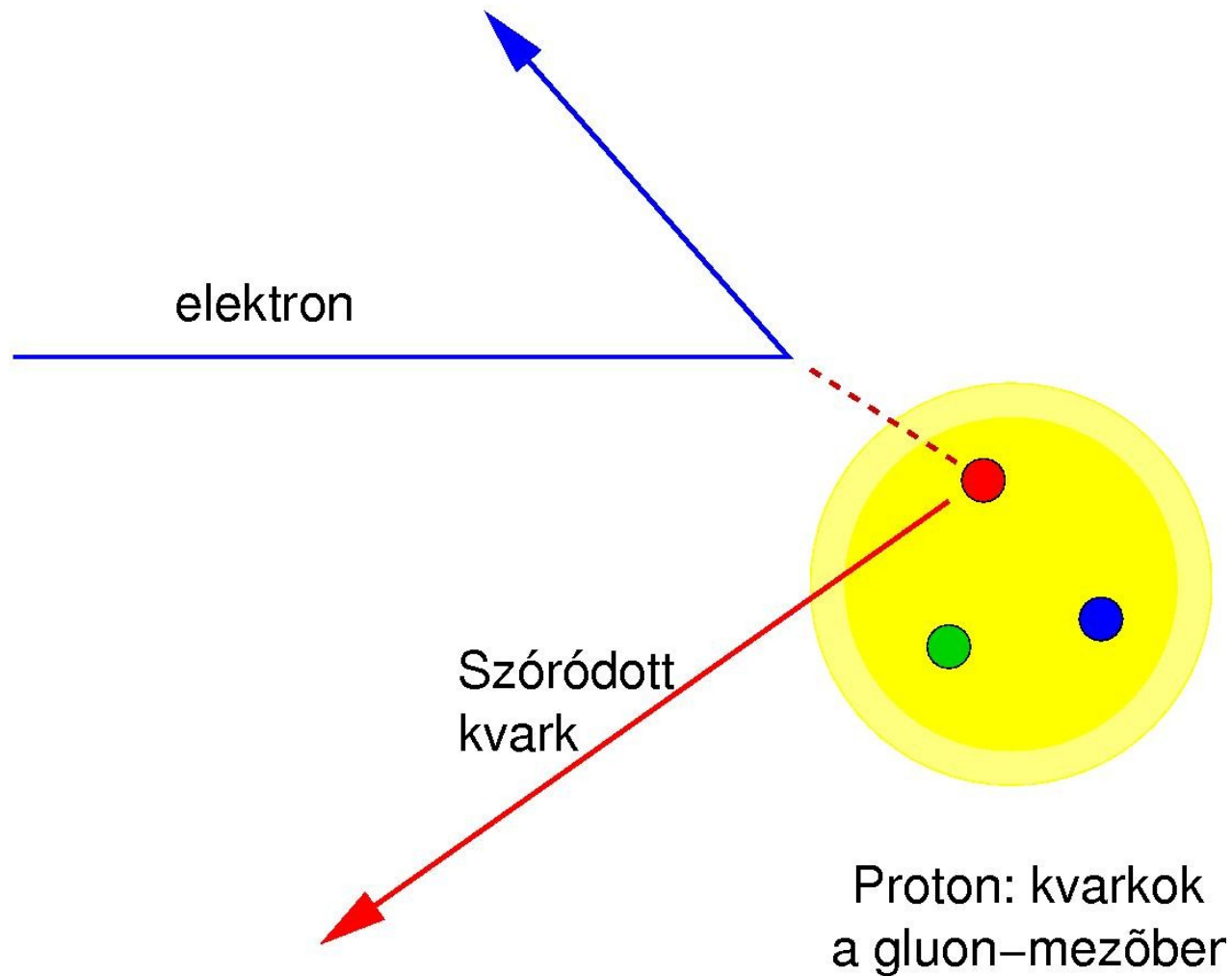
# Kvarkok: szabadon nem léteznek...



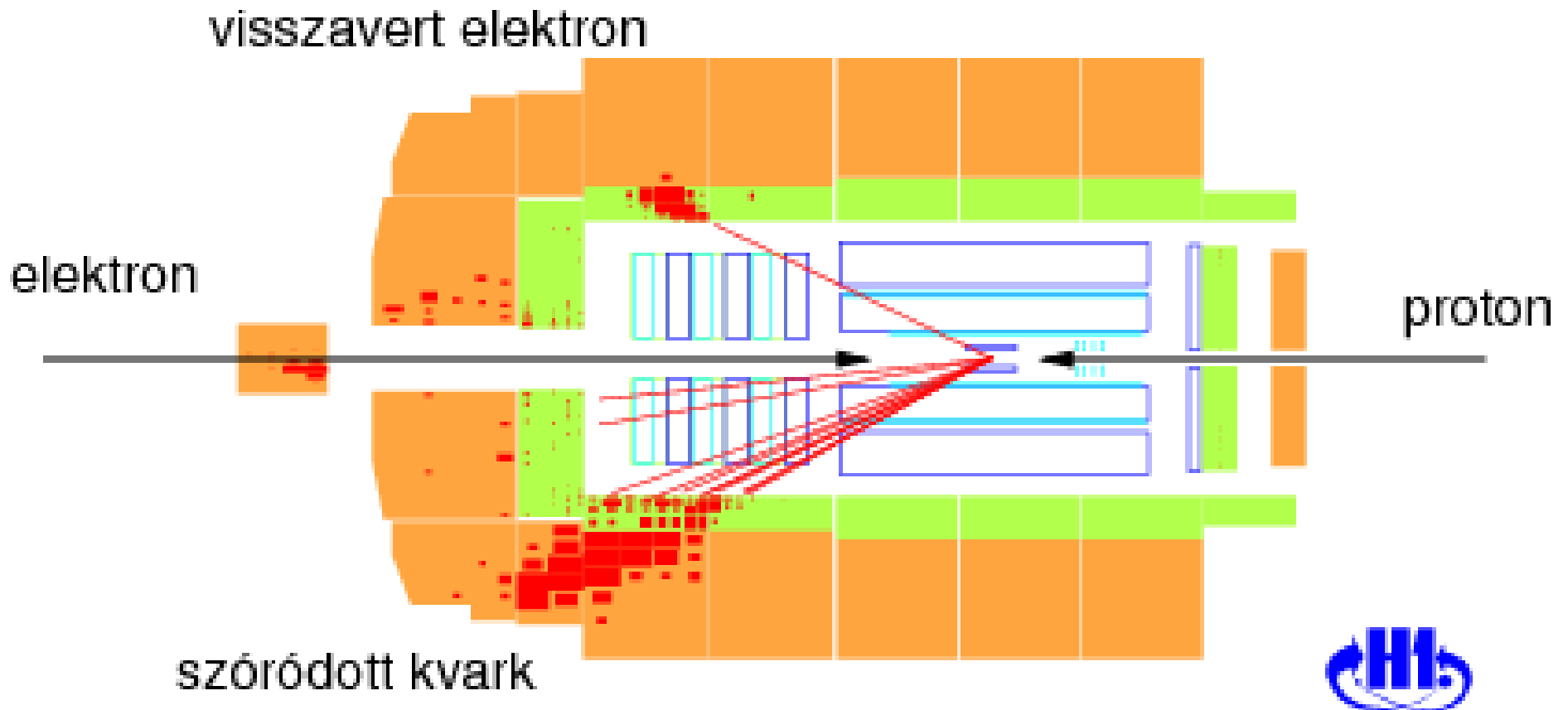
Z részecske bomlása két kvarkba:  
a kvarkok részecskezáport (jetet) keltenek



# Hogyan figyeljük meg a kvarkokat a protonban?

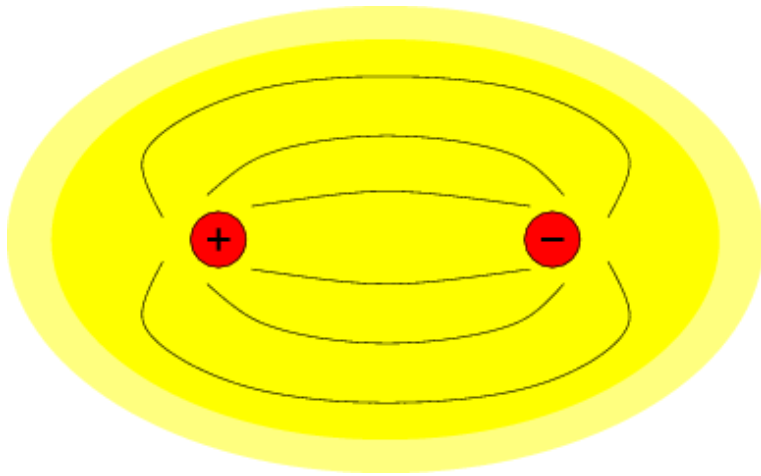


# Elektron meglök egy kvarkot



Miért viselkednek ilyen furcsán a kvarkok???

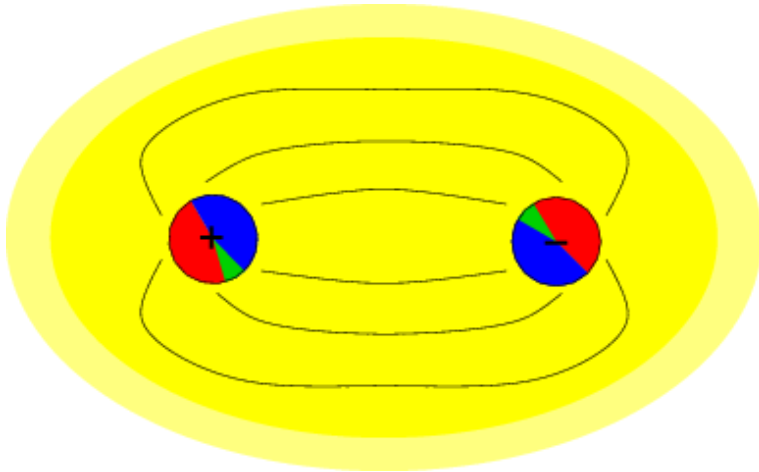
# Elektromosság (mágnesség)



Elektromos erőter  
töltések között:  
elektromos mező

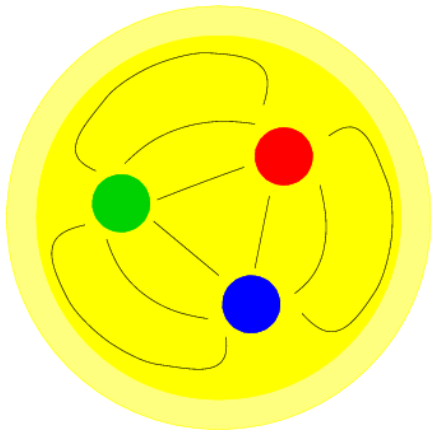
(Mezőelmélet: 1800-as évek, Maxwell, Faraday, Gauss, Hertz)

# Erős kölcsönhatás: „színes” töltés



(Semmi köze a színhez...)  
Arra utal, hogy nemcsak  $+2e$   
vagy  $-3e$  lehet a töltés, hanem

$$2z + 4x - 3y \quad (\text{vektor}).$$



Kétféle stabil objektum létezik:  
két kvark (szín - antiszín),  
vagy három kvark (pl. proton)

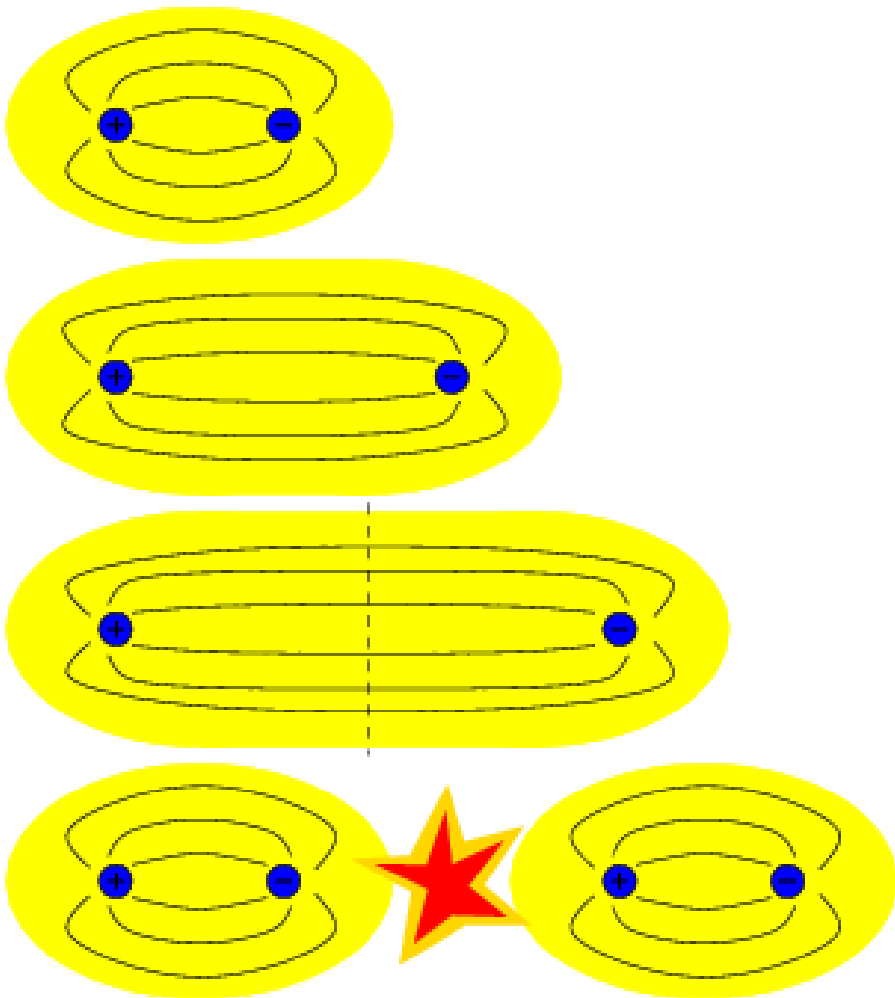
Az erős kölcsönhatás igazi érdekessége:  
a kölcsönhatást átvivő mezőnek is van töltése!

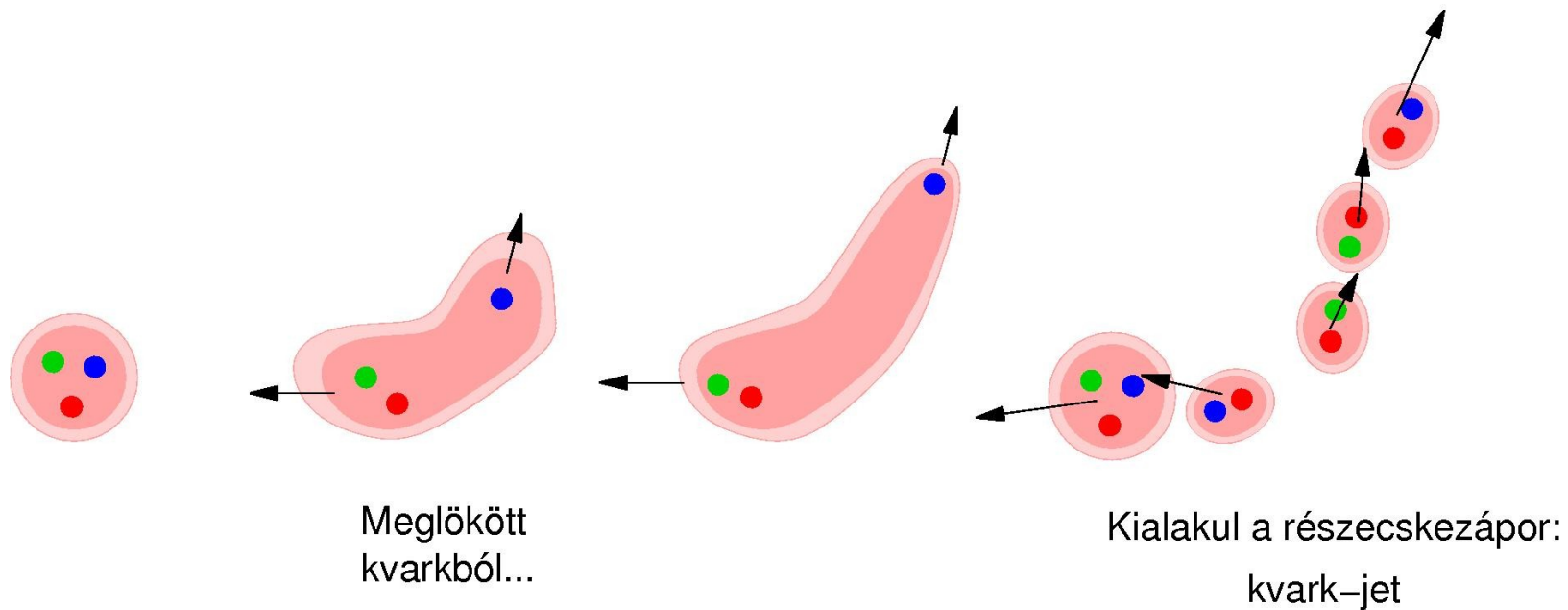
# Kvarkok gluonok mezőjében

Ha szét akarunk  
szedni egy kvark-párt,  
széthúzzuk...

de nem engedi őket a  
gluon-mező (cső)

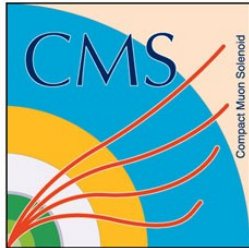
... tovább húzzuk:  
QM széthasítja  
két újabb párra!



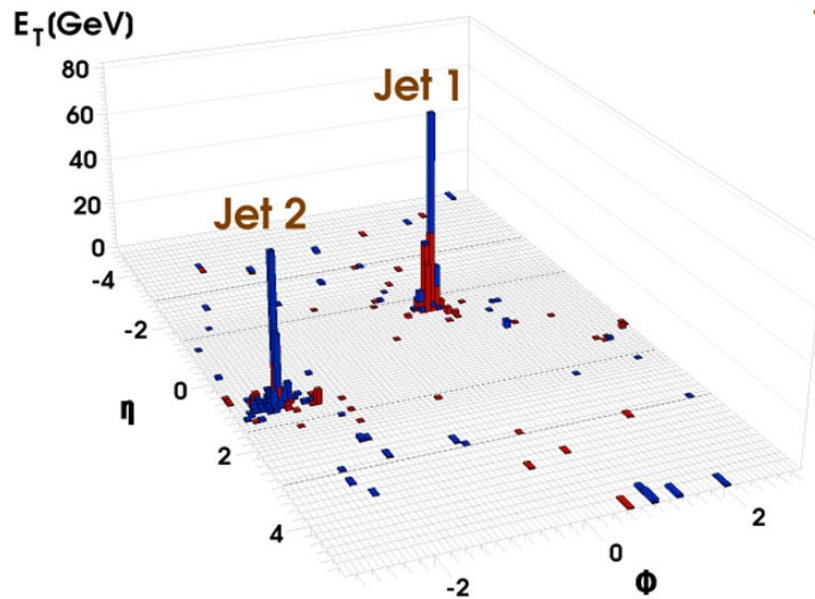
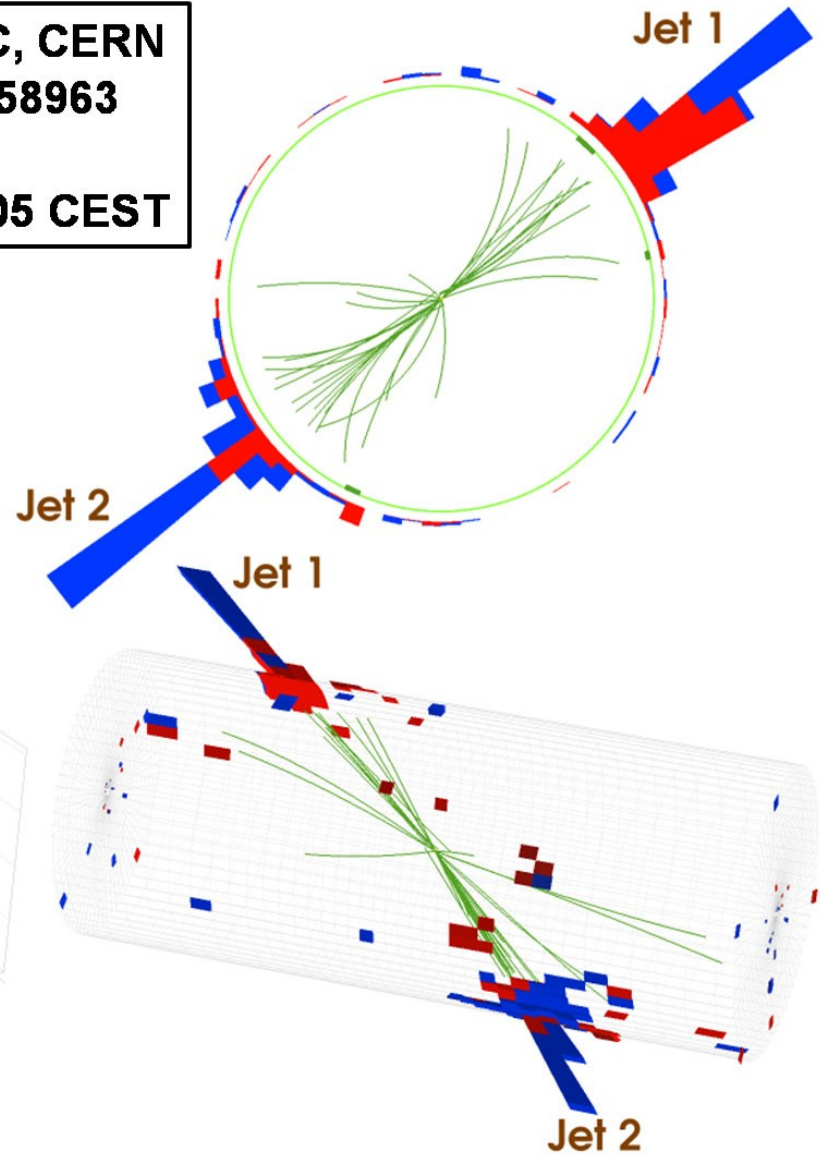


Szabad kvarkok nem léteznek:  
mindig magukkal rángatnak további kvarkokat...

# LHC: kvark-kvark ütközés (erős k.h.)



**CMS Experiment at LHC, CERN**  
**Run 133450 Event 16358963**  
**Lumi section: 285**  
**Sat Apr 17 2010, 12:25:05 CEST**



# De mik általában a játékszabályok az elemi részecskék világában?

- **Kvantummechanika** (részecskék helyett hullámok), avagy:

...minden ami megtörténhet, meg is történik!

- **Relativitáselmélet** (fénynél gyorsabban nem terjed semmilyen hatás)

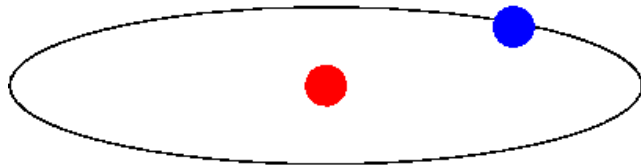


# Atomok felépítése: kvantumelmélet

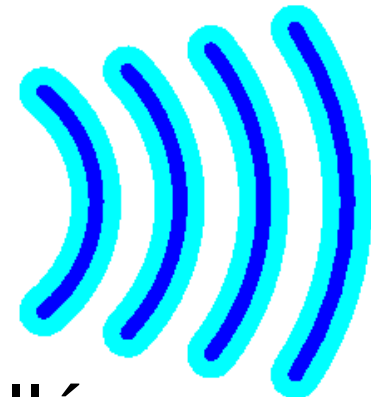
A töltéseket (**pontszerű objektumok**) mint hullámokat nézzük (anyag hullám)



Pontszerű elektron



Keringő elektron



hullámcsomag

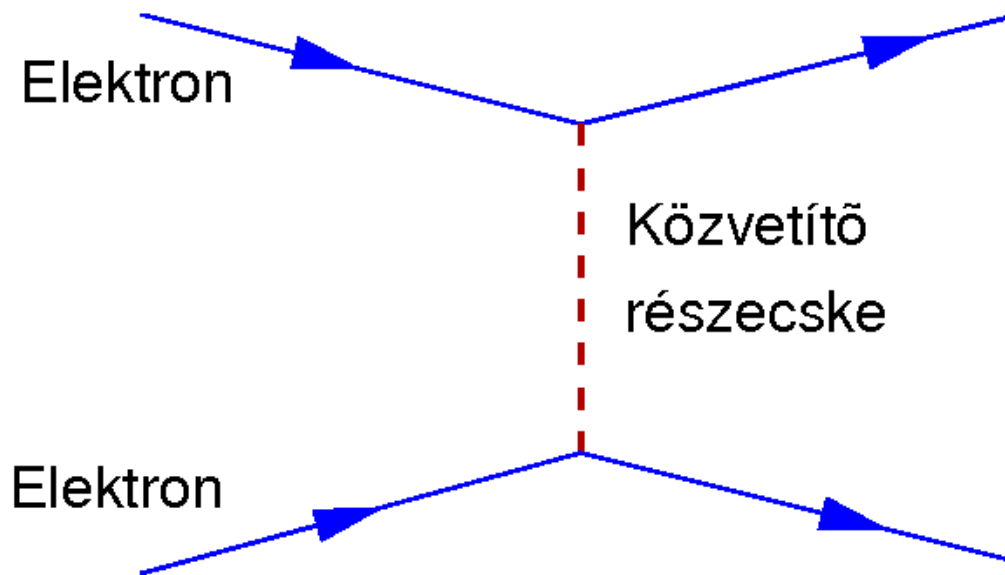


elektron-felhő

Elektromos vonzás: itt távoli erő a hullám pontjai között

Relativitáselmélet megkötése: nincsenek  
„távolható”, „azonnal ható” erők!

Elektromágnesség kvantum-mezőelmélete:



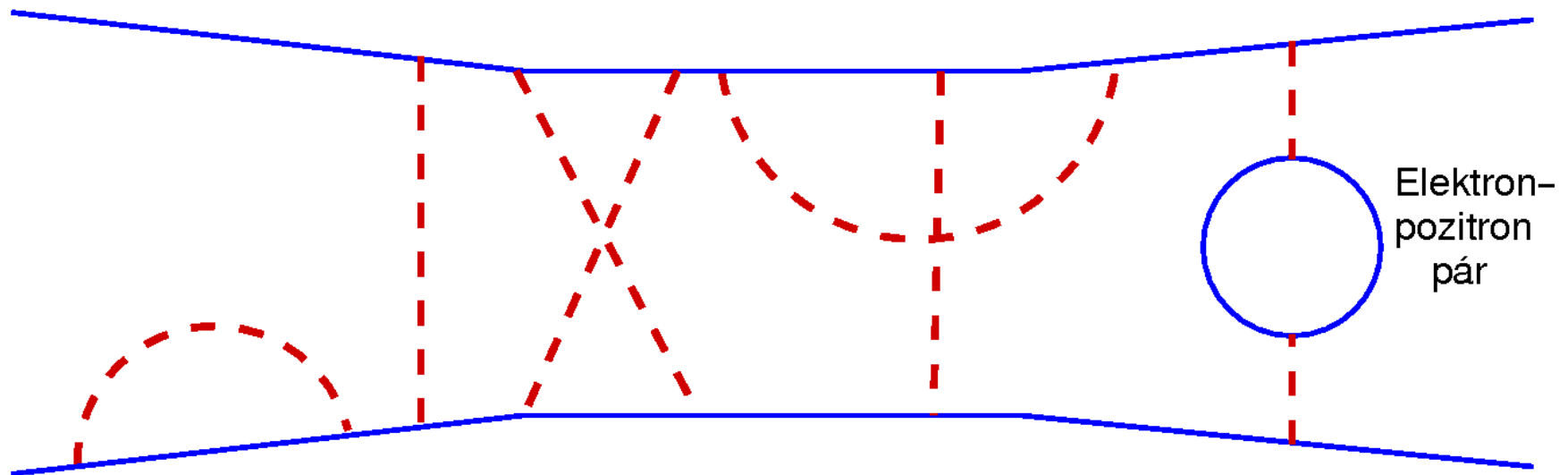
Elektronok kölcsönhatása: FOTON-csere!

„Elektron”: hullám, ami kvantum-mező

„Foton”: hullám, ami kvantum-mező; pl. fény, Röntgen sugárzás...

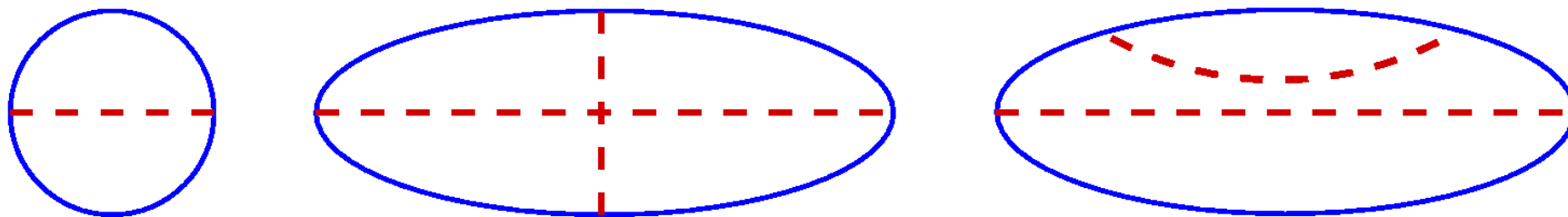
Kvantummechanikai alapszabály:

Fotoncsere **minden lehetséges módon!!!**



Kísérletileg igazolható, hogy ez mind meg is valósul...

# Benépesülő vákuum: részecskék a „semmiből”



... és még sok ilyen ...

Ez tényleg így van, ez is kísérletileg igazolható!

ld. pl. Casimir-effektus, AtomCsill 2009 nov 12 Takács Gábor

Megjegyzés: **energiamegmaradás sérthető**,  
(alagút-effektus) de csak rövid ideig

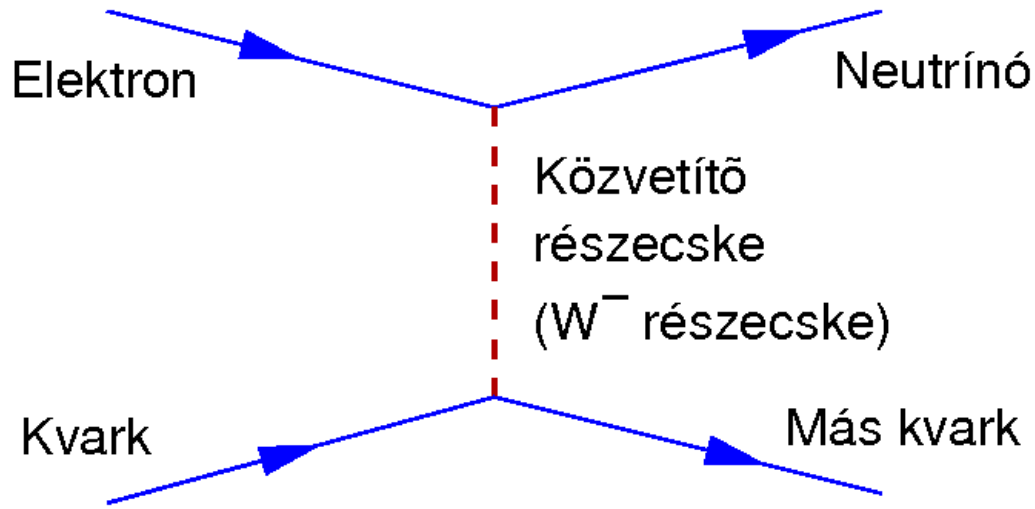
Fontos alapelv: a **vákuum** nem az üresség, hanem  
a (statisztikusan) **legalacsonyabb energiájú** állapot

# Erős és gyenge kölcsönhatások

Erős kölcsönhatás (**kvarkok** kvantum-mezői közt)

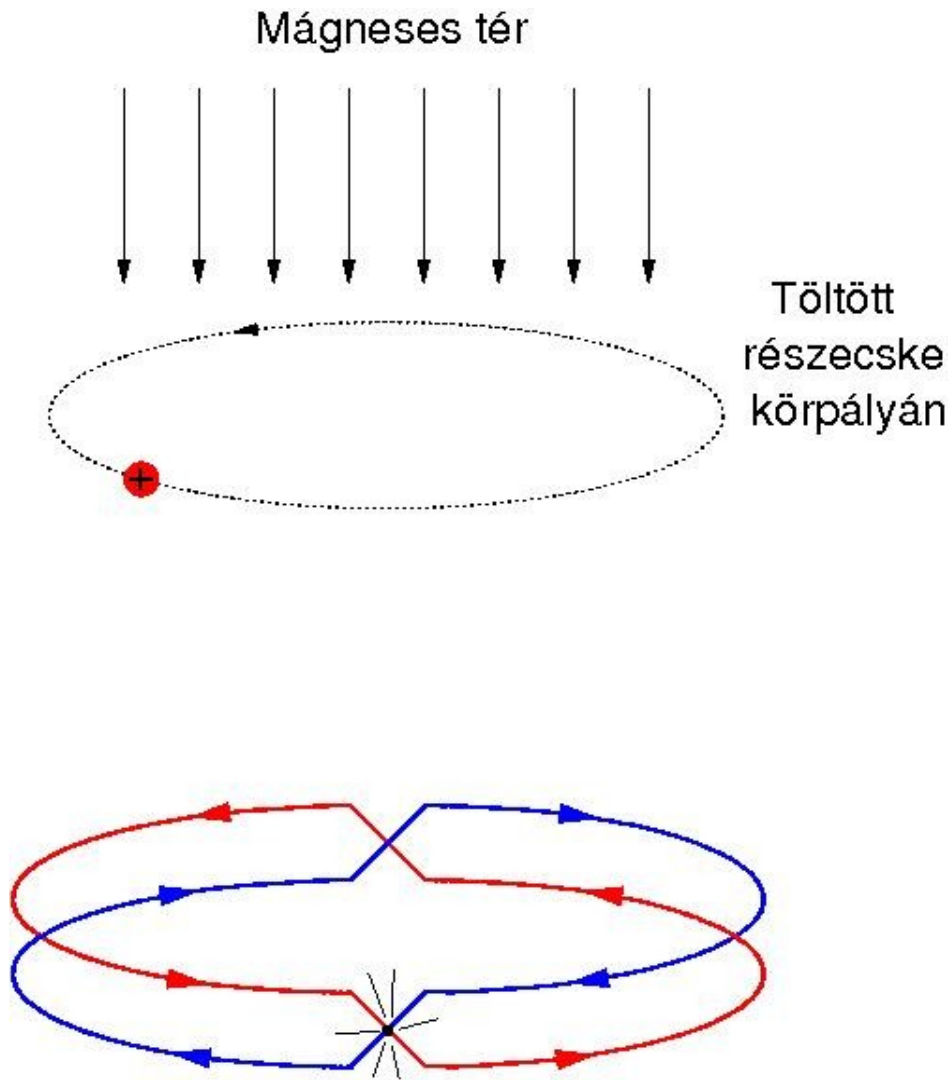
Közvetítő részecske: gluon

Gyenge kölcsönhatás (**mindenki játszik**)



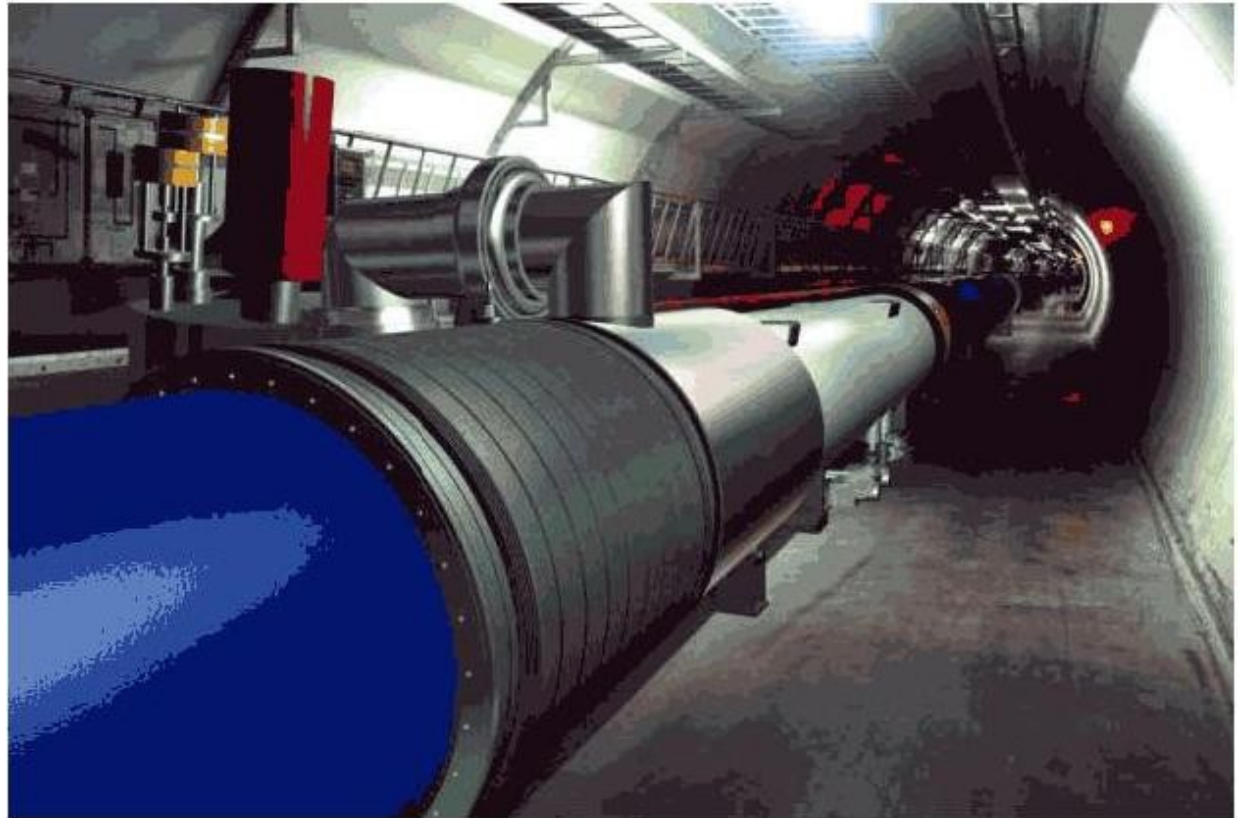
Közvetítő részecske:  
W és Z részecskék  
(érdekesség, hogy ezek nagy tömegűek)

# Részecskegyorsító alapelve



- Mágneses térrel körpályán tartjuk (nagy energia = nagy sugár)
- Gyorsítjuk (elektromos térrel)
- A részecskéket ütköztetjük

# LHC felépítése

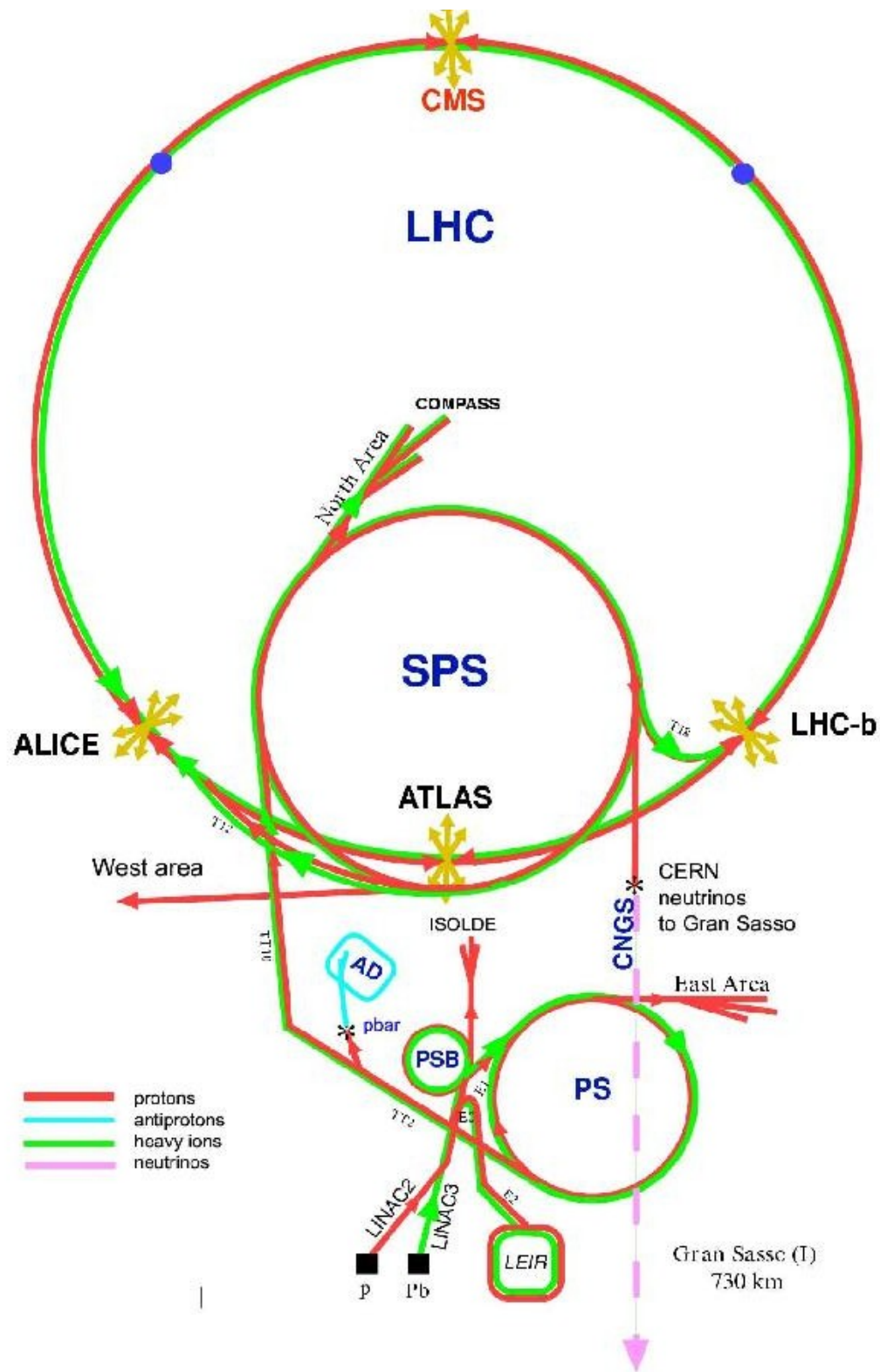


30000 tonna teljes tömeg,  
1.9 K hőmérsékleten

# Az LHC alagútjában







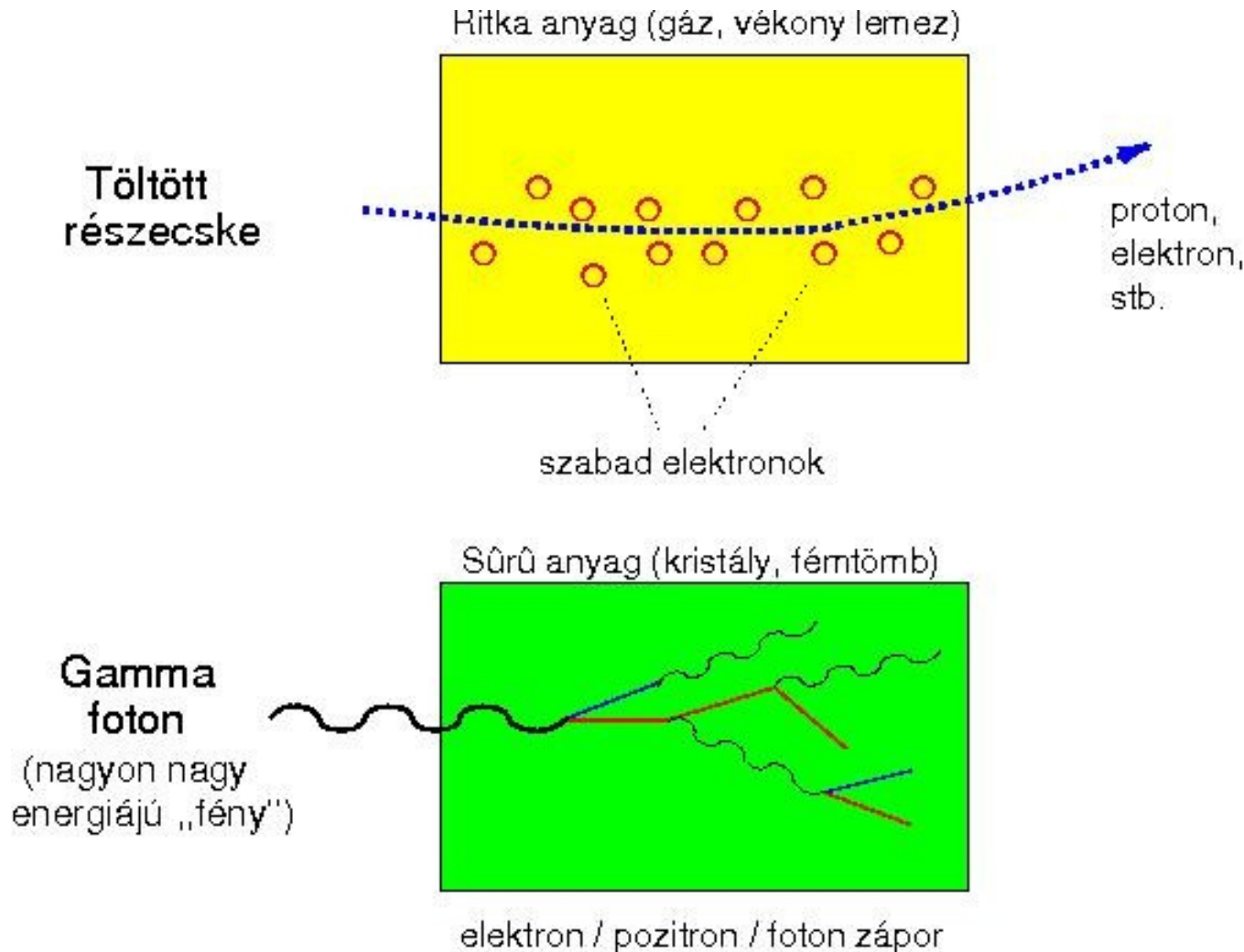
Több lépcsős  
gyorsítás:

egy gyorsító  
egy  
nagyságrendet  
növel csak  
az energián

# „Szenzációs” tények

- A nyalábban tárolt teljes energia 300MJ (lesz) (ez **egy tonna** vizet tudna forrásig melegíteni; gyorsvonat teljes sebességen)
- A teljes lehűtött, 1.7K-es tömeg 30000 tonna
- Egyetlen ütközés energiája akkora, mintha egy 1.2 km/h sebességű narancsmag (0.04 gramm) ütközne (0.6 cm-ről leejtve). Ez **egyetlen pár** proton energiája, miközben egy narancsmag tömege  $2.5 \cdot 10^{20}$  protonénak megfelelő!
- A mágneses tér 1GJ energiát tárol

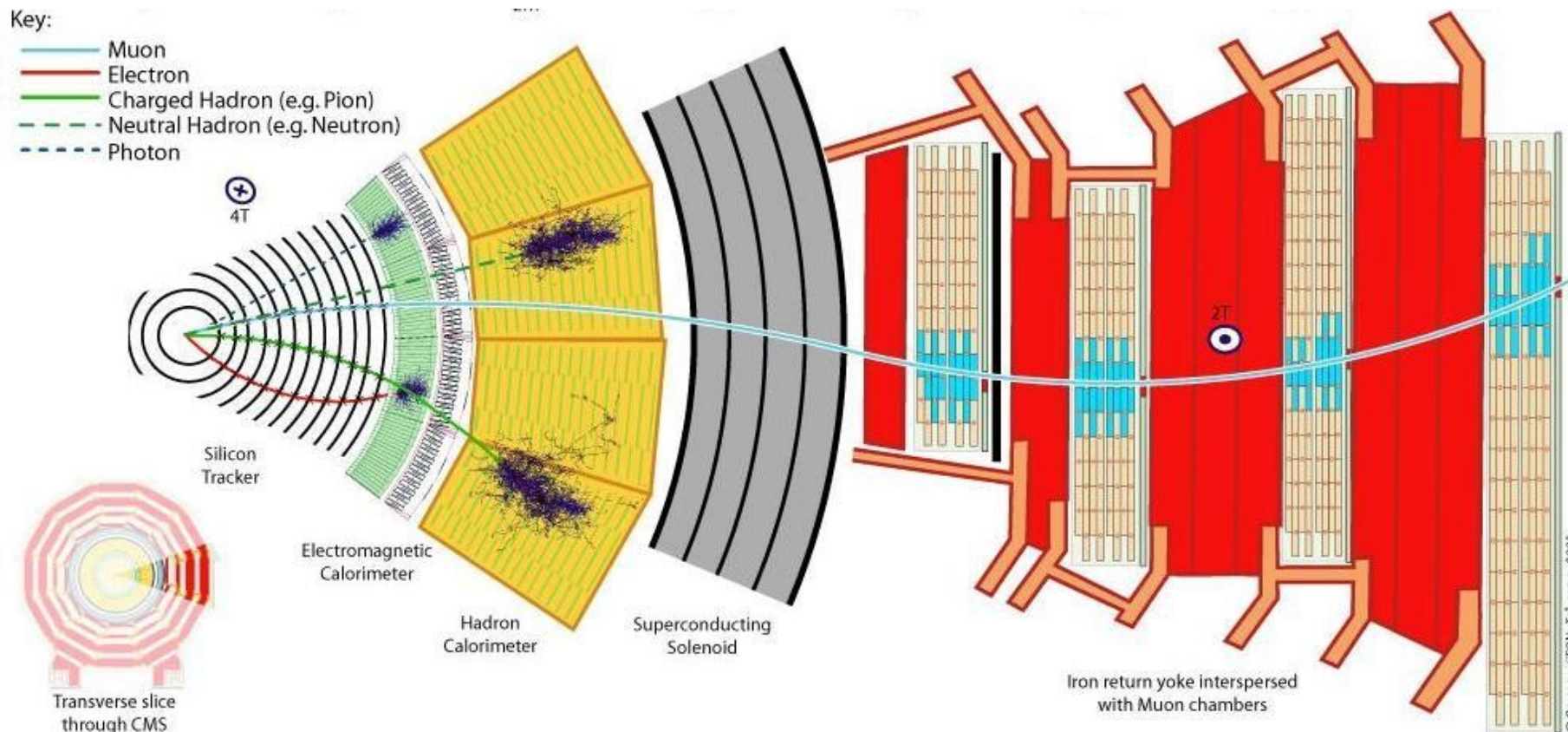
# Keletkezett részecskék detektálása



- Áthaladó típusú detektor: részecskepálya

- Elnyelő típusú detektor: kaloriméter

# Tipikus detektor: réteges szerkezet



gamma foton,  
elektron



kvarkokból álló  
részekék



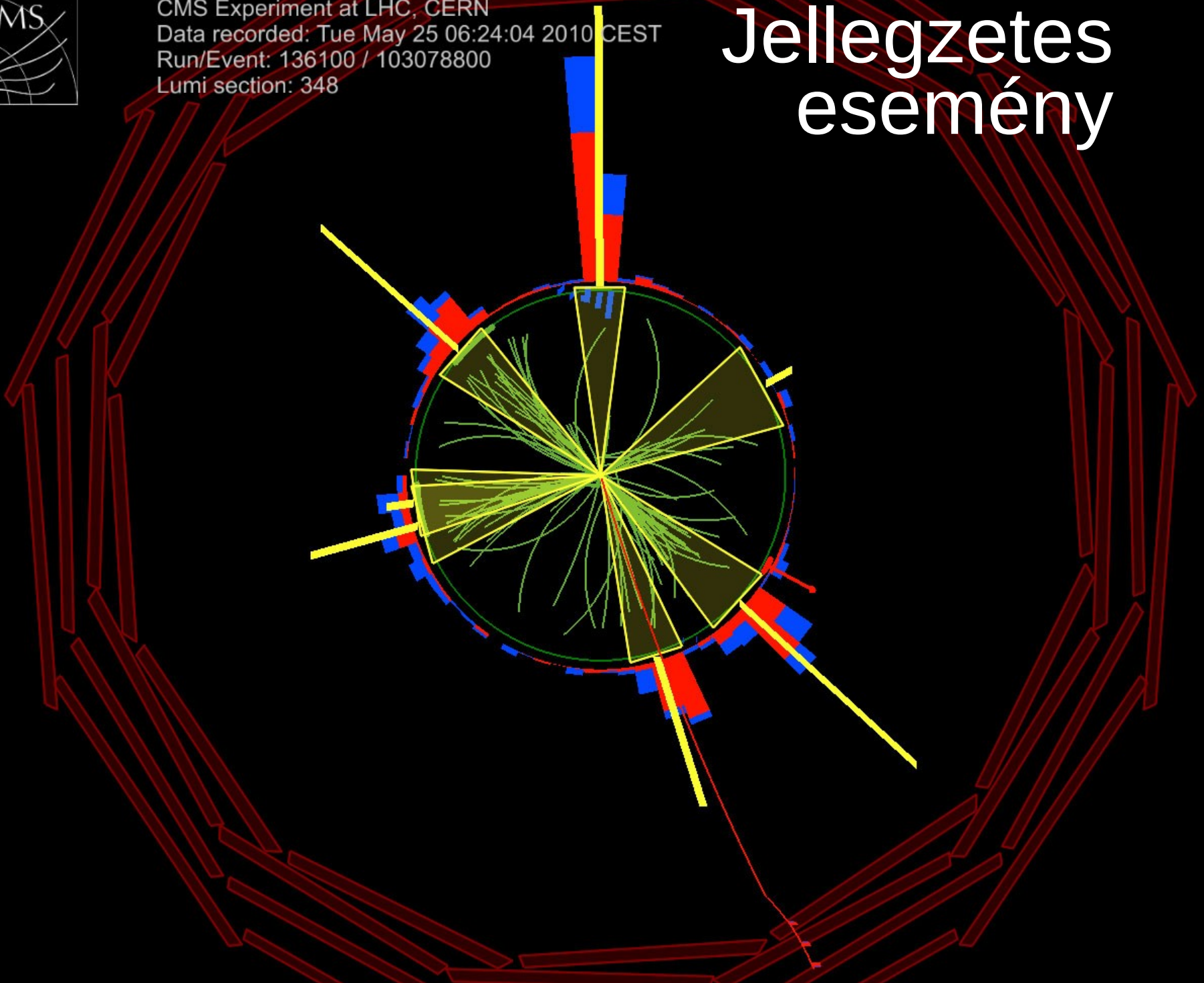
Muon



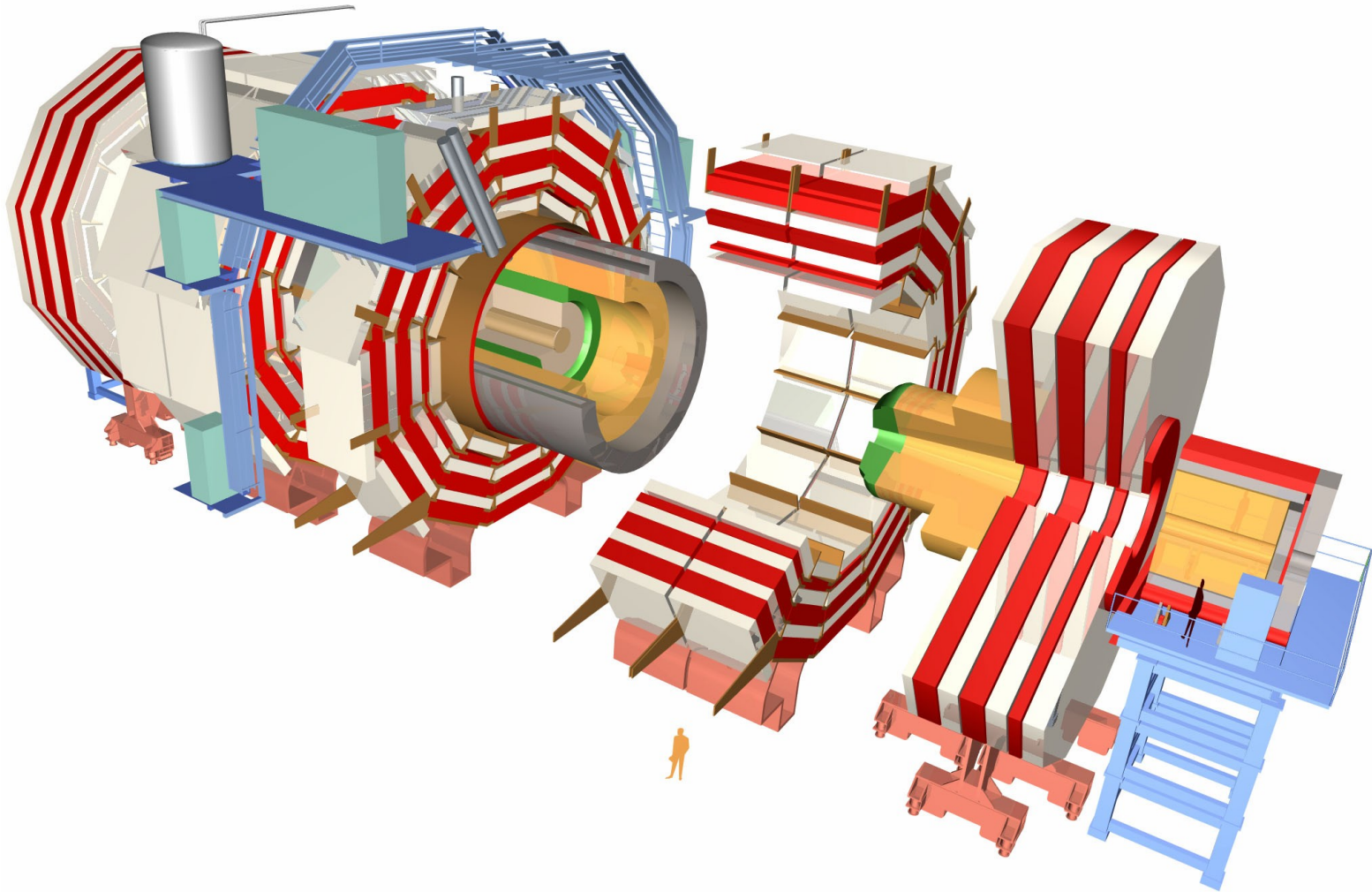


CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Tue May 25 06:24:04 2010 CEST  
Run/Event: 136100 / 103078800  
Lumi section: 348

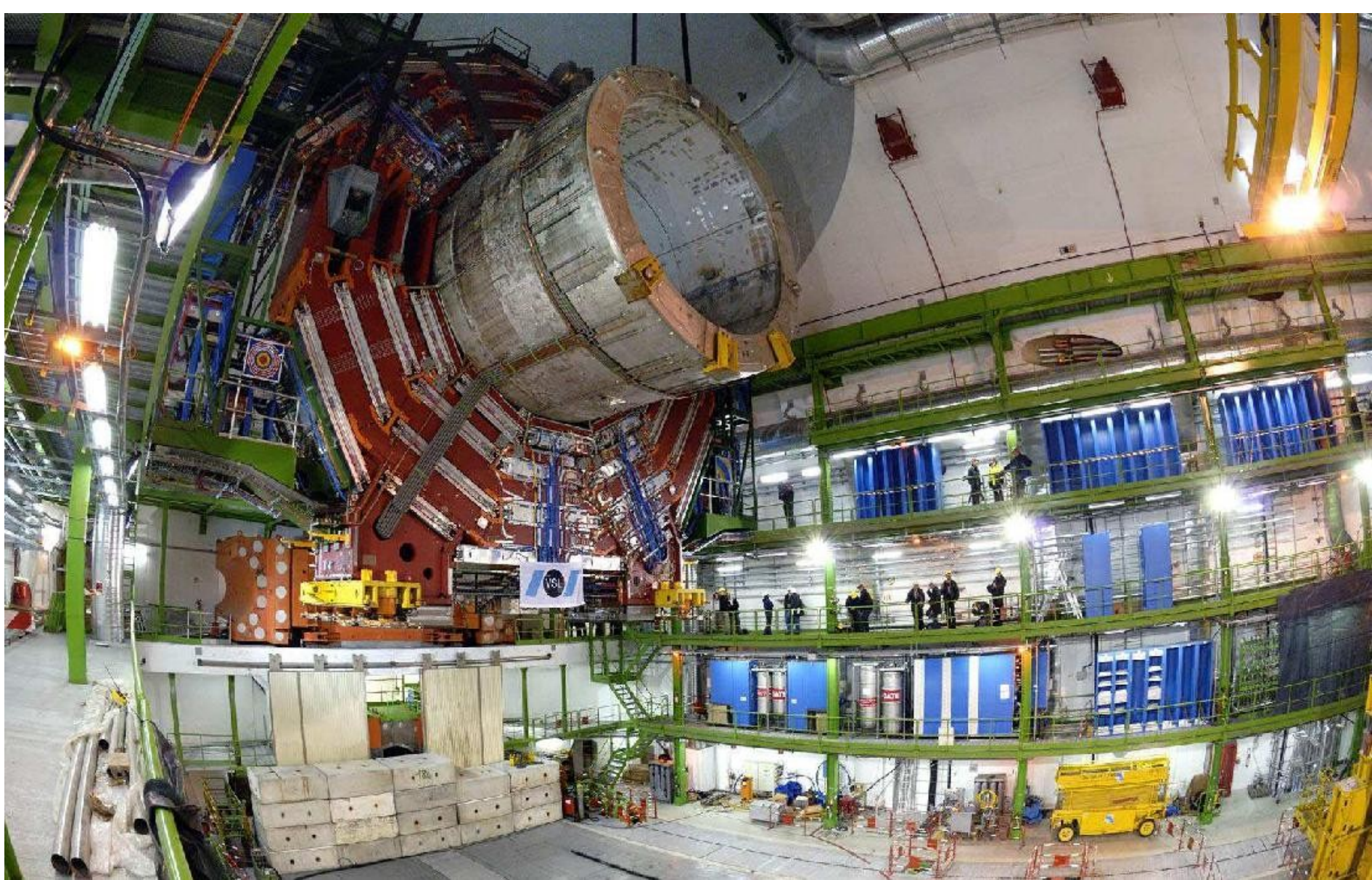
# Jellegzetes esemény



# A CMS detektor a CERN-ben



Jellegzetes „hagymahéj” szerkezet



Nagyon jelentős magyar részvétel!

RMKI (Siklér Ferenc, Krajczár Krisztián),  
ELTE (Veres Gábor), ATOMKI

# Kvantum-mezőelmélet problémája a tömeggel

(Relativisztikus mechanika + Kvantummechanika)

**Kísérleti** megfigyelés: a (gyenge kölcsönhatás) sérti a tükrözési szimmetriát

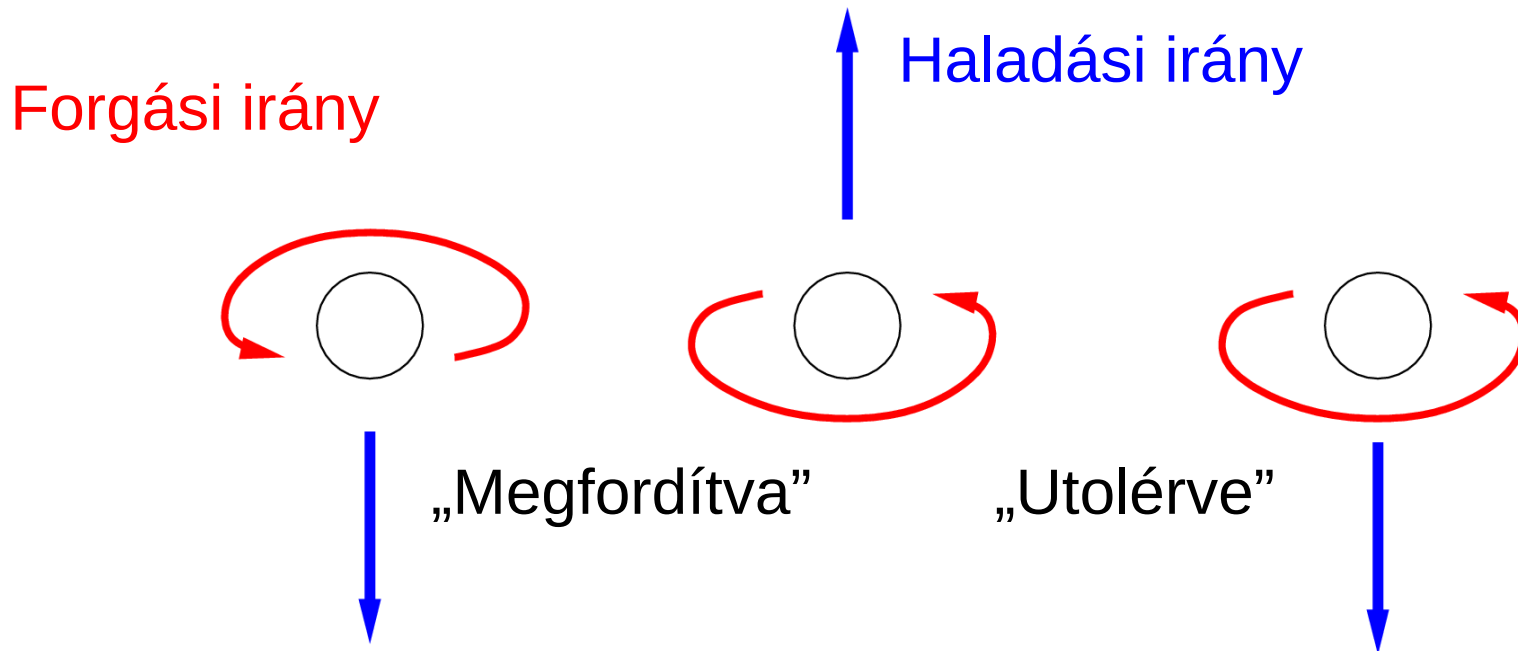


**semmilyen** részecskének nem lehet tömege

A részecskéknak egy speciális részecske ad tömeget!



# Ha egy részecskének tömege van, tükrözhető...



Csak azok a részecskék nem „érhetők utol”,  
akik fénysebességgel mennek,  
azaz zérus a tömegük!

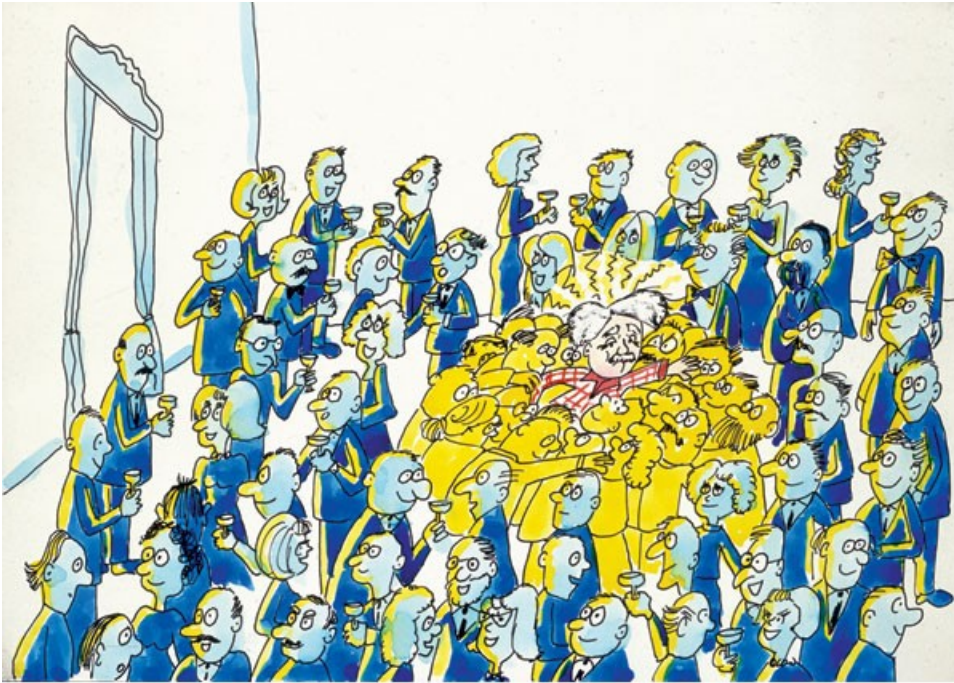
(Nem teljesen korrekt magyarázat, de egyáltalán nem teljesen hibás)

# Higgs- mechanizmus

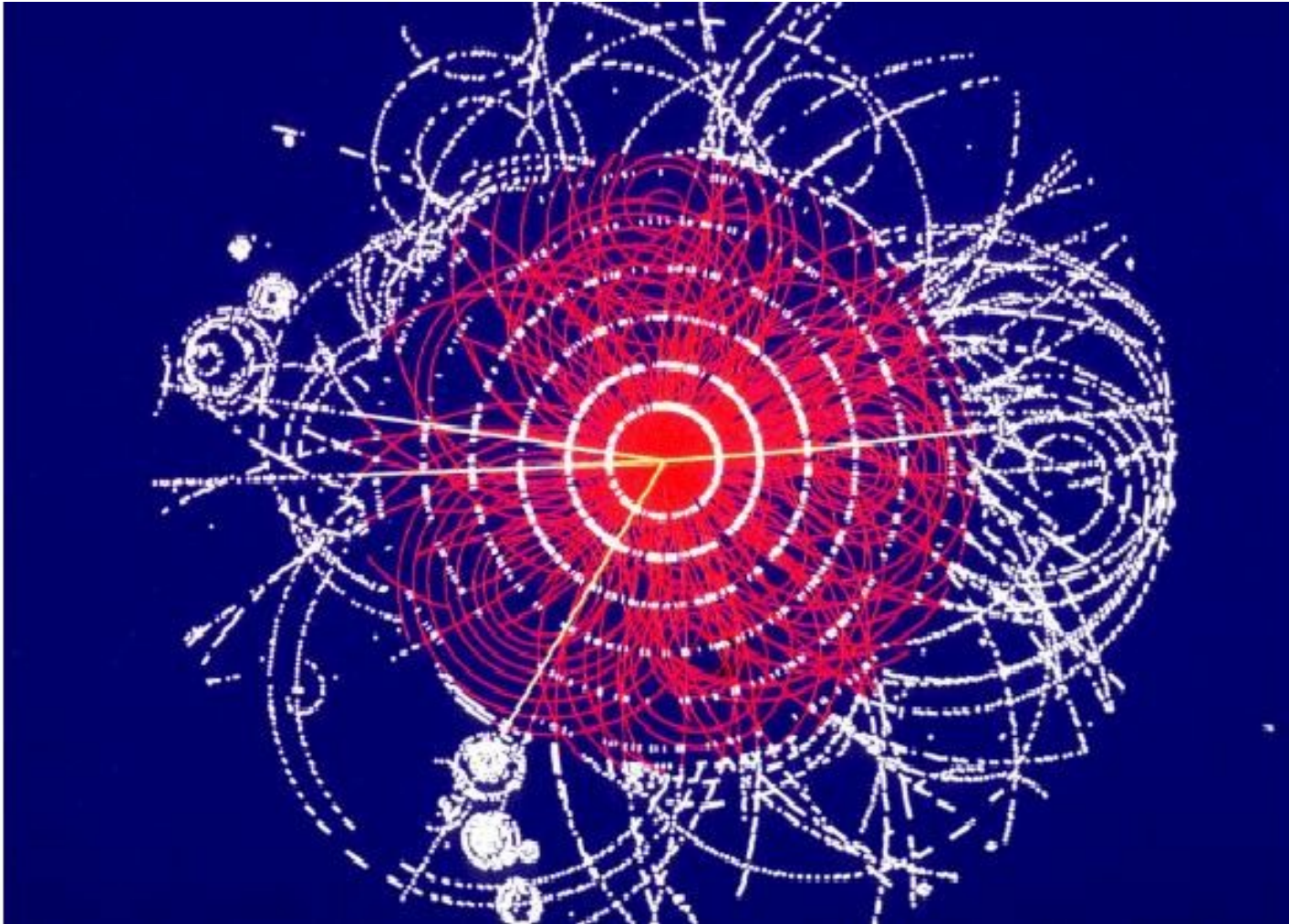
(D. Millertől)

A szobán keresztülhaladó híres ember körül összegyűlnek a kíváncsiskodók... mintha a saját tömege nőne meg!

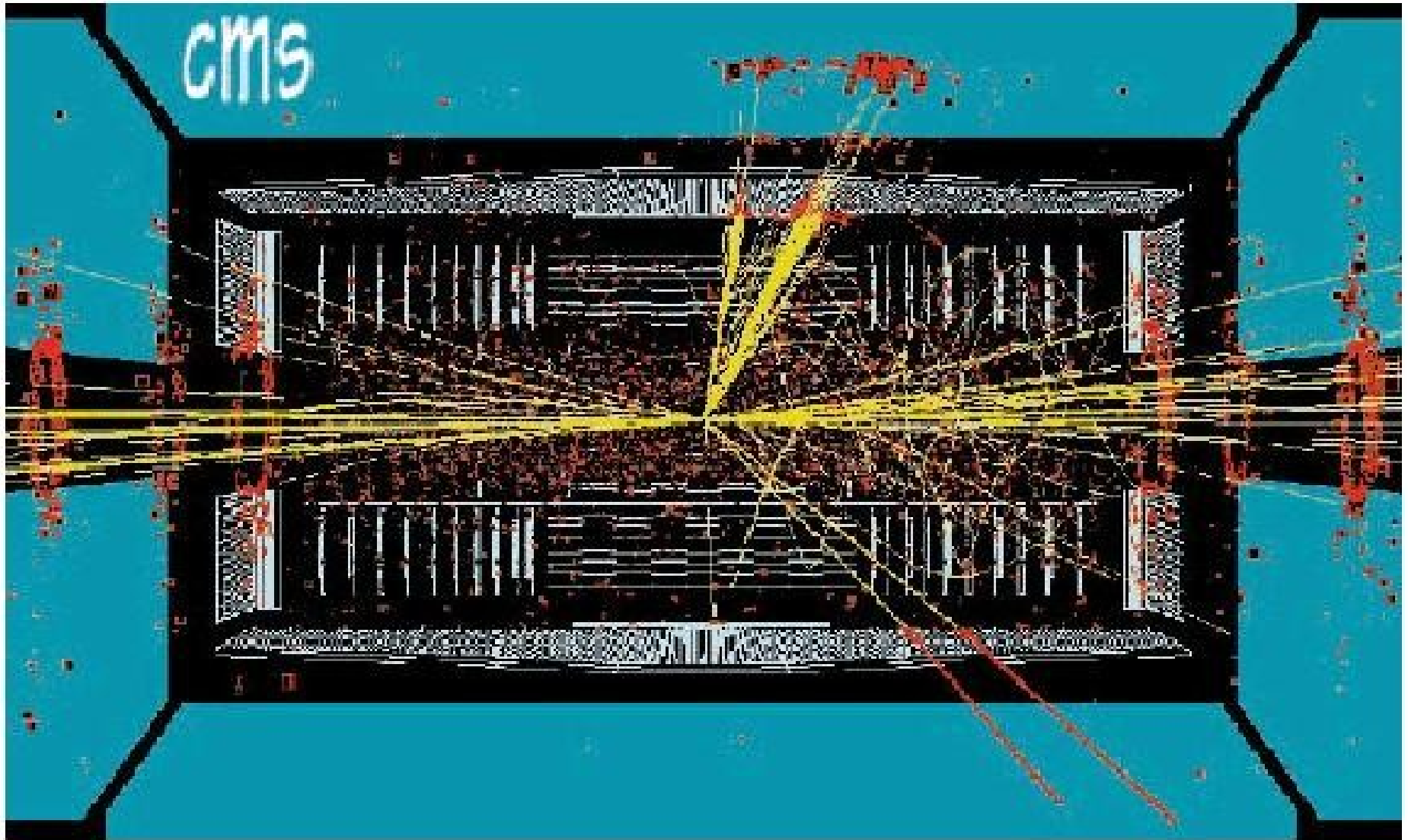
Pletyka terjedése: a Higgs saját tömege



# Higgs részecske a detektorban (szimuláció)



4 gyors müon (nem csak sok lassú egyéb)

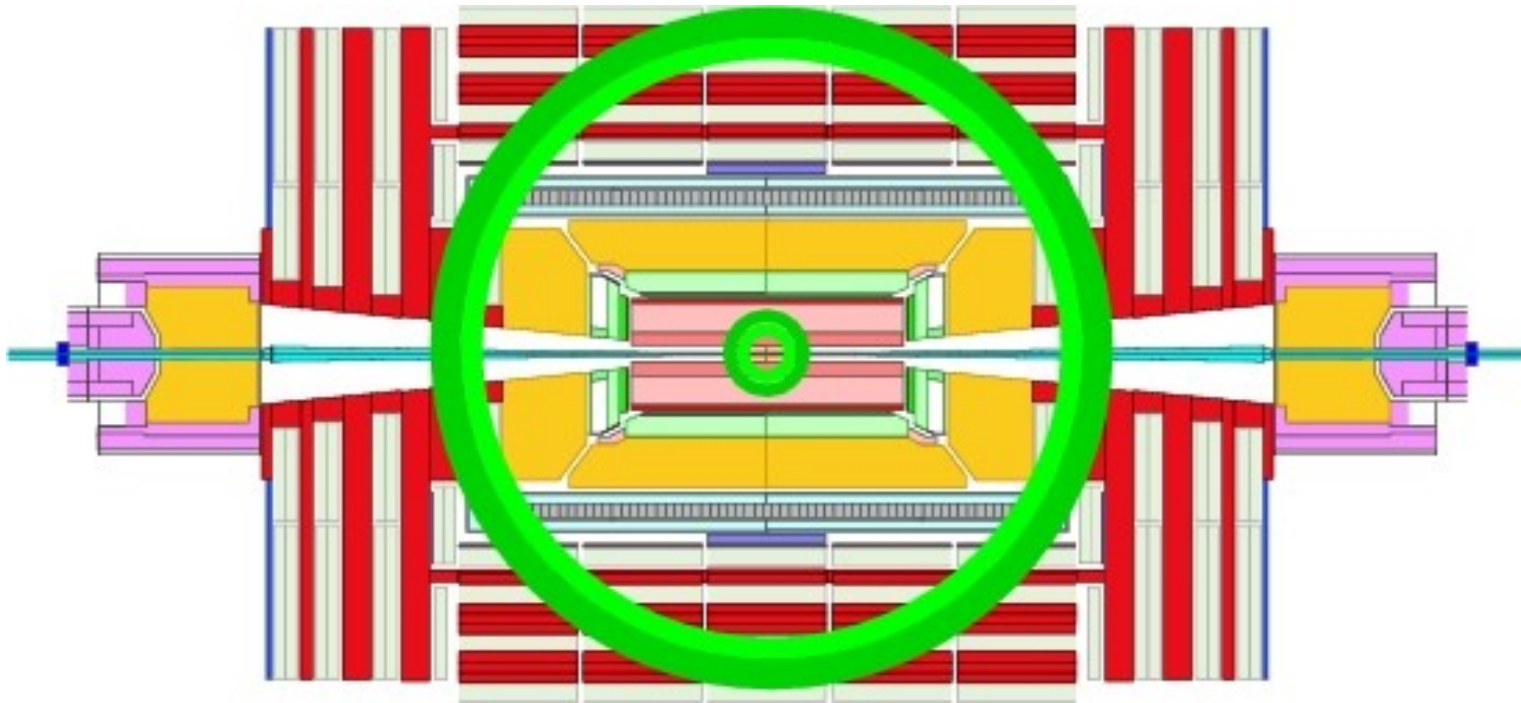


Kicsit bonyolultabb: itt is Higgs részecske bomlik két Z részecskére

**Ritka dolog a Higgs-részecske:**  
mint **egy tű 100 000 szénakazalban!**  
(egy szénakazal  $10^8$  szalmaszál)

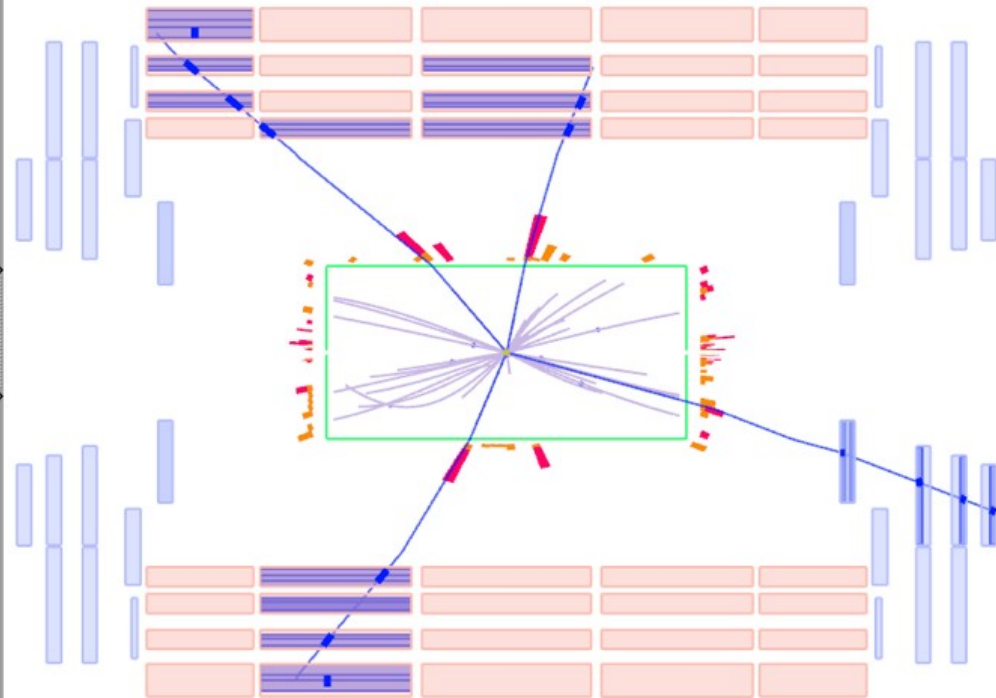
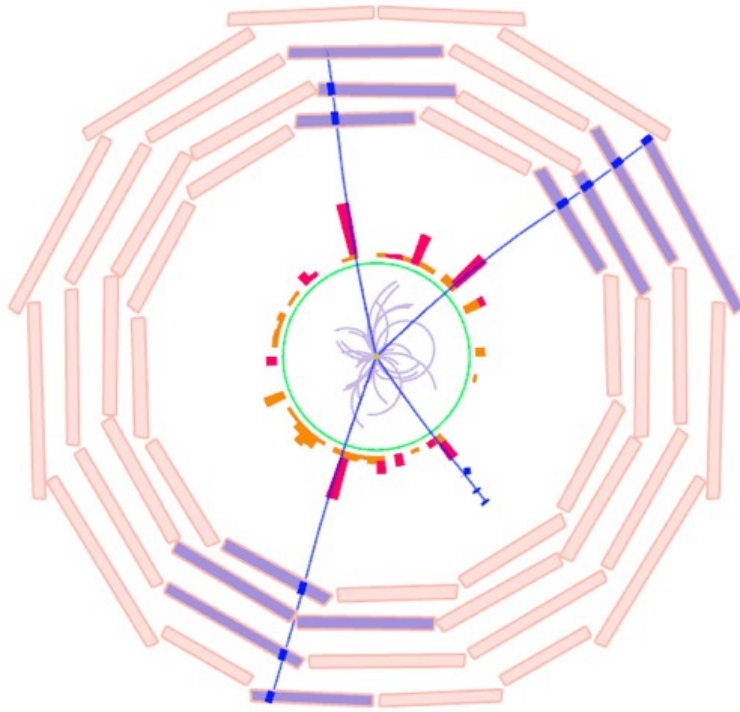
**Keresési stratégia** (két év alatti „biztos” megtalálásra)

- nagyon **gyors** detektorok
- „**trigger**”: minden 500 000-dik eseményt tartjuk meg



(Két esemény rögtön egymásután: fénysebességgel sem „ürül ki” a detektor!)

# Az első $ZZ \rightarrow 4 \mu$ on esemény, CMS (nem szimuláció!)



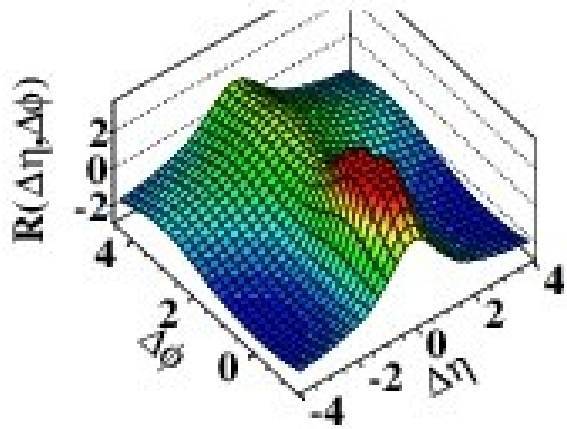
## Invariant Masses

$\mu_0 + \mu_1$ : 92.15 GeV (total( $Z$ )  $p_T$  26.5 GeV,  $\phi$  -3.03),  
 $\mu_2 + \mu_3$ : 92.24 GeV (total( $Z$ )  $p_T$  29.4 GeV,  $\phi$  +.06),  
 $\mu_0 + \mu_2$ : 70.12 GeV (total  $p_T$  27 GeV),  
 $\mu_3 + \mu_1$ : 83.1 GeV (total  $p_T$  26.1 GeV).

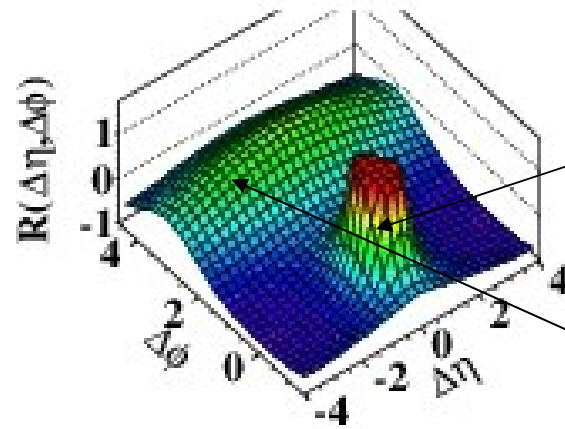
**Invariant Mass of  $4\mu$ : 201 GeV**

# Érdekes felismerés az erős kölcsönhatás természetéről (CMS)

(a) CMS MinBias,  $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$



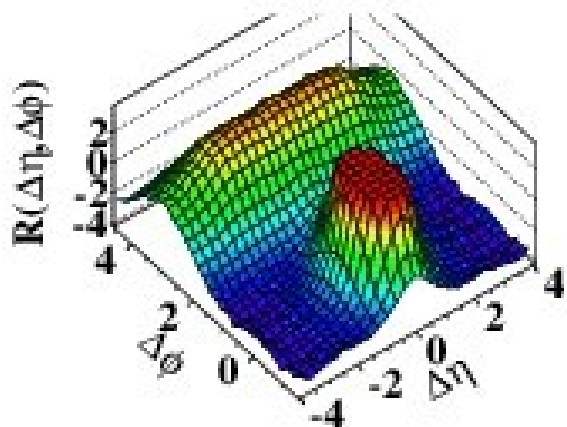
(b) CMS MinBias,  $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$



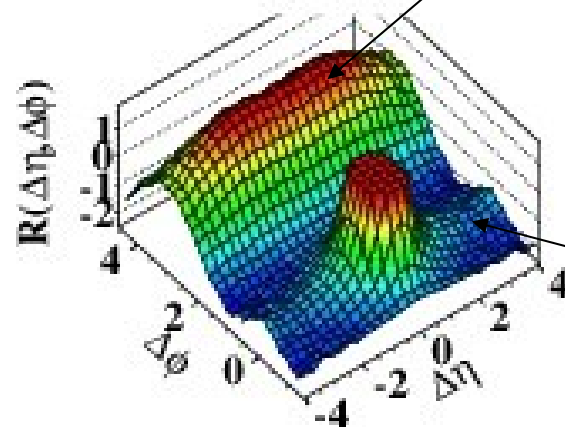
Jet (kvark)

ellenoldai Jet (kvark)

(c) CMS  $N \geq 110$ ,  $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$



(d) CMS  $N \geq 110$ ,  $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$

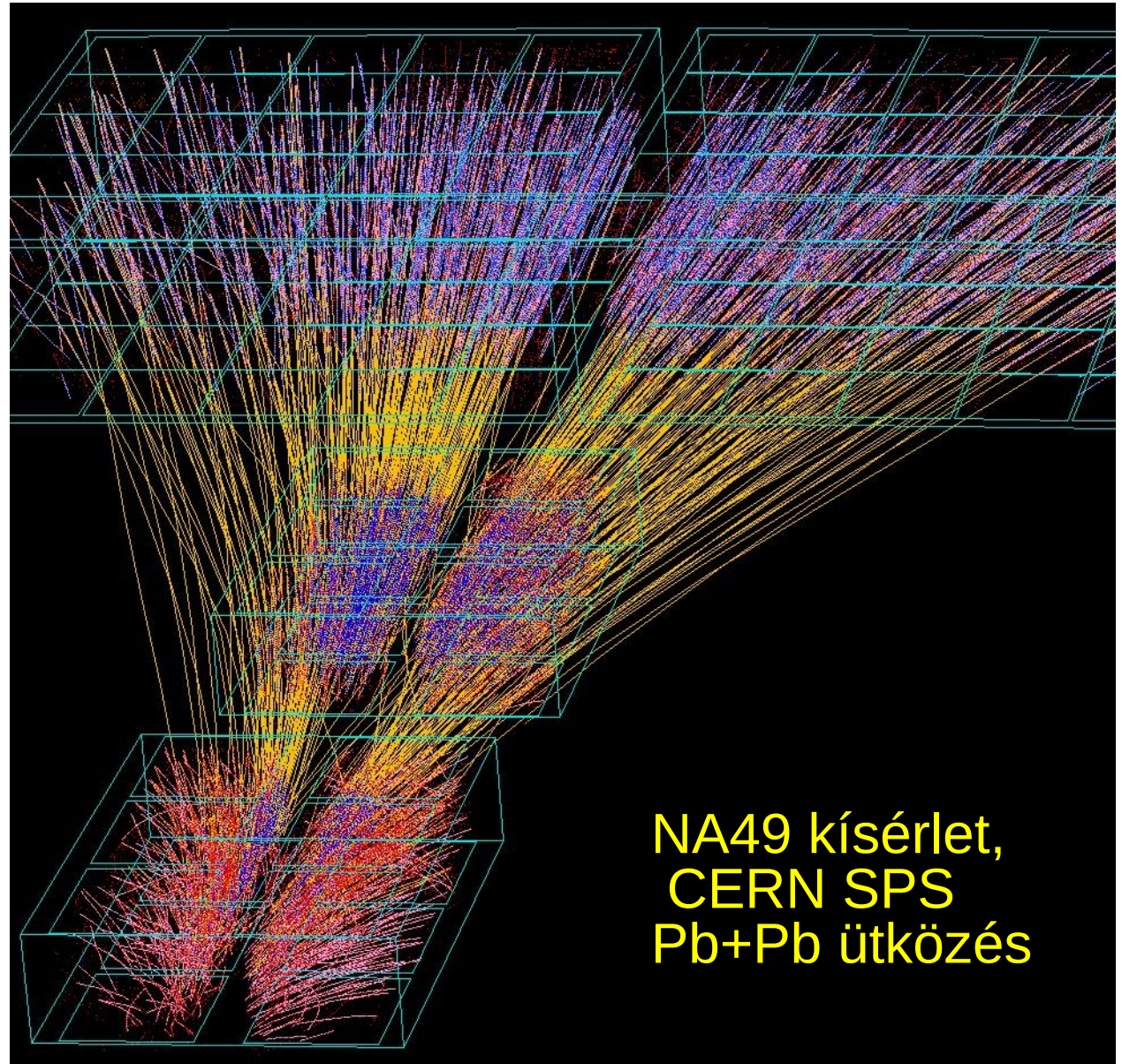
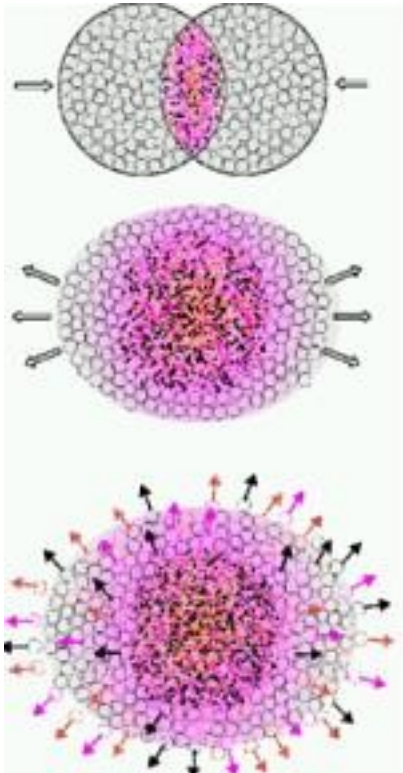


Sokrészecskés események:

„gerinc”

# Kvark-anyag a laboratóriumban

Szabad kvarkok nem léteznek: előállítható lehet a **plazma-állapot** (szabad kvarkok, gluonok gáza)



NA49 kísérlet,  
CERN SPS  
Pb+Pb ütközés



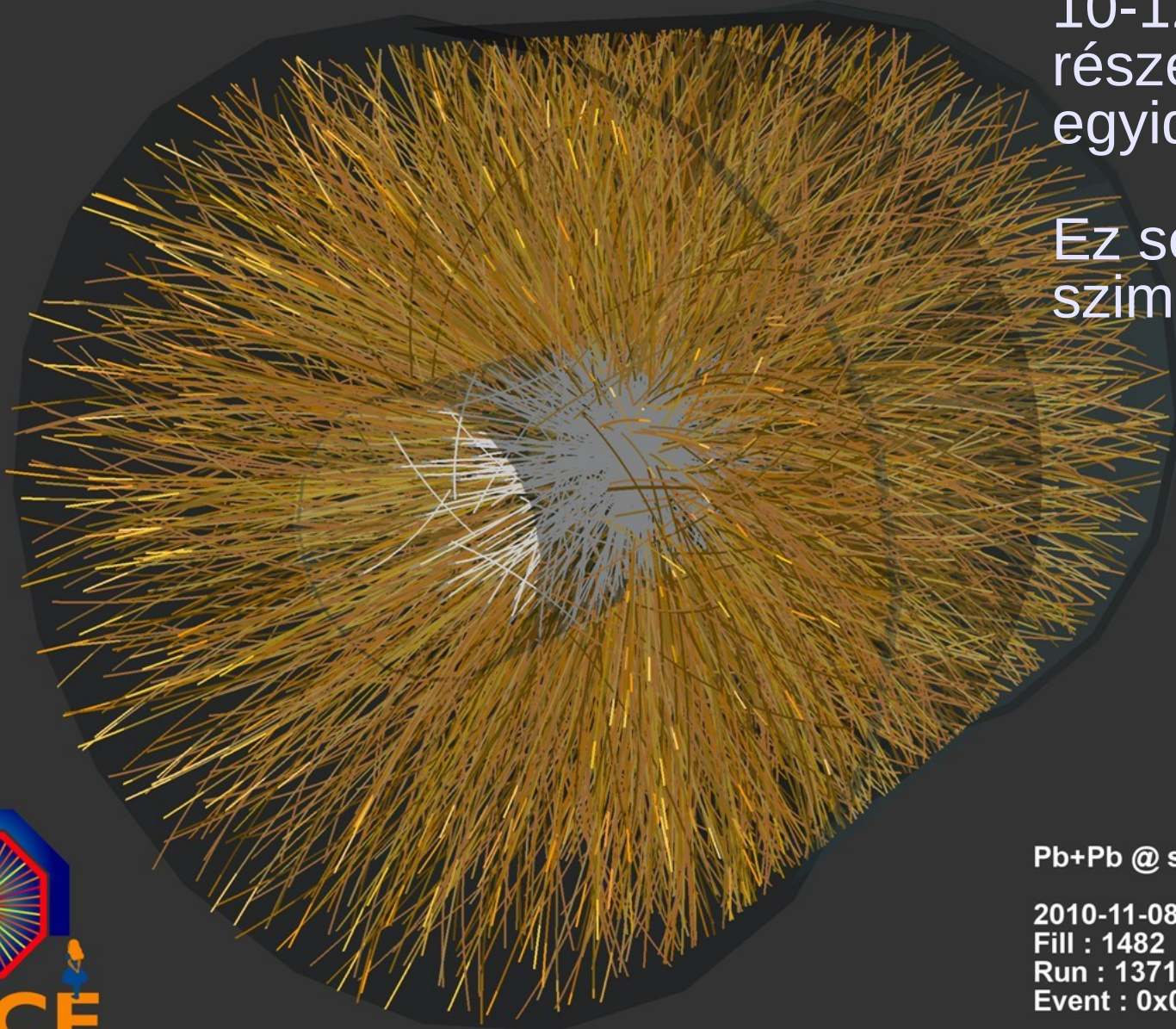
# LHC: Alice kísérlet



Pb+Pb kölcsönhatások minden eddiginél nagyobb energián

Egy esemény  
az ALICE-ban:  
10-12 ezer  
részecske  
egyidejűleg!

Ez sem  
szimuláció!



Pb+Pb @  $\sqrt{s} = 2.76$  ATeV

2010-11-08 11:29:52

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x000000042B1B693

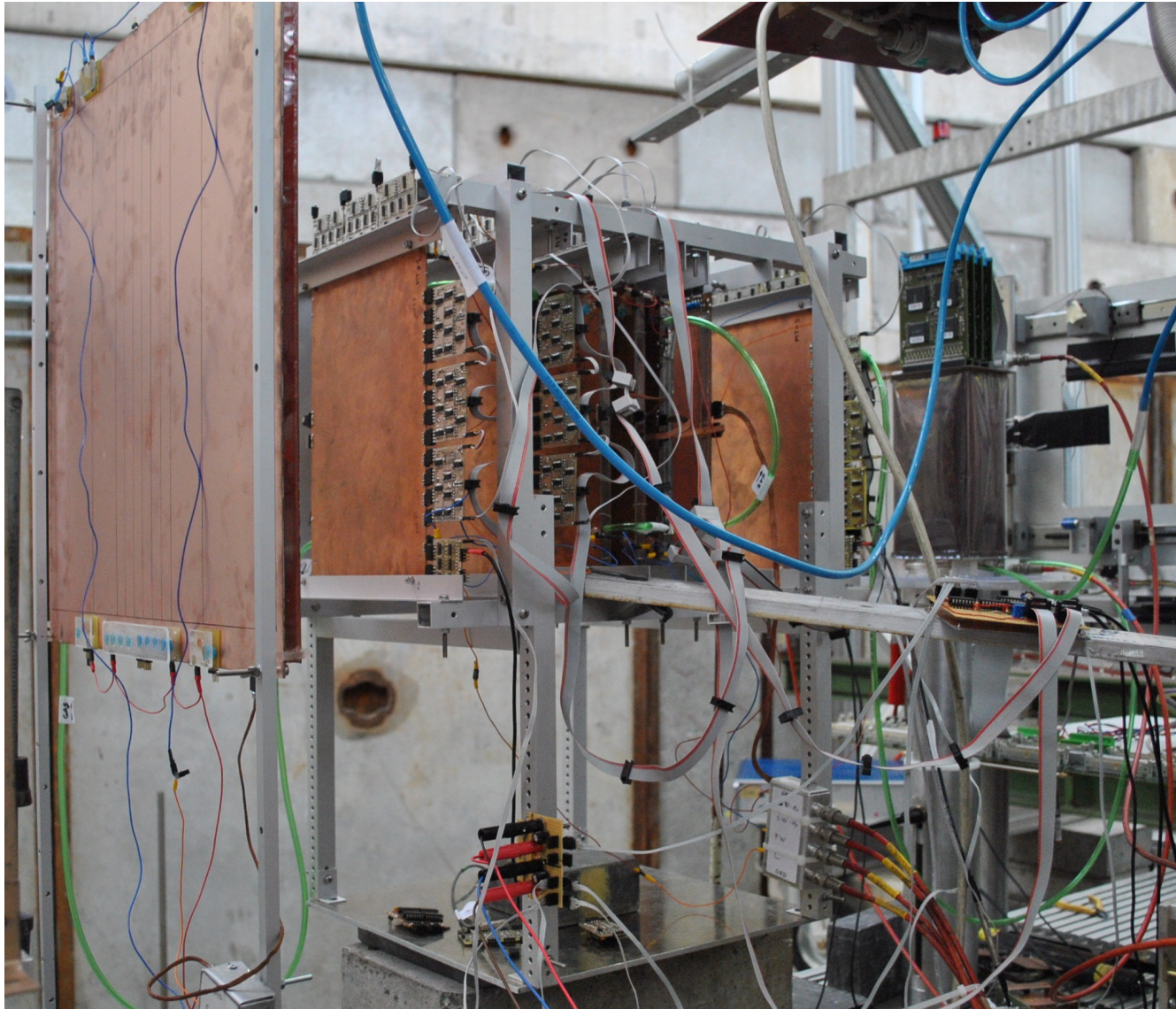
# Hol áll ma az LHC?

- A gyorsító kiválóan működik, de hosszú még az út a teljes intenzitásig: kb. 50-es faktor hiányzik
- Proton+proton kölcsönhatások: kb. 20-40-szer ekkora statisztikával a Higgs-részecske
- Az erős kölcsönhatás vizsgálata izgalmas lehetőségeket rejt már most is
- Az első Pb+Pb ütközésekben a forró, sűrű kvark-anyag vizsgálata elindult LHC energián

# ELTE hallgatók a CERN-ben (2009) ALICE HPŰD, NA61 TPC tesztmérés

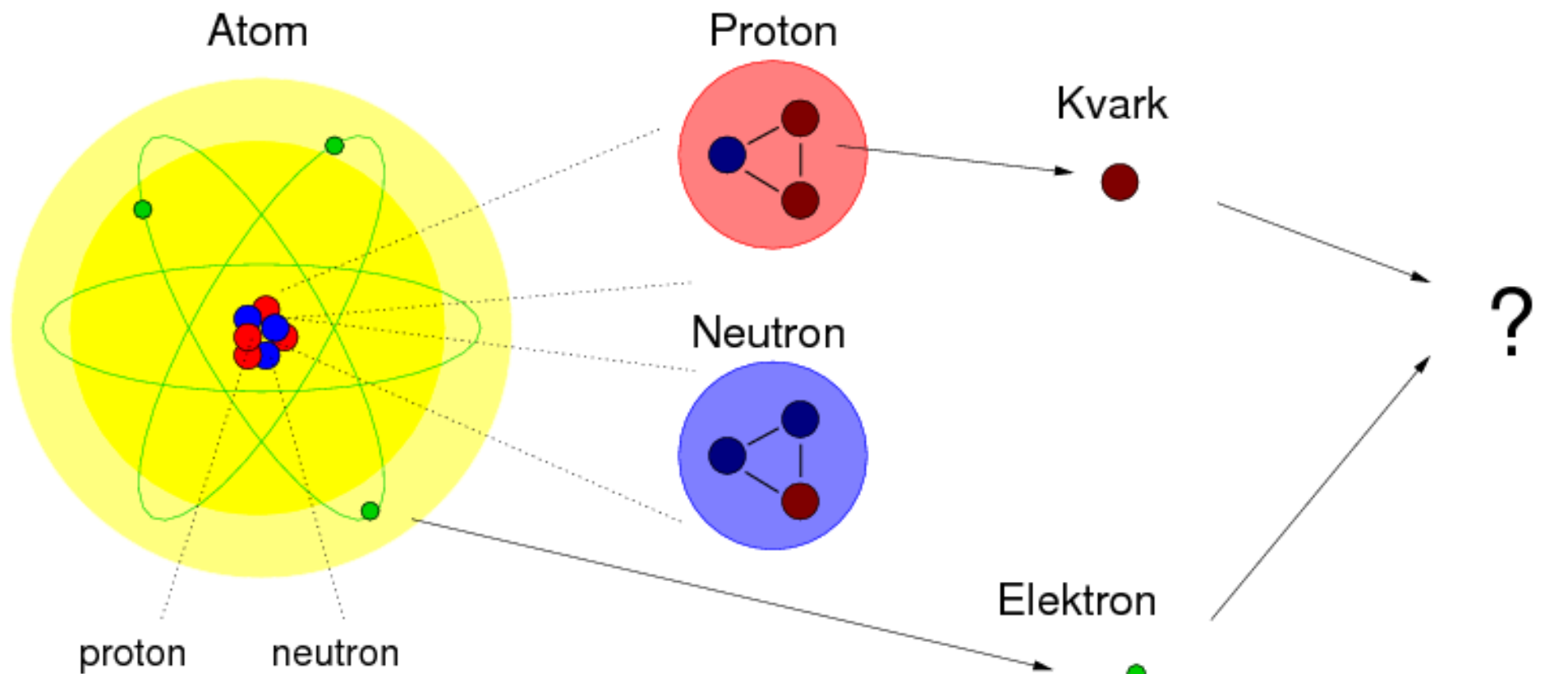


# Tesztmérési összeállítás, 2010 (ALICE VHMPID HPTD, NA61 TPC)



Ennek nagy  
része hallgatók  
közvetlen segít-  
ségével épült,

akik a mérésben  
részt is vettek!



1820

1910

1970

???

Kapcsolódó AtomCsill anyagok:

- Csanád Máté 2010 dec 16 (Kvarkanyag)
- Takács Gábor 2009 nov 12 (Casimir-effektus)
- Veres Gábor 2007 dec 20 (Részecskegyorsítók)